

航空機用加速度計による地震観測

— 加速度計を高感度長周期海底地震観測に用いる可能性の検討 —

地震研究所 { 片尾 浩
 { 笠原 順三
 { 是沢 定之

(平成2年6月28日受理)

要 旨

全地球的な地震観測には大洋域での観測が必要であることは論を待たないが、広帯域の海底地震計を開発するためには多くの障害がある。我々は将来の長周期海底地震計に用いることを念頭にして、そのセンサーの候補のひとつである航空機の慣性航法用小型サーボ加速度計を用いた試験的地震観測を行った。

観測は、地震研究所油壺地殻変動観測所の観測坑内において、従来海底地震計に用いてきた速度型地震計とともに、2種類計3台の加速度計を使用して行った。また、加速度計の特性に大きな影響を与える気温変化をみるための精密温度測定もあわせて行った。

その結果、これらの加速度計は15~0.05 Hzの帯域では0.1 μ G (100 μ gal)の分解能を持ち、やや長周期の高感度地震計として十分使用可能であることを確認した。

1. はじめに

地球の3分の2は海で覆われているにもかかわらず、現在の地震学的観測はほとんど陸上でしか行われていない。そのため観測点分布が不均質となり、地球内部の構造解析等のグローバル地震学には著しい制約となっている。グローバル地震学を今後進めていくためには大洋地域での海底地震観測が不可欠である。

しかし、現在の海底地震計は微小地震や人工地震を観測の対象にしており、地震計は主に固有周期が数Hzの速度型(例えば地震研究所型海底地震計は2Hz)を使用している。遠地地震の観測はこれらの速度型地震計では不十分であり、より広帯域・高感度でダイナミックレンジが広い海底地震計の開発が必要である。また、従来の陸上用長周期地震計をそのまま海底地震計に用いることは、その物理的大きさや設置回収時の衝撃等が大きな障害となって、特に3成分の観測ともなると極めて困難である。

小型サーボ型加速度計は、振子にかかっている力(加速度)をサーボ機構の電氣的パネで零位置になるようにバランスさせ、その時のフィードバック電流から加速度を検出するもので、もともと航空機の慣性航法用に開発されたものである。このサーボ型加速度計は、

- 1) 衝撃に強い
- 2) DC から数百 Hz までフラットな周波数特性を持つ

- 3) Linearity が良い
- 4) ダイナミックレンジが広い (100-120 dB)
- 5) クロスカップリングが小さい
- 6) 傾斜計としても使える
- 7) 小型軽量
- 8) センス方向を自由に選ぶことができジンバルが不用
- 9) 長周期地震計に比べると安価

等の優れた特徴を有しており、超広帯域海底地震計センサーの候補として有望である。その反面、温度係数が極めて高い。ムービングコイル型の速度型地震計に比べると消費電力が大きい等の欠点もあり (Fig. 1), 実際の応用にあたっては細心の注意が必要である。航空機用サーボ型加速度計はこれらの欠点あまり問題にならないような振動計測や強震計としては広く用いられるようになってきているが、極微小加速度の地震観測に適用した例はほとんど無い。分解能の限界, 1 Hz 以下の長周期地震観測 (精度 0.1 μG 以下, 周期数百秒) に使用可能かどうか等もよくわかっていない。


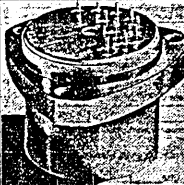
	 JA-5V 日本航空電子	 QA-1400 Sundstrand
電流感度(mA/G)	1.0	1.3
バイアス温度係数($\mu\text{G}/^\circ\text{C}$)	70	10
感度温度係数(ppm/ $^\circ\text{C}$)	200以下	180
分解能(μG)	1以下	1以下
周波数応答	DC-500HZ	DC-800Hz
ダイナミックレンジ(dB)	120	120
ケースアライメント(mrad)	8.7以下	2.8
消費電流(mA)	20	20
耐衝撃(G)	100	200
重量(g)	80	80
1G=978gal(cm/sec ²)		

Fig. 1. Comparison of accelerometer performance.

本研究は海底地震計への応用を念頭におき、周期10秒程度のやや長周期を目標にして、小型サーボ加速度計による分解能 $0.1 \mu\text{G}$ 程度の高感度地震観測が可能かどうかを調べることを目的としている。

2. 実験方法

1989年3月9日から4月10日の期間、サーボ加速度を用いた地震観測実験を東大地震研究所油壺地殻変動観測所の観測坑内で行った。観測装置のブロック図を Fig. 2 に示す。

2-1. センサー

この実験では2種類の航空機用サーボ型加速度計を評価した。日本航空電子社製の JA-5V を2台と Sundstrand Data Control Inc. 製 QA-1400 を1台を用いた (Fig. 1)。この2つのセンサーの性能は感度等はほぼ同じであるが、温度係数は QA-1400 の方が優れている。20 k Ω の精密出力抵抗を取付けて加速度感度を 20 V/G (JA-5V) および 26 V/G (QA-1400) とした。今回の実験では、センサーは横置きにし水平成分として使用し、専用の取付けブロックを用いて3点支持の水平台に取付けた。観測坑の床面に金属製の台座板を置き、その上に水平台を乗せた。正確にセンサーが水平になるように、水準器および加速度出力の DC レベルをオシロスコープで見ながら水平台を調節した後、センサー部分全体を直径 40 cm のガラスの半球で蓋をした。加速度計の電源は観測坑内の交流電源から $\pm 15 \text{V}$ の直流安定化電源ユニットを通じて供給した。

