

2G02 宇宙用高精度 MEMS ジャイロ開発の中間報告

○笹田武志, 嶋根愛理 (宇宙航空研究開発機構)
西田 宏, 森口孝文, 内納亮平, 孫崎 太 (住友精密工業株式会社)

An Interim Report on the Development of High-Accuracy MEMS Gyros for Space Applications
Takeshi Sasada, Eri Shimane (JAXA)
Hiroshi Nishida, Takafumi Moriguchi, Ryohei Uchino, Futoshi Magosaki
(Sumitomo Precision Products Co., Ltd.)

Key Words: MEMS, Gyro, IMU, digital compensation, bias instability

Abstract

The development of high-accuracy Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) gyroscopes for space applications have been started under the framework of the JAXA Aerospace Open Laboratory program in 2012. Taking advantage of MEMS capabilities such as small, lightweight, low power consumption, and low cost, to modify the existing gyro products for navigation-grade. Two approaches; (1) advanced digital compensation for temperature variation, and (2) improvements of characteristics for MEMS sensor head, are adopted to accomplish the ten times better than the performance of existing gyros (0.1 or less degrees per hours of bias instability). This paper reports a research outline, interim results, and revealed technical issues for high-accuracy.

1. 概要

2012 年より, JAXA オープンラボ¹⁾の枠組みで宇宙用高精度 MEMS ジャイロの研究を開始した. 小型軽量, 低消費電力, 低コストな MEMS の特徴を活かしつつ, ロケット等への搭載を目指した高精度化を行う. 既存ジャイロをベースに, ①デジタル信号処理による高度な温度補正と, ②MEMS センサヘッドの特性改善の 2 つのアプローチにて従来比 10 倍以上 (バイアス非安定性 0.1 deg/h 以下) の性能を目指す. 本稿では研究概要および前半までの成果と技術課題について報告する.

2. 背景・目的

2.1 開発の背景

慣性航法装置 (IMU) は角速度・加速度を計測するが, その性能は内蔵するセンサ方式・精度に依存する. ロケットの誘導制御で用いる光ジャイロスコープのリングレーザジャイロ (RLG)²⁾は, 高精度な回転角速度 (レート) を検出するが, ガラス製造, レーザ発光方式, ミラー制御等に高度かつ複雑な製造技術が必要である. また, その機構上, 部品点数も増えることから機器の小型化, 低コスト化は困難である.

近年, 微小電気機械システム (MEMS) 技術を用

いた小型・軽量かつ低コストなジャイロ (及び加速度計) が民生分野で普及している. 自動車用途などで使われる振動型 MEMS ジャイロは, MEMS センサヘッドと, それを制御する電子回路から構成される. 振動型ジャイロは, 振動子を共振状態に保つ駆動軸と, 角速度入力を検出する検出軸の 2 つの異なる振動モード軸を持ち, 回転角速度が入力された際には, 駆動軸の共振運動に応じたコリオリ力が発生し, 検出軸の振動が励起される. この振動の振幅量を検出して回転角速度を出力する. MEMS 振動子の材料には, 主に単結晶シリコンが使用され, IC, LSI と同様に半導体プロセスに準じて製造できることから, 小型化, 大量生産が可能で低コスト化が容易である. 他方, 宇宙用として要求される性能 (バイアス非安定性, ランダムウォーク等) は, 光ジャイロスコープと比較すると高くない.

現在, 我々が研究のベースとしている市販の MEMS ジャイロ (住友精密工業グループ製 CRS09 シリーズ) においては, バイアス非安定性を低下させている主要因はバイアスの温度変動であり, 次項に示す目標レベルに到達するためには, 変動量を現状の 1/10 以下に低減する必要がある. しかしながら MEMS 振動子の特性に依存した温度変動は非常に大きく (数 100 deg/h 以上), かつ非線形であるため, 現状技術からの改良だけでは達成困難である.

2.2 目的・ゴール

(1) 目的

本研究では以下の手段により、バイアス非安定性 $1 \sim 0.1 \text{ deg/h}$ レベル（目標 0.05 deg/h ）の宇宙用高精度 MEMS ジャイロを実現する計画である。

1 つ目は、電子回路にデジタル信号処理を導入（アナログ駆動検出回路→デジタル駆動検出回路）することで、より高度な温度補正を行う。2 つ目は、共振倍率 Q （Quality factor）を高める等の MEMS センサヘッドの設計変更を行うことで、温度変動そのものを低減させる。

これら技術を組み合わせることで、高度かつ複雑な製造技術が必要であった RLG、FOG に代わる、半導体プロセスをベースとした宇宙用高精度 MEMS ジャイロを実現する。

