

令和 5 年度 防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

研究成果報告書
量子干渉効果による小型時計用
発振器の高安定化の基礎研究

令和 6 年 5 月

一般財団法人マイクロマシンセンター

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、一般財団法人マイクロマシンセンターが実施した令和5年度「量子干渉効果による小型時計用発振器の高安定化の基礎研究」の成果をとりまとめたものです。

目次

目次	i
1. 委託業務の目的	1
1. 1 研究課題の最終目標	1
1. 2 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題	1
1. 3 要素課題に対する実施項目及び体制	3
2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度	9
2. 1 エグゼクティブサマリー	9
2. 2 各実施項目における目標達成状況	14
3. 委託業務における研究の方法及び成果	20
① (実施項目(1)) 周波数シフトとその変動要因の評価	20
② (実施項目(2)) 耐振動特性をもつ水晶発振器の設計、試作及び特性評価 ...	67
③ (実施項目(3)) 量子部の試作及び評価	123
④ (実施項目(4)) プロトタイプモジュールの試作及び評価	156
⑤ (実施項目(5)) 周波数変動要因評価技術の開発	167
4. 委託業務全体の成果	209
4. 1 計画時に想定していなかった成果(副次的成果)や目標を超える成果 .	209
4. 2 研究課題の発展性(間接的成果を含む)	210
4. 3 研究成果の発表・発信に関する活動	211
5. プロジェクトの総合的推進	211
5. 1 研究実施体制とマネジメント	211
5. 2 経費の効率的執行	214
6. まとめ、今後の予定	215
7. 研究発表、知的財産権等の状況	217
(1) 研究発表等の状況	217
(2) 知的財産権等の状況	218
(3) その他特記事項	219

1. 委託業務の目的

1. 1 研究課題の最終目標

本課題では、自動車等の移動体及び第5、第6世代の移動通信基地局への搭載を想定し、市販されている測位衛星搭載レベル時計用発振器(発振器の周波数安定度の指標となるアラン標準偏差 σ_y (平均時間 τ)が、 $\sigma_y(\tau=1s)=1.2\times 10^{-11}$ 、 $\sigma_y(\tau=1day)=8\times 10^{-14}$ 、消費電力50W、質量30kg、体積30000cm³)の性能をほぼ維持したままの小型・低消費電力化した小型時計用発振器を実現する技術の確立を目指す。このため、小型時計用発振器の周波数変動要因を解明するとともに、下記の実現するための条件を解明し、当該目標を達成した高安定な小型時計用発振器(High Stability Ultra Low Power Atomic Clock(以下HS-ULPACと呼ぶ))のプロトタイプを試作して、その性能が目標を達成していることを評価・実証することを最終目標とする。

- ・1秒平均のアラン標準偏差 $\sigma_y(\tau=1s)$ が 2.0×10^{-11} 、1日平均のアラン標準偏差 $\sigma_y(\tau=1day)$ が 7×10^{-14}
- ・長期安定度として周波数ドリフトが $1.0\times 10^{-13}/day$
- ・消費電力300mW以下(量子部、水晶発振器、制御回路等すべて含め)
- ・体積50cm³以下

上記の性能が以下の環境下で実現できること(運転時の車内動作環境を想定)

- ・振動 加速度 3G(加速度の単位 1G=9.8 m/s²) (5~50Hz)
- ・温度 -10℃~70℃(衛星搭載レベル時計用発振器は0℃~50℃)
- ・磁場 0~最大 2×10^{-4} T(直流磁場及び50Hzと60Hz交流磁場)

非動作時に以下の環境でも壊れないこと(自動車の保管環境を想定)

- ・温度 -40℃~+85℃

1. 2 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題

HS-ULPACの最終目標である1秒平均のアラン標準偏差 $\sigma_y(\tau=1s)$ が 2.0×10^{-11} 、1日平均のアラン標準偏差 $\sigma_y(\tau=1day)$ が 7×10^{-14} 、ドリフト $1.0\times 10^{-13}/day$ を実現するためには上記周波数変動要因のすべての事項について克服すべき課題が存在する。具体的な要素課題は以下のとおりである。

(1) 周波数シフトとその変動要因の解明及びその制御技術の確立

周波数安定度を向上するためには各種シフト変動要因の解明が鍵であり、以下の4つの要素課題がある。

(1)-1 ライトシフト(ac Stark Shift)とその変動要因の解明及びその制御技術の確立

ライトシフトはレーザの光電場と原子の相互作用の結果、発生する周波数シフトである。小型時計用発振器においてはCPT共鳴を生成するためにCs原子に波長894nm付近で約9.2GHzの周波数差を持つ2波長レーザを照射する必要がある、VCSELの直接電流変調により発生するレーザ光が利用される。そのため、ライトシフトは照射レーザ光の強度、波長、変調指数等、非常に多くのパラメータに依存すると推定される。HS-ULPACにおける最終目標を実現するためには、ULPACで確認した周波数安定度及びドリフトレートを高精度化する必要がある。本研究課題ではバッファガスを含んだガスセルを用いて温度変動、磁場変動及び振動環境下においても、更なる周波数の高安定化を実現するためにライトシフトの変動要因の解明及び制御技術を確立する必要がある。

(1)-2 バッファガスシフト(hyper-fine pressure shift)とその変動要因の解明及び制御技術の確立

バッファガスシフトはガスセルに封入するアルカリ原子とバッファガス(緩衝気体)の衝突に起因する周波数シフトである。バッファガスとしては、原子と反応しない不活性ガス

である He、Ne、Ar、N₂、Xeなどが用いられるが、ガス種によりシフト量やその極性が異なることを利用して混合ガス化することで、温度依存性の低減が可能である。ULPACの開発ではガラス加工方式 ガスセルを用いて、バッファガスシフトに関連する変動要因を、一定温度、静止環境下で確認した。HS-ULPACにおける最終目標を実現するためには、さらにこれを低減する必要がある。本研究課題では温度変動、磁場変動及び振動環境下においても、さらなる周波数の高安定化を実現するために、バッファガスシフトの変動要因の解明及び制御技術を確立する必要がある。

(1)-3 ゼーマンシフト(Zeeman shift)とその変動要因の解明及びその制御技術の確立

ゼーマンシフトは外部磁場とアルカリ原子の磁気モーメントが相互作用することで発生する周波数シフトである。一般的に時計用発振器を構築する際には、外部磁場の直接的な影響を避けるために制御された磁場を印加し、磁気量子数 $m_F=0$ (F は核スピン角運動量 I と全角運動量 J の合成角運動量)の原子を選択的に利用する。HS-ULPACにおける最終目標を実現するためには、温度変動、磁場変動及び振動環境下におけるゼーマンシフトの変動要因の解明及びその制御技術を確立する必要がある。

(1)-4 各種シフトの相関メカニズムの解明

最終目標に到達するためには、ULPACで得た周波数安定度よりも高精度領域での各種シフトを解明するに留まらず、複合して周波数変動に影響を与える要素も考慮する必要がある。例えば、バッファガスシフトの温度特性を評価するために動作温度を変更すれば、VCSELの温度が変わるためレーザ光の状態が変化しライトシフト起因の周波数変動も同時に発生し、取得したデータの解析精度に影響を与える。この様な周波数変動は温度、外部磁場及び振動という比較的短い時間スケール(平均時間数日程度)での外部影響因子によるものと捉えることが可能である。一方で、外部影響因子が一定の場合でも発生する周波数変動がある。顕著なのがプロトタイプを構成するデバイスの経年変化(エージング)であることがULPAC開発で確認されている。時間スケールが前者と異なり平均時間が数週間以上で観測されるものであり、これらがさらに複合的に周波数変動に影響を及ぼし、世界的に小型時計用発振器の性能向上を困難なものにしていると推定される。そこで、ULPACより高精度領域において各種シフトの相関メカニズムを解明することが必要である。

(2) 水晶発振器の最適化技術の確立

最終目標を達成するためには振動下での周波数の揺らぎ(G-Sensitivity)と短期安定度(アラン標準偏差 σ_y ($\tau=1s$))を改善すると同時に消費電力を大きく削減する必要がある。G-Sensitivityは $1 \times 10^{-10}/G$ (0.1ppb/G)以下、 σ_y ($\tau=1s$)は 2.0×10^{-11} が設計目標値となる。ULPACでは、一定温度、地球静磁場及び静止環境で、 $\sigma_y(\tau=1s)$ が 8.0×10^{-11} の性能を温度補償水晶発振器(TCXO)で確認した。本研究の目標性能を達成するためには、恒温槽付水晶発振器(OCXO)レベルの性能が必要と考えるが、既存の技術で実現可能な性能は9x7mmのサイズで消費電力は300mW程度に留まる。本研究課題では、温度変動、磁場変動及び振動環境下においても、さらなる高性能化・小型化・低消費電力化を実現するための水晶発振器の最適化技術の確立が必要となる。

(3) 量子部の最適化技術の確立

量子部はレーザ光源であるVCSEL、アルカリ原子を封入した超小型ガスセル、光検出器等のキーパーツを集積化し、セラミックパッケージで真空封止された主要部品である。ULPACでは断熱特性に着目し、集積化されたキーパーツと周囲との熱伝導を可能な限り小さくする吊り下げ構造を採用することで、75°Cの動作温度を消費電力13mWで実現している。一方で、静止環境で利用する据置型の小型時計用発振器を想定していたため、耐振動特性は考慮していない。HS-ULPACの最終目標では移動体への搭載を想定しているため、耐振動性を向上させることが重要となる。そのためには集積化されたキーパーツの物理的な支持構造を補強することが考えられるが、結果として、断熱性を犠牲にするため、温度変動環境下で一定の動作温度を維持するための消費電力の増加が懸念される。本研究課題では、まず、

量子部に加わる振動や温度変動など環境変動要因が周波数安定度に及ぼす影響を明確にし、それを基にHS-ULPACに要求される低消費電力化と高耐振動化を実現する量子部構造の最適化技術を確立することが必要となる。

(4) プロトタイプモジュールの最適化技術の確立

プロトタイプモジュールは、前述の量子部を制御回路基板上に実装し、外部磁場変動の影響を低減するために、それらを直方体のシールドで覆ったデバイスである。制御回路基板上には量子部の他に、常に時計用の電気信号(10MHz時間標準信号)を出力する水晶発振器、VCSELの動作電流を変調するためのVCO(Voltage Control Oscillator)やPLL(Phase Locked Loop)回路、CPT共鳴信号の観測結果に基づく時分割制御のタイミングコントロールや演算を担うMPU(Micro-Processing Unit)等が実装される。ULPAC開発では、一定温度、地球静磁場環境及び静止環境で動作する約15cm³のプロトタイプジュールを試作した。HS-ULPACでは温度変動、磁場変動及び振動環境下においても動作するプロトタイプモジュールを試作する必要があるが、対応技術は未知である。そのため、これらの要件に対応するための最適化技術を確立する必要がある。

(5) 周波数変動要因評価技術の確立

最終目標に到達するためには、要素課題(1)で示した周波数変動要因の解明及び制御技術を確立する他に、これらをサポートするための様々な評価技術を確立することが重要であり、以下に示す2種類の評価技術確立が要素課題となる。

(5)-1 環境変動に対する周波数変動要因評価技術の確立

HS-ULPACの最終目標を達成するためには、プロトタイプモジュールが温度、磁場及び振動の環境変動中であってもその動作が確認され、特に、温度と磁場変動に対しては周波数安定度が劣化しないことが求められる。よって、これらの環境変動と周波数変動の相関を高精度に解明するために、その評価技術を確立する必要がある。

(5)-2 超高真空ガスセルを用いた高精度ライトシフト変動要因評価技術の確立

ULPACにおける主要な周波数シフト量はCsの固有周波数(9.192GHz)に対する相対周波数で表すと次のとおりである。

- ・バッファガスシフト: 7.5×10^{-6} (封入圧力: N₂(10.8kPa)、Ar(4.2kPa))
- ・ライトシフト: 6.2×10^{-8} (レーザ光強度: 2200μW/cm²)
- ・ゼーマンシフト: 1.1×10^{-9} (印加磁場: 14μT)

前述した要素課題(5)-1で示される評価法ではアルカリ原子とバッファガスを小型ガスセルに封入しているためバッファガスシフトはライトシフトよりも2桁以上大きい。そのため、ライトシフト変動量を検出する際には何らかの理由でバッファガスシフト変動も同時に検出してしまい、最終目標に到達できるような評価精度が得られない可能性もある。よって、バッファガスシフトが発生しない状態、すなわち超高真空に封止されたガスセル内で周辺環境から孤立した状態にあるアルカリ原子を生成し、高精度にライトシフトを評価する技術の確立が必要となる。

1.3 要素課題に対する実施項目及び体制

要素課題に取り組むために、一般財団法人マイクロマシンセンターではHS-ULPACの量子部の設計及び試作を実施する。国立研究開発法人産業技術総合研究所ではHS-ULPACの周波数変動要因を解明する。また、HS-ULPACのプロトタイプモジュール試作を実施し、その周波数安定度を評価する。日本電気株式会社では環境変動に対する周波数変動要因を高精度に評価する技術の確立に取り組む。株式会社大真空では高性能化・小型化・低消費電力化水晶発振器の設計及び試作を実施する。以下、個別の実施項目について記述する。

実施項目(1) 周波数シフトとその変動要因の評価

実施項目(1)-1 ライトシフト低減法の開発

要素課題(1)-1で示したライトシフトについてはULPACの周波数安定度を制限する主要因であると推定され、HS-ULPACにおいても、最も困難な課題の一つであると考えられ、以下の3手法に関する取り組みを進める。

実施項目(1)-1-① zero-cross 法の実証 (担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

zero-cross 法はVCSELの経年変化による変調指数変動が原因で発生するライトシフト変動をVCSELの動作電流を最適化することで最小化するものであり、ULPAC 開発で見いだされ、プロトタイプモジュールの長期安定度を飛躍的に改善する手法である。このzero-cross法を適用し、世界に先駆けて数値計算によりHS-ULPAC での有効性を検討するとともに実験的な評価を実施する。

最終目標：zero-cross法をHS-ULPACへ適用し、ライトシフトの変動によるアラン標準偏差と周波数ドリフトが最終目標値より小さいことを実証する。

実施項目(1)-1-② CPT-Ramsey 共鳴法の実証(担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

CPT-Ramsey共鳴法は原子に照射するレーザ光を時分割(光パルス化)することでライトシフト量自体を低減することが可能であり、その結果ライトシフト変動を低減し、周波数の高安定化に結び付く可能性がある。よって、CPT-Ramsey共鳴法によるライトシフト量低減効果を数値的、実験的に評価する。また、CPT-Ramsey共鳴法を実証するためには、光パルス作製のms以下で応答可能な消光比100%の高速の光学シャッターが必要であり、その光学シャッターの設計及び試作を実施する。

最終目標：プロトタイプモジュールに搭載可能な光学シャッターを試作し、実装する。また、プロトタイプモジュールにおいて、CPT-Ramsey共鳴法に基づいた基本動作が可能であることを実証し、周波数安定度を評価する。

実施項目(1)-1-③ プッシュプルポンピング法に適したライトシフト低減化VCSEL の試作及び評価 (担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

ライトシフト変動量を削減する手法の一つとしてプッシュプルポンピング法が提案されている。本手法ではレーザ偏光を高速(GHz)で変調することでCPT信号のSN比が大幅に向上し、周波数安定度が改善すると期待されている。そこで、レーザ偏光を高速(GHz)で変調可能なチップサイズ円偏光切り替え光源の実現へ向けて、スピントロニクス技術を導入することで、円偏光で直接発振するVCSELの試作及び評価を実施する。電流注入方式において高度なスピン制御技術を確立し、固定円偏光での室温レーザ発振を世界に先駆けて実証することを目指すとともに、円偏光切り替え手法を検討する。実用的な円偏光VCSELが実現できれば光磁気センサの光源応用など他分野への波及効果も極めて大きい。

最終目標：円偏光VCSEL構造を試作し、電流注入法による円偏光発振を確認する。

実施項目(1)-2 バッファガスシフト解明用種々ガスセルの試作及び評価

要素課題(1)-2で示したバッファガスシフトはガスセルを構成する素材の影響が大きい。Heに対するガス透過率は温度80°Cで、石英の場合 1.9×10^{-18} (m²/s/Pa)、ホウケイ酸ガラスの場合 5.7×10^{-19} (m²/s/Pa)、単結晶サファイアの場合 1×10^{-25} (m²/s/Pa)以下(アルミナセラミックスからの推定値)となっている。これらの素材依存性を考慮しつつ、バッファガスシフトによる周波数変動の影響を解明するために以下の3項目に取り組む。

実施項目(1)-2-① ガラス加工方式ガスセル(石英)の試作(担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

ガラス加工方式ガスセル(石英)は、高純度のアルカリ原子をガスセルへ封入することが可能である。そのため、MEMSプロセスでのアルカリ原子を導入する手法に対する基準データを取得するため、ガラス加工方式ガスセルを試作し、HS-ULPAC実験室モジュール及

びHS-ULPACプロトタイプモジュールへ搭載し、その性能評価を実施する。

最終目標：HS-ULPACプロトタイプモジュールにガラス加工方式ガスセル搭載し、バッファガスシフトによる周波数変動によるアラン標準偏差と周波数ドリフトが最終目標値より小さいことを実証する。

実施項目(1)-2-② MEMSガスセル(ホウケイ酸ガラス-Si接合)の試作(担当：一般財団法人マイクロマシンセンター)

ガスセルの製造効率化、信頼性向上に向け、MEMSデバイスの製造で培った微細加工技術を適用し、キャビティが形成されたSi基板の両面にホウケイ酸ガラスの窓材を封止接合する構成のMEMSガスセルを試作する。この試作を通してバッファガスシフトの要因となる構成素材のガス透過性、加工プロセスにおける不純物混入、接合部からの微小リークなどが周波数安定度に及ぼす影響を検証する。

最終目標：ガスセルにおけるバッファガスシフトの要因とその影響を解明し、MEMSガスセルの最適設計・製造技術を確立し、HS-ULPACプロトタイプの目標性能達成に寄与するMEMSガスセルの試作を完了する。

実施項目(1)-2-③ MEMS ガスセル(単結晶サファイア-Si接合)の試作(担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

ガスセル内部へのガス透過の影響を極小化することが期待できる単結晶サファイアを用いて、ガスセルを試作・評価する。窓材としてサファイアを、キャビティ材としてMEMS加工が可能なSiを候補として、ガスセルの製造プロセスを確立する。また、試作したガスセルの評価も実施し、MEMSプロセスにおける脱ガス、接合手法の違いも検証する。

最終目標：高温脱ガス処理した後に単結晶サファイアと穴あきSiをバッファガス雰囲気中で気密封止接合し、Si-サファイアガスセルを試作する。CPT共鳴スペクトルからバッファガスシフトを評価し、低ガス透過性ガスセルの実現を図る。

実施項目(1)-3 ゼーマンシフト低減用磁気シールドの設計及び試作(担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

要素課題(1)-3 に示すゼーマンシフトとその変動要因を解明するため、プロトタイプモジュールを試作するための磁気シールドの設計を行い、外部磁場変動の遮蔽効率(シールドイングファクター)の特性を評価し、その影響を低減する技術を確立する。

最終目標：磁場変動に起因するアラン標準偏差とドリフトが、最終目標値よりも小さいことを実証する。

実施項目(1)-4 各種シフトの相関メカニズムの評価

要素課題(1)-4に示す各種シフトの相関メカニズムを解明するために、短い時間スケール(平均時間数日)及び長い時間スケール(平均時間数週間以上)の観点から、以下の2項目を実施する。

実施項目(1)-4-① 周波数変動低減のための機械学習に基づく変動モデル構築(担当：日本電気株式会社)

短い時間スケールでのHS-ULPACの周波数変動要因解明のため、AI(Artificial Intelligence)技術を用いて周波数変動モデルを構築する。日本電気株式会社独自の時系列データ機械学習向けのAI技術をベースとして、様々な条件下で取得した評価データをAIに学習させることで、様々な環境パラメータ(温度、外部磁場、振動等)に対する周波数変動の法則性を見出す。この変動モデルを基にして、極限レベルでの周波数変動最小化を図るとともに、非連続な周波数変動の予知や高信頼化に資する技術も同時に確立する。

最終目標：周波数変動モデルを解明し、温度変動、磁場変動、振動環境下での周波数変動低減技術を確立する。

実施項目(1)-4-② VCSELとガスセルのエージング評価(担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)
長い時間スケールにおける各種シフトの相関メカニズムを解明するため、量子部を構成する重要部品である VCSEL とガスセルの加速試験等によるエージング評価を実施する。

最終目標：VCSELとガスセルのエージングによる周波数変動及び周波数ドリフトによる影響が最終目標値より小さいことを実証する。

実施項目(2) 耐振動特性をもつ水晶発振器の設計、試作及び特性評価(担当：株式会社大真空)

HS-ULPACの高安定化を目指す中で要素課題(2)に示す振動環境下での最適化技術(特に、小型・低消費電力化技術)を確立するため、ウェハレベルパッケージプロセス(WLP Process)を適用した小型低ノイズ水晶発振器の試作を実施する。WLP Processは水晶ウェハとフォトリソグラフィプロセスを併用するもので、小型であるにも関わらず耐振動特性に優れた水晶発振器を作製するのに有望な手法である。試作品はHS-ULPACプロトタイプモジュールに搭載し、周波数安定性の評価を実施する。

最終目標：7.0mm×5.0mmのサイズにおいて、プロトタイプの性能実現に寄与する1秒平均のアラン標準偏差 $\sigma_y(\tau=1s)$ が 2.0×10^{-11} 、G-Sensitivityが $1 \times 10^{-10}/G(0.1\text{ppb}/G)$ の性能を実証する。

実施項目(3) 量子部の試作及び評価

要素課題(3)に示す通り、環境変動要因が周波数安定度に及ぼす影響の明確化及びそれに基づく量子部の構造最適化が鍵となることから、以下の2つの実施項目に取り組む。

実施項目(3)-1 HS-ULPAC 実験室モデル量子部の試作(担当：一般財団法人マイクロマシンセンター)

環境変動下における量子部の構造最適化技術を確立するために、理想に近い量子部の条件で基準となるデータを取得・分析できる実験室モデルが必要である。そのため、CPT共鳴周波数の安定度に及ぼす温度変動、磁場変動、及び振動印加などの各環境変動要因を個別に評価できる実験室モデル用量子部の設計・試作を実施する。

最終目標：(1)-2-②で設計・試作したMEMSガスセルを組み込み、各環境変動要因の影響を個別に評価できる実験室モデル用量子部の試作を完了する。

実施項目(3)-2 HS-ULPAC プロトタイプ真空断熱型量子部の試作(担当：一般財団法人マイクロマシンセンター)

実験室モデルから得られた評価結果及び要素実験を通して構築した量子部の伝熱・構造連成解析モデルをベースに、耐振動性とトレードオフの関係にある低消費電力化を実現する真空断熱型量子部を設計・試作する。

最終目標：実施項目(1)-2-②で最適設計・試作したMEMSガスセルを組み込み、HS-ULPACプロトタイプの目標とする耐振性能(振動加速度：3G(5~50Hz))と低消費電力(消費電力：300mW以下)との両立を目指し、真空断熱型量子部の試作を完了する。

実施項目(4) プロトタイプモジュールの試作及び評価(担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

要素課題(4)に示すプロトタイプモジュールの最適化技術及び小型化技術の確立のため、制御回路基板をHS-ULPACプロトタイプモジュール用に設計・試作する。また、実施項目(2)と実施項目(3)で試作した水晶発振器と量子部を搭載したHS-ULPACプロトタイプモジュールを試作・評価する。また、実施項目(5)-1で確立された環境変動に対する評価技術を適用し、要素課題(1)に示した周波数変動要因の解明を目指す。

最終目標：プロトタイプモジュールを試作し、周波数変動によるアラン標準偏差及び周波数ドリフトが最終目標値以下であることを実証する。

実施項目(5) 周波数変動要因評価技術の開発

実施項目(5)-1 環境変動に対する周波数変動要因評価技術の開発

要素課題(5)-1に示す環境変動に対する周波数変動要因評価技術の確立のため以下の3項目

を実施する。

実施項目(5)-1-①-1 小型恒温槽の設計及び試作 (担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

体積1000cm³級の超安定恒温槽を設計し、恒温槽内の温度の安定性・均熱性を評価する。また、その超安定恒温槽内にHS-ULPACプロトタイプモジュールを設置し、周波数変動を評価する。

最終目標：体積1000cm³級の小型恒温槽において-10°C～70°Cの範囲で高精度に温度安定性を評価し、0.01°Cオーダーで温度を安定化する技術を確立する。

実施項目(5)-1-①-2 温度変動環境下での周波数変動要因評価技術の確立(担当：日本電気株式会社)

取得したデータを解析することで温度特性を明らかにし、要素課題(1)、(2)、(3)、(4)に示された現象の解明を目指すとともに、HS-ULPACプロトタイプモジュールを移動体に搭載した実証も行う。

最終目標：HS-ULPACを移動体に搭載し、温度変動下での周波数変動データの取得を完了するとともに取得したデータを解析し、温度特性を明らかにする。

実施項目(5)-1-②-1 振動環境下での周波数変動要因評価技術の確立 (担当：日本電気株式会社)

三軸振動試験装置を設計・試作し、その安定性を評価する。取得したデータを解析することで振動特性を明らかにし、要素課題(1)、(2)、(3)、(4)に示された現象の解明を目指すとともに、HS-ULPACプロトタイプモジュールを移動体に搭載した実証も行う。

最終目標：HS-ULPACを移動体に搭載し、振動環境下での周波数変動データの取得を完了するとともに取得したデータを解析し、振動特性を明らかにする。

実施項目(5)-1-②-2 振動環境下での周波数変動要因評価技術の確立 (担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

DUT(Device Under Test)の振動環境下での特性を正確に測定するためには、測定システムの校正測定能力を知ることが重要である。測定システムの校正測定能力を制限する主な要因は固定測定システムと振動試験装置の間に接続される同軸ケーブル等が原因であると推定される。振動環境下における周波数変動測定技術動向の調査を実施すると共に幾つかの測定システムを試作し、校正測定能力を算出する。

最終目標：同軸ケーブル等により付加される雑音が最終目標として設定しているアラン標準偏差よりも小さいことを確認する。

実施項目(5)-1-③-1 磁場環境下での周波数変動要因評価技術の確立 (担当：日本電気株式会社)

三軸磁場変動試験装置を設計・試作し、その安定性を評価する。取得したデータを解析することで外部磁場特性を明らかにし、要素課題(1)、(2)、(3)、(4)に示された現象の解明を目指すとともに、HS-ULPACプロトタイプモジュールを移動体に搭載した実証も行う。

最終目標：HS-ULPACを移動体に搭載し、磁場変動下での周波数変動データの取得を完了するとともに取得したデータを解析し、磁場特性を明らかにする。

実施項目(5)-1-③-2 磁場環境下での周波数変動要因評価技術の確立 (担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

DUT(Device Under Test)の磁場環境下での特性を正確に測定するためには、測定システムの測定能力を知ることが重要である。測定システムの校正測定能力を制限する要因として外部磁場の有無を比較する。もし影響があると判断された場合には、その対策技術を確立する。

最終目標：測定システムの校正測定能力が最終目標として設定しているアラン標準偏差よりも性能が良いことを確認する。

実施項目(5)-2 高精度ライトシフト変動要因評価技術の開発

要素課題(5)-2で示した超高真空ガスセルを用いた高精度ライトシフト変動要因評価技術の確立のため、超高真空に封止されたガスセル内で周辺環境から孤立した状態にあるアルカ

リ原子を生成することでバッファガスシフトの影響なしに、VCOと原子遷移の周波数差を読み出すレーザに起因するライトシフト量及びライトシフト変動に関する高精度データを収集する。そのため、以下の4項目を実施する。

実施項目(5)-2-① 孤立状態原子生成用のデバイスの設計、試作及び評価(担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

孤立状態にある原子を生成するためには超高真空ガスセル、外部共振器型半導体レーザ(ECDL)及び原子にレーザ光を最適に照射するための特殊グレーティングが必要となり、それらの設計、試作及びデバイス単体の性能評価を実施する。超高真空ガスセルの試作では、アルカリ原子以外の不要ガスを排除するためのMEMSプロセス技術の確立を目指す。

最終目標：孤立状態原子のための 10^{-6} Paの小型超高真空ガスセルを実現する。

ECDLの試作では、孤立状態にある原子遷移の情報を高精度に読み出すため、Cs原子の場合は波長894nm付近で約9.2GHzの周波数差を持つ2波長レーザの高安定化技術の確立を目指す。これは、VCSELの直接電流変調を用いた手法よりもライトシフトを精密に評価することが可能であるためである。

最終目標：広い環境温度において運転可能な小型ECDLを作製し、ライトシフト評価用の恒温槽内に実装する。

光MEMSの技術を用いたECDLの小型化・モジュール化の検討、試作では、実装技術の確立を目指す。

最終目標：波長852nm付近の外部共振器型半導体レーザ(ECDL)の基本特性を評価し、ライトシフト評価装置に組み込む。

特殊グレーティングの試作では、回折パターン、回折効率をガスセル形状に対して最適化するための技術の確立を目指す。

最終目標：加工工程を確立するとともに、グレーティングの試作・評価結果を設計にフィードバックし、最適化技術を確立するとともに、ライトシフト評価装置に組み込んで評価する。

実施項目(5)-2-② 超高真空ガスセル内における孤立状態原子生成装置の設計、試作及び評価(担当：日本電気株式会社)

実施項目(5)-2-①で試作されたデバイスを組み合わせ、孤立状態原子生成装置の設計・試作を行い、各デバイスの機能をすり合わせたうえでの評価を実施し、必要に応じてコンポーネントの試作にフィードバックする。これらにより孤立状態原子を安定に実現し、HS-ULPACプロトタイプモジュールにおいて主要な周波数変動要因の一つとなるバッファガスシフトの影響を排除する。

最終目標：環境温度依存性評価によって孤立状態原子におけるバッファガスシフトとライトシフトを定量的に評価・算出し、プロトタイプモジュールの性能実現に寄与する。

実施項目(5)-2-③-1 超高真空ガスセルを用いた高精度ライトシフト評価法の温度依存性取得技術の確立(担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

円筒型あるいは直方体型の体積 $100,000\text{cm}^3$ 級の超安定恒温槽を試作し、恒温槽内の温度の安定性・均熱性を評価する。

最終目標：体積 $100,000\text{cm}^3$ 級の大型恒温槽において $-40^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ の範囲で高精度に温度安定性を評価し、mKオーダーで温度を安定化する技術を確立する。

実施項目(5)-2-③-2 超高真空ガスセルを用いた高精度ライトシフト評価法の温度依存性取得技術の確立(担当：日本電気株式会社)

恒温槽内に孤立状態原子生成装置を設置し、温度依存性に関わる評価データを取得し、

バッファガスシフトの影響が排除されていることを確認する。

最終目標：上記装置を用いてライトシフトの温度依存性評価を行い、ライトシフト変動のモデル化に資する評価データの取得を完了する。

実施項目(5)-2-④ AIによるライトシフト変動評価及び低減化技術の確立(担当：日本電気株式会社)

実施項目(5)-2-③で収集された純粋なライトシフト変動起因の高精度特性データに、各種周波数変動要因解明のために実施項目(1)-4-①で構築したAI技術を適用し、ライトシフト変動モデル（環境パラメータに対する依存性）を解明することで、究極レベルでのライトシフト変動を低減するための技術の確立を目指す。

最終目標：ライトシフト変動モデルを構築・解明し、究極レベルでの周波数変動低減技術を確立する。

実施項目(6) プロジェクトの総合的推進(担当：一般財団法人マイクロマシンセンター)

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、2カ月に1回を基準とした定期的な研究会を実施し、各実施機関の進捗状況報告によりプロジェクト全体の進捗状況を確認する。研究会では、進捗結果を議論するとともに、状況に応じて研究代表者より指示を与え、研究全体の方向性を調整して、プロジェクトの推進に努める。特に、プロジェクト全体の進捗状況を確認しつつ計画の合理化を検討し、必要に応じて調査或いは外部有識者を招聘して意見を聞くなど、プロジェクトの推進に資する。本委託業務の実施により得られた成果について、国内外の学会等において積極的に発表し、本研究の更なる進展に努める。なお、研究成果の発表に当たっては、委託契約書の定めに従い、事前に発表内容等を通知する。

2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

本課題では、自動車等の移動体制御の高度化や、大容量次世代通信のための基地局間同期などへの適用を見据え、「CPT (Coherent Population Trapping)共鳴を活用した小型原子時計の極限的な性能追及」(実施項目(1)～実施項目(5)-1に対応)、「次世代の原子時計で必須となる磁気光学トラップ (Magneto-Optical Trap=MOT) 小型化のためのMEMSデバイス開発」(実施項目(5)-2に対応)、の2つを大きな柱として研究を進めてきた。本項ではエグゼクティブサマリーとして、まず全体成果とその意義、得られた課題と今後に向けた展望についてそれぞれ述べた上で、その後、実施項目ごとの達成度を記載する。

2. 1 エグゼクティブサマリー

(1) CPT共鳴を活用した小型原子時計の性能追求

まず、第1の柱である「CPT共鳴を活用した小型原子時計の性能追求」について、その当初目標／狙いと、本事業を通して得られた成果概要と意義、新たに判明した課題や今後の展望について述べる。

【当初目標】

長期間にわたって時刻ズレの少ない高安定性と移動体搭載に資する高い耐環境性を両立する小型原子時計を実現することを、当初より目標としてきた。この目標を達成すべく、以下の課題に取り組んできた。

- (a) 長期高安定を実現するための動作手法の実証
- (b) 原子時計の高安定化・小型化のためのガスセルの開発
- (c) 耐環境性を有する動作手法の実証
- (d) 耐環境性を有する量子部構造の開発
- (e) 短～中期安定度と耐環境性を実現する水晶発振器の開発

【成果概要と意義】

以下、上記それぞれの課題に対する成果の概要と、その成果の意義について述べる。

(a)長期安定度に支配的に寄与する周波数ドリフトの抑制(Zero-cross法の実証)

【成果】 長期安定度の律速要因となる周波数ドリフトについて、独自のZero-cross法を用いてこれを抑制する手法を開発・実証した。VCSELの駆動電流や温度等の動作パラメータを適切に設計することで、当初目標達成には至らなかったものの、従来の類似技術（Microchip社CSACなど。同製品の周波数ドリフト： $3.0 \times 10^{-11}/\text{day}$ ）に比べて約一桁小さな周波数ドリフト（ $2.3 \times 10^{-12}/\text{day}$ ）が実証されており、今後の更なる最適化により更なるドリフト低減も期待される。

【意義】 本成果を用いれば、例えばGNSS等の時刻基準信号を受けない海中等においても、一か月といった長期に渡って、数百 μs やそれ以下の精度での長期時刻保持（ホールドオーバー）を実施することが可能となる。

(b)高安定・小型ガスセルの開発

【成果】 ガスセルについては、①プロトタイプ搭載用に、温度変動によるバッファガスシフトの変化(温度係数)をゼロとするための混合ガスを用いた石英ガラス製ガスセルを開発した。また、②MEMS微細加工技術を適用し、ホウケイ酸ガラス-Si接合により多数のMEMSガスセルをウェハー括で製造する技術を確立した。さらに、③ガス透過率が極めて低いサファイア結晶を窓材、シリコンを壁材に用い、バッファガスとしてNeを封入したガスセルの開発に成功した。

【意義】 ①については、今後の種々の移動体搭載に向けて課題となる温度依存性を緩和する技術として、今後の活用が期待される。②については、将来的な小型原子時計の大規模量産化を見据えた高効率製造技術として、各種産業への適用へ可能性を拓く成果と言える。また③については、海中や宇宙といった超長期間での運用を考えた場合に、透過性が低いゆえにガスの抜け漏れが無く、単一種（Ne）のバッファガスで安定な温度特性が得られる可能性があるサファイア素材をガスセルに使用できることを初めて実証した成果として、今後の応用上大きな意義がある。

(c) 耐環境性向上のための外部不感（魔法磁場）型動作手法の実証

【成果】 通常サイズのガスセルを用いた光学定盤上の実験においてCPT共鳴の基本的特性を取得し、磁場揺らぎに対するCPT共鳴周波数のシフトがゼロに近くなる磁場不感遷移（魔法磁場）の存在を実証した。また、励起光波長、励起光強度、変調指数、バッファガス圧、偏光状態を変えてCPT共鳴スペクトルを測定するとともに、得られた結果に対してCPT共鳴に関連する全32準位を用いた数値シミュレーションを行って物理理論モデルを構築し、実験との一致を得た。

【意義】 本プロジェクトのアウトカムとして想定する移動体搭載応用においては、各種電子機器やモーターなどから発せられる環境磁場による小型原子時計の発振周波数の揺らぎが問題となるが、魔法磁場による動作手法を採用すれば、小型原子時計の移動体搭載時の耐環境性を大きく高める効果が期待される。また、今回構築した上記物理理論モデルを用いることで、小型原子時計の周波数シフトを低減出来るパラメータ条件を導出できることも明らかになり、同モデルの活用が今後のさらなる高安定化のための設計に寄与することが期待される。

(d) 耐環境型量子部構造の開発

【成果】 原子と光を相互作用させる「量子部」については、独自構造に基づき振動耐性を有し、多様なガスセルを搭載可能な実験室モデル量子部を開発するとともに、外部との熱を遮断可能な真空断熱型量子部の設計・製造技術を確立した。

【意義】 振動耐性を有する独自量子部構造は、今後高速移動体や、打ち上げ時の加速度耐性が求められる衛星搭載応用などに資する重要な成果と考える。また、小型原子時計としての機能実証には至らなかったものの、セラミックパッケージの真空断熱封止の基本技術が確立でき、今後の耐環境特性向上や消費電力低減に資する成果が得られた。

(e) 高安定水晶発振器の実証

【成果】 水晶発振器については、1 sの平均時間において極めて高い安定性(1.4×10^{-11} のアラン標準偏差)を有し、同時に耐振動性を有する世界最高レベルの水晶発振器を実現することに成功した。

【意義】 本技術と、高安定なCs周波数基準（量子部）の組み合わせにより、短期から中期（平均時間約1000 s以下まで）に渡って、小型原子時計としては最終目標に近い世界最高レベルの安定性（ $\sim 10^{-12}$ @1000 s平均）が得られた。この成果は、1000 sで数 nsしかずれない高精度な小型原子時計が世界で初めて実現でき

たことを意味している。これは、例えば地上-移動体間、ないしは移動体同士の通信可能な幾つかのユースケースにおいては、数分から数十分の周期で移動体群の同期処理を行うことで、全体としてnsオーダーの高精度同期を実現しうることを示唆する。

上記の構成要素を組み合わせることで、原子時計として動作するプロトタイプモジュールを構築し、実験室環境で温度・振動・磁場を変化させて環境耐性実験を行った。さらにプロトタイプモジュールを自動車に搭載して実証実験を行った。実験室環境で測定されたプロトタイプモジュールのアラン標準偏差と最終目標を図2.1に示す。

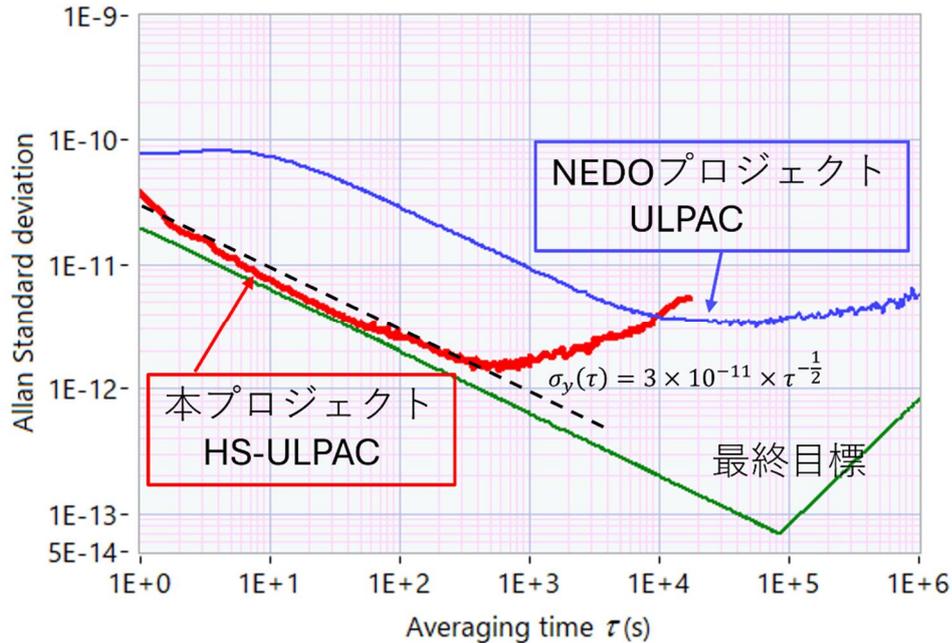


図2.1 HS-ULPAC試作を通じて確認した周波数安定度(赤線)。比較のため、NEDOプロジェクトULPAC(青線)、最終目標(緑線)を共に示す。

【課題と展望】

「CPT共鳴を活用した小型原子時計の性能追求」において、達成できなかった／新たに得られた課題と、その分析に基づく対処方針について、以下に示す。

・中期安定性

平均時間 τ が約400 s以下の領域で最終目標に近いアラン標準偏差 $\sigma_y(\tau)=3 \times 10^{-11} \times \tau^{1/2}$ を達成した一方、 τ が1000 sから10000 sの範囲の平均時間におけるアラン標準偏差は、最終目標に届かない値となった。この中期安定性の悪化要因は、主に温度変動によるものと考えられる。上記(b)の成果として温度変動に耐性のある混合ガスセルの実現に至ったが、ガスセル近傍の温度分布が完全に一様ではないことに起因し、ガスセルの一部が温度係数ゼロとなる設定温度からずれるために、わずかな温度変動に伴うバッファガスシフトの周波数変動が生じたものと考えられる（ガスセルがゼロ温度係数の温度からずれると、外部の温度変動に対する感度が増大する）。

改善策としては、ヒータ配置を最適化してガスセル内の温度分布を一様にする、バッファガスとして単一原子のNeを利用した熱伝導率の良いサファイア-Siセルを用いること、さらに真空断熱量子部構造を採用することで外部の熱変動の影響を遮断することの、3点が考えられる。

さらに、上述した(c)の成果として得られた32準位数値シミュレーションに基づく物理理論モデルについても、今後中期安定度を大きく改善できる潜在性を有している。短期安定度には発振器の安定性、長期安定度にはライトシフトに起因する周波数ドリフトが、それぞれ時計精度に支配的に寄与するのに対して、中期安定度については多種多様な要因（光源やガスセル、動作条件といった安定度を劣化させる種々のパラメータ）が互いに複雑に相関しながら影響を及ぼし、その改善対策を立てることを困難としている。今回構築に成功した物理理論モデルや機械学習モデルを活用することで、これまで困難だった中期安定度

向上のための対策／改善指針を導き出すことができると期待される。

・長期安定性

上述した(a)のZero-cross法に係る成果により、長期安定度に支配的に寄与する周波数ドリフトの抑制を原理実証したものの、1日平均の長期安定度については、最終目標に対して未達となった。VCSELの温度を変化させて周波数ドリフトを評価した実験データを分析した結果、最終的に残ったドリフト（大きさ 2.3×10^{-12} /day）は、Zero-cross状態となる温度（ゼロドリフト温度）からのわずかな偏差によるものであることが分かった。

改善策として、ヒータの配置や温調構造を最適化することによって、VCSELの温度制御性を高める方策が挙げられる。上記分析によれば、ゼロドリフト温度から6 mK以内に設定することができれば、最終目標の長期安定度を達成できると考えられる。加えて、今後MEMSシャッター等を利用したCPTラムゼー共鳴法（連続光ではなくパルス光によって原子周波数基準を読み取る手法）を用いることで、ライトシフトの絶対値自体を低減する手法も有効と考えられる。

・耐環境特性

環境（温度・振動・磁場）特性評価や車載実験データを分析した結果、温度変化に起因して発振周波数が変動する課題が明らかになった。対策としては前述した中期安定性での改善策でも述べた通り、ヒータ配置や温調構造の最適化、真空断熱量子部構造の採用などが挙げられる。

温度以外の環境要因としては、プロトタイプの前直方向（レーザの光軸方向）の磁場が、アラン偏差を劣化させる要因であることが判明した。これについては、量子部の磁気シールドに開けられたレーザ光導入穴や、磁気シールド材同士の継ぎ合わせ構造部分の隙間などにおいて、ガスセル周辺に外部磁場が侵入することが要因であることが、シミュレーションによる分析の結果明らかになった。対策として、磁場が侵入しうる隙間部分を縮減するとともに、磁場侵入を最小化するようにシミュレーションに基づき設計した磁気シールドをもう一層追加することで、この問題を解決できると考えている。

・装置サイズ・消費電力

プロトタイプにおいては、筐体サイズとして 300 cm^3 を達成した。このうち構成要素のサイズとして、量子部が 15.5 cm^3 、水晶発振器が 0.73 cm^3 と、制御回路基板(量子部、水晶発振器含む)が 30 cm^3 となっている。制御回路基板をさらに小型化するとともに、構成要素の配置を最適化して高密度実装すれば、筐体としても 50 cm^3 以下のサイズに収めることは可能であると考えている。

消費電力については、評価ボードを含めたプロトタイプ全体として約4.0 Wを達成した。このうち構成要素の電力として、量子部が約2.0 W、水晶発振器が約50 mW、制御回路が約2.0 Wとなっている。前述した中期安定性及び耐環境特性の改善策としても述べた通り、真空断熱型量子部を採用すれば、ヒータの加熱効率が大幅に高まることから量子部は100 mW程度まで消費電力を下げる事が可能と見積もっている。また制御回路についてもASICを利用することによって100 mW以下が達成可能と考えられ、トータルの消費電力は300 mW以下を実現することは十分可能であると考えている。

(2) MOT用デバイスの小型化

次に、第2の柱である「MOT用デバイスの小型化」について、その当初目標／狙いと、本事業を通して得られた成果概要と意義、今後の展望について述べる。

【当初目標】

本事業での主たるターゲットは、移動体や小型基地局等に分散配備可能な小型原子時計（上述した第1の柱）であるが、次世代GNSSや宇宙通信応用等を見据え、従来原子時計と比較してより高精度な「光時計」の開発も世界的に活発に進められている。ただ、これらのサイズは非常に大きなものであり、装置のモジュール化も難しいことから、社会実装に向けた具体的な道筋が見えていなかった。例えば、原子と光を相互作用させる部分である「量子部」については小型化研究が進む傍らで、レーザや真空ポンプ等の周辺機器はテーブルトップの装置が用いられている。

本プロジェクトでは、小型原子時計プロトタイプの評価用システムとして機能すると同時に、上記次世

代光時計等の実現に資する各種MEMSデバイスの研究開発も目標として掲げ、研究開発を進めてきた。具体的には、MOT装置小型化のための、

- (f) 周波数読み取りおよび原子冷却のための外部共振器レーザ
- (g) 原子捕獲及び周波数読み取り(CPT-Ramsey)のためのMEMSシャッター
- (h) 小型回折格子・メタレンズ等を用いた原子捕獲・冷却装置
- (i) 全体システム小型化のためのMEMS真空ポンプ

といった要素技術の開発を行った。これらを全て組み合わせることで、周辺機器を含めた原子冷却システム全体の小型・モジュール化が可能となり、様々な具体的ユースケースに適用可能な実応用へ初めて端緒を開くことができる。

【成果概要】

本プロジェクトにおいて得られたMOT用デバイスの小型化に関する成果について、図2.2にその概要図を示すとともに、以下成果の概要について述べる。

(f) 周波数読み取りおよび原子冷却のための外部共振器半導体レーザの開発

原子冷却／状態読み取りのためのレーザ光源を小型化するため、光集積回路技術による外部共振器と半導体光増幅器を組み合わせた光源を実現し、その基本機能を実証した。

(g) 原子捕獲及び周波数読み取り(CPT-Ramsey)のためのMEMSシャッターの開発

パルス化された入射光を用いるCPT - Ramsey方式や、冷却原子状態を生成・制御するための光変調技術の小型化のため、超小型サイズ（幅2mm、奥行き1mm以下）のMEMSシャッターを開発した。

(h) 小型回折格子・メタレンズ等を用いた原子捕獲・冷却装置の開発

回折格子やメタレンズ等の光波制御デバイスを構成要素とする小型MOT装置を開発し、原子を捕獲するシステムの機能実証に成功した。

(i) 全体システム小型化のためのMEMS真空ポンプの開発

MEMS構造を利用したイオンポンプ技術の研究開発を行い、 10^{-6} Paまでの真空度を達成可能な排気機能を実証した。また、同技術に基づく小型超高真空セルの開発に成功した。

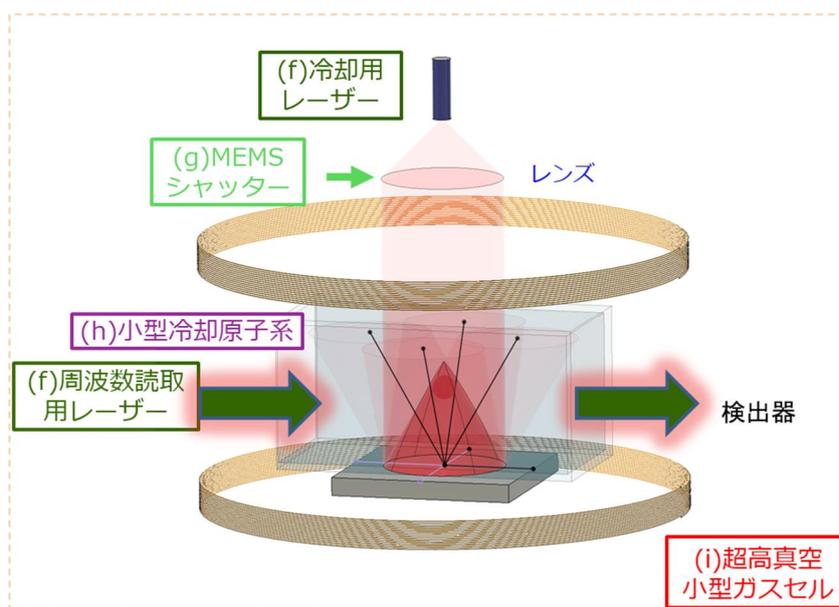


図2.2 高度な光時計や各種量子センシング応用に適用可能な小型MOTシステムの概念図

【成果の意義】

本プロジェクトにおいて実現した小型MOTのための原子捕獲／冷却システム、及びそれを構成する要素技術は、テーブルトップ型からチップベース中性原子量子システムへ移行するための独創的基盤技術となる。このようなシステムは、提案当初に想定していた小型原子時計の評価用システムとしての用途に加えて、「①次世代光時計」や「②高精度量子センサ」、「③冷却原子量子コンピュータ」といった、様々な産業分野に革新をもたらすコア技術としても、大いに期待される。

① 例えば既存のGNSS測位衛星に搭載されている従来原子時計を高精度光時計に置き換えることで、地上における測位精度や時刻同期精度を劇的に向上させる技術に繋がる可能性がある。また、ここ数年進展の著しい小型衛星コンステレーションに小型高精度クロックを搭載するニーズやユースケースシナリオも今後現実味を帯びる。

② クロック応用の枠組みに留まらず、今後の量子重力センサや量子ジャイロといった、冷却原子系を用いる各種量子センシングの基盤プラットフォームとしての礎になると考えている。例えばこれまで実験室レベルで研究開発されてきた量子センサは、磁気センサなどの一部の技術を除いては、光学定盤上での機能実証に留まっている状況にある。本事業で実証された成果を用いることで、様々な量子センサの小型化・モジュール化が可能となり、超高感度計測システムの社会実装に大きな貢献をもたらすことが期待される。

③ さらに、昨今注目を集める中性冷却原子に基づく量子コンピュータについての貢献についても期待される。中性原子の捕獲・冷却・制御技術は、小型原子時計や量子センシングに留まらず、幅広い量子技術の革新に大きく寄与することが予想されており、分野横断型のオープンイノベーションが今後ますます進展する中で、本事業で実証された要素技術が大いに活用されると考えられる。

2. 2 各実施項目における目標達成状況

各要素課題に対する実施項目の目標達成状況は下記の通りである。達成度は、◎：目標以上、○：達成、△：一部未達、として示す。未達の場合、課題と解決の見通し等についても合わせて記載した。

実施項目(1)-1-① zero-cross 法の実証

目標達成状況：NEDO-ULPACとは異なるVCSELにおいて、ドリフトのゼロ点が存在することを確認し、ゼロクロス理論の妥当性を実証した。ドリフトのゼロ点近傍で長期(約30日間)の観測を行った結果、 $-2.3 \times 10^{-12}/\text{day}$ の値を得た。HS-ULPACへの適用を行ったが、アラン標準偏差と周波数ドリフトは最終目標よりも一桁大きかった。ドリフトの温度依存性は $-1.6 \times 10^{-11}/\text{day}^\circ\text{C}$ と測定されたことから、長期の測定によりドリフトがゼロになる温度をより高精度に決定し、そのゼロ点に対して6mK以内に制御すれば、ライトシフトの変動によるアラン標準偏差と周波数ドリフトを最終目標値より小さくすることは可能と考えられる。

達成度：△

実施項目(1)-1-② CPT-Ramsey共鳴法の実証

目標達成状況：励起光をパルス化するCPT-Ramsey方式で、信号の狭窄化・ライトシフト低減を数値的・実験的に実証した。狭窄な信号による短期安定度改善、及びライトシフト低減による長期安定度改善(周波数ドリフト低減を含む)に寄与しうることを確認した。レーザ光をパルス化するMEMSシャッターについては、プロトタイプモジュールに搭載可能な幅2mm、奥行き1mm以下のサイズで設計を行い、1次、2次試作を経て共振周波数2kHz以上でのシャッター動作を実証した。最終目標とした「レーザ光をパルス化するMEMSシャッターのプロトタイプへの実装」は未達となった。アンカーの搭載や印加電圧波形にpre-emphasisを掛けるなどの対策をすることによって駆動速度の改善、また、遮光部に金属などにより完全に遮光する機構を付与することで消光比の改善が見込まれる。

達成度：△

実施項目(1)-1-③ プッシュプルポンピング法に適したライトシフト低減化VCSELの試作及び評価

目標達成状況：電子スピン制御手法による円偏光出力VCSELの要素技術を開発し、以下の成果を得た。①GaAs(110)面上に電子スピンを揃えて注入できる垂直磁化膜を開発した。②スピン情報を長時間保持できるスピン輸送層を開発した。③高品質な活性層を開発した。④活性層のスピン偏極の極性を反転させる方法を考案した。一方、VCSEL構造を試作したものの、共鳴波長と活性層波長のズレによりレーザ発振には至らなかった。共鳴波長と活性層波長のずれによりレーザ発振には至っていないが、構造を見直して再試作を行うことで、レーザ発振を実現できる見込みである。

達成度：△

実施項目(1)-2-① ガラス加工方式ガスセル(石英)の試作

目標達成状況：プロトタイプ実験室モデル用、及び真空断熱型量子部に搭載し、種々の基準データ取得(周波数安定度、周波数変動観測実験、車載実験等)に活用した。一方、それらのサンプルにおいて、最終的にアラン標準偏差と周波数ドリフトは、最終目標値に対しては未達であった。未達の理由はガスセル単独の温度に依存した周波数変動の特性評価に至らず、ライトシフトとの切り分けができなかったためである。理想的な対応策は、状況に対応したパラメータ(封入ガス圧やガス混合比)でサンプルを試作し、単独の温度特性評価に基づいてプロトタイプへ実装しパラメータの比較実験をおこない最適化を実施することである。一方で、このような対応策はパラメータの精度を考慮すると現実的ではないと考えられる。故に、HS-ULPACプロトタイプモジュールに利用するガスセルは、混合比の考慮が不要な単一ガスであるNeを使ったサファイアガスセルを適用し、周波数安定度を改善する方策を採ることで最終目標値到達を見込む。

達成度：△

実施項目(1)-2-② MEMS ガスセル(ホウケイ酸ガラス-Si 接合)の試作

目標達成状況：ガスセルの製造効率化、信頼性向上に向け、MEMS微細加工技術を適用し、多数のガスセルをウエハー括で製造する技術を開発した。まず、Csディスペンサーを用いる従来手法をベースに流路に改良を加えた新構造(Type2)にてMEMSガスセルを設計・製造し、それらを組込んだ量子部にてCs吸収線の計測を行い、ガスセルとして機能することを実証した。更なる小型化及び量産性の向上を目指し新たに提案した独自方式(Type1)では、予め作製したMEMSガスセル容器を真空チャンバー内に設置し、Cs蒸気とバッファガスをMEMSガスセル内に導入・封止する手法を開発した。Csに浸食されにくい封止材(低融点ガラス)にて気密性の高い封止を可能としたが、ガスセル内への必要量のCs導入が実現できず、本方式(Type1)によるMEMSガスセルの製造技術の確立には至らなかった。

以上の結果から、目標である「HS-ULPACプロトタイプの目標性能達成に寄与するMEMSガスセル(ホウケイ酸ガラス-Si接合)の試作」に対し、Type2構造では達成したと考える。一方、Type1では性能未達となったが、開発を通して封止手法は確立、残課題のCs導入手法については、Cs原子の流れに指向性を付与するなど解決策を提示することができたため、達成度としては一部未達と判断する。

達成度：△

実施項目(1)-2-③ MEMS ガスセル(単結晶サファイア-Si 接合)の試作

目標達成状況：Si-サファイアガスセル製造技術を確立した。世界で初めて、サファイア-Siと、バッファガスとしてNeを使ったガスセルを実現し、これをHS-ULPACプロトタイプに実装して、低ドリフトを確認した。最終目標を達成し、さらに、セルをプロトタイプモジュールに搭載して車載実験も行った。

達成度：◎

実施項目(1)-3 ゼーマンシフト低減用磁気シールドの設計及び試作

目標達成状況：Cs原子の磁場敏感遷移を用いた磁場の評価、及びプロトタイプ内の磁場変動による周波数変動成分の推定に成功した。実験室環境ならば、平均時間 $\tau=10000$ s付近までは磁場変動は最終目標値に影響しないことを確認した。シミュレーションの結果、磁気シールドに開けられた穴とシールド同士のはめ合わせ部分からの磁場の漏洩を改善することで、平均時間10000 s以上における最終目標も達成可能であると考えられる。

達成度：△

実施項目(1)-4-① 周波数変動低減のための機械学習に基づく変動モデル構築

目標達成状況：小型原子時計における、多様な要因が複雑に相関して生じる周波数変動モデルに関する研究開発を実施した。様々な動作条件における実験データを取得すべく、小型原子時計の機能を模した光学定盤モデルの構築を行い、これを用いて磁場変動に対して周波数変動を低減しうる技術を確立した。また、各種環境変動を与えた場合のプロトタイプの周波数変動を、機械学習モデルにより分

析し、特に周波数変動が顕著であった温度変動環境下では、温度変化に起因する周波数シフトを正確に予測するモデルを構築することができた。車載実験環境下でも、同傾向の結果が得られており、機械学習の予測値に基づく補正を行うことで、周波数変動を低減できる可能性が示された。一方、最終的にプロトタイプへの本動作手法適用に至らなかった点が未達成事項として挙げられる。本手法の適用については各種パラメータの最適化に一定期間を要するが、今後、偏光・印加磁場を調整することで、外部磁場に対して安定なプロトタイプを実現することが可能と考えている。

達成度：△

実施項目(1)-4-② VCSELとガスセルのエージング評価

目標達成状況：100 μg以下の質量分解能を持つセシウム用の示差走査熱量測定装置を試作した。加熱試験を行い、ガスセル内のセシウムが消失する温度条件の範囲を定めることに成功した。一方で、ガスセルとVCSELのエージングによる周波数変動及び周波数ドリフトの影響の見極めは未達である。エグゼクティブサマリーで記載されている通り、VCSEL駆動電流と温度に依存してライトシフトやバッファガスシフトが変動することが現時点でのHS-ULPACプロトタイプの周波数安定度を制限している。その意味においては、ガスセルエージングよりもVCSELエージングの影響が大きいと考えられる。今後の対応策は本実施項目にて試作した面発光レーザー(VCSEL)RF変調特性測定システムにて広範囲の温度動作条件にてエージングデータを取得・把握し、HS-ULPACプロトタイプの動作条件の最適化を図ることである。これによりライトシフト変動軽減が可能となり、プロトタイプの周波数安定度改善が見込まれる。

達成度：△

実施項目(2) 耐振動特性をもつ水晶発振器の設計、試作及び特性評価

目標達成状況：11 mm×9 mmサイズTCXOにおいて、アラン標準偏差： 2.0×10^{-11} 、G-Sensitivity：0.1ppb/G、消費電力18 mWを達成した。7 mm×5 mmという最終目標の製品サイズは達成できなかったが、同等の電気的仕様を持つOCXOに比べ、当11 mm×9 mmサイズのTCXOは、従来の技術では達成できなかった18 mWという低消費電力かつ、アラン標準偏差、G-Sensitivity特性といった複数の優れた特性を実現した世界最高水準の製品である。水晶デバイス業界においてこれらの性能をTCXOで実現できたことは大きな成果である。7mm×5mmというサイズを実現するためには、11×9 mmサイズTCXOで使用した回路構成における各部品の高密度実装、回路規模の縮小、IC化による実装面積を縮小等が有効と考えられる。目標達成度について、最終目標であるアラン標準偏差： 2.0×10^{-11} 、G-Sensitivity：0.1 ppb/Gの2項目について、製品サイズ11×9 mmサイズにおいて達成した。製品サイズの最終目標である7 mm×5 mmサイズでの達成ができなかったため、達成度を一部未達の△とした。

達成度：△

実施項目(3)-1 HS-ULPAC 実験室モデル量子部の試作

目標達成状況：プロトタイプモジュールに搭載し安定度評価のベースとなる実験室モデル量子部として、サイズの異なる多様な仕様のガスセルの搭載を可能とし、VCSELとガスセルの温度を個別に制御するなど、汎用性の高い独自構成の量子部を設計、その製造技術を確認した。本技術を適用し、MEMS ガスセルやガラス加工型ガスセルが組込まれた量子部を作製し、各種評価に用いるプロトタイプモジュール搭載用に提供した。

これらの成果により、目標である「CPT 共鳴周波数の安定度に及ぼす温度変動、磁場変動及び振動印加などの各環境変動要因を個別に評価できる量子部の設計・試作」を達成したと判断する。

達成度：○

実施項目(3)-2 HS-ULPAC プロトタイプ真空断熱型量子部の試作

目標達成状況：耐振動性とトレードオフの関係にある低消費電力化を実現する真空断熱型量子部の実現に向け、MEMS微細加工技術を適用し、断熱支持基板及び実装面積の縮小に寄与する貫通配線の各製造技術を開発した。開発した貫通配線を有する断熱支持基板にて量子部構造を作製、基本動作の評価を通して真空断熱型量子部の設計・製造技術を確認した。ガラス加工型ガスセルを搭載した2次試作構成にて、量子部を作製しプロトタイプモジュール搭載用に提供した。一方、MEMSガスセル(Type1)

を搭載した3次試作構成では、同ガスセルの性能未達のため量子部としての機能実証には至らなかった。

これらの結果から目標である「耐振性能（振動加速度：3G（5～50 Hz））と低消費電力（消費電力：300 mW以下、量子部単体では100 mW）との両立を目指し、真空断熱型量子部の試作を完了する」に対し、ガラス加工型ガスセルを搭載した2次試作では、消費電力の目標値は未達であるが量子部としての基本動作は実証された。また、MEMSガスセル(Type1)を搭載し小型化を図った3次試作では、各目標値は達成したが、MEMSガスセル(Type1)の性能未達により量子部としての機能実証には至らなかったため、達成度としては一部未達と判断する。

達成度：△

実施項目(4) プロトタイプモジュールの試作及び評価

目標達成状況：平均時間 $\tau < \text{約} 400 \text{ s}$ では、最終目標に近いアラン標準偏差 $\sigma_y(\tau) = 3 \times 10^{-11} \times \tau^{-1/2}$ の値を得ることに成功した。アラン標準偏差と周波数ドリフトが最終目標値に到達していないことから目標未達となった。目標を達成するための課題と解決案や今後の見通し見通しについてはエグゼグティブサマリーに記載した。

達成度：△

実施項目(5)-1-①-1 小型恒温槽の設計及び試作

目標達成状況：-10 °Cから 70 °Cの温度範囲で使用可能な体積 1000 cm³ 級の小型恒温槽を開発・評価し、最終目標である 0.01 °Cオーダーの温度安定性を達成した。さらに、当初は予定していなかったシリコンフォトリソ技術によるフォトリソ温度計測技術を開発し、-10 °Cから 70 °Cの温度範囲において基板実装したフォトリソ温度計を評価した。温度制御用サーミスタの精密評価を行い、0.01 °C、80 °Cで約 2 mK/月の安定性を持つことを確認した。HS-ULPAC プロトタイプモジュールに使用する温度制御用サーミスタの評価データを取得した。

達成度：◎

実施項目(5)-1-①-2 温度変動環境下での周波数変動要因評価技術の確立

目標達成状況：実験室内での温度変動環境下での周波数変動データの取得を完了し、2次プロトタイプモジュールと3次プロトタイプモジュールの温度特性を明らかにした。また、機械学習に基づく手法での分析・周波数予測を行い、温度変動時に実測周波数と予測周波数が正の相関を持つことを示した。温度由来の周波数変動を低減しうることを示した。温度変動環境と移動体搭載環境での周波数評価実験により、最終目標を達成した。

達成度：○

実施項目(5)-1-②-1 振動環境下での周波数変動要因評価技術の確立

目標達成状況：実験室内での振動環境下での周波数変動データの取得を完了し、2次プロトタイプモジュールと3次プロトタイプモジュールの耐振動特性を明らかにした。振動環境と移動体搭載環境での周波数評価実験により、最終目標を達成した。振動環境と移動体搭載環境での周波数評価実験により、最終目標を達成した。

達成度：○

実施項目(5)-1-②-2 振動環境下での周波数変動要因評価技術の確立

目標達成状況：試作した周波数測定システムにより、振動(5 Hz、50 Hz)環境下でケーブル要因の雑音を評価し、HS-ULPAC プロトタイプモジュール性能評価に影響がないことを算出し、最終目標を達成した。

達成度：○

実施項目(5)-1-③-1 磁場環境下での周波数変動要因評価技術の確立

目標達成状況：実験室内での磁場変動環境下での周波数変動データの取得を完了し、2次プロトタイプモジュールと3次プロトタイプモジュールの磁場変動特性を明らかにした。評価の結果、プロトタイプ

に対して面直磁場変動による相対的に大きな周波数シフトがあることを示した。振動変動環境と移動体搭載環境での周波数評価実験により、最終目標を達成した。プロトタイプモジュールの磁気シールド構造の最適化等により面直磁場変動に対する周波数変動のさらなる抑制が可能であると考えられる。
達成度：○

実施項目(5)-1-③-2 磁場環境下での周波数変動要因評価技術の確立

目標達成状況：試作した周波数測定システムにより、直流磁場、及び交流磁場環境下でケーブル要因の雑音を評価し、HS-ULPAC プロトタイプモジュール性能評価に影響がないことを算出し、最終目標を達成した。
達成度：○

実施項目(5)-2-① 孤立状態原子生成用のデバイスの設計、試作及び評価

・小型MEMS真空計の設計・作成・評価

目標達成状況： 10^{-6} Pa までの真空度を計測出来る小型イオンポンプを開発し、 10^{-6} Pa の超高真空ガスセルを実現し、最終目標を達成した。さらに、開発した真空セルに Cs を導入し、その蛍光観測にも成功した。
達成度：◎

・外部共振器半導体レーザの試作と評価

目標達成状況：広い環境温度において運転可能な小型 ECDL を作製し、ライトシフト評価用の恒温槽内に実装し、最終目標を達成した。さらに、当初目標を超えて、ECDL の注入電流による連続掃引範囲をフリースペクトルレンジの 4.5 倍に広げた。
達成度：◎

・光MEMSの技術を用いたECDLの小型化及びモジュール化の試作検討

目標達成状況：波長 850 nm 近傍で SiN 光導波路の基盤を構築した。超小型(2.4 mm × 0.5 mm)の光集積回路型外部共振器にて、波長 852 nm 付近でレーザ発振を達成した。微小空間光学型 ECDL を実装した。MOT に資する直径 10 mm 以上の円偏光ビームを形成できるメタレンズからなるビームエキスパンダーの原理検証に成功した。以上により最終目標を達成した。
達成度：○

・特殊グレーティングの試作検討

目標達成状況：回折効率 80 % 以上かつ円偏光度 90 % 以上のグレーティングを作製し、ライトシフト評価装置に組み込んで評価する準備を完了し、最終目標を達成した。
達成度：○

実施項目(5)-2-② 超高真空ガスセル内における孤立状態原子生成装置の設計、試作及び評価

目標達成状況：孤立状態原子生成の技術基盤となる磁気光学トラップ光学系の構築を完了し、レーザ系の安定化機構の構築により孤立状態原子の恒常的な生成を可能にした。孤立状態原子に対する CPT 共鳴観測のためのレーザ系および磁場の切り替えのためのコイル系および制御系を構築し、磁気光学トラップ系と協調動作させることでライトシフト評価系の構築を完了した。一方、最終目標である CPT を通したライトシフト評価は未達である。大型のコイルを設置することで磁場を制御し、孤立状態原子の原子数及び寿命の恒常的な評価系および最適条件へのフィードバック系の構築により最終目標を達成可能と考えられる。
達成度：△

実施項目(5)-2-③-1 超高真空ガスセルを用いた高精度ライトシフト評価法の温度依存性取得技術の確立

目標達成状況：-40 °C から 80 °C の範囲で使用可能な、体積 100000 cm³ 級の大型恒温槽を作製・評価し、最終目標である mK オーダーの温度安定性を達成し、最終目標を達成した。さらに、音響気体温度計（AGT）を用いて熱力学温度を測定し、大型恒温槽の性能を高精度に評価した。

達成度：◎

実施項目(5)-2-③-2 超高真空ガスセルを用いた高精度ライトシフト評価法の温度依存性取得技術の確立

目標達成状況：高真空ガスセル、ディスペンサー、イオンポンプが集積されたモジュールとレーザ光学系を用いた孤立状態原子生成装置を設計した。孤立状態原子生成装置を体積 100000 cm³ 級の大型恒温槽内に導入するためのモデル構築を行った。ライトシフトの温度依存性のデータ取得は未達である。ライトシフト評価装置と MOT 観測系の更なる小型化を行い、集積化されたレーザ波長安定化装置や制御のための集積エレクトロニクスの導入により最終目標は達成可能と考えられる。

達成度：△

実施項目(5)-2-④ AI によるライトシフト変動評価及び低減化技術の確立

目標達成状況：ライトシフトの変動モデルを構築・解明するため、光学定盤上に構築したCPT共鳴評価系を使用して、各種のパラメータを変えつつCPT共鳴スペクトルを測定した。また、この測定データを元に、物理理論モデルを構築した。結果、CPT共鳴スペクトルの反対称成分がライトシフトに大きく寄与していることを明らかにした。また、このモデルを用いて、励起光強度の変化に対するライトシフトの変動が抑制される動作条件が存在することを見出し、実験によってそれを実証した。上記の成果から、周波数変動をより高い精度で低減するための技術の確立が行い、最終目標を達成した。光学定盤モデルでの実証は完了したが、プロトタイプモジュールでの実証は未了であることから、物理計算モデルがプロトタイプモジュールにおける共鳴信号の観測にも適用可能であるかを、プロトタイプモジュールでの実測データに基づいて検証することが重要と考える。

達成度：○

3. 委託業務における研究の方法及び成果

以下に最終目標を実現するために実施した実施項目ごとの研究内容、及び成果を記載する。

実施項目(1) 周波数シフトとその変動要因の評価

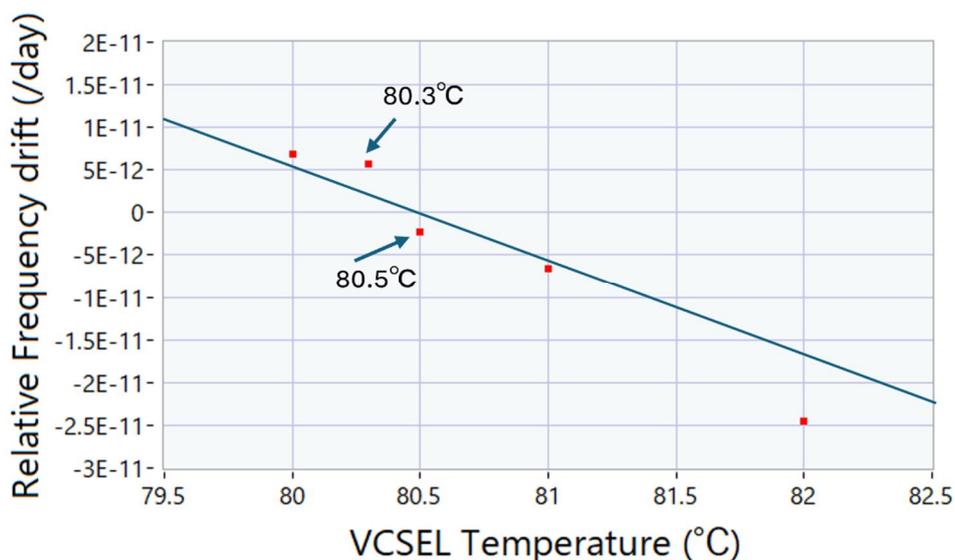
実施項目(1)-1 ライトシフト低減法の開発

実施項目(1)-1-① zero-cross 法の実証(担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

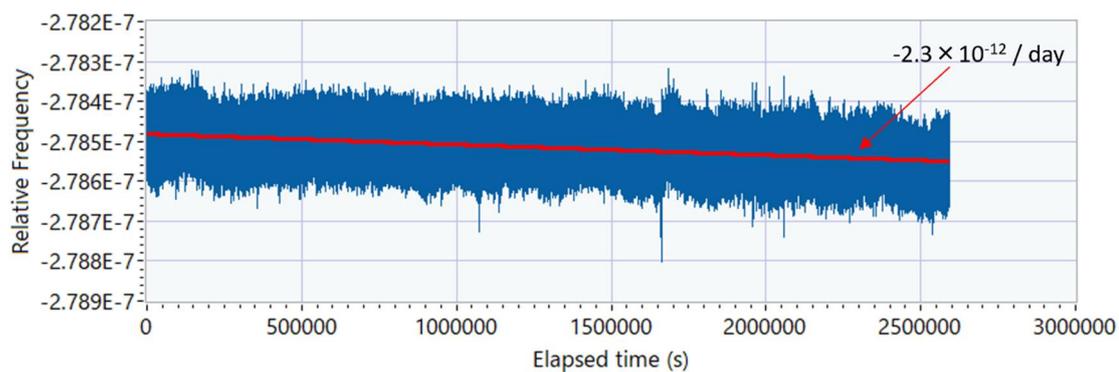
zero-cross 法は、VCSEL(Vertical Cavity Surface Emitting Laser)を用いた小型原子時計において、その経年変化による変動指数変動が原因で発生するライトシフト変動を VCSEL の動作電流を最適化することで、周波数ドリフトを最小化し、小型原子時計プロトタイプモジュールの長期安定度を飛躍的に改善する可能性を秘めた手法である。zero-cross 法は ULPAC 開発プロジェクトで端緒となるアイデアが生まれ、検証された^[1]。一方、複数のサンプルにその手法が適用可能なのかという疑問は解消されなかった。本プロジェクトでは、ULPAC 開発プロジェクトとは異なる VCSEL、ガスセル、量子部構造をもつプロトタイプモジュール(実験室モデル)を試作し、zero-cross 法の妥当性の検証を進めた。

図(1)-1-①.1 中に、zero-cross 法を検証するために取得した実験データを示す。測定は、3次プロトタイプ実験室モデルを恒温槽環境に設置して行われた。量子部内ではガスセルと VCSEL の動作温度が独立に設定可能で、ガスセルの温度は 65 °C に保った。VCSEL の動作温度を 80.0 °C から 82 °C まで 5 種類の値に変更し、相対周波数ドリフトを観測した。VCSEL には発振波長の温度依存性があるため、CPT 共鳴が観測可能となるよう一定の波長出力し続けるためには動作電流が温度変化分を補償する必要がある。動作電流は制御温度範囲 80.0 °C から 82 °C に対応して約 0.5mA 幅の変更を加えたことになる。動作温度 80.0 °C 及び 80.3 °C では、正方向へのドリフトが観測され、それ以上の温度では負方向へのドリフトが観測された。ドリフトのゼロ点は 80.3 °C と 80.5 °C の間に存在すると推定される。図(1)-1-①.2 に最小のドリフトが観測された事例(VCSEL 動作温度 80.5 °C)において、相対周波数変動を約 30 日間測定した結果を示す。ドリフトは -2.3×10^{-12} /day の値が得られた。

以上により ULPAC 開発プロジェクトとは異なるサンプルを用い、ドリフトのゼロ点が存在することを確認し、zero-cross 法の妥当性を実証した。本プロジェクトにおいては、ドリフトの最終目標を 1.0×10^{-13} /day としている。図(1)-1-①.1 より得られた観測データから、1 °C 当たりのドリフト変化率は -1.6×10^{-11} /day と推定され、VCSEL の動作温度をドリフトゼロ点近傍で 6 mK 程度以内に収めれば、最終目標を達成可能であると見積もられる。



図(1)-1-①.1 VCSEL の動作温度と相対周波数ドリフトの関係：プロトタイプ実験室モデルにおいて、VCSEL の動作温度を 80.0 °C から 82.0 °C まで変更しそれぞれのドリフトを計測した。



図(1)-1-①.2 ドリフトのゼロ点近傍での周波数変動の長期観測：VCSEL の動作温度は $80.5 \text{ }^\circ\text{C}$ であった。

参考文献

- [1] S. Yanagimachi et al., “Reducing frequency drift caused by light shift in coherent population trapping-based low-power atomic clocks”, Appl. Phys. Lett. 116, 104102(2020).

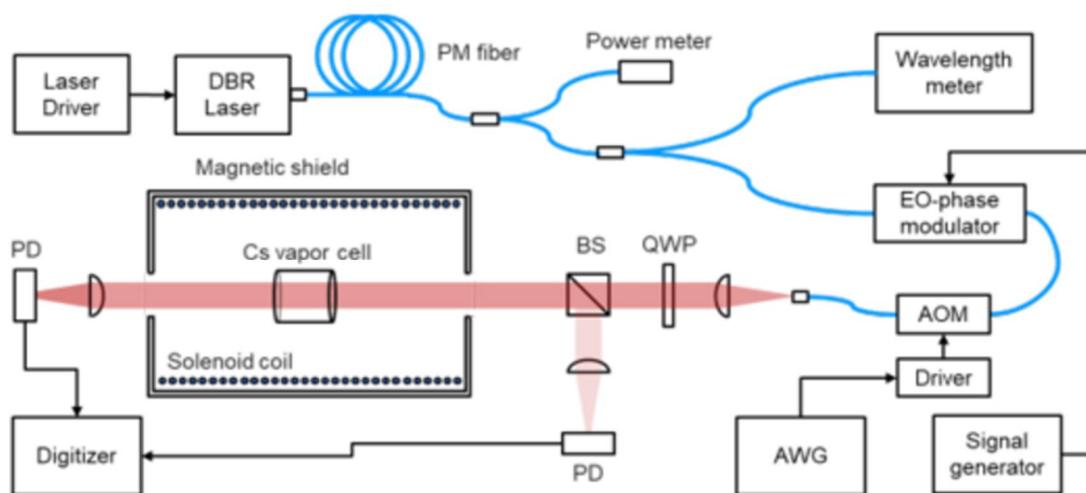
実施項目(1) 周波数シフトとその変動要因の評価

実施項目(1)-1 ライトシフト低減法の開発

実施項目(1)-1-② CPT-Ramsey 共鳴法の実証(担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

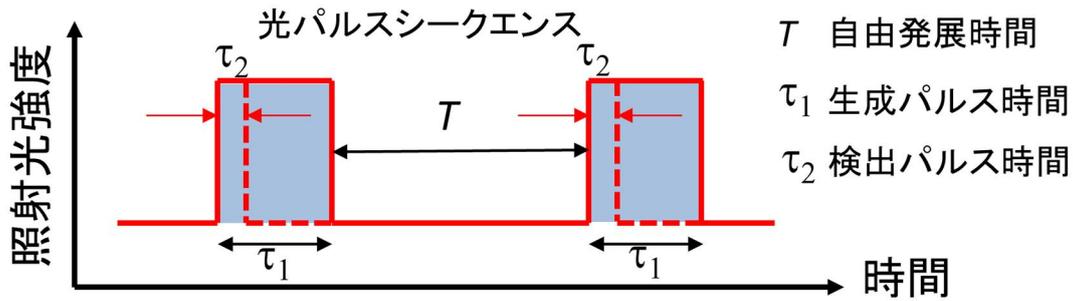
ライトシフトはレーザーの光電場と原子の相互作用の結果、発生する周波数シフトである。小型原子時計においては CPT 共鳴を生成するためにセシウム原子に波長 894 nm 付近で約 9.2 GHz の周波数差を持つ 2 周波レーザー光を照射する必要がある、VCSEL の直接電流変調により発生するレーザー光が利用される。CPT-Ramsey 共鳴法は原子に照射するレーザー光を時分割(パルス化)することでライトシフト量自体を低減することが可能である。本実施項目においては、CPT-Ramsey 共鳴法の有用性検討を行った。

図(1)-1-②.1 中に CPT-Ramsey 共鳴を観測するための実験装置配置図を示す。DBR レーザから出射した光(894 nm)は、ファイバ導波路型の電気光学変調器(Electro-Optic Modulator(EOM))を通過することで、CPT 共鳴生成用に必要な 2 周波レーザーが構成された。EOM はセシウム原子の基底状態超微細構造間の周波数差に関連する周波数約 4.6 GHz で変調された。側帯波の±1 次光が D₁ 線共鳴近傍にある場合に CPT 共鳴が観測可能となるが、側帯波の周波数は信号発生器によりコントロールされた。レーザー光をパルス化するためには任意波形発生器(Arbitrary Waveform Generator(AWG))で強度変調される音響光学変調器(Acousto-Optic Modulator(AOM))が用いられ、さらに光ファイバから出射した光はコリメートされた。これらの過程を経て形成された光がセシウム原子を封入しているガスセルに照射され、CPT-Ramsey 共鳴が観測された。パワーメータ、波長計、デジタイザー、信号発生器、任意波形発生器は PC に接続され、データ等が統合的に管理された。



図(1)-1-②.1 CPT-Ramsey 共鳴観測用の実験装置配置図：EOM に入射する光はあらかじめパワーメータ、波長計で状態がモニターされる。

図(1)-1-②.2にパルス化されたCPT-Ramsey共鳴観測用レーザー光の波形とそれに伴ういくつかのパラメータを示す。波形は $T + \tau_1$ の繰り返し時間を持つ。そのうち τ_1 はレーザー光が照射されている時間間隔であり、セシウム原子の基底状態超微細遷移間にコヒーレンシーを励起するために用いられ、生成パルス時間の時間間隔である。 T は、多くの場合、CPT-Ramsey共鳴における自由発展時間と呼ばれ、レーザー光が照射されない時間間隔を示す。 τ_2 は自由発展時間後に再度レーザー光が照射され、透過光検出が実行される時間間隔を示し、検出パルス時間である。これらの意味においては、コヒーレンシー励起と透過光検出は部分的に重複しており、 τ_1 のイベント中に τ_2 が実行される。

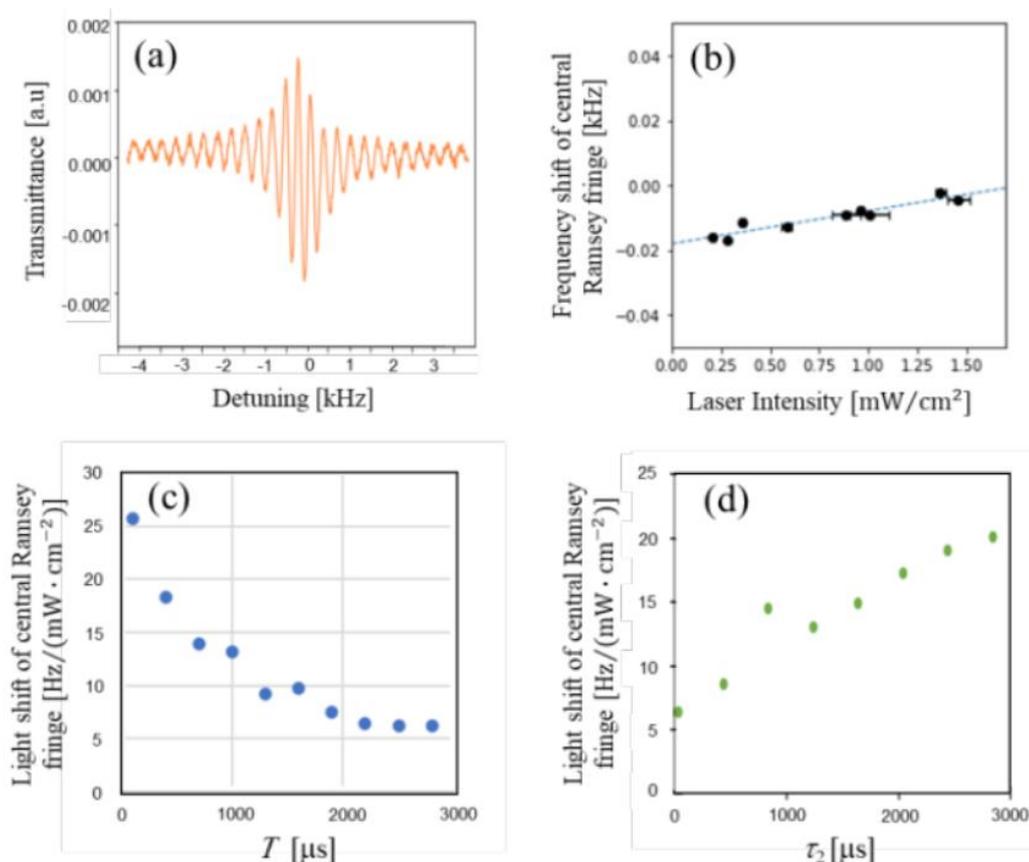


図(1)-1-②.2 パルス化された CPT-Ramsey 共鳴観測用レーザ光に関連する時間パラメータ T , τ_1 , τ_2 の概要図

図(1)-1-②.3(a)に自由発展時間 $T = 3000 \text{ ms}$ としたときの CPT-Ramsey 共鳴信号を示す。信号発生器の周波数をコントロールすることで、2 周波レーザの差周波数を掃引すると、自由発展時間 T と関連する原子状態の位相回転角に応じたフリンジが観測された。

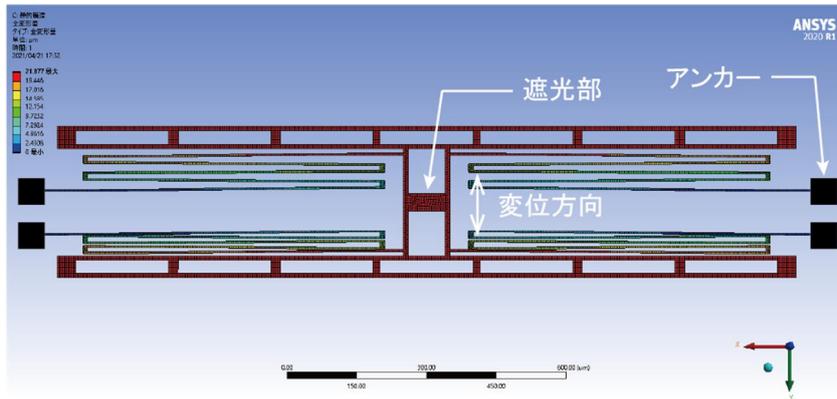
次に、ライトシフト量において、2 周波レーザ光強度と自由発展時間 T 、生成パルス時間 τ_1 、検出パルス時間 τ_2 の関係性を調べるための実験を行った。以下では、先述したフリンジの極大値を共鳴周波数の中心とみなし、その変化分をライトシフト量として議論を進める。図(1)-1-②.3(b)では、セシウム原子に照射した 2 周波レーザ光強度を変更した場合の共鳴周波数シフトを示している。2 周波レーザ光強度に対して周波数シフトはほぼ線形に生じており、グラフの傾きとして表されるライトシフト係数は $10.1 \text{ Hz}/(\text{mW} \cdot \text{cm}^2)$ であった。図(1)-1-②.3(c)に自由発展時間 T を数十 ms から約 3000 ms の間で変更した場合のライトシフト係数の様子を示す。自由発展時間 T が小さい場合にはライトシフト係数が大きく、自由発展時間 T が大きくなるにしたがってライトシフト係数が小さくなっていることがグラフから読み取れる。これは、CPT-Ramsey 共鳴において、自由発展時間 T を設けることでライトシフト量低減効果の可能性を示唆するものである。図(1)-1-②.3(d)は検出パルス時間 τ_2 を数 ms から約 3000 ms の間で変更した場合のライトシフト係数を示す。 τ_2 の大きさに従って、ライトシフト係数が比例的に変化していることが判る。また、この結果は τ_2 が 0 となる極限においては、一定の値となる切片の存在を示唆している可能性がある。図(1)-1-②.3(b)、(c)、(d)で議論した実験結果は先行文献^[1]で議論されている内容と矛盾しないと考えられる。

以上、CPT-Ramsey 共鳴信号を観測するための実験系を構築し、検出実験を実施した。励起光パルスとなる 2 周波レーザの構成や検出パルス時間を変更してデータを系統的に収集することで、CPT-Ramsey 共鳴法においてはライトシフト量自体を低減可能であることが判明した。小型原子時計の長期的な周波数安定度はライトシフトに関連する変動により制限されている可能性があり CPT-Ramsey 共鳴法によってその制限を緩和することが期待できる。



図(1)-1-②.3 CPT-Ramsey 共鳴信号と周波数シフト評価実験の結果:(a) 生成パルス時間 $\tau_1 = 1500$ ms、自由発展時間 $T = 3000$ ms、検出パルス時間 $\tau_2 = 41$ ms で観測した CPT-Ramsey 共鳴信号 (b) 生成パルス時間 $\tau_1 = 1000$ ms、自由発展時間 $T = 1500$ ms、検出パルス時間 $\tau_2 = 10$ ms で観測した CPT-Ramsey 共鳴の共鳴周波数シフト (c) 生成パルス時間 $\tau_1 = 2000$ ms、検出パルス時間 $\tau_2 = 40$ ms において自由発展時間 T を変更した場合のライトシフト係数 (d) 生成パルス時間 $\tau_1 = 3000$ ms、自由発展時間 $T = 1500$ ms において、検出パルス時間 τ_2 を変更した場合のライトシフト係数。

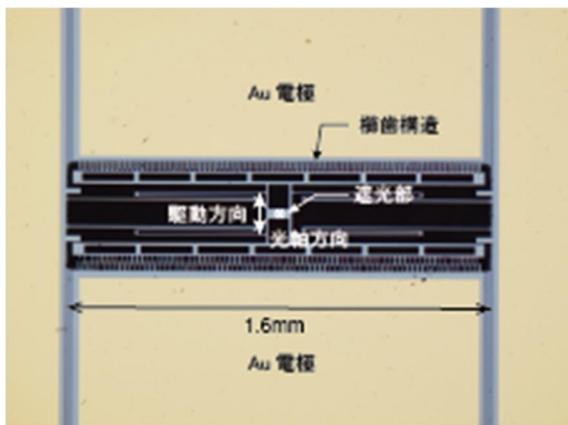
汎用機械シャッターを用いた CPT-Ramsey 共鳴の検出システム全体の小型化には、MEMS(micro electro mechanical systems)技術を応用した光学シャッター(MEMS シャッター)が有効であると考えられる。MEMS シャッターは高速駆動が可能であるが、変位量が大きくはなく、消光特性との両立が課題となる。そこで、高 NA のレンズによって回折限界付近まで集光して MEMS シャッターを通過させることで、高い消光特性と高速駆動を両立可能な素子の開発に取り組んだ。駆動方式は櫛歯型の静電アクチュエーター方式とし、数 μm にフォーカスされた光波のチョッピングが可能ないように駆動量は $10 \mu\text{m}$ 程度確保されるような設計を探索した。設計は有限要素法による数値計算を用いて行われ、図(1)-1-②.4 に示すような構造が設計された。



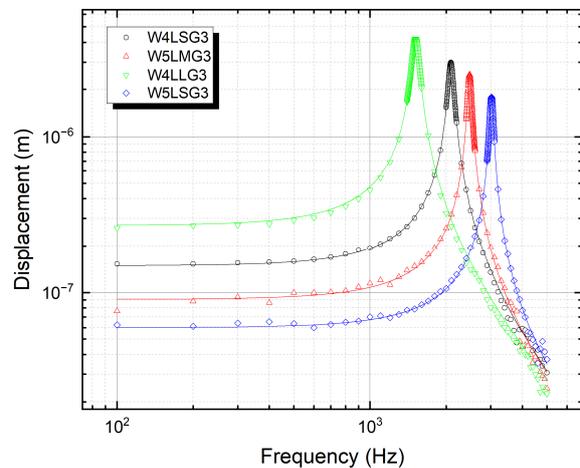
図(1)-1-②.4 有限要素法により数値計算されたMEMSシャッターの構造。左右両端の点は基板に固定されており、面内上下方向で変位する。

設計された構造を実際に作製するために既存のプロセスを調整し、図(1)-1-②.5(a)に示すような素子を作製した。作製された素子は画像認識により面内機械振動が計測された。図(1)-1-②.5(b)は測定された変位量の周波数特性を示している。それぞれ寸法の異なる複数の素子について計測を行ったところ、数値計算による共振周波数と10%以下で一致し、所望の寸法にて素子が試作できていることが確認された。実際のチョッピング動作はステップ駆動であるため、ステップ応答についても計測した。測定結果を図(1)-1-②.6に示す。2.48kHzの共振周波数を持つ素子では大きなリングングが発生している(左側グラフ、素子W5LMG3)。一方で3.02kHzの共振周波数を持つ素子では大きくリングングが減少していることが明らかとなった(右側グラフ、素子W5LSG3)。

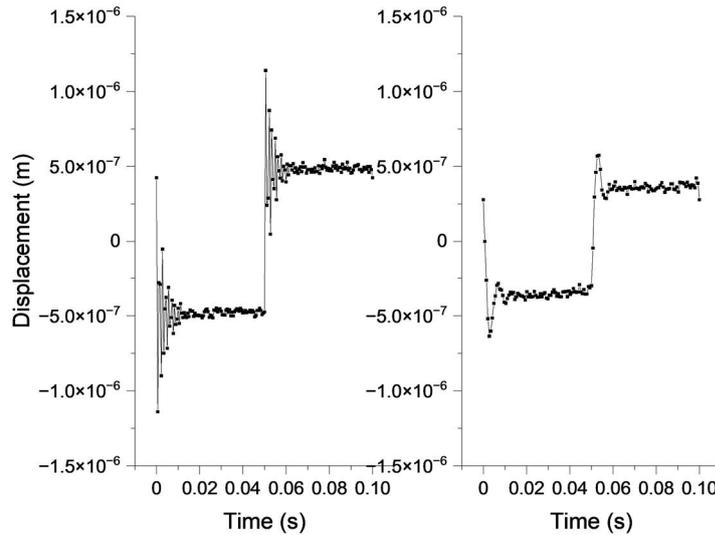
(a)



(b)



図(1)-1-②.5 (a)試作されたMEMSシャッターの写真。紙面内上下方向に遮光部は振動し、紙面法線方向に伝搬する光波をチョッピングする。(b)面内方向変位量の周波数特性の測定結果。凡例は、W4、W5は梁の太さが4、5 μm 、LS、LM、LLは梁の長さが短い、中間、長い、G3は櫛歯間隔が3 μm であることを示している。

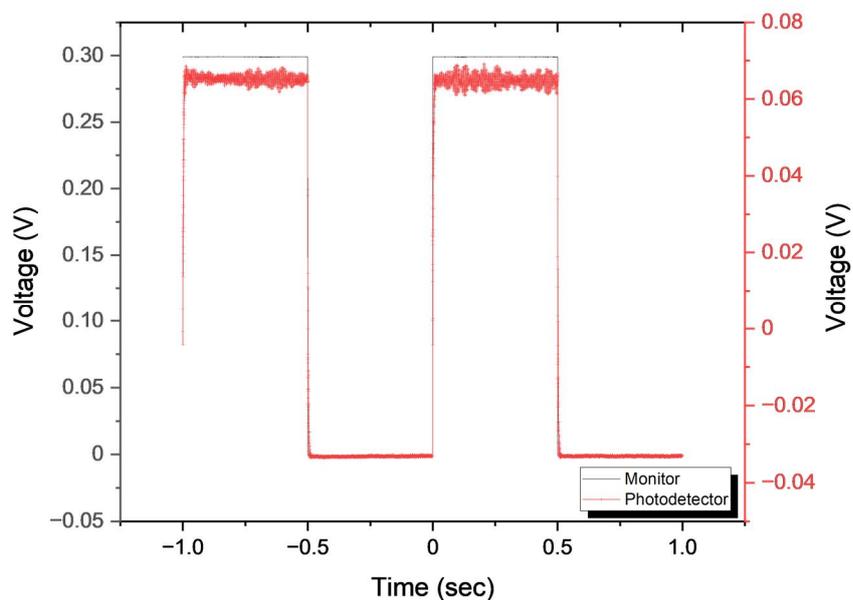
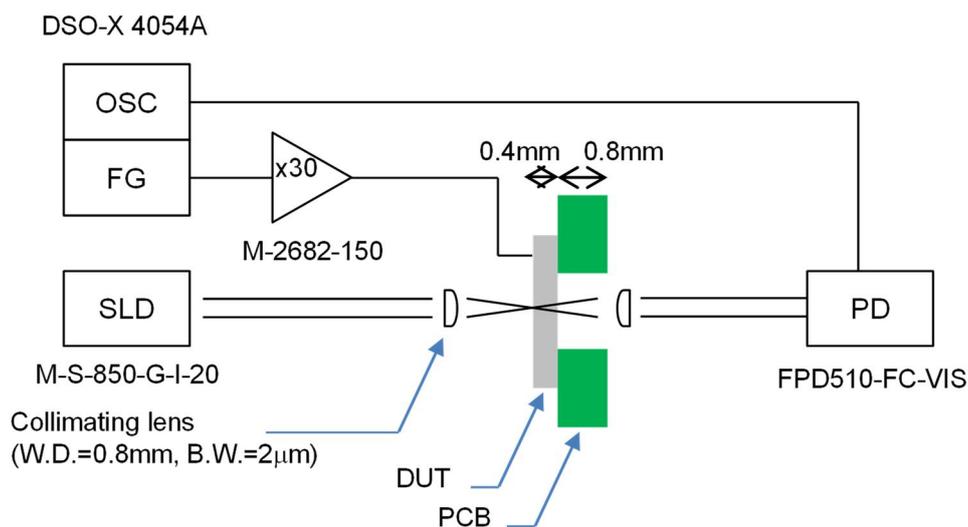


図(1)-1-②.6 変位量のステップ応答の測定結果。左はW5LMG3、右はW5LSG3の素子の測定結果を示している。振幅15 V、周波数100Hzの矩形波を印可した。

続いて、図(1)-1-②.7(a)に示される測定系によって光学特性の評価を行った。電圧が印可される時にMEMSシャッターが開き、光が透過する。測定に用いた素子は、リングングの影響の影響がより小さいW5LSG3を用いた。図(1)-1-②.7(b)の測定結果から試作したサンプルのシャッター動作を確認した。一方で、駆動周波数を上昇させる必要があることが明らかとなった。

今後の課題として、共振周波数の向上とそれに伴う変位量の減少を保証するために、櫛歯数を増大と櫛歯間隔を狭めることによって駆動力を向上させる必要がある。櫛歯数の増大は素子の重量が増大することから共振周波数の低下を招くものであるため、櫛歯数と共振周波数の関係を踏まえて素子設計を行う。現行のプロセスではこれ以上の櫛歯の狭間隔化は困難であるため、プロセスの見直しも必要となる。

本研究開発では、プロトタイプモジュールに搭載可能なサイズで設計を行い、シャッター動作を実証した。素子のサイズは、幅2mm、奥行き1mm以下の小型であり、プロトタイプモジュールに組み込んだとしても、モジュール全体の体積が著しく増大することはない。前述した改善により高速動作を可能にすることで、CPT-Ramsey共鳴の実証に有効である見込みを得た。



図(1)-1-②.7 (a)光学特性の評価系と(b)評価結果。SLD (Super luminescent Diode)からの光波をコリメートレンズによりビームウエスト2mmまで集光し素子に入射する。シャッター(W5LSG3)を通過した光波はPD(Photo detector)により検出される。シャッターは、FG(Function generator)により発生させた信号を増幅器により30倍に増幅して駆動させた。黒線は印可電圧を、赤線はPDの信号を示している。

参考文献

[1] S. Micalizio et al., “Raman-Ramsey resonances in atomic vapor cells: Rabi pulling and optical-density effects”, Phys. Rev. A, 99, (2019),043425

実施項目(1) 周波数シフトとその変動要因の評価

実施項目(1)-1 ライトシフト低減法の開発

実施項目(1)-1-③ プッシュプルポンピング法に適したライトシフト低減化VCSELの試作及び評価(担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

電子スピン制御手法による円偏光出力VCSELの要素技術を開発し、以下の成果を得た。

- ①GaAs(110)面上に電子スピンを揃えて注入できる垂直磁化膜を開発した。
- ②スピン情報を長時間保持できるスピン輸送層を開発した。
- ③高品質な活性層を開発した。
- ④活性層のスピン偏極の極性を反転させる方法を考案した。

実施項目(1) 周波数シフトとその変動要因の評価

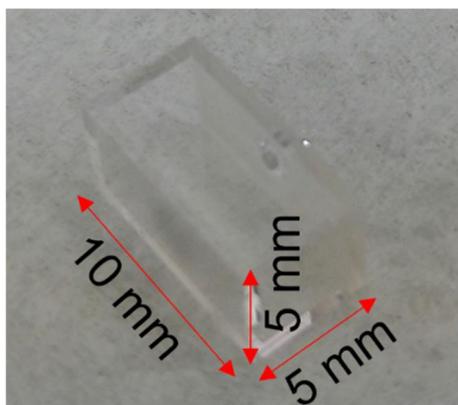
実施項目(1)-2 バッファガスシフト解明用種々ガスセルの試作及び評価

実施項目(1)-2-① ガラス加工方式ガスセル(石英)の試作(担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

バッファガスシフトはガスセルに封入するアルカリ原子とバッファガス(緩衝気体)の衝突に起因する周波数シフトである。バッファガスとしては、原子と反応しない不活性ガスであるヘリウム、ネオン、アルゴン、窒素、キセノンなどが用いられるが、ガス種によりシフト量やその極性が異なることを利用し混合ガス化することで、温度依存性の低減が可能である^[1]。

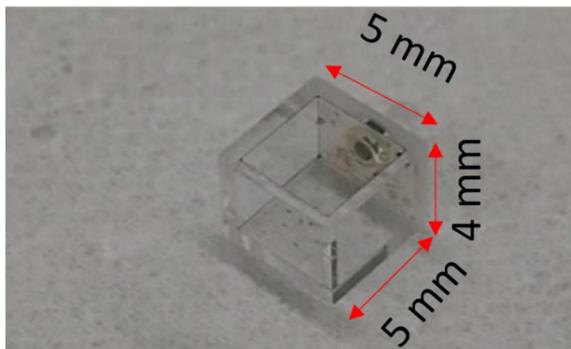
1次試作ではガラス加工方式において、セシウム原子とバッファガス封入プロセスを確認するため、比較的、容易に加工できるホウケイ酸ガラスのガスセルを試作した。窒素を単一のバッファガスとして用い、封入したバッファガス圧に比例する周波数シフトが得られることを、CPT共鳴観測により実験的に確かめた。

2次試作では、1次試作で確認した同様の封入プロセスを用い、石英ガラスで構成されるガスセルを試作した。これは、プロトタイプ実験室モデルへの搭載を想定したものである。図(1)-2-①.1に実物写真を示す。ガラスの板厚は0.5 mmであり、直方体の外形は5 mm×5 mm×10 mm大きさである。封入したバッファガスは単一の窒素を用い、圧力は1 kPaから10 kPaの間で試作を繰り返し、種々のデータ取得に活用することができた。



図(1)-2-①.1 大きさ5 mm×5 mm×10 mmの石英製ガラス加工方式ガスセル

同様に、プロトタイプ真空断熱型量子部に搭載可能な石英ガラスで構成されるガスセルを試作した。プロトタイプ実験室モデル用に試作したものと同様に0.5 mm厚の石英素材が利用されているが、真空封止可能なセラミックパッケージ内に配置できるように、小型化された。具体的なサイズは5 mm×5 mm×4 mmである。図(1)-2-①.2に本ガスセルの現物写真を示す。また図(1)-2-①.3に、実際にセラミックパッケージに実装して制御基板と接続した様子を示す。



図(1)-2-①.2 大きさ 5 mm×5 mm×4 mm の石英製ガラス加工方式ガスセル



図(1)-2-①.3 石英製ガスセルが実装された真空断熱型量子部とその制御基板

3 次試作では、バッファガスとして窒素とアルゴンの混合ガスを活用した。一般的にバッファガス中にセシウム原子が存在する場合、その遷移周波数はバッファガスとの衝突によりシフトし、シフト量 $\Delta\nu$ は

$$\Delta\nu = P_0[\beta + \delta(T - T_0) + \gamma(T - T_0)^2] \quad \text{式(1)-2-①.1}$$

と表される。ここで、 P_0 は基準温度 0 °Cにおけるバッファガス圧力、 β は圧力係数、 δ は 1 次温度係数、 γ は 2 次温度係数として与えられる。窒素とアルゴンの諸定数を表(1)-2-①.1 に示す。

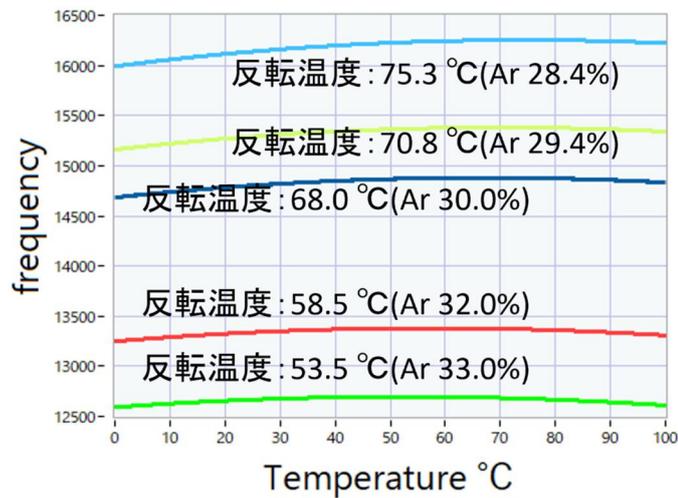
表(1)-2-①.1 窒素とアルゴンの衝突シフトに関わる定数 ^[1]

ガス種	β (Hz/Pa)	δ (Hz/(kPa・K))	γ (mHz/(kPa・K ²))
窒素	6.92	6.18	-18.8
アルゴン	-1.46	-8.54	0.0

混合ガスを封入した場合の衝突シフトは、窒素、及びアルゴン寄与分の合計とすることができる。故に、両ガス種の 1 次温度係数の極性が逆向きのため、混合した場合、温度依存性の軽減が容易に期待できる。窒素とアルゴンの混合比を R とすると 1 次の温度依存性が完全になくなる反転温度 T_{inv} は

$$T_{inv} = \frac{2R\gamma_{N_2} - \delta_{Ar} - R\delta_{N_2}}{2R\gamma_{N_2}} \quad \text{式(1)-2-①.2}$$

と表される。ここで、 δ_{N_2} 、 γ_{N_2} は窒素の1次・2次温度係数であり、 δ_{Ar} はアルゴンの1次温度係数である。図(1)-2-①.4に示すいくつかの反転温度を持つガスセルを全圧1 kPa から 10 kPa の領域で試作し、他の実施項目において、種々のデータ取得に活用した。



図(1)-2-①.4 ガスセル動作温度と衝突シフトの関係：それぞれの曲線にはアルゴンの分圧比率と反転温度がともに示されている。

参考文献

- [1] Kozlova et al., "Temperature and pressure shift of the Cs clock transition in the presence of buffer gases: Ne, N₂, Ar." Phys. Rev. A, 83 (2011): 062714.

