

MEMS 重力センサの開発(1)

相澤隆生 (サンコーコンサルタント), 大熊茂雄, 駒澤正夫 (産業技術総合研究所),
松嶋正和 (三井造船), 小山光明, 武藤 猛 (日本電波工業), 松岡俊文 (京都大学大学院)

Development of the MEMS Gravity Sensor (1)

Takao Aizawa* (Suncohort Consultants), Shigeo Okuma, Masao Komazawa (AIST),
Masakazu Matsushima (Mitsui Engineering), Mitsuaki Koyama, Takeru Muto (NDK)
Toshifumi Matsuoka (Kyoto University)

Abstract: We developed a new MEMS gravity sensor with quartz crystals for experiments. We proposed an electric capacity change type sensor on which the drive electrode and the sensing electrode were prepared by making the piece of crystal of AT cut into cantilever structure as a structure of a sensor. We estimated the accuracy of the gravity sensor at about several-mgal, as a result of evaluation tests using the new MEMS gravity sensor.

1. はじめに

重力探査は、陸上の硫化物鉱床探査では広域物理探査データの中でも探査指針となる重要な役割を担ってきた。海底熱水鉱床探査においても、100km²程度の広い領域の中から精密調査を行う領域を選定するためには重力探査を適用し、鉱体による高重力異常を抽出することが考えられている。例えば、100km²程度の領域を効率良く1ヶ月程度で3次元調査を行うためには、移動しながらの重力探査が必須となる。ここでは、移動しながらの重力探査を念頭に、目標性能 0.1mgal の重力変化測定を実現するための重力センサの開発結果について紹介する。

筆者らはこれまで MEMS 加速度センサの地震探査及び地震観測への適用 (相澤ほか, 2007a, 2007b), 地震探査用の MEMS 加速度センサの開発 (国見ほか, 2009) を行ってきた。また、移動しながらの重力探査に用いることができる重力センサとして、小型で高性能な MEMS 加速度センサ開発のための検討 (相澤・松岡, 2010) を行ってきた。その結果、筆者らがこれまで手がけてきたシリコン静電容量型の加速度センサでは、重力計測用として使用する DC~低周波数領域での MEMS 加速度センサの特徴として、感度を大きくするために重りを大きくすると両持ち梁構造で支えるより方法がなく、その結果として温度ドリフトが大きくなるため、シリコン静電容量型では重力センサの開発が難しいことが分かった。一方、既に実現されている水晶センサは圧力、力、ジャイロ等の物理センサや化学・生化学・環境センサ等がある。このような水晶セン

サは、他の材料を用いたセンサ素子と比較して最も高感度の領域を担当していることが多い (例えば、富川, 2002) ため、水晶センサ素子の検討を行った。

2. 水晶デバイス

一般的に、物理センサ用水晶片は Z カットで、形状は音叉型または双音叉型が使用され、一方、化学センサ用水晶片は AT カットで、形状は平板が使用されていることが多い。AT カット水晶片を用いたセンサは、例えば QCM (Quartz Crystal Micro-balance ; 水晶振動子の電極表面に物質が付着するとその質量に応じて共振周波数が変動する (下がる) 性質を利用し極めて微量な質量変化を計測する質量センサ) がある (例えば、Muto *et al.* (2008))。

本開発の目標としている重力変化 0.1mgal を実現するための選択肢の一つに、双音叉型水晶センサがある。双音叉型の構造では、センサ単独の目的感度を実現することは難しく、機械的な装置との併用により実現されている (例えば、Paroscientific Inc., <http://www.paroscientific.com/pdf/DQAdvantage.pdf>)。しかしながら、Z カットの水晶片に圧力差や温度差を与えるとその周辺部位に双晶と称する目的としない結晶が作られてしまうため、センサとしての信頼性に不安が残る。そこで、センサとして実現可能な温度範囲で、ゼロ温度特性を実現できる AT カット水晶片を利用した重力センサの検討を行った。