(2) ゴール

中間目標（初年度目）：

デジタル補正を付与したプロトタイプ試作

- ・ Bias Instability (BI) $< 0.1 \text{ deg/hr}$

中間目標（2 年度目）：

デジタル回路（デジタル信号処理）の完成と MEMS センサヘッドの開発

- ・ Angle Random Walk (ARW) $< 0.01 \text{ deg}/\sqrt{\text{hr}}$

最終目標（3 年度目）：

高精度 MEMS ジャイロの完成と評価

- ・ BI $< 0.1 \text{ deg/hr}$ （同上）→ 0.05 deg/hr （目標）
- ・ ARW $< 0.01 \text{ deg}/\sqrt{\text{hr}}$ （同上）
- ・ Azimuthal Error $< 0.1 \text{ deg}$
- ・ Input Range $> 400 \text{ deg/s}$
- ・ 搭載環境条件（熱、振動・衝撃等）を確認

3. MEMS ジャイロ開発概要

3.1 開発のベースライン

本開発のベースとなる MEMS ジャイロ（CRS09）に採用されているリング型 MEMS 振動子（SGH シリーズ；図 1）は、ビーム型や音叉型等の他の形状の振動子と比較し、①温度・時間安定性、②振動・衝撃耐性の二つの優れた特徴を備えている。

温度・時間安定性に関しては、振動型ジャイロの非安定性は、駆動と検出の 2 つの振動モード間の Quality Factor の差や共振周波数の差の、温度変化や経時変化が原因であるが、リング型では 2 つの振動モードの対称性が高い（図 2）ために、これらの差分の変化も極めて小さい。

この特徴により、高精度なアナログ回路を組み合わせた CRS09 では、中精度の FOG に匹敵するバイ

アス非安定性（最大 3 deg/hr ）を達成し、高精度 MEMS ジャイロの世界的な先駆けとなった。リング型の振動子のポテンシャルはさらに高く、MEMS センサヘッドや電子回路の改善を行うことで、さらなる性能向上が可能であると考えている。

また、前述の 2 つの振動モードは、外部からの力によって励起されにくいために、振動・衝撃に対しても優れた特性を示し、振動・衝撃耐性が重視される自動車の横滑り防止装置や、戦術用飛翔体等の防衛用途にも広く利用されていることから、ロケット打上時の機械的環境条件等に対しても、十分適用可能であると考えられる。

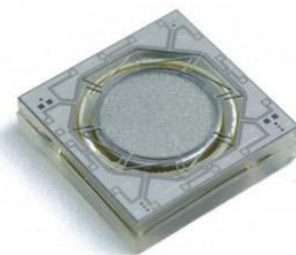


図 1 リング型の MEMS 振動子

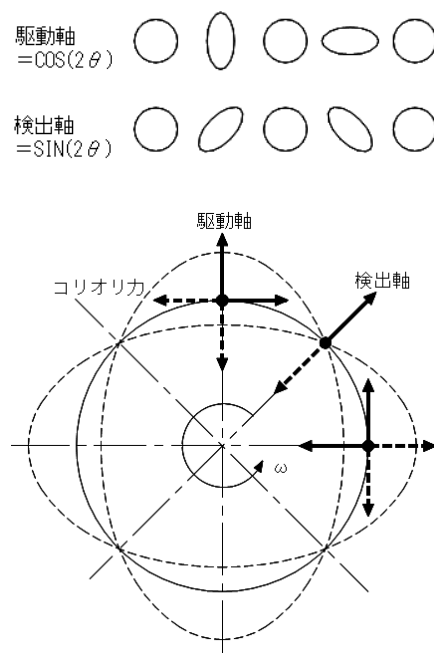


図 2 振動モードとコリオリ効果

3.2 精度向上へのアプローチ

JAXA オープンラボの制度上、研究期間は 3 年間である（2012～2014 年度）。年度毎に精度向上のアプローチを分割し、段階を経て最終形態（高精度 MEMS ジャイロ試作品の完成）を目指す。

