

自然地震観測における MEMS 型加速度センサーの特性評価

村上文俊^{1)*}・佐藤比呂志²⁾・黒田 徹¹⁾・阿部 進¹⁾・加藤直子²⁾

¹⁾ (株)地球科学総合研究所

²⁾ 東京大学地震研究所

Evaluation of MEMS Accelerometer Sensor for Earthquake Observations

Fumitoshi Murakami^{1)*}, Hiroshi Sato²⁾, Toru Kuroda¹⁾, Susumu Abe¹⁾ and Naoko Kato²⁾

¹⁾ JGI Inc.

²⁾ Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

Abstract

Technology for imaging the lithospheric structure using earthquakes, such as receiver functions and seismic interferometry, have advanced greatly in the last decade. Three component, low cost accelerometer sensors have been constructed using Micro Electro Mechanical System (MEMS) technology, and are providing new opportunities for earthquake observations. To evaluate the feasibility of MEMS sensors for earthquake observations, dense seismic array observations were carried out using MEMS sensors in Mizusawa district, northern Honshu, Japan, for three months in 2007. In comparison with observed seismograms of velocity sensors, MEMS sensors show high performance for local and regional earthquakes. However, due to high-noise levels from the sensor itself at lower frequencies, MEMS sensors are not adequate for recording teleseismic waves.

Key words: MEMS sensor, earthquake observations, imaging of lithosphere

1. はじめに

近年、レーザ関数解析法・地震波干渉法などの新たな解析方法の開発によって、自然地震を用いたリソスフェア構造のイメージング法が大きく進展した (Wilson and Aster, 2005; Ruigrok *et al.*, 2008). 関東地域では、フィリピン海プレートが太平洋プレートの上に沈み込み両者のスラブは複雑な接合関係を示しており、スラブの形状を含めた地殻・マントル構造を明らかにすることは、当該地域の地震発生メカニズムを理解する上で重要な課題となっている (Wu *et al.*, 2007). とくに稠密自然地震観測データを利用したイメージングは、地殻・上部マントルの詳細な構造を明らかにする上で有効であり (Abe *et al.*, 2007), 首都直下地震防災減災プロジェクトにおいても、制御震源と組み合わせて稠密自然地震観測によるイメージングが予定されている (平田ほか, 2009).

MEMS (Micro Electro Mechanical System) 型三成

分加速度センサーは、自然地震から制御震源データまで取得できる広帯域受振特性を持ち、自己ノイズが大きいものの低価格で可搬性及び耐久性に優れている. MEMS 加速度センサーと電子回路を受振器の筐体内に実装したデジタル3成分受振器の登場は、制御震源を用いた地下構造探査の幅を大きく広げるものとして注目されている (大竹, 2004; 赤間・川中, 2009). この加速度センサーの自然地震観測に対する特性を評価しておくことは、効率的な自然地震観測を行うために重要である. このため、2007年9月28日~12月28日(90日間: 設置撤収を含む)に渡って、岩手県奥州市において自然地震観測を行い、MEMS センサーの特性についての検討を行った. ここでは、MEMS センサーを用いた観測システムと、実際の観測波形に基づくセンサーの特性評価について述べる.

*email: f_mura@jgi.co.jp (〒112-0012 東京都文京区大塚 1-5-21)

2. MEMS 型三成分加速度センサーの導入と自然地震観測システムの構築

2.1. MEMS 型加速度センサーの動作原理と構造

近年 MEMS (Micro Electro-Mechanical System) に関する技術開発、産業分野への適用は目覚ましいものがある。MEMS センサーが一般に使用され始めたのは約 20 年前であり、車両のエアバッグ装置を起動するための衝撃検知用センサーとして使われ始めた。今日、携帯電話からハードディスクまで、日常の民生用機器に様々な形で活用されている。これは、MEMS 製品が半導体製造技術の応用であるため、安価で大量生産できることが大きな要因である。数ある MEMS 製品の中で、加速度計に代表されるセンサーは、最も普及している MEMS センサーである。MEMS 加速度センサーの動作原理には、ピエゾ抵抗型、静電容量型、熱検知型などが実用化されているが、大半は静電容量型である (Fig. 1)。センサー本体である差動キャパシタ・センサーは、加速度に応じて移動するビームに取り付けられた可動プレートと、固定プレートにより構成されている。加速度によりビームが移動した量に応じて、可動プレートと固定プレートとの差動容量が変化する。この変化量をオンチップ回路により計測する。このような加速度検出機構をシリコンチップの中に埋め込むことで、MEMS 加速度センサーが製作される。

こうした MEMS 加速度センサーは、小型で低価格な点で多くの需要を創出したが、自然地震観測や地震探査

の分野における普及は未だに遅れている。これは、MEMS 加速度センサーの性能、特に測定可能な振動レベルと自己ノイズの関係による。つまり、一般に民生用に開発された MEMS 加速度センサーは、感度が低く (ノイズレベルが高い)、地震探査あるいは地震観測には適していない。Fig. 2 は、大竹 (2004) による図に地震探査で必要とされる計測領域 (破線領域) を付け加えたもので、MEMS 加速度センサーを含む各種の地震計とその計測範囲 (振動強度と周波数) を示している。点線領域は、一般に量産化・製品化されている MEMS 加速度センサーの計測領域であり、破線領域は地震探査で必要とされる領域であることから、一般の MEMS 加速度センサーに対し、

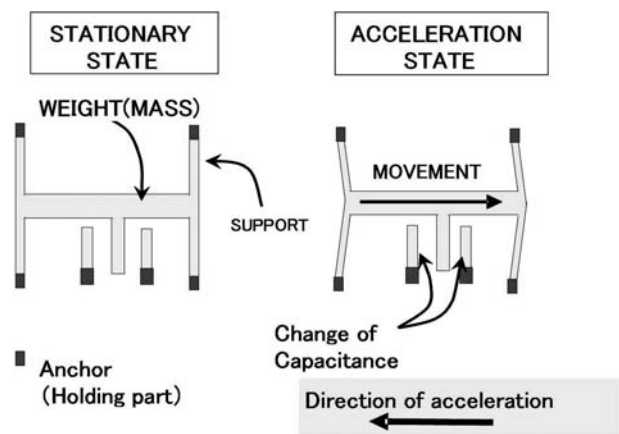


Fig. 1. Schematic diagram showing the principle of capacitive MEMS accelerometer sensor after Yamada (2006).

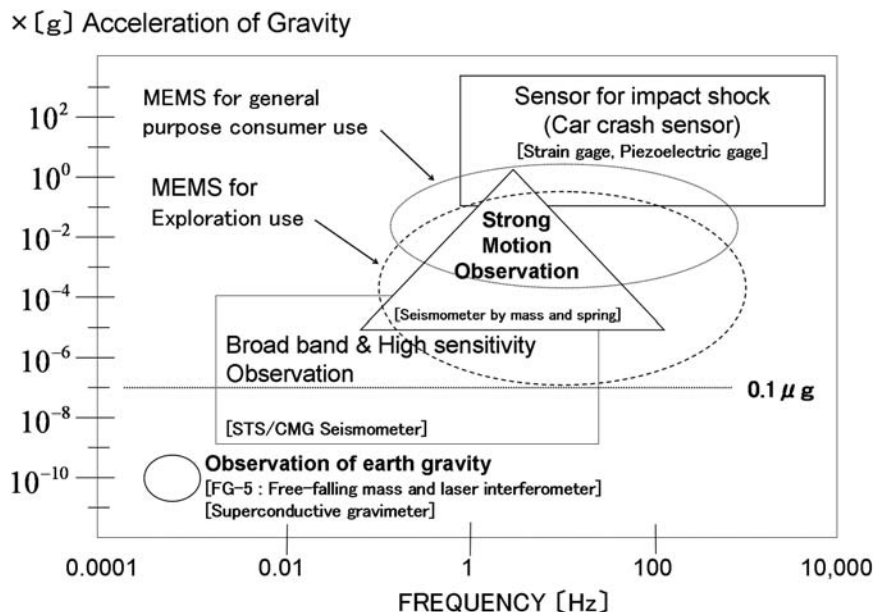


Fig. 2. Frequency and intensity range of acceleration for various objects of oscillation observation and corresponding accelerometer sensors modified after Ohtake (2004).

