研究成果報告書

3次元一体成型による MEMS半球共振ジャイロスコープの研究

> 令和6年5月 東京計器株式会社

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、東京計器株式会社が実施した令和5年度「3次元一体成型によるMEMS半球共振ジャイロスコープの研究」の成果を取りまとめたものです。

1. 委託業務の目的

本研究課題では、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技法による3次元一体構造の共振子を検討し、試作によって、3次元形状一体成型の妥当性を確認し、振動ジャイロの性能に重要なファクターであるQ値に基づいて製造に最適な3次元MEMS一体成型プロセスを導出する。3次元MEMS一体成型プロセスで作製される共振子の特性値より、ジャイロスコープの性能を評価することで、高精度な半球共振ジャイロスコープを実現可能な製造プロセスの確立を目指す。併せて、上記の製造プロセスにより、以下の性能を有する半球共振ジャイロスコープの共振子の実現を目指す。

・Q値:10⁹ (バイアス安定性:10⁻⁴ °/h以下)

2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

高精度で小型かつ安価なMEMS型HRGの3次元一体成型プロセス技術として、鋳型方式にて3次元一体構造の成型に成功することができた。高温膨らましに耐える金属拡散接合用の金属および接合条件、電極材料の成立解を得ることができた。また、共振子分離法としてレーザーカットの実現可能性も確認ができ、3次元一体成型プロセスの基本となる要素技術を確立することができた。Q値評価は、ピエゾ素子加振のレーザードップラ測定(減衰法)により、石英単体共振子(電極蒸着していない)の1サンプル測定の結果であるが、約50,000を確認した。また、得られたセンサチップ(共振子+制御基板)の写真をFig.1に示す。

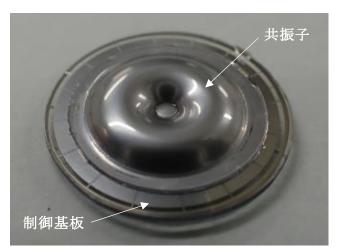


Fig.1 センサチップ

3. 委託業務における研究の方法及び成果

本研究では、以下の項目を実施した。

(1) 3次元一体成型プロセスの開発

- a. ガラス吹き工程の条件探索
- b. 犠牲層の成分、貼り合わせ方法の探索
- c. 各種メタルの耐性確認
- d. エッチャント組成、温度の探索
- e. 各工程の組合せ
- f. FEM(Finite Element Method)による最適形状の探索

(2) ジャイロ性能の確認

- g. 制御方式の検討
- h. Q値の比較のためのMEMS以外の製法による共振子の準備

以下に、詳細内容を記す。

(1) 3次元一体成型プロセスの導出

下記の項目を実施することで、3次元一体成型プロセスを導出し、Q値測定が可能なセンサチップの作製を目指した。

a. ガラス吹き工程の条件探索

共振子を形成する方法として、ガラス吹き工程[1]を採用した。高温真空炉(Fig. 2、R3. 12導入、テルモセラ、Mini-BENCH)を用いて、キャビティーを形成したサンプル(Fig. 3)を膨らませる。石英の場合、貼り合わせてキャビティーを形成する方法が難しいため、先行してSiと直接接合によりキャビティーが形成可能なテンパックス(Tx)ガラスで、ガラス吹き工程の条件出しを実施した。Fig. 4に結果を示す。温度および加熱時間を調節することで、中央に柱構造を持つ共振子形状を形成することが可能となった。



Fig. 2 高温真空炉 (最大温度2000℃)

キャビティー内を圧力調整(~1気圧) Tx GLAS Si

Fig. 3 条件出しサンプル (Siとガラスを陽極接合で直接接合)

