地震探査用MEMS受振器の開発

相澤隆生*, 国見 敬***, 伊東俊一郎**, 村田和則**, 関根 透***, 角田貴弘***,
 松岡俊文****, 加藤文人*****

要 旨

これまで地震探査で使用され続けてきたジオフォンに代わる受振器として, MEMSセンサを用いることを検討したが, 民生用に使用されているMEMSセンサは感度が低く, 地震探査に用いることができないため, 新規開発を行った. 高感度化のためには静電容量変化量を大きくする必要がある. その課題を解決するために, 支える梁の形状, 梁の厚さ, 電極間ギャップ, スティックング(張り付き), 気体の粘性の影響, ブラウニアンノイズ等の影響をシミュレーションで確認し, 周波数帯域0~250Hzにおいて感度異常の生じない設計仕様とした. センサエレメントを駆動する回路は, 静電容量変化の読み取り, 波形フィルタおよび出力を全てデジタルで行う方式とした. 性能試験では, ノイズ評価試験を行い, ノイズレベルとして-130dB/√Hz以下を確認した. フィールド性能試験では, 千葉県山武市において, 測線長4kmの反射法地震探査を, 試作品MEMS, ジオフォンおよび市販のMEMSセンサの3種類を用いて対比試験を行った. その結果, 3種類のセンサによる反射断面は類似しており, 実施時期やセンサ設置条件の違いを考慮すると, これらと同等であると考えられた.

Key words : 地震探査 seismic exploration, 受振器 seismic receiver, 高感度MEMS high sensitivity MEMS, MEMS加速度センサ MEMS acceleration sensor

1. はじめに

構造物の設計や防災のための調査にあたり, 地盤内の構造や物理的・力学的性質を推定する方法の一つとして, 物理探査では, 弾性波動, 電気, 電磁波または重力等を計測することにより, 地中を可視化している. 弾性波動を用いる方法では, 屈折法地震探査, 反射法地震探査, 表面波探査等が一般に適用されることが多く, 振動を受振するためのセンサとして, ジオフォンと称されている可動コイル型のセンサが使用されている. ジオフォンは, 地盤の振動をコイルと永久磁石によって電流に変換し電圧として出力するため, 受振に電源を必要としない. ジオフォンは地震探査法の開発初期から唯一の受振素子として用いられてきており, 今日に至るまで小型化・高感度化がなされ, 単価が

数千円から数万円程度と比較的安価なセンサでもある. これに代わる振動センサとしてMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 加速度センサ (以後, MEMSセンサ) の利用が期待されており, 一部では既に実用化がなされている^{1,2)}.

ここで述べるMEMSセンサとは, シリコンの結晶異方性を利用して選択的にエッチング, またはガラスと接合することによってマイクロメートル単位の精度でシリコンウェハ上に3次元構造体の微小機械システムを構築し, 機械的な動作を電気信号に変換, またはその逆を行う素子のことである.

MEMSセンサの特徴としては, 以下の項目が挙げられる.

- ①素材にシリコンを用いているため材料特性が良い
- ②大量生産に向いている
- ③小型化が可能である
- ④周波数特性, 位相特性が優れる

これらの説明として, ①シリコン素材では弾性的な性能は劣化しないため, 自動車部品では20年間の性能保証が付いており, 一方のジオフォンの性能保証が1, 2年間であるのと対照的である. ②マイクロマシンの製造技術として, シリコンウェハのエッチングと貼り付けによって積層を形成することにより, 部品の組立でなくシリコンウェハ上に作られた製品の集合体から切り離すことによって, 一度に同品質の物を大量に製造することができる. そのため,

* サンコーコンサルタント(株)(会員)
 Suncoh Consultants Co., Ltd.
 aizawa@suncoh.co.jp

** サンコーコンサルタント(株)
 Suncoh Consultants Co., Ltd.

*** 曙ブレーキ工業(株)
 Akebono Brake Industry Co., Ltd.

**** (公財)深田地質研究所(会員)
 Fukada Geological Institute

***** 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構
 Japan Oil, Gas and Metals National Corporation

マンパワーによって部品を組み立てるジオフォンに比べると大量生産によって製造コストが低下するメリットがある。③また、マイクロマシン技術を用いているため、微細加工によってセンサの小型化が可能である。④位相特性としてジオフォンでは共振周波数を90度として最大180度の位相のズレを示すことが分かっているが、MEMSセンサでは、位相特性を平坦にすることができる³⁾。空間的に広い範囲の情報を含むという意味で、地震探査では低周波数領域測定の需要が高まっているが、10Hz以下の周波数領域まで感度が伸びているジオフォンまたは地震計では大型・高価となるため、周波数特性が0Hz (DC) ～数百HzであるMEMSセンサの利用が期待されている。

