

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1322 June 2016

港湾地域強震観測年報（2014）

野津 厚
長坂 陽介

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

| | |
|--------------------------------|----|
| 要 旨 | 3 |
| 1. はじめに | 4 |
| 2. 観測網と観測機器 | 6 |
| 2.1 観測網 | 6 |
| 2.2 強震計の維持管理 | 7 |
| 2.3 観測地点 | 7 |
| 2.4 強震計 | 7 |
| 2.5 強震計の基礎と観測小屋 | 12 |
| 3. 記録の整理 | 14 |
| 4. 補正と積分 | 14 |
| 4.1 フィルタリングと積分の方法..... | 14 |
| 4.2 計器特性補正等のためのフィルタ | 14 |
| 4.3 SMAC-B2相当フィルタ | 15 |
| 4.4 積分用のハイパスフィルタ | 15 |
| 4.5 解析のアウトプット | 16 |
| 5. 2014年に取得された代表的な記録について | 17 |
| 6. まとめ | 19 |
| 謝辞 | 19 |
| 参考文献 | 20 |
| 付録 釧路港の地中強震計の設置方位誤差について | 22 |
| 強震観測担当者（2014年1月～12月） | 24 |

Annual Report on Strong-Motion Earthquake Records in Japanese Ports (2014)

Atsushi NOZU*

Yosuke NAGASAKA**

Synopsis

Since 1962, strong ground motions and earthquake responses of structures have been observed in the major ports in Japan. In 2014, 2363 accelerograms were obtained and analyzed at the Port and Airport Research Institute.

The strong-motion earthquake observation network in Japanese ports consists of 136 strong-motion accelerographs installed at 61 ports as of December 2014. Seventy-one accelerographs out of 136 are installed on ground surface, 45 accelerographs are in ground by using bore-hole and the rest 20 are on structures such as quay walls. Currently six types of accelerographs are used in the network, namely, the ERS accelerograph, the SMAC-MDU accelerograph, the Dato1-100 accelerograph, the Omni accelerograph, the Basalt accelerograph and the CV-374 accelerograph, all of which are negative feedback accelerographs equipped with a digital recorder.

This report presents the results of observation and preliminary analysis of records obtained in 2014. ASCII data of the recorded accelerations for all the records in 2014 are available on the attached DVD in the user-friendly CSV format. Also, computer plots of recorded accelerations are available on the DVD for the records with peak accelerations exceeding 20 Gal. For the records with peak accelerations exceeding 50 Gal, computer plots of recorded accelerations, integrated velocities and displacements, Fourier spectra and response spectra are available on the DVD.

Key Words: earthquake, port, strong-motion earthquake observation, acceleration record,
Fourier spectra

* Director of Earthquake Disaster Prevention Engineering Department

** Research Engineer, Engineering Seismology Group, Earthquake Disaster Prevention Engineering Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5058 Fax : +81-46-844-0839 e-mail: nozu@pari.go.jp

港湾地域強震観測年報（2014）

野津 厚*・長坂 陽介**

要 旨

1962年より実施されている港湾地域強震観測により、2014年には2363の強震記録が得られた。強震計の台数としては、2014年末現在、136台の強震計が61港に設置されており、設置状況としては、71台が地表に、45台が地中に、20台が構造物上に設置されている。観測網を構成する強震計はERS型強震計、SMAC-MDU型強震計、Dato1-100型強震計、Omni型強震計、Basalt型強震計、CV-374型強震計の6種類であり、いずれもサーボ型加速度計である。

本資料は2014年に港湾地域強震観測網で得られた記録について報告するものである。得られた記録は港湾毎に分類され、地震諸元・記録番号・最大加速度等とともに付録DVDの強震観測表にまとめられている。強震観測表の地震諸元は気象庁の地震・火山月報（カタログ編）に基づいている。また、強震記録の記録番号は各観測地点から記録が送られてきた順番に付けられており、記録の分類として、頭文字「F」で始まる記録はERS型強震計で得られた記録、頭文字「U」で始まる記録はSMAC-MDU型強震計で得られた記録、頭文字「D」で始まる記録はDato1-100型強震計で得られた記録、頭文字「O」で始まる記録はOmni型強震計で得られた記録、頭文字「B」で始まる記録はBasalt型強震計で得られた記録、頭文字「C」で始まる記録はCV-374型強震計で得られた記録をそれぞれ示している。強震観測表にまとめられているすべての記録のデジタルデータを付録DVDにCSV形式で収録している。最大加速度が20Galを越える記録については加速度波形を画像ファイルの形で付録DVDに収録している。また、最大加速度が50Galを越える比較的大きな記録については、加速度波形に加え、速度波形、変位波形、フーリエスペクトル、応答スペクトルも画像ファイルの形で付録DVDに収録している。

2014年の観測は次に示す諸機関の協力の下に実施された。

国土交通省港湾局 国土交通省地方整備局 国土交通省北海道開発局 内閣府沖縄総合事務局
東京都港湾局 静岡県港湾局 大阪市港湾局 神戸市みなと総局 宮崎県港湾課

強震観測は、各観測地点での強震観測担当者の努力に負うところが非常に大きい。担当者各位に敬意と謝意を表すとともに、各観測地点で実際に観測に携わった方々の氏名を巻末に掲載する。

キーワード：地震、港湾地域強震観測、加速度記録、フーリエスペクトル

* 地震防災研究領域長

** 地震防災研究領域 地震動研究グループ 研究官

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5058 Fax：046-844-0839 e-mail: nozu@pari.go.jp

1. はじめに

港湾地域強震観測は当所の前身である運輸省港湾技術研究所が中心となり 1962 年に開始され、国の機関や地方自治体が参画して実施されてきた。2014 年末の時点では全国 61 の港に 136 台の強震計が設置されている(図-1)。図-1 には強震計の機種も示されているが、その詳細については 2. を参照されたい。表-1 に 2001 年以降の強震計台数と記録数の推移を示す。

港湾地域強震観測の目的は極めて多岐にわたるが、ここでは代表的な三つの目的を説明する。

(1) 強震観測の第一の目的は、港湾に被害をもたらすような大地震が発生した場合に、その揺れを記録して、これを被害メカニズムの解明や適切な復旧工法の選定に利用することである。1995 年兵庫県南部地震で被災した神戸港の岸壁の被害原因の解明には、神戸港で取得された強震記録が活用された^{1), 2)}。また、2011 年東北地方太平洋沖地震の際に取得された強震記録も、防波堤等の被害原因の解明に活用されている。

(2) 強震観測の第二の目的は、地点毎に異なる地震動の特性を解明することである。図-2 では八戸港と関西国際空港で得られた強震記録のフーリエスペクトルを比較している。八戸港では 1968 年十勝沖地震と 1994 年三陸はるか沖地震の強震記録が得られているが、26 年の時を隔てて発生した二つの大地震で、いずれも周期 2.5 秒(周波数 0.4Hz)の成分が卓越している。一方、関西国際空港では 1995 年兵庫県南部地震と 2000 年鳥取県西部地震の記録が得られているが、いずれも周期 5 秒(周波数 0.2Hz)の成分が卓越している。このように、場所により地震動の特性が異なるのは、地震基盤上に存在する堆積層の地震動への影響(サイト特性)が場所毎に異なるためである。平成 19 年 4 月に改訂された新しい港湾の施設の技術上の基準では、設計用入力地震動の評価を行う際、対象施設設置位置もしくはその周辺における地震動の実測値に基づいてサイト特性の評価を行うことが求められるようになった。従って、設計実務において強震観測の果たす役割の重要性は今後一層高まるものと予想される。このことに関連して、全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性の評価結果をとりまとめた資料が刊行されているので^{3), 4), 5)}、参考にしていただければ幸いである。強震観測により地震動の卓越周期の解明が進めば、構造物の固有周期と地震動の卓越周期が一致しないように工夫することも可能になるので、地震による被害の軽減に資するものと期待される。

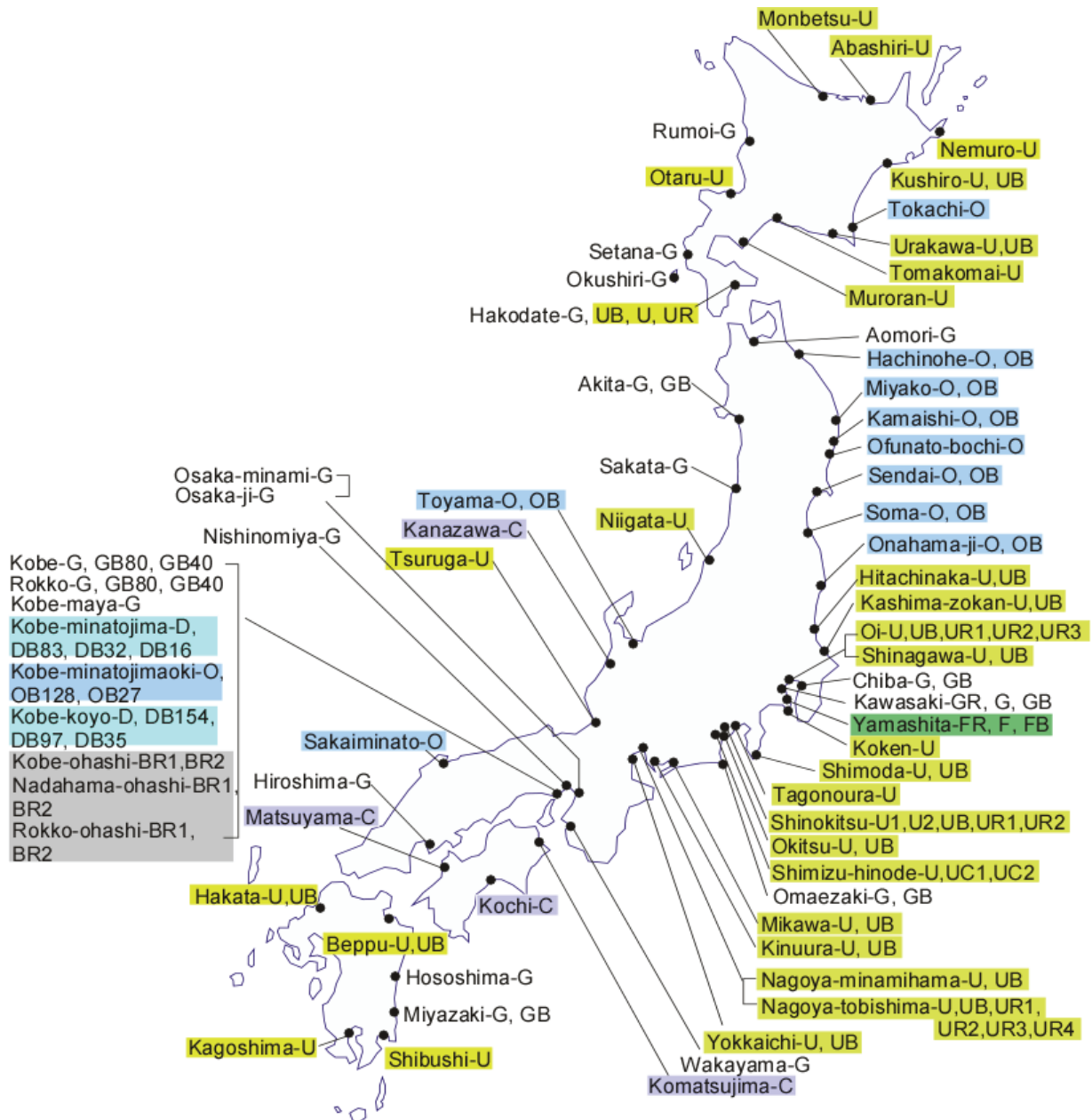
(3) 強震観測の第三の目的は、良質な(SN比の高い)

中小地震の記録を取得して、将来の大地震の揺れの予測に活用することである。上述のように地震動の性質は地点毎に異なるため、構造物の耐震設計には地点毎の特性を反映した入力地震動を用いることが望ましい。各港湾で得られた中小地震の記録には、港湾毎の地下構造の情報が含まれており、この情報を生かすことにより、将来の大地震による揺れの予測に役立てることができる。その一例として、2000 年鳥取県西部地震の余震の際に境港とその周辺の複数の地点(図-3)で取得された記録を経験的グリーン関数法と呼ばれる方法で多数重ね合わせることにより、鳥取県西部地震の本震地動をシミュレーションした結果を図-4 に示すが、各地点の地震動の振幅、周期、継続時間などの特徴をかなり良好に再現できていることがわかる。ここで用いた手法の詳細については文献 6) を参照していただきたい。

港湾地域強震観測で得られた記録は、後に説明するような処理と解析を経た後に、強震観測年報として公表されてきた。まず、1963 年から 1975 年の記録が強震観測年報として公表された⁷⁾⁻¹⁷⁾。1963 年から 1975 年の年報には鉛直成分が含まれていなかったため、それらは別冊¹⁸⁾として公表された。1976 年と 1977 年の強震観測年報からは新しいデータ処理の方法を取り入れ、計器補正を施した加速度波形とそれを積分した速度波形と変位波形、フーリエスペクトルや応答スペクトルを年報で報告するようになった¹⁹⁾⁻⁵¹⁾。また、通常年報とは別に、被害地震の記録だけを集めた資料も刊行されている⁵²⁾⁻⁶³⁾。強震観測年報の変遷を表-2 に示す。

