

圧電形振動ジャイロ스코ープの漏れ出力の等価回路考察

石巻専修大学・理工学部・電子材料工学科

菅原 澄夫

1. まえがき

圧電形振動ジャイロスコープ（以下、振動ジャイロと略）は、⁽¹⁾最近車両ナビゲーションやビデオカメラの画振れ防止などに使用される角速度センサとして注目されている。⁽²⁾、⁽³⁾このような振動ジャイロの特性は、力係数の余剰成分、入出力間の静電結合容量、機械的結合などの諸結合による漏れ出力の影響によって本来必要とされる特性とは大幅に異なる場合が多い。従って、これら各種の結合因子による漏れ出力の影響を低減・除去して所望の特性を実現するための設計指針を明らかにする必要がある。しかしながら、これまで漏れ出力の影響を含んだ特性から如何にして所望の特性を実現するかについては考察されてこなかった。

著者らはこれまで、振動ジャイロの等価回路による設計の体系化を図る目的から、コリオリ力によるジャイレータ結合以外に結合のない理想的な振動ジャイロの基本等価回路⁽⁴⁾並びに各種の結合がある場合の総合等価回路を提案・発表してきた。⁽⁵⁾、⁽⁶⁾

本文は、その総合等価回路に基づいて圧電形振動ジャイロにおける各種の結合因子が独自に存在する場合の影響を定量的に計算・算出し、漏れ出力の影響を低減・除去する設計指針の概要を明らかにしたものである。振動ジャイロの要求仕様値は使用目的によって異なり、例えば車両ナビゲーション用では最大印加角速度と分解能はそれぞれ $\pm 40^\circ/\text{s}$ と $0.001^\circ/\text{s}$ 、またビデオカメラの画振れ防止用では $\pm 15^\circ/\text{s}$ と $0.01^\circ/\text{s}$ 程度が必要とされる。⁽²⁾、⁽³⁾本文では、これらの要求仕様値を等価回路考察の目標値として設定し、これらを実現するための各種結合因子に起因する漏れ出力について考察している。

2. 振動ジャイロの等価回路

2.1 漏れ出力の影響を考慮した

総合等価回路

図1は考察の対象とする横振動音片を用いた圧電形振動ジャイロの一構造例である。⁽¹⁾図2はその利用する基本双共振モードで、 $\dot{\eta}_i$ は*i*軸方向(*i*=*x*, *y*)の変位速度である。動作原理を略述すると、図1、2において*x*軸方向の f_x 振動モードを予め駆動・励振させた状態で、*z*軸の回りに外部から回転角速度 Ω_0 が印加されると、*y*軸方向にコリオリ力が発生して直交 f_y 振動モードが起振され圧電的に出力電圧として検出される。その大きさは Ω_0 に比例するので、角速度センサとして使用される。

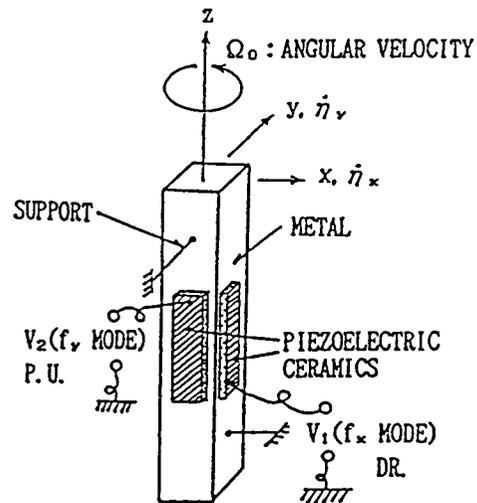


図1 圧電形横振動音片ジャイロスコープの構造

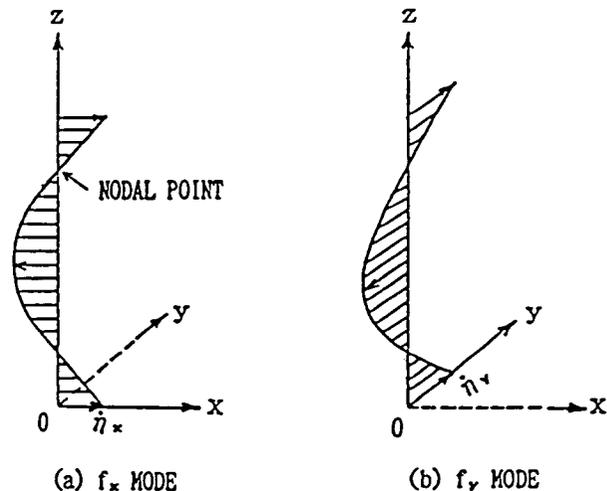


図2 音片の振動モード

図3(a)は漏れ出力の発生原因となる諸結合をも考慮した振動ジャイロの総合等価回路で、⁽⁵⁾ $z_i (=r_i + j\omega_a m_i + s_i/j\omega_a)$, $i=x, y$ は双共振音片の*i*軸方向の振動モードに対する等価機械インピーダンスで、 r_i, m_i, s_i はそれぞれ等価機械抵抗、等価質量、等価スチフネスで、 ω_a は駆動角周波数である。また、 A_{j1} ($j=1, 2$)は f_i モードに対する力係数、 C_{d1} は制動容量である。さらに、 ΔA_{j1} は圧電セラミックスの正規接着位置からのずれなどに起因する余剰力係数成分、 C_{12} は入出力間の静電結合容量、 s_m は双共振モード間の機械的結合を表すもので、これらの諸結合因子は振動ジャイロにおける漏れ出力の原因となる。図3(b)は同図(a)を計算に便利なように整理表示したもので、次式が成立する。

$$\begin{aligned}
Z_x &= z_x/A_{1x}^2 \\
&= (r_x + j\omega_d m_x + s_x/j\omega_d) / A_{1x}^2 \\
&= R_x + j\omega_d L_x + (j\omega_d C_x)^{-1}, \\
Z_y &= z_y/A_{2y}^2 \\
&= (r_y + j\omega_d m_y + s_y/j\omega_d) / A_{2y}^2 \\
&= R_y + j\omega_d L_y + (j\omega_d C_y)^{-1}, \\
\bar{G}_1 &= \bar{G}_y / (A_{1x} A_{2y}) \\
&= -2m_y \Omega_0 / (A_{1x} A_{2y}), \\
\bar{G}_2 &= \bar{G}_x / (A_{1x} A_{2y}) \\
&= -2m_x \Omega_0 / (A_{1x} A_{2y}), \\
n_x &= \Delta A_{2x} / A_{1x}, \quad n_y = \Delta A_{1y} / A_{2y}, \\
Y_c &= Z_c^{-1} = j\omega_d C_{12}, \\
Y_{d1} &= Z_{d1}^{-1} = j\omega_d C_{d1}, \\
Z_M &= z_M / A_{1x}^2 = (s_M / j\omega_d) / A_{1x}^2, \\
n &= n_A n_M, \quad n_A = A_{1x} / A_{2y}, \quad n_M = \pm 1.
\end{aligned}
\tag{1}$$