MEMSセンサは、2000年代に開発された小型の容量型MEMSセンサが自動車市場に適用され、ゲームコントローラやスマートフォンへの応用が広まったことで、利用が急速に拡大した。しかしながら、民生用に使われている小型で安価なMEMSセンサは、地震探査に用いるには感度が低く不十分であり、地震探査に使用することのできる高感度なMEMSセンサは存在するものの高価である。地中の振動を計測する技術としては、新妻⁴⁾(1997)によってマイクロマシン技術による振動センサが先駆的に提案され、坑井内での微小破壊音の観測を目的としてMEMSセンサが開発⁵⁾されたのが初めてである。一方、市販の高感度なMEMSセンサを使用したロガーの開発⁶⁾なども行われている。地震探査に用いるためのMEMSセンサとしては、油ガス層を対象とした反射法地震探査のための観測システムとして、米国ION社と仏国Sercel社では既に製品化¹⁾²⁾され、Royal Dutch Shell社でも独自の技術を基にMEMS加速度センサの開発を行っている⁷⁾。しかしながら、これら市販のMEMSセンサは、高感度なものは高価であり、測定の3成分化、多チャンネル化が進む中で、このままでは地震探査に関して価格競争力の低下が懸念されていた。

これまで筆者らは、安価で高感度なMEMSセンサとそれを利用した地震探査機器の開発を進めてきた^{8)~11)}。その結果、MEMSセンサを利用した地震探査システムの構築を行い、データ伝送系と地震探査装置側からのセンサ制御方法の確立に成功し、市街地に近く地盤のノイズレベルがセンサの内部ノイズレベルに比べて高いところでは、十分良質のデータの取得が可能であることを示した¹²⁾。しかしながら

ら前回開発したMEMSセンサは内部ノイズレベル $-120 \sim -110 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$ であり¹¹⁾、ジオフォンに取って代わるには、MEMSセンサの感度特性に関して、未だ開発余地があることが分かった。

MEMSセンサの感度特性と測定系として用いる電子機器の性能は密接に関係しており、例えば、一般的な高分解能のA/D変換機が24bitであることから、 10^7 程度のダイナミックレンジが必要とされていることが分かる。これをセンサ感度の単位であるdB (デシベル) に変換すると140dBとなるため、地震探査で一般に使用されているA/D変換器の性能を満足させるノイズレベル $-140 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$ の精度を持つMEMSセンサの量産化を目指した開発を行った。

2. センサエレメント (機械的振動受感部)

本研究開発では、筆者らがこれまで数多く使用してきた、梁と錘による可動電極層を主構造とした静電容量型の加速度センサを開発対象とした。静電容量型加速度センサは、**図-1**に示す様に、中央に配置された可動電極の両側を固定電極層で挟み込んだ形で表すことができる。その動作原理は、電極面積を S [m^2]、誘電率を ϵ [F/m]、可動電極-固定電極間ギャップを d_0 [m]とした場合、定常状態(加速度印加0)における静電容量 C_0 は式(1-1)となる。

$$C_0 = \epsilon \frac{S}{d_0} \quad (1-1)$$

また、加速度が印加されると、可動電極部分に慣性力が作用し可動電極を支える梁が変形する。これによって、可動電極が移動し、可動電極-固定電極間ギャップが変位しギャップ間距離は d_1 [m]となり、静電容量 C_1 は式(1-2)となる。加速度が印加されたことによる静電容量変化分 $\Delta C = C_1 - C_0$ を電子回路(C/V回路)によって電圧値に変換することで加速度を検出することができる。

$$C_1 = \epsilon \frac{S}{d_1} \quad (1-2)$$

高感度にするためには、静電容量の変化を大きくする必要があり、電極を可能な限り大型化するため4本の梁によって支持する両持ち梁構造にした。この構造で、静電容量変化量及び共振周波数特性などを確認しながら適切な梁の長さ、幅、厚さを求めるために、シミュレーションソフトウェア (CoventorWareTM) による有限要素法シミュレー