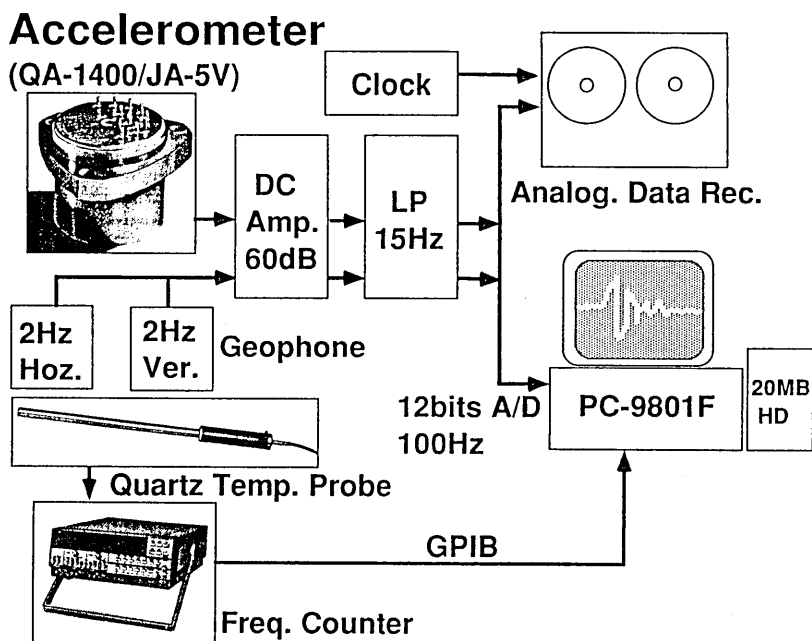


Fig. 2. Schematic block diagram of the observation instruments.

加速度計との比較のために、従来我々が海底地震計のセンサーとして用いている 2 Hz の速度型地震計(マークプロダクト社製 L-22E)上下・水平各 1 成分の観測も同時に行った。

2-2. 記録装置

各センサーの出力は直流アンプ(日電三栄製 6L02)で 50~60 dB (300~1000倍)増幅した後、主に低周波をみるために 15 Hz 以上をアナログフィルター(エヌエフ製 P-84)でカットしてから記録した。データ収録はアナログ連続記録とデジタルトリガー記録の 2 つの方式を併用した。

主に脈動と短時間のドリフトをみるためのアナログ連続記録では、FM 方式アナログデータレコーダ(ソニーマグネスケール製 A-814)に直接記録した。テープスピードを 2.4 cm/s にすると約 8 時間の連続記録(DC~300 Hz)が得られる。入力は、地震計上下・水平各 1 成分、加速度計 2 台の 4 チャンネルで、さらに精密水晶時計(金石舎製 MCXO-019)の時刻信号も合わせて収録した。アナログ連続記録は上記観測期間のうち筆者らが現地に行った機会に、主にノイズの少ない夜間をねらって断続的に数回行った。

地震記録を得るためのデジタルトリガー記録では A/D 変換ボード(カノーブス社製 ADX-98E)を組み込んだパーソナルコンピュータ(NEC 製 PC-9801F)にデータを取りこんだ。A/D 変換の入力電圧範囲は ± 5 V、変換精度は 12 bit、サンプリング周波数は 100 Hz で、水平動地震計、加速度計 2 台および時刻信号の計 4 チャンネルを取りこんだ。60 dB の増幅の場合、最小ビットは約 $0.1 \mu\text{G}$ に相当する。測定用プログラムは新たに作成し、トリガー条件はトリガーチャンネル(水平動地震計に設定)の連続する 16 個のサンプル(0.16 秒間)の絶対値の和があらかじめ設定したレベルを越えた時に満たされるようにした。トリガーがかかると、トリガー後 60 秒間計測し、メモリー上のリングバッファに蓄えられているトリガー前 20 秒間データを加えた計 80 秒間のデータがハードディスクに書き込まれる。

2-3. 温度測定

加速度センサーは DC オフセット、感度等の特性が温度によって大きく変化するので、水晶温度プローブ(電光社製 QT-211Y)を用いて坑内の温度変化を $1/1000^\circ\text{C}$ の精度で監視するようにした。温度検出プローブは加速度センサーの近傍にセットし、出力信号の周波数(水晶の振動数)をユニバーサルカウンタ(岩通社製 SC7204)で測定する。周波数値は GPIB パラレルインターフェースを介してパソコンにとりこむようにした。アナログ連続記録を行う間は 10 分間隔で温度のデータだけを連続的に記録し、デジタルトリガー記録の場合は 1 個の地震のデータ収録終了直後の値を波形データと合わせて記録した。

また、加速度計自体も温度センサーを内蔵している。その測温精度は 0.1°C で水晶温度プローブに比べて劣るが、将来の応用に備えて同時にモニターしておいた。

3. 結 果

3-1. 脈動およびノイズ

アナログ連続観測された脈動の例を示す。Fig. 3 では記録再生時に 1/4 Hz のローパスフィルタをかけてある。周期数秒の脈動がはっきり記録されており、振幅は $0.5 \mu\text{G}$ ($500 \mu\text{gal}$) p-p 以上ある。同時に用いた 2 台の加速度計間の一致も極めて良い。2 つの加速度計記録は、2 台の JA-5 V をセンス方向を正反対に設置して同時に測定したもので、図では片方の局性を正負逆転させて表してある。従って、同じ原因による電気的なノイズであれば逆位相となるはずなので、これらの信号は実際の地動をとらえているものであると判断できる。

Fig. 4 は 1/8 Hz のローパスフィルタをかけてさらに低周波をみたものである。2 台の加速度計記録の間で一致しない部分が見られるがそれは数 10 秒の周期成分であり、周期 20 秒程度までならば問題はなさそうである。

以上の観測結果から 15 Hz ~ 0.05 Hz の範囲では $0.1 \mu\text{G}$ (100mgal) の分解能で十分観測が可能であることがわかる。

この他、加速度記録の DC レベルに時々奇妙な段階状の“とび”が現れているのが記録されていた (Fig. 5)。この“とび”は測定中の 2 台の加速度計に同時に現れることはほとんど無い。また、このとき速度型地震計にもまったく反応は見られない。また、2 台のセンサー取付け台のうち軽量のものに取付けられた加速度計にこの現象がより頻繁に起き