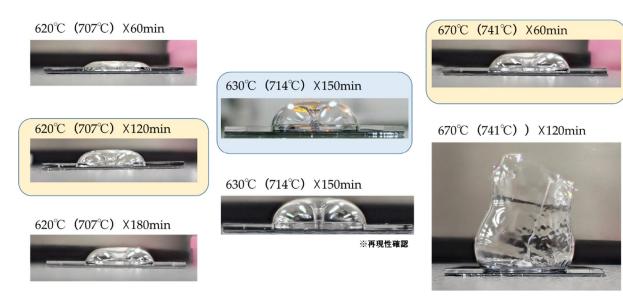


Fig. 4 条件出し結果(凡例:設定温度(実温度)×加熱時間)

Q値は周囲の空気の粘性や固定方法など様々な影響を受ける。Q値の全量:Qtotalは、式(1)の関係がある。影響が大きい順に右項に記しており、空気の粘性減衰:Qair、熱弾性減衰:QTED、固定方法による減衰:Qanchorloss、電気減衰:Qelectronics、その他の影響:Qotherの順となる[2,3]。

$$\frac{1}{Q_{total}} = \frac{1}{Q_{air}} + \frac{1}{Q_{TED}} + \frac{1}{Q_{anchorloss}} + \frac{1}{Q_{electronics}} + \frac{1}{Q_{others}}$$
 \sharp (1)

空気の粘性減衰: Q_{air} は、真空にすれば消すことができる。しかし、振動エネルギーを熱に変えてしまう熱弾性減衰: Q_{TED} は材料由来であるため、材料を正しく選定する必要がある。 Q_{TED} を材料別に計算した結果を、Fig.5に示す。市場から安定して入手できるシリコン、Txガラス、パイレックス (Px) ガラス、石英の中では、石英が最も高いことが分かる。したがって、高Q値化には、石英のガラス吹き工程を実現させる必要がある。

石英を貼り合わせる方法として、プラズマ活性直接接合、オプティカルコンタクト、真空ホットプレスなどがある。プラズマ活性直接接合、真空ホットプレスは、専用の装置が必要であり、オプティカルコンタクトは、接合力が小さいのでガラス吹き工程で剥がれてしまった。そこで、金属どうしを貼り合わせる方法として金属拡散接合があり、石英の接合面に金属薄膜を形成し、その薄膜どうしを貼り合わせることで、キャビティーを形成可能とした。

Txガラスでの結果を参考にして、共振子内球面にメタル (制御電極) を成膜した石英のガラス吹き工程の条件を探索した。パラメータ条件は温度 ($1500\sim1650$ °C)、保持時間 (5min固定)、キャビティー内圧 ($0.1\sim1.0$ 気圧)、アール形状 (なし or 0.5mm)、外径 ($5\sim10mm$)、リム径 (1.5mm固定)、ステム径 (Φ 0.75 \sim 3.5mm) とし実験を行った。Table.1に実験条件を示す。なお、各部位の名称はFig.6に示す。方式は後述の「鋳型」と「分離」である。

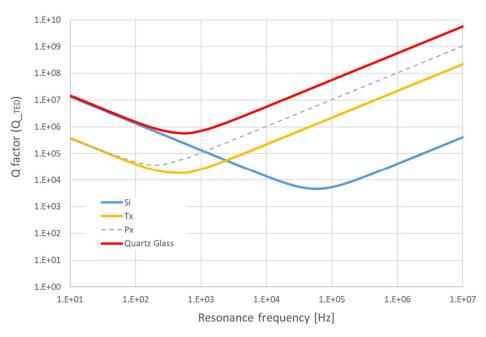


Fig. 5 材料による熱弾性減衰(Q_{TED})の違い[2,3]

Table.1 石英のガラス吹き工程の条件

方式	温度[℃]	時間 [min]	キャビティー 内圧[気圧]	角部R[mm] (鋳型形状)	外径 [mm]	リム長さ [mm]	ステム径 [mm]
鋳型	1525	5	0.5	R0. 5	10	1.5	1. 5
分離	1550	5	0. 3	なし	10	1.5	1. 5