<acceleration not applied>

<acceleration applied>

図-1 静電容量型MEMSセンサ加速度検出原理図

ションを実施した。シミュレーション結果の一覧を表-1に示す。

解析のための可動電極と固定電極間の電極間ギャップに関しては、感度とスティッキング（静電気による張り付き）発生リスクを考慮し、3.5（ μm ）に固定して計算を行った。また、可動電極（錘）に関しては、センサエレメントの外形を1辺あたり12mmの正方形とした。

解析結果から試作品の梁の仕様を決める上で判断のポイントは、周波数帯域0～250Hzにおいて振動波形に歪みがなく、忠実に再現できることである。また、製造する上での加工性も重要であり、共振周波数が解析範囲に収まったF、G、H、Iのうち梁の変形量に着目し、最大静電容量変化の大きいFの厚みを少し増した表-1中のI仕様のセンサエレメントを選定し、センサエレメントの試作を行った。試作したセンサエレメントの構造断面を図-2に示す。センサエレメントの可動電極面上にはスティッキング防止を目的とした酸化珪素（ SiO_2 ）のストッパーを設け、それに相対する固定電極面上にはストッパー用にアース接続したシールド電極を設けた。これによって、クーロン力による錘と固定電極間の吸引を防止した。固定電極の信号を外部に引き出すためのフィードスルー構造は、ガラス絶縁層にサンドブラスト（研磨剤吹付加工）によって貫通穴を開けている。エレメントダイシング（シリコンウエハーからの切離し）時は圧力調整孔がある面にダイシングテープ（切出し

時に使用する保護フィルム）を貼り付けることで、内部への水やゴミの浸入を防止している。センサエレメントをセラミックパッケージへ固定した後、セラミックパッケージは封止工程（シーム溶接）により気密封止される。シーム溶接は真空雰囲気中で行われるため、圧力調整穴を形成することによりキャビティ内（センサエレメントの空間；電極間ギャップなど）の空気を抜くことが可能な構造とした。

3. パッケージ（センサエレメントの固着容器）

3.1 パッケージのデザイン

センサエレメントを封入するパッケージは、センサそのものを基板に振動子として固定、あるいは電氣的に接続するための筐体である。また、高感度を目的とするMEMSセンサの場合には、パッケージ内部の空気をできるだけ真空に近い状態まで減らすための封止容器としても重要な意味を持つ。

開発したセンサエレメントは、切離しプロセス終了後、密封を行った。封止容器は、周波数特性向上、ブラウニアンノイズ（気体のブラウン運動によるセンサ内部のノイズ）低減のため、センサキャビティ内を大気圧以下の圧力に保持する必要がある。セラミック材質および金属材料による、封止方法の検討を行った。その結果、パッケージ本体は、真空封止で実績のあるセラミック製とし、それをメタルリッド（半導体封止用の金属蓋）で覆うかたちとした。本センサエレメントは外形が12mmの正方形でMEMS加速度センサの中では大型であることや、センサエレメントの電極とパッケージの電極をワイヤボンド（細線による配線）によって接続する作業上、センサエレメントはパッケージに対して縦型に設置して固定作業を行う必要があることから、センサエレメントの寸法の2倍程度の面積及び6倍程度の厚みを有するものとした。開発したセラミックパッケージを図-3に示す。

表-1 シミュレーション結果一覧表

	Dimension of Beam (μm)			d	q_0	f_0	Δq	w
	L	W	T					
A	8000	600	50	3.5	197	-	-	3.9
B	6000	400	50	3.5	197	-	-	2.9
C	6000	600	50	3.5	197	-	-	1.9
D	5000	500	50	3.5	197	-	-	1.4
E	6000	600	60	3.5	197	-	176	1.43
F	5000	600	60	3.5	197	589	90	0.78
G	5000	600	70	3.5	197	726	30	0.48
H	5000	600	80	3.5	197	900	25	0.32
I	5000	600	64	3.5	197	640	39	0.61

d : gap (μm) q_0 : Initial Capacity (pF); f_0 : Resonance Frequency (Hz);
 Δq : Capacity change/1G (pF/G); w : Beam Displacement/1G ($\mu\text{m}/\text{G}$)