格段の高精度化が必要となる。すなわち、数 Hz ～数 10 Hz の周波数に於いておいて $0.1 \mu\text{G}$ レベルの測定が必要となる。自然地震観測や、地震探査分野での数量的需要は、その他の民生機器と比べ数桁小さく、この分野への応用可能なセンサー開発が進展しなかった。こうした実情に対し、米国及び仏国の物理探査機器メーカー（米国 ION 社と仏国 Sercel 社）は、1990 年代後半から独自の開発により MEMS 加速度センサーを利用することに踏み切った。石油天然ガス資源探査の分野では、三次元陸上地震探査が一般化しており、数万個のセンサーが各調査に使用される。この様な計測システムが多数稼動する数量的需要が近年高まったことが、センサー開発の契機となった (Gibson *et al.*, 2005)。

仏国 Sercel 社が開発した MEMS 加速度センサー (Sercel Inc., 2007), 及び米国 ION 社が開発した MEMS 加速度センサー (Colibrys Ltd., 2006) は、いずれも、Fig. 2 の破線領域に相当するセンサー性能を持っている。Sercel 社の構造は、Fig. 1 に示した楕形をした構造の拡張版で、楕形構造を多数設けることでセンサー感度を向上させている。ION 社の製品は、これとは異なり、‘proof mass’ と呼ばれる振動を受ける重り部分を形状的に大型化し、感度を高めている。こうした MEMS 加速度センサーは地震探査用探鉱機の一部として組み込まれている。但し、ION 社のセンサー部分については、スイス拠点の Colibrys 社が現在、製造担っている。Colibrys 社では、現在探査用としての性能を有する高精度 MEMS 加速度センサーとして、数種類を製品化しており、アナログ出力型の SF-1500 (単一成分), SF-3000 (三成分), デジタル出力型の Digital-3 (三成分) などを提供している。本研究では、制御震源による地震探査のみならず自然地震観測における MEMS 加速度センサーを用いた軽量かつ可搬性に優れた計測システムの実現可能性検証のために、Colibrys 社のアナログ出力型 SF-3000 及びデジタル出力型 Digital-3 のセンサーを評価対象とした。

Fig. 3 は、デジタル出力型 Digital-3 に関わるセンサー部と付属回路の外観である。図の右端に 2 個の MEMS

センサーが配置されている。これらと直交する成分のセンサーはこの写真では隠れているが、内部に取り付けられており、合計三成分が内蔵されている。Fig. 4 は、アナログ出力型 SF-1500 の内部ブロック図で、MEMS センサーの周辺に ASIC (Application Specific Integrated Circuit) による電子回路が組み込まれている。Digital-3 は、これらアナログ出力型とは異なり、直接 24 ビット精度のデジタルデータを出力するもので、アナログ出力型よりもさらに高精度化が図られている。Fig. 5 は、この Digital-3 の回路ブロック図である。アナログ型の SF-1500 や SF-3000 とは異なり、デルタシグマ型の A/D 変換モジュールが組み込まれ、128 kHz のビットストリームでデジタルデータがデシメーションフィルターへ送られる。Digital-3 では、デシメーションフィルターとして、Cirrus-Logic 社の CS5376A を使用しており、デジタルデータ出力仕様（サンプリング間隔及びフィルター特性）は、この LSI に依存する。デジタル出力という点の他に、Digital-3 で特徴的である点は、16.384 MHz の発振器に、デジタル制御式の TCXO (温度補償型水晶発振器) が使用されている点である。この利点を活用し、高精度のサンプリングクロックを確保し、外部制御を通じて GPS 衛星の正確な秒信号とサンプリングクロックを同期させることが可能である。

2.2. MEMS 型三成分加速度センサーの基本仕様

Fig. 6, Fig. 8 にアナログ型及びデジタル型 MEMS 三成分加速度センサー及びレコーダの外観写真を示す。また、Table 1 にこれらの基本仕様表を示す。アナログ出力型 MEMS 加速度センサーに関しては、Colibrys 社 SF-3000 をアルミ製防水筐体に収納し、上面に水準器とコネクタ（電源入力、アナログデータ出力）を装備した。大きさ及び重量は、外径 100 mm × 高さ 100 mm, 1.0 kg と小型で、運搬が容易である。感度は、 1.2 V/G で、ピーク値としての最大出力は 3 G である (G は重力加速度)。また、ノイズレベル (カタログ値) は、 $300 \sim 500 \text{ nGrms}/\sqrt{\text{Hz}}$ (10-1000 Hz) で、gal (cm/s^2) 換算では、1 mgal 以下である。但し、このセンサーは仕様上 DC 成分、すなわち

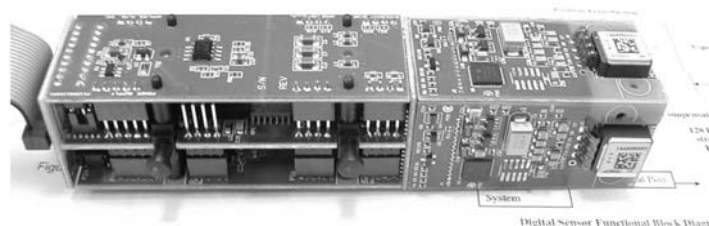


Fig. 3. Outlook of Digital-3 MEMS accelerometer sensor and its electronics unit by Colibrys Ltd. (2006).

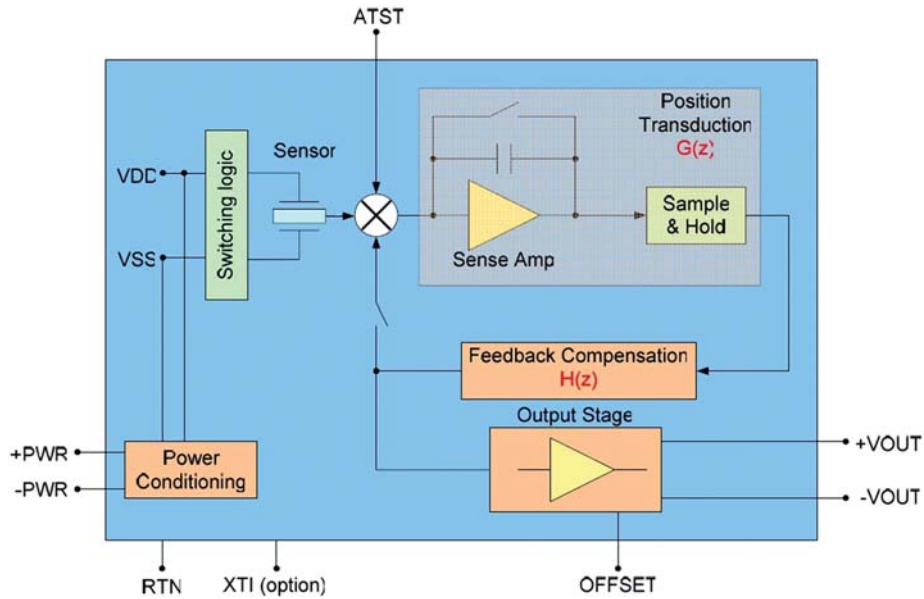


Fig. 4. Block diagram and electrical connections of analog-output type MEMS accelerometer sensor by Colibrys Ltd. (2006).

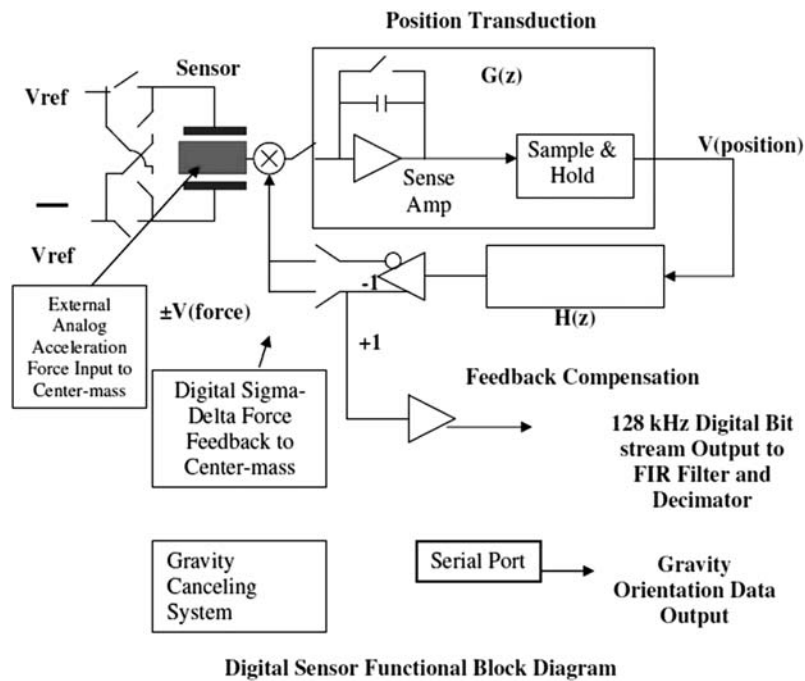


Fig. 5. Block diagram and electrical connections of digital-output type MEMS accelerometer sensor by Colibrys Ltd. (2006).

上下動成分では必ず重力加速度に相当する値が約 1.2 Volt の DC オフセット電圧として出力される。このため、微小なノイズレベルの振動を観測する場合には、レコーダが DC レベルで飽和しないように注意する必要がある。具体的な回避方法としては、コンデンサーで DC 成分をカットする（ローカットフィルター）か、DC オフ

セットをキャンセルする回路を組み込むなどの対処が必要である。

デジタル出力型 MEMS 加速度センサーに関しては、Colibrys 社の Digital-3 をステンレス製防水筐体に収納し、上面に水準器とコネクタ（電源入力、デジタルデータ出力）を装備した。大きさ/重量は、外径 65 mm×高さ

175 mm, 1.4 kg と小型で運搬が可能であるが (Table 1), A/D 変換モジュールに関わる回路が付加されているため, アナログ出力型 MEMS 加速度センサーよりはサイズは大きい. 今回採用した Digital-3 では, 出力に感度の異なる 3 つのモードがある. 最も感度の高いモードでは, ビットの重みが, 58 nG で, ノイズレベル (Nominal) は, 100 nGpeak/√ (10–400 Hz) と規定されている (カタログ値). 従って, アナログ出力型 MEMS 加速度センサー (SF-1500, SF-3000) と対比した場合, 自己ノイズレベルは 1/5 程度であり, 大きく高精度化されていると考えられる. 但し, これは仕様表に準拠した値であり, 実際の測定データでは後述する様に, 1/5 までの差異は見られなかった. この高感度モードでは, 測定加速度範囲は ± 0.2 G であり, ダイナミックレンジ 120 dB 以上を有している. このモードでは, 微動から有感地震まで収録



Fig. 6. Outlook of earthquake observation system employed with analog-output type MEMS accelerometer sensor.