実施項目(1) 周波数シフトとその変動要因の評価

実施項目(1)-2 バッファガスシフト解明用種々ガスセルの試作及び評価

実施項目(1)-2-② MEMSガスセル(ホウケイ酸ガラス-Si接合)の試作(担当：一般財団法人マイクロマシンセンター)

本実施項目では、ガスセルの製造効率化、信頼性向上に向け、MEMSデバイスの製造で培った微細加工技術を適用し、キャビティが形成されたSi基板の両面にホウケイ酸ガラスの窓材を封止接合する構成のMEMSガスセルを試作する。まず、MEMSガスセルの先行技術調査を行い、先行各方式の構造及び製造プロセスを比較分析し課題抽出を行った。その結果を基に、従来方式の課題を解決する方策を検討し、MEMSガスセル構造とCs導入方法とを合わせて2方式(Type 1, Type 2)を提案した。

Type 1は、Cs導入穴を有するMEMSガスセルを真空チャンバー内に配置し、同チャンバー内にCs蒸気及びバッファガスを供給することで、Cs導入穴を通してMEMSガスセル内にCsを導入、その後、封止材で導入穴を気密封止する新規考案の独自方式である。Type 2は、MEMSガスセルに内蔵したCsディスペンサーにレーザー光を照射して加熱、分離されたCsを連通するガスセル室に導入する従来法をベースに改良した新構造である。

各方式のMEMSガスセルの試作においては、まず、構造設計とそれを実現する作製プロセスの構築を行い、各ガスセル構造体(Cs封入前の容器)を微細加工装置により作製した。次に、Csをガスセルに封入する手法に関して、Type 1では、独自のCs封入治具を作製し、それに用いる封止材や加熱方式の変更など課題解決に向けた実験評価を行った。また、Type 2では、Csディスペンサーからガスセル室に至る流路に変更を加え最適化を行った。以下に詳細を記述する。

(a)MEMSガスセル先行技術調査と開発方針

米国 DARPA のプログラムで、小型原子時計(CSAC)の開発が本格化して以来、多くの研究機関から、小型化のキーとなる MEMS ガスセルの方式が提案されてきた。表(1)-2-②.1 に文献調査を基に先行技術の比較分析を行った結果をまとめて示す。各方式の得失は以下の通り。

①純アルカリ金属滴下方式^[1]

キャビティを形成した Si 基板の底面に、陽極接合にてガラス基板を接合し、液体状の純アルカリ金属を滴下、バッファガス雰囲気中で上面のガラス基板を陽極接合で封止している。セルサイズは最小となるが、封止時に陽極接合に起因する脱ガスがセル内に混入する可能性がある。また、底面ガラスは高温の最適条件で陽極接合が可能であるが、上面ガラスは、アルカリ金属の蒸散を抑制するため最適条件よりも低い温度で陽極接合されることから接合部の信頼性に課題が残る。さらに、アルカリ金属の滴下を多数のキャビティが形成されたウエハに対し一括で行うのは困難であり量産性にも課題がある。

②混合ガス ガラス管供給方式^[2]

アルカリ金属とバッファの混合ガスを封入する前に、キャビティを形成した Si 基板の両面にガラス基板を高温の最適条件で陽極接合し、一方のガラス基板に予め形成したガラス管から混合ガスを供給、最後にガラス管をバーナーで熔融切断することで封止している。陽極接合に起因する脱ガスの混入は、混合ガス供給前に真空加熱により脱ガス処理することで防止することが可能となる。また、接合部の信頼性は、最適条件にて陽極接合されているため確保される。一方で、ガラス管の残留部によりセルサイズが大きくなり、また、バーナーによる封じ切りをウエハ一括で行うのは困難であり量産性が問題となる。

③化学反応 ガス生成方式^[3]

純アルカリ金属滴下方式と同様の工程で製造されるが、供給される物質は、純アルカリ金属ではなく、より大気中で取り扱いが容易なアルカリ金属化合物である。陽極接合時の加熱により、セル内で化学反応が生じアルカリ金属蒸気が発生する。化学反応の副生成物がセル内に残留しガス純度を保証するのが困難である。

④混合ガス中はんだ接合方式^[4]

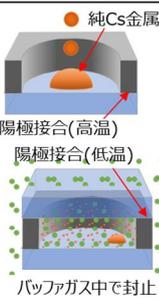
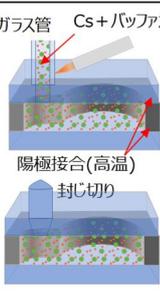
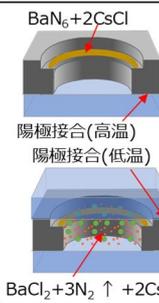
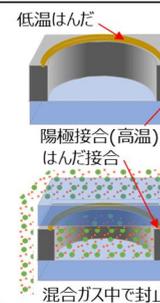
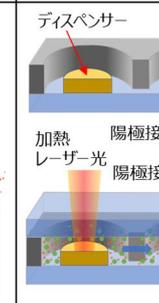
キャビティを形成した Si 基板の底面に、陽極接合にてガラス基板を接合し混合ガス雰囲気中で上面ガラス基板を低温はんだで接合している。はんだ接合は、低温条件での陽極接合と比較して、接合強度など信頼性は向上すると考えられるが、アルカリ金属蒸気によるはんだの腐食など長期的な相互作用は確認されていない。また、はんだ供給は、プリフォームを搭載する形となるため、ウエハー括で行うのは困難であり量産性が問題となる。

⑤ディスペンサー加熱供給方式^[5]

連結した 2 つのキャビティを形成した Si 基板の底面に、陽極接合にてガラス基板を接合し、一方のキャビティにアルカリ金属を含有したディスペンサーを搭載、バッファガス雰囲気中で上面のガラス基板を陽極接合で封止している。最終的に外部からレーザー光でディスペンサーを加熱することでアルカリ金属蒸気をセル内に充填している。ディスペンサーは接合時の温度範囲では安定であるため、底面、上面の陽極接合は、高温の最適条件で実施することが可能であり信頼性は確保できるが、陽極接合に起因する脱ガスの混入は避けられない。セルサイズは、ディスペンサー用のスペースが必要であるため大型化し、また、レーザー加熱はウエハー括で行うのは困難であるため量産性が問題となる。

表(1)-2-②.1 の各比較項目に対する先行各方式の問題点とその対策方針を以下に記述する。セルサイズの小型化に向けては、封じ切り部やディスペンサー室など稼働時に不必要なスペースを極力排除する。封入混合ガスの高純度化に向けては、陽極接合時の脱ガスの混入や化学反応後の残留物質が生じないように、陽極接合後の脱ガス処理、混合ガスの直接導入を実施する。信頼性の確保に向けては、陽極接合を高温の最適条件で実施する。量産性の確保に向けては、アルカリ金属の滴下、ガラス管の封じ切りなどガスセルチップ毎の工程を不要とし、ガスセルが形成されるウエハー単位で一括処理可能な工程とする。プロセス再現性の確保に向けては、化学反応制御などプロセス条件の厳しい工程を排除する。

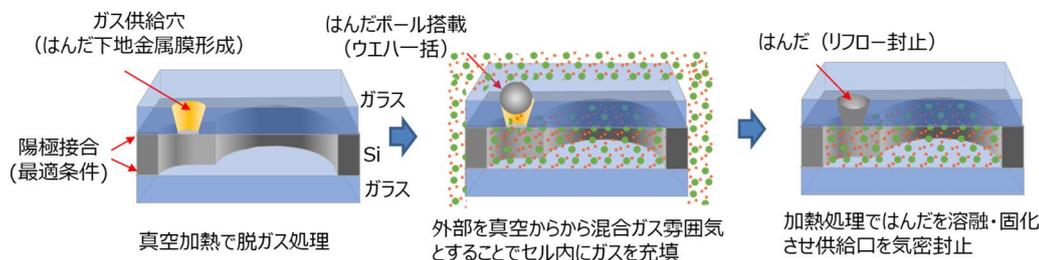
表(1)-2-②.1 MEMS ガスセル先行技術の比較

方式	①純アルカリ金属滴下	②混合ガス ガラス管供給	③化学反応 ガス生成	④混合ガス中はんだ接合	⑤ディスペンサー加熱供給
構造・プロセス	 <p>純Cs金属 陽極接合(高温) 陽極接合(低温) バッファガス中で封止</p>	 <p>ガラス管 Cs+バッファガス 陽極接合(高温) 封じ切り</p>	 <p>$BaN_6 + 2CsCl$ 陽極接合(高温) 陽極接合(低温) $BaCl_2 + 3N_2 \uparrow + 2Cs \uparrow$</p>	 <p>低温はんだ 陽極接合(高温) はんだ接合 混合ガス中で封止</p>	 <p>ディスペンサー 加熱レーザー光 陽極接合(高温) 陽極接合(高温)</p>
サイズ	◎	△ (供給ガラス管残留)	◎	◎	× (ディスペンサー室必要)
純度	△ (陽極接合脱ガス)	○	× (化学反応残留物)	○	△ (陽極接合脱ガス)
信頼性	△ (低温陽極接合)	◎	△ (低温陽極接合)	○	◎
量産性	△ (金属滴下)	× (封じ切り工程)	△ (化合物供給)	× (はんだ枠配置)	× (レーザー加熱工程)
再現性	○	◎	△ (化学反応制御)	○	○

上記方針のもと、先行技術に対してアドバンテージを有する MEMS ガスセルの新方式を考案した。図(1)-2-②.1 に新規考案した Cs 一括導入・封止方式を示す。まず、キャビティを形成した Si 基板の両面にガラス基板を高温の最適条件で陽極接合する。一方のガラス基板には、混合ガス供給穴として、テーパ状の貫通穴を形成し、その側面にはんだ下地金属を成膜する。この段階で真空加熱処理を行い、陽極接合で発生する脱ガスなど不純物を除去する。次に、はんだプリフォーム (はんだボール) を供給穴に搭載し密閉容器内にガスセルを設置する。雰囲気を真空状態とした後、アルカリ金属蒸気、バッファガスを順次、密閉容器内に送り込む。この時、供給穴に搭載したはんだプリフォームは、供

給穴を完全に塞いだ状態ではなく、隙間からアルカリ金属蒸気及びバッファガスがセル内に供給される。最後に、ガスセル全体を加熱し、はんだをリフローさせることで供給穴を封止する。

本方式によれば、大きなセルサイズは必要なく、脱ガス処理により高いガス純度が期待でき、さらに、最適条件（高温）での陽極接合により接合部の信頼性が確保できる。また、プロセスは全てウエハレベルで可能であるため量産性も確保できる。



図(1)-2-②.1 Cs一括導入・封止方式（独自方式）

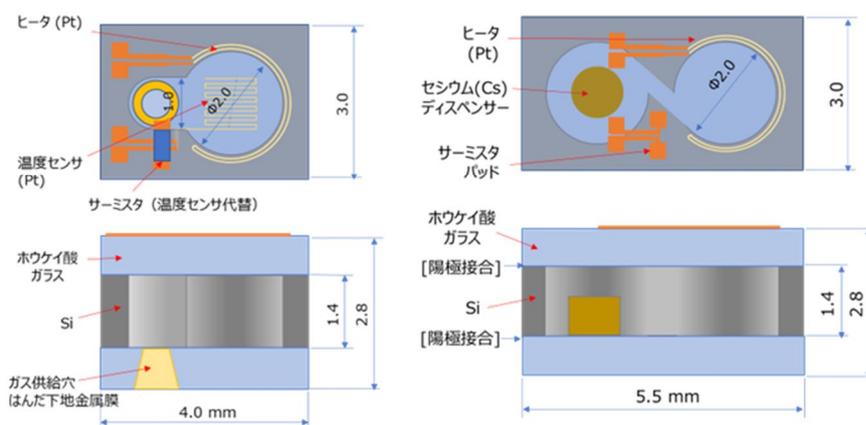
(b)MEMSガスセル構造の設計・試作

図(1)-2-②.2にMEMSガスセル1次試作の構造を示す。Type 1は新規に考案したCs一括導入・封止方式であり、併せて先行技術の中で最も採用例が多いディスペンサー方式をベースとした新規構成をType 2として試作する。

Type 1、Type 2共にキャビティを形成した厚さ1.4 mmのSi基板の上下面に厚さ0.7 mmのホウケイ酸ガラス基板を接合する構成とした。Type 1では下部基板にガス供給穴を形成し、その側面にはんだ下地金属膜を成膜する。Type 2ではSiキャビティにCsディスペンサーを内蔵するための空間（ディスペンサー室）を設ける。さらに、上面ガラスの表面には、ガスセルヒータ、及び温度センサとして白金(Pt)薄膜配線を形成する。なお、ヒータ、温度センサの各配線を通過する電流により生じる磁界を抑制するため、配線パターンは、双方とも近接する往復配線としている。

Type1: Cs一括導入・封止方式

Type2: ディスペンサー方式

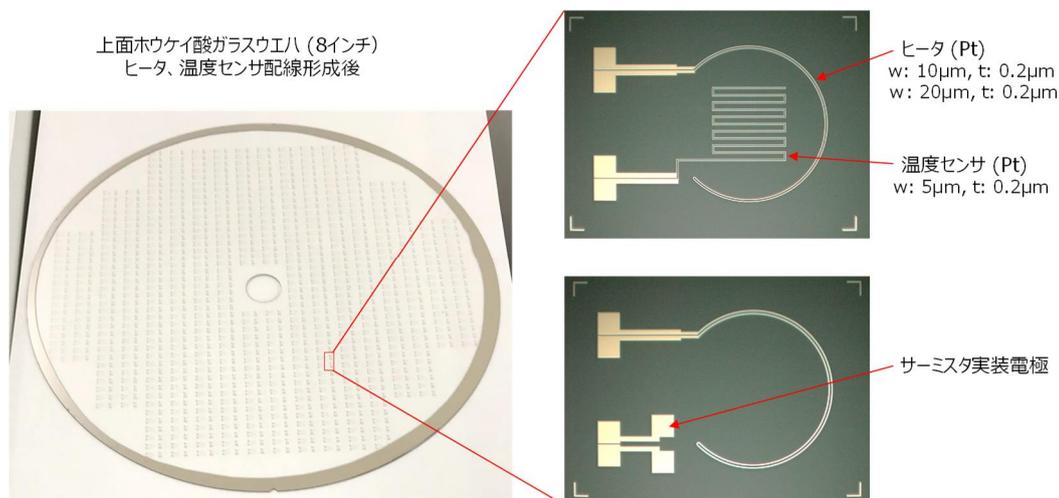


図(1)-2-②.2 MEMS ガスセル 1 次試作の設計構造図

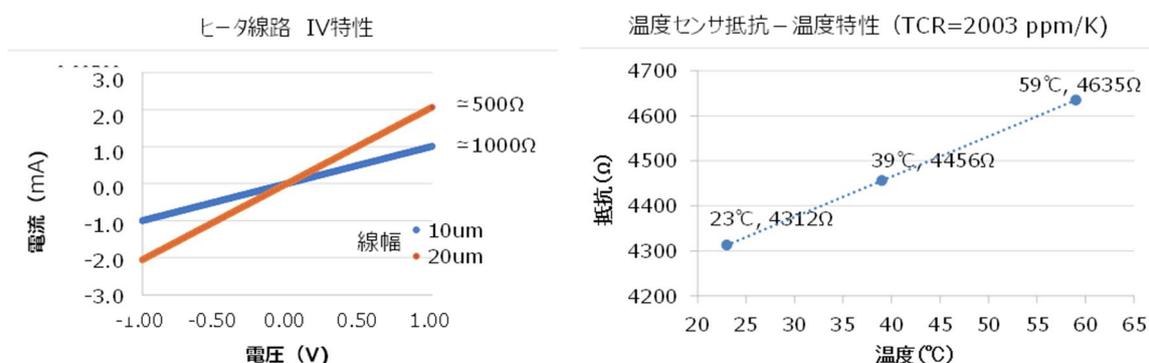
図(1)-2-②.3に、ヒータ及び温度センサ配線を形成した上面ガラス基板の外観を示す。ヒータ配線幅は10 μm と20 μm 、温度センサ配線幅は5 μm 、厚さは各々0.2 μm とした。各配線の材質は白金(Pt)とし、電流により生じる磁界をキャンセルするため、近接した往復線路としている。なお、温度センサとして、サーミスタの採用も想定し、その実装用電極のみ形成したパターンも作製した（図右下）。

図(1)-2-②.4にヒータ配線の電流－電圧(IV)特性（上段）及び温度センサの抵抗－温度特性（下段）を示す。形成したヒータ配線は、純抵抗特性を示し、線幅20 μm で500 Ω 、10 μm で1000 Ω と、ほぼ設計通りの値を示した。温度センサ配線は、常温での抵抗値約4.3 k Ω 、温度係数T

CR約2000 ppm/Kであり、温度センサとしての適用可能性を確認した。



図(1)-2-②.3 上面ガラス基板（ヒータ及び温度センサ配線形成後）

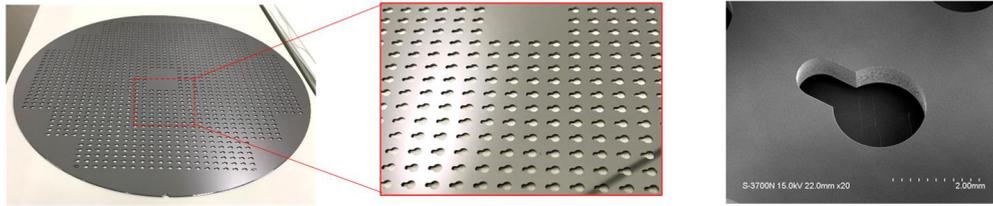


図(1)-2-②.4 ヒータ及び温度センサの電気特性

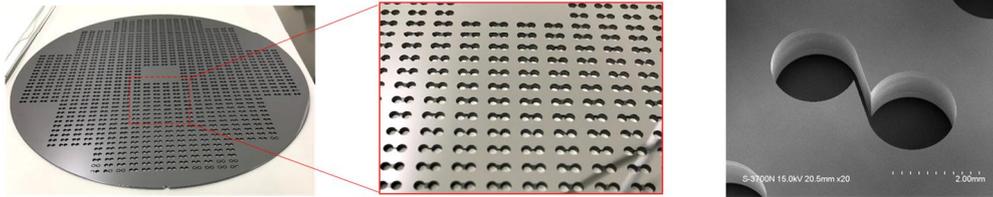
図(1)-2-②.5にSiキャビティ加工後の8インチウエハ及びType 1、Type 2各キャビティの拡大SEM像を示す。ウエハ全面にわたり、均質な加工ができていることを確認した。Type 2では、ディスペンサー加熱時に発生するパーティクルのガスセル室への侵入を抑制するためのディスペンサー室とガスセル室を連通する流路の形状による効果を検証するため、複数種の流路形状を形成した（図下段）。

図(1)-2-②.6にガス供給穴形成から下地金属膜の形成過程をウエハ、及び各部拡大写真で示す。まず、ガラス基板にサンドブラスト加工にて、ガス供給穴を形成した（図左側）。形状はテーパ形状であり、大径（上φ1.0 mm,下φ0.5 mm）及び小径（上φ0.7 mm,下φ0.3 mm）の2種類とした。次に、スパッター装置によりガス供給穴側面に下地金属膜を形成した（図中央）。下地金属膜は、サンドブラストにより粗度の大きい側面のはんだ濡れ性を付与する機能が要求されるため、予備実験により膜構成、膜厚など適正な仕様を決定した。また、下地金属膜の形成には、工程の簡素化及び金属膜表面の汚染抑制の観点から、メタルマスクによるパターンニングを採用した。

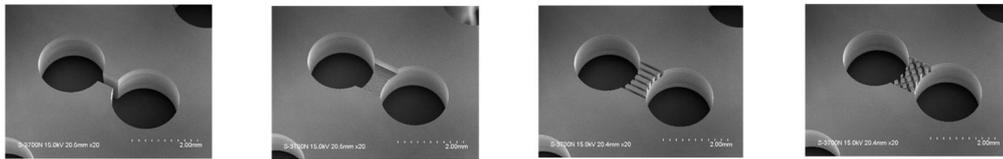
Type1



Type2

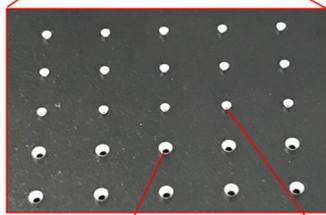
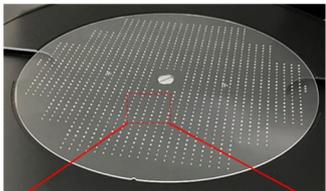


(Type2 キャビティ形状バリエーション)

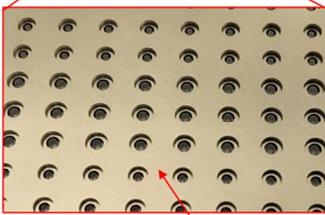
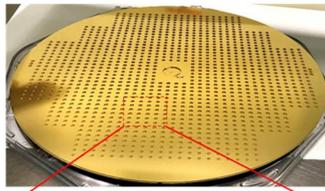


図(1)-2-②.5 Si キャビティ形成基板(Type 1, Type 2)

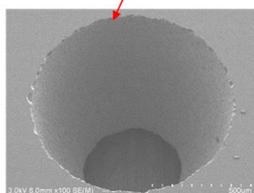
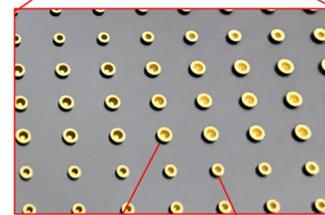
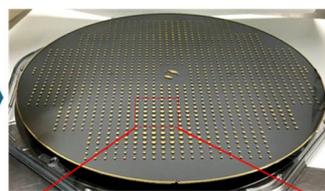
ガス供給穴加工後 (サンドブラスト加工)



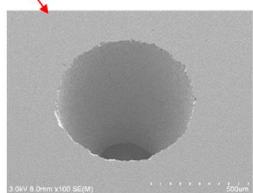
メタルマスクによる下地金属成膜



下地金属膜形成後

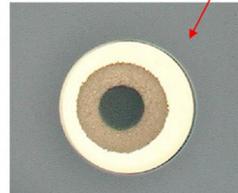


大径穴
(上φ1.0mm、下φ0.5mm)

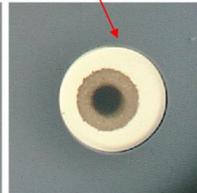


小径穴
(上φ0.7mm、下φ0.3mm)

メタルマスク



大径穴

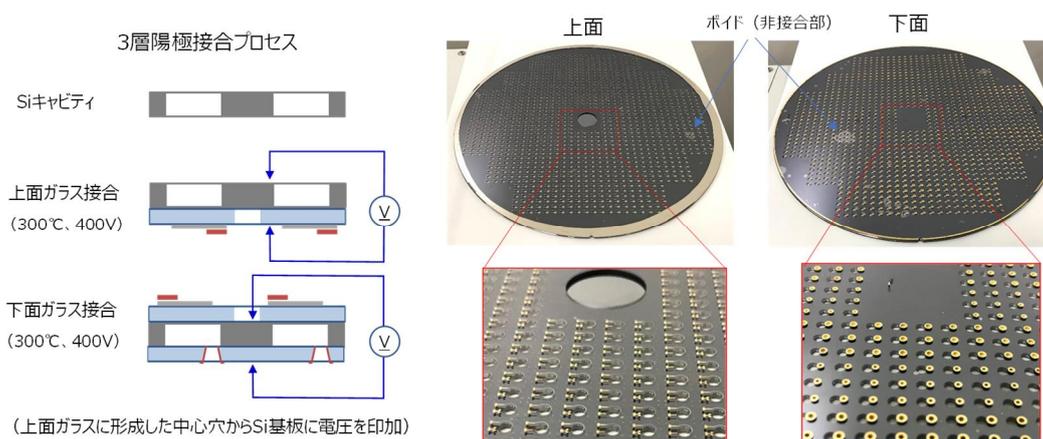


小径穴

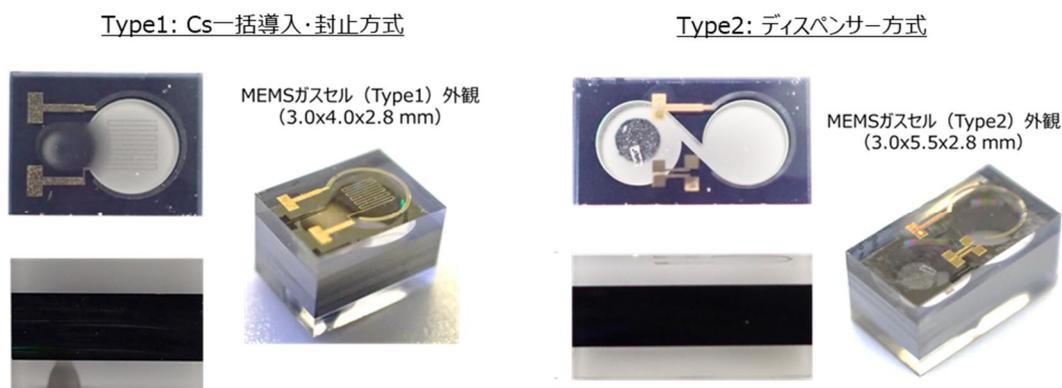
図(1)-2-②.6 下面ガラス基板 (ガス供給穴・下地金属膜形成後)

図(1)-2-②.7にガラス-Si-ガラスの3層を陽極接合にて接合するプロセスと3層接合後の基板外観を示す。まず、上面ガラス基板とSiキャビティ基板とを接合し、続いて下面ガラス基板を接合する。この時、上面ガラス基板中央に設けた貫通穴からSi基板に電圧を印加する。接合条件は、最適条件である温度300℃、電圧400 Vとした。接合後の外観から、局所的にパーティクルのかみ込みによるボイド（非接合部）が生じているが、全体的に良好な接合状態であることを確認した。

図(1)-2-②.8に個片化したMEMSガスセル(Type 1)及びディスペンサーを封入した(Type 2)の各構造体の外観を示す。構造体として、当初設計の仕様（寸法、配線パターン、配線抵抗等）を満たすことを確認した。



図(1)-2-②.7 3層陽極接合プロセスと接合後3層基板

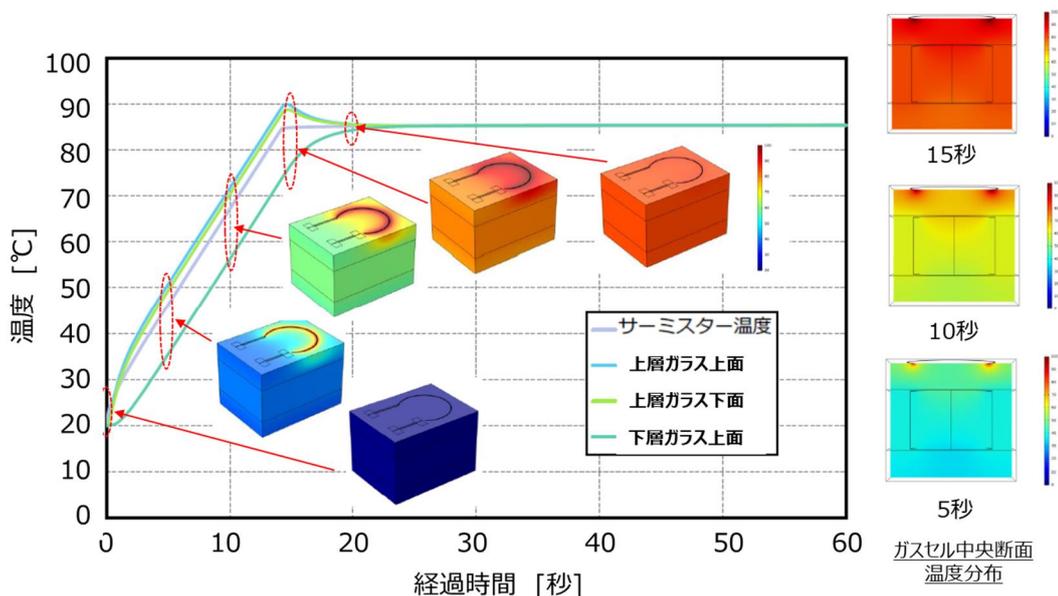


図(1)-2-②.8 MEMS ガスセル 1次試作の外観(Type 1, Type 2)

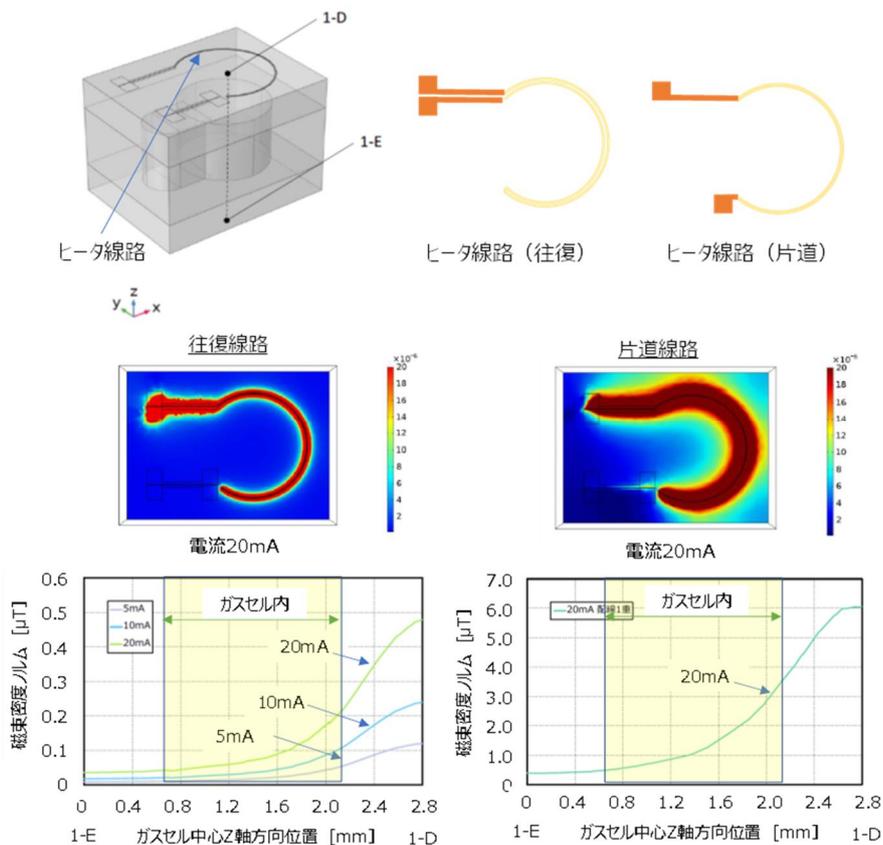
図(1)-2-②.9にMEMSガスセル1次試作(Type 1)の伝熱シミュレーション結果を示す。グラフの各線はガスセルの中心線上各ポイントの温度時間変化を示し、ガスセル上層ガラスの上面(1-A)、上層ガラスの下面(1-B)及び下層ガラスの上面(1-C)である。温度境界条件は、周辺部を断熱、初期温度を20℃とした。温度制御は、サーミスタ取り付け位置の温度が設定値85℃以下では電流20 mAを印加(ON)、設定値を超えるとOFFにするON/OFF制御とした。ガスセルは、ヒータ回りから昇温を開始し、上層ガラスから5秒程度の時間差で、約20秒後に全体が設定温度に収束することが示された。図右側に示すガスセル中心断面の温度分布からもガスセル内のガス温度は設定温度に収束していることが確認できる。

MEMSガスセル1次試作では図(1)-2-②.2に示す通り、ヒータ電流により生じる磁場の影響を抑制することを目的にヒータを往復線路としている。その効果を解析により確認するため電磁界解析を行った。図(1)-2-②.10にヒータ電流により生じる磁場の解析モデルと結果を示す。ヒータを往復線路とした場合と片道線路とした場合とを比較するため両ケースでモデル化し解析を行なった。グラフ横軸は、ガスセル中心線上の位置として、最下面(1-E)から最上面(1-D)までの長さを示し、0.7 mm～2.1 mmの範囲がキャビティ内（ガス充填部）である。往復線路（図

左側) では、磁束密度 (縦軸) はガスセル上面のヒータに接近するほど増加しているが、その値は、20 mA通電時、キャビティ最上部 (横軸2.1 mm) で0.25 μT 程度と低い値となっている。一方、片道線路 (図右側) では、3.5 μT 程度となり、往復線路と比較して1桁以上大きな値となることから、往復線路による磁場変動抑制の効果が確認できる。



図(1-2-⑨.9) ガスセル中心線上各ポイントの温度時間変化 (解析結果)
(ヒータ電流 20 mA)

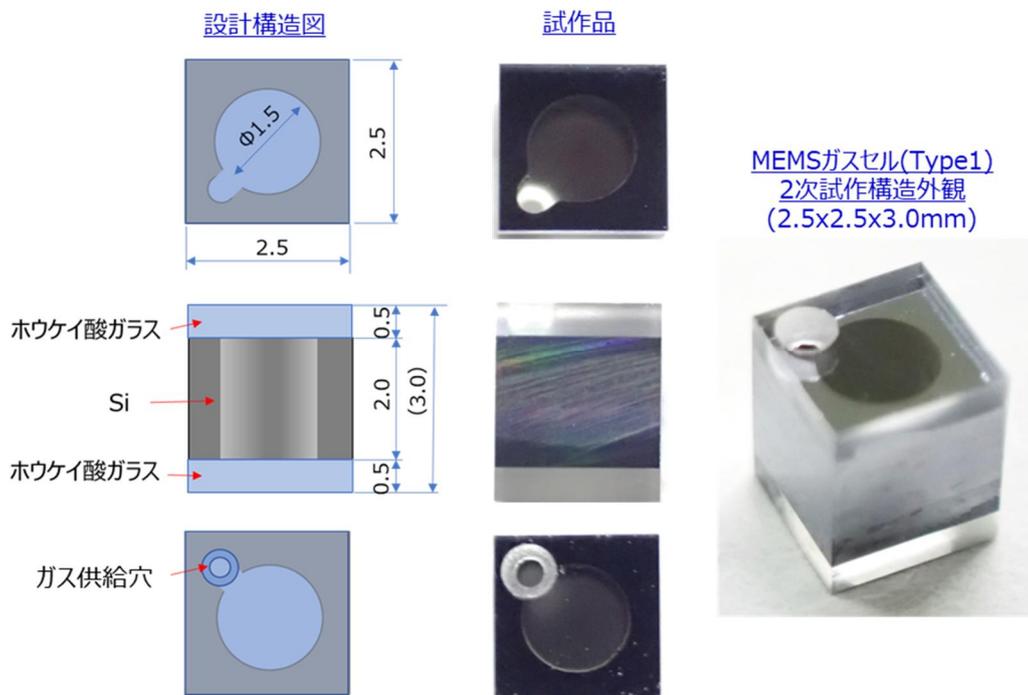


図(1-2-⑨.10) ヒータ電流により生じる磁場 (解析結果)

MEMSガスセル1次試作(Type 1)の試作結果を基に気密性が確保できる限界のサイズでMEMSガスセルの小型化を実現する2次試作構造を検討し作製した。図(1)-2-②.11にMEMSガスセル2次試作の設計構造図と作製したガスセル構造の外観を示す。作製プロセスは1次試作で開発した手法を踏襲した。Cs導入は前述のCs一括導入・封止方式(Type 1)を採用することとし、ガス供給穴を対角部に移動することで長辺サイズを縮小し正方形とした。ガスセル室の直径は、フォトダイオードの受光部径(1.5 mm)以上のサイズは不要であることから $\phi 1.5$ mmまで縮小した。また、ガスセル室の高さについては作製プロセス上可能な範囲で2 mmまで拡大した。その分、上下のホウケイ酸ガラスの板厚を0.5 mmに薄化することで、外形サイズの増加を抑制した。

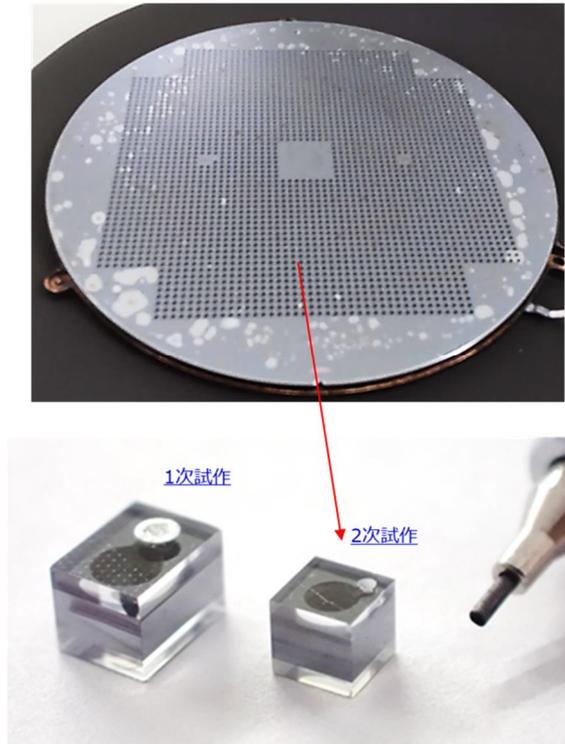
なお、1次試作で形成したガスセル表面のヒータ及びサーミスタ実装パッドは廃止し、ガスセルの温度制御は接合する基板に形成したヒータからの伝熱により行なうこととした。

図(1)-2-②.12にMEMSガスセル2次試作ウエハの外観と切り出したMEMSガスセル2次試作品単体の外観を1次試作品との対比で示す。作製したウエハには部分的に微細パーティクルのかみ込みに起因する未接合部が見られるが、8インチウエハ1枚からの理論取れ数は2880個であり、優れた量産性が期待できる。また、1次試作と比較してガスセル部の高さは33%拡大させつつ体積は44%縮小している。



図(1)-2-②.11 MEMSガスセル2次試作の設計構造図と作製したガスセル構造の外観

ガスセル形成ウエハ（取れ数2880個）

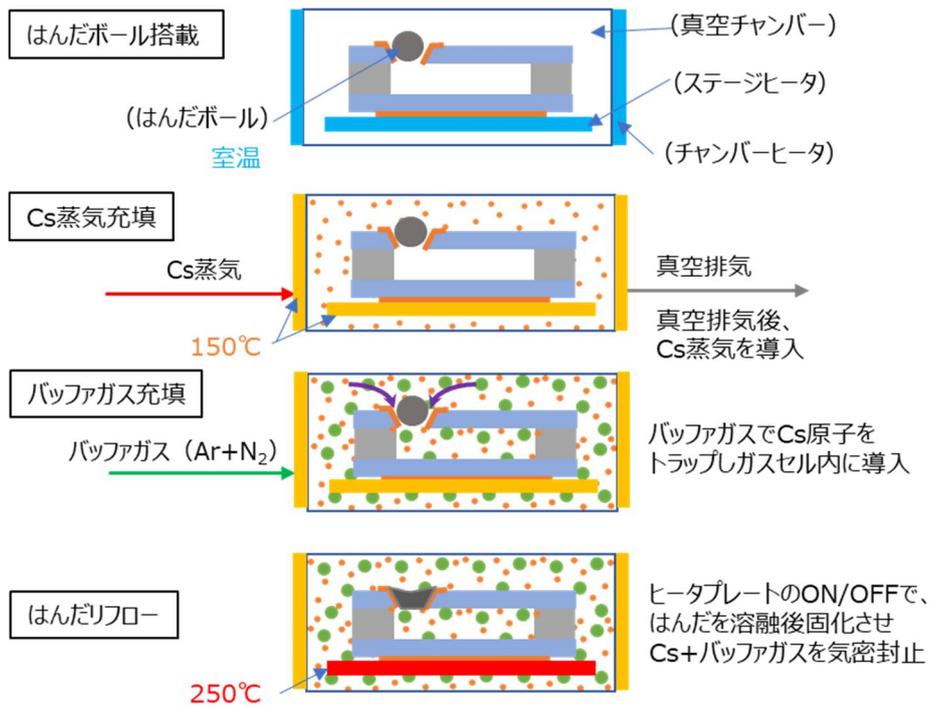


図(1)-2-②.12 MEMS ガスセル 2次試作形成ウエハと1次試作との比較

(c) MEMS ガスセルへの Cs 導入法の開発

(c)-1 Type 1: Cs 一括導入・封止方式（独自方式）

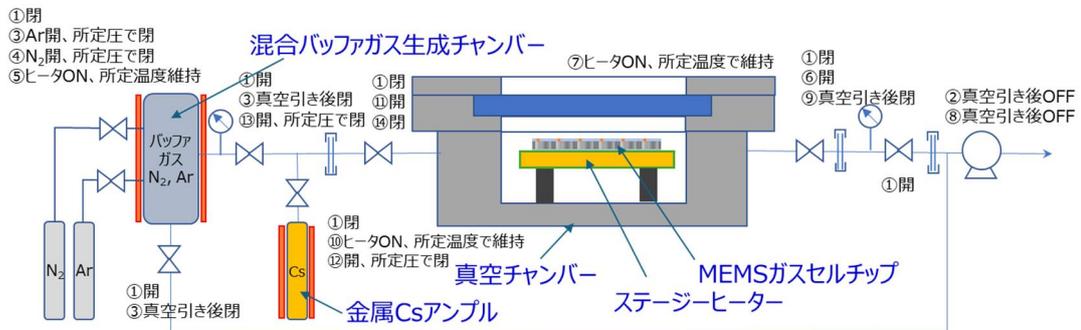
図(1)-2-②.13にMEMSガスセル1次試作(Type 1)のセシウム(Cs)導入法として考案したCs一括導入・封止方式のプロセス概容を示す。まず、真空チャンバー内に設けた加熱ステージ上に、はんだボールをガス供給穴に搭載したMEMSガスセルチップを設置し真空排気を行う。次に、真空チャンバー内を150℃程度に加熱し、Cs供給源からCs蒸気を真空チャンバーに導入、続けてバッファガスを所定の圧力まで供給する。この時、Cs原子はバッファガスに捕捉され、供給穴を通してガスセル内部に導入される。その後、加熱ステージを250℃程度まで昇温し、供給穴のはんだを熔融させる。供給穴の側壁には、下地金属膜(Ti/Ni/Au)が成膜されているため、はんだは供給穴を完全に塞ぐ形で濡れ広がる。最後に、加熱を停止しはんだを固化させて気密封止が完了する。



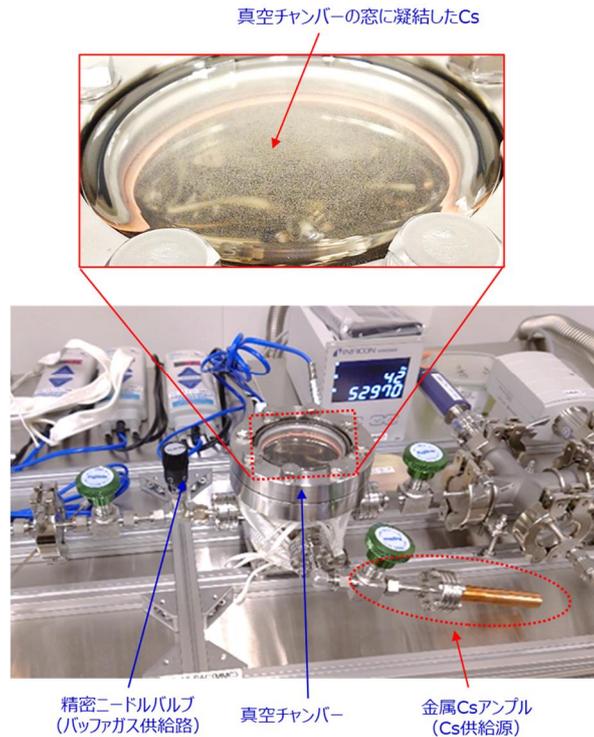
図(1)-2-②.13 セシウム(Cs)導入プロセス概要(Type 1)

図(1)-2-②.14にCs一括導入・封止方式を実験評価するために設計・作製したガス充填治具の構成を示す。ガス充填工程の初期設定として、まず、真空チャンバー内に設置されたステージヒータ上にMEMSガスセルチップを搭載し、各ガスセルのガス供給穴にはんだボールをセットする。また、真空ポンプにて、各チャンバー、及び配管内を真空引きした後、バルブ操作により、混合バッファガス生成チャンバーにN₂ガス、Arガスを供給し、所定混合比のバッファガスを予め生成しておく。ガス充填操作は、まず、金属Csアンブルから真空チャンバーに至る系を加熱し、Cs蒸気を真空チャンバーに導入する。その後、バッファガスを所定圧力になるまで真空チャンバーに供給することで、Cs原子を捕捉したバッファガスがMEMSガスセルのガス供給穴を通してガスセル内に導入される。最後に、ガス供給穴に搭載したはんだボールをステージヒータのON/OFF操作により熔融/固化させ、MEMSガスセル内にCs原子を捕捉したバッファガスが気密封止される。

上記ガス充填治具を用いてセシウム(Cs)の導入実験を実施した。図(1)-2-②.15にCs導入時の真空チャンバーの様子を示す。真空チャンバーの窓には凝結したCsが見られ、想定通りCsが飽和蒸気圧レベルまで充填していることが確認できる。



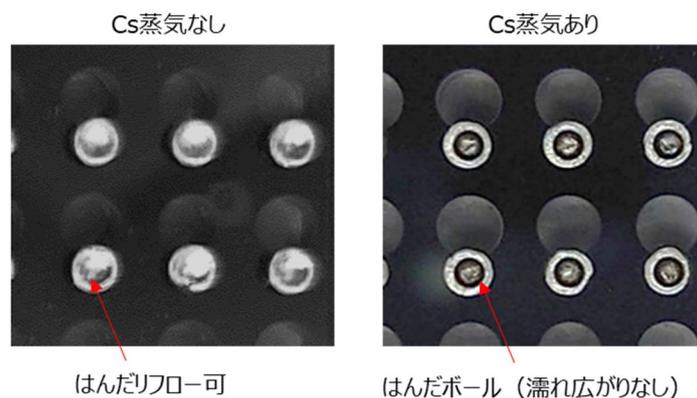
図(1)-2-②.14 ガス充填治具の構成



図(1)-2-②.15 セシウム(Cs)導入時のガス充填治具の状況

図(1)-2-②.16に一連のCs導入プロセス完了後のMEMSガスセルサンプルを示す。Cs蒸気を導入しない場合（左写真）は、はんだリフローによる封止が正常に行われているのに対し、Cs蒸気を導入した場合（右写真）は、はんだボールの濡れ広がりが見られずリフロー封止が不可であった。この時、はんだ下地金属膜(Ti/Ni/Au)に変色（黒色傾向）が見られることから、Csとの間で何らかの化合物が生成され、はんだの濡れ性を阻害しているものと考えられる。

一連の実験から、Csは想定以上に金属との反応性が高く、金属との接触は、化合物の生成など回避できない弊害をもたらすことが明確となった。そのため、はんだによる封止を断念し、封止材として低融点ガラスを採用する方向で計画を変更し、2次試作として検討することとした（(c)-3項に記述）。

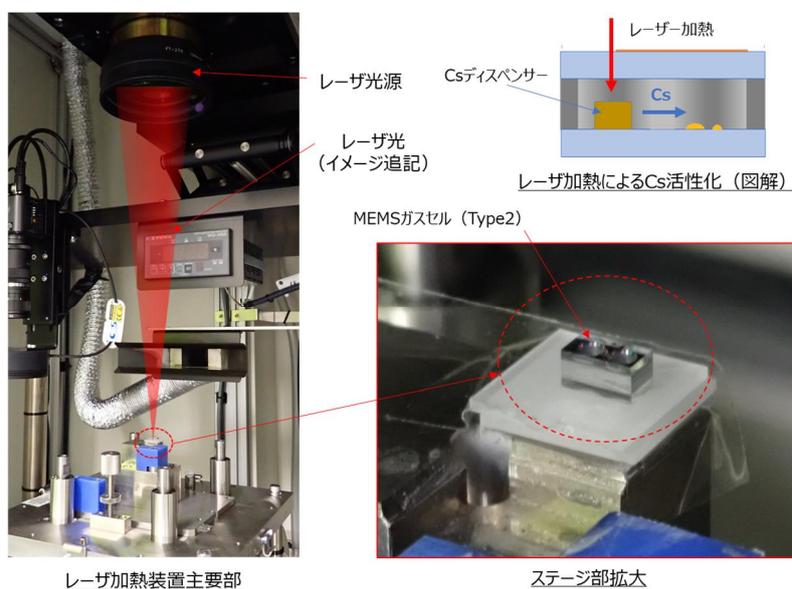


図(1)-2-②.16 Cs 導入プロセス完了後のはんだボールの状態（Cs 蒸気有/無での比較）

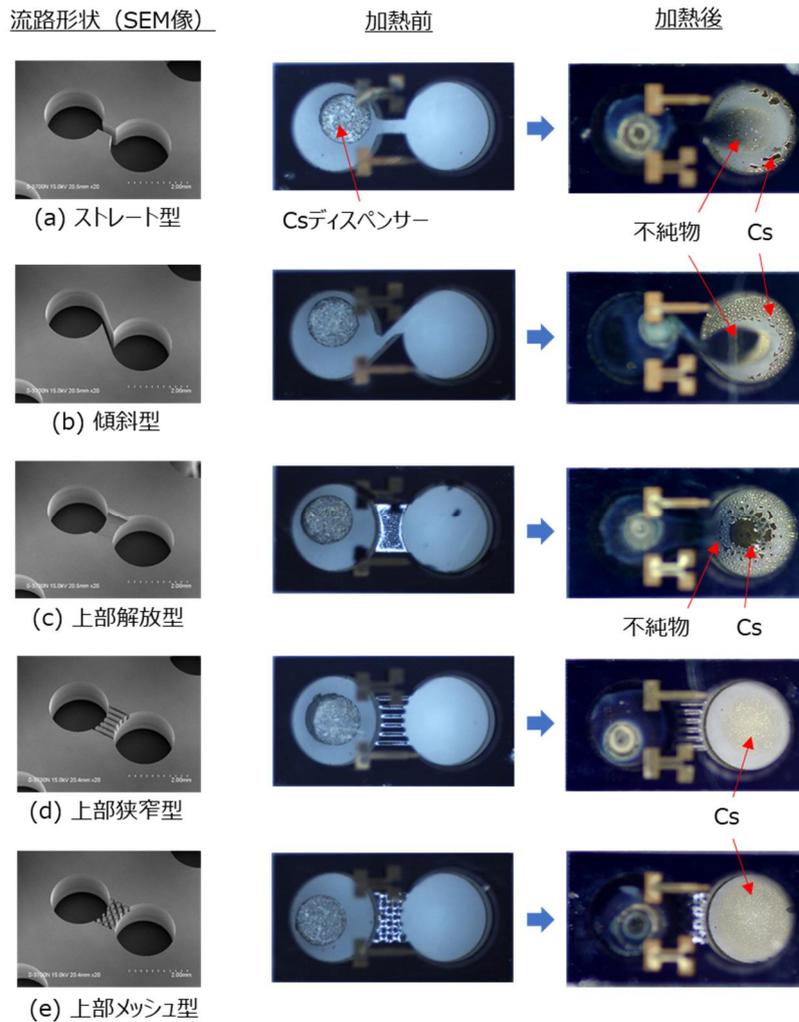
(c)-2 Type 2: ディスペンサー方式（従来方式の改良）

図(1)-2-②.17にMEMSガスセル1次試作(Type 2)のセシウム(Cs)導入法として採用したCsディスペンサー活性化プロセスと使用したレーザー加熱装置を示す。レーザー光の焦点位置にCsディスペンサーをセットし、レーザー出力3 W、時間10秒の照射で、ガラスに損傷を与えずCs活性化が可能となることを確認した。

図(1)-2-②.18の左列に今回試作した各種流路形状を示す。流路形状(a)ストレート型及び(b)傾斜型は、流路が底面ガラスに到達するまで掘り込まれた形状であり作製プロセスが簡単であるが、レーザー加熱時にCs以外にディスペンサーから分離する粒状破片がガスセル室に入り込む可能性がある。それを防止する形状として、流路深さを上部のみに制限した (c)上部解放型、(d)上部狭窄型及び(e)上部メッシュ型を考案した。図(1)-2-②.18の中央及び右列に各種流路形状におけるレーザー加熱（Cs活性化）前後のガスセル内部状態を示す。懸念した通り、流路形状(a)、(b)では、ガスセル室にディスペンサーから分離した不純物の堆積が見られる。一方、流路形状(c)~(e)では、不純物の堆積は顕著ではなく、特に流路幅を狭めた(d)、(e)では、活性化したCsも微細な粒状に凝結しており良好な結果となった。また、実施項目(3)-1にて、作製したガスセル(Type 2)を組込んだ量子部を作製し、Cs吸収線を測定した結果、明確な吸収特性がみられ、ガスセルとして機能することを確認した。



図(1)-2-②.17 セシウム(Cs)導入プロセス(Type 2)



図(1)-2-②.18 各種流路形状とレーザ加熱前後のガスセル内部状態

(c)-3 Type 1 (2次試作): Cs 一括導入・封止方式

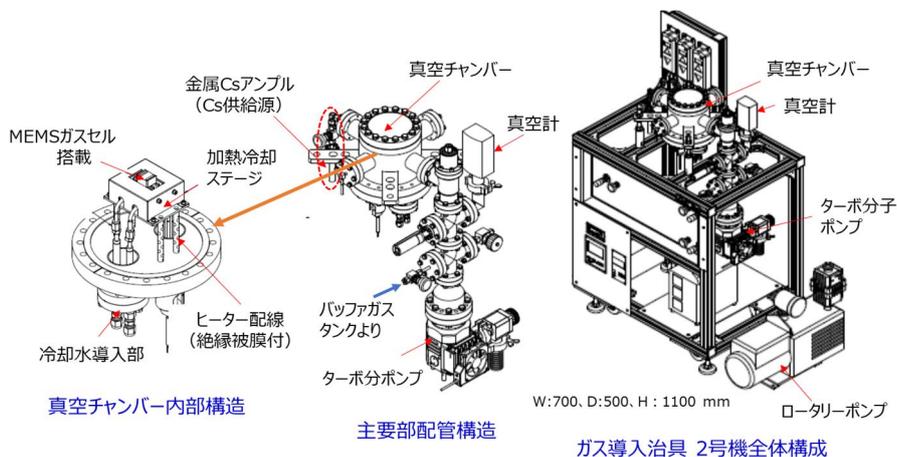
表(1)-2-②.2にMEMSガスセル構造(Type 1)にセシウム(Cs)及びバッファガス(N₂)を低融点ガラスにて封入するプロセスを示す。まず、低融点ガラスプリフォーム(円筒型)をガス供給穴に搭載したMEMSガスセルチップを真空チャンバー内に設けたステージ上に設置し真空排気を行う。この時、真空チャンバーは200℃程度に加熱し、ステージは50℃以下を保つように冷却する。次に、真空チャンバーに接続されたCs供給源の温度を300℃程度に加熱しCs蒸気を真空チャンバー内に導入する。この時、飽和蒸気圧133 Pa程度のCsが真空チャンバー内に充満し低温に保たれたステージにCsが凝結し始める。ステージ上のガスセル及びそのガス供給穴を通して内部にもCsが凝結する。続けてバッファガスを真空チャンバー内に所定の圧力まで供給することでガス供給穴を通してガスセル内にも供給される。この時、ステージ温度をガラスプリフォームの融点(約400℃)まで上昇させる時間とバッファガスを供給する時間とを同期させることにより、ステージ温度の上昇に伴いガスセル内に凝結したCsの蒸気がガス供給穴を通して排出されるのをバッファガスの流入で防止する。その後、ステージを420℃程度まで昇温しガラスプリフォームを完全に溶融させ、低融点ガラスがガス供給穴を塞ぐ形で充填される。最後に、ステージ温度を下げ低融点ガラスが固化した段階で封止が完了する。

表(1)-2-②.2 低融点ガラスによる Cs 封入プロセス

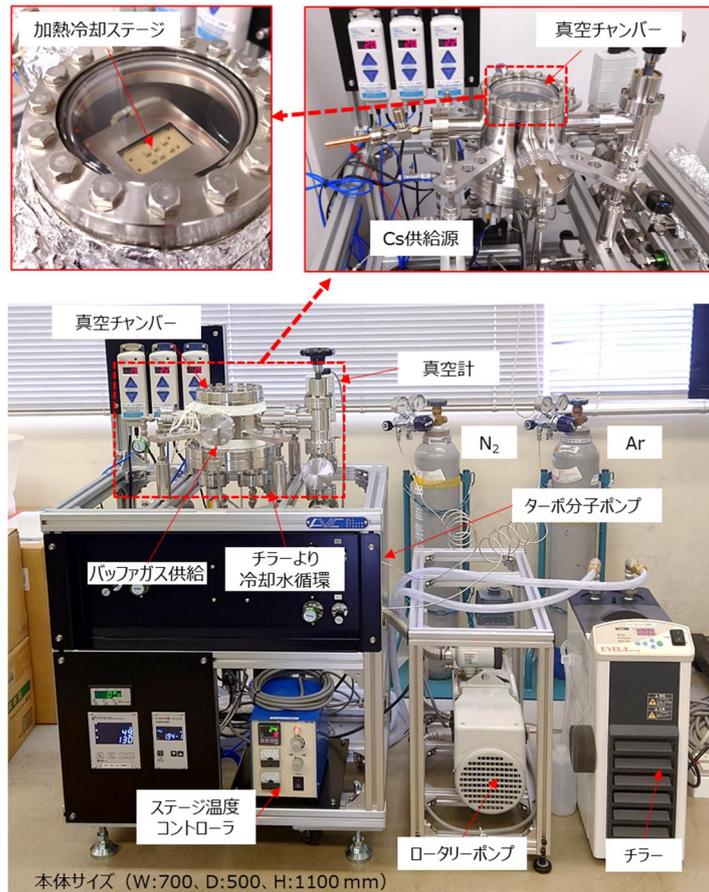
1	MEMSガスセルのガス供給穴に低融点ガラスプリフォーム搭載 →チャンバーを閉じ真空排気	
2	真空排気後Csを供給 (Cs供給源温度300°Cにて蒸気圧133Paまで供給される) →ステージ温度を低温に維持しガスセル内にCsを凝結させる	
3	バッファガスN ₂ を所定圧力まで供給 同時にステージを昇温 (昇温によるCs蒸散をバッファガスの供給で抑制)	
4	低融点ガラスの融点以上にステージを昇温 →ガラスプリフォームの溶融によりガス供給穴が埋められる	
5	ステージ温度を下げ低融点ガラスを固化させガスセル内を気密封止 →排気によりチャンバー内の残留Csを排出 →チャンバー内を大気圧に戻しMEMSガスセルを取出し	

図(1)-2-②.19に低融点ガラスに対応するよう設計したガス充填治具2号機の構成を、図(1)-2-②.20に作製したガス充填治具2号機の外観を各々示す。治具中央部の真空チャンバー（ビューポート付き）には、ヒータ加熱とチラーによる水冷が可能なステージが内蔵され、ロータリーポンプ及びターボ分子ポンプにより真空排気される。また、Cs供給源及びバッファガスタンクとは配管により接続されバルブ開閉により供給調整される。真空チャンバー及びCs供給源は周囲に巻かれたリボンヒータにより昇温される。主な仕様は以下の通り。

- ・ステージ最高到達温度：600℃（ガラス融点まで加熱可能）
- ・真空チャンバー加熱時のステージ温度：50℃以下（Csの凝結を促進）
- ・真空チャンバー内配線の絶縁被膜：有（Cs凝結による短絡を防止）
- ・真空チャンバー内到達真空度：10⁻³ Pa以下

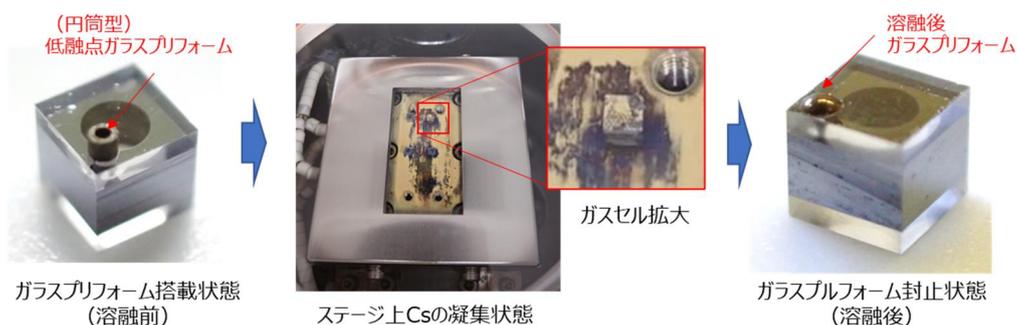


図(1)-2-②.19 ガス充填治具 2 号機の構成（低融点ガラス封止対応）



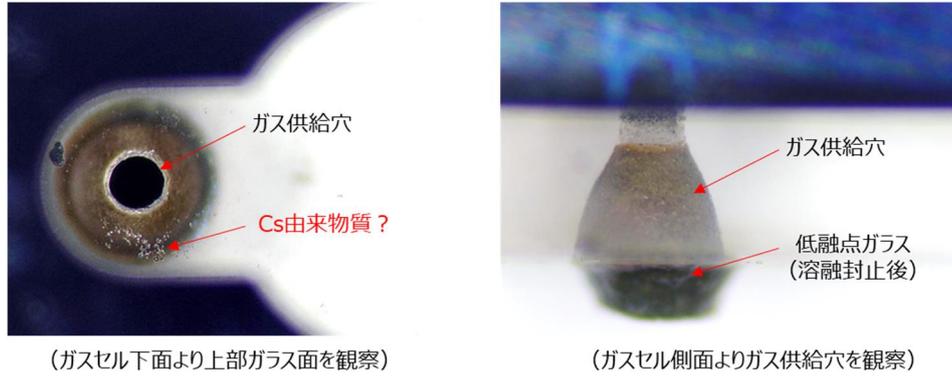
図(1)-2-②.20 ガス充填治具 2号機の外観

図(1)-2-②.21にCs封入プロセスの実施状況を示す。まず、左写真に示す通り、MEMSガスセル2次試作品に円筒型ガラスプリフォームを搭載し、真空チャンバー内のステージ上にセットする。真空引き後、Cs蒸気を供給することで、中央写真に示す通り、冷却されたステージ上及びガスセル上にCsが凝結していることが確認できる。その後、ガラスプリフォームを溶融・固化させることで右写真に示す通り、ガス供給穴が低融点ガラスで充填され封止されている。



図(1)-2-②.21 Cs封入プロセスの実施状況

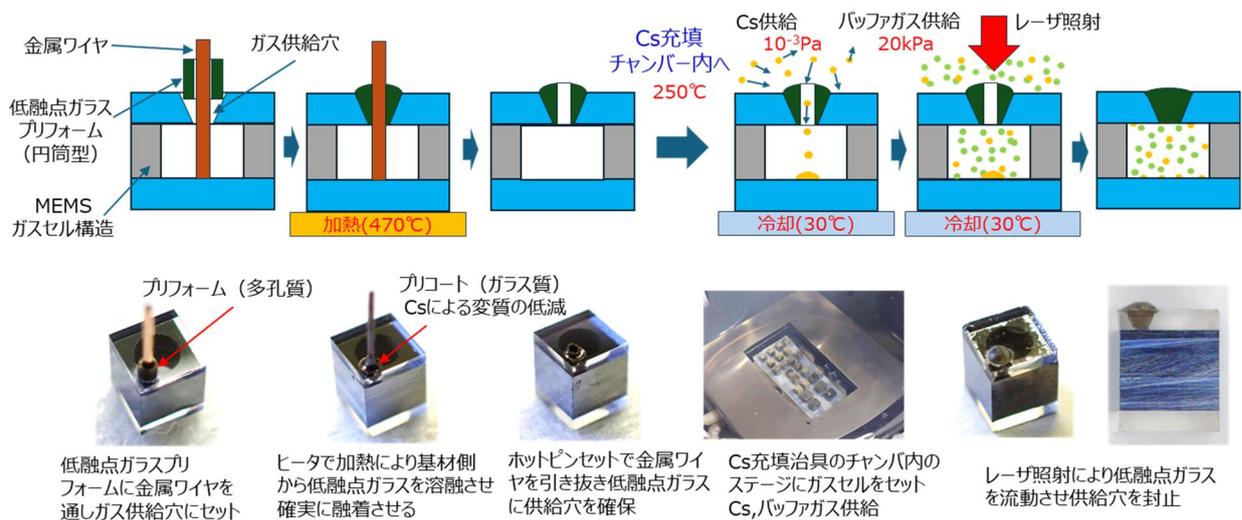
図(1)-2-②.22にCs封入プロセス実施後のガスセル内部観察結果を示す。左写真はガスセル下部ガラスを通して、ガスセル上部ガラスの内側を写したものである。ガス供給穴周辺にCs由来と思われる粒状の物質が見られた。この物質は、ガスセルをヒータで加熱しても移動することがなかったことから、純粋な金属Csではなく何らかの化合物となっているものと考えられる。また、多数のサンプルでの結果からもガスセル内部に残留するCsは見られず、その原因として、ガラス溶融温度まで加熱する間に凝結したCsがガスセル外部に蒸散したものと考えられる。右写真はガスセル側面からガス供給穴を写したものである。ガラスプリフォームは溶融し低融点ガラスがガス供給穴に充填されていることが確認できる。



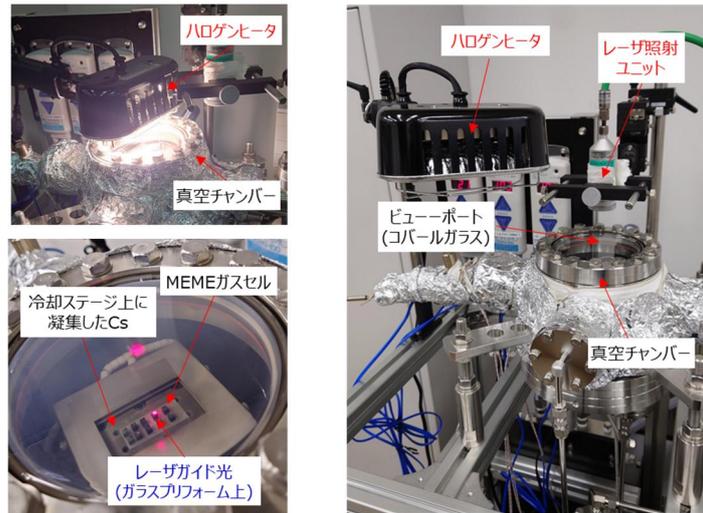
図(1)-2-②.22 Cs 封入プロセス実施後のガスセル内部観察結果

以上の結果を受け、ガス供給穴を低融点ガラスプリフォームにて溶融封止する際、Csの蒸散を抑制する方策として、ガスセル全体を加熱するのではなく、ガラスプリフォーム周辺のみレーザー光照射により局所加熱する方式を考案した。図(1)-2-②.23にレーザー光照射による局所加熱方式のプロセスを示す。下段には、MEMSガスセル2次試作構造にて実施した各工程における状態を示す。まず、円筒形のガラスプリフォームをガス供給穴に搭載し、ステージヒータにて加熱溶融させることで予め供給穴側面にコーティングする。この時、ガス供給穴が塞がれないように金属ワイヤを通し、封止ガラスが硬化した後、ホットピンセットで金属ワイヤを加熱し引き抜くことでガス供給穴の開口を確保する。この前処理により、封止ガラスとガス供給穴側面とを確実に密着させる。次に、ガスセルを真空チャンバーに設置し、真空引き後、Cs及びバッファガスを供給する。この時、ガスセル底面のステージを冷却しガスセル内へのCsの凝結を促進させる。その後、真空チャンバー外からビューポートを通してレーザー光を封止ガラスに照射することで溶融封止が実施される。

図(1)-2-②.24にレーザー光照射による局所加熱方式でのセットアップを示す。図(1)-2-②.20に示すCs充填治具2号機にレーザー照射ユニットとハロゲンランプを追加している。ハロゲンランプは、ビューポートに凝結するCsを輻射熱で蒸散させ、レーザー光の透過性を確保するためのものである。



図(1)-2-②.23 レーザ光照射による局所加熱方式の Cs 封入プロセス及び各工程における実サンプルの状態

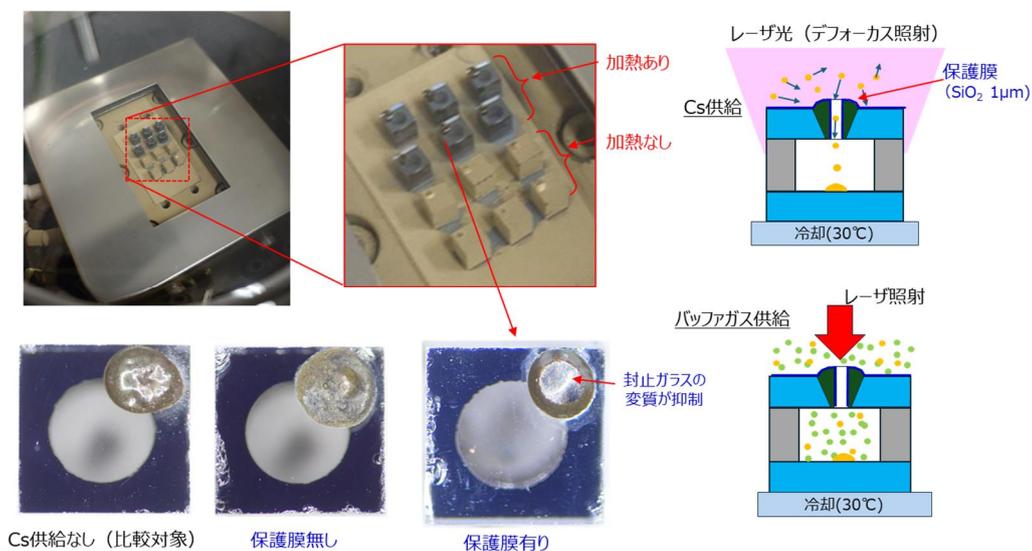


図(1)-2-②.24 レーザ光照射による局所加熱方式のセットアップ

図(1)-2-②.25にレーザー照射による局所加熱方式でのCs封入プロセスの実施状況を示す。左上の写真に示す通り、冷却されたステージ上及びガスセル上にCsが凝結している様子が確認できる。一方、ガスセル上側2列にはCsの凝結が見られないが、これは、Csによる封止ガラスの変質を抑制することを目的として、デフォーカスしたレーザー光をガスセル上面に照射し昇温させることでガスセル上面へのCs凝結を防止しているためである。Cs供給開始後約60分間放置した後、バッファガスを所定圧力まで供給し、レーザー焦点をガス供給穴近傍に合わせて照射することで封止ガラスを熔融させ封止した。

封止後のガスセルの外観を図左下に示す。ここでは、Csによる封止ガラスの変質を抑制するため、封止ガラス上面には保護膜としてSiO₂ (厚さ1 μm) を成膜している。中央は保護膜無し、右側は保護膜有りの外観である。保護膜無しでは、封止ガラスに光沢がなく多孔質化している。一方、保護膜有りでは、比較のため示したCsなしでの封止結果 (左側) と同等の封止ガラスの状態が得られ、保護膜の効果が確認された。

実施項目(3)-2にて、ここで作製した2次試作構造のMEMSガスセルを組込んだ量子部を作製し、Cs吸収線を測定した結果、僅かな吸収特性は見られたが、ガスセルとして機能するものは得られなかった。保護膜の効果などにより、反応性の高いCs雰囲気において、低融点ガラスによる気密封止は可能となったが、小径のガス供給穴を通して安定的に必要な量のCsを供給する手法の開発が課題として残された。



図(1)-2-②.25 レーザ照射による局所加熱方式でのCs封入実施状況

(c)-4 考察（課題と解決策）

ガスセルの量産化、低価格化に向けて、MEMS微細加工技術を適用し、ウエハレベルで一括製造を可能とするMEMSガスセル製造技術の開発を実施した。

Csディスペンサーを利用する従来手法では、流路に改良を加えた新構造(Type 2)を提案し、その試作品にてCs吸収線を測定した結果、明確な吸収特性が見られガスセルとして機能するものが得られた。ただし、Csディスペンサーを利用する従来手法では、実際の使用時に不要となるディスペンサーの残留が小型化の障害となる。また、そのゲッター作用によりバッファガス圧が変動しドリフトの要因となるとの指摘もある。そこで、ディスペンサーを利用することなく、Csを一括導入・封止を可能とする独自方式(Type 1)を新たに提案し、その実現に向けて研究開発を進めた。本プロジェクト期間内に、結果的には完成に至らなかったが、実験評価において都度、不具合点の分析、対策案の検討を行い、その過程で本方式の実現に向けて重要な幾つかの事項が明らかとなった。

本方式のポイントとなる工程は、ガスセルに設けられたガス供給穴の気密封止工程及びガスセル内へのCs導入工程である。表(1)-2-②.3にガス供給穴の気密封止、表(1)-2-②.4にガスセル内へのCs導入の各工程における主要な実験評価内容と判明事項を示す。最上段の行に示す内容から実験評価を始め、実験手段とその結果得られた現象から原因を推定し最右列に判明事項とその対策を示した。その対策は次段の行に示す手段に反映され同様に順次対策を加え実験評価を行った。

最終的に、ガス供給穴の気密封止については、表の最下行右列に示す通り、封止材として低融点ガラス（フリットガラス）を用い、予めガス供給穴側面に封止材（低融点ガラス）をコーティングし、その表面にCsに耐性のある保護膜(SiO₂)を成膜した状態まで処理を施すことで、Cs蒸気が充填された真空チャンバー内であってもレーザーによる局所加熱にて良好な気密封止が可能であることが判明した。

ガスセル内へのCs導入については、表の最下行右列に示す通り、ガスセル自体を低温に保持することでCsの凝結を促進するとともに、Cs蒸気圧のみの高真空状態ではなくバッファガスも供給された低真空状態に保ち、気体の拡散現象を利用することで初めてガスセル内へのCs導入が確認できた。ただし、ガスセルとして機能するに十分なCs導入量は得られなかった。これらの結果から、小径(φ0.5 mm)のガス供給穴を通して十分な量のCsを導入することは、拡散などの受動的な現象を利用するだけでは困難であることが判明した。解決策として、Cs原子を帯電させ、ガスセル内に引込む方向に電界を印加するなど能動的にCs導入を可能とする装置の開発が最も有効であると考えられる。

表(1)-2-②.3 ガス供給穴の気密封止工程における実験評価内容と判明事項

工程	手段 (対策)			現象	(推定) 原因	判明事項 ⇒対策	
	封止材	封止材形態	加熱方法				
ガス供給穴の気密封止	はんだ (SnAg)	ガス供給口側面にはんだ下地金属膜 (Ti/Ni/Au)を形成し、はんだボールを搭載	全体加熱 (ヒータによりガスセル全体を加熱)	はんだの濡れ広がり阻害され封止できず	下地金属膜表面のAuがCs蒸気との接触により化し変質、はんだ濡れ性消失	Csは金属との反応性が高く安定なAuであっても化し変質することが判明、封止材として金属の使用は不可 ⇒封止材として低熔点ガラスを採用	
		はんだを予めガス供給穴側面に熔融接合させ中心部に穴を確保		はんだの溶融が阻害され封止できず	はんだがCs蒸気との接触により化し変質、融点上昇		
	低熔点ガラス (フリットガラス)	ガス供給穴に円筒型低熔点ガラスを搭載		局所加熱 (レーザーによりガス供給穴近傍のみ加熱)	低熔点ガラスで供給穴の封止は可能、ガスセル内にCsの凝結は無し	低熔点ガラスの融点以上に加熱することによりガスセル内のCsが蒸散	ガスセル内のCsを蒸散させることなく封止材を溶融させる方法として全体加熱は不適切 ⇒ガス供給穴の低熔点ガラス近傍のみ局所加熱する方法を採用
					低熔点ガラスとガス供給穴側面との密着は局所加熱では不十分 ⇒Cs供給前に予め全体加熱により低熔点ガラスとガス供給穴側面とを密着させるプリコートを採用	低熔点ガラスの融点以上に加熱することによりガスセル内のCsが蒸散	低熔点ガラスとガス供給穴側面との密着は局所加熱では不十分 ⇒Cs供給前に予め全体加熱により低熔点ガラスとガス供給穴側面とを密着させるプリコートを採用
		低熔点ガラスを予めガス供給穴側面に熔融密着させるプリコートを実施 (中心部に穴は確保)	低熔点ガラスは溶融し穴は塞がれたが、気密性は不十分	低熔点ガラスがCs蒸気との接触により化し多孔質化	低熔点ガラス (成分不明) の構成元素がCsと化し変質 ⇒低熔点ガラス表面に保護膜としてSiO ₂ をCVD装置にて成膜		
		低熔点ガラス表面に保護膜(SiO ₂)1μmを成膜	Csによる低熔点ガラスの変質が抑制され気密封止が可能となった		低熔点ガラスを予めガス供給穴側面にコーティングし、その表面に保護膜を成膜した状態でレーザーによる局所加熱を行えば、Cs雰囲気中であっても良好な気密封止が可能		

表(1)-2-②.4 ガスセル内へのCs導入工程における実験評価内容と判明事項

工程	手段 (対策)		現象		(推定) 原因	判明事項 ⇒対策
	ガスセル設置状態	Cs,バッファガス供給手順	チャンバー内	ガスセルCs導入		
ガスセル内へのCs導入	チャンバー加熱 (200℃) ステージ冷却なし	Cs供給時、真空排気継続 バッファガス供給後、即ガスセル封止	ガスセル上にCs凝結なし	× 不可	チャンバー内のCs蒸気圧が低く凝結せず	チャンバー加熱によりステージ及びガスセルの温度が上昇、Csの凝結を阻害 ⇒ステージ冷却機構追加
		Cs供給時、真空排気停止 バッファガス供給後、即ガスセル封止	ガスセル上に僅かにCs凝結	× 不可	チャンバー内のCsは飽和蒸気圧に達するがステージ温度も上昇し凝結せず	
	チャンバー加熱 (200℃) ステージ冷却あり	Cs供給時、真空排気停止 長時間*維持 バッファガス供給後、即ガスセル封止 *60分(封止材の変質限界)	ステージ及びガスセル上に液滴状にCs凝結	× 不可	Cs凝結が促進されたが、真空中でのCs原子の平均自由行程が大きく供給穴を通過する確率が低い	真空中ではCs原子がガス供給穴を通過する確率が低く、ガスセル内への充分な量のCs導入は困難 ⇒バッファガス供給による気体拡散によりCsを導入
		Cs供給時、真空排気停止 バッファガス供給し、長時間*維持、その後ガスセル封止 *60分(封止材の変質限界)	ステージ及びガスセル上に多量のCsが凝結	△ 僅かに吸収線確認	バッファガスの供給によりCs原子の平均自由行程が大幅に短縮され気体拡散によりガス供給穴から導入された	バッファガス導入による気体拡散の効果は認められるが充分な量のCs導入には至らない ⇒Cs原子を帯電させ電界により指向性を持たせることで、強制的にCs原子をガスセル内に導入する装置の開発が必要

参考文献

- [1] M.H. Kwakernaak, S. Lipp, S. McBride, P. Zanzucchi, W.K. Chan, V.B. Khalfin, H. An, R.D. Whaley, Jr., B.I. Willner, A. Ulmer, et al. “Components for batch-fabricated chip-scale atomic-clocks”, Proceedings of the 36th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, Washington, 2004, pp. 355–368.
- [2] R. Lutwak, D. Emmons, T. English, W. Riley, A. Duwel, M. Varghese, D.K. Serkland, G.M. Peake, “The chip-scale atomic clock-recent development progress”, Proceedings of the 35th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, San Diego, 2003, pp. 467–478.
- [3] L. Liew, S. Knappe, J. Moreland, H. Robinson, L. Hollberg, J. Kitching, “Microfabricated alkali atom vapor cells”, Appl. Phys. Lett. 2004, 84, PP. 2694–2696.
- [4] R. Straessle, M. Pellaton, Y. Pétremand, D. Briand, C. Affolderbach, G. Miletì, N.F. de Rooij, “Low-temperature indium hermetic sealing of alkali vapor-cells for chip-scale atomic clocks”, Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2012, PP.361-364.
- [5] P. Knapkiewicz, J. Dziuban, R. Walczak, L. Mauri, P. Dziuban, C. Gorecki, “MEMS caesium vapour cell for European micro-atomic-clock”, Procedia Eng. 2010, 5, PP. 721–724.

実施項目(1) 周波数シフトとその変動要因の評価

実施項目(1)-2 バッファガスシフト解明用種々ガスセルの試作及び評価

実施項目(1)-2-③ MEMS ガスセル(単結晶サファイア-Si接合)の試作(担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

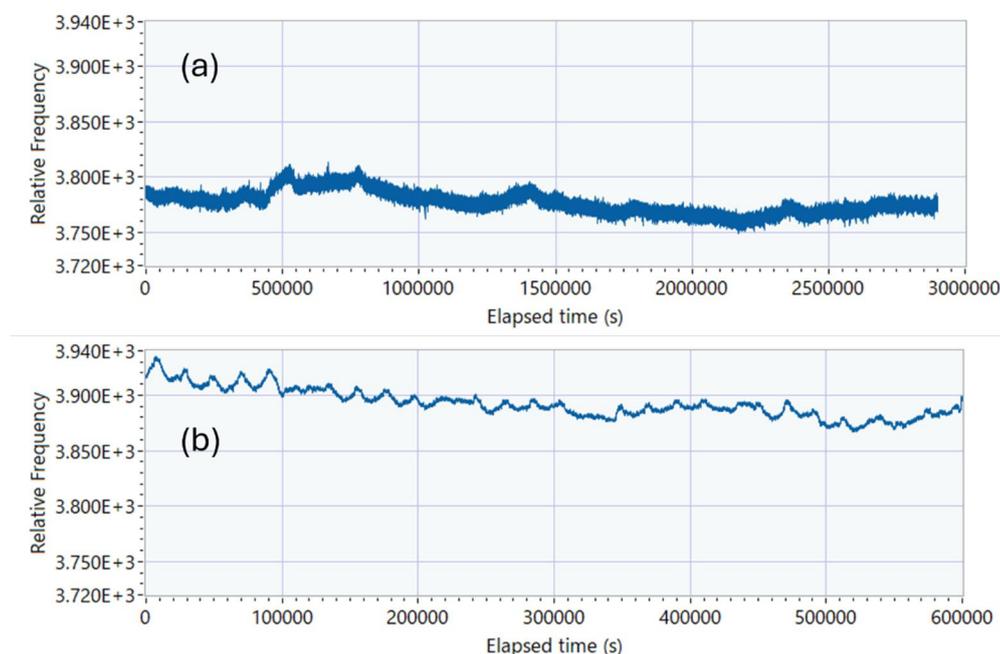
小型原子時計のガスセル内部へのガス透過の影響を極小化することが期待できる単結晶サファイア及びSiを用いて、Si-サファイアガスセルを試作した。また、CPT共鳴スペクトルからバッファガスシフトを評価し、低ガス透過性ガスセルを実現した。

実施項目(1) 周波数シフトとその変動要因の評価

実施項目(1)-3 ゼーマンシフト低減用磁気シールドの設計及び試作(担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

ゼーマンシフトは外部磁場とアルカリ原子の磁気モーメントが相互作用することで発生する周波数シフトである。一般的に原子時計を構築する際には、外部磁場の直接的な影響を避けるために制御された磁場を印加し、磁気量子数 $m_F=0$ (F は核スピン角運動量量子数 I と全角運動量量子数 J の合成角運動量量子数) の状態にある原子を選択的に利用する。 m_F に比例する 1 次ゼーマンシフトが無いため、磁場変動に対する周波数変動が他の遷移よりも小さいことが理由の一つである。一方、 $m_F=0$ でも 2 次ゼーマンシフトが存在するため、その大きさを評価し原子時計全体の性能に与える影響を見極める必要性が生ずる。

前述の目的のためプロトタイプ実験室モデルを用い、 $m_F=0$ の時計遷移における 2 次ゼーマンシフトの評価を試みた。図(1)-3.1 に $m_F=1$ 、及び $m_F=2$ に関わる磁場敏感遷移に安定化した際の周波数変動観測結果を示す。 $m_F=1$ は、時計遷移から相対周波数で約 3.2×10^{-5} の周波数シフトを持つ遷移線に安定化された。凡そ $38 \mu\text{T}$ の磁場が印加されていると見積もれる。 $m_F=2$ は、 $m_F=1$ の 2 倍の周波数シフトで、約 6.4×10^{-5} あった。



図(1)-3.1 (a) $F=3, m_F=1 \leftrightarrow F=4, m_F=1$ の遷移への安定化による周波数変動観測(実験室環境)、(b) $F=3, m_F=2 \leftrightarrow F=4, m_F=2$ の遷移への安定化による周波数変動観測(実験室環境)

図(1)-3.2に、先述した(a)、(b)の時系列データから算出したアラン標準偏差を示す。水色線が $m_F=2$ 、赤線 $m_F=1$ に安定化、青線は時計遷移に安定化したときのアラン標準偏差であった。磁場敏感遷移で観測されたアラン標準偏差は凡そ平均時間 $\tau > 2000 \text{ s}$ の領域で $t^{1/2}$ のランダムノイズ特性を示し、 $m_F=2$ は $m_F=1$ の 2 倍の揺らぎの大きさを示した。 $m_F=2$ 、及び $m_F=1$ で観測されたアラン標準偏差をそれぞれ $\sigma_{y, m_F=2}(\tau)$ 、 $\sigma_{y, m_F=1}(\tau)$ とすると、時計遷移において 2 次ゼーマンシフトにより劣化に寄与するノイズ成

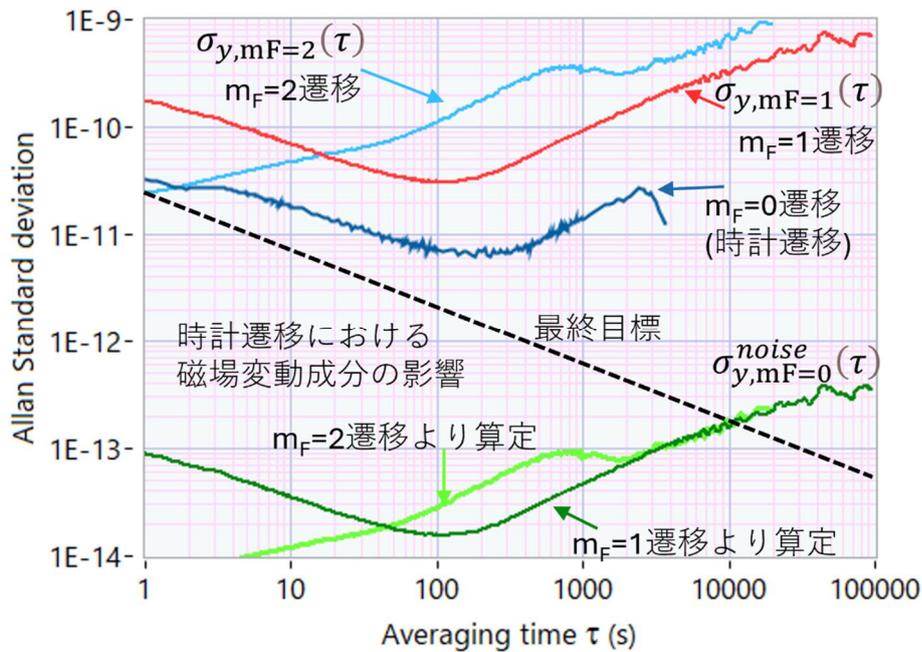
分のアラン標準偏差 $\sigma_{y,mF=0}^{noise}(\tau)$ は、

$$\sigma_{y,mF=0}^{noise}(\tau) = 16 \left(\frac{\delta v_{1,1}}{v_0} \right) \sigma_{y,mF=1}(\tau) \quad \text{式(1)-3.1}$$

$$\sigma_{y,mF=0}^{noise}(\tau) = 4 \left(\frac{\delta v_{2,2}}{v_0} \right) \sigma_{y,mF=2}(\tau) \quad \text{式(1)-3.2}$$

として示すことができる。ここで、 $\delta v_{1,1}/v_0$ 、 $\delta v_{2,2}/v_0$ は時計遷移からの相対周波数シフトである。図(1)-3.2のグラフ中に $\sigma_{y,mF=1}(\tau)$ から算定したノイズ成分を濃緑線、 $\sigma_{y,mF=2}(\tau)$ から算定したノイズ成分を淡緑線として示す。平均時間 $\tau > 2000$ sの領域では2種類の異なるアラン標準偏差結果から算定したノイズ成分が非常に良く一致している。また、その値は平均時間 $\tau \sim 10000$ s付近で 2×10^{-13} を示し、プロトタイプ最終目標を示すラインと交差している。

以上の事象から本評価方法において、プロトタイプ内の磁場変動によるノイズ成分を十分に抽出可能であることが判明した。時計遷移のアラン標準偏差は磁場変動によるノイズ成分よりも2桁程度大きいため、現状では磁場変動はプロトタイプ性能において制限要因とはなっていない。但し、他の制限要因が取除かれ、 $\tau \sim 10000$ s付近で 2×10^{-13} のアラン標準偏差(最終目標)が得られるようになった場合には、磁場変動によるノイズ成分を低減するために磁気シールドのレイヤーを増やす等の対策によりシールドファクターの向上を図る必要がある。



図(1)-3.2 $m_F=0$ (時計遷移、青線)、 $m_F=1$ (赤線)、 $m_F=2$ (水色線)へ安定化した際のアラン標準偏差、及び2次ゼーマンシフトが時計遷移に付加する算定雑音成分 $m_F=1$ (濃緑線)、 $m_F=2$ (淡緑線)

実施項目(1) 周波数シフトとその変動要因の評価

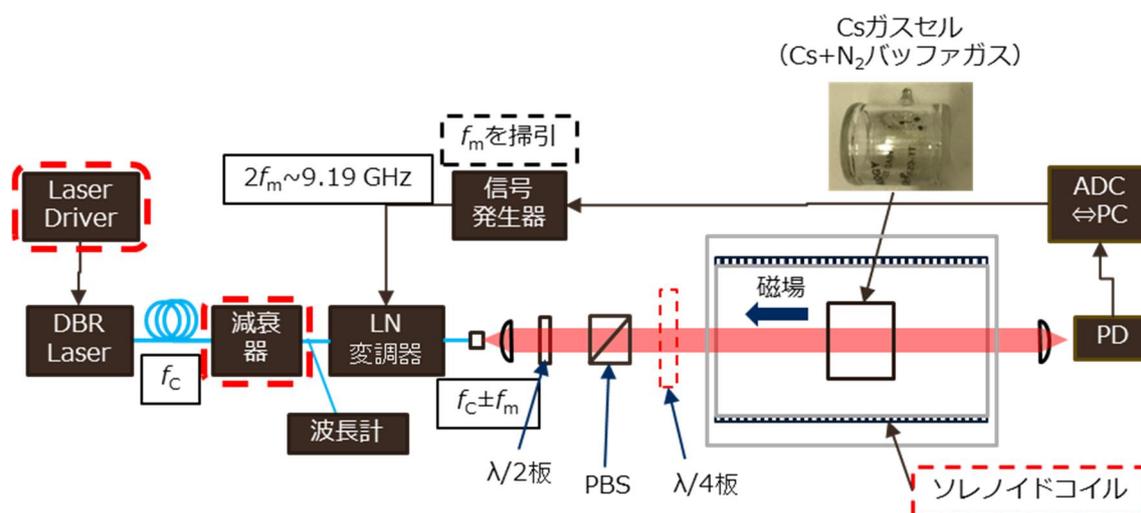
実施項目(1)-4 各種シフトの相関メカニズムの評価

実施項目(1)-4-① 周波数変動低減のための機械学習に基づく変動モデル構築(担当：日本電気株式会社)

本項目は、短い時間スケールでのHS-ULPACの周波数変動要因解明を目的として設定されている。パッケージ化されたプロトタイプモジュールでは困難な、構成要素ごとの影響を評価するために、光学定盤上に原子共鳴信号観測のための各構成要素を配置した光学定盤モデルを構築した。これを用いて、ガスセル位置での磁場、温度、励起光の偏光などの各要素が、共鳴信号にどのような影響を与えるのか、詳細に評価した。合わせて、AI(Artificial Intelligence)技術を用いて周波数変動モデルの構築に取り組んだ。実施項目(5)-1関連で行った各種環境変動測定の結果ならびに車載実験の結果を材料に、機械学習技術を用いた解析を行い、環境変動由来の周波数変動を予測しうるかを検討した。

(a)光学定盤モデル構築

CPT共鳴の検出には、アルカリ金属原子が封入されたガスセル、2つの周波数を有する励起光、透過光量を検出する光検出器、が最低限必要である。図(1)-4-①.1に、今回構築したCPT共鳴検出装置の機能ブロック図を示す。



図(1)-4-①.1 CPT共鳴検出装置の機能ブロック図

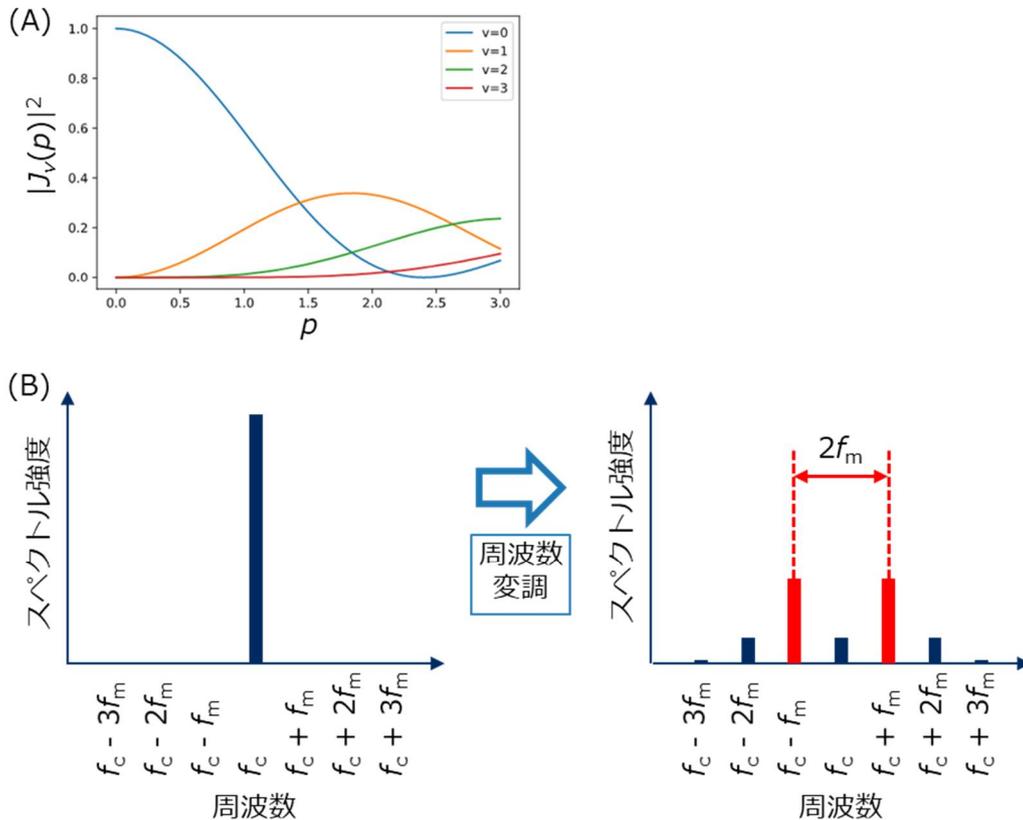
2つの周波数 ($f_c \pm f_m$) を有する励起光は、DBRレーザから発振される単色光 (f_c) に、信号発生器とLN変調器を用いて周波数変調 (f_m) をかけ、サイドバンドを生成することで実現している。励起光強度は電圧可変光減衰器によって制御され、単色光のキャリア周波数(波長)は波長計でモニターしている。キャリア周波数 f_c を有する正弦波に、振幅 p 、周波数 f_m の変調をかけると、以下の式の通り、周波数 $f_c + \nu f_m$ ($\nu = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$) のサイドバンドが生成される。

$$\cos(2\pi f_c t + p \sin(2\pi f_m t)) = \sum_{\nu} J_{\nu}(p) \cos((f_c + \nu f_m) 2\pi t) \quad \text{式(1)-4-①.1}$$

ここで、 ν 次のサイドバンドの振幅である $J_{\nu}(p)$ は ν 次のベッセル関数であり、変調信号の振幅 p に応じて図(1)-4-①.2(A)のように値が変動する。単色光に対して周波数変調をかけたときの周波数スペクトルの一例を図(1)-4-①.2(B)に示しているが、生成されるサイドバンドのうち、差周波数が $2f_m$ である2つの周波数、 $f_c + f_m$ と $f_c - f_m$ をCPT共鳴の励起光として用いる。なお、単色光の波長は図2のD₁線の周辺で変調しているため、励起準位が $6^2P_{1/2}$ の $F' = 3$ あるいは $F' = 4$ のいずれかの磁気副準位であるCPT共鳴が検出される。光ファイバで伝搬された励起光は、コリメータを介して径1.7 mmのガウスビームとなり、ガスセル位置に照射される。

ガスセル内部には固体のセシウム原子が封入されている。セル温度に応じた蒸気圧の気体状のセシウム原子が発生し、これがCPT共鳴に寄与する。また、セシウム原子に加え、バッファガスとして窒素が封入されている。バッファガスは、セシウム原子と容器壁面、あるいはセシウム原子同士の衝突確率を減らし、共鳴状態の緩和を低減することを目的として封入されてい

る。ガスセル容器は励起光を吸収しにくいガラス製で、長さ25 mm、直径20 mmの円筒形状であり、円筒の軸方向に励起光が照射される。印加磁場がCPT共鳴に与える影響を評価するため、ガスセルは磁場印加用のソレノイドコイル及び磁気シールドに覆われている。



図(1)-4-①.2 周波数変調によるサイドバンド生成：(A) サイドバンドの振幅に対応するベッセル関数、(B) キャリア周波数 f_c の単色光と、単色光に f_m の周波数変調をかけた光の周波数スペクトルの一例。

ガスセルを透過した光はフォトダイオードの受光面に入り、透過光量が電圧として測定される。励起光の変調周波数 f_m を掃引しつつ透過光量を測定することで、透過光スペクトルが得られる。CPT共鳴を生じる基底準位間の遷移周波数と励起光の差周波数($2f_m$)が一致するときに、セシウム原子による光吸収が抑制されるため、透過光量の増大としてCPT共鳴を検出することができる。

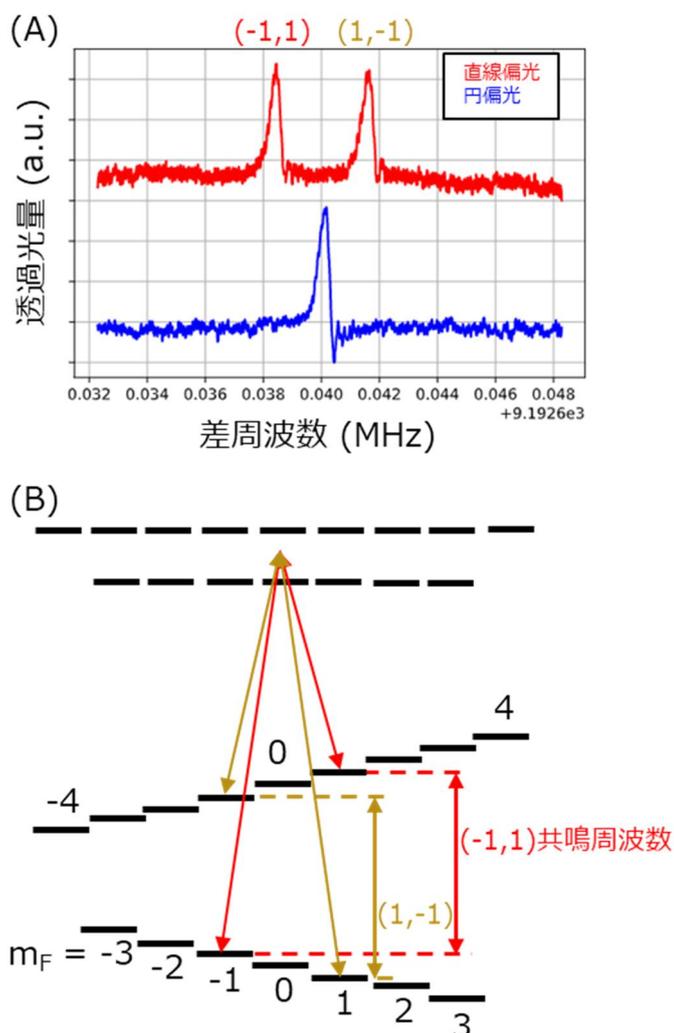
今回構築した実験系では、図(1)-4-①.1に示した機能ブロック図のうち、赤い点線で囲った箇所を外部制御することで、各種パラメータの変動に対するCPT共鳴の応答を測定できる。具体的には、DBRレーザの駆動電流を操作することでキャリア周波数 f_c を制御し、CPT共鳴にかかわる励起準位の選択を行う。また、単色光の強度は、電圧可変光減衰器によって制御されている。励起光の偏光状態は、直線偏光あるいは円偏光となるよう、偏光板($\lambda/2$ 板及び $\lambda/4$ 板)を用いて制御されている。ソレノイドコイルの印加電流を操作して、ガスセル位置に生じる磁場の向き及び強さを制御している。

以上、周波数変動データ取得のため光学定盤上プロトタイプを作製し、原子時計の動作原理であるCPT共鳴を検出するシステムを構築した。Cs原子ガスをガラス容器に封入したガスセルに励起光を照射し、その透過光を測定することでCPT共鳴信号を検出する。外部パラメータに対するCPT共鳴信号の応答を調べるため、励起光の強度や偏光状態、ガスセルの印加磁場、レーザ波長等を変調する機構を構築した。

(b)光学定盤上プロトタイプにおける新たな原子時計動作方式の実証

光学定盤上プロトタイプで得られた成果として、新たな原子時計動作方式の実証実験の結果を報告する。図(1)-4-①.3 (A) に、直線偏光、円偏光のそれぞれを励起光として用いた場合に

検出されるCPT共鳴を示す。なお、測定はガスセルに磁場139 μT を印加した状態で行っている。円偏光照射時には(0,0)共鳴が単一のピークとして検出されたのに対し、直線偏光を照射した場合には、近接した共鳴周波数を有する2つのピークが検出された。これらはそれぞれ、図(1)-4-①-(b).3 (B) に示す励起構造を有する(-1,1)共鳴及び(1,-1)共鳴に対応する。

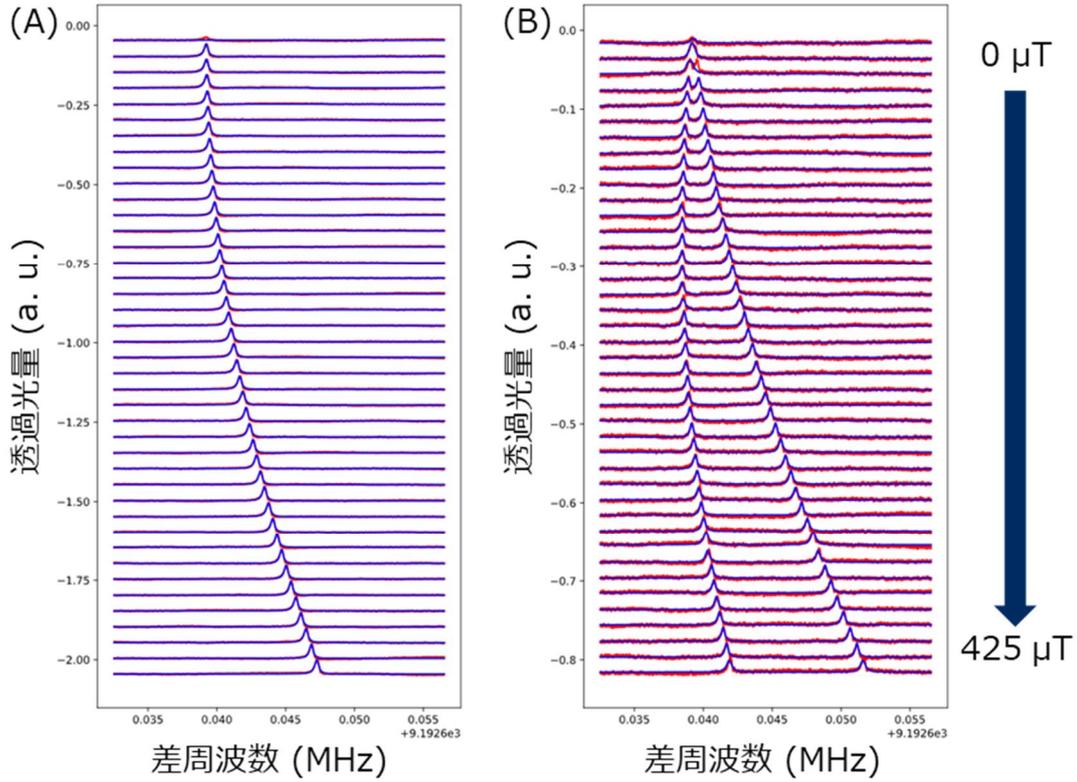


図(1)-4-①.3 励起光の偏光状態によるCPT共鳴状態の選択：(A) 直線偏光あるいは円偏光照射時に検出されるCPT共鳴の一例、(B) 直線偏光照射時に検出されるCPT共鳴の励起構造

互いに逆向きの円偏光の重ね合わせである直線偏光を照射した際に、円偏光照射で検出される(0,0)共鳴が現れないのは一見すると直観に反するが、以下のように理解できる。 σ_+ を照射したときの暗共鳴状態 ($|\text{dark}, +\rangle$ とする)は $m_F = +1$ の励起準位への遷移が生じない状態であり、 σ_- を照射したときの暗共鳴状態 ($|\text{dark}, -\rangle$ とする)は $m_F = -1$ の励起準位への遷移が生じない。直線偏光照射時に(0,0)共鳴が検出されるならば、その暗共鳴状態は $m_F = +1, -1$ の両方の励起準位への遷移が生じない状態である。しかしながら $|\text{dark}, +\rangle$ と $|\text{dark}, -\rangle$ は同一の状態ではない。例えば直線偏光照射時には $|\text{dark}, +\rangle$ から $m_F = -1$ の励起準位への遷移確率はゼロではないので、暗共鳴状態にならない。 $|\text{dark}, +\rangle$ と $|\text{dark}, -\rangle$ のいずれもが直線偏光照射時には暗共鳴状態になり得ず、(0,0)共鳴は検出されない。

以上、円偏光を照射した場合には(0,0)共鳴が検出される一方、直線偏光を照射した場合には(-1,1)共鳴及び(1,-1)共鳴が検出されることが示された。セシウム原子に印加する磁場を変調すると、磁気副準位のゼーマン効果に由来する共鳴周波数の変動が生じることが期待される。これを検証するため、励起光が円偏光あるいは直線偏光である場合に検出されるCPT共鳴の共鳴周波数を、印加磁場強度を変えつつ測定した。励起光の差周波数の掃引範囲は、(1,1)共鳴など

の高次のCPT共鳴の影響を受けない範囲に限定している。円偏光照射時には、図(1)-4-①.4 (A)に示すように(0,0)共鳴に対応する単一のピークが検出され、直線偏光照射時には図(1)-4-①.4 (B)に示すように(-1,1)共鳴及び(1,-1)共鳴に対応する2つのピークが検出された。