図-2 センサエレメント構造断面

図-3 セラミックパッケージ

3.2 パッケージ内部圧力の検討

①内部圧力と周波数特性の検討

センサエレメントのキャビティ内部は、圧力調整孔から気体を吸引することで圧力を大気圧以下とし、可動電極と固定電極との狭いギャップで生じるスクイズフィルム効果（負荷容量の発生）による可動電極の張り付きを低減させ、目的とする周波数特性を得ることが必要である。本センサのように、可動電極の表面積（約76mm²）に対してギャップが3.5（μm）と非常に狭い場合、ギャップ中の気体は、粘性効果によるダンピングだけでなく流体の圧縮によるばね効果の抗力を発生する。このとき気体の粘性は可動電極の減衰係数、圧縮性は可動電極のばね定数に影響を及ぼす。低周波数領域では流体が押し出される時の粘性効果によるダンピング力が支配的であり、高周波数領域では可動電極の振動速度が非常に速いため空気ばねの力が支配的となり、何れの場合も感度特性の低下として現れる。そのため、これらをシミュレーションによる評価によってセンサを設計する方法が有効である¹³⁾。

そこで、センサエレメントのキャビティ内部の圧力を変化させることによる周波数特性の変化を、スクイズフィルム効果を仮定してシミュレーションを行った¹⁴⁾。シミュレーション結果に基づき、周波数と利得の関係を図-4に示す。より真空に近い1.0Paでは、感度特性は表-1で求めた共振周波数640Hzでピークを示し、それより低周波数側で平坦な感度特性を示し、高周波数側で次第に減衰する感度特性を示す。加速度センサでは共振周波数よりも低周波数側の周波数領域で計測を行うのが普通である。また、パッケージ内に閉じ込められたガスのシミュレーション結果から、圧力減少とともに周波数全体域で感度が上昇していくことが図-4のグラフより読み取ることができる。この結果から、内部圧力が1Paおよび10Paの時、周波数特性が平坦な帯域を広く確保でき、10Paの方が共振周波数でのピークが低いいため、ここでは10Paが最適な内部圧力であるこ

図-4 内部圧力毎の周波数と利得の関係

とが考えられた。

②ブラウニアンノイズの検討

本研究で目指しているノイズレベル-140dB/√Hzでは、MEMSセンサの最小ノイズレベルは、ブラウニアンノイズ（Brownian Noise）と呼ばれる気体ガス分子の衝突によるホワイトノイズにより支配される。

J.Bernstein et al.¹⁵⁾ (1999) によると、ブラウニアンノイズは次の式で表すことができる。

$$F_B = \sqrt{4kTD} \quad (N/\sqrt{Hz}) \quad (2-1)$$

ここで加速度換算ノイズで表すと、

$$a_n = \frac{\sqrt{4kTD}}{MG} \quad (G/\sqrt{Hz}) \quad (2-2)$$

k=Boltzmann constant (J/K), T=Temperature (K), D=Damping coefficient (kg/s), M=Mass (kg), G=9.8 (m/s²)

※ (N/√Hz)；単位帯域周波数の平方根あたりの重量 (N) (G/√Hz)；単位帯域周波数の平方根あたりの重力加速度 (G)

式 (2-2) は、ダンピング係数が大きいほどノイズが大きくなることを示している。ダンピング係数は可動電極の周囲の圧力に依存するため、各圧力下でのダンピング係数をシミュレーションによって求めることにより、パッケージ内部圧力とブラウニアンノイズとの関係を求めることができる。図-5にシミュレーションの結果である圧力下での周波数とブラウニアンノイズとの関係を示す¹⁴⁾。

内部圧力を減圧させるほど理論上ブラウニアンノイズは減少するが、共振周波数でのピーク値は増加するため、2つのパラメータのバランスを考慮して圧力値を決定する必要がある。本センサの場合は、シミュレーション解析の結果、センサ内部圧力値が10Paでブラウニアンノイズが-135dB/√Hz程度となり、1Paでは-140dB/√Hzをさらに上回る。ここでは1Paは最適であることが分かるが、圧力が下がると、落下衝撃等によるセンサエレメントの破壊リスクも増加することを考慮し、前項で適切な周波数特性を示す内部圧力が10Paであったため、センサ内部圧力値を