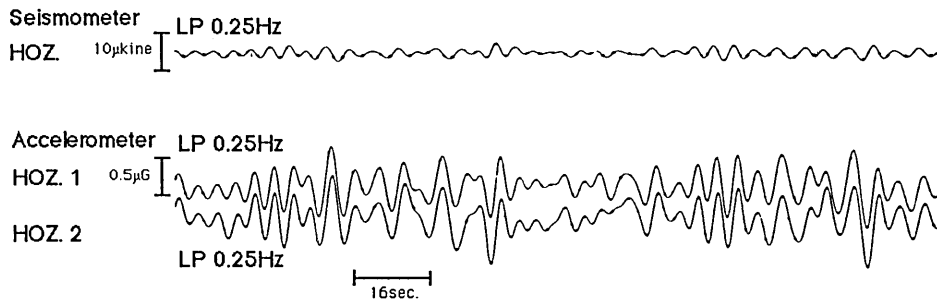


Fig. 3. Example of analog seismic record applying 1/4 Hz low-pass filter.

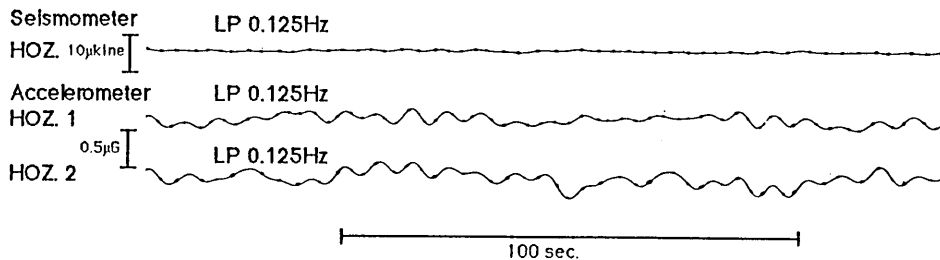


Fig. 4. Example of analog seismic record applying 1/8 Hz low-pass filter.

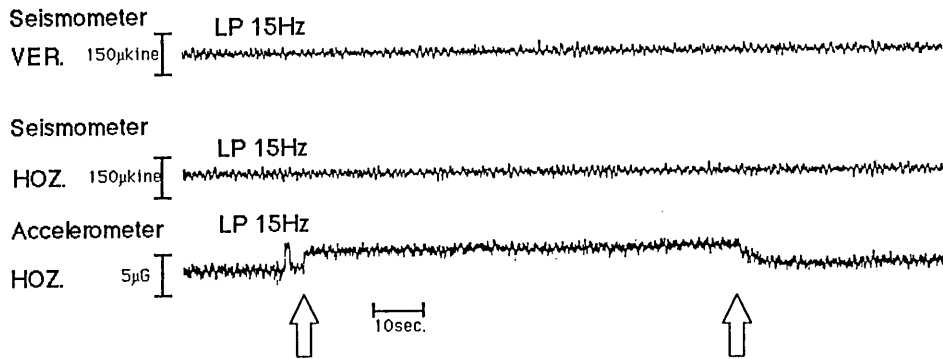


Fig. 5. An example of a "strange step" observed on the acceleration record.

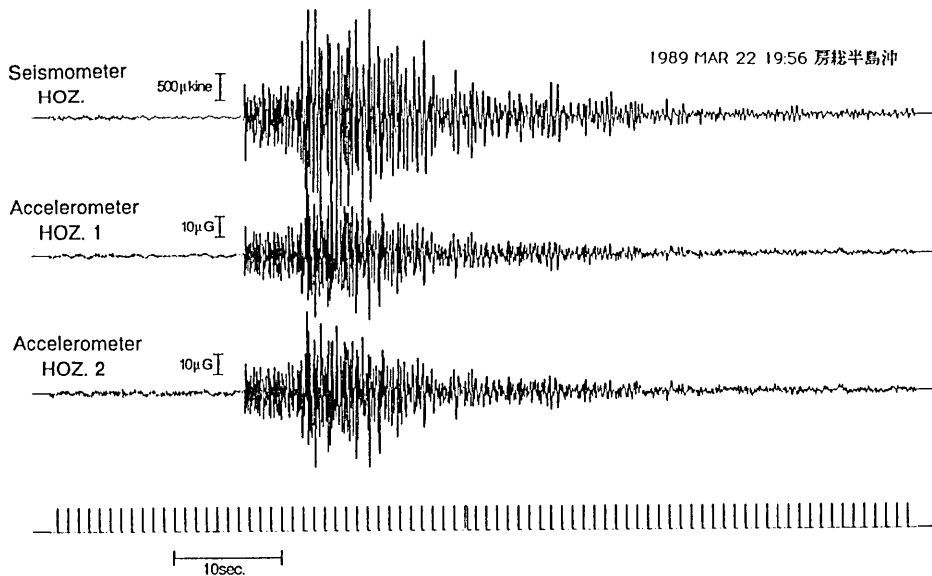


Fig. 6. Example of digitally recorded seismograms. An earthquake took place off the Boso Peninsula on Mar. 22, 1989. All sensors are horizontal components. Top: L-22 conventional velocity type seismometer. Middle: JA-5V accelerometer. Bottom: another JA-5V.