なお、横振動音片ジャイロでは $m_x = m_y = m_0$ 、即ち、 $\bar{G}_x = \bar{G}_y = \bar{G}_0 = -2m_0 \Omega_0$ の理想ジャイレータとなる。⁽⁴⁾

$$\begin{aligned}
Y_{12} &= Y_0 \{ n_x n_y \bar{G}_2 - \bar{G}_1 + n_y Z_x + n_x Z_y \\
&\quad + (n n_x + 1)(n + n_y) Z_M \} + Y_c, \\
Y_{21} &= Y_0 \{ \bar{G}_2 - n_x n_y \bar{G}_1 + n_y Z_x + n_x Z_y \\
&\quad + (n n_x + 1)(n + n_y) Z_M \} + Y_c, \\
Y_{22} &= Y_{d2} + Y_0 \{ n_x (\bar{G}_2 - \bar{G}_1) + Z_x \\
&\quad + n_x^2 Z_y + (n n_x + 1)^2 Z_M \} + Y_c, \\
Y_0 &= \{ \bar{G}_1 \bar{G}_2 + Z_x Z_y + (n^2 Z_x + Z_y \\
&\quad + n \bar{G}_1 - n \bar{G}_2) Z_M \}^{-1}
\end{aligned}
\tag{2}$$

のように導出される。

従って、図3の出力端子に負荷抵抗 R_2 が接続された場合の振動ジャイロの入出力電圧比 V_2/V_1 は

$$V_2/V_1 = Y_{21} / (Y_{22} + 1/R_2) \tag{3}$$

と与えられ、出力の大きさ $|V_2/V_1|$ とその位相角 θ_2 が求められる。即ち、式(3)によって振動ジャイロの特性シミュレーションが可能となる。

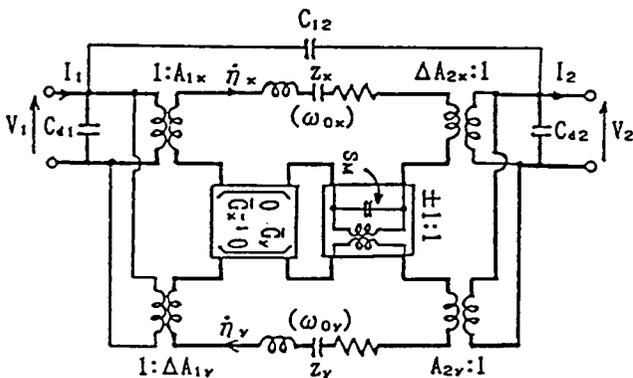
2.3 等価回路定数

表1は試作した双共振音片の等価回路定数の実測値で、 f_{0i} ($i=x, y$) は音片の双共振周波数であり、力係数の余剰成分 ΔA_{1i} の値は接着圧電セラミックスの電極部を2分割にしてその両力係数の差から算出したものである。なお、音片試料の恒弾性金属(住友金属, EL-3材)と接着圧電セラミックス(トーキン, NEPEC-1材)の寸法はそれぞれ $70 \times 4.8 \times 4.8 \text{ mm}^3$, $35 \times 3.0 \times 0.25 \text{ mm}^3$ であり、支持は図1のような直交形構成とした。

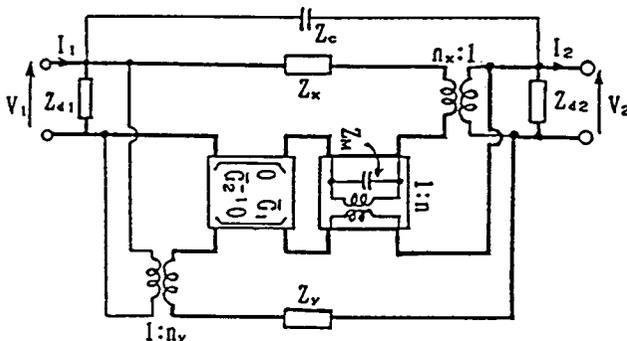
表1 試料音片の実測等価回路定数

f_x MODE		f_y MODE	
f_{0x} (Hz)	4864.1	f_{0y} (Hz)	4746.6
L_x (H)	105.58	L_y (H)	97.68
C_x (pF)	10.14	C_y (pF)	11.51
R_x (Ω)	1593	R_y (Ω)	2272
C_{d1} (pF)	2944	C_{d2} (pF)	2800
Q_x	2026	Q_y	1285
γ_x	290	γ_y	243
A_{1x} (g/H) ^{1/2}	1.76×10^{-1}	A_{2y} (g/H) ^{1/2}	1.83×10^{-1}
ΔA_{2x} (g/H) ^{1/2}	-4.05×10^{-3}	ΔA_{1y} (g/H) ^{1/2}	5.75×10^{-3}
n_x	-2.30×10^{-2}	n_y	3.14×10^{-2}

Q_i : QUALITY FACTOR, $\gamma_i (=C_{d1}/C_i)$: CAPACITANCE RATIO ($i=x, y, j=1, 2$)



(a) Electromechanical circuit



(b) Electrical circuit

図3 諸結合のある振動ジャイロの総等価回路

2.2 入出力電圧比の算出式

図3(b)の等価回路の[Y]行列は

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned}
Y_{11} &= Y_{d1} + Y_0 \{ n_y (\bar{G}_2 - \bar{G}_1) \\
&\quad + n_y^2 Z_x + Z_y + (n + n_y)^2 Z_M \} + Y_c.
\end{aligned}$$

3. 振動ジャイロの出力とその検出

振動ジャイロの出力電圧 V_2 は、一般に図4に示すようにジャイレータ結合だけによって発生する出力成分 V_0 と零回転 ($\Omega_0 = 0$) 時の漏れ出力 V_N とのベクトル和となる。