図-5 内部圧力と周波数およびブラウニアンノイズとの関係

10Paとした。

4. センサ回路

センサ回路は、振動でMEMSエレメントの可動電極（錘）が動くことによって生じる静電容量の変化を電圧に変換する電子回路を用いた。回路の基本構成として、静電容量の変化を電圧に変換して読み取るために、MEMSエレメントに正弦波を印加して、振動による静電容量の変化とともに正弦波の振幅が変化することを検出する静電容量－電圧変換回路（C/V変換回路）を採用した。当初は、変化した振幅のピーク値を保持するためのサンプルホールド回路とノイズを低減するための差動回路を経由した後にA/D変換するアナログ回路としたが、回路の内部ノイズが大きく、目標のノイズレベルを達成することが出来なかった。そこで、ノイズの原因を電子部品の熱雑音等の影響と考えて、電子部品数を少なくできるフルデジタル回路を採用した。フルデジタル回路では、静電容量の変化を電圧に変換して読み取るため、MEMSエレメントに9.6kHzの正弦波を印加し、その印可波形を10倍の96kHzのサンプリング周波数でA/D変換することで静電容量変化を電圧の変化としてデジタルで読み取る方式とした。従来利用されている静電容量－電圧変換のためのアナログ回路（サンプルホールド回路および差動回路）を使用せず、A/D変換によって静電容量変化を読み取るため、フルデジタル回路のMEMSセンサと称することができる。これに加えて、図-6にアナログ方式およびデジタル方式によるセンサ回路のブロック図を示す。熱雑音を避けるために電子部品数を減らし、フルデジタル回路へと見直したことにより $-10\text{dB}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度の感度向上を図ることができた。

MEMSセンサの電子回路には、さらにデジタル信号として取得したデータを記録するために外部とデータ通信（CAN通信：Controller Area Network通信）を行う回路を搭載し、さらに、デジタル値をD/A変換することで、可動電極の振動波形を他機器へも出力できる加速度アナログ出力する回路も付加した。図-7に、3成分MEMS駆動電子回路を示す。

図-6 センサ回路アナログ／デジタル対比ブロック図

5. 性能評価試験

性能評価試験として、パッケージに封入したセンサエレメントにセンサ回路を接続し、ノイズ評価試験を実施した。ノイズ評価試験では、これまでの実験を通じて地盤のノイズレベルが小さい山間部において、1/3オクターブバンド分析器（RION_SA-30）の周波数レンジ1.6Hz～2.5kHzを用いてノイズレベルを測定した。オクターブバンド分析器は、特定の帯域だけを通過させるフィルタを多数持っており、音響および振動分野で周波数毎の振動レベルを求める目的で作られ、使用されている。ここでは、周波数の分解能を1オクターブ（周波数の2倍）からさらに1dB程度まで高めた1/3オクターブバンド分析器を使用した。設計ノイズレベルと評価試験結果を対比するために、内部ノイズレベルに最も大きな影響を与えると思われるブラウンアンノイズのグラフ（図-4）に計測結果をプロットした。ここでの設計値は、センサ内の空気圧10Paに相当する線である。図-8に示すように、ノイズ評価試験結果では、対象とする250Hz以下の周波数帯で、ブラウンアンノイズを評価した際の設計値である $-135\text{dB}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度をやや上回り、ノイズレベルとして $-130\text{dB}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度であることが確認できた。また、250Hz以上の周波数帯でノイズレベルが $-130\text{dB}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下を示すことについては、センサに250Hz以上の感度がないため感度が小さく現れることが推察される。

図-7 3成分MEMS 駆動電子回路

図-8 ノイズ評価試験結果図

6. MEMSセンサのフィールド性能試験

開発中の高感度MEMSの性能を検証するために、実フィールドにおいてジオフォンや既存のMEMSと比較することが必要と考えられる。そこで、実フィールドにおいて試作した高感度MEMSセンサ、市販のMEMSセンサ（SF1500S.A:Colibrys社製）、ジオフォン型受振器（SM-4:ION社製）、の3種類のセンサにより取得した反射法地震探査データの比較を行った。