図(1)-4-①.4 CPT共鳴信号の磁場依存性：(A) 円偏光照射時、(B) 直線偏光照射時。

ここで、基底状態のそれぞれの磁気副準位の磁場下でのエネルギー変化は、Breit-Rabiの式に基づいて以下のように表される。

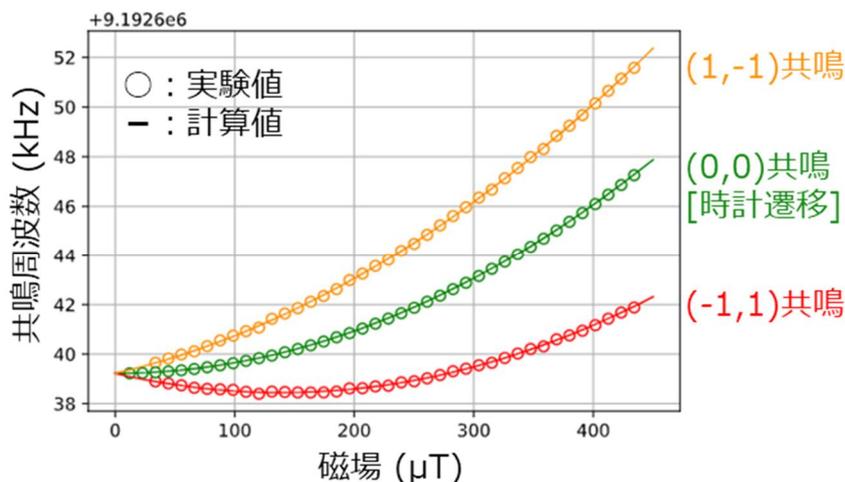
$$\left. \begin{aligned}
 f_{|F=3, m_F\rangle} &= -\frac{f_{HFS}}{16} - g_I \mu_B B m_F - \frac{f_{HFS}}{2} \sqrt{1 + \frac{x}{2} m_F + x^2} \\
 f_{|F=4, m_F\rangle} &= -\frac{f_{HFS}}{16} - g_I \mu_B B m_F + \frac{f_{HFS}}{2} \sqrt{1 + \frac{x}{2} m_F + x^2} \\
 x &= \frac{(g_J - g_I) \mu_B}{f_{HFS}} B, \quad f_{HFS} = 9192631770 \text{ Hz}, \\
 \mu_B &= 13996.24624 \text{ Hz } \mu\text{T}^{-1}, \quad g_J = 2.00254032, \quad g_I = -0.00039885395
 \end{aligned} \right\} \text{式(1)-4-①.2}$$

また、(0,0)共鳴、(-1,1)共鳴、(1,-1)共鳴のそれぞれの共鳴周波数は次の式で表される。

$$\left. \begin{aligned}
 f_{0,0} &= f_{|F=4, m_F=0\rangle} - f_{|F=3, m_F=0\rangle} = f_{HFS} \sqrt{1 + x^2} \\
 f_{-1,1} &= f_{|F=4, m_F=1\rangle} - f_{|F=3, m_F=-1\rangle} = 2g_I \mu_B B + \frac{f_{HFS}}{2} \left(\sqrt{1 - \frac{x}{2} + x^2} + \sqrt{1 + \frac{x}{2} + x^2} \right) \\
 f_{1,-1} &= f_{|F=4, m_F=-1\rangle} - f_{|F=3, m_F=1\rangle} = -2g_I \mu_B B + \frac{f_{HFS}}{2} \left(\sqrt{1 - \frac{x}{2} + x^2} + \sqrt{1 + \frac{x}{2} + x^2} \right)
 \end{aligned} \right\} \text{式(1)-4-①.3}$$

式(1)-4-①.3中の1行目に示した(0,0)共鳴の共鳴周波数は磁場の偶関数であり、0 μTで共鳴周波数は極小値をとる。一方、式(1)-4-①.3中の3行目示した(-1,1)共鳴の共鳴周波数は、右辺第1項は傾き

が負の直線であり (g_I が負の数であることに注意)、第2項は0 μT で極小となる磁場の偶関数であるため、特定の正の磁場 (セシウム原子の場合139.3 μT) で極小値をとる関数になる。式(1)-4-①.3から得た共鳴周波数値を計算値として、図(1)-4-①.4に示した実験結果から決定した値と併せて図(1)-4-①.5に示す。ガスセルに封入されたバッファガスに由来する一様な周波数シフトがあるものの、磁場による共鳴周波数変動から、観測された共鳴モードが(0,0)共鳴、(1,-1)共鳴及び(-1,1)共鳴であることが示された。



図(1)-4-①.5 (0,0)共鳴、(1,-1)共鳴及び(-1,1)共鳴の共鳴周波数の磁場依存性

ここで、共鳴周波数が極値をとる磁場では、磁場変動に対する周波数安定度が高く、時計用の周波数発振に適している。一般にCPT方式の発振器で用いられる(0,0)共鳴では、高次のCPT共鳴との共鳴周波数の重畳が生じるために、共鳴周波数が最安定である0 μT での運用は困難であり、数10 μT 程度の磁場を印加して共鳴検出が行われる。一方で、(-1,1)共鳴を周波数発振に利用する場合には、バイアス磁場を139.3 μT 印加することで、磁場変動に対する周波数安定度が最も高い状態での共鳴信号の検出を実現できる。この磁場では他のCPT共鳴との重畳が生じない(最近接である(1,-1)共鳴とは共鳴周波数が3.1 kHz離れている)ことから、(0,0)共鳴と比較してより安定性の高い発振機構を提供しうる。

以上、光学定盤上プロトタイプで得られた成果として、新たな原子時計動作方式の実証実験に関して述べた。励起光の偏光状態とガスセルの印加磁場を調整することで、外部磁場の変動に対して共鳴周波数が安定であるCPT共鳴モードの検出に成功した。

(c)環境変動実験結果のAI解析

AI(Artificial Intelligence)技術を用いて周波数変動モデルを構築するため、人工的に生成した環境変動に対して、どの環境パラメータがどの程度周波数シフトに寄与しているのかを定量的に評価した。環境変動としては、本プロジェクトで試作したHS-ULPACプロトタイプの環境温度、環境加速度(振動)、環境磁場である。機械学習のモデルは、予備検討で高い精度で出力周波数を予測可能であった決定木に基づくLightGBMを用いた。なお、LightGBMのハイパーパラメータはグリッドサーチと交差検証によって最適化した。

・実験室環境における温度特性評価

試作したHS-ULPACプロトタイプにおける出力周波数の外部温度依存性を調べた。実験データ取得方法は後述する実施項目(5)-1-①-2で説明されている。また、温度変動を生成する装置は後述する実施項目(5)-1-①-1で試作した体積1000 cm^3 級の小型恒温槽である。小型恒温槽内に対象となる物品が配置されていない場合には、0.01 $^{\circ}\text{C}$ 以下の温度安定度を維持することが可能である。小型恒温槽内にHS-ULPACプロトタイプを配置し、恒温槽制御温度すなわちHS-ULPACプロトタイプの外部温度を-10, 0, 10 $^{\circ}\text{C}$ のそれぞれに安定化し、説明変数(温度)と目的変数(出力周波数)の時系列データを取得した。このデータセットに対して機械学習モデルを構築し、予測

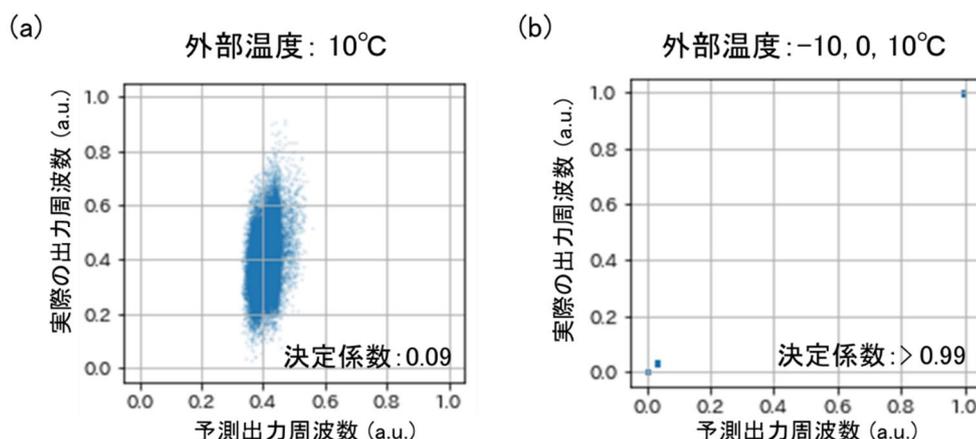
精度を決定係数によって定量化した。なお、データセットのうち、49,000点のデータをトレーニング用、21,000点のデータをテスト用として検証を行った。

図(1)-4-①.6のグラフは横軸が予測値で縦軸が実際の値であるため、予測精度が高いほどグラフは右肩上がりの直線に近づく。ここで、この予測精度は式(1)の決定係数 R^2 を用いて定量化した。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{式(1)-4-①.3}$$

ここで n はテストデータ数、 y_i は実際の出力周波数、 \bar{y} は出力周波数の平均値、 \hat{y}_i は予測出力周波数である。決定係数は、予測出力周波数と実際の出力周波数が完全に一致している時に1となる。また、機械学習モデルにおける残差平方和($\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$)が、単に平均値を出力するモデルにおける残差平方和($(\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2)$)よりも大きい場合、決定係数は負の値となる。この決定係数を使用して予測精度を定量化した。

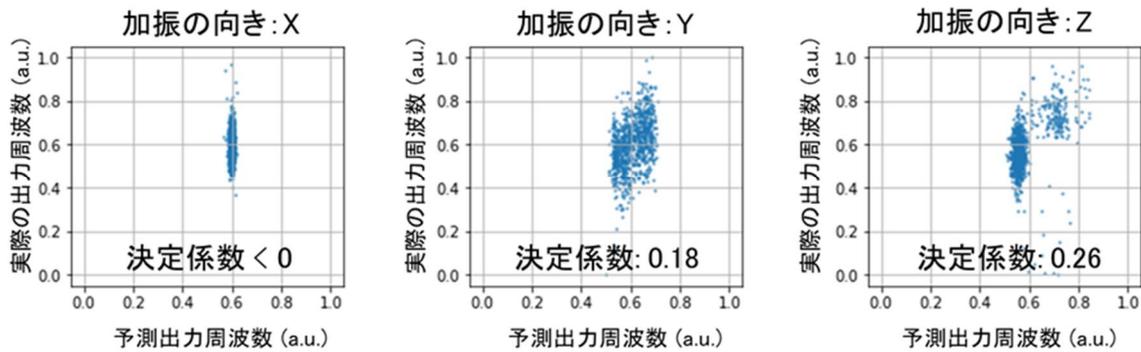
以上を踏まえると、外部温度が10°Cで一定の場合(図(1)-4-①.6(a))の決定係数が0.09であったのに対して、外部温度を-10, 0, 10°Cで変化させた場合(図(1)-4-①.6(b))の決定係数が0.99以上となった。したがって、外部温度と出力周波数は強く相関していると考えられる。この結果から、外部温度の影響を低減させる機構を持たせることで、プロトタイプ周波数安定度を向上させる可能性が示唆された。



図(1)-4-①.6 外部温度が(a)10°C、(b)-10, 0, 10°Cのデータセットを使った時の予測精度検証。なお、出力周波数は規格化している。

・実験室環境における加速度特性評価

次に、環境加速度とHS-ULPACプロトタイプ出力周波数との関係について着目した。実験データ取得方法は後述する実施項目(5)-1-②-1で説明されている。加振装置にHS-ULPACプロトタイプを固定し、X, Y, Z方向に加振しながら、その出力周波数とX, Y, Z方向の加速度のデータセットを構築した。この時、加振の向きはプロトタイプを固定する方向を変えることで制御した。また、加振における加速度の最大値は3 Gであり、加振の周期は5 Hzである。上記データセットは、トレーニングデータ(2,100点)とテストデータ(900点)に分け、このトレーニングデータを使って、X, Y, Z方向の加速度と出力周波数の関係を機械学習でモデル化した。機械学習のアルゴリズムは、これまでの検討と同様にLightGBMである。また、説明変数はX, Y, Z方向の加速度で、目的変数は出力周波数とした。この条件でトレーニングした機械学習モデルをテストデータに適用して、その予測精度を決定係数で定量化した(図(1)-4-①.7)。結果、X, Y, Z方向にプロトタイプを加振した場合において、それぞれ決定係数<0, 決定係数=0.18, 決定係数=0.26を得た。それぞれの決定係数が小さいことから、X, Y, Z方向の加速度と出力周波数は相関が小さいことがわかった。従って、HS-ULPACプロトタイプは本プロジェクトで検証する範囲の加速度に対してロバストであることが明らかになった。



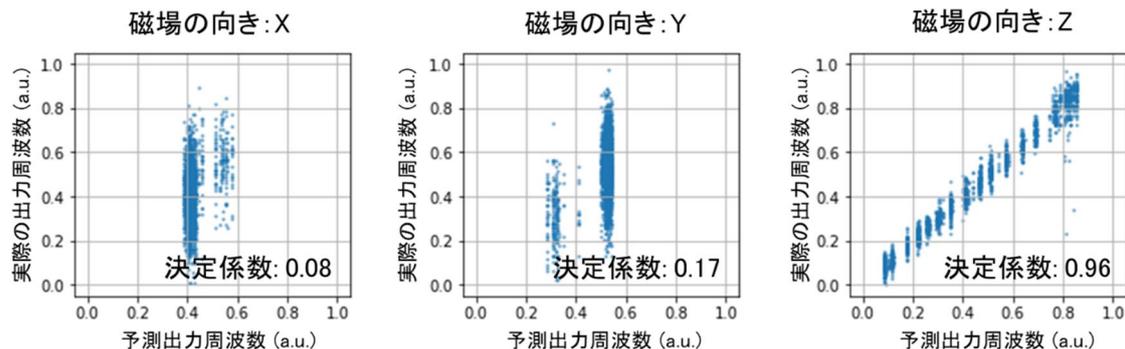
図(1)-4-①.7 加振の向きがX, Y, Zのデータセットを使った時のそれぞれの予測精度検証。なお、出力周波数は規格化している。

・実験室環境における磁場特性評価

第3番目として、環境磁場とHS-ULPACプロトタイプの実出力周波数との相関を定量化した。データ取得方法は後述する実施項目(5)-1-③-1の「(a)磁場変動環境下での周波数データ取得実験」にて説明されている。磁場印加装置に対してHS-ULPACプロトタイプを取付け、印加磁場を $-200\ \mu\text{T}$ から $+200\ \mu\text{T}$ まで変化させながら、プロトタイプの実出力周波数と印加磁場の値とのデータセットを構築した。また磁場の向きがX, Y, Zの場合でそれぞれデータセットを構築した。磁場の向きはプロトタイプを固定する向きを変えることで制御した。

次に、それぞれのデータセットを、トレーニングデータ(2100点)とテストデータ(900点)に分け、そのトレーニングデータを使って、説明変数を磁場の値、目的変数を出力周波数として機械学習によるモデル化を行った。機械学習のアルゴリズムは、これまでと同様にLightGBMである。また、トレーニングした機械学習モデルをテストデータに適用して、その予測精度を決定係数で定量化した(図(1)-4-①.8)。

結果、X, Y, Z方向に磁場をかけた場合において、それぞれ決定係数=0.08、決定係数=0.17、決定係数=0.96を得た。以上の結果から、プロトタイプはX, Y方向の磁場にはロバストであり、Z方向の磁場の影響は受けやすいことが示唆され、これらの帰結はプロトタイプの構成から予測される傾向と定性的に合致する。

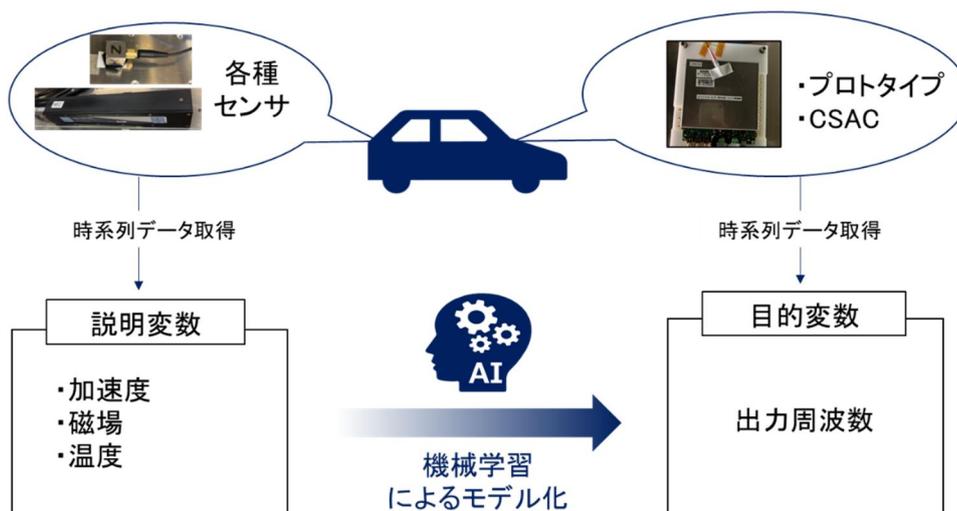


図(1)-4-①.8 磁場の向きがX, Y, Zのデータセットを使った時の予測精度検証。なお、出力周波数は規格化している。

(d)車載実験結果(令和5年6月、令和5年12月に実施)のAI解析

本項目では、走行中の車両に積載したHS-ULPACプロトタイプにおいて、どの環境パラメータがどの程度周波数シフトに寄与しているのかを機械学習を使って定量的に評価した。ベンチマークとしてCSAC(SA.45s)も同様に評価した(図(1)-4-①.9)。機械学習のモデルは、先述の実験室条件と同様に、LightGBMを用いた。また、LightGBMのハイパーパラメータは実験室条件と同様である。また、機械学習に使用したデータの取得方法は後述する(5)-1-③-1の「(b)車載環

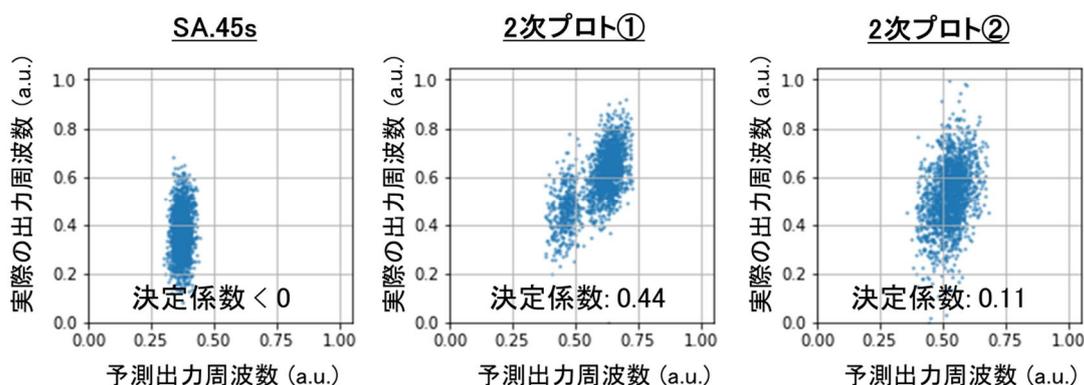
境下での周波数データ取得実験」に記載の通りである。



図(1)-4-①.9 車載環境における環境パラメータと出力周波数の相関を機械学習によって定量的に評価する模式図。

・令和5年6月の車載実験結果のAI解析

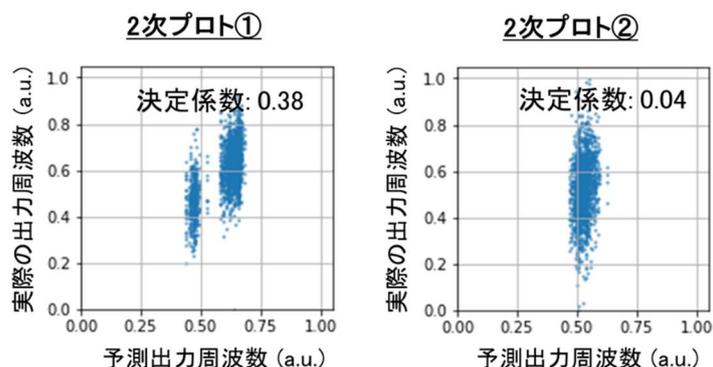
令和5年6月の車載実験で取得したデータのAI解析について報告する。説明変数を温度、X、Y、Z方向加速度、X、Y、Z方向磁場とし、目的変数を出力周波数として機械学習を行った。ここで加速度に関しては、加速度の生データをフーリエ変換し、0、4、10、20、50、100、200、500、1000 Hzの9個の成分を説明変数とした。そして、トレーニングデータ数を4000点、テストデータ2000点として機械学習モデルを構築した。この機械学習モデルの予測精度は決定係数を用いて定量化した。図(1)-4-①.10より、SA.45s、HS-ULPACの2次プロトタイプ①(以下2次プロトタイプ①と記載)、HS-ULPACの2次プロトタイプ②(以下2次プロトタイプ②と記載)の決定係数はそれぞれ、0未満、0.44、0.11となった。この結果から、SA.45sの出力周波数は、車載環境において、温度、加速度、磁場に対して依存性がないことがわかった。2次プロトタイプ①、2次プロトタイプ②に関しては、決定係数が0以上であったことから、出力周波数と温度、加速度、磁場が相関している可能性が考えられる。そこで、説明変数を細分化して機械学習を実施し、温度、加速度、磁場のどのパラメータが出力周波数に影響しているのかを分析した。



図(1)-4-①.10 説明変数に温度、X、Y、Z方向加速度、X、Y、Z方向磁場を用いた場合の出力周波数予測精度の検証。なお、出力周波数は規格化している。

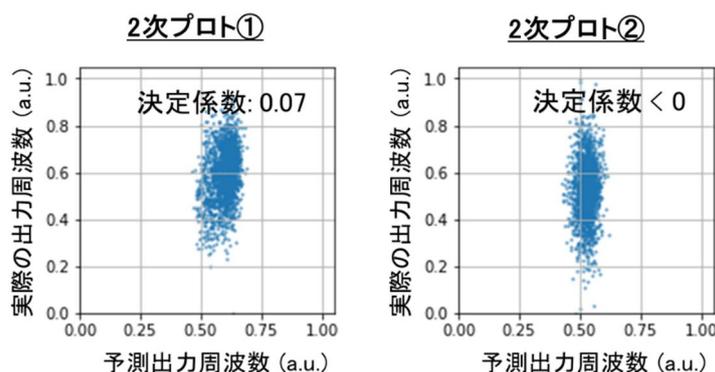
次に、説明変数を温度、目的変数を出力周波数として機械学習を行った。図(1)-4-①.11より、2次プロトタイプ①は決定係数が0.38、2次プロトタイプ②は決定係数0.04であった。この結果から、今回の車載環境において、2次プロトタイプ①は温度耐性が十分ではなく、2次プロトタイプ②はSA.45sと同程度に温度耐性が高いことが明らかになった。この理由として、2次プロトタイプ②は2次プロトタイプ①に比べてガスセルのサイズが小さいため、熱容量の観点から、ガス

セルヒータによる温度制御がより支配的になっている可能性が考えられる。



図(1)-4-①.11 説明変数に温度を用いた場合の出力周波数予測精度の検証。なお、出力周波数は規格化している。

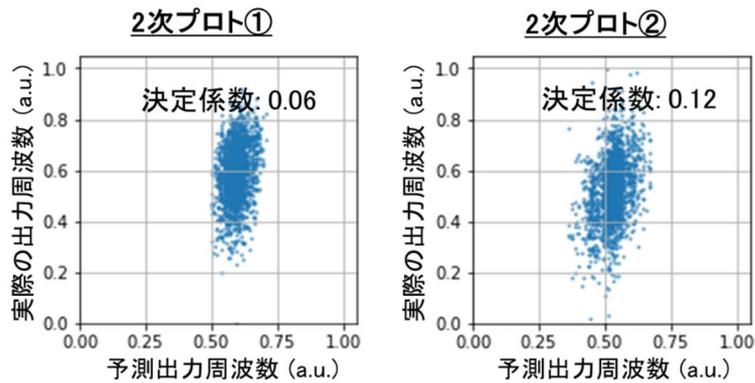
続いて、説明変数をX, Y, Z方向加速度、目的変数を出力周波数として機械学習を行った。図(1)-4-①.12より、2次プロトタイプ①は決定係数が0.07、2次プロトタイプ②は決定係数が0未満であった。いずれも決定係数が非常に小さい。したがって、X, Y, Z方向加速度は、いずれも2次プロトタイプ①および2次プロトタイプ②の出力周波数に影響しないことが明らかになった。この結果はすでに説明している「**実験室環境における加速度特性評価**」で得られた図(1)-4-①.7の結果の傾向と合致している。



図(1)-4-①.12 説明変数にX, Y, Z方向加速度を用いた場合の出力周波数予測精度の検証。なお、出力周波数は規格化している。

最後に、説明変数をX, Y, Z方向磁場、目的変数を出力周波数として機械学習を行った。図(1)-4-①.13より、2次プロトタイプ①は決定係数が0.06、2次プロトタイプ②は決定係数が0.12であった。いずれも決定係数が非常に小さい。したがって、車載環境における磁場変動は2次プロトタイプ①および2次プロトタイプ②の出力周波数にほとんど影響しないことが分かった。

ここで、既に記載した「**実験室環境における磁場特性評価**」で示した実験室の結果では、Z方向の磁場がプロトタイプの出力周波数に影響を与えていた。車載環境におけるプロトタイプの出力周波数が磁場の影響を受けなかった理由として、車載実験におけるZ方向の磁場変化が3~6 μT であり、実験室条件であった-200~200 μT に比べて小さかったことが考えられる。

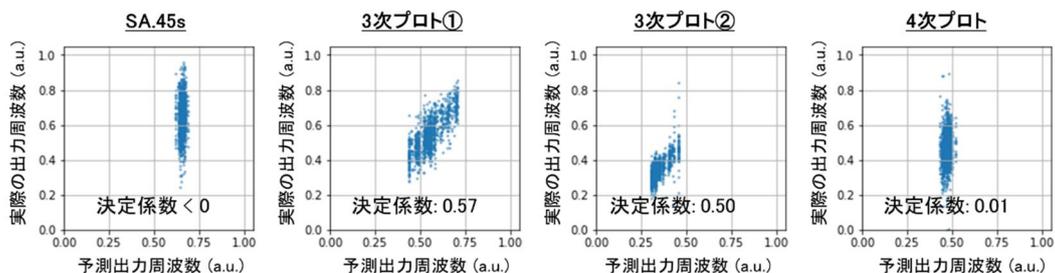


図(1)-4-①.13 説明変数にX, Y, Z方向磁場を用いた場合の出力周波数予測精度の検証。なお、出力周波数は規格化している。

・令和5年12月の車載実験結果のAI解析

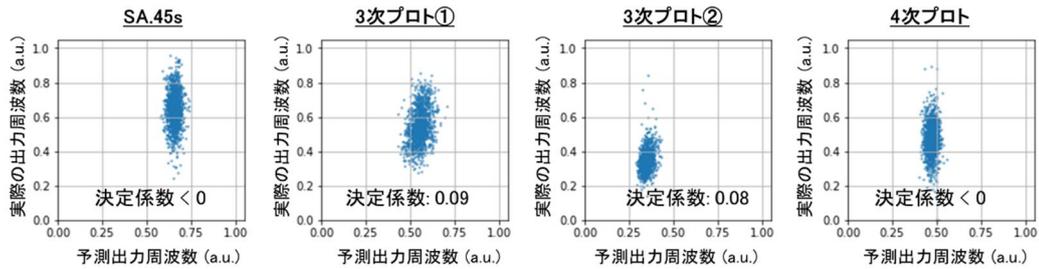
令和5年12月の車載実験で取得したデータのAI解析について報告する。説明変数を温度、X, Y, Z方向加速度、X, Y, Z方向磁場とし、目的変数を出力周波数として機械学習を行った。ここで加速度に関しては、加速度の生データをフーリエ変換し、0, 4, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 Hzの9個の成分を説明変数とした。そして、トレーニングデータ数を5040点、テストデータ2160点として機械学習モデルを構築した。この機械学習モデルの予測精度は決定係数を用いて定量化した。

まず、説明変数を温度、目的変数を出力周波数として機械学習を行った。図(1)-4-①.14より、SA.45s、HS-ULPACの3次プロトタイプ①(以下3次プロトタイプ①と記載)、HS-ULPACの3次プロトタイプ②(以下3次プロトタイプ②と記載)、HS-ULPACの4次プロトタイプ(以下4次プロトタイプ②と記載)の決定係数はそれぞれ、0未満、0.57、0.50、0.01となった。この結果から、今回の車載環境において、3次プロトタイプ①、3次プロトタイプ②は温度耐性が十分ではなく、SA.45sと4次プロトタイプは温度耐性が十分であることが明らかになった。この理由として、4次プロトタイプは3次プロトタイプと比較して筐体が小型化しており、温度制御特性が改善したためであると考えられる。



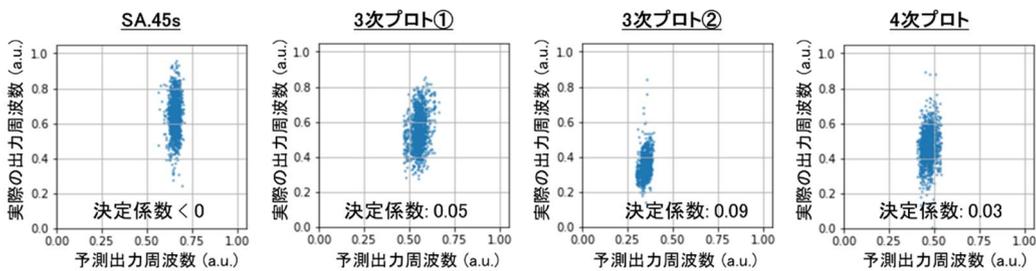
図(1)-4-①.14 説明変数に温度を用いた場合の出力周波数予測精度の検証。なお、出力周波数は規格化している。

続いて、説明変数をX, Y, Z方向加速度、目的変数を出力周波数として機械学習を行った。図(1)-4-①.15より、SA.45s、3次プロトタイプ①、3次プロトタイプ②、4次プロトタイプの決定係数はそれぞれ、0未満、0.09、0.08、0未満となった。いずれも決定係数が非常に小さい。したがって、X, Y, Z方向加速度は、いずれのプロトタイプ出力周波数に影響しないことが明らかになった。この結果は、すでに説明している「実験室環境における加速度特性評価」で得られた図(1)-4-①.7の結果、および令和5年6月の車載実験での「説明変数をX, Y, Z方向加速度」とした場合に得られた図(1)-4-①.11の結果の傾向と合致している。



図(1)-4-①.15 説明変数にX, Y, Z方向加速度を用いた場合の出力周波数予測精度の検証。なお、出力周波数は規格化している。

図(1)-4-①.16より、SA.45s、3次プロトタイプ①、3次プロトタイプ②、4次プロトタイプの決定係数はそれぞれ、0未満、0.05、0.09、0.03となった。いずれも決定係数が非常に小さい。したがって、X, Y, Z方向磁場は、いずれのプロトタイプの出力周波数に影響しないことが明らかになった。この結果は、令和5年6月の車載実験での「説明変数をX, Y, Z方向加速度」として得られた図(1)-4-①.12の結果の傾向と合致している。



図(1)-4-①.16 説明変数にX, Y, Z方向磁場を用いた場合の出力周波数予測精度の検証。なお、出力周波数は規格化している。

以上の車載実験データのAI解析結果から、車載環境においては加速度と磁場はプロトタイプの出力周波数への影響が小さく、温度は影響が大きことが明らかになった。ただし、4次プロトタイプに関しては、車載環境における温度変動に対する耐性が十分であることが示唆された。

・最終目標に対する達成度

本実施項目の(a)で周波数変動モデルの解明に資する光学定盤モデルの構築を行った。これを基に、量子干渉効果の観測実験を重ね、(b)で示した磁場不感な共鳴状態の検出に成功した。磁場変動に対して周波数変動を低減しうる一技術を確認した。また、(c)では、各種環境変動を与えた場合のプロトタイプモジュールの周波数変動を機械学習に基づく手法によって分析し、特に周波数変動が顕著であった温度変動環境下では、予測周波数が実測周波数と正の相関を有することを示した。(d)で示した車載実験環境下でも、同様の結果が得られた。このことは、事前学習によって温度変動由来の周波数変動を予測することが可能であることを示しており、予測値に基づく周波数補正を行うことで周波数変動を低減しうることを示している。

・最終目標を達成できなかった内容の原因、課題、解決策

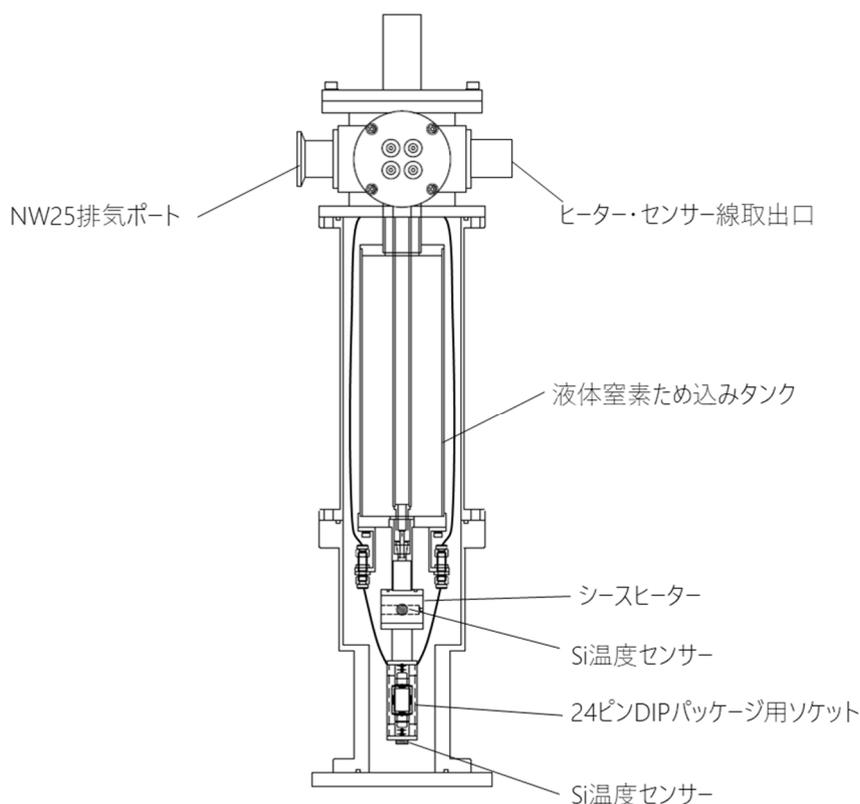
HS-ULPACプロトタイプの動作条件の最適化に関しては、多数のパラメータ調整が必要となることから、プロジェクト期間中にプロトタイプ向けに適用できなかった。AIによる全体パラメータのチューニングプログラムを実装することで、多数の動作パラメータを最適化し、より高安定な原子時計動作に資すると考えている。

実施項目(1) 周波数シフトとその変動要因の評価

実施項目(1)-4 各種シフトの相関メカニズムの評価

実施項目(1)-4-② VCSELとガスセルのエイジング評価(担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

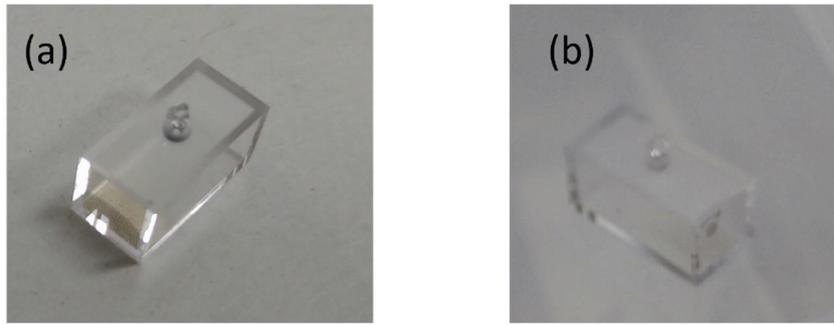
VCSELを用いた小型原子時計において、その動作電流を最適化することで周波数ドリフトを飛躍的に削減できる可能性がある^[1]。この考え方に基づき長期周波数安定度を高度化するためには、直接変調されたVCSEL光の変調指数が変動する様子を長期に渡り観測する必要がある。VCSEL単体の変調特性をより高精度に観測するための測定システムを試作した(図(1)-4-②.1)。装置はRF伝送路(最大20 GHz対応)を備えたクライオスタットである。広い温度範囲(80~433 K)にわたってVCSELの出力特性を評価でき、高温下でのエイジング特性を詳細に計測可能である。また、試料は真空下に設置されるため真空断熱により温度安定性が高い。以上により、この装置を用いることでプロトタイプ実験室モデルより広範囲の温度動作条件、高安定温度状態で変調特性を観測することが見込まれる。



図(1)-4-②.1 面発光レーザー RF 変調特性測定システム

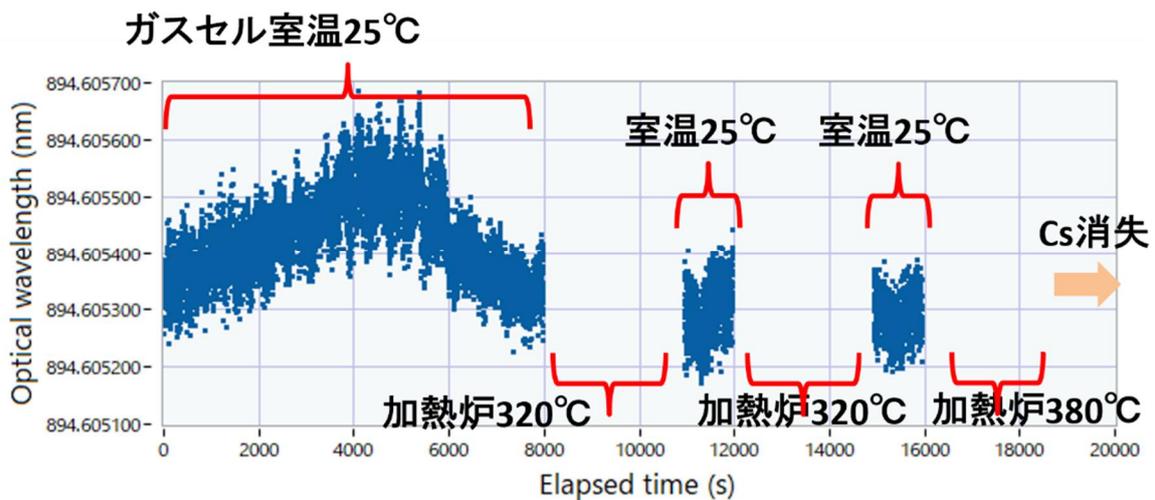
小型原子時計においてガスセル中のアルカリ原子の質量が減少することは、長年、動作不良の原因の一つとされていた^[2]。アルカリ原子が封入されているガスセルが高温環境下にさらされると、化学反応によりアルカリ原子のガラス中への拡散が促進され、最終的には全て消費し、利用不能になってしまう。

まずは予備的な試験を実施した。約1日、150℃の高温環境にガラス加工方式石英セルをさらし、その前後のガスセル外観の様子を観察した(図(1)-4-②.2)。加熱前(図(1)-4-②.2(a))にガスセル内壁全体に付着していた固体状セシウム原子が、加熱試験後(図(1)-4-②.2(b))には零状の塊となり、比較的狭い領域に集積していた。その他、ガラスの色味変化に着目したが、目視の範囲では変化は観測されなかった。

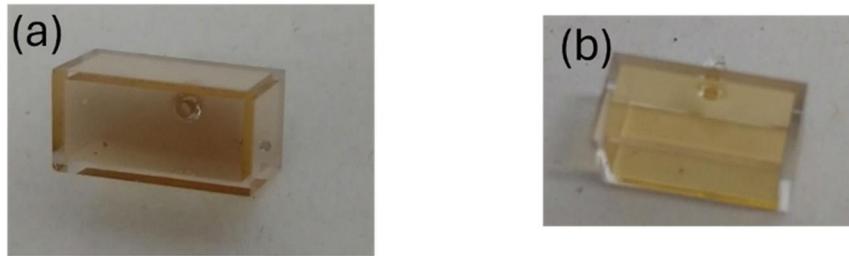


図(1)-4-②.2 150 °C加熱前後におけるガラス加工方式石英セルの様子：(a)加熱前、(b)加熱後

次に、レーザ光をセシウム原子の吸収線に安定化し波長計で断続的に波長計測を行った。加熱試験は図(1)-4-②.3 に示した手順で実施した。高温環境では、ガラス加工方式石英セルを 300 °C以上の環境にさらし、波長計測期間中はガスセル温度を室温(25 °C)に設定した。グラフから波長変動が生じていることが読み取れるが、これは加熱試験とは無関係のものである。2回の 320 °C加熱後のガラス加工方式石英セルの様子を図(1)-4-②.4(a)に示す。封入されたセシウム原子がガラス壁面の数か所に凝縮しているのが確認された。ガラス壁は無色透明から茶褐色へと変色していた。320 °C加熱前後ではセシウム原子の吸収信号は確認され、安定化された波長の値は変動の範囲内であった。約 30 分の 380 °C加熱後ガラス加工方式石英セルの様子を図(1)-4-②.4(b)に示す。金属光沢の無い物質片が、幾つか存在しているのを確認した。ガラス壁面は、目視で判断する限り、2回の 320°C加熱後よりも黄色の色合いが若干強まっているようであった。また、セシウム原子の吸収信号は確認されなかったため、レーザ光をセシウム原子の吸収線に安定化することはできなかった。以上、320°C付近の加熱ではガスセルを構成するガラス壁が変色したという事実から、セシウム原子と石英ガラスが化学反応を生じ、セシウム原子の質量が減少していたと考えられる。また、380°Cでは化学反応の速度が増加し、30 分の間に全てのセシウム原子が消費されてしまったと推定される。高温領域におけるセシウム原子質量消費の加熱試験は 320°Cから 380°Cの間で実施することで、計測が容易になる時間スケールで実施可能なことが判明した。



図(1)-4-②.3 加熱試験と吸収測定



図(1)-4-②.4 300℃以上の加熱後におけるガラス加工方式石英セルの様子：(a)320℃加熱後、(b)380℃(30分)加熱後

参考文献

- [1] S. Yanagimachi et al., “Reducing frequency drift caused by light shift in coherent population trapping-based low-power atomic clocks”, Appl. Phys. Lett. 116, 104102(2020).
- [2] C. H. VOLK and R. P. FRUEHOLZ, “Lifetime and Reliability of Rubidium Discharge Lamps for Use in Atomic Frequency Standards”, AEROSPACE CORP EL SEGUNDO CA CHEMISTRY AND PHYSICS LAB, (1984).

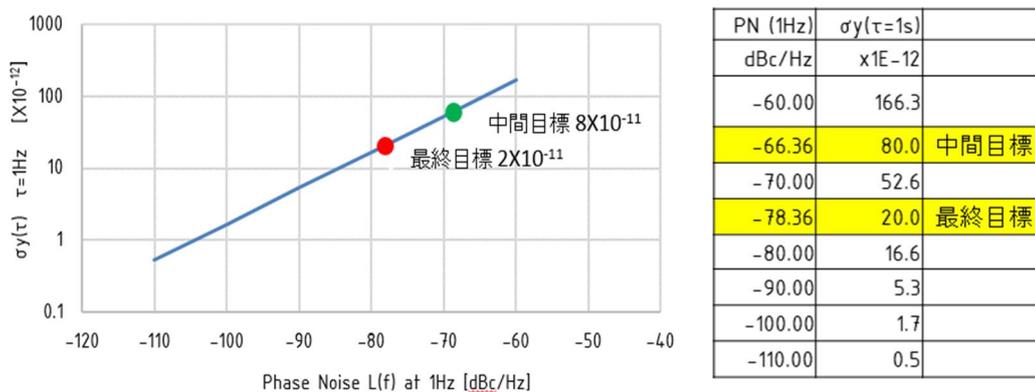
実施項目(2) 耐振動特性をもつ水晶発振器の設計、試作及び特性評価(担当：株式会社大真空)

本実施項目では、振動環境下において優れた周波数安定度を持ち、かつ小型化、低消費電力化を実現した水晶発振器の設計及び試作を実施した。

最終目標である1秒平均のアラン標準偏差 $\sigma_y(\tau=1s)$ が 2.0×10^{-11} 、G-Sensitivity が $1 \times 10^{-10} / G$ (0.1 ppb/G) を達成するためには振動下での周波数の揺らぎ (G-Sensitivity) と短期安定度 (アラン標準偏差 $\sigma_y(\tau=1s)$) を改善すると同時に消費電力を大きく削減する必要がある。本研究では、水晶発振器としてはTCXO、OCXOにて実現を目指し、達成に必要な水晶振動子として振動部の軽量化、振動部の保持部の応力分散によるG-Sensitivityの改善効果、OCXOにおける加熱領域となる熱容量の最小化効果を期待し、Wafer Level Package(WLP)振動子の採用検討を進めた。

(a)発振回路位相雑音の必要仕様

1秒平均のアラン標準偏差の目標に対して水晶振動子を含む発振回路の設計条件を検討した。図(2).1に水晶発振回路の位相雑音とアラン偏差との関係を示す。



位相雑音とアラン偏差の関係は次式により求めた

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{2}{(\pi f_0 \tau)^2} \int_0^{\infty} S_{\phi}(f) \sin^4(\pi f \tau) df$$

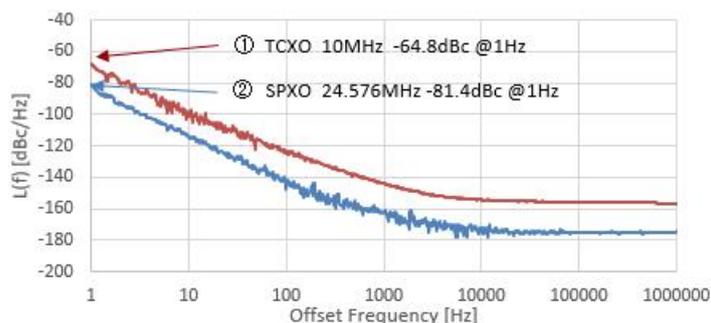
図(2).1 発振器の位相雑音と短期安定度の関係 10MHz、 $\tau=1s$

位相雑音はオフセット周波数 f に対して f^3 に従うものと仮定している。計算結果より出力周波数 10MHz の場合、オフセット周波数 1Hz の位相雑音は 1 秒平均のアラン偏差の中間目標値 8.0×10^{-11} に対して、-66.36dBc/Hz、また、最終目標値 2.0×10^{-11} に対しては-78.36dBc/Hz 以下であることが必要である。したがって、発振回路の設計目標としては、最終目標までを考慮して、出力周波数 10MHz オフセット周波数 1Hz での位相雑音を-80dBc/Hz 以下とした。出力周波数を 10MHz と異なる場合は、周波数が 2 倍になる毎に位相雑音の目標値は+6dBc の増加となる。

(b)現状の発振回路位相雑音の実力確認

上述した位相雑音の目標値に対して、まず、既存の発振器での実力を確認した。図(2).2は5×3.2mm サイズ水晶発振器の位相雑音測定例を示す。

①TCXO(温度補償機能付き水晶発振器)10MHz では位相雑音は-64.8dBc/Hz であり目標値を大きく下回っている。TCXO で内蔵している温度補償回路の発生する雑音が悪化の原因と考えられる。この製品はULPACの試作で使用された水晶発振器と同等性能であるが、本実施項目では、このレベルから+13dB改善することが目標となる。一方、②SPXO 24.576MHz では-81.4dBc/Hz、10MHz 出力に換算すると-86.4dBc/Hz となり目標値-80dBc/Hz を満足している。この製品は内部に温度補償を含めて周波数制御機能を持たないことに加えて、雑音源となるレギュレータを内蔵せず、低雑音に特化した水晶発振器である。この SPXO 用 IC を以降のプロトタイプの TCXO を含め水晶振動子の発振用 IC として使用している。



TCXO(Temperature Compensated Crystal Oscillator): 温度補償機能付き水晶発振器

SPXO(Simple Packaged Crystal Oscillator): 周波数調整機能を持たない発振器

図(2).2 既存水晶発振器の位相雑音測定例(5×3.2 mm 面実装タイプ)

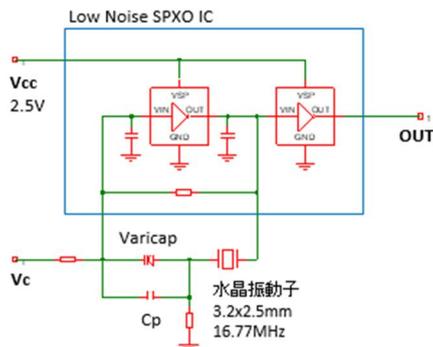
(c)周波数制御による発振回路位相雑音への影響と発振器構成の検討

本研究で使用される水晶発振器は、基準信号に同期させるために水晶発振器の周波数変動、ばらつきを入力電圧で補正する周波数制御機能が必要である。しかし、一般に周波数制御感度が大きくなるほど位相雑音は劣化するため、制御感度は出来るだけ小さく設定することが重要となる。表(2).1に代表例としてOCXOとVCXOで設計した場合の周波数安定度と同期に必要な周波数制御感度を示す。

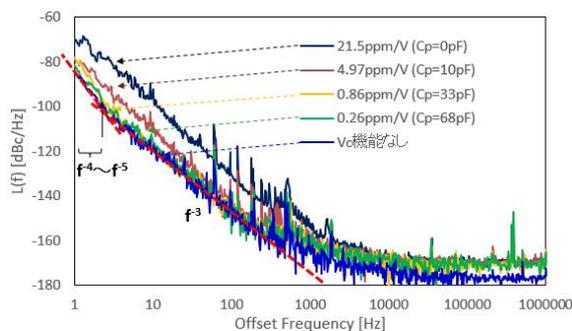
表(2).1 VCXO と OCXO で必要となる周波数制御感度の比較

	OCXO	VCXO	条件
周波数安定度	±3ppm	±20ppm	温度特性、初期偏差、経年変化含む
周波数制御範囲	±3ppm以上	±20ppm以上	Vc 0~3V
周波数制御感度	2ppm/V以上	16.7ppm/V以上	

VCXOでは水晶振動子の温度特性を補正する機能を持たないためOCXOと比較して周波数制御感度を大きく設定する必要がある。図(2).2で示したSPXOを基本として、バリキャップダイオードによる周波数制御回路を追加し、さらにバリキャップダイオードに並列に接続したコンデンサCpの容量と制御電圧値を変化させて、制御感度と位相雑音の関係を測定した。測定回路を図(2).3に、測定結果の例を図(2).4に示す。コンデンサ容量を大きくし、制御感度を小さくするほど位相雑音が改善されていることが確認された。

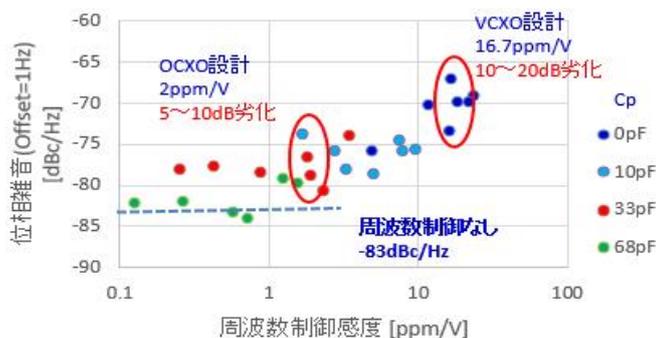


図(2).3 VCXO 構成図



図(2).4 Cpによる位相雑音の変化

次に、図(2).5に C_p と制御電圧を変化させて測定し、周波数制御感度と位相雑音との関係をプロットした結果を示す。表(2).1 で示した、VCXO で必要となる周波数制御感度 16.7ppm/V では周波数制御機能によって位相雑音が 10~20dB 程度劣化しているのに対して、OCXO での周波数制御感度 2ppm/V では 5~10dB 程度の劣化である。図(2).5 において制御感度が小さくなるにしたがって、キャリア近傍での位相雑音の傾斜が $f^4 \sim f^5$ の領域が出現している。これは位相雑音が低減することで環境温度の揺らぎや起動後の熱的ストレスの影響による、周波数のランダムウォークやドリフト等の微小変動が検出されていると推測する。したがって、OCXO 構成とすることによって周波数制御感度を低減し位相雑音の劣化を改善するとともに、環境温度の揺らぎによるランダムウォーク、ドリフトの影響も改善し、発振回路設計としては(a)で示した目標値-80dBc を達成できると考える。



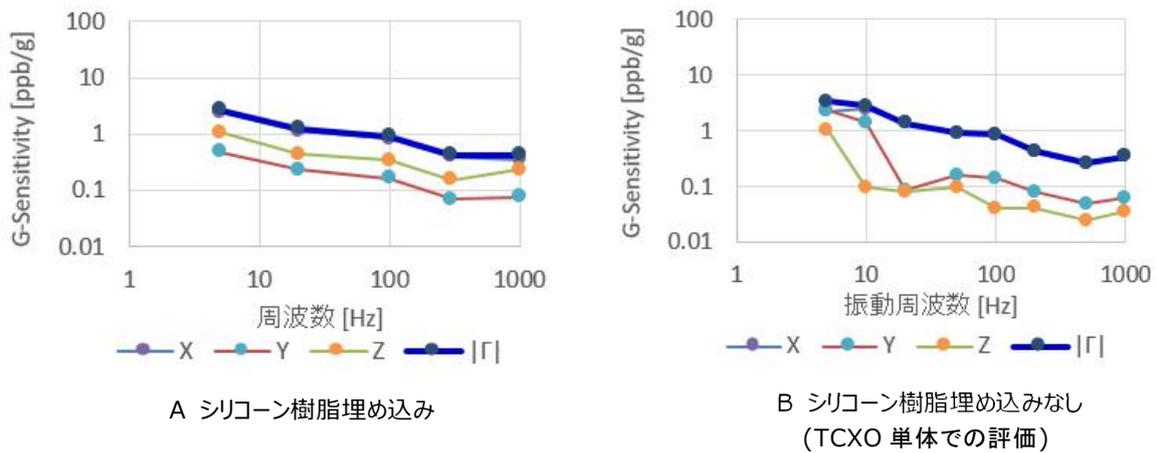
図(2).5 周波数制御感度と位相雑音との関係

(d)パッケージ構造によるG-Sensitivityの改善検討

発振器パッケージ内部に振動を吸収する緩衝機構を設けることにより振動子に加えらるる振動加速度を低減しG-Sensitivityを改善することを検討した。まず、予備実験として水晶発振器をシリコン樹脂に埋め込み、機械振動を吸収させることでG-Sensitivityの改善が得られるかの確認を行った。試作した発振器の構成を図(2).6に示す。5×3.2mmサイズTCXOを基板上にワイヤー接続し基板から浮かせた状態で、9×7mmサイズの透明ケース中でシリコン樹脂に埋め込み、G-Sensitivityへの影響を評価した。試験結果を図(2).7に示す。比較用のシリコン樹脂埋め込みのないTCXO単体と比較して、効果が得られていない結果となった。振動試験の周波数は5~50Hzと低いため振動振幅が大きく、小型パッケージでの緩衝構造による振動減衰で正弦波加速度の影響を低減することは困難と考える。



図(2).6 シリコン樹脂埋めによる試作品 1

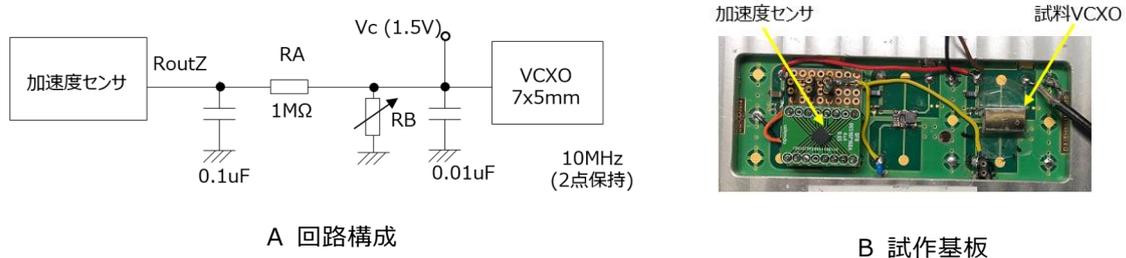


*|Γ| : x,y,z各方向成分のベクトル和の絶対値 $|\Gamma| = (r_x^2 + r_y^2 + r_z^2)^{1/2}$

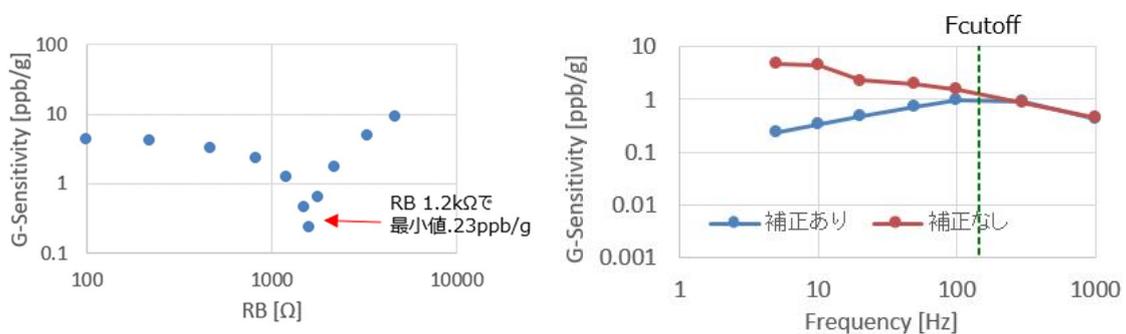
図(2.7) G-Sensitivity 試験結果

(e)加速度センサによるG-Sensitivity改善の検討

加速度センサで振動加速度を検出し、周波数の変化を補正することによってG-Sensitivityを改善することを検討した。試作した回路基板の構成を図(2).8に示す。加速度センサには静電容量型MEMS加速度センサ(3軸アナログ出力)を使用した。加速度センサで検出した出力電圧をVCXOの周波数制御電圧に入力し、加速度センサの出力電圧は抵抗分圧で調整することで、振動による周波数変動をキャンセルしている。試験はZ方向に正弦波振動を加え、加速度センサからのZ方向出力電圧をVCXOに入力してG-Sensitivityを測定した。試験結果を図(2).9に示す。



図(2.8) 加速度センサによる補償回路と試作基板



図(2.9) 加速度センサによる補償回路と試作基板

加速度センサによる補償のない状態で5Hz, Z方向のG-Sensitivityが4.6ppb/Gであった試料が、調整用抵抗RB=1.2kΩでG-Sensitivityは下限値0.23ppb/Gとなった。一方、RB=1.2kΩにて振動周波数を変化させて測定したところ振動周波数が大きくなるほど補償の効果が低減している。G-Sensitivityの周波数特性と加速度センサの周波数特性の差分が原因であり、加速度センサ出力の

カットオフ周波数最適化が必要となる。

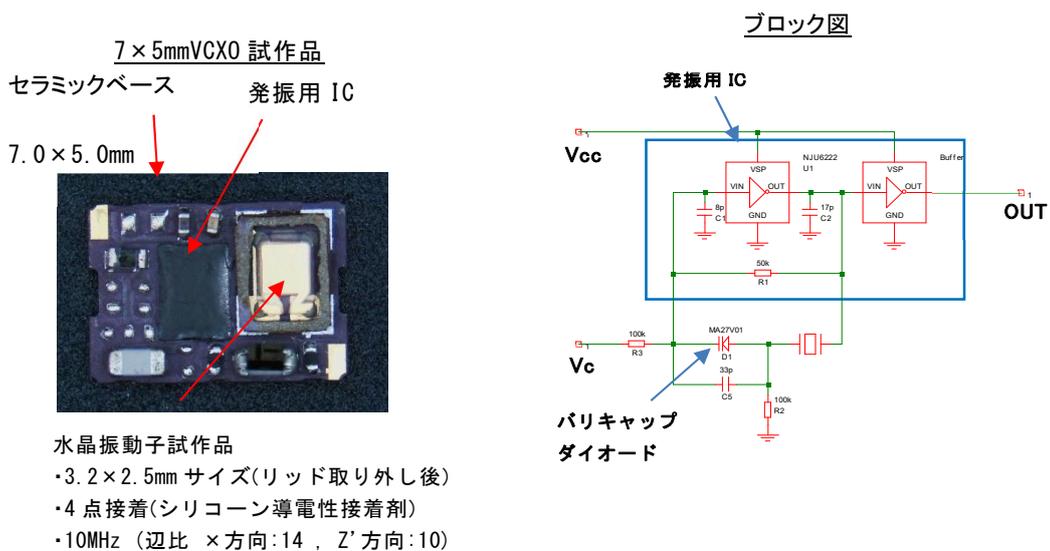
上記G-Sensitivityの改善実験では加速度センサを用いた周波数補償によって一定の改善効果があった。G-Sensitivityが最悪となる条件、Z方向、5Hzにおいて、補償無しで4.6ppb/Gであった試料が、振動補償によって0.23ppb/Gに改善された。しかし、振動周波数が高くなるほど補償の効果が減少し50Hzでは約1ppb/Gとなり、目標の0.1ppb/Gの達成には大幅に改善が必要な結果であった。

一方、水晶振動子内の水晶板の保持設計によるG-Sensitivityへの影響を確認した結果、接着保持点数は4点、また水晶板の辺比（板厚に対する外形のアスペクト比）を小さくすることでG-Sensitivityが良好になる結果を得た。この結果については、以下(f)水晶振動子の振動部保持構造による応力感度改善項目で示す。

これらの結果を組み合わせ、加速度センサによる振動補償と4点接着振動子であり水晶設計を最適化した振動子とを組み合わせG-Sensitivityの評価を行った。

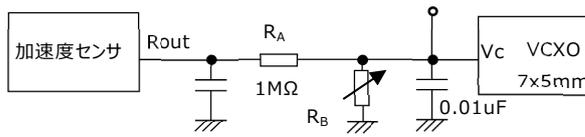
図(2).10に評価に使用したVCXO、また図(2).11に加速度センサを使用した補償回路の構成を示す。水晶振動子は令和2年度の実験において最もG-Sensitivityの優れた条件、4点接着、10MHzの3.2×2.5mmサイズを使用し、これを7×5mmサイズのVCXOに搭載した。

加速度センサの検出した出力電圧をVCXOの周波数制御電圧に入力し周波数をシフトさせることで、振動による周波数変動をキャンセルしている。加速度センサの出力電圧は、LPFを経由して、抵抗 R_A, R_B によって分割した電圧がVCXOに入力される。

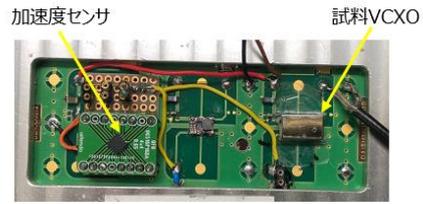


図(2).10 VCXO構成図

回路構成



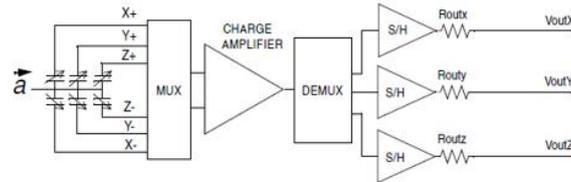
試作基板



LIS344ALH(ST-Micro 社製)

型式	静電MEMS加速度センサー (3軸アナログ出力)
検出範囲	±2g, ±6g / Full scale
感度	0.66V/g, 0.22V/g
帯域幅	DC~1.8kHz

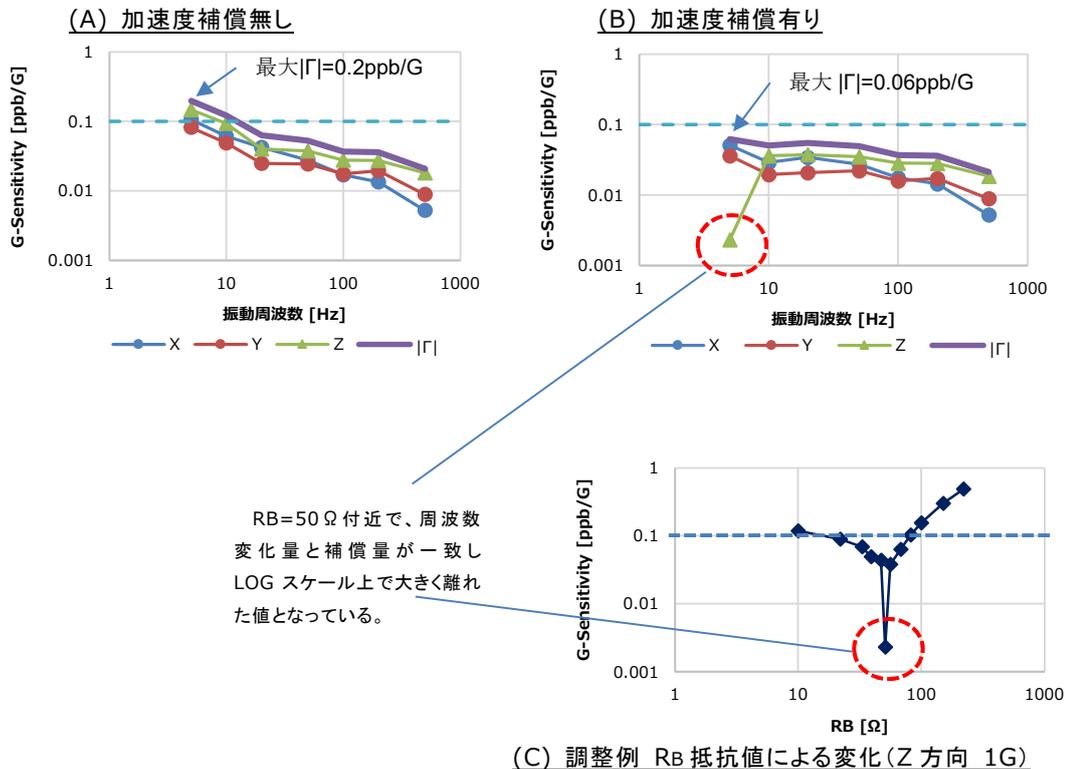
使用した加速度センサ



図(2).11 加速度センサによる補償回路と試作基板

VCXOのVc電圧を0Vに固定し、加速度補償の無い状態でG-Sensitivityを測定した結果を図(2).12 (A)に示す。振動周波数が低くなるほどG-Sensitivityが劣化する傾向が見られ、約10Hz以下で目標の0.1ppb/G以上、5Hzでは0.2ppb/Gとなった。10Hz以下の領域を補償し、かつ高周波域の過補償を防ぐため、加速度センサの出力端子内部抵抗Routと出力負荷容量CLとでLPFを構成した。LPFのカットオフ周波数は、はRout仕様値110kΩに対して、CLを0.1μFとし、14.5Hzに設定した。LPFは加速度センサの出力インピーダンスRoutと負荷容量CLによりローパスフィルタが構成され、カットオフ周波数ftは式(2).1で表される。

$$f_t = \frac{1}{2\pi R_{out} C_L} \quad \text{式(2).1}$$

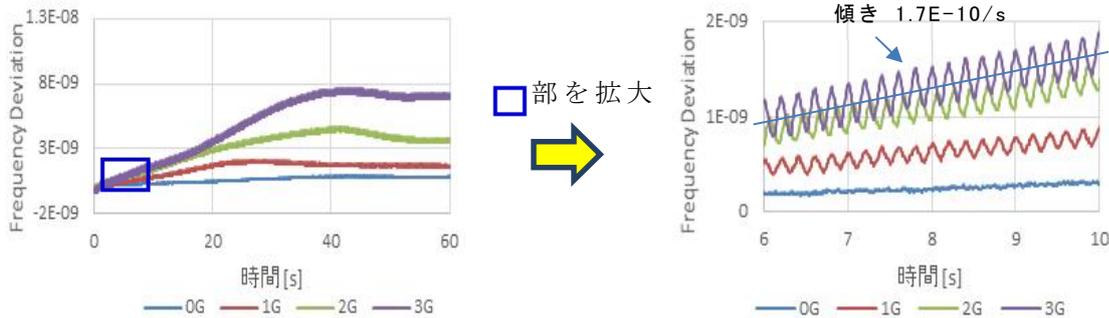


図(2).12 加速度センサによる補償での G-Sensitivity

このCL値においてx、y、z各方向のR_B抵抗値を変化させて補償量を調整した結果、振動補償後のG-Sensitivityは、5Hzにおいて最大で0.06ppb/Gとなり、中間目標及び最終目標である0.1ppb/Gを満たすことを確認した。加速度センサによる振動補償と4点接着振動子であり水晶設計を最適化した振動子とを組み合わせることでG-Sensitivityに対する効果があることがわかった。そのため、プロトタイプTCXOは当構成を採用している。

(f)振動下におけるアラン標準偏差

上記のVCXOで加速度センサによる補償を停止した状態でのアラン標準偏差を評価した。振動条件はZ方向、周波数5Hz、加速度は1G、2G、3Gの3条件で行った。図(2).13に振動開始後の経過時間に対する周波数の測定結果を示す。振動開始後の40秒程度は、周波数が概ね直線的に上昇している。右側のグラフは振動開始後6秒から10秒の領域を拡大している。加速度3Gでは周期5Hz、振幅 4.4×10^{-10} 、平均の傾斜が 1.7×10^{-10} /秒の速度で上昇している。

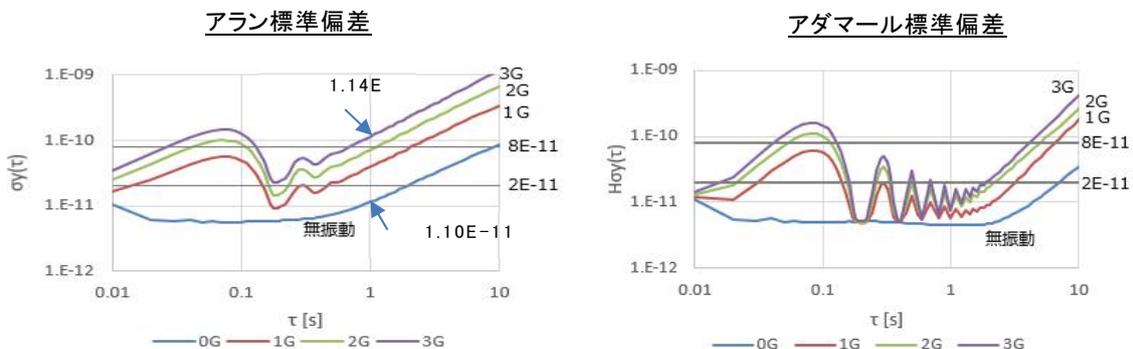


加振条件： Z方向 ， 5Hz ， 加速度(1G, 2G, 3G)

図(2).13 振動開始後の時間経過に伴う周波数変化

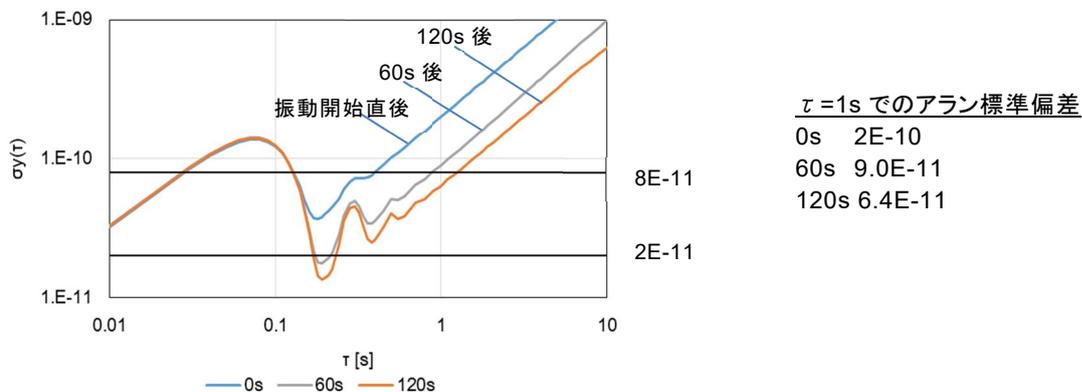
図(2).14は同一条件で測定した振動下でのアラン標準偏差とアダマール標準偏差を示す。アラン標準偏差は無振動時には $\tau=1s$ で 1.10×10^{-11} であるが、加速度が大きくなるにしたがって劣化し、加速度3Gでは 1.14×10^{-10} となり中間目標値の 8×10^{-11} を越える。図(2).13に示した3Gでの傾きと概ね同等のオーダーであること、アダマール標準偏差では加速度の上昇に伴う劣化が少ないことから水晶振動子のG-Sensitivityによる劣化ではなく、振動開始から振動環境での定常状態に至るまでの間の何らかの状態変化に起因する、一時的な劣化であると推測する。アダマール標準偏差は、式(2).2で与えられ、直線的な周波数ドリフトに影響されない評価方法である^[1]。

$$H\delta_y^2(\tau) = \frac{1}{6(M-2)} \sum_{i=1}^{M-2} (y_{i+2} - 2y_{i+1} + y_i)^2 \quad \text{式(2).2}$$



図(2).14 振動下でのアラン標準偏差とアダマール標準偏差

図(2).15は振動開始直後、60秒後、120秒後より、それぞれ40秒間のアラン標準偏差測定結果を示す。振動開始直後は周波数ドリフトにより劣化し、アラン標準偏差は 2.0×10^{-10} である。図(2).13での周波数ドリフトの測定結果と同様に、時間経過とともにアラン標準偏差の値は徐々に減少し、120秒後の測定では 6.4×10^{-11} となった。また、測定した条件、Z方向、加速度3G、振動周波数5Hz、はこの試料においてG-Sensitivityが最大となる条件である。



図(2).15 振動開始後の経過時間に対するアラン標準偏差

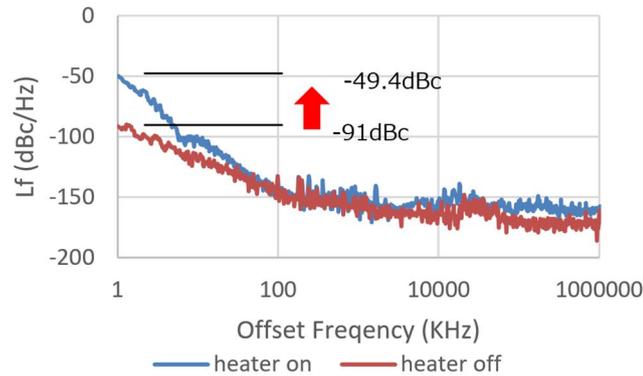
以上より、加速度3G、5Hz～50Hzの振動下において、アラン標準偏差は中間目標値 8×10^{-11} を満たすものと判断する。

(g)OCXOの検討

OCXOとしての温度安定性、消費電力の低減を目標として、図(2).16に示すパッケージ構造のOCXOを試作した。消費電力は、パッケージサイズ、ヒータICによって加熱する領域の体積に大きく依存しており、 $7.0 \times 5.0mm$ のパッケージでは、 $9.0 \times 7.0mm$ のパッケージより、30%程度の消費電力になることが確認できた。内部温度に関しても、ヒータ部のIC検出温度は、外周温度が変化しても、 $1^\circ C$ 程度の変化量に抑えられており、水晶振動子部とヒータ部間での熱のロスを抑えることで、OCXOとしての周波数精度が改善されると見込んでいる。一方、ヒータ電源を動作させた時にオフセット周波数の低い領域(1～100Hz)で、位相雑音の劣化が確認された(図(2).17)。

試作	P(mW)	構造図
① 9x7mm 分離構造	634	
② 7x5mm 水晶+ヒータIC (水晶基板)	211	
③ 7x5mm 水晶+ヒータIC (ポリイミドフィルム)	190	
④ 14x9mm VC-OCXO試作	327	

図(2).16 試作構造と消費電力

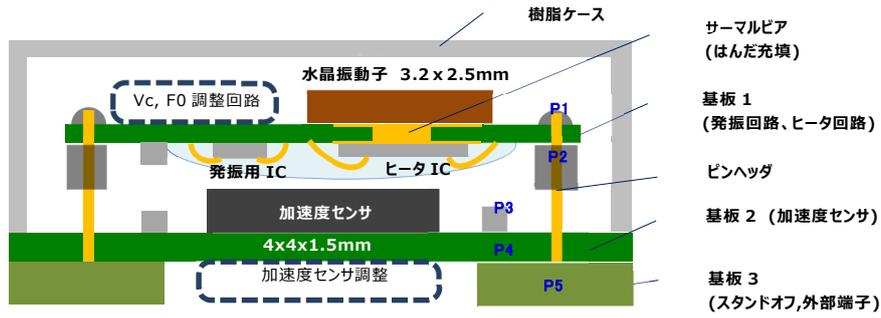


図(2).17 ヒータ回路動作、非動作時の位相雑音

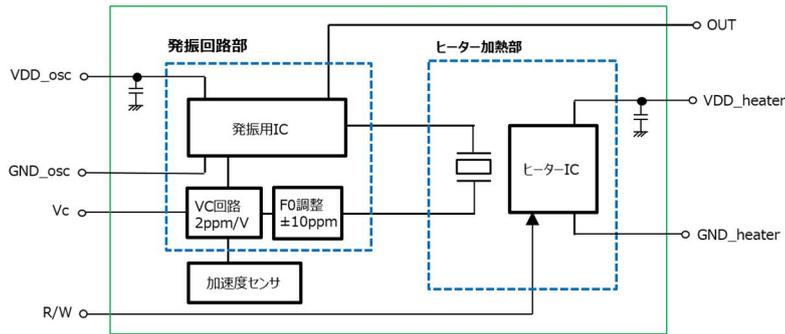
ヒータIC内部の雑音特性及び発振回路部とヒータ制御での干渉による影響と考える。ヒータICと発振回路の特性改善、アイソレーション設計の見直しを進めていく。

以上の要素実験の結果を基に14×9mmサイズのOCXOを試作し、性能検証を行った。試作したOCXOの構造図とブロック図及び回路図を図(2).18及び図(2).19に示す。パッケージ内部の基板1に発振回路とヒータ回路を配置し、製品内底面部の基板2との間をピンヘッダではんだ付け接続することでパッケージ内に電氣的、機械的に接続した。液晶ポリマー製の樹脂ケースを被せ、基板2にエポキシ接着材で接続、さらに最下部に基板3（スタンドオフ用）をはんだ付け接続した。基板1の下面にはCMOS発振回路を内蔵した水晶発振用IC及びOCXO用ヒータICをワイヤーボンディング接続している。ヒータICは温度センサ、加熱用パワートランジスタ、温度制御回路及び温度制御条件を外部から制御し記憶するためのメモリとRead/Write機能を備えている。基板1の上面に水晶振動子、VCXOとして機能させるためのバリキャップダイオードを含む周波数制御回路及び周波数調整用コンデンサを実装している。また、ヒータICと水晶振動子は基板1のヒータIC実装部には直径1mmのスルーホールをはんだで充填したサーマルビアを備え、ヒータIC底面と水晶振動子底面とを熱的に結合している。基板2の上面に加速度センサと周波数特性調整用のLPFを構成するコンデンサを実装し、また基板2の下面には補償電圧を分割して周波数制御回路に入力するための加速度補償量の調整用ランドを備えている。また、これらの施策工程フローを表(2).2に示す。

構造図 外形 14(L) x 9(W) x 6.5(H) mm

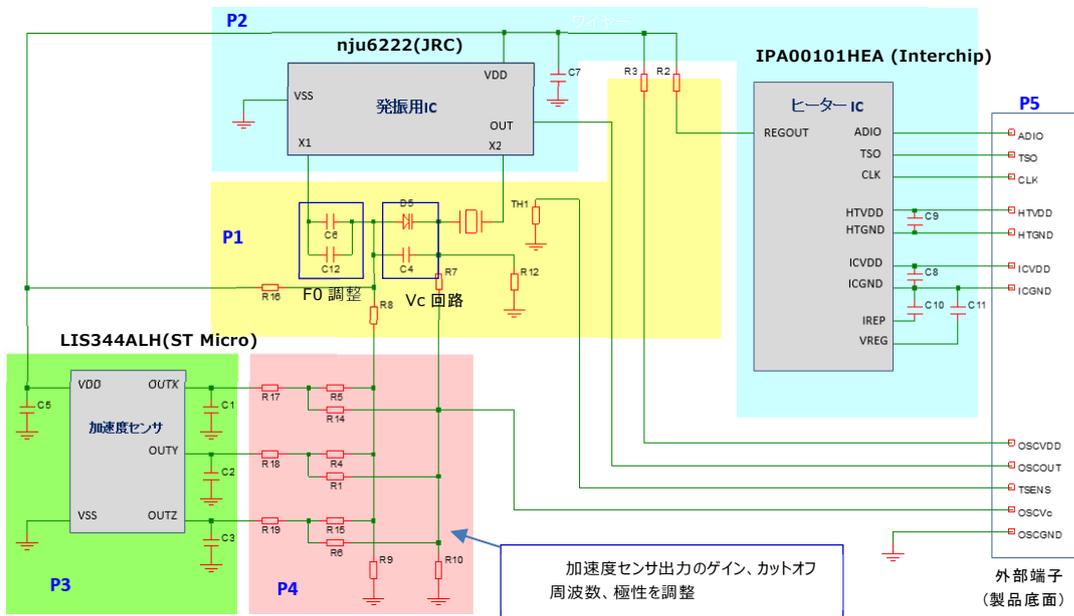


ブロック図



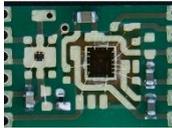
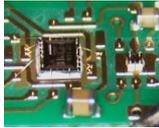
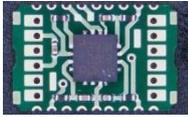
図(2).18 OCXO 構造図とブロック図

回路図

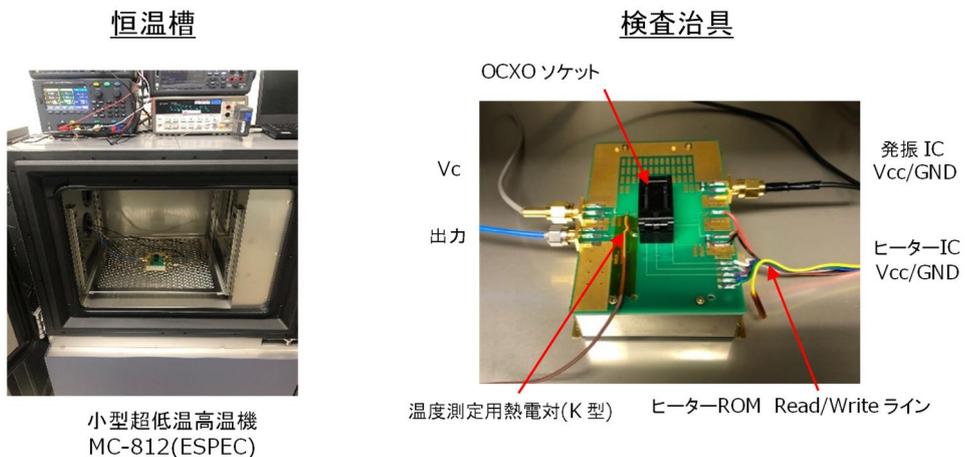


図(2).19 OCXO 回路図

表(2).2 試作工程フロー

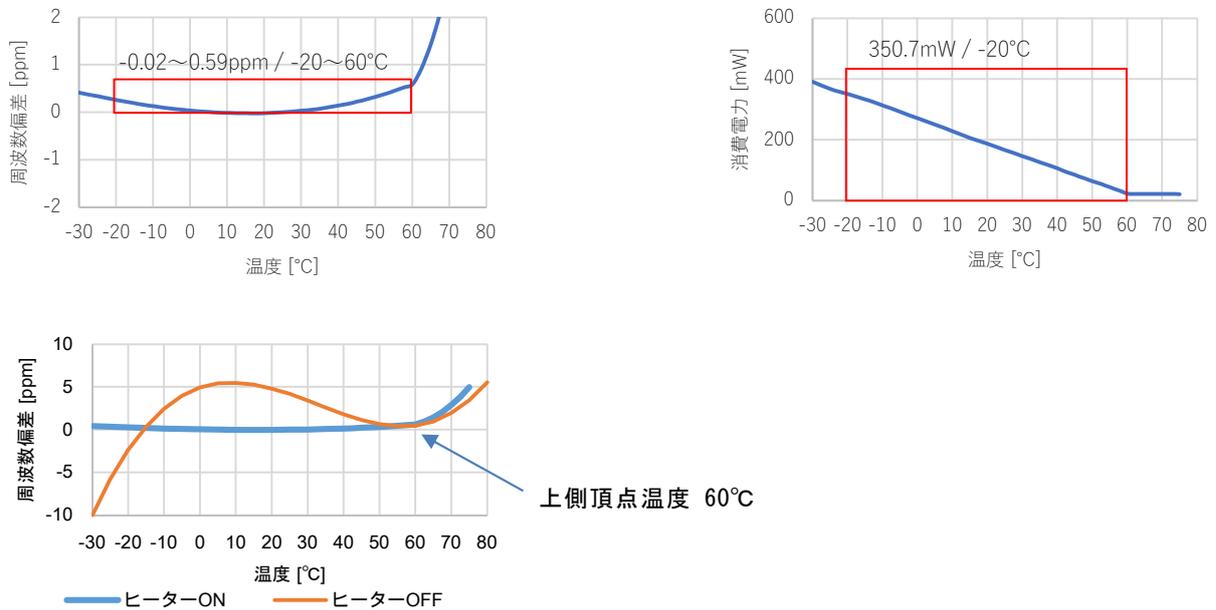
工程	試作品写真
1 基板 1,サーマルビア充填(はんだ)	
2 基板 1,P2 部品実装(抵抗、コンデンサ)	
3 基板 1,P2 IC 搭載 (発振用 IC,ヒータ IC)	
4 ワイヤーボンディング	
5 シリコン樹脂塗布、硬化	
6 基板 1,P1 部品実装 (振動子,バリキャップ,抵抗,コンデンサ)	 
7 基板 2,P3 部品実装 (加速度センサ, 抵抗,コンデンサ)	
8 組み立て 1	
9 ケース付け (エポキシ樹脂)	 
10 1 スタンドオフ接続	
10 1 P4 部品実装、調整	

上記の組み立て完了後、オープン温度設定及び特性評価を行った。使用した水晶振動子は AT-CUT であり、温度特性は常温付近に変曲点温度を持つ 3 次関数で表される。OCXO のオープン動作温度を水晶振動子の上側頂点温度に一致させることにより、温度に対する周波数の傾きを平坦化し、周囲温度揺らぎに起因するドリフトとアラン標準偏差の劣化を防いでいる。オープン温度の設定及び評価は、図(2).20 に示す検査治具を恒温槽内に配置して行った。



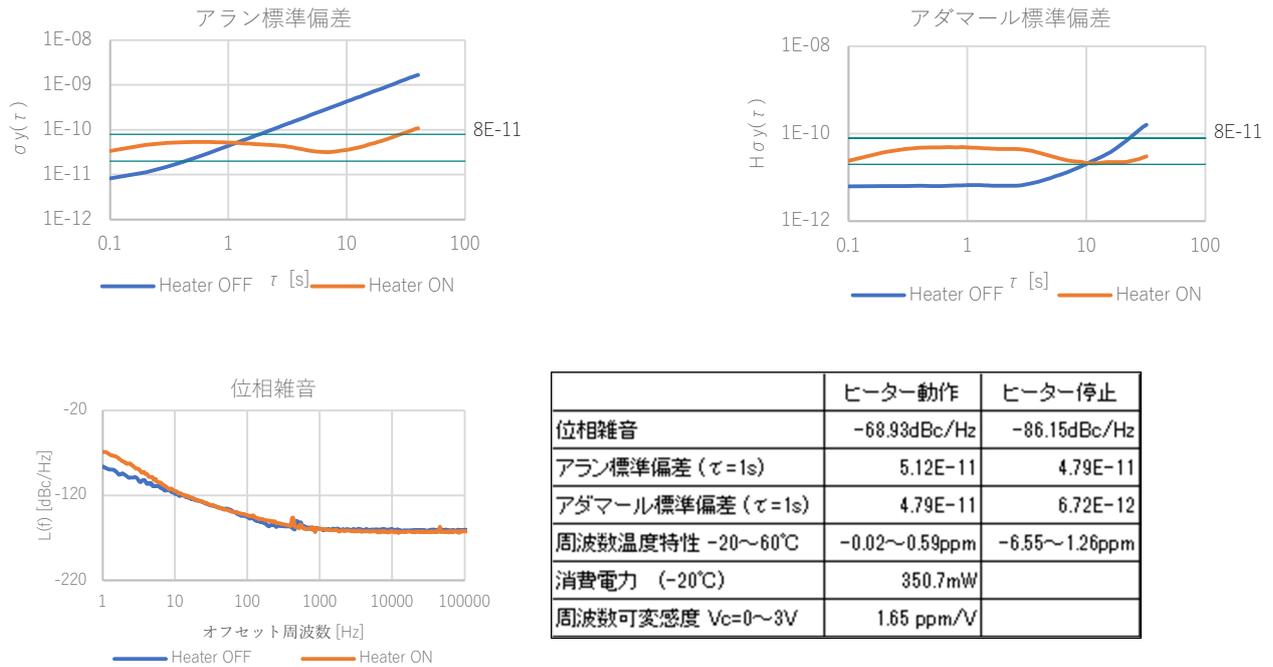
図(2).20 温度特性測定環境

測定結果を図(2).21に示す。試料のヒータ停止時の温度特性から得られた上側頂点温度に、動作時の水晶振動子の温度が一致するように調整を行い、調整後の周波数温度特性は、 $-0.02 \sim 0.59\text{ppm}$ 、消費電力は低温側で最大 350.7mW となった。温度範囲の条件は、使用した試料の上側頂点温度が 60°C であったことから、上限を 60°C とし、また下限は最終目標での温度範囲 $-10 \sim 70^\circ\text{C}$ における温度幅 80°C と等しくなるように -20°C に設定した。



図(2).21 温度特性測定結果

アラン標準偏差、アダマール標準偏差、位相雑音のヒータ動作時と停止時での測定結果を図(2).22に示す。ヒータ動作時のアラン標準偏差は 5.13×10^{-11} であり、中間目標値の 8×10^{-11} を満足することを確認した。しかし、ヒータ動作時には 10Hz 以下の位相雑音と1秒前後のアダマール標準偏差が劣化している。位相雑音は、ヒータ動作時 -68.9dBc/Hz に対して、ヒータ停止時 -86.2dBc/Hz であり 17dB 劣化、またアダマール標準偏差は動作時 4.8×10^{-11} に対してヒータ停止時に 6.7×10^{-12} であることから約7倍に劣化している。また、ヒータ動作時のアラン標準偏差のカーブはアダマール標準偏差の形状とほぼ同等である。したがって、ヒータICの発生する雑音によって 10Hz 以下の位相雑音レベル、1秒前後のアラン標準偏差及びアダマール標準偏差を劣化させており、最終目標の 2×10^{-11} を達成するにはヒータのノイズ対策が必要となる。

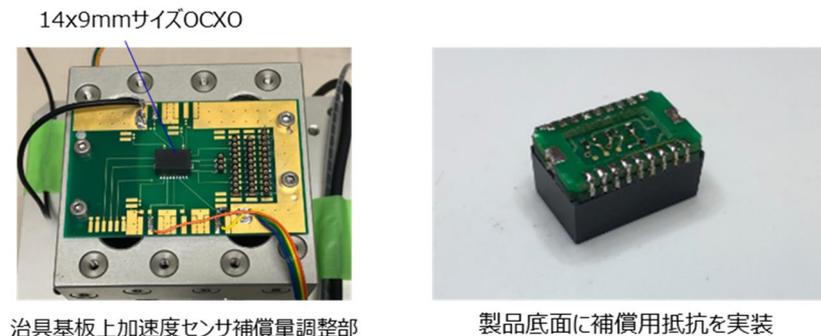


図(2.22) アラン標準偏差、アダマール標準偏差、位相雑音

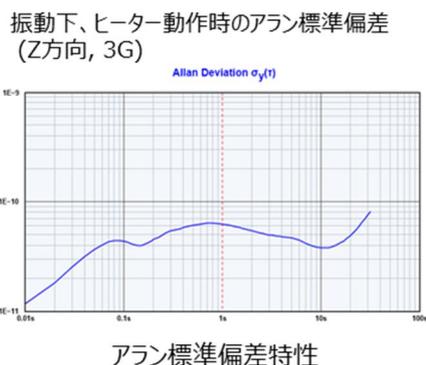
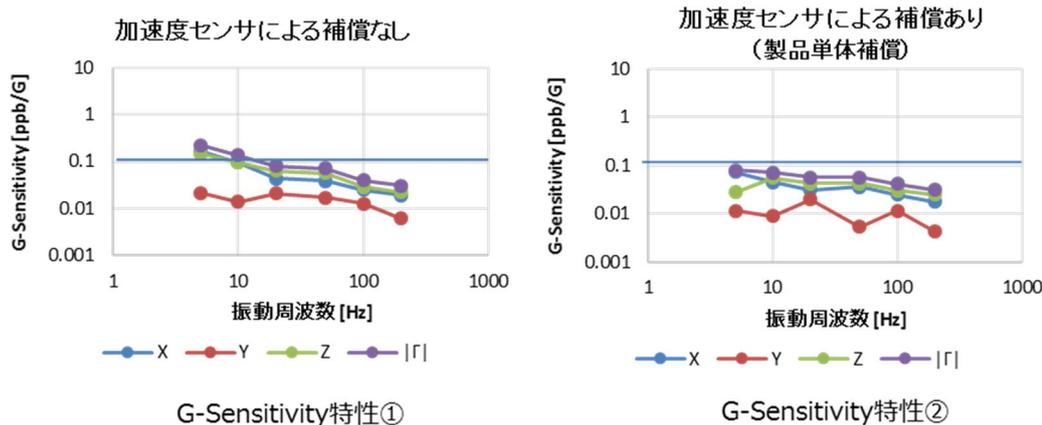
次に加速度センサ部の調整を行うため、以下のフローにて調整及び性能評価を行った。

- ①OCXOを治具基板に実装
- ②加速度センサによる補償無しでG-Sensitivityの性能評価
- ③加速度センサ補償用ソケットで抵抗調整
- ④振動試験を行いながら定数を決定
- ⑤OCXOを治具基板から取り外し製品底面の補償用抵抗を搭載
- ⑥再度治具基板に実装して性能評価

図(2.23)に上記の調整、性能評価を行った際の治具基板上のOCXOと抵抗値調整のための加速度センサ補償量調整部の製品底面部の状態を示す。図(2.24)に、加速度センサ補償有無における振動周波数に対するG-Sensitivityの測定結果を示す。加速度センサによる補償によりG-Sensitivityは0.08ppb/Gの結果であり、最終目標である0.1ppb/Gを満足している。また、アラン標準偏差もZ方向 加速度: 3Gのワーストケースにおいて 6.24×10^{-11} であり、中間目標である 8.0×10^{-11} を満足しているが、最終目標の 2.0×10^{-11} には到達していない。



図(2.23) 加速度センサ補償量調整時の測定、製品状態

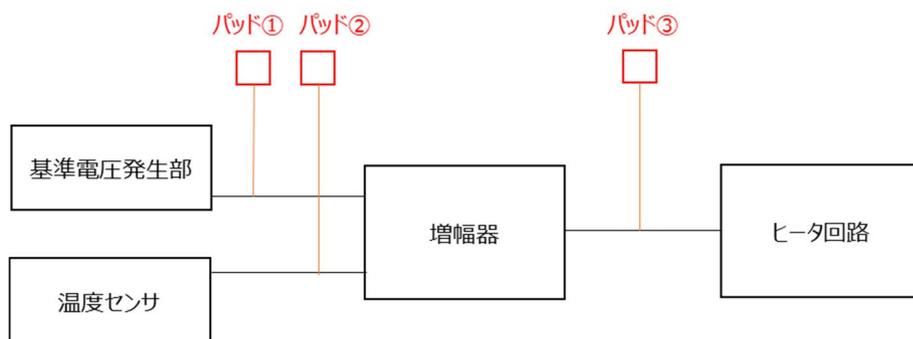


図(2).24 加速度センサ補償有無の特性結果

上記の性能評価結果を元にヒータノイズ対策を実施した。その対策のため、使用していたヒータICに対してパッド機能を追加したICを用いて性能評価を行った。

図(2).25にパッド①～③を今回の対策のために追加したICの温度検出からヒータ電流制御に至るブロック図を示す。

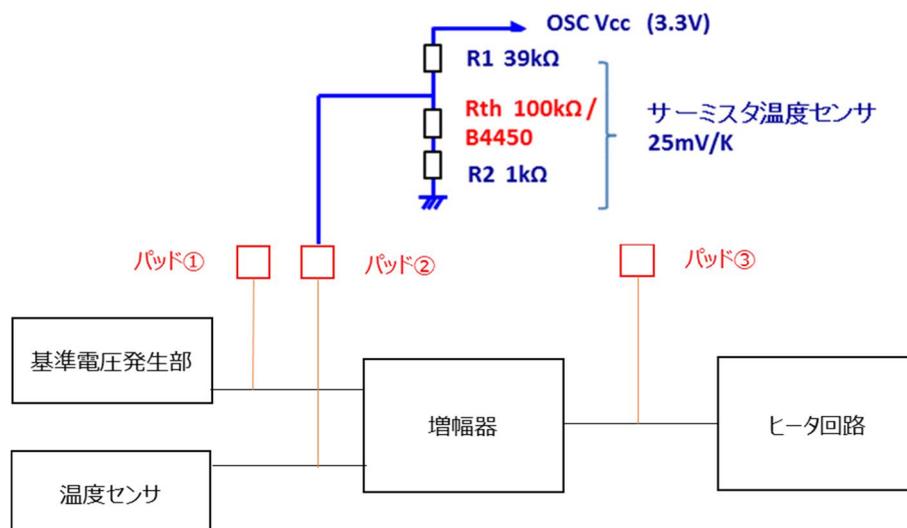
IC内蔵のPN接合電圧を利用した温度センサと比較し、サーミスタ温度センサは検出感度が約8倍高い。そのため、アンプゲインを低減することができ、ヒータノイズを低減することができる。温度センサとしてサーミスタを外付けできるようにICにパッド②を追加した。またICの増幅器前後のノイズ発生源に対してデカップリングができるように、コンデンサ等を用いて制御するためのパッド①と③を追加した。



図(2).25 ヒータ IC ブロック図

図(2).26に、ヒータノイズ対策のための回路ブロック図を示す。温度センサであるサーミスタ

により検出した温度を電圧に変換するため、R1との分圧とし、パッド②に入力している。なお、R2はサーミスタとGND間の熱抵抗を大きくするためのものである。



図(2).26 ヒータ IC 評価時の回路ブロック図

図(2).27に、試作、評価した際の基板外観を示す。サーミスタを水晶振動子に近接配置し、水晶振動子の温度をより正確に検出できるようにしている。また、アンプのゲイン設定は、内蔵温度センサによる場合に対して1/14倍に設定し、評価を行った。



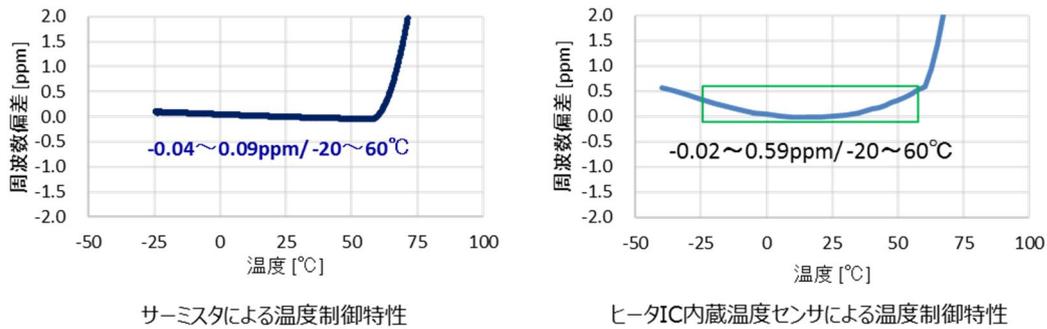
サーミスタを水晶振動子に近接配置した基板外観

ヒータIC実装状態の基板外観

図(2).27 試作品の基板外観

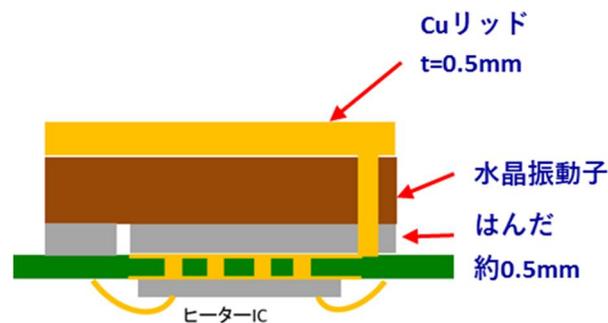
図(2).28に上記試作品の周波数温度特性の結果を示す。内蔵温度センサによる周波数温度特性の結果（図(2).28）も合わせて示す。内蔵温度センサを用いた際の周波数変化は $-0.02 \sim +0.59 \text{ ppm}/-20 \sim +60^\circ\text{C}$ に対して、サーミスタを用いた際の周波数変化は $-0.04 \sim +0.09 \text{ ppm}/-20 \sim +60^\circ\text{C}$ であり、周波数変化量が大きく改善されている。また、直線性も大きく改善されている。これは水晶振動子の温度をより一定に保つことができたためであり、内蔵の温度センサに対してサーミスタを水晶振動子に近接配置させたことによる効果である。

以上より、温度センサであるサーミスタを水晶振動子に近接配置することにより、アンプゲインを下げ、かつ温度が安定になったことを確認した。



図(2).28 各温度センサに対する特性結果

位相雑音、アラン標準偏差についても特性評価を行った。また、同時に増幅器入出力にあるパッド①、③とGND間にコンデンサを接続した際の特性評価及び水晶振動子周りの熱容量追加の組み合わせによる効果についても特性評価を行った。熱容量追加の組み合わせについては、①水晶振動子と基板を接続しているハンダの追加（厚みを約0.5mm）、②①のハンダの追加に、さらにCuリッド（厚み 0.5mm）を追加した2つの条件である。この熱容量追加組み合わせの模式図を図(2).29に示す。基板を介して伝わるヒータICからの熱を水晶振動子に伝えやすく、かつ周囲温度が変化しても水晶振動子の温度が安定しやすいように水晶振動子の上面全体を覆うようにCuリッドを配置した。



図(2).29 熱容量追加組み合わせ評価時の模式図

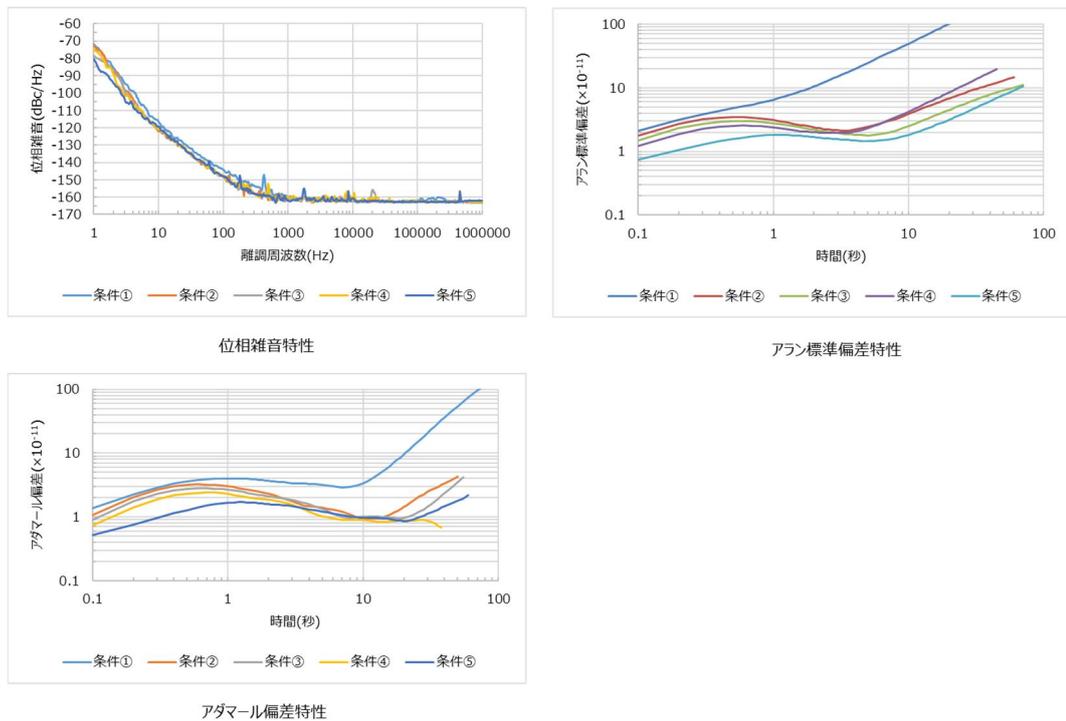
以上の組み合わせ条件と結果一覧を表(2).3に、位相雑音、アラン標準偏差及びアダマール標準偏差の結果を図(2).30に示す。まず、パッド①とGND間に10 μ Fのコンデンサを接続することでアラン標準偏差とアダマール標準偏差に効果が得られた。さらに、アンプゲイン低減、熱容量追加の組み合わせにより位相雑音、アラン標準偏差のいずれも改善した。アラン標準偏差は 1.81×10^{-11} まで低減し、最終目標である 2.0×10^{-11} を満足する。これら改善の要因としては以下が考えられる。

- ①アンプゲインの低減により、ヒータノイズ成分の増幅が抑制され、ヒータ温度揺らぎに起因する劣化が抑制された
- ②パッド①とGND間のデカップリングコンデンサにより、アンプへのノイズ成分の入力が抑制された
- ③ハンダの追加、Cuリッドの追加により、熱容量が大きくなり、温度の揺らぎに起因する劣化が抑制された

以上より、パッド機能を追加したヒータICを用い、温度センサとしてサーミスタを外付けし、水晶振動子に近接配置することで、温度に対する周波数の安定化及びヒータICのノイズ対策ができたものとする。

