

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02575

研究課題名（和文）極端環境を計測する小型慣性センシングデバイス

研究課題名（英文）Miniaturized Inertial Sensing device for Harsh environment

研究代表者

前中 一介（Maenaka, Kazusuke）

兵庫県立大学・工学研究科・教授

研究者番号：70173721

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：水晶（クォーツ）の縦振動（厚み滑り振動）を角速度検出の参照振動としたジャイロの設計、試作・評価を行った。参照振動を縦振動とすることでバルク形状の素子で角速度が検出できる。このため現状の脆弱なバネマス系を持つMEMSジャイロにおいて強加速度・強振動下で動作不能、あるいは破壊するなどの問題を解決することができる。研究成果として、三角柱構造を持つ水晶ジャイロの設計手法の確立、出力から直交3軸の角速度成分を抽出する理論的手法の提案、デバイスクラмпिंगの影響の明確化、高インピーダンスを持つインターフェイスの実現、などを通じ、ジャイロセンサとして角速度信号を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年MEMS慣性センサが民生用として広く用いられている。しかしながら、大きな衝撃や振動下での動作は保証されておらず、例えばサッカーボールやゴルフボールの中に慣性システムを埋め込んでその運動を把握することや、ドローン同士が衝突したときの姿勢の保持、大きな振動を伴う工具や機械などに用いることができず、応用を大きく妨げている。縦振動を用いるジャイロの場合、動作原理的に構造がバルク状になり、また加速度の影響は構造全体への分布荷重となり、振動や衝撃による破壊強度は極めて高く、参照振動の停止も発生しない。以上の特徴をもつ慣性センサが普及すれば、さらなる慣性センサの応用発展が可能になると思われる。

研究成果の概要（英文）：We designed, prototyped, and evaluated a miniaturized quartz gyroscope using the thickness-shear vibration mode as the reference vibration for detection of angular velocity. The device with thickness-shear mode as the reference vibration can be realized by bulk-shaped elements, which have resistance to the harsh environment. This resolves the problems of current MEMS gyroscopes, such as inoperability or destruction under strong acceleration / vibration or shock. We performed the establishment of design theory for triangular prism shaped quartz-gyros, theoretical solution of the data conversion from raw signals to the cartesian coordinate system, clarification of the effect of the device cramping method to sensing characteristics, realization of analog frontend circuitry with very high input impedance. Finally, we confirmed the angular velocity output signals from example devices.

研究分野：MEMSセンサ

キーワード：ジャイロ MEMS 水晶 縦振動

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

角速度を検出する MEMS ジャイロが普及して久しい。現在ではスマートフォンやドローン、乗用車など様々な製品で用いられているが、研究開始当初から現在に至るまで低価格な市販 MEMS ジャイロはほぼ 100%、質点系として取り扱える質量部を二自由度のバネで支えこれを定常振動（参照振動）させて、回転角速度に伴うコリオリ力による質点の変位を検出して角速度出力としている。この構造では、質量は過剰な加速度や衝撃入力によって大きく変位し、ストップに当たることによる参照振動の停止やバネの破壊などが発生する。これを回避するため、我々は圧電材料である PZT（Lead Zirconate Titanate）のバルク直方体上に電極を形成し、高次の共振モード（縦振動／厚み滑り振動）で励振し、その振動を参照振動として利用するジャイロを提案した（図 1）<sup>1,2)</sup>。この頑健な構造のジャイロは複数の研究機関によって追試、改良されているが<sup>3-6)</sup> いずれも材料起因の温度安定性が比較的悪く、より高精度な計測には材料を含めた改善が必要な状況であった。材料となるセラミック焼結体の PZT は特性ばらつきが大きく、素子固有の温度変化を示し画一的な補正がしがたいことから、まず特性が安定な単結晶材料を選択すべきであること、また入手容易で良質な圧電特性を持つ必要があることから、水晶（ $\alpha$ -クォーツ）を素材としてバルク形状のジャイロの実現を目指した。

