双共振音さ型振動ジャイロの振動特性*

(第2報, 磁気ダンパによる動特性の改善)

新堀 佑三^{*1}, 畑河内 秀樹^{*1}, 背戸 一登^{*2}Vibration Characteristics of Twin Resonance Tuning-Fork Type Gyro
(2nd Report, Improvement of Dynamic Characteristics with Magnetic Damper)Yuzo SHIMBORI^{*3}, Hideki HATAGUCHI and Kazuto SETO^{*3} Nihon University, College of Science & Technology, Dept. of Precision Machinery Engineering
Narashinodai 7-24-1, Funabashi-shi Chiba-ken, 274-8501 Japan

Twin resonance tuning-fork type gyro that is one of Vibratory Rate Gyroscopes has a number of advantages. On the other hand, its output signal is very small on the structure of the vibratory body as a fault. Therefore, the rate gyro of this type is supported by an elastic mechanism and is required high gain in the resonance between the excitation system and the detection system by fine tuning⁽⁷⁾. However, the quick response and the stabilization of gyro vibration system worsen by high mechanical Q value. They are problems which do not coexist easily, and conflict. Then, it is necessary to give moderate damping to both of the twin resonance tuning-fork and the gyro support part for improvement of dynamic characteristics and stabilization. Therefore, this paper describes an experimental study concerning the quick response and the stabilization of twin resonance tuning-fork type gyro made a high gain by the method of the first report, and reports on a method of obtaining moderate damping as the means.

Key Words: Torsional Vibration, Coupled Vibration, Vibratory Rate Gyroscopes, Twin Resonance Tuning-Fork, Stabilization, Magnetic Damper

1. 序 論

レートジャイロスコープは大別すると、光学式と機械式があり、角速度センサとして広く利用されている。なかでも、機械式ジャイロである振動ジャイロは高速回転するロータの代わりに振動子を利用したジャイロで、軸受けがないため構造が簡単、堅牢かつ小型化が比較的容易などの特徴を持っている⁽²⁾。ロボットのマニピュレータや走行ロボットの運動制御等への応用の場が広がっている。しかし、振動ジャイロは角速度入力によるコリオリの力を振動片のねじり振動、曲げ振動あるいは支持機構のねじり振動として検出しているために検出感度が低いという問題がある^{(1)~(3)}。検出感度増大のためには振動子の加振振動とそれら振動とを共振させ、高い機械的 Q 値を得る必要がある。第1報において双共振音さ型を振動子とした場合、振動片断面形状の微調整による直接的方法と基礎部慣性の調節による間接的方法との併用により、比較的容易

にその共振が得られることがわかった。その結果、双共振音さ型振動ジャイロの角速度検出感度を向上させることができた⁽⁷⁾。しかし、感度の向上を得ることと、外乱に対するジャイロ出力の安定化および周波数特性の向上とは、相反する問題である。また、第一報の方法による双共振振動子は加振系と検出系の共振周波数が近接しているため、外乱によりビートが発生しやすく、不安定化する。そこで、弾性支持された双共振音さ型振動子の加振系の高い Q 値を維持しつつ、検出系と弾性支持部に適度の減衰を付与し、ビートの抑制と動特性の改善をはかる必要がある。

本研究では、その手段として機械的接触なしで減衰を付与できる磁気ダンパの適用を試みた。その結果、加振系と検出系の共振時の周波数差によるビートを抑制し、双共振音さ型振動ジャイロに要求される共振と出力の安定化と速応性を満足させることができたので報告する。

2. 振動ジャイロの原理

図1(a)は双共振音さ型振動ジャイロの原理図である。振動片が半径方向に面内振動($Y-Z$ 面)をしなから振動子が回転入力(歳差 Ω)を受けると、振動子はコリオリの力 F_c によって面外振動($X-Z$ 面)をする。

* 原稿受付 1999年7月21日。

^{*1} 正員, 日本大学理工学部(〒274-8501 船橋市習志野台7-24-1)。^{*2} 正員, 日本大学理工学部(〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台1-8)。