昨今のように公的機関の組織再編が進む中では、強震記録のデジタルデータを研究室内で保管することが最も確実な保管方法であるとはもはや言えなくなっている。デジタルデータを保管する場所としてはウェブ・サーバも考えられるが、ウェブ・サーバのサービスが停止すれば、それと同時にデータが失われる可能性がある。しかるべき出版物に電子媒体を添付して、その中にデジタルデータを収めておくことが、強震記録のデジタルデータを後世に残すための最も確実な手段であろう。電子媒体にも種々のものがあるが、容量・価格・普及の度合いなどから CD または DVD が最適と判断される。このような考えから 1999 年以降の強震観測年報³⁸⁾⁻⁵¹⁾には、デジタルデータを収録した CD または DVD を添付している。

本資料の付録 DVD には、2014 年に取得されたすべての加速度記録のデジタルデータが CSV 形式で収められている。また、20Gal を越える記録については、加速度記録を図化したものが収められている。さらに、50Gal



2014年12月31日現在 61港136地点

| | | |
|------------|-------|-------|
| ERS-F | ---- | 3 |
| ERS-G | ---- | 35 |
| SMAC-MDU | -- | 60 |
| DATOL-100 | -- | 8 |
| OMNI | ----- | 20 |
| BASALT | ---- | 6 |
| CV-374 | ----- | 4 |
| オンライン化完了地点 | | 129地点 |

図-1 港湾地域強震観測網

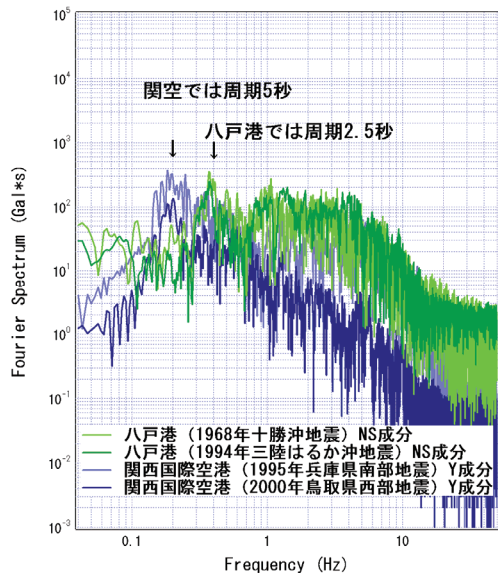


図-2 八戸港と関西国際空港の地震動特性の比較

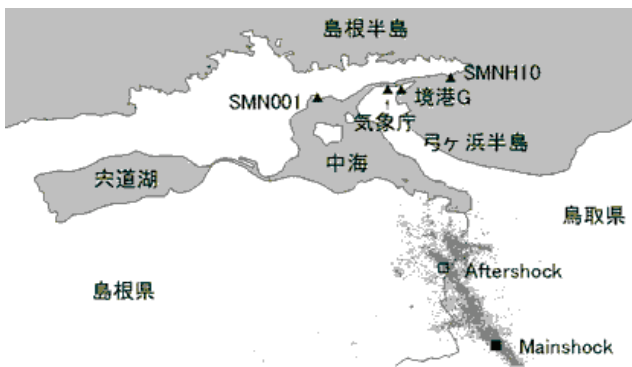


図-3 境港およびその周辺の強震観測地点

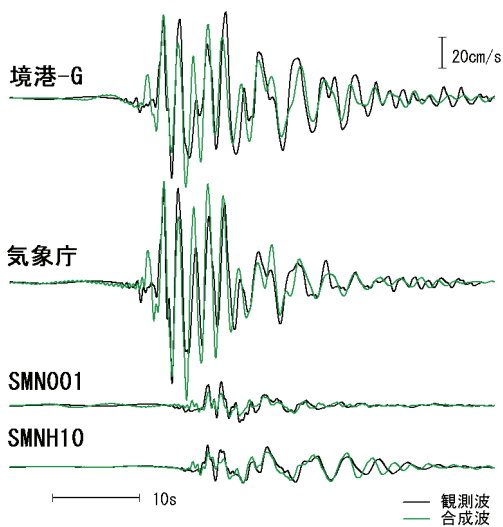


図-4 経験的グリーン関数法による 2000 年鳥取県西部地震の本震地動の再現⁶⁾

表-1 強震計台数と記録数の推移 (台数は年末の数字)

| 年 | 港湾数 | 強震計台数 | 記録数 |
|------|-----|-------|------|
| 2001 | 60 | 97 | 207 |
| 2002 | 60 | 98 | 140 |
| 2003 | 60 | 104 | 394 |
| 2004 | 60 | 110 | 468 |
| 2005 | 60 | 111 | 434 |
| 2006 | 61 | 113 | 276 |
| 2007 | 61 | 119 | 520 |
| 2008 | 61 | 119 | 417 |
| 2009 | 61 | 119 | 488 |
| 2010 | 61 | 119 | 296 |
| 2011 | 61 | 136 | 2417 |
| 2012 | 61 | 136 | 752 |
| 2013 | 61 | 137 | 2474 |
| 2014 | 61 | 136 | 2363 |

表-2 強震観測年報の変遷

| 年 | 強震観測年報の内容 | CD |
|-----------|--|----|
| 1963~1975 | 加速度波形, フーリエスペクトル, 応答スペクトル. 鉛直成分は別冊として公表. | 無 |
| 1976~1998 | 計器補正を施した加速度波形とそれを積分した速度波形と変位波形, フーリエスペクトル, 応答スペクトル | 無 |
| 1999~本資料 | 同上 | 有 |

を越える記録については、加速度記録と、これを積分して得た速度波形、変位波形、フーリエスペクトル、さらに応答スペクトルを図化したものが収められている。

2. 観測網と観測機器

2.1 観測網

港湾地域強震観測網は日本全国の海岸線をカバーしており、2014 年末の時点では 136 の強震計が 61 の港に設置されている。2014 年末の時点で強震計の設置されている港湾は図-1 および付録 DVD の地図に示すとおりである。付録 DVD の地図上の港名をクリックすれば、強震計の機種と設置条件が表示される。観測地点の土質柱状図等も付録 DVD に収められており、地図からたどることができる。観測地点のさらなる詳細情報については観測地点資料⁶⁴⁾⁻⁶⁹⁾を参照されたい。2014 年末の時点では、136 の観測地点のうち 38 地点に ERS 型強震計が、60 地点に SMAC-MDU 型強震計が、8 地点に Datol-100 型強震計が、20 地点に Omni 型強震計が、6 地点に Basalt 型強震計が、4 地点に CV-374 型強震計が設置されている。これらはいずれもサーボ型加速度

計（フォースバランス型または速度帰還型）⁷⁰⁾ である。これらの強震計の詳細については2.4で述べる。

2.2 強震計の維持管理

強震計の維持管理は当所と港湾地域強震観測の他の参画機関との緊密な協力の下に実地されている。現在、観測網を構成する強震計の大半は通信機能を有しており、ダイヤルアップ方式により、観測点から当所へのデータ転送が可能な状況となっている。オンラインによるデータ転送が可能な地点は、2014年末の時点では、136の強震観測地点のうち129地点である。

強震計の通信機能は、データ収集だけでなく、強震計の健全度把握にも用いられている。いつ発生するかわからない大地震に備えて、強震計を常に健全な状態に保つことが極めて重要である。そのためには、強震計に不具合が発生した場合、それを早期に発見することが必要である。強震計の通信機能を活用し、当所の職員が強震計の健全度把握を行うことが、観測網の維持に大きく寄与していると考えられる。

なお、通信方式については、従来はダイヤルアップ方式であったが、地震直後に強震計から当所サーバまで波形データを自動で転送できる新しいシステム（地震動情報即時伝達システム）が2011年に開発され、2014年末の時点では80地点に導入されている。この新しいシステムの詳細については文献71)を参照していただきたい。

2.3 観測地点

観測網には3種類の観測地点がある。1つ目は地表面の加速度を記録するもの、2つ目はボアホールを使用し地中の加速度を記録するもの、3つ目は構造物の地震応答を記録するものである。構造物の地震応答を記録するための観測点のそばには必ず地盤の加速度を測定するための観測点が設けられている。

各観測地点では、原則として、強震計の水平成分の一つは真北を向いている。ただし、例外として、構造物の応答を記録する観測点と、これに付随して地盤加速度を記録する観測点では、強震計が構造物と平行に設置されている場合もある。岸壁や栈橋など多くの港湾構造物は2次元な形状をしており、構造物の法線方向に垂直な成分と平行な成分を計測する方が解析上便利であるため、そのようにしている。強震計の2つの水平成分が真の南北方向と東西方向に一致しない場合には、方向成分を表すために偏角（単位は度）が使用される。例えばN10Eは真北から東に10°回転した方向を意味する。

観測網のそれぞれの観測地点には観測地点名が付けら

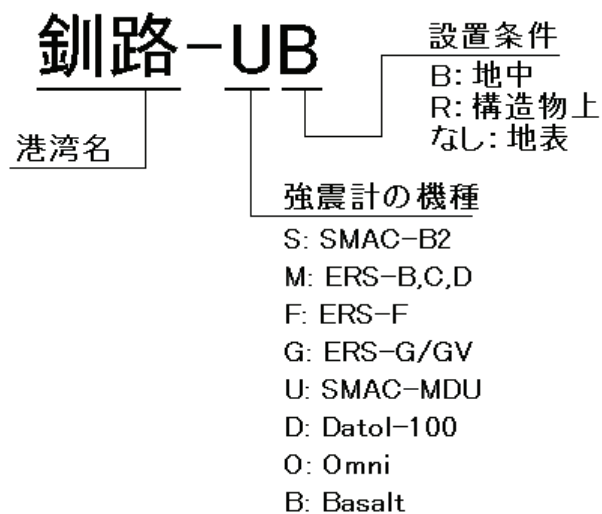


図-5 観測地点名のルール

れている。観測地点名は位置と強震計の型と設置条件の組み合わせである(図-5)。例えば北海道の釧路港の観測点は「釧路-U」および「釧路-UB」と名付けられている。「釧路」は観測地点の位置を表している。港湾事務所に設置されている観測点では「小名浜事」のように「事」という文字をつけている場合がある。添え字の「U」は強震計の型を表しており、釧路港にはSMAC-MDU型強震計が設置されていることを意味する。添え字には「S」「M」「F」「G」「U」「D」「O」「B」「C」があり、それらと強震計の機種との対応は図-5に示すとおりである。「釧路-UB」で添え字「U」の後ろの「B」は設置条件を示し、ボアホールを使用して地中に強震計を設置していることを意味する。例えば「釧路-U」のように設置条件を表す添え字がない場合は、その強震計が地表に設置されていることを意味する。添え字「R」がついている場合は強震計が構造物上に設置されていることを意味する。「神戸」等のように地中の異なる深さに強震計が設置されている場合は、添え字「B」の後ろに強震計の深度を表す「40」等の数字をつけている(単位m)。また、「清水日の出-UC1」と「清水日の出-UC2」の「C」は、強震計がCDM改良地盤に設置されていることを示している。

2.4 強震計

(1) ERS-F型強震計

ERS-F型強震計は不揮発性磁気バブルメモリを備えたサーボ型加速度計（フォースバランス型）である。記録器のメインユニットは、図-6に示す通り、不揮発性磁気バブルメモリが4つと制御装置からなり、その寸法は240×240×35240×240×35mm、質量は約1kgである。記録器

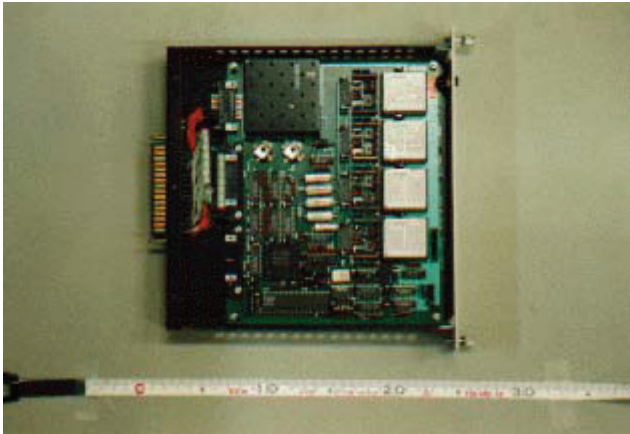


図-6 ERS-F 型強震計の記録装置のメインユニット



図-7 ERS-F, G, GV 型強震計の地中設置用換振器



図-8 ERS-F, G, GV 型強震計の構造物取り付け用換振器

には2つのユニットが設置できる。加速度3成分に時間信号を加えた4チャンネルの記録時間はユニットが2つの場合には約40分である。

ERS-F 型強震計には、もともと換振器と記録器を1つの箱に収納した一体型のものがあり、その後、換振器と記録

表-3 ERS-F, G, GV 型強震計の仕様

| | |
|---|---|
| 総合特性 | |
| 計測可能加速度 | (-F)2G (-G, -GV)0.008G~2G の範囲で設定可能 |
| 周波数範囲 | 0.01Hz-35Hz |
| ダイナミックレンジ | 86dB over |
| 換振器 | |
| 成分 | 水平2成分と上下成分 |
| 計測可能加速度 | (-F) 2G (-G, -GV)0.008G~2G の範囲で設定可能 |
| 感度 | 10^{-5} |
| 形式 | (-F and -G)フォースバランス型 (-GV)速度帰還型 |
| フィルタ | |
| ハイパスフィルタ | 0.007Hz -6dB/octave |
| ローパスフィルタ | 35Hz -18dB/octave |
| A/D 変換 | |
| 解像度 | 16bit |
| 変換速度 | 100Hz |
| 遅延メモリ： 10s | |
| 時計： 内蔵時計の精度は 1/100s, 1 時間毎にラジオの時報により校正 | |
| スタータ： トリガーレベルは計測可能加速度の 0.5, 1 または 2% | |
| 記録器 | |
| チャンネル数 | (-F) 4-10 チャンネル (うち 1 チャンネルは時刻) (-G, -GV)3-12 チャンネル |
| メモリサイズ | (-F) バブルメモリ: 1 Mbyte×2 (-G, -GV) IC カードメモリ: 2 Mbyte |
| 収録時間 | 1 記録あたり 1-10min |
| 最大記録時間 | (-F) 40 min/4ch (-G, -GV) 52 min/3ch 加速度が大きいものを優先的に保存 |
| 関連情報 | 観測地点, 記録数, 記録開始時刻, 各成分の最大値 |
| 校正： 総合的な校正が可能 | |
| バックアップ電源: 充電後 2 時間 | |
| 容器：アルミニウム箱, 防水 | |
| サイズ： (-F) 54(L)×54(W)×38(H)cm (-G, -GV) 54(L)×54(W)×33(H)cm | |