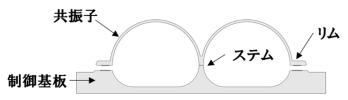


Fig.6 センサチップ断面形状

結果として、Table. 2-3に示す条件で石英のガラス吹き工程の実現性の確認ができた。Fig. 7に分離型の共振子の写真を示す。また、Fig. 8にガラス吹き工程の温度と膨らみ高さの関係を示す。Fig. 9に横方向からの観察写真を示す。

Table. 2 石英のガラス吹き工程の条件(結果1)

方式	温度	時間	キャビティー	角部R[mm]	外径	リム長さ	ステム径
	[℃]	[min]	内圧[気圧]	(鋳型形状)	[mm]	[mm]	[mm]
鋳型 分離	1500 1525 1550 1600 1650	5min (固定)	0. 1 0. 3 0. 5 1. 0	なし RO.5	5 7. 5 10	1.5 (固定)	0. 75 1. 5 2. 0 2. 5 3. 5

Table.3 石英のガラス吹き工程の条件(結果2)

方式	温度[℃]	エッジ角度[゜]	高さ[mm]	共振周波数 [kHz]	Q[-]	振動振幅[um]
鋳型	1525	35	1.2	未測定	未測定	未測定
分離	1550	40	2.3	21. 1	50,000	0. 7



Fig.7 分離型共振子の写真 (Q≒50,000)

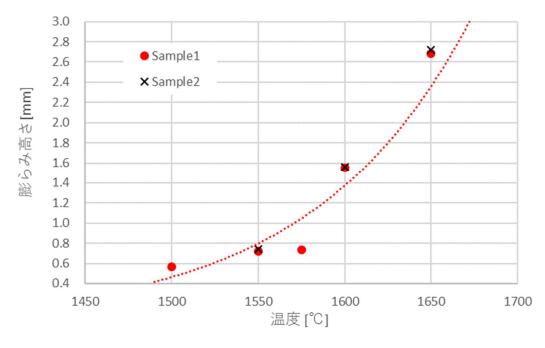


Fig. 8 石英のガラス吹き工程の温度と膨らみ高さの関係 (結果抜粋)

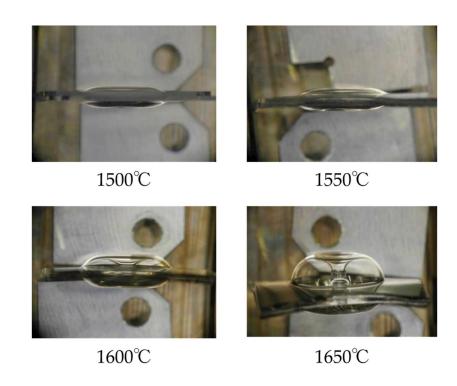


Fig. 9 石英のガラス吹き工程の温度と膨らみ高さの関係(横方向から観察)

b. 犠牲層の成分、貼り合わせ方法の探索

セメント系 (リン酸塩アルミニウム) 犠牲層で貼り合わせ、気密を保持したまま膨らましができたが、高温にさらされることで、犠牲層が「石英と融合」、「ガラス化」が発生した。強アルカリ (TMAH) で300時間以上のエッチングを試みたが、犠牲層の完全な除去には到らず、探索が更に長期化することが予測されたため中断し方式変更を行った。Fig. 10に犠牲層の除去例を示す。

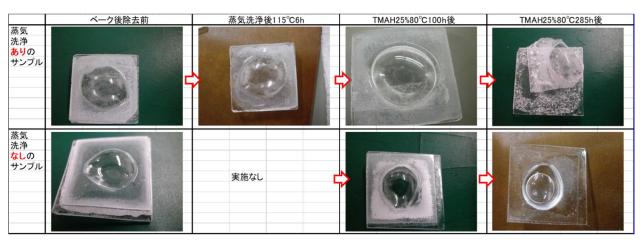
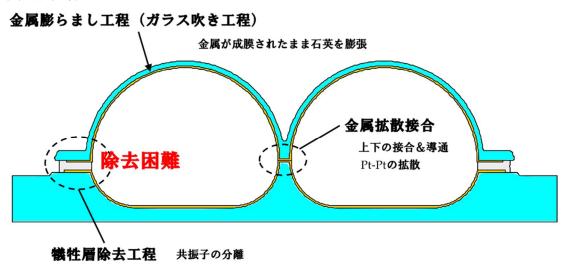