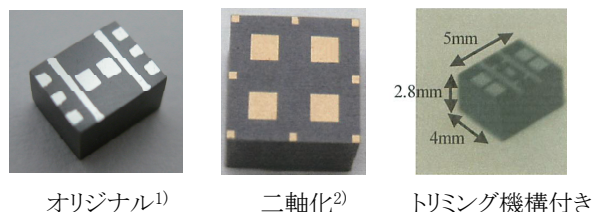


図 1 先行研究(PZT バルクジャイロ)

### 2. 研究の目的

研究の目的は、

- (1) 六方晶系である水晶単結晶において、ジャイロとして適切な形状、参照振動モードの探索とその駆動手法の確立
  - (2) 最終的な 3 軸化を想定して、x 軸、y 軸、z 軸のそれぞれの角速度入力に対して独立な出力を取り出すことの可否・手法の検討
  - (3) デバイス試作プロセスの確立
  - (4) デバイス実装に関わる問題点の抽出と解決
  - (5) 適切なインターフェイス回路の実現
  - (6) デバイス特性の基本調査
  - (7) 極端環境における特性の調査
  - (8) 慣性検出システムの完成
- となる。

### 3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、シミュレーション、実験の両面からのアプローチを行う。特にバルク形状の高次共振モード（縦振動／厚み滑り振動）に角速度を与えたときの形状変位から応力発生、圧電効果による電圧発生までのプロセスは単純なモデル化が不可能で数式的に解くことがきわめて難しく、動作を解明するためには三次元の有限要素法など数値解法に頼るしかない。このため、まず有限要素法でのシミュレーション環境を確立し運用する。

次にバルク形状の素子を形成するため、3mm の板厚の水晶単結晶版を特注してこれを必要な形状に切り出す条件を見いだす。カッティング時に切断縁が荒れるチップングを防ぐ条件を探索すると同時に、チップングや保持・電極のアライメント誤差など現実的な問題が素子特性にどのような影響を及ぼすかをシミュレーションで確認し、実験と計算の結果を対照して許容デバイス作製条件を見いだす。

切り出した素子を適切に励振するためおよび出力信号を取り出すため、バルク形状の素子の表面に正確に微小電極を形成する必要がある。しかし対象が厚くバルク形状であるためパターン形成に通常のマスクアライナは使用できない。このため我々は DMD (Digital Micromirror Device) を使用し非接触で水晶表面に必要なパターン形成を行う露光機を開発し、これを使用することによって、バルク水晶の（側面を含む）全表面に必要なパターン形成を行う。

デバイスの駆動、評価のためには、高次共振周波数で励振するための駆動回路、コリオリ力によって発生した電圧を精度良く読み取る回路が必要である。駆動には発振周波数精度と安定度が高い DDS (Direct Digital Synthesizer) を用い、検出信号の抽出のための同期検波回路を構築する。回転評価や最終的には落下衝撃時の評価などを伴うため、これらはターンテーブル上に載せられる程度に小型にし、かつ電池駆動でさらにはデータの無線伝送化が好ましい。また、効率よく水晶に発生する電圧を取り出すためには極めて高い入力インピーダンスを持つフロントエンドが必要である。これらを備えたシステムをアナログデジタル混載で実現する。

最後に、落下評価試験や大加速度下での動作検証を行うために、落下試験器や高回転ターンテ

ープルなどを準備し評価する。

#### 4. 研究成果

以下では、目的の項目に沿って成果を説明する。

(1) 六方晶系である水晶単結晶において、ジャイロとして適切な形状、参照振動モードの探索とその駆動手法の確立

まず、z-カット水晶を対象に、ジャイロとして動作可能なモードを有限要素法解析によって探索した。水晶は三回対称構造を持つため、基本構造として一辺 4.7mm 高さ 3mm の三角柱を仮定した。その結果、素子上面が右回りに回転振動するとき下面が左回りに回転振動するモード（回転滑り振動と名付ける）を見いだした。この状態で垂直軸周りの角速度が加わると上下面で逆のコリオリ力が働き応力が発生し、結果として、与えた角速度に比例する電位が素子表面に生じる。またこのモードを効率的に励振するための電極を検討し、図 2 に示す上下面の扇形電極で励振可能であることを見いだした。また、デバイス厚、三角形の一辺の長さ、ガード電極の有無、電極位置や個数、励振電極の形状やサイズ、デバイス固定位置の変動やボンディングワイヤの有無などに対して、共振周波数や感度、オフセットがどのように影響を受けるのかのシミュレーションも行っている。

