

圧電振動ジャイロ用四角柱振動子の支持構造に関する有限要素解析

群馬職業能力開発短期大学校 栗山好夫

Finite Element Analysis for Support Structure of the Square Beam Resonator in a Piezoelectric Vibratory Gyroscope

Yoshio KURIYAMA

要約 四角柱振動子を用いた圧電振動ジャイロにおける振動子の支持構造について、鋼の細線による標準的な門枠型を用いたときの励振側の振動方向とコリオリの方向の固有振動数に与える影響を有限要素法によるモード解析を用いて検討した。また、このときの共振先鋭度のQ値を周波数応答解析により求め、支持寸法によっては支持線の屈曲共振が生じることによるQ値の低下があることをあきらかにして、鋼の細線による門枠型支持構造の設計指針を得た。

さらに、これらの成果を基にして、組立後の固有振動数の微調整を支持線のみで可能にする支持方法を提案した。この構造をモード解析により解析し、良好な結果が得られた。

I まえがき

圧電振動ジャイロはカーナビゲーション・システムなどにおいて、回転角速度を検出するためのセンサである。その構造は温度変化に対して弾性係数の変化が小さい恒弾性金属で加工された振動子に圧電セラミックスを接着し、これを電氣的に発振させることにより振動子を振動させるものである。このジャイロが回転したときに振動子に加わるコリオリの力を圧電セラミックスで電氣的に検出することにより、回転の角速度を測定するものである。この感度は振動子の質量、振動数および振幅に比例する。したがって、その感度を高めるにはこれらを大きくすればよい。より高い感度を得るためには、励振側の振動方向における振動子の固有振動数とコリオリの方向の固有振動数を一致させることが有効である。

著者ら⁽¹⁾は四角柱振動子を用いた振動ジャイロで、励振側の振動方向における振動子の固有振動数とコリオリの方向の固有振動数を一致させる縮退化のシミュレーションを行い、実作業における縮退化を可能にし

た。

トリミングなどによる縮退化が得られれば、振動モード軸（振動方向）のずれはないが、経年変化などにより非対称性が加わると縮退が解け、振動モード軸の方向がずれてしまう。このずれ角（振動子の振動方向の変化）によって生じたヌル電圧（ジャイロの静止時の出力）は電子回路によって補正することが可能であるが、ずれ角を零にすることは困難なため、振動子に非対称性が残る。このため、温度ドリフト（温度変化によるヌル電圧の変動）が大きくなり、きわめて重要な問題となる。

そのため、実動作状態すなわち定常振動時におけるずれ角の挙動を考察するため、縮退化された二つの固有振動数に差を与えて、その時のずれ角を周波数応答解析により求めた。その結果、定常振動でのずれ角 δ force を小さくして安定させるためには、二つの固有振動数の差 F を小さくすることおよび自由振動でのずれ角 δ free を小さくすることが有効であることをあきらかにした。⁽¹⁾

これらの解析では現象を単純にするため支持線をは

ずし、圧電セラミックスを含まない振動子単体を解析対象モデルとして、剛体モードを含む振動解析により検討してきた。しかし、実用的には何らかの支持が必要となる。

この支持方法について、本研究のようなはりの曲げ振動を利用するジャイロでは、その振動の節にシリコンゴムを介して門柱を支持する方法¹²⁾や鋼の細線で正三角柱や長方形柱を支持する方法¹³⁾などがある。後者の鋼の細線で支持する方法は、生産性の良さから実用的に用いられているが、振動子の表面に溶接・接合するため、二つの固有振動モードに共通する不動点が存在しない。そのため振動子自体の二つの固有振動数を精度良く一致させても、支持線の結合により縮退が解けてしまう。また、菅原¹⁴⁾はこの支持線寸法によっては支持線の屈曲反共振が生じることによる共振先鋭度のQ値の低下があるため、避けるべき寸法があることを等価回路解析により論じている。

本報告では鋼の細線で支持固定する方法を解析の対象として、どのような支持線の形状寸法にするかの設計指針を得ることを目的として、標準的な支持構造である門枠型を用いたときの固有振動数の影響について有限要素法により解析した。さらに、これらの成果を基にして、組立後の固有振動数の微調整を支持線のみで可能にする支持構造を提案する。