反射法地震探査データの取得は、図-9に示す千葉県山武市を試験フィールドとして実施した。本地域ではこれまで資源調査や地下構造調査が行われ、陸域海域における反射法地震探査、調査孔を利用したVSP探査が実施されており、地質構造が明らかにされている。

本地域の地質は、地下数百m以浅には更新世の上総層群が分布しており、砂岩泥岩互層によって構成されている。上総層群には天然ガスが多く胚胎しており、天然ガスは水溶性メタンガスであるため地層水（地下水）中に溶けた状

図-9 評価試験実施場所および測線図

態で分布している。また深度1,000～2,000m付近には先第三系の基盤層が太平洋側にわずかに傾斜して分布している。

フィールド性能試験では、延長約4kmの測線を設定し、受振点および発振点間隔10mとし、震源に大型パイプレータ（Y-2400:IVI社製）を使用した。主な実験仕様を表-2に示す。ここでは、同一測線で従来のジオフォンおよび市販のMEMSによる調査、および本研究の成果である試作品のMEMSによる調査を実施したが、実施時期および季節は異なっている。

データ処理では、3種類のセンサともに共通のパラメータによる反射法処理を適用し、CMP重合数を同等にして反射断面の比較を行った。

大型パイプレータによる起震はスイープ長13秒、記録長16秒、起震周波数5～90Hzで行った。この16秒の測定記録波形の比較を行った。図-10に示すスイープ波形は、起震点番号395、受振点番号397の波形であり、振幅は加速度[gal]を表している。上左側は16秒記録、上右側は0～3秒を拡大表示したものであり、上側が試作した高感度MEMSセンサ、下側が市販のMEMSセンサである。16秒間のスペクトル図を下右側に示した。両者の波形を16秒記録で対比すると、0秒の起震開始から徐々に振幅が強くなり、2秒付近でピークを迎え、13秒まで揺れが続き、13秒以降は振幅がほぼ0になるという全体的な波形は似ていることが分かる。その中で、高周波成分となる0～3秒拡大図を見ると特に類似しており、S/N比についても類似している。

測定記録に対して相互相関処理、ダイバーシティスタックを行い、さらにMEMSセンサのデータに対して積分処理をして加速度から速度への変換を行った。図-11の枠内に示す反射波に着目し、ジオフォンとMEMSセンサの起震記録比較を行った結果、試作品、市販のMEMS、ジオフォン共に同様な記録であることが分かった。これらは、調査

表-2 性能評価試験 測定仕様一覧表

	ジオフォン 市販MEMS	試作品 MEMS
測定日	2010/9/28 - 10/6	2012/4/10 - 4/17
測線長	4130m	4130m
展開	4展開(固定展開) ST1-180、ST90-270 ST180-360、ST270-414	8展開(固定展開) ST1-100、ST51-150、ST101-200、ST151-250 ST201-300、ST251-350、ST301-400、ST321-414
震源	大型パイプレータ1台	大型パイプレータ1台
発振点間隔	10m	10m
総発振点数	378点	368点
発振周波数	5-90Hz	5-90Hz
垂直重合数	5回	10回
スイープ長	13s	13s
記録長	16s	16s
受振器	①ジオフォン(6個/点) ②市販MEMS型加速度センサ(1個/点)	3成分高感度MEMS型加速度センサ(1個/点)
受振点間隔	10m	10m
総受振点数	411点	414点
探鉱器	DSS-12	次世代探鉱システム
コリレーション後の記録長	3s	3s
サンプリング間隔	1ms	1ms

図-10 スイープ波形対比

図-11 起震記録対比

地の地盤のノイズレベルがセンサの内部ノイズレベルより大きい場合、各センサの内部ノイズレベルの違いによる影響が記録に現れていないことを示している。

マイグレーション深度断面図を、図-12に示す。深度0～100mには水平な反射面(A)、それ以深では図面左側(陸側)にやや傾斜した反射面が連続している。深度100～400mには平行な反射面群(B)、深度400～500m区間は上下に湾曲した反射面(C)が存在する。深度600～900m(D、