水晶片は、結晶軸に対する切断角度 (カット) の違いによって振動方向及び周波数温度特性が異なること

が知られており、温度変化に対して周波数安定度が良好な AT カットを採用することとして研究を進めた・AT カットとは、水晶の X 軸の周りに回転切断して造られるカット群の中で Z 軸から 35 度 15 分近辺(岡野, 2010) に切り出されたもの(図 1) を指す。また、AT カットの温度-周波数変化率の例(図 2) を示す。図中 2° 54" のグラフでは、5°C~40°C の範囲で温度変化による周波数の変化がないことが分かる。

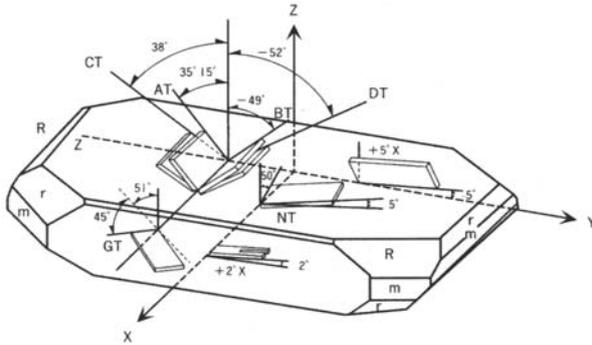


図 1 人工水晶とカット軸

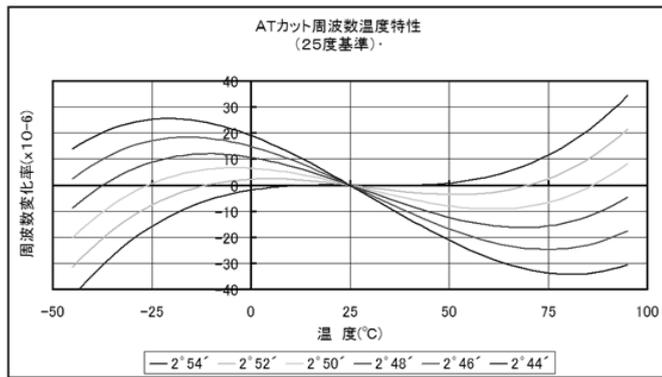


図 2 AT カットの周波数-温度特性図

(<http://homepage1.nifty.com/sokano/knowledge/knowledge02.html>)

3. 動作原理

ここで提案する重力センサ素子の動作原理は、図 3 に示すように、水晶片を片持ち梁構造にし、この片持ち梁に駆動電極を形成し、さらに、この水晶片の端部に検出用電極 A を設け、その電極の反対側の保持器の内面にも検出用電極 B を形成する。この A と B で可変コンデンサを実現して検出部とした。この等価回路を図 4 に示す。記号は、 R_1 、 C_1 、 L_1 、 C_0 ：水晶振動子の等価回路定数、 C_V ：重力検出部の静電容量成分、 C_{OSC} ：能動回路の静電容量成分、 C_L ：水晶振動子側から見たセンサ部の静電容量である。これは能動回路の静電容量成分 C_{OSC} とセンサ部の変位により決定される静電容量 C_V との合成容量、 F_L ：能動回路(発振器)の出力周波数、 d ：カンチレバーの静電容量を決定する基準となる

距離、 δd ：重力変化によりセンサ部が変位した距離、 S ：センサ部の有効電極面積、 ϵ ：誘電率である。さらに、 F_r ：水晶振動子の電氣的直列共振周波数とすれば、

$$F_L = F_r \times \left\{ 1 + \frac{C_1}{2 \times (C_0 + C_L)} \right\} \quad (1)$$