$|V_{\Omega}|$ は印加角速度 Ω_0 の大きさとその印加方向(±)によって変化するから、 $|V_2|$ とその位相角 θ_2 も変化する。従って、この出力電圧 $|V_2|$ あるいは位相 θ_2 の Ω_0 に対する変化を検出することによって、印加角速度 Ω_0 の値を知ることができる。

しかしながら、位相変化量 $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_N$ の測定による Ω_0 の検出法は、⁽⁷⁾ (1)漏れ出力の位相 θ_N が一般に不安定なこと、(2) Ω_0 対 $\Delta\theta$ 特性が対称となるための条件 $\theta_N = \pm 90^\circ$ が必要なこと、さらに(3) Ω_0 対 $\Delta\theta$ 特性は直線特性とならないことなどのため、 $\Delta\theta$ 測定による Ω_0 の検出方法は好ましくないように思われるので、以下振幅変化を利用する方法についてだけ考察する。

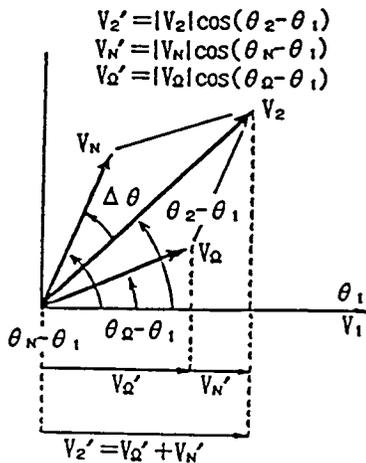


図4 出力電圧のベクトル図

図5(a)は振動ジャイロの出力電圧 V_2 の検出ブロック図で、角速度 Ω_0 の印加方向も判別できるように駆動電圧 V_1 を参照信号として同期検波して測定する。即ち、出力電圧 V_2 の同期検波出力 V_2' は、図4に示すように

$$\begin{aligned} V_2' &= |V_2| \cos(\theta_2 - \theta_1) \\ &= |V_{\Omega}| \cos(\theta_{\Omega} - \theta_1) \\ &\quad + |V_N| \cos(\theta_N - \theta_1) \\ &= V_{\Omega}' + V_N' \end{aligned} \quad (4)$$

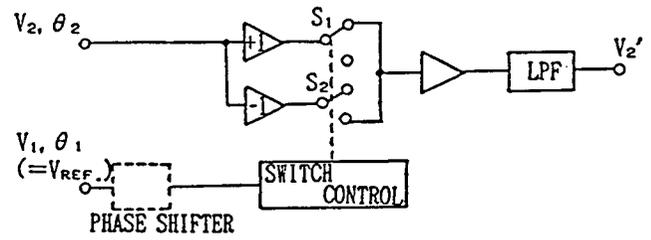
となる。ここで、 V_N' は Ω_0 に対して不変とみなされるから、所望の出力成分は

$$V_{\Omega}' = V_2' - V_N' \quad (5)$$

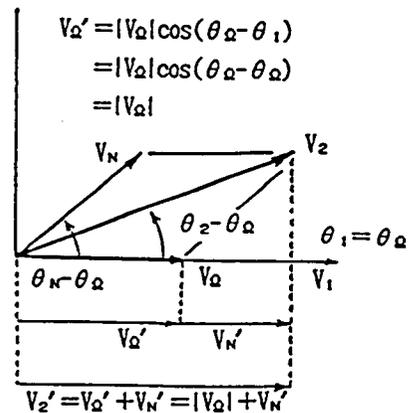
として求められ、この V_{Ω}' から角速度 Ω_0 を知ることができる。

ここで、式(5)の $V_{\Omega}' = |V_{\Omega}| \cos(\theta_{\Omega} - \theta_1)$ を最大の状態で検出するには、図5(a)における参照信号の位相 θ_1 を移相器(PS)によって同図(b)のように $\theta_{\Omega} - \theta_1 = 0$ となるようにシフトすればよい。以下の考察

では、全て $\theta_{\Omega} = \theta_1$ の条件が満たされている場合、即ち $|V_{\Omega}'| = |V_{\Omega}|$ となる場合を対象とする。



(a)



(b)

図5 出力電圧の検出ブロック図(同期検波)

図6(a)(b)はこれらの考察結果に基づき振動ジャイロの Ω_0 対 V_2' 特性及び Ω_0 対 V_{Ω}' 特性を定性的に示したものである。図示のように Ω_0 対 V_2' 特性が原点を通るようにするには、式(4)を参照して(1) $V_N' = |V_N| \cos(\theta_N - \theta_1) = |V_N| \cos(\theta_N - \theta_{\Omega}) = 0$ 即ち $|V_N| = 0$ あるいは $\theta_N - \theta_{\Omega} = \pm 90^\circ$ とする方法が考えられる。しかし、音片単体を完全に $|V_N| = 0$ となるように製作することは後述するように不可能であり、また $\theta_N - \theta_{\Omega} = \pm 90^\circ$ とする方法は実現が難しく実際には $\theta_N - \theta_1 = \pm 90^\circ$ として実施されるので⁽⁸⁾ $\theta_1 \neq \theta_{\Omega}$ となり V_{Ω}' が最大の状態で検出できなくなるという欠点が生じる。これらに変わる方法として、(2)同期検波回路の前段で差動検出⁽⁹⁾などにより V_N の値を見かけ上零となるようにする方法が考えられ、むしろこのほうが実利的である。

図7は漏れ出力のない理想的な振動ジャイロ(即ち図3で $n_x = 0, n_y = 0, C_{12} = 0, s_M = 0$ の場合)の駆動周波数 $f_d (= f_{ox})$ と $|V_{\Omega}|/|V_1|$ 及び θ_{Ω} の関係を表1の実測定数値を用いて算出した結果である。横軸における $f_d = f_{ox}$ の意味は駆動周波数 f_d が駆動

側の共振周波数 f_{ox} と一致して変化することを意味しており、いわゆる自励振状態にあたる。なお、図7では図3の出力端子開放 ($R_2 = \infty$) の場合だけを示したが、 $R_2 \neq \infty$ の場合は図8(a)(b)に示すように $|V_{\Omega}|/|V_1|$ の値は R_2 が小さくなる程小さくなり、 θ_{Ω} の値も図示のように変化するので注意が必要である。