表(2.3) 組み合わせ評価結果

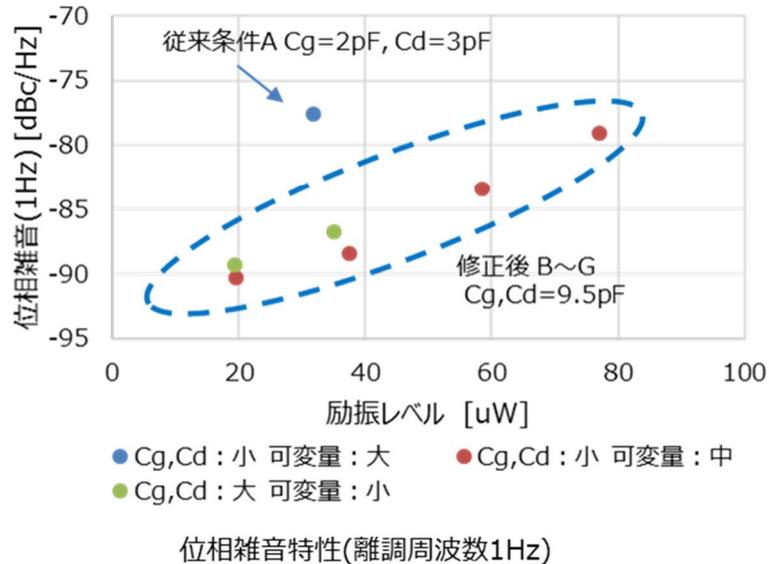
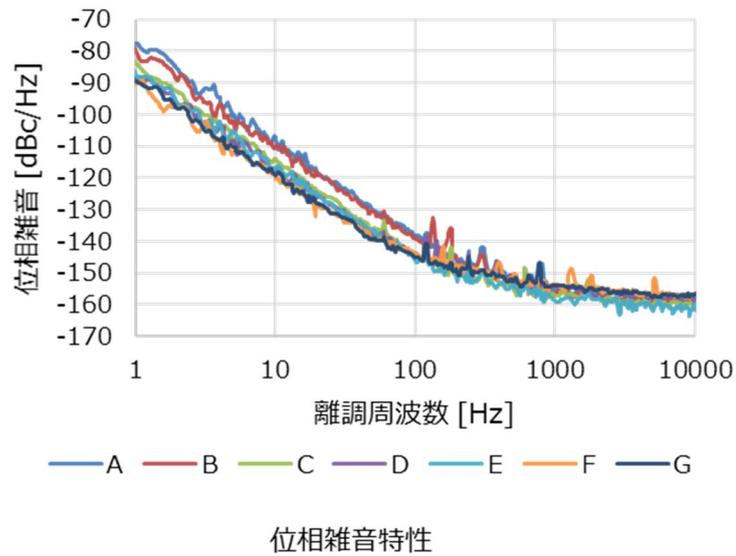
条件	温度センサ	ゲイン設定	他	位相雑音 (1Hz) dBc/Hz	アラン標準偏差 (1s) $\times 10^{-11}$	アダマル偏差 (1s) $\times 10^{-11}$
条件①	内蔵	0.29	(令和3年10月報告)	-71.8	6.50	4.02
条件②	外付け サーミスタ	0.02	-	-72.9	3.11	3.03
条件③		0.02	パッド①とGND間 コンデンサ10uF	-71.6	2.76	2.67
条件④		0.02	パッド①とGND間 コンデンサ10uF 底面はんだ(t0.5mm)追加	-74.9	2.37	2.28
条件⑤		0.02	パッド①とGND間 コンデンサ10uF 底面はんだ(t0.5mm)追加 Cuリッド(t=0.5mm)追加	-80.6	1.81	1.67



図(2.30) 組み合わせ評価結果

位相雑音性能を向上することでOCXOの小型化とアラン標準偏差の改善を図るため、VCXO用ICの設計を修正し、10MHzの水晶振動子を使用して性能評価を行った。

VCXO用ICの設計の修正については、水晶振動子の励振レベルと可変感度を小さくするために、発振段入出力容量の追加、制限抵抗値の増加及びバリキャップダイオードの変更を行った。図(2.31)に位相雑音とオフセット周波数1Hzにおける励振レベルを変化させた際の位相雑音の結果を示す。励振レベルが $20\mu\text{W}$ 、及び周波数制御感度を小さくした条件において、位相雑音は -90dBc/Hz に到達した。最終目標に必要な -80dBc/Hz を十分満足している。OCXOの小型化のためには、水晶振動子の周波数として20MHzもしくは、40MHzも考慮に入れる必要がある。そのため、今回の設計修正内容を20MHzと40MHzのためのVCXO用ICにも展開が必要になる。



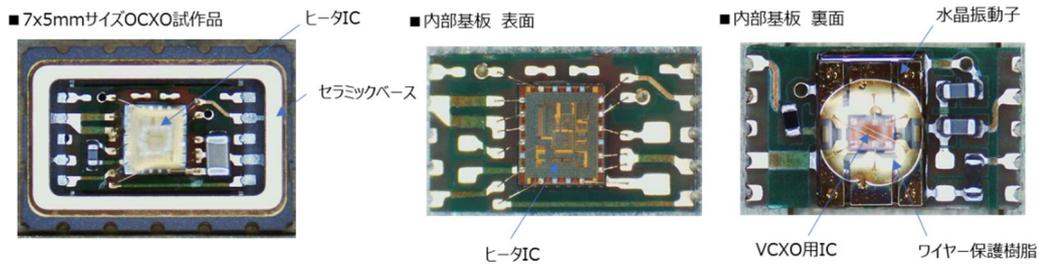
図(2).31 VCXO 用 IC の位相雑音結果

(h)7mm×5mm サイズ OCXO の試作、評価

最終目標の製品サイズ実現のため、7mm×5mm サイズ OCXO の設計、試作を行い、初期性能評価を行った。

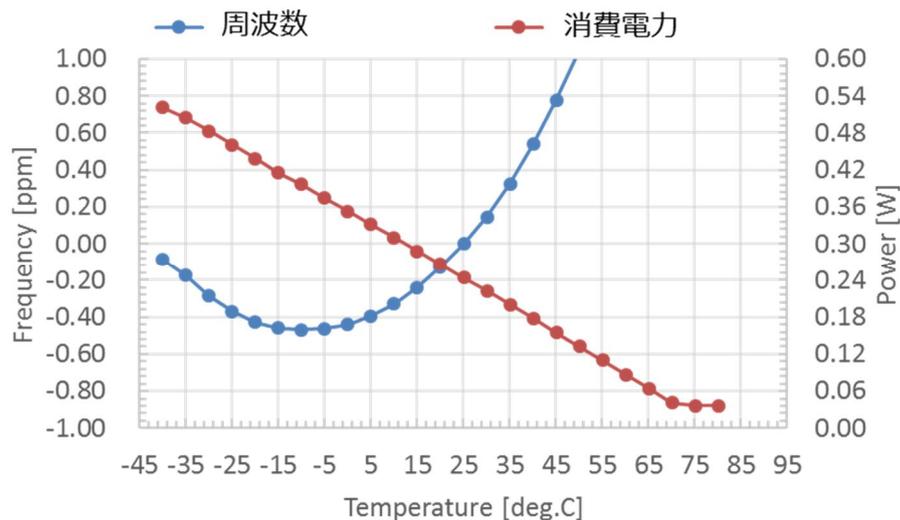
(1) 1次試作

7.3mm×4.9mmサイズセラミックベースの設計、水晶振動子、チップ部品などを実装するための内部基板の設計を行った。使用した水晶振動子は、WLP構造の2.5mm×1.8mmサイズ水晶振動子である。試作した7mm×5mm サイズOCXOの外観を図(2).32に示す。内部基板はセラミックベース短辺側でのみ保持する構造とし、内部基板上にWLP水晶振動子を搭載し、その上に発振用VCXO用ICを搭載している。また、セラミックベースに金属リッドを用い、内部雰囲気真空として気密封止している。



図(2).32 7mm×5mm サイズ OCXO 構成図

図(2).33に周波数温度特性と消費電力温度特性の測定結果を示す。周波数温度特性の結果について、水晶ATカットの特性が広い温度範囲でそのまま出ていることから、周囲温度の影響を大きく受けており、OCXOとしての内部温度の安定性が低いものと考えられる。次に消費電力温度特性の結果について、+25℃において240mWの結果、目標である100mWに到達していない。また、気密封止前後（内部雰囲気：真空）における消費電流の変化が封止前：108mA、封止後（内部は真空）：100mAと低下が少なかった。ヒータ部の熱が閉じ込められておらず、内部基板からパッケージへの熱伝導が大きいことを示唆しているものと考えられ、今の構造では内部基板に対する断熱性能が低いと考える。さらに、特性評価と要因分析を行う必要がある。また、断熱性の観点から、基板、パッケージなどの構造の見直しが必要になる。

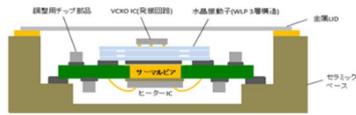


図(2).33 7mm×5mm サイズ OCXO 特性結果

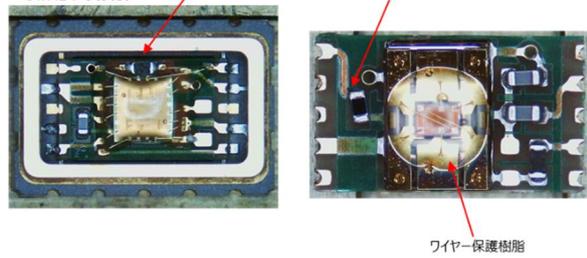
(2) 2次試作

温度制御方式としてヒータIC内蔵温度センサによる温度制御(以下、IC内蔵温度センサ制御とする)を使用している。IC内蔵温度センサ制御では温度変化に対する温度センサからの出力電圧の変化量が小さいため、ヒータを制御するためのアンプのゲイン（以下ヒータゲインとする）を大きくする必要がある。ヒータからのノイズを低減するためにはヒータゲインを小さくする必要がある。IC内蔵のPN接合電圧を利用した温度センサと比較し、サーミスタ温度センサは検出感度が高いため、温度センサとしてサーミスタを用いたサーミスタ制御について評価を行った。各制御においてヒータゲインを変更したときの位相雑音、アダマール標準偏差の評価を行った。その構造、回路図、実装状態、結果を図(2).34に示す。OCXO構造についてはセラミックベースおよび金属リッドを用いた気密封止構造である。水晶振動子はWLP構造、周波数は40MHzを使用した。

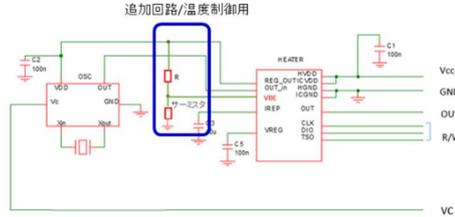
■構造



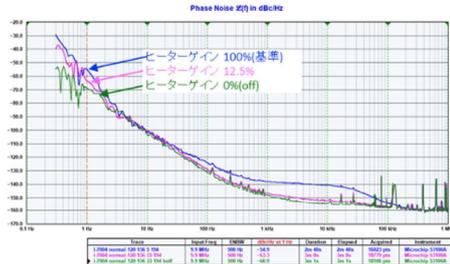
■試作結果 実装後



■OCXO回路図

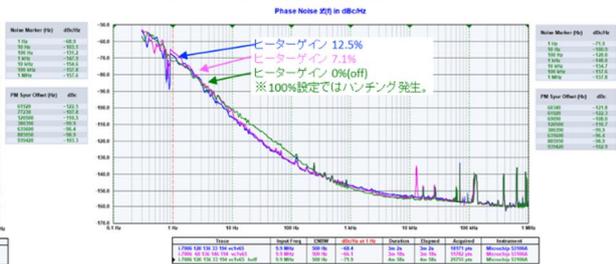


<IC内蔵温度センサ制御回路での動作製品特性>



ヒータゲイン	位相雑音 [dBc/Hz]		アダマール偏差 [τ=1s]
	1Hz	10Hz	
100%	-54.9	-100.9	4.26×10^{-10}
12.5%	-63.3	-100.2	2.85×10^{-10}
0%(OFF)	-68.9	-103.1	1.36×10^{-10}

<サーミスタ制御回路での動作製品特性>



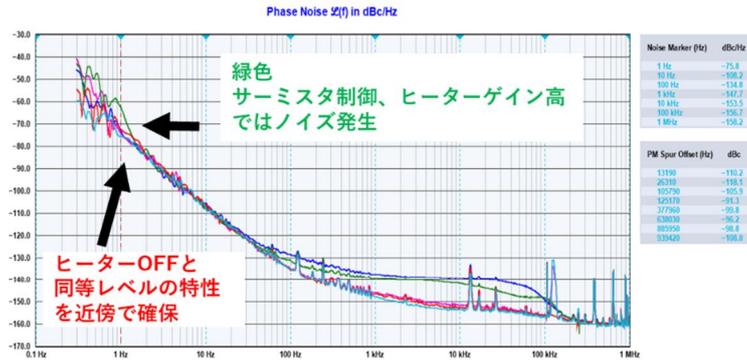
ヒータゲイン	位相雑音 [dBc/Hz]		アダマール偏差 [τ=1s]
	1Hz	10Hz	
12.5%	-68.4	-105.6	4.86×10^{-11}
7.1%	-66.1	-101.7	1.01×10^{-10}
0%(OFF)	-71.9	-100.9	3.43×10^{-10}

図(2).34 各制御における位相雑音、アダマール標準偏差

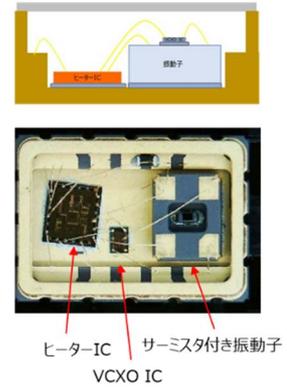
IC内蔵温度センサ制御の場合、ヒータゲインを下げると位相雑音(1Hz)はヒータゲイン100%において-54.9dBc/Hz、12.5%において-63.3dBc/Hzと改善傾向にあるが、オフセット周波数近傍(1~3Hz)では位相雑音は悪化し、またヒータゲインが大きい100%においてはフロア領域で約10dBc/Hz位相雑音が悪化する結果となった。サーミスタ制御とすることで、ヒータゲイン12.5%の場合、位相雑音(1Hz)がIC内蔵温度センサ制御-63.3dBc/Hzに対しサーミスタ制御-68.4dBc/Hzと改善する結果となった。サーミスタ制御のほうがヒータゲインに入力される温度センサ電圧のノイズ成分が小さいためではないかと推測する。

位相雑音におけるオフセット周波数近傍領域の劣化改善のため、ヒータと水晶振動子の位置を上記評価の縦方向の構造から横方向の構造に変更し同じ評価を行った。その結果と搭載の様子を図(2).35に示す。

【位相雑音 評価結果】



【横方向搭載】



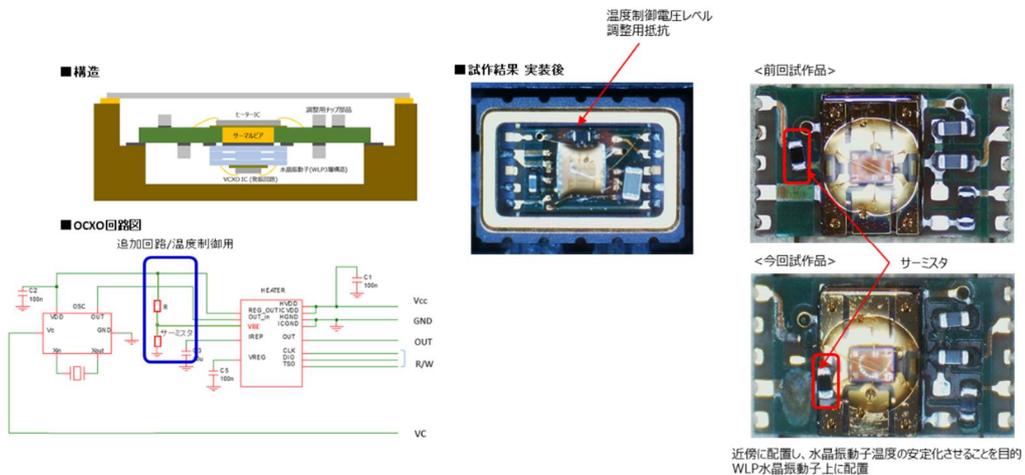
ヒーターゲイン	温度制御	位相雑音 [dBc/Hz]		アダマール偏差 [τ=1s]
		1Hz	10Hz	
100%	内部回路	-73.2	-105.4	1.69×10^{-10}
12.5%	内部回路	-74.4	-107.6	1.06×10^{-10}
100%	サーミスタ	-62.7	-106.7	1.26×10^{-10}
12.5%	サーミスタ	-72.4	-106.4	9.38×10^{-11}
0%(OFF)	なし	-75.8	-106.2	4.69×10^{-11}

図(2.35) 位相雑音結果と横方向搭載図

IC内蔵温度センサ制御、サーミスタ制御ともに位相雑音（1Hz）について、ヒータオフ-75.8dBc/Hzに対し、ヒータゲイン12.5%においてサーミスタ制御-72.4dBc/Hz、IC内蔵温度センサ制御-74.4dBc/Hzと同等の特性をオフセット周波数近傍で確保できており、縦実装で発生していたオフセット周波数近傍の劣化は見られなかった。ただ、サーミスタ制御におけるヒータゲイン高では1Hz近傍でノイズが発生しているが、原因についてはわかっていない。この結果よりヒータと水晶振動子の距離が大きく依存していることが考えられ、距離が近い場合ヒータの温度揺らぎや温度衝撃が水晶振動子に伝わりやすくオフセット周波数近傍に影響を与えていると考えられる。

(3) 3次試作

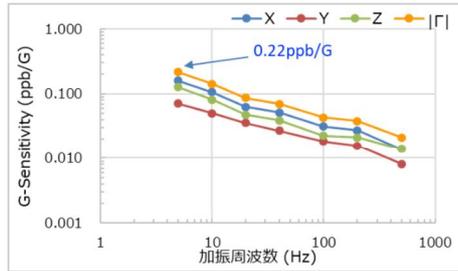
励振電極部を2点支持とし、かつ上記において位相雑音が良好であったサーミスタ制御にてG-Sensitivity、周波数温度特性、位相雑音、アラン標準偏差の評価を行った。サーミスタの実装状態と結果を図(2.36)に示す。OCXO構造についてはセラミックベースおよび金属リッドを用いた気密封止構造である。水晶振動子はWLP構造、周波数は20MHzを使用した。なお水晶振動子の温度を正確に検出できるようにサーミスタの実装位置をガラスエポキシ基板上から水晶振動子上に変更している。



図(2.36) 3次試作結果 (次ページに続く)

【G-sensitivity評価】

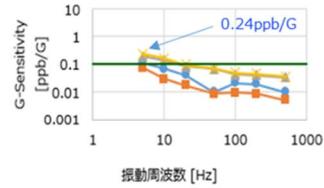
- Vcc=3.3V
- Vc=1.65V
- Ta=+25°C
- 振動周波数: 5~500Hz
- 加速度: 3G



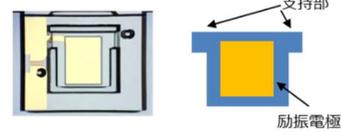
		振動周波数 [Hz]						
		5	10	20	40	100	200	500
G-Sensitivity [ppb/G]	X	0.16	0.11	0.06	0.05	0.03	0.03	0.01
	Y	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01
	Z	0.13	0.08	0.05	0.04	0.02	0.02	0.01
	Γ	0.22	0.14	0.09	0.07	0.04	0.04	0.02

20MHz WLP振動子 単体評価結果
(※ 令和4年度成果報告書 記載結果)

②対向2点支持

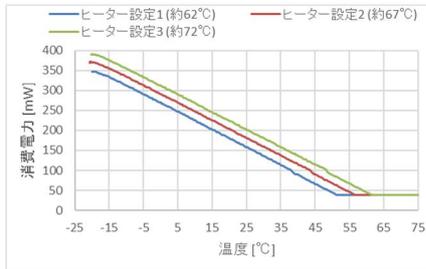
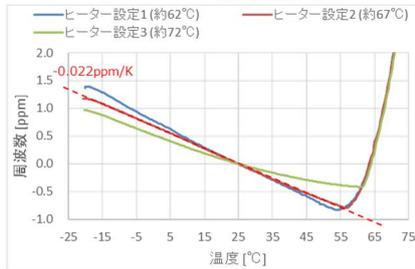


振動子保持部構造 (2点支持)

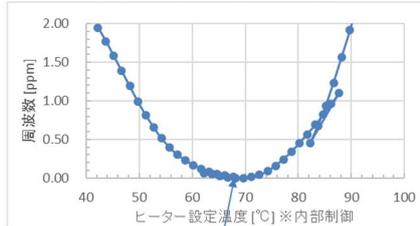


【温度特性評価】

- Vcc=3.3V
- Vc=1.65V
- 温度制御: サーマスタ

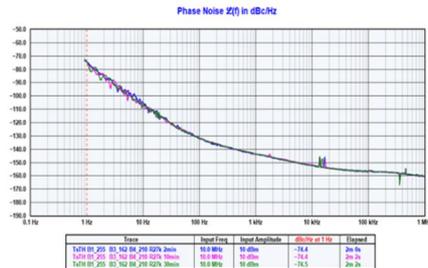


【室温でのヒーター温度設定と周波数の関係】

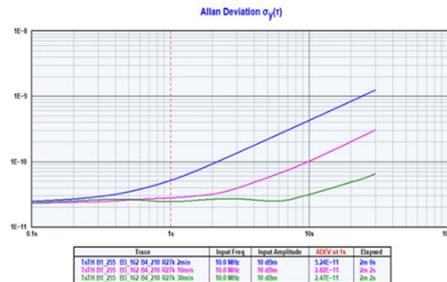


ヒーター温度 67°Cでは高温ターンオーバー温度だが、OCXOとしては1次の傾斜が発生

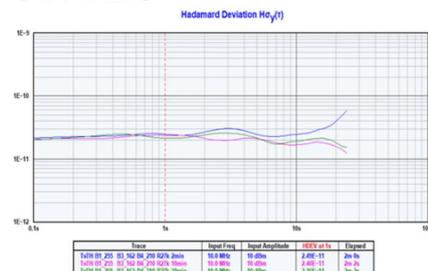
【位相雑音特性】



【アラン標準偏差】



【アダマール偏差】



	CN(1Hz) dBc/Hz	Adev(1s) x1E-11	Hdev(1s) x1E-11
2min	-74.4	5.24	2.49
10min	-74.4	2.82	2.40
30min	-74.5	2.47	2.16

図(2).36 3次試作結果 (前ページから)

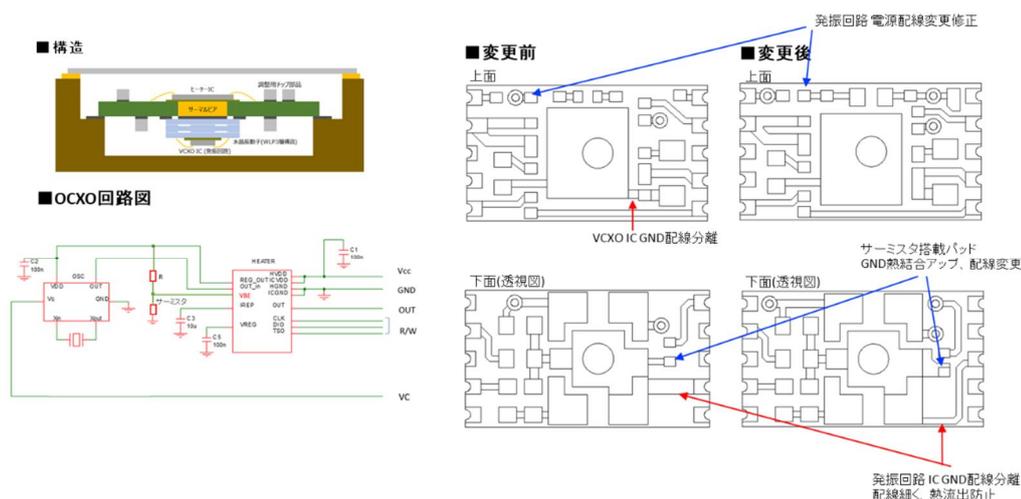
G-Sensitivityについて、振動周波数20Hz以上では0.1ppb/Gを達成しているが、5Hzにおいては0.22ppb/Gの結果であり目標を達成していない。

周波数温度特性について、水晶の高温側のターンオーバー温度を捉えているが、周囲温度変化に対して約-0.022ppm/Kの傾きが生じている。この原因についてはヒータゲインによる影響、VCXOの可変感度依存性、VCXOの周波数調整感度(容量)依存、パッケージ内温度勾配依存が考えられるが、水晶振動子への応力による可能性が高いのではないかと推測する。

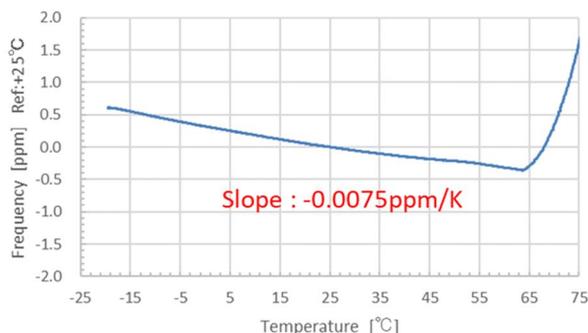
位相雑音(1Hz、電源投入30分後)について、-74.5dBc/Hzと近傍ノイズが低減傾向にあるが、目標値の-80dBc/Hzには到達していない結果となった。水晶振動子の応力による影響、ヒータICからのノイズ、水晶振動子への熱衝撃等の影響と考えられるが、明確な原因の特定には至っていない。

(4) 4次試作

温度特性の改善、ヒータゲインの低減を目的に、温度制御用サーミスタの熱結合強化のため基板側GNDパターン側を大きくする修正、基板からセラミックパッケージへの熱の流出を防ぐために発振回路のGND配線を細長くする修正、また位相雑音改善を目的に、電源の分離を容易にする配線に基板を修正し周波数温度特性の評価を行った。変更前後の基板配線、結果を図(2).37に示す。OCXO構造についてはセラミックベースおよび金属リッドを用いた気密封止構造である。



温度特性(出力周波数 10MHz)



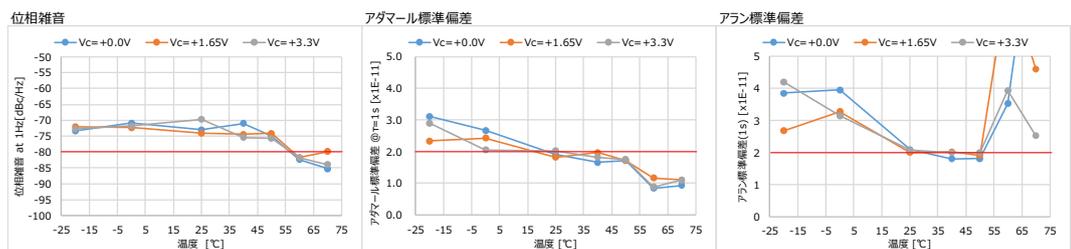
図(2).37 変更前後の基板図、周波数温度特性結果

周波数温度特性におけるスロープについて、基板変更前の-0.022ppm/Kから-0.0075ppm/Kに改善できた。水晶振動子の温度範囲を狭い範囲で制御できるようになった結果であり、基板からセラミックパッケージへの熱流出を抑制できている効果、および温度制御用サーミスタと基板との熱結合強化により両者間での温度差が小さくなったことで基板温度全体がより均一の温度

になったことの効果であると考え。

次に温度度を変化させた時の位相雑音、アラン標準偏差、アダマール標準偏差を検証した。測定結果を図(2).38に示す。

	Vc電圧	環境温度						
		-20℃	+0℃	+25℃	+40℃	+50℃	+60℃	+70℃
位相雑音 dBc/Hz (@1Hz)	+0.0V	-73.4	-70.9	-73.0	-71.0	-74.9	-82.3	-85.2
	+1.65V	-72.0	-72.3	-74.1	-74.4	-74.1	-81.7	-79.8
	+3.3V	-72.7	-71.8	-69.7	-75.4	-75.7	-81.8	-83.9
アダマール標準偏差 $\times 10^{-11}$ (@ $\tau=1s$)	+0.0V	3.11	2.67	1.90	1.65	1.72	0.84	0.93
	+1.65V	2.33	2.43	1.82	1.97	1.72	1.16	1.10
	+3.3V	2.90	2.05	2.02	1.82	1.75	0.88	1.10
Adev $\times 10^{-11}$ (@ $\tau=1s$)	+0.0V	3.85	3.96	2.10	1.81	1.82	3.53	9.80
	+1.65V	2.69	3.28	2.00	2.03	1.91	7.33	4.60
	+3.3V	4.20	3.15	2.08	2.00	2.00	3.94	2.53



図(2).38 半田実装品における環境温度に対する各種特性 測定結果

アラン標準偏差、アダマール標準偏差において、25~50℃の温度範囲において、最終目標である 2×10^{-11} を達成した。50℃より高い温度領域においては、今回の試料では水晶振動子の高温側の頂点温度が想定より低かったため、ヒータ制御が停止しており、ヒータノイズ由来の劣化がなく、発振器の特性が現れていると考える。適正な水晶の温度特性であった場合、50℃の特性に近い値となっていたと推測される。

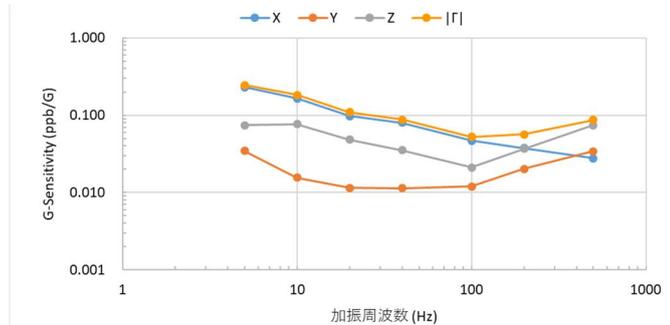
一方、低温領域では、特性が劣化している。この劣化については、今回の試料では温度特性が -0.0075ppm/K の傾斜を持っていること、温度を一定に保つためにヒータ出力が大きくなることでヒータノイズが増大したことが原因と推測する。温度特性については、ヒータノイズとの相関がみられ、ヒータノイズの低減を優先したこともあり、今回の結果より、さらに最適な構造の検討が必要と考える。アラン標準偏差、アダマール標準偏差において、 $\tau=0.1\sim 2s$ の領域で、ヒータノイズが $\tau=1s$ での測定値を劣化させる要因となり、温度起因の要因もあいまって、 $-10\sim 70\text{℃}$ の全温度領域での特性の確保はできなかった。

上記構造でのG-sensitivityについて図(2).39の結果となった。なお加速度補償回路は実装していない。振動周波数40Hzで目標値の0.1ppb/Gをクリアしたが、5~20Hzの領域ではX方向(製品の長手方向)に振動した際に悪化する傾向が見られた。パッケージ内部において短辺側のみで基板を実装している構造のため、X方向では内部の基板が振動しやすく、影響が出やすいと考える。以上が、7mm×5mmサイズOCXOの本研究における結果である。7mm×5mmサイズOCXOにおいて最終目標であるアラン標準偏差： 2×10^{-11} ($\tau=1s$)の全温度範囲、G-Sensitivity：0.1ppb/Gを達成することができなかった。

課題と対策については以下と考える。アラン標準偏差については、熱的な揺らぎによる周波数安定度の劣化、ヒータICからのノイズが課題であると考え。その対策には振動子とヒータ間の熱容量や距離の適正化、ヒータIC自体のヒータゲインやノイズに対する調整、補正機能の付加が効果的であると考え。

G-Sensitivityについては、加速度補償による効果が大きいですが、回路規模が大きくなるため、実装ができなかったことが課題であると考え。対策には加速度補償回路を含めた回路の小型化が必要となる。そのためには、補償する軸方向の限定、調整回路の縮小による回路規模の縮小、加速度補償ICパッケージの小型化、回路全体のIC化が効果的であると考え。

	FO MHz	10	10	10	10	10	10	10
	加振周波数 Hz	5	10	20	40	100	200	500
	加加速度 g	3	3	3	3	3	3	3
Phase Noise dBc/Hz	X	-63.2	-72.1	-82.7	-90.5	-103.1	-111	-121.6
	Y	-79.7	-92.6	-101.3	-107.4	-114.9	-116.4	-119.8
	Z	-73	-78.8	-88.8	-97.6	-110	-111.2	-113
G-Sensitivity X1E-9	X	0.23	0.17	0.10	0.08	0.05	0.04	0.03
	Y	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
	Z	0.07	0.08	0.05	0.04	0.02	0.04	0.07
	Γ	0.24	0.18	0.11	0.09	0.05	0.06	0.09



図(2).39 G-Sensitivity結果

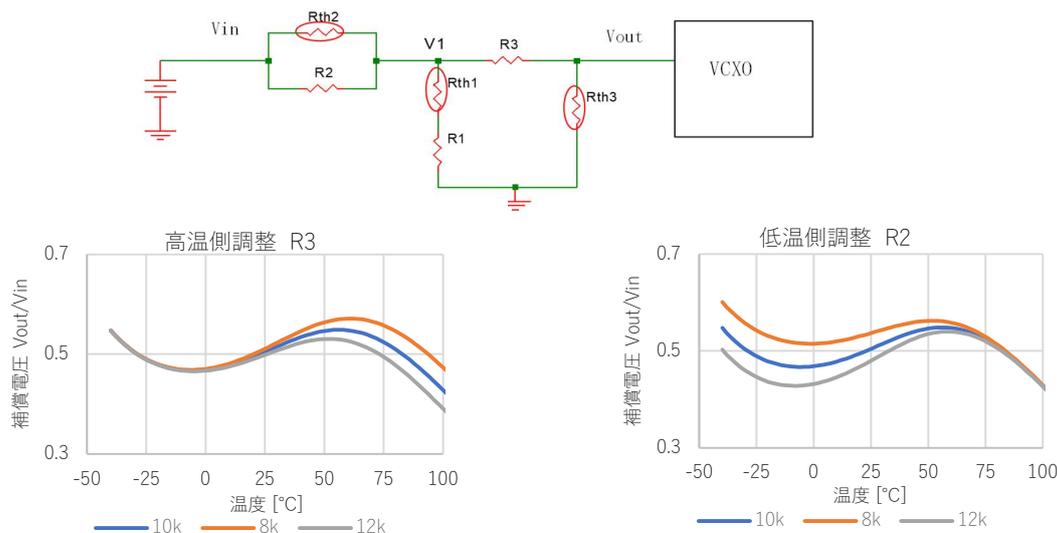
(i)TCXOの検討

(g)OCXOの検討における14×9mmサイズの試験結果にて、消費電力は低温側で最大350mWとなった。OCXO構成では小型化によって電力低減が期待できるが、目標としている7×5mmサイズでは200mW程度と見込まれる。一方、本プロジェクトでの原子時計全体の消費電力は最終目標で300mWであることから、水晶発振器の消費電力は100mW以下に抑えることが望ましい。そこで、ヒータ加熱による温度制御ではなく、環境温度を検知して温度による周波数変化を補正するTCXO(Temperature Compensated Crystal Oscillator)の構成を用いて最終目標を満たす水晶発振器を検討した。

現在、主流となっているTCXOは小型化のため補償データを記憶するメモリ、補償電圧発生回路、発振回路を1チップ化した構成が一般的であるが、IC内部の補償電圧発生回路が発生する雑音成分により位相雑音が劣化する。そのため、比較的位相雑音性能の優れた10MHzのTCXOで、オフセット周波数1Hzの位相雑音は、-60~-70dBc/Hz程度であり、目標としている-80dBc/Hzには10dBc以上の差がある。

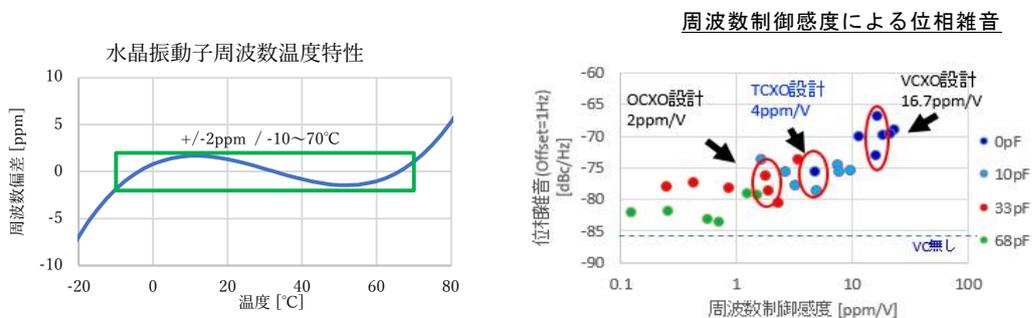
そこで、補償電圧の発生にサーミスタと抵抗の回路網を使用する間接型アナログ補償方式を用いたTCXOを検討した。温度の3次関数となる補償電圧を発生させ水晶振動子の周波数温度特性をキャンセルする。間接型アナログ補償方式を用いることで、補償電圧発生回路による雑音を低減し位相雑音性能の優れたTCXOが可能となる。温度補償回路には従来から知られているサーミスタ3個と抵抗の組み合わせからなる間接型アナログ補償方式を用いた^[2]。図(2).40に補償回路の構成と設計例を示す。

サーミスタ抵抗回路網による補償回路



図(2).40 サーミスタによる間接型アナログ補償TCXOの設計例

水晶振動子の周波数温度特性をVCXOで補償するため、VCXOの周波数可変感度に水晶振動子の温度特性による周波数変化分をOCXOでの設計に対して上乗せする必要がある。水晶振動子の周波数温度特性は、水晶素板の切断角度を最適化することで、 $-10\sim 70^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で $\pm 2\text{ppm}$ 程度となる。TCXOで温度補償するために必要なVCXO周波数制御感度はOCXOでの設計値 2ppm/V に対して 4ppm/V 程度に拡大が必要である。(c)周波数制御による発振回路位相雑音への影響と発振器構成の検討において検討した周波数制御感度と位相雑音との関係より、周波数制御感度 4ppm/V への拡大による位相雑音への影響は比較的少ないと考えられる(図(2).41)。



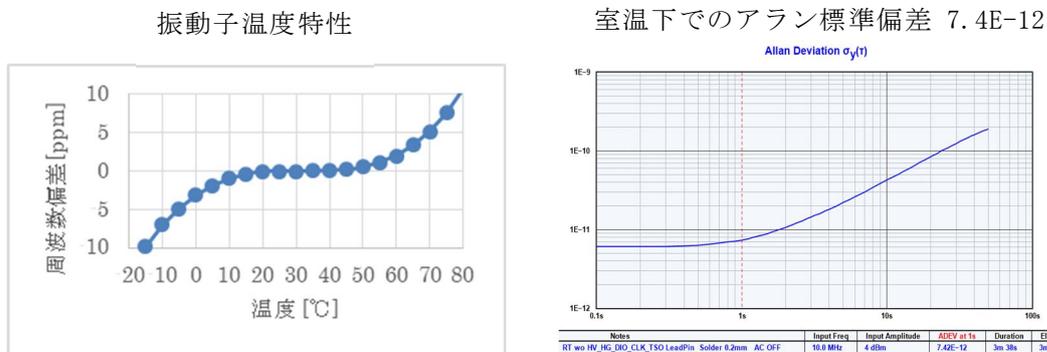
図(2).41 水晶振動子温度特性と周波数制御感度の設計

TCXOでは水晶振動子の周波数温度特性の温度に対する傾き(周波数温度スロープ)と環境温度が変化する速度(昇温/降温速度)との積が周波数ドリフトとなり、 $\tau=1\text{s}$ におけるアラン標準偏差に上乗せされる。そこで環境温度条件として 0.1K/分 の昇温/降温速度を設定し、周波数変化速度がアラン標準偏差の最終目標 2×10^{-11} を超えないこと考慮して、TCXOの周波数温度スロープの設計目標を 10ppb/K とした。TCXOの環境温度条件と温度スロープ設計目標を表(2).4に示す。

表(2).4 TCXOの環境温度条件と温度スロープ設計目標

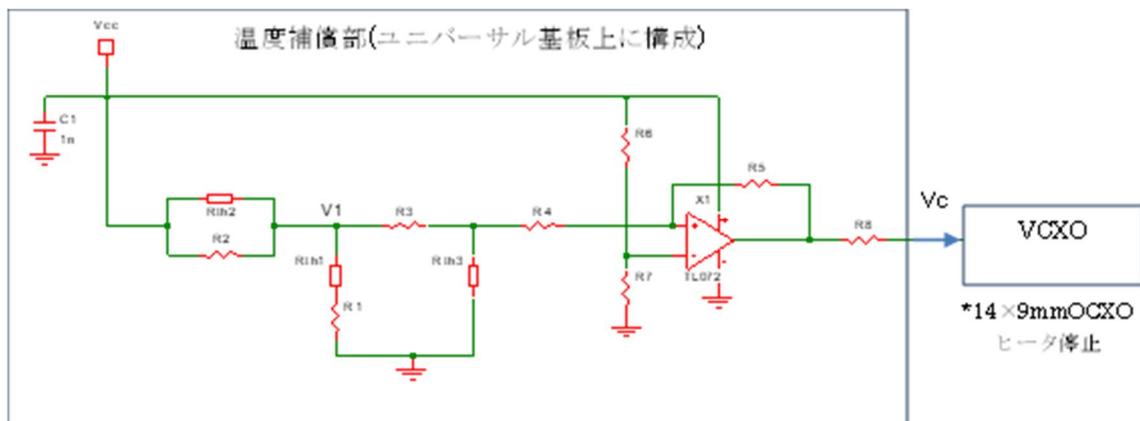
項目	仕様
昇温/降温速度(環境温度条件)	0.1K/分
周波数温度スロープ(設計目標)	10ppb/K
周波数変化速度(予想されるドリフト)	$1.67\times 10^{-11}/\text{s}$

以上の検討を基に、間接型アナログ補償TCXOによるアラン標準偏差の最終目標達成の実現性を見積もるために、試作評価を行った。実験に使用する水晶振動子は、常温近辺で周波数の温度勾配が0付近となる切断角度を選択した。この振動子をVCXOに搭載し室温下でのアラン標準偏差を評価したところ、図(2).42に示すように、 7.4×10^{-12} となり、最終目標に対して問題のない実力であることを確認した。



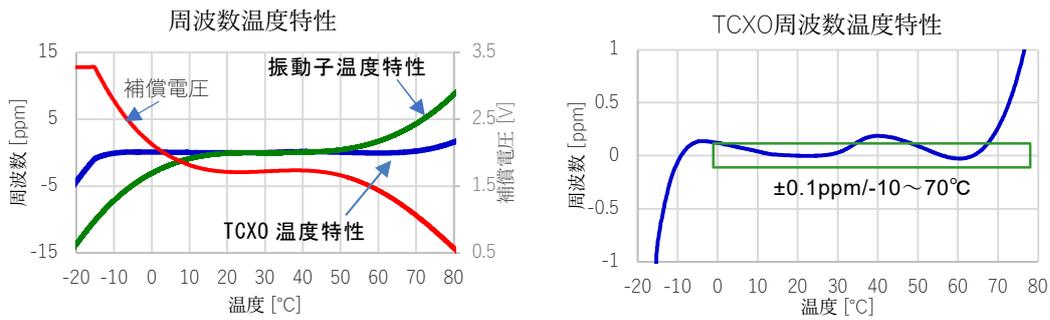
図(2).42 水晶振動子温度特性とアラン標準偏差

試作したTCXOの構成を図(2).43に示す。サーミスタ、抵抗の回路網による補償回路から出力された電圧をオペアンプで増幅して、VCXOに周波数制御電圧(V_c)に入力する。VCXOは試作した $14 \times 9\text{mm}$ サイズOCXOを用いてヒータ回路に電源電圧を供給せず、VCXOとして使用した。



図(2).43 間接型アナログ補償 TCXO の構成

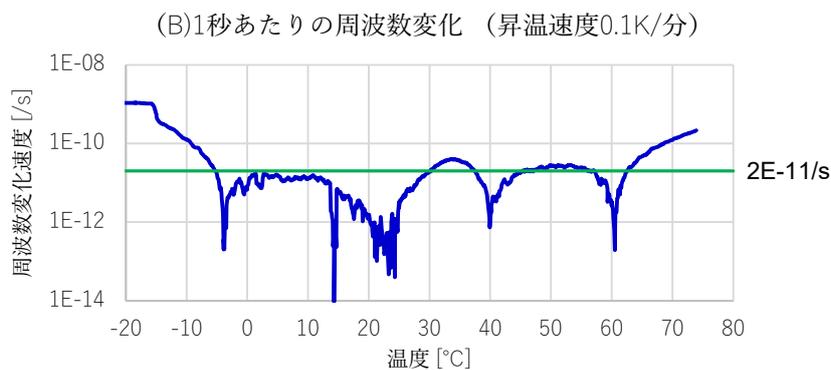
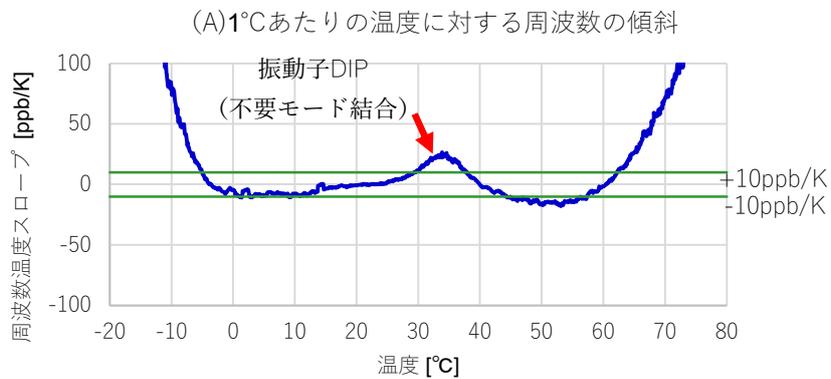
図(2).44及び表(2).5に試作したTCXOの周波数温度特性の測定結果を示す。 $-10 \sim 70^\circ\text{C}$ で周波数温度特性 0.1ppm を目標に調整した。 $-15 \sim 70^\circ\text{C}$ の範囲で温度補償電圧により振動子の温度特性が補償されている。温度 1K あたりの周波数変化(周波数温度スロープ)を図(2).45(A)に、また、昇温速度の 0.1K/分 の環境下での周波数変化速度を図(2).45(B)に示す。周波数温度スロープは、 $30 \sim 40^\circ\text{C}$ 付近に振動子の不要モードとの結合による周波数ディップがあり若干劣化しているが、その他の温度では概略 $-5^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ の範囲内では目標の $\pm 10\text{ppb/K}$ 以内に調整可能と考えられる。ただし、この温度範囲を超えると急速に温度スロープの傾斜が大きくなるために、目標の $-10 \sim 70^\circ\text{C}$ への対応には補償回路の改善が必要であることが予想される。



図(2.44) 周波数温度特性測定結果

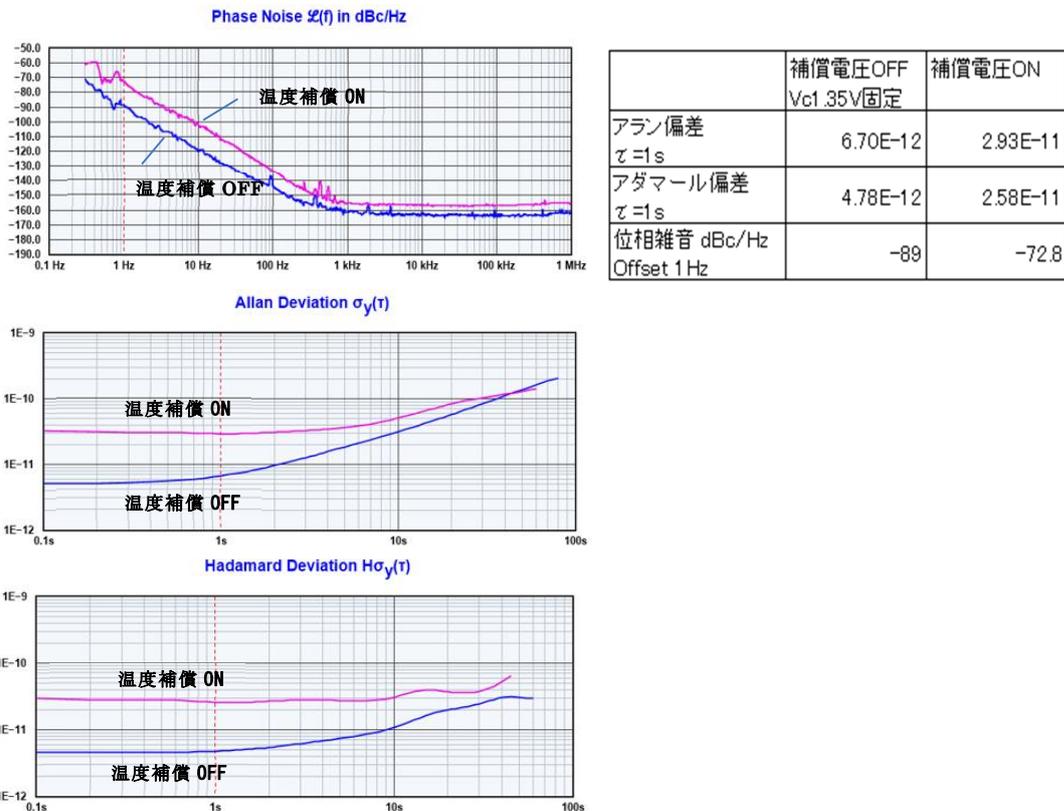
表(2.5) TCXO 周波数温度特性測定結果

温度 ℃	周波数偏差 ppm	補償電圧 V	周波数温度 スロープ ppb/K	周波数 変化速度 /s
-10	-0.07	2.78	78.71	1.3E-10
-5	0.13	2.40	9.83	1.4E-11
0	0.12	2.13	-4.84	8.8E-12
10	0.04	1.81	-7.47	1.2E-11
25	0.00	1.71	1.40	2.1E-12
35	0.13	1.73	20.78	3.7E-11
40	0.19	1.74	-0.94	3.0E-12
50	0.09	1.66	-15.91	0.00
60	-0.03	1.45	-1.41	2.7E-12
70	0.27	1.07	72.18	1.3E-10



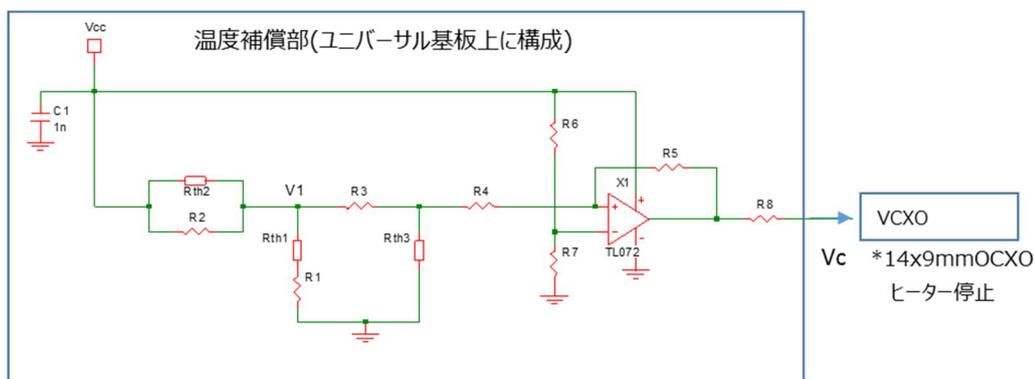
図(2.45) 周波数温度スロープ評価結果

TCXOの補償回路動作による位相雑音、アラン標準偏差、アダマール標準偏差の評価を行った。結果を図(2).46に示す。補償電圧をVCXOに入力することにより位相雑音、アラン標準偏差、アダマール標準偏差はいずれも劣化が見られる。アラン標準偏差は補償電圧の入力によって 2.93×10^{-11} となり最終目標の 2×10^{-11} を越える。補償回路に使用したオペアンプの発生するノイズが原因と考えられ、対策が必要である。



図(2).46 位相雑音、アラン標準偏差、アダマール標準偏差評価結果

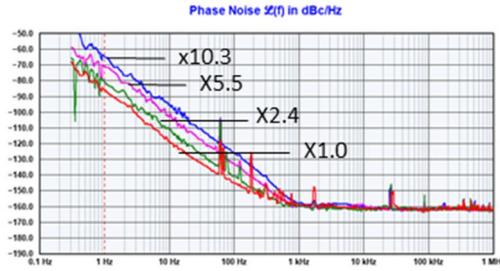
補償回路に使用したオペアンプの発生するノイズを対策するため、オペアンプのゲイン設定による影響評価を図(2).47に示す温度補償回路にて行った。



図(2).47 温度補償回路

図(2).48に、オペアンプのゲインを変化させた際の位相雑音とアラン標準偏差の評価結果を示す。いずれもゲインを大きく設定するにしたがって特性の劣化が確認された。位相雑音の目標である -80dBc/Hz 、アラン標準偏差の最終目標である 2.0×10^{-11} を満足するためにはオペアンプのゲインを2倍以下に設定する必要がある。なお、オペアンプの発生する雑音はゲイン1倍に

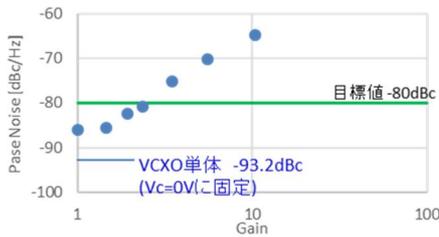
て-100dBc程度であり十分小さい。



位相雑音特性



アラン標準偏差特性



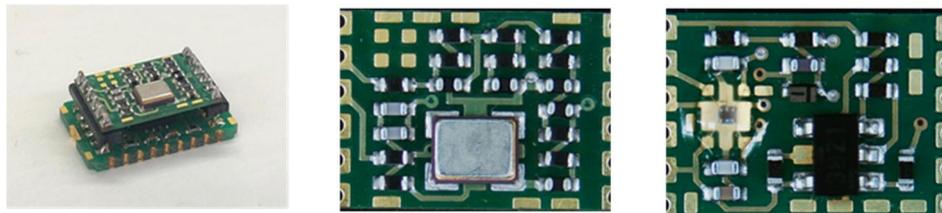
位相雑音特性(離調周波数1Hz)



アラン標準偏差特性(1秒)

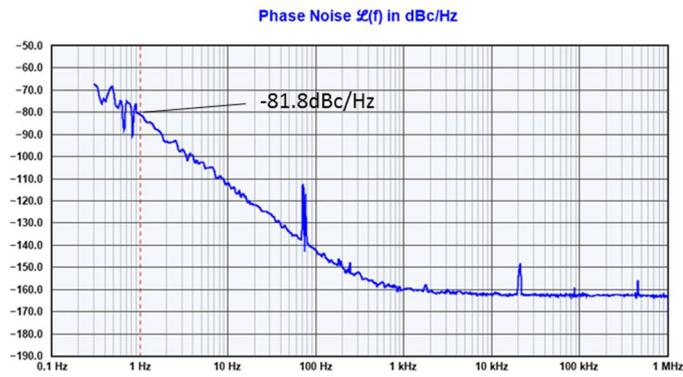
図(2).48 オペアンプゲインによる特性結果

上記の結果を元に14mm×9mmサイズTCXOを試作、性能評価を行った。図(2).49に試作した14mm×9mmサイズのTCXOの外観写真を示す。この製品は14mm×9mmサイズOCXOのパッケージにて内部基板をTCXOに変更したものである。



図(2).49 14mm×9mm サイズ TCXO 外観

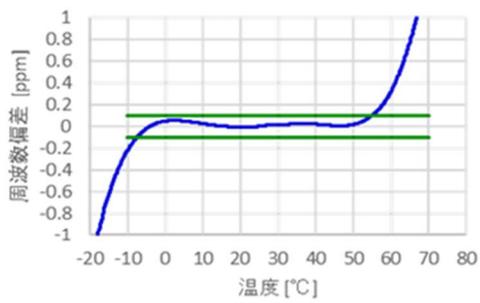
図(2).50に位相雑音、アラン標準偏差及び周波数温度特性の評価結果を示す。位相雑音は-81.8dBc/Hz、アラン標準偏は 1.42×10^{-11} であり、位相雑音の目標である-80dBc/Hz、アラン標準偏差の最終目標である 2.0×10^{-11} のいずれも満足する。また周波数温度特性の平坦度と1秒あたりの周波数変化量は0～+50℃の温度範囲で 1×10^{-11} 以下に改善された。



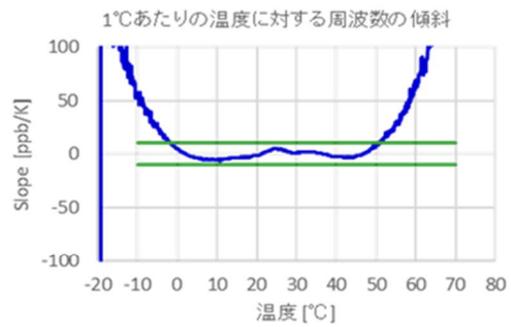
位相雑音特性



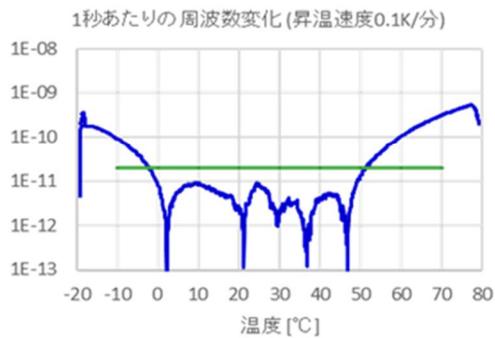
アラン標準偏差特性



周波数温度特性



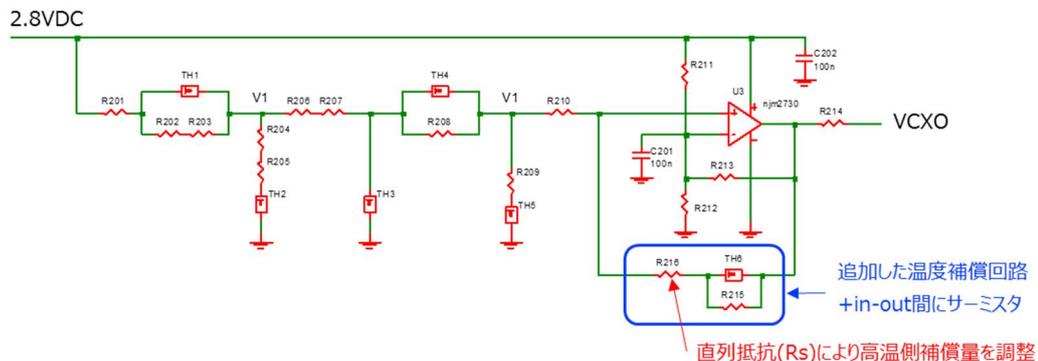
1°Cあたりの温度に対する周波数スロープ特性



1秒あたりの周波数変化特性 (昇温速度 0.1K/分)

図(2).50 14mm×9mm サイズ TCXO 測定結果

次に温度範囲について、上記TCXOの初期評価の結果、 $-5\sim 60^{\circ}\text{C}$ の範囲内では目標の $\pm 10\text{ppb/K}$ 以内に調整可能と考えられるが、この温度範囲を超えると急速に温度スロープの傾斜が大きくなるために、目標の $-10\sim 70^{\circ}\text{C}$ への対応には補償回路の改善が必要であった。そこで、その改善のため高温側の温度範囲の拡大の検討を行った。温度補償回路に高温側の補償回路をオペアンプの出力と入力のプラス側に追加した。その温度補償回路を図(2).51に示す。

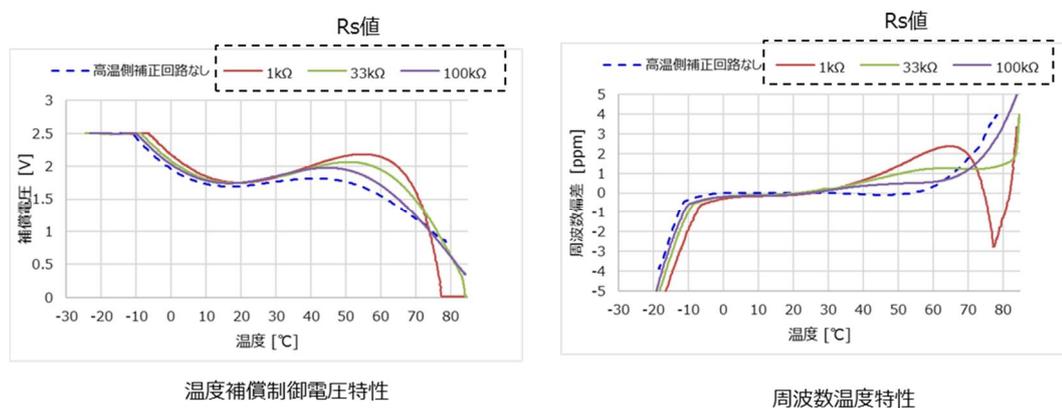


図(2).51 温度補償回路 (高温補償回路追加)

図(2).52に直列抵抗 R_s を変化させた際の温度補償電圧と周波数温度特性の結果を示す。高温側温度補償回路無しに対して、高温側温度補償回路有りは温度補償電圧が高温側にシフトしている。また、直列抵抗 R_s により高温側の特性が変化していることから高温側の調整が可能であることを示している。

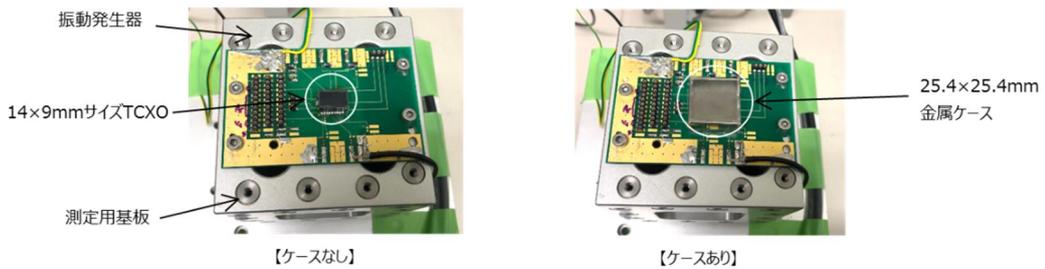
以上より、オペアンプの出力と入力のプラス側の温度補償回路の追加により、高温側まで補償領域を拡大できた。

しかし、最終目標である $-10\sim +70^{\circ}\text{C}$ の温度範囲には達していないため、更なる回路構成についての検討が必要になる。



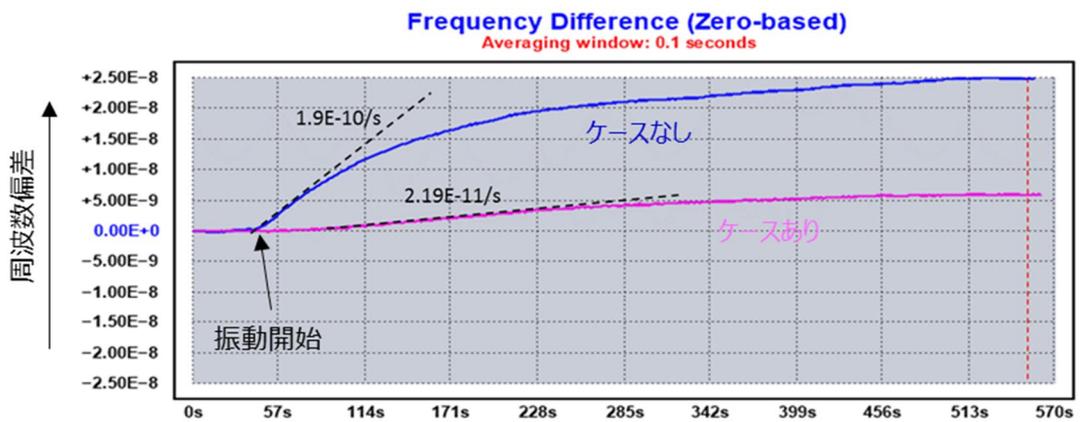
図(2).52 高温側補償回路における特性結果

振動開始直後の周波数ドリフトの要因について、振動開始から振動環境での定常状態に至るまでの振動により発生する風による製品の温度変化であると考え、その影響について評価を行った。まず振動による風の影響を抑制するために、TCXOの外側に $25.4\text{ mm}\times 25.4\text{ mm}$ 金属ケースを被せた際の周波数ドリフト特性について評価を行った。金属ケース有無の状態と振動下における周波数ドリフト測定環境を図(2).53に示す。



図(2).53 振動下における周波数ドリフト測定環境

図(2).54に測定開始から約30秒後に振動を開始した周波数ドリフト特性の測定結果を示す。振動開始から時間の経過とともに周波数が上昇し、540秒後の測定結果はケース無し： $+25\text{ppb}$ 、ケース有り： $+7\text{ppb}$ である。金属ケースを被せることで振動による風が抑制されたことにより、TCXOの温度変化が抑制されたためと考える。



条件

- ・周波数測定開始30秒後に振動開始
- ・Z方向、加速度：3G、振動周波数：5Hz

図(2).54 周波数ドリフト特性結果

次に、周波数ドリフト特性における振動と風速の関係について評価を行った。振動に相当する風を製品にあて、その際の周波数ドリフト特性を評価するものである。

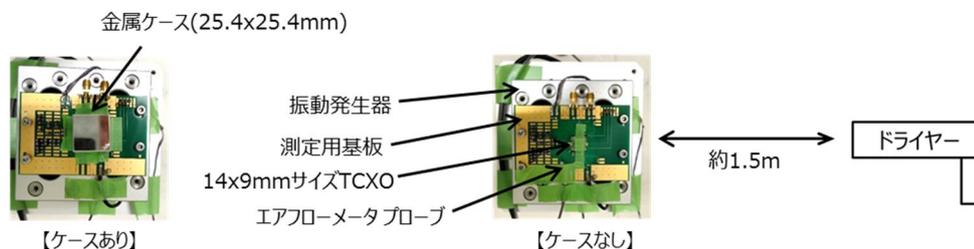
振動の際の風速の測定はエアフローメータを使用し、エアフローメータプローブを振動発生器の上部に取り付け、振動に対する風速の測定を行った。図(2).55に振動周波数5Hzにおける加速度を変化させた際の風速の測定結果を示す。周波数：5Hz、加速度：3Gにおいて風速は0.38m/sの結果であった。



※エアフローメータ：MODEL 6332D
 ※エアフローメータプローブ：0965-04
 (無指向性)
 ※測定範囲：0.1~25.0m/s

図(2).55 振動時の風速確認結果

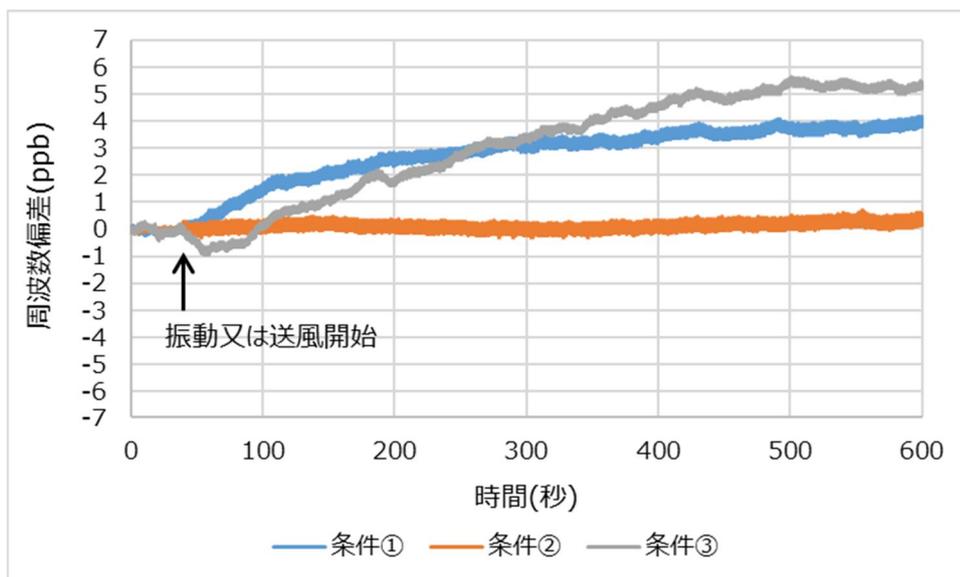
検証テストは、周波数：5Hz、加速度：3Gの条件にて行った。図(2).56に示すとおり検証テストは、TCXOに対するケース無しの状態で当条件に相当する送風を、ドライヤーを用い、製品とドライヤーとの距離により風速の調整を行った。比較とし振動ありのケース有無でもテストを行った。



図(2).56 送風による検証テスト構成

図(2).57に測定開始から30秒後に振動またはドライヤーによる送風を開始した周波数ドリフト特性の結果を示す。条件①の振動あり・ケースなしと条件③のドライヤーの送風による周波数ドリフト特性について、時間の経過とともにほぼ同様の軌跡で上昇している。振動による結果と送風による結果が同等であることから、振動初期の周波数ドリフト特性は振動による風の影響と考えられる。なお、金属ケースをTCXOに被せた際の周波数ドリフト特性については前のテスト結果と同等であり、金属ケースにより風の影響を抑制できているものと考えられる。

以上より、金属ケースなどで振動による風を防ぐ配慮があれば振動初期の周波数ドリフト特性を抑制できるものとする。



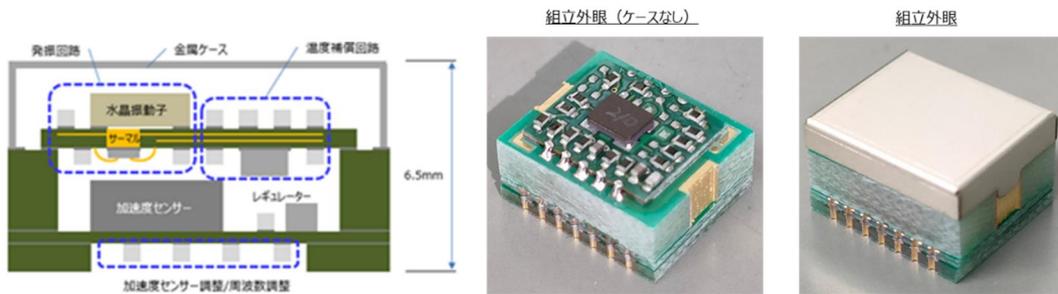
- 条件① (振動試験、ケースなし)
- 条件② (振動試験、ケースあり)
- 条件③ (ドライヤーによる送風 (加熱なし))

・周波数測定開始30秒後に送風開始。振動なし。

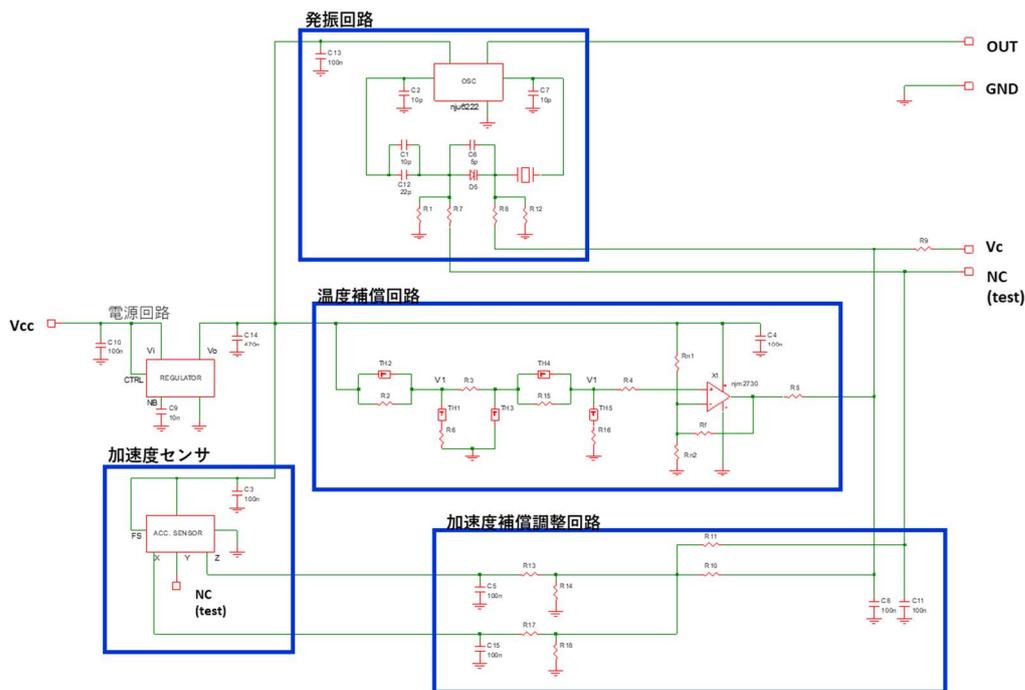
図(2).57 振動又は送風における周波数ドリフト特性結果

(j) プロトタイプ向け11mm×9mmサイズTCXO の試作、評価

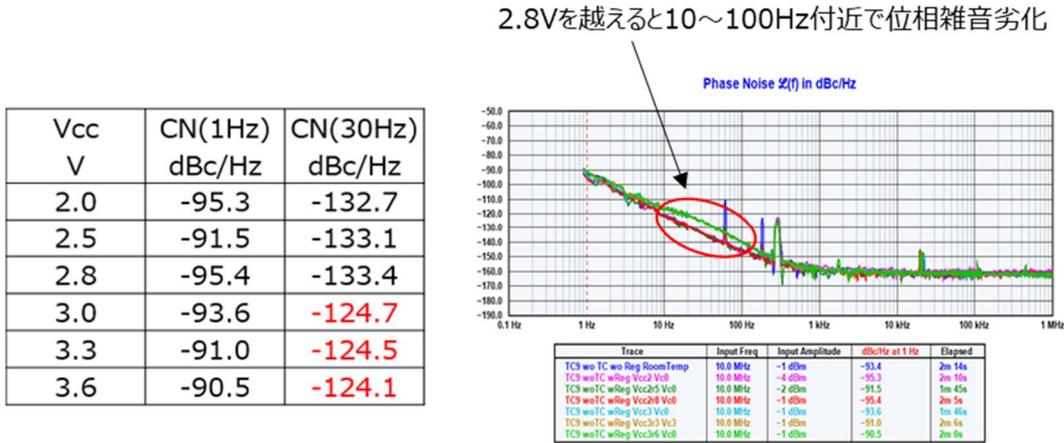
以上の結果をもとに、プロトタイプモジュールに搭載する水晶発振器の試作を行った。製品構造は上基板、中基板、下基板の3枚構成に、上基板を覆うように金属ケースを搭載する構造である。回路は、TCXOの検討において実施してきた水晶を発振させるための発振回路部、水晶の温度に対する周波数変動を補償するための温度補償回路部、水晶の振動に対する周波数変動を補償するための加速度補償部と加速度補償調整回路部、そしてレギュレータを搭載した電源回路部の構成である。上基板上に発振回路部と温度補償回路部を配置し、下基板上に加速度センサ部、加速度補償調整回路部、電源回路部を配置している。中基板については、製品全体の熱容量を大きくするとともに、製品を実装した基板側からの熱の伝わり方を遅くするバッファの役割を果たすものである。図(2).58に試作したプロトタイプ向け11mm×9mmサイズTCXO外観と構成を示す。回路図については図(2).59に示す。先行の試作評価を行った結果、位相雑音において電源電圧が2.8Vを超えるとオフセット周波数100Hz～1kHzに10dB程度の劣化を確認した。その結果を図(2).60に示す。この原因については、レギュレータから発生するノイズが原因と考えられるため、レギュレータノイズバイパス端子とレギュレータ電圧出力端子のバイパスコンデンサを変更したテストを行った。レギュレータバイパスコンデンサ変更後の位相雑音結果を図(2).61に示す。



図(2).58 プロトタイプ向け 11mm×9mm サイズ TCXO 構成図と外観



図(2).59 回路図



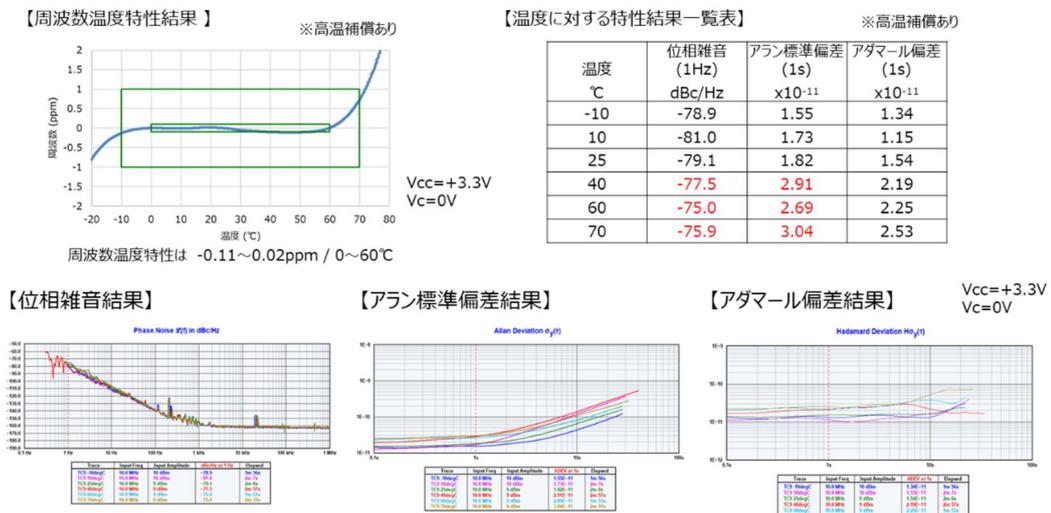
図(2).60 電源電圧に対する位相雑音



図(2).61 レギュレータ バイパスコンデンサ変更による位相雑音

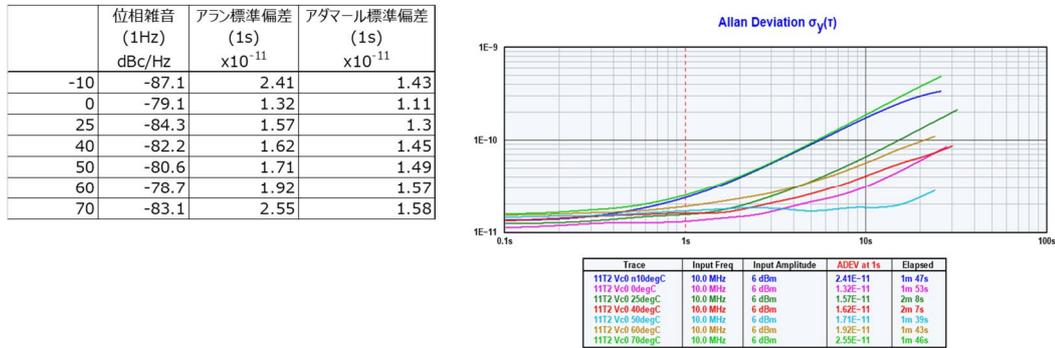
位相雑音 (30Hz) について、レギュレータノイズバイパス端子のバイパスコンデンサ容量 $1\mu\text{F}$ 未満では -130dBc/Hz に達していない結果であるのに対し、 $1\mu\text{F}$ 以上にする事で -130dBc/Hz 以上の結果となった。レギュレータノイズバイパス端子のバイパスコンデンサ容量は、レギュレータ推奨回路上の $0.01\mu\text{F}$ ではなく、 $1\mu\text{F}$ 以上にする事が必須である。そのため、プロトタイプ TCXOは当バイパスコンデンサ容量として $10\mu\text{F}$ を使用した。

次に温度に対する周波数偏差、位相雑音、アラン標準偏差、アダマール標準偏差の評価を行った。その結果を図(2).62に示す。



図(2).62 温度に対する諸特性

位相雑音、アラン標準偏差ともに高温側において特性が劣化する傾向があり、目標値を満足しない結果となった。高温側の改善が必要であることからオペアンプのゲインを現行から低減した評価を行った。位相雑音、アラン標準偏差、アダマール標準偏差の温特特性の結果を図(2).63に示す。



図(2).63 温度に対する諸特性の結果

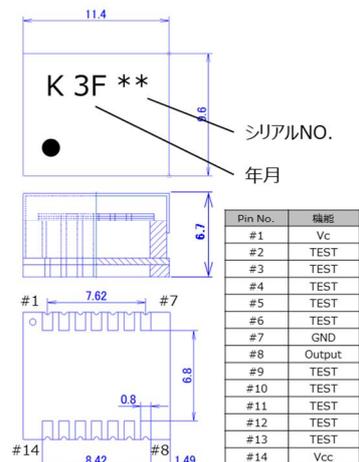
オペアンプゲインを変更前3.4から変更後3に低減して、温特がほぼ劣化しない条件にて、アラン標準偏差を評価した結果、0~60℃の温度範囲において最終目標である 2×10^{-11} を満足する結果を得た。そのため、プロトタイプTCXOについてはオペアンプゲインを低減した3にて試作した。

プロトタイプ向け11mm×9mmサイズTCXOの組立、評価、提出を行った。当該製品の電氣的仕様、外形寸法を図(2).64に、組立、試作品の特性を図(2).65に示す。

【電氣的仕様】

項目	仕様	条件
電源電圧	3.3V ± 5%	
動作温度範囲	0~+60℃	
出力波形	C-MOS Level (2.8V Level)	
出力負荷	15pF max.	
周波数	10MHz	
周波数制御電圧	1.65 ± 1.65V	
周波数制御範囲	±1.5~±2.5ppm / Vc=1.65±1.65V	
入力抵抗	100kΩ min.	
周波数温度特性	±0.1ppm / 0~+60℃ ±1.0ppm / -10~+70℃	
消費電力	50mW max.	
位相雑音	-80dBc/Hz typ. / Offset 1Hz	f _{nom} =10MHz
Allan標準偏差	2E-11 typ. / τ=1s	電源投入後 30分以上
G-Sensitivity	0.1ppb/G typ.	正弦波 0~3G, 5~50Hz
外形	L:11.4mm W:9.6mm H:6.7mm	

【外形寸法】



図(2).64 プロトタイプ向けTCXO 電氣的仕様、外形寸法図

【電氣的特性】

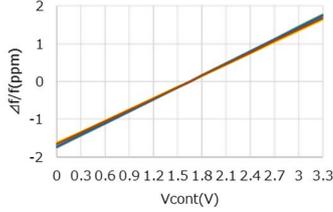
	周波数		周波数可変量		APR	電源変動		消費電力	波形特性				
	Vc=1.65V (MHz)	Vc=1.65V (ppm)	Vc=0V (ppm)	Vc=3.3V (ppm)		- (ppm)	Vcc=3.135V (ppm)		Vcc=3.465V (ppm)	Vol (V)	Voh (V)	SYM (%)	tr (ns)
01	9999989.5	-1.05	-1.74	1.78	0.62	0.000	-0.003	18.4	0.01	2.74	51.8	1.44	1.41
02	9999979.3	-0.27	-1.73	1.76	1.49	-0.001	-0.004	18.8	0.01	2.74	51.8	1.47	1.41
03	9999992.1	-0.79	-1.75	1.76	0.92	-0.004	0.000	18.2	0.01	2.74	52.0	1.47	1.44
04	9999992.5	-0.75	-1.63	1.64	0.84	-0.002	0.001	18.9	0.01	2.74	52.0	1.47	1.41
05	9999988.4	-1.16	-1.73	1.74	0.58	-0.001	0.001	18.7	0.01	2.74	52.2	1.47	1.47
06	9999990.3	-0.97	-1.74	1.78	0.78	-0.004	-0.003	18.5	0.01	2.74	52.2	1.47	1.41
07	9999993.1	-0.69	-1.73	1.75	1.04	-0.001	0.000	18.7	0.01	2.74	52.0	1.47	1.41
08	9999990.7	-0.93	-1.66	1.69	0.69	-0.006	-0.004	18.6	0.01	2.74	51.8	1.47	1.41

※APR: 絶対可変周波数範囲=周波数可変量-常温偏差-温度偏差-電源変動の絶対値の最小値

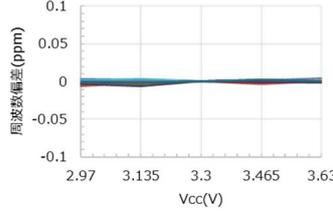
※SYM 測定レベル=1.4V

※Tr/Tf 測定レベル0.28~2.52V

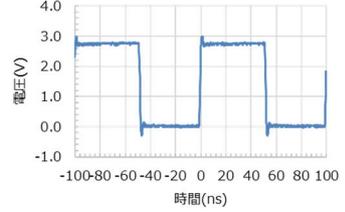
【周波数可変特性】



【周波数電源変動特性】



【出力波形】



- Vcc=3.3V
- Vc=1.65V
- 出力負荷=15pF
- Ta=+25°C
- Oscilloscope: Keysight DSO7104B
- Probe: Tektronix P6243

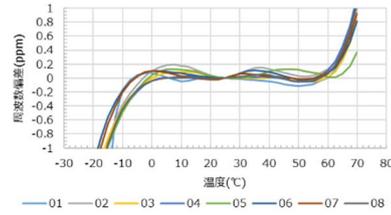
【周波数温度特性】 単位: ppm

	温度範囲	
	0~+60°C	-10~+70°C
01	0.090	0.583
02	0.097	0.682
03	0.072	0.630
04	0.080	0.811
05	0.066	0.429
06	0.067	0.495
07	0.060	0.566
08	0.061	0.760

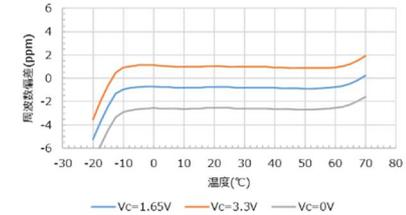
(Fmax.-Fmin.)/2

- Vcc=3.3V, Vc=1.65V

周波数温度特性結果 (Vcc=3.3V, Vc=1.65V)



周波数温度特性結果 (NO.01: Vcc=3.3V)



【振動下の位相雑音特性 (オフセット周波数 1Hz)】

	振動なし			5Hz			10Hz			100Hz		
	X軸	Y軸	Z軸									
01	-82.9	-77.2	-77.3	-81.8	-79.0	-81.6	-80.1	-81.0	-80.2	-79.5	-81.8	-78.1
02	-84.4	-82.4	-83.2	-82.4	-83.1	-83.4	-83.4	-82.5	-79.2	-81.7	-83.9	-83.4
03	-81.2	-83.9	-79.4	-81.6	-81.0	-82.2	-82.1	-79.5	-82.9	-84.3	-82.6	-81.1
04	-74.5	-79.1	-84.3	-77.8	-82.7	-82.0	-78.0	-79.4	-80.4	-81.6	-83.4	-81.5
05	-84.5	-80.5	-83.3	-83.0	-82.2	-80.5	-82.4	-84.4	-85.0	-80.3	-80.7	-81.3
06	-80.8	-83.7	-80.8	-81.6	-86.0	-81.8	-82.9	-83.8	-80.6	-80.5	-83.0	-82.5
07	-80.8	-79.0	-79.3	-82.6	-82.9	-82.8	-79.9	-81.2	-82.6	-82.6	-81.4	-79.4
08	-85.6	-81.7	-81.7	-82.6	-82.2	-84.6	-81.6	-84.0	-79.6	-86.6	-79.8	-81.9

単位: dBc/Hz

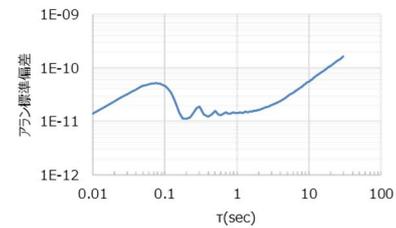
- Vcc=3.3V
- Vc=1.65V
- Ta=+25°C
- 加速度: 3G
- 振動周波数: 5Hz, 10Hz, 100Hz

【振動下のアラン標準偏差 (τ=1秒)】

	振動なし			5Hz			10Hz			100Hz		
	X軸	Y軸	Z軸	X軸	Y軸	Z軸	X軸	Y軸	Z軸	X軸	Y軸	Z軸
01	1.9	1.8	1.6	1.5	1.6	1.6	1.7	1.9	1.8	1.7	1.6	1.9
02	1.1	1.5	1.3	1.7	1.4	1.7	1.4	1.4	1.8	1.3	1.3	1.1
03	1.4	1.4	1.6	1.5	1.3	1.4	1.3	1.3	1.2	1.3	1.3	1.2
04	1.7	1.6	1.5	1.8	1.2	1.5	1.7	1.8	1.7	1.8	1.8	1.9
05	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.4	1.5	1.5	1.3	1.3
06	1.3	1.7	1.4	1.6	1.5	1.3	1.8	1.3	1.3	1.4	1.2	1.4
07	1.5	1.6	1.7	1.4	1.7	1.5	1.5	1.4	1.5	1.3	1.6	1.3
08	1.2	1.2	1.2	1.1	1.2	1.4	1.1	1.4	1.2	1.3	1.1	1.2

×10⁻¹¹

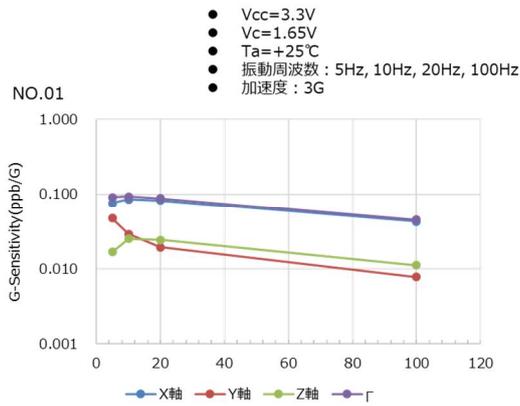
NO.01 振動周波数: 5Hz, Z軸



図(2).65 プロトタイプ向けTCXO特性結果 (次ページに続く)

【G-sensitivity特性】

振動周波数	5Hz	10Hz	20Hz	100Hz
加速度	3G	3G	3G	3G
01	0.09	0.09	0.08	0.04
02	0.05	0.04	0.03	0.01
03	0.05	0.04	0.02	0.01
04	0.04	0.05	0.04	0.02
05	0.08	0.09	0.07	0.04
06	0.10	0.09	0.08	0.05
07	0.07	0.06	0.04	0.02
08	0.05	0.06	0.05	0.03



図(2).65 プロトタイプ向けTCXO特性結果 (前ページから)

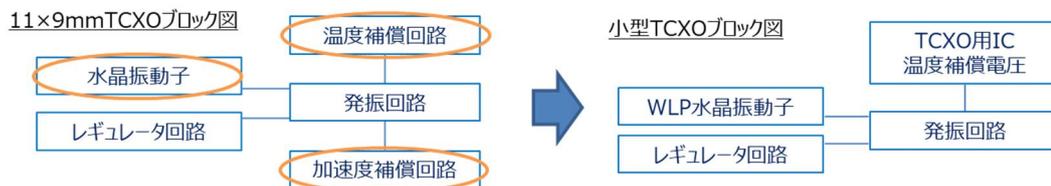
以上の製品8個を23年6月27日にプロトタイプ向けの水晶発振器として送付した。いずれの製品も電氣的仕様を満足する製品であり、アラン標準偏差（振動下）： 2×10^{-11} （ $\tau=1s$ ）、G-Sensitivity：0.1ppb/Gについては最終目標を満足している。また、消費電力については18mWの性能である。

(k)7mm×5mmサイズTCXOの評価、試作

最終目標の製品サイズ実現のため、7mm×5mmサイズTCXOの設計、試作を行い、初期性能評価を行った。11mm×9mmサイズからの実現には回路規模を小さくする必要があり、11mm×9mmサイズTCXOで使用していたディスクリート部品の削減、および機能の削減が必要である。各機能ブロックに対する小型化案を表(2).6に示す。また11mm×9mmサイズTCXOと小型TCXOのブロック図の比較を図(2).66に示す。これらの案を元に小型化の評価、試作を進めた。

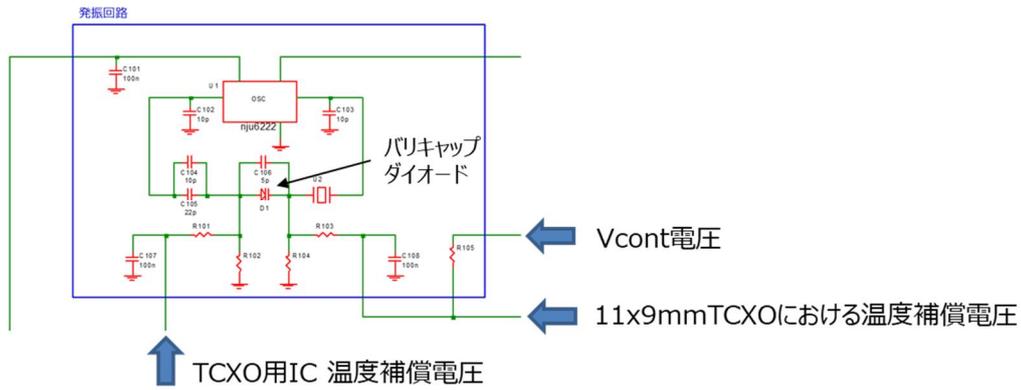
表(2).6 各機能ブロックに対する小型化案

11×9TCXO 機能ブロック	小型化案
水晶振動子	WLP構造の水晶振動子（耐振動特性が必須）
発振回路	現状回路構成の使用を想定
温度補償回路	1チップ化。TCXO用ICの温度補償回路の使用を想定。（ディスクリート部品の削減）
加速度補償回路	削除。そのため、水晶振動子に耐振動特性が必須（補償用IC、調整用ディスクリート部品の削減）
レギュレータ回路	現状回路構成の使用を想定



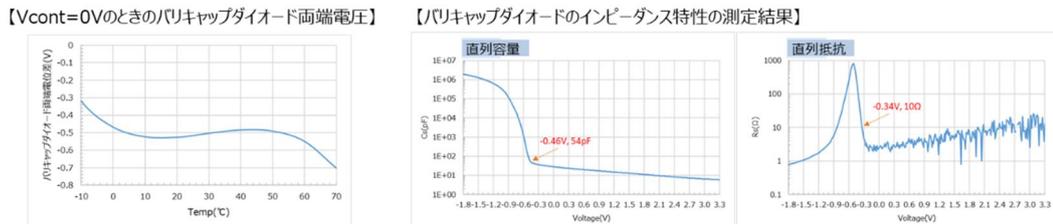
図(2).66 各機能ブロックの比較

11mm×9mmサイズTCXOでは、温度補償電圧をバリキャップダイオードのカソード側に入力していたが、TCXO用ICから出力される温度補償電圧を用いた場合、バリキャップダイオードのアノード側へ入力する必要がある。TCXO用ICから出力される温度補償電圧が11mm×9mmサイズTCXOの温度補償電圧に対して、Y軸に対する線対称の特性のためであり、カソード入力のままでは周波数調整ができない。発振回路部の回路構成と3種の電圧の印加の様子を図(2).67に示す。



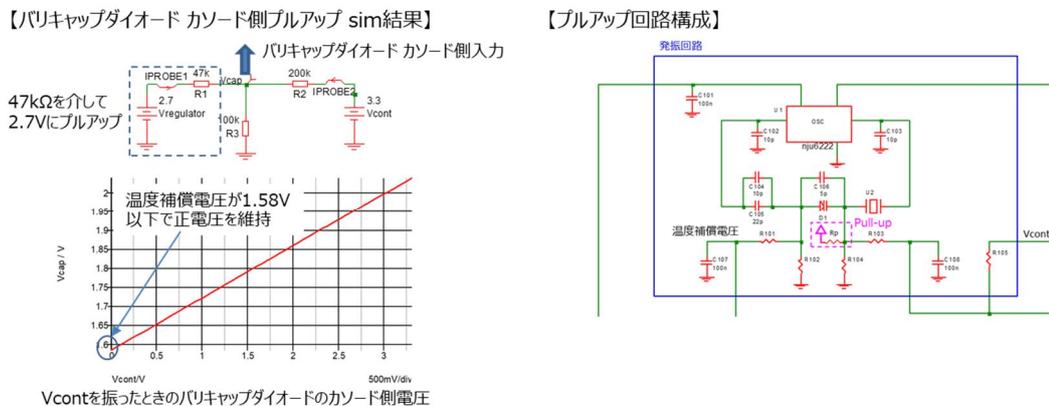
図(2).67 発振回路部の回路構成と入力電圧の様子

バリキャップダイオードのアノード側へ温度補償電圧を入力した場合、 V_c 電圧によりバリキャップダイオードに負電圧が印可される場合がある。そのため、 $V_c=0V$ におけるバリキャップダイオード両端電圧とその電圧におけるバリキャップダイオードのインピーダンス特性から影響について検証を行った。 $V_c=0V$ のときのバリキャップダイオード両端電圧とバリキャップダイオードのインピーダンス特性の測定結果を図(2).68に示す。



図(2).68 バリキャップダイオード両端電圧とインピーダンス特性の測定結果

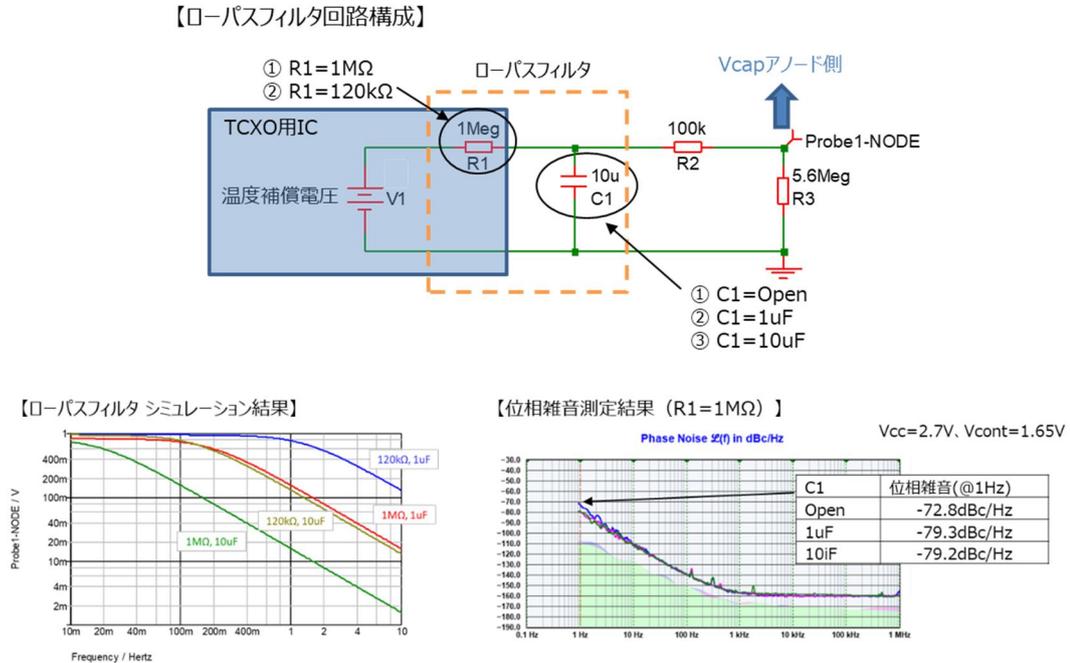
バリキャップダイオードの両端電圧として最大 $-0.7V$ の電圧が印可される。 $-0.5V$ 近辺において直列抵抗が約 1000Ω に至り、発振回路に対して直列に負荷されるため、水晶の発振が止まる可能性が非常に高くなる。そのため、バリキャップダイオードの両端電圧については正電圧を維持する必要がある。正電圧を維持するため、バリキャップダイオードのカソード側をプルアップすることとし、その回路図を図(2).69に示す。またプルアップ抵抗値 $47k\Omega$ 、プルアップ電圧 $2.7V$ において V_c 電圧を変化させたときのカソード側電圧のシミュレーション結果もあわせて図(2).69に示す。



図(2).69 シミュレーション結果とプルアップ回路構成図

V_c 電圧が最小の $0V$ であっても温度補償電圧が $1.58V$ 以下であれば正電圧を維持できる結果である。当回路構成、回路定数にて評価、試作を進める。

これまでの研究から温度補償電圧の出力について、ノイズ成分を含んでおり位相雑音に影響を与えていたことから、温度補償電圧の出力端子とバリキャップダイオードのアノード間にRCによるローパスフィルタを形成したときの位相雑音の評価を行った。TCXO用IC内部の温度補償電圧出力部に内蔵されている抵抗をローパスフィルタ用として利用した。ローパスフィルタの回路構成、シミュレーション結果、位相雑音の測定結果を図(2).70に示す。

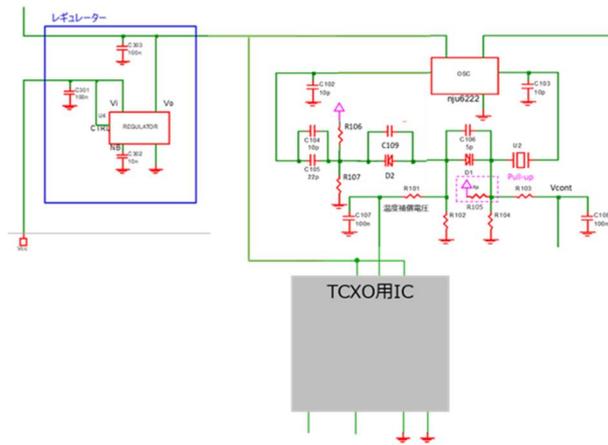


図(2).70 ローパスフィルタ回路構成と検証結果

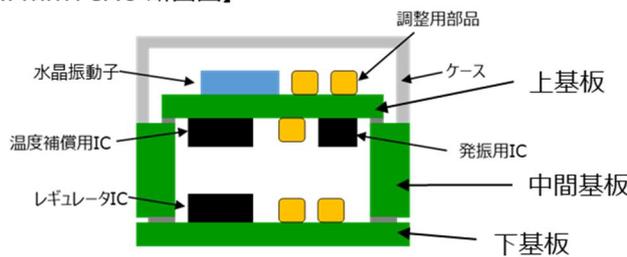
位相雑音 (1Hz) について、ローパスフィルタなしの-72.8dBc/Hzに対して、R1=1MΩ、C1=1μF以上のローパスフィルタを追加することで、約6dBc/Hz(@1Hz)の改善ができた。これまでの研究経験通りの結果が得られた。そのため、温度補償電圧の出力に対しRCによるローパスフィルタを追加した回路構成を小型TCXOに適用した。その際の時定数は10である。

上記の内容を反映させ、9mm×7mmサイズにおいてまずは試作、評価を行った。当回路構成と断面構成、および製品外観を図(2).71に示す。なお水晶振動子については、プロトタイプ向け11mm×9mmサイズTCXOで使用した10MHzの水晶振動子を使用している。

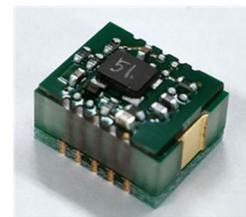
【基板の回路構成】



【9x7mmTCXO 断面図】



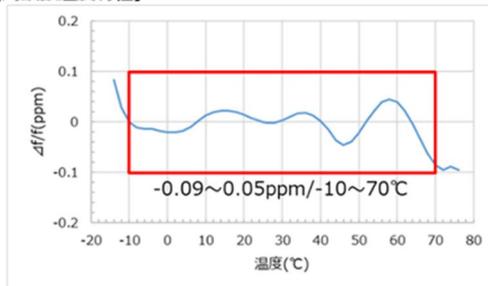
【9x7mmTCXO 組立後外観】



図(2).71 9mm×7mmサイズTCXO 回路、製品構成

回路定数、TCXO用ICの温度補償電圧調整による周波数温度特性、アラン標準偏差の評価を実施した。なお、バリキャップダイオードについては、1個では温度補償電圧に対する可変感度不足のため2個使用した回路構成とした。結果を図(2).72に示す。

【周波数温度特性】



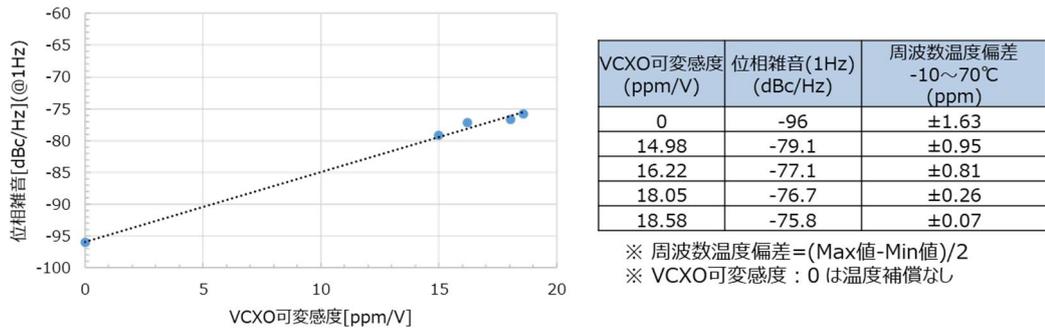
【アラン標準偏差特性】



図(2).72 周波数温度特性、アラン標準偏差

周波数温度特性は-0.09~0.05ppm/-10~70°Cに調整することができたが、アラン標準偏差は 3.09×10^{-11} ($\tau = 1s$) であり最終目標を達成できていない。

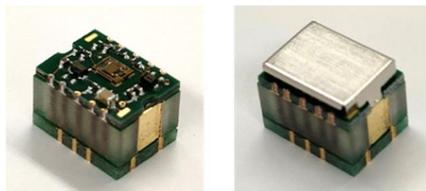
上記要因を検証するためVCXOの可変感度に対する周波数温度特性、位相雑音の相関性に関する評価を実施した。その結果を図(2).73に示す。



図(2).73 VCXO可変感度に対する周波数温度偏差、位相雑音

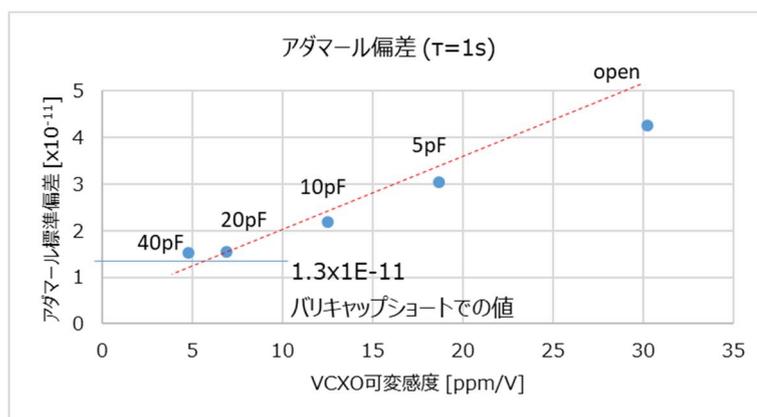
図(2).73より、VCXO可変感度と位相雑音及び周波数温度偏差には相関性があり、VCXO可変感度について、周波数温度特性の温度範囲を広げるためにはVCXO感度大が有利である一方、位相雑音を小さくするためにはVCXO感度小が有利である。温度補償電圧の出力にTCXO用ICを用いた当構成において、位相雑音の-80dBc/Hz以下の達成にはVCXO可変感度として14ppm/V以下が必要であるが、周波数温度特性±0.1ppm/-10~70℃の達成には18.5ppm/V以上必要である。すなわち相関性のあるVCXO可変感度を小さくする必要があるが、小さくした状態では周波数の温度補償量が十分ではないため、-10~70℃の全温度範囲において周波数偏差を目安となる±0.1ppmに調整することができない。このことから、位相雑音の全温度範囲(-10~70℃)での達成は不可能である。

最終目標の製品サイズである7mm×5mmサイズの試作、評価を行った。製品外観を図(2).74に示す。回路構成、製品構成については9mm×7mmサイズTCXOと同じ構成である。水晶振動子についてはWLP水晶振動子、周波数40MHzを使用した。TCXOの出力周波数は40MHzになるが、水晶を発振させるためのICにおいて1/4分周の出力機能を持ったものを使用すれば容易に10MHz出力ができるため、評価については分周機能無しの40MHzのままで行った。



図(2).74 7mm×5mmサイズTCXO

アラン標準偏差 2×10^{-11} の全温度範囲(-10~70℃)での達成は、9mm×7mmサイズTCXOの上記結果より不可であることから、温度範囲限定にてアラン標準偏差の評価を行った。なお、G-Sensitivityの評価は、WLP水晶振動子単体評価において最終目標の0.1ppb/Gを達成していないため(図(2).94)、評価は行っていない。本評価については、図(2).71の回路図におけるバリキャップダイオードの並列容量C106とC109の容量を変化させ、VCXO可変感度に対するアダマール標準偏差測定を行った。この結果を図(2).75示す。本評価で用いたWLP水晶振動子の周波数温度特性は1次係数が約-0.4ppm/℃のため温度に対する周波数ドリフトの影響が残る。そのため直線的な周波数ドリフトに影響されない評価方法であるアダマール標準偏差にて評価を行った。



図(2).75 VCXO可変感度に対するアダマール標準偏差

VCXO可変感度を9ppm/V以下にすることで、最終目標である 2×10^{-11} を満たす。図(2).75に示すように、VCXO可変感度とアダマール標準偏差とは1次の傾きを持つ相関性であり、VCXO可変感度に対する相関性を測定することで、アダマール標準偏差を予測できる簡易な手法を見出すことができた。