E-mail: shimbori@eme.cst.nihon-u.ac.jp

Fig.1 Illustration of twin resonance tuning-fork type gyro

この面外振動している振動片、ベース部、弾性支持部を図1(b)の簡素化したねじり振動系と等価と見なすと角運動量保存則から式(1)が導かれる。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\{J_1(\Omega + \dot{\theta}_1)\} &= -d_1\dot{\theta}_1 - k_1\theta_1 + d_2(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) \\ &\quad + k_2(\theta_2 - \theta_1) \\ \frac{d}{dt}\{J_2(\Omega + \dot{\theta}_2)\} &= -d_2(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) - k_2(\theta_2 - \theta_1) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

J_1, J_2 : ベース, 振動片等価慣性モーメント
 d_1, d_2 : ベース, 振動片等価減衰係数
 k_1, k_2 : ベース, 振動片等価ばね定数

θ_1, θ_2 : ベース, 振動片等価ねじれ角

J_2 は振動子の面内振動(角周波数 ω_s : Y-Z 面内)で変動するので式(2)とおくと、

$$J_2 = J_s + \Delta J_s \sin \omega_s t \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

J_s : 振動片慣性モーメントの一定分

ΔJ_s : 振動片慣性モーメントの変動分

式(1), (2)から式(3)が得られる。

$$\begin{aligned} \left(p^2 + \frac{d_1 + d_2}{J_1}p + \frac{k_1 + k_2}{J_1}\right)\theta_1 - \left(\frac{d_2}{J_1}p + \frac{k_2}{J_1}\right)\theta_2 &= 0 \\ -\left(\frac{d_2}{J_s}p + \frac{k_2}{J_s}\right)\theta_1 + \left(p^2 + \frac{d_2}{J_s}p + \frac{k_2}{J_s}\right)\theta_2 &= -\frac{\Delta J_s}{J_s}\omega_s\Omega \cos \omega_s t \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ただし、

$$d_2 \gg \Delta J_s \omega_s, \quad J_s \gg \Delta J_s,$$

$$d/dt = p$$

歳差 Ω に式(4)の角速度変動がある場合、式(3)からジャイロ出力であるベース部に対する振動片のねじれ角 θ_0 は式(5)となる。

$$\Omega = \Omega_0 + \Delta\Omega \cos \omega_t t \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、

Ω_0 : 一定角速度

$\Delta\Omega$: 角速度振幅

ω_t : 変動角周波数

$$\begin{aligned} \theta_0 = \theta_2 - \theta_1 &= \left[\frac{\Delta J_s}{J_s} \frac{\Omega_0}{\omega_2} \frac{\omega_s}{\omega_2} \sqrt{\left\{ \left(\frac{\omega_s}{\omega_2} \right)^2 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 - \left(\frac{J_s}{J_1} \right)^2 \right\} + \left(2\zeta_1 \frac{\omega_1}{\omega_2} + 2\zeta_2 \frac{J_s}{J_1} \right) \left(\frac{\omega_s}{\omega_2} \right)^2} \sin(\omega_s t + \Phi_{02}) \right. \\ &\quad \left. - \frac{\Delta J_s}{J_1} \frac{\Omega_0}{\omega_2} \frac{\omega_s}{\omega_2} \sqrt{1 + \left(2\zeta_2 \frac{\omega_s}{\omega_2} \right)^2} \sin(\omega_s t + \Phi_{01}) \right] / K \left(\frac{\omega_s}{\omega_2} \right) + \frac{\Delta\Omega}{\omega_2} \frac{\omega_t}{\omega_2} \frac{\omega_1}{\omega_2} \\ &\quad \times \sqrt{\left\{ \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 + \left(2\zeta_1 \frac{\omega_t}{\omega_2} \right)^2 \right\} / K \left(\frac{\omega_t}{\omega_2} \right)} \sin(\omega_t t + \Phi_{1a}) + \frac{1}{2} \frac{\Delta J_s}{J_s} \frac{\Delta\Omega}{\omega_2} \frac{\omega_s - \omega_t}{\omega_2} \\ &\quad \times \sqrt{\left\{ \left(\frac{\omega_s - \omega_t}{\omega_2} \right)^2 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \right\}^2 + \left\{ 2\zeta_1 \left(\frac{\omega_s - \omega_t}{\omega_2} \right) \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right) \right\}^2} / K \left(\frac{\omega_s - \omega_t}{\omega_2} \right) \cdot \sin\{(\omega_s - \omega_t)t + \Phi_{v'}\} \\ &\quad + \frac{1}{2} \frac{\Delta J_s}{J_s} \frac{\Delta\Omega}{\omega_2} \frac{\omega_s + \omega_t}{\omega_2} \sqrt{\left\{ \left(\frac{\omega_s + \omega_t}{\omega_2} \right)^2 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \right\}^2 + \left\{ 2\zeta_1 \left(\frac{\omega_s + \omega_t}{\omega_2} \right) \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right) \right\}^2} / K \left(\frac{\omega_s + \omega_t}{\omega_2} \right) \\ &\quad \times \sin\{(\omega_s + \omega_t)t + \Phi_{v''}\} \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここに、位相角は式(6), (7), (8)となる。