が可能である. この他に, 中感度モード (測定加速度範囲: ± 0.45 G), 低感度モード (測定加速度範囲: ± 1.6 G) が選択できる. また, デジタル回路部分の仕様は, 大部分がデシメーションフィルターに依存している. 基本フィルター特性は, 直線位相と最小位相の選択が可能であり, サンプリング周波数は最大 2kHz から最小 0.5 Hz までは選択できる. 尚, Digital-3 はデジタルデータ出力のためのパラメータ設定等に必要な通信インターフェース回路, 出力データを受け取るための回路, サンプリングクロックの制御回路など, 外部に必要な回路を付加する必要がある.

2.3. MEMS 型三成分加速度センサーを用いた自然地震観測システム

MEMS 加速度センサーを用いた軽量かつ可搬性に優れた計測システムの実現可能性検証のために, MEMS 型三成分加速度センサーを自然地震観測システムとして, アナログ出力型及びデジタル出力型のセンサーを実装した記録装置を検討対象とした. アナログ出力 MEMS 加速度センサーによるシステムとしては, Colibrys 社の SF-3000 を内蔵した三成分加速度センサーに, (株)地球科学総合研究所製の MS2000 レコーダ及びリチウムイオンバッテリーを接続した記録装置を採用した. Fig. 6 にシステム全体の外観を, また, MS2000 を含む全体の記録システム構成図を Fig. 7 に示す. アナログ出力 MEMS 加速度センサーの防水筐体内には, 上下動成分についてのみ重力加速度の DC 成分を除去する電気回路を組み込んである.

次に, デジタル出力 MEMS 加速度センサーによる記録装置は, Colibrys 社の Digital-3 三成分加速度センサーに, (株)地球科学総合研究所製の GPS レシーバ/時刻同期装置, データロガー装置及びリチウムイオンバッテリーを接続し, システム化したものである. Fig. 8 にシ

Table 1. Main specifications of MEMS accelerometer sensors.

	Analog MEMS Accelerometer	Digital MEMS Accelerometer
Multi-Component Sensors	1 vertical component 2 horizontal component	1 vertical component 2 horizontal component
Max. Acceleration	± 3.0 Gpeak	± 1.6 Gpeak (Strong motion mode) ± 0.2 Gpeak/ ± 0.45 Gpeak (High Sensitive Mode)
Sensitivity	± 1.2 Volt/G	58 nG/bit
Resolution (Digital Quantization)	—	60 nG (High Sensitive Mode)
Frequency Response	DC–1,500 Hz	DC–1,000 Hz
Self Noise	300–500 nGrms/√Hz	100 nGpeak/√Hz (High Sensitive Mode)
Shock Resistance (0.5ms, 1/2-sine)	1,500 Gpeak	1,500 Gpeak
Dimensions	100mm in diameter, 100mm in length	65mm in diameter, 175mm in length
Weight	1.0kg	1.4kg

Table 2. Basic specification of the recording system employed with digital-output type MEMS accelerometer sensor.

Data Logger		Digital MEMS 3C Accelerometer	
Max. Records Channels	3ch	Multi-Component Sensors	1 vertical component 2 horizontal component
Data Format	WIN Compressed Format	Max. Acceleration	$\pm 1.6\text{Gpeak}$ (Strong motion mode)
Sampling Frequency	100/250/500/1000/2000Hz	High Sensitive Mode Selectable	$\pm 0.2\text{Gpeak}/\pm 0.45\text{Gpeak}$
Data Storage	Compact Flash Memory	Frequency Response	DC-1,000Hz
Max. Continuous Recording Time	40 days or more @ 4ms Sampling	Digital Quantization	60nG (High Sensitive Mode)
Time Stamp Accuracy	<10 μsec	Shock Resistance	1,500Gpeak (0.5ms, 1/2-sine)
Interfaces	High Speed Serial 460.8 kbps.	Power Requirements	12VDC/0.12A (Typical)
	Bluetooth (BT), LAN	Environments	Dust & Water Proof
	Real Time Waveform Monitor (LAN)	Dimensions	65mm in diameter, 175mm in length
	Wireless (BT), System Control (PDA)	Weight	1.4kg
Power requirements	DC+12V, Automatic System Shutdown in Case of Power Loss	Battery	
	400 hrs or more continuous operation with two 72Ah Li-Ion Batteries	Battery Type	Lithium-Ion Battery
Dimensions	L207mm×W246mm×H174mm	Voltage and Capacity	DC+12V/72Ah
Weight	>2kg	Size	L207mm×W140mm×H232mm
		Weight	7kg

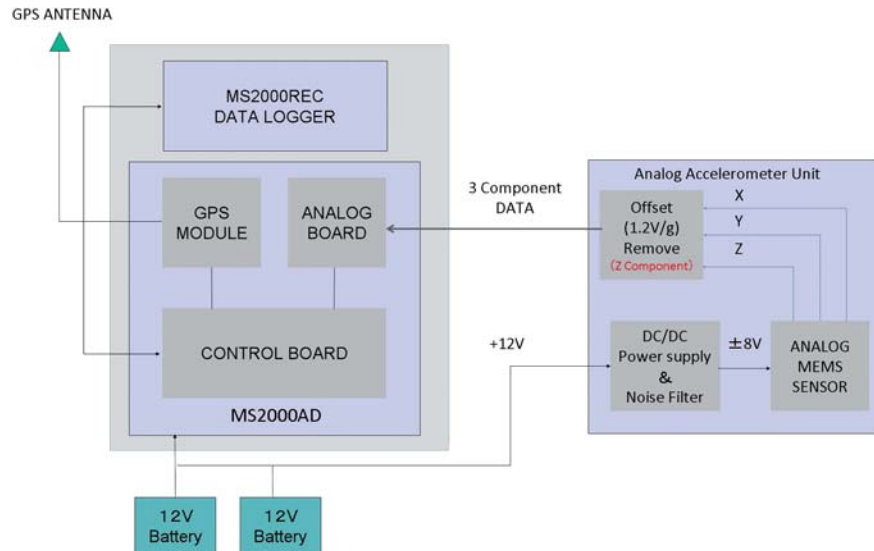


Fig. 7. Configuration of earthquake observation system employed with analog-output type MEMS accelerometer sensor.



Fig. 8. Outlook of earthquake observation system employed with digital-output type MEMS accelerometer sensor.

システム全体の外観を、また、MS2000を含む全体の記録システム構成図を Fig. 9 に示す。

2. 4. MEMS 型三成分加速度センサーに関わる性能確認

アナログ出力型 MEMS 加速度センサーとデジタル出力型 MEMS 加速度センサーを用いて同一場所で観測を

行った場合に、同じ特性の波形が両者とも再現性をもって取得できることは、性能評価の第一要件である。この観点から、同一場所に 2 種類のセンサーを設置し、インパルス振動を人工的に起こし、比較データを取得した。Fig. 10 にアナログ出力型とデジタル出力型 MEMS 加速度センサーで取得した波形と解析結果を示す。測定波形は、左側グラフの上から水平動 X 軸、水平動 Y 軸、上下動 Z 軸の順に、アナログ型を赤色、デジタル型を水色

で示してある。比較のため、アナログ出力型とデジタル出力型の波形振幅の最大値が 1 となるように調整してある。これらの図から、波形はほぼ一致しているが、水平動成分の波形の一部に若干の差異も見られることがわかる。これは、センサー筐体の形状や感知部の筐体内実装位置、筐体の固定状況の違いによる影響などが考えられる。そこで、これらの条件が比較的近い上下動成分のデータに対し、振幅と位相スペクトル、振幅比をとり比

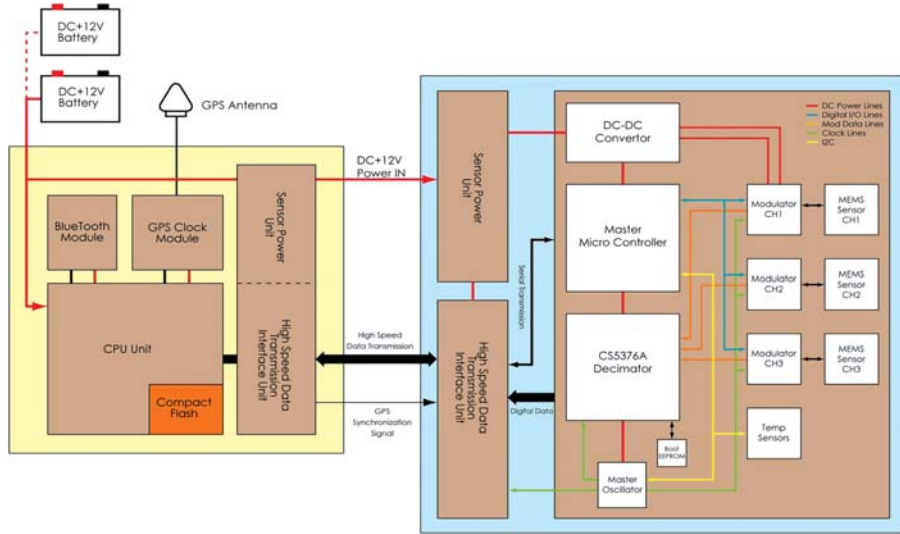


Fig. 9. Configuration of earthquake observation system employed with digital-output type MEMS accelerometer sensor.