図7より、駆動側と検出側の共振周波数 f_{ox} ($=f_d$) と f_{oy} の値の選び方によって、 $|V_{\Omega}|/|V_1|$ と θ_{Ω} の値が異なってくる。例えば、同図の設定位置(C)の場合即ち $f_d = f_{ox} = f_{oy}'$ ($=1.002f_{oy}$) のとき $|V_{\Omega}|/|V_1|$ は最大となるが θ_{Ω} の変化は最も急峻となる。ここに、 f_{oy}' は出力端子を開放とした場合の C_{42} による影響をも含めた検出側の共振周波数で、 r_v を容量比として(表1参照) $f_{oy}' = \{1 + (2r_v)^{-1}\} f_{oy}$ と与えられる。また、設定位置(B)の場合即ち $f_{ox}/f_{oy} = 0.998$ 及び(D)即ち $f_{ox}/f_{oy} = 1.006$ の場合は $|V_{\Omega}|/|V_1|$ の値は $1/10$ 程度に小さくなるが θ_{Ω} の変化は非常に小さく $\partial \theta_{\Omega} / \partial f_d$ の値にして約 $1/100$ に減少する。一方、設定位置(A)即ち $f_{ox}/f_{oy} = 0.979$ 及び(E)即ち $f_{ox}/f_{oy} = 1.025$ の場合には $|V_{\Omega}|/|V_1|$ 及び θ_{Ω} の変化は極めて小さいが $|V_{\Omega}|/|V_1|$ の値は 2×10^{-2} 程度に低下するので、検出用増幅器の利得を大きくして使用する必要がある。表2にこれら各場合における $|V_{\Omega}|/|V_1|$ と θ_{Ω} 及び $|\partial(|V_{\Omega}|/|V_1|) / \partial f_d|$ と $|\partial \theta_{\Omega} / \partial f_d|$ の値を整理表示した。また、図9(a)は上記の設定位置(A)~(E)の各場合における Ω_0 対 $V_{\Omega}'/|V_1|$ 特性の計算値である。 $f_{ox} \neq f_{oy}'$ の場合(即ち設定位置(A), (B), (D), (E))は $f_{ox} = f_{oy}'$ の場合(即ち設定位置(C))と比較して、感度 $|V_{\Omega}'|/\Omega_0$ は減少するが、位相の変化が小さく(

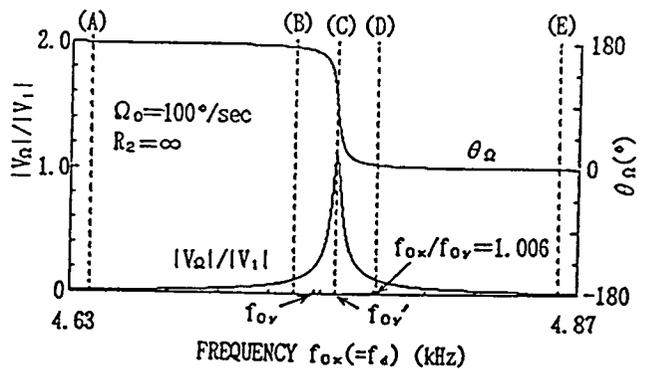
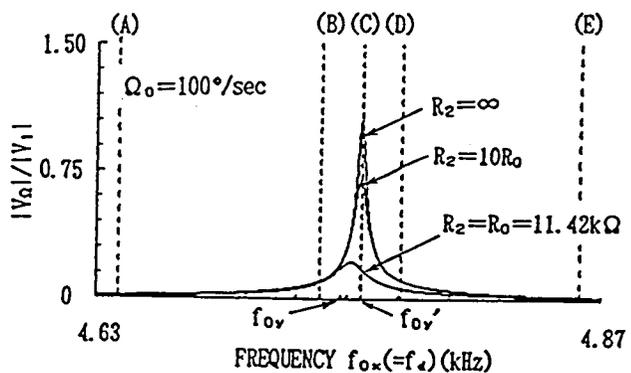
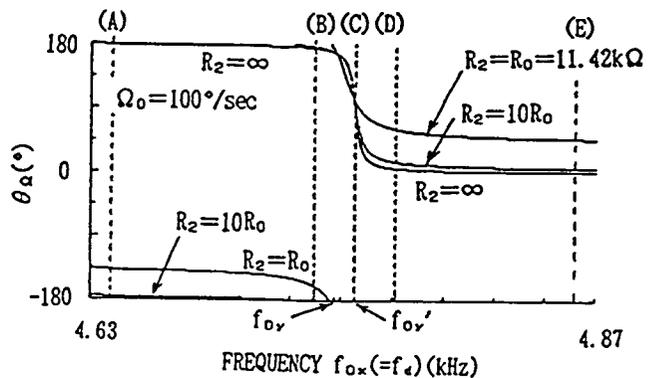


図7 $f_d(=f_{ox})$ に対する $|V_{\Omega}|/|V_1|$ および θ_{Ω} の計算値



(a) $|V_{\Omega}|/|V_1| - f_d(=f_{ox})$



(b) $\theta_{\Omega} - f_d(=f_{ox})$

図8 $f_d(=f_{ox})$ に対する $|V_{\Omega}|/|V_1|$ および θ_{Ω} の計算値

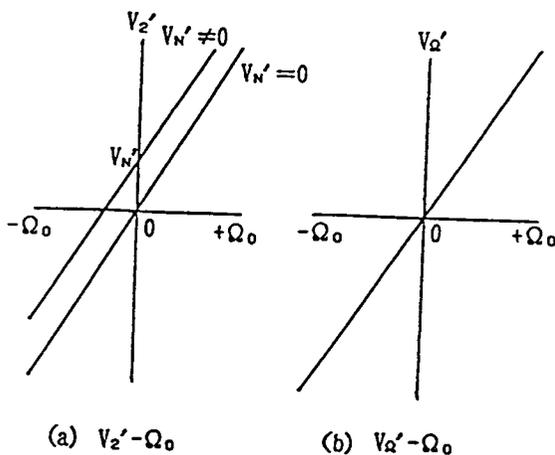


図6 振動ジャイロの角速度センサ特性(説明図)