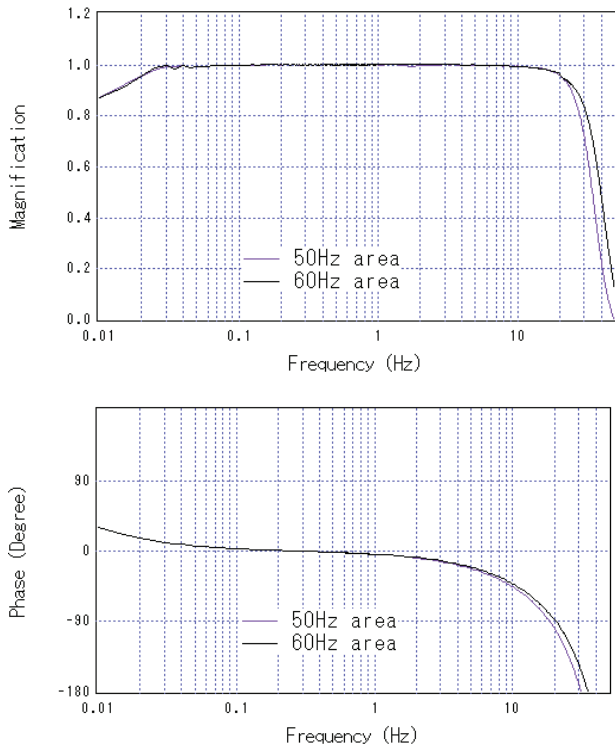


図-9 ERS-F, G 型強震計の周波数特性

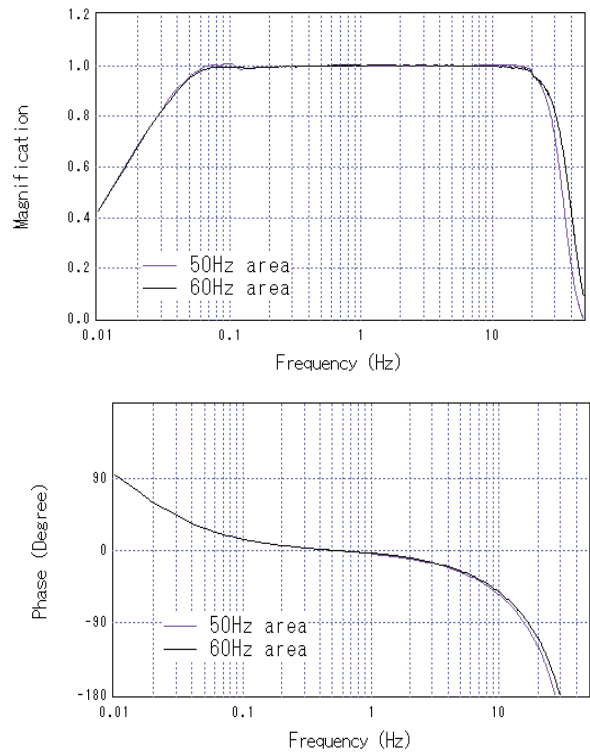


図-11 ERS-GV 型強震計の周波数特性



図-10 ERS-G/GV 型強震計の IC カードメモリ

器が分かれた分離タイプのものが開発された。図-7 に示すものはボアホール用の換振器である。図-8 に示すものは構造物取り付け用の換振器である。2014 年末の時点で ERS-F 型強震計の総数は 3 である。

ERS-F 型強震計の仕様を表-3 に示す。ERS-F 型強震計の周波数特性を図-9 に示す。周波数特性の上段は振幅特性（実際の揺れに対して記録のフーリエ振幅が何倍か）を表しており、下段は位相特性（実際の揺れに対して記録のフーリエ位相が何度進んでいるか）を表している。このような周波数特性の表示方法は以下に述べる他の強震計に対し



図-12 ERS-G/GV 型強震計の外観

ても同様である。

(2) ERS-G/GV 型強震計

ERS-G/GV 型強震計は記憶媒体として IC カードメモリを用いたサーボ型加速度計であり、フォースバランス型（ERS-G 型）と速度帰還型（ERS-GV 型）がある。図-10 は ERS-G/GV 型強震計で用いられている IC カードメモリ

表-4 SMAC-MDU 型強震計の仕様
(港湾地域強震観測での設定)

| | |
|-----------|--|
| 計測 | |
| 計測範囲 | ±2097Gal |
| 振動数範囲 | DC～30Hz |
| ダイナミックレンジ | 114dB |
| A/D 変換 | |
| 解像度 | 24bit |
| サンプリング周波数 | 100Hz |
| 換振器 | |
| 成分 | 水平 2 成分と上下成分 |
| 感度 | 3V/G |
| 形式 | フォースバランス型 |
| フィルタ | |
| ハイパスフィルタ | 0.02Hz |
| ローパスフィルタ | 30Hz |
| 時計 | |
| 水晶精度 | 誤差±0.5ppm 以下 |
| 時刻修正 | GPS による時刻修正 |
| 記録 | |
| 起動条件 | 指定 3 成分の論理演算組み合わせ |
| 記録開始 | 正秒記録開始 |
| 記録停止 | 停止設定レベルを下回って設定時間後に自動停止 |
| 最大記録時間 | 600 s/3ch 加速度が大きいものを優先的に保存 |
| メモリ | IC カードメモリ: 10Mbyte 以上 |
| 記録内容 | 加速度波形データ, 起動時刻 設定値, 機器状態, 最大加速度値 SI 値, 計測震度値 |
| 電源 | |
| 使用電源 | AC100V 50/60Hz |
| 内蔵充電電池 | DC12V バックアップ: 3 時間以上 |
| 外形寸法・質量 | |
| サイズ(据置型) | 398W×418D×210Hmm, 約 24kg |

(メモリサイズは 2MB) である。加速度 3 成分の記録時間は 1 つのカードで約 52 分である。加速度のトリガーレベルは様々な段階に設定できる。強震計の計測可能最大加速度は 2G で最大加速度のレベル (感度) は 0.008G から 2G の



図-13 SMAC-MDU 型強震計の外観

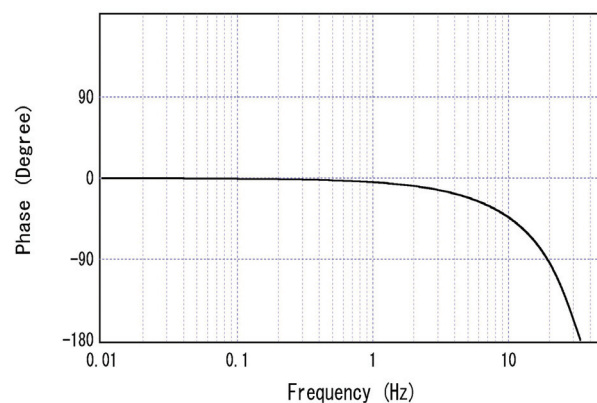
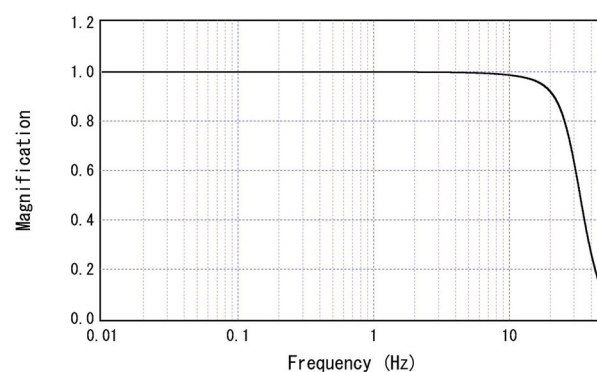


図-14 SMAC-MDU 型強震計の周波数特性

間で適切な値に設定できる。2014 年末の時点で ERS-G/GV 型強震計の総数は 35 である。

ERS-G/GV 型強震計の仕様を表-3 に ERS-F 型と共に示す。フォースバランス型である ERS-G 型強震計の周波数特性は ERS-F 型強震計と同じであり、図-9 に示すとおりである。

表-5 Datol-100 型強震計の仕様
(港湾地域強震観測での設定)

| | |
|-----------|-------------------------|
| 計測 | |
| 計測範囲 | ±1000Gal |
| 振動数範囲 | 0.1～30Hz |
| A/D 変換 | |
| 解像度 | 16bit |
| サンプリング周波数 | 100Hz |
| 換振器 | |
| 成分 | 水平 2 成分と上下成分 |
| 感度 | 10mV/Gal |
| 形式 | 速度帰還型 |
| フィルタ | |
| ローパスフィルタ | 30Hz |
| 時計 | |
| 時刻修正 | ラジオの時報により校正 |
| 記録 | |
| 起動条件 | 3 成分の論理演算組み合わせ |
| 記録停止 | 停止設定レベルを下回って設定時間後に自動停止 |
| 保存モード | 加速度が大きいものを優先的に保存 |
| メモリ | IC カードメモリ: 4～8Mbyte |
| 電源 | |
| 使用電源 | AC100V 50/60Hz |
| 内蔵充電池 | DC12V バックアップ: 約 5 時間 |

速度帰還型である ERS-GV 型強震計の周波数特性は ERS-F 型と異なっており、これを図-11 に示す。速度帰還型は雷の影響に対して有利であることから⁷⁰⁾、ERS-GV 型強震計は地中観測点とこれに付随する地表観測点（例えば「秋田-GB」と「秋田-G」）で多く用いられている。換振器と記録器を 1 つの箱に収納した標準的な ERS-G/GV 型強震計の外観を図-12 に示す。

(3) SMAC-MDU 型強震計

SMAC-MDU 型強震計はフォースバランス型のサーボ型加速度計である。表-4 に SMAC-MDU 型強震計の仕様を示す。強震計の外観と周波数特性をそれぞれ図-13 と図-14 に示す。2014 年末の時点で SMAC-MDU 型強震計の総数は 60 である。

(4) Datol-100 型強震計

Datol-100 型強震計は速度帰還型のサーボ型加速度計で

表-6 Omni 型強震計の仕様
(港湾地域強震観測での設定)

| | |
|-----------|------------------------|
| 計測 | |
| 計測範囲 | ±2000Gal |
| 振動数範囲 | 0.1～30Hz |
| A/D 変換 | |
| 解像度 | 24bit |
| サンプリング周波数 | 100Hz |
| 換振器 | |
| 成分 | 水平 2 成分と上下成分 |
| 感度 | 5mV/Gal |
| 形式 | 速度帰還型 |
| フィルタ | |
| ローパスフィルタ | 30Hz |
| 時計 | |
| 時刻修正 | GPS による時刻修正 |
| 記録 | |
| 起動条件 | 3 成分の論理演算組み合わせ |
| 記録停止 | 停止設定レベルを下回って設定時間後に自動停止 |
| 保存モード | 新しいものを優先的に保存 |
| メモリ | Flash Card: 256Mbyte |
| 電源 | |
| 使用電源 | AC100V 50/60Hz |
| 内蔵充電池 | バックアップ: 4 時間以上 |

ある。表-5 に Datol-100 型強震計の仕様を示す。強震計の周波数特性を図-15 に示す。2014 年末の時点で Datol-100 型強震計の総数は 8 である。

(5) Omni 型強震計

Omni 型強震計は速度帰還型のサーボ型加速度計である。表-6 に Omni 型強震計の仕様を示す。強震計の周波数特性は Datol-100 型強震計と同じであり、図-15 に示すとおりである。2014 年末の時点で Omni 型強震計の総数は 20 である。

(6) Basalt 型強震計

Basalt 型強震計はフォースバランス型のサーボ型加速度計である。表-7 に Basalt 型強震計の仕様を示す。強震計の周波数特性を図-16 に示す。2014 年末の時点で Basalt 型強震計の総数は 6 である。