なお、このモード以外でも、例えば上部の 3 頂点が拡張振動、下部 3 頂点が縮小振動する振動モードでも角速度検出が行えることを確認し、それを駆動する電極構成も見いだしており、本報告書での記述は省略するがそれについての初期実験も行っている。

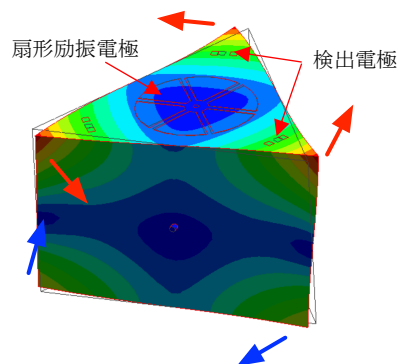


図 2 上下で逆回転するモード

(2) 最終的な 3 軸化を想定して、x 軸、y 軸、z 軸のそれぞれの角速度入力に対して独立な出力を取り出すことの可否・手法の検討

FEM シミュレーションによると、上面下面の三角形頂点付近、あるいは辺中央に設けた計 6 個の検出電極からは、角速度強度の情報とその印加軸情報が重畳して出力されることが分かった。図 3 に各軸への角速度印加時における表面電位変化を示す。また、これらの信号に基づき、マトリクス計算をすることによって任意の軸で印加された角速度の x、y、z 軸成分を算出し、0.1%以下の誤差で通常の直角座標系の 3 軸センサとして扱えることを示した。図 4 にその変換例を示す。

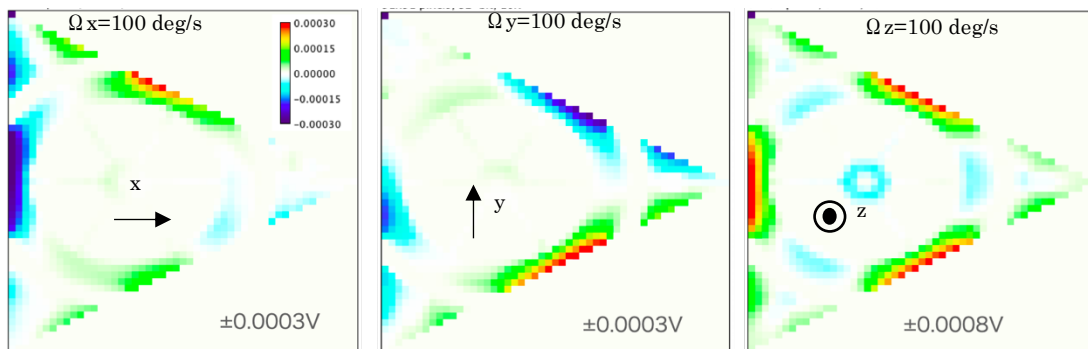


図 3 角速度印加時の表面電位（ガード電極付き）

(3) デバイス試作プロセスの確立

水晶ウエハを適正な条件でワイヤソーを用いて切断し、電極面を研磨、両面アルミ蒸着を行った後、開発した DMD 露光器を使用して TEOS 酸化膜を層間絶縁膜とした 2 層配線を行うと基本構造が完成する。デバイス保持のためにあらかじめ三角柱の（振動の節となる）側面 3 面中央にディンプルを形成し、別途 3D プリンタで加工したパッケージに挿入し、ディンプルを固定することによって強固な支持を行った。なお、さらに上下三角面の中央も振動の節であり、これを加えて周辺 5 点できわめて強固にデバイスを保持することも可能である。