表2参照), 周波数特性⁽¹⁾の広い振動ジャイロが構成できる。振動ジャイロにおける周波数特性とは、印加角速度を $\Omega(t) = \Omega_0 \cos(2\pi f_{\Omega} t)$ のように変化させた場合の f_{Ω} と同期検波出力 $V_{\Omega}'/|V_1|$ の関係において、 f_{Ω} の増加に対して $V_{\Omega}'/|V_1|$ の値が減少しない周波数範囲を意味する。このような f_{Ω} の上限値として、車両ナビゲーション用、ビデオカメラの画振れ防止用ではそれぞれ 10Hz, 15Hz程度が必要とされている。^{(2), (3)}

表2 図7の(A)~(E)の場合の $|V_{\Omega}|/|V_{11}|$, $|V_{\Omega}|/|V_{\Omega}|_{max}$, $|\partial(|V_{\Omega}|/|V_{11}|)/\partial f_{d1}|$, θ_{Ω} , $|\partial\theta_{\Omega}/\partial f_{d1}|$ の計算値

CASE	f_{0x}/f_{0y}	$ V_{\Omega} / V_{11} $	$ V_{\Omega} / V_{\Omega} _{max}$	$ \partial(V_{\Omega} / V_{11})/\partial f_{d1} $	$\theta_{\Omega}(^{\circ})$	$ \partial\theta_{\Omega}/\partial f_{d1} $
(A)	0.979	1.94×10^{-2}	0.018	1.81×10^{-4}	179.00	9.00×10^{-3}
(B)	0.998	1.19×10^{-1}	0.107	6.65×10^{-3}	173.84	3.45×10^{-1}
(C)	1.002	1.11	1.000	0.0	90.00	2.99×10
(D)	1.006	1.19×10^{-1}	0.108	6.63×10^{-3}	6.18	3.45×10^{-1}
(E)	1.025	1.99×10^{-2}	0.018	1.84×10^{-4}	1.03	9.50×10^{-3}

従って、駆動周波数 $f_d (=f_{0x})$ を図7の(C)あるいは(B), (D)近傍に設定することがその設計指針となるが、上記の f_{Ω} の上限値の小さい要求に対しては感度の最も大きい設定位置(C)即ち $f_{0x}=f_{0y}'$ に設定する。いずれにしても要求される感度と周波数特性に対する要求仕様条件とを考慮して $f_{0x}=f_{0y}'$ あるいは $f_{0x}=f_{0y}' \pm \Delta f$ に設定される。参考までに、図7の(E)の場合即ち $f_{0x}/f_{0y}=1.025$ のときの Ω_0 対 $V_{\Omega}'/|V_{11}|$ 特性の実験値と計算値の一比較例を図9(b)に示した。即ち、実験値と等価回路による計算結果とは図示のように良く一致対応することが確かめられた。なお、この離調の設定条件については感度と安定度の両者が設計仕様条件となり、これについては現在考察を進めている。

4. 漏れ出力の等価回路解析

振動ジャイロに対する要求仕様値を実現するには、最大印加角速度と分解能(印加角速度を変化させたときジャイロ出力が入力変化の50%を検出する最小角速度)及び前章3で述べた $|V_{N'}|/|V_{11}|$ と $|V_{\Omega}|/|V_{11}|$ の数値計算結果から、コリオリ力に起因する所望の出力 $|V_{\Omega}|$ に対して変動する漏れ出力 $|V_{N'}|$ を最終的に以下のように低減させる必要がある。即ち、車両ナビゲーションでは $|V_{N'}|/|V_{\Omega}| = (|V_{N'}|/|V_{11}|) / (|V_{\Omega}|/|V_{11}|) < 1.25 \times 10^{-5} (=0.001 \times 0.5/40)$ 、ビデオカメラの画振れ防止用では $|V_{N'}|/|V_{\Omega}| = (|V_{N'}|/|V_{11}|) / (|V_{\Omega}|/|V_{11}|) < 3.34 \times 10^{-4} (=0.01 \times 0.5/15)$ とする必要がある。

漏れ出力の原因となる各種結合因子は一般に共存しているが、以下では各種結合因子による漏れ出力の影響を個別に検討し、上記の要求仕様値を実現するための諸因子の値を考察すると共に、漏れ出力の低減・

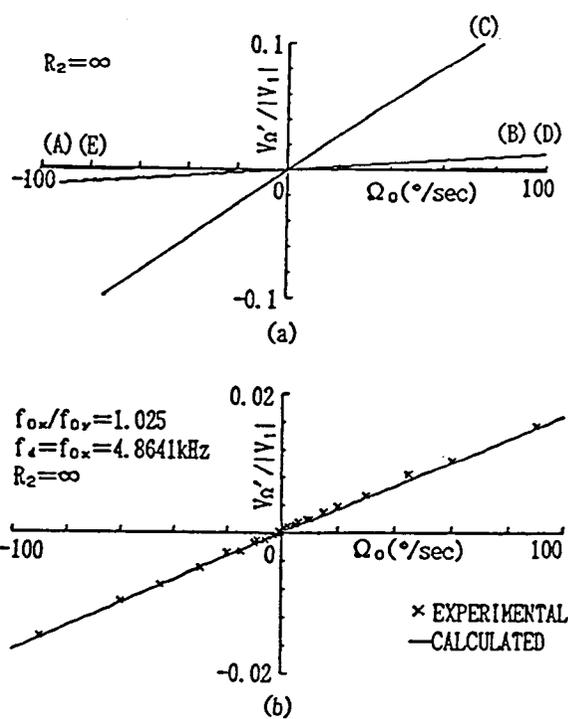


図9 $V_{\Omega}'/|V_{11}|-\Omega_0$ 特性

除去のための設計指針の概要について述べる。

4.1 力係数の余剰成分 ΔA_{J1} による影響

圧電セラミックスは横振動音片の中性線に対称に接着される必要があるが、この正規接着位置からずれて接着されると、力係数 A_{1x} (或いは A_{2y})のほかに好ましくない余剰な ΔA_{2x} (或いは ΔA_{1y})が生じ、図3の等価回路からも明らかなように f_x 振動モードのほかに僅かながら他の f_y 振動モードも駆動されるようになり、漏れ出力が発生する。