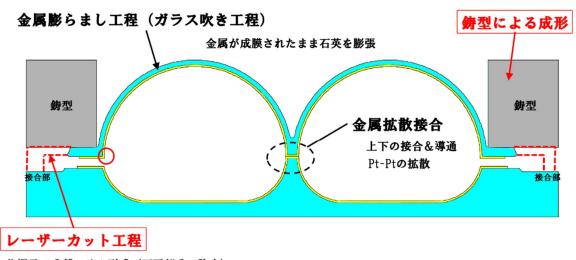
Fig. 10 セメント系犠牲層の除去 (完全除去には到らず)

犠牲層に代わる新しいプロセスとして鋳型方式を開発した。この鋳型方式にて、3次元一体構造の成型に成功することができた。石英の貼り合わせには、Pt-Ptの金属拡散接合を用いてキャビティーを形成し、ガラス吹き工程を実施した。共振子の分離には、レーザーカットもしくはエッチングで実施するプロセスの要素技術を確立した。鋳型方式によるプロセスおよびガラス吹き工程での配線断裂防止は特許出願を行った(7. (2)に記載)。Fig. 11に概略図を示す。

(a) 犠牲層方式



(b) 鋳型方式



共振子の分離、リム形成(不要部分の除去)

Fig. 11 (a) 犠牲層方式と(b) 鋳型方式の概略図

c. 各種メタルの耐性確認

通常、酸化物 (SiO2) にメタライズする場合、Cr、Ti、Ni等のバインディングメタルの上に連続的にAu、Pt、A1等を成膜するが、本研究では、石英が変形するレベルの加熱を行うので、十分に耐熱性があるメタルを選択する。その際、メタルの材質のみならず、層構造の両方の探索を実施したうえで、耐性の確認を実施した。

石英より融点の高い、W, Ta, Nb. V, Ru, Ti, Cr, Pt, MoおよびNi, Auなどについて探索を行った。層構造として、Cr (スパッタ) /Cr (蒸着) /Pt (蒸着) とすることで、石英の高温下での変形に耐える電極形成が可能となった。ガラス吹き工程は、高温かつ真空で行うため金属の蒸気圧が低下し蒸発消失してしまう問題があった。そこで、構造の工夫により、キャビティー内部に形成することでメタルの蒸発消失を解決した。また、最表面をPtとすることで、金属拡散接合の成立解も得ることが出来た。この方式は先行事例がなく本研究による独自の方式である。探索した各種材料の結果をTable. 4に示す。

Table. 4 各材料の3次元一体成型プロセスへの適応

元素	金属拡散接合 低温、低圧で接合	ガラス吹き 耐熱、耐変形	配線 真空高温で蒸発しない	バインディングメタル 石英に成膜可能	コメント	
W	×		0	0		
Ta		×	×	0	高温で接合面にガス発生	
Nb				×		
V				×		
Ru				×		
Ti		×	×	0		
Cr		\circ	0	0		
Pt	0	\circ	0			
Мо			0		高温で酸素と反応	
Ni	0	×		0		
Au	0	×				
Zr02				×		
MgO				×	キロマボケキ 4.1111 フルが	
TiO2				×	高温で酸素放出し剥離 高温でバリア機能なし	
Sn02				×	ied mr C / / / // // // // // // // / / // //	
Ta205				×		

d. エッチャント組成、温度の探索

b. 項と同じく、鋳型方式として実現。

e. 各工程の組合せ

金属拡散接合(キャビティー形成)、熱変形耐性金属の成膜、ガラス吹き工程(共振子成型)を組合せた鋳型方式にて3次元一体構造の成型に成功することができ、要素技術を確立することができた。 犠牲層に代わる共振子の分離工程は、レーザーカットもしくはエッチングで実施することとした。Fig. 12-13にプロセスチャートを示す。