となる。ここで、

$$C_L = \frac{1}{\frac{1}{C_V} + \frac{1}{C_{OSC}}} \quad (2)$$

および、

$$C_V = \frac{S \times \epsilon}{d} \quad (3)$$

である。

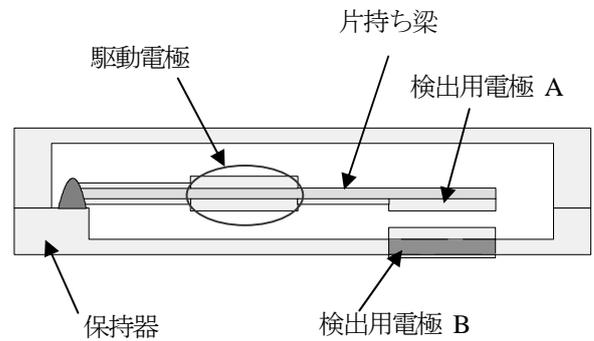


図 3 重力センサ素子の動作原理図

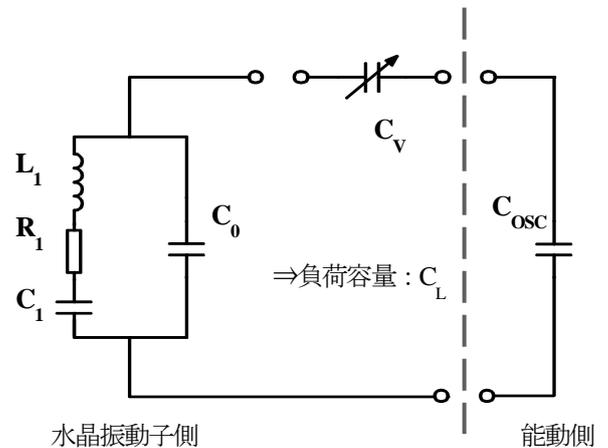


図 4 素子の等価回路

カンチレバーが d から $d + \delta d$ まで変化すれば、式(1)~式(3)より負荷時共振周波数の差は次式で示される。

$$\Delta f = F_r \times \frac{C_1}{2} \times (A - B) \quad (4)$$

ここで、

$$A = \frac{S \times \epsilon + C_{OSC} \times (d + \delta d)}{C_0 \times C_{OSC} \times (d + \delta d) + S \times \epsilon \times (C_0 + C_{OSC})} \quad (5)$$

$$B = \frac{S \times \epsilon + C_{OSC} \times d}{C_0 \times C_{OSC} \times d + S \times \epsilon \times (C_0 + C_{OSC})} \quad (6)$$

4. 水晶センサのシミュレーション

重力センサとして目的とする 0.1mgal の精度を得るための適切な水晶片のサイズを求めるために、AT カットの水晶片に Y 方向の重力 (1000gal および 1000gal+0.1mgal) が加わった時の Y 方向の撓み量と静電容量の変化をシミュレーションによって確認した。

シミュレーションでは、予め水晶片のサイズを求めた後、水晶の振動部と重り部の長さを変化させながら、その時の静電容量の変化を求めた。その結果、振動部と重り部の比率が 1:1 となる場合に静電容量が最大となり、Y 方向の撓み量は 5.38×10^{-5} [um]、静電容量は約 1.24[pF]で静電容量の変化量は 4.78×10^{-6} [pF]となった。次に、電極間のギャップの大きさと静電容量の変化量との関係をシミュレーションによって求め、センサの寸法を決定した。

5. 試作した水晶重力センサの概要

シミュレーションにより求められた寸法を元に、以下に示す仕様で、重力センサの試作を行った。

(1) センサの設計仕様

センサの設計仕様を下記に示す。

- ・公称周波数 : 73 MHz
- ・振動モード : 基本波
- ・水晶グレード : IEC60758 grade Aa
- ・最終仕上げ : Polishing
- ・水晶片寸法 : 20.0×1.6 mm
- ・電極材料 : Cr, Au
- ・保持器寸法 : 27.0×12.0×1.0 mm

(2) 計測システム

計測システムは、

- ① センサモジュール
- ② 制御装置
- ③ 周波数計測装置

に分かれている。

一般的に計測装置内には冷却ファンが使用されるが、ここでは暗振動(振動雑音)低減対策としてこの冷却ファンは使用しない構成としている。

(3) 恒温槽の温度選定

恒温層の温度決定のために、国際規格である IEC 60444-1 を適用して、+25°C~+60°Cの温度範囲で、このセンサ素子の周波数温度特性の計測 (図 5) を行った。結果は、温度を 25°C以上としてあるため 2 次曲線として表示される。これにより、温度変化による周波数変化量の小さい+54°Cを恒温槽内温度とした。