各プロセスでは現実的な最適条件を見だし、そこでの作製トレランスによるデバイス特性変化が設計値に対し大きな変化を与えないことを確認している。例えば、切断時に比較的良く発生する三角形頂点の欠け（チップング）の共振周波数に対する影響は、

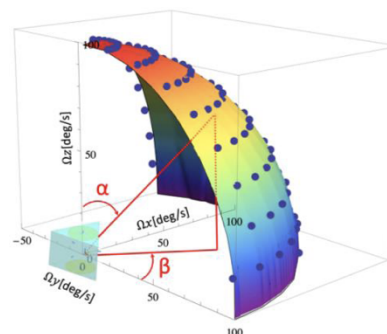


図 4 6 点の出力から直交 3 軸成分への変換（ドットが計算点）

有限要素法解析によると頂点1箇所、 $100\mu\text{m}$ の欠けは0.08%、2箇所の欠けでは0.13%の変化となることなどが調査されており、切断プロセス時に発生する $100\mu\text{m}$ 以下のチッピングの影響は比較的小さいことがわかる。

#### (4) デバイス実装に関わる問題点の抽出と解決

デバイスのクランプは上に述べたように三角柱の側面中央3点で図5のようにパッケージに固定されている。固定は振動の節で行われているとはいえ、有限の面積で保持することになるためクランプの強さによる参照振動への影響は存在する。参照振動への影響はもっぱらQ値に現れるが、温度特性にもわずかに影響があらわれる。実験によるとクランプの強度によりQ値は2000~6000程度まで変化し、共振周波数の温度係数は $-100\sim-76\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ の範囲で変化することが計測された。また、クランプ位置の壁面中央からのずれについてもシミュレーションで確認しており、 $100\mu\text{m}$ のずれに対して共振周波数はおおよそ0.1%以下の偏差となる。

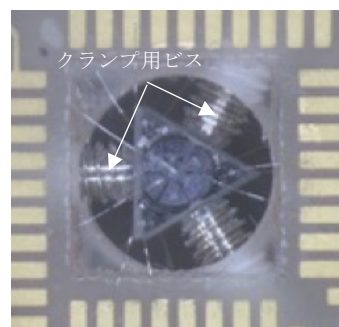


図5 三角柱構造のパッケージへの実装

#### (5) 適切なインターフェイス回路の実現

評価項目に対応し、複数のインターフェイス回路を試作した。圧電システムは場合によっては高電圧回路になりがちであるが、いずれのインターフェイスについてもコンパクトなシステムに納めるためバッテリー電圧から容易に昇圧できる $\pm 12\text{V}$ の供給とし、表面実装部品を用いて回路を構成した。駆動回路については500kHz台の駆動周波数に対して発振周波数設定分解能を0.25Hz以下、駆動電圧振幅を $\pm 10\text{V}$ としている。水晶デバイスの出力端子の内部インピーダンスは極めて高く(静電容量は20fF程度)、G $\Omega$ レベルの入力インピーダンスを持つフロントエンド回路を構成している。一般にこのようにインピーダンスが高い系では駆動電圧の漏れや外部ノイズ侵入が問題となる。実際に、パッケージングされた素子では浮遊容量結合による明確な駆動電圧の漏れが見られた。この信号を除去するため、信号を一旦オーディオ周波数にダウンコンバートし、これを高分解能でA/D変換し、デジタル処理によって信号分離する回路構成を検討し、プリント基板設計・試作まで行った。同時に簡易的な手法として、システムサイズの肥大や安定性の低下は避けられないが各出力端子個別に位相・振幅を調整するための可変コンデンサ、可変抵抗によるオフセット調整機構を付加した回路基板も設計・試作した。以降の特性評価は後者の基板を用いて実験を行っている。その他調整機能の実装のアイデアとして、図6のような基板上の伝送線路状トリミング方式を提案しており、この部分のみを機械的にトリミングしてオフセット調整ができるように設計、初期実験を行っている。なお、外部環境からのノイズの混入を低減するため、LC共振回路によって必要な周波数域のみ取り出すフィルタもインターフェイス回路には含まれる。