1. 複合ガラスの作製

- 2. 上ガラスの作製
- 3. 複合ガラスと上ガラスの接合(金属拡散接合)
- 4. 不要部分の除去 (共振子部分を先に分離)



- 1.1 予め除去する部分のガラスをある程度加工
- 1. 2 接合する部分にW/Ptを形成
- 2. 1 キャビティー部分のガラスをエッチングで形成
- 2. 2 制御電極の形成 (Cr/Pt)
- 2. 3 接合する部分にW/Ptを形成
- 3. 1 アライナーで位置合せ、加圧治具にセット
- 3. 2 真空加熱によりPt拡散接合
- 4.1 両面Cr/Auスパッタでマスキング
- 4. 2 ガラスエッチングにより不要部分を除去

5. 下ガラスの作製



6. 複合ガラスと下ガラスの接合(金属拡散接合)

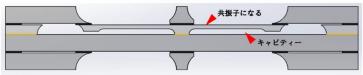


7. 不要部分の除去



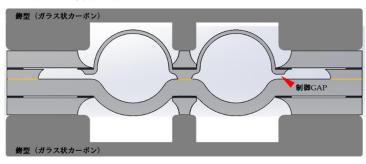
- 5. 1 制御電極の形成 (Cr/Pt) 図示なし
- 5. 2 接合する部分にW/Ptを形成
- 6. 1 複合ガラス(1と同じ)を準備
- 6.2 アライナーで位置合せ、加圧治具にセット
- 6.3 真空加熱によりPt拡散接合
- 7. 1 両面Cr/Auスパッタでマスキング
- 7. 2 ガラスエッチングにより不要部分を除去

8. 上下ガラスの接合(金属拡散接合)



- 8. 1 4と7を張り合わせる (制御電極がPt)
- 8. 2 アライナーで位置合せ、加圧治具にセット
- 8. 2 真空加熱によりPt拡散接合

9. ガラス吹き工程



- 9.1 鋳型にセット
- 9. 1 真空加熱 (数十mTorr、1500~1600°C)

キャビティー内圧と外部との圧力差により、 共振子が均等に膨らむ。

高温で低圧の場合、金属は蒸発し霧散する。 キャビティー内部、張り合わせ部は、 金属の蒸気圧が下がるため、蒸発を防ぐ。

10. 複合ガラスの除去(共振子部分の分離)



10.1 Wの除去 (H2O2煮沸)

制御電極 (Cr/Pt) 、接合部 (W/Pt)である。 H2O2は、Wのみをエッチングするため、 複合ガラスのみがはずれる。

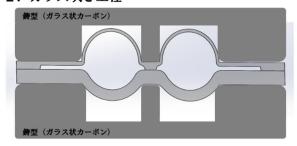
Fig. 12 3次元一体成型プロセスのプロセスチャート (鋳型方式、エッチングで分離)

鋳型方式(レーザーカット法)

1. 上下ガラスの貼り合わせ



2. ガラス吹き工程



- 1.1 上下ガラスの準備
- 1. 2 真空加熱によりPt拡散接合
- 2. 1 鋳型にセット
- 2. 1 真空加熱 (数十mTorr、1500~1600℃)

キャビティー内圧と外部との圧力差により、 共振子が均等に膨らむ。

高温で低圧の場合、金属は蒸発し霧散する。 キャビティー内部、張り合わせ部は、 金属の蒸気圧が下がるため、蒸発を防ぐ。

3. 共振子の分離 (レーザーカット)