$$\Phi_{1a} = \tan^{-1} \left\{ 2\zeta_1 \frac{\omega_t}{\omega_1} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\Phi_{v'} = \tan^{-1} \left\{ \frac{\left(\frac{\omega_s - \omega_t}{\omega_2} \right)^2 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2}{2\zeta_1 \frac{\omega_1}{\omega_2} \frac{\omega_s - \omega_t}{\omega_2}} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\Phi_{v''} = \tan^{-1} \left\{ \frac{\left(\frac{\omega_s + \omega_t}{\omega_2} \right)^2 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2}{2\zeta_1 \frac{\omega_1}{\omega_2} \frac{\omega_s + \omega_t}{\omega_2}} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし,

ベース, 振動片の減衰率:

$$\zeta_1 = \frac{d_1}{2\sqrt{J_1 k_1}}, \quad \zeta_2 = \frac{d_2}{2\sqrt{J_2 k_2}}$$

ベース, 振動片の固有角周波数:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{J_1}}, \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{J_2}}$$

であり, 式(5)は以下の関係を持つ.

$$\begin{aligned} K\left[\frac{\omega}{\omega_2}\right] = & \left[\left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^4 - \left\{\left(1 + \frac{J_s}{J_1}\right) + \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 + 4\zeta_1\zeta_2\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)\right\}\right. \\ & \times \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2 + \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2\left.\right]^2 + \left[\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)\left\{2\zeta_1 + 2\zeta_2\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)\right\}\right. \\ & \left. - \left\{2\zeta_2\left(1 + \frac{J_s}{J_1}\right) + 2\zeta_1\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)\right\}\left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right]^2 \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^{1/2} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式(5)の第1項は定角速度入力 Ω_0 に相当するジャイロ出力であり, 式(10)と置くと, 面外固有角周波数 ω_2 と面内固有角周波数である振動子の角周波数 ω_s との比の関係は図2の特性を持つ. 慣性比の調律による共振から最大ゲインを得, 入力角速度 Ω_0 に比例したねじれ角 θ_{s0} が得られることは第一報で報告した⁽⁷⁾. 式(5)の第2項は変動角周波数 ω_t による角加速度項, 第3, 4項は角速度振幅 $\Delta\Omega$ に相当する角速度項

$$\theta_{s0} = \frac{\Delta J_s}{J_s} \frac{\Omega_0}{\omega_2} \frac{\omega_s}{\omega_2} \left| G_0\left(\frac{\omega_s}{\omega_2}\right) \right| \sin(\omega_s t + \Gamma) \quad \dots (10)$$

$$\theta_t = \theta_{2t} - \theta_{1t} = \frac{\Delta J_s}{2J_s} \frac{\Delta\Omega}{\omega_2} \frac{\omega_s}{\omega_2} \cdot G_t\left(\frac{\omega_t}{\omega_2}\right) \quad \dots\dots\dots (12)$$