ることや、“とび”が現れる頻度が時間的に徐々に減少していくことから考えると、センサーの周りの信号線等の微小な動きやセンサー取付け台が自然に傾いたりしたことが原因ではないかと思われる。

3-2. 地震波形

観測期間中デジタル記録方式で総計 213 個のデータファイルを得た。自動車その他の人

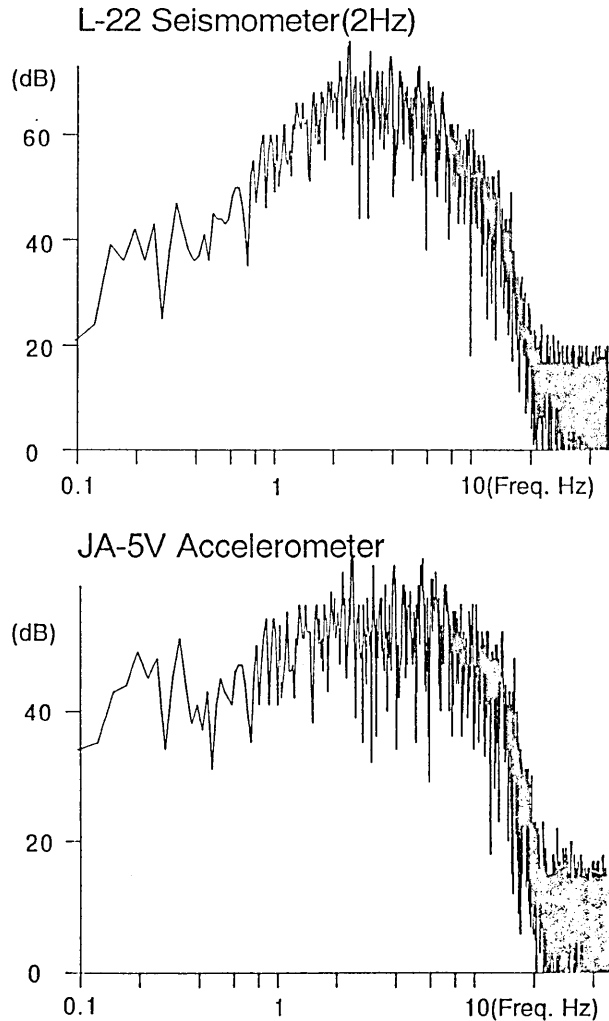


Fig. 7. Comparison of power spectra of the S phase of the earthquake shown in Fig. 6. Top: L-22 seismometer (Horizontal). Bottom: JA-5V accelerometer (Horizontal).

工的ノイズによってトリガーがなかったものも多いが、このうちの十数個については気象庁地震火山部発表の地震活動概況で震源、マグニチュード等がわかっている。

Fig. 6 はデジタル記録の一例で3月22日に房総半島沖で起きた地震である。同時に観測している2台の加速度計 (JA-5V) の一致は極めて良い。この地震のS波の部分で速度型地震計と加速度計のスペクトルを比較したものが Fig. 7 である。速度型地震計に比べて加速度計の特性が低域 (周期10秒) までのびていることがよくわかる。加速度波形を積分して速度波形に変換してやると長周期成分が明瞭になる (Fig. 8)。S波の部分で約1 Hzの波が卓越していること、地震前の部分の周期数秒の脈動等の2 Hz速度型地震計ではと

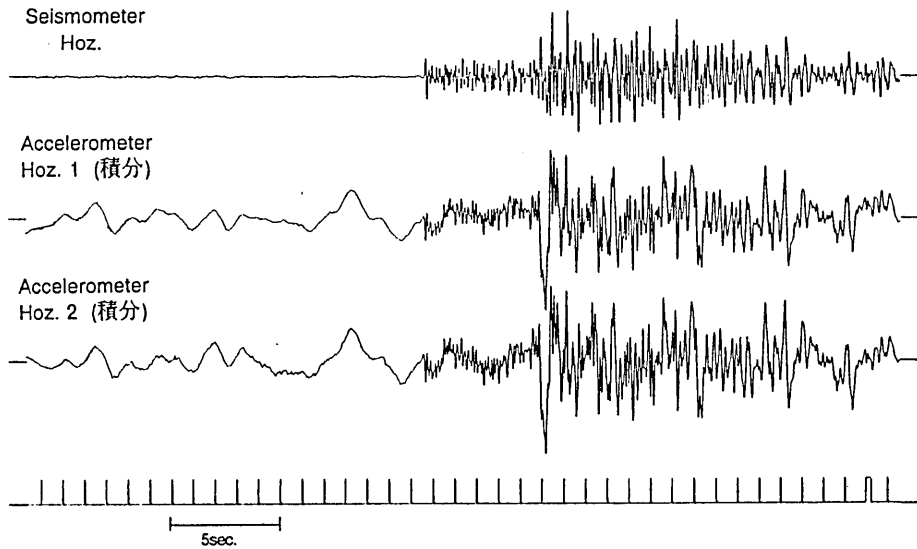


Fig. 8. Integrated records of two accelerometers in Fig. 6 (Middle and Bottom), and record of L-22 velocity seismometer (Top).

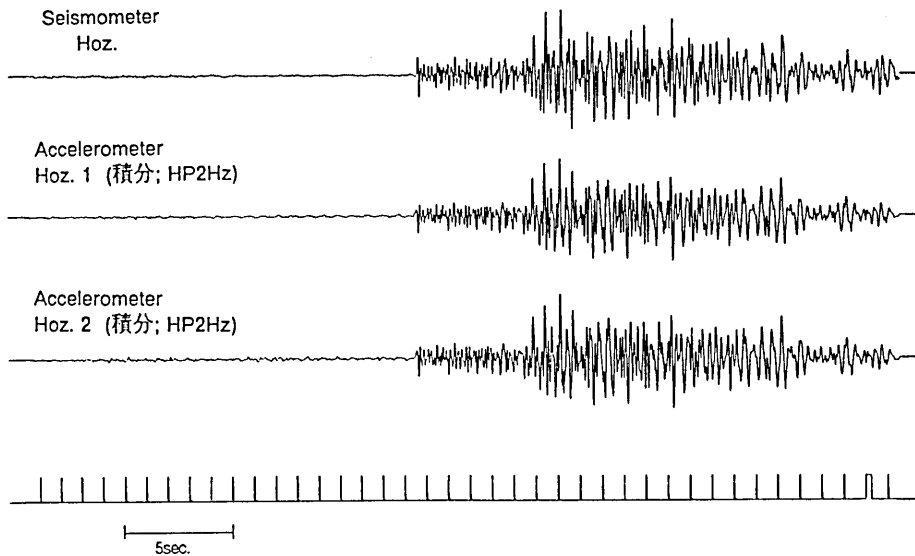


Fig. 9. Integrated acceleration records shown in Fig. 8 filtered through 2 Hz high-pass filter, and compared with velocity (L-22 seismometer) record.