解析に使用したプログラムは、汎用コードANSYS Rev 5.4を用いた。

図1は四角柱振動子を組み込んだ試作用圧電振動ジャイロである。

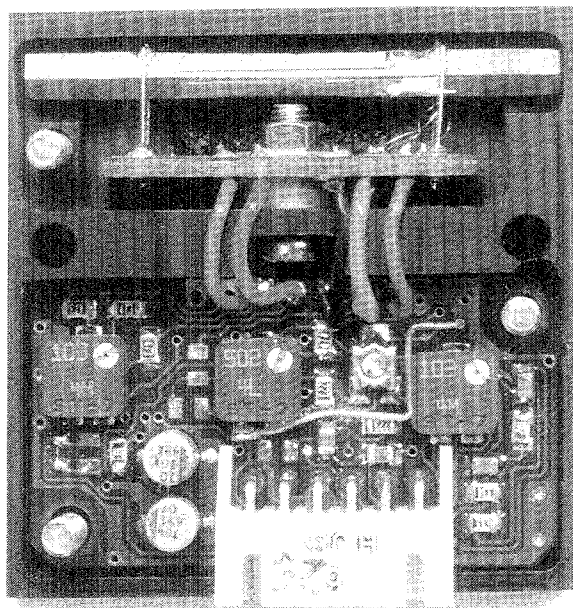


図1 圧電振動ジャイロ内の四角柱振動子
Fig.1 Square beam resonator in a piezoelectric vibratory gyroscope

図2は門枠型の金属細線により支持した振動子の構造モデルである。

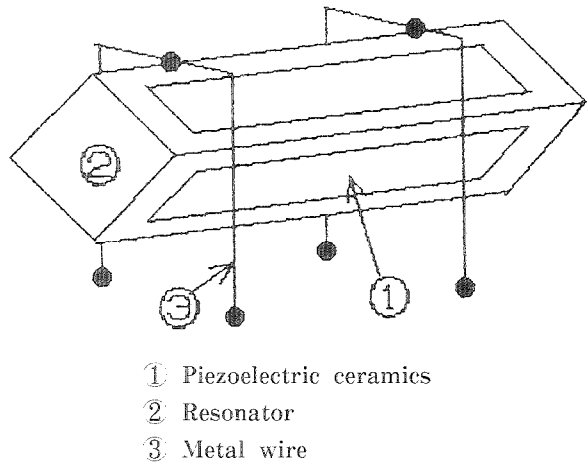


図2 門枠型の金属細線により支持した振動子の構造モデル
Fig.2 Structure model of a resonator supported by a slender metal wire of frame type

II モード解析と周波数応答解析

有限要素法による周波数応答解析により、強制振動に対する構造の定常状態を求めることができる。このときの支配方程式は式(1)となる。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f(t)\} \quad \dots (1)$$

ここで、 $[M]$ は質量マトリックス、 $[C]$ は減衰マトリックス、 $[K]$ は剛性マトリックス、 $\{\ddot{u}\}$ は加速度ベクトル、 $\{\dot{u}\}$ は速度ベクトル、 $\{u\}$ は変位ベクトル、 $\{f(t)\}$ は時間依存の加振ベクトルである。自由振動に対しては $[C]=0$ 、 $\{f(t)\}=0$ として、非減衰のモード解析を行い構造の固有振動数と固有モードを得ることができる。

III 門枠型支持線の影響

1 解析モデル

振動子の形状は振動子単体の解析¹⁾と同じく、一辺が3.5mm(以下寸法の単位はmm)の正四角断面形で長さを47.6とした。この振動子各辺の中央部に厚さ0.2幅2.1長さ15.5の圧電セラミックスを接着して、図1のように門枠型の細線を溶接したモデルを解析対象とした。この支持線に関連する寸法は図3に示す寸法記号を用い、実験モデルから標準のパラメータをつぎのよ

うに定めた。

$$L1 = L1' = 8$$

$$L2a = L2b = L2a' = L2b' = 3.5$$

$$L3 = L3' = 10.7$$

支持線直径 $D = 0.3$

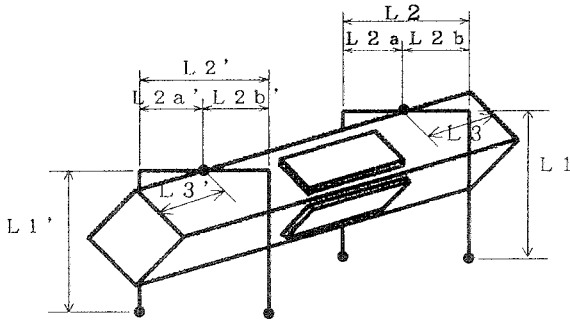


図3 標準構造モデル
Fig.3 Standard structure model

使用した要素は振動子と圧電セラミックスには三次元構造要素を、支持線には三次元弾性ビーム要素を用いた。要素数は各材料の均等要素分割した要素節点が共有できるようにするため、振動子の横断面は5×5の25要素にし、軸方向に80要素を用いた。また、支持線は門枠型はり単独の解析値⁽⁷⁾(第1対称面内モード)との比較解析により、水平部には6要素、垂直部にはそれぞれ5要素を用いた。この有限要素モデルを図4に示す。このときのモデルに適用した材料定数を表1に示す。