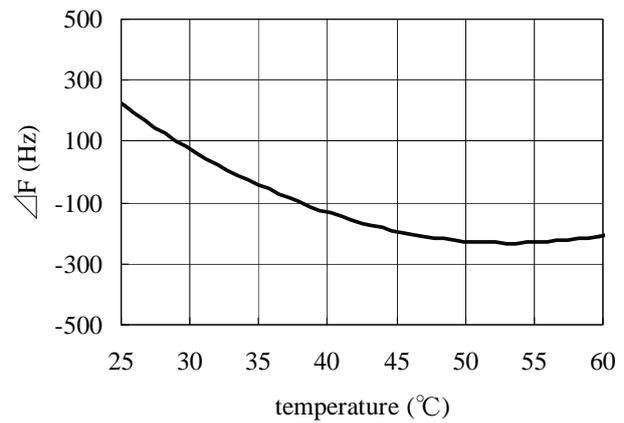


図 5 試作したセンサの周波数温度特性図

6. 重力センサの評価のための評価試験機

試作した重力センサに 20mgal~230gal の重力変化を与え、重力変化と負荷時共振周波数の変化との関係を計測した。当該重力センサの構造は感度に指向性があるため、傾斜角度を変化させることにより、センサに作用する重力の鉛直成分を加減する (豊澤ほか, 2008) ことにより実施した。

地球の重力は 980gal とすると、傾斜角度 $\theta = 0^\circ$ のとき、感度軸へ印加する重力加速度 a は、

$$a = 980(\text{gal}) \times \cos \theta = 980(\text{gal}) \quad (7)$$

一方、傾斜角度 $\theta = \angle \theta$ のとき、感度軸へ印加する重力加速度 b は、以下のように表す (図 8) ことができる。

$$b = 980(\text{gal}) \times \cos \angle \theta \quad (8)$$

(8)式を用いて、微小な重力変化を調べるために、精密に角度変化を設定できる評価試験機を製作した。評価試験機は、重力センサの目標性能である 0.1mgal の重力差を印加するために、 0.024° (-0.1mgal) ~ 2.4° (-10mgal) を 1/1,000 度の分解能で与えることができる構造となっている。

7. 重力センサ評価試験

評価試験として、重力センサに対し小さな重力変化を与えて試験を行った。与えた重力の変化は、 0° (980gal)から 30° (849gal)までを、 10° ステップで -15gal, -60gal, -131gal の重力を印加し、周波数の連続計測を実施し、重力変化と周波数変化量の関係を求めた (図 6)。連続計測の結果、傾斜角 30° (-131mgal) の変化に対し周波数の変化は 500Hz を超えること、角度 (印加重力) の変化による周波数応答は再現性があることを確認することができた。

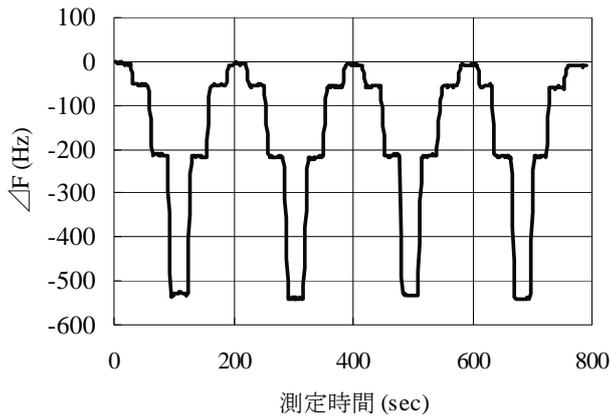


図6 連続測定による重力と周波数の変化図

評価試験機を用いて重力変化量-20mgal を繰り返し印加した時の印加した重力の波形と、重力センサの周波数変化を図7に示す。グラフの中で細線は生記録を、太線は生記録に移動平均を適用したものを示した。20mgal レンジの測定では、試験を実施した建物の暗振動の影響と考えられるノイズ成分が混入している。また、温度の影響と考えられるドリフトも認められた。印加重力のグラフを参考に、20mgal を変化させた場合の理論値である-0.05Hz の変化を考慮すると、解釈図に示したようにドリフトを考慮して描くことができる。これにより、20mgal ~数 mgal の重力変化の検出が可能であることが推察された。