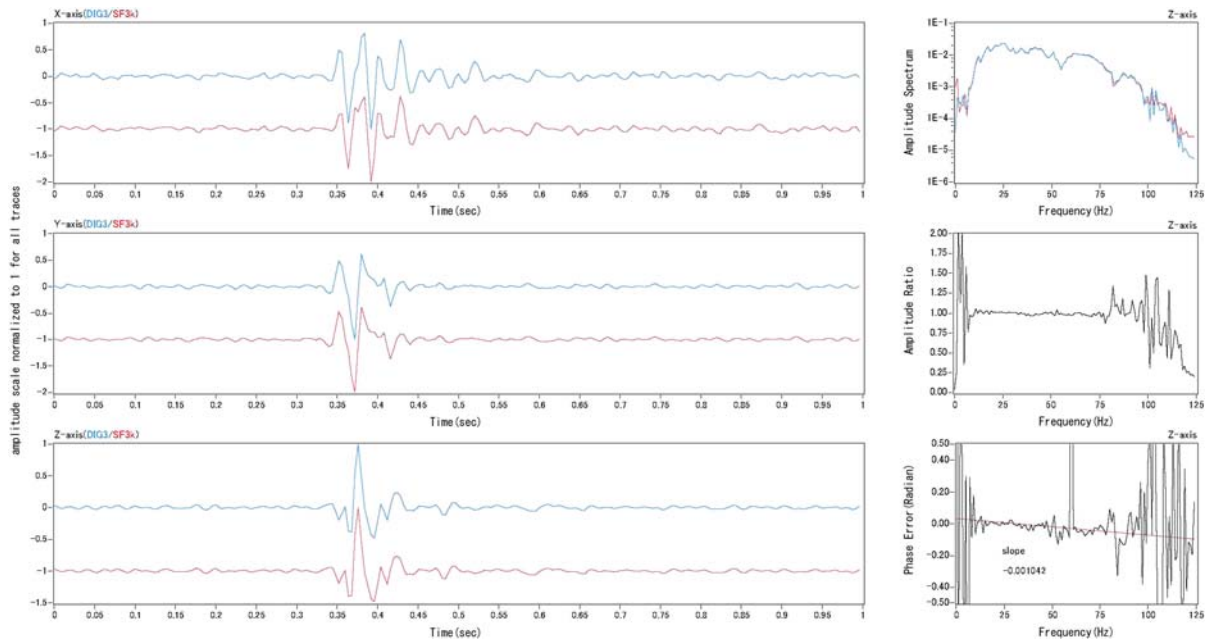


Fig. 10. Comparison of observed waveforms of impulsive seismic source by analog-output type and digital-output type MEMS accelerometer sensors. Right-hand side shows figures of spectrum comparison (top), amplitude ratio (middle), phase difference (bottom).

較することで、両者の波形の違いを定量的に調べた。結果を同じ図の右側グラフの上から、振幅スペクトル、振幅比、位相スペクトルの順に、同じ色分けで示す。インパルス振動の卓越周波数帯域は 10 Hz から 75 Hz 程度であるが、この周波数帯域において振幅スペクトルは一致しており、振幅比もほぼ 1 であった。位相スペクトルについては僅かな傾きを持った直線的な特性を示すが、これはインパルス振動の発振位置からそれぞれのセンサー筐体の設置位置までの距離の違いによる走時差を表すものと考えられる。以上より、アナログ型とデジタル型の

波形はよく一致していると結論付けることができる。なお、アナログ出力型 MEMS 加速度センサーの時刻は既存の MS2000 システムによるものであり、この刻時精度は別途検証されているため、両者を混在して自然地震を観測する場合にも時刻精度の問題は発生しないと考えられる。

次に、スウィープ波形記録による性能評価を目的として、人工震源としてパイプロサイスにより振動を発生させ比較記録を取得した。Fig. 11 と 12 にそれぞれアナログ出力型とデジタル出力型 MEMS 加速度センサーで取

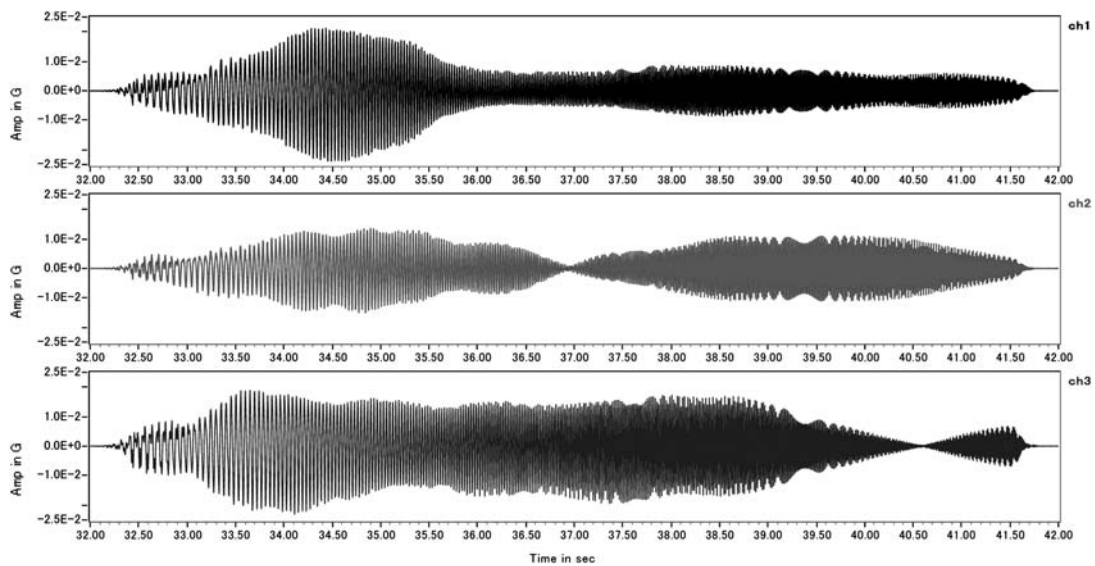


Fig. 11. Observed waveform of vibrator sweep seismic source by analog-output type MEMS accelerometer sensor. Sweep frequency: 8-96 Hz, Sweep length: 10 sec., Taper length: 0.3 sec.

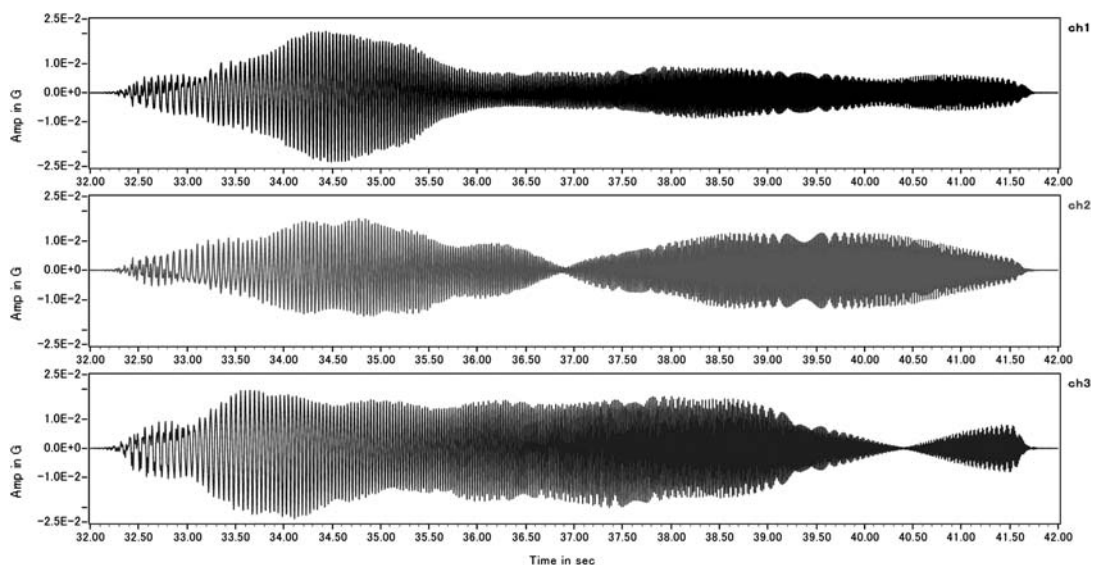


Fig. 12. Observed waveform of vibrator sweep seismic source by digital-output type MEMS accelerometer sensor. Sweep frequency: 8-96 Hz, Sweep length: 10 sec., Taper length: 0.3 sec.