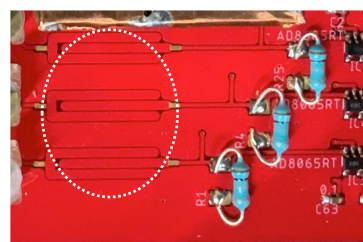


図6 プリント基板に実装した伝送線路状のオフセット調整部。パターンの物理カットでトリミングする

#### (6) デバイス特性の基本調査

電気軸方位、電極形式、ガード電極の有無など複数のデバイスを試作し、基本特性の評価を行った。まず、参照振動についての評価として、ネットワークアナライザで素子を駆動し、検出端子からの出力を測定した。三角柱上面の辺の中心に電極が形成されているデバイスについて広い周波数範囲で計測した例を図7に示す。バルク形状であるため、多数の高次振動モードが存在し、複数のピークが観測される。図中に矢印で示されるシミュレーションによる振動モードの結果と実測値はほぼ一致し、どのピークが要求されるモードであるかが判断できる。同時にレーザードップラー振動計を利用して光学的にも表面の変位方向を計測し、モードシェープの確定を行っている。回転滑り振動に必要な励振周波数は533kHz、Q値は数千のオーダーで、十分な値である。

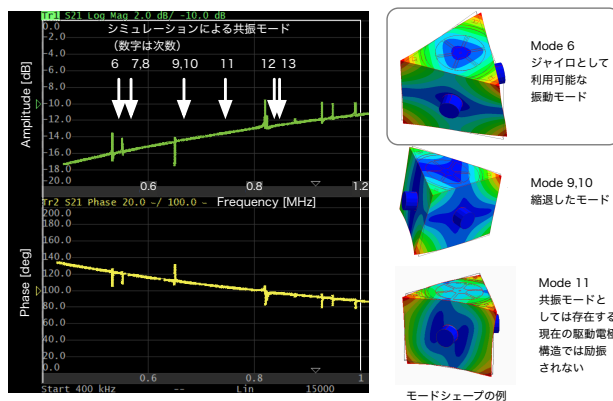


図7 実測した共振と計算によるモードシェープの例

角速度の計測は、図8に示すシステムで行った。まず、14ビット分解能のDDS(Direct Digital Synthesizer)で533 kHzのMode 6共振周波数でデバイスを励振する。励振振幅は±10 Vである。デバイスの三角面の頂点、あるいは辺中央に設けた検出電極からの6つの出力を高入力インピーダンスの

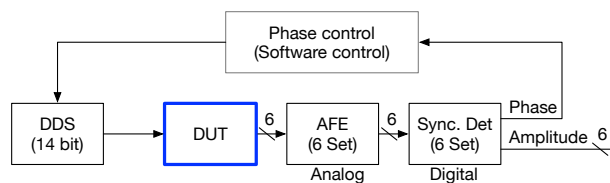


図8 角速度検出回路構成

AFE (Analog Front End) で受け取り、オフセット調整をした後同期検波回路 (Sync. Det.) で復調し、位相変化と振幅変化を得る。信号の位相を保持するフィードバックを行いつつ、ターンテーブルで角速度を与え、出力電圧 (Amplitude) を得る。得られた信号はマイクロコントローラによって WiFi シグナルに変換され、ターンテーブル外へ無線で伝送され、WiFi を備えた PC でリアルタイムに受信される。またシステム全体はモバイルバッテリーにより駆動され、完全に外部から分離されたシステムとして動作している。このため、ケーブルを気にすることなくターンテーブルや各種試験器に設置でき、様々な環境下での特性評価を行うことができる。駆動周波数に対する出力の振幅位相特性を図9に示す。位相は180° から-180° までスムーズに移行しており、安定に位相フィードバックがかけられることが分かる。駆動を共振周波数に一致させたときの、z 軸周り (図3参照) の角速度に対する出力の例を図10に示す。出力には共振時に本質的に発生するオフセット成分とデジタルノイズが混入しており平均化処理を行っているが (エラーバーはその際の標準誤差を示す)、±1000 deg/s と大きな角速度印加に対しても線形な出力が得られている。なお、このデバイスのシミュレーションによる検出出力は  $Q=10,000$  想定で約  $20 \mu V/(deg/s)$  であるが、 $Q$  がその半分程度であることを勘案すると計測された感度  $9.2 \mu V/(deg/s)$  は設計値と良く一致している。