(7) CV-374 型強震計

CV-374 型強震計はフォースバランス型のサーボ型加速

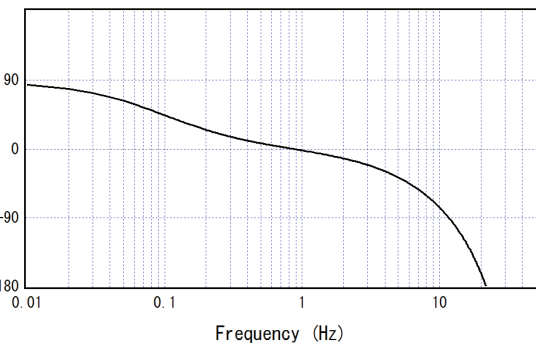
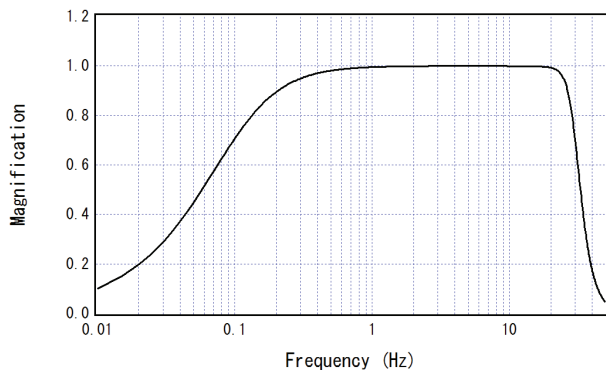


図-15 Dato1-100/Omni 型強震計の周波数特性

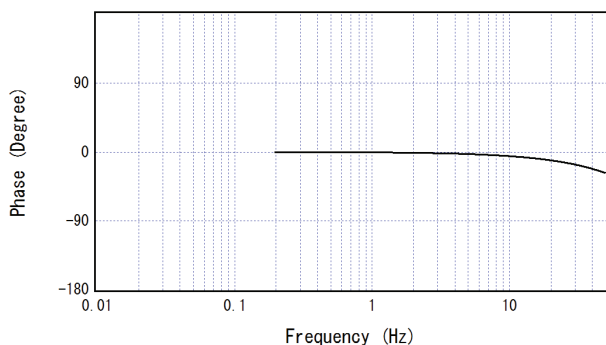
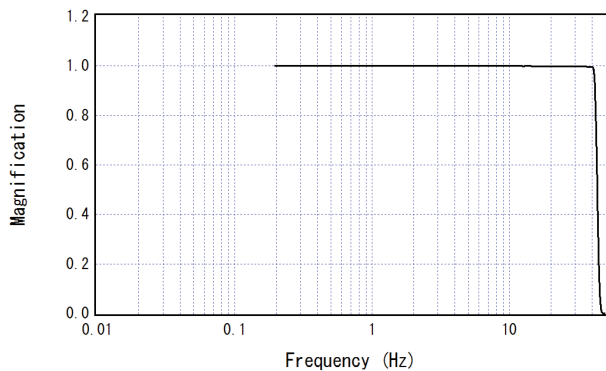


図-16 Basalt 型強震計の周波数特性

度計である。表-8 に CV-374 型強震計の仕様を示す。強震計の周波数特性を図-17 に示す。2014 年末の時点で CV-374 型強震計の総数は 4 である。

表-7 Basalt 型強震計の仕様
(港湾地域強震観測での設定)

| | |
|-----------|-------------------------------------|
| 計測 | |
| 計測範囲 | ±3920Gal |
| 振動数範囲 | DC～40Hz |
| A/D 変換 | |
| 解像度 | 24bit |
| サンプリング周波数 | 100Hz |
| 換振器 | |
| 成分 | 水平 2 成分と上下成分 |
| 感度 | 1.276mV/Gal |
| 形式 | フォースバランス型 |
| フィルタ | |
| ローパスフィルタ | 50Hz |
| 時計 | |
| 時刻修正 | GPS による時刻修正 |
| 記録 | |
| 起動条件 | 3 成分の論理演算組み合わせ |
| 記録停止 | 停止設定レベルを下回って設定時間後に自動停止 (最小収録時間 90s) |
| 保存モード | 新しいものを優先的に保存 |
| メモリ | CF カード 2.8GB |
| 電源 | |
| 使用電源 | AC100-250V 50/60Hz |
| 内蔵充電電池 | バックアップ: 約 30 時間 |

2.5 強震計の基礎と観測小屋

港湾地域強震観測で強震計を地表に設置する場合、強震観測小屋に設置する場合とハンドホール内に設置する場合がある。このうち強震観測小屋に設置する場合、図-18 に示すような鉄筋コンクリート製の簡単な基礎を使用することが標準となっている。図-18 に示される厚さ 300mm の空洞は、基礎のみかけの密度を周囲の土の密度と等しくすることにより、基礎が存在することによる記録への影響を最小限とするために設けられている。基礎は強震計を収納する小屋とは構造的に離れている必要がある。通常、強震計の基礎を支持するのに杭は使用されない。しかし、観測地点の地盤が非常に軟弱な粘土地盤やゆるい砂地盤である場合には、コンクリートや木製の杭が使用されることもある。例えば新潟港の観測点では基礎を杭で支持している。強震観測小屋そのものの構造には特に制限はないが、耐震性に優れたものである必要がある。強震観測小屋の一例として、

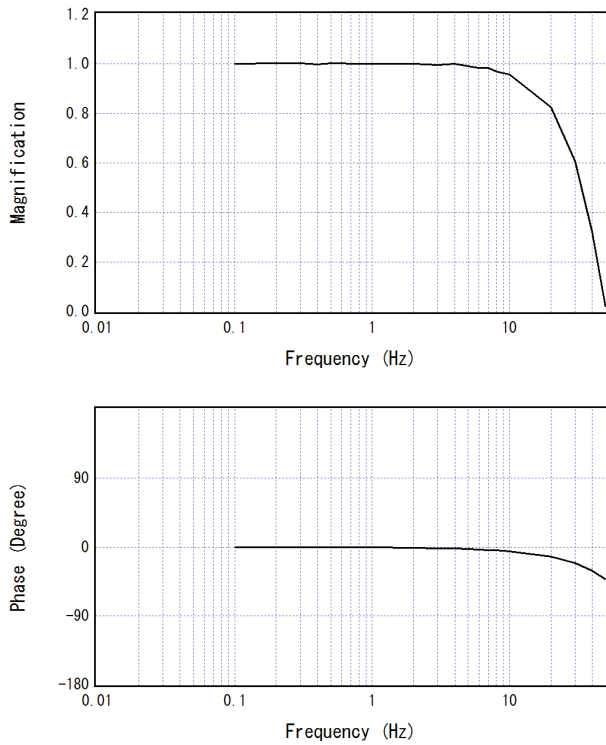
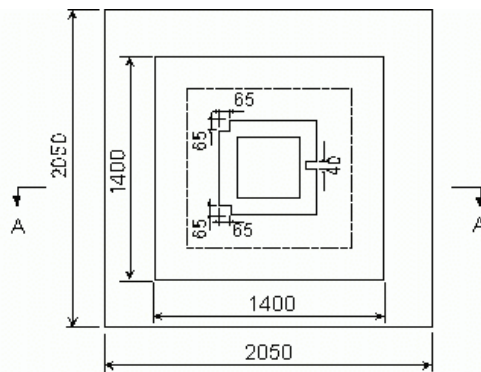


図-17 CV-374 型強震計の周波数特性



平面図 単位：mm

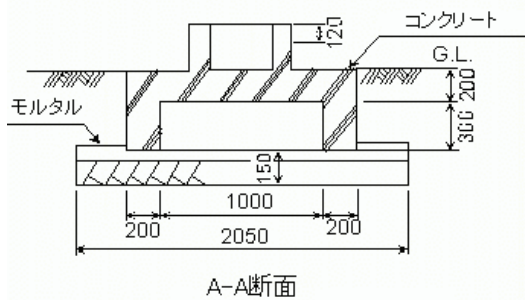


図-18 強震計基礎の一例

表-8 CV-374 型強震計の仕様
(港湾地域強震観測での設定)

| | |
|-----------|-------------------------------------|
| 計測 | |
| 計測範囲 | ±2000Gal |
| 振動数範囲 | DC～100Hz |
| A/D 変換 | |
| 解像度 | 24bit |
| サンプリング周波数 | 100Hz |
| 換振器 | |
| 成分 | 水平 2 成分と上下成分 |
| 感度 | 2mV/Gal |
| 形式 | フォースバランス型 |
| フィルタ | |
| ローパスフィルタ | 約 26Hz |
| 時計 | |
| 時刻修正 | GPS による時刻修正 |
| 記録 | |
| 起動条件 | 3 成分の論理演算組み合わせ |
| 記録停止 | 停止設定レベルを下回って設定時間後に自動停止 (最小収録時間 10s) |
| 保存モード | 新しいものを優先的に保存 |
| メモリ | CF カード 32.0GB |
| 電源 | |
| 使用電源 | AC85-264V 50/60Hz |
| 内蔵充電電池 | バックアップ: 約 90 分 |



図-19 観測小屋の一例(大船渡防地-O)

大船渡港の強震観測小屋を図-19 に示す。

3. 記録の整理

当所に到着したすべての強震記録は以下に述べる手順で整理・保管される。まず、各々の強震記録は、研究室に到着した順に番号がつけられる。ERS-F,G,GV 型強震計の記録には「F」で始まる番号、SMAC-MDU 型強震計の記録には「U」で始まる番号、Dato1-100 型強震計の記録には「D」で始まる番号、Omni 型強震計の記録には「O」で始まる番号、Basalt 型強震計の記録には「B」で始まる番号、CV-374 型強震計の記録には「C」で始まる番号が付けられる。次に、各々の強震記録に対応する地震を確認する。記録に対応する地震の震源情報としては、気象庁地震・火山月報（防災編）⁷²⁾ のものを仮に採用しておき、強震観測年報の刊行までには気象庁地震・火山月報（カタログ編）⁷³⁾ のものに置き換える。このようにして整理された記録が付録 DVD に収録されている。なお、付録 DVD の強震記録一覧のマグニチュードは気象庁マグニチュードである。

4. 補正と積分

得られた記録に対して、まず基線補正が行われる。次に、定められた方法^{74),75)}に従い、計器特性補正のためのフィルタリング、高周波成分と低周波成分の補正のためのフィルタリング、積分、応答スペクトルとフーリエスペクトルの計算などを実施する。処理の手順を図-20 に示す。この手順は 1976 年以降の記録に適用されてきている。図-20 においてオリジナル加速度波形とは基線補正のみを行った波形、補正加速度波形とは、計器特性に関する補正を行った上で、SN 比の十分でない低周波成分をハイパスフィルタにより削除した波形、SMAC-B2 相当加速度波形とは、港湾地域強震観測で長く用いられてきた SMAC-B2 型強震計による記録と比較可能なように周波数成分を調整した波形のことである。

4.1 フィルタリングと積分の方法

フィルタリングと積分は周波数領域で実施する。リンク効果を避けるため、基線補正後の加速度波形（オリジナル加速度波形）の外側にゼロを付けたものに対して FFT を適用する。ゼロ部分の長さ $L(s)$ は次式により定める。

$$L > \max [2 / 3T, 10.0] \quad (1)$$

ここに $T(s)$ はオリジナル加速度波形の長さである。この条件は、後述する積分用のハイパスフィルタのインパルス応答を考慮して定めたものである。

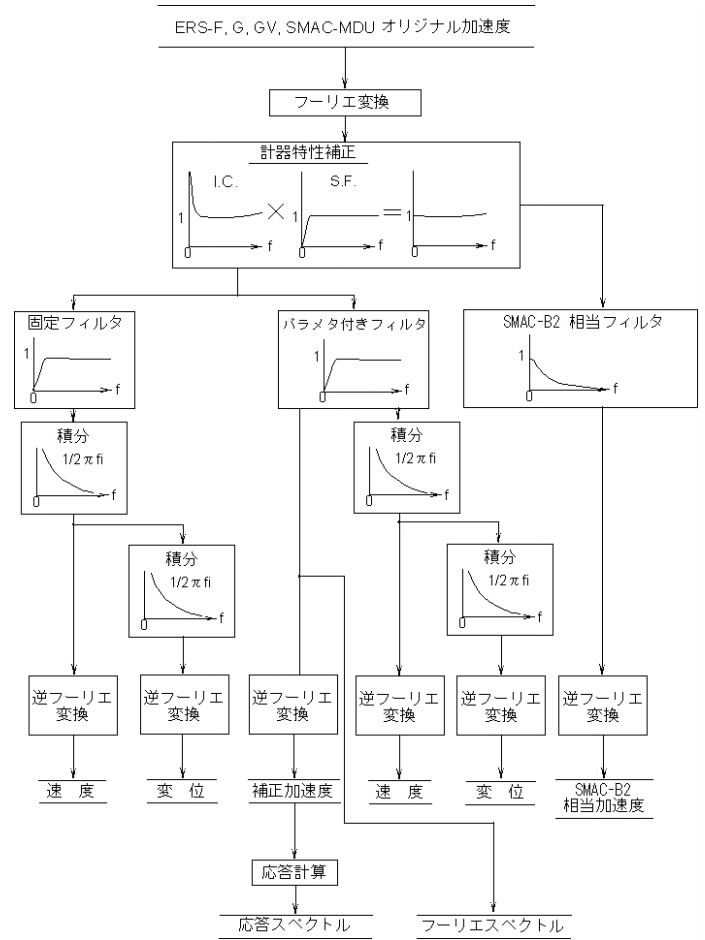


図-20 補正と積分の手順

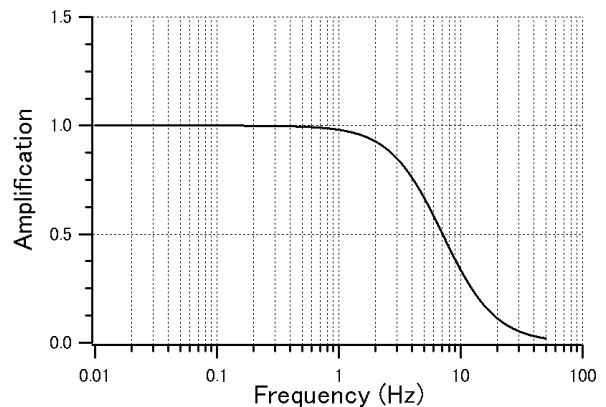


図-21 SMAC-B2 相当フィルタ

4.2 計器特性補正等のためのフィルタ

計器特性補正としては、図-9、図-11、図-14、図-15、図-16 および図-17 の下段に示す位相特性に関する補正を行う。これに加え、Dato1-100 型強震計および Omni 型強震計については、振幅特性の補正の必要性が高いため、図-15 の上段に示す振幅特性の補正も行う。さらに、すべての強