(1) 初年度目

デジタル補正を付与したプロトタイプ試作

- 温度特性補正用のデジタル回路を追加したプロトタイプを試作し、高度な補正（高次関数でのフィッティング）を行うことでバイアス温度変動を低減する。（図3）

これによって、温度変動の影響と考えられる、アラン分散プロットでの+1のスロープを下側にシフトさせ、BIを低減する。（図4）

- 温度変化による誤差要因を排除し、MEMS センサヘッド単体の性能限界を見極める。

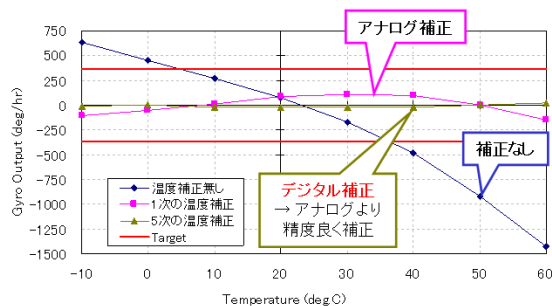


図3 補正によるバイアス温度変動の低減イメージ

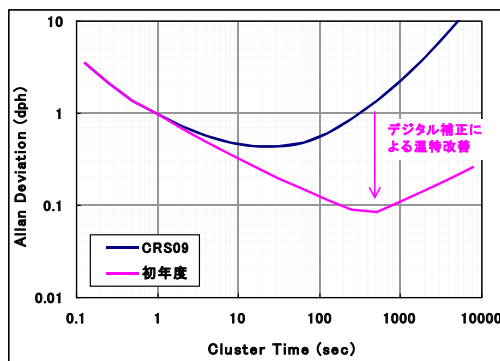


図4 バイアス温度変動低減によるBIの低減イメージ

(2) 2年度目

デジタル回路（デジタル信号処理）の完成と MEMS センサヘッドの開発

- デジタル信号制御によるジャイロの駆動・検出を実現する。
- ジャイロ性能を改善するための MEMS センサヘッドのデザイン及びプロセスの開発を行う。

- ① Quality Factor の向上
- ② ホワイトノイズの低減
- ③ 駆動・検出（トランスデューサー）部の利得の安定性向上 等

(3) 3 年度目

高精度 MEMS ジャイロの完成と評価

- 1, 2 年度目を実施したデジタル回路と MEMS センサヘッドを統合した高精度 MEMS ジャイロを製作する。

表1 仕様比較（CRS09 及び研究目標）

	CRS09	研究目標
信号処理 温度補正 外部出力	アナログ	デジタル
入力角速度範囲 ※	±100deg/s (CRS09-12) ±200deg/s (CRS09-11)	±400deg/s
ARW	0.1deg/√hr	0.01deg/√hr
BI	< 3deg/hr	< 0.1deg/hr (< 0.05deg/hr)
バイアス温度変動	< ±1deg/s	< ±0.1deg/s
感度温度変動	< ±1%	←
耐振動	10G	20G

※ CRS09 シリーズは入力角速度等の差異により複数の製品群がある

4. 現在までの成果・課題

4.1 成果

(1) 設計・試作

- システム

初年度のプロトタイプのデジタルによる温度補正は、従来までのジャイロ出力に対する補正演算（図5）ではなく、制御回路に補正値を加算することでジャイロ出力を補正する方式（図6）を採用した。ジャイロは複数の制御回路を有しているため、各制御回路の誤差成分が全て加算されたジャイロ出力へ補正では無く、制御回路毎に補正を施す事で、より高度な補正が可能になる。

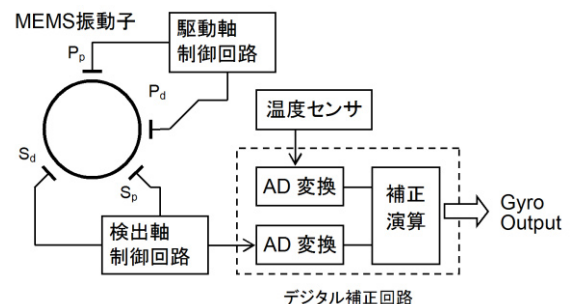


図5 出力を補正する場合のシステムブロック図

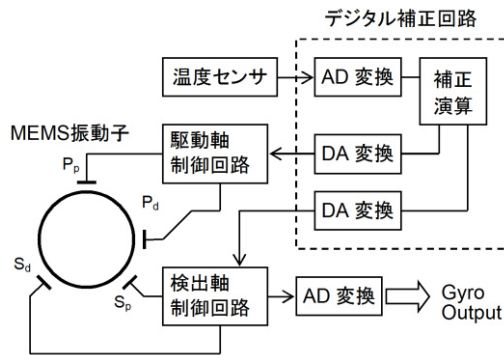


図 6 制御回路を補正する場合のシステムブロック図

- ・アナログ回路

基本的な回路構成は CRS09 を踏襲しているが、CRS09 開発後も、高性能な電子部品が多数製品化されているため、最新の情報を元に部品の再選定を行っている。また、温度補正回路のデジタル化に伴い、アナログ補正回路は全て除去した。