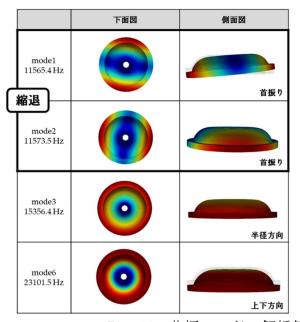


3.1 レーザーカット 不要部分をレーザーで除去

Fig. 13 3次元一体成型プロセスのプロセスチャート (鋳型方式、レーザーカットで分離)

f. FEM (Finite Element Method) による最適形状の探索

固有値解析、共振状態へのレート入力を解析した。制御上必要となる、共振周波数、有効質量、粘性項、ばね定数の算出が可能となった。レート入力時にジャイロとして作動するn2モードの歳差運動を確認した。Fig. 14に共振モードの解析例を示す。各モードの変形状態が分かる。



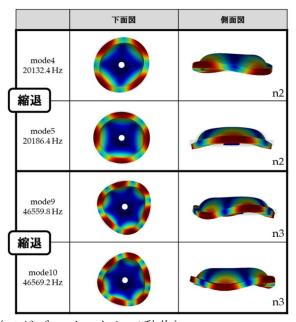


Fig. 14 共振モードの解析例 (n2がジャイロとして動作)

また、n2モードの制御にとって外乱となる柱状部の共振など他のモードの影響を避けるため、形状設計へのフィードバックを行った。具体的には、Fig.~15に共振子の周波数特性の測定例を示す。ジャイロとして動作させるn2モードは、21kHz付近に存在するが、その付近に上下方向に動くモードが存在する。ここでは17.~5kHz付近にある。この共振は裾野が広いため、n2付近に存在すると、裾野がn2と重なり制御が困難となる。これは、ステム(中央の柱状部)径を変更することで遠ざけることが可能であった。今後、高Q値化するために、共振子の各部寸法を変更し確認していくが、FEM解析により試してもムダな寸法領域を避けることができ、試行回数(開発期間)の短縮化が期待できる。

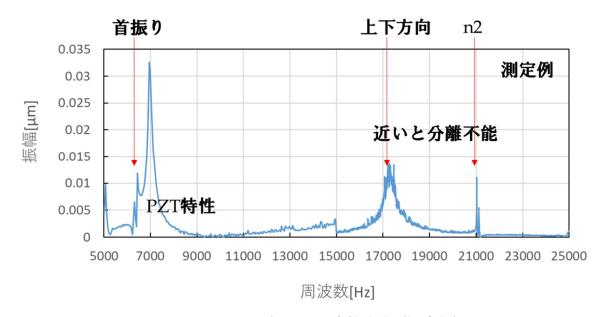


Fig. 15 共振子の周波数特性(測定例)

到達性能(最小検出角速度: Ω_{min})については、Fig. 16に示すルーチンにより、シミュレーション結果から、式(2)を推定した。式(2)は、最小検出角速度、共振子の振動振幅:AとQ値との関係性を表している。ただし、制御シミュレーション上の制御方法は実機と異なるため、今後、実機で各共振子パラメータとQ値の関係性を明らかにしていき、高性能化を実現していく。