震計に対して、振幅特性に関し、高周波成分を次式に示すフィルタにより取り除く。

$$A_f(f) = \begin{cases} 1 & |f| \leq f_1 \\ \frac{1}{2}[\cos(\pi(f-f_1)/(f_2-f_1))+1] & f_1 \leq |f| \leq f_2 \\ 0 & f_2 \leq |f| \end{cases} \quad (2)$$

ここに $f_1=25\text{Hz}$, $f_2=40\text{Hz}$ である。

4.3 SMAC-B2 相当フィルタ

港湾地域強震観測で長く用いられてきた SMAC-B2 型強震計の周波数特性は、現在用いられている強震計の周波数特性とは異なるので、現在の強震計で得られた記録を SMAC-B2 型強震計による記録と比較できるようにするため、「SMAC-B2 相当加速度」を求める。そのため、次式に示すフィルタを用いる。

$$S(f) = \frac{1}{1 - \left(\frac{f}{f_s}\right)^2 + 2h_s \left(\frac{f}{f_s}\right) i} \quad (3)$$

ここに $f_s=1/0.14=7.1\text{Hz}$, $h_s=1.0$ である。

このフィルタは図-21 に示されるとおり SMAC-B2 型強震計と同じ周波数特性を有する。このフィルタは、4.2 で述べた計器特性補正のためのフィルタを適用した後に適用する。このフィルタを作用させることによって得られた「SMAC-B2 相当加速度」は、強震計で測定しようとしている地盤や構造物の本来の加速度とは異なっており、その最大値は本来の加速度よりも小さいが、この処理を施して得られる加速度はすべて互いに比較可能である。

4.4 積分用のハイパスフィルタ

すべての周波数に対して SN 比を一定以上に保つと同時に物理的に意味のある信号はできるだけ消さないようにするという観点からは、積分用のハイパスフィルタの遮断周波数が加速度波形の周波数特性に応じて変化することが望ましい。一方、積分後に得られる速度波形や変位波形を異なる記録について相互に比較するという観点からは、遮断周波数が一定値であるほうが都合がよい。強震記録が様々な立場で応用されることを考慮し、ここでは、速度波形や変位波形を得るための積分方法として二通りの方法を用いる。一つは固定フィルタを用いる方法であり、もう一つはパラメタ付きフィルタを用いる方法である。

(1) 固定フィルタ

固定フィルタは次式により定義される。

$$H_1(f) = \frac{1}{1 - \left(\frac{f_0}{f}\right)^2 - 2h \left(\frac{f_0}{f}\right) i} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_1}{f}\right)^2}} \quad (4)$$

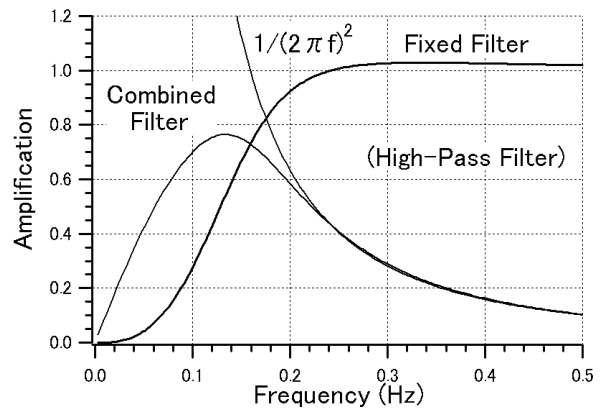


図-22 固定フィルタと二回積分の合成

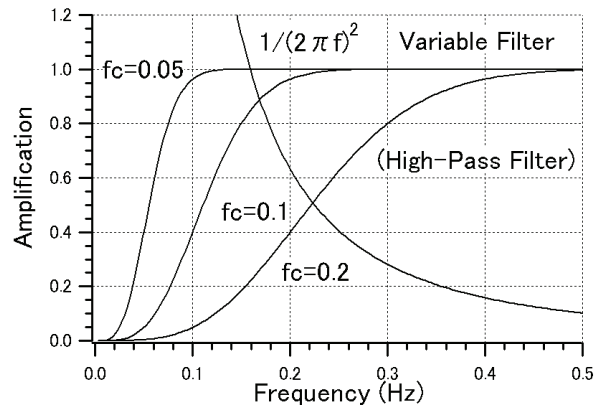


図-23 パラメタ付きフィルタと二回積分

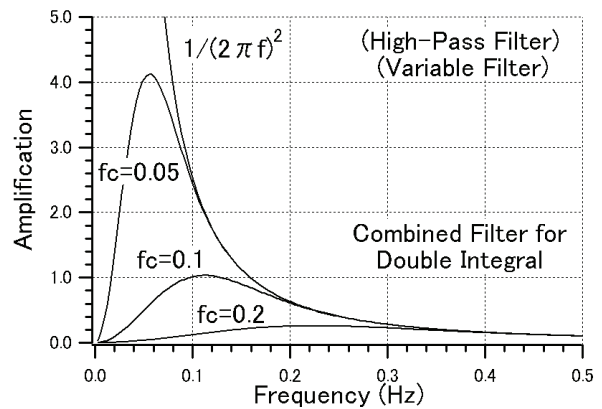


図-24 パラメタ付きフィルタと二回積分の合成

ここに $f_0=1/6(\text{Hz})$, $h=0.552$, $f_1=0.1(\text{Hz})$ である。

このフィルタは、得られる変位波形が気象庁の1倍強震計 ($T=6$ 秒, $h=0.552$) の変位波形と比較できるように設定されたものである。フィルタの遮断周波数(3 dB down)は 0.154Hz である。なお、ここで言う「フィルタの遮断周波数(3 dB down)」とは、フィルタの値がフラット部の $10^{-3/20}$

倍まで低下する周波数のことである。固定フィルタを図-22に示す。

(2) パラメタ付きフィルタ

このフィルタは次式により定義される。

$$H_2(f) = \left\{ 1 - \exp \left(- \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right) \right\}^2 \quad (5)$$

このフィルタの遮断周波数は $1.36f_c$ (3 dB down) である。パラメタ付きフィルタを図-23 および図-24 に示す。パラメタ f_c は、低周波側での SN 比が良好な記録に対しては小さな値、そうでない記録に対しては大きな値とする。具体的には、以下に述べる σ と E が等しくなるように f_c を設定する。まず、 σ は次式により定義される。

$$\sigma^2 = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 \{1 - \exp(-fT)\}^4 \{1 - H_2(f)\}^2 df \quad (6)$$

ここに T はオリジナル加速度波形の長さ、 $X(f)$ はオリジナル加速度波形のフーリエ変換である。式(6)は、図-25 に示すように、オリジナル加速度波形から計算したフーリエスペクトルの自乗を $1/T \sim f_c$ の範囲で積分した値を示している。これが所定の値 (E^2) となるように f_c が設定されるので、低周波成分の振幅が大きい記録、すなわち低周波側で

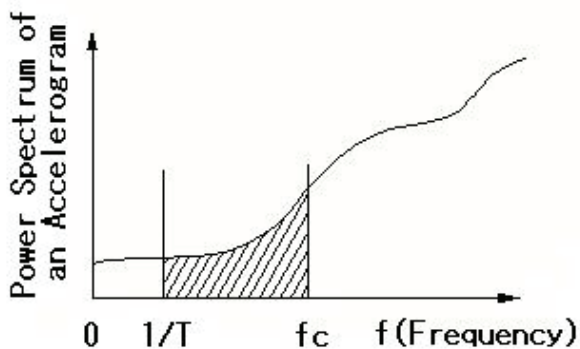
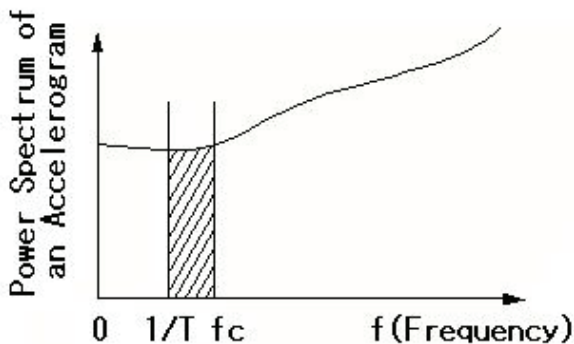


図-25 式(6)の意味するもの

の SN 比が良好な記録に対しては小さめの f_c が設定され、そうでない記録に対しては大きめの f_c が設定される。 $1/T$ 以下の周波数成分については、 f_c の決定の際には考慮に入れない。

なお、 E は以下に示す値である。

ERS-F,G 型強震計：

$$E = (p \times 0.001) \times 0.02236 \text{ (Gal)}$$

ここに p は ERS-F,G 型強震計の感度 (Gal/2¹⁵)

ERS-GV 型強震計：

$$E = (p \times 0.001) \times 0.07071 \text{ (Gal)}$$

ここに p は ERS-GV 型強震計の感度 (Gal/2¹⁵)

SMAC-MDU 型強震計：

$$E = 2 \times 0.00707 \text{ (Gal)}$$

Datol-100 型強震計：

$$E = 2 \times 0.01257 \text{ (Gal)}$$

Omni 型強震計：

$$E = 2 \times 0.002236 \text{ (Gal)}$$

Basalt 型強震計：

$$E = 2 \times 0.00707 \text{ (Gal)}$$

CV-374 型強震計：

$$E = 2 \times 0.02236 \text{ (Gal)}$$

各強震計の E 値は、非地震時に取得した記録のノイズレベルを調べて定めたものである。ERS-F,G 型 (フォースフィードバック) と ERS-GV 型 (速度帰還型) の低周波側のノイズレベルには差が認められたので、両者の E 値は異なる値としている。

ここで用いる二つのハイパスフィルタはいずれもなかなか周波数特性を持っており、遮断周波数の前後の成分が時間領域に変換したときに不自然な形をとって現れるのを防ぐことができる。

4.5 解析のアウトプット

(1) 加速度、速度、変位

各種の加速度波形と速度波形、変位波形が付録 DVD に収められている。先に述べたように、オリジナル加速度波形とは基線補正のみを行った波形、補正加速度波形とは、計器特性に関する補正を行った上で、SN 比の十分でない低周波成分をハイパスフィルタにより削除した波形、SMAC-B2 相当加速度波形とは、港湾地域強震観測で長く用いられてきた SMAC-B2 型強震計による記録と比較可能なように周波数成分を調整した波形のことである。速度と変位は、固定フィルタによるものとパラメタ付きフィルタによるものの双方を提示している。

(2) フーリエスペクトル

フーリエスペクトルは補正加速度からFFTにより計算される。

(3) 応答スペクトル

応答スペクトルは補正加速度から計算される。絶対加速度比、絶対加速度、相対速度、相対変位の4種類の応答が0%、1%、5%の3種類の1自由度系に対して計算される。

5. 2014年に取得された代表的な記録について

例年、強震観測年報では、その年に得られた代表的な記録について一章を設けて紹介してきている。ここでは、2月8日に福島県東方沖で発生した地震(M5.0)、3月14日に伊予灘で発生した地震(M6.2)および9月24日に福島県東方沖で発生した地震(M5.1)の記録について紹介する。

2月8日2時18分に福島県東方沖の東経141°28.1′、北緯37°31.1′、深さ48.3kmを震源としてM5.0の地震が発生し、福島県で最大震度4を観測した。港湾地域強震観測では東北の4つの港湾で記録が得られた。このうち相馬港の記録は最大加速度が193.0Galと比較的大きかった。図-26に相馬-Oで観測された水平2成分の加速度波形を示す。

3月14日2時6分に伊予灘の東経131°53.5′、北緯33°41.5′、深さ78.0kmを震源としてM6.2の地震が発生し、愛媛県で最大震度5強を観測した。港湾地域強震観測では東海から九州にかけての15の港湾で記録が得られた。このうち松山港の記録は最大加速度が122.5Galと比較的大きかった。図-27に松山-Cで観測された水平2成分の加速度波形を示す。

9月24日22時30分に福島県東方沖の東経141°23.6′、北緯37°32.1′、深さ50.9kmを震源としてM5.1の地震が

発生し、東北で最大震度4を観測した。港湾地域強震観測では東北から関東にかけての6つの港湾で記録が得られた。このうち相馬港の記録は最大加速度が175.1Galと比較的大きかった。図-28に相馬-Oで観測された水平2成分の加速度波形を示す。