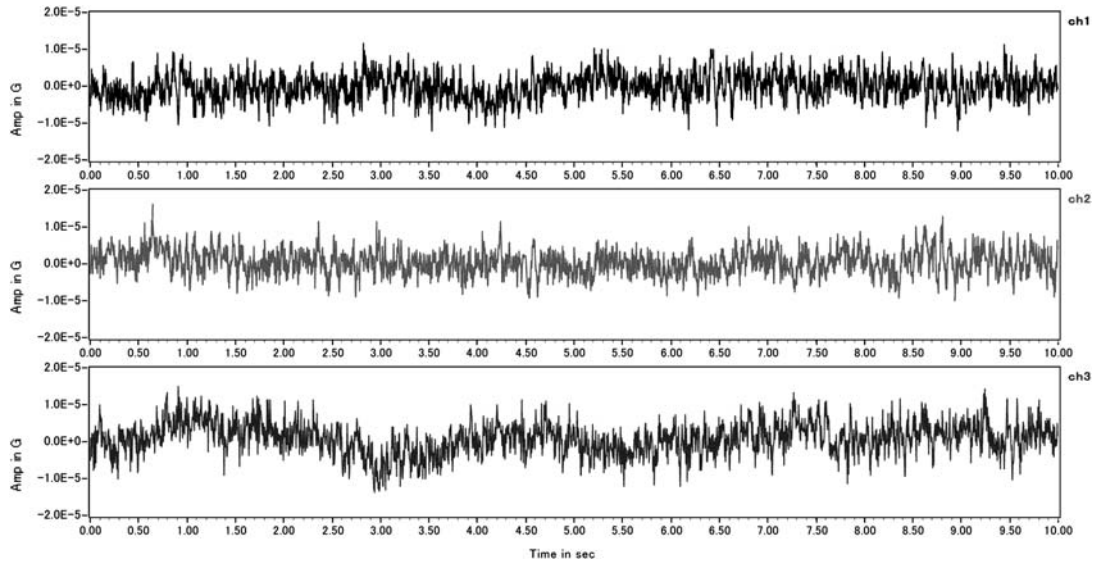


Fig. 13. Waveform of ground noise observed late at night by analog-output type MEMS accelerometer sensor.

得した波形を示す。波形は、上から水平動 X 軸，水平動 Y 軸，上下動 Z 軸である。振動レベルとしては、有感地震に近い振動であり、スイープ周波数は 8-96 Hz に設定している。両センサーとも最大入力範囲に近い振動レベルにおいて飽和せずにデータ収録が可能なのことが確認できた。

センサー基本性能評価の最終項目として、常時微動に関わる比較データを取得した。Fig. 13 と 15 にそれぞれアナログ出力型とデジタル出力型 MEMS 加速度センサーで取得した波形を示す。また、この 10 秒間のノイズデータに対する振幅スペクトラム（単位は Grms）を Fig. 14 と 16 に示す。データは、深夜時間帯 10 秒間のデータを使用した。波形図、スペクトル図共に、上から水平動 X 軸，水平動 Y 軸，上下動 Z 軸の順である。ノイズ波形の RMS レベルを見ると、アナログ出力型とデジタル出力型 MEMS 加速度センサー共に $3 \sim 4 \mu\text{Grms}$ 程度である。これは加速度計センサーの自己ノイズレベルに近い値であり、センサーはほぼ仕様通りに動作していることが確認できた。尚、このデータには常時微動と加速度計センサーの自己ノイズが混在していると考えられることから、両者の自己ノイズレベルに関わる詳細な比較検討は行っていないが、アナログ出力型 MEMS センサーには DC 付近の極低周波領域のノイズが波形及びスペクトルに現れており、デジタル出力型 MEMS 加速度センサーのノイズ特性が優れていることが理解できる。常時微動の卓越周波数はスペクトル表示から 10 Hz 程度であり、DC に近い成分は加速度センサーの自己ノイズと判断される。

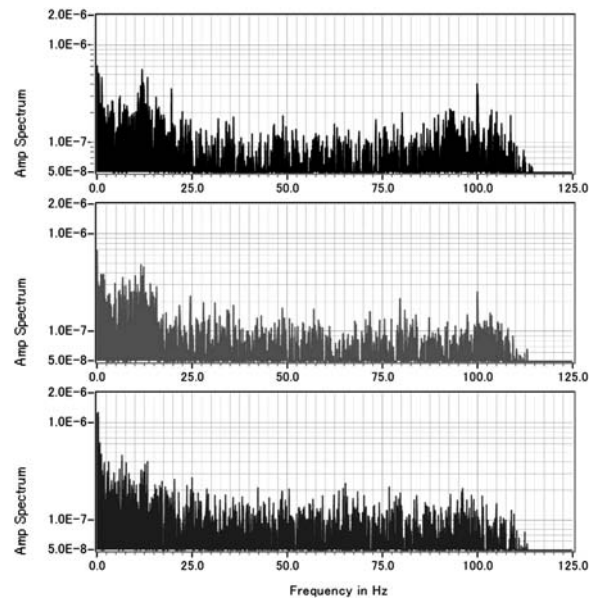


Fig. 14. Amplitude spectrum of ground noise observed late at night by analog-output type MEMS accelerometer sensor.

3. MEMS 型三成分加速度センサーによる自然地震アレイ観測結果

3.1. 自然地震アレイ観測測線

岩手県の北上低地帯に位置する水沢地域においては、石油公団による反射法地震探査が実施され、日本海形成期の初期中新世に形成された正断層群のその後の短縮変形による逆断層運動が明らかにされている (Kato *et al.*, 2006)。その後、地球科学総合研究所を中心とした研究グループによって、震源断層の深部延長に関わる微弱な深

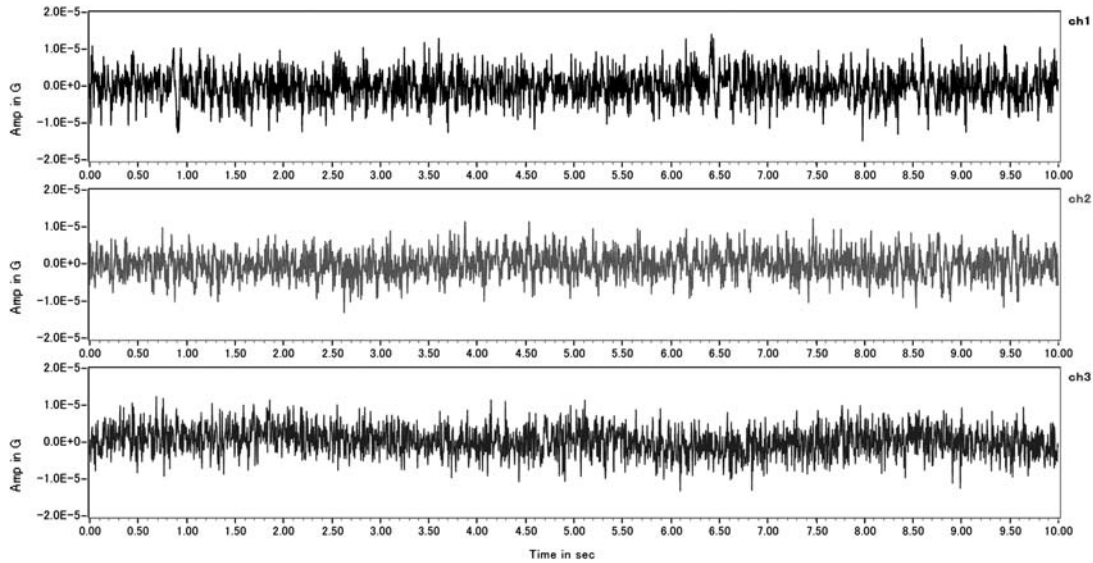


Fig. 15. Waveform of ground noise observed late at night by digital-output type MEMS accelerometer sensor.

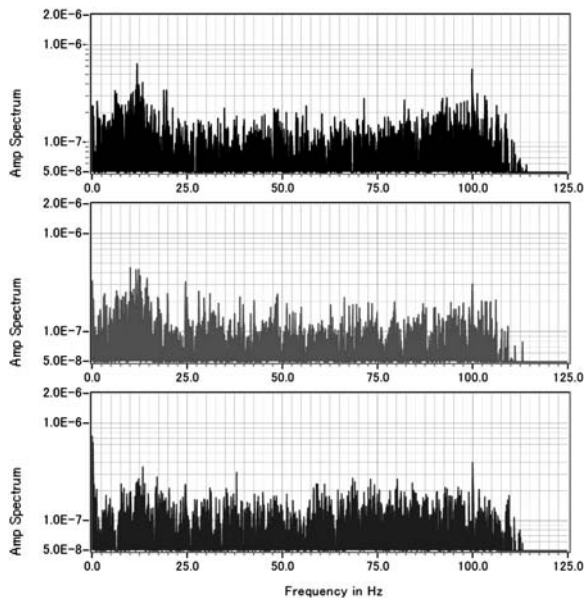


Fig. 16. Amplitude spectrum of ground noise observed late at night by digital-output type MEMS accelerometer sensor.