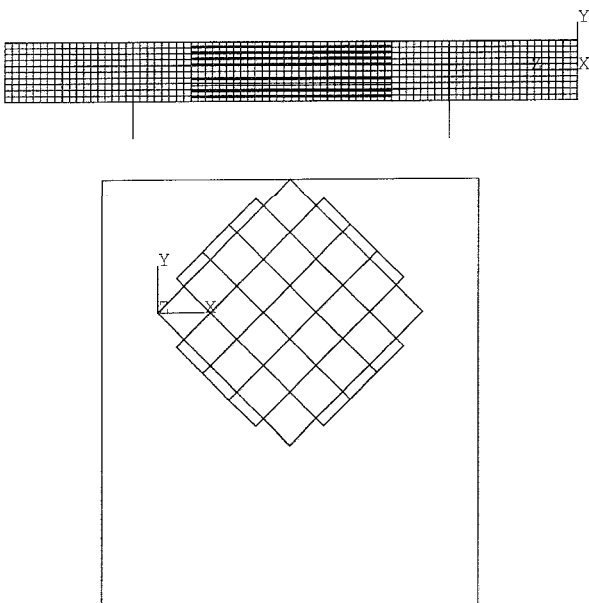


図4 有限要素モデル
Fig.4 Finite element model

表1 材料定数

Table 1 Material constants

	Young's modulus E (GPa)	Density ρ (kg/m ³)	Poisson's ratio ν
Resonator	196	8.15×10^3	0.3
Ceramic	103	7.47×10^3	0.32
Wire	206	7.86×10^3	0.3

2 標準モデルのモード解析

図4のモデルをサブスペース法によりモード解析を行った。その結果を表2にモード12まで示す。

表2 サブスペース法による標準モデルのモード解析
Table 2 Modal analysis of standard model by subspace iteration

MODE	FREQUENCY (Hz)	MODE	FREQUENCY (Hz)
1	0.0	7	4424.9
2	95.9	8	4424.9
3	163.3	9	7816.7
4	331.3	10	7819.4
5	458.0	11	9853.1
6	472.6	12	9857.0

表2で示されているモード9と10がジャイロで利用する振動子の第1曲げモードである。ただし、この曲げモードは支持線形状によってはモード7と8になるときもある。そのため、この二つの固有振動数の表示を、横断面からみて振動子が縦方向に振動するモードの固有振動数をFaとし、横方向のそれをFbとした。標準モデルでは、Fa=7816.7とFb=7819.4Hzである。この二つのモードを図5に示す。

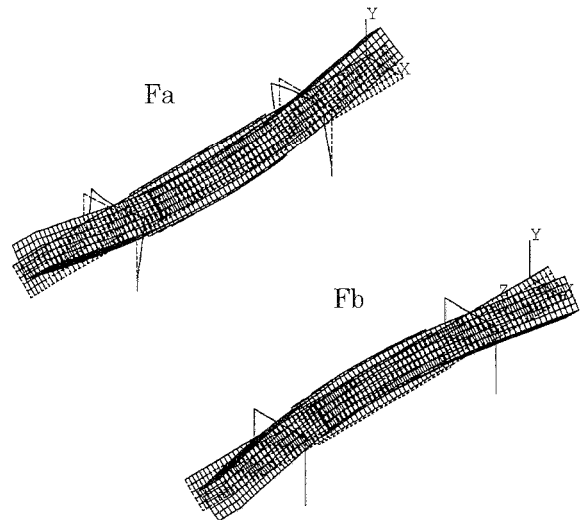


図5 門枠型の金属細線により支持した振動子の第1曲げモード (FaとFb)
Fig.5 First bending mode (Fa&Fb) of a resonator supported by a slender metal wire of frame type

なお、このモデリングでは振動子と支持線の溶接部を各1節点での結合にしてあるため、解析結果にZ軸回りの剛体モードが存在してしまう。これは考察上除くことにする。

支持線のない拘束なしのモード解析では、完全自由であるので系の剛体モードの個数は6であり、各3個の剛体変位と剛体回転がある。このときのモード解析の結果を比較のために、モード10までを表3に示す。