図-26～図-28の加速度波形から求めたフーリエスペクトルを図-29に示す。なお、以下に示すフーリエスペクトルはすべて水平2成分のベクトル和をとりバンド幅0.05HzのParzenウィンドウを適用したものである。

図-26～図-28に示す加速度波形の中では松山-Cの記録が最も最大加速度が小さいが、図-29に示すフーリエスペクトルでは松山-Cの記録が群を抜いて大きいことがわかる。これらの記録の観測条件を表-9に整理して示す。これを見ると、3月14日の地震は他の二つの地震と比較してマグニチュードが1以上大きい。地震の規模はフーリエスペクトルの低周波側のレベルに大きく影響するので、松山-Cのスペクトルの低周波側(0.1-0.6Hz程度)のレベルが他の二つと比較して大きいのは、主にマグニチュードが大きいことによると考えられる。これに加えて、松山-Cのスペクトルが1Hz付近で局所的に大きな値を示しているのはサイト増幅特性の寄与によるものと考えられる。

図-30(a)では、比較のため、松山-Cの記録と、最寄りの他機関の観測点であるK-NET⁷⁶⁾松山における同じ地震の記録のフーリエスペクトルを重ね書きしている。なお、松山-CとK-NET松山の位置関係を図-30(f)に示す。両地点におけるフーリエスペクトルを比較すると、0.6Hz付近では松山-Cが小さめ、1Hz付近では松山-Cが大きめの値を示している。過去に松山-G(松山-Cと同一地点)とK-NET松山で観測された記録のフーリエスペクトルも、同様の傾向を示している。図-30(b)～(d)は、過去に松山-Gと

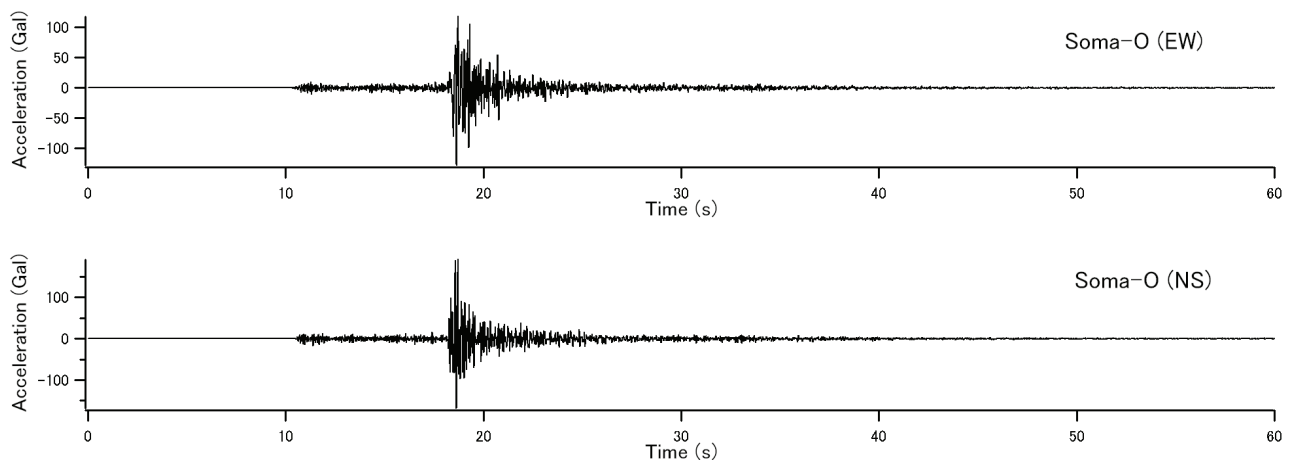


図-26 2月8日に相馬港で観測された加速度波形

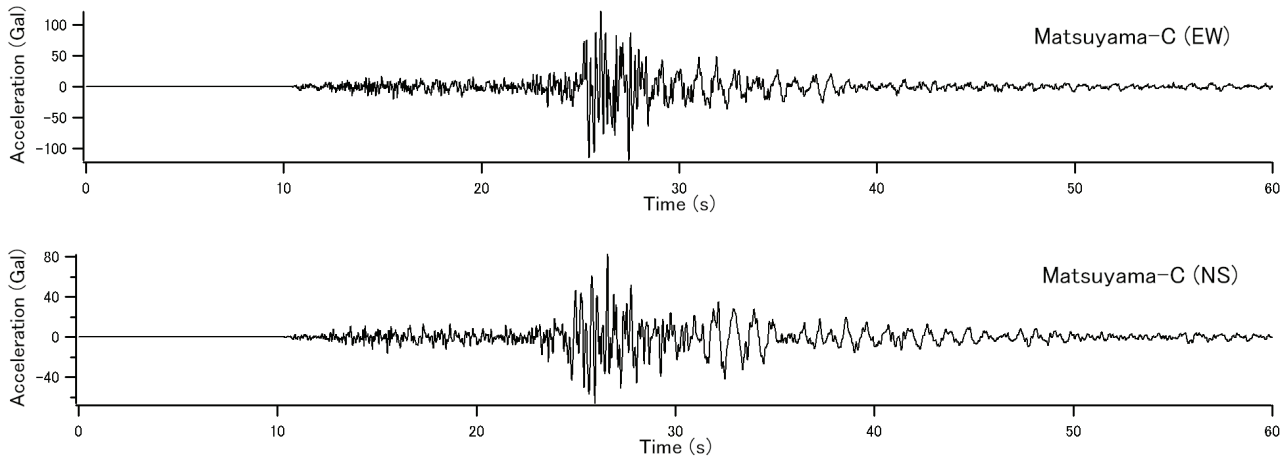


図-27 3月14日に松山港で観測された加速度波形

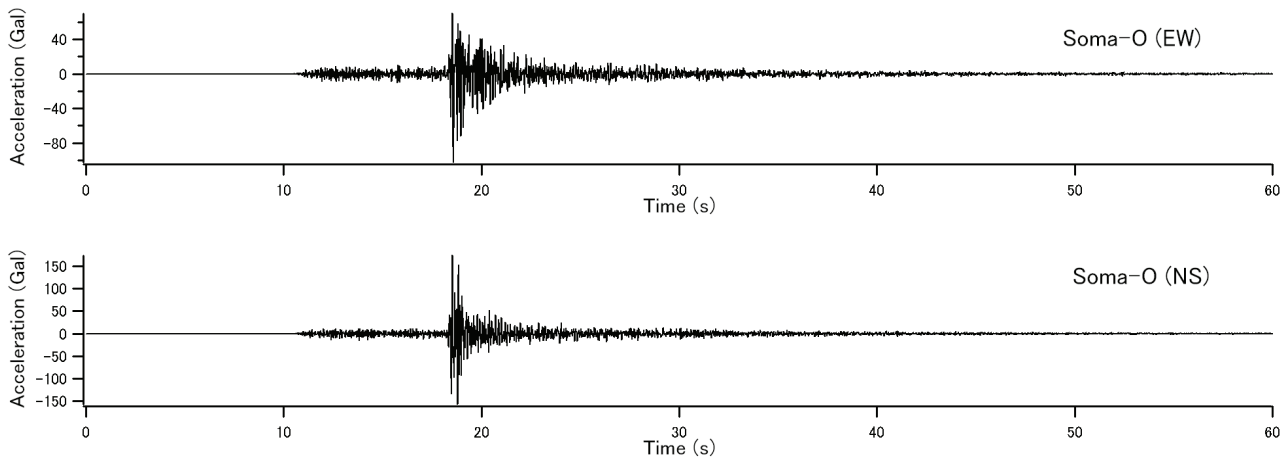


図-28 9月24日に相馬港で観測された加速度波形

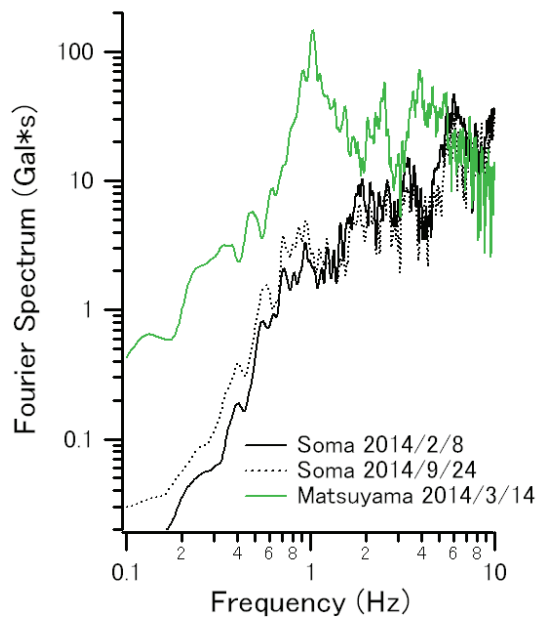


図-29 3つの記録から求めた加速度フーリエスペクトル

表-9 3つの記録の観測条件

| 日付 | 地点 | 規模 | 震央距離 |
|-----------|------|------|--------|
| 2014/2/8 | 相馬-O | M5.0 | 56.6km |
| 2014/3/14 | 松山-C | M6.2 | 78.0km |
| 2014/9/24 | 相馬-O | M5.1 | 50.3km |

K-NET 松山で観測された主な記録として、2000年鳥取県西部地震 (M7.3)、2001年芸予地震 (M6.7)、2006年6月12日大分県北部の地震 (M6.2)の記録のフーリエスペクトルを示したものであるが、いずれの記録においても、0.6Hz付近では松山-Gが小さめ、1Hz付近では松山-Gが大きめの値を示している。図-30 (e)は、今回の地震を含め、両地点のフーリエスペクトルの比率を示したものである。これを見ると、両地点のスペクトル比は地震によらずほぼ同様である。

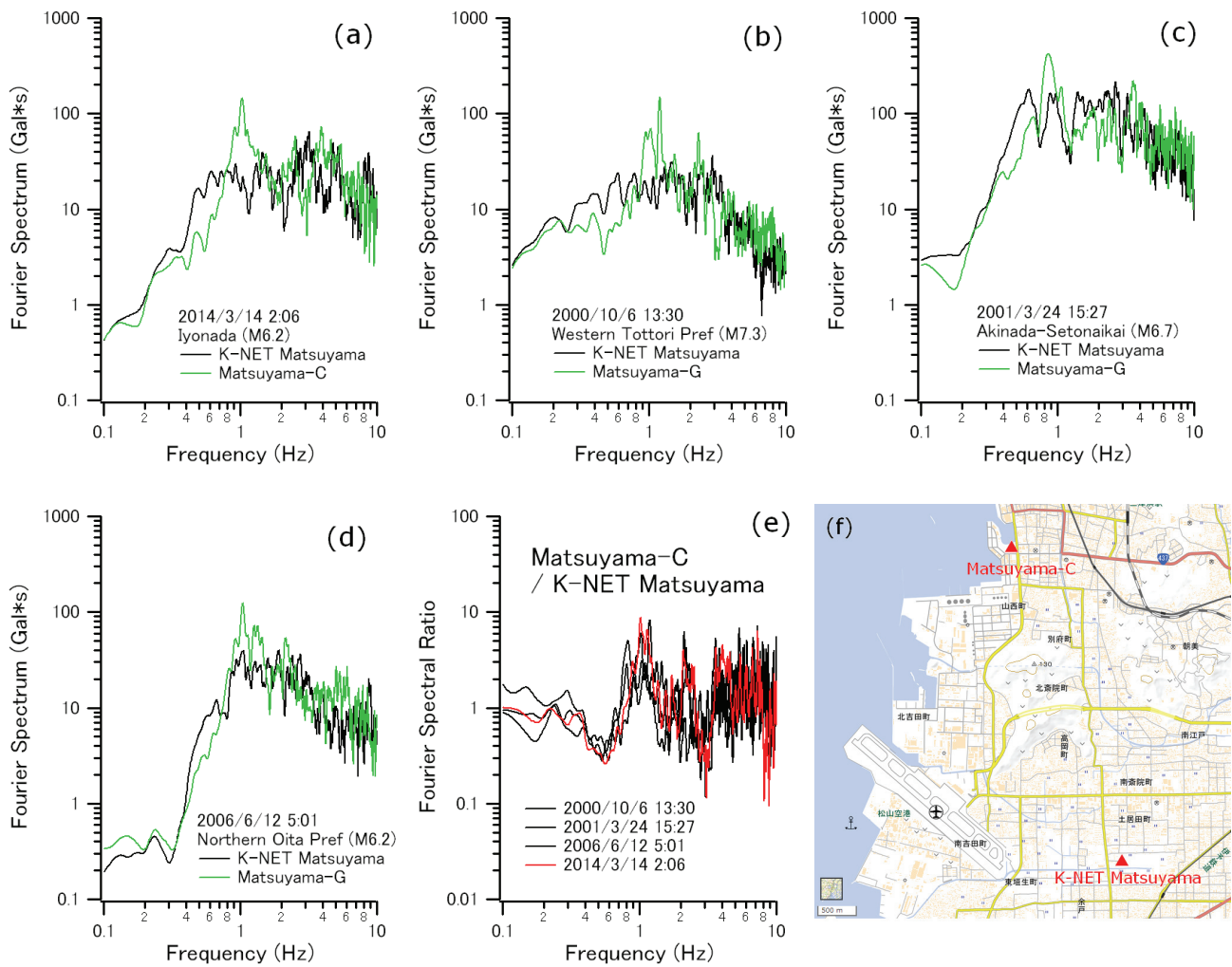


図-30 松山-C と K-NET 松山で観測されたこれまでの主な記録のフーリエスペクトルとそれらの比
(f)は両地点の位置関係)