E、F)にも反射面が確認でき、深度900m以降は徐々に反射面の振幅が小さくなる傾向を示す。以上の特徴は、3センサの反射断面上で共通している。ジオフォンは前述した反射面の連続性が最もよく振幅も非常に強い。これはグルーピング効果(6個/点)が大きく寄与していると考えられる。市販のMEMSはジオフォンより連続性や振幅の強さが若干劣るが、ほぼ同等の記録が得られている。試作品のMEMSは、他の2センサと比較してCMP1200～1300

図-12 マイグレーション深度断面对比

付近やCMP1600～1700付近で振幅が弱く連続性が下がっている。逆にCMP1000～1200は連続性や振幅強度がほぼ同等な記録が得られている。今回の測定記録には、単純にセンサ感度の影響だけでなく、グルーピングによる効果、センサの設置箇所の違いに加えて測定季節による地下水位の影響等も影響し、データ処理断面の品質に影響を与えていることも考えられる。

7. ま と め

本研究では、地震探査に用いる振動センサとして、静電容量変化の読み取りから全てデジタル化するフルデジタル方式のMEMSセンサを開発した。フルデジタルのメリットとしては、アナログ回路を廃止することによって電子部品を少なくし、その結果、電子部品の熱雑音による内部ノイズを小さくすることができる点である。

評価試験の結果、試作したMEMS加速度センサは、開発のための設計ノイズレベルに近い $-130\text{dB}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度を有することが分かり、目標性能より $10\text{dB}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度劣ものの、高感度なMEMSセンサを開発することができた。また、MEMSセンサを用いた反射法地震探査のフィールド性能試験により、反射法地震探査の受振器として使用することが可能であることが分かった。フィールド性能試験結果では、市販のMEMSのうち最も高感度のものとの対

表-3 試作品MEMS性能一覧表

項目	目標	結果	備考
計測軸	3 軸	OK	
計測レンジ	$\pm 1\text{ G}$ $\pm 0.2\text{ G}$	OK	
スケールファクタ	1.5 V/G	OK	
電源電圧	$+9\sim 16\text{ V (DC)}$	NG	$+20\sim 28\text{ V}$ 電流増加対応
消費電流	$300\text{ mA (100 mA/軸} \times 3)$	NG	500 mA 改造必要
周波数特性	$\text{DC}\sim 250\text{ Hz (at } -3\text{ dB)}$	OK	
直線性	$\pm 2\%$	OK	
オフセットドリフト	$\pm 200\text{ mG (変化量)}$	OK	
使用温度	$-10\sim 65^\circ\text{C}$	OK	
ノイズ	$-140\text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$	NG	$-130\text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$
他軸	5%	OK	
回路方式	デジタル	OK	
通信	CAN	OK	

比から、試作品は、既存のMEMSと同等の感度であることが分かった。

試作品の性能は、表-3に示す通り、電源電圧、消費電流、ノイズレベルに未達成項目として課題が残された。電源・消費電流に関しては、現行の $1/20$ 程度の $20\sim 30\text{ mA}$ を目標にして、電子回路のASIC化等の効果によって、小型化・省電力化を図る必要がある。ノイズレベルに関しては、回路をASIC化すること、および構成部品見直しにより内部ノイズの低減を見込むことができる。その他製造コスト面では、センサエレメントを構成するシリコンウェハの接合材料をガラスから別の素材に変更することによって小型化およびコスト低下が期待できる。また、パッケージのデ

ザインを試作品の縦置き型から横置き型に変更することによって小型化およびコスト低下が試算されている。

今後は、電子回路、センサエレメントおよびパッケージを改善し、電子回路の集積化によりMEMS本来の特徴である小型化を図る計画である。

謝辞 本研究は、石油天然ガス・金属鉱物資源機構の大型研究「次世代反射法地震探査技術のための高分解能探鉱及び高精度モニタリング用MEMS型加速度センサ素子の開発及び調査技術の研究」および、特別研究「石油鉱業で必要とされる高分解能及び高精度MEMS型加速度センサ素子の研究」にて実施したものである。