図10は図3の等価回路で漏れ出力が ΔA_{J1} によってのみ発生するとした場合の $V_2'/$

$|V_{11}|$ と印加角速度 Ω_0 との関係を数値計算したもので、設定位置が図7の(D)即ち $f_{ox}/f_{oy} = 1.006$ の場合である。即ち、 $n_x = \Delta A_{2x}/A_{1x} \neq 0$, $n_y = \Delta A_{1y}/A_{2y} \neq 0$ の場合は漏れ出力 $V_N'/|V_{11}|$ が発生し特性は原点を通らなくなるので、この漏れ出力を除去して所望の特性を実現させる必要がある。また、 n_x, n_y が異符号の場合は $V_N'/|V_{11}|$ の値は小さくなるが、 n_x, n_y が同符号の場合はこの値が大きくなるので好ましくないことがわかる。

漏れ出力が ΔA_{11} によってのみ発生するとした場合、前述の $|V_N'|/|V_{11}| < 1.25 \times 10^{-5}$ (或いは 3.34×10^{-4}) という漏れ出力の低減条件を満足させるには、 $|n_x|, |n_y| < 1.86 \times 10^{-6}$ (或いは 4.49×10^{-6}) にする必要がある。しかし、この値を満足する試料音片を製作することは實際上困難であるから、 ΔA_{11} に起因する漏れ出力は必ず存在するものとして、後述のような低減化対策を実施することが必要である。

なお、図11は図7の設定位置(E)即ち $f_{ox}/f_{oy} = 1.025$ に設定した場合における n_x, n_y が異符号のときの漏れ出力、即ち $|V_N|/|V_{11}|$, θ_N および $V_N'/|V_{11}|$ の周波数特性を参考までに示したもので、実験値は等価回路による計算結果と良く一致することを示している。

以上要するに、力係数の余剰成分 ΔA_{11} によって発生する漏れ出力を零にするには、(1) 圧電セラミックスの正規接着位置からの接着ずれが無く均一に接着されるようにできるだけ工作精度を上げて漏れ出力の小さい音片を製作することがまず必要で、残存する漏れ出力に対して次のような対策を施す。即ち、(2) 圧電セラミックスの電極を2分割してそれぞれにオペアンプ⁽¹⁾や電気的インピーダンス⁽⁵⁾を挿入し平衡補償を行って漏れ出力を零にする方法、或いは差動検出⁽⁹⁾による方法などが考えられる。このような方法によってもなお残存する漏れ出力に対しては、さらに(3)同期検波時に $\theta_N - \theta_1 = \pm 90^\circ$ とすれば $V_N' = |V_N| \cos(\theta_N - \theta_1) = 0$ となり、漏れ出力は見かけ上完全に打ち消され所望の特性が実現できる。ただし、この場合 $V_{\Omega}' = |V_{\Omega}| \cos(\theta_{\Omega} - \theta_1)$ は一般に $\theta_{\Omega} \neq \theta_1$ となるので最大値とならない。

4.2 入出力間の静電結合容量 C_{12} による影響

図12は漏れ出力が静電結合容量 C_{12} によってのみ発生するとした場合の設定位置が図7の(D)即ち $f_{ox}/f_{oy} = 1.006$ のときの Ω_0 対 $V_2'/|V_{11}|$ 特性である。 C_{12} の値が大きいほど漏れ出力 $V_N'/|V_{11}|$ は大きく一方向に平行移動した特性を示す。この場合、漏れ出

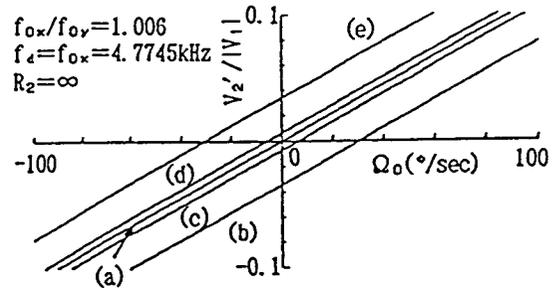


図10 $V_2'/|V_{11}| - \Omega_0$ 特性の計算値

- (a) $n_x = n_y = 0$, (b) $n_x = n_y = 2.7 \times 10^{-2}$,
- (c) $n_x = 2.7 \times 10^{-2}$, $n_y = -2.7 \times 10^{-2}$,
- (d) $n_x = -2.7 \times 10^{-2}$, $n_y = 2.7 \times 10^{-2}$,
- (e) $n_x = n_y = -2.7 \times 10^{-2}$

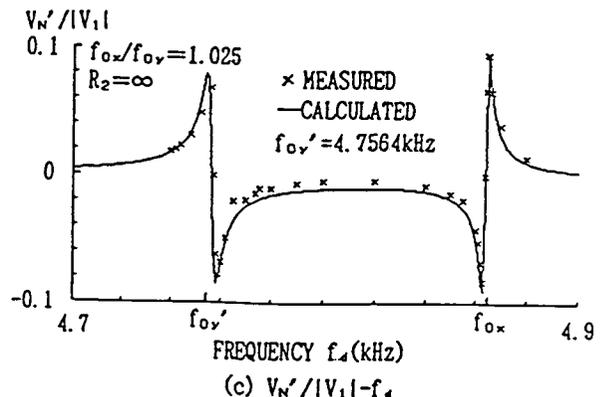
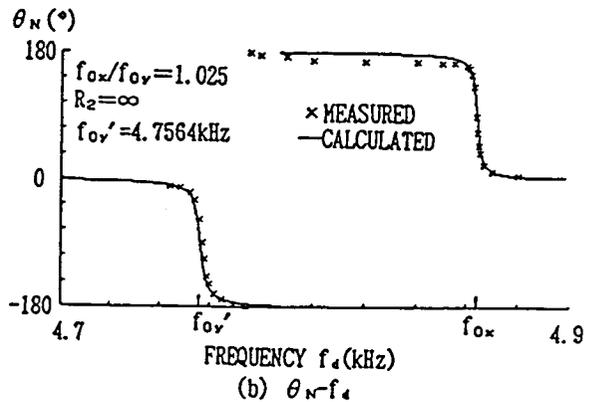
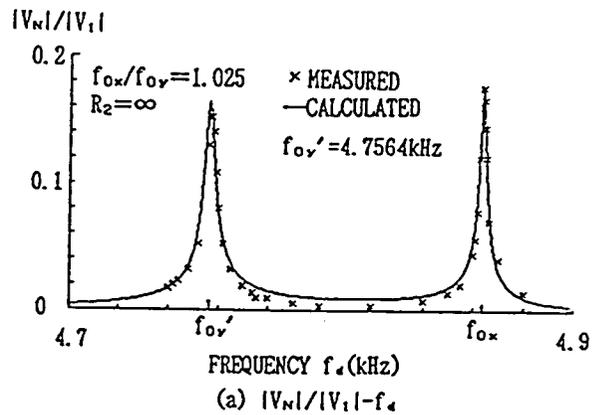