んど検知できなかった特徴がよくわかる。また、速度型地震計の周波数特性にほぼ合わせた 2 Hz のローカットフィルタを加速度計の積分波形にかけてやれば、速度型地震計とほぼ同一の波形を得ることができる (Fig. 9)。

Fig. 10 は同じくデジタル記録の例で 3 月 29 日に父島近海で起きた地震の S 波の部分がトリガーしたものである。これは今回の実験で震源の判明しているものの中では最も震源の遠いものであるが、加速度波形そのままでも長周期の波が含まれていることがわかる。加速度波形を積分してやったものを Fig. 11 に示す。周期 1~4 秒の長周期成分が明瞭にとらえられている。

Fig. 12 に示したのは 3 月 26 日千葉県北部に起きたマグニチュード 4.3 のもので、東京でも有感であった。12 bit の A/D 変換ではダイナミックレンジがせまく、今回のゲイン設定ではスケールアウトしてしまっている。

QA-1400 と JA-5V を比較した例を Fig. 13 に示す。QA-1400 の感度は JA-5V の 1.3 倍であるが図中では振幅補正して同じスケールで表してある。両者の一致は良いが、QA-1400の方が高周波のノイズがやや大きいようである。この傾向はその後の観測でも認められた。

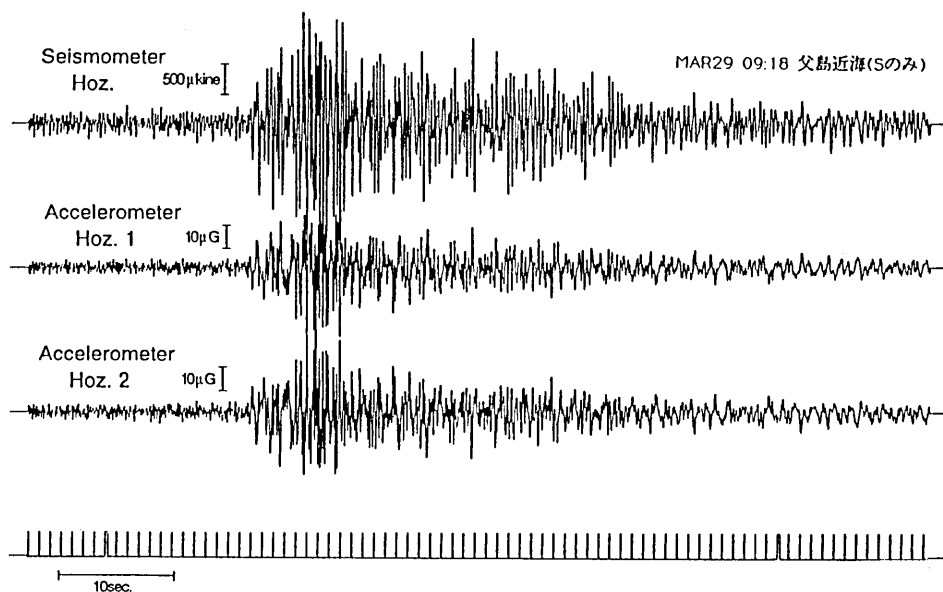


Fig. 10. Example of digitally recorded seismograms. Epicenter is near Chichijima (Ogasawara) Island on Mar. 29, 1989. All sensors are horizontal. Only the S phase was triggered. Top: L-22 velocity type seismometer. Middle: JA-5V accelerometer. Bottom: another JA-5V.

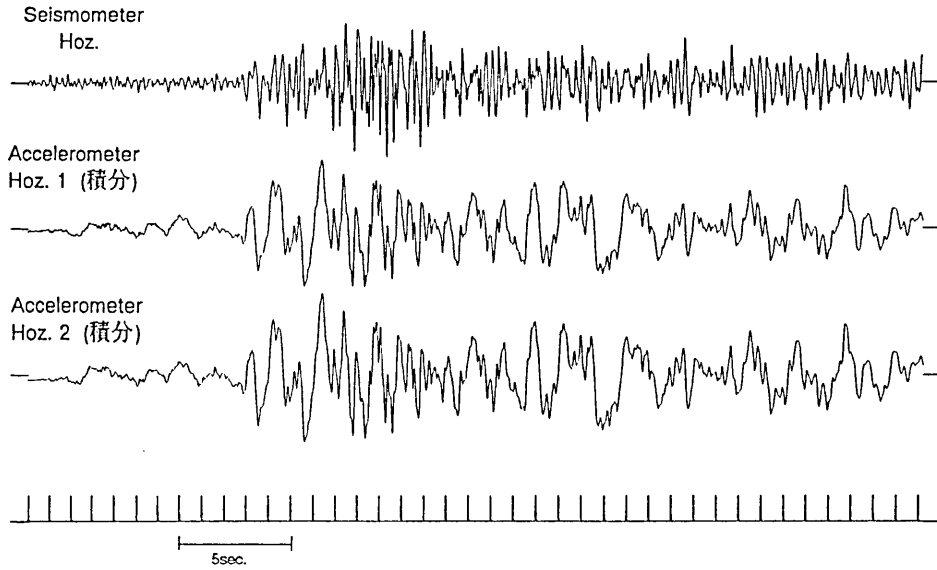


Fig. 11. Integrated records of two accelerometers shown in Fig. 10.

