

# 技術紹介

## 9 振動ジャイロの開発

### Development of Vibratory Gyro

|       |                    |       |       |                |
|-------|--------------------|-------|-------|----------------|
| 中島 光浩 | Mitsuhiro Nakajima | 中央研究所 | 研究開発部 | センサ技術マネージャー    |
| 細川 武志 | Takeshi Hosokawa   | 中央研究所 | 研究開発部 |                |
| 倉本 健次 | Kenji Kuramoto     | 中央研究所 | 研究開発部 | センサ技術シニアマネージャー |

**キーワード:** 角速度、ジャイロ、センサ、コリオリカ、振動子、圧電単結晶

**Keywords :** angular velocity, gyro, sensor, Coriolis force, oscillator, piezoelectric single crystal

### 要 旨

急速に電子制御化が進んでいる自動車や物流機械及び各種移動ロボット等においては、動作制御・誘導システムのさらなる高度化に伴い、高精度に角速度検出可能な小型ジャイロが必要になると予測されます。そこで、高精度化と小型化に向けて高感度圧電単結晶による6脚振動子を採用した振動ジャイロを開発しています。

本報告では、代表的な基本性能としてバイアスノイズ、バイアス温度補正残差、感度非直線性を評価し、オープンループ型ファイバーオプティックジャイロ (FOG) に匹敵する性能を実証しましたので紹介します。

### SUMMARY

It is forecasted that small gyros possible to measure angular velocity with high-accuracy will be demanded for application such as automobiles, machineries for logistics, and various mobile robots, where shift to electronic control is rapidly progressing, along with their further improvement in motion control and guidance system. Towards higher accuracy and downsizing of gyros, JAE is now developing a vibration gyro that adopts a six-leg oscillator made by high-sensitive piezoelectric single crystal.

We evaluated its basic performance including bias noise, bias temperature compensation residual error and sensitivity non-linearity, and obtained high performance equivalent to the open-loop type fiber optic gyro (FOG). We outline the result of the development in this report.

## 1 まえがき

近年、振動ジャイロはビデオ、カメラの手ブレ検出用、ゲーム機のモーションモニタ用として普及してきており、急速な電子制御化が進む自動車にも横滑り防止等の車体動作制御用センサとして使用されています。今後も自動車ユーザーへの高度な運転支援や安全性確保のため、車体制御・誘導システムのさらなる高度化が予測されます。また物流機械や各種移動ロボット等においても、動作制御に必要な移動体の動き計測や方向制御などの要求が拡大してきています。これらの実現には、構造体の動きを正確に捉えるための高精度角速度検出が可能な高性能ジャイロが必要となります。

高性能ジャイロとして、航空電子はすでに航空機、産業機器向けに光ジャイロ（リングレーザージャイロ、ファイバーオプティックジャイロ）を製品化していますが、部品点数は多く、またサイズは比較的大きくなっています。そこで、部品点数が少なく小型化が可能な振動ジャイロ方式を選択し、また高精度化に向けて高感度圧電単結晶を採用した6脚構造振動ジャイロを開発してきました。

本報告では、設計した振動ジャイロの基本性能について紹介します。図1に今回評価用に試作した振動ジャイロの外観を示します。



図1 振動ジャイロ外観

## 2 振動ジャイロの原理

振動する物体に回転が加わると、振動に垂直方向にコリオリ力が発生し、この力を検出するのが振動ジャイロの検出原理です。使用される振動材料としては、圧電セラミック、圧電単結晶、半導体（シリコン）があり、それぞれ 三角柱、円柱、平板、多脚などの構造が発表、製品化されています<sup>1)-2)</sup>。これらの中で、本開発では高性能化に適した圧電単結晶材料を用いた多脚構造を採用しました。