表3 サブスペース法による自由-自由振動のモード解析
Table 3 Modal analysis of free-free vibration by subspace iteration

MODE	FREQUENCY (Hz)	MODE	FREQUENCY (Hz)
1	0.0	6	0.0
2	0.0	7	7819.4
3	0.0	8	7819.4
4	0.0	9	20453.7
5	0.0	10	20453.7

標準モデルは、支持線なしでの解析値(7819.4 Hzの重根)と比較すると、横断面からみて縦方向の振動モードで、支持線の影響を受けていることが図5からもわかる。これは、支持線の接合部が縦方向の振動モードの節になっていないためである。本モデルでは振動子と支持線の質量の比が大きいため、表2のモード1~6までが表3の1~6までの剛体モードに対応して生じる固有モードである。また、モード7と8および11と12は、振動子の接合部と支持線の固定端を両固定端とするような支持線の振動を主とする固有モードである。

3 支持線形状の影響

図3の標準モデルについて、はじめに通常生じやすい支持線取り付け工程時の誤差による固有振動数の影響を解析した。

表4は支持線と振動子の接合部が、L2とL2'の中央から0.5と1mmの取り付け誤差を有するときの固有振動数の影響である。

表4 L2a,L2a',L2bおよびL2b'の変化による固有振動数の影響
Table 4 Effect of natural frequency by variation of L2a,L2a',L2b and L2b'

L2a&L2a'	L2b&L2b'	Fa(Hz)	Fb(Hz)
3.0	4.0	7817.0	7819.4
3.5	3.5	7816.7	7819.4
2.5	4.5	7817.6	7819.4

表5は支持線と振動子の接合部の位置L3とL3'が、±0.5mmの取り付け誤差を有するときの固有振動数の影響である。

表5 L3とL3'の変化による固有振動数の影響
Table 5 Effect of natural frequency by variation of L3 and L3'

L3	L3'	Fa(Hz)	Fb(Hz)
10.2	10.2	7816.7	7819.3
10.2	10.7	7816.7	7819.4
10.2	11.2	7816.8	7819.3
11.2	10.7	7816.7	7819.4
11.2	11.2	7816.8	7819.3

表4と5から取り付け工程での誤差は、固有振動数に与える影響が0.1Hz以下なので許容できる範囲にある。

図6は標準モデルで、支持線の水平部の長さL2とL2'を変更したときの固有振動数である。図よりこの長さが短いほど、二つの固有振動数の差Fiが小さくなり、8mmより長くなるとFiが大きくなり実用性がなくなる。図7は標準モデルで、支持線の垂直部の長さL1とL1'を変更して、全体の支持線径Dをそれぞれ0.3、0.35、0.4としたときの固有振動数である。線径を変更してもFbは一定であるが、太いほどFiが小さく実用性の範囲が広がる。また、D = 0.3のときL1とL1'が9.5mmより大きくなるとFiが大きくなり、実用にはならない寸法になる。

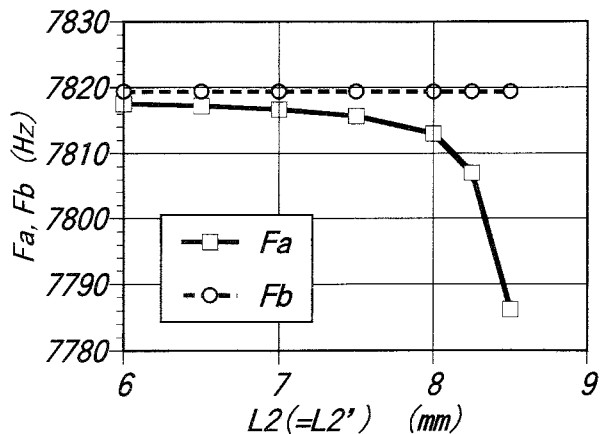


図6 支持線長さL2とL2'の変化による固有振動数の影響
Fig.6 Effect of natural frequency by variation of wire length L2 (= L2')