VCXO可変感度が9ppm/V以下となるC106=C109=20pF (VCXO感度は6.9ppm/V) を用いて周波数温度補償を実施したが、周波数補償量は $\pm 1 \text{ppm}/-10 \sim 70^\circ\text{C}$ 程度の結果であった。そのため、周波数の温度補償はほぼできなかった。

実測による評価は、常温におけるアダマール標準偏差 2×10^{-11} の達成に留まった。

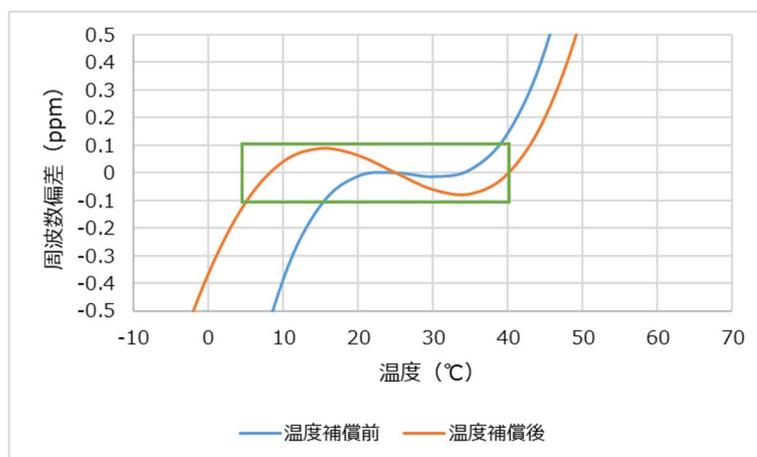
7mm \times 5mmサイズTCXOにおいて最終目標であるアラン標準偏差: 2×10^{-11} ($\tau=1\text{s}$)、G-Sensitivity: 0.1ppb/Gを達成することができなかった。

なお、消費電力については、約42mWであった。40MHzの水晶振動子、40MHzの出力のためである。10MHz出力とすれば出力負荷による電流が1/4程度に減るため、消費電力については数mWの減少が見込まれる。

以上が、7mm \times 5mmサイズTCXOの本研究における結果である。

以下、 $\pm 0.1 \text{ppm}$ の周波数温度特性、すなわちアラン標準偏差実現の目安となる温度範囲の予測結果を示す。

$\pm 0.1 \text{ppm}$ の周波数温度特性、すなわちアラン標準偏差実現の目安となる温度範囲を算出するため、常温付近においてフラットになる周波数温度特性を持つWLP水晶振動子を用いた場合を想定し、温度補償量を計算、周波数温度特性の算出を行った。その結果を図(2).76に示す。



図(2).76 周波数温度特性の温度補償計算結果

常温付近がフラットになる周波数温度特性を持つWLP水晶振動子を用いた場合、計算上5～40℃の温度範囲において、±0.1ppmが達成可能である。アラン標準偏差 2×10^{-11} の達成について、アダマール標準偏差での達成であるが、水晶の切断角度を最適化し±0.1ppm/5～40℃が達成できれば温度による周波数ドリフトがなくなるため、当温度範囲においてアラン標準偏差 2×10^{-11} の達成が見込まれる。

7mm×5mmサイズTCXOにおいて最終目標であるアラン標準偏差： 2×10^{-11} ($\tau=1s$)、G-Sensitivity：0.1ppb/Gを達成することができなかった。その課題と対策については以下と考える。

アラン標準偏差について、最終目標達成には相関性のあるVCXO可変感度を小さくする必要があるが、温度に対する周波数調整量を考慮すると小さくすることができなかった。また11mm×9mmサイズTCXOで使用したサーミスタ、抵抗の回路網による温度補償回路では実装面積が大きいため7mm×5mmサイズTCXOで構成することができなかった。

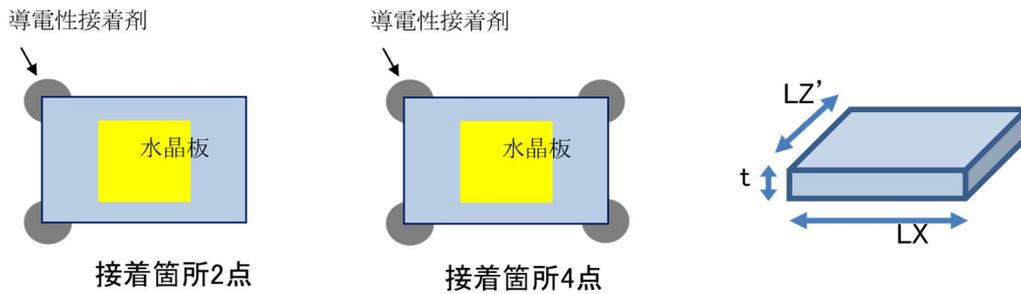
対策には、11mm×9mmサイズTCXOで使用した回路構成における各部品の高密度実装、補償回路の最適化による回路規模の縮小、もしくはIC化により実装面積を縮小することが必要である。また7mm×5mmサイズTCXOで使用した温度補償用ICの温度補償電圧発生回路の低ノイズ化、水晶振動子の周波数温度特性を最適化して必要な周波数温度補償量を低減することによってVCXO可変感度を低減することが必要である。

G-Sensitivityについては、加速度補償による効果が大きいですが、回路規模が大きくなるため、実装ができなかったことが課題であると考ええる。

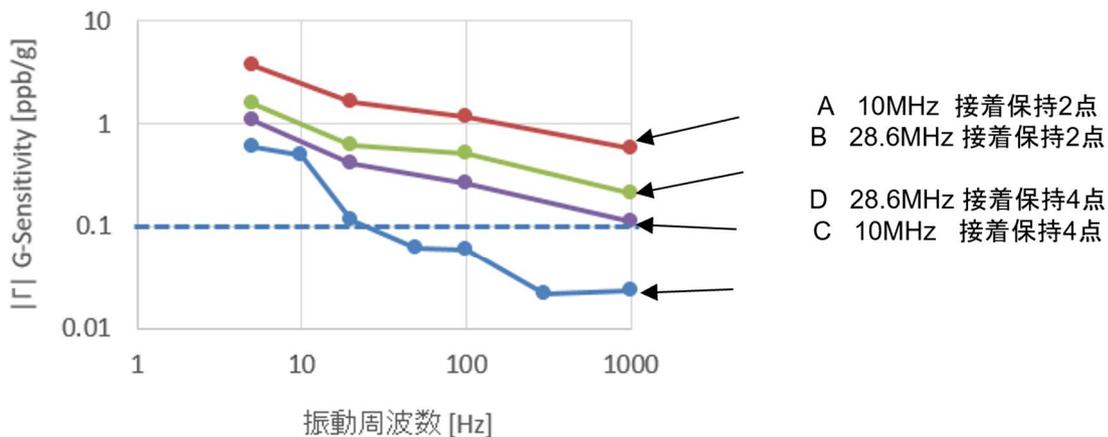
対策には加速度補償回路を含めた回路の小型化が必要となる。そのためには、補償する軸方向の限定、調整回路の縮小による回路規模の縮小、加速度補償ICパッケージの小型化、回路全体のIC化が効果的であると考ええる。

(1)水晶振動子の振動部保持構造による応力感度改善

水晶振動子の振動下における周波数変化は、励振電極下の変形が水晶の非線形性により実効的な弾性定数の変化を引き起こすことによる。振動加速度のよる水晶板の変形を低減するためには、水晶ブランク辺比（厚さに対する外形のアスペクト比）を低減すること及び接着保持点数の増加が有効であると考えられる。これを確認するために、3.2×2.5 mmサイズ振動子にて保持点数2点、4点の比較及び水晶板辺比の比較評価を行った。試験条件と結果を図(2).77に示す。



	接着保持点数	周波数 MHz	水晶ブランク辺比		G-Sensitivity Γ ppb/g	
			LX/t	LZ'/t	5Hz	100Hz
A	2点	10	14	10	3.67	1.17
B	2点	28.6	40	26	1.55	0.51
C	4点	10	14	10	0.59	0.06
D	4点	28.6	40	26	1.1	0.26



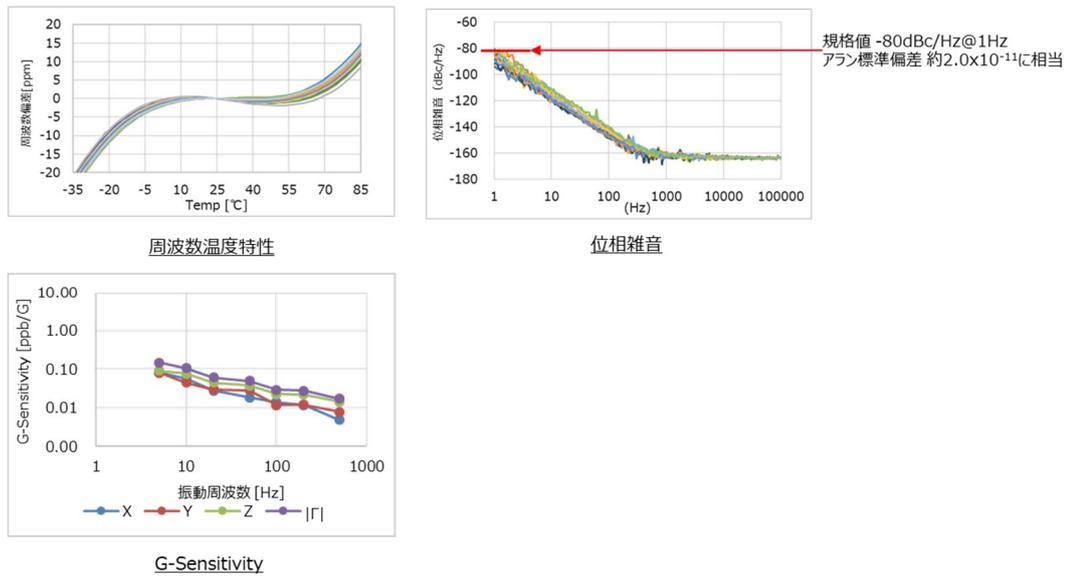
*|Γ| : x,y,z各方向成分のベクトル和の絶対値 $|Γ| = (\Gamma_x^2 + \Gamma_y^2 + \Gamma_z^2)^{1/2}$

図(2.77) 水晶ブランク辺比と保持点数による G-Sensitivity への影響

結果より10MHz 接着2点支持が、最も値が大きく5Hzで3.67ppb/Gであり、目標値の0.1 ppb/G以下を大きく上回る結果である。一方、10MHz 4点保持が最も優れており、5Hzで0.59 ppb/Gに改善されている。小辺比かつ4点保持設計が有効であることが確認された。この結果より、複数点保持、低周波で進めることとした。

(m)プロトタイプ向け11mmx9mmサイズTCXO用水晶振動子の検討、設計

プロトタイプ向け11mm×9mmサイズTCXO用10MHz水晶振動子の試作を行った。3.2mm×2.5mmのセラミックパッケージに導電性接着剤にて水晶片を4点で保持し気密封止した水晶振動子である。周波数温度特性、位相雑音、G-Sensitivityについて評価を行った。その結果を図(2.78)に示す。位相雑音とG-Sensitivityについては、水晶振動子を水晶発振器として評価用の基板に実装し測定を行った。



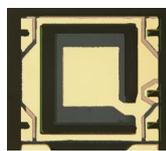
図(2).78 水晶振動子の諸特性結果

位相雑音 (1Hz) について -80dBc/Hz を満足することから、アラン標準偏差 ($\tau=1s$) に相当する 2×10^{-11} の達成が見込まれる。G-Sensitivity について 0.15ppb/G を水晶振動子単体で達成した。当水晶振動子を用いることで加速度補償により水晶発振器としての最終目標である 0.1ppb/G の達成が見込まれる。

(n)SC-Cut水晶振動子の検討

最終目標である1秒平均のアラン標準偏差 $\sigma_y(\tau=1s)$ 2.0×10^{-11} を達成するには、環境温度の揺らぎや起動時の周波数変化の改善が重要な課題であることが(a)の結果より推測できる。SC-CUTは温度特性の変曲点温度が93℃付近であり、AT-CUTと比較して高温下での周波数の温度スロープを小さく設計できる。また、電極の熱膨張、熱収縮による周波数変化量が小さいために過渡的な温度変化による周波数変動が小さい。したがって、環境温度の揺らぎによるランダムウォークや電源起動による周波数ドリフトの改善にはSC-CUTが有効である。一方、SC-CUTの厚みすべり振動モードには主振動(Cモード)の付近に電氣的に励振可能な不要モードであるBモードが存在する。そのため水晶の保持部、外形、電極の設計を最適化し、Bモードを抑制することが課題となる。

最終目標である7×5mmサイズのOCXOへの適用を想定して、小型WLP構造1.0×0.8mmサイズでのSC-CUT振動子を試作した。評価結果の例を図(2).79示す。



WLP 構造振動部



7x5mm サイズパッケージ実装し評価

	C-MODE	B-MODE	比 (B/C)
周波数 (MHz)	79.615	87.225	1.10
CI (Ω)	189.3	1370	7.24

図(2).79 サイズ WLP 構造による SC-CUT 振動子

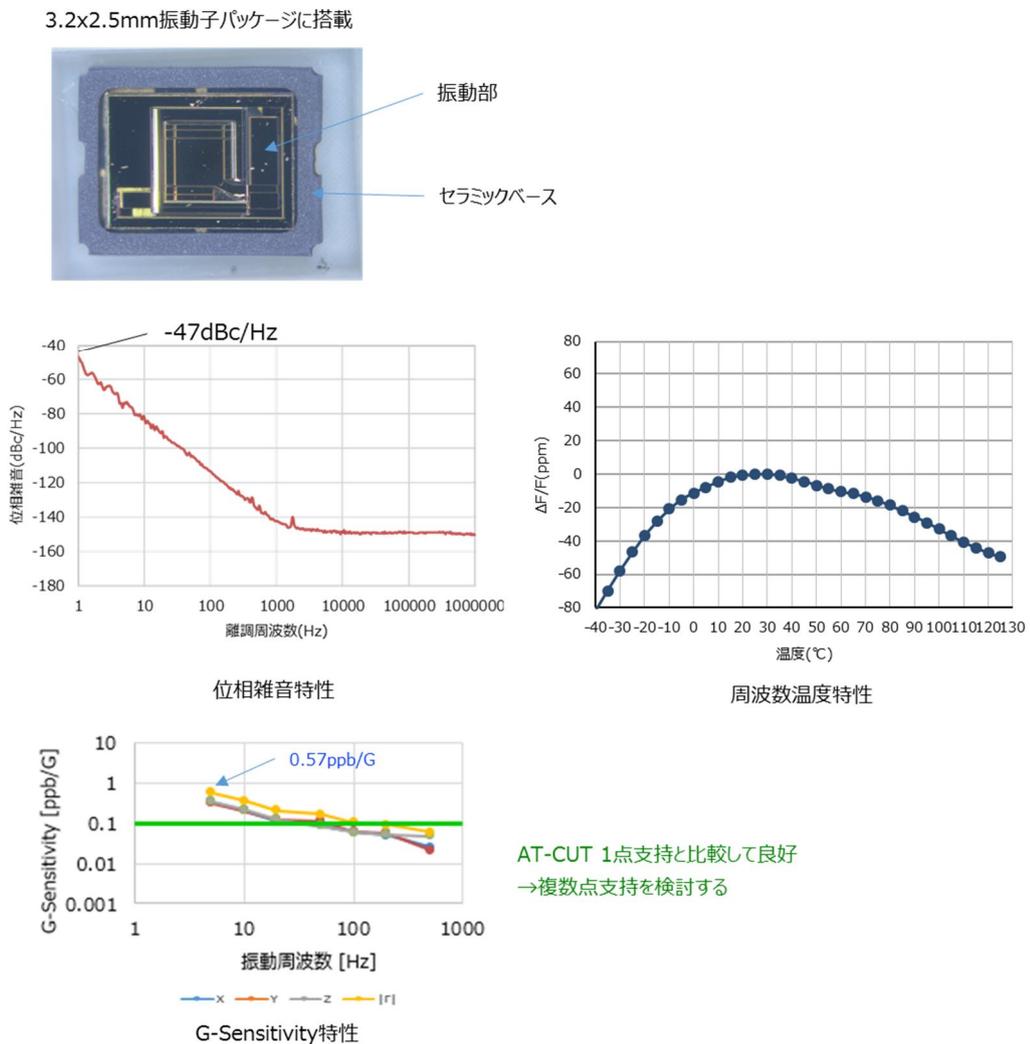
電極、振動部外形の調整により、B-MODEのCI値がC-MODEより十分に大きく、B-MODEでの発振が抑制可能であることを確認した。この例ではB-MODEのCI値はC-MODEの7.24倍が得られ

ている。一方、C-MODEのCI値が 189Ω と大きいため、雑音性能の劣化が予想され、さらに設計条件の最適化が必要である。

SC-CUT WLP水晶振動子における実力を確認するため、外形寸法 $2.5\text{mm}\times 1.8\text{mm}$ にて振動部のみを試作し、 $3.2\text{mm}\times 2.5\text{mm}$ の水晶振動子とした後、 $7\text{mm}\times 5\text{mm}$ のVCXO基板に搭載し、評価を行った。

図(2).80に試作、測定結果を示す。水晶振動子の周波数温度特性について、OCXOでの使用を想定した場合 $+70^\circ\text{C}$ 近辺での平坦化が必要であり、改善のためには切断角度の修正が必要である。位相雑音は $-47\text{dBc}/\text{Hz}$ 、AT-CUT水晶振動子の使用に対し劣る結果である一方、G-SensitivityについてはAT-CUTの1点支持と比較して良好な結果であった。AT-CUT水晶振動子と同様に対向2点等の複数点支持の検討が必要である。

以上初期評価の結果、切断角度や複数点支持の検討が必要となる。



図(2).80 SC-CUT WLP構造水晶振動子の特性結果

(o)WLP構造水晶振動子の検討、試作

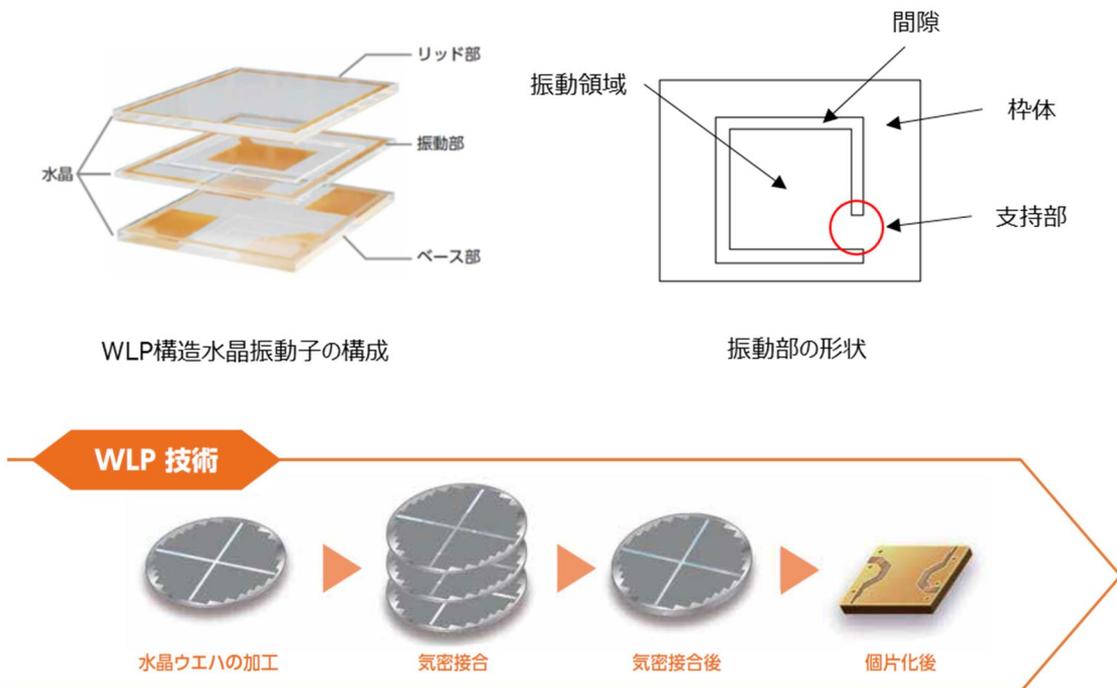
本研究では、振動部の軽量化、振動部の保持部の応力分散によるG-Sensitivityの改善効果、OCXOにおける加熱領域となる熱容量の最小化効果を期待し、Wafer Level Package(WLP)振動子の採用検討を行った。

WLP構造の水晶振動子について以下説明する。

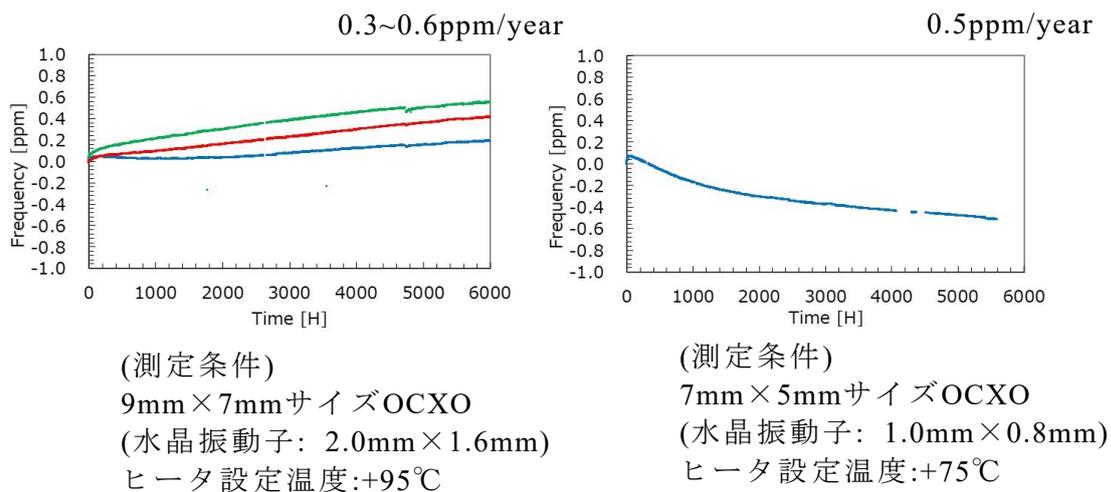
図(2).81にWLP構造の構成を示す。WLP水晶振動子はWLP (ウエハレベルパッケージ) 技術により実現したデバイスで、水晶を母体としたリッド部、振動部、ベース部の3層構造である。フォトリソプロ

セスにて振動部などの外形を形成した3枚の水晶ウエハを貼り合わせ、それを個片化することでWLP構造の水晶振動子となる。振動部内の振動領域部は枠体に支持部を介して機械的、電氣的に接続された一体構造となっている。なお、振動領域部は水晶の圧電振動への影響を抑制する必要があるため、間隙等を設け枠体から可能な限り浮かしておくことが特性上望ましい。

WLPの採用により、一般的な水晶振動子でセラミックパッケージと振動部の電極を電氣的に接続する導電性接着剤を採用しなくて良いため、接着剤からのアウトガスによる振動部への吸着、質量変化による周波数変化などが発生しない。エージング特性の改善が見込まれるため、水晶振動子サイズを2.0mm×1.6mm、1.0mm×0.8mmの2種類作成し、サイズ毎のOCXOとして動作させた際のエージング特性を測定した(図(2).82)。



図(2).81 Wafer Level Package 振動子の概略



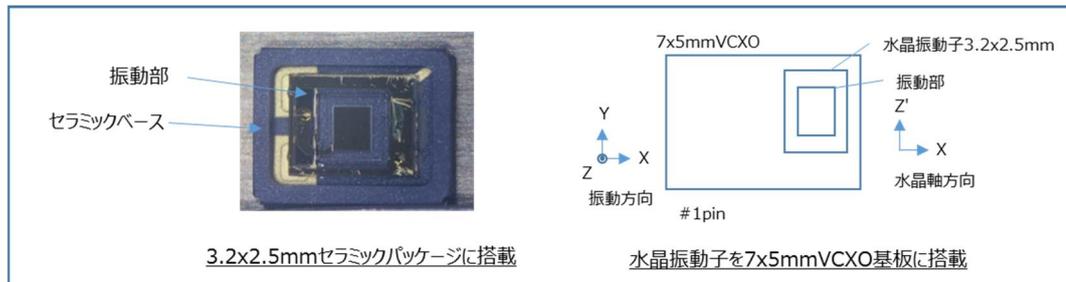
図(2).82 エージング特性

エージングレートは0.3~0.6ppm/年程度となった。10年程度の使用期間を想定すると、3~6ppmの周波数変化となる、(c)周波数制御による発振回路位相雑音への影響と発振器構成の検討で示した制御範囲の条件2ppm/Vでは、制御電圧範囲が0~3Vの場合は、周波数制御範囲は±3ppmとなり、エージングによる変動を補正できない。したがって、1/2程度に改善する必要がある。

る。

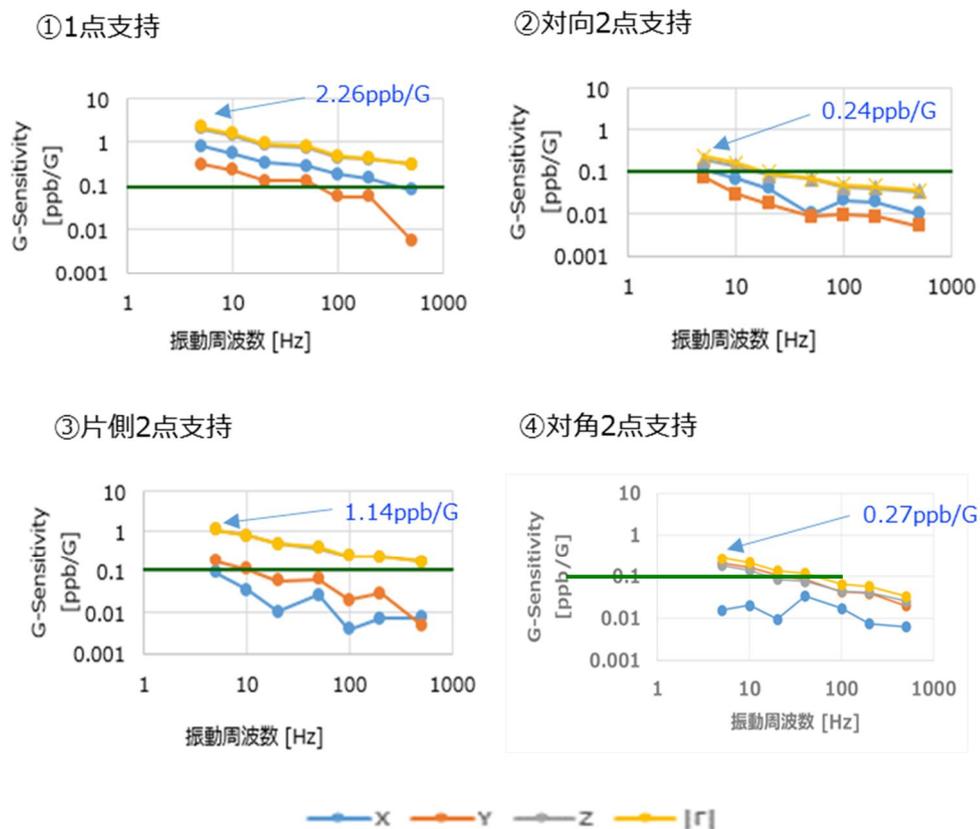
WLP構造を用いた水晶振動子において振動部支持構造の設計最適化が必要であり、周波数20MHzと40MHzを用いてG-Sensitivityの性能評価を行った。

図(2).83に周波数20MHzと40MHzのWLP水晶振動子の振動部を用いた性能評価時の構成を示す。振動部の外形寸法は2.0mm×1.6mmのものを使用している。これを3.2mm×2.5mmのセラミックパッケージに搭載、封止し、この水晶振動子を7mm×5mmサイズのVCXO基板に搭載し、G-Sensitivityの初期評価を行った。

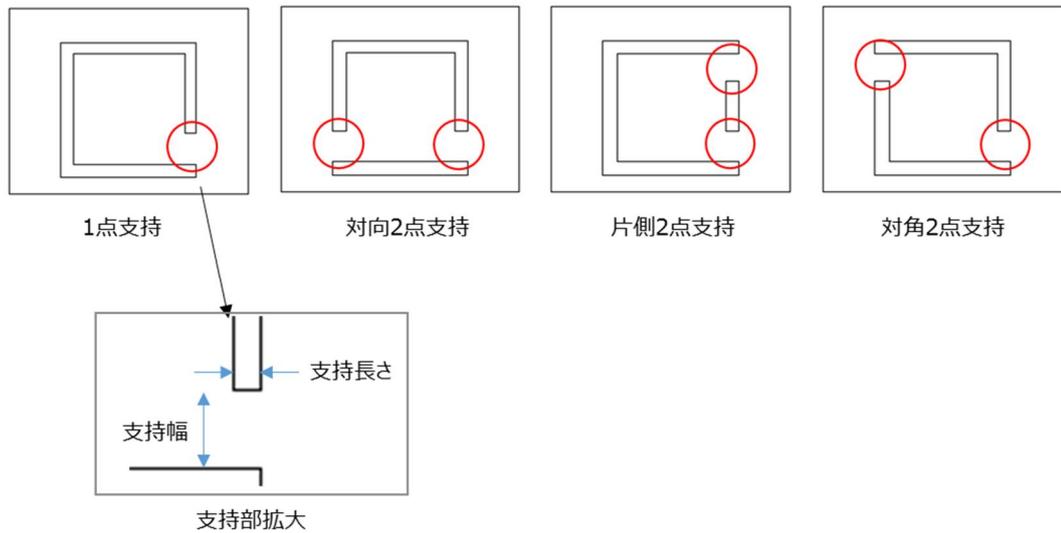


図(2).83 振動部評価時の構成

図(2).84に20MHzの振動領域部の支持方法を変化させた際のG-Sensitivity評価結果を示す。支持方法は、①1点支持、②対向2点支持、③片側2点支持、④対角2点支持の4条件であり、その構成を図(2).85に示す。G-Sensitivityの結果、対向2点支持が0.24ppb/Gと最も良好な結果であった。

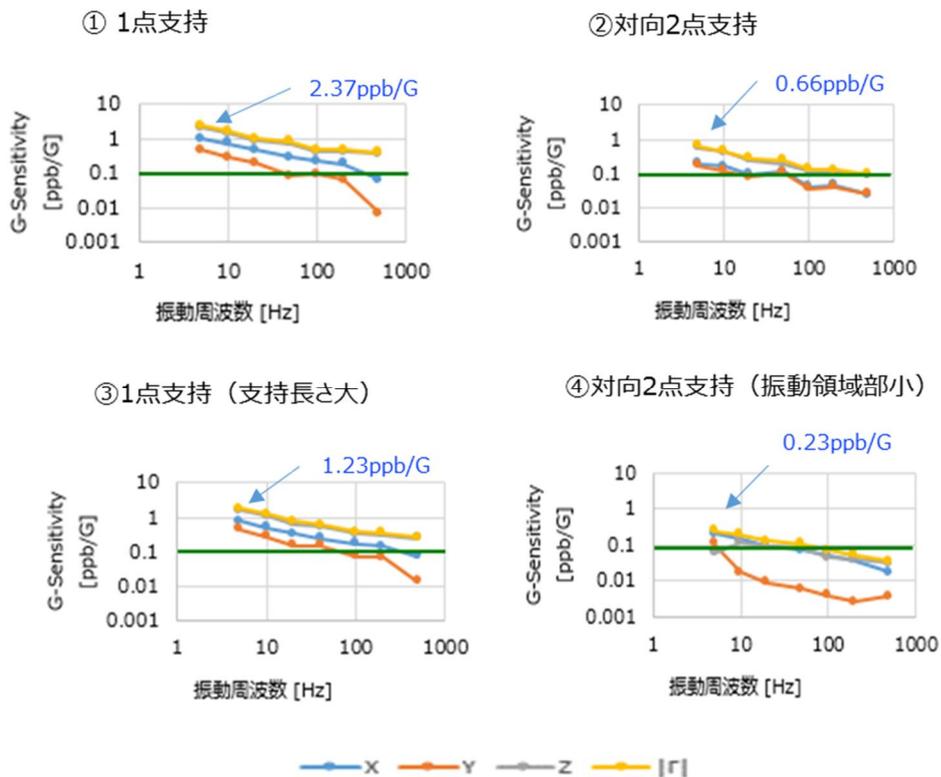


図(2).84 20MHzの支持方法に対する特性結果



図(2).85 振動領域部の支持方法

また、図(2).86に40MHzの振動領域部の支持方法を変化させた際のG-Sensitivityの評価結果を示す。支持方法は、①1点支持、②対向2点支持、③1点支持（支持長さ大）、④対向2点支持（振動領域部寸法小）の4条件であり、その構成については図(2).85と同様である。40MHzについても対向2点支持が最も良好な結果であった。なお、支持方法の違いによる差異は、振動における振動領域部のたわみ量によるものと推測する。



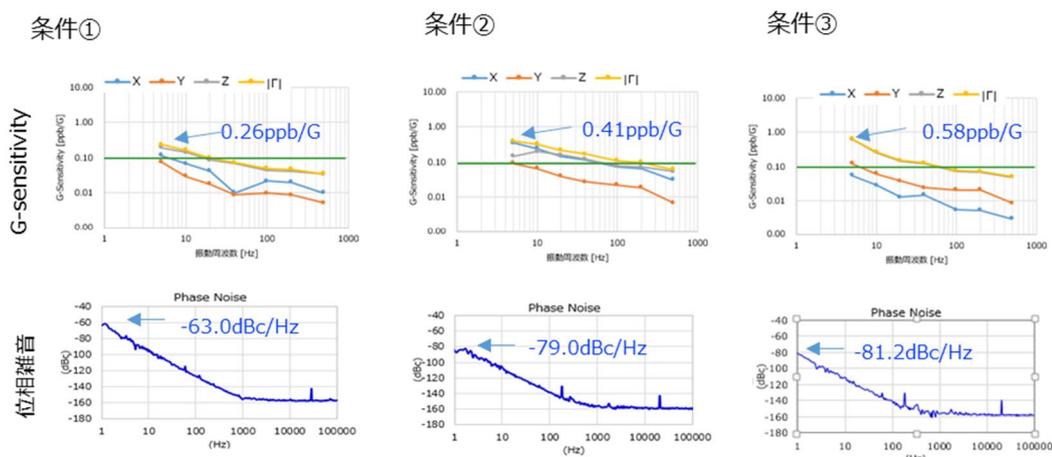
図(2).86 40MHzの支持方法に対する特性結果

次に、周波数20MHzについて、位相雑音の改善のため、対向2点支持にて、振動領域部寸法を調整したWLP水晶振動子を試作し、G-Sensitivity、位相雑音の評価を行った。表(2).7に試作したWLP水晶振動子の条件及び評価結果、図(2).87にその結果グラフを示す。振動領域部寸法により、

位相雑音が改善した一方、G-Sensitivityは劣化した。振動領域部寸法を大きくしたことにより水晶AT-CUTの厚みすべり振動が十分に閉じ込められ、水晶端面での固定端反射した振動による主振動の障害が軽減された結果、位相雑音が改善した一方、振動領域寸法が大きいことにより振動による振動部のたわみ量が大きくなったことで周波数変動が増大し、G-Sensitivityが劣化したものと推測する。

表(2.7) 20MHz 試作条件と結果一覧

	条件①	条件②	条件③
振動領域部の大きさ	小	中	大
G-Sensitivity(ppb/G)	0.26	0.41	0.58
位相雑音(dBc/Hz)	-63.0	-79.0	-81.2

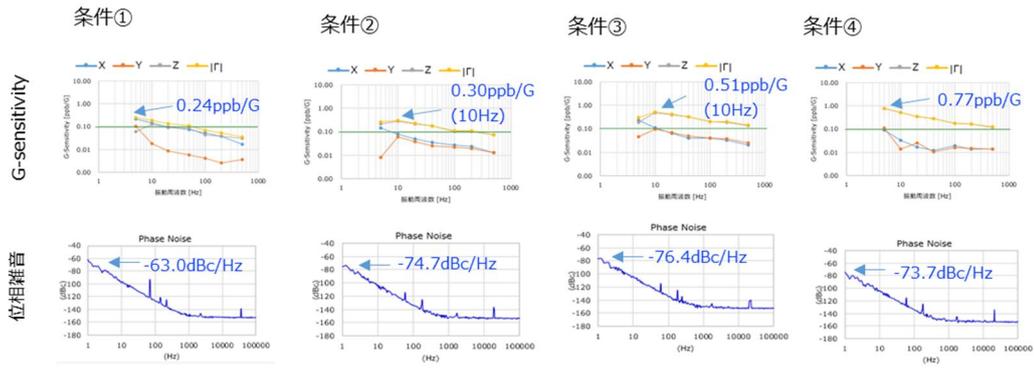


図(2.87) 20MHz の各条件に対する特性結果

周波数40MHzについても位相雑音の改善のため、対向2点支持において、振動領域部寸法、支持寸法を調整したWLP水晶振動子を試作し、G-Sensitivity、位相雑音の評価を行った。表(2.8)に試作したWLP水晶振動子の条件及び評価結果、図(2.88)にその結果グラフを示す。20MHzと同様に振動領域部寸法により、位相雑音が改善した一方、G-Sensitivityは劣化した。要因についても20MHzと同様と推測する。また、支持幅については大きくすることによりG-Sensitivityは0.77ppb/Gから0.3ppb/Gに小さくなった。支持幅を大きくすることにより振動に対する振動領域部のたわみ量が小さくなったことで周波数変動が抑制された結果と推測する。

表(2.8) 40MHz 試作条件と結果一覧

	条件①	条件②	条件③	条件④
振動領域部の大きさ	小	大	大	大
支持幅の大きさ	小	大	小	小
支持長さ	長	短	短	中
G-Sensitivity(ppb/G)	0.24	0.30	0.51	0.77
位相雑音(dBc/Hz)	-63.0	-74.7	-76.4	-73.7

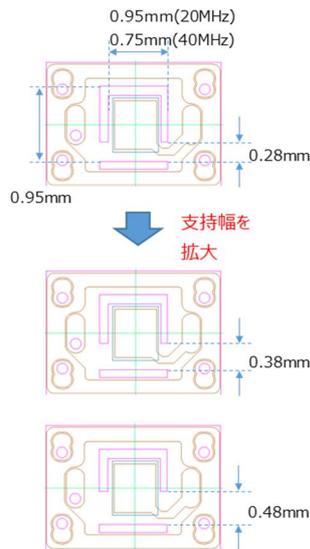


図(2).88 40MHz の各条件に対する特性結果

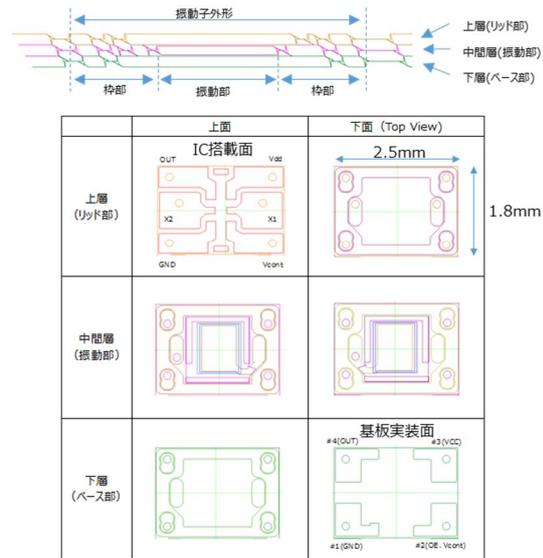
以上より、①振動領域部寸法の調整と②支持幅の拡大によりG-Sensitivityの改善を図る必要がある。

また、3層のWLP水晶振動子の試作、評価を進める必要があるため、リッド部、振動部、ベース部の設計を行った。当設計内容を図(2).89に示す。振動部寸法については、20MHz：0.95mm×0.942mm～1.10mm×1.05mm、40MHz：0.95mm×0.75mm～0.99mm×0.98mmとし、支持幅については、0.28mm、0.38mm、0.48mmの3条件とした。また、リッド部はVCXO用ICの搭載を、ベース部は基板への実装を想定した配線パターン設計としたことにより、WLP水晶振動子の外形寸法を2.0mm×1.6mmから2.5mm×1.8mmに拡大した。

● 振動部と支持の設計

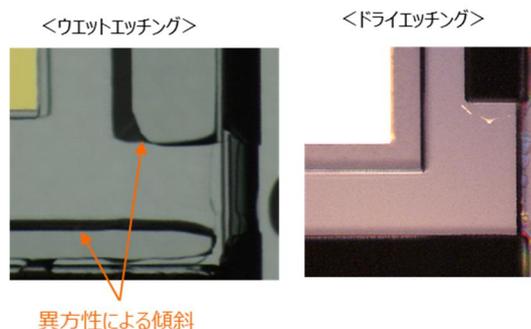


● 3層構造水晶振動子の設計



図(2).89 3層 WLP 水晶振動子の設計

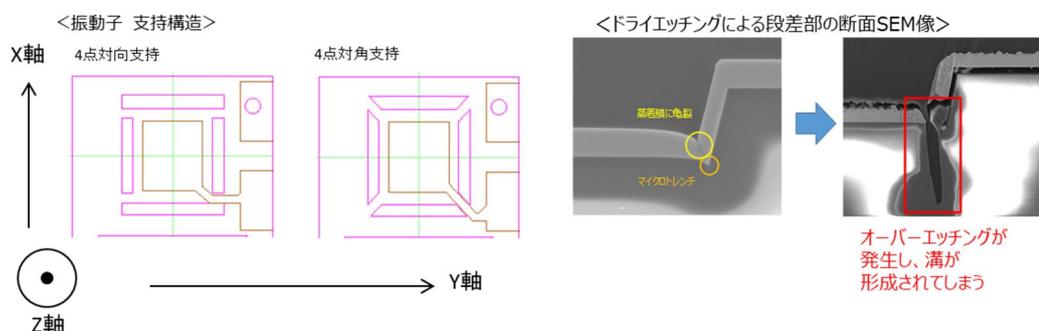
WLP水晶振動子の外形形成については液浸によるウェットエッチング工法を利用していた。しかし、当工法では水晶の結晶軸に対する異方性により水晶端面に傾斜が生じ、振動領域と枠体との振動時の接触を防ぐためには間隙幅を大きくする必要があった。そこで水晶端面を垂直に加工できるドライエッチング工法を用いた初期検証を行った。ウェットエッチングとドライエッチングによる水晶の加工後の状態を図(2).90に示す。なお、ドライエッチング工法はハロゲンを含むガスのプラズマをウエハに接触・反応させてエッチングする工法である。



図(2.90) 各エッチング後の水晶状態

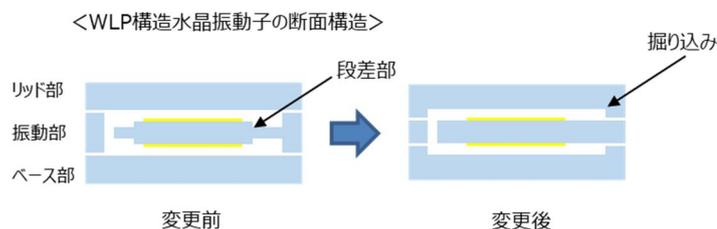
ドライエッチング工法を用いることで、水晶端面を垂直に外形形成ができることを確認した。

ドライエッチング工法を用いたWLP水晶振動子の試作を行った。振動子の支持構造例と断面観察結果を図(2.91)に示す。



図(2.91) 振動子の支持構造例と断面観察結果

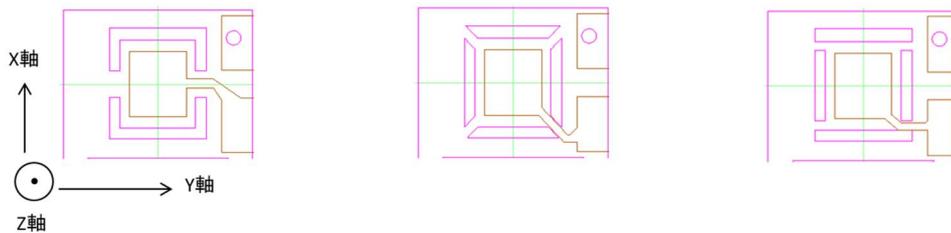
ドライエッチング後の水晶断面観察において段差部に溝が形成されていることを確認した。これは水晶端面の形状が垂直のため、保護膜である金属膜が角部において薄く、途切れた結果マイクロレンチが発生し、ここを起点にドライエッチングによるオーバーエッチングが発生したことが原因と思われる。そのため振動部に段差を形成しない構造に変更し、かつリッド部とベース部にウエットエッチング工法にて掘り込みを形成する形状へ変更することとした。変更前後の断面図を図(2.92)に示す。



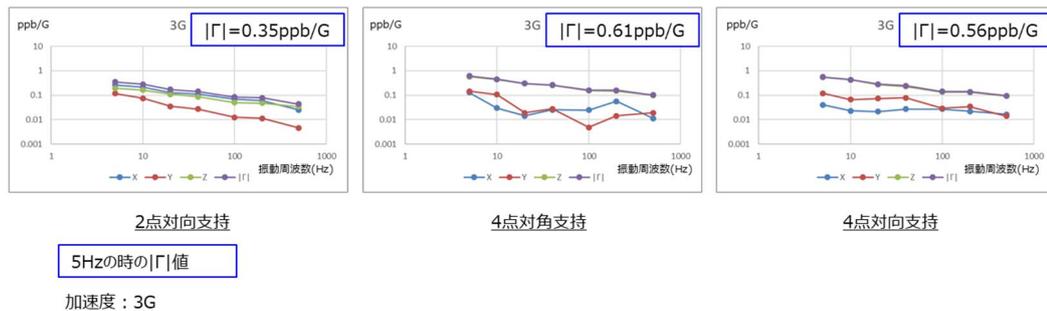
図(2.92) 変更前後の断面構造

上記における段差を形成しない構造においてG-Sensitivityの評価を行った。評価を行った試作品については段差部のない振動部のみを作成し、セラミックパッケージに接着、気密封止を行っている。この水晶振動子を水晶発振器として評価用の基板に実装し測定を行った。WLP水晶振動子の振動部の支持構造については2点对向支持、4点对角支持、4点对向支持の3種類であり、周波数は40MHzである。振動部の支持構造、G-Sensitivityの結果を図(2.93)に示す。

振動部 支持部構造図



G-Sensitivity

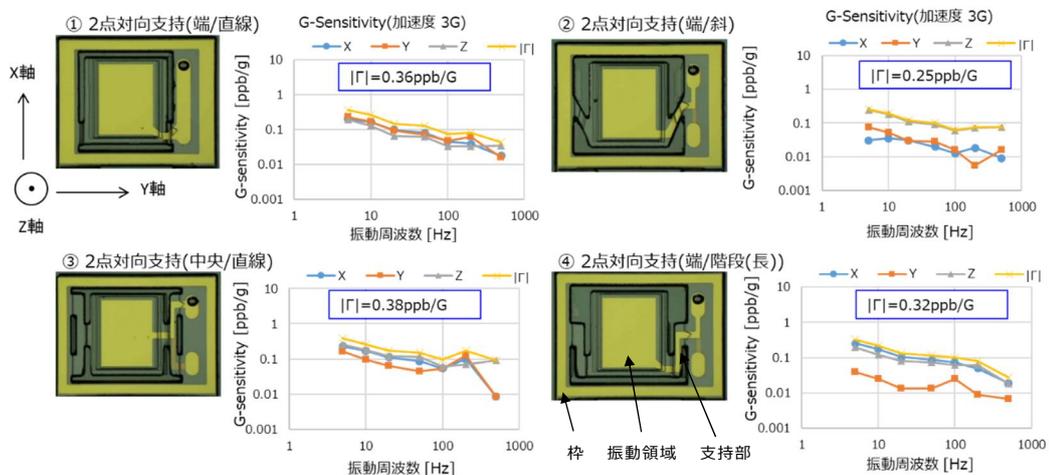


図(2).93 WLP水晶振動子 振動部 支持部構造図、G-Sensitivity結果

G-Sensitivity の結果について、2 点对向支持が 0.35ppb/G、4 点支持の 0.61ppb/G と 0.56ppb/G に対して良好な結果であった。4 点支持については Z 軸方向が 2 点对向支持に対して振動の影響を大きく受け特性が劣化している。Z 軸方向の振動は振動領域において慣性モーメントによる影響が X 軸、Y 軸より大きいと考えられる。4 点支持のほうが 2 点支持に対して Z 軸方向の振動による応力の発生箇所が振動領域内において 2 倍になり、振動領域に対する影響が大きくなるためと考える。

40MHz の振動子における G-Sensitivity について、2 点对向支持が 0.35ppb/G の結果であり、最終目標である 0.1ppb/G には達していない。

最終試作に向け上記で良好であった水晶 X 軸に対称の 2 点对向支持において、さらに支持形状を追加した試作を行い、G-Sensitivity の評価を行った。WLP 水晶振動子の振動部の支持構造については図(2).93 に示す 4 種類であり、周波数は 20MHz にて行った。評価を行った試作品については WLP 水晶振動子をセラミックパッケージに接着剤で搭載し、気密封止している。この水晶振動子を水晶発振器として評価用の基板に実装し測定を行った。振動部の支持構造図、G-Sensitivity の結果を図(2).94 に示す。



図(2).94 振動部の2点支持部形状、G-Sensitivity結果

②2 点对向支持(端/斜)が G-sensitivity0.25ppb/G と最も良好な結果であった。Z 軸方向については結果に差異はなく、G-Sensitivity の特性差については X、Y 軸における差異と考える。まず Y 軸について、②2 点对向支持(端/斜)と④2 点对向支持(端/階段(長))が小さい結果であった。その理由については、枠側の中央両端を支持することで当支持部と振動領域部の重心が Y 軸方向の振動に対して一直線状になるために機械的振動振幅が抑制されているのではないかと考える。③2 点对向支持(中央/直線)も同じ状態であるが、支持部も同一直線上にあるために振動による応力が振動領域部に影響を及ぼしているために劣化しているのではないかと推測する。次に X 軸について、②2 点对向支持(端/斜)の形状が最も小さい結果である。その理由については、振動による応力が支持部の細い部分に集中すると考えられ、この応力集中点が①、③の形状と比較して振動領域部から少し距離を有したことにより、振動領域部への応力が減少したためと考える。④2 点对向支持(端/階段(長))も同じ状態ではあるが、振動領域の支持部の細い部分が振動方向に平行に配置しているため、当部分に応力が集中せず振動領域部への応力減少に寄与しなかったのではないかと考える。以上が、WLP 水晶振動子の本研究における結果である。

WLP水晶振動子におけるG-sensitivityの最終結果は0.25ppb/Gである。水晶振動子の振動下における振動部の保持部の応力分散による効果を期待していたが、改善効果が限定的に留まり、振動子単体での目標0.1ppb/Gの達成はできなかった。達成には、水晶振動子の固定方法、さらに振動部の緩衝領域を持った支持構造の研究、支持構造に適した水晶切断方位の最適化が必要である。

(p)課題と対策

(課題)

① 7mm×5mmサイズTCXOのアラン標準偏差の達成には、相関性のあるVCXO可変感度を小さくする必要があるが、温度に対する周波数調整量を考慮すると小さくすることができなかった。

また11mm×9mmサイズTCXOで使用したサーミスタ、抵抗の回路網による温度補償回路では実装面積が大きいため7mm×5mmサイズTCXOで構成することができなかった。

② 7.0mm×5.0mmサイズOCXOのアラン標準偏差については、熱的な揺らぎによる周波数安定度の劣化、ヒータICからのノイズが課題であると考ええる。

③ 7mm×5mmサイズTCXO、7.0mm×5.0mmサイズOCXOともに、G-Sensitivityの達成には加速度補償による効果が大きいですが、回路規模が大きくなるため、実装ができなかった。

④ G-Sensitivityの達成には、水晶振動子の振動下における振動部の保持部の応力分散による効果を期待していたが、改善効果は小さく、振動子単体での目標の達成はできなかった。

(対策)

課題①

(1) 11mm×9mmサイズTCXOで使用した回路構成における各部品の高密度実装、補償回路の最適化による回路規模の縮小、もしくはIC化により実装面積を縮小する。

(2) 7mm×5mmサイズTCXOで使用した温度補償用ICの温度補償電圧発生回路の低ノイズ化。

(3) 水晶振動子の周波数温度特性を最適化して必要な周波数温度補償量を低減することによってVCXO可変感度を低減する。

課題② 振動子とヒータ間の熱容量や距離の適正化、ヒータIC自体のヒータゲインやノイズに対する調整、補正機能の付加が効果的であると考ええる。

課題③ 加速度補償回路を含めた回路の小型化が必要と考える。そのためには、補償する軸方向の限定、調整回路の縮小による回路規模の縮小、加速度補償ICパッケージの小型化、回路全体のIC化が効果的であると考ええる。

課題④ 水晶振動子について、振動下における振動部の保持部の応力分散のための振動子固定方法、緩衝領域を持った構造設計、支持構造に適した水晶切断方位の最適化が必要である。

参考文献

[1] W. J. Riley, "Handbook of Frequency Stability Analysis", NIST Special Publication 1065, p.20

[2] M. E. Frerking, "Methods of Temperature Compensation", 36th Annual Frequency Control Symposium, 554-570, (1982)

実施項目(3) 量子部の試作及び評価

実施項目(3)-1 HS-ULPAC 実験室モデル量子部の試作(担当:一般財団法人マイクロマシンセンター)

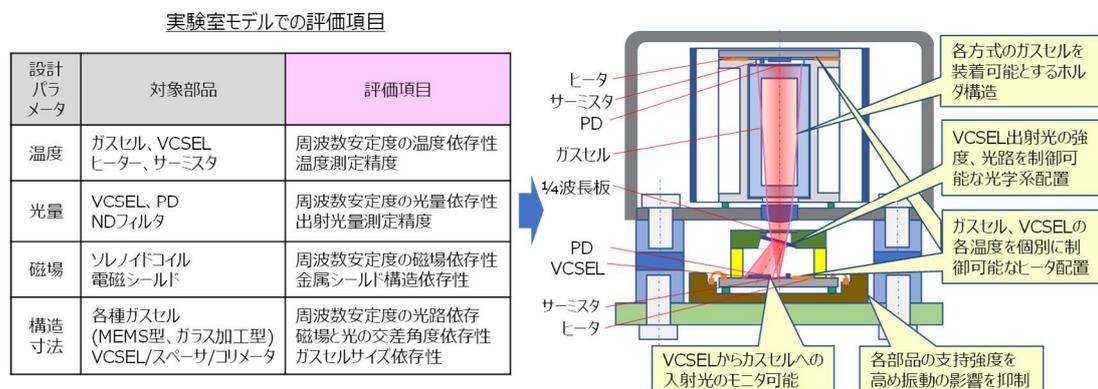
本実施項目では、理想に近い量子部の条件で基準となるデータを取得・分析できる実験室モデルを試作する。そのためには、CPT共鳴周波数の安定度に及ぼす温度変動、磁場変動、及び振動印加などの各環境変動要因を個別に評価できる実験室モデル量子部が必要となる。

まず、実験室モデルが適用される各実験項目に対応可能な量子部の仕様を検討し、多様なガスセルの搭載が可能、ガスセルとVCSELの独立温度制御が可能などの特長を有する量子部の設計を行った。この設計をもとに、ガラス加工型ガスセル及び実施項目(1)-2-②で作製したMEMSガスセルを組み込んだ量子部を試作し、量子部としての機能評価を行った。評価を通して抽出された課題に対し種々の改良を加え、プロトタイプモジュール搭載用に完成品を提供した。設計及び対策効果の検証には、伝熱シミュレーションを適用した。詳細を以下に記述する。

(a)量子部構造の設計・試作

実験室モデルは、環境変動下での基準となるデータを取得することが目的であるため、各種設計パラメータ（温度、光量、磁場、構造）に対し、柔軟に評価が可能となるように量子部を設計する必要がある。図(3)-1.1に実験室モデルにて実施する評価項目とそれらに対応すべく新たに設計した量子部の基本構成及びその特長を示す。主な特長は以下の通り。

- ①各方式ガスセルを装着可能とするガスセルホルダ構造
- ②VCSEL出射光の強度や光路を制御可能な光学系配置
- ③ガスセル、VCSELの各温度を個別に制御可能なヒータ配置
- ④構成部品の支持強度を高め振動の影響を抑制
- ⑤VCSELからガスセルへの入射光のモニタ可能

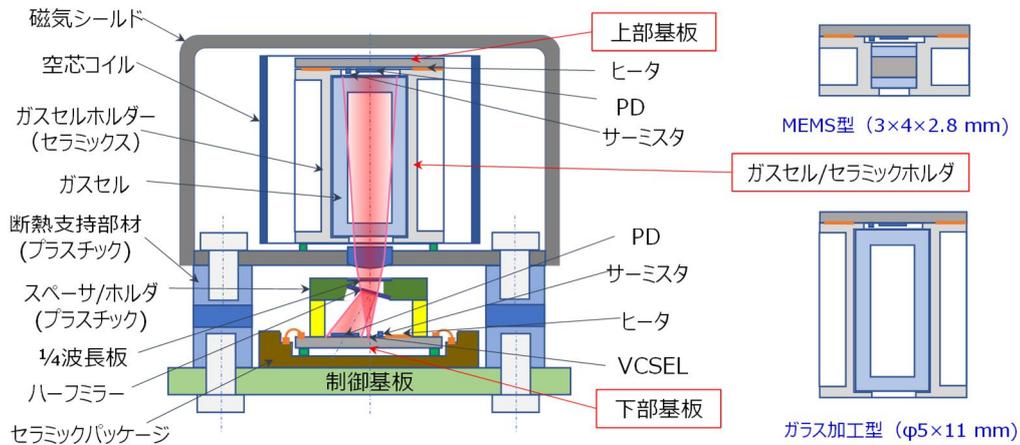


図(3)-1.1 実験室モデルの評価項目と量子部基本構成の特長

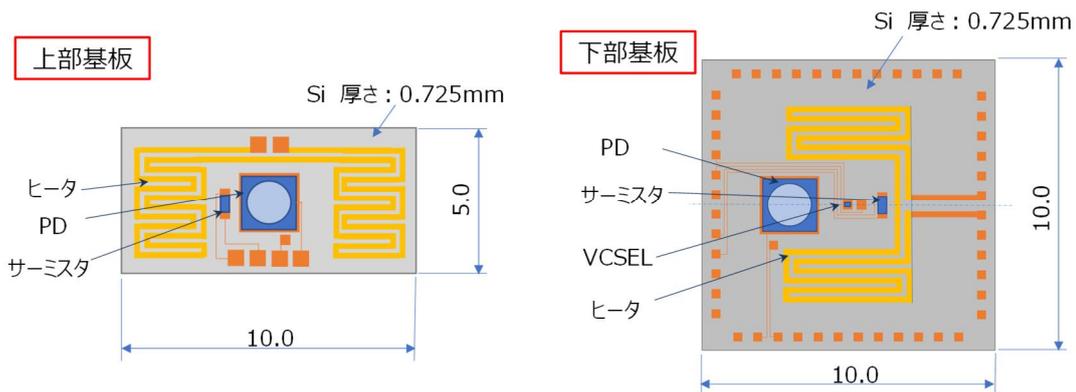
図(3)-1.2に実験室モデル量子部の基本構成を示す。下部基板上に実装されたVCSELから出射されたレーザ光は、ホルダに取り付けられたハーフミラーにより、反射光は下部基板上に実装されたフォトダイオード(PD)に向かい、透過光は1/4波長板で円偏光に変換されガスセルに入射する。反射光を検出するPDはVCSELの光量モニタとして使用する。一方、ガスセルに入射したレーザ光はガスセル内を通過し、上部基板に実装されたPDにて検出される。ガスセルはセラミック製のホルダに取り付けて組込む構成とした。これにより、従来タイプで実績のあるガラス加工型及び新規開発するMEMS型など、多様な方式やサイズのガスセルをホルダの構造を変更するだけで取り付け可能となる。ガスセルの外周には、磁場を印加する空芯コイル及び外部磁場を遮蔽する磁気シールドを配置している。

図(3)-1.3に上部基板、下部基板の基本構成を示す。上部基板には、ガスセルを適正温度に昇温制御するための薄膜ヒータが形成され、レーザ光を検出するPD、温度検出用のサーミスタが実装される。このヒータで生じる熱は、高熱伝導のセラミック製ホルダからガスセルに伝導される。下部基板には、中心部に実装されたVCSELを適正温度に昇温するための薄膜ヒータが形

成され、さらに、レーザ光をモニタするPD、及び温度検出用のサーミスタが実装される。下部基板はセラミックパッケージを介して制御基板に実装され、上部基板を含む磁気シールド内の上部構造は、樹脂製の断熱支持部材を介して制御基板に取り付けられる。このため、上下基板間の熱抵抗は確保され、互いに独立した温度制御が可能となる。



図(3)-1.2 実験室モデルの基本構成



図(3)-1.3 上部基板、下部基板の基本構成

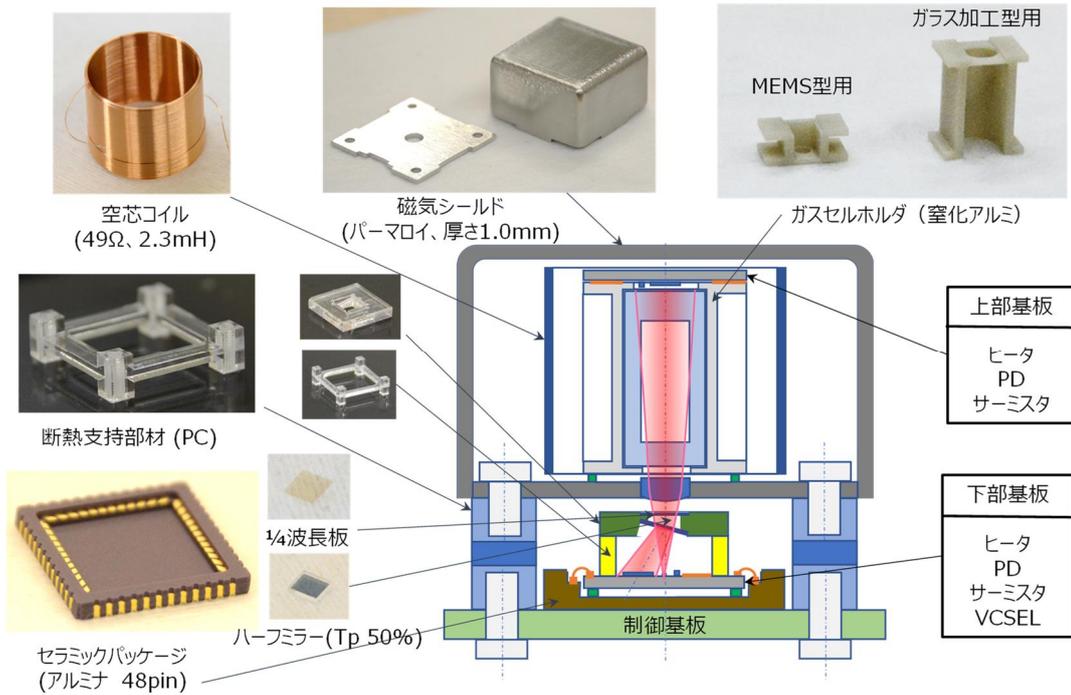
(a)-1 1次試作（基本構成）

図(3)-1.4に実験室モデル量子部を構成する試作部品を示す。上部/下部基板以外の各部品は、設計方針に従い設計し、加工メーカーに外注し作製した。いずれも要求仕様を満たす仕上がりであることを確認した。

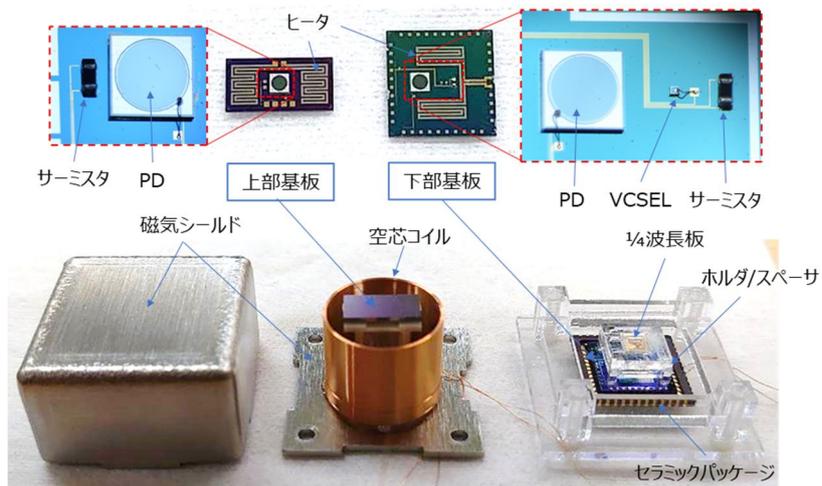
図(3)-1.5に実験室モデル量子部主要部品の実装・組込み形態を示す。図上段に示す上部/下部基板は、8インチSiウエハ上にヒータ、配線、及びパッドをフォトリソグラフィにより形成し個片化したものである。ヒータの材質は白金(Pt)、厚さ $0.5\ \mu\text{m}$ 、幅 $200\ \mu\text{m}$ で、抵抗値は実測値で $94\ \Omega$ となった。VCSEL、PD、サーミスタは、はんだリフローにより基板にダイボンズし、アノード電極はAuワイヤボンズにより基板パッドに接続している。

図(3)-1.6に実験室モデル量子部の基本試作完成品の外観と内部構造を示す。図下段に示すガスセル（ガラス加工型、MEMS型）の組込みは、熱伝導率が高い窒化アルミ製のガスセルホルダに高熱伝導の接着剤でガスセルと上部基板を接着している。さらに、ガスセルホルダと磁気シールドベース間には断熱性の高いポリプロピレン(PP)材を挟み、熱の流出を防止している。

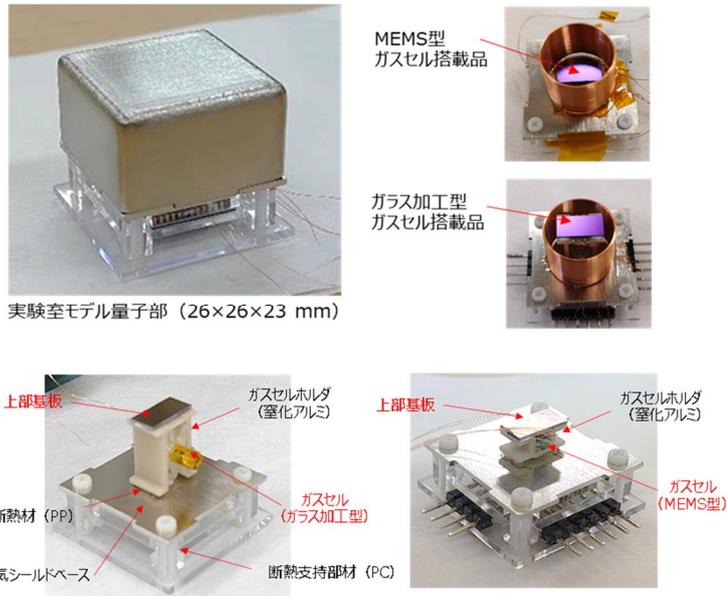
本試作品にて、ヒータ通电による昇温とそれに応じたサーミスタ抵抗値の変化、及びVCSEL通电による発光とそれに応じたPD電流出力の変化など、各部品の基本動作を確認した。



図(3)-1.4 実験室モデル量子部を構成する部品

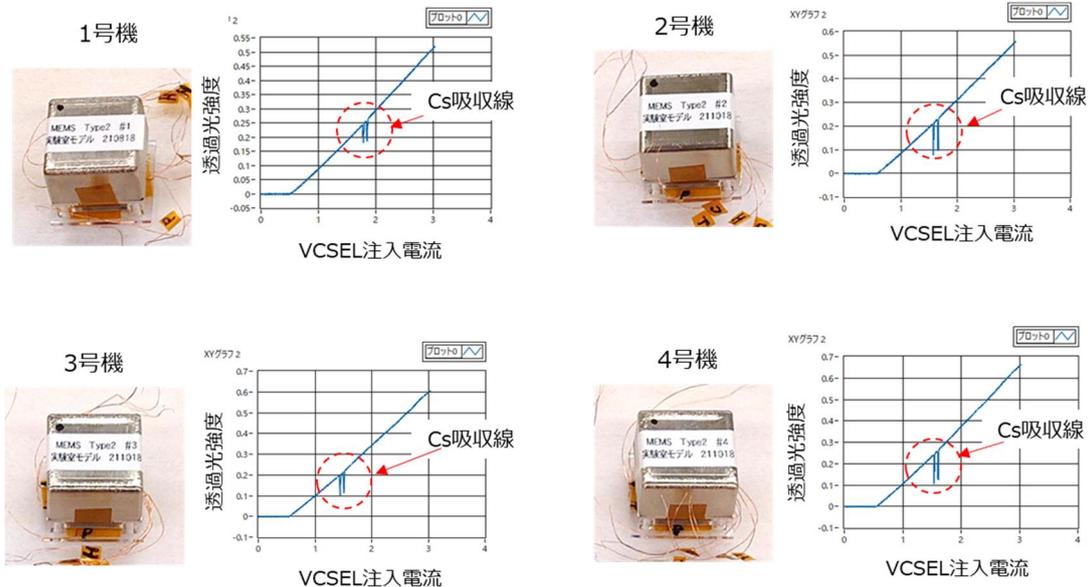


図(3)-1.5 実験室モデル量子部主要部品の実装・組み込み形態



図(3)-1.6 実験室モデル量子部の基本試作完成品の外観と内部構造

実施項目(1)-2-②で記載した通りMEMSガスセル1次試作(Type 2)の構造作製及びCs活性化が完了し、そのガスセルとしての基本機能を検証するため実験室モデル量子部への組込み試作を行った。図(3)-1.7にMEMSガスセル(Type 2)を組込んだ実験室モデル量子部(4台)とガスセルの基本機能であるCsによる吸収の観測結果を示す。VCSELへの注入電流(横軸)の増加に伴い、閾値を超えた時点からレーザ光が出力され、ガスセルを透過してPDで検出された透過光強度(縦軸)の増加が観測できる。また、VCSELへの注入電流の増加に伴いレーザ強度とともに周波数も変化するため、レーザ光の周波数がCs吸収線に一致する電流値にて透過光強度が低下する現象が観測される。実験結果から試作した4台の量子部にてCs吸収線の存在が観測され、試作したMEMSガスセル1次試作(Type 2)が、ガスセルとして機能していることを確認した。

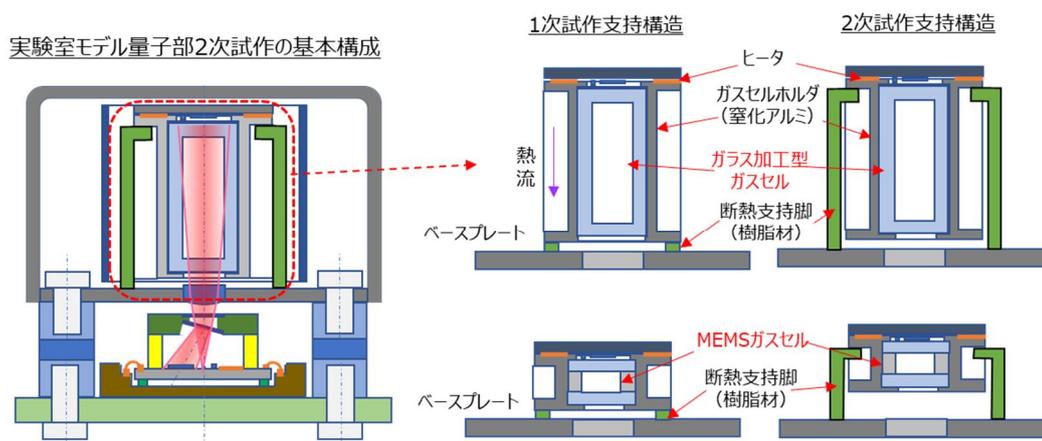


図(3)-1.7 MEMS ガスセル(Type 2)を組込んだ実験室モデル量子部によるCs吸収線観測結果

(a)-2 2次試作、3次試作(改良構成)

2次試作では更なる完成度の向上を目指し、量子部に組込まれるガスセルの温度分布を低減する新たな支持構造を検討した。

図(3)-1.8に実験室モデル量子部2次試作のガスセル支持構造を示す。図中央に示す通り、ガスセルを収めたガスセルホルダは、1次試作ではその底面に設けられた短い断熱支持脚にてベースプレートに固定されている。そのため、上部基板のヒータからガスセルホルダ及び断熱支持脚を通してベースプレートに至る熱流によりガスセルホルダの上部から下部に向かって温度が低下する温度分布が生じること懸念された。後述する伝熱シミュレーションでは、外気温度20℃でヒータ温度を85℃に設定した場合、ガスセル上下の温度差が最大3 K程度となることが示唆された。そこで、2次試作ではガスセルホルダの上部から下部に至る熱流を低減する構造として、図右側に示す通り、ガスセルホルダの上部を長い断熱支持脚でベースプレートに固定し、ガスセル底面とベースプレート間に空隙を設ける構造とした。図(3)-1.9に実験室モデル量子部2次試作のガスセル支持部の外観を示す。ガラス加工型ガスセル（左写真）及びMEMSガスセル（右写真）とも問題なく組み込み可能であることを確認した。



図(3)-1.8 実験室モデル量子部 2 次試作ガスセル支持構造（1 次試作との対比）



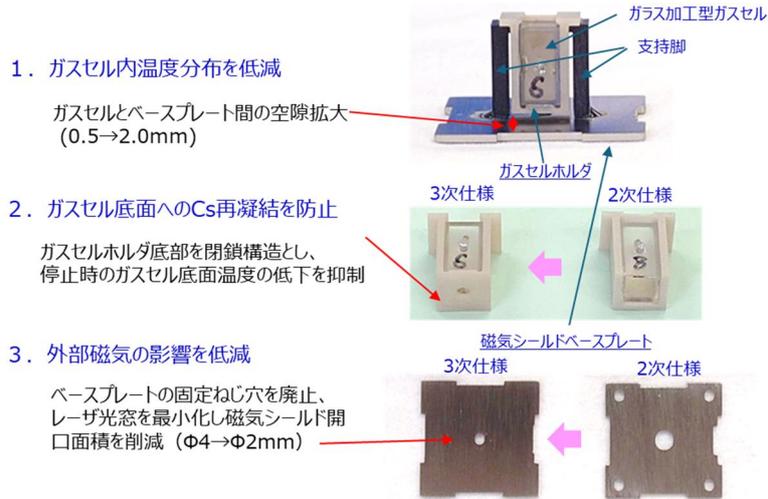
図(3)-1.9 実験室モデル量子部 2 次試作のガスセル支持部外観

3次試作では、残課題の解決に向けて更なる改良を行った。図(3)-1.10に実験室モデル量子部3次試作の改良点(1~3)と各改良部品の外観を示す。

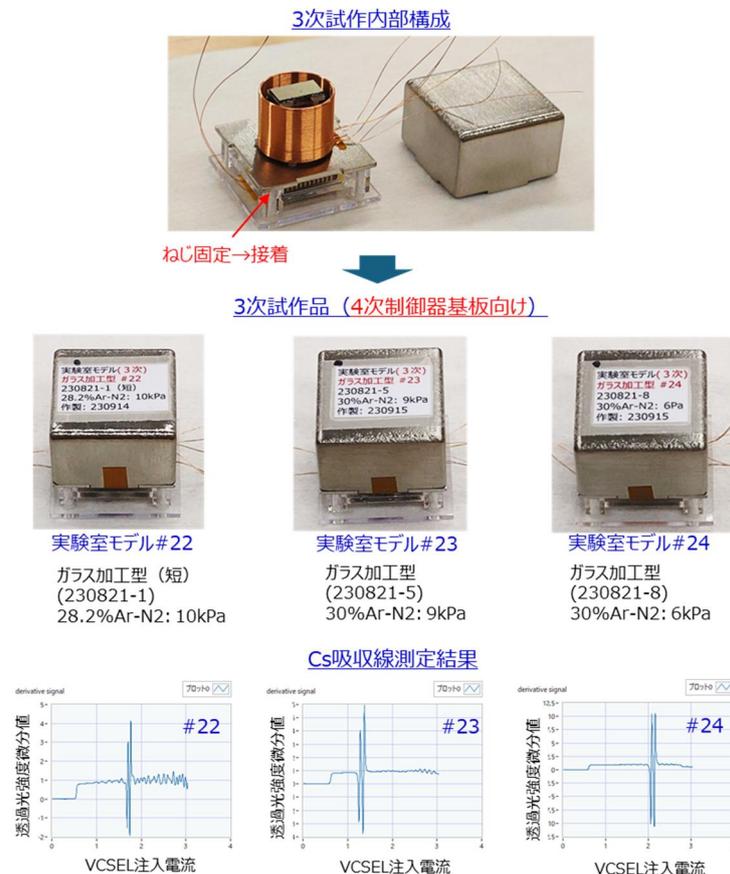
- ・改良点1：既に2次試作にてガスセル上部から下部にかけての温度分布を低減する方策として、ガスセルホルダの支持位置を上部に変更し、ガスセル底面と磁気シールドプレートと間に隙間を設けているが、この隙間の気体熱伝導や輻射による熱流の影響が見られたことから、3次試作ではさらに隙間を拡大(0.5→2.0 mm)することとした。
- ・改良点2：2次試作品を組み込んだモジュールにて評価実験を進める中、VCSEL からガスセルを通してPDで検出するレーザー光のレベルが徐々に低下する不具合が見られた。これは、モジュール電源をOFFにした後、ガスセルホルダ下部が解放構造となっているため、ガスセル底面の温度が先に低下し、低温部に選択的なCs凝結が生じたためと考えられる。その対策として、ガスセルホルダ下部を閉鎖構造としガスセル底面の温度低下を抑制した。これにより、レーザー光の検出レベルが低下する問題は解消した。

- ・改良点3：2次試作品を組込んだモジュールにて評価実験を進める中、外部磁気の影響が見られた。そこで、可能な限り磁気シールドの隙間を削減する構造として、ベースプレートのレーザ光が通る中央部の開口を必要最小限とするとともに固定用のねじ穴を廃止した。

図(3)-1.11 にプロトタイプモジュール（4次制御基板）搭載用に提供した実験室モデル量子部3次試作の完成品と Cs 吸収線測定結果を示す。上段の内部構成に示す通り磁気シールドベースプレートのねじ固定穴を廃止したため固定は接着材にて行った。中段に制御基板搭載用に提供した実験室モデル3次試作完成品の外観を示す。組込んだガスセルはガラス加工型ガスセルであり、それぞれバッファガス構成比、圧力が異なるものである。量子部の基本性能である Cs 吸収線は、下段に示す通り安定して観測できており、目標とする実験室モデル量子部が完成したと考える。



図(3)-1.10 実験室モデル量子部3次試作の改良点と改良部品



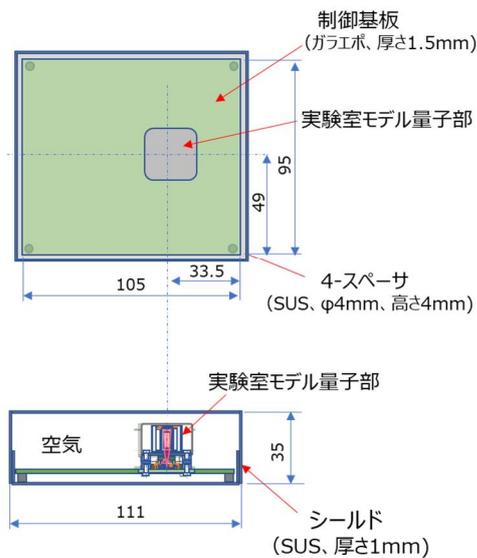
図(3)-1.11 実験室モデル量子部3次試作完成品と Cs 吸収線測定結果

(b)伝熱シミュレーションによる検証

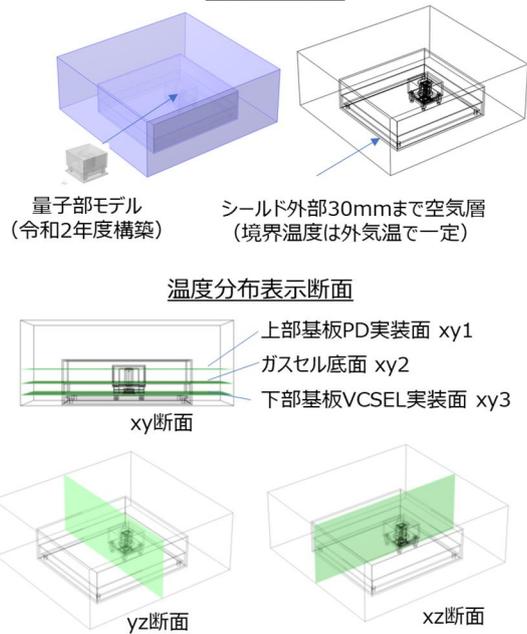
実験室モデルによる各種評価における因果関係の検証及び改良試作における設計の高度化・効率化を狙いとし、基本構成の設計仕様をベースに伝熱シミュレーションモデルを構築した。図(3)-1.12に実験室モデル量子部の伝熱解析モデルを示す。量子部を所定の位置に搭載した制御基板とそれ全体を覆う磁気シールド、さらに、磁気シールド外周部に空気層を設定し一定温度の外気との境界とした。なお、今回は対流による熱移動はないものとした。また、図右下に示す通り、温度分布などの解析結果を表示する断面を定義した。図(3)-1.13に主要構成部品の物性定義領域、表(3)-1.1に解析で使用した各材質の物性値を示す。

図(3)-1.14に実験室モデル量子部の基本構成での伝熱解析結果として、上部基板を85℃、下部基板を55℃に温度制御（PID制御）した場合の温度分布を示す。グラフの縦軸は、量子部の中心を通る垂直軸（Z軸）上の位置を示し量子部底面を原点0としている。複数の折れ線は、ヒータ通電開始（初期20℃）からの各経過時間における代表的な部材位置の温度を結んだものであり、時間の経過とともに上部/下部基板は各設定温度に漸近することを示している。また、各断面図は、定常状態に到達した時間（450秒）における温度分布を示したものである。温度制御の対象であるVCSELは55℃、ガスセル（高さ11mmのガラス加工型）は上部基板に接する上面は84.5℃となるが下面は82.5℃であり約2 Kの温度差が生じることが示唆された。図(3)-1.15に温度設定を上部基板55℃、下部基板85℃と逆に設定した場合の伝熱解析結果を示す。この場合、VCSELは85℃、ガスセルは53.5~54.5℃と上部/下部基板の各設定温度に追従した値に収束している。これらの結果から、VCSELとガスセルは独立に温度制御可能であることがシミュレーションにて検証された。

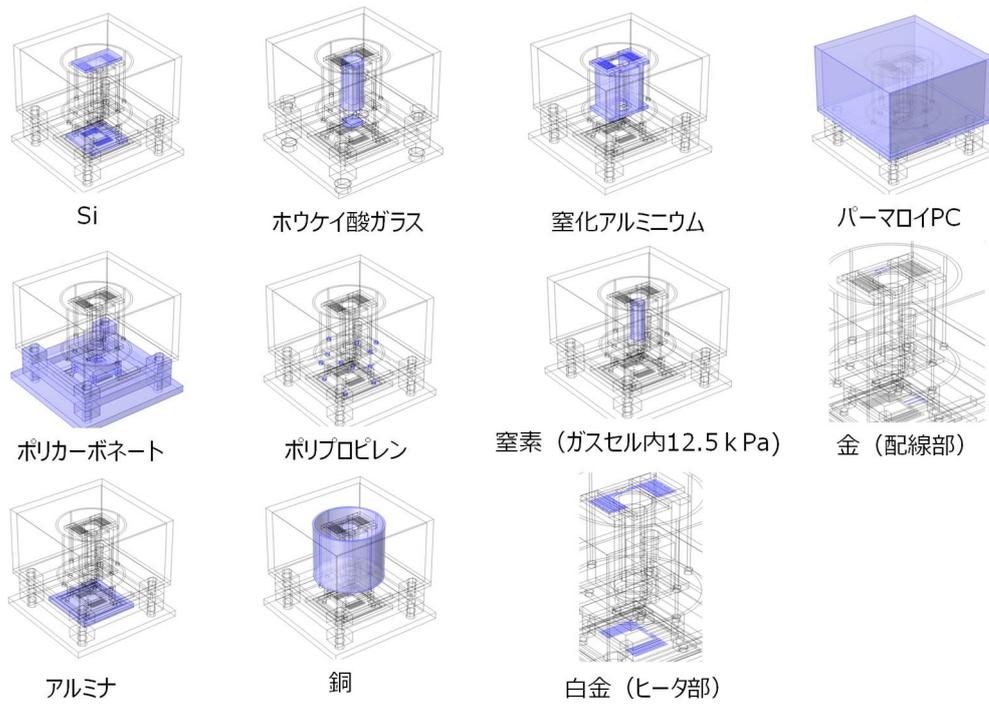
実験室モデル構成（制御基板への実装形態）



温度境界条件



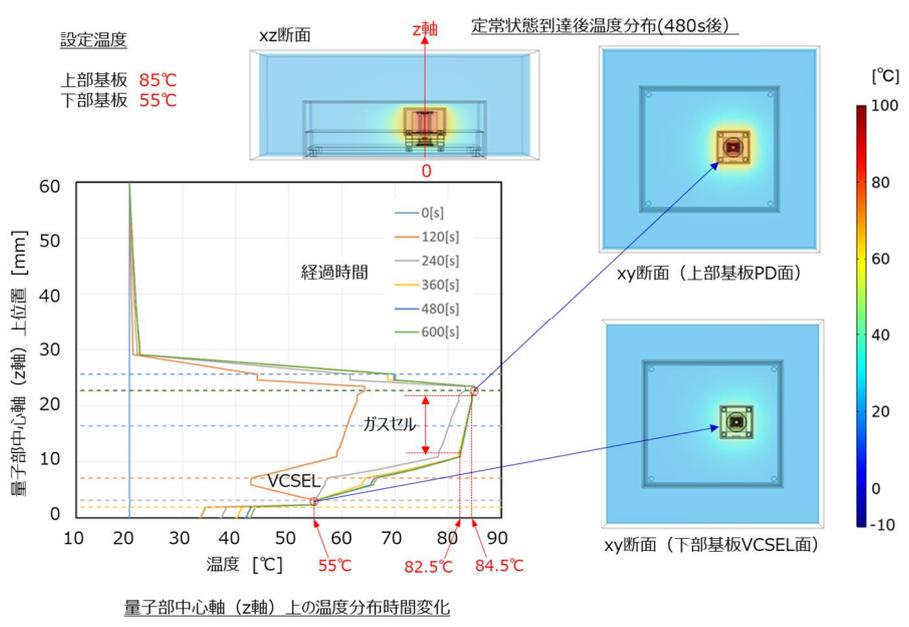
図(3)-1.12 実験室モデル量子部の伝熱解析モデル



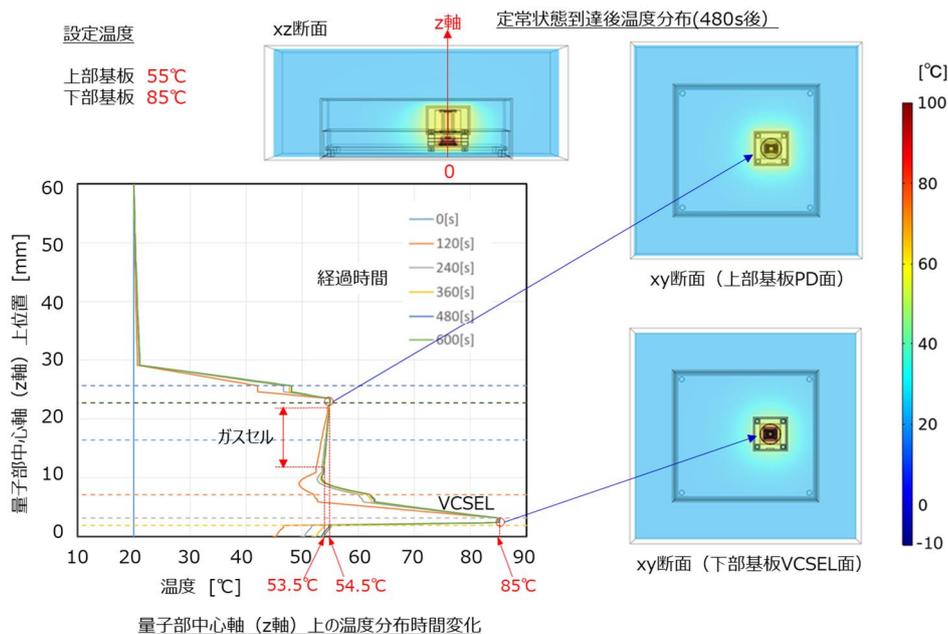
図(3)-1.13 実験室モデル量子部の主要構成部品の材質物性定義領域

表(3)-1.1 構成部品材料の物性値

項目	材料名													
	シリコン	ホウケイ酸ガラス	金	白金	ポリカーボネート	ポリイミド	ポリプロピレン	アルミナ	ニッケル	銅	窒化アルミニウム	パーマロイPC	窒素(10 kPa)	空気
質量密度 [g/cm ³]	2.32	2.51	19.30	21.45	1.2	1.47	0.9	3.9	8.9	8.96	3.3	8.8	0.0916	1.205
熱伝導率 [W/m/K]	163	1.1	313	72	0.19	0.16	0.12	30	90	396	160	35	0.0313	0.026
比熱 [J/kg/K]	703	830	130	134	1260	1093	1930	700	440	392	740	110	1042	1005



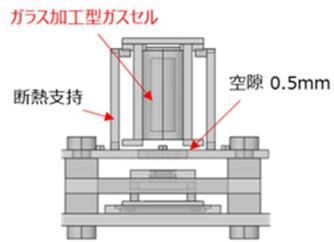
図(3)-1.14 実験室モデル量子部の伝熱解析結果 (上部基板 85°C、下部基板 55°C設定時の温度分布)



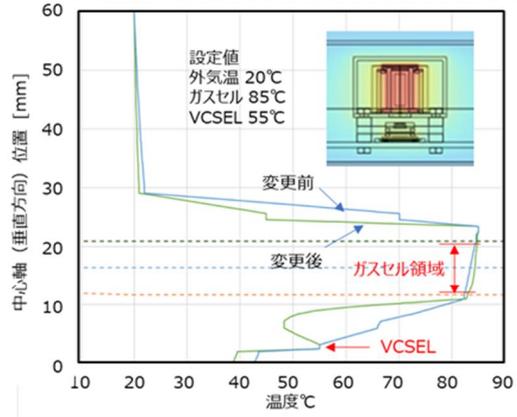
図(3)-1.15 実験室モデル量子部の伝熱解析結果（上部基板 55 °C、下部基板 85 °C設定時の温度分布）

図(3)-1.16に2次試作にて実施した支持構造変更前後のガラス加工型ガスセル組込み構成（上段）及びMEMSガスセル組込み構成（下段）での温度分布の解析結果を示す。各々外気温度20°Cで上部基板を85°C、下部基板を55°Cに設定し定常状態での温度分布を示している。グラフの縦軸は、量子部の中心を通る垂直軸（Z軸）上の位置を示し、量子部底面を原点としている。ガラス加工型ガスセル組込み構成では、グラフに示すガスセル領域の上下温度差は支持構造変更前が2K程度であるのに対し、変更後は1.5 K程度に低減されることがシミュレーションにより検証された。MEMSガスセル組込み構成では、変更後のガスセル支持位置を上方に移動させベースプレートとの空隙を4.5 mmとした。そのため、グラフに示すガスセル領域も変更前後でずれているが、その上下温度差は支持構造変更前が1 K程度であるのに対し変更後は、ほぼ0に低減されることがシミュレーションにより検証された。

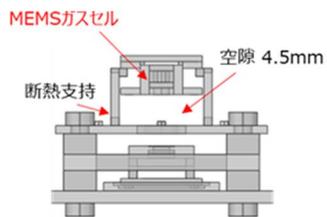
伝熱解析モデル（内部構造のみ表示）



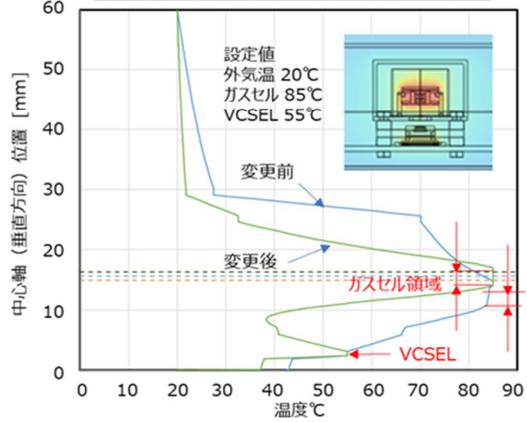
伝熱解析結果（定常状態での温度分布）



伝熱解析モデル（内部構造のみ表示）



伝熱解析結果（定常状態での温度分布）



図(3)-1.16 2次試作で実施した支持構造変更前後の温度分布解析結果
（上段：ガラス加工型ガスセル構成、下段：MEMS ガスセル構成）

実施項目(3) 量子部の試作及び評価

実施項目(3)-2 HS-ULPAC プロトタイプ真空断熱型量子部の試作(担当：一般財団法人マイクロマシンセンター)

本実施項目では、移動体搭載で要求される耐振動性と低消費電力化を実現する真空断熱型量子部を設計・試作する。まず、先行技術調査をもとに、量子部光学系のサイズ、共線性、組立性及び部品点数について比較検討を行い、光学系構成を選定した。次に、低消費電力化と高耐振性の両立を図るために、MEMS 微細加工技術を適用した独自構造の断熱支持基板及び実装面積の縮小に寄与する貫通配線構造を提案し、それを実現する作製プロセスを構築した。作製した断熱支持基板にて、ガラス加工型ガスセル及び実施項目(1)-2-②で作製した MEMS ガスセルを組込んだ量子部を試作し、量子部としての機能評価を行った。評価を通して抽出された課題に対し種々の改良を加え、プロトタイプモジュール搭載用に完成品を提供した。設計及び対策効果の検証には、伝熱・構造シミュレーションを適用した。詳細を以下に記述する。

(a)量子部光学系構成の先行技術調査と開発方針

表(3)-2.1 に文献調査を基に量子部光学系構成に関する先行技術の比較分析を行った結果を示す。表中に示す構成図では、1/4 波長板や ND フィルターなど光路変化に関与しない部品は省略している。各方式の得失は以下の通りである。

①直接方式^[1]

VCSEL から出射されるレーザ光の広がり角($20^{\circ} \sim 26^{\circ}$)を利用し、ガスセル内に広くレーザ光を通過させ、ガスセル上部に配置した PD で光強度を検出している。最低限の部品で構成されているため、組立性やサイズに優れるが、量子部に垂直方向に印加される磁場に対し、レーザ光の方向が一致しない(共線性が悪い)。共線性が検出精度及ぼす影響を見極める必要がある。

②コリメート方式^[2]

量子部に印加される磁場方向(垂直方向)と、レーザ光線の方向を一致させるため、コリメータレンズとして、ガスセル底面ガラスに形成されたにフレネルレンズを配置している。部品点数が増加し、VCSEL からガスセルまでの距離も増加するが、ガスセル内全領域にレーザ光線を均一に、共線性良く通過させることができる。

③拡大+コリメート方式^[3]

コリメート方式にレンズを追加してレーザ光の広がり角を拡大させることで、VCSEL からガスセルまでの距離を短縮している。部品点数が増加し、光学系の組立てに一定の精度が要求されるが、良好な共線性と小型化を両立させることができる。

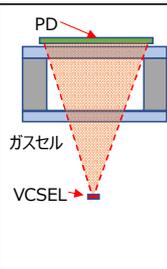
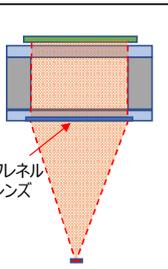
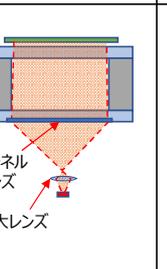
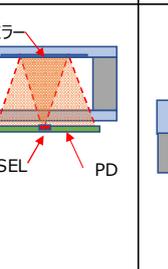
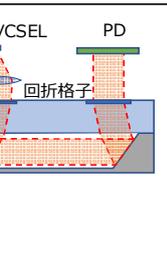
④反射方式^[4]

ガスセル上面にミラーを配置し、VCSEL から出射されるレーザ光をガスセル上面で反射させ、ガスセル底面側に配置された PD で光強度を検出している。光路が折り返されるため、サイズは最小となるが、ガスセル内でのレーザ光の共線性や均質性が悪く、レーザ光の干渉なども検出精度を悪化させる要因となる。

⑤回折+反射方式^[5]

光路にコリメータレンズ、回折格子を配置し、ガスセル側面の反射でレーザビーム水平方向に通過させる構成である。ガスセルの反射面は、Si 基板を異方性エッチングで掘り込むことで形成しているため、傾斜角が 45° ではなく、結晶面(111)の方位 54.74° となる。そのため、入射光を垂直方向から僅かに傾ける必要があり、ガスセル上面には回折格子が形成されている。部品点数が多く、光学系の調整に一定の精度が要求されるなど、組立の難易度は高いものとなっている。

表(3)-2.1 量子部光学系構成 先行技術の比較

方式	①直接方式	②コリメート方式	③拡大+コリメート方式	④反射方式	⑤回折+反射方式
構成	 PD ガスセル VCSEL	 フレネル レンズ	 フレネル レンズ 拡大レンズ	 ミラー VCSEL PD	 VCSEL PD 回折格子
	VCSELの射出角(20°~26°)を直接利用	ガスセル底面にコリメータレンズを配置し、レーザービームを平行光線化	光路中にレンズを配置しレーザービームを拡大することで光路長を短縮	ガスセル上面にミラーを配置し、レーザービームをガスセル内で2度通過させる	コリメータレンズ、回折格子を配置し、ガスセル側面の反射でレーザービーム横方向に通過させる
サイズ	○	△	○	◎	×
共線性 (均質性)	△	◎	◎	×	○
組立性	◎	◎	△	△	×
部品点数	◎	○	○	△	×

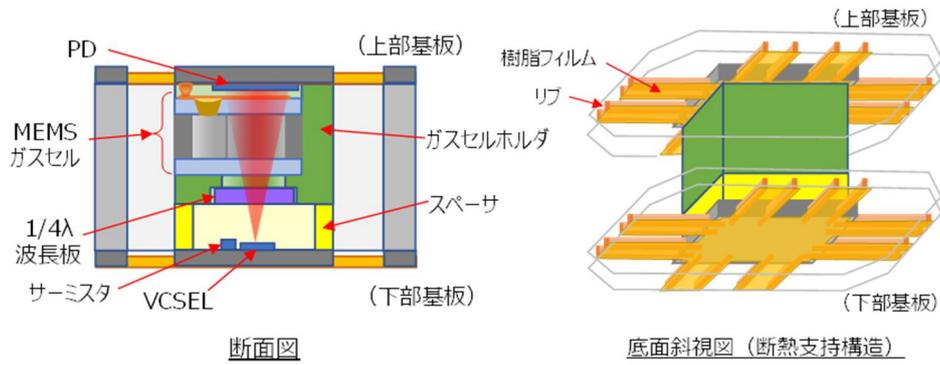
先行技術調査をもとに、量子部光学系のサイズ、共線性、組立性及び部品点数について比較検討を行い、開発試作する光学系構成を選定した。開発の目的である低消費電力化と高耐振性の両立を図るためには、熱容量及び質量を極力抑える必要があり、そのためには部品点数が少なく小型化が容易な直接方式にて試作を進めることとした。

ガスセル内のアルカリ金属の蒸気圧を所定値に維持させるため、ガスセルの温度はヒータにて周辺環境よりも高い値で制御する必要がある。また、VCSELにおいても所定の波長のレーザー光を射出するためにはヒータによる温度制御が必要となる。各ヒータでの消費電力を低減するためには、量子部を断熱材で支持する必要があり、先行技術では、量子部を樹脂フィルムで吊り下げる構成が実用化されている^[1]。移動体への搭載など高い耐振性が要求される用途では、支持構造により高い強度が必要となることから、断熱性と強度が両立する独自の断熱支持構造を考案した。

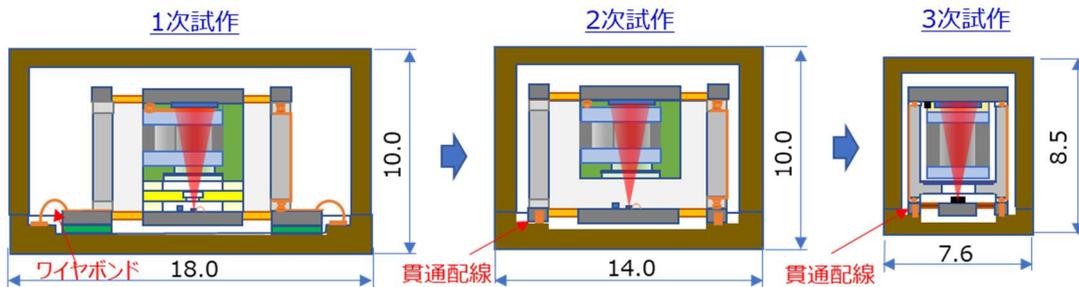
図(3)-2.1に真空断熱型量子部の基本構成と新規考案した断熱支持構造を示す。断面図に示す通り、下部基板に搭載したVCSELからレーザー光が上方に射出される。スペーサを挟んで、MEMSガスセルと1/4波長板を内蔵するガスセルホルダを配置することで、レーザー光は1/4波長板、ガスセルを通過し、上部基板に搭載したフォトダイオード(PD)に達する。下部基板と上部基板は各々断熱支持され伝熱による熱の流出を抑制している。

断熱支持構造については、底面斜視図に示す通り量子部の下面と上面を樹脂フィルムにて支持する構成は従来技術と同様であるが、フィルムの曲げ剛性を高める補強材としてフィルム面に対して垂直方向にリブを形成することとした。

図(3)-2.2に真空断熱型量子部の開発ステップと概略構成を示す。まず、1次試作では、考案した断熱支持構造の試作を通してその作製プロセスの確立を行う。量子部本体は、基準となるガラス加工型ガスセルの搭載も可能とするため余裕を持ったサイズとしている。2次試作では、小型化の実現に不可欠な貫通配線を採用することとし、その作製プロセスの確立を行う。量子部本体は1次試作と同等な構成とし、ガラス加工型ガスセルの搭載も可能としている。3次試作では、実施項目(1)-2-②で開発する小型MEMSガスセルの搭載を前提とし、1次試作で確立した断熱支持構造、2次試作で確立した貫通配線の各作製プロセスを適用し最小サイズの量子部を作製するとともに目標とする低消費電力化(100 mW以下)を実現する。



図(3)-2.1 真空断熱型量子部の基本構成と断熱支持構造（新規考案構造）



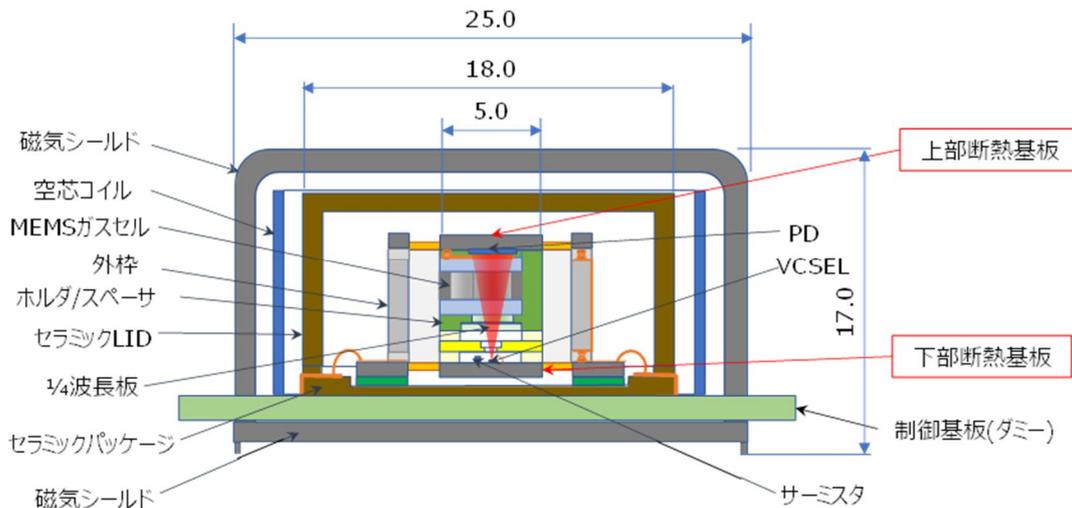
図(3)-2.2 真空断熱型量子部の開発ステップと概略構成

(b) 量子部構造の設計・試作

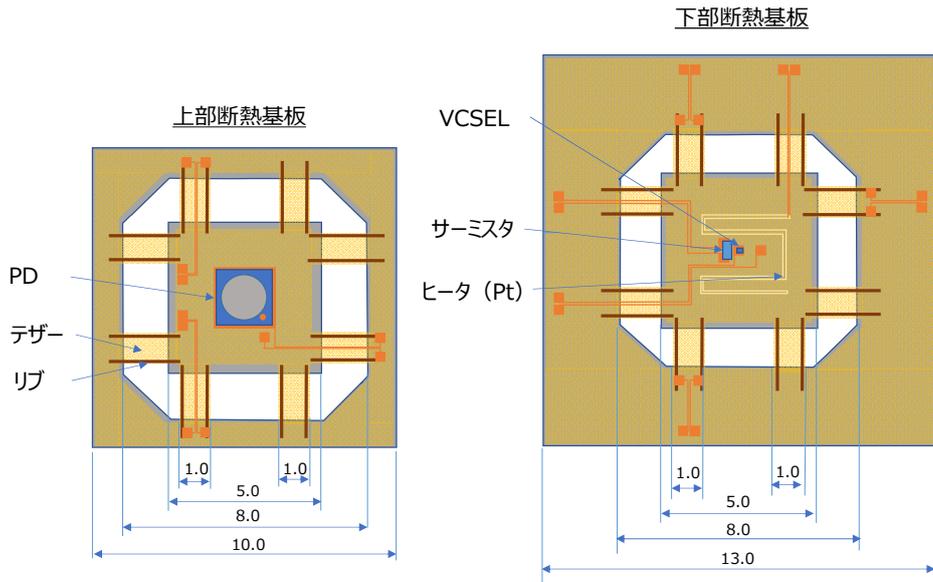
(b)-1 1次試作（断熱支持構造）

図(3)-2.3に真空断熱型量子部の1次試作構造を示す。光学系の構成は前項で示した通りであり、量子部本体は、リブ付樹脂フィルム（テザー）を形成した上部/下部断熱基板で挟み込む形で支持され、セラミックパッケージに実装される。セラミックパッケージはセラミックLIDにて真空封止されることで、量子部本体から空気を伝わり流出する熱を遮断する。パッケージ外周には、磁場を印加する空芯コイルが配置され、さらに外部磁場を遮蔽する磁気シールドにて底面を含め全周カバーされている。

図(3)-2.4に上部/下部断熱支持基板の構造を示す。上部断熱基板には、レーザ光を検出するPDが実装され、さらにMEMSガスセル上のヒータ、サーミスタに接続するためのパッドとテザー上を通過する配線が形成される。下部断熱基板には、中心部に実装されたVCSELを適正温度に昇温するための薄膜ヒータが形成され、さらに温度検出用のサーミスタが実装される。



図(3)-2.3 真空断熱量子部の1次試作構造



図(3)-2.4 上部/下部断熱支持基板の構造

上部/下部断熱支持基板には、VCSEL、サーミスタ、PDの搭載、それら各パーツへの配線及びヒータなど精密・微細な加工が要求される。そのため、断熱基板の製造には、フォトリソグラフィによるMEMS微細加工技術を適用することとした。図(3)-2.5に断熱支持基板の外観とその作製プロセスを示す。フォトリソグラフィでの加工を考慮し、基板にはSi、樹脂フィルムには感光性ポリイミドを使用した。プロセスの概要は以下の通りである。

