

安全保障技術研究推進制度 令和5年度終了課題 終了評価結果

1. 評価対象研究課題

- (1) 研究課題名：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
- (2) 研究代表者：一般財団法人マイクロマシンセンター 池上 健
- (3) 研究期間：令和元年度～令和5年度

2. 終了評価の実施概要

実施日：令和6年11月15日

場所：TKP秋葉原カンファレンスセンター

評価委員：未来工学研究所 理事長、上席研究員／東京大学 名誉教授

平澤 洽（委員長）

長岡技術科学大学 副学長・教授

井原 郁夫

産業技術総合研究所 執行役員

兼 エネルギー・環境領域 領域長

小原 春彦

東京科学大学 工学院 電気電子系 教授

梶川 浩太郎

東京農工大学 名誉教授

佐藤 勝昭

国立感染症研究所 客員研究員

四ノ宮 成祥

科学技術振興機構 研究開発センター 企画運営室長、フェロー

中山 智弘

（委員長以外は五十音順・敬称略）

3. 研究と成果の概要

研究の概要

時計の車載や次世代移動通信基地局への設置等を想定し、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時計用の高精度発振器の実現を目指す。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、主要な周波数変動要因の解明及びプロトタイプでの実証・評価等を実施する。

成果の概要

<プロトタイプモジュールの構成要素に関する成果>

- ・ 水晶発振器については、1 秒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。
- ・ プロトタイプ搭載用に混合ガスを用いた石英ガラス製ガスセルを開発したほか、MEMS 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認した。さらに、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。
- ・ 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・製造技術を確認した。

<上記の要素を組み合わせて構成したプロトタイプモジュールに関する成果>

- ・ 実験室環境で温度・振動・磁場を変化させる環境耐性実験と、自動車に搭載した実証実験を実施し、発振周波数の環境特性を解明した。
- ・ 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。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: 3.0×10^{-11} /day) に比べて約一桁小さな周波数ドリフト (2.3×10^{-12} /day) が実証された。

4. 終了評価の評点

A 相応の成果をあげた。

5. 総合コメント

目標は未達のものも多かったが、プロジェクトの目標は概ね達成したものと考えられる。小型原子時計としては世界最高レベルで可搬型にまとめることができおり、将来の社会実装に向けて意義のある成果が得られている。また、副次的な成果として波及効果の高いいくつかの成果も得ており、広範囲な応用が期待できる。

研究チームのポテンシャルは高いので、これらの成果を利用して、目的に応じた実用化に向けて本格的に取り組んでいただきたい。

6. 評価の観点ごとの評価結果と個々の委員によるコメント

6-1. 研究開始時に設定した研究目標の達成度（主題的成果）

最終目標は以下の通りである。

- ・ 1 秒平均のアラン標準偏差 $\sigma_y(\tau=1\text{ s})$ が 2.0×10^{-11} 、1 日平均のアラン標準偏差 $\sigma_y(\tau=1\text{ day})$ が 7×10^{-14}
- ・ 長期安定度として周波数ドリフトが $1.0 \times 10^{-13}/\text{day}$
- ・ 消費電力 300 mW 以下（量子部、水晶発振器、制御回路等すべて含め）
- ・ 体積 50 cm³ 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 3 G(加速度の単位 1 G=9.8 m/s²) (5～50 Hz)
 - － 温度 -10 °C～70 °C(衛星搭載レベル時計用発振器は 0 °C～50 °C)
 - － 磁場 0～最大 2×10^{-4} T (直流磁場及び 50 Hz と 60 Hz 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 °C～+85 °C

中期安定性に関しては、平均時間 τ が約 400 秒以下の領域で最終目標に近いアラン標準偏差 $3 \times 10^{-11} \times \tau^{-1/2}$ を達成した。これは、1 秒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したことによる貢献が大きい。

一方、 τ が 1000 秒から 10000 秒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。この中期安定性の主要な悪化要因として、ガスセル近傍の温度分布の非一様性があげられる。

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。未達要因として調整後に残ったドリフト（大きさ $2.3 \times 10^{-12} / \text{day}$ ）があるが、これは VCSEL 温度の Zero-cross 状態となる温度からのわずかな偏差によるものと考えている。

耐環境特性に関して、温度変化に加え、プロトタイプの面直方向（レーザの光軸方向）の磁場変動が、周波数変動要因であることが判明しており、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から、ガスセル周辺に外部磁場が侵入し、周波数変動を生じたと考えている。

筐体サイズとして 300 cm³ を達成したが、最終目標である 50 cm³ 以下は未達である。また、プロトタイプ全体として約 4.0 W の消費電力を達成したが、最終目標である 300 mW 以下は未達である。構成要素の配置を最適化した高密度実装、真空断熱型量子部の採用、制御回路の ASIC 等により達成可能であると考えている。

【個々の委員によるコメント】（主題的成果）

- ・ 目標が、短期的な時間幅では達成されているものの、長期的な時間幅については達

成されていない。

- ・小型化による可能性を示した点は評価できる。

6-2. 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）

- ・小型 MOT（磁気光学トラップ）システムの開発に関して、MEMS 技術・光集積回路技術等を適用し MOT 構築に必要なデバイス（レーザ、レンズ、シャッター、回折格子、超高真空ガスセル）の小型化を実証した。また、世界初の Cs 原子回折格子磁気光学トラップの実現に成功した。
- ・光学定盤モデルでの CPT 共鳴、CPT-Ramsey 共鳴実験を実施し、耐環境性向上のための外部不感型動作手法の実証等の成果を創出した。
- ・シリコンフォトリソ技術によるフォトニック温度計測技術を開発した。
- ・HS-ULPAC プロトタイプモジュールに用いられる温度計測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。
- ・温度安定性が世界最高レベルで良好な大型恒温槽を製造した。