ただし

$$\begin{aligned} G_t\left(\frac{\omega_t}{\omega_2}\right) = & \frac{\omega_s - \omega_t}{\omega_s} \sqrt{\frac{\left\{\left(\frac{\omega_s - \omega_t}{\omega_2}\right)^2 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2\right\}^2 + \left\{2\zeta_1\left(\frac{\omega_s - \omega_t}{\omega_2}\right)\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)\right\}^2}{K\left(\frac{\omega_s - \omega_t}{\omega_2}\right)}} \cdot \cos(\omega_s - \omega_t)t \\ & + \frac{\omega_s + \omega_t}{\omega_s} \sqrt{\frac{\left\{\left(\frac{\omega_s + \omega_t}{\omega_2}\right)^2 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2\right\}^2 + \left\{2\zeta_1\left(\frac{\omega_s + \omega_t}{\omega_2}\right)\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)\right\}^2}{K\left(\frac{\omega_s + \omega_t}{\omega_2}\right)}} \cdot \cos(\omega_s + \omega_t)t \quad \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

式(12)で変動角周波数 $\omega_t = 0$ とした時のねじれ角を θ_{s0} とすると, θ_{s0} は角速度振幅 $\Delta\Omega$ に相当する定角速度入力時のジャイロ出力である. 共振点で設定した場合の角速度変動時の出力 θ_t との振幅比 $|\theta_t/\theta_{s0}|$ の特性を図3の実線(一)で示す.

よって, 速度変動がある場合でも $\omega_2 \gg \omega_t$ ならば, 定角速度入力時と同様に瞬時の角速度に比例したジャイロ出力が得られ, 適度の減衰 (ζ_2) で周波数特性の改善も図れることを示している. また, 設定が偏っている場合(図3の表の設定)はゲイン低下を招くが, 式(13)の第1項または第2項が共振点に近づき, 周波数特性が改善($\dots$, $---$)されることがわかる.

3. 出力の安定化と動特性の向上

振動子の高い機械的 Q 値は面内振動の場合, 少ない加振エネルギーで振動を継続的に維持できることを表し, 安定振動に寄与する. 面外振動の場合は弾性支持部慣性の微調整で, 精度よく面内振動との共振が得られ, 図2の出

Fig. 2 Response of twin resonance tuning-fork type gyro ($\Omega = \text{constant}$, $\zeta_1 = 0.05$, $\zeta_2 = 4 \times 10^{-3}$)

である. 定角速度入力時と同様に図2の面内固有角周波数との共振状態 ($\omega_s \doteq \omega_2$) で $\omega_2 \gg \omega_t$ の時, 式(11)の条件が許容できるならば, 角加速度項は無視できる.

$$1 \gg \frac{\text{角加速度項の振幅}}{\text{角速度項の振幅}} = \frac{\zeta_2 J_s \omega_t}{\Delta J_s \omega_2} \quad \dots\dots\dots (11)$$

また, 振動子の弾性支持により $\omega_2 > \omega_1$ のため式(7), (8)はともに $\Phi_v = \Phi_{v''} \doteq \pi/2$ となる. よって, 歳差 Ω の角速度変動 $\Delta\Omega$ に相当するジャイロ出力 θ_t は式(12)で表され, 変動角周波数 ω_t で変調されたねじれ振動となる.

Fig. 3 Characteristics of frequency response ($\omega_1/\omega_2 = 0.06$, $\omega_s/\omega_z = 1.035$, $\zeta_1 = 0.05$, $J_2/J_1 = 7$)

Fig. 4 Principle of magnetic damper

力の高ゲイン化に寄与する。その反面、ジャイロ出力である面外振動は急激な入力角速度 Ω の変化に対しての速応性の低下や共振点のわずかな変動によってゲインの大幅な低下を招く。また、外乱の影響を受け、面内・面外の固有周波数差によるビートが発生し、安定したジャイロ特性が得られない。そこで、面内振動を抑制することなく、周波数特性を考慮した適度な減衰 (ζ_1 , ζ_2) を面外振動に与え、ジャイロの動特性の改善を図る必要がある。その一手段として非接触で面外振動のみを抑制する減衰機構として磁気ダンパを適用した。