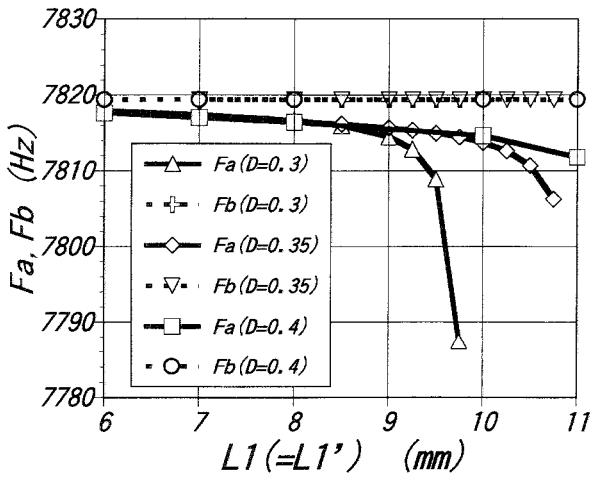


図7 支持線長さL1 (≠L1') と支持線径Dの変化による固有振動数の影響

Fig.7 Effect of natural frequency by variation of wire length L1 (= L1') and diameter D

4 周波数応答解析

標準モデルについて、共振先鋭度のQ値を求めるために式(1)による周波数応答解析を行った。定常振動における加振方法は圧電要素を用いなくて、振動子の中心部の節点に図4のY軸方向に1Gの強制力を加えて解析した。なお、減衰比は実験データより 3×10^{-4} とした。図8はこのときの圧電セラミックス中央部要素のY方向の共振振動数近傍の変位(振幅)と位相角を算出し示したものである。

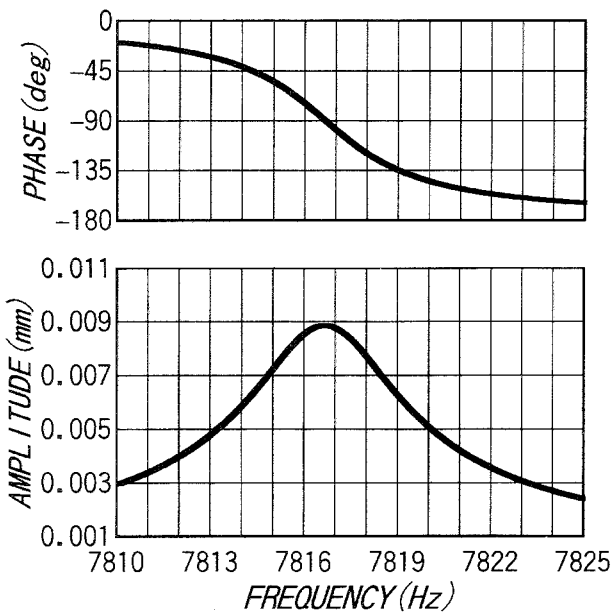


図8 標準モデルの周波数応答解析

Fig.8 Frequency response analysis of standard model

図9は図8を標準モデルから L1 (= L1') を11 mmにしたときの結果である。この条件でのモード図ではおもに支持線が振動子の軸方向に屈曲共振して、このため振動子もその影響で反共振状態になっていることを示している。これらのQ値は一般に式(2)で求められる。

$$Q = Fr / \Delta Fr \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、Fr は共振振動数、 ΔFr は半値幅である。

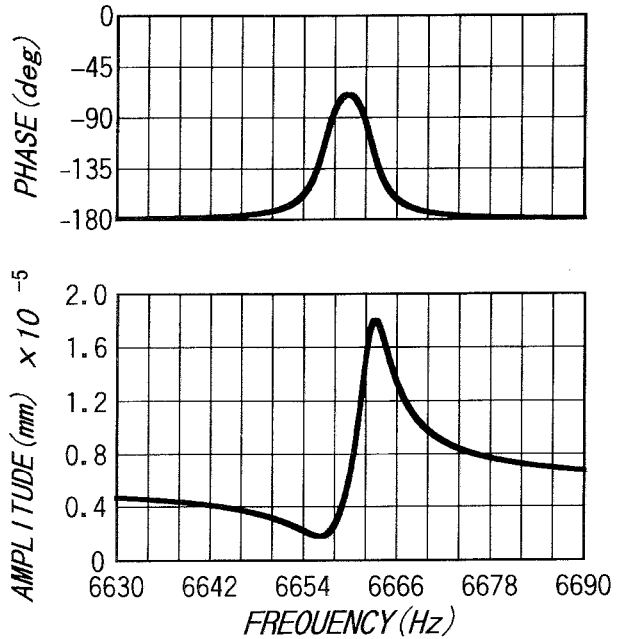


図9 L1 (= L1') = 11mmのときの周波数応答解析

Fig.9 Frequency response analysis at L1 (= L1') = 11mm

図10と11はそれぞれ支持線寸法 L2 (= L2') と L1 (= L1') を変化させたときのQ値を示したものである。算出に用いた Fr と ΔFr はそれぞれ、0.1Hz刻みの振動数に対する変位応答の最大値とその $1/\sqrt{2}$ 倍に対する振動数から算出した。