図11 図7の(E)の場合の ΔA_{11} に起因する漏れ出力の周波数特性

力の低減条件即ち $|V_N'|/|V_Q| < 1.25 \times 10^{-5}$ (或いは 3.34×10^{-4}) を満足する C_{12} の値は、 $C_{12} < 7.69 \times 10^{-2} \text{ pF}$ (或いは $3.17 \times 10^{-2} \text{ pF}$) と算出されるが、その実現は実際には難しく漏れ出力は僅かながら必ず存在する。なお、本試料音片では特性の実測値と計算値との比較から C_{12} の値は 7 pF 程度と推定された。

以上要するに C_{12} に対する漏れ出力対策は、まず電極配置を工夫してできるだけ C_{12} の値の小さな構成とした上で、残存する漏れ出力を前節 4.1 と同様にして見かけ上零にして使用することが望ましい。

4.3 機械的結合 s_M による影響

次に、漏れ出力が機械的結合 s_M だけによって発生するとした場合で、式(1)で $n_M = +1$ のときを考察した。図13は設定位置を図7の(D) 即ち $f_{ox}/f_{oy} = 1.006$ にした場合の Ω_0 対 $V_2'/|V_{11}|$ 特性の計算値で、 s_M が存在する場合は図示のように原点をはずれた直線特性となり、 s_M がある値以上に大きくなると $|V_Q'|/|V_{11}|$ の値が急に低下し感度 $|V_Q'|/\Omega_0$ が悪くなる。図14は $\Omega_0 = 100^\circ/\text{sec}$ 一定とした場合の s_M に対する $|V_Q|/|V_{11}|$ の変化の計算結果で、本試料寸法の場合 $s_M = 1 \times 10^6 \text{ dyne/cm}$ 以上になると $|V_Q|/|V_{11}|$ の値は著しく低減し不利となる。例えば、 $s_M = 2 \times 10^6 \text{ dyne/cm}$ の場合 $|V_Q|/|V_{11}|$ の値は 30% も低減する。

なお、この s_M の値を同一寸法の双共振音片における結合度 k_M (機械フィルタの比帯域幅に相当) に換算表示すると、図15のようになる。これは、前図3(a)の等価回路で $\Omega_0 = 0$, $\Delta A_{11} = 0$, $C_{12} = 0$ として出力端子を短絡 ($R_2 = 0$) として得られた図15の等価機械回路において、その駆動端子から見た入力インピーダンスの虚数部が零となる周波数 f_{ox} , f_{ox}'' から、 $k_M = |f_{ox}'' - f_{ox}|/f_{ox}$ (%) として算出したもので、 $s_M = 1 \times 10^6 \text{ dyne/cm}$ の値は $k_M = 0.017\%$ に相当することがわかる。

前述の漏れ出力の低減条件、即ち $|V_N'|/|V_Q| < 1.25 \times 10^{-5}$ (或いは 3.34×10^{-4}) を満足する機械的結合 s_M の値は、 $s_M < 1.23 \times 10^4 \text{ dyne/cm}$ (或いは $3.30 \times 10^4 \text{ dyne/cm}$) と計算される。この値は $k_M < 0.0021\%$ の場合に相当するが、この場合もこのような試料を製作することは困難で、 s_M に起因する漏れ出力は僅かながらも必ず存在すると考えてよい。従って、この漏れ出力に対する低減化対策は、まず s_M の値を可能な限り小さい構成とすること、即ち音片構造の対称性と材質の均一性を良くすると共にアニール処理によって内部ストレスも除去した上で、存在する漏れ出力に対しては前節 4.1

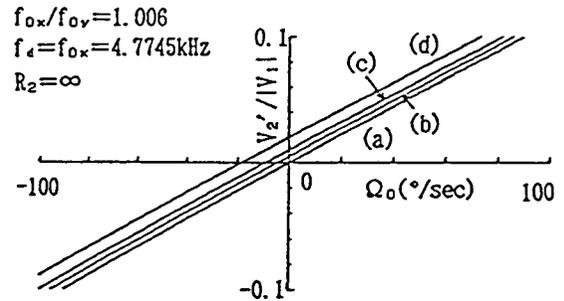


図12 $V_2'/|V_{11}| - \Omega_0$ 特性の計算値
(a) $C_{12} = 0$, (b) $C_{12} = 10 \text{ pF}$,
(c) $C_{12} = 20 \text{ pF}$, (d) $C_{12} = 40 \text{ pF}$

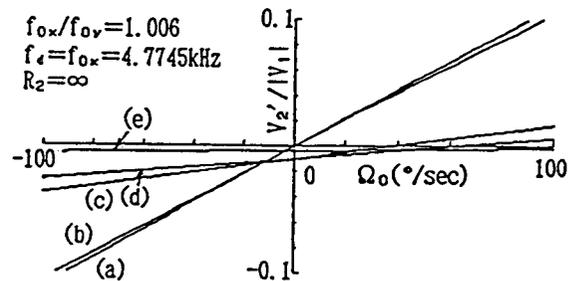


図13 $V_2'/|V_{11}| - \Omega_0$ 特性の計算値
(a) $s_M = 0$, (b) $s_M = 6 \times 10^5 \text{ dyne/cm}$,
(c) $s_M = 6 \times 10^6$, (d) $s_M = 1 \times 10^7$,
(e) $s_M = 1 \times 10^8$