3.1 磁気ダンパの原理 磁気ダンパは図4の二つの磁極 (N, S) に挟まれた導体の磁束を横切る速度 v に応じて抵抗力 ($F = cv$) が生じ、減衰力としている。この制振デバイスとしての有用性は背戸⁽⁴⁾によって初めて示され、その後、希土類磁石の出現によって多くの研究が見られるようになった。その減衰係数 c [kg/s] は式(14)で表される。 C_0 は無次元量であり a/α , b/β によりほぼ一定値⁽⁵⁾を示す。

よって、容易に減衰力を設定することができる。また、磁気ダンパは原理的に、磁束を横切る方向の運動に対し磁気減衰力を発生するが、磁束と同方向の運動には発生しない。これは本研究で要求されている面内振動の高い Q 値を損なうことなく、面外振動に対し

Fig. 5 Damped free vibration of vibratory strips on X-Z plane ($a/\alpha = 2$, $b/\beta = 3$, gap = 0.5 mm)

てのみ減衰を付与する目的になっている。

$$c = \frac{B^2 a \beta t C_0}{\rho} \quad (14)$$

ただし、 $C_0 = f(\alpha, \beta, a, b, \dots)$

B : 平均磁束密度 [T]

α, β, γ : 磁石のサイズ [m]

a, b, t : 導体のサイズ [m]

ρ : 導体の電気抵抗率 [Ωm]

3.2 減衰付与の実験(1) 双共振音さの面外振動を抑制する方法として、音さ両頭部に導体(純銅: サイズ $a \times b \times t = 18 \times 6 \sim 16 \times 0.5, 1.0, 2.0$ mm)を設置し、音さベース部で固定支持されたヨークの永久磁石 ($9 \times 4 \times 3$ mm, 残留磁束密度 0.45 T, (株)住友特殊金属製) 2個で導体を挟み磁気ダンパとした。導体・磁石間げきは 0.5 mm である。図5に導体サイズ比 $a/\alpha = 2$, $b/\beta = 3$, $t = 0.5, 1, 2$ mm の導体を設置した場合の面外減衰自由振動 (ω_z , ζ_2) の例を示す。導体の厚さ t にほぼ相応して減衰率 ζ_2 が増加している。減衰実験から得られた減衰係数 c の結果を図6に示す。 $t = 0.5$ mm の場合、他に比べて減衰効果が小さいのは導体・磁石間の間げきが厚みに比して大きいため、漏洩磁束の影響と考える。

よって、導体・磁石間げき、導体・磁石寸法比によって任意に減衰力が得られることを示している。

図6の結果から得られた磁気ダンパを、試作した音さ振動子の頭部とベース部に設置した双共振音さ型振動ジャイロの例を図7に示す。面内加振、面外矯正加

 Fig. 6 Characteristics of magnetic damper ($a/a=2$)

Fig. 7 Twin resonance tuning-fork type gyro with magnetic damper

振に圧電セラミック((株)富士セラミックス製), 検出にひずみゲージ(p型Si半導体:(株)共和電業製)を用いた。

3.3 減衰付与の実験(2) 図8は実験装置全体図を示す。図9は磁気ダンパ1, 2を取り付けた図7の双共振音さ型振動ジャイロの実験計測系の構成を示す。音さ振動子は面内自励振動とした。図9の $z.s.$ は主に振動子の形状的不平衡によって面内振動するだけで発生するノイズ(回転入力 $\Omega=0$ 時の出力)で, 極小化するために平衡重りと移相器1・圧電素子(面外駆動用)によって振動子を矯正($-z.s.$)している。さらに矯正しきれなかったノイズ($\Delta z.s.$)を移相器2と差動増幅器によって除去した。レートテーブルで角速度入力を与え, ジャイロ出力($E \propto \Omega$)を得ている。

また, 角加速度項の影響を避けるため, 式(11)の条件を0.15%以下とした。

図10は図8で双共振音さ型振動ジャイロ(VRG)と

Fig. 8 Experimental equipments

Fig. 9 Configuration of experimental measurement system

Fig. 10 Response to step input ($\Delta\Omega=0.7$ rad/s)