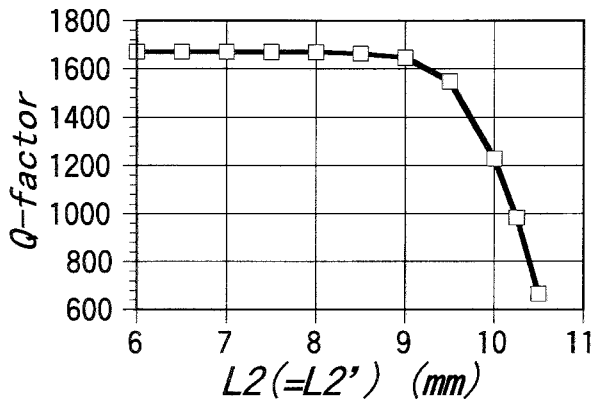


図10 支持線L2 (= L2') の変化によるQ値の影響

Fig.10 Effect of Q-factor by variation of wire length L2 (= L2')

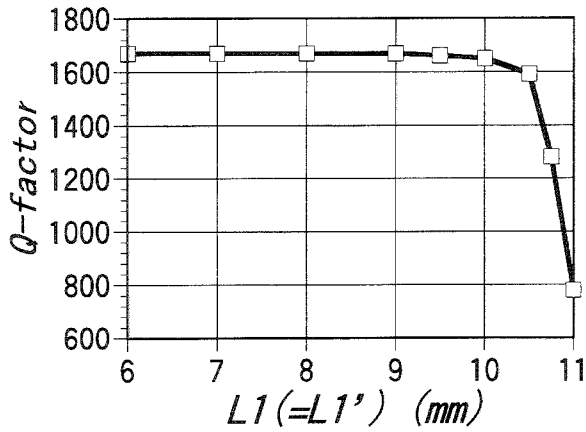


図11 支持線L1 (= L1') の変化によるQ値の影響
 Fig.11 Effect of Q-factor by variation of wire length L1 (= L1')

これらの図から、標準モデルに対し L1 (= L1') が10より大きく、L2 (= L2') が9より大きくなるとQ値が急激に減少することがわかる。なお、標準モデルでのQ値の実験値は 1,700程度であり、シミュレーション結果とよく一致している。

IV 微調整型支持方法に関する検討

完全な振動子を用いてもなんらかの支持を要するため、門枠型のような場合には、前述したような影響がある。また、製作工程上の各種寸法誤差や組立上の問題点があるため、性能を高めるためには最終的な固有振動数の微調整が必要である。

この微調整を最終組立後に、振動子をトリミングすることで行うことは通常困難である。また、図3の門枠型のままでは支持線の形状を変更しても、図6と7からあきらかなように二つの固有振動数を一致させることはできない。