【個々の委員によるコメント】（副次的成果）

- ・MOT などの素晴らしい成果が得られており、高く評価できる。

6-3. 他の者により派生した成果（間接的成果）

該当なし。

【個々の委員によるコメント】（間接的成果）

該当なし。

6-4. 科学技術上特筆すべき成果

- ・11 mm×9 mm サイズの水晶発振器で、アラン標準偏差 1.4×10^{-11} 、G-sensitivity 0.1 ppb/G、消費電力 18 mW を実現した。
- ・光学定盤上に構築した光学系での CPT 共鳴、CPT-Ramsey 共鳴実験を実施し、耐環境性向上のための外部不感型動作手法の実証等の成果を創出した。
- ・CPT 共鳴信号において磁場不感遷移の存在を実証した。
- ・温度安定性が世界最高レベルで良好な大型恒温槽を開発した。
- ・小型 MOT システムの開発に関して、MEMS 技術・光集積回路技術等を適用し MOT 構築に必要なデバイス（レンズ、超高真空ガスセル）の小型化を実証した。また、世界初の Cs 原子回折格子磁気光学トラップの実現に成功した。
- ・新規に開発した外部共振器半導体レーザでは、注入電流のみで FSR 以上の周波数連続掃引を実現した。

【個々の委員によるコメント】(科学技術上特筆すべき成果)

- ・短い平均時間において、CPT 共鳴を活用した小型原子時計としては世界最高レベルの周波数安定度を得たことは特筆すべきである。
- ・水晶発振器の高安定化と原子時計の小型化に成功したことは評価に値する。

6-5. 論文(投稿中のものも含む), 学会発表等

論文、6 件(2024 年 5 月 31 日時点)、追加 2 件

学会発表、37 件

展示・講演、14 件

雑誌・図書、1 件

プレス、4 件

6-6. 特許(出願中のものも含む)

出願中 14 件(2024 年 5 月 31 日時点)、追加 3 件

【個々の委員によるコメント】(論文、特許、学会発表等の研究成果)

- ・相応の外部公表と特許出願がなされている。
- ・よいアウトプットがなされている。

6-7. 科学技術への波及効果

- ・独自のドリフト低減手法の開発実証は、GNSS 等の時刻基準信号を受けることができない海中等での適用可能性を高める成果である。
- ・多数の MEMS ガスセルをウェハ一括で製造する技術確立したことは、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である。
- ・磁場不感型動作手法の実証は、移動体搭載時に問題となる、環境磁場による小型原子時計の発振周波数の変動を抑制しうる。
- ・外部との熱を遮断可能な真空断熱型量子部の設計・製造技術確立したことは、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、今後の耐環境特性向上や消費電力低減に資する。
- ・極めて高い安定性と耐振動性を有する世界最高レベルの水晶発振器を実現したことは、移動体間の高精度同期等の実現に資する重要な成果である。
- ・MOT 構築に必要なデバイス(レーザ、レンズ、シャッター、回折格子、超高真空ガスセル)の小型化を実証し、さらに世界初の Cs 原子回折格子磁気光学トラップの実現に成功したことは、量子コンピュータ等の基盤技術にも展開しうる重要な成果である。

【個々の委員によるコメント】（発展性と波及効果）

- ・光量子コンピュータ、光格子時計などに発展する可能性がある。

6-8. 効率的な研究実施体制とマネジメント

関連する 4 機関の連携を綿密なものとするため、研究開発を効率的に推進するため 2 カ月 1 回の定期的な研究会を合計 25 回実施した。また、つくば地区を拠点とする参加メンバーの技術力相互向上を目的とし、プロジェクト期間内で輪講会を合計 30 回開催した。

【個々の委員によるコメント】（効率的な研究実施体制とマネジメント）

- ・プロジェクトマネジメントに関しては課題が残る。
- ・多くの研究成果が出ているにもかかわらず、未達の項目が多いのは研究全体のマネジメントが十分でないためと考えられる。
- ・マネジメントがうまくできていれば、より良好な成果が得られたと考えられる。

6-9. 研究推進時に生じた問題への対応

最終年度は確実な HS-ULPAC プロトタイプの性能向上を図るため、HS-ULPAC プロトタイプに関連する実施項目間の連携チャートにより作業内容を見える化し、担当者間で詳細情報を共有した。

【個々の委員によるコメント】（研究推進時に生じた問題への対応）

- ・未達となった原因や対応策は分かっているものの、それらが実行されていない。
- ・研究の大きな目標に向かっての問題解決の方向性に欠けていた印象がある。数多くの細部研究が展開されていたが、統一感に欠けるものとなった。
- ・全体を取りまとめるリーダーが不在に近い状態であったと判断される。

6-10. 経費の効率的な執行

研究開発期間の初期に物品費（設備等）へ重点的に予算配分し、その後、研究進捗に従い HS-ULPAC プロトタイプに関連する試作・評価へ必要な経費を計上した。このように研究開発フェーズに合わせた効率的な経費執行を実施した。

【個々の委員によるコメント】（経費の効率的な執行）

- ・多額の研究費に対して、成果が十分ではない。
- ・実用化になれば費用対効果は高い。