- ・デジタル回路

AD 変換器や、補正演算用のプロセッサは、マスタークロックを必要とするが、振動型ジャイロでは、これらのクロックがノイズ源となる場合がある。そのため、ジャイロの共振周波数を PLL によって逡倍した信号を、これらのクロック源として使用している。

外部機器との接続については、ケーブル長に制約が少なく、高速な信号伝播が可能な RS422 を採用した。

- ・試作サンプル

CRS09 と同一のフットプリントとし、アナログ制御回路内の信号レベルの確認用に、チェックパッドを配置した。



図 7 試作品外観（左：試作品，右：CRS09）

(2) 補正

5 次の多項式近似とし、各設定温度下での、サンプル内の温度センサ出力と補正值とのテーブル（表 2）を作成し、最小二乗法を用いて係数を求めた。

温度は-5℃～65℃の範囲で 10℃ステップの計 8 点とした。

表 2 補正用データテーブル

設定温度	-5℃	5℃	...	55℃	65℃
温度センサ	T ₁	T ₁	...	T ₇	T ₈
補正值 P (駆動軸制御)	P ₁	P ₂	...	P ₇	P ₈
補正值 S (検出軸制御)	S ₁	S ₂	...	S ₇	S ₈

$$P = a \cdot T^5 + b \cdot T^4 + c \cdot T^3 + d \cdot T^2 + e \cdot T + f$$

$$S = g \cdot T^5 + h \cdot T^4 + i \cdot T^3 + j \cdot T^2 + k \cdot T + l$$

(3) 性能評価

- ・バイアス温度特性

-10～60℃の温度範囲でのバイアス変動量（pk-pk）は、未補正では約 2,000 deg/hr であったが、デジタル補正後は 50 deg/hr となり、変動量は 1/40 となった。（図 8）

また、補正後の変動量の設計目標は CRS09 の 1/10 以下である 0.1 deg/s (=360 deg/hr) としていたが、これに関しても十分に達成している。

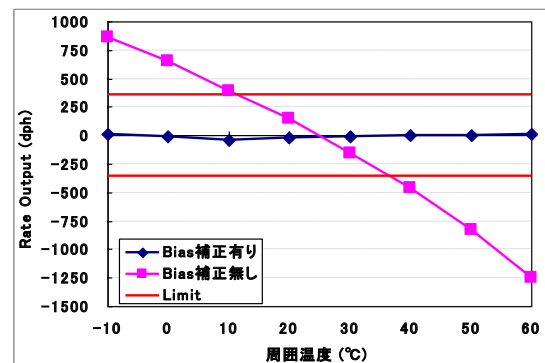


図 8 バイアスの温度変動

- ・アラン分散

25℃環境下での計測では、想定（図 4）の通りクラスタタイム（横軸）が長い領域では、未補正の場合と比べてアラン分散は減少し、BI<0.1 deg/hr を達成した。（図 9）

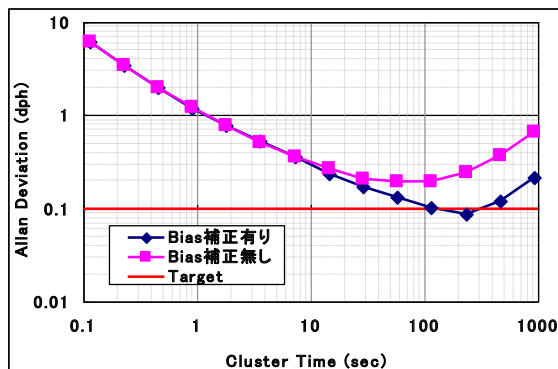


図 9 25℃環境下でのアラン分散プロット

4.2 課題

25℃に続き、低温側 (-10℃) と高温側 (+60℃) の補正後の計測データを用いてアラン分散を求めたところ、特に高温側において、目標に対して大きく未達となっており (図 10)、アラン分散プロットの+1のスロープは、バイアス温度変動以外にも原因があることが確認された。

すなわち、アラン分散の結果に温度依存性があり、高温で特に顕著であることから、①MEMS センサヘッドや電子部品等の構成材料の経時的な特性変化や、②MEMS 振動子への熱ストレス (膨張・収縮) の影響等による出力変動が原因として考えられる。

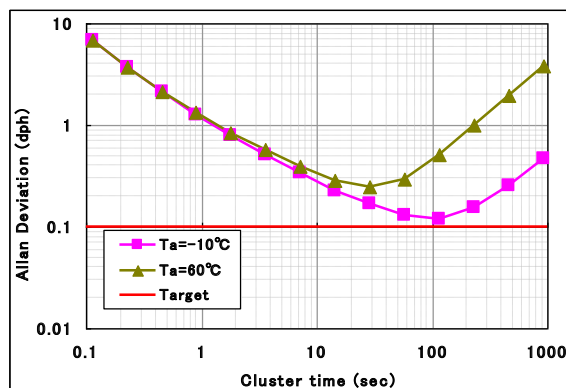


図 10 高温・低温下でのアラン分散プロット
(バイアス補正有り)