- 工程①：断熱基板作製用に Si 基板（厚さ 0.725 mm）を準備
- 工程②：Si 基板にリブの型となる溝をドライエッチングにて形成
- 工程③：溝にリブとなるポリイミドを充填
- 工程④：表面に感光性ポリイミドを塗布、
- 工程⑤：表面のポリイミドにテザー形状をパターンニング
- 工程⑥：配線/パッド、及びヒータを形成
- 工程⑦：テザー部 Si を裏面よりドライエッチングにて除去し基板を分離

工程	処理内容	
①	Si 基板	
②	リブ溝形成 ドライエッチング	
③	樹脂充填 (ポリイミド)	
④	感光性ポリイミド 塗布	
⑤	支持フィルム形状 パターンニング	
⑥	配線形成 (ヒータなど)	
⑦	基板分離 Siドライエッチング	

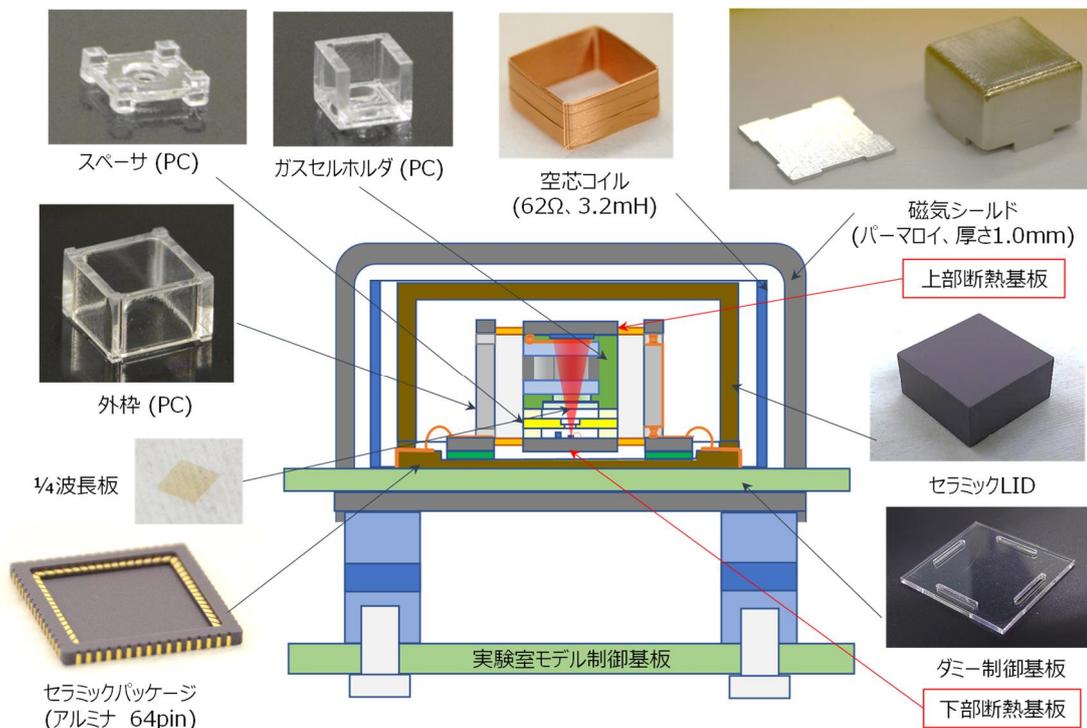
図(3)-2.5 断熱支持基板の外観と作製プロセス

図(3)-2.6に真空断熱型量子部の1次試作を構成する部品を示す。MEMSガスセル、上部/下部断熱基板以外の各部品は、設計方針に従い設計・試作し、いずれも要求仕様を満たす仕上がりであることを確認した。

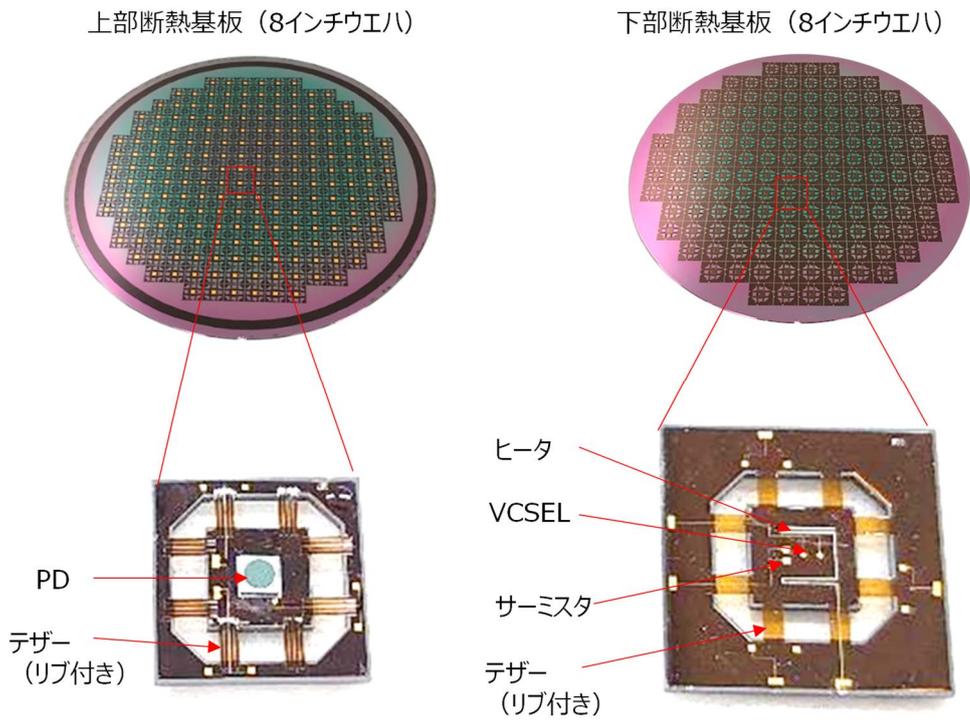
図(3)-2.7に試作した上部/下部断熱支持基板のウエハ外観を示す。8インチSiウエハ上にヒータ、配線/パッドをフォトリソグラフィにより形成した後、量子部本体を搭載する中央部とパッケージに実装する外周部との間をテザーで繋がった状態で分離したものである。ヒータの材質は白金(Pt)、厚さ0.18 μm 、幅20 μm で、抵抗値は実測値で1.4 k Ω となった。VCSEL、PD、サーミスタは、はんだリフローにより基板に実装し、アノード電極はAuワイヤボンドにより基板パッドに接続した。

図(3)-2.8に作製した断熱支持基板の外観及びテザー部拡大を示す。テザーには4本のリブが良好に形成され、電気的特性も要求仕様を満たすものとなった。

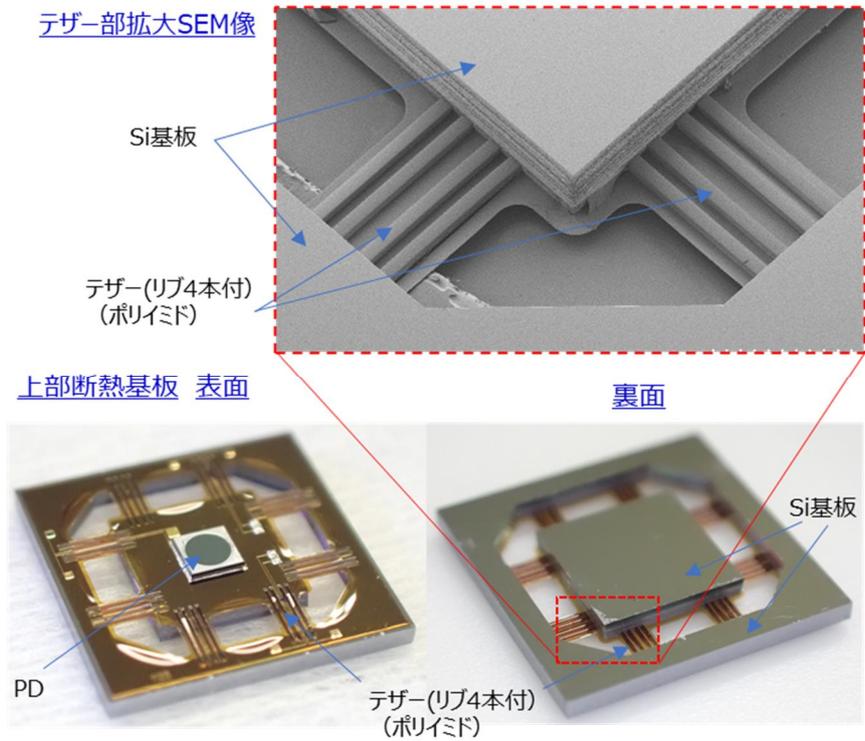
続けて、作製した上部/下部断熱支持基板とMEMSガスセル1次試作(Type 2)を組み込み真空断熱型量子部の試作を行った。図(3)-2.9に完成した真空断熱型量子部1次試作品の内部構造とCs吸収線測定結果を示す。量子部本体は断熱支持基板上で上下から支持された構造で、透明な外枠を通してMEMSガスセルが組み込まれていることが確認でき、構想通りの仕上がりとなっている。また、本試作品にてCs吸収線も観測され、量子部としての基本機能を有していることを確認した。



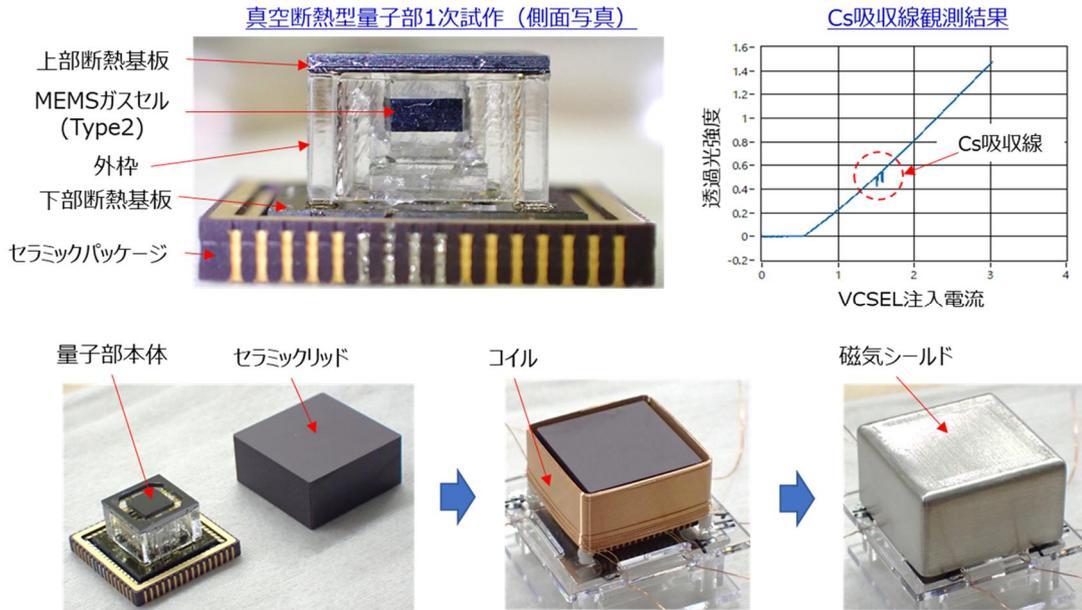
図(3)-2.6 真空断熱型量子部 1次試作を構成する部品



図(3)-2.7 上部/下部断熱支持基板のウエハ及び個片の外観



図(3)-2.8 断熱支持基板の外観及びテザー部拡大

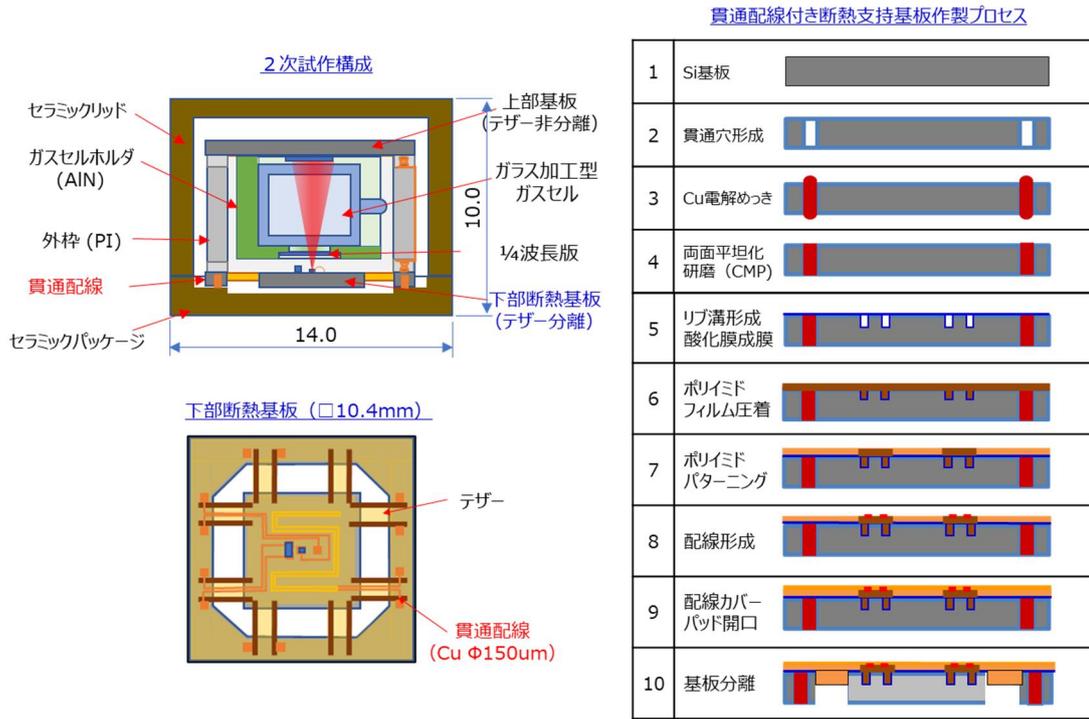


図(3)-2.9 真空断熱型量子部 1次試完成品内部構造と Cs 吸収線測定結果

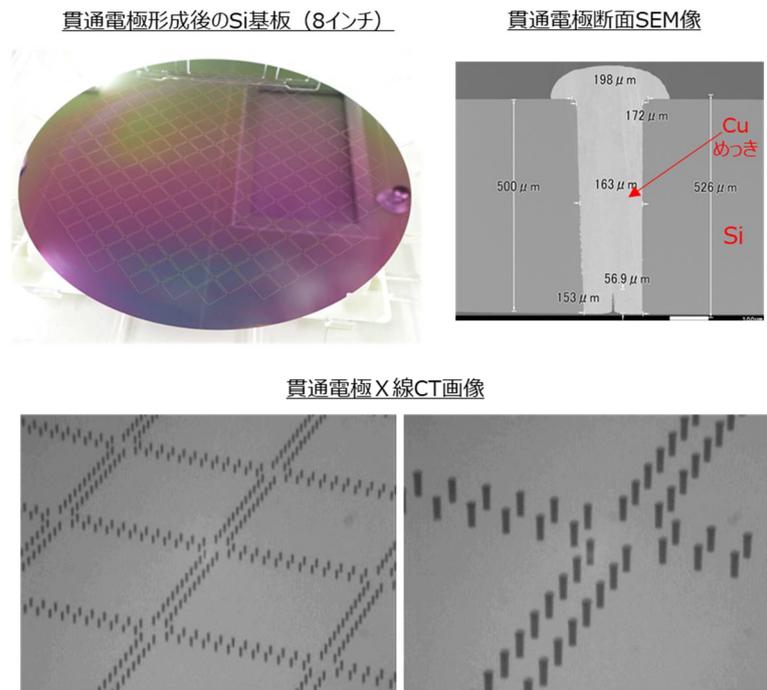
(b)-2 2次試作（貫通配線構造）

2次試作では、量子部本体構成はそのままに、下部断熱基板とセラミックパッケージとの配線をワイヤボンドから貫通配電に変更することにより小型化を図った。

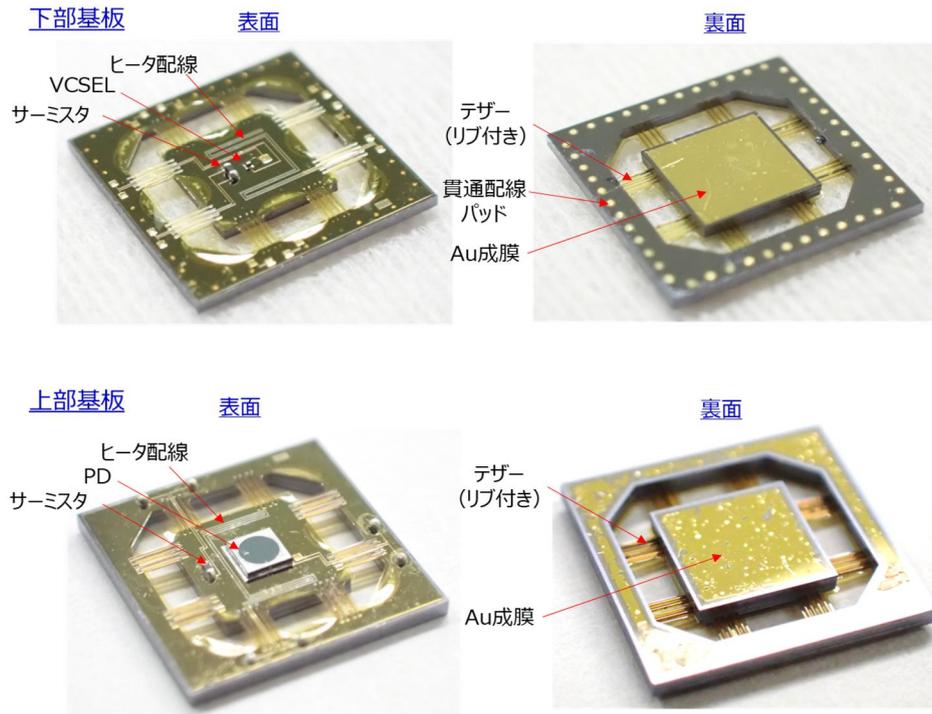
図(3)-2.10に2次試作構成と貫通配線付き断熱支持基板の基本作製プロセスを示す。まず、Si基板に深掘りエッチング装置にて貫通穴を形成する（工程2）。次に、基板表面及び貫通穴側面に酸化絶縁膜を成膜した後、銅(Cu)電解めっきにて貫通穴にCuを埋め込み貫通電極を形成する（工程3）。その後、基板両面をCMP装置にて平坦化研磨することで貫通電極付きSi基板が完成する（工程4）。それ以降のプロセス（工程5～10）は、1次試作にて確立した断熱支持基板作製プロセスを踏襲した。図(3)-2.11に試作した貫通電極形成ウエハの観察画像を示す。貫通電極は、断熱支持基板チップ（サイズ10.4×10.4 mm）の外周部4辺に0.75 mmピッチで1チップあたり48個形成されている。ウエハ外観写真（左上写真）に示す通り、8インチウエハにて208チップ分の貫通電極が形成されており、その断面SEM像（右上写真）から、厚さ500 μm程度のSi基板に直径160 μm程度でCuが隙間なく充填された貫通電極が形成されていることを確認した。さらに、貫通電極のX線CT画像（下段写真）から、貫通電極が欠如することなく、歩留まり良く作製できていることも確認した。図(3)-2.12に試作した貫通電極付きSiウエハにて作製した断熱支持基板の外観を示す。下部基板（上段写真）の外周には表面と裏面に貫通電極に接続するパッドが形成されている。表面パッドに接続された各部品からの電気入出力は裏面パッドに伝わり、この裏面パッドがセラミックパッケージに直接はんだ接続される。上部基板、下部基板ともにポリイミド製のリブ付きテザーで量子部本体を断熱支持する構造は1次試作と同様であるが、2次試作では、輻射による熱流出の抑制効果を期待して、各基板の裏面に放射率が低い金(Au)を成膜している。



図(3)-2.10 2次試作構成と貫通配線付き断熱支持基板の基本作製プロセス



図(3)-2.11 貫通電極形成ウエハの観察結果

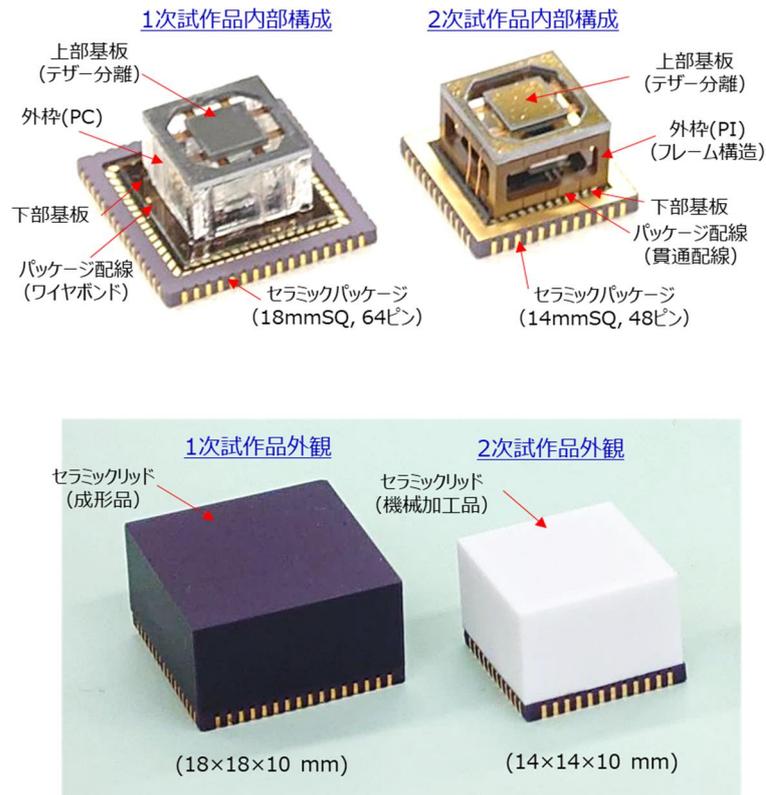


図(3)-2.12 貫通配線付き断熱支持基板の外観

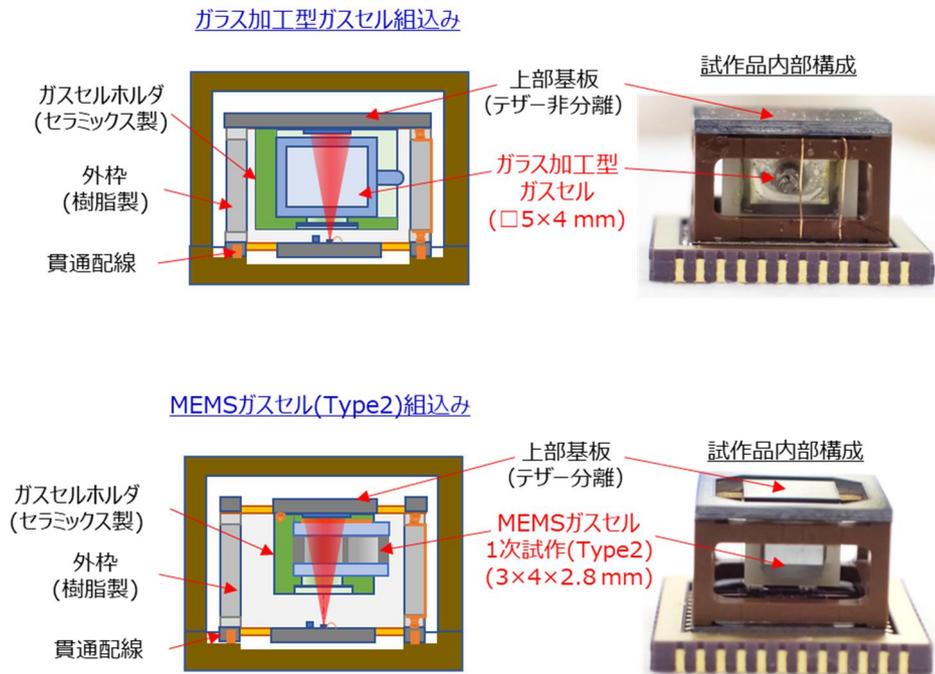
図(3)-2.13に作製した貫通配線付き断熱支持基板を組込んだ真空断熱型量子部2次試作品の内部構成と外観を1次試作品と対比して示す。1次試作、2次試作ともテザーで支持される量子部本体（中央部）は共通であるが、2次試作では貫通配線を採用したため、1次試作の下部基板外周部に形成されたワイヤボンダ用パッドが不要となり、より小型のパッケージへの実装が可能となった。上下の断熱支持基板をつなぐ外枠は、パッケージの真空封止工程での加熱による変形や脱ガスを抑制するため、材質をポリカーボネート(PC)からより耐熱性の高いポリイミド(PI)に変更した。形状も面構造からフレーム構造に変更することで上部基板の断熱性を高めている。パッケージサイズは下段写真に示す通り、2次試作で $14 \times 14 \times 10$ mmとなり、1次試作($18 \times 18 \times 10$ mm)と比較して設置面積で約60%まで小型化を実現した。

図(3)-2.14に作製した真空断熱型量子部2次試作品の内部構成を示す。上段は基準データ測定用にガラス加工型ガスセルを組込んだ構成であり、下段はMEMSガスセル(Type 2)を組込んだ構成である。なお、ガラス加工型ガスセルはサイズが大きいため、上部支持基板にテザーが形成された基板を使用することができず、テザー形成前の非分離基板を使用している。

図(3)-2.15にプロトタイプモジュール4次制御基板搭載用に提供した真空断熱型量子部2次試作完成品を示す。ガラス加工型ガスセル組込品（左側）及びMEMSガスセル(Type 2)組込品（右側）ともに問題なく作製することができ、レーザ強度測定結果からCs吸収線も正常に観察されることを確認した。



図(3)-2.13 真空断熱型量子部 2次試作の内部構成と外観 (1次試作対比)



図(3)-2.14 真空断熱型量子部 2次試作の内部構成

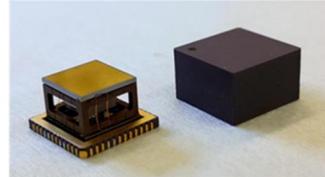
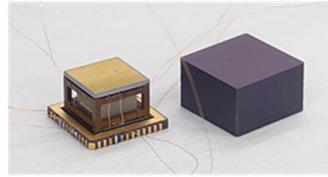
真空断熱型#10

ガラス加工型ガスセル
(221011-6)、 $\square 5 \times 4 \text{mm}$
28.4%Ar-N₂: 6kPa

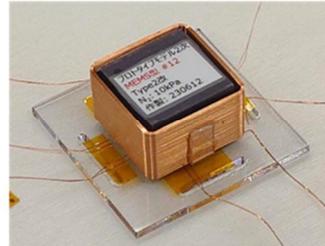
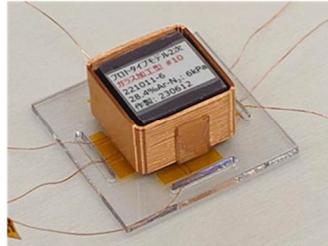
内部構成

真空断熱型#12

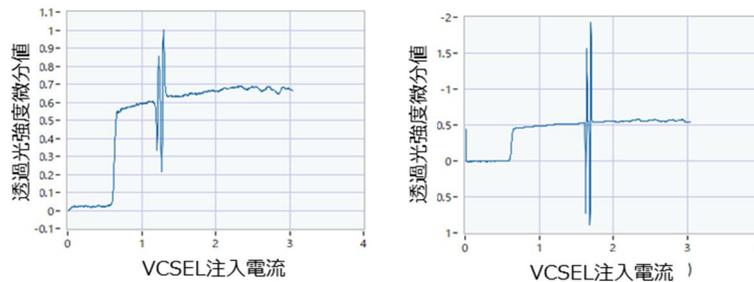
MEMS型ガスセル
(Type2改)
N₂: 10kPa



2次試作完成品



Cs吸収線確認実験結果

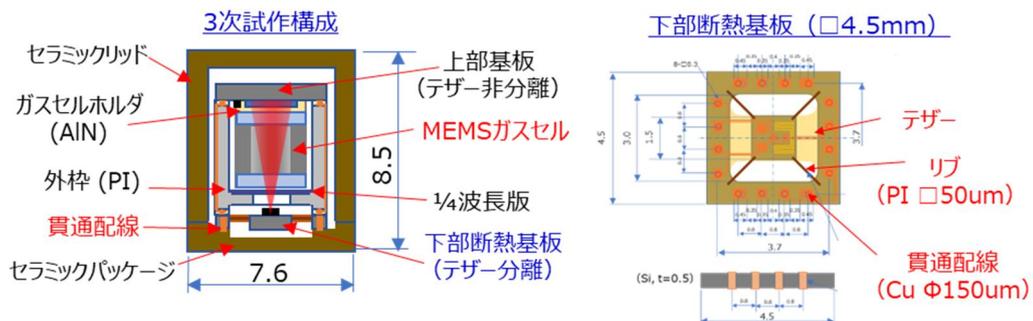


図(3)-2.15 真空断熱型量子部2次試作完成品とCs吸収線測定結果
(プロトタイプモジュール4次制御基板搭載用に提供)

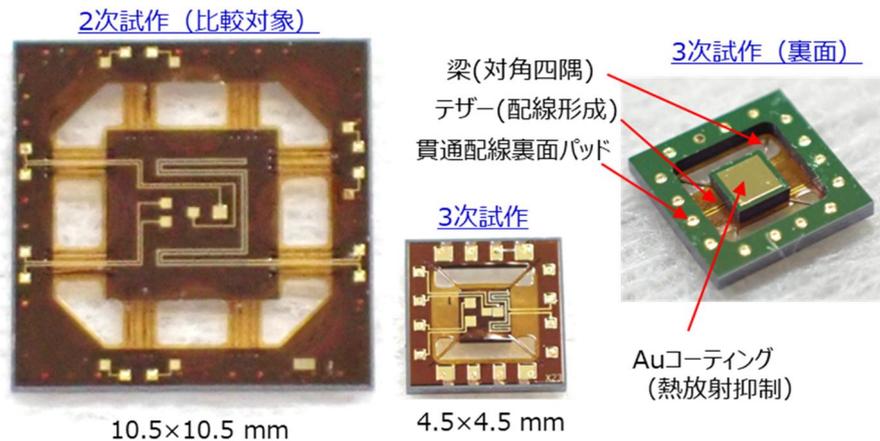
(b)-3 3次試作 (小型・低消費電力化)

図(3)-2.16に3次試作構成と貫通配線付き断熱支持基板の配置図を示す。3次試作では、実施項目(1)-2-②で開発する最小サイズのMEMSガスセル2次試作(Type 1)の搭載を前提として、小型化による低消費電力化を目的に開発した。断熱支持基板は、前試作までに開発したテザー構造及び貫通配線の形成技術を適用した。

図(3)-2.17に作製した3次試作断熱支持基板を2次試作比較して示す。基板面積は1/4以下となり大幅に縮小している。貫通配線は基板外周4辺に各4個(計16個)形成され、表面と裏面に電極パッドが形成されている。基板中央部にはVCSEL、サーミスタを実装するパッド及びヒータ配線が形成され、テザー上の配線により外周部と接続している。基板中央部は外周部との間に形成された対角位置のリブ4本により断熱支持されている。また、加熱される基板中央部の裏面には、輻射による熱流出抑制のため熱放射率が低い金(Au)を成膜している。



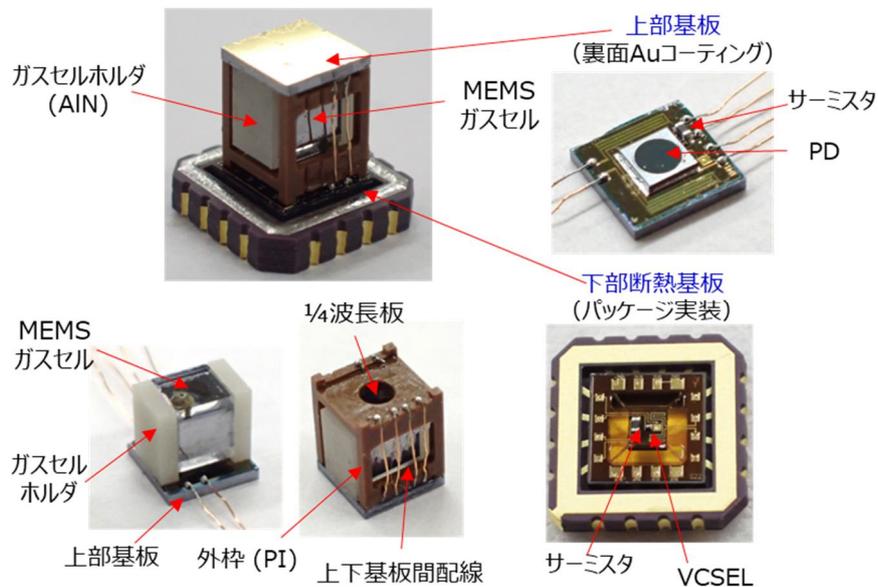
図(3)-2.16 3次試作構成と貫通配線付き断熱支持基板配置図



図(3)-2.17 作製した3次試作断熱支持基板(2次試作との対比)

図(3)-2.18に作製した貫通配線付き断熱支持基板を組込んだ真空断熱型量子部3次試作品を示す。上部基板には、ヒータ温度検出用サーミスタ及びレーザ光検出用PDを搭載した。上部基板のヒータ部はガスセルホルダを介してMEMSガスセルに接続され、上部基板からの熱伝導によりガスセル温度が制御される。下部断熱基板には、先述の通りテザー及びリブにより断熱支持された基板中央部にVCSEL及びその温度制御のためのヒータ温度検出用サーミスタを搭載した。この上部基板をポリイミド製の外枠により下部断熱基板の外周部に固定し、上部基板からの配線は外枠側面を通して下部断熱基板の貫通配線パッドにはんだ接合した。これにより量子部本体は下部断熱基板上に搭載された状態となり、下部断熱基板を裏面の貫通配線パッドとセラミックパッケージ端子とをはんだ接合することでパッケージ実装を実施した。なお、上部基板裏面にも輻射による熱流出抑制のやめ熱放射率が低い金(Au)を成膜している。

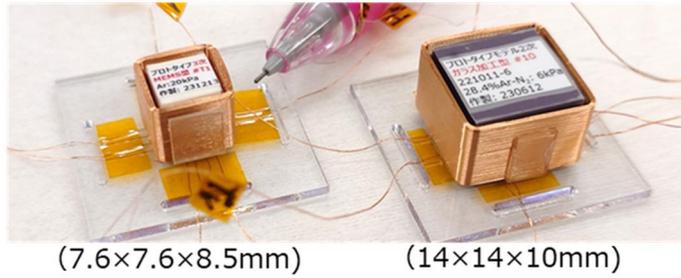
図(3)-2.19に真空断熱型量子部3次試作の完成品を2次試作品と比較して示す。完成品の構成は、図に示す通り、パッケージ実装された量子部にセラミックリッドを接合し、その外周部に空芯コイルを取り付けた構造となる。リッドを含めたパッケージサイズは3次試作で7.6×7.6×8.5 mmであり、2次試作(14×14×10 mm)と比較して設置面積で約30%まで小型化を実現した。作製した3次試作品にて動作確認を実施した結果、VCSEL、ガスセルの温度制御及び下段に示すVCSEL注入電流とPDで検出される透過光強度の関係など基本動作は正常であるが、量子部として不可欠な機能である明確なCs吸収線の存在が観測されないなどMEMSガスセル2次試作(Type1)に起因する課題が残った。



図(3)-2.18 真空断熱型量子部3次試作の内部構成

3次試作完成品

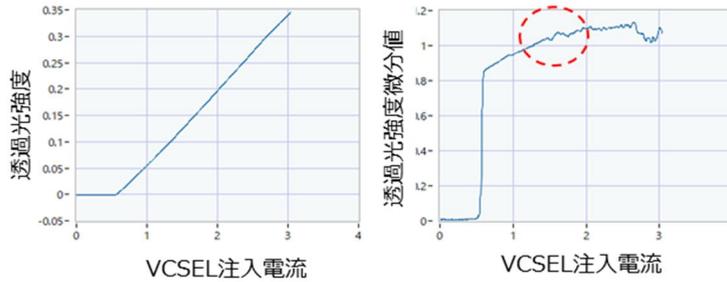
2次試作品 (比較対象)



(7.6×7.6×8.5mm)

(14×14×10mm)

Cs吸収線確認実験結果

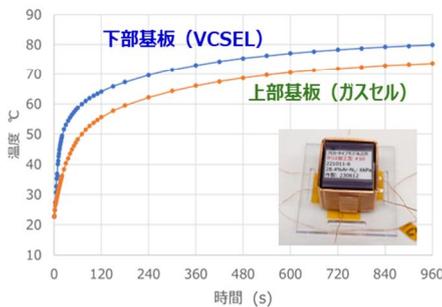


図(3)-2.19 真空断熱型量子部 3次試作完成品

図(3)-2.20 に 2 次試作及び 3 次試作完成品での昇温特性測定結果を示す。量子部単体にて温度制御なしの状態での評価であるため、外気温度 20℃の環境で上部基板温度 73℃、下部基板温度 80℃で定常温度となるように各ヒータに電圧を印加し、各基板温度の時間変化をプロットした。2 次試作品と比較して 3 次試作品は小型で熱容量が小さいため温度上昇は早く定常状態での消費電力も小さくなる傾向が見られた。定常状態での消費電力は 2 次試作品で 384 mW に対し、3 次試作品では 180 mW と低減した。これらの結果は、パッケージ内の真空封止が未達状態での値であり、目標値（量子部単体で 100 mW 以下）の達成のためには真空封止による断熱性向上が必須となる。

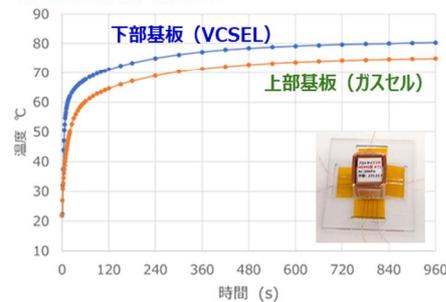
2次試作品 (真空封止未達)

- ・下部基板 (VCSEL温度制御)
印加電圧: 5.4V、ヒータ抵抗: 429Ω → 消費電力68mW
 - ・上部基板 (ガスセル温度制御)
印加電圧: 12.0V、ヒータ抵抗: 456Ω → 消費電力316mW
- ⇒合計消費電力: 384mW



3次試作品 (真空封止未達)

- ・下部基板 (VCSEL温度制御)
印加電圧: 2.15V、ヒータ抵抗: 226Ω → 消費電力20mW
 - ・上部基板 (ガスセル温度制御)
印加電圧: 7.2V、ヒータ抵抗: 322Ω → 消費電力160mW
- ⇒合計消費電力: 180mW

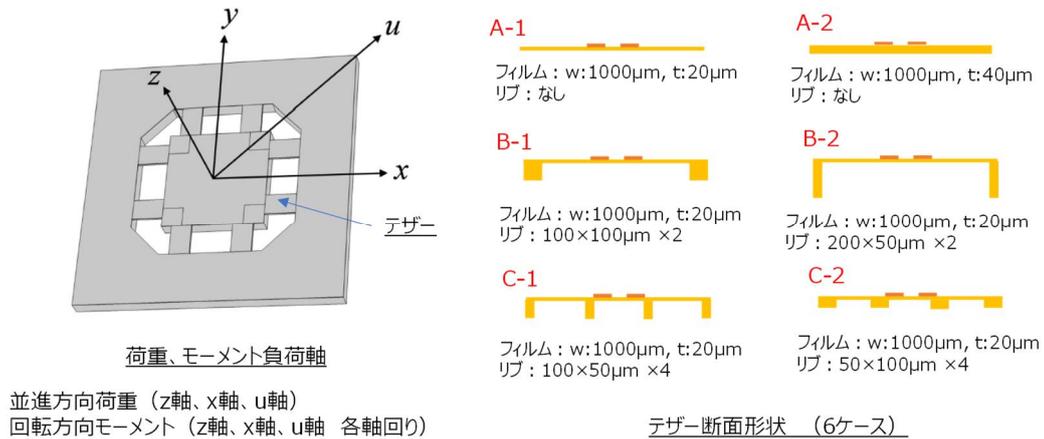


図(3)-2.20 2次試作及び3次試作完成品での温度特性測定結果

真空封止を阻害する原因として、封止部のはんだ接合の工程でパッケージ全体が高温(280℃)に加熱され、パッケージ内部の構成部品や接着剤などから脱ガスが生じていることが考えられる。現状、封止時温度の低温化を図ることで 3 次試作において消費電力は 148 mW まで低減したが、まだ十分な真空度は得られていないと考えられる。解決策として、真空封止工程の更なる低温化、ゲッター材の適正化などが必要となる。なお、実際の稼働時は、上部基板温度は 60℃程度、下部基板温度は 70℃程度であり、この条件では、消費電力は 100 mW となり目標値を達成している。

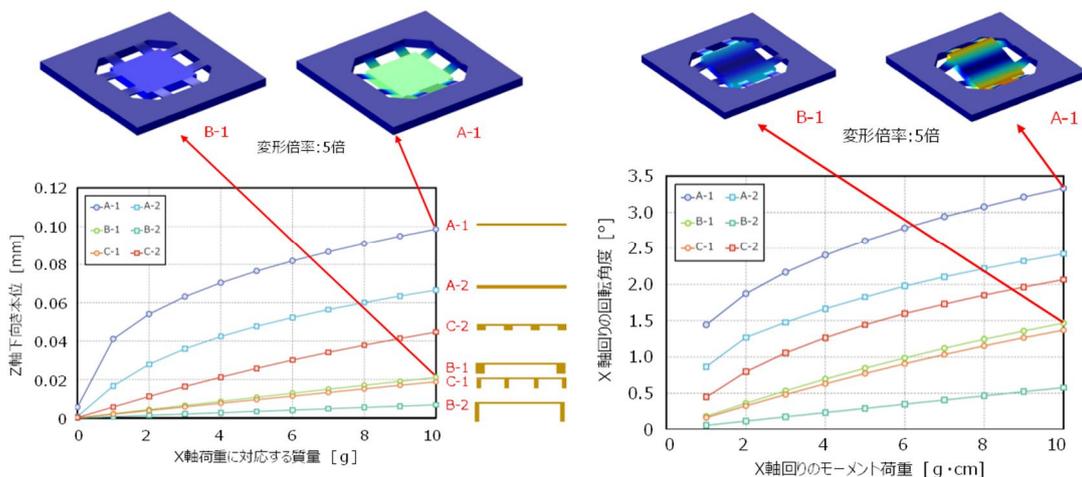
(c) 伝熱・構造シミュレーションによる検証

今回の開発試作では、テザーにリブ構造を付与することで支持剛性を高めることを特長としており、その断熱性に及ぼす影響を伝熱・構造シミュレーションにより検討した。図(3)-2.21に断熱支持基板の解析モデルを示す。テザー断面構造は図右側に示す6通りとし、その断面積は、A-1以外は同一となるように設定した。境界条件として、伝熱解析では外周部の温度を20℃一定とし、構造解析では外周図を固定端としている。構成材料として、基板はシリコン(Si)、テザー部はポリイミド(PI)とした。



図(3)-2.21 断熱支持基板の解析モデル

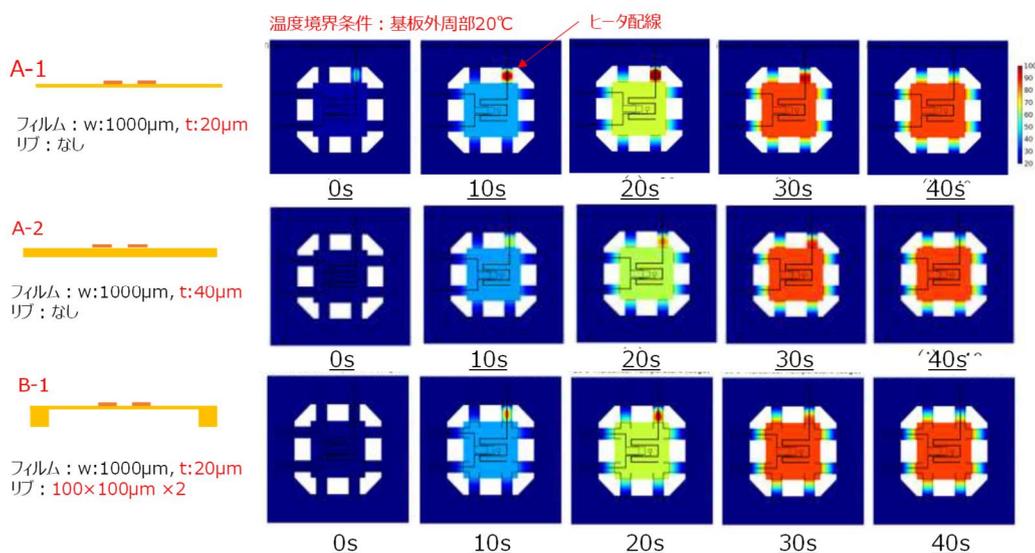
図(3)-2.22 (右側)に鉛直方向(Z軸)荷重を加えた時の変位、(左側)にモーメント(X軸回り)荷重を加えた時の回転変位を各々示す。各種テザー形状により変形量は異なり、リブ高さが大きい(断面二次モーメントが大きい)構造ほど変形量は小さくなる傾向が示された。鉛直方向の荷重条件より、フィルム厚さが同一(20 μm)の場合、リブ無し(A-1)と比較して、高さ100 μmのリブ有り(B-1)、(C-1)では、約5倍の剛性が得られ、断面積が同一のリブ無し(A-2)と比較しても約3.3倍の剛性が得られリブの有効性が確認された。モーメント荷重条件より、リブ無し(A-1)と比較して、高さ100 μmのリブ有り(B-1)、(C-1)では、約2.2倍の剛性が得られ、鉛直方向の変位抑制効果よりは少ないものの回転変位でもリブの有効性が確認された。



図(3)-2.22 鉛直方向荷重、モーメント印加時のテザー変位(解析結果)

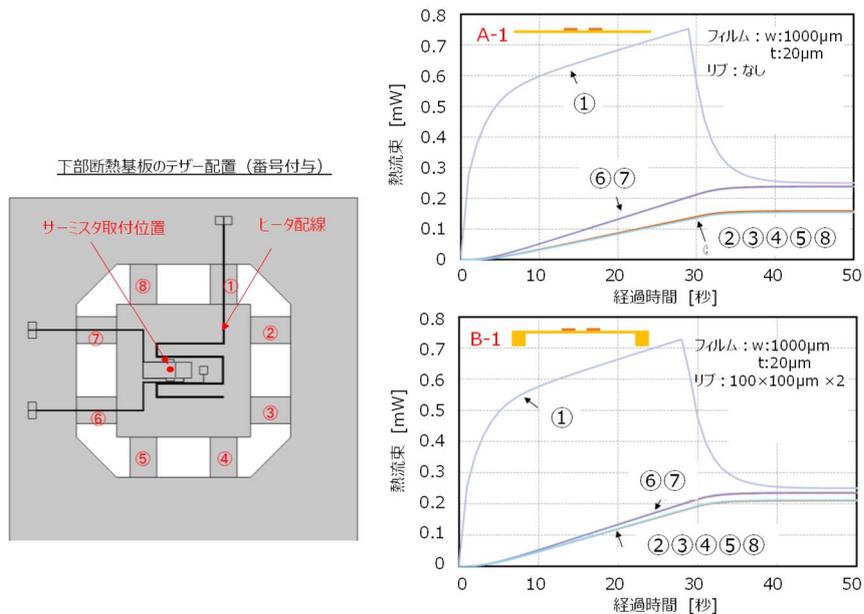
図(3)-2.23に断熱支持基板の温度分布の時間変化の解析結果を示す。温度制御は、サーミスタ取り付け位置の温度が設定値85℃以下ではヒータ電流10 mAをON、設定値を超えるとOFFにするON/OFF制御とした。解析結果から、各種テザー形状において昇温過程で大きな差異は見られず、テザーで支えられた基板中央部が約30秒で設定値85℃の均一温度となる。この時、基板外周部は初期設定値20℃を保持しており、テザーによる高い断熱性が示された。なお、昇温途中の

10秒、20秒の時点で、ヒータ配線が通るテザー（右上）で、局所的な高温部が見られるが、これは、ヒータ配線直下のフィルムの高い断熱性のため熱の拡散が遅いことが原因である。最高温度は、テザー形状B-1で120℃に達しており、配線の劣化が懸念される。実際の温度制御では、立ち上げ時の電流プロファイルの適正化が必要となる。



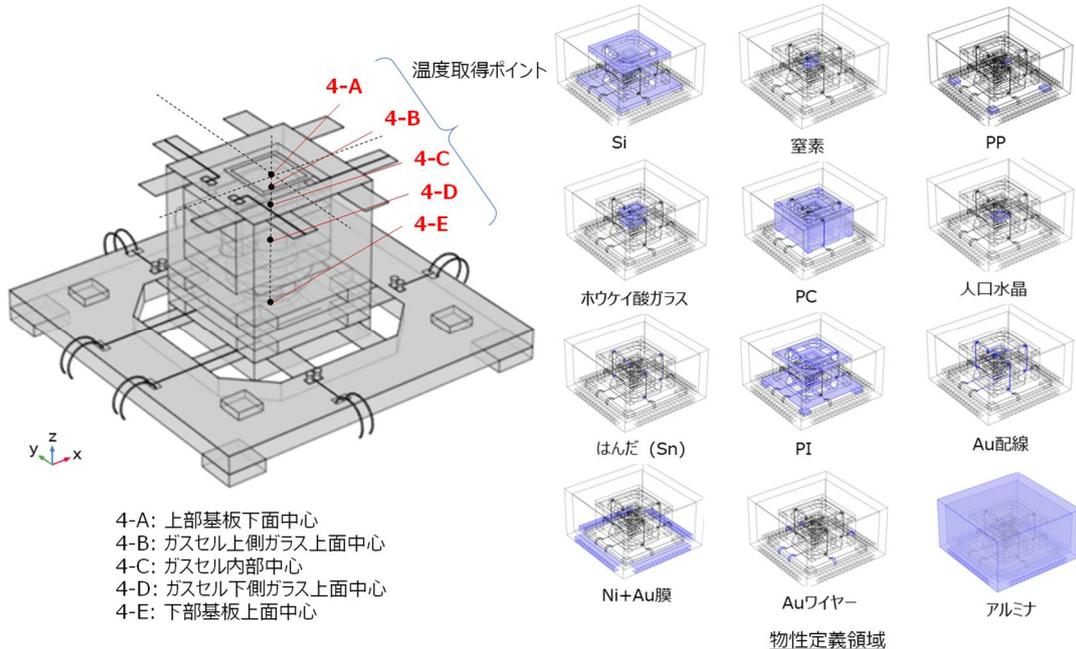
図(3)-2.23 断熱支持基板の温度分布の時間変化（解析結果）

次に、テザー断面形状による断熱性能の差異を詳細に検討するため、テザーから流出する熱流束を解析した。図(3)-2.24に断熱基板を構成する8本の各テザーから流出する熱流束の時間変化の解析結果を示す。図左側に示す通り、各テザーに番号を付与し、ヒータ配線が通るテザーを①、VCSEL、サーミスタにつながる配線が通るテザーを⑥⑦、配線が通らないテザーを②③④⑤⑧とした。図右側のグラフから、設定値85℃に達する時間（約28秒）までは流出する熱流束は増加し、設定値に達した後は定常状態に収束している。特にテザー①はヒータ配線が通るため大きな変化が見られるが、定常状態では他の配線が通るテザー⑥⑦と同等な値に収束している。配線が通らないテザーから流出する熱流束には、テザー断面形状の差異が認められ、断面積の小さい形状A-1（図右上）の方が、リブ付きで断面積が2倍となった形状B-1よりも流出量は少なくなっている。配線が通るテザーでは、両者の差異は小さくなることから、配線から流出する熱流束が支配的となると推定される。本解析結果から、定常状態で8本のテザーから流出する熱流束の合計は、リブ無しの形状A-1で1.5 mW、リブ付きの形状B-1で1.8 mWとなる。リブを付けることで断熱性は約20%低下しているが、リブによる変位抑制効果の方が大きく（鉛直方向変位で約1/5）、リブ構造を採用することの妥当性が裏づけられた。



図(3)-2.24 各テザーから流出する熱流束の時間変化（解析結果）

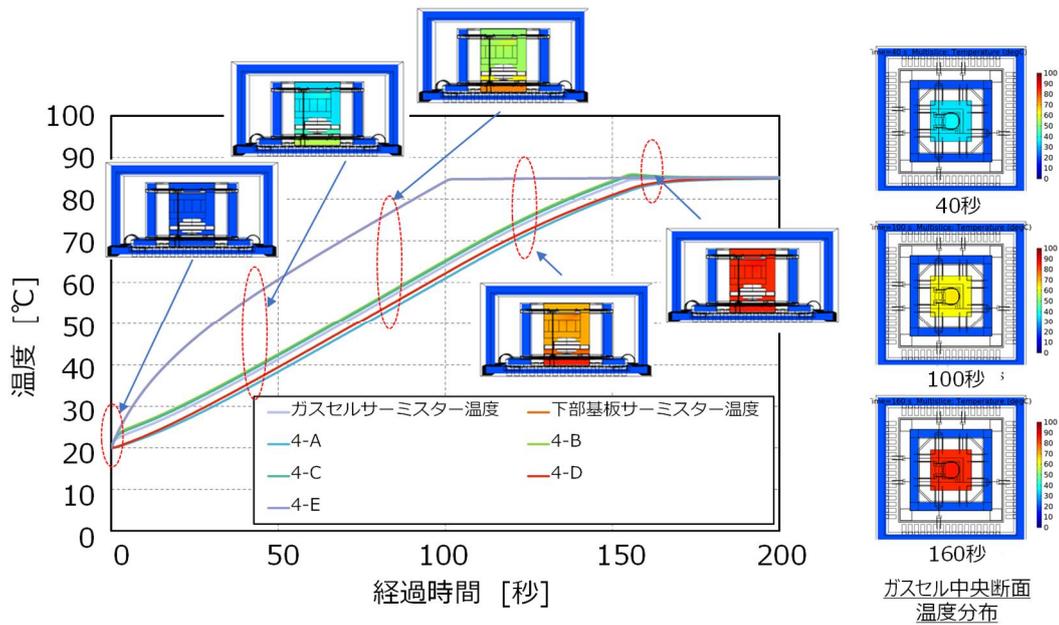
図(3)-2.25に真空断熱型量子部全体の伝熱・構造解析モデルを示す。内部構成が見えるようにセラミックLIDを外した状態を示しているが、伝熱解析はLIDにより真空封止された状態で行っている。温度境界条件は、セラミックパッケージとLIDの外周部温度を20℃で一定としている。温度取得ポイントは、解析にて温度時間変化を取得する代表的な位置を示している。構成部品の物性定義領域は右側に示す通り指定した。各物性値は表(3)-1.1に示す値を使用した。



図(3)-2.25 真空断熱型量子部1次試作構造の伝熱・構造解析モデル

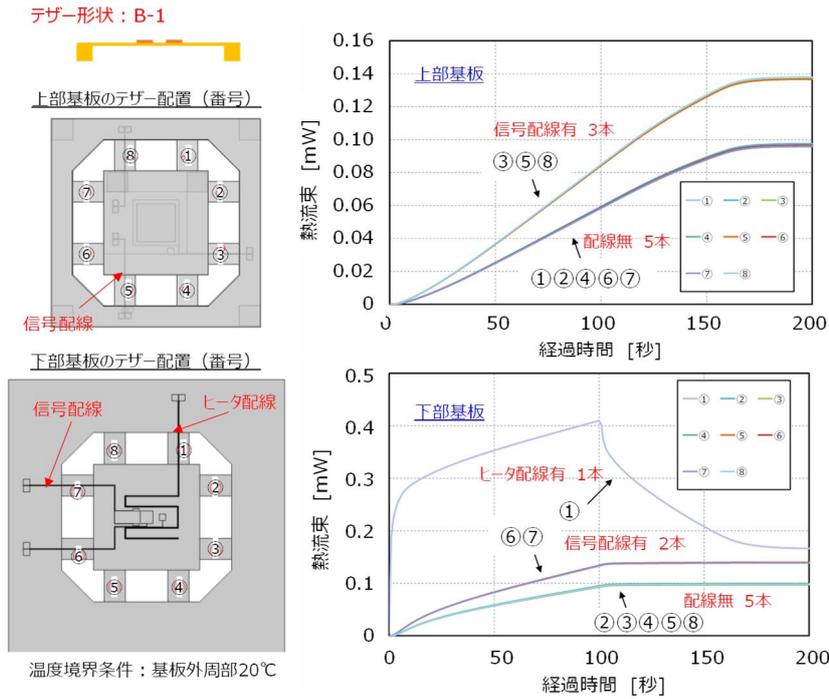
図(3)-2.26にガスセル中心線上各ポイントの温度時間変化の解析結果を示す。温度制御は、ガスセル、及び下部断熱基板の各サーミスタ取り付け位置の温度が設定値85℃以下では、各々のヒータに電流10 mAをON、設定値を超えるとOFFにするON/OFF制御とした。解析結果から、まず、下部断熱基板部(4-E)から温度が立ち上がり約100秒で設定値85℃に到達し、約70秒遅れてガスセル部(4-B, 4-C, 4-D)の温度も設定値85℃に達することが示された。その間、上部/下部断熱基板の外周部と外枠の温度は初期値20℃を維持しており、各断熱基板が高い断熱性を有するこ

とを示唆している。図右側に示すガスセル中心断面の温度分布からもガスセル内のガス温度は設定温度に収束していることが確認できる。



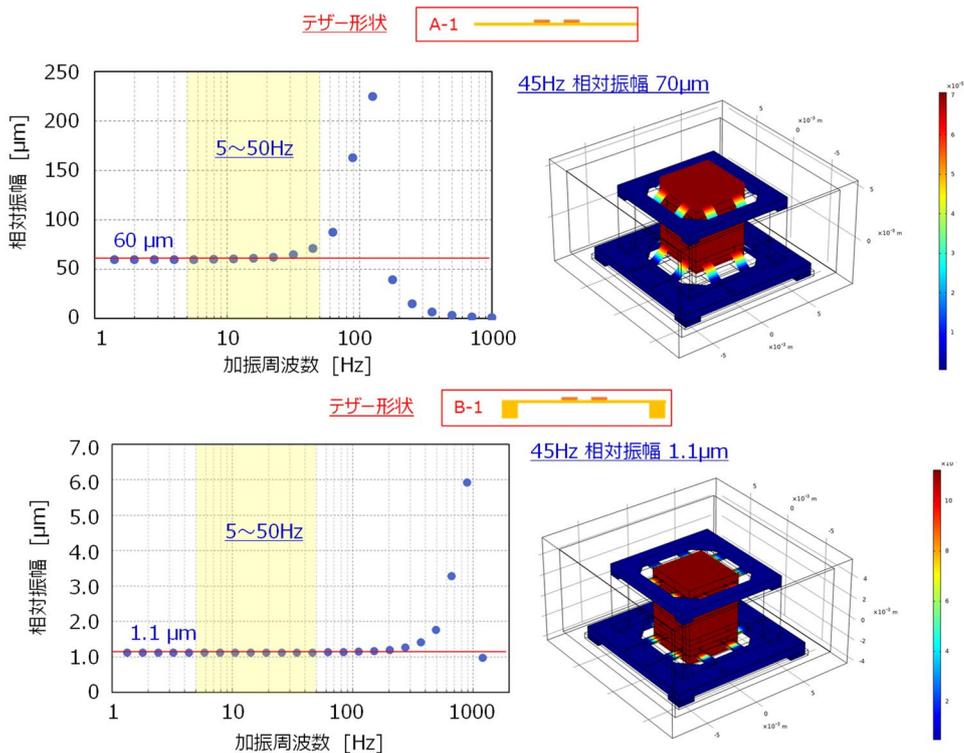
図(3)-2.26 ガスセル中心線上各ポイントの温度時間変化（解析結果）

図(3)-2.27に上部/下部断熱基板のテザーから流出する熱流束時間変化の解析結果を示す。各テザーの形状はリブ付きの(B-1)とし、図左側に示す通り各テザーに番号を付与した。上部基板では、PD、ガスセルヒータ及びサーミスタの配線が通るテザーを③⑤⑧、配線が通らないテザーを①②④⑥⑦とした。下部基板では、ヒータ配線が通るテザーを①、VCSEL、サーミスタの配線が通るテザーを⑥⑦、配線が通らないテザーを②③④⑤⑧とした。図右側のグラフから、上部断熱基板では、設定値85°Cに達する時間（約170秒）までは、流出する熱流束は増加し、設定値に達した後は定常状態に収束し、配線が通るテザーは通らないテザーと比較して約1.4倍の流出量となっている。下部断熱基板では、設定値85°Cに達する時間（約100秒）までは、ヒータ配線が通るテザー①から流出する熱流束に大きな変化が見られるが、定常状態では他のテザー同様に一定値に収束している。なお、ヒータ配線は他の信号線配線と比較して流出する熱流束が大きくなっているのは、配線の断面積が大きいためであると推定される。本解析結果から、定常状態で上部断熱基板8本のテザーから流出する熱流束の合計は0.85 mW、下部断熱基板8本のテザーの合計は0.95 mWで総計1.8 mWの流出となることが示された。実際の量子部からの熱流出は、輻射や気体熱伝導などの要素が加わり、より大きな値となると考えられる。



図(3)-2.27 上下基板のテザーから流出する熱流束時間変化 (解析結果)

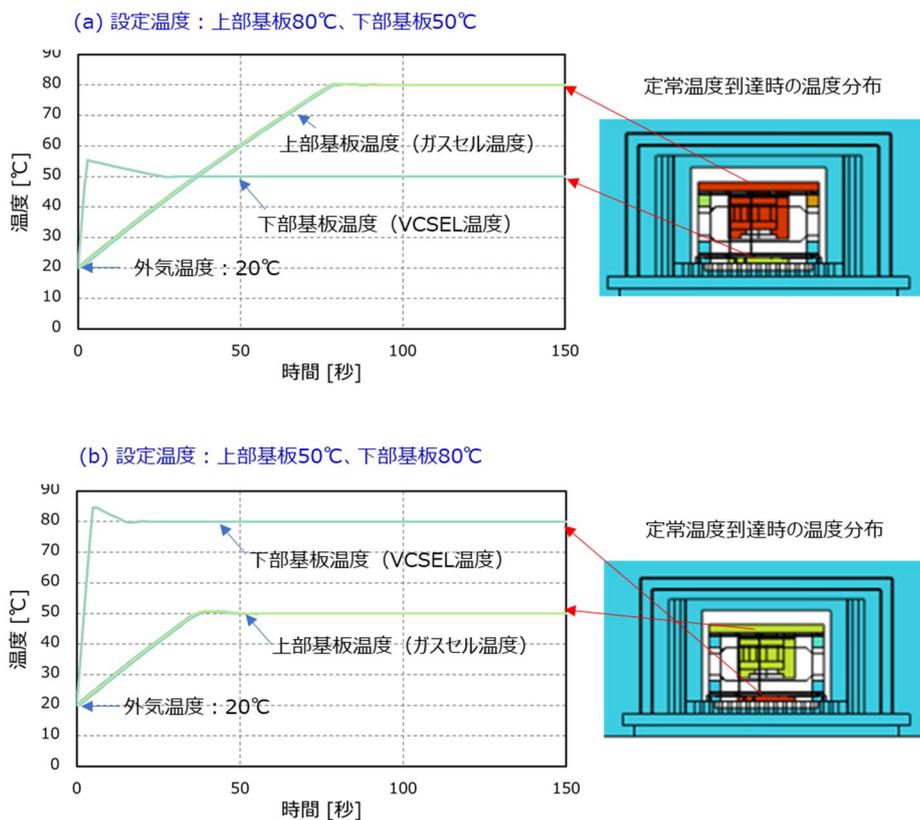
図(3)-2.28にテザーにより支持された量子部本体の相対振幅の周波数特性解析結果を示す。加振方向はZ軸、加速度は目標値に設定した3Gとし、周波数範囲1~1000 Hzで離散的に解析を行い、断熱基板外周部に対する量子部本体 (基板中央部) の相対変位をプロットした。図上段はリブ無しのテザー形状(A-1)の場合を示す。共振周波数は約110 Hz、目標値として設定した5~50 Hzの範囲において約60 μm の相対変位であることが示された。図下段に示すリブ有りのテザー形状(B-1)では、共振周波数は900 Hz、5~50 Hzの範囲における相対変位は1.1 μm となり、大幅に振動が低減できることが示唆された。



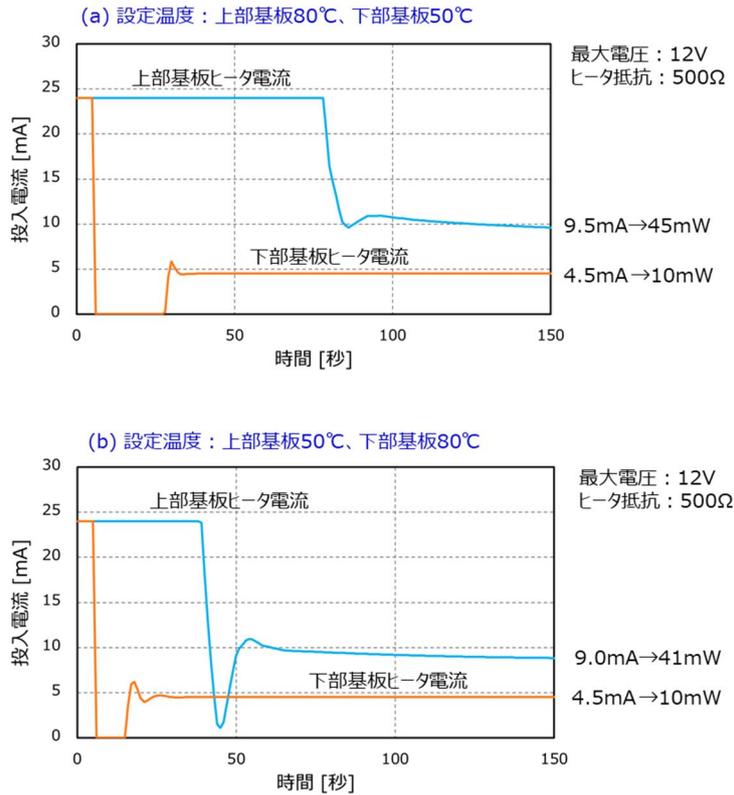
図(3)-2.28 量子部本体の相対振幅の周波数特性 (解析結果)

上記、真空断熱型量子部1次試作の伝熱・構造解析モデルをベースに、上部、下部の各基板及びパッケージを2次試作構造に変更した解析モデルを作成し解析を行った。図(3)-2.29に真空断熱型量子部2次試作構造での昇温特性の解析結果を示す。ここでは、ガラス加工型ガスセルの組込みを想定し、上部基板はテザー無しとし、ガスセルと下部基板間は分離された構造とした。これにより上部基板のヒータにより温度制御されるガスセルとVCSEL温度を制御する下部基板とは熱的に分離され、それぞれ独立に温度制御されることが期待できる。また、下部基板とパッケージ間は貫通配線にて接続される構造とした。上段のグラフは設定温度を上部基板80℃、下部基板50℃とした場合、下段のグラフは設定温度を上部基板50℃、下部基板80℃とした場合の各々外気温20℃からの昇温特性である。双方の解析結果から、下部基板(VCSEL)と上部基板(ガスセル)は互いに独立に温度制御が可能であることが示唆された。

図(3)-2.30に昇温過程における投入電流の解析結果を示す。解析対象と温度設定は図(3)-2.29と同条件である。上部基板及び下部基板のヒータ抵抗は各々500 Ω、印加電圧の上限は12 Vとしたため投入電流の最大値は24 mAに制限される。各基板とも設定温度に到達するまでは最大電流24 mAが投入され、その後、投入電流は低下し定常状態に至る。定常状態での電流値から導かれる電力が各基板を設定温度に維持するための消費電力となる。解析結果から、各条件において上部基板と下部基板の消費電力の合計は51~55 mW程度であり、上部基板にテザーがない構造であっても目標とする量子部全体の消費電力100 mW以下を満足する可能性が示された。

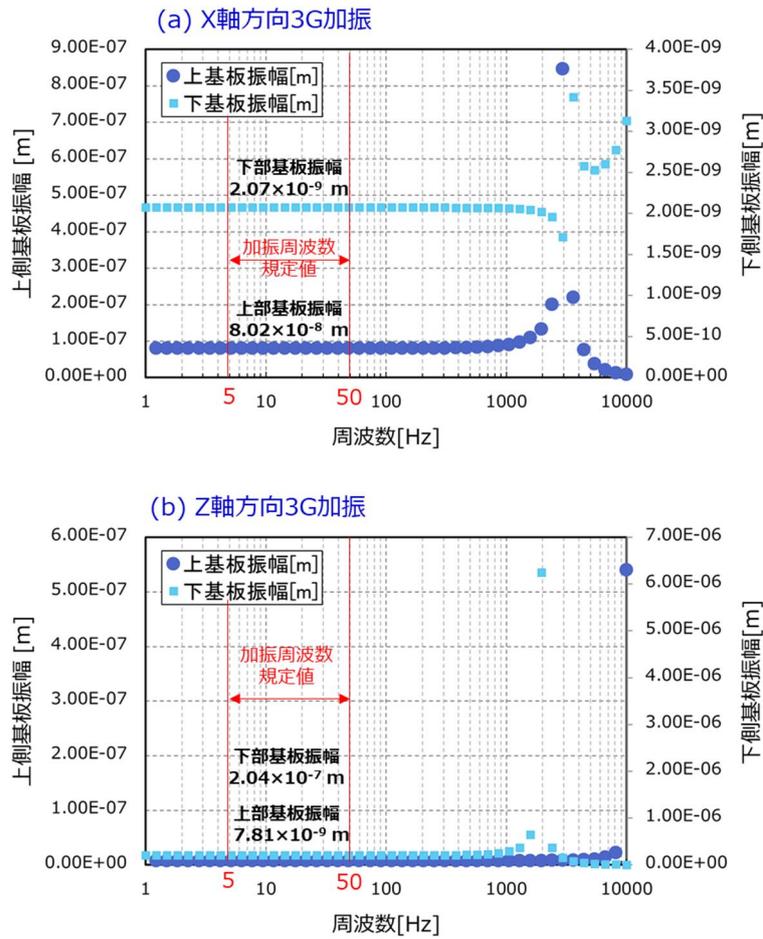


図(3)-2.29 真空断熱型量子部 2次試作構造での昇温特性 (解析結果)



図(3)-2.30 2次試作構造での昇温過程における投入電流（解析結果）

図(3)-2.31に真空断熱型量子部2次試作構造での加振周波数特性の解析結果を示す。横方向（X軸方向）及び垂直方向（Z軸方向）の3G加振において、規定周波数5～50 Hzの範囲では上部基板及び下部基板の相対振幅は 10^{-9} ～ 10^{-7} mのオーダーであり微小な値に抑えられていることを確認した。

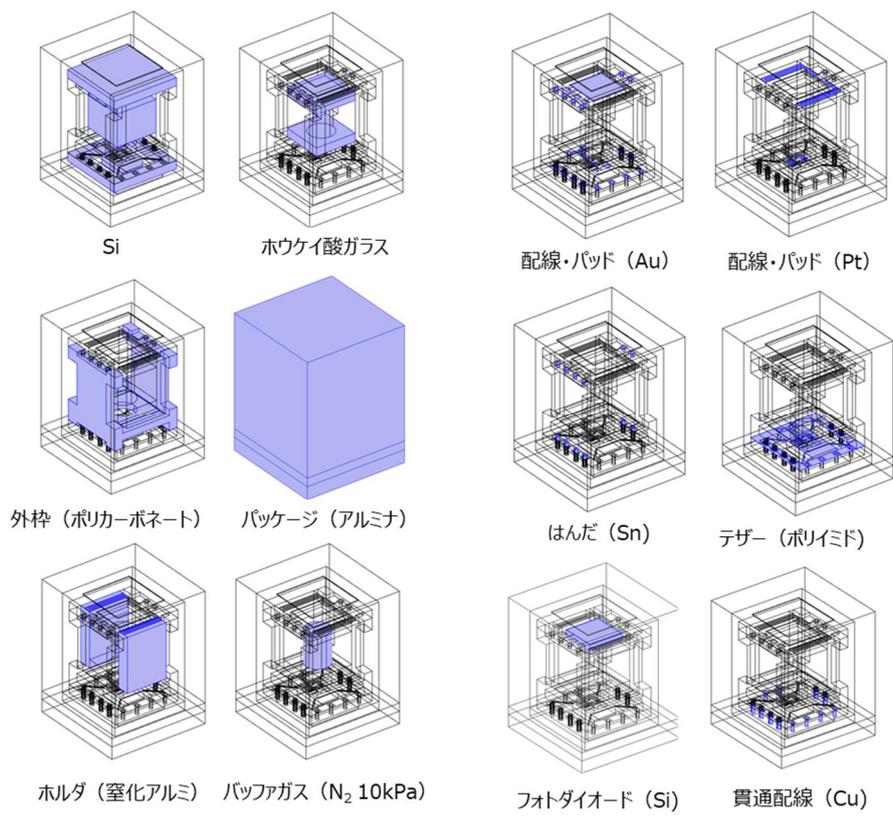


図(3)-2.31 真空断熱型量子部 2 次試作構造での加振周波数特性 (解析結果)

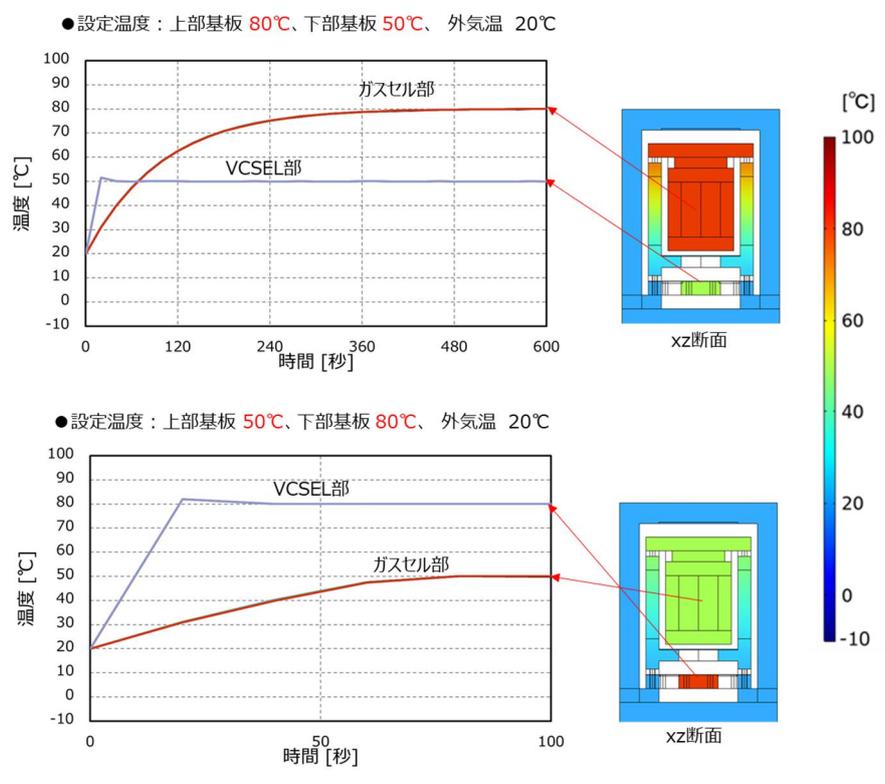
最後に、3次試作構造での伝熱・構造解析を実施した。図(3)-2.32に真空断熱型量子部3次試作構造の伝熱・構造解析モデルを示す。構成部品それぞれの材料を定義し、物性値は表(3)-2.1に示す値を用いている。

まず、VCSELが実装されている下部基板とガスセルが搭載されている上部基板の温度設定を異なる値に設定した場合の昇温特性を解析した。図(3)-2.33に3次試作構造での昇温特性の解析結果を示す。ここでは投入電流の最大値を10 mAに制限しPID制御を用いた。上段は、上部基板80℃、下部基板50℃に設定した場合であり、熱容量が大きいガスセル部の昇温に時間を要するものの約480秒後には各々の設定温度に到達し、その後一定温度を維持している。下段は、上図とは逆に上部基板50℃、下部基板80℃に設定した場合であり、約80秒後には各々の設定温度に到達し、その後一定温度を維持している。これらの結果から、3次試作構成においてもVCSELとガスセルの独立温度制御が可能であることが示唆された。

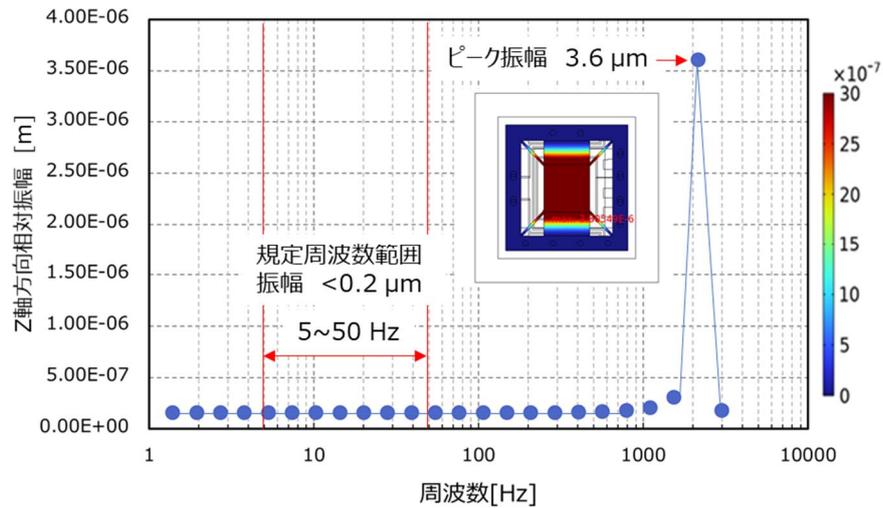
次に、量子部の耐震性を評価するため、加振時における下部基板振幅の周波数特性を解析した。図(3)-2.34に真空断熱型量子部3次試作構造での周波数特性の解析結果を示す。加振加速度は目標値として設定されているピーク値3 Gとした。水平方向 (Z軸方向) 加振時の下部基板のZ軸方向相対変位は、2.1 kHz付近に振幅3.6 μm 程度のピークが存在し、低周波数側では振幅0.2 μm 以下と非常に小さな値となっている。目標値として設定された周波数範囲は5~50 Hzであり、この範囲では十分な耐震性が得られると考えられる。



図(3)-2.32 真空断熱型量子部3次試作構造の伝熱・構造解析モデル



図(3)-2.33 3次試作構造での昇温特性（解析結果）



図(3)-2.34 真空断熱型量子部 3 次試作構造での周波数特性 (解析結果)

参考文献

- [1] R. Lutwak, “The SA. 45s Chip-Scale Atomic Clock - Early Production Statistics”, 43rd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, 2011, pp. 14-17.
- [2] S. Knappe, et al., “A microfabricated atomic clock”, Appl. Phys. Lett. 85, 2004, PP. 1460–1462.
- [3] P. Karioja, et al., “MEMS, MOEMS, RF-MEMS and photonics packaging based on LTCC technology” Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC), IEEE, 2014, pp. 16-18.
- [4] R. Lutwak, et al., “The Chip-Scale Atomic Clock-Prototype Evaluation”, 39th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, ,2007, PP. 269-290.
- [5] V. Maurice, N. Passilly, C. Gorecki, R. Boudot, M.A. Hafiz, P. Abbe, S. Galliou, J. Rauch, E. de Clercq, “Laser light routing in an elongated micromachined vapoer cell with diffraction gratings for atomic clock applications”, Sci. Rep. 2015, 5, 14001.

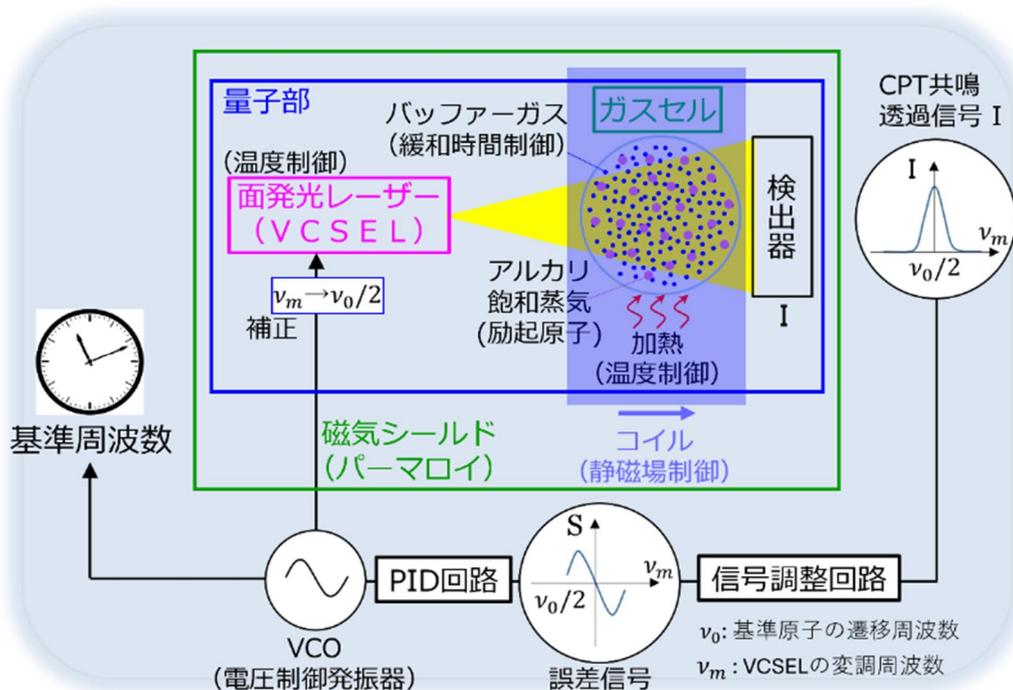
実施項目(4) プロトタイプモジュールの試作及び評価(担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

(a)HS-ULPACプロトタイプモジュールの概要

本研究課題では、自動車等の移動体制御の高度化や、大容量次世代通信のための基地局間同期等への適用を見据え、CPT(Coherent Population Trapping)共鳴を活用した小型原子時計の究極的な性能追求を進めた。このような目的のため、磁場変動・温度変動・振動環境での環境試験や車載実験を念頭に置きHS-ULPACプロトタイプモジュール(以下プロトタイプモジュールと記載)の試作をおこなった。

図(4).1中にプロトタイプモジュールに搭載される主要な部品の概要を示し、以下に小型原子時計の動作原理の概念を説明する。電圧制御発振器(VCO(Voltage Controlled Oscillator))は基準となる原子(本研究課題ではCs原子)の遷移周波数に関連した電気信号を出力する。その出力は小型原子時計外に基準周波数として取り出されるものと、面発光レーザー(VCSEL(Vertical Cavity Surface Emitting Laser))の駆動電流を変調する信号の2系統に分割される。基準原子の遷移周波数を ν_0 とした場合、VCSELの変調周波数 ν_m は約 $\nu_0/2$ である。VCSELの射出光が基準原子に吸収され $\nu_m = \nu_0/2$ の条件を満たすと、CPT共鳴と呼ばれる量子干渉効果が現れ、透過信号Iにおける吸収量の減少、すなわち透過信号の増加が観測可能となる。CPT共鳴には、VCSEL光の+1次と-1次のサイドバンドが関与するのが一般的であり、 $\nu_m = \nu_0/2$ の条件では2つのサイドバンドの周波数差が基準原子の遷移周波数 ν_0 と一致する。この状態を持続するために、CPT共鳴透過信号に基づき信号調整回路で誤差信号を生成し、PID回路を通じてVCOの制御電圧に対してフィードバック制御を行う。このような過程を経ることで、VCOから小型原子時計外に取り出した基準周波数は基準原子の遷移周波数 ν_0 に安定化される(周波数安定化)。

基準原子は実施項目(1)-2で開発されるようなガスセルに封入され、CPT共鳴信号(透過信号における吸収量の減少)が大きくなるよう、ガスセル内のバッファガス圧やバッファガス種、ガスセルの温度が選択される。基準原子はガスセル壁に衝突すると緩和により量子干渉状態が失われるため、その緩和抑制にバッファガスは寄与する。実施項目(1)で既に説明されている通り、基準原子の遷移周波数 ν_0 はライトシフト、バッファガスシフト、ゼーマンシフトによって変化するため、それらの変動が小さくなるよう種々のパラメータを安定化する必要がある。特にゼーマンシフトによる周波数変動を小さくするために、コイルをガスセル近傍に配置し、それが生成する意図的な磁場のみが基準原子へ印加される状態を作り出す。さらにCPT共鳴信号生成に直接関与する部品を、量子部として一体化し、磁気シールド内に配置し、外部不要磁場の影響を小さくする。プロトタイプモジュールは、以上の状態でVCO出力周波数を遷移周波数 ν_0 へ安定化したものである。

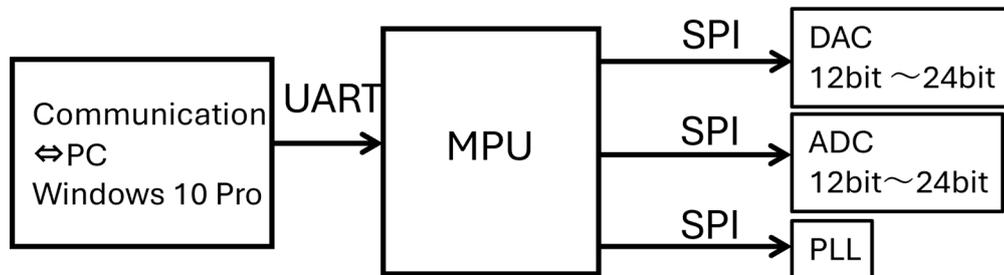


図(4).1 HS-ULPACプロトタイプモジュール概要

(b)制御回路基板、及び評価ボードの設計・試作・評価

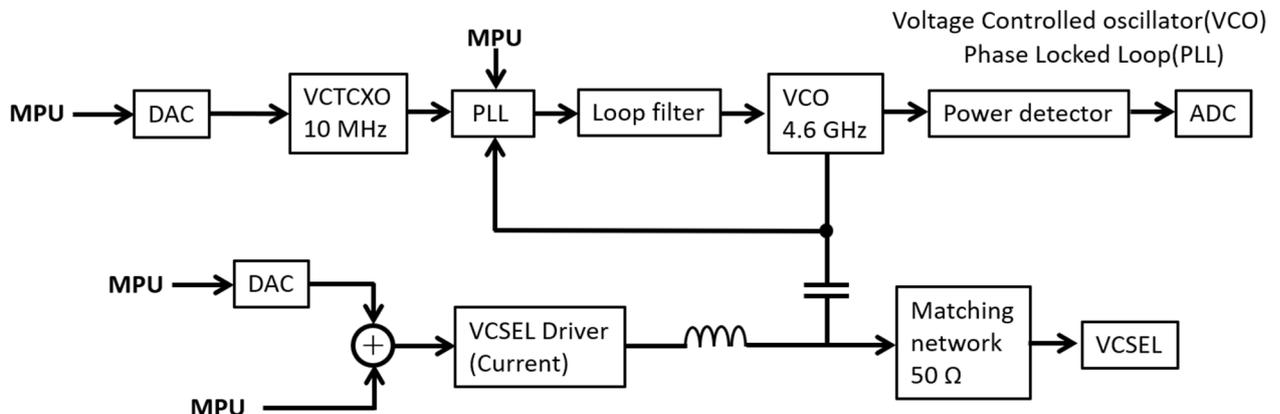
制御回路基板にはある程度安定な発振器として10 MHz(基準周波数、基準信号)の出力周波数をもつ水晶発振器を搭載する。本項冒頭の概要で述べた電圧制御可能な発振器に該当するもので、正確にはVCTCXO(Voltage Controlled Temperature Compensated Crystal Oscillator)と呼ばれるものである。周波数安定化は、VCTCXOの駆動電圧設定、及び量子部からの誤差信号の読取りという2つのプロセスを交互に継続することで実現可能である。ただし、単に10 MHzの信号を基準原子であるCs原子に照射しても誤差信号は生成不可能であり、幾つかの環境パラメータはCs原子自体の遷移周波数を変動させる要因になり得る。そのため、主要な2つのプロセス以外のプロセスも組合せ、周波数安定化を実行・維持するのが一般的であり、これらはMicro Processing Unit(MPU)を用いた逐次制御で実現する。また、10 MHzの周波数をCs原子の遷移周波数に関連する約4.6 GHz($= \nu_0/2$, $\nu_0 \approx 9.2$ GHz)に変換する周波数合成回路も制御回路基板には実装される。さらに、量子干渉効果に基づくCPT共鳴信号はCs原子がVCSEL光を吸収している条件で観測されるが、そのような吸収を維持、観測するための回路機能も実装する。

このような機能をもつ制御回路基板として、デジタル位相検波方式制御回路を設計した。それぞれMPU周辺回路ブロック図(図(4).2)、周波数合成回路及びVCSEL駆動回路ブロック図(図(4).3)、CPT位相検波用PD回路ブロック図(図(4).4)を示す。

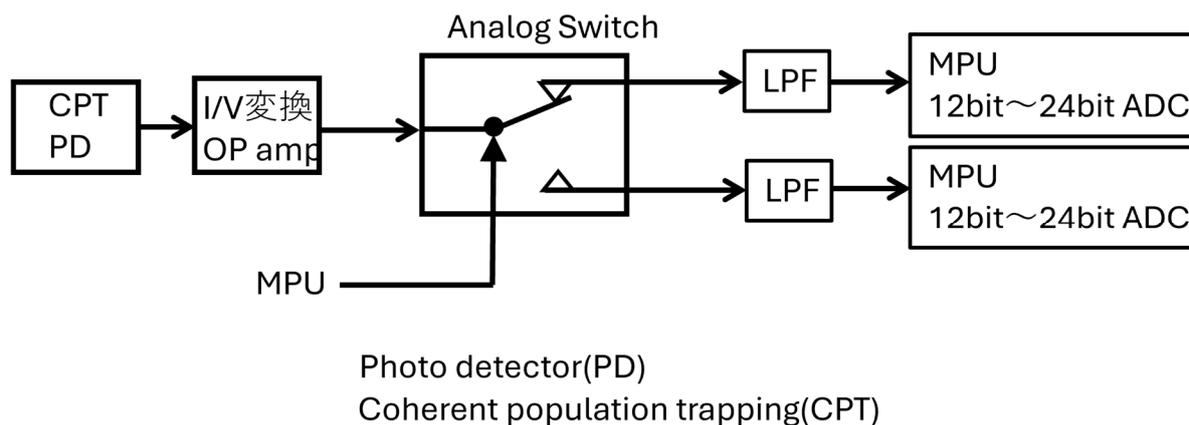


- | | |
|-------------------------------|---|
| Micro Processor Unit(MPU) | Universal Asynchronous Receiver/Transmitter(UART) |
| Analog digital convertor(ADC) | Serial Peripheral Interface(SPI) |
| Digital analog convertor(DAC) | |

図(4).2 デジタル位相検波方式制御回路における MPU 周辺回路ブロック図



図(4).3 デジタル位相検波方式制御回路における周波数合成回路及び VCSEL 駆動回路ブロック図



図(4).4 デジタル位相検波方式制御回路における CPT 位相検波用 PD 回路ブロック図

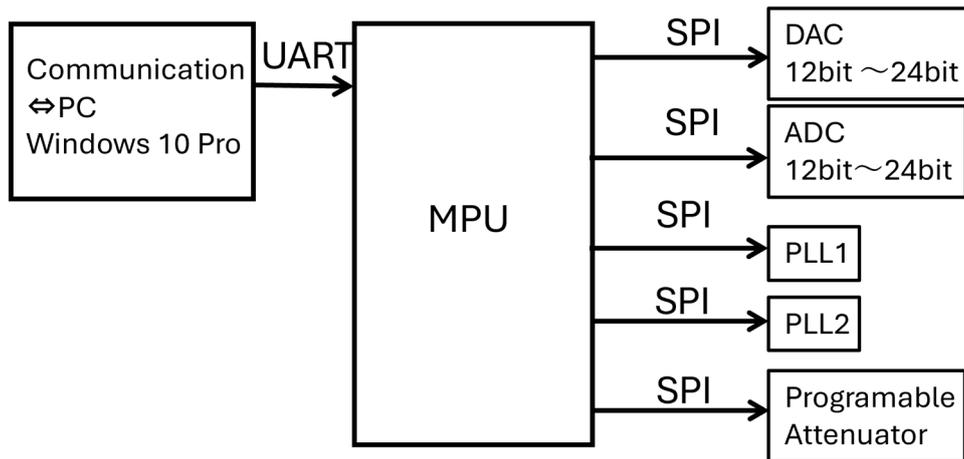
図(4).2では、MPUと電圧入出力機能をもつDigital Analog Convertor(DAC)、及びAnalog Digital Convertor(ADC)とをSerial Peripheral Interface(SPI)を介して接続する。SPIは多くの汎用ICがシリアル通信でデータ転送を実行可能な通信規格である。ADCは量子部から出力される誤差信号の取得、DACはVCTCXOの駆動電圧設定、VCSELの駆動電流設定等を担う。また、MPUは演算機能を備え、予め書込むソフトウェアに従って、各種パラメータの測定値が目標値と一致するように、DACの出力電圧を調整し、デバイスの状態を制御する。MPUにおける制御プログラムは、開発期間中に何度もデバッグする必要があり、汎用コンピュータからの書き込みを容易にするためWindows10 Proとの接続インターフェースであるUART(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)をサポートする。

図(4).3は、プロトタイプモジュールに搭載するコア部品であるVCTCXOとVCSELの駆動状態を設定する回路ブロックである。VCTCXOの動作電圧は、CPT共鳴信号から変換された誤差信号に基づき、MPUが所定の演算により誤差ゼロの状態を算出しDACを介して設定する。VCTCXOが出力する周波数10 MHz信号はPhase Lock Loop(PLL)に接続され、MPUがPLLに対してコントロールする周波数関係に基づき、周波数4.6 GHz信号を出力するVCOと位相同期する。VCOの4.6 GHz信号はVCSELの駆動電流のAC成分となるため、出力パワーはパワー検出器とADCを介してその測定値をMPUに取込む。VCSELの駆動電流のDC成分はCs原子の吸収を維持するための制御用と位相検波用の和で構築され、バイアスTを経て駆動電流のAC成分と混合され、VCSELに作用する。

図(4).4はデジタル位相検波方式の回路ブロックである。量子部内に設置されたCs原子が封入されたガスセルを通過したVCSELからの透過光をPD(Photo Detector)で受信し、光電流を回路基板上のオペアンプで電圧に変換する。この信号をMPUからのデジタル信号に基づいてCPT共鳴信号を位相検波し、誤差信号生成に必要な信号に変換することでMPUに取込む。

次にアナログ位相検波方式制御回路を設計した。設計の指針は、デジタル位相検波方式制御回路と比較して、制御回路基板の大きさを維持可能な範囲で部品点数を増やし、制御回路が関わるノイズを低減することでプロトタイプモジュールの性能向上を図ることである。それぞれMPU周辺回路ブロック図(図(4).5)、周波数合成回路及びVCSEL駆動回路ブロック図(図(4).6)、CPT位相検波用PD回路ブロック図(図(4).7)を示す。

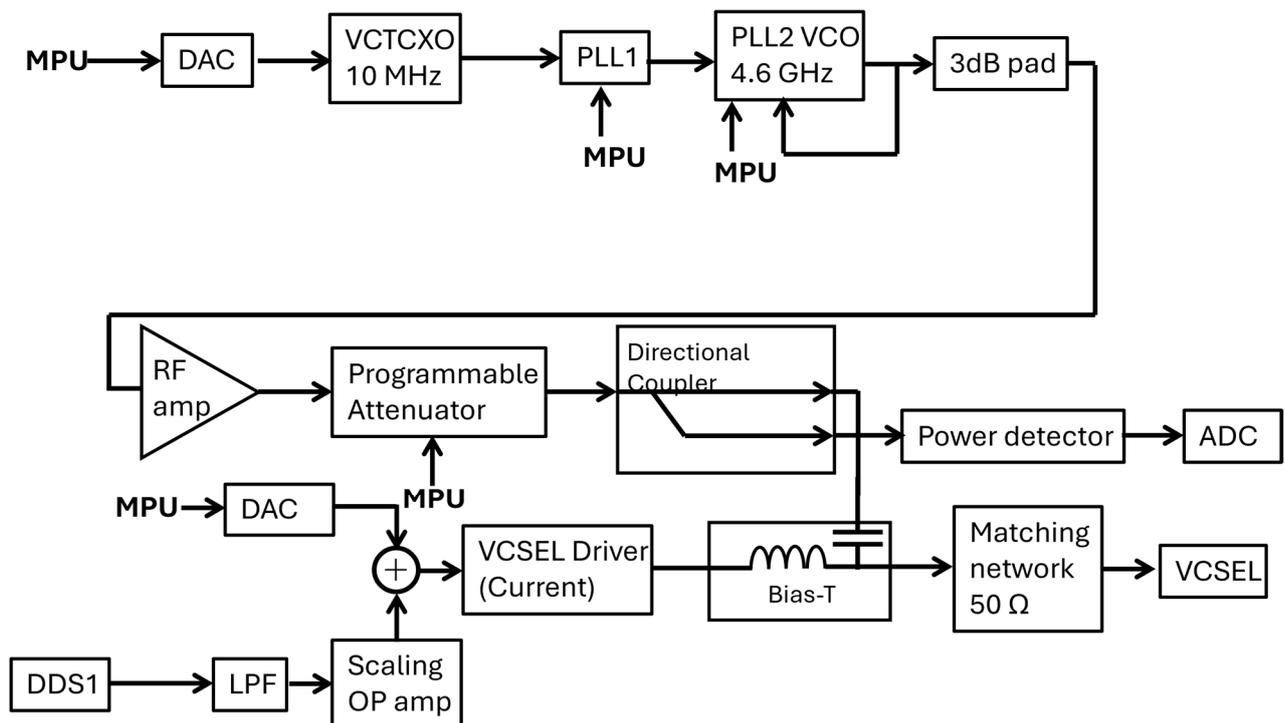
アナログ位相検波方式制御回路(図(4).5)では、周波数10MHz信号からVCSELの駆動電流におけるAC成分を直接変調するために用いられる4.6 GHz信号を周波数合成する手法が大きく異なる。PLLを2段階に分割するため、MPUには2つのPLL1、PLL2が接続される。また、4.6 GHz信号の出力パワーを安定化するためのプログラマブルアッテネータもMPUに接続される。他の機能はデジタル位相検波方式と同様である。



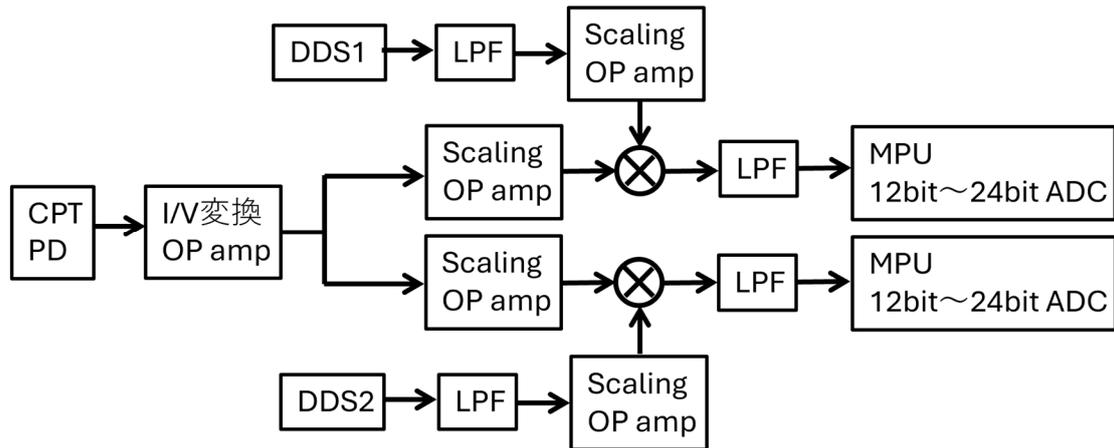
Micro Processor Unit(MPU)
 Analog digital convertor(ADC)
 Digital analog convertor(DAC)

Universal Asynchronous
 Receiver/Transmitter(UART)
 Serial Peripheral Interface(SPI)

図(4.5) アナログ位相検波方式制御回路における MPU 周辺回路ブロック図



図(4.6) アナログ位相検波方式制御回路における周波数合成回路及び VCSEL 駆動回路ブロック図



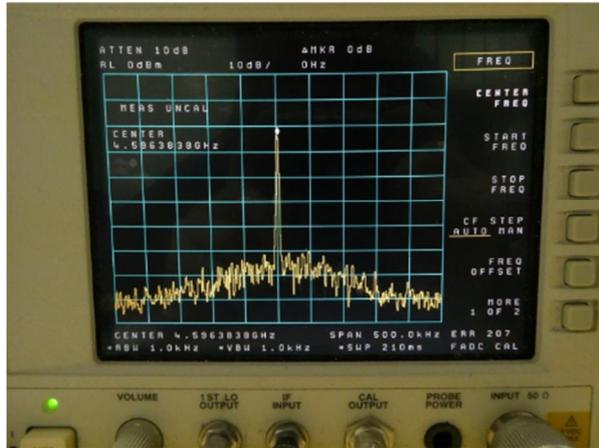
図(4).7 アナログ位相検波方式制御回路における CPT 位相検波用 PD 回路ブロック図

図(4).6 は、アナログ位相検波方式制御回路において、プロトタイプモジュールに搭載するコア部品である VCTCXO と VCSEL の駆動状態を設定する回路ブロックである。VCTCXO の動作電圧は、CPT 共鳴信号から変換された誤差信号に基づき、MPU が所定の演算により誤差ゼロの状態を算出し DAC を介して設定する。VCTCXO が出力する周波数 10MHz 信号は、2 つの PLL(PLL1 と PLL2)を MPU が精密にコントロールすることで設定される周波数関係に基づき、周波数 4.6 GHz 信号と位相同期する。4.6 GHz 信号の出力パワーを安定化するために増幅器、MPU コントロール可能なプログラマブルアッテネータ、方向結合器(Directional Coupler)を経て、片方の信号経路をパワー検出器に接続する。このパワー検出器は ADC を介し MPU へ測定値を返す。MPU には予め 4.6 GHz 信号の目標値をセットし、MPU 演算により目標値と測定値の差分がゼロになるようプログラマブルアッテネータの動作状態を設定する PID 制御を行えば、4.6 GHz 信号の出力パワーが安定化される。方向結合器から得られるもう一つの信号は、バイアス T に接続することで VCSEL 駆動電流の AC 成分として機能する。デジタル位相検波方式と異なる点は周波数合成を 2 つの PLL で行うこと、VCSEL 駆動電流の AC 成分のパワー安定化を行うことであり、これらにより制御回路の雑音低減化を期待する。

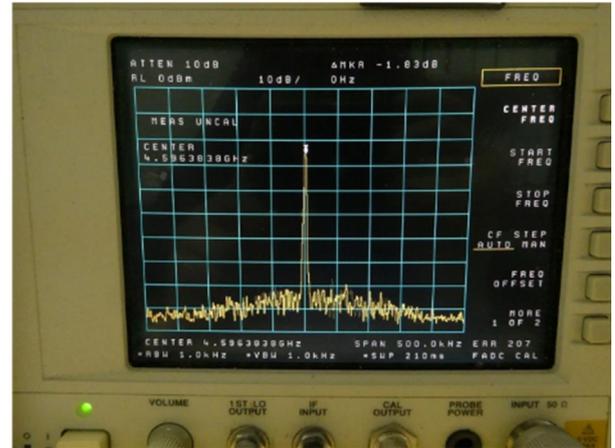
図(4).7は、アナログ位相検波方式の回路ブロックである。デジタル位相検波方式と同様に VCSEL からの透過光を PD で受信し、光電流を回路基板上のオペアンプで電圧に変換する。この信号を 2 つの DDS(Direct Digital Synthesizer)が生成する正弦波に基づいて CPT 共鳴信号を位相検波することで MPU に取込む。デジタル位相検波、アナログ位相検波の両方式間では、位相検波に用いられる波形が異なる。位相検波により生成される誤差信号の測定値と予め MPU に設定する目標値の差分がゼロになるよう VCTCXO の駆動電圧、及び VCSEL の駆動電流の DC 成分を設定する PID 制御を行えば、VCSEL 光の吸収が最大になる状態で、CPT 共鳴信号の中心、すなわち Cs 原子の遷移周波数の半分の値(= $\nu_0/2$)に 4.6 GHz 信号を安定化することができる。この時、4.6 GHz 信号と 10 MHz 信号の位相同期はこれらの PID 制御には依存しないため、プロトタイプモジュールの外部へ取り出す 10 MHz 信号は Cs 原子の遷移周波数 ν_0 を反映したものとなる。

図(4).8にデジタル位相検波方式制御回路及びアナログ位相検波方式制御回路から出力された 4.6 GHz 信号のスペクトラムをスペクトラムアナライザで観測した結果を示す。横軸は中心周波数 4.5963 GHz、トータルの周波数範囲 500 kHz、周波数分解能 1 kHz で測定結果が表示されている。縦軸は 10 dB スケールで +20 dBm から -80 dBm までの範囲を示す。両方式とも観測される周波数領域では単一スペクトルの信号が観測された。上記測定条件で搬送波対雑音比はデジタル位相検波方式では約 -55 dB、アナログ位相検波方式では約 -65 dB と見積もられる。この結果は、プロトタイプモジュールのアラン標準偏差に換算すると約 3 倍の改善可能性を示唆する。また、アナログ位相検波方式の評価結果はスペクトラムアナライザ自体のノイズフロアで制限されている可能性があるため、3 倍以上の可能性があると考えられる。プロトタイプモジュールに実装する制御基板としては、アナログ位相検波方式制御回路を中心に開発を進めた。

(a) デジタル位相検波方式制御回路

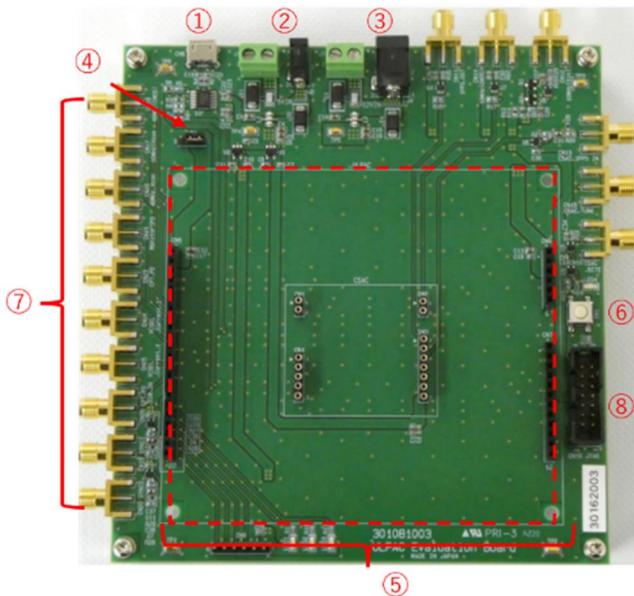


(b) アナログ位相検波方式制御回路



図(4.8 (a)デジタル位相検波方式制御回路、及び(b)アナログ位相検波方式制御回路における 4.6 GHz の搬送波対雑音特性評価

続いて評価ボードの設計・試作をおこなった。評価ボードはプロトタイプモジュールの開発を支援するための機能を備える必要がある。一例としてプロトタイプモジュールのハードウェア的、ソフトウェア的な機能変更があった場合でも、同質の評価を継続するための変更作業が最小限で済むことがあげられる。図(4.9)に試作品の写真と、主要な機能を示す。