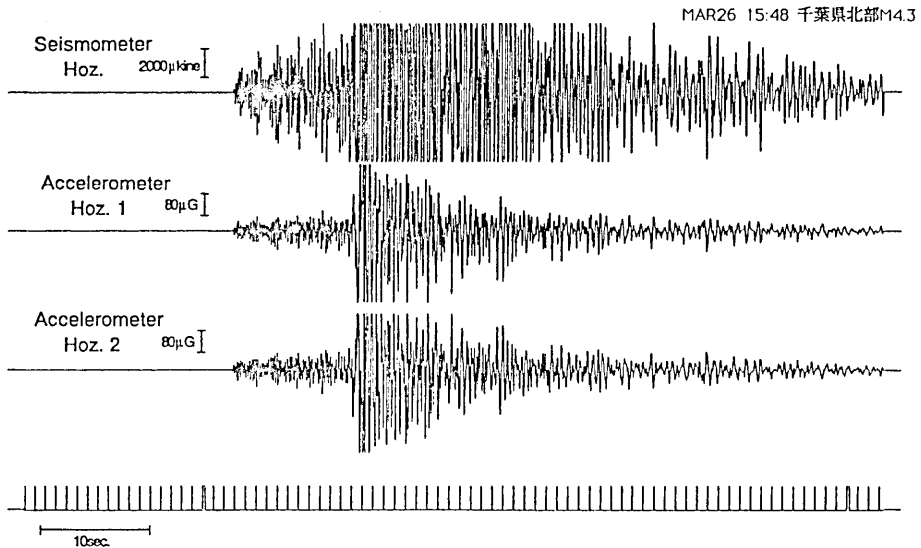


Fig. 12. Example of digitally recorded seismograms. An earthquake which took place in Northern Chiba Prefecture on Mar. 26, 1989. All sensors are horizontal components. Top: L-22 seismometer. Middle: JA-5V accelerometer. Bottom: another JA-5V.

APR8 3:13

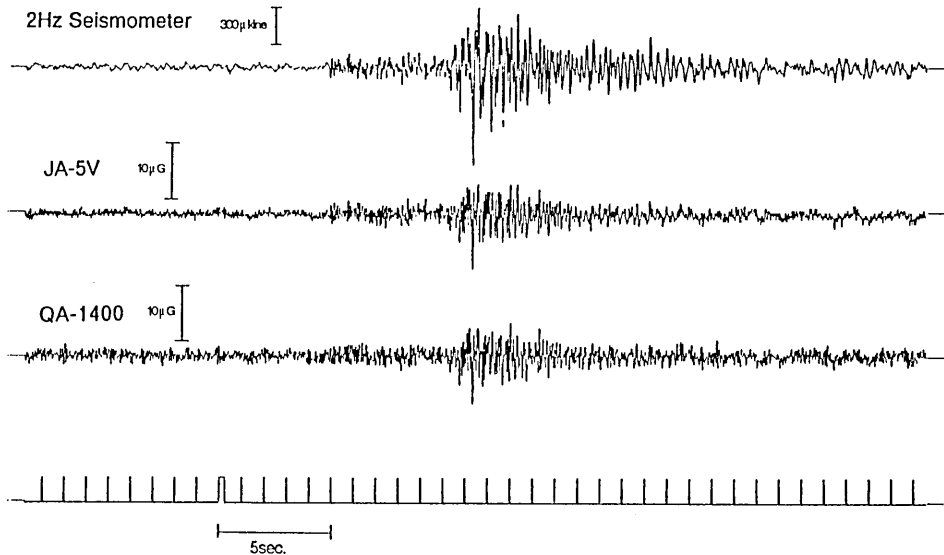


Fig. 13. Example of digitally recorded seismograms. Two different types of accelerometers are compared. All sensors are horizontal components. Top: L-22 seismometer. Middle: JA-5V accelerometer. Bottom: QA-1400 accelerometer.

3-3. 温度変化とDCドリフト

観測坑内の気温は、数時間のスケールでは $1/1000^{\circ}C$ オーダーで安定している。坑内の気温変化をモニターした例を Fig. 14 に示す。Fig. 14a は3月20日から29日の温度変化を示しているが、数日のスケールで見ても $1/100^{\circ}C$ 以下の変化しか無いことがわかる。この程度の温度変化であれば、加速度センサーの感度等に対する影響はほとんど無視できるはずである。

Fig. 14b は同じく3月20日から29日間の2台の JA-5V 加速度計の DC レベルの変動（ドリフト）を示す。この期間の温度変化 ($1/100^{\circ}C$ オーダー) と加速度計の温度特性から予想されるドリフトの推定値は約 $1 \mu G$ である。しかしながら実際に観測されたドリフトは最大で $10 \mu G$ に達している。このドリフトの長周期（数日スケール）の傾向には、2台の加速度計間で相関が無く、温度とも無関係に見える。このドリフトの原因としては温度変化に伴う DC オフセット特性の変化は考えにくい。またこの期間中、速度型地震計および時刻信号のチャンネルでは一切この種のドリフトはみられないことから、アンプ・記録器系のドリフトは考え難い。加速度計を置いた台座は臨時観測のための簡単なものであるので時間とともに微小に傾斜していったものとも考えられる。また、気圧変化等の他の要因が加速度計に与える影響と重なっているかもしれないので今後検討を要する。

また、Fig. 14b では $2 \mu G$ 程度の約半日周期の変化がみられる。この変化は2台の加速度センサーで同時に同方向に現れているので、実際の動き（傾動）を記録しているものと