6. まとめ

本資料は、1962年より実施されている港湾地域強震観測の記録のうち、2014年に得られた記録について報告するものである。得られた記録は地点毎に分類され、地震諸元、記録番号、最大加速度等とともに付録DVDの強震観測表にまとめられている。強震観測表の地震諸元は気象庁の地震・火山月報（カタログ編）に基づいている。強震観測表にまとめられている記録の中で、最大加速度が20Galを越える記録については加速度波形を示している。また、最大加速度が50Galを越える比較的大きな記録については、加速度波形に加え、速度波形、変位波形、フーリエスペクトル、応答スペクトルも併せて示している。

(2016年1月25日受付)

謝辞

港湾地域強震観測は、当所の他、国土交通省港湾局、東北地方整備局、関東地方整備局、北陸地方整備局、中部地方整備局、近畿地方整備局、中国地方整備局、四国地方整備局、九州地方整備局、北海道開発局、内閣府沖縄総合事務局、東京都港湾局、静岡県港湾局、大阪市港湾局、神戸市みなと総局および宮崎県港湾課の各機関の協力の下に実施されています。地震動研究チームの林公美さん、宮田さよ子さんには記録の処理などで大きく貢献していただいています。第5章では比較のため防災科学技術研究所のK-NETの記録を利用しました。(株)システムアンドデータリサーチの中村豊さんからは釧路港地中強震計の設置方位誤差について第一報をいただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 菅野高弘・三籙正明・及川研：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察（その 8）ケーソン式岸壁の被災に関する模型振動実験，港湾技研資料，No.813，1995 年 9 月，pp.207-252.
- 2) 一井康二・井合進・森田年一：兵庫県南部地震におけるケーソン式岸壁の挙動の有効応力解析，港湾技研報告，第 36 卷，第 2 号，1997 年 6 月，pp.41-86.
- 3) 野津厚・長尾毅：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性，港湾空港技術研究所資料 No.1112，2005 年 12 月.
- 4) 野津厚・菅野高弘：スペクトルインバージョンに基づく南西諸島の強震観測地点におけるサイト増幅特性，港湾空港技術研究所資料 No.1149，2007 年 3 月.
- 5) 野津厚・菅野高弘：スペクトルインバージョンに基づく道北の強震観測地点におけるサイト増幅特性，港湾空港技術研究所資料 No.1214，2010 年 6 月.
- 6) 野津厚・盛川仁：表層地盤の多重非線形効果を考慮した経験的グリーン関数法，地震2，第55巻，2003年3月，pp.361-374.
- 7) 土田 肇・山田通一郎・倉田栄一・須藤克子：港湾地域強震観測年報（1963・1964），港湾技研資料 No.55，1968 年 9 月.
- 8) 土田 肇・山田通一郎・倉田栄一・須藤克子：港湾地域強震観測年報（1965・1966），港湾技研資料 No.62，1968 年 12 月.
- 9) 土田 肇・倉田栄一・須藤克子：港湾地域強震観測年報（1967），港湾技研資料 No.64，1969 年 3 月.
- 10) 土田 肇・倉田栄一・須藤克子：港湾地域強震観測年報（1968），港湾技研資料 No.98，1970 年 3 月.
- 11) 土田 肇・倉田栄一・須藤克子：港湾地域強震観測年報（1969），港湾技研資料 No.100，1970 年 6 月.
- 12) 土田 肇・倉田栄一・須藤克子：港湾地域強震観測年報（1970），港湾技研資料 No.116，1971 年 3 月.
- 13) 倉田栄一・石坂徳三・土田 肇：港湾地域強震観測年報（1971），港湾技研資料 No.136，1972 年 3 月.
- 14) 倉田栄一・石坂徳三・土田 肇：港湾地域強震観測年報（1972），港湾技研資料 No.160，1973 年 3 月.
- 15) 倉田栄一・石坂徳三・土田 肇：港湾地域強震観測年報（1973），港湾技研資料 No.181，1974 年 3 月.
- 16) 倉田栄一・石坂徳三・土田 肇：港湾地域強震観測年報（1974），港湾技研資料 No.202，1975 年 3 月.
- 17) 倉田栄一・井合 進・土田 肇：港湾地域強震観測年報（1975），港湾技研資料 No.236，1976 年 3 月.
- 18) 倉田栄一・井合 進・土田 肇：港湾地域強震観測年報，補遺（1963~1975，上下動成分），港湾技研資料 No.250，1976 年 12 月.
- 19) 倉田栄一・井合 進・土田 肇：港湾地域強震観測年報（1976・1977），港湾技研資料 No.287，1978 年 3 月.
- 20) 倉田栄一・井合 進・横山淑子・土田 肇：港湾地域強震観測年報（1978・1979），港湾技研資料 No.338，1980 年 6 月.
- 21) 倉田栄一・井合 進・横山淑子・野田節男：港湾地域強震観測年報（1980），港湾技研資料 No.374，1981 年 6 月.
- 22) 倉田栄一・野田節男：港湾地域強震観測年報（1981），港湾技研資料 No.426，1982 年 6 月.
- 23) 倉田栄一・福原哲夫・野田節男：港湾地域強震観測年報（1982），港湾技研資料 No.446，1983 年 6 月.
- 24) 倉田栄一・福原哲夫・野田節男：港湾地域強震観測年報（1983），港湾技研資料 No.487，1984 年 6 月.
- 25) 倉田栄一・福原哲夫・野田節男：港湾地域強震観測年報（1984），港湾技研資料 No.519，1985 年 6 月.
- 26) 倉田栄一・福原哲夫・野田節男：港湾地域強震観測年報（1985），港湾技研資料 No.547，1986 年 6 月.
- 27) 倉田栄一・井合 進・野田節男：港湾地域強震観測年報（1986），港湾技研資料 No.588，1987 年 6 月.
- 28) 倉田栄一・野田節男・樋口豊志：港湾地域強震観測年報（1987），港湾技研資料 No.618，1988 年 6 月.
- 29) 倉田栄一・井合 進：港湾地域強震観測年報（1988），港湾技研資料 No.649，1989 年 6 月.
- 30) 倉田栄一・井合 進：港湾地域強震観測年報（1989），港湾技研資料 No.676，1990 年 6 月.
- 31) 倉田栄一・井合 進：港湾地域強震観測年報（1990），港湾技研資料 No.705，1991 年 6 月.
- 32) 倉田栄一・井合 進：港湾地域強震観測年報（1991），港湾技研資料 No.727，1992 年 6 月.
- 33) 松永康男・桜井博孝・森田年一・井合 進：港湾地域強震観測年報（1992&1993），港湾技研資料 No.776，1994 年 6 月.
- 34) 宮田正史・佐藤幸博・一井康二・森田年一・井合 進：港湾地域強震観測年報（1994），港湾技研資料 No.840，1996 年 6 月.
- 35) 佐藤幸博・一井康二・井合 進・星野裕子・佐藤陽子・宮田正史・森田年一：港湾地域強震観測年報（1995&1996），港湾技研資料 No.909，1998 年 9 月.
- 36) 佐藤幸博・一井康二・井合 進・星野裕子・佐藤陽子：港湾地域強震観測年報（1997），港湾技研資料 No.936，1999 年 6 月.
- 37) 佐藤幸博・一井康二・星野裕子・佐藤陽子・井合 進・

- 長尾 毅：港湾地域強震観測年報（1998），港湾技研資料 No.942，1999年9月。
- 38) 野津 厚・深澤清尊・佐藤陽子・玉井伸昌・菅野高弘：港湾地域強震観測年報（1999&2000），港湾空港技術研究所資料 No.1016，2002年3月。
- 39) 深澤清尊・佐藤陽子・野津厚・菅野高弘：港湾地域強震観測年報（2001），港湾空港技術研究所資料 No.1019，2002年6月。
- 40) 野津 厚・佐藤陽子・深澤清尊・佐藤泰子・菅野高弘：港湾地域強震観測年報（2002），港湾空港技術研究所資料 No.1054，2003年9月。
- 41) 野津 厚・鈴木嘉秀・早田泰子・菅野高弘：港湾地域強震観測年報（2003），港湾空港技術研究所資料 No.1084，2004年9月。
- 42) 野津 厚・菅野高弘：港湾地域強震観測年報（2004），港湾空港技術研究所資料 No.1109，2005年9月。
- 43) 野津 厚・菅野高弘：港湾地域強震観測年報（2005），港湾空港技術研究所資料 No.1136，2006年9月。
- 44) 野津 厚・菅野高弘：港湾地域強震観測年報（2006），港湾空港技術研究所資料 No.1164，2007年9月。
- 45) 野津 厚・菅野高弘：港湾地域強震観測年報（2007），港湾空港技術研究所資料 No.1184，2008年9月。
- 46) 野津 厚・菅野高弘：港湾地域強震観測年報（2008），港湾空港技術研究所資料 No.1207，2010年3月。
- 47) 野津 厚・若井 淳：港湾地域強震観測年報（2009），港湾空港技術研究所資料 No.1223，2010年12月。
- 48) 野津 厚・若井 淳：港湾地域強震観測年報（2010），港湾空港技術研究所資料 No.1243，2011年12月。
- 49) 野津 厚・若井 淳：港湾地域強震観測年報（2011），港湾空港技術研究所資料 No.1266，2013年3月。
- 50) 野津 厚・若井 淳・長坂陽介：港湾地域強震観測年報（2012），港湾空港技術研究所資料 No.1283，2014年3月。
- 51) 野津 厚・長坂陽介：港湾地域強震観測年報（2013），港湾空港技術研究所資料 No.1302，2015年3月。
- 52) 土田 肇・倉田栄一・須藤克子：1968年十勝沖地震とその余震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料 No.80，1969年6月。
- 53) 倉田栄一・井合 進・土田 肇：1978年伊豆大島近海の地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料 No.317，1979年3月。
- 54) 倉田栄一・井合 進・横山淑子・土田 肇：1978年宮城県沖地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料 No.319，1979年6月。
- 55) 倉田栄一・野田節男：昭和57年（1982年）浦河沖地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料 No.442，1983年3月。
- 56) 倉田栄一・福原哲夫・野田節男：昭和58年（1983年）日本海中部地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料 No.458，1983年9月。
- 57) 倉田栄一・福原哲夫・野田節男：昭和59年（1984年）8月7日 日向灘地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料 No.503，1984年12月。
- 58) 倉田栄一・野田節男・樋口豊志：昭和62年（1987年）12月17日 千葉県東方沖地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料 No.619，1988年6月。
- 59) 松永康男・桜井博孝・森田年一・井合 進：1993年釧路沖地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料 No.777，1994年6月。
- 60) 松永康男・桜井博孝・森田年一・井合 進：1993年北海道南西沖地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料 No.778，1994年6月。
- 61) 佐藤幸博・宮田正史・一井康二・森田年一・井合 進：1994年北海道東方沖地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料 No.853，1996年12月。
- 62) 佐藤幸博・一井康二・宮田正史・森田年一・井合 進：1994年三陸はるか沖地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料 No.892，1997年12月。
- 63) 佐藤幸博・一井康二・星野裕子・佐藤陽子・宮田正史・森田年一・井合 進：1995年兵庫県南部地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料 No.907，1998年6月。
- 64) 土田 肇・山田暹一郎・倉田栄一：港湾地域強震観測地点資料（その1），港湾技研資料 No.34，1967年11月。
- 65) 倉田栄一・土田 肇・須藤克子：港湾地域強震観測地点資料（その2），港湾技研資料 No.107，1970年12月。
- 66) 倉田栄一・石坂徳三：港湾地域強震観測地点資料（その3），港湾技研資料 No.156，1973年3月。
- 67) 横山淑子・倉田栄一：港湾地域強震観測地点資料（その4），港湾技研資料 No.298，1978年6月。
- 68) 横山淑子・倉田栄一：港湾地域強震観測地点資料（その5），港湾技研資料 No.351，1980年9月。
- 69) 一井康二・佐藤幸博・佐藤陽子・星野裕子・井合 進：港湾地域強震観測地点資料（その6），港湾技研資料 No.935，1999年6月。
- 70) 木下繁夫：サーボ型地震計，地震2，第50巻，1998年3月，pp.471-483。
- 71) 若井 淳，野津 厚，菅野高弘，長坂陽介：港湾地域強震観測におけるデータ伝送方法の改良—地震動情報即時伝達システムの開発—，港湾空港技術研究所資料 No.1310，2015年9月。

- 72) 気象庁：地震・火山月報（防災編），2013年。
 73) 気象庁：地震・火山月報（カタログ編），平成25年12月，2013年。
 74) 井合 進・倉田栄一・土田 肇：強震記録のデジタル化と補正，港湾技研資料 No.286，1978年3月。
 75) Susumu Iai and Eiichi Kurata: Integration of strong-motion accelerograms, Proceedings of the 5th Japan Earthquake Engineering Symposium, 1978, pp.225-232.
 76) Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-net), *Seim. Res. Lett.*, Vol.69, 1998, pp.309-332.