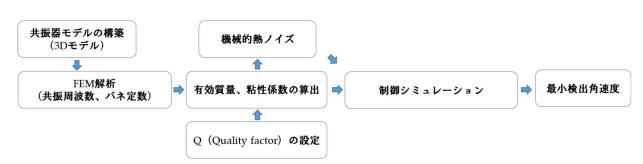


Fig. 16 到達性能のシミュレーションによる予測ルーチン

$$\Omega_{min} \propto \frac{1}{A\sqrt{Q}} \qquad \qquad \vec{\lesssim} \ (2)$$

(2) ジャイロ性能の確認

Q値の測定により、到達性能を評価するため、以下の項目を実施した。

g. 制御方式の検討

ジャイロ性能の確認として、物理モデルから制御ブロック図を検討した。FM(周波数変調)は温度感度を低くできる可能性があるが、共振点以外で作動させるため感度が低くなる可能性がある。そこで、変調方式としてAM(振幅変調)を選択した。従来型のレート検出に加えて、積分型による角度検出が可能であり、高精度化が期待できる。Fig. 17に制御ブロック図を示す。共振子の振動は、ある質点の楕円振動とみなせる。その長径をa、短径をqとしたとき、aを一定、qを0に制御すると、n2モードの節の位置は、x軸からの角度: θ となる。これを直交制御と呼ぶ。同時に共振を維持するために θ 0 (θ 0 t:共振周波数に相当、 θ 0 :初期位相)で振動させる。これを位相制御と呼ぶ。ここで、レート入力: θ 0 が変わる。その θ 0 を変わらないように角度制御すれば、フォースリバランス型となり、Rate mode と呼ぶ。また、 θ 0 を制御しない場合、 θ 0 に比例した形で θ 0 が変わる積分型となり、Whole Angle mode と呼ぶ。Rate modeは、回転座標系(ジャイロケース)に角度固定した状態であり、Whole Angle mode は慣性座標系(宇宙空間)に角度固定した状態となる。これは、フーコーの振り子と同様の動作である。今後は、センサチップと回路と結合させジャイロシステムとしての検証を行っていきたい。

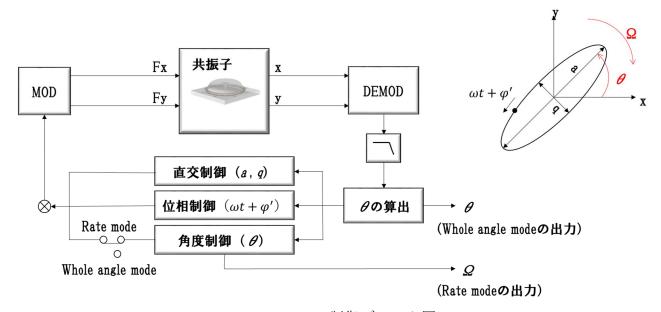


Fig. 17 HRGの制御ブロック図

h. Q値の比較のためのMEMS以外の製法による共振子の準備

機械加工により共振子を作製し、Q値より到達性能を評価した。

機械加工により作製した共振子のQ値測定を行った。真空槽(北野精機、特注品)、PZT加振(NEC/TOKIN、AE0505D08F)、レーザードップラ速度計(小野測器、LV-1800)、ロックインアンプ(Zurich Instruments、HF2LI)の組合せによる測定系を構築し、減衰法による測定を実施した(Fig. 18)。

減衰法は、共振子を共振周波数: $f_n[Hz]$ で加振し、その後、加振を停止させ振幅が1/eになる時間: τ [s]を測定することでQ値を測定する方法である。Q値は以下で算出できる。

$$Q = \pi \tau f_n \qquad \qquad \vec{x}(3)$$

機械加工型共振子は、 f_n =5,411Hz、 τ =0.47sとなり**Q=8,009**であった。その時の真空度は、0.6Paである。加工変質層の除去、表面粗さの低減、各部位の寸法最適化などで、Q値(性能)を上げていけると考える。

MEMS型共振子は、 f_n =21,091Hz、 τ =0.82sとなり**Q=54,362**であった。その時の真空度は、0.3Paである。将来的にMEMS型HRGをウエハで量産することで、低コスト化が可能と考える。



Fig. 18 Q值測定系 (左:真空層、中:MEMS型共振子、右:機械加工型共振子)

参考文献

- [1] Doruk Senkal, Andrei M. Shkel, et al, "Demonstration of 1 Million Q-Factor on Microglassblown Wineglass Resonators With Out-of-Plane Electrostatic Transduction," JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, VOL. 24, NO. 1, FEBRUARY 2015, pp. 29-37
- [2] C. Zener, Physical Review 52, Aug. 1, 1937; p230
- [3] C. Zener, Physical Review 53, Jan. 1, 1938; p90