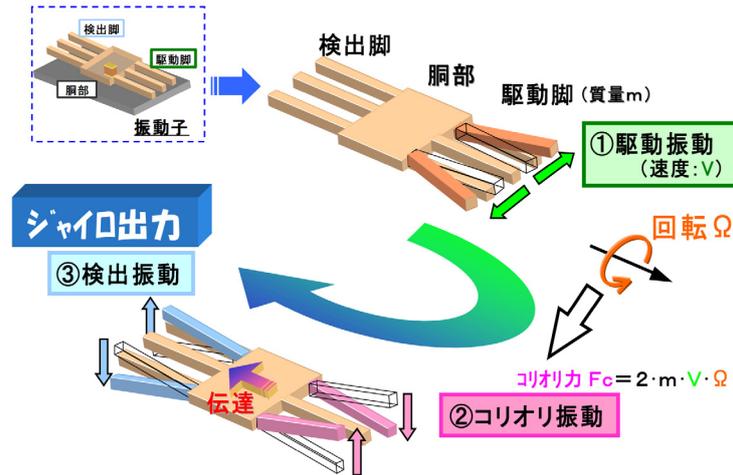


図 2 振動ジャイロの検出原理

図 2 に多脚構造振動ジャイロの構造とその検出原理を示します。振動子は、左右に配置した駆動脚、検出脚を胴体部で結合した 6 脚構造となっており、コリオリ力検出に直接かかわる 4 本の脚に加え、質量バランスをとり安定性を増すための中央脚から構成されています。①質量 (m) を持つ駆動脚が速度 (v) で振動しているところに回転角速度 (Ω) が入力すると、②発生するコリオリ力 ( $F_c = 2mv\Omega$ ) により駆動振動と垂直方向に振動（以降コリオリ振動と記す）が発生します。③胴体部を通して検出脚にコリオリ振動が伝達します。この検出振動を検出脚に配置した電極により電圧として取り出し、駆動振動周波数で同期検波することでジャイロ出力（角速度信号）が得られます。図 3 にジャイロ出力ブロック図を示します。

この振動子構造は、駆動脚 / 検出脚が独立しているため、駆動振動から検出振動への干渉が小さく、また各電極が分離していることから駆動 / 検出効率の良い電極設計が可能であり、高性能化を図ることができます。

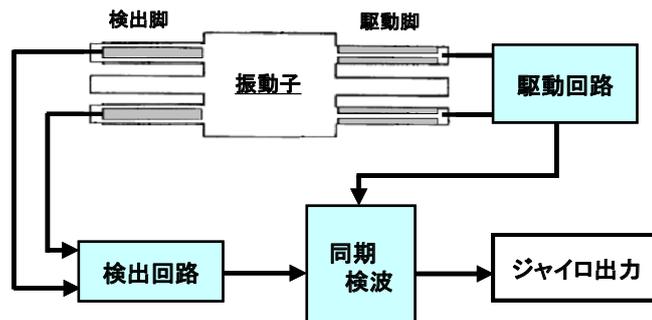


図 3 ジャイロ出力ブロック図

### 3 構造

図 4 に試作した振動ジャイロのモジュールを示します。振動子パッケージ(内部に振動子)とコリオリ力を電圧として検出する回路基板から構成されています。

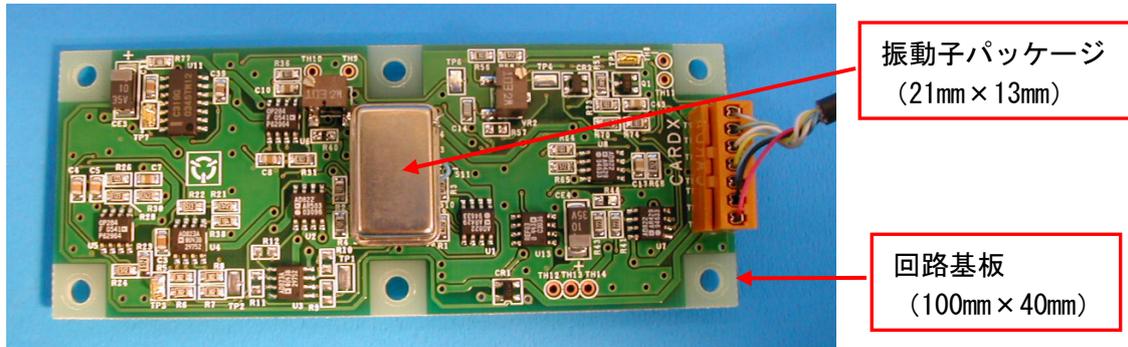


図 4 振動子と回路基板

#### 3.1 振動子

図 5 に振動子の構造を示します。6脚構造をもつ圧電単結晶の振動子に駆動振動励起用電極、ジャイロ出力検出用電極を設け、支持材にて気密封止パッケージ底板に接着固定し、ワイヤボンディング配線をしています。振動子のバランスは、脚先ウェイトを使用してレーザートリミングで調整しています。圧電単結晶としては、一般にジャイロ素材として使用されている水晶よりも圧電特性の優れたランガサイト (LGS : La<sub>3</sub> Ga<sub>5</sub> SiO<sub>14</sub>) を採用しました。