ファイバオプティックジャイロ (FOG: (株)日本航空電子工業製, JG-108 FD, 周波数特性, DC~20 Hz) をともにレイトテーブルに載せ, テーブル駆動後 0.7 rad/s の一定角速度に到達するまでの過渡状態を比較実験した例である. 双共振音さの面内・面外のそれぞれの Q 値は約 1500, 500~1000, ジャイロの高ゲイン化のため, 双共振音さの共振周波数は近接 ($\Delta\omega/\omega_2 \approx 0.01, 0.02$) している. そのため, 少ない減衰力ではテーブル駆動時の衝撃により角周波数差 $\Delta\omega$ による面外振動のビート [約 9.5, 12 Hz, 図 10(a), (b)] が発生し, 消失するまで約 3 秒以上要した. しかし, 磁気ダンパにより ζ_2 をそれぞれ約 3.5 倍, 7.2 倍に設定するとビートが抑制され, レイトテーブルの立ち上がりの速度変化に対して FOG の出力と同等の応答を示し, 動特性が十分に改善されていることがわかる. また, ベース部磁気ダンパによる効果は認められるが減衰力の不足により, 顕著ではなかった.

図 11 はレイトテーブルを $\Omega = \Delta\Omega \cos \omega_t t$ の周期駆動とした場合の応答例である. 図 11(a) の VRG1 では図 10 と同様にビートによって変動角周波数 ω_t が変調され, 角速度振幅 $\Delta\Omega$ によるジャイロ出力が判別できない. 減衰率 0.5×10^{-3} の VRG2 ではさらに激しい変動を示した. しかし, 磁気ダンパの効果によって図 11(b), (c) のように抑制され, $\Delta\Omega$ に比例した安定したジャイロ出力を示した. また, 式(11)の角加

Fig. 11 Example of response to periodic input ($\zeta_1=5.2 \times 10^{-2}$)

速度項による出力変動は認められなかった. 角周波数比 ω_t/ω_2 に対する双共振音さ型振動ジャイロの実験結果を図 3 の周波数特性 $|\theta_t/\theta_{t0}|$ の実験点群で示す. 本実験では帯域が DC~1.7 Hz まで線形性が確認できた. よって, 双共振音さの検出系の動特性と安定化の改善に磁気ダンパが有効な方法であることがわかった.

4. 結 論

双共振音さ型振動ジャイロの安定化と動特性の改善を目的として, 磁気ダンパを振動子および支持部の減衰手段として適用を試みた結果, 以下の結論を得た.

- (1) 双共振音さ振動片の面外振動と双共振音さ弾性支持部のねじれ振動の抑制によってジャイロ検出感度の低下はあるが, 磁気ダンパ効果により容易に周波数帯域幅を改善できる.
- (2) 双共振音さの欠点である, 面内・面外固有周波数の近接によるビートの発生を十分に抑制できる.
- (3) 磁気ダンパは導体・磁石のサイズ比により任意に減衰力を付与できる.

以上得られた知見から, 双共振音さの面外・面内振動の共振による高ゲインを維持しながら, 双共振音さ型振動ジャイロの安定化と動特性の改善をはかるには, 非接触で面外振動のみを自由に抑制できる磁気減衰は有効な手段と考えられる.

文 献

- (1) MORROW, C. T., Steady State Response of Vibratory Gyroscope, *J. of Acoustical Society of America*, **27**-1 (1955), 56-61.
- (2) 石塚武・新堀佑三, 振動ジャイロの特性, 精密機械, **39**-1 (1973), 99-105.
- (3) 石塚武・新堀佑三・畑河内秀樹, 精機学会春季大会講演論文集, (1984), 129-130.
- (4) 背戸一登・山之内三男, 磁気ダンピングを有する定数可変形動吸振器の研究, 機論, **44**-378 (1978), 542-553.
- (5) 長屋幸助・小島宏行, 長方形磁束と長方形導体を組み合わせた磁気ダンパの形状特性, 機論, **47**-424 (1981), 1620-1624.
- (6) 新堀佑三・畑河内秀樹・背戸一登, 運動と振動の制御, 機講論 No. 97-31 (1997), 125-128.
- (7) 新堀佑三・畑河内秀樹・背戸一登, 双共振音さ型振動ジャイロの振動特性, 機論, **65**-629, C(1999), 30-36.