部反射波の抽出を目的として、制御震源による深部地殻構造探査 (MZ-1 測線) が実施された (阿部ほか, 2007)。この深部構造調査においては、稠密長大展開による反射法、広角反射法及び屈折法データの解析によって、北上低地帯の胆沢扇状地を南北に横断する出店断層の構造が、浅層部から深部に至るまで極めて明瞭にイメージングされた。明瞭な地殻構造が明らかになっていることや、ノイズレベルが低いこと、さらに逆断層の上盤側にもかかわらず断層の反転運動のため地形的に平坦である

ことなどから、自然地震を用いたイメージングを試みるには良好なフィールドである。こうした背景から、自然地震波を用いた地殻構造のイメージングに関するポテンシャルを評価検証するフィールドとして、この岩手県水沢地域を選択した。

MEMS 型三成分加速度センサーによる自然地震アレ観測測線 (Fig. 17) は、制御震源による MZ-1 測線 (阿部ほか, 2007) とほぼ重複する。この測線は岩手県奥州市前沢区生母の北上山地を基点として、北上川西岸地域から胆沢川扇状地を東西に横断し、奥羽脊梁山地の秋田-岩手県境に位置する奥州市胆沢町若柳に至る約 40 km の測線長を持つ。

3.2. MEMS 型三成分加速度センサーの性能検証データ取得内容

MEMS 型三成分加速度センサーを装備した自然地震観測システムに関して、センサー性能に関わる項目の検証を目的として、速度型地震計を含めた比較観測データを取得した。検証項目は、第一に、近地震及び遠地震に関する取得データの品質と周波数特性である。特に、自然地震データ取得における 1.5 Hz 以下の低周波数領域における分解能確保と自己ノイズレベルの確認が重要である。第二の検証項目として、MEMS 加速度センサーの動作機構の確認が挙げられる。具体的には、アナログ及びデジタル MEMS 加速度センサーの鉛直成分に関する DC 成分抑制機構、デジタル MEMS 加速度センサーに関する通信インターフェース回路、データ伝送回路及びサンプリングクロック制御回路等の基本動作の検証が不可欠である。第三は、設置条件、カップリング及

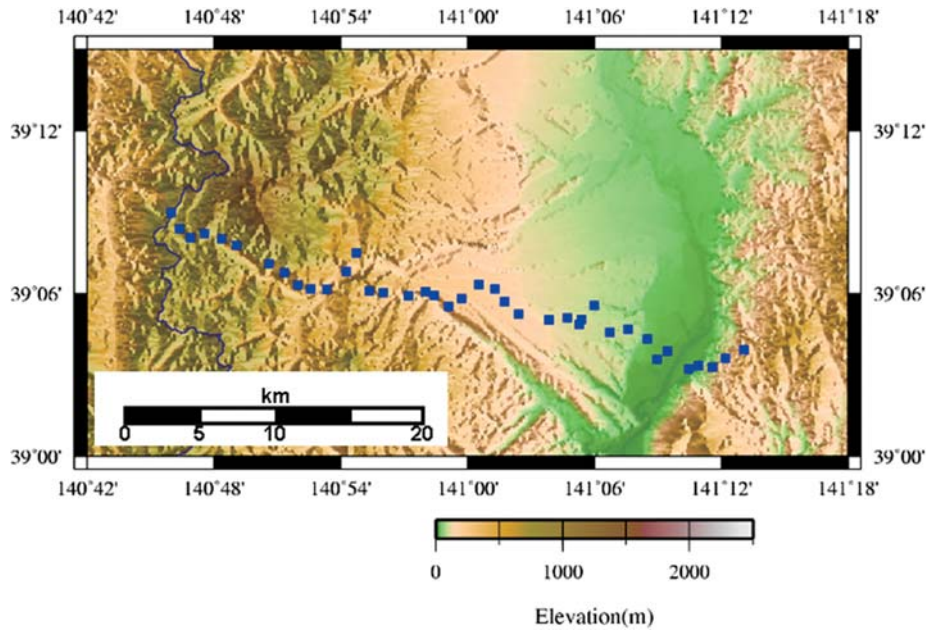


Fig. 17. Location map of the dense seismic array observation in Mizusawa district, northern Honshu, Japan. Small square dots show the observation stations.

び天候状況による出力特性の影響度，実際の観測時の消費電力，さらには筐体の防水性等の，運用上の確認項目である．実際の MEMS 型三成分加速度センサーの性能検証データを取得した期間と機材は以下になる．

3. 2. 1. 観測期間

平成 19 年 9 月 28 日～12 月 28 日（90 日間：設置撤収を含む）．

ただし，奥羽脊梁山地を横断する冬季閉鎖区間 10 点分は 11 月 24 日までの 58 日間とした．

3. 2. 2. 使用機材（予備機材を含む）

本観測に使用した機材を以下に示す．

速度型地震計 A...ennart Electric LE-3D lite 1.0 Hz
.....15 台

速度型地震計 B...Markproducts L-4-3D 1.0 Hz.....
5 台

速度型地震計 C...Markproducts L-22D 2.0 Hz.....
10 台

加速度計 A..... アナログ MEMS 型加速度センサー
JGI AMS-3C.....10 台

[素子部: Colibrys MEMS Si-Flex3000L]

加速度計 B..... デジタル MEMS 型加速度センサー
JGI DMS-3000.....10 台

[素子部: Colibrys MEMS Digital-3]

記録システム A...JGI: MS-2000.....40 台

記録システム B...JGI: DMS-3000.....10 台

記録システム A は速度型地震計 A, B, C 及び加速度

計 A に関して用いられ，記録システム B は加速度計 B に関して用いられた．また，上記の速度型地震計及び加速度計は約 40.0 km の測線において，0.8-1.2 km 間隔で分散して設置し，計 2 箇所（北上山地及び奥羽山地）において，全種類のセンサーを用いた比較観測データを取得した．

3. 3. 近地及び遠地地震観測例

本節では前述のアレイ観測測線において取得された自然地震観測例を示す．全ての表示結果は，アレイ観測測線東端の北上山地内に位置する同一の比較観測点における取得データである．この比較観測点においては，全種類のセンサーによるデータ取得が，全観測期間に互って実施された．この観測点は中新世初期の安山岩類が卓越する地域の岩体上に設定された．

取得された地震観測データについて，レシーバ関数及び地震波干渉法等の地殻構造イメージング手法の適用可能性から下記に区分した．尚，自然地震の震央・マグニチュードなどの情報は，「一元化震源カタログ」による．

i) Type-A (Local Earthquake)

調査測線から 100 km 以内で生じた近地地震．調査測線及びその延長上のアジマスに震源が位置する場合には，逆 VSP マッピング法あるいは地震波干渉法の適用可能性が高い．

ii) Type-B (Regional Earthquake)

調査測線から 100 km 以上かつ震央距離 20 度以内の日本列島周辺で発生したマグニチュード 4.0 以上の地

震. 調査測線及びその延長上のアジマスに震源が位置する場合には, 地震波干渉法の適用可能性が高い. また, 深発地震に関してはレシーバ関数解析の適用可能性が高い.

iii) Type-C (Teleseismic Wave)

調査測線から震央距離 25 度以上 80 度未満のマグニチュード 5.7 以上の地震. レシーバ関数解析及び地震波干渉法の適用可能性が高い.

Fig. 18 に調査測線東端から約 45 km 東方に位置する Type-A の近地地震に関する観測記録例 (原記録) を示す. 尚, この図を始めとして地震記録の表示では, 加速度センサーに関しては積分処理を適用していない. また, 各トレースの平均自乗振幅を正規化する表示を採用している. Fig. 19 は Fig. 18 の観測記録に帯域通過フィルター (0.01-7.0 Hz) を適用した結果を示す. この図から全センサーに記録に関して, ほぼ同等の品質を持った記録が得られていることがわかる. 但し, 帯域通過フィルター適用結果では, アナログ MEMS 型加速度センサーの記録について, 0.5 Hz 以下の低周波数帯域ノイズが特に鉛直成分に関して顕著である. 今回の観測で使用したアナログ MEMS 型加速度センサーの自己ノイズは 300-500 nGrms/ $\sqrt{\text{Hz}}$ であり, デジタル MEMS 型加速度センサーと対比すると仕様上は 5 倍の自己ノイズレベルを持つ. MEMS 型加速度センサーに関しては, アナログ,

デジタルの種別を問わず, 鉛直成分ではフィードバック回路に至る前段階の入力データでは DC 成分が加算されており, 特に自己ノイズの影響を受け易い. 一方, 水平動成分に関しては鉛直成分に比較して, こうした低周波数帯域ノイズの影響は, 相対的に低い. Fig. 20 に Type-A の地震記録に関する水平動成分の振幅スペクトルを, デジタル MEMS 型加速度センサー及び 1.0 Hz 速度型地震計について示した. MEMS 型加速度センサーの記録に関しては, 積分処理後のトレースを入力とした. この図からは, 両者の周波数応答はほぼ同等程度と考えられる. Fig. 21 及び 22 は Type-B の福島県沖及び茨城県沖地震の記録例 (帯域通過フィルター 0.01-5.0 Hz 適用) である. 全般的に, MEMS 加速度センサー記録は良好であるが, Fig. 19 の地震記録と同様に, アナログ MEMS 型加速度センサーの鉛直成分にはセンサー自己ノイズの影響が確認される. 次に, 遠地地震の観測記録例 (帯域通過フィルター 0.01-3.0 Hz 適用) を Fig. 23 に示す. この地震のマグニチュードは 7.8 Mw であり, デジタル MEMS 型加速度センサーでは P 波初動及び後続波が確認できる. しかしながら, アナログ MEMS に関しては, 自己ノイズと遠地地震波の振幅レベルは同等であり, 信号の抽出は困難である. 従って, アナログ MEMS 型加速度センサーは近地の有感地震を記録する強震計としては使用できるが, 現段階では一般的な自然地震観測のセンサー