1 解析モデル

ここで、支持構造により二つの固有振動数の微調整が可能になる図12のモデルを考案した。

ただし、図中の①と②で示される部材は、それぞれ図中のL3とL3'に位置するものである。

図中の寸法記号はつぎのように定め、これを提案モデルとした。

- L1 = L1' = 6
- L2 = 4.1
- L4 = 0.6

L5 = 1.75
 (θ = 45°)
 なお、支持線直径と柱長方向の各寸法は、図3と同一である。

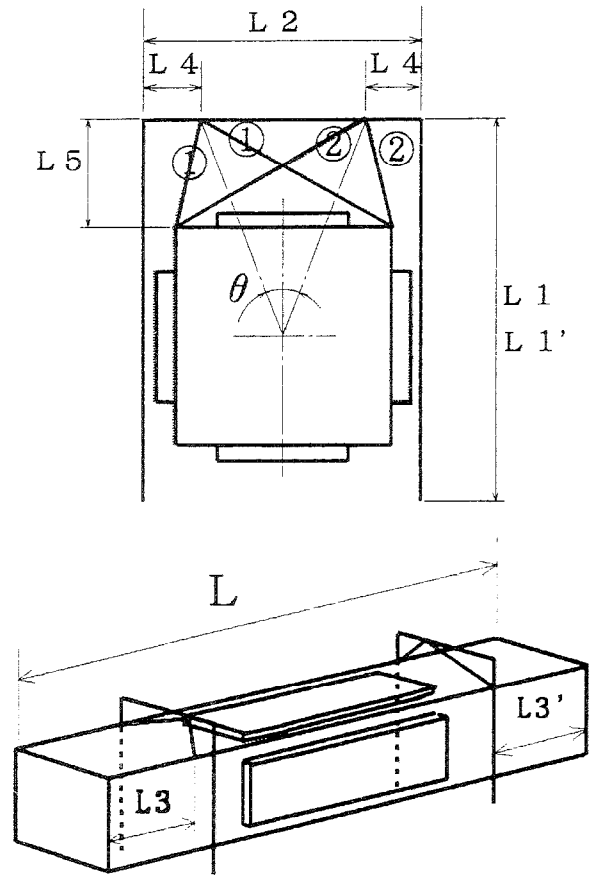


図12 提案モデル
 Fig.12 A proposal model

図13は図12の有限要素モデルである。解析モデルに用いた各種の条件は、門枠型のそれと同一である。

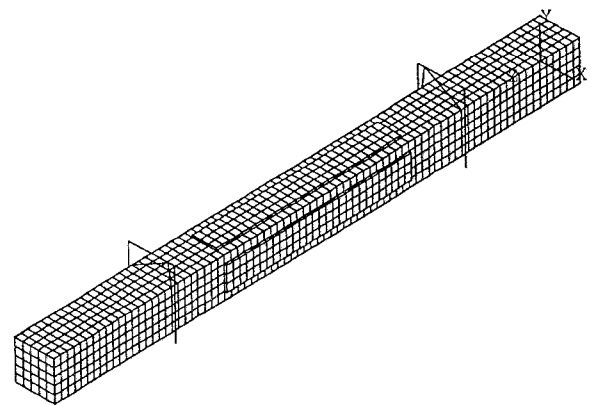


図13 提案モデルの有限要素モデル
 Fig.13 Finite element model of the proposal model

2 モード解析

図12の提案モデルによるモード解析の結果を、表6にモード10まで示す。

表6 サブスペース法による提案モデルのモード解析
Table 6 Modal analysis of proposal model by subspace iteration

MODE	FREQUENCY (Hz)	MODE	FREQUENCY (Hz)
1	222.0	6	4294.2
2	254.4	7	7819.1
3	282.7	8	7822.7
4	1300.5	9	12383.2
5	2845.8	10	12388.6

この提案モデルでは表6で示されているモード7と8がジャイロで利用する振動子の第1曲げモードである。この二つの固有振動数の表示も、横断面からみて振動子が縦方向に振動するモードの固有振動数をFaとし、横方向のそれをFbとした。提案モデルでは、Fa=7819.1とFb=7822.7Hzである。支持線の影響を解析する準備として、振動子部分をトリミングのアルゴリズム¹⁴⁾により処理して、支持線付きで二つの固有振動数を一致させた。このとき $\delta=0.0605$ 、 $\gamma=0.024$ とすると、FaとFbは、7817.3Hzとなった。この二つのモードを図15に示す。このときの縮退したモデルを基準提案モデルとした。

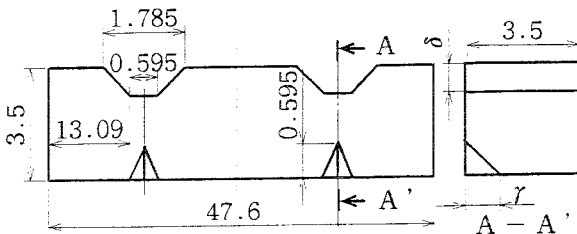


図14 提案モデルのトリミングの位置
Fig.14 Trimming position of the proposal model

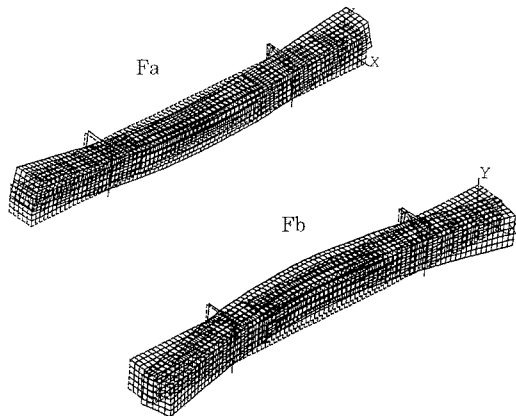


図15 基準提案モデルの第1曲げモード (Fa&Fb)
Fig.15 First bending mode (Fa&Fb) of a basic proposal model