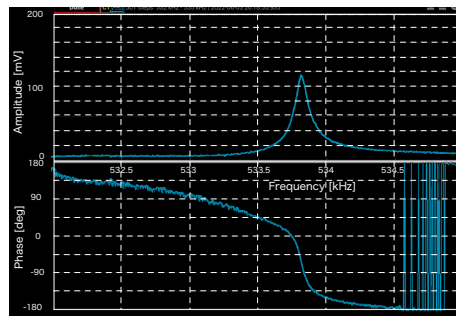


図9 共振周波数周辺の振幅位相特性 (漏洩駆動信号の補正済み)

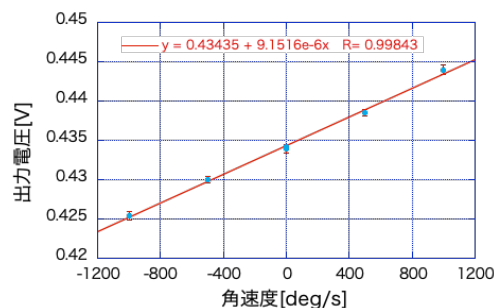


図10 印加角速度に対するデバイス出力例

以上のように、角速度検出に成功し水晶の回転滑り振動が角速度検出に利用可能であり、設計値どおりの出力が得られることを確認した。また、温度安定性は先行研究の PZT を用いたものに比較して数倍以上向上していることも確認できた。さらに、定性的ではあるがデバイスに大きな衝撃を与えても参照振動が停止することがなく、デバイスそのものはきわめて強靱であることを確認している。しかしながら、残念ながら極端環境に対する定量評価を行うには至らなかった。本研究の難しさの一つは、水晶デバイスの出力インピーダンスが極めて高いことにある。このため容易に駆動信号の漏洩が発生し、そのための補正回路が複雑になる。単純な機械的なトリマを使用した場合、その温度特性、評価時の衝撃・高加速度による特性変動も無視できない。この解決法の一つとして、未補正の 400 kHz の信号周波数をオーディオ周波数にダウンコンバートし、高分解能でデジタル処理を行うことを想定して基礎実験を進め、プリント基板の作製まで行っていた。しかし急な半導体供給不足によって使用予定の電子部品の入手に手間取り、念のために作製していた通常のトリマコンデンサ・抵抗によるオフセット補償回路付き基板での評価にとどまってしまった。このような構成であっても一応の角速度検出は可能であるが、トリマ部品の性能のため、水晶デバイスの特性が十分発揮できていないのが現状である。現在これらの半導体は入荷済みであり、補助金期間は終わったものの、継続してシステム完成、極端環境下での特性の実測を行いたい。また、これまで完成度に難があると躊躇していた学会発表、論文発表も、現段階ではある程度に達したと考えられるため今後積極的に行っていききたい。

#### 引用文献

- 1) K. Maenaka, et. al., MEMS2006 Istanbul, Turkey (2006)
- 2) K. Maekawa et. al., ICMA2008 Awaji Japan (2008)
- 3) Xiaosheng, Wu et. al., J. Micromech. Microeng. **19** (2009)
- 4) Yipeng Lu, et. al., Microsyst. Technol., **16** (2010)
- 5) Zafer Ozer, et. al., Ferroelectrics, **497** (2016)
- 6) Yipeng Lu, et. al., J. Micromech. Microeng., **20** (2010)
- 7) 田中他、「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム、Web 開催 (2020)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田中、前中、藤田、神田
2. 発表標題 クオーツによるバルクジャイロの提案
3. 学会等名 「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------