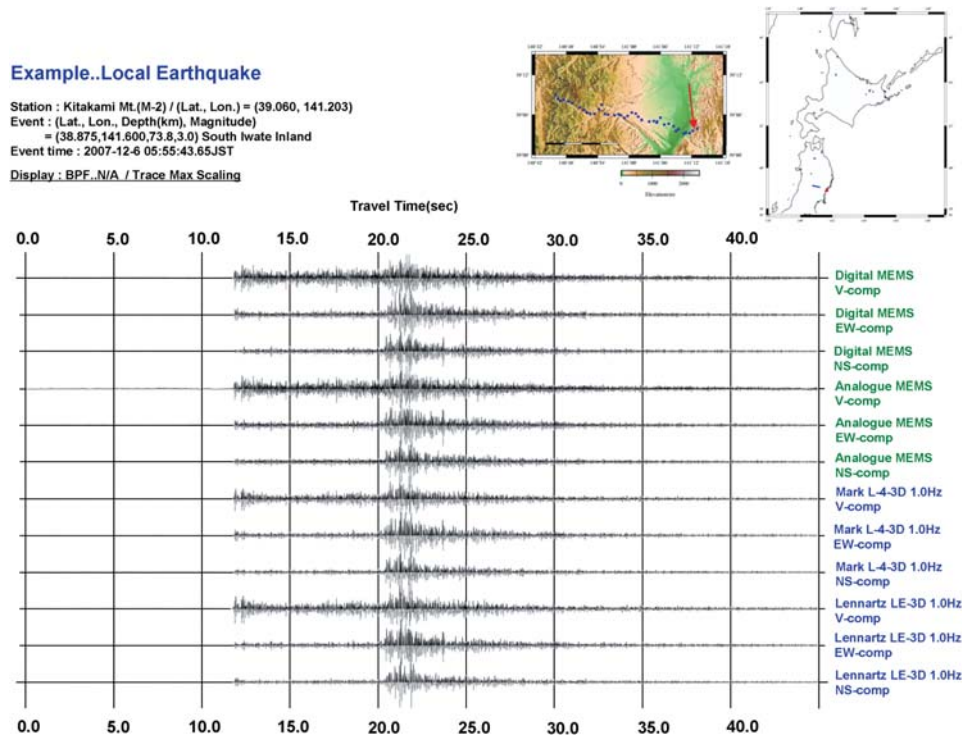


Fig. 18. Example of observed earthquake (Type-A).

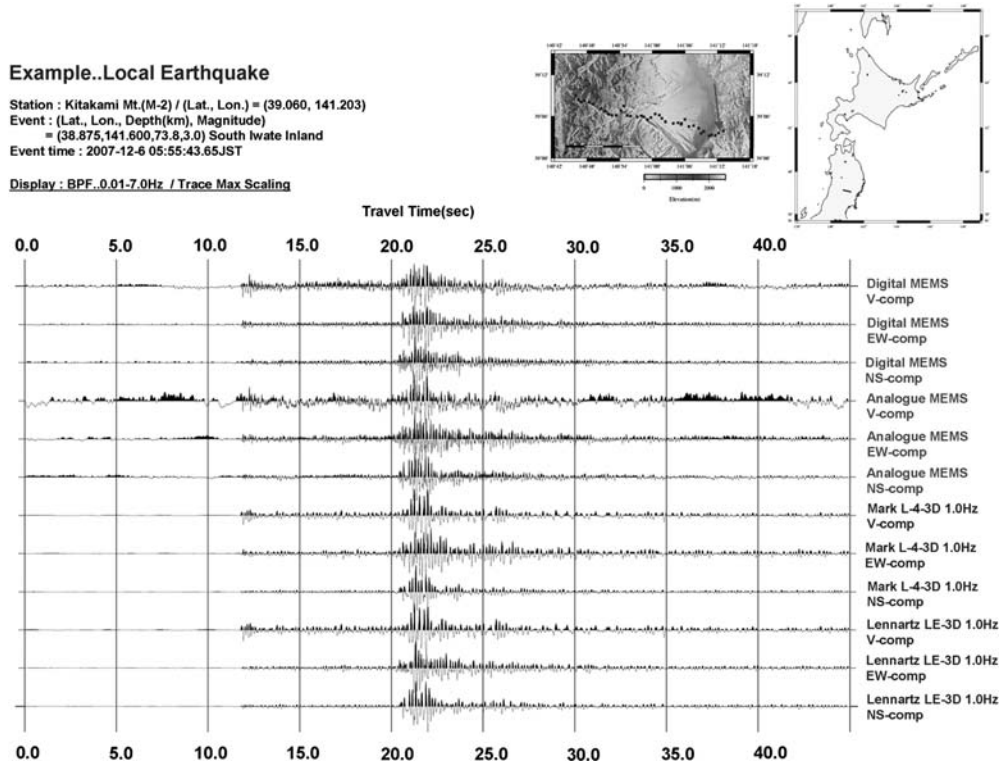


Fig. 19. Example of observed earthquake (Type-A). After applying band-pass filter: 0.01–7.0 Hz.

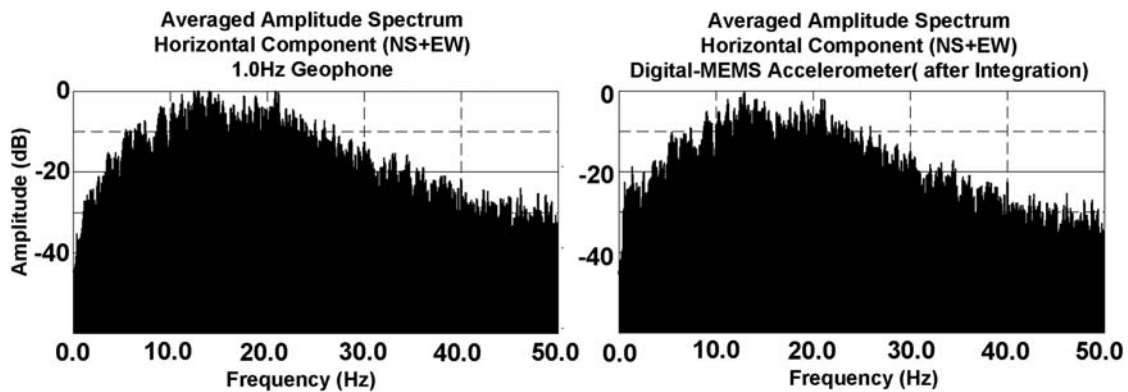


Fig. 20. Comparison of amplitude spectrum for horizontal component of Digital-MEMS and 1.0 Hz geophone sensor (Lennartz LE-3D). Time integration was applied to the observed record of Digital MEMS.

としては採用すべきではないと判断される。

Table 3には制御震源データ, Type-A, Type-B, Type-Cの各自然地震データに関して, イメージング解析法及び解析によって得られるプロファイルの一覧を表示した。併せて, 制御震源用速度型地震計(10 Hz), 自然地震観測用速度型地震計(1.0 Hz)及びデジタル MEMS 型加速度センサーに関して, 各データを用いたプロファイル構築に関わる評価結果を示した。デジタル MEMS 型加速度センサーに関しては, 自己ノイズレベルが低く, 近地地震データの取得に関しては十分な性能を持つものと

期待できる。また, 制御震源データに関しては, 100 Hz以上の有効周波数帯域まで十分に信号を捕捉できると考えられる。

4. まとめ

「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」の「制御震源を用いた地殻構造調査」では, 制御震源と自然地震を震源とした地震波形を解析し, 統合的なプレート構造から地殻構造までの詳細な断面を得ることを目的として研究を進めている。この中の「自然地震波干渉法による

Example..Regional Earthquake[1]

Station : Kitakami Mt.(M-2) / (Lat., Lon.) = (39.060, 141.203)
 Event : (Lat., Lon., Depth(km), Magnitude)
 = (37.304, 141.757, 44.1, 5.9) Offshore Fukushima Pref.
 Event time : 2007-11-26 22:51:37.56JST

Display : BPF..0.01-5.0Hz / Trace Max Scaling

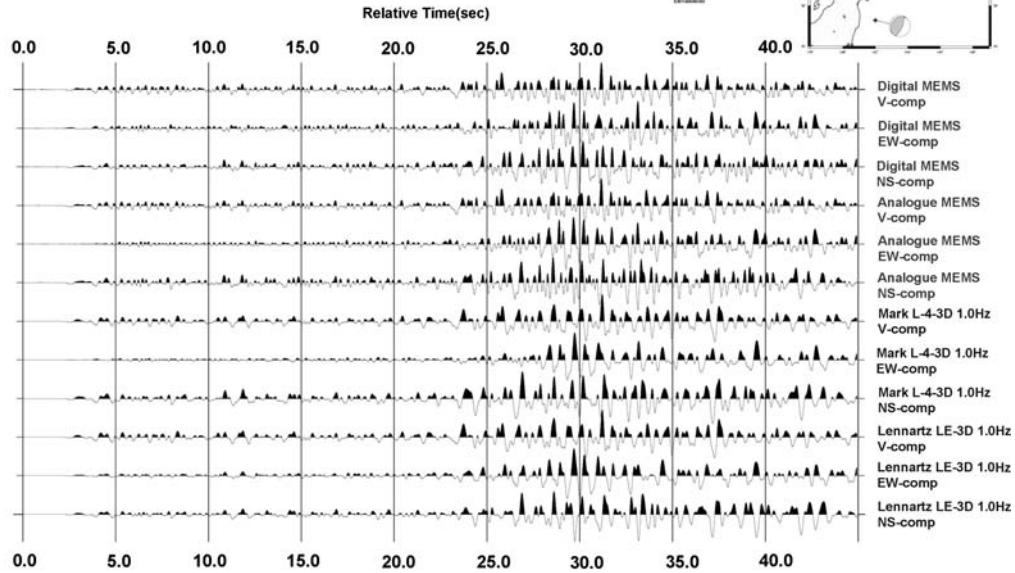


Fig. 21. Example of observed earthquake (Type-B). After applying band-pass filter: 0.01-5.0 Hz.