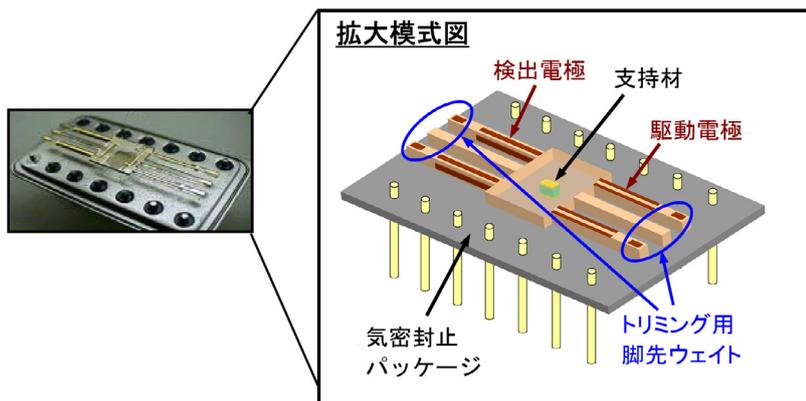


図 5 振動子構造

#### 3.2 回路基板

振動子の評価用として駆動 / 検出回路基板を表面実装ディスクリート部品で作製しました。駆動回路は発振振幅の制御、また検出回路は高インピーダンスアンプ、検波のための移相回路、ノイズ低減のためのフィルタなどから構成されています。

## 4 基本性能の評価

当初設定した目標性能を表 1 に示します。評価の結果、これらの基本性能を満足することを確認しました。

表 1 目標性能

| 項目     | 目標性能                           |                                                                     |
|--------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 電源電圧   | $\pm 5 \pm 0.5V$               |                                                                     |
| 測定範囲   | $\pm 100^\circ/s$              |                                                                     |
| 応答周波数  | 10Hz                           |                                                                     |
| バイアス特性 | 温度補正残差                         | $\pm 0.05 [^\circ/s]$ 以内                                            |
|        | ショートターム(温度安定下)                 | $0.01 [^\circ/s, p-p]$ 以下                                           |
|        | バイアスノイズ(温度安定下)<br>(ランダムウォーク係数) | $0.01 [^\circ/s, p-p]$ 以下<br>《 $0.003 [^\circ/\sqrt{s}, 1\sigma]$ 》 |
|        | 振動特性(バイアスシフト)<br>(*)：振動条件      | $0.06 [^\circ/s/(3G)]$ 以下                                           |
| 感度特性   | 感度非直線性(温度安定下)                  | $\pm 0.1 [\%]$ 以内                                                   |
|        | 感度温度特性(温度補正後)                  | $\pm 1 [\%]$ 以内                                                     |
| 耐環境性   | 作動温度範囲                         | $-10 \sim 70^\circ C$                                               |
|        | 振動(*)                          | $29.4m/s^2 (3G), \sim 200Hz$                                        |
|        | 衝撃                             | $392m/s^2 (40G)$                                                    |

代表的な性能としてバイアスノイズ(図 6)、バイアス温度補正残差(図 7)、感度非直線性(図 8) を示します。これらの基本性能はいずれもオープンループ型ファイバオプティックジャイロ (FOG) に匹敵しています。

図 6 は、 $20^\circ C$  温度一定における入力角速度印加なし状態でのジャイロ出力の変動(バイアスノイズ) を表しています。上図は約 4 時間のジャイロ出力変動を示しており、下図は最後の 1 時間データを拡大したもので、バイアスノイズは  $0.01 [^\circ/s, p-p]$  以下となっています。

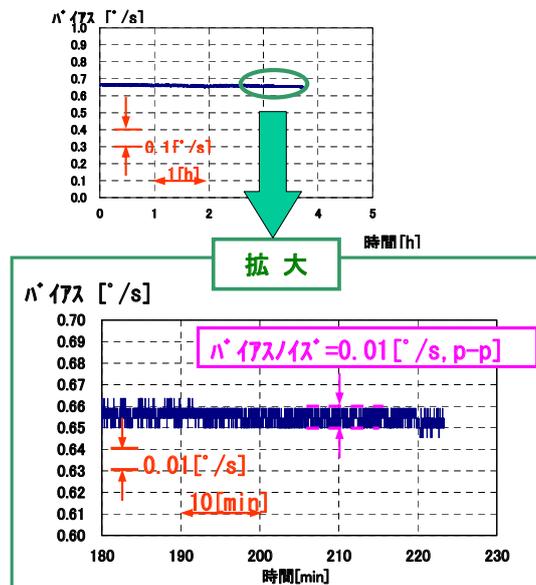


図 6 ジャイロ出力変動 (バイアスノイズ)