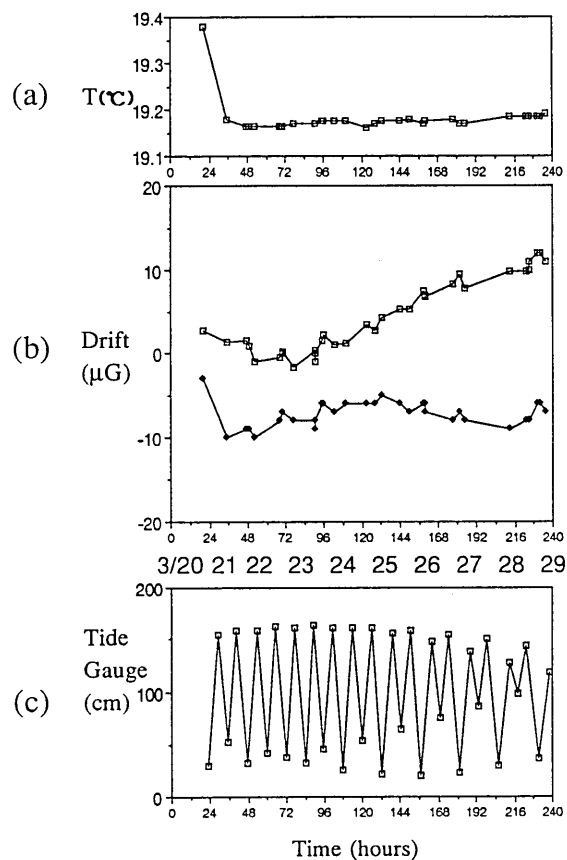


Fig. 14. Correlation of the temperature in observation tunnel and DC drift of acceleration records during the period from Mar. 20 to Mar. 29, 1989. (a) Temperature ($^{\circ}\text{C}$) in the observation tunnel measured by quartz thermometer. (b) DC level drift (μG) of two JA-5V accelerometers. (c) Sea level (cm) measured by tide gauge at Yokosuka.

判断できる。油壺観測所の観測坑は油壺湾の海岸線に接して設けられているため、海の干満の影響を受ける可能性が大きい。Fig. 14cに海上保安庁発行の潮位表による横須賀の潮位を示す。横須賀と油壺の潮位差は15分であり、この図上では無視できる。ドリフトのデータはデジタル記録器がトリガーした時点のものしか得られていないため、連続的な変化を追うには多少問題があるものの、潮位との相関はかなり良いと言えるであろう。したがって、この半日周期の変動は加速度計が海洋潮汐にともなう地盤の傾動をとらえたものと思われる。

4. 海底地震計に应用する際の課題

航空機用小型サーボ加速度計は消費電流が 20 mA と大きいことが欠点の一つである。オンラインケーブル式海底地震計の場合とはかく、自己浮上式によるオフライン観測では電源供給が大きな問題となる。リチウム電池等大容量の電池を大量に使用するためには、複数の耐圧ガラス球を用いる等の海底地震計の大幅な改造が必要となるであろう。また最近では消費電流が約 10 mA と小さい加速度計も開発されているので（例えば、Sundstrand Data Control Inc. 製の QA-3000）、それらを使用することを今後検討する。

3-2 で述べたように記録系のダイナミックレンジが小さいと有感地震のような大きな信号が入ってきた場合スケールオーバーをおこしてしまう。多少の DC ドリフトがあっても観測が可能にする意味でも大きなダイナミックレンジが必要である。デジタル収録の場合 16 bit あるいはそれ以上のダイナミックレンジを確保する必要がある。またその際には A/D 変換器の DC ドリフト等も問題になると思われる。

今回の実験では加速度センサーを水平方向に用いたため重力加速度を問題にすることは無かったが、実用上は上下動成分（直交 3 成分）を観測しなければならない。今回の実験の感度では 1G の加速度は 20 V にもなり、そのままでは測定不可能となるので、なんらかの方法で重力加速度（直流成分）をキャンセルしてやる必要がある。直流分をキャンセルする補償電圧をかけてやる等の方法を用いればよいであろう。その際、キャンセルに必要な 3 成分の電圧値から重力加速度の方向すなわち海底地震計の傾き（姿勢）を知ることができる。そうすれば、海底地震計が傾いていても 3 成分の合成によって上下水平の各成分を計算することができるので、現在速度型の海底地震計に用いているジンバルは不用になる。

また、3-3 で述べた数日スケールの DC ドリフトの原因をはっきりさせ、加速度計自体に問題がある場合はその対策をたてる必要がある。

一般に深海底では水温変化がほとんど無いと信じられているが、これまでの海底地震計による観測で相当速い底層流が存在することがわかってきた（例えば笠原他, 1981）。気象庁のケーブル式海底地震計では、流れにともなうと思われる 0.1°C 程度の温度変化が在り、これが水晶型津波計等のドリフトに影響するという観測結果がある（浜田, 私信）。これらのことを考えると、今回の実験と同じく $1/1000^{\circ}\text{C}$ 精度で温度モニターするようにして深海底の温度環境を知る必要がある。また最近の新しい加速度計（Sundstrand 社 QA-3000）では、2つの正反対向きのセンサーを対にし、両者の和をノイズとして信号から自動的に取りのぞくことで温度係数を改善したものも現れている。

5. 海底地震計による試験観測

1989年11月15日から17日の2日間、従来型のアナログ式海底地震計（ERI-AR81型；南雲他, 1982）に簡単な改造を施し、実際に海底に設置して予備的な試験観測を試みた。地震計のジンバルを取りはずし、日本航空電子社製の JA-5 III（同 JA-5 V に水晶フレクチャを用いたもの）3個を3軸マウント台に装着し直接耐圧球に取付けた（Fig. 15a）。加速度計の電源はアルカリ乾電池から IC トラッキングレギュレータを通して供給した。ただ

