メンブレン型バネ構造を持つ振動ジャイロのバネ設計に関する一考察

正員 前 中 一 介 (姫路工大)、非会員 岡 田 茂 (姫路工大)、
非会員 徳 永 理 人 (姫路工大)、学生員 藤 田 孝 之 (姫路工大)、
非会員 前 田 宗 雄 (姫路工大)

A Study of Vibratory Gyroscope using Membrane Structure as A Spring

Kazusuke Maenaka, Member, Shigeru Okada, Student Member, Masato Tokunaga, Member,
Takayuki Fujita, Student Member, Muneo Maeda, Nonmember (Himeji Institute of Technology)

Recently, micromachined vibratory gyroscopes are in the lime light. Especially, the double resonant mode is important in order to improve the sensitivity of micro gyroscopes. For such a purpose, some membrane structure of the micromachined gyroscopes have been reported. In this paper, we show the design strategy of the membrane spring for noting the resonance characteristics. In the paper, by measuring the fabricated devices and some simulations, we pointed out that the through knowledge of a non-linearity of the membrane spring is important for micro structures.

キーワード：振動ジャイロ、バネ、双共振、メンブレン、SOI

1. はじめに

近年、メンブレン構造をバネとして用いる振動型ジャイロの提案がなされている⁽¹⁾。これらのデバイスでは90度回転対称構造をマスク精度で実現できるため、励振方向の共振周波数と検出方向の共振周波数をコントロールしやすく、双共振⁽²⁾を用いたデバイスに対して大きなメリットがある。

これまで提案されてきたデバイスでは、メンブレン構造が比較的大きな金属板であったり、また、メンブレンの変位をあまりとらない構成のものであったが、マイクロ化、高感度化のためには小型メンブレンを大変位させた場合の挙動に関する考察が重要である。本論文ではシリコンマイクロマシニングを用いて試作したメンブレンによるバネ構造について、特にその構造非線形性による共振特性の振る舞いを実験およびシミュレーションで調査し、マイクロマシニングでこのようなデバイスを設計する際の知見を得たので報告する。

2. メンブレンタイプ振動ジャイロの構造・動作原理

図1にメンブレンタイプの振動ジャイロの構造例を示す。この例では十字型に形成されたメンブレン状バネ構造体の中央にマスがあり、これを参照振動としてx方向に、例えば磁界電流相互作用により振動させる。z軸周りの角速度が印加すると、振動するマスにy方向のコリオリ力が発生し、マスはy方向に参照振動と同期して変位する。この変位を検出すれば与えられた角速度を知ることができる。このような構造では、駆動方向、検出方向の共振周波

図1 デバイス構造例

Fig. 1. Example of device structure.

数はマスク精度でほぼ決定可能であるため、両者を一致させ双共振による高感度化⁽²⁾を望むことができる。しかしながら、参照振動として大変位を与えた場合、いわゆるハードスプリング効果によってその共振周波数が変化し、適切な駆動周波数を得ることができない。以下、具体的なデバイス例をとりあげ、検討した結果について述べる。

3. 試作したデバイス例と測定方法

図2に試作したデバイス2例の概略を示す。図2Aは、メンブレンバネ形状を十字構造としたもの、図2Bは円構造としたものである。両者ともにメンブレンの部分の厚さは5 μm 、マスとなる部分の厚さ(ウエハ厚)は625 μm である。基板にはSOIを用い、表層シリコン層がメンブレンとなるようにプロセスを組み立てた。また、マスを基板から切り離すプロセスとしてICPRIEを用いており、マスの部分はほとんど正確な直方体である。

メンブレン・マスで形成される共振系の特性を計測するため、デバイスをピエゾアクチュエータに貼り付け、 x 方向に駆動した。この際バネの z 方向の変位を、各メンブレ

図2 評価したデバイス
Fig. 2. Test devices.

ンバネ中央部にレーザ変位計のスポットをあて計測した。

4 評価および考察

十字構造、 π 構造の両者に対し、駆動振幅をパラメータにして共振特性を計測した。図3に計測結果を示す。グラフは微小振幅で駆動したときの共振周波数で規格化した駆動周波数を横軸に、メンブレン部の振幅を縦軸に示している。両者ともに、計測範囲では駆動変位振幅が大きくなるとともに共振周波数が高周波側に变化する、ハードスプリング効果が現れている。特に十字型構造の場合、振幅の大きなところで必ずしも駆動振幅と最大振動振幅が比例していない部分がある。これはハードスプリング効果特有の最大振幅値付近での振動の不安定性が発現しているためである。両者のグラフを比較したとき、ハードスプリング効果に明らかな差異が見られる。この事実を定量的に説明するため、構造非線形性を加味したFEM解析(ANSYSによる)によって静的な変位におけるバネ定数の変化を計算した。図4が解析結果である。解析ではマスの両端(図2で、○部△部)にそれぞれ±z軸方向の荷重を与えトルクを発生させ、その点の変位を計算している。図4では第0次近似として、変位xを得るために与えた荷重Fにより、平均的バネ定数 F/x を計算し、これを併せて表示している。共振周波数が一般的2次系の共振構造で記述できるとすれば、それはバネ定数の平方根に比例するはずである。このようにして求めた変位と共振周波数の関係をプロットしたものが、図3のグラフのポイント(「計算値」と記されている)である。極めて荒い近似でありながら、計算結果は計測結果を良く表現していることが分かる。

5. まとめ

メンブレン構造のバネを持つマイクロ振動型ジャイロについて、そのバネ構造と共振特性について実験と計算により議論した。その結果、1:比較的薄く、柔らかいと考え

図3 試作デバイスの共振特性
Fig. 3. Resonance characteristics of test devices.

図4 FEMにより計算したバネ定数
Fig. 4. Calculated spring constants.

られるメンブレンバネでも、マイクロマシンングで扱うサイズになるとハardspring効果が無視できないこと、2：この効果はバネの静的非線形性をFEMなどを用いて計算することによって予測可能であること、3：結果として特に双共振を用いたデバイスのように共振周波数の制御が重要であるデバイスではモーダルな解析とともにバネの非線形効果を十分考慮して構造設計しなければならないことを明らかにした。

(平成11年 8月 31日受付)

文 献

- (1) Y.Tomikawa,HOkuyama,A.Satoh,S.Sugawara and K.Ohnishi
" Flatly Supported Vibratory Gyro-Sensor Using
Trident-Type Tuning Fork Resonator", Sym. Gyro
Technology, Stuttgart, Germany, 8.0 (1997)
- (2) 前中一介、藤田孝之、前田宗雄,"振動型マイクロ
ジャイロの設計指針", 電学論、Vol.118-E, 377-
383 (1998)