Example..Regional Earthquake[2]

Station : Kitakami Mt.(M-2) / (Lat., Lon.) = (39.060, 141.203)
 Event : (Lat., Lon., Depth(km), Magnitude)
 = (36.427, 140.696, 52.9, 4.7) Northern Ibaragi Pref.
 Event time : 2007-11-30 18:36:58.08JST

Display : BPF..0.01-5.0Hz / Trace Max Scaling

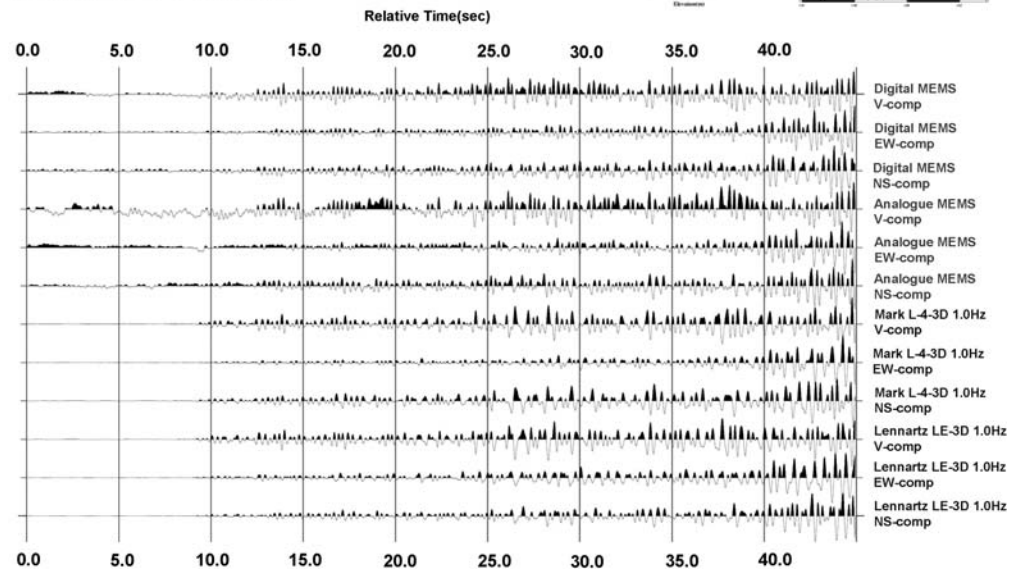


Fig. 22. Example of observed earthquake (Type-B). After applying band-pass filter: 0.01-5.0 Hz.

Example..Teleseismic Wave

Station : Kitakami Mt.(M-2) / (Lat., Lon.) = (39.060, 141.203)
 Event : (Lat., Lon., Depth(km), Magnitude)
 = (-25.810, 177.270, 144.1, 7.8Mw) South Fiji Island
 Event time : 2007-12-9 7:28:39.00GMT
 Display : BPF:0.01-3.0Hz / Trace Max Scaling

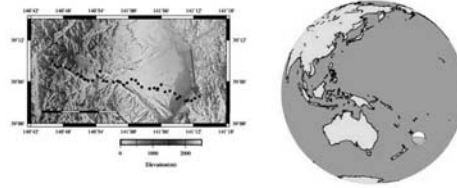


Fig. 23. Example of observed earthquake (Type-C). After applying band-pass filter: 0.01-3.0 Hz

Table 3. Combination of various profiling method. Table shows profiling methods, which employ controlled seismic source and natural earthquake data, and corresponding resultant subsurface profile and related seismic sensors.

	Processing	Profiles	Geophone (10Hz)	Geophone (1Hz)	Digital MEMS
Active Seismic Profiling	CMP Stack Prestack Imaging Migration V/A RAP Processing Refraction Analysis	P-wave Seismic Reflection Profile Migration Velocity Profile AVO Response Tomographic Velocity Profile	◎	▲	◎
Local Earthquake Imaging [Type-A]	Prestack Imaging (Analogous to Reverse VSP) Interferometric Seismic Imaging	Reverse-VSP-CDP Profile P-wave Acoustic Seismic Profile	○	◎	◎
Regional Earthquake Imaging [Type-B]	Interferometric Seismic Imaging	P-wave Acoustic Seismic Profile	▲	◎	○
Teleseismic Wave Imaging [Type-C]	Prestack Imaging (Analogous to P-SV Converted Wave Analysis) Interferometric Seismic Imaging	S-wave Structure Ps Receiver Function Profile PpPp Seismic Profile	×	○	×

◎ very good, ○ good, ▲ poor, × does not work

地殻・上部マントル構造調査研究」として、今後のプロジェクトの基礎となる、制御震源から遠地地震までの観測機器の検討を行った。

取り扱い・経済性に優れた MEMS 型加速度センサーを用いた観測機器と、1 Hz 地震計による観測を、岩手県

奥州市で実施し、制御震源・自然地震観測によって得られた波形データを比較した。その結果、デジタル MEMS 型加速度センサーに関しては、近地地震データの取得に関しては十分な性能を持つと判断できる。したがって、遠地地震も含めた観測としては、取り扱い・経済性など

も考慮して、デジタル MEMS と 1 Hz 地震計の組み合わせによる観測が最適と判断した。

謝 辞

本研究を行うにあたり測線沿いの岩手県奥州市の皆様には、探査に対してご協力いただいた。査読者の東京大学地震研究所森田裕一教授からは有益な御助言をいただいた。地震波形のデータ編集に際しては、気象庁と文部科学省が協力してデータ処理した結果（一元化震源カタログ）を使用させていただいた。ここに記して謝意を表す。なお、本研究は文部科学省受託研究「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」サブプロジェクト①「首都圏周辺でのプレート構造調査、震源断層モデル等の構築等」の一環として実施した。

文 献

- 阿部 進・齊藤秀雄・佐藤比呂志・越谷 信・川中 卓, 2007, 北上低地帯横断地殻構造探査について, 日本地球惑星科学連合学会予稿集, S152-P005.
- Abe, S., Kurashimo, E., Sato, H., Hirata, N., Iwasaki, T. and Kawanaka, T., 2007, Interferometric seismic imaging of crustal structure using scattered teleseismic waves, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, No. 19, L19305, doi: 10.1029/2007GL030633.
- 赤間健一・川中 卓, 2009, PS 変換波を用いた地震探査, 石油技術協会誌, **74**, 3, 247-251.
- Colibrys Ltd., 2006, Product Description, Company Brochure.
- Gibson, J., Burnett, R., Ronen, S. and Watt, H., 2005, MEMS

sensors: Some issues for consideration, *The Leading Edge*, **24**, 8, 786-790.

- 平田 直・酒井慎一・佐藤比呂志・佐竹健治・額田一起, 「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」サブプロジェクト①「首都圏周辺でのプレート構造調査、震源断層モデル等の構築等」の概要, 地震研彙報, **84**, 41-56.
- Kato, N., Sato, H. and Umino, N., 2006, Fault reactivation and active tectonics on the fore-arc side of the back-arc rift system, NE Japan, *Journal of Structural Geology*, **28**, 2011-2022.
- 大竹雄次, 2004, 地震計の現状と MEMS への期待, 日本機械学会 No. 04-76 講習会教材 41-46.
- Ruigrok, E., D. Draganov and K. Wapenaar, 2008, Global-scale seismic interferometry: theory and numerical examples, *Geophys. Prosp.*, **56**, 395-417, doi: 10.1111/j.1365-2478.2008.00697.
- Sercel Inc., 2007, Digital sensor unit 3C DSU/428XL, Company Brochure.
- Shragge, J., Artman, B. and Wilson, C., 2006, Teleseismic shot-profile migration, *Geophysics*, **71**, SI221-229.
- Wilson, D. and R. Aster, 2005, Seismic imaging of the crust and upper mantle using regularized joint receiver functions, frequency-wave number filtering, and multimode Kirchhoff migration, *J. Geophys. Res.*, **110**, B05305, doi: 10.1029/2004JB003430.
- Wu, F., Okaya, D., Sato, H. and Hirata, N., 2007, Interaction between two subducting plates under Tokyo and its possible effects on seismic hazards, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L18301, doi: 10.1029/2007GL030763.
- 山田 剛良, 2006, Buyers' Guide 〈3 軸加速度センサ〉, Nikkei Electronics, 2006 年 10 月号, 71-77.

(Received January 14, 2010)

(Accepted March 1, 2010)