参 考 文 献

- 1) Yu, D., Criss, J. and Faber, C. A. M. (2006) : Sensor Design Parametric Study and Impact on Seismic Imaging, 68th EAGE Conference & Exhibition.
- 2) Mougenot, Denis., Cherepovskiy, Anatoly. and JunJiel, Liu. (2011) : MEMS-based accelerometers : expectations and practical achievements, first break volume 29.
- 3) 相澤隆生・伊東俊一郎・松岡俊文・国見 敬・佐伯龍男 (2009) : 地震探査用MEMS素子の開発, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム2009, 地盤工学会関西支部.
- 4) 新妻弘明 (1997) : 地下のマイクロマシンセンシング, 物理探査学会第96回学術講演会論文集, pp.33-34.
- 5) 西澤充智・新妻弘明・江差正喜 (1997) : マイクロマシンニングによる地下弾性波検出のためのシリコン容量型加速度センサの製作, 物理探査学会第96回学術講演会論文集, pp.35-38.
- 6) 黒田 徹・村上文俊・川部喜朗・渡辺義孝 (2008) : デジタル出力型高精度MEMS加速度センサーによるデータロガーの開発, 物理探査学会第118回学術講演会論文集, pp.31-34.
- 7) Hewlett-Packard Development Company white Paper (2011) : HP MEMS Seismic Sensor for Oil and Gas Exploration, 4AA3-4464ENW.
- 8) 相澤隆生・伊東俊一郎・木村俊則・尾西恭亮・松岡俊文 (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回学術講演会論文集, pp.79-82.
- 9) 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加速度センサ素子を用いた3成分受振器の特性, 物理探査学会第117回学術講演会論文集, pp.155-156.
- 10) 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回学術講演会論文集, pp.203-206.
- 11) Sekine, T., Kunimi, T., Tsunoda, T., Matsuoka, T. and Aizawa, T. (2009) : Development of the high sensitive MEMS accelerometer for the seismic exploration system., The 9th SEGJ International Symposium.
- 12) 角田貴弘・国見 敬・相澤隆生・松岡俊文 (2009) : 地震探査用MEMS素子の開発, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム2009, 地盤工学会関西支部.
- 13) 浅沼 宏・阿曾秀明・新妻弘明 (2005) : スクイズフィルム効果を考慮した静電容量型マイクロ加速度センサの特性評価と設計, IEEJ Trans. SM, Vol.125, No.2.
- 14) Aizawa, T., Tsunoda, T., Sekine, T., Kunimi, T., Ito, S., Kato, A. and Matsuoka, T. (2013) : Development of the high sensitivity MEMS accelerometer for oil and gas exploration, ASEG- PESA, 23rd International Geophysical Conference and Exhibition, pp.11-14 August 2013 - Melbourne.
- 15) Bernstein, Jonathan., Miller, Raanan., Kelley, William. and Ward, Paul. (1999) : Low-Noise MEMS Vibration Sensor for Geophysical Applications, Journal of Microelectromechanical Syatems, Vol.8, No.4.

(2016年8月5日受付, 2018年4月12日受理)

Development of MEMS Receiver for the Seismic Survey

Takao AIZAWA, Takashi KUNIMI, Shunichiro ITO, Kazunori MURATA, Toru SEKINE,
Takahiro TSUNODA, Toshifumi MATSUOKA and Ayato KATOH

Abstract

The authors have developed the high resolution MEMS accelerometer for seismic exploration, as an alternative receiver to conventional geophones. The sensitivity of MEMS sensors in the consumer market is so low that they cannot be used for seismic exploration. We developed a new model. To improve the sensitivity, it is necessary to increase the range of variation of capacitance. This was overcome by increasing the size of the electrodes. For the purpose of solving the problems associated with increasing the size of moving electrode, a simulation was run and confirmed the effects of the shape of the beam support, the beam thickness, the inter-electrode gap, sticking, the gas viscosity and the influence of Brownian noise. A design specification was set not to cause sensitivity error in the frequency band $0 \sim 250$ Hz. The circuit to drive the elements was designed to work digitally in reading capacitance change, filtering and outputting. A performance test we carried out included the noise evaluation test, and confirmed that the noise level was below -130 dB $/\sqrt{\text{Hz}}$. As a field performance test, we carried out a 4 km long reflection seismic survey in Sanmu City in Chiba Prefecture, comparing a the newly-developed prototype MEMS, conventional geophones and commercial high-sensitivity MEMS sensors. The result showed the seismic sections by the three sensors are similar, despite the differences in the season and the conditions of sensor installation.

Key words : seismic exploration, seismic receiver, high sensitivity MEMS, MEMS acceleration sensor