基準提案モデルを基に、前2本のL1と後2本のL1'をそれぞれ4~8mm変化させた。

図16 (a)はこの解析結果を三次元グラフで示したものである。図16 (b)は図16 (a)を上面から投影して二次元グラフで示したものである。図より、提案モデルが支持線だけで二つの固有振動数を微調整できることを示している。

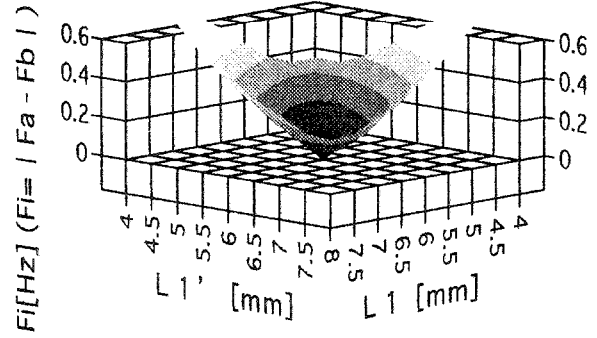


図16 (a) 縮退近傍の固有振動数の差 F_i
Fig.16 (a) Difference F_i of natural frequency around the degeneration

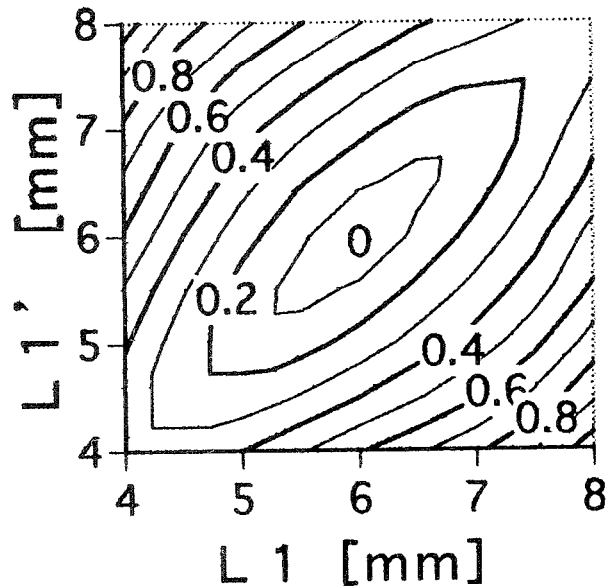


図16 (b) 図16 (a)の上面からの投影図
Fig.16 (b) Top view of Fig.16 (a)

V まとめ

四角柱振動子を用いた圧電振動ジャイロで、標準的な支持構造である門枠型を用いたときの支持線各部の寸法形状が、二つの固有振動数に与える影響を有限要素法により解析した。また、支持寸法によっては支持線の屈曲共振が生じることによるQ値の低下があるこ

とをあきらかにして、門枠型支持の設計指針を得た。

さらに、これらの成果を基にして、組立後の固有振動数の微調整を支持線のみで可能にする支持方法を提案した。この構造をモード解析により解析し、良好な結果が得られた。

今後、支持線の太さの組み合わせや質量の調整が容易にできる方法などを組み合わせることで、この応用を検討していきたい。

なお、本研究は太陽誘電㈱より依頼された受託研究の一部をまとめたものである。本報告の内容について、商品技術部の柿沼博美氏には問題点の提起や支持方法に関する提案を多く受けました。深く感謝致します。

[参考文献]

- (1) 栗山好夫・柿沼博美、圧電振動ジャイロ用四角柱振動子のシミュレーション、日本機械学会論文集、64、C (1998)、pp.3011-3018
- (2) H. Abe et al., Piezoelectric-Ceramic Cylinder Vibratory Gyroscope, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 31 (1992)、pp.3061-3063
- (3) 阿部洋・吉田哲男・敦賀紀久夫、円柱型圧電セラミックスを用いた小型圧電振動ジャイロ、Tokin Technical Review、No.19 (1993-2)、pp.50-54
- (4) 菅原澄夫・杉本真之、圧電形音片ジャイロスコープの支持等価回路解析、信学技報、Vol. 94、No. 249、(1994-9)、pp.1-8
- (5) 近野正・菅原澄夫・尾山茂、音片振動子表面に接合された支持線および結合子、電子通信学会論文誌、1976-9、Vol.J59-A No.9、pp.695-701
- (6) 近野正・永井健三、電気・機械振動子とその応用、コロナ社、1974-3、pp.138-144
- (7) R.D.Blevins, Formulas for Natural Frequency and Mode Shape, Nostrand Reinhold Co.,1979、pp.219-222