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

当初想定していたプロセスである犠牲層方式は、ガラス吹き工程での高熱を経ることで変質し、犠牲層と共振子の分離が困難となったため中断した。しかし、ガラス吹き工程で鋳型を用いる鋳型方式にて3次元一体構造の成型に成功することができた。

4. 2 研究課題の発展性(間接的成果を含む)

MEMSプロセスによるHRGの研究であるため、完成した際には、高精度で小型・低価格のジャイロスコープの提供が可能となり、自動運転や建機・農機の自動化による社会的貢献の一助になると考える。また、成長率25%/年以上となっており注目されている無人移動体、特に、UAV、UUVにおいても、慣性航法装置を適用する時の障壁(主にコスト)を下げることに貢献できる。

一方、学術分野では、国内において、新規なジャイロスコープ自体を研究開発している研究室、企業は少ない。既存の製品を使用して制御の研究を行っている所がほとんどである※。そのため、安価で高性能なジャイロスコープが開発できれば、国内の関連研究のレベルの底上げに貢献すると考える。

※「高性能ジャイロに関する座談会」 一般社団法人慣性センサ応用技術研究協会 2020.11.25

4.3 研究成果の発表・発信に関する活動

特になし。

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

特になし。

5.2 経費の効率的執行

特になし。

6. まとめ、今後の予定

高精度で小型かつ安価なMEMS型HRGの3次元一体成型プロセス技術を確立するため、共振子材料は、極めて高Q値の獲得が可能な熱弾性減衰(TED)の小さい石英を選定した。3次元一体成型の実現方法は、複数案立案しそれぞれの成立性について検証を行った。その結果、当初挑戦した犠牲層方式は、気密状態を保持して共振子を膨らまし、高温成型後に犠牲層を完全に除去するための材料や分離条件の探索を続けてきたが成立解が見いだせず探索が更に長期化することが予測されたため中断した。一方、鋳型方式にて3次元一体構造の成型に成功することができた。高温膨らましに耐える金属拡散接合用の金属および接合条件、電極材料の成立解を得ることができた。また、共振子分離法としてレーザーカットの実現可能性も確認ができ、3次元一体成型

プロセスの基本となる要素技術を確立することができた。

Q値評価は、ピエゾ素子加振のレーザードップラ測定(減衰法)により、石英単体共振子(電極蒸着していない)の1サンプル測定の結果であるが、約50,000を確認した。制御回路と結合しジャイロスコープとしての動作確認、性能評価を今後継続していきたい。

ジャイロの最小検出角速度: Ω_{\min} は、式(2)に従いQ値で表されると推定される。式(2) より性能向上にはQ値を更に上げていく必要がある。そのため、高いQ値を得られる共振子パラメータ(各部位の寸法、電極膜厚、固定方法、表面粗さなど)とジャイロ性能の関係を解明することで設計手法を確立させ、製品化を実現させる。また、高性能慣性航法システムの周辺技術の確立を目指していきたい。

MEMS型HRGとの比較のため機械加工型共振子のサンプル測定では、Q値は約8,000を確認した。 MEMS型HRGで解明する共振子パラメータとジャイロ性能の関係を明らかにし、パラメータの最適 化を図ることで性能向上が期待できると考える。

7. 研究発表、知的財産権等の状況

(1) 研究発表等の状況

種別	件数
学術論文	該当なし
学会発表	該当なし
展示・講演	2件※
雑誌・図書	該当なし
プレス	該当なし
その他	該当なし

※展示: Techno-Ocean 2023、防衛装備庁技術シンポジウム2023

(2) 知的財産権等の状況

発明の名称	発明者	出願登	出願番号(出願	出願区	出願国	登録番号(登録日)
		録区分	日)	分		
曲面支持構造体の製造	山口高功 谷和明	出願	特願2024-54800 (2024/03/28)	国内	日本	
方法	市岡頌子 山本悠貴 飯野耕平	出願	特願2024-54803 (2024/03/28)	国内	日本	

(3) その他特記事項

該当なし