図7は、 $-10^{\circ}\text{C}$ ～ $70^{\circ}\text{C}$ の温度変化時におけるジャイロ出力を内蔵温度センサで3次補正した結果(バイアス温度補正残差)です。図6の一定温度データと比べ計測レンジの違いにより見かけ上出力バラツキが大きく見えていますが、温度変動環境での再現性をあらず温度ヒステリシスが $0.05[^{\circ}/\text{s}]$ と、バイアスノイズと同様、良好な結果を示しています。

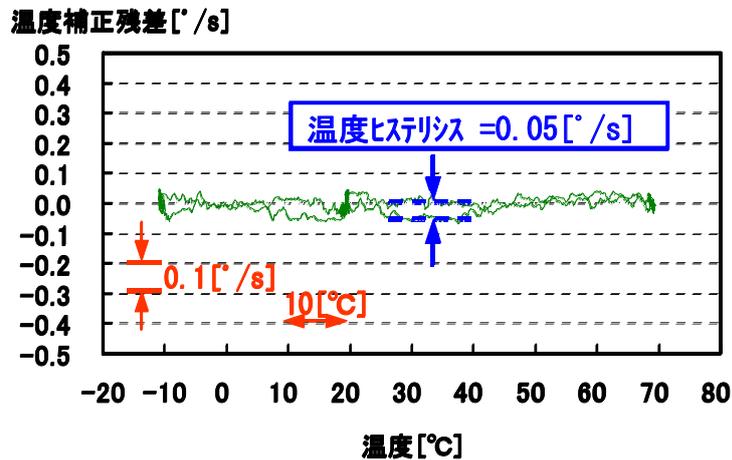


図7 バイアスノイズ温度補正残差(3次補正後)

図8は、 $-10^{\circ}\text{C}$ 、 $20^{\circ}\text{C}$ 、 $70^{\circ}\text{C}$ で温度一定化において入力角速度 $\pm 100[^{\circ}/\text{s}]$ までの感度直線性の誤差を示したデータです。各温度とも一様に誤差は $\pm 0.05[\%]$ と非常に安定した性能を示しています。

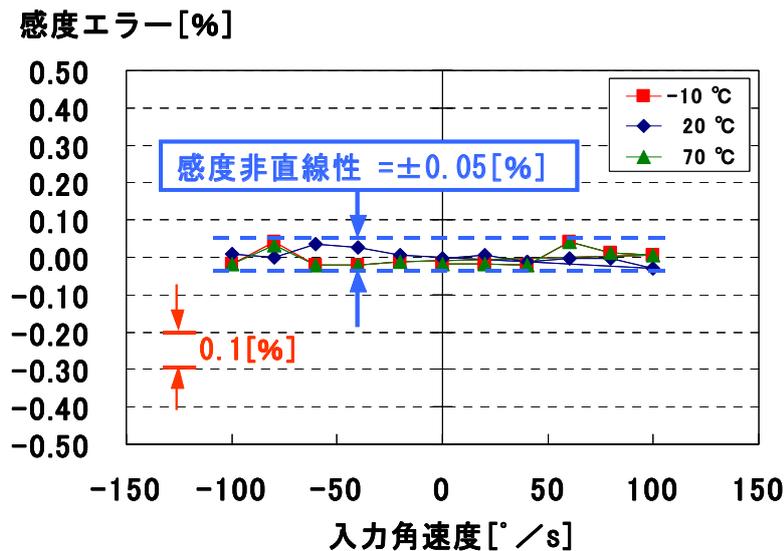


図8 感度非直線性

## 5 むすび

今回、高感度な圧電単結晶を用いた 6 脚構造振動ジャイロを開発し、オープンループ型ファイバーオプティックジャイロ (FOG) に匹敵する基本性能を実証しました。

今後は、製品化に向けて耐環境特性の向上を図るとともに、信号処理部を含めたモジュールの小型化を図ります。

### 【参考文献】

- 1) 菅原澄夫、富川義朗；「弾性波機能デバイス」—振動ジャイロ，日本音響学誌，55-07，(1999-07)，pp.469-503
- 2) 産業技術サービスセンター発行；IVマイクロマシンの応用例，マイクロアクチュエータの応用，17. 振動ジャイロ，マイクロマシン技術総覧，(2003)，pp.654-658