5. 今後の計画

5.1 繰り返し再現性・長期安定性評価

MEMS ジャイロを組み込む慣性航法装置等の機器は、衛星・ロケットに組み込まれてから使用に供するまでに一定期間 (通常は 1 年以上) を要する。そのため、出荷後にセンサの校正が必要となる。衛星の場合は、運用期間が数年間に至るため、その間の劣化も考慮する。

課題の推定原因①の検証として、長期安定性評価を通电状態で実施し、経時的な特性変化やエージングによる経時変化抑制の効果の有無を確認する。

5.2 MEMS センサヘッドの特性改善

当初計画していた、温度変動の低減を目的とした改善と合わせ、課題の推定原因②に注視し、機械的なストレスの影響を受けにくいセンサヘッドの構造などを検討する。

6. 高精度 MEMS ジャイロの応用先

航空・宇宙分野以外で高精度 MEMS ジャイロが適用できる分野としては、資源探査、地震計測、列車運行、ロボティクスなどが考えらる。これらはユーザーの環境制約から、他のセンサ情報 (衛星航法システムや光学的方位観測) 支援を受けられないため、ジャイロ単体の計測精度が機能・性能を支配する。下記に具体例を示す。

6.1 資源探査

地下や海底下の資源探査では、方位計測に当たって GPS 衛星からの電波による GPS コンパスは利用できない。従来は、磁方位を検出する磁気コンパスを利用するが、周囲環境や探査機器本体に含まれる磁性体の影響を避けるために、高価な非磁性体のケーシングが必要であった。高精度 MEMS ジャイロは地球自転レートから単独で真方位計測が可能のため、高価な非磁性体を必要としない利点がある。³⁾

6.2 地震計測

地震計測においては、その取り付けた計測装置の方位を正確に知る必要がある。地震計は海底を含む広範囲な国土に設置されるため、高精度 MEMS ジャイロを適用することで、地震計測・予知の高精度化に寄与できると考える。さらに地震計は設置数が多いため、MEMS の特徴である大量生産に適する。すなわち、地震計観測システム全体の低コスト化にも有効である。

7. まとめ

JAXA オープンラボの枠組みのもと、共同研究として開始した宇宙用高精度 MEMS ジャイロについて中間報告を行った。実質の作業期間としては 1 年弱であるが、設定した目標性能 (精度: BI でベースラインの 10 倍以上) を一部上回る成果 (25℃で BI<0.1deg/s) を実測している。その理由としては、精度に対する温度補正の効果寄与が高いことが挙げられる。また、当該ジャイロは民生分野で多数使用

されており，ベース技術は確立されていることも一因である．

研究のベースとなった CRS09 は，その小型軽量，低消費電力，高精度な特徴により，2012 年 5 月に H-IIA 21 号機で打ち上げられた小型実証衛星 4 型（SDS-4）にも，姿勢制御系搭載機器（低コスト 3 軸レートセンサ；VSGA）として使用された．現時点でも正常に機能している．

今後は MEMS センサヘッドの繰り返し再現性・長期安定性評価を行いつつ，センサヘッドの特性改善に取り組む．また，試作で実現したデジタル温度補正を行う電子回路部以外の回路のデジタル化を図るための設計を進める．

参考文献

- 1) JAXA オープンラボ：<http://aerospacebiz.jaxa.jp/>
- 2) 笹田武志，川井洋志，横田清美，松本秀一，泉 達司，斎藤宏之，宮原聖明，沖倉晴彦：国産ロケット用慣性センサユニットの開発，第 56 回宇宙科学技術連合講演会講演集（1H15），別府国際コンベンションセンター，Nov. 2012.
- 3) 孫崎 太，森口孝文，岩井裕三，山口和彦（2011）『坑井用途向け MEMS ジャイロ方位計測の開発』（社）物理探査学会，第 124 回 学術講演会論文集，P207～P210
- 4) 中島佑太，村上尚美，三浦尚幸，立原裕司，大谷崇，中村揚介，井上浩一，平子敬一：小型実証衛星 4 型（SDS-4）姿勢制御系搭載機器の軌道上評価結果速報，第 56 回宇宙科学技術連合講演会講演集（3M13），別府国際コンベンションセンター，Nov. 2012.