- ①USB Micro-B : PC と USB ケーブルで接続を行い、プロトタイプモジュールの制御基板に搭載されている MPU と通信を行う。
- ②+5 V 電源コネクタ : プロトタイプ制御基板への電源供給を行う。
- ③+12 V 電源コネクタ : プロトタイプ制御基板へヒータ電源供給を行う。
- ④ヒータ切替ジャンパ : ヒータ用電源として、+5 V と+12 V の切替を行う。
- ⑤プロトタイプ制御基板搭載エリア : 両側のソケットにプロトタイプモジュールのヘッダピンを接続する。
- ⑥リセットスイッチ : プロトタイプモジュールの MPU をリセットすることができる。
- ⑦モニタ用コネクタ : プロトタイプモジュールから出力される各種信号をモニタすることができる。
- ⑧ソフトウェア用コネクタ : ソフトウェアに変更があった場合、専用ケーブルを接続することでデバッグが可能になる。

図(4.9) プロトタイプモジュール用評価ボード

(c)プロトタイプモジュールの状態モニタ

前述した評価ボードを介し、プロトタイプモジュールのMPUと通信することで、各種パラメータをモニタすることが可能となっている。パラメータの種類と内容を表(4.1)に示す。内容はアナログ位相

検波方式制御回路に適用したものとなっている。

表(4).1 プロトタイプモジュールにおけるモニタ可能なパラメータ

種類	内容	種類	内容
時間	起動後の経過時間	目標値	4.6 GHz VCO の出力パワーの目標値
測定値	MPU 温度	測定値	4.6 GHz VCO の出力パワー
目標値	VCSEL の目標温度	制御値	VCSEL 駆動電流 DC 成分の制御値
測定値	VCSEL の温度	測定値	VCSEL 駆動電流 DC 成分の測定値
制御値	VCSEL の温度制御値	測定値	CPT 観測用 PD の電圧値
目標値	ガスセルの目標温度	測定値	CPT 共鳴位相検波信号の測定値
測定値	ガスセルの温度	測定値	VCSEL 制御用位相検波信号の測定値
制御値	ガスセルの温度制御値	目標値	ゼーマンコイル用駆動電流の設定値
制御値	PLL2 の制御値	制御値	10MHzVCTCXO の駆動電圧制御値
制御値	プログラマブルアッテネータの設定値		

(d)プロトタイプモジュールの試作・評価

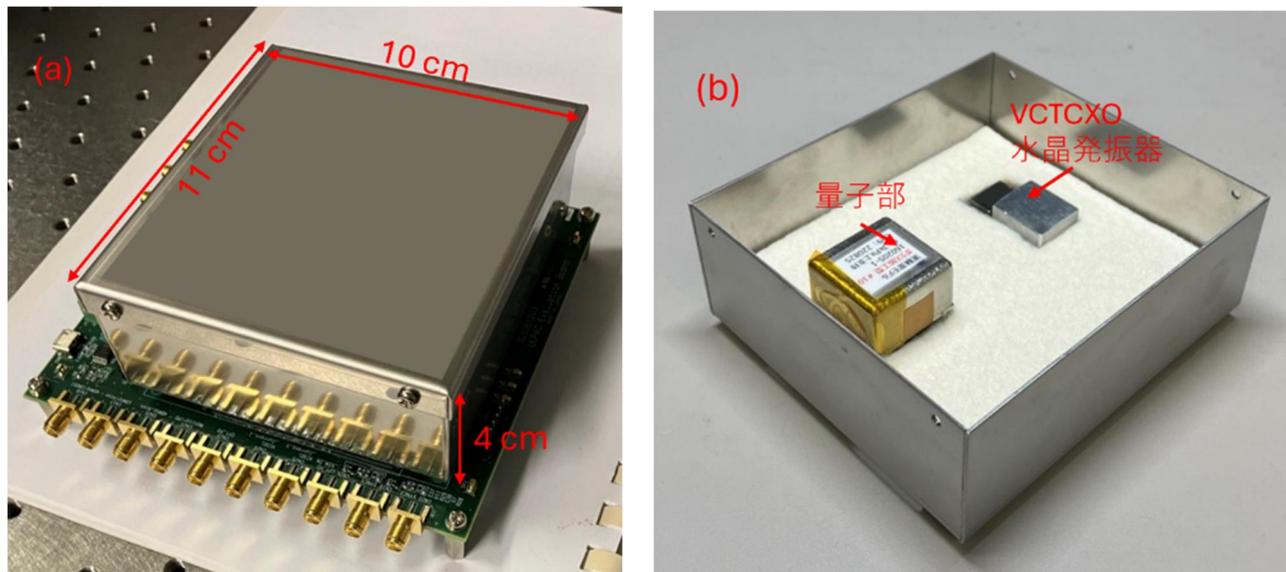
プロトタイプモジュールは、実施項目(3)でマイクロマシンセンターが開発する量子部を制御回路基板上に実装し、外部磁場変動の影響を低減するために、それらを直方体のシールドで覆ったデバイスである。また、制御回路基板上には量子部の他に、Cs原子の遷移周波数に周波数安定化された10MHz信号を出力するVCTCXOが搭載されるが、最終的には実施項目(2)で大真空が開発する高安定VCTCXOの活用を想定し、段階的に開発を進めた。

図(4).10に2次試作制御回路基板を用いたプロトタイプモジュールの概要を示す。量子部(実験室モデル)と10MHz信号出力用のVCTCXOを、本項(b)で設計・試作した制御回路基板上に実装し、それらをアルミ製筐体の中に配置している。プロトタイプモジュールの大きさは4 cm×10 cm×11 cm(図(4).10(a))であり、評価ボード上に組込んでいる。アルミ製筐体内の量子部とVCTCXOの様子は図(4).10(b)中の写真に示す。開発スケジュールの都合により2次試作制御基板に実装しているVCTCXOは商用のものを利用した。このVCTCXOのアラン標準偏差は凡そ $\sigma_y(\tau=1)=6\times 10^{-11}\sim 8\times 10^{-11}$ 程度である。VCTCXO周辺の温度揺らぎが影響しないよう、デバイス自体は別途小型アルミ筐体で覆われている。また、制御回路基板自体の温度が安定するよう、部分的に断熱材で筐体内の空間を充足した。

図(4).11は実験室環境で、2次試作制御回路基板を用いたプロトタイプモジュールを評価している様子を示した写真である。評価ボードに接続された3台のプロトタイプモジュールから出力される10MHz信号を位相計に接続し、UTC(NMIJ)に対してそれらの周波数変動を測定している。また、評価ボードのUSB Micro-BとPCを接続し、プロトタイプの状態を示すログをPCの画面でモニタしている。ログの内容は表(4).1に示すものを基本としている。

図(4).12に2次試作制御回路基板を用いたプロトタイプモジュールのアラン標準偏差を示す。緑線は2022年5月、えんじ色線は2022年12月、濃紺色線は2023年3月に取得したデータであり、すべてプロトタイプモジュールを恒温槽内に設置した場合である。これらの期間中プロトタイプモジュールのソフトウェアのデバッグ、及び効率的なパラメータモニタ環境の構築を並行して進めた。緑線のデータにおいては、平均時間数百秒以下の領域では $\sigma_y(\tau) = 3 \times 10^{-10} \times \tau^{-1/2}$ として表される白色周波数雑音特

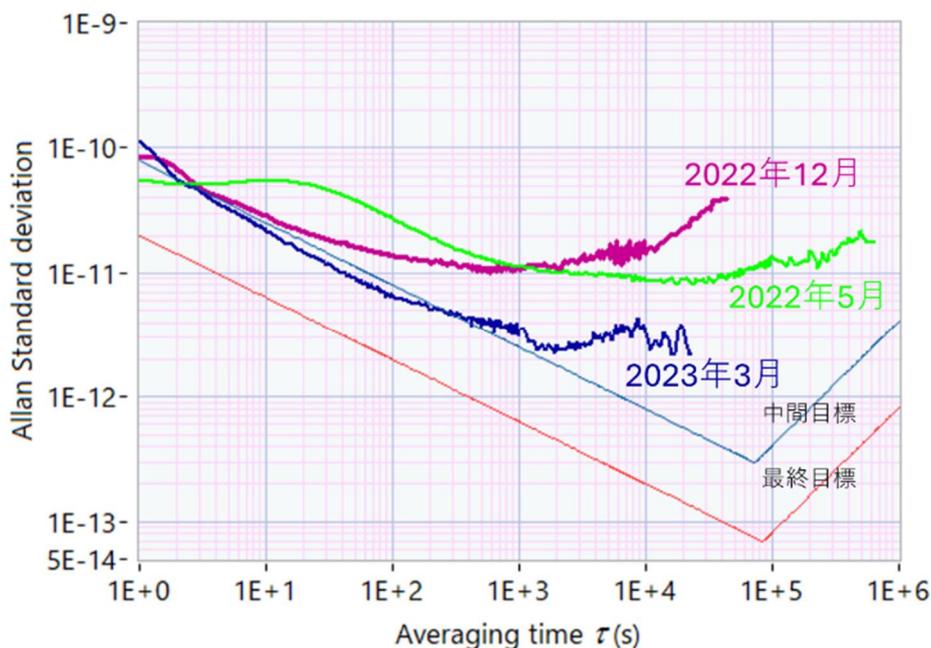
性を示すアラン標準偏差が得られた。ソフトウェアのデバッグに従い、平均時間約1000以下の領域では周波数安定度が向上し、最終的には $\sigma_y(\tau) \sim 8 \times 10^{-11} \times \tau^{-1/2}$ として表されるアラン標準偏差が得られた。一方で、長期安定度やドリフトに着目した場合、緑線(2022年5月)とえんじ色線(2022年12月)を比較すると、前述したアプローチは効果がない可能性がある。また、短期安定度は搭載しているVCTCXOの周波数安定度により制限されている可能性がある。



図(4).10 2次試作制御回路基板を用いたプロトタイプモジュールの概要：(a) 2次試作制御基板を用いたプロトタイプモジュールの外観。(b) 2次試作制御基板を用いたプロトタイプモジュール筐体内の様子。量子部(マイクロマシンセンター開発)は、5 mm×5 mm×10 mmの石英製ガラス加工方式ガスセルを含む実験室モデルである。



図(4).11 実験室環境における2次試作制御回路基板を用いたプロトタイプモジュールの評価の様子。



図(4).12 2次試作制御回路基板を用いたプロトタイプモジュールのアラン標準偏差：緑線(2022年5月取得)、えんじ色線(2022年12月取得)、濃紺色線(2023年3月取得)である。すべて恒温槽環境にプロトタイプモジュールを設置した条件である。2023年3月のデータ取得は、VCSEL温度79.5℃、ガスセル温度60℃、単一窒素5kPaで実施した。

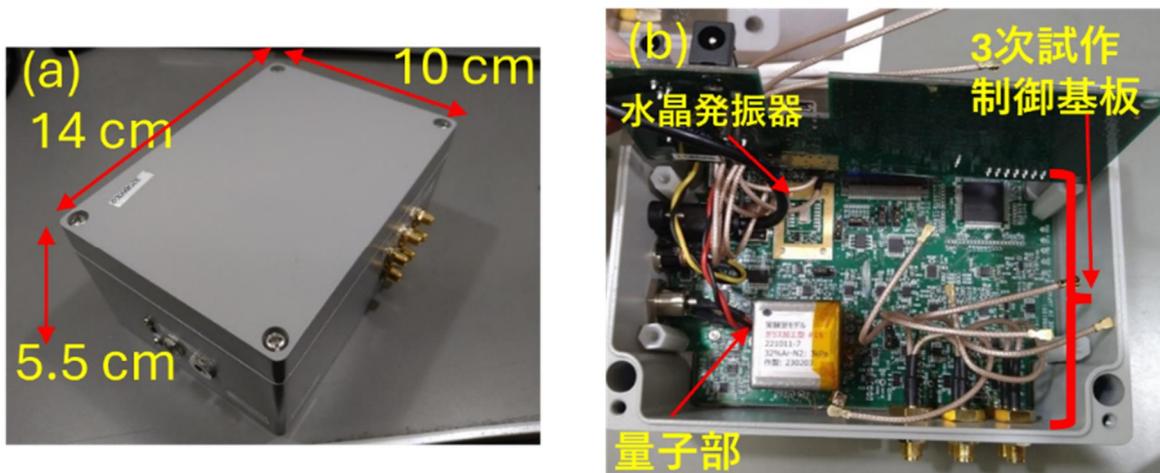
2次試作制御回路基板を用いたプロトタイプモジュールの評価結果から、短期周波数安定度の改善を見込むためには、より周波数安定度の高い10MHz標準信号出力用VCTCXOを活用することの必要性が示唆される。また、中長期における周波数安定度の改善を見込むためには、プロトタイプモジュールの動作環境をより温度が安定な状態にする必要があると推定した。3次試作では、この2点に着目し、制御回路基板試作、及びプロトタイプモジュールの試作を進めた。

図(4).13に3次試作制御回路基板を用いたプロトタイプモジュールの概要を示す。図(4).13(a)はプロトタイプモジュールの外観である。10cm×14cm×5.5cmのアルミ筐体中に評価ボードも含めた小型原子時計を構成するために必要な全コンポーネントを実装した。これにより、プロトタイプモジュールの2次試作では、本体と評価ボードの接続ヘッダピンを介して発生する可能性があった伝導熱流の影響軽減を期待する。また、制御回路基板自体にヒータ配線を施し、直接、基板温度を安定化する機能も追加した。2次試作と同様にプロトタイプモジュール内部の空間には断熱材を充足した。回路機能については、詳細な動作状況を把握、設定変更に対応するため、各種パラメータのモニタ及び制御用のI/Oポートを12個備えた。図(4).13(b)は筐体内に実装された3次試作制御回路基板、10MHz信号出力用VCTCXO、量子部等の様子を示す。10MHz信号出力用VCTCXOは実施項目(2)において株式会社大真空、により開発されたもので、 $\sigma_y(\tau=1s) < 2 \times 10^{-11}$ のアラン標準偏差がスペックされる。量子部は実施項目(3)においてマイクロマシンセンターにより開発されたもので、量子部実験室モデルである。

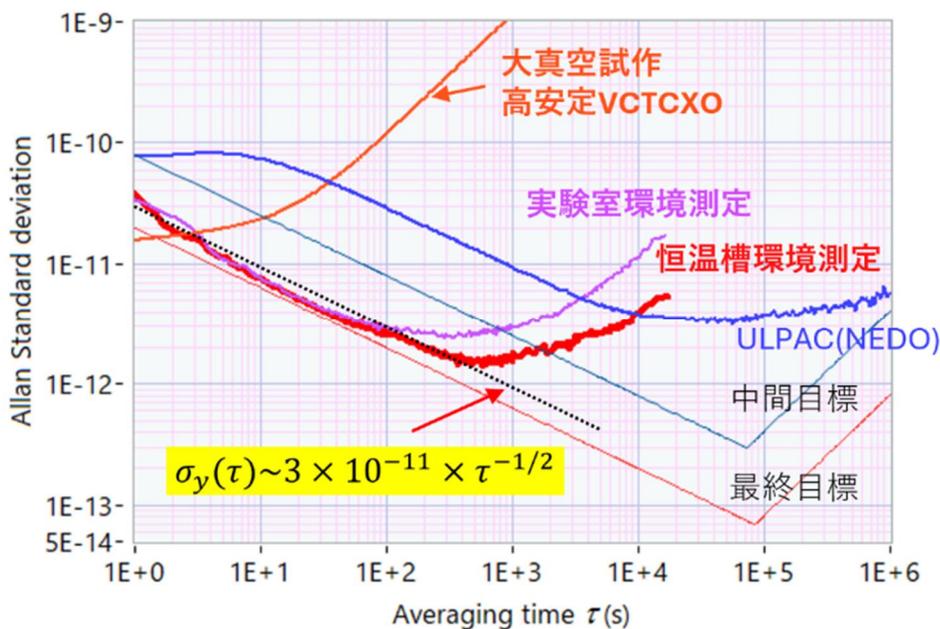
図(4).14に前述した3次試作制御回路基板を用いたプロトタイプモジュールにより取得したアラン標準偏差を示す。測定条件はVCSEL温度80.5℃、ガスセル温度60℃、アルゴン-窒素混合ガスセル圧力6kPaとし、実験室環境測定は室温25℃、恒温槽環境測定は47℃設定とした。実験室環境測定においては、平均時間1sから約100sの領域において、アラン標準偏差は $\sigma_y(\tau) \sim 3 \times 10^{-11} \times \tau^{-1/2}$ で示される白色周波数雑音特性が得られた。平均時間100s以上の領域では、白色周波数雑音特性から乖離し、平均時間10000sでアラン標準偏差 $\sigma_y(\tau) \sim 1 \times 10^{-11}$ と周波数安定度が劣化することが確認された。恒温槽環境での測定においては、平均時間1sから約400sの領域において、アラン標準偏差は $\sigma_y(\tau) \sim 3 \times 10^{-11} \times \tau^{-1/2}$ で示される白色周波数雑音特性が得られ、実験室環境よりも良好な性能が確認できた。平均時間400s以上の領域では、白色周波数雑音特性から乖離はするものの、平均時間10000sでアラン標準偏差 $\sigma_y(\tau) \sim 4 \times 10^{-12}$ が得られ、実験室環境のデータと比較すると、約2倍良好な性能が得られることが確認できた。

以上より、3次試作制御回路基板を用いたプロトタイプモジュールを用いて平均時間 $\tau < 400$ sの領

域では、最終目標に近いアラン標準偏差 $\sigma_y(\tau) \sim 3 \times 10^{-11} \times \tau^{-1/2}$ を達成した。さらに、平均時間 $\tau > 400$ sの平均時間の領域では環境温度変動による影響を軽減することで、周波数安定度が改善可能であることを示した。



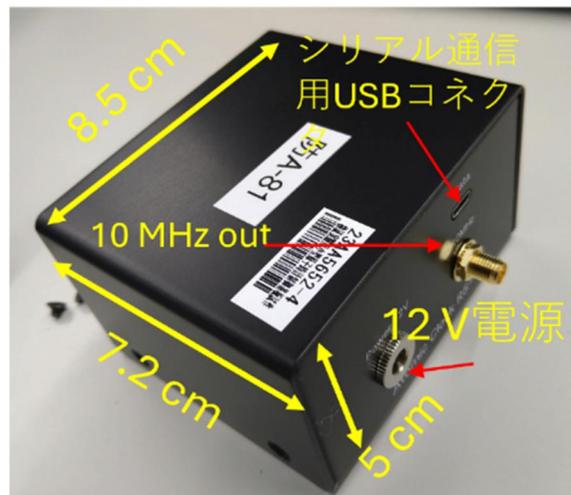
図(4).13 3次試作制御回路基板を用いたプロトタイプモジュールの概要：(a) 3次試作プロトタイプ実験室モデルの外観。(b) 筐体中に実装されている3次試作制御基板、量子部(マイクロマシンセンター開発)、水晶発振器(大真空開発)の様子。



図(4).14 実験データとして得られたプロトタイプ実験室モデルのアラン標準偏差：オレンジ線はフリーランニング水晶発振器(10 MHz 信号出力用 VCTCXO)、紫線は3次試作制御回路基板を用いたプロトタイプモジュールを実験室環境で評価した場合、赤線は同一のサンプルを恒温槽環境で評価した場合のそれぞれのアラン標準偏差を示す。

次に本方式による小型原子時計のポータビリティ性能向上(持運び性の向上)を検討するために、4次試作制御回路基板を用いたプロトタイプモジュールの試作をおこなった。主な設計の指針は、10MHz標準信号を出力するVCTCXOの周波数安定化に関わる機能を維持する一方で、それ以外のパラメータモニタ機能等の開発支援的な要素を削減し小型化を図ることである。図(4).15中にその概要を示す。

VCTCXOの周波数安定化に関わる機能は3次試作制御回路基板を用いたプロトタイプと同様の機能を持たせつつ、必要デバイスを大きさ5 cm×8.5 cm×7.2 cm(約300 cm³)の筐体内に実装した。筐体外側に接続されているコネクタは、このプロトタイプモジュールを起動させるために必要な+12V電源、シリアル通信用USBコネクタのみであり、制御回路基板から抽出している信号は10 MHz標準信号だけである。この4次試作制御回路基板を用いたプロトタイプモジュールについては、プロトタイプ全体として約4.0W(量子部が約2.0 W、水晶発振器が約50 mW、制御回路が約2.0 W)にて動作することを確認し、実施項目(5)-1-③に記載される車載実験に活用した。



図(4).15 4次試作制御回路基板を用いたプロトタイプモジュールの外観及び概要

実施項目(5) 周波数変動要因評価技術の開発

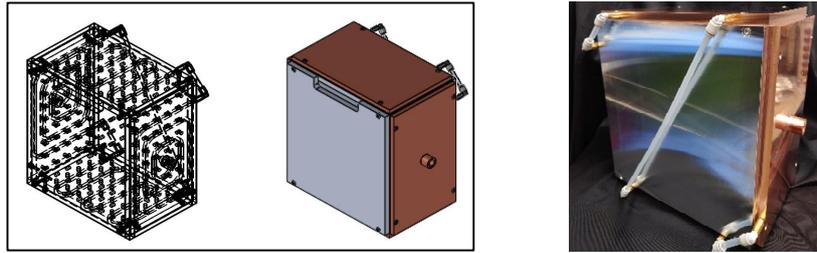
実施項目(5)-1 環境変動に対する周波数変動要因評価技術の開発

実施項目(5)-1-① 温度変動に対する周波数変動要因評価技術の開発

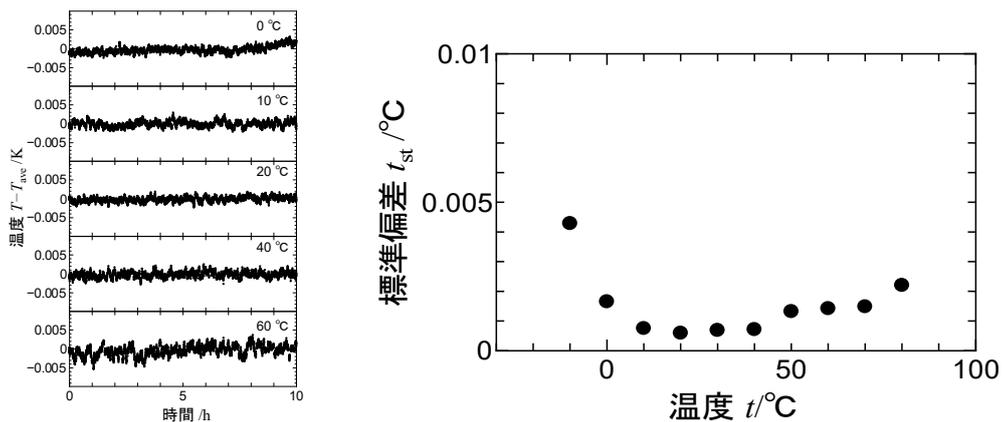
実施項目(5)-1-①-1 小型恒温槽の設計及び試作(担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

(a)小型恒温槽、および、フォトニック温度計の開発

HS-ULPACプロトタイプモジュールの温度環境変動要因評価を目的とした、10 mKオーダーの温度安定度となる1000 cm³級の小型恒温槽の開発を行った。図(5)-1-①-1.1に示すアルミ製均熱ブロックと銅製ヒートシンクを組み合わせた試作型小型恒温槽を設計・試作し、図(5)-1-①-1.2に示すように、-10 °Cから70 °Cの温度範囲において、0.01 °C以下の安定度を達成した。試作型小型恒温槽を基に、HSULPACプロトタイプモジュール評価に最適化した改良型小型恒温槽を開発し、小型原子時計の温度環境変動要因評価に貢献した。(実施項目(5)-1-①-2参照)

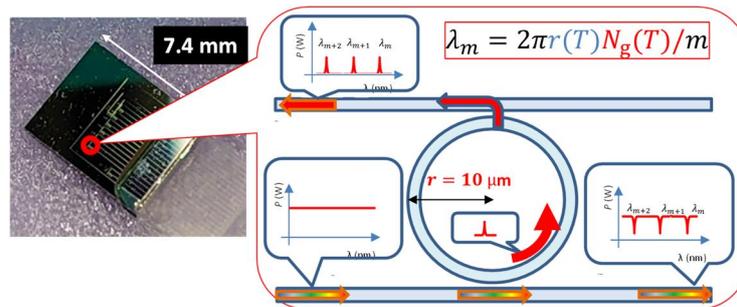


図(5)-1-①-1.1：改良型小型恒温槽の設計図（左）と写真（右）

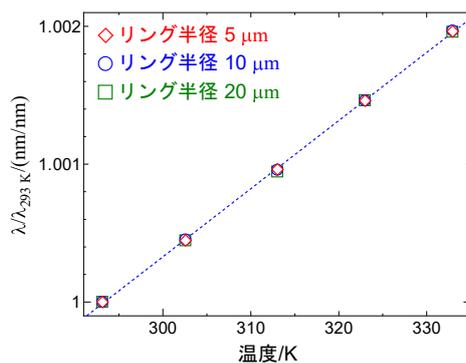


図(5)-1-①-1.2：小型恒温槽内部の温度時間依存性（左）と各温度における温度安定度（右）

また、基板上に実装可能なマイクロスケールの温度計測技術として、図(5)-1-①-1.3に示す、シリコンフォトニクス技術を用いた光共振器温度計（フォトニック温度計）の試作開発と評価を行った。異なるリング半径をもった複数のフォトニック温度計を基板上に実装し評価したところ、図(5)-1-①-1.4に示すように、共振波長を0 °Cで規格化することで、共振器のリング半径に依らずに温度計測が可能となることを明らかにした。



図(5)-1-①-1.3：試作したフォトニック温度計



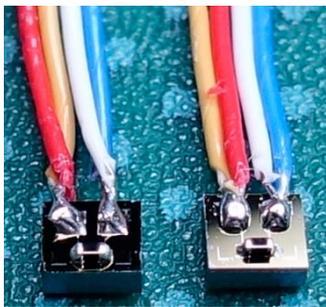
図(5)-1-①-1.4 : フォトニック温度計の共振波長温度依存性

(b)HS-ULPAC用の温度センサの評価

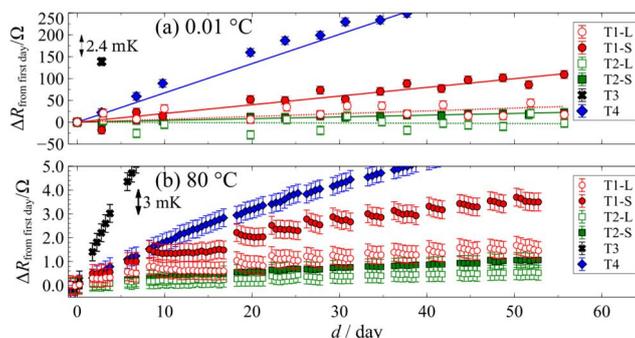
原子時計の発振周波数の安定性は、温度コントロールの精度と密接に関係している。そこで、温度制御用センサとして有力な候補であるサーミスタを、水の三重点(0.01 °C)を活用することで、高精度にその安定性の長期評価を行った。

小型原子時計にて使用予定のサーミスタチップはサイズが0.6 mm × 0.3 mm × 0.3 mmという表面実装タイプであるため、シリコン基板の上にサーミスタを実装し、基板上からリード線を引き出した(図(5)-1-①-1.5)。サーミスタチップはメーカーが異なる4種類をそれぞれ2個ずつ準備し、最終的に6個の素子进行评估した。その上で、小型原子時計で制御を行う80 °Cに設定した電気炉を準備するとともに、温度の基準である水の三重点セル(0.01 °C)を準備し、0.01 °Cと80 °Cにおいてサーミスタの抵抗値の測定を交互に行うことで、その安定性を評価した。

その結果を図(5)-1-①-1.6に示す。いずれのサーミスタチップも抵抗値がほぼ一定の割合で上昇する傾向が見られた。最も安定していた素子で、0.01 °Cでは0.4 Ω/day (≈0.6 mK/month)、80 °Cでは12 mΩ/day(≈1 mK/month)であることが分かった。



図(5)-1-①-1.5:シリコン基板に実装されたサーミスタ素子の拡大写真



図(5)-1-①-1.6 : サーミスタの繰り返し温度測定の結果。下が0.01 °C、上が80 °Cでの抵抗値の相対変化をプロットしたもの。

実施項目(5) 周波数変動要因評価技術の開発

実施項目(5)-1 環境変動に対する周波数変動要因評価技術の開発

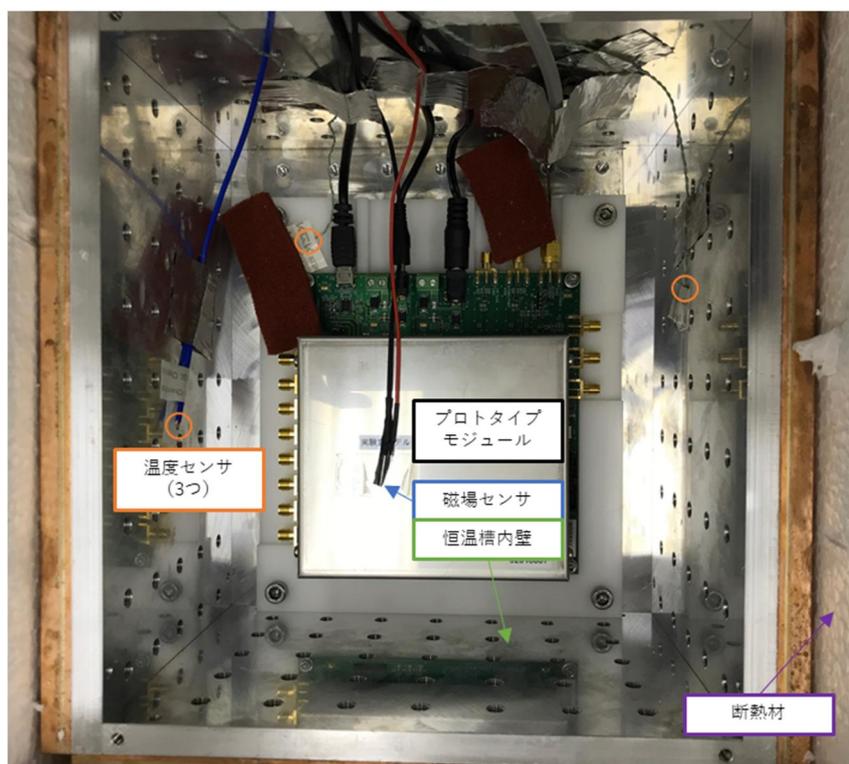
実施項目(5)-1-① 温度変動に対する周波数変動要因評価技術の開発

実施項目(5)-1-①-2 温度変動環境下での周波数変動要因評価技術の確立(担当：日本電気株式会社)

本項目では、温度変動環境下にHS-ULPACプロトタイプモジュールを静置した際の、出力周波数の変動を評価する実験に関して報告する。本項目で述べる実験結果のAI解析は実施項目(1)-4で詳述した。また、HS-ULPACプロトタイプモジュールを移動体に搭載した場合の実験及び結果に関しては、実施項目(5)-1-③-1で報告する。

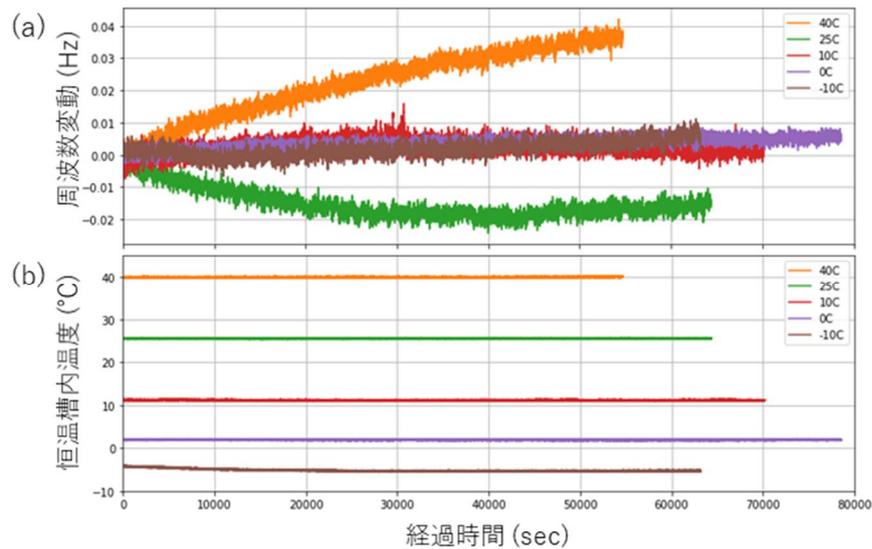
実施項目(5)-1-①-1で構築された改良型小型恒温槽を用いた温度特性評価装置にHS-ULPACプロトタイプモジュールを設置し、環境温度を変動させた場合のHS-ULPACプロトタイプモジュールの周波数安定度データを取得した。以下にその詳細を述べる。

まず、2次プロトタイプモジュールを用いた際の結果を述べる。2次プロトタイプモジュールを改良型小型恒温槽内部に固定して設置できるように、固定用ステージ等の治具を作製した。なお、これらの治具の大部分は、磁場及び振動変動環境下、ならびに車載実験においても適用した。改良型小型恒温槽内部に固定設置された2次プロトタイプモジュールの写真を図(5)-1-①-2.1に示す。2次プロトタイプモジュール本体のほか、環境データ取得のため磁場センサおよび温度センサを取り付けている。また、恒温槽本体の外側は断熱材で覆われている。改良型小型恒温槽内部の温度は、冷却水温によって制御する。 $+70^{\circ}\text{C}$ から -10°C の範囲で制御可能であるものの、低温領域に関しては、プロトタイプモジュール本体を動作した状態では -7°C 程度以下には下がらなかった。プロトタイプモジュール本体の動作時の発熱により、改良型小型恒温槽の冷却能力ではそれ以上の冷却が困難であった可能性がある。



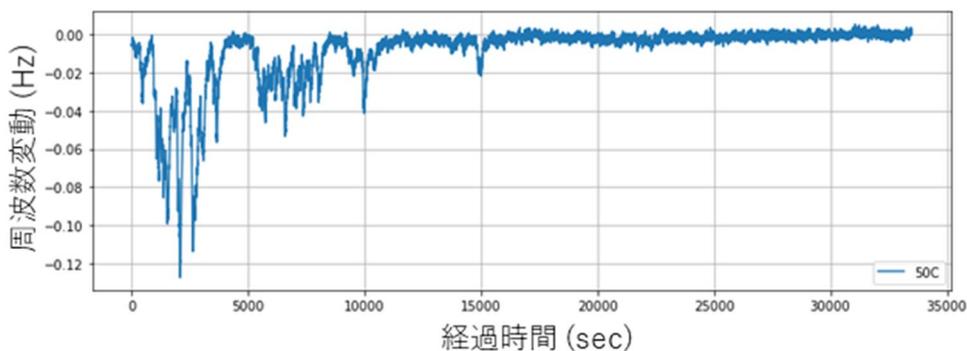
図(5)-1-①-2.1 改良型小型恒温槽内部に固定設置されたプロトタイプモジュール

以下、2次プロトタイプモジュールを用いた小型恒温槽内での周波数測定結果について述べる。恒温槽の温度を 40°C 、 25°C 、 10°C 、 0°C 、 -10°C に設定し、 5×10^4 秒以上の連続測定を行った。なお、評価に用いた2次プロトタイプモジュールは、恒温槽の温度を変更すると、出力周波数が原子共鳴にロックされた状態を維持できなくなることがあった。このため、恒温槽の温度を変更する度に、プロトタイプモジュールの照射光波長と差周波数の調整プロセスを初期状態から設定しなおして測定した。各温度に設定したときのプロトタイプモジュールの発振周波数と、温度センサで監視した恒温槽内の環境温度を図(5)-1-①-2.2に示す。



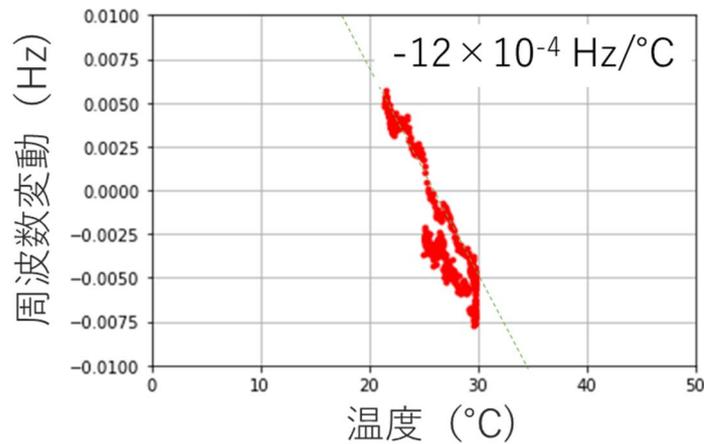
図(5)-1-①-2.2 改良型小型恒温槽内部に固定設置された2次プロトタイプモジュールの(a)出力周波数変動と(b)恒温槽内温度

まず、恒温槽内部の温度については、 -10°C に設定した場合を除いて、非常に安定している。 -10°C に設定時には、改良型小型恒温槽の冷却能力の限界まで冷やしたために、安定温度に到達するまでに3万秒弱の時間を要している。一方、出力周波数の変動を見てみると、 40°C および 25°C の測定では、より低い温度に設定しての測定と比較して、大きな周波数変動が生じることが確認された。また、恒温槽内温度を 50°C 以上に設定した場合には、プロトタイプモジュールの安定動作が実現しなかった。図(5)-1-①-2.3に、恒温槽内温度を 50°C に設定した場合のプロトタイプモジュールの出力周波数変動を示す。他の温度と比較して一桁程度大きい周波数変動が生じる時間帯があり、原子共鳴へのロックが正常に動作していないとみられる。原因として、高い環境温度下ではアルカリ金属原子が封入されたガスセルの温度が安定でない可能性があげられる。



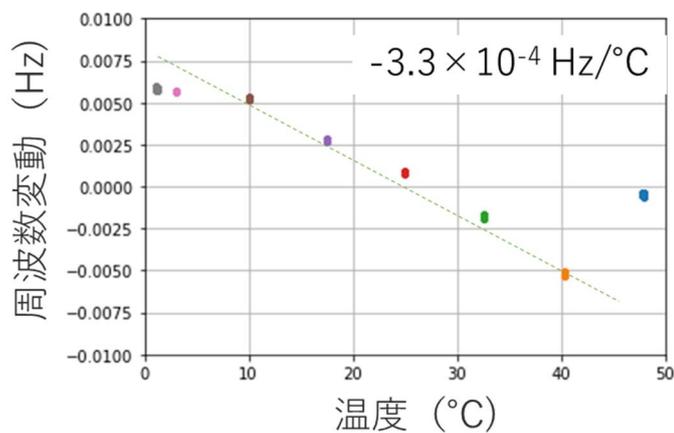
図(5)-1-①-2.3 恒温槽内温度を 50°C に設定した場合の2次プロトタイプモジュールの出力周波数変動

プロトタイプモジュールの動作中は、ガスセル温度を $60\sim 85^{\circ}\text{C}$ 程度に、VCSEL温度を $75\sim 95^{\circ}\text{C}$ 程度に安定化させる。これをしないと、原子共鳴周波数の温度シフトや光シフトが変動することになり、出力周波数が安定化されない。現状、プロトタイプモジュールにはこれらの素子の温度を制御する加温機構が備えられているが、冷却機構は備えていない。このため、外部温度がガスセルやVCSELの制御温度に近くなると、共鳴周波数シフトに由来する出力周波数の不安定化が生じると考えている。また、実施項目(5)-1-③-1にて詳述する車載実験でも、車両内での連続的な温度変動に伴って周波数変動が生じることが示された。これを図(5)-1-①-2.4に示す。温度変動に対し、 $-12 \times 10^{-4} \text{ Hz}/^{\circ}\text{C}$ 程度の周波数変動が生じた。



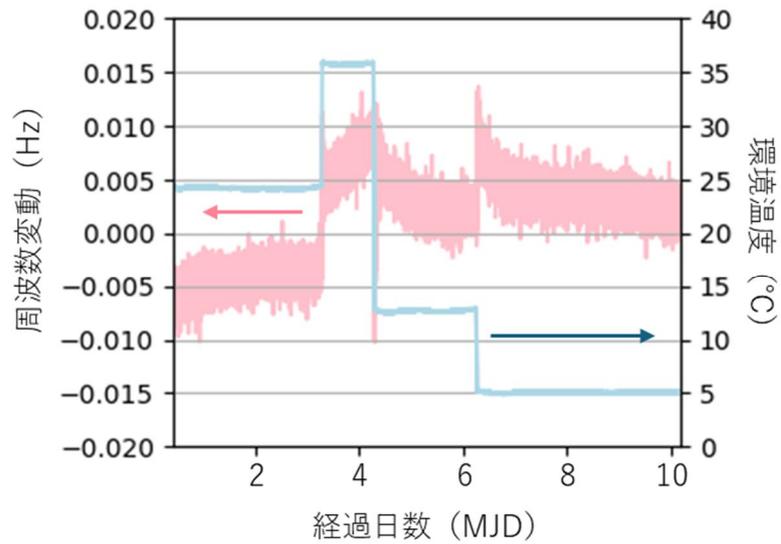
図(5)-1-①-2.4 車載実験時の温度変動に対する2次プロトタイプモジュールの出力周波数変動

続いて、同様にして2次プロトタイプモジュールを小型恒温槽内に固定した際の結果について述べる。3次プロトタイプモジュールでは、2次プロトタイプモジュールと異なり、恒温槽の温度を変更しても、出力周波数が原子共鳴にロックされた状態を維持し、連続して測定することが可能であった。温度変動に対する周波数変動特性が改善され、原子の共鳴周波数が急激に変動しなくなったと推定される。この3次プロトタイプモジュールを恒温槽内で測定した際の、恒温槽温度と出力周波数変動との対応を図(5)-1-①-2.5に示す。温度変動に対し、 -3.3×10^{-4} Hz/°C程度の周波数変動が生じた。2次プロトタイプモジュールと比較して1/4程度に変動量が抑制されていることが確認された。3次プロトタイプモジュールで実装された基板温度の安定化や、筐体素材の変更、筐体内の基板構成の変更などが寄与し、温度特性が改善されたものと考えている。



図(5)-1-①-2.5 恒温槽内実験時の温度変動に対する3次プロトタイプモジュールの出力周波数変動

続いて、4次プロトタイプモジュールを恒温槽内に固定した際の評価結果について述べる。図(5)-1-①-2.6に、36°C～5°Cの間で環境温度を変えつつ測定を行った結果を示す。周波数変動は最大で0.01 Hz程度であり、3次プロトタイプモジュールと同程度の温度特性を示すことを確認した。2次・3次プロトタイプモジュールでは、温度の低下に伴って周波数が正にシフトする傾向があった一方で、要因は明らかでないが、4次プロトタイプモジュールでは周波数のシフト方向は一様ではなかった。



図(5)-1-①-2.6 恒温槽内実験時の温度変動に対する4次プロトタイプモジュールの出力周波数変動

・最終目標を達成したか

本項目の最終目標は、「HS-ULPACを移動体に搭載し、温度変動下での周波数変動データの取得を完了するとともに取得したデータを解析し、温度特性を明らかにする」ことである。実験室内での温度環境下計測と、実施項目(5)-1-③-1に記載する車載実験を実施したことで、上記目標は達成された。

実施項目(5) 周波数変動要因評価技術の開発

実施項目(5)-1 環境変動に対する周波数変動要因評価技術の開発

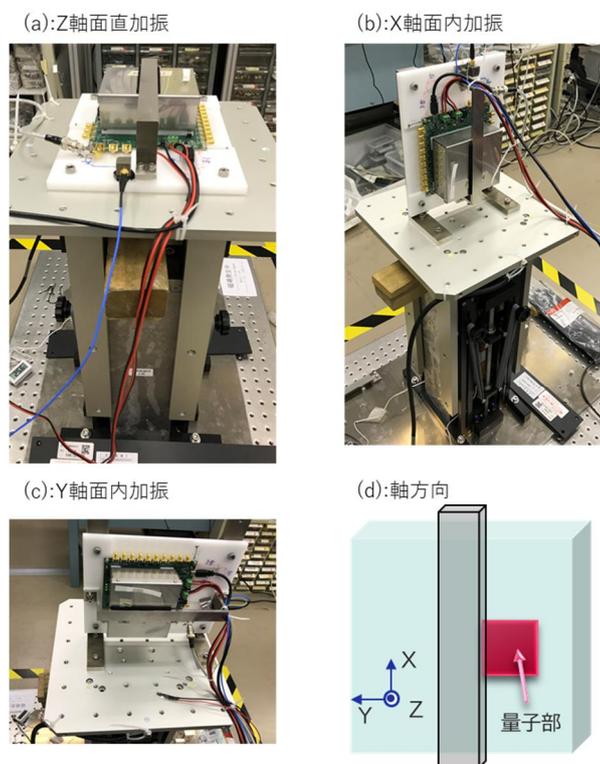
実施項目(5)-1-② 振動変動に対する周波数変動要因評価技術の開発

実施項目(5)-1-②-1 振動環境下での周波数変動要因評価技術の確立(担当：日本電気株式会社)

本項目では、振動環境下にHS-ULPACプロトタイプモジュールを設置した際の、出力周波数の変動を評価する実験に関して報告する。本項目で述べる実験結果のAI解析は実施項目(1)-4で詳述する。また、HS-ULPACプロトタイプモジュールを移動体に搭載した場合の実験及び結果に関しては、実施項目(5)-1-③-1で報告する。

以下、2次プロトタイプモジュールについて実験室内で行った振動環境下での周波数変動特性データの取得実験に関して述べる。振動特性評価装置にプロトタイプモジュールを設置し、3G以下の三軸振動環境下でのプロトタイプモジュールの周波数安定度データを取得した。要求試験範囲である周波数5~50 Hz、加速度0~3 Gの印加が可能であることを確認した振動加振機(SSV-125、サンエス社製)を用いて、プロトタイプモジュールを振動させる実験系を構築した。これを図(5)-1-②-1.1に示す。振動加振機は天板の付け替えにより、水平加振、垂直加振が可能であるが、水平加振形態では、内蔵磁石の漏れ磁場の影響が天板上の位置で大きくなることが懸念されていた。このため、プロトタイプモジュールの評価は垂直加振形態で行うこととした。プロトタイプモジュールに対して3方向からの加振を実現するため、振動加振機の天板上に固定用ステージを配置し、天板に対して水平あるいは垂直にプロトタイプモジュールを配置できるようにした。

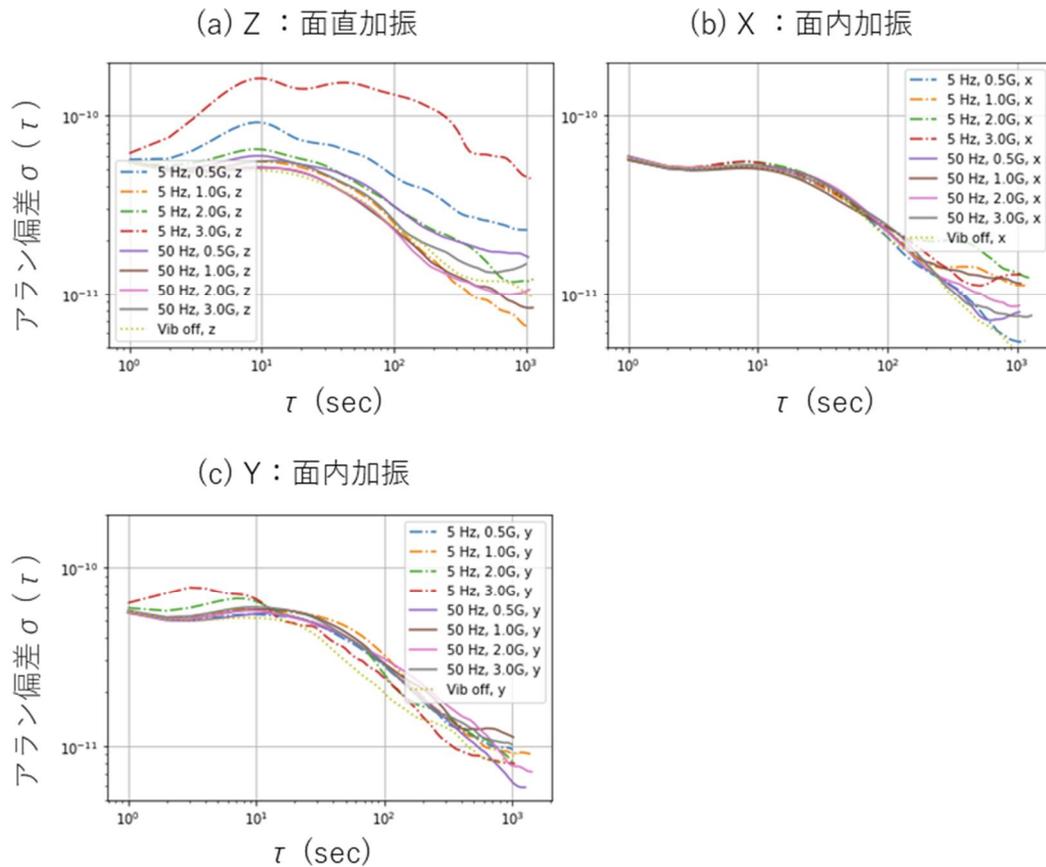
図(5)-1-②-1.1(a)から(c)に、固定用ステージを用いて振動加振機の天板上にプロトタイプモジュールを配置した様子を示す。三軸方向からの加振が行えるよう、固定用ステージは水平あるいは垂直な向きに配置された。ケーブル類は振動加振機本体や測定機器ラックに緩く固定されており、特に接続部分の振動がノイズ源になる恐れを低減した。また、固定用ステージ上には、加速度センサ(PCB GPTA02、NI社製)を設置し、加速度の出力値を取得した。振動加振機は高い入力信号で動作させた場合、内蔵コイルが発熱する。実験中はコイルの発熱が許容範囲以上にならないよう、熱電対で監視しつつ実験を行った。



図(5)-1-②-1.1 (a)-(c)振動加振機に固定用ステージを用いて据え付けたプロトタイプモジュール。写真の上下方向に振動する。(d)加振方向。

出力周波数の読出しに用いる10 MHzが流れる信号線は、ノイズ耐性の高い高周波用同軸線（RG-55/U、フジクラ社製）を用いて、実験室中に静置した位相計に接続した。位相計には参照信号として産総研の水素メーザークロックの10 MHz信号を入力しており、これと比較計測することでプロトタイプモジュールの出力周波数を評価できる。

図(5)-1-②-1.2に、三軸方向のそれぞれに振動を加えた環境下でプロトタイプモジュールの出力周波数を1万秒以上評価し、算出したアラン偏差を示す。面内方向に加振した場合には、静置した場合と比較してほぼ同等のアラン偏差が得られたのに対して、面直方向に加振した際には、いくつかの条件でアラン偏差が著しく悪化した。

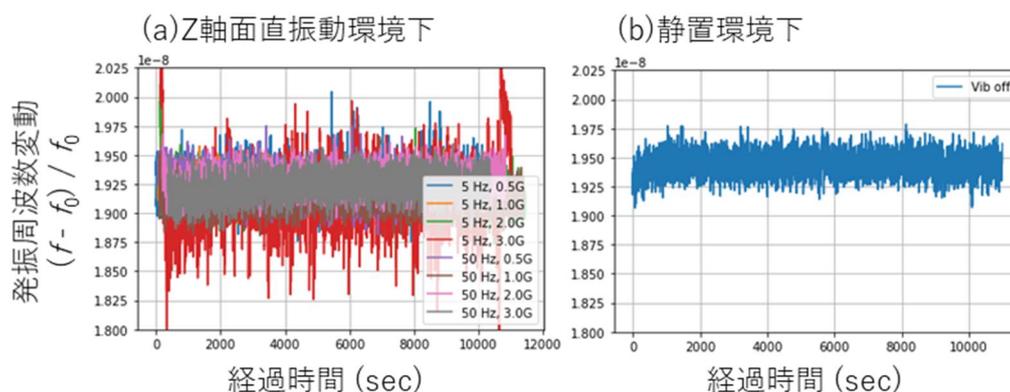


図(5)-1-②-1.2 加振環境下でのプロトタイプモジュールの出力周波数のアラン標準偏差。

面直方向に加振した際の結果を詳しく見るため、図(5)-1-②-1.3にプロトタイプモジュールの出力周波数の経時変動を示した。5 Hz、3 Gの遅く、大きい加速度の加振条件では、アラン偏差が悪化したのに加え、明確にノイズが大きくなっている。一方で50 Hzにて面直方向に加振した場合には、5 Hzの場合ほど明確には出力周波数のノイズの増大は生じていない。周波数安定度悪化の原因として、振動加振機本体から生じる磁場が影響していることが考えられる。振動加振機の加振機構には電磁石を用いており、動作時にはコイルに交流電流が印加されるため、装置周辺に磁場が発生する。この影響を評価するため、振動加振機が動作している状態での、プロトタイプモジュール固定位置での磁場を測定した。実施項目(5)-1-③-1にて議論しているが、プロトタイプモジュールの出力周波数に大きく影響しうるのは、プロトタイプモジュールの面直方向にかかる磁場である。このため、各方向での加振時の、プロトタイプモジュールの面直方向に係る磁場を測定した。この結果を表(5)-1-②-1.1に示す。

プロトタイプモジュールの面直方向の磁場変動量は、加振方向を面直にとった場合に最も大きくなる。また、加振周波数が5 Hzである場合と50 Hzである場合とで比較すると、5 Hzである場合により大きな面直磁場変動が生じる。加振方向による差異については、電流印加するコイルの軸方向に最も大きな磁場変動が起こると理解できる。また、加振周波数に関しては、同一の加速度を得るには周波数が低い方が大きな振幅が必要になるため、コイルにより近接することになる。以上の検討は、5 Hz、3 GでZ軸方向に加振した際に、プロトタイプモジュールの

出力周波数の変動が最も大きくなったことと整合する。



図(5)-1-②-1.3 面直加振環境下および静置環境下でのプロトタイプモジュールの出力周波数の経時変動。

表(5)-1-②-1.1 三軸の各方向への加振を行った際の、プロトタイプモジュールの面直方向にかかる磁場の変動量。

設置方向	面直磁場変動(μT) 5 Hz / 50 Hz
X : 面内加振	39.6 \pm 1.2 / 8.2 \pm 1.7
Y : 面内加振	11.3 \pm 1.3 / 5 \pm 2
Z : 面直加振	103.9 \pm 1.4 / 34 \pm 4

本項目の最終目標は、「HS-ULPACを移動体に搭載し、振動環境下での周波数変動データの取得を完了するとともに取得したデータを解析し、振動特性を明らかにする」ことである。実験室内での振動環境下計測と、実施項目(5)-1-③-1に記載する車載実験を実施したことで、上記目標は達成された。

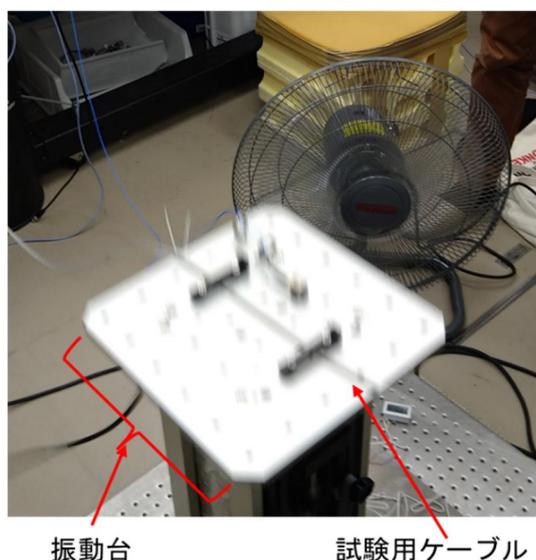
実施項目(5) 周波数変動要因評価技術の開発

実施項目(5)-1 環境変動に対する周波数変動要因評価技術の開発

実施項目(5)-1-② 振動変動に対する周波数変動要因評価技術の開発

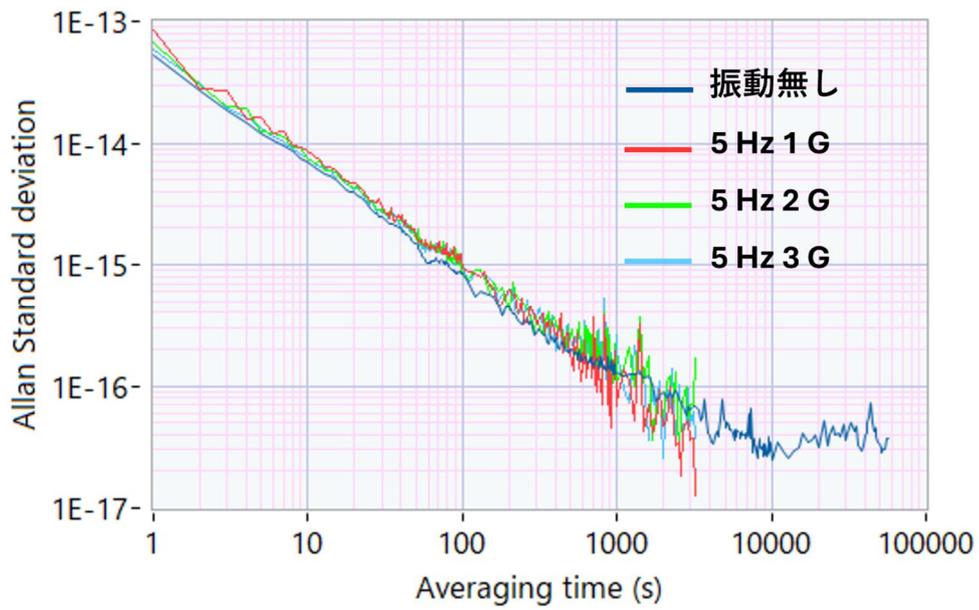
実施項目(5)-1-②-2 振動環境下での周波数変動要因評価技術の確立(担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

本プロジェクトでは、HS-ULPACプロトタイプモジュールを振動環境下で評価する必要がある。評価対象となるDUT(Device Under Test)の振動環境下での特性を正確に測定するためには、測定システムの校正測定能力を知ることが重要である。測定システムの校正測定能力を制限する主な要因は固定測定システムと振動試験装置の間に接続される同軸ケーブルが原因であると推定される。本実施項目では、振動環境がアラン標準偏差に与える影響を調査した。具体的にはケーブル振動による影響でその測定能力の劣化状況、すなわち付加される雑音の様子を実験的に調べた。図(5)-1-②-2.1はケーブルに振動を与える環境を示す。試験用ケーブルは、加振装置となっている振動台に固定され、最終的に別所に固定される測定器へ接続された。測定器のコネクターに衝撃が加わった場合は、明らかな付加雑音が観測されたため、振動環境はその影響を排除するよう設定した。加振装置により周波数5 Hz、50 Hzで加速度1 G、2 G、3 Gで振動を与えた。ここで、1 Gは約 9.8 m/s^2 の標準重力加速度である。

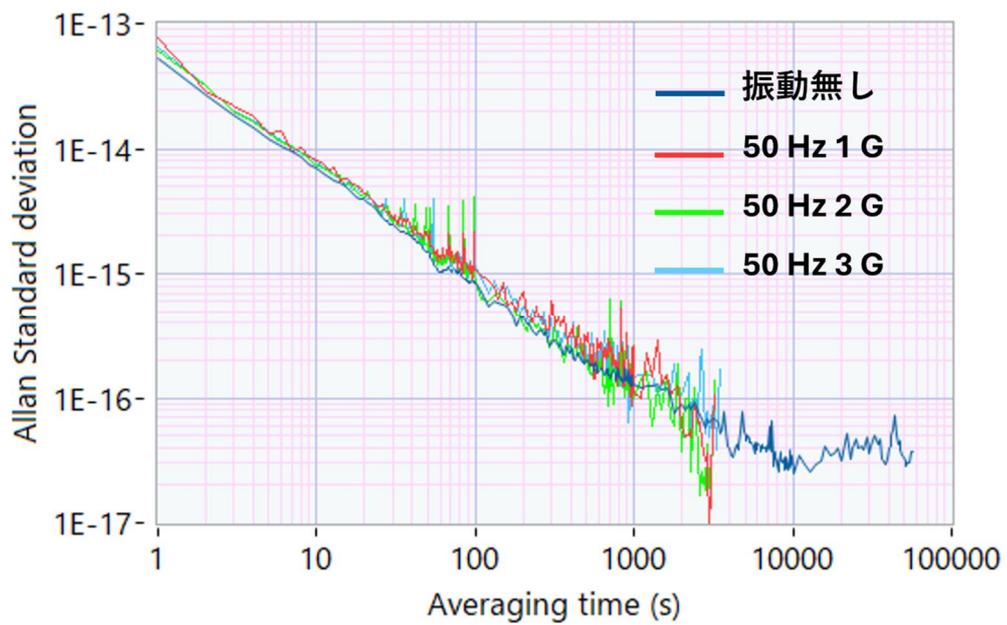


図(5)-1-②-2.1 振動台による試験用ケーブルの加振状態

5 Hz の場合の測定結果を図(5)-1-②-2.2、50Hz の場合の測定結果を図(5)-1-②-2.3 に示す。それぞれ、振動無し、振動環境下(5 Hz、50 Hz)における 1 G、2 G、3 G のアラン標準偏差を示す。振動の周波数 5Hz、50Hz で、1 G の加速度が与えられた場合、平均時間 1 s から 10 s の領域で若干の付加雑音増加が観測された。また、平均時間 1000 s 付近でのスプリアスの付加雑音増加も観測された。一方で、アラン標準偏差の記述に用いられる冪乗ノイズ特性はいずれの振動環境下においても、振動無しの条件と同等の測定能力であることが確認できた。若干の付加雑音増加分も平均時間 1 s で 10^{-13} 以下のレベルであるため、開発している小型原子時計プロトタイプの性能評価には影響がないものと考えられる。



図(5)-1-②-2.2 5 Hz の加振状態におけるアラン標準偏差



図(5)-1-②-2.3 50 Hz の加振状態におけるアラン標準偏差

実施項目(5) 周波数変動要因評価技術の開発

実施項目(5)-1 環境変動に対する周波数変動要因評価技術の開発

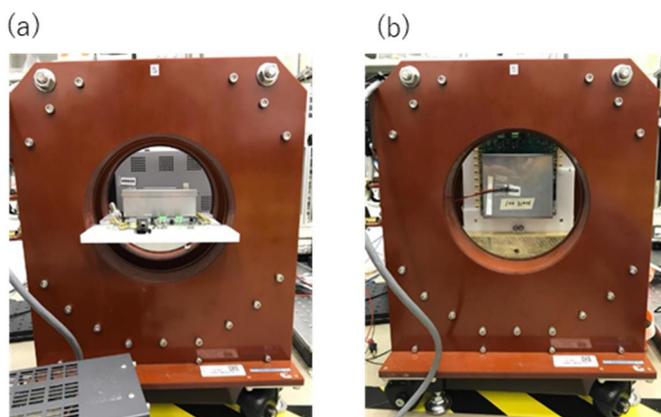
実施項目(5)-1-③ 磁場変動に対する周波数変動要因評価技術の開発

実施項目(5)-1-③-1 磁場環境下での周波数変動要因評価技術の確立(担当：日本電気株式会社)

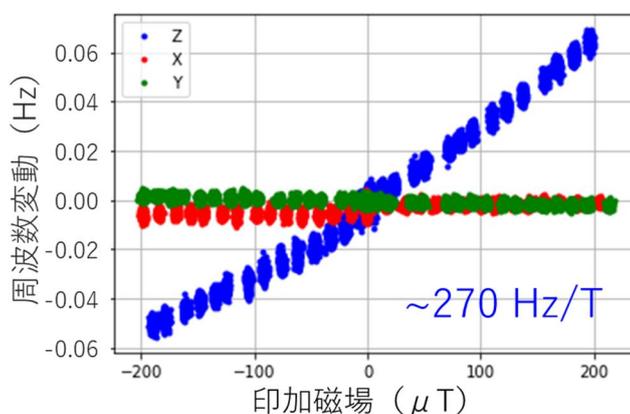
本項目では、磁場変動環境下にHS-ULPACプロトタイプモジュール(以下プロトタイプモジュールと記載)を静置した際の、出力周波数の変動を評価する実験に関して報告する。本項目で述べる実験結果のAI解析は実施項目(1)-4で詳述する。また、プロトタイプモジュールを移動体に搭載した場合の実験及び結果に関しても、本項目で報告する。

(a)磁場変動環境下での周波数データ取得実験

実験室環境にて磁場特性評価装置にプロトタイプモジュールを設置し、200 μT までの直流磁場及び50 Hz以下の周波数の交流磁場を三軸方向に印加した場合のプロトタイプモジュールの周波数安定度データを取得した。位相計53100Aを用いて、産総研の標準信号であるUTC-NMIJを参照信号として、プロトタイプモジュールの周波数計測をおこなった。三軸方向への磁場の印加は、図(5)-1-③-1.1に、一軸磁場発生装置の磁場発生位置にプロトタイプモジュールを設置した様子を示す。プロトタイプモジュールの評価ボードを据え付けられるよう、専用の固定用治具を設計した。紙面の面直方向に磁場が印加されるため、(a)の配置ではプロトタイプモジュールに対して面内方向の、(b)の配置では面直方向の磁場が、それぞれ印加される。直流磁場の印加は、磁場発生装置に直流電流をかけることで実現した。直流電流の極性を入れ替えることで、正あるいは負の直流磁場を印加した。印加磁場は-200 μT から+200 μT の範囲で設定し、各設定磁場におけるプロトタイプモジュールの出力周波数を時系列データとして取得した。図(5)-1-③-1.2に、2次プロトタイプモジュールについての、印加直流磁場と出力周波数の変動の対応を示す。



図(5)-1-③-1.1 磁場変動環境下での2次プロトタイプモジュールの周波数評価用の実験装置。(a)面内磁場配置(b)面直磁場配置

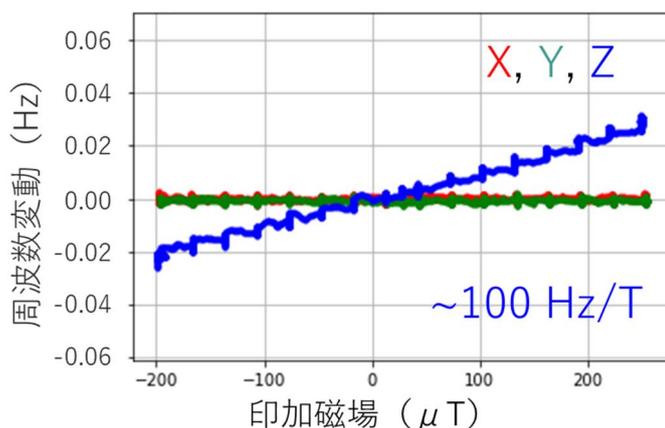


図(5)-1-③-1.2 直流磁場印加時の2次プロトタイプモジュールの出力周波数の変動。

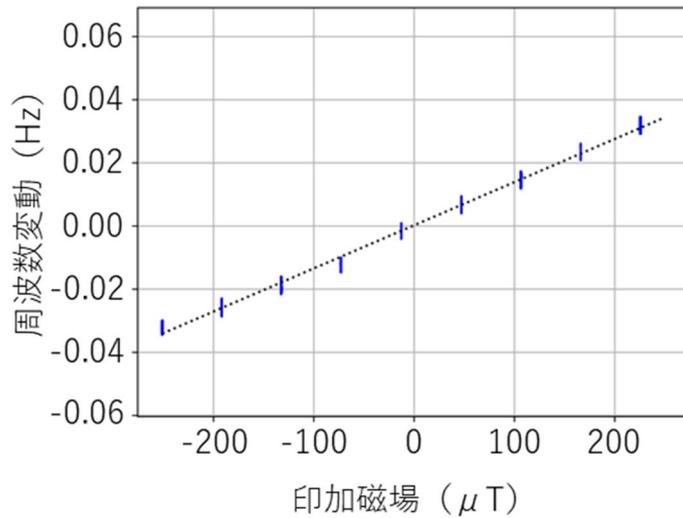
X,Yは面内方向、Zは面直方向である。面直方向に直流磁場を印加した場合には、磁場に対してほぼ線形な出力周波数のシフト（270 Hz/T）が生じた。一方で、面内磁場を印加した場合には、周波数変動が比較的小さい。この結果は、セシウム原子準位のゼーマンシフトから説明できる。プロトタイプモジュール内部では面直方向に光路がとられており、面直磁場配置では光軸と平行な磁場が印加される。この時、発振周波数の基準として検出される(0,0)共鳴周波数は、印加磁場に応じてシフトする。この周波数シフトは光軸と平行な磁場に応じて生じるものであり、光軸と垂直な向きの磁場ではシフトしない。（ただし、光軸と垂直な向きに磁場があると、磁気副準位のミキシングが生じて共鳴信号強度が変動する可能性はある。）以上から、面直方向に磁場を印加した場合にのみ、大きな周波数シフトが生じたことが理解できる。類似の傾向は、予め実施した市販小型原子時計SA.45sの評価でも確認されていた。面内方向に磁場を印加した場合の小さな周波数シフトは、磁場とプロトタイプモジュールのミスアラインメントに由来する可能性がある。

次に、3次プロトタイプモジュールでの結果を図(5)-1-③-1.3に示す。3次プロトタイプモジュールにおいても面直磁場による周波数シフトが生じることが確認できたものの、シフトの大きさ（100 Hz/T）は2次プロトタイプモジュールと比較して抑制されていることが示された。また、4次プロトタイプモジュールでの試験では面直磁場に対する周波数シフトは137 Hz/T程度であった。4次プロトタイプモジュールでの結果を図(5)-1-③-1.4に示す。この結果から、3次プロトタイプモジュールおよび4次プロトタイプモジュールにおいては、磁場変動の影響を受けにくい構造を有しているといえる。2次プロトタイプモジュールと3次プロトタイプモジュール、4次プロトタイプモジュールでは磁気シールドの形状（空孔の大きさ）が異なっており、このシールド形状の改善が磁場特性の改善に寄与したと考えている。また、静磁場シミュレーションから、シールドの嵌め込みの微小なズレによって面直磁場の遮蔽性能が変わりうることを示されている。3次プロトタイプモジュールと4次プロトタイプモジュールでの周波数シフトの違いは構成時の個体差に由来するものと考えている。

一方、参照用に測定した市販小型原子時計SA.45sでは、面直磁場による周波数シフトは1.3 Hz/T程度であった。SA.45sは装置外装を密閉してシールドしており、磁場に対する耐性を向上させるには類似の構成を取る必要があると考えている。本研究でのプロトタイプモジュールでは内部の改良を都度施すことを想定していたために、開閉が比較的容易な構造を取ることに重きを置いていた。

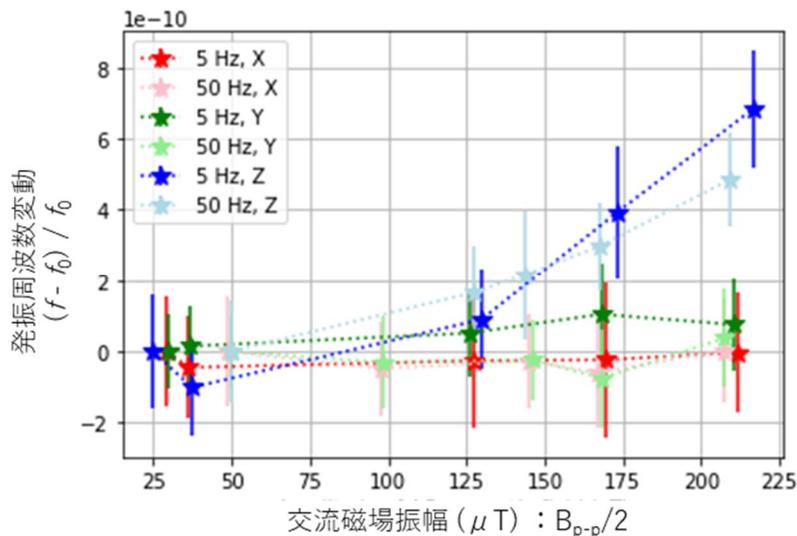


図(5)-1-③-1.3 直流磁場印加時の3次プロトタイプモジュールの出力周波数の変動。



図(5)-1-③-1.4 直路面直磁場印加時の4次プロトタイプモジュールの出力周波数の変動。

続いて、交流磁場を印加した時の実験結果に関して述べる。交流磁場は、磁場発生装置に交流電流をかけることで発生させた。交流電流の生成は、振動装置の駆動に用いた装置群を用いて行った。交流磁場の周波数は5 Hzあるいは50 Hzとし、また交流磁場のピーク間強度は最大で400 μTとした。図(5)-1-③-1.5に、印加交流磁場と出力周波数の変動の対応を示す。面直方向に交流磁場を印加した場合に、出力周波数の変動が生じることが明らかになった。ただし、変動の大きさは直流磁場印加時と比較して1/10程度である。一方、面内方向に交流磁場を印加した場合には、明確な周波数変動は見られなかった。先に述べたゼーマンシフトは直流磁場に対して起こるものであるため、交流磁場印加時の周波数シフトは説明できない。プロトタイプモジュール内部あるいは周辺で磁化するものがあった場合には、間接的に磁場の影響を受ける可能性はある。



図(5)-1-③-1.5 交流磁場印加時の2次プロトタイプモジュールの出力周波数の変動。

(b) 車載環境下での周波数データ取得実験

プロトタイプモジュールを移動体（自動車）に積載し、自動車運転中の出力周波数を取得する実験を行った。図(5)-1-③-1.6に、自動車に積載する装置の全体写真を示す。積載中は、最下段の充電電池から全装置に電源供給する。周波数測定のため、位相計53100Aを積載した。

位相計53100Aでは、1つの参照信号入力に対し、3つの被試験体の周波数を並行して計測することが出来る。被試験体として、市販小型原子時計SA.45sあるいはプロトタイプモジュールを設置した。また、これらより十分高精度な参照用の信号供給源として、据置型の原子時計OSA3300を用いた。被試験体の周囲での環境変動をモニターするため、温度センサ、磁場センサおよび加速度センサをそれぞれ設置した。以上、周波数データと各種環境データを取得するシステムを構築し、車両内に設置したノートPCでデータ収集することとした。上記の装置群のうち充電電池と測定PCを除くすべてを、棚板上に固定し、図(5)-1-③-1.7に示すように棚全体を車両底面に固定することで、自動車への積載を完了した。この状態での自動車走行実験を、令和5年6月、令和5年12月の計2回実施した。1回目の6月車載実験では、市販品SA.45sと2次プロトタイプモジュールを被試験体とし、2回目の12月車載実験では、市販品SA.45sと3次プロトタイプモジュール、4次プロトタイプモジュールを被試験体とした。



図(5)-1-③-1.6 車載実験に用いた積載装置一式

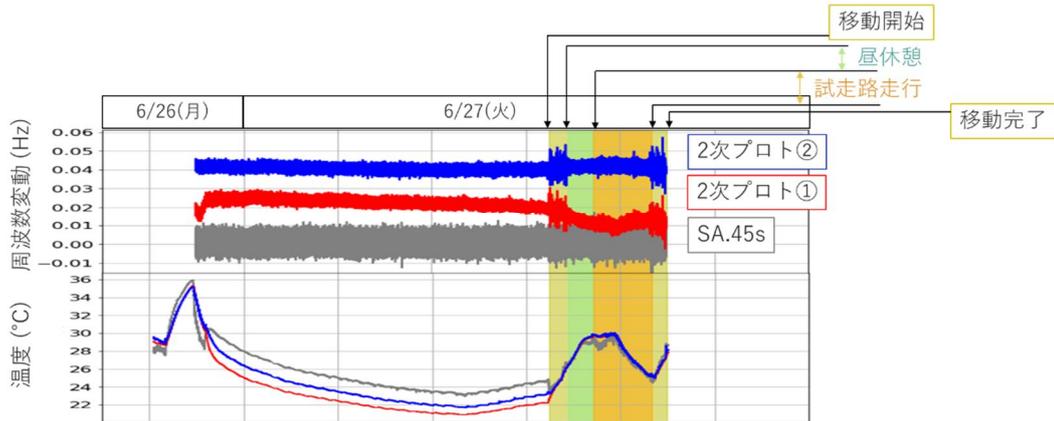


図(5)-1-③-1.7 車載時の装置一式

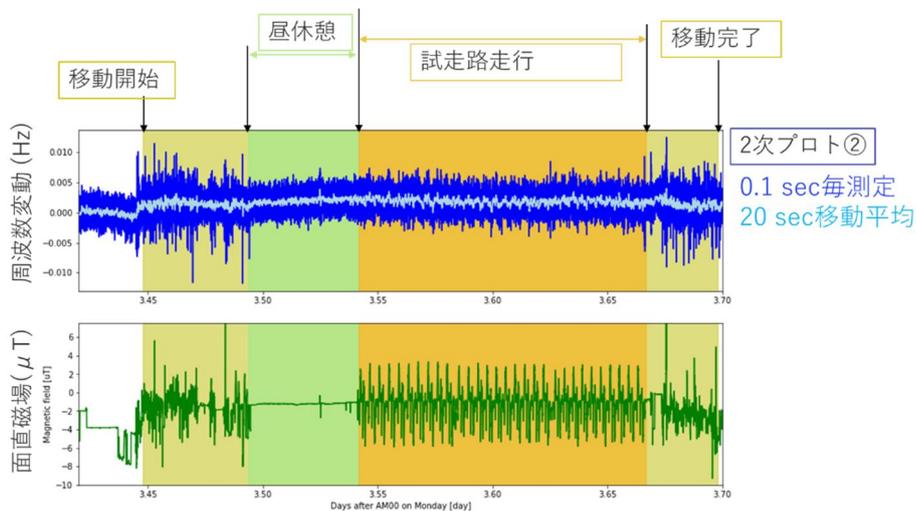
自動車走行実験では、産総研つくば北サイト内の試走路（一周3.2 km）を、時速30 km程度で10000秒（~3時間）走行し、その間の被試験体の出力周波数を取得した。6月の車載実験で得た周波数データと温度データの一例を、図(5)-1-③-1.8に示す。詳細な解析結果は実施項目(1)-4で記述しているが、2次プロトタイプモジュールでは出力周波数が環境温度と相関があることが示された。

また、試走路走行中の2次プロトタイプモジュールの周波数変動と面直磁場計測値を図(5)-1-③-1.9に示す。詳細な解析結果は実施項目(1)-4で記述しているが、面直磁場変動に応じて周波数変動する様子がある。これらの温度、磁場に対する応答は、実験室内で行った環境変動実験の結果と矛盾しないものであるといえる。すなわち、環境温度と面直磁場の変動は、2次プロ

トタイプモジュールの出力周波数変動と相関がある。



図(5)-1-③-1.8 1回目の車載実験時の2次プロトタイプモジュール・SA.45sの周波数および温度データ

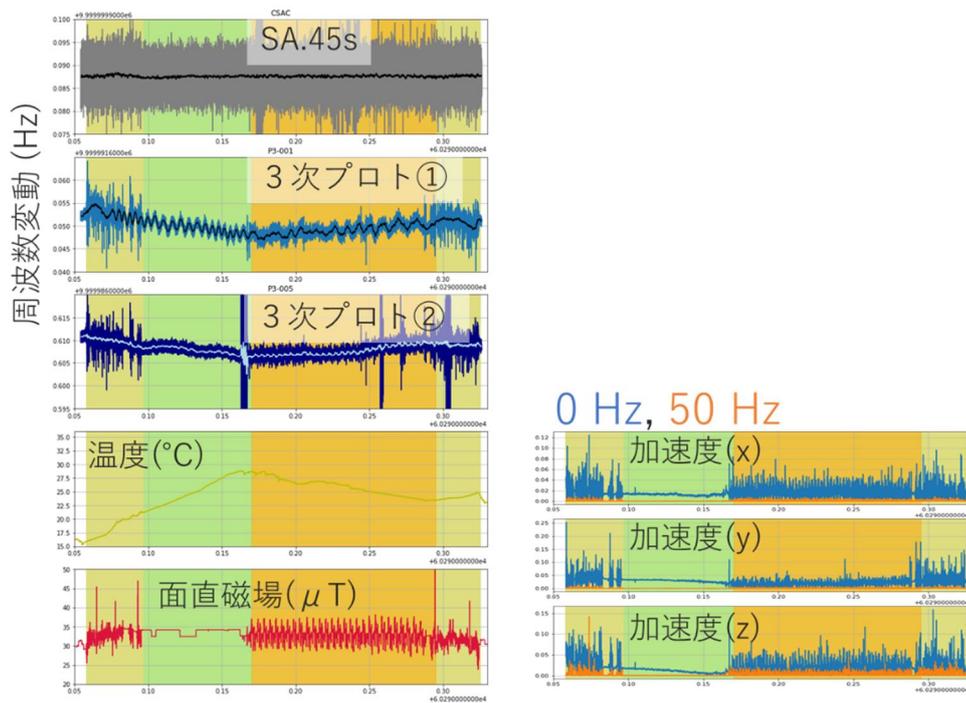


図(5)-1-③-1.9 1回目の車載実験時の2次プロトタイプモジュールの周波数および磁場データ

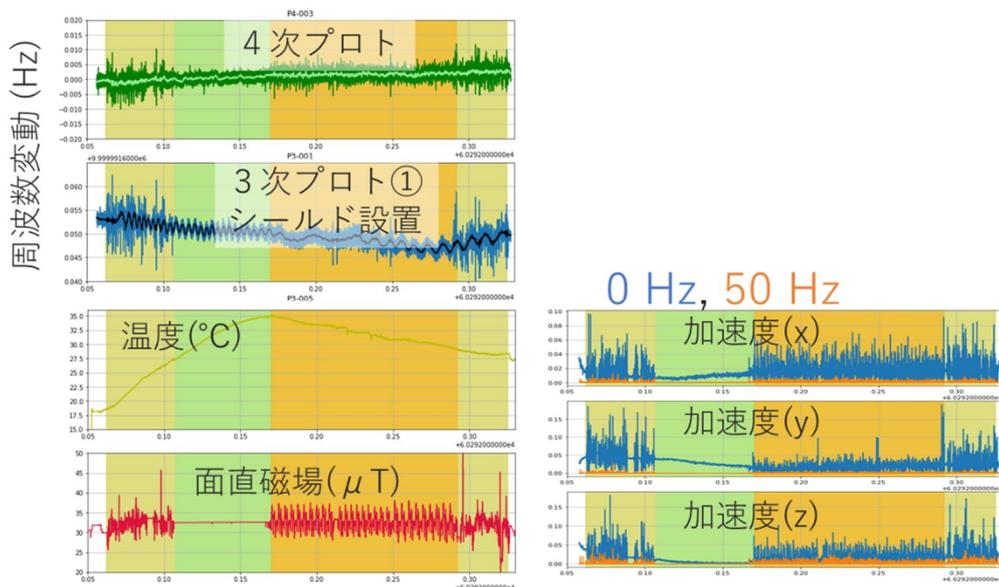
次に、12月に実施した2回目の車載実験の結果を示す。図(5)-1-③-1.10に、SA.45sと3次プロトタイプモジュールの出力周波数と、温度、面直磁場、加速度データを示す。詳細な解析結果は実施項目(1)-4で記述しているが、3次プロトタイプモジュールでも、出力周波数が環境温度にある程度相関している。2回目の車載実験時には、被試験体を次記のように変更しての走行実験も行った。3次プロトタイプモジュールのうち1基の周辺を断熱材で覆い、その外からパーマロイ製の磁場遮蔽装置を設置した。また、4次プロトタイプモジュール1基を被試験体とした。この結果を図(5)-1-③-1.11に示す。

4次プロトタイプモジュール及び磁場遮蔽装置を設置した3次プロトタイプモジュールは、環境温度の変動に対する応答がより低減されている。4次プロトタイプモジュールでは装置の小型化が進められたため、温度変動の影響を受けにくい周波数発振が実現されたものと考えている。また、磁場遮蔽装置を設置した3次プロトタイプモジュールの結果から、装置の構造改善によって環境変動に対する周波数変動を抑制することが可能であることが示唆された。

本項目の最終目標は、「HS-ULPACを移動体に搭載し、磁場変動下での周波数変動データの取得を完了するとともに取得したデータを解析し、磁場特性を明らかにする」ことである。実験室内での磁場印加実験と車載実験を実施したことで、上記目標は達成された。



図(5)-1-③-1.10 2回目の車載実験時のSA.45sと3次プロトタイプモジュールの周波数および温度、面直磁場、加速度データ



図(5)-1-③-1.11 2回目の車載実験時の3次プロトタイプモジュール（磁気シールド・断熱材設置後）、4次プロトタイプモジュールの周波数および温度、面直磁

実施項目(5) 周波数変動要因評価技術の開発

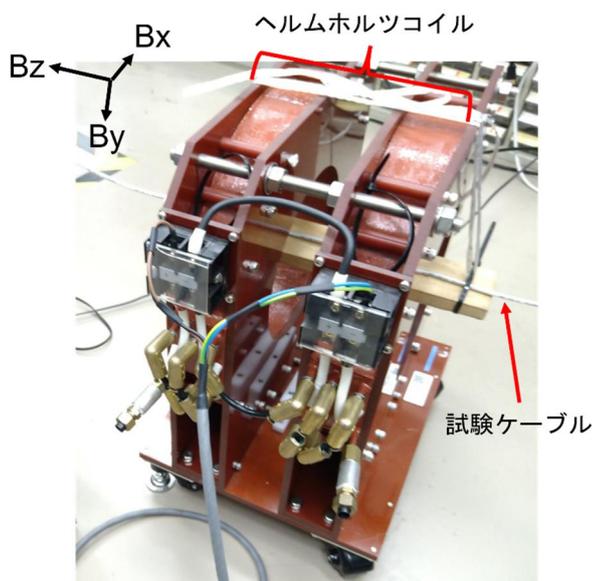
実施項目(5)-1 環境変動に対する周波数変動要因評価技術の開発

実施項目(5)-1-③ 磁場変動に対する周波数変動要因評価技術の開発

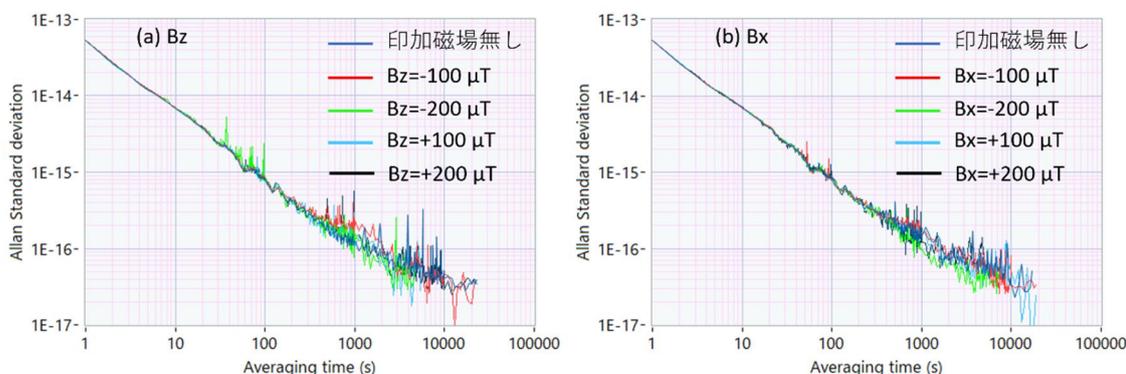
実施項目(5)-1-③-2 磁場環境下での周波数変動要因評価技術の確立(担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

前述した実施項目(5)-1-②-2と同様に、評価対象となるDUT(Device Under Test)の磁場環境下での特性を正確に測定するためには、測定システムの測定能力を知ることが重要である。本実施項目では磁場環境が及ぼす影響について試験的な調査を行った。具体的にはケーブルに印加される直流・交流磁場の影響でその測定能力の劣化状況、すなわち付加される雑音の様子を実験的に調べた。

図(5)-1-③-2.1 にヘルムホルツコイルを用いた磁場印加環境を示す。試験ケーブルは写真に示した磁場印加環境を経由し、周波数変動を観測する測定器に接続された。ケーブルにおいて信号の伝搬方向を B_z とし、垂直方向(ex. B_x)の印加磁場の影響を観測する場合は、写真の事例から垂直にケーブルを配置した。図(5)-1-③-2.2 に直流磁場を印加した際に観測されたアラン標準偏差を示す。比較のために印加磁場無しのアラン標準偏差も共にプロットしている。印加磁場の大きさはヘルムホルツコイルに接続している電源電流の大きさ及び極性を変更することで、 B_z 、 B_x をそれぞれ $\pm 100 \mu\text{T}$ 、 $\pm 200 \mu\text{T}$ と設定している。印加磁場無しの場合と比較した場合、特定の平均時間においてスプリアス的なノイズが付加されている事例もある。一方、アラン偏差の記述に用いられる冪乗ノイズ特性は全ての条件においてほぼ一致し、同等の測定能力を有すると考えられる。



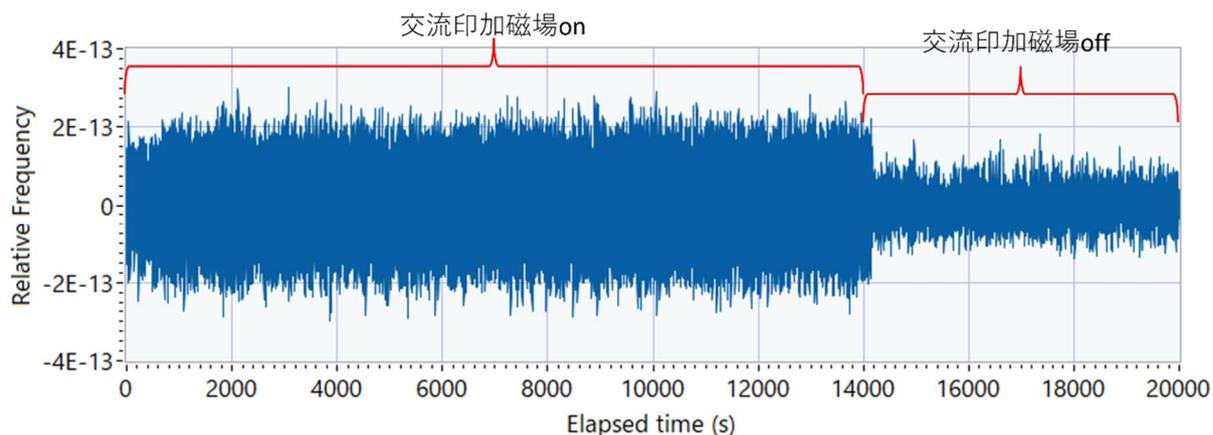
図(5)-1-③-2.1 ヘルムホルツコイルを用いてケーブルに磁場を印加している様子



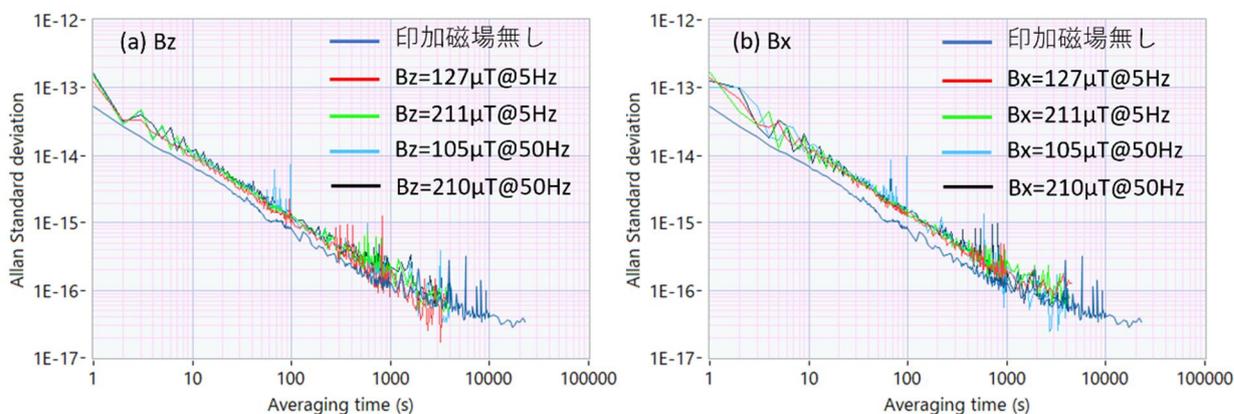
図(5)-1-③-2.2 (a) B_z 、(b) B_x 方向に直流磁場を印加した状態におけるアラン標準偏差

次に、交流磁場印加時の測定能力を調べた。図(5)-1-③-2.3 は、交流磁場を印加した際に観測された周波数変動の時系列データである。交流磁場の条件は、磁場強度 $B_z=210 \mu\text{T}$ 、周波数 50 Hz であった。

約 20000 s の観測期間のうち、14000 s 程度は交流磁場がオンであり、残りの 6000 s 程度は交流磁場がオフの測定データである。交流磁場オンの時は peak-to-peak の雑音レベルは 4×10^{-13} であるのに対し、交流磁場オフの時は凡そこの半分程度の雑音レベルであった。直流磁場のケースと比較して、交流磁場の場合は明らかに印加磁場の有無で周波数変動のノイズレベルに差異が観測された。図(5)-1-③-2.4 に B_z 、 B_x 方向にいくつかの振幅を持つ交流磁場を印加した場合のアラン標準偏差を示す。交流磁場の周波数は 5 Hz と 50 Hz の 2 種類である。これらの測定結果は交流磁場の振幅や周波数に関わらず、交流磁場の有無で同様の差異が観測された。具体的には、アラン偏差の記述に用いられる冪乗ノイズ特性は印加磁場無しの場合と比較して、印加磁場がある場合は 2 倍程度であり、測定能力は劣化していた。但し、劣化の程度は平均時間 1 秒で 10^{-13} のレベルであり、総じて開発している小型原子時計プロトタイプのパフォーマンスには影響がないと結論付ける。



図(5)-1-③-2.3 $B_z=210$ mT、周波数 50 Hz の交流磁場印加時の周波数変動



図(5)-1-③-2.4 (a) B_z 、(b) B_x 方向に交流磁場を印加した状態におけるアラン標準偏差

実施項目(5) 周波数変動要因評価技術の開発

実施項目(5)-2 高精度ライトシフト変動要因評価技術の開発

実施項目(5)-2-① 孤立状態原子生成用のデバイスの設計、試作及び評価(担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

・小型MEMS真空計の設計・作成・評価

10^{-6} Paまでの真空度を計測出来る小型化イオンポンプを開発し、 10^{-6} Paの超高真空ガスセルを実現した。

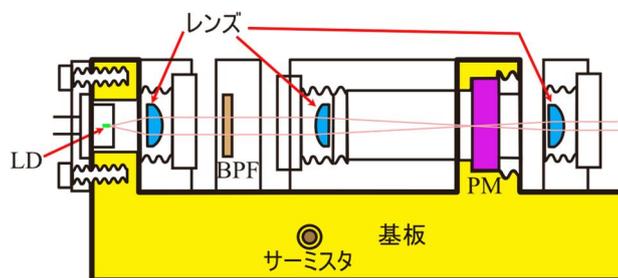
・外部共振器半導体レーザの試作と評価

ライトシフト評価装置で用いるための孤立状態セシウム原子生成用の波長852 nm (D2線) のレーザ2台と、coherent population trapping (CPT)共鳴用の波長894 nm (D1線) のレーザ2台を試作した。ライトシフト評価では環境温度を変えながら測定するため、恒温槽内に導入できるように小型化することと、広い環境温度範囲においてセシウム原子の共鳴に同調させられることが必要となる。

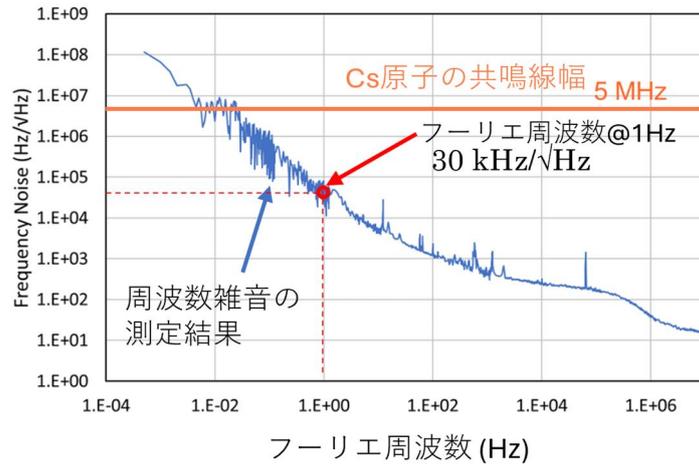
レーザは以前から開発してきた外部共振器半導体レーザ(ECDL)である。このECDLは図(5)-2-①.1に示すように、レンズ2枚で半導体レーザ素子からの出力光をコリメート及び集光し、焦点の位置に部分反射ミラーを置くことにより、外部共振器をアライメントのずれに鈍感なキャッツアイ配置で構成した。波長選択は、外部共振器内に配置したバンドパスフィルタの角度を調節することにより行った。機械的な安定性を向上させるため、ピエゾ素子などの位置微調器具を使わずにECDLを作製した^[1]。

同様に作製した波長894 nmのECDL2台を用い、それらの間で10MHzのビート信号を取り、信号の雑音測定に基づき性能評価を行った。雑音測定は、位相計測アルゴリズムをFPGAに搭載したデジタル位相計を用いた^[2]。雑音を周波数雑音に換算した測定結果を図(5)-2-①.2に示す^[3]。グラフの横軸はキャリア周波数10MHzにおけるフーリエ周波数、縦軸はレーザの周波数雑音に相当する。フーリエ周波数1 Hzにおいてレーザ周波数雑音は $30 \text{ kHz}/\sqrt{\text{Hz}}$ の値が得られた。これはフーリエ周波数の逆数となる時間スケール(ここでは1秒に相当)におけるレーザの変動幅を意味し、その値が30kHzであり、セシウム原子の共鳴線幅である5MHzより十分に小さいことを意味する。よって、試作したECDLはライトシフト評価にとっては十分に低雑音であることを確認した。

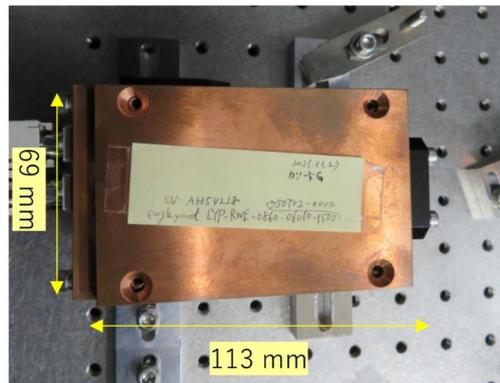
また、環境気圧変動に伴う周波数変化を抑制するための密閉筐体^[4]を150 mm×150 mm×260 mm から69 mm×113 mm×58 mmへと小型化した。図(5)-2-①.3にその写真を示す。この筐体に入れたECDLの周波数をセシウムの共鳴線にロックし、気圧変動とは無関係にモードホップなく1ヶ月間周波数ロックがかかり続けることを確認した。



図(5)-2-①.1 ECDLを横からみた図。ただし、LD: 半導体レーザチップ、BPF: バンドパスフィルタ、PM: 部分反射ミラー

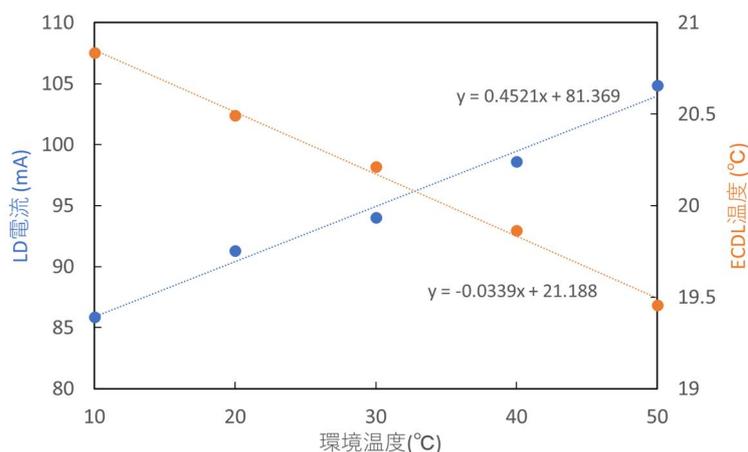


図(5)-2-①.2 ECDLの周波数雑音



図(5)-2-①.3 ECDL管体を上から見た写真

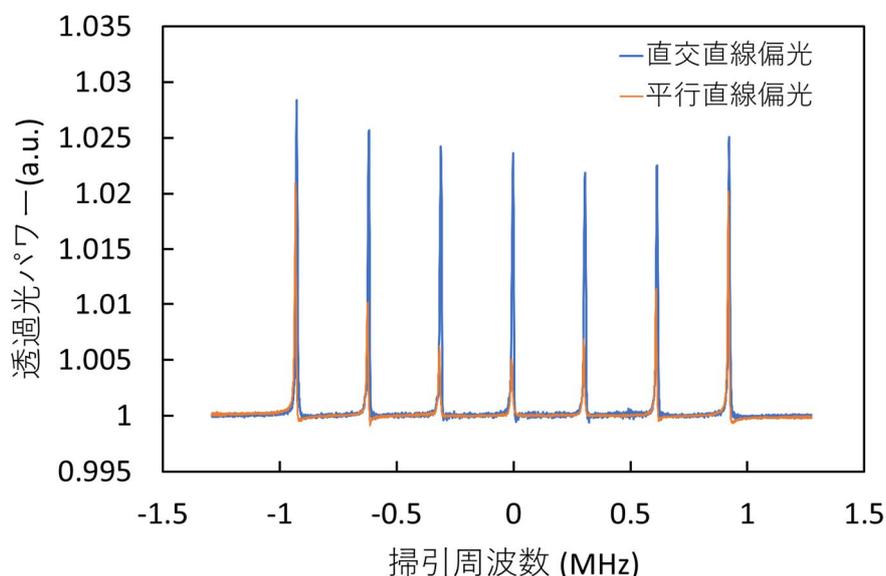
また、恒温槽内にECDLを入れて環境温度を変えつつ、セシウム原子に共鳴させた。環境温度を変えると、ECDLの周波数が変化するが、半導体レーザーへの注入電流とECDL基板の温度を調整することにより共鳴周波数にチューンすることができる。図(5)-2-①.4に、ECDLの周波数をセシウムD2線の $F = 4 - F' = 5$ の遷移に同調させた際の半導体レーザーへの注入電流（青）とECDL基板の温度（オレンジ）を、環境温度の関数として示す。10 °Cから50 °Cの環境温度範囲において、環境温度の上昇に対して線形に注入電流を増やし、かつ線形にECDL基板の温度を下げればセシウム原子の所望の共鳴周波数が得られる。なお、小型密閉管体に環境温度変化による不具合がないことも確認した。



図(5)-2-①.4 環境温度の関数として示した、セシウム原子の共鳴周波数にECDLの周波数をチューンさせたときの半導体レーザの注入電流とECDL基板の温度。

また、波長894 nmのECDL2台を約9.2 GHzの周波数差で位相同期させ、CPT共鳴を観測した^[5]。図(5)-2-①.5にその結果を示す。ただし、青が2本のレーザが互いに直交する直線偏光の場合、オレンジが互いに平行な直線偏光の場合である。セシウムガスセルに弱い一様な磁場をかけることによって、信号を磁気副準位 m_F で分離した。直交直線偏光の場合には、 σ^+ 円偏光と σ^- 円偏光との間で周期的に偏光を変化させて行うpush-pullポンピング^[6]と同様の効果が得られ、時計遷移として使われる磁気副準位 $m_F = 0-0$ 間の信号（掃引周波数0 MHzの信号）が平行直線偏光の場合よりも4.7倍に増えた。

波長852 nmのECDLに関しては、周波数制御系等を構築するとともに、薄いセシウム蒸気が導入された超高真空ガラスセル内に照射することにより、磁気光学トラップ(MOT)を生成した。以上により、孤立状態原子生成のための波長852 nmのECDL2台と、CPT共鳴用の波長894 nmのECDL2台を整備した。



図(5)-2-①.5 直交直線偏光および平行直線偏光におけるCPT共鳴信号の比較。

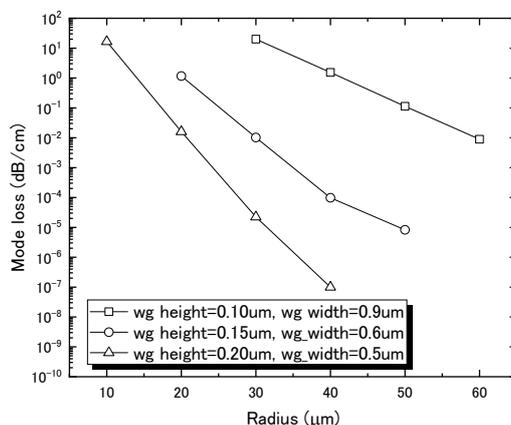
・光MEMSの技術を用いたECDLの小型化及びモジュール化の試作検討

(a)光集積回路技術を用いたECDL

光集積回路技術は、ウェハなどの平面上に主に半導体微細加工技術を用いて形成される光導波路中に光波を伝搬させて光機能素子を互いに接続することにより高度な機能を発現させることのできる技術である。光導波路は、コアと、コアを覆う、屈折率の低い材料からなるクラッド

ドからなり、固有モードを形成してコア内を光波が伝搬する。その寸法は概ね数ミクロンからサブミクロンほどであるため、従来までのバルク型光学素子を組み合わせた光学装置に比べて劇的な小型化を可能にする。また、光機能素子は光導波路をベースとして、構造を工夫するほか、異種材料を集積化することで様々な光機能を実現する。本研究では、光集積回路の技術を活用して、孤立原子生成に資する小型なレーザ光源の開発を指向した。

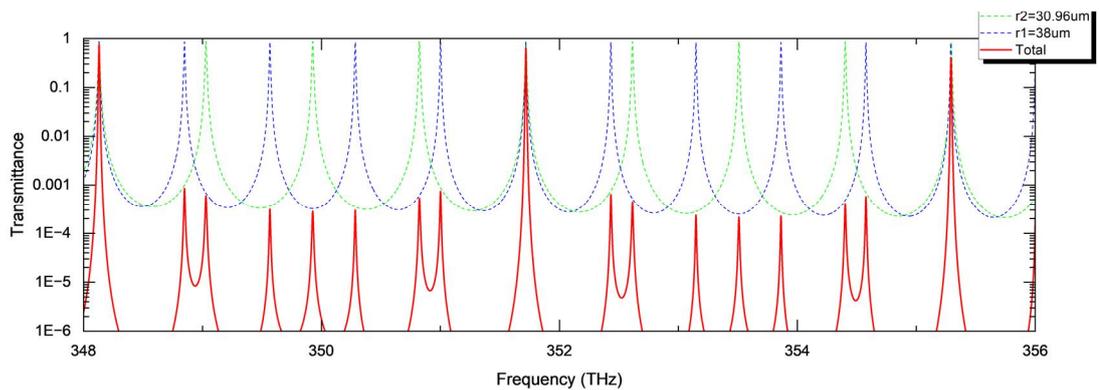
光導波路の不連続点は導波路中を伝搬する光波に損失を与えるため、伝搬方向を変化させる際には滑らかに導波路を接続しなければならず、曲げ導波路の曲率半径は過剰な損失が発生することのないように十分に大きな曲率半径を持たせる必要がある。一方で、大きな曲げ半径は光集積回路の寸法を大きくするため、これらをバランスさせる必要がある。本研究では光導波路のコア材として加工性や入手性、透過率などを加味して窒化シリコン(SiN)を採用することとした。その場合、許容される光導波路の曲率半径は概ね数十ミクロン以上となる。さらに、リング共振器を用いた波長フィルタでは小さなリング半径がFSR (Free Spectrum Range)を広げ、モードホップの抑制に寄与する。そこで、コア高さを変化させたときの曲げ導波路の放射損失を計算によって求め、十分無視できるほど小さな(0.01 dB/cm以下)な損失となるようにコア高さを決定することとした。図(5)-2-①.6は計算結果を示している。導波路高さ150 nmの場合に、曲げ半径を33 μm 以上とすると十分に曲げ損失を抑制でき、リング共振器のFSRは2.3 nmと計算されモードホップを抑制可能な十分なFSRが確保されることが見通しを得た。