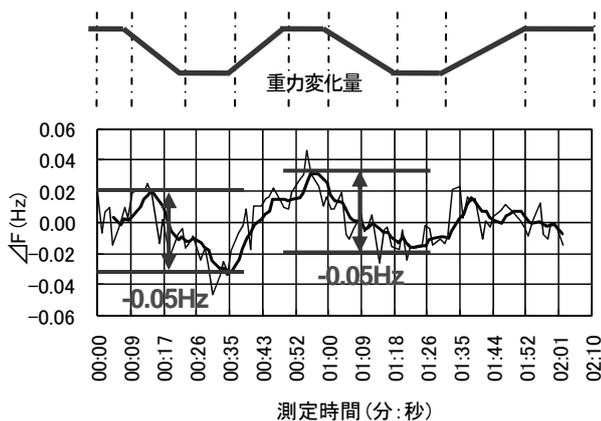


図7 評価試験結果解釈図

8. まとめ

MEMS 重力センサとして、水晶を用いた片持ち梁構造の受感素子を試作した。センサの構造として、AT カットの水晶を片持ち梁構造として、その上に駆動電極と検出電極を設けた静電容量変化型センサを提案した。

重力センサに 20mgal の重力差を与えて評価試験を行った結果、0.05Hz の周波数変化が確認できており、

本センサにより 20mgal~数 mgal の重力変化の検出が可能であると考えられた。

9. 今後の課題と展望

AT カットの水晶を用いることにより重力センサの開発が可能であることが分かった。1次試作では、数 mgal の分解能があることが確認できたものの、温度ドリフトや雑振動の影響がノイズとなって目標とする 0.1mgal の分解能には届かなかった。

2次試作では、オープンの精度を高めて温度ドリフトを抑え、ツインセンサによるノイズ除去等により、さらなる高精度化を図りたい。

謝辞

本研究は、文部科学省研究委託事業【海洋資源の利用促進に向けた基盤ツール開発プログラム】の「小型高性能 MEMS アレイによる移動型重力探査システムの開発研究」により実施した。

参考文献

- 相澤隆生・松岡俊文 (2010) : 低周波数領域を対象とした MEMS 加速度センサの検討, 物理探査学会第 123 回学術講演回講演論文集 183-184.
- 相澤隆生・伊東俊一郎・木村俊則・松岡俊文・尾西恭亮 (2007a) : 地震探査のための MEMS 加速度センサの検討, 物理探査学会第 116 回学術講演回講演論文集, 79-82.
- 相澤隆生・伊東俊一郎・木村俊則・武田哲也・浅野陽一・尾西恭亮・松岡俊文 (2007b) : MEMS 加速度センサを用いた 3 成分受振器の特性, 物理探査学会第 117 回学術講演回講演論文集, 155-156.
- 国見 敬・相澤隆生・松岡俊文 (2009) : 次世代探鉱のための MEMS 素子の開発, 物理探査学会第 121 回学術講演回講演論文集, 203-206.
- 富川義郎 (2002) : 地球自転によるコリオリ・力を利用した地球上移動体の自己検知スピードセンサ, 科研費 (基盤研究(B)(2)) 研究成果報告書, 89-95.
- Muto, T., S. Watanabe, S. Wakamatsu and M. Koyama (2008): Examination for Realization of a High Precision Crystal Sensor, IFCS 2008, pp.532-534.
- 岡野正太郎 (2010) : 水晶周波数制御デバイス, 株式会社テクノ
- 豊澤康男・伊藤和也・Tamrakar S. B.・有木高明・国見 敬・西條敦志・大久保智美 (2008) : 高精度傾斜計を用いた斜面崩壊の動態観測・崩壊予知システムの開発, 労働安全衛生研究所特別研究報告, No.35, 91-106.