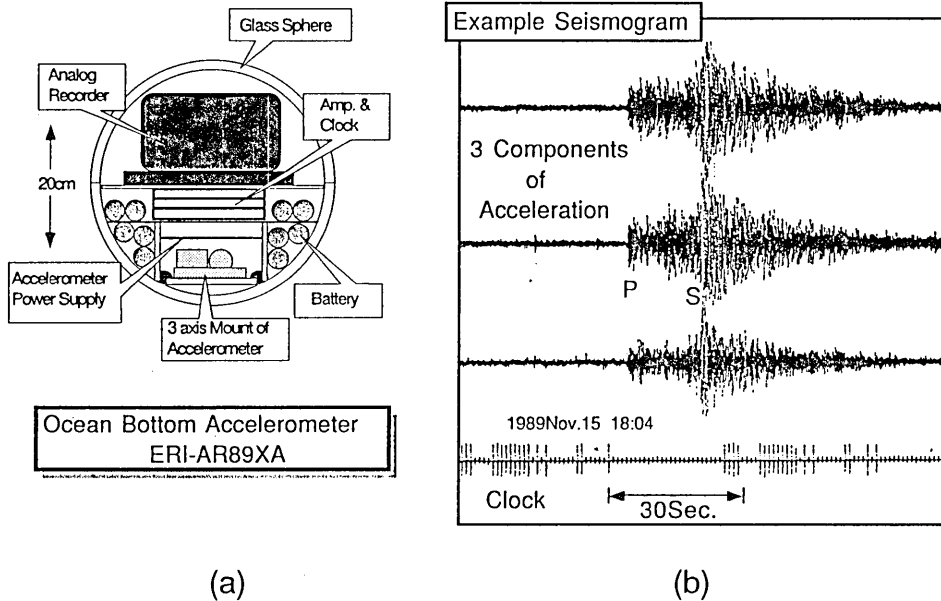


Fig. 15. (a) Schematic sketch of the ocean bottom seismometer used for test observations. (b) Example of 3-axis acceleration records obtained by OBS. An occurrence of Off Sanriku swarm earthquakes in Nov. 1989.

し、この実験では重力加速度 (DC 成分) を簡便に除くために加速出力は 0.1 Hz のパスシフハイパスフィルタを通してから記録したので、海底地震計 (加速度計) の傾きを知ることはできない。観測点は大鵜湾口 (北緯39度22.40分, 東経142度01.01分水深 90 m) で東京大学海洋研究所付属大鵜臨海研究センター所属の観測船“弥生”により投入および回収を行った。

この観測期間は2日間だけであったが、10月末から始まった三陸沖の群発地震活動が続いており、多数の地震記録を得ることに成功した。浅海であるにもかかわらず波浪によるノイズも比較的になく、高 S/N の記録が得られた (Fig. 15b)。しかし、この最初の海底観測ではミストリガーを恐れてアナログ方式の記録計を使用したためにダイナミックレンジが狭く、観測された地震波形は同時に行った陸上で行ったデジタル観測波形に比べると著しく歪んでいる。積分やフィルタリングといった処理を含む高度の解析を行うためにはダイナミックレンジの広いデジタル記録をとることが必要である。

今後は、現在我々が現在使用しているデジタル式海底地震計 (Kasahara et al., 1985) に必要な改造を施して実際の海底での試験観測を重ねていきたいと考えている。現時点では測器の設計や実際の観測上必要となる深海底の長周期ノイズの状況はほとんど知られていないので、海底試験観測でその情報を集めていくことが必要である。また、陸上においても、既存の長周期地震観測点において比較実験を行い、さらに長周期側へ観測帯域を広げる試みや広帯域観測に対応したトリガーアルゴリズムの開発を行う必要がある。それらの結果を基に、本格的な海底超広帯域地震計を開発していきたいと考えている。

6. ま と め

将来の長周期海底地震計の候補として小型サーボ加速度計を用いた試験的な地震観測を行った。その結果、これらの加速度計は 15~0.05 Hz の範囲で 0.1 μ G (100 μ gal) の分解能を持っており、やや長周期の高感度地震計として十分使用可能であることが確認できた。加速度波形を積分するなどの手法で、従来の速度型地震計ではとらえられなかった地震の長周期成分の特徴を把握することができた。また、加速度計は海洋潮汐による地盤の傾動をとらえる等、傾斜計としても有効であることがわかった。今後実際に海底での観測を行うための開発を行っていく。

謝 辞

本研究は東京大学地震研究所昭和63年度プロジェクト研究の援助を受けて行った。油壺での観測にあたっては東京大学地震研究所油壺地殻変動観測所の高橋辰利氏の御協力を頂いた。また、地震研究所の石井紘教授をはじめとする地殻変動研究室の方々にはいろいろと便宜を図って頂いた。大槌湾における観測は、平成元年度東京大学海洋研究所付属大槌臨海研究センター共同利用研究で行い、同センターの方々の御協力を頂いたことを感謝する。

参 考 文 献

- 笠原順三. 是沢定之. 西 祐二, 1981, 海底地震観測から推定される深海底の強い流れ (予報), 地震研究所彙報, 56, 207-221.
- KASAHARA, J., M. TAKAHASHI, T. MATSUBARA, and M. KOMIYA, 1985, Mass storage digital ocean bottom seismometer and hydrophone (DOBSH) controlled by micro-processors using ADPCM voice synthesizing, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 60, 23-37.
- 南雲昭三郎. 笠原順三. 是沢定之. 村上英幸, 1982, 音響切り離し方式海底地震計 (ERI-AR81 型), 地震研究所彙報, 57, 125-132.

*Seismic Observations Using Inertial Navigation Servo Accelerometers
for Application to the Broad-Band Ocean Bottom Seismometer*

Hiroshi KATAO, Junzo KASAHARA and Sadayuki KORESAWA

Earthquake Research Institute

Servo accelerometers were developed originally for the inertial navigation system, and have many superior features as a seismic sensor. However, there is little precedent for application to seismic observations except for strong-motion seismic observations.

A series of seismic experiments were carried out to measure characteristics of inertial navigation servo accelerometers. Two types of accelerometers were used with comparison to conventional velocity type seismometers. Seismic signals were stored both in the analog and digital recording systems.

It is found that these accelerometers have a resolution of $0.1 \mu\text{G}$ in the frequency range 15-0.05 Hz. Servo accelerometers are proven to be one of the powerful candidates as the sensor of the broad-band ocean bottom seismometer to be developed in near future.