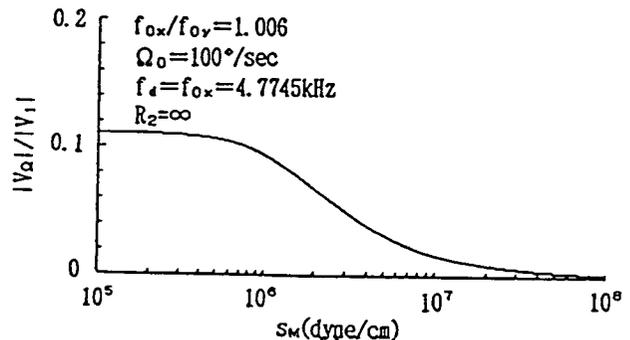


図14 $|V_Q|/|V_{11}| - s_M$ 特性の計算値

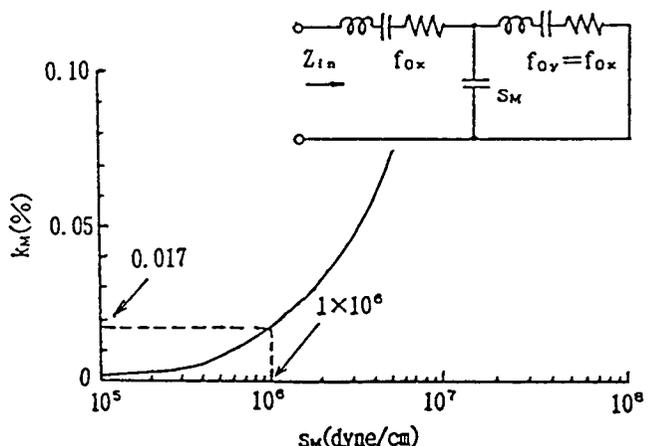


図15 s_M と k_M の関係

と同様の方法で見かけ上零にすることができる。

なお、このような機械的結合 s_M は支持構造によっても発生するので注意する必要がある。(11)

5. あとがき

振動ジャイロの漏れ出力を生じる各種結合因子について等価回路考察を行い、その影響を定量的に明らかにすると共に軽減対策方法についても述べ、漏れ出力を含む実際の出力電圧から所求の出力信号だけを検出する設計指針の概要を明らかにした。結論を以下に要約する。

(1) 圧電セラミックスの接着ずれ等に起因する力係数の余剰成分 ΔA_{11} による影響は、 Ω_0 対 $V_2'/|V_1|$ 特性を縦軸上で上下方向に平行移動させる。この影響を低減するには、(a) 圧電セラミックスを正規接着位置にできるだけ正しく接着した上で、(b) 残存する漏れ出力に対して電極を2分割してオペアンプや電氣的インピーダンスを挿入して平衡補償を行うか、或いは差動検出を利用して漏れ出力の値を見かけ上零あるいは小さな値とする必要がある。(c) このような方法によってもなお残存する漏れ出力に対しては、同期検波時に $\theta_N - \theta_1 = \pm 90^\circ$ とするか、或いは検波後に漏れ出力と外部印加の直流電圧とを差動検出させて見かけ上原点通過形の特性を得ることができる。

(2) 入出力間の静電結合容量 C_{12} による影響は、 Ω_0 対 $V_2'/|V_1|$ 特性を縦軸上において一方向へ平行移動させる。この影響を低減させるには、電極配置を工夫してできるだけ C_{12} の小さい構成とする。それでも、なお現れた漏れ出力に対しては前項(1)と同様にして見かけ上その値を零にすることができる。

(3) 機械的結合 s_M による影響は、前二者による影響と異なり s_M の値が大きくなると、その移動は単なる縦軸上の平行移動ではなく傾斜も変化し、 $|V_{21}|/|V_1|$ の値が低下して感度が悪くなるから、 s_M の値はできるだけ小さくする必要がある。即ち、音片における構造の対称性と材質の均一性を良くし内部ストレスも除去することが必要である。本試料寸法では s_M の値を 1×10^{-6} dyne/cm (結合度に換算して $k_M=0.017\%$ に相当)より小さな構成にすれば、 $|V_{21}|/|V_1|$ の値の低下を15%以下に抑えることができる。

実際の漏れ出力は各種の結合因子による漏れ出力のベクトル和となるから、上述の各種結合因子に対する漏れ出力の低減化対策を実施することによって、所望の振動ジ

ャイロの特性を実現することができる。

以上の考察と成果は、横振動音片の場合に限らず音さやその他の振動子を使用した振動ジャイロにも適用できる。

なお、振動ジャイロの設計は感度と安定度の二つの因子を考慮して行う必要があり、これについては現在考察を進めている。

謝辞 本研究には大井電気(株)・石田記念財団からの研究奨学金の補助を受けた。関係各位にお礼申し上げます。

文 献

- (1) W. D. Gates: "Vibratory angular rate sensor may threaten the gyroscope", *Electron.*, **48**, 10, pp. 131~134(1968).
- (2) 中村武: "ジャイロスター", *センサ技術*, **10**, 11, pp. 65~70(1989-4).
- (3) 古賀良男, 美濃野正, 仲雅文: "カメラ一体型VTRの手ブレ補正機能, 圧電振動ジャイロを使って誤動作を減らす", *NIKKEI ELECTRONICS*, No. 541, pp. 217~226(1991-11).
- (4) 近野正, 菅原澄夫, 中村尚, 尾山茂: "圧電形の振動ジャイロ", *信学論*, **J68-A**, 6, pp. 602~603(1985-6).
- (5) 近野正, 菅原澄夫, 尾山茂, 中村尚: "圧電形振動ジャイロ・角速度センサの等価回路", *信学論*, **J70-A**, 11, pp. 1724~1727(1987-11).
- (6) S. Sugawara & M. Konno: "Equivalent Circuits of a Piezoelectric Vibratory Gyro", *IEEE Ultrasonics Symp. Proc.*, pp. 539~542(1987-11).
- (7) S. Sugawara, C. C. Hwang & M. Konno: "Angular Rate Detection Utilizing Phase Shift in a Piezoelectric Vibratory Gyro", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26**, Suppl. 26-2, pp. 171~173(1987-11).
- (8) 菅原澄夫, 近野正: "圧電形振動ジャイロの零回転時出力に関する考察", *信学総全大*, No. 1-79(1987-3).
- (9) レオニクスKK: "Watson Industries Inc. 角速度センサー", *カタログ*, No. L-0519(1982-5).
- (10) 工藤すばる, 近野正, 菅原澄夫, 吉田登美男: "定速度駆動・振動ジャイロスコープの同期検波出力", *電気学会, 波動デバイス・周波数制御シンポジウム資*, pp. 1~6(1991-5).
- (11) 菅原澄夫, 近野正, 工藤すばる: "横振動ジャイロスコープの支持について", *音響学会, 講論集(II)*, pp. 783~784(1991-3).