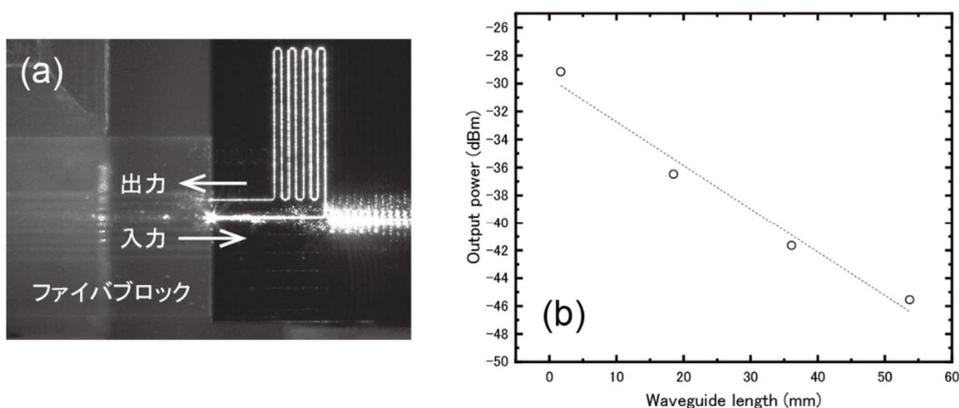
図(5)-2-①.6 有限要素法による曲げ半径に対する放射損失(Mode loss)の計算結果。ダイヤモンド、三角、丸は、それぞれ導波路高さが100 nm、150 nm、200 nmの場合に相当する。導波路高さはシングルモード条件を満たす最も広い幅とした。

また、数値計算による固有モード解析と散乱行列により、ECDLの応答を計算した。発振周波数の安定化のために、バーニア効果を用いたリング共振器型波長選択素子を採用した。図(5)-2-①.7には、計算された特性を示している。わずかに周回長の異なるリング共振器を直列に接続することで、互いの共振周波数が一致した点以外では共振が抑制される。そのため隣接する共振ピークとの間隔が広がることでモードホップを抑制できる。

実際に試作を行うためのプロセス調整を行った。光導波路では、コアのエッチングが最も重要な工程となる。図(5)-2-①.8はエッチング直後のSiNコアの断面電子顕微鏡写真である。エッチング工程の反応ガスの混合比等を適切に調整することで、高い垂直性をもってSiNをエッチングすることができた。実際にSiN光導波路を作製し、その伝搬損失を評価した。図(5)-2-①.8(a)は光導波路中を光波が伝搬している様子を示している。図中左側の矩形のファイバブロック中に入出力用の光ファイバが固定されており、そこから波長850nmの光波を光導波路へ入力した。光導波路中を光波が伝搬する際に散乱された光波が導波路上方からCMOSカメラによって観察され、光導波路部の画像の輝度が出力側で入力側と大差ないことから低損失な光導波路が実現できたことを示している。伝搬損失は、長さの異なる光導波路に対して透過光強度を計測することによって算出できる。測定結果は図(5)-2-①.8(b)に示され、近似曲線の傾きから3.1dB/cmであった。



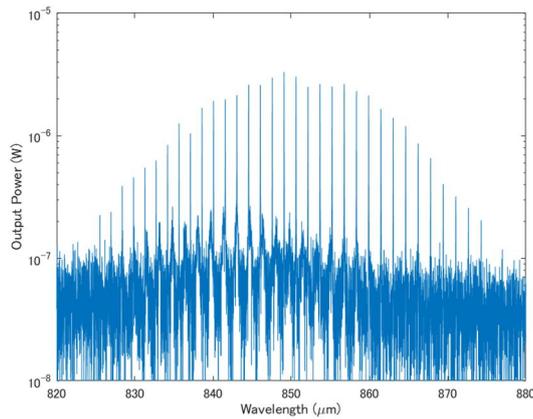
図(5)-2-①.7 数値計算により見積もられたバーニア効果を用いた波長選択素子の波長特性



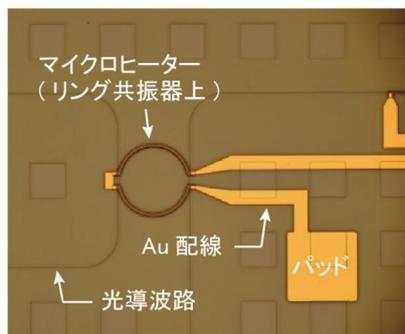
図(5)-2-①.8 (a)ミアンダ状のSiN光導波路中を波長850nmの光波が伝搬している様子を上方から観察した様子。(b)導波路長のそれぞれ異なる光導波路の透過光強度の測定結果。

光集積回路型ECDLにおいて主要な要素素子であるリング共振器の試作と特性の評価を行った。リング共振器の測定された波長特性を図(5)-2-①.9に示す。リング共振器は、共振器半径50 μm 、バス導波路とリング共振器との空隙500 nmを持つ。一定のFSRを有する共振器ピークが観測され、852 nm近傍のピークの半値幅はおよそ20 pmであり、そこから算出されるQ値はおよそ42000程度であった。これはシミュレーションの値とよく一致しており、設計の妥当性が担保された。

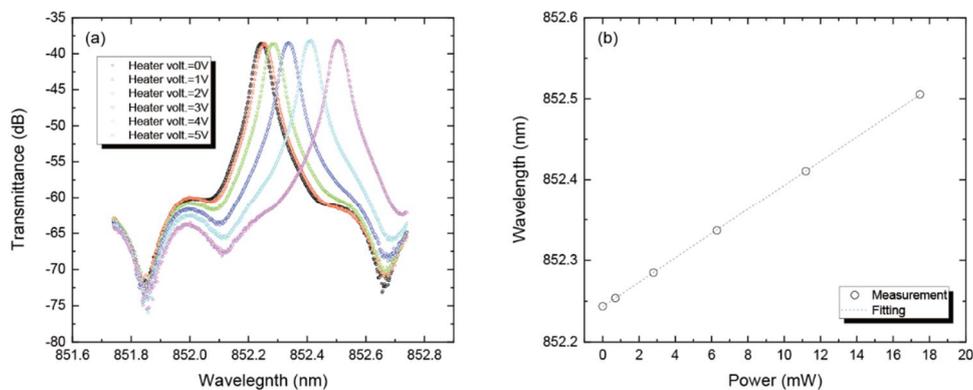
ECDLからの光波を所望の波長に制御するために、リング共振器にはマイクロヒータを実装し、熱光学効果によりSiNの屈折率を変化させることによってその共振波長を制御する。そのためマイクロヒータ実装のプロセスを確立し、その特性を評価した。マイクロヒータはTiNで構成し、マイクロヒータへ電力を投入する配線はAuを用いた。リング共振器導波路の上クラッド層として、プラズマCVD (chemical vapor deposition)によりTEOS-SiO₂膜を1.2 μm 製膜し、その上にTiNマイクロヒータとAu配線を形成した。試作された素子を図(5)-2-①.10に示す。図(5)-2-①.11は、マイクロヒータ装荷型リング共振器の評価結果を示している。印加電圧を変化させたときに共振ピークが長波長側へシフトしていることが分かる。これは典型的な熱光学効果の挙動である。共振波長の投入電力に対するプロットを図(5)-2-①.11(b)に示す。投入電力に対して波長シフトが15 pm/mWの傾きで線形に変化しており、共振波長を所望の波長に制御可能なリング共振器が実現された。



図(5)-2-①.9 リング共振器の波長特性。ピークの包絡線が山状になっているのは、測定に用いた光源の波長特性を反映している。



図(5)-2-①.10 (a) マイクロヒーターに印加する電圧を変化させた時のリング共振器の波長特性。(b)共振波長の投入電力に対するプロット。

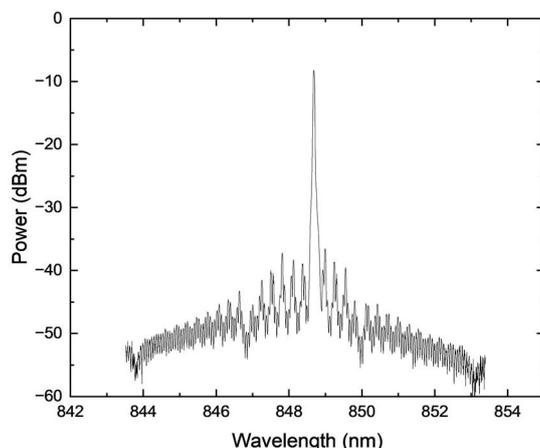


図(5)-2-①.11 (a) マイクロヒーターに印加する電圧を変化させた時のリング共振器の波長特性。(b)共振波長の投入電力に対するプロット。

光源となる半導体光増幅器(Semiconductor optical amplifier, SOA)は端面出射型であり、外部共振器の光導波路端面と突き合わせることで光波結合される。4インチウエハ上に試作された外部共振器はブレードダイサーを用いて小辺化されるため、外部共振器端面には切削痕が発生している。この切削痕によって光波結合に大きな散乱損失が伴うため、端面を研磨し損失を抑制する必要がある。研磨ではアルミナ懸濁液を使用し、粗研磨ののちに仕上げ研磨を行うことで滑らかな端面を得ることができた。最後に端面に無反射コーティングを施して、SOAへの反射戻り光をさらに抑制する。

外部共振器とSOAを高精度に位置合わせし、SOAへ電流注入を行うことでレーザ発振を得られた。図(5)-2-①.12は光スペクトルアナライザーによって計測されたレーザ発振スペクトルを示している。発振の安定性を示すために、時間をおいて複数回計測したスペクトルを重ねて示

している。リング共振器による波長選択性によってシングルモード発振が得られた。当該ECDLを用いて孤立状態原子を生成するためには、狭線幅化と出力を増加させる必要がある。狭線幅化については、光導波路の損失を低減させることが必要であり、そのためには、より高度な露光技術を採用することでラインエッジラフネスを低減して、低損失な光導波路を実現できる。また、出力を増加させるためには、上クラッド層の厚みを増加させるなどして、SOAと光導波路の接続で発生するモードプロファイルの不連続を取り除く必要がある。これらの改善を行うことで、孤立原子の生成に資する超小型ECDLを実現することが可能になる見通しである。



図(5)-2-①.12 レーザ発振スペクトル

(b)微小空間光学型ECDL

高精度ライトシフト変動要因評価技術開発において、微小孤立状態原子生成用デバイスに適用できる微小空間光学型外部共振器半導体レーザー(ECDL)の開発にも取り組んだ。各種マイクロマシニングの進展により、フリースペース用微小光学素子をシリコン基板上に集積した小型光デバイスの研究開発が進められているが、AuSnなどのはんだを用いるため異種材料の高密度集積に課題があった。本研究では、図(5)-2-①.13(a)に示すように、高熱伝導の窒化アルミニウム(AIN)などの多層配線板上に半導体レーザーチップ、マイクロペルチェ、サーミスタ、マイクロレンズ、マイクロ偏光ビームスプリッタ、体積型ホログラフィック回折格子等、パッケージを含めたシステム全体を集積化した微小空間光学型ECDLの構築を提案した。

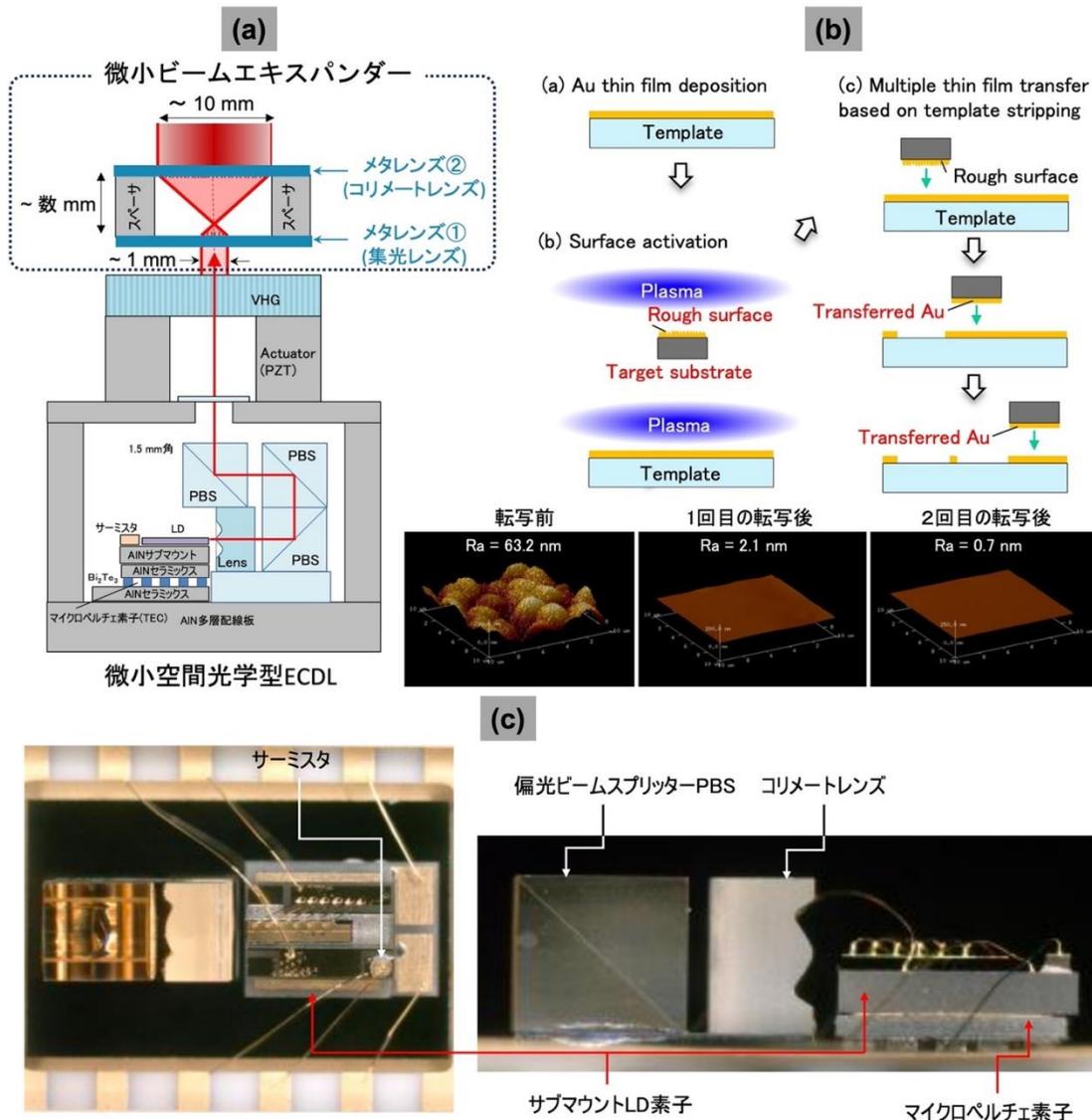
一方、表面活性化接合のような固相低温接合技術の大きな課題は、活性化された固体表面を原子間の凝着力により接合させる方法であるがゆえに、極めて平滑な接合面(rms 表面粗さ: 1 nm 以下)が求められる点である。一般に、直接接合に用いられる化学機械研磨(CMP: Chemical Mechanical Polishing)はセラミックス等の難加工材料では、加工速度が遅く、rms 表面粗さ 1 nm 以下の平滑な面を得るには、極めて高コストである。また、CMP プロセスは、大面積加工性には優れるが、小面積のチップ等への適用は困難である。そこで本研究では、接合に平滑面を実現するための新しい視点として、研磨のような除去加工ではなく、テンプレートストリッピング(Template stripping)法と低温接合法に基づく付加工による平滑化を提案し、窒化アルミニウム(AIN)等の粗い接合面の平滑化を実証した。

図(5)-2-①.13(b)に平滑化プロセスの概要図を示す。ここでは、表面の粗いAIN基板に金(Au)薄膜が成膜されており、このターゲット基板を平滑化する様子を示している。平滑な表面を有する表面の酸化されたシリコンのテンプレート基板を準備し、スパッタ等により、Au薄膜を堆積する。対象とするターゲット基板とテンプレートに堆積したAu薄膜表面をアルゴンプラズマ照射により表面活性化を行う。次に、Ar+プラズマで活性化したAu表面どうしをコンタクトさせ、テンプレートとターゲット基板のAu薄膜同士の凝着力を利用して、テンプレート上のAu薄膜を機械的に剥離することにより、ターゲット基板側に転写させる。これらの転写プロセスを繰り返すことで平滑化を実現する。

本実験では、金薄膜(厚み:300 nm)をテンプレートとして使い、ターゲットのAINを2回の転写を行なった。原子間力顕微鏡(AFM)による転写前と各回の転写後のターゲット基板の表面

粗さ測定結果を図(5)-2-①.13(b)に示す。この測定結果は、2回の転写で、表面粗さ数100 nmの粗い表面から、表面粗さの1.0 nm程度の平滑なセラミックス表面が得られることを示している。よって、テンプレートstripping法は表面活性化接合に十分に適用できると考えられる。

開発したテンプレートstrippingに基づくセラミックス材料の接合面平滑化技術を適用し、提案した微小空間光学型ECDLの実装を行った。結果は図(5)-2-①.13(c)に示すように、数mmサイズのマイクロペルチェや半導体レーザチップ等の素子がAIN多層配線板に接合され、電流注入によってレーザ発振が確認された。



図(5)-2-①.13 (a)微小空間光学型 ECDL の概念図。(b)テンプレートstripping (Template stripping)による窒化アルミニウム(AIN)の接合面の平滑化プロセスの概念図、及びAFMによるAINの表面粗さの測定結果。(c)試作した微小空間光学型 ECDL の写真。

一方、CPT共鳴測定や孤立状態原子生成のための原子の磁気光学トラップをはじめ、原子時計の量子部における計測では、通常径数10.0 mmの平行光のビームが必要である。ECDLから出力されたレーザスポットを拡大しながら平行光のビームを作り出す光学素子として、2枚のレンズの組み合わせによって構成されたビームエキスパンダーは一般的に使われている。しかし、このようなビームエキスパンダーは、湾曲レンズ等の物理構造上かさばる屈折光学素子によるものであり、空間光学型系の小型化に不向きである。とりわけ、ビームエキスパンダーの焦点距離が長いという課題がある。一方、メタ構造と呼ばれる光の波長より小さいサイズの誘電体構造体を配列して波面を自在に制御するメタ表面 (又はメタサーフェス) は極膜でありなが

存の光学素子を超えた高性能を実現する革新的な光学素子として注目されている。そこで、開発した微小型ECDLの特徴をさらに引き出すためには、メタレンズと呼ばれる超短焦点距離を持つ極薄膜状の凸レンズを開発し、2枚メタレンズの組み合わせによる革新的なケプラー式ビームエキスパンダを考案・実証した。試作したビームエキスパンダーは、3.0 mmの極短動作距離にて、径1.5mmのビームを1cm程度のビームに拡大することができ、更にビームコリメートと円偏光素子としての機能を備えた素子として実証した。

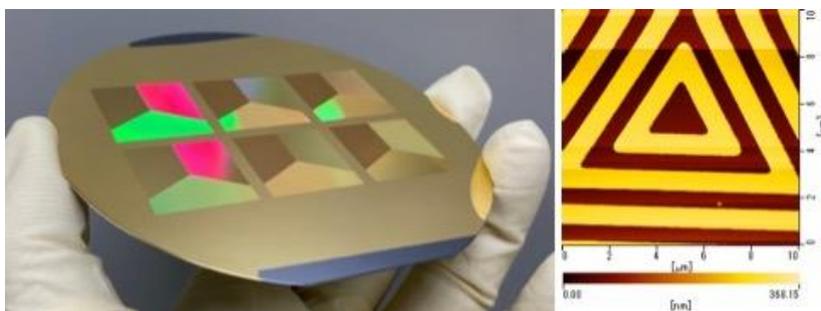
・特殊グレーティングの試作検討

孤立状態原子生成用の特殊グレーティングの開発では、グレーティングの試作・評価結果を設計にフィードバックし、回折効率・円偏光度に優れたグレーティングを実現する適正化を行った。結果として、回折効率80%以上かつ円偏光度90%以上のグレーティングを作製することができ、また再現性の良い加工工程を確立することができた。

一次元の特殊グレーティングの試作では、構造周期 1608.5 nm（回折角 32°）に設計した構造を作製し（図(5)-2-①.14）、その光学特性の評価を行った。作製方法は、Si 基板表面にグレーティング構造を形成し、蒸着により Cr を密着層として Au を成膜したものである。光学特性の評価は、2方向に反射する一次回折光の強度と偏光状態を測定することで行い、90%以上の回折効率でかつ 90%以上の円偏光度の良好な光学特性が得られた(表(5)-2-①.1)。

二次元の特殊グレーティングの試作では、一次元グレーティングの試作で得られた知見を加工プロセスに反映し、良好な等方性構造が作製できる加工工程を確立した。等方性の適正化前では、一次反射光の回折方向の反射率ばらつきが標準偏差で2.6%あったが、適正化後では0.6%まで低減することができた。また、必要な回折角に比べられるようにするため、回折角を従来の46°だけでなく、50°、60°、70°になるように設計したグレーティングを試作した（図(5)-2-①.15）。表(5)-2-①.2に改良試作した特殊グレーティングの光学特性を示す。回折角50°の試作グレーティングでは、回折効率86%・円偏光度92%を達成した。

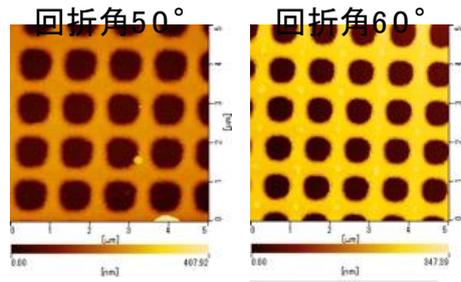
Csガスセル内で使用する場合、グレーティングの反射膜であるAuはCsガスセル中に置くと黒色に変化してしまい、反射率が大きく低下してしまう。そのため、Csガスセル内で用いるにはAu膜上にコーティングを行うことが解決策のひとつである。コーティング膜やAu膜との密着を向上する密着膜がグレーティングの光学特性にどのような影響を与えるか、光学シミュレーションと実験により確かめた。原理確認のため、Al₂O₃など候補材料はあるが、今回はCsガスセル中に置いても変化が見られず低屈折率材料であるSiO₂をコーティング膜として検証した。密着層をCrとAlとして、SiO₂の厚さを変えた実験により、Al膜では円偏光度の低下は少なく、約90%の円偏光度を維持したが、回折効率は80%から60%程度まで低下した。一方、Crの密着層の場合、回折効率は約80%を維持したが、条件によって円偏光度が90%から60%まで低下が見られ、SiO₂の厚みにより変化することが確認できた。



図(5)-2-①.14 試作した1次元特殊グレーティング

表(5)-2-①.1

回折角	回折効率	円偏光度
32°	95 %	97 %



図(5)-2-①.15 改良試作した二次元特殊グレーティングのAFM像

表(5)-2-①.2

回折角	回折効率	円偏光度
46° (R3年度)	70 %	83 %
46°	81 %	88 %
50°	86 %	92 %
60°	84 %	96 %
70°	81 %	79 %

参考文献

- [1] A. Takamizawa et al., Appl. Opt. 54 (18), 5777-5781 (2015).
- [2] W. Kokuyama et al., arXiv:2009.01137 (2020).
- [3] 高見澤昭文他, 第68回応用物理学会春季学術講演会, 16p-Z11-13 (2021).
- [4] A. Takamizawa et al., Appl. Phys. Express 9, 032704 (2016).
- [5] 高見澤昭文他, 第70回応用物理学会春季学術講演会, 16p-A502-11 (2023).
- [6] X. Liu et al., Phys. Rev. A 87, 013416 (2013).

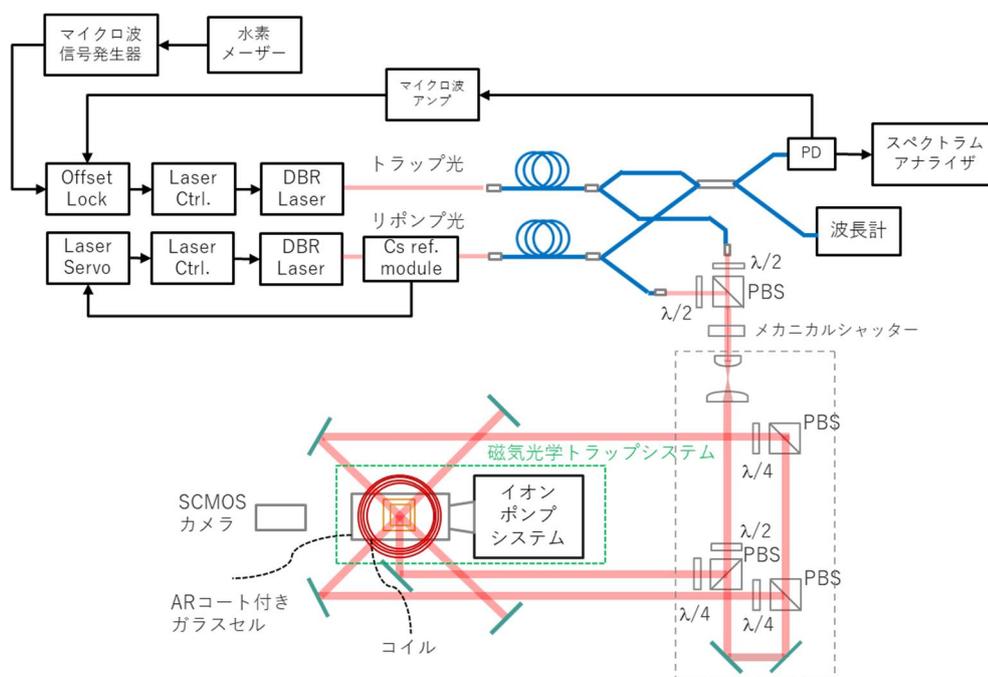
実施項目(5) 周波数変動要因評価技術の開発

実施項目(5)-2 高精度ライトシフト変動要因評価技術の開発

実施項目(5)-2-② 超高真空ガスセル内における孤立状態原子生成装置の設計、試作及び評価(担当：日本電気株式会社)

本項目では、超高真空ガスセル内における孤立状態原子生成装置の設計、試作、および評価について述べる。実施項目(5)-2-①で試作されたデバイス、特に特殊グレーティングやECDLの動作実証が可能であり、さらにバッファガスを用いることなく主たる周波数変動要因であるライトシフトを高精度に評価することを目的として、孤立状態原子を扱った各種実証実験が可能な孤立状態原子生成システムの構築とライトシフト評価装置の基本動作実証に取り組んだ。

孤立状態原子生成システムは磁気光学トラップ(MOT: Magneto-Optical Trap)と呼ばれる技術に基づいて構成される。MOTは冷却された原子集団の空間的な捕獲を行う技術であり、その実現には、高真空化のアルカリ金属原子に対し、四重極磁場を印可し、適切な波長および偏光が制御されたトラップ光を原子の存在する四重極磁場のゼロ磁場点に上下左右6方向から照射し、さらに適切な波長で制御されたリポンプ光を導入することが必要となる。図(5)-2-②.1に、孤立状態原子生成システムの概略図を示す。主に2つのレーザ光源、光学系、磁場印可用のコイル、およびARコート付き高真空ガラスセルとセシウム(Cs)ディスプレイとイオンポンプシステムからなる磁気光学トラップシステム、そして原子集団からの蛍光をイメージとして検出するためのSCMOSカメラによって構成されている。

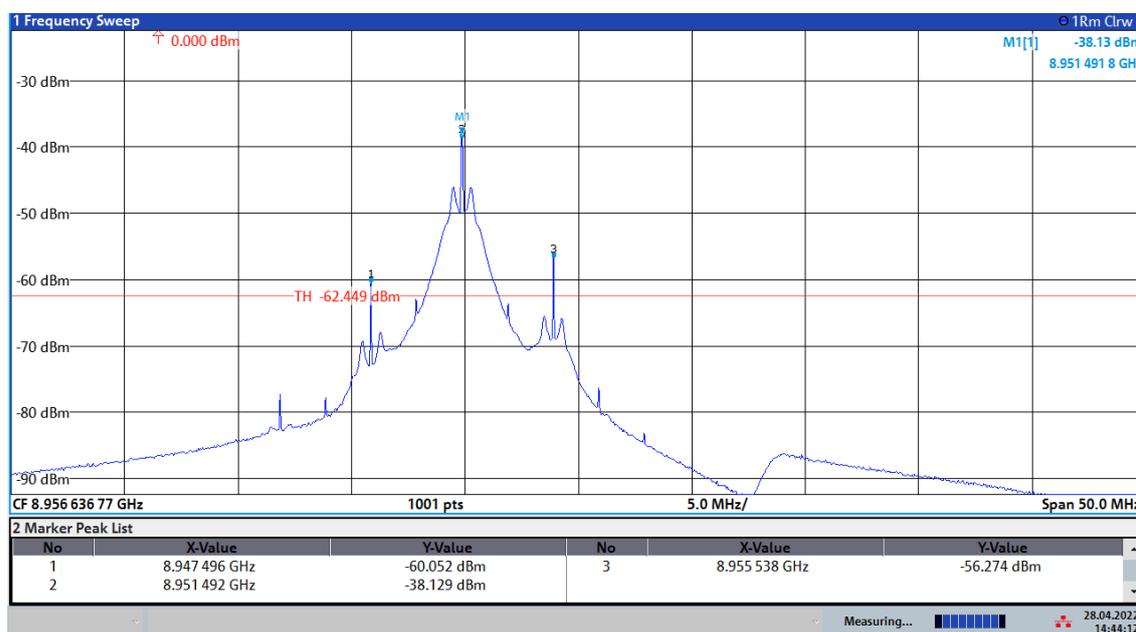


図(5)-2-②.1 孤立状態原子生成システムの概略図

2つのレーザ光源(DBR Laser: Vescent D2-100-DBR-852-PHP1/M)はそれぞれ、トラップ光、リポンプ光を発振するため、Cs原子のD₂線に相当する852 nm付近に発振波長を有するようなレーザダイオードを内部に有し、主にレーザコントローラ(Laser Ctrl.: Vescent D2-105-500)からの電流によって波長の制御を可能とする。本システムにおいては、MOTによる孤立状態原子の安定した生成を行うため、2つのレーザ波長の安定化を行う。リポンプ光についてはCs原子の飽和吸収スペクトルに基づき周波数ロックを行うため、Cs参照モジュール(Cs ref. module: Vescent D2-210-CS/M)からの信号をフィードバックのためのサーボコントローラ(Laser Servo: Vescent D2-125-PL)に入力し、リポンプ光の波長をCsの吸収線にロックする。今回、リポンプ光は周波数においてCsのD₂線におけるF=3からF'=4遷移に相当する $3.51730902 \times 10^{14}$ Hzとなるように波長ロックを行った。また、トラップ光については、2つのレーザの差周波を用いて波長ロックを行った。

2本のレーザをそれぞれ光ファイバに結合した後、光ファイバカプラによって合波し、その差周波をビート信号として受光器(PD Vescent D2-260)で検出した後、適切な振幅になるようにマイクロ波アンプ(R&K CA922BW100)で増幅し、オフセットロック(Offset Lock: Vescent D2-135)回路に導入し、所望の周波数をマイクロ波信号発生器(Rohde&Schwarz SMA100B)から入力することでトラップ光の波長の安定化と制御を行った。

今回、トラップ光の周波数はCsのD2線におけるF=4からF'=5遷移から20 MHz程度離調させた $3.51721941 \times 10^{14}$ Hzをターゲットとして波長ロックを行った。このとき、オフセットロック回路の入力周波数の上限が200 MHzかつ通倍率が64であることから、マイクロ波信号発生器の出力は 1.40025575×10^8 Hzである。マイクロ波信号発生器の周波数は水素メーザーによって校正されている。ビート信号はスペクトルアナライザ(Rohde&Schwarz FSVA3000)で直接モニタし、信号発生器からの周波数を変化させることでトラップ光の周波数離調を制御する。図(5)-2-②.2にスペクトラムアナライザで観測したビート信号の一例を示す。2本のレーザの差周波数が8.947496 GHzになるように安定化されている。

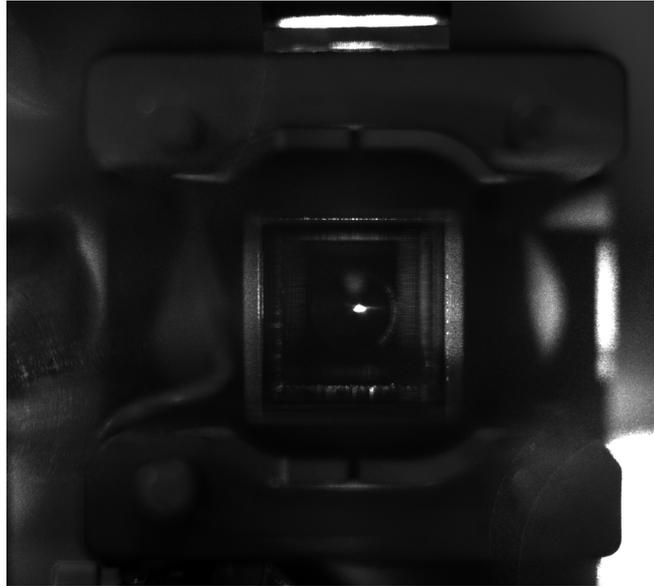


14:44:13 28.04.2022

図(5)-2-②.2 スペクトラムアナライザによるレーザ間のビート信号の測定例

上記手法に基づき、絶対波長および差周波数が安定化された2本のレーザ光を、ミラーやレンズ、偏光ビームスプリッタ(PBS)、 $\lambda/2$ 、 $\lambda/4$ 波長板等で構成された光学系を介して磁気光学トラップシステムに導入する。磁気光学トラップシステム入射する3光路におけるレーザ光のパワーが均等になるように、 $\lambda/2$ 波長板とPBSを用いて調整を行った。またトラップ光の偏光については偏光計(Thorlabs PAX1000IR1/M)を用いて $\lambda/4$ 波長板の角度を変化させ、適切な円偏光となるように調整を行った。

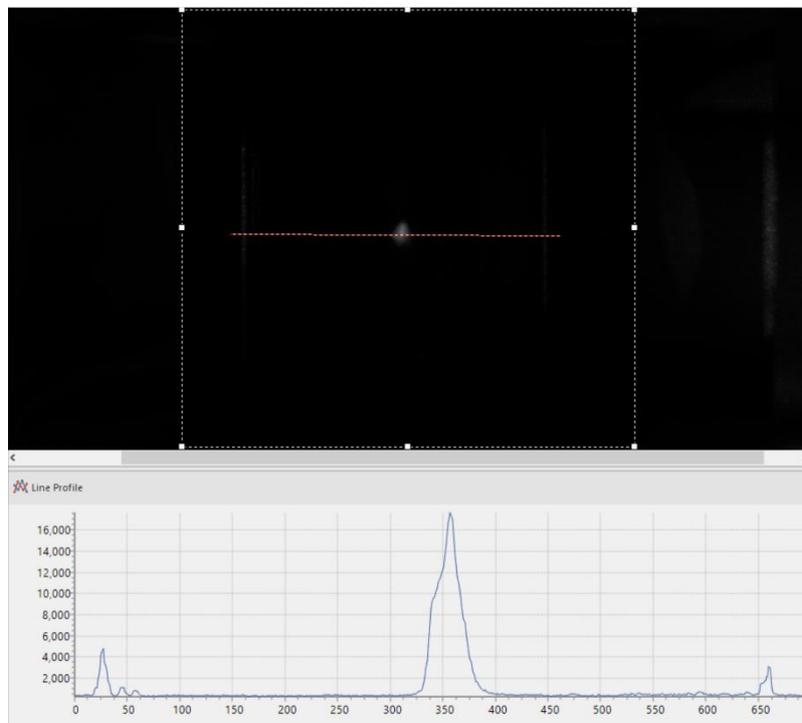
磁気光学トラップシステムはColdQuanta社のMiniMOTを用いた。高真空のガラスセル、そこに接続されたCsのディスペンサ、イオンポンプシステムによって主に構成されている。高真空のガラスセルを紙面鉛直方向に挟向こうに磁場印可用のアンチヘルムホルツコイルが設置されている。真空ガラスセル中のCsの量はディスペンサの電流値によって制御可能であり、今回は3.1 A程度に設定している。図(5)-2-②.3にSCMOSカメラ(Teledyne Photometrics: Prime BSI)で取得した蛍光像の例を示す。寸法20 mm×20 mm×60 mm、厚さ3 mmのガラスセルにおいて、ARコートが施されていない20 mm角の面から撮像を行った。図の中心付近に周囲と比較して高い輝度を有する像が存在することが確認できる。



図(5)-2-②.3 SCMOSカメラで取得した蛍光像の例

図(5)-2-②.4は上記、図(5)-2-②.3を拡大し、カメラレンズの絞りで輝度を低下させ、図中の点線に沿った断面で受光光パワーのプロファイルを示した図である。下図の横軸はカメラのセンサのピクセル数であり、左右の2つのピークがガラスセルからの散乱光を示すものである。寸法からガラスセルの直径は20 mmであり、これがおよそ640ピクセル程度である。

中央のピークがMOTによって定在する原子集団であり、そのサイズは半値幅でおよそ50ピクセル程度であるので、実際の直径は1.6 mm程度であることが算出される。このときMOTシステムに入射させたトラップ光のパワーはおよそ55 mWであり、リポンプ光は45 mWである。磁場用コイルには電流値で0.62 A印可している。ディスプレイに電流印可し、数10分の待ち時間の後、同様の原子集団由来の蛍光を恒常的に長時間連続的に観測できることが確認された。



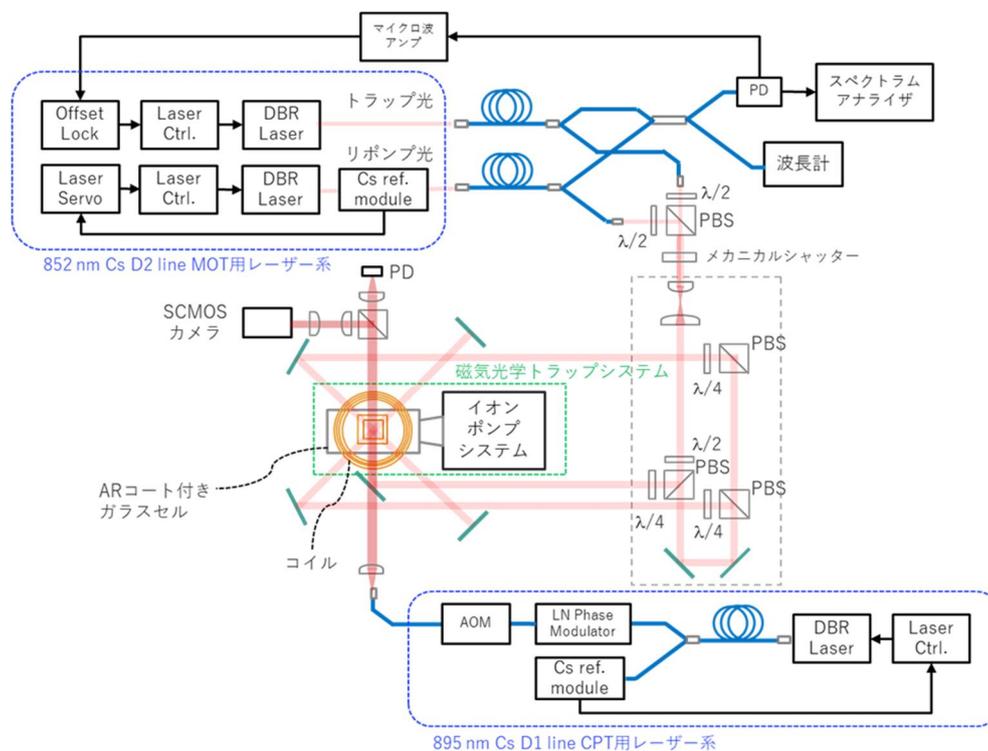
図(5)-2-②.4 SCMOSカメラで取得した蛍光像の断面プロファイルの例

上記の方法で生成された孤立状態原子集団に対してライトシフトの評価を行うためには、孤立状態原子の状態に起因するCPT共鳴の観測が一つの有望な手段となる。Cs原子のCPT共鳴の

観測においては、蒸気ガスと同様、セシウム原子のD₁線波長を孤立状態原子に照射し、その透過率を測定する必要がある。図(5)-2-②.5に構築を行った捕獲原子のライトシフト評価系の概略図を示す。Cs原子を用いたMOTにおいてはCsのD₂線用のレーザを用いる。一方で、生成された冷却原子の集団についてCPT共鳴の測定および状態観測を行うためにはD₁線用のレーザを用いるため、複数の波長を複合したシステムの構築が必要となる。

Cs原子のMOTを用いた孤立状態原子生成用の光学系に加え、さらに波長894nm付近のD₁線レーザを照射する光学系を構築し、上記6方向の中心すなわちMOTの捕獲原子の透過率が測定可能な光学設計を行った。D₁線のレーザはLN位相変調器に信号発生器からのマイクロ波を入力することでサイドバンド変調を行い、CPT共鳴の観測に必要な2つの波長の光を生成する。さらにAO変調器を用いることで、光強度のパルス変調が可能となる。捕獲原子の透過率および透過像の測定のため、それぞれ受光器(PD)およびSCMOSカメラを設置した。

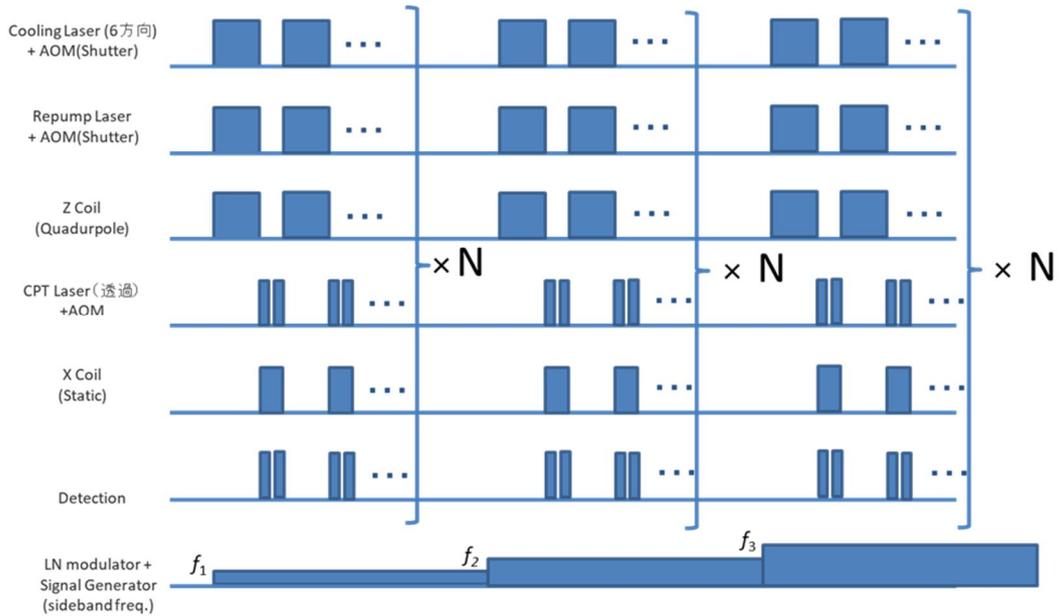
ライトシフト評価のためにはトラップ光、リポンプ光、四重極磁場を解除した捕獲原子に対し、D₁線のレーザを照射し、その透過率を評価することでのCPT共鳴の測定が必要となる。すなわち、CPT共鳴の観測のためには、磁場および各レーザのパルス変調、およびそれらの相対的なタイミングを制御するパルスシーケンスの生成が必要となる。



図(5)-2-②.5 捕獲原子のライトシフト評価系

図(5)-2-②.6に捕獲原子のCPT共鳴測定のパルスシーケンスの例を示す。捕獲原子を生成した後、四重極磁場およびトラップ光およびリポンプ光を遮断し、直後、四重極磁場と直交する静磁場の印可とD₁線のレーザの照射を行う。D₁線のレーザはサイドバンド変調を行い、CPT共鳴に必要な2つの波長の成分を生成する。このサイドバンド波長を掃引し、透過率の測定を行うことでCPT共鳴の評価を行う。

図(5)-2-②.7にMOTのパルス変調システムを示す。(a)は四重極磁場の制御系であり、電圧によってコイルに印可する電流を制御可能なコイルドライバを用いる。(b)レーザのパルス変調のためのメカニカルシャッターであり、リポンプ光およびトラップ光の光路に導入することで高い消光比のパルス変調を可能とする。LabVIEW等のプログラミングツールで所望のパルスシーケンスを作成した後、パルス発生器や任意波形発生器からの電圧をそれぞれの系に入力することで磁場とレーザ光のタイミング制御が可能となる。



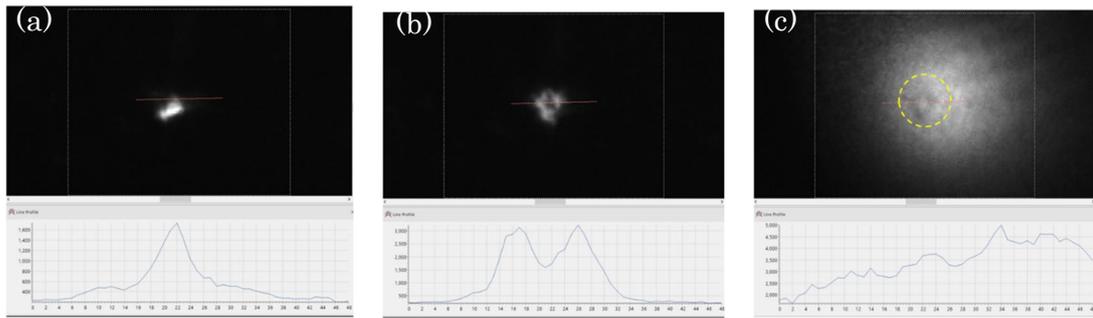
図(5)-2-②.6 捕獲原子のCPT共鳴測定のパルスシーケンスの例



図(5)-2-②.7 パルス変調システム：(a)四重極磁場 (b)トラップ光リポンプ光

CPT共鳴観測によるライトシフトの評価に先立ち、吸収イメージング法の確立を行った。捕獲原子を用いたCPT共鳴の評価においては前述のとおり、生成された捕獲原子集団に対してトラップ光およびリポンプ光を遮断した後、透過率の測定を行う。蛍光を放出しない原子集団からの像を取得するためには、準位に共鳴する微弱なレーザー光を、原子集団より大きな照射面積で照射し、その吸収イメージをレーザー光の影として取得する必要がある。

図(5)-2-②.8に、図(5)-2-②.5に示したSCMOSカメラによって実際に取得された原子集団の像を示す。(a)はD₂線レーザーすなわちトラップ光およびリポンプ光照射時の蛍光像である。(b)はこの状態に共鳴するD₁線レーザー光を照射した際の蛍光像である。SCMOSカメラの前に中心波長約850 nmのバンドパスフィルタを設置し、D₂線由来の蛍光(波長~852 nm)のみを取得した。(a)と比較し、D₁線レーザー照射の影響で、原子集団の像が変化した様子が観測されている。(c)はバンドパスフィルタを中心波長~890 nmの素子に置き換え、D₁線レーザーおよび蛍光由来の光のみの観測を行った像である。原子集団に照射されたD₁線のレーザー像の中に(b)でみられる原子集団像の影が観測されており、構築したライトシフト評価系において、原子の吸収イメージが取得可能なことが確認された。さらに、図(5)-2-②.6のパルス変調システムを用いることで、D₂線レーザーおよび四重極磁場を遮断した状態での吸収イメージの取得が可能なが示唆される。



図(5)-2-②.8 原子集団の像：(a)D₂線レーザー照射時の蛍光像 (b)D₂線レーザーおよびD₁線レーザー照射時の蛍光像 (c)D₂線レーザーおよびD₁線レーザー照射時の透過イメージ

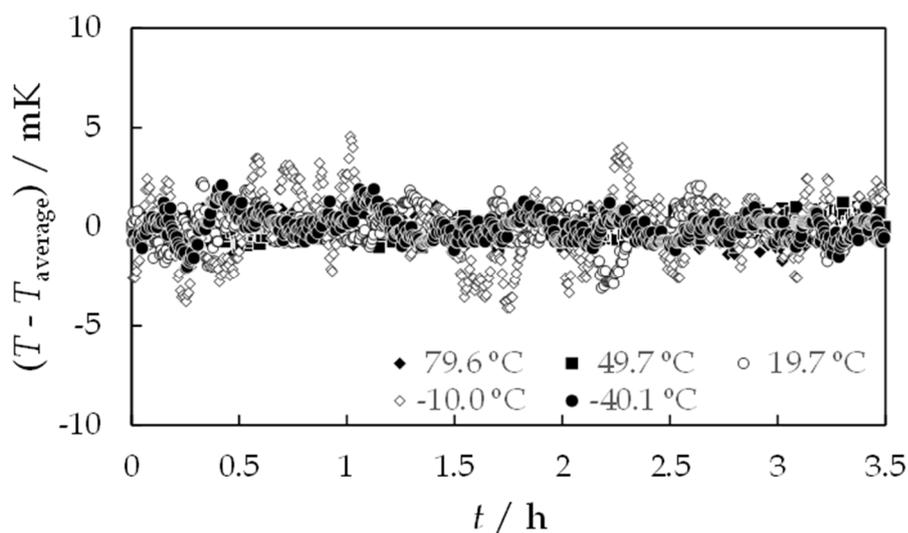
実施項目(5) 周波数変動要因評価技術の開発

実施項目(5)-2 高精度ライトシフト変動要因評価技術の開発

実施項目(5)-2-③-1 超高真空ガスセルを用いた高精度ライトシフト評価法の温度依存性取得技術の確立(担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

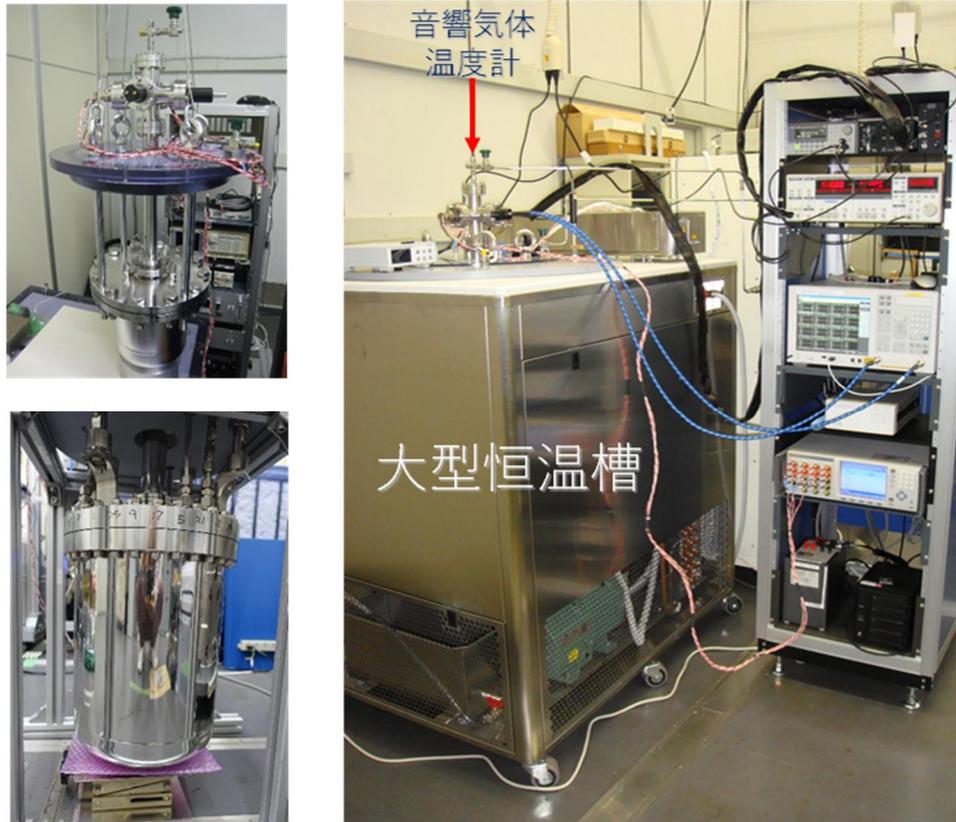
令和2年度は、ライトシフト評価法の温度依存性取得のため、大型恒温槽を設計・試作した。令和3年度は、高精度ライトシフト評価法の温度依存性取得のため、新規に試作した体積155,000 cm³の恒温空間を持つ大型恒温槽の温度安定性および温度分布を高精度に評価した。令和4年度は、原子時計の模擬装置として準備した音響気体温度計 (AGT) を当大型恒温槽内に設置して、AGT内の温度安定性および均一性の評価を行うとともに、熱力学温度の測定を行った。令和5年度は、30 °C以上の温度域で使用可能な高温用AGTを用いて、AGT内の温度安定性および均一性の評価を行った。

開発した大型恒温槽には、水、もしくは、水とエタノールの混合液を熱媒体として用い、白金抵抗温度計 (SPRT) を使用して、-40 °C付近から80 °C付近までの温度範囲で大型恒温槽の温度安定性評価を実施した。その結果を図(5)-2-③-1.1に示す。開発した大型恒温槽は20 °C付近および-10 °C付近以外で±2 mK以内で安定していることが分かった。

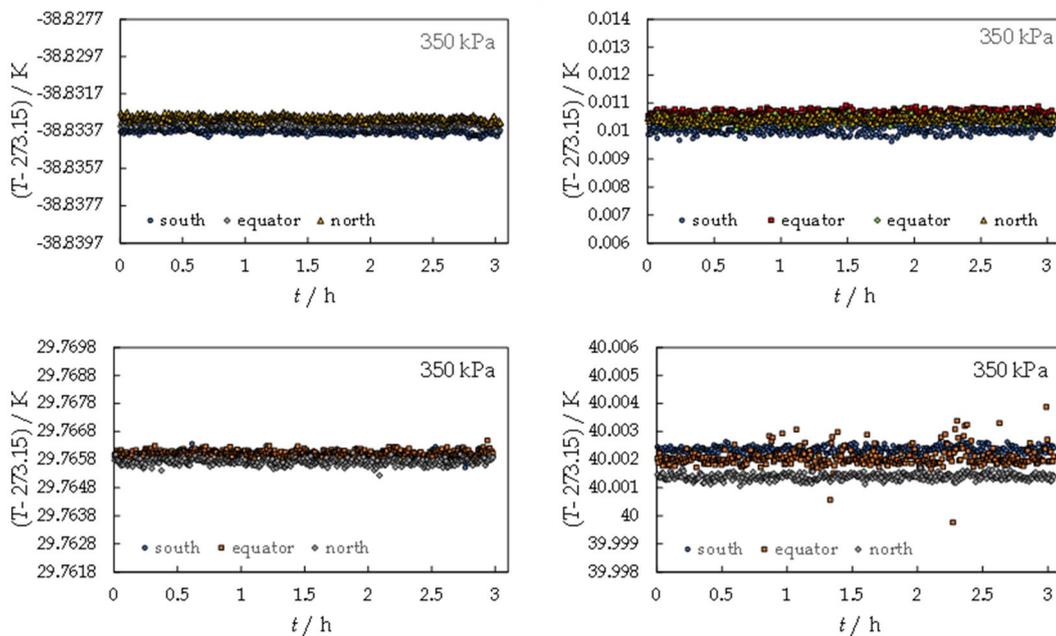


図(5)-2-③-1.1 開発した大型恒温槽の温度安定性

次に、原子時計の模擬装置として準備したAGTおよびその制御・測定システムを図(5)-2-③-1.2に示す。室温以下の温度域では、内積が約1000 cm³の無酸素銅製の球共鳴器、および、共鳴器を内包する圧力容器からなるAGTを使用した。温度測定には、1990年国際温度目盛 (ITS-90) に従い校正されたカプセル型標準白金抵抗温度計 (cSPRT) を用いた。cSPRTは、共鳴器を地球に見立てた際の北極側、南極側および赤道側に設置して共鳴器の温度安定性および均一性を測定・評価するために用いた。大型恒温槽には、水とエタノールの混合液を熱媒体として用いた。室温以下の温度域における共鳴器内の温度安定性を図(5)-2-③-1.3に示す。模擬装置として使用した共鳴器の温度は±0.1 mK程度で実現可能であることが分かった。また、共鳴器の北極、南極および赤道側の温度の均一性は±0.5 mK程度であることが分かった。



図(5)-2-③-1.2 模擬装置として使用した室温以下用の音響気体温度計（左上図）、室温以上用の音響気体温度計（左下図）および大型恒温槽での設置の様子（右図）



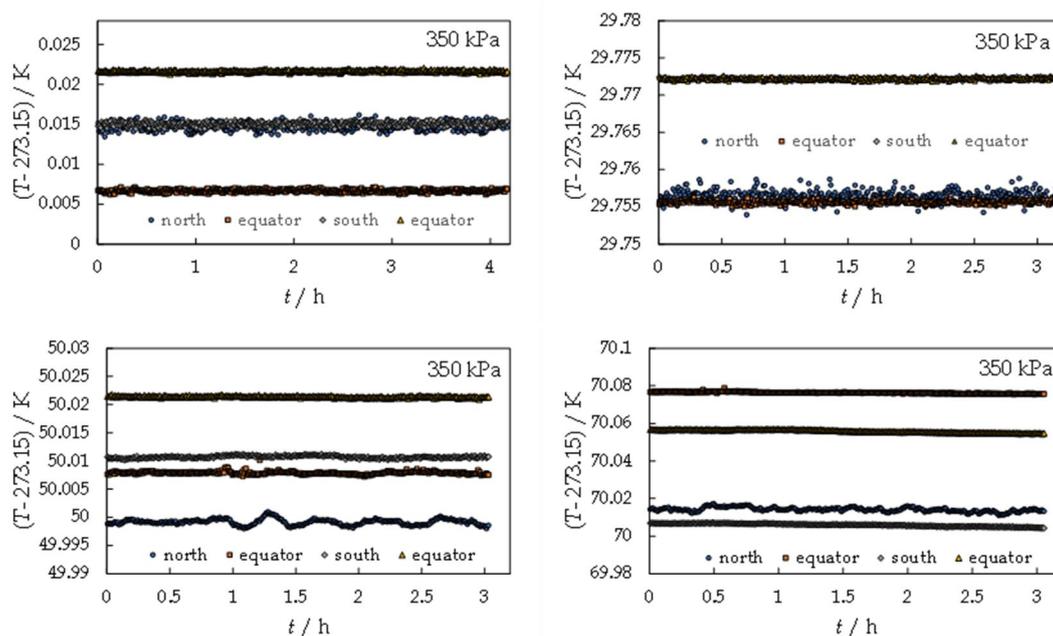
図(5)-2-③-1.3 模擬装置として使用した室温以下用の共鳴器内の温度安定性

30 °C以上の温度域での測定については、高温への耐久性を持たせるため、内積が約3000 cm³のステンレス鋼316L製の球共鳴器、および、共鳴器を内包するための圧力容器を新たに開発した。温度測定には、1990年国際温度目盛（ITS-90）に従いインジウムの凝固点で校正された標準白金抵抗温度計（SPRT）およびカプセル型標準白金抵抗温度計（cSPRT）を用いた。共鳴器

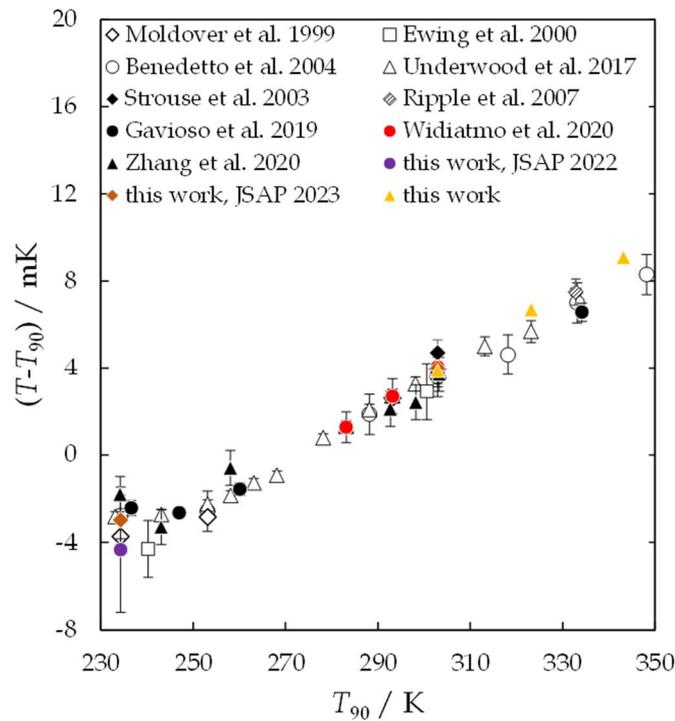
の北極側および南極側にcSPRTを、共鳴器の赤道側にcSPRTおよびSPRTを設置して、共鳴器の温度安定性および均一性を測定・評価するために用いた。大型恒温槽には、水とエタノールの混合液を熱媒体として用いた。

大型恒温槽、および、熱媒体中に設置したAGTシステムにおけるステンレス鋼316L製の共鳴器内の温度安定性や温度均一性を、水の三重点（0.01 °C）、ガリウムの融解点（29.7646 °C）、50 °C付近および70 °C付近において評価した。その結果を図(5)-2-③-1.4に示す。これらの図から、模擬装置として使用した共鳴器の温度は、制御温度計である北極側cSPRTで得られたものを除き、±0.8 mK程度で実現可能であることが分かった。しかし、室温以下で使用した無酸素銅製の共鳴器と比較して、本共鳴器の北極、南極および赤道側の温度の不均一は大きく、大型恒温槽の設定温度が大きくなるに従って、その不均一も大きくなる傾向があることが分かった。この結果により、さらに高精度な温度測定を行う必要がある場合は、共鳴器の温度制御システムのさらなる最適設定が必要であると言える。

本プロジェクトで開発した優れた温度安定性を持つ大型恒温槽と、前述した模擬装置であるAGTおよびその制御・測定システムを組み合わせることにより、水銀の三重点（29.7646 °C）、ガリウムの融解点（29.7646 °C）、50 °Cおよび70 °Cにおいて、熱力学温度 T と、現在温度標準とされているITS-90により測定した温度 T_{90} の差（ $T-T_{90}$ ）を評価した。評価結果を図(5)-2-③-1.5に示す。図中には、参考値として、これまで海外の研究機関において報告された実測値を、測定不確かさであるエラーバーとともに示した。一方で、「this work」付き名称で示した（ $T-T_{90}$ ）が本研究にて得られた成果である。「this work」については、現時点では、共鳴器の温度の不均一性により大きな不確かさとなっているため、エラーバーを示していないが、図(5)-2-③-1.5から分かるように、本測定で得られた結果は、既存の実測値と一致した傾向を示している。



図(5)-2-③-1.4 模擬装置として使用した室温以上用の共鳴器内の温度安定性



図(5)-2-③-1.5 ITS-90 の温度値 T_{90} と熱力学温度 T との差 ($T - T_{90}$)

上記の温度安定性の評価および熱力学温度の測定結果から、開発した本大型恒温槽は、プロジェクトを推進するうえで十分な性能を持っていることが分かった。後述する実施項目(5)-2-③-2に示すように、大型恒温槽へのライトシフト評価装置の設置準備として、大型恒温槽の蓋や使用空間の寸法の検討も完了している。これらのことから、高精度ライトシフト評価法の温度依存性を取得するための技術を確立できたと言えらるとともに、大型恒温槽が温度の次期標準および国際温度目盛の開発のために非常に重要な役割を担う高精度な熱力学温度の測定にも応用できることを見出すことができた。

実施項目(5) 周波数変動要因評価技術の開発

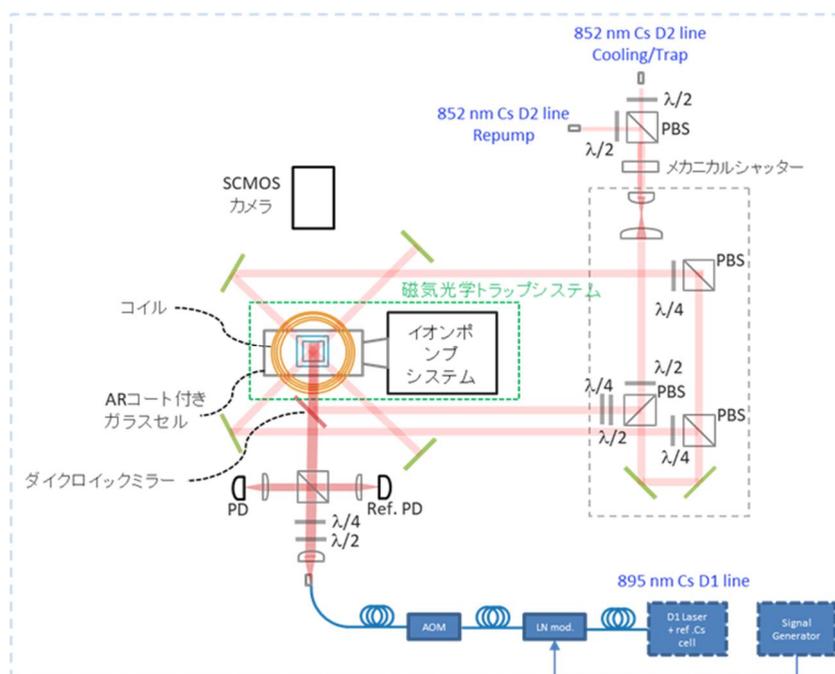
実施項目(5)-2 高精度ライトシフト変動要因評価技術の開発

実施項目(5)-2-③-2 超高真空ガスセルを用いた高精度ライトシフト評価法の温度依存性取得技術の確立(担当：日本電気株式会社)

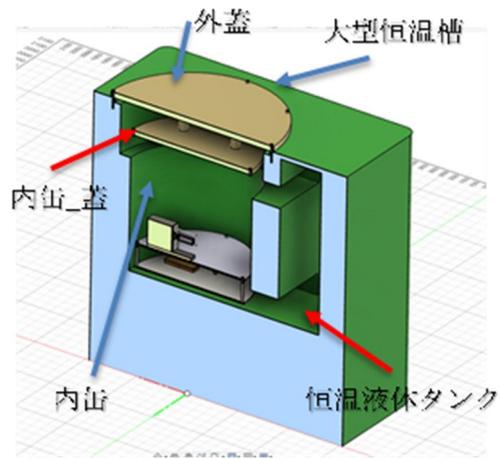
本実施項目においては、恒温槽内に設置可能な孤立状態原子生成装置の設計・試作を行い、各種パラメータの温度依存性に関わるデータを取得する。恒温槽に設置可能な寸法で孤立状態原子生成の技術基盤となる磁気光学トラップ光学系の構築を完了し、レーザ系の安定化機構の構築により孤立状態原子の恒常的な生成を可能にした。孤立状態原子に対するCPT共鳴観測のためのレーザ系および磁場の切り替えのためのコイル系および制御系を構築し、磁気光学トラップ系と協動作させることでライトシフト評価系の構築を完了した。

図(5)-2-③-2.1に捕獲原子のライトシフト評価系の構成図を示す。ライトシフトの評価系においてはセシウム原子 ^{133}Cs のCPT共鳴の観測に使用するD₁線(波長~894 nm)および磁気光学トラップのためのD₂線(波長~852 nm)のレーザ光を高真空のガスセル内に入射させ、Cs蒸気に対して照射を行う必要がある。今回構築した光学系においては、恒温槽内に導入するためのフットプリントを削減するためのファイバオプティクスとダイクロイックミラーの導入を行った。ダイクロイックミラーにおいては、D₂線を反射し、D₁線を透過させる光学特性を有する素子を選定することで、D₁線とD₂線を同軸で入射させることを可能にした。またCPT共鳴の観測において、原子に照射され透過したレーザ光を磁気光学トラップ用のミラーで同様に反射させることで、再びダイクロイックミラーを透過した光が偏光ビームスプリッタ後の光検出器(PD)で検出可能な光学配置での光学系の構築を完了した。上記光学系により、40 cm×40 cmのフットプリントでCPT-MOTすなわちライトシフトの評価が恒温槽内で可能な系の構築を達成した。

図(5)-2-③-2.2は実際に恒温槽内に図(5)-2-③-2.1の光学系を導入することを想定した設計図である。これにより、光学系を実際に恒温槽内に設置に、CPT共鳴の温度依存性データを取得することでライトシフトの評価の温度依存性の評価が恒温槽内で可能であることを確認した。



図(5)-2-③-2.1 捕獲原子のライトシフト評価系



図(5)-2-③-2.2 ライトシフト評価装置の設置の準備

実施項目(5) 周波数変動要因評価技術の開発

実施項目(5)-2 高精度ライトシフト変動要因評価技術の開発

実施項目(5)-2-④ AIによるライトシフト変動評価及び低減化技術の確立

(a)光学定盤モデルでのライトシフト・非対称信号の検討

光学定盤モデルでのCPT共鳴測定を、励起光の各種パラメータを変えて実行し、CPT共鳴信号がどのように励起光の状態の影響を受けるかを詳細に評価した。励起光の各種パラメータとは、励起光の強度、励起光の周波数変調深さ、励起光波長の励起準位からの離調等である。これらの測定の結果から、CPT共鳴信号のライトシフトおよび非対称スペクトルの特徴に関する知見を得た。ここで得られた知見は、CPT共鳴信号を時計用発振器として活用した際のライトシフトの変動抑制を実現するために重要な寄与を有するものである。

(b)32準位モデル構築

CPT共鳴現象を理解、考察するために広く用いられるモデルは、2周波の光と3つあるいは4つの少数量子準位を含むものである。こうした少数準位モデルは、計算量が小さく済むこと、現象を単純化して考察しやすいことが利点としてある。一方、本研究で対象としているCs原子の D_1 線は、ゼーマン分裂した32個の量子準位を有しており、CPT共鳴信号の生成の背景には、これらすべての準位が関与した光遷移過程がある。各種の励起光条件に対してCPT共鳴信号を定量的に見積もるために、これら32準位をすべて含んだリウビル密度行列方程式の多準位モデルを構築した。異なる偏光、周波数、強度の励起光によって励起されるCPT共鳴の振幅と形状をシミュレーションし、対応する実験結果と比較することによって、その基礎となるメカニズムを解明した。

4. 委託業務全体の成果

4. 1 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果

・実施項目(1)-4-①において、磁場変動に対して共鳴周波数が安定な動作条件、すなわち、「魔法磁場」があることを実証し、磁場による周波数変動低減に向け有効な手段を提示することができた。

成果：K.Matsumoto et al., Phys.Rev.A 105(2022)023110.

K.Matsumoto et al., 2022 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum & The IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF-IFCS2022) ID:B1P-6,5041 (2022).

松本健太他，電気学会第9回精密計測を元に科学技術に変革をもたらす回路技術調査専門委員会，(2022).

各務惣太他，2022年第69回応用物理学会春季学術講演会，26p-E302-11，(2022).

・実施項目(5)-1-①-1において、基板上に実装可能なマイクロスケールの温度計測技術として、シリコンフォトニクス技術を用いた光共振器温度計(フォトニック温度計)の試作開発と評価を行った。異なるリング半径をもった複数のフォトニック温度計を基板上に実装し評価したところ、共振波長を0℃で規格化することで、共振器のリング半径に依らずに温度計測が可能となることを明らかにすることができた。

成果：河村泰樹他，第82回応用物理学会秋季学術講演会，13p-S401-4 (2021).

河村泰樹他，2021年度NMIJ（産総研計量標準総合センター）成果発表会，(2021).

・実施項目(5)-2-1(b)においては、外部共振器半導体レーザ(ECDL)における周波数範囲の拡大を実証することが出来た。ECDLにおいて、出力端面に反射防止膜を施した半導体レーザ(LD)チップを用いることにより、波長選択素子であるバンドパスフィルタを動かさずにLDへの注入電流を変えるだけで、フリースペクトルレンジ(FSR)の4.5倍に相当する14.8 GHzにわたり周波数を連続掃引した。従来知見に基づけば、波長選択素子を固定している限り連続掃引範囲はFSRに制限されるはずである。連続掃引範囲は周波数ロックを行う際のロッキングレンジに対応するため、広い連続掃引範囲は周波数ロックの安定化に寄与する。

ECDLの周波数の変化を、もう1台用意したECDLとのビート周波数を取ることによって測定した。図4.1.1に注入電流に対するECDLの周波数変化を示す。発振閾値65 mA付近から本実験で試みた最大の電流値190 mAまで、モードホップせず14.8 GHzにわたって連続掃引されたことが分かる。

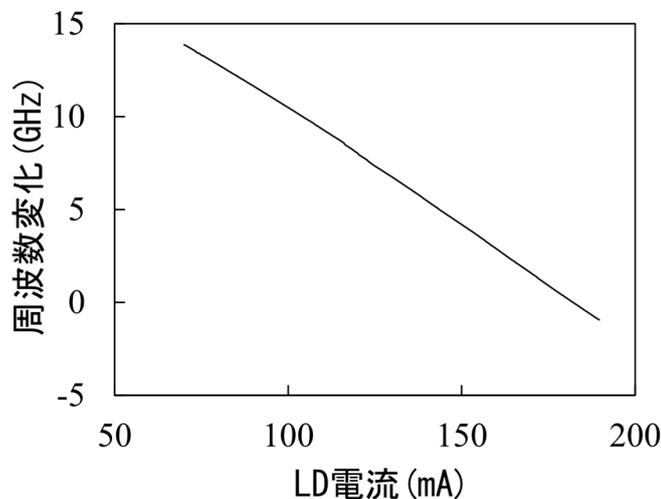


図 4.1.1 LD への注入電流に対する ECDL の周波数変化。

成果：A. Takamizawa, Opt. Express 32(1), 774 (2024).

高見澤昭文他, 第71回応用物理学会春季学術講演会, 24a-13P-1 (2024).

4. 2 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

・測位への応用

本プロジェクトでは開発された小型原子時計は、車載や次世代移動通信基地局に設置されることで、地上発信電波を利用した作動測位のため、また、測位衛星からの電波が途絶しても高精度測位を維持するための小型原子時計用の高精度発振器として、産業分野の発展に寄与すると予想される。

・小型化光時計へのMEMSデバイスの応用

本プロジェクトでは原子時計の周波数としてはマイクロ波帯の従来の原子時計を扱った。目的は異なるが、より精度の高い「一次周波数標準器」の世界では次世代の秒の再定義をにらみ、ストロンチウム原子やイッテルビウム原子、また水銀イオンにおける光の遷移を利用した 10^{-18} 位の精度を有する「光時計」の開発が活発に進められている。

本プロジェクトにおいて我々が開発した各種MEMSデバイスは、光時計でも必須となる磁気光学トラップ (Magneto-Optical Trap) のシステム全体を小型化する上で極めて重要なデバイスとなると予想されることから、我々も当初よりこれを睨んで開発を進めてきたが、開発されたMEMSデバイスは光時計の発展にも不可欠な道具となることが予想される。米国においてもDARPAにおいてAtomic-Photonic Integration (A-Phi)という同様の試みが進められている。

・耐振動特性をもつ水晶発振器

将来的に通信においてデータ処理容量の増大によるデータの並列処理、リアルタイム性が重視されるアプリケーションの広がりが見込まれる。これらのキー要素となるのが各処理ノードにおける時刻同期であると思われる。この時刻同期はネットワークに接続されていないスタンドアロンにおいても同期した時刻を維持する必要がある。ここに高精度な基準信号源となる原子発振器やOCXO、高精度TCXOが必要となってくる。そのためOCXO、高精度TCXOの需要は今後大きく広がっていくものと考えられる。また、将来的には自動車の自動運転においてもリアルタイム性の必要性から無線通信を通じて高精度な同期が必要となることが予想される。このように時刻同期が社会の隅々まで浸透する世界になることが予想され、様々なアプリケーションで高精度な基準信号源が必須になるものと考えられる。

・小型恒温槽、フォトニック温度計

今回開発した小型恒温槽は、小型・高い可搬性・低い製造コストの中で、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ から $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲において $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下という高い温度安定度を実現した。動作原理から、更に低温・高温に稼働温度範囲を拡張できる可能性がある。本装置はHSULPACプロトタイプモジュールの評価だけでなく、様々な物性の評価に応用可能となることが期待できる。

・チップサーミスタ

サーミスタの抵抗値が変化することについては明らかになっていないが有力な要因としては熱膨張率が挙げられる。サーミスタ素子とこれを実装したシリコン基板間の熱膨張率に差異があり、サーミスタ素子にかかる基板からの応力が温度に応じて変化することで、同一温度であっても抵抗値が変化することと考えられる。

・大型恒温槽

本研究で開発した大型恒温槽について、有効に使用可能な大空間において $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ から $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ までの温度範囲でその性能を精密に評価したが、熱媒体の選択によっては、低温側では $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ まで、高温側では $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ まで使用可能である。これまで原子時計の模擬装置として使用した音響気体温度計を最適化すれば、前述した温度範囲で、学術的にも重要性が高い ($T-T_{90}$) を広範囲かつ高精度に測定可能であると考えられる。

4. 3 研究成果の発表・発信に関する活動

査読付きの学術論文として、Micromachine(IF=2.891)、Physical Review A(IF=3.140)、Sensors(IF=3.847)、Optics Express (IF=3.8)、Applied Physics Express (IF=2.3) に各1件、計5件採択された。また、第31回マイクロエレクトロニクスシンポジウム秋季大会(エレクトロニクス実装学会、2021年9月22日発表)において発表した「原子時計の小型化に向けた回折格子の作製と等方性評価」がベストペーパー賞を受賞した。

5. プロジェクトの総合的推進

5. 1 研究実施体制とマネジメント

本プロジェクトでは、代表研究機関の一般財団法人マイクロマシンセンターから分担研究機関の国立研究開発法人産業技術総合研究所、日本電気株式会社、株式会社大真空の3機関に再委託を行い、4機関連携して研究開発を実施した。図5.1.1に研究実施体制と担当テーマを、図5.1.2に各機関間の連携関係を示す。

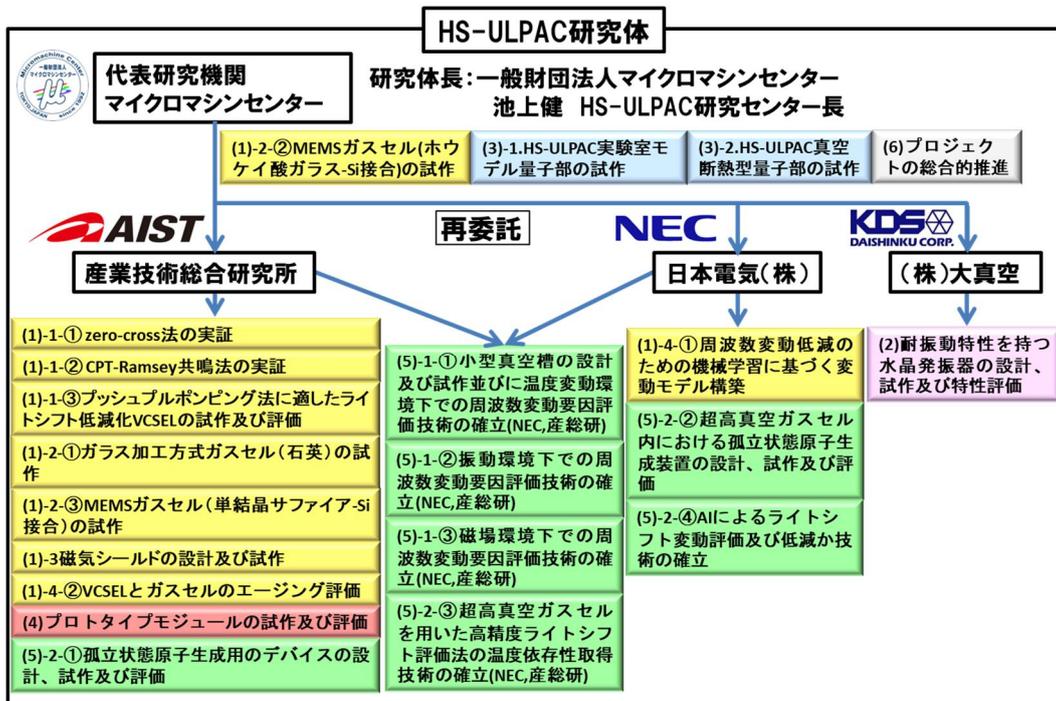


図 5.1.1 研究実施体制

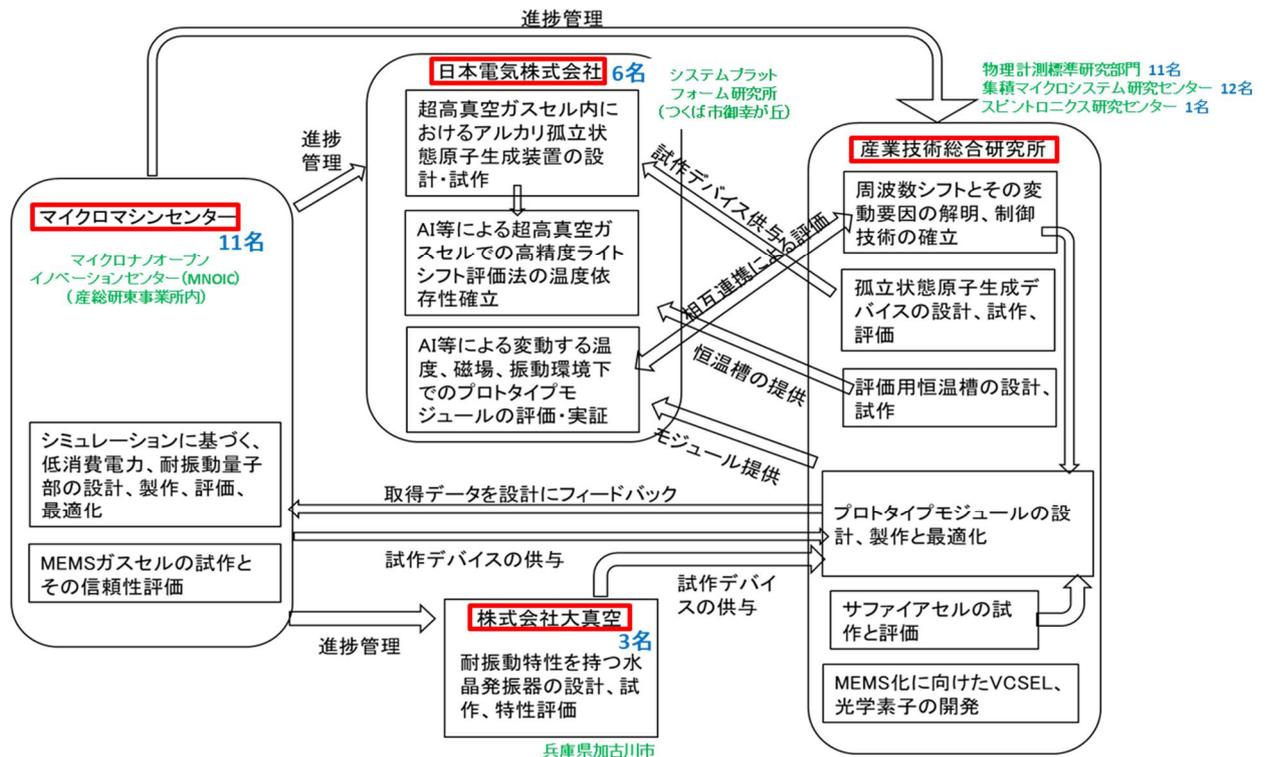


図 5.1.2 参画機関間の連携関係

図5.1.2に示すように、各機関の連携関係は複雑なものとなっているため、お互いの研究進捗状況を共有して、研究開発を円滑かつ効率的に実施するため、2か月に1回を基準とした定期的な研究会を実施した。さらに、株式会社大真空を除く、各機関は国立研究開発法人産業技術総合研究所のつくば地区を研究開発の拠点としているため、研究テーマ毎の輪講会を開催することにより、技術力の相互向上を図った。2019年3月25日に全研究者が集まるキックオフミーティングを計画したが、新型コロナウイルスの拡大が終息しなかったため、政府基本方針の感染拡大防止の観点から書面開催をおこなった。書面開催では、各機関リーダーから基本方針が示され、その方針に従って、本格的に研究開発を開始した。研究会、及び輪講会の開催日程は以下の通りである。

・研究会

- (1) 令和元年度キックオフ会議 (3/25 : 書面開催)
- (2) 令和2年度研究会 (計6回 : 4/16、6/25、9/15、11/19、1/14、3/11)
- (3) 令和3年度研究会 (計6回 : 5/13、7/8、9/16、10/25、1/13、3/10)
- (4) 令和4年度研究会 (計6回 : 5/12、7/7、9/8、11/10、1/12、3/9)
- (5) 令和5年度研究会 (計6回 : 5/11、7/13、9/7、11/9、1/11、3/7)

・輪講会

令和2年度

- (1) 第1回HS-ULPAC輪講会(令和2年4月28日)
- (2) 第2回HS-ULPAC輪講会(令和2年5月13日)
- (3) 第3回HS-ULPAC輪講会(令和2年5月20日)
- (4) 第4回HS-ULPAC輪講会(令和2年6月3日)
- (5) 第5回HS-ULPAC輪講会(令和2年6月10日)
- (6) 第6回HS-ULPAC輪講会(令和2年6月17日)
- (7) 第7回HS-ULPAC輪講会(令和2年7月1日)
- (8) 第8回HS-ULPAC輪講会(令和2年7月8日)
- (9) 第9回HS-ULPAC輪講会(令和2年7月15日)

- (10)第10回HS-ULPAC輪講会(令和2年7月22日)
- (11)第11回HS-ULPAC輪講会(令和2年7月29日)
- (12)第12回HS-ULPAC輪講会(令和2年8月26日)
- (13)第13回HS-ULPAC輪講会(令和2年9月2日)
- (14)第14回HS-ULPAC輪講会(令和2年9月23日)
- (15)第15回HS-ULPAC輪講会(令和2年9月30日)
- (16)第16回HS-ULPAC輪講会(令和2年10月7日)
- (17)第17回HS-ULPAC輪講会(令和2年10月21日)
- (18)第18回HS-ULPAC輪講会(令和2年10月28日)
- (19)第19回HS-ULPAC輪講会(令和2年11月5日)
- (20)第20回HS-ULPAC輪講会(令和2年12月2日)
- (21)第21回HS-ULPAC輪講会(令和3年1月20日)

令和3年度

- (1) 第1回HS-ULPAC輪講会(令和3年4月14日)
- (2) 第2回HS-ULPAC輪講会(令和3年4月21日)
- (3) 第3回HS-ULPAC輪講会(令和3年7月14日)
- (4) 第4回HS-ULPAC輪講会(令和4年2月9日)

令和4年度

- (1) 第1回HS-ULPAC輪講会(令和4年6月22日)
- (2) 第2回HS-ULPAC輪講会(令和4年6月29日)
- (3) 第3回HS-ULPAC輪講会(令和4年9月14日)

令和5年度

- (1) 第1回HS-ULPAC輪講会(令和5年4月12日)
- (2) 第2回HS-ULPAC輪講会(令和5年12月6日)

また、図5.1.3に示す研究進捗報告フォーマットを作成し、研究会において、本フォーマットで進捗管理を行い、目標の常時監視、進捗状況・マイルストーン・予算の執行状況の確認及び遅れ挽回策の確認と柔軟な研究方策の見直しを実施することで、相互連携を図りながら、目標達成のために研究内容の改善や軌道修正等を効率的に実施した。

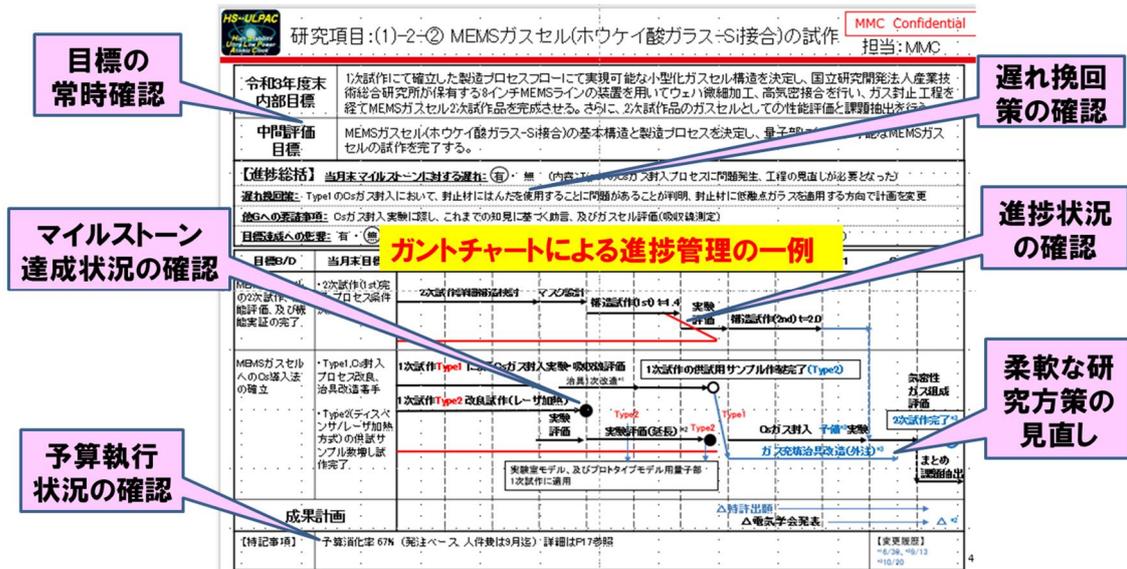


図 5.1.3 研究進捗報告フォーマット

さらに、最終年度に関しては、図5.1.4に示す実施項目間の連携チャートを作成し、最終目標達成に向け、連携の見える化を図った。

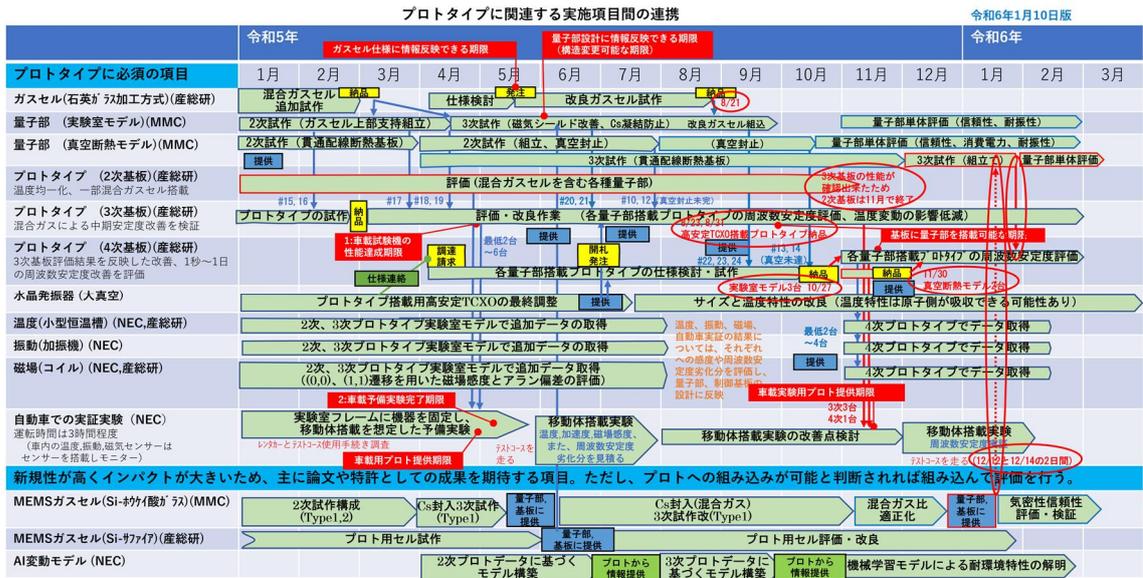


図 5.1.4 実施項目間の連携チャート

5. 2 経費の効率的執行

表5.2.1と図5.2.1に直接費の費目毎の経費執行の年度変化を示す。令和元年度は研究期間が1カ月であり、令和2年度から本格研究を開始した。機械装置（物品費）は研究開発の初期に主に導入し、その後は評価装置等研究開発に必要なものを順次導入した。したがって、年度総額の減少の主要因は物品費の減少に相当する。令和3年度と令和4年度はプロトタイプの試作・評価のため、試作外注、評価外注が増加したため、その他経費と人件費が増加した。最終年度はまとめのため、全体的に減少した。このように、研究開発のフェーズに合わせて、効率的な経費の執行を行った。

表 5.2.1 費目毎の経費執行の年度変化（直接費）

	(千円)					
	令和元年	令和2年	令和3年	令和4年	令和5年	計
全機関計						
物品費	0	587,980	241,448	82,752	43,260	955,440
人件費	517	58,367	79,268	65,357	38,274	241,783
旅費	9	146	2,562	2,077	2,373	7,166
その他	51	43,500	71,205	84,358	18,124	217,237
直接費計	577	689,993	394,483	234,544	102,031	1,421,626

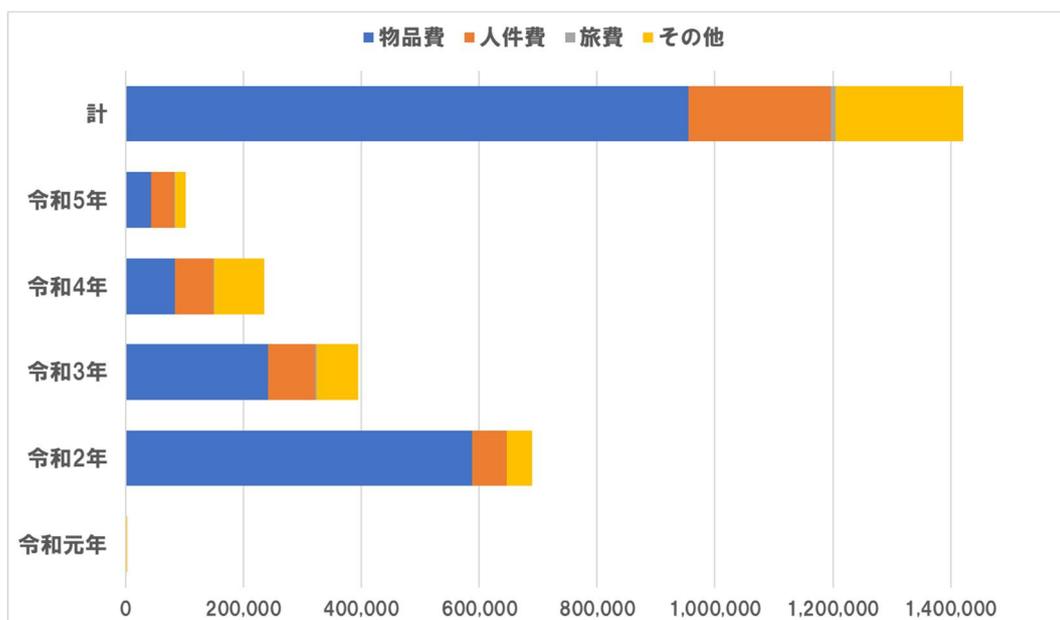


図 5.2.1 費目毎の経費執行の年度変化（直接費）

6. まとめ、今後の予定

- ・測位衛星搭載用時計の発振器と同等の性能を有し、かつ手のひらサイズで低消費電力の小型時計用発振器を高安定化するための基礎研究として、下記を行った。
 - (1) 各種周波数変動要因を解明した。
 - (2) 車載環境(移動局)で周波数安定度を維持するための条件を解明した。
 - (3) プロトタイプモジュール試作による性能評価・実証を行った。

- ・基本的な実験と理論により下記を明らかにした。

ライトシフトの変動モデルを構築するために光学定盤モデルを使用して、励起光強度、励起光強度、変調指数、バッファガス圧、偏光状態などの多数のパラメータを変化させてCPT共鳴スペクトルを測定し、下記の結果を得た。

磁場不感(-1,1)遷移の発見：磁場変動に対して安定な動作条件（魔法磁場）があることを実証した。

CPT共鳴の非対称性の探索：CPT共鳴信号においてのライトシフトおよび非対称スペクトルの特徴に関する知見を得た。

32準位モデル計算環境構築：Cs原子のCPT共鳴に関連する全32準位を用いたモデルで信号強度を計算し、実験結果を説明でき、励起方法によらない統一的な説明が出来るようになった。

CPT-Ramsey方式によるライトシフト低減実証：励起光をパルス化するCPT - Ramsey方式で、信号の狭窄化・ライトシフト低減を数値的・実験的に実証した。狭窄な信号による短期安定度改善、及びライトシフト低減による長期安定度改善(周波数ドリフト低減を含む)に寄与しうることを確認した。

AI(Artificial Intelligence)を用いた周波数変動モデル構築：機械学習に基づく手法で分析・周波数予測を行い、温度変動時に実測周波数と予測周波数が正の相関を持つことを示し、温度由来の周波数変動を低減しうることを示した。

- ・実験的には下記を達成した。

ゼロクロス法の妥当性実証：NEDO-ULPACとは異なるVCSELにおいて、ドリフトのゼロ点の存在を確認した。

プロトタイプにおけるゼーマンシフトの探索：原子の磁場敏感遷移を用いた磁場の評価を用いたプ

ロトタイプ内の磁場変動成分の推定に成功。

量子部の設計・製造技術確立：実験室モデルについては石英ガスセルを組み込み、プロトタイプモジュールに搭載し、安定度評価のベースとなる量子部の設計・製造技術を確認。真空断熱モデルについては断熱性と耐震性を併せ持つ断熱支持構造と実装面積の縮小に寄与する貫通取付の製造技術を確認し、基本動作を確認し、設計・製造技術を確認。

- 要素技術としては下記を達成した。

ガラス加工方式ガスセルの活用：プロトタイプモジュール搭載用石英ガスセルを製作し、基準データを取得した。

MEMS(ホウケイ酸ガラス-Si接合)ガスセル製造技術の探索：多数(2880個)のガスセル構造をウエハー一括で製造する技術を確認した。

MEMSガスセル(単結晶サファイア-Si接合)ガスセル製造技術の探索：製造技術を確認し、プロトタイプに実装して低ドリフトを確認した。

水晶発振器製造技術の探索：11x9 mmサイズ TCXO で 1.4×10^{-11} のアラン偏差、G-Sensitivity 0.1ppb/G、消費電力 18 mW の世界最高性能 TCXO の製品化実現。今後 OCXO、高精度 TCXO の市場規模の拡大が見込まれることから、当研究において養われノウハウを生かしつつ、性能だけでなく生産性を含めてさらなる製品の発展を将来に向けて行きたい。

小型温槽の活用：体積 1000 cm^3 で $-10 \text{ }^\circ\text{C} \sim +70 \text{ }^\circ\text{C}$ の範囲で $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$ で温度安定化技術を確認。また、温度制御用サーミスタを評価し、これらをプロトタイプモジュールに活用。

- 以上の基礎研究結果を踏まえ、下記のように HS-ULPAC プロトタイプモジュールを構築し、温度、振動、磁場の変動環境における周波数変動データを取得し、機械学習に基づく手法での分析・周波数予測を行うとともに、HS-ULPAC プロトタイプモジュールを自動車に搭載した実証を行った。

HS-ULPAC プロトタイプモジュールの実現：プロトタイプモジュールの評価結果については「実施項目(4)プロトタイプモジュールの試作及び評価」に記載したとおりであるが、世界的な位置づけを下記(図6.1)に示す。CSACタイプのアーキテクチャーを用いた小型原子時計としては世界的に高いレベルにあることを確認した。

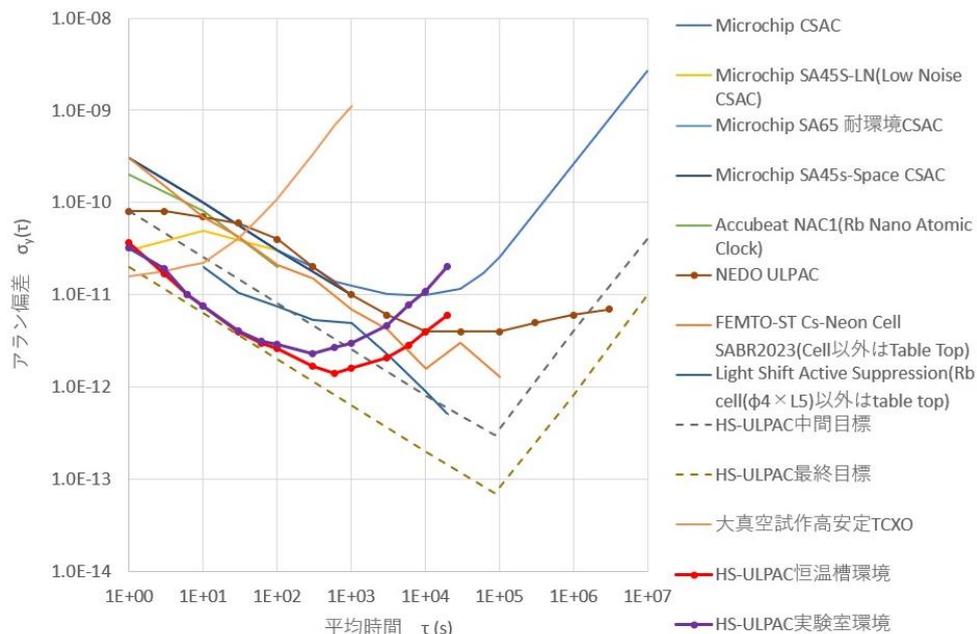


図6.1 世界の小型原子時計の周波数安定度の現状^[1-7]

温度・振動・磁場試験の実施：機械学習に基づく手法での分析・周波数予測を行い、実測周波数と予測周波数の相関を調べた。温度に依存した周波数変動が存在し、機械学習のデータを用いてこれを低減しうることを示した。また、プロトタイプモジュールの面直方向に磁場による周波数シフト

が存在することを確認した。

車載実験の実施：2度にわたる車載実験で、実験室で行った温度・振動・磁場試験との整合性を確認した。

- ・磁気光学トラップ (Magneto-Optical Trap=MOT) 用デバイス開発として下記を実現した。
 - 外部共振器半導体レーザ(ECDL)**：広い環境温度で運転可能な小型を作成し、注入電流によりフリースペクトルレンジより大幅に広い連続掃引範囲を実現。
 - 光集積回路型ECDL製造技術**：SiN光導波路を用いた超小型(2.4mmx0.5mm)のECDLで、波長852nm付近でのレーザ発振を達成。
 - 円偏光出力VCSEL**：既存のキャリア寿命を10倍上回る活性層の作成に成功。
 - 回折格子**：回折効率80%、円偏光度90%以上の回折格子作成工程を確立し、反射光強度のばらつきを低減に成功。
 - 孤立状態原子生成装置**：回折格子を用いたCs原子の孤立状態原子の生成 (MOT) を世界で初めて確認。
 - 大型温槽**：体積100000cm³の大型恒温槽で、-40°C~+80°Cの範囲でmKオーダーで温度を安定化する技術を確立。

なお、ライトシフトについてはバッファガスを含むガスセルを用いたCPT共鳴の観測により十分な知見を得られたことから、孤立状態原子生成実験についてはMOTに特化して実験を進めた。今後の取り組みとしては、本プロジェクトで得た成果を元にして、小型原子時計の実用化に向けた研究、また本プロジェクトで開発されたMEMSデバイスを使った超小型MOTシステムの構築や小型化光時計の実現へとつなげていきたい。

参考文献

- [1] MicroChip社 SA.45s CSAC Options 001 and 003 Chip-Scale Atomic Clock Specifications.
- [2] MicroChip社 LN CSAC Low-Noise Chip-Scale Atomic Clock Specifications.
- [3] MicroChip社 CSAC-SA65 Chip Scale Atomic Clock Specifications.
- [4] MicroChip社 Space Chip-Scale Atomic Clock (CSAC) SA.45s Specifications.
- [5] Accubeat社 Rubidium Frequency Standard NAC1 – Nano Atomic Clock Specifications.
- [6] C.Carle et al., “Pulsed-CPT Cs-Ne microcell atomic clock with frequency stability below 2×10^{-12} at 10^5 s”, Opt. Express 31(5), 6150 (2023).
- [7] D.A.Radnatarov et al., “Active Suppression of the Light Shift in an Atomic Clock Based on Coherent Population Trapping in ⁸⁷Rb Vapor Using the Phase Jump Technique”, Optics and Laser Physics 117(7), 504 (2023).

7. 研究発表、知的財産権等の状況

(1) 研究発表等の状況

研究開発から終了までの全期間における研究成果の発表件数を種別毎に表7(1).1に示す。

表 7(1).1 研究発表等の状況

種別	件数
学術論文	5件
学会発表	38件
展示・講演	14件
雑誌・図書	1件
プレス	4件
その他	該当なし

(2) 知的財産権等の状況

研究開発から終了までの全期間における公開されている知的財産権等の出願状況を表7(2).1に示す。

表 7(2).1 知的財産権等の状況

発明の名称	発明者	出願登録区分	出願番号 (出願日)	出願区分	出願国	登録番号 (登録日)
量子干渉装置、原子発振器及び制御方法	松本健太 (日本電気)、 各務惣太 (日本電気)、 柳町信也 (産総研)、 盛永篤郎 (マイクロマシンセンター)、 池上健 (マイクロマシンセンター)	出願	特願 2021 - 126765 (2021/8/2)	国内		
		出願	US17/877, 235 (2022/7/29)	国外国別	米国	
恒温槽型圧電発振器	重松俊輔 (大真空)	出願	特願 2021 - 182504 (2021/11/9)	国内		
量子干渉装置	松本健太 (日本電気)	出願	特願 2022 - 029511 (2022/2/28)	国内		
		出願	US18/113202 (2023/2/23)	国外国別	米国	
量子干渉装置	藤咲貴大 (日本電気)、 松本健太 (日本電気)、 各務惣太 (日本電気)	出願	特願 2022 - 029512 (2022/2/28)	国内		
		出願	US18/113215 (2023/2/23)	国外国別	米国	
原子発振器	各務惣太 (日本電気)	出願	特願 2022 - 056941 (2022/3/30)	国内		
		出願	US18/101737 (2023/1/26)	国外国別	米国	
原子発振器	藤咲貴大 (日本電気)、 松本健太 (日本電気)、	出願	特願 2022 - 088511 (2022/5/31)	国内		
		出願	US18/200850 (2023/5/23)	国外国別	米国	

	各務惣太 (日本電気)					
電子スピン 伝送素子、発 光装置、発光 アレイ装置 及びセンサ 装置	揖場聡 (産総研)、 大野裕三 (産総研)	出願	特 願 2022 - 120334 (2022/7/28)	国内		
原子発振器	松本健太 (日本電気)、 藤咲貴大 (日本電気)	出願	特 願 2022 - 168348 (2022/10/20)	国内		
		出願	US18/378401 (2023/10/10)	国外国別	米国	

(3) その他特記事項

研究開発から終了までの全期間におけるワークショップの開催、運営委員会等の関連する委員会等の開催状況等を表7(3).1に示す。一般財団法人マイクロマシンセンターが主催するMEMSセンシング&ネットワークシステム展において、併催ワークショップとして、研究開発プロジェクトの成果報告会開催し、広く本プロジェクトの成果広報を行った。

表 7(3).1 ワークショップ等の開催の状況

年月日	開催名称	実施場所	備考
2020/12/10	MEMSセンシング&ネットワークシステム展2021併催研究開発プロジェクト成果報告会	東京ビッグサイト会議棟102室	
2022/1/27	MEMSセンシング&ネットワークシステム展2022併催研究開発プロジェクト成果報告会	東京ビッグサイト会議棟102室	
2023/2/2	MEMSセンシング&ネットワークシステム展2023併催研究開発プロジェクト成果報告会	東京ビッグサイト会議棟102室	