付録 釧路港の地中強震計の設置方位誤差について

一般にボアホールを利用して地中に設置される強震計の水平面内の設置方位には誤差が含まれることが多い。釧路港では2012年3月よりSMAC-MDU型強震計で観測を行っているが，最近得られた記録の分析により，地中強震計（釧路-UB）の設置方位に誤差が含まれることが判ったので，この点について詳しく調べた。

調査の方法は，地表と地中のセンサー間で変化が少ないと考えられる地震動の長周期成分に着目し，地表と地中の記録を比較するものである。具体的には次のような手順で行った。

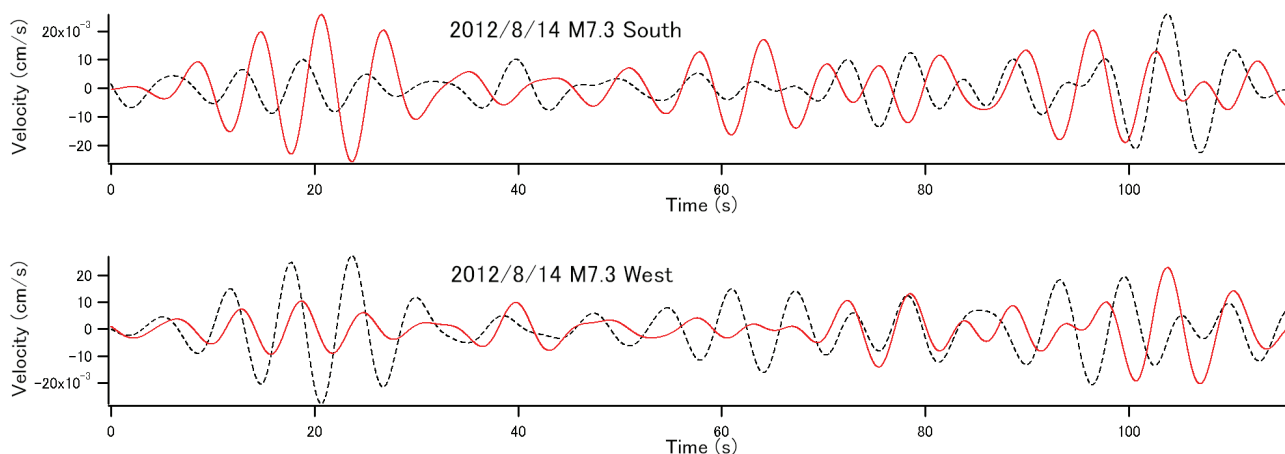


図-A.1 地表の記録から計算される速度波形（破線）と地中の記録から計算される速度波形（実線）の比較。2012年8月14日の記録を用い，地中の記録を回転させない場合。

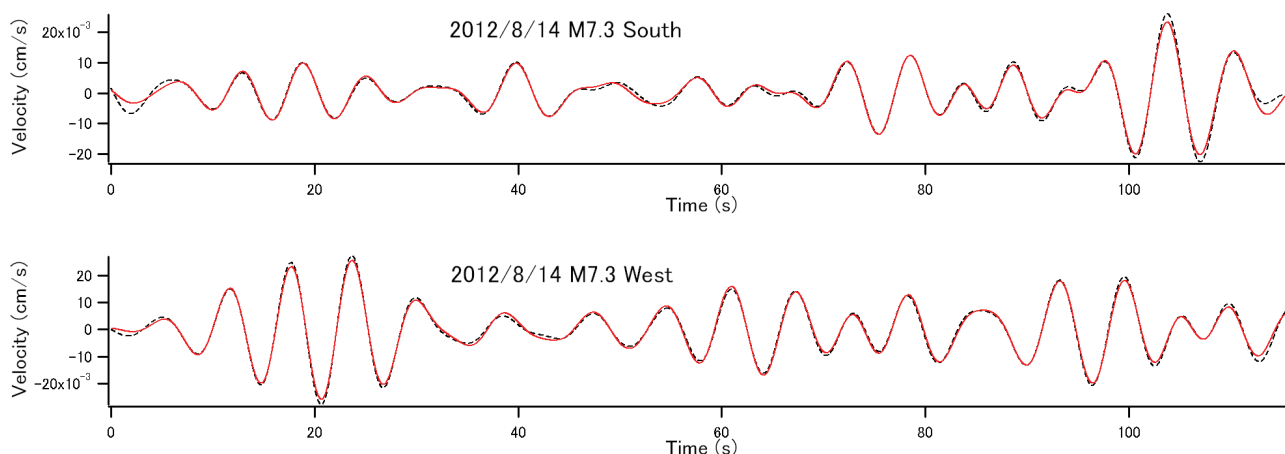


図-A.2 地表の記録から計算される速度波形（破線）と地中の記録から計算される速度波形（実線）の比較。2012年8月14日の記録を用い，地中の記録を86°回転させた場合。

表-A.1 設置方位誤差の解析に使用した地震と残差が最小となる角度

| 日付 | 震央地名 | 規模 | 残差が最小となる角度 |
|------------|-----------|------|------------|
| 2012/8/14 | オホーツク海南部 | M7.3 | 86° |
| 2012/12/7 | 宮城県東方はるか沖 | M7.3 | 86° |
| 2013/4/19 | 千島列島 | M7.0 | 87° |
| 2013/10/26 | 北日本東方はるか沖 | M7.1 | 90° |

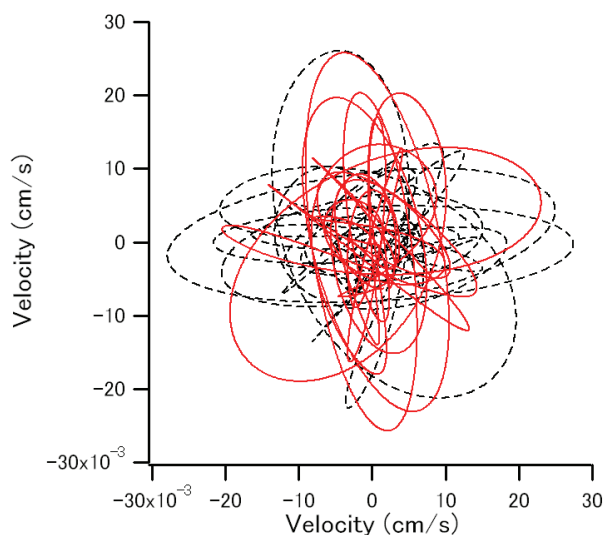


図-A.3 地表（破線）と地中（実線）の記録から計算される速度軌跡の比較。2012年8月14日の記録を用い、地中の記録を回転させない場合。

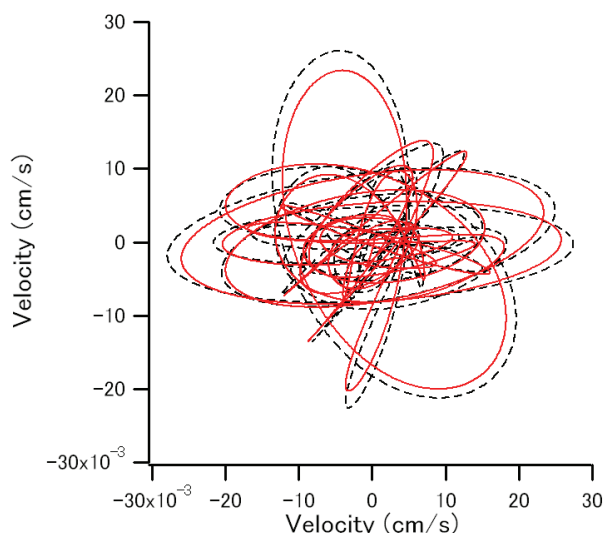


図-A.4 地表（破線）と地中（実線）の記録から計算される速度軌跡の比較。2012年8月14日の記録を用い、地中の記録を86°回転させた場合。

まず、長周期側で十分に精度を有することが期待できるマグニチュードの大きい記録として、2012年3月の観測開始以降現在までに釧路港で得られているM7.0以上の記録（表-A.1の4つ）に着目し、地表と地中の記録に0.1-0.2Hzのバンドパスフィルタをかけた上で周波数領域で積分し、速度波形とした。次に、地中の記録を1°刻みで回転させながら、地表の記録と地中の記録の残差の自乗和を計算し、残差が最も小さくなる角度を求めた。その結果得られた角度を表-A.1に示している。

例えば2012年8月14日の記録に対しては残差を最小とする角度は86°であった。図-A.1には地中の記録を回転させない場合の地中の記録から計算される速度波形と地表の記録から計算される速度波形の比較を示す。この場合は速度波形は全く一致していない。一方、図-A.2には地中の記録を86°回転させた場合の地中の記録から計算される速度波形と地表の記録から計算される速度波形の比較を示す。この場合は地表と地中の速度波形はほぼ一致している。同じように速度の軌跡について比較を行った結果が図-A.3と図-A.4である。速度の軌跡で見ても、地中の記録を回転させない場合は地表と地中のものが全く一致しないが、地中の記録を86°回転させた場合は両者がほぼ一致している。他の3つの地震についても同様の傾向であった。

誤差が最小となる角度を4つの地震に対して平均すると87°となる。すなわち、釧路-UBの記録で「SOUTH」と表示されているものは実際には「S87E」、 「WEST」と表示されているものは実際には「W87S」と考えられる。

強震観測担当者（2014年1月～12月）

東北地方整備局

| | | | | |
|--------------|---------|-------|--------|-------|
| 青森港湾事務所 | | 玉山 具夫 | 須藤 浩 | 杉本 陽 |
| 八戸港湾・空港整備事務所 | | 地本 敏雄 | 滝沢 洋一 | 松野 潤 |
| | | 川合 政伸 | | |
| 釜石港湾事務所 | | 高橋 仁志 | 加賀谷 康司 | 山田 裕之 |
| 釜石港湾事務所 | 宮古港出張所 | 石岡 英樹 | 進藤 武 | |
| 釜石港湾事務所 | 大船渡港出張所 | 佐藤 勇二 | 大里 典正 | |
| 塩釜港湾・空港整備事務所 | | 及川 恵悦 | 瀬川 哲 | |
| 小名浜港湾事務所 | | 齋藤 良章 | | |
| 小名浜港湾事務所 | 相馬港出張所 | 斉藤 雅志 | | |
| 秋田港湾事務所 | | 菅原 将徳 | 富樫 浩一 | |
| 酒田港湾事務所 | | 小関 慎哉 | 永廣 迪 | |

北陸地方整備局

| | | | | |
|--------------|--|--------|-------|-------|
| 新潟港湾・空港整備事務所 | | 田村 孝夫 | 鈴木 智憲 | 澁谷 覚 |
| | | 千田 奈津子 | | |
| 伏木富山港湾事務所 | | 渡辺 晃弘 | 川見 健二 | |
| 金沢港湾・空港整備事務所 | | 安井 哲博 | 岡本 博 | 佐藤 敏文 |
| | | 友田 尚貴 | 間野 豊春 | |
| 敦賀港湾事務所 | | 竹田 敏之 | | |

関東地方整備局

| | | | | |
|---------------|----------|--------|--------|-------|
| 鹿島港湾・空港整備事務所 | | 関野 亮二 | 佐々木 績 | |
| 鹿島港湾・空港整備事務所 | 常陸那珂港事務所 | 関野 亮二 | 佐々木 績 | |
| 千葉港湾事務所 | | 岡島 達男 | 四戸 秀治 | 雨宮 康良 |
| | | 岩瀬 美奈子 | | |
| 横浜港湾空港技術調査事務所 | | 中村 浩明 | 能登谷 健一 | 村上 栄喜 |
| | | 佐藤 達也 | | |
| 京浜港湾事務所 | | 亀澤 満年 | | |

中部地方整備局

| | | | | |
|----------------|---------|--------|-------|-------|
| 清水港湾事務所 | | 本田 宗隆 | 島田 浩幸 | |
| 清水港湾事務所 | 下田港事務所 | 佐藤 友紀 | | |
| 清水港湾事務所 | 御前崎港事務所 | 井伊 孝義 | 浅井 茂樹 | |
| 三河港湾事務所 | | 山脇 秀仁 | 小園 雄二 | |
| 三河港湾事務所 | 衣浦港事務所 | 林 友弥 | 梅田 至人 | |
| 名古屋港湾事務所 | | 宇野 清助 | 上岡 智志 | 森下 倫明 |
| 名古屋港湾空港技術調査事務所 | | 作中 淳一郎 | 鷺見 直子 | |
| 四日市港湾事務所 | | 梶 浩太 | | |

近畿地方整備局

| | | | | |
|----------|--|-------|-------|-------|
| 和歌山港湾事務所 | | 土井 貴昭 | | |
| 神戸港湾事務所 | | 石川 健二 | 三邊 ふみ | 村木 一郎 |

中国地方整備局

境港湾・空港整備事務所 大杉 晋作 西本 高志
広島港湾・空港整備事務所 北浦 直子

四国地方整備局

松山港湾・空港整備事務所 二宮 裕介 福永 義仁
小松島港湾・空港整備事務所 杉山 元資郎 大仁 洋実
高知港湾・空港整備事務所 浅川 圭一 宮本 将平 小松 喬

九州地方整備局

博多港湾・空港整備事務所 森重 常雄 佐藤 鉄志 花木 崇
別府港湾・空港整備事務所 木下 栄一郎 久賀 圭介
宮崎港湾・空港整備事務所 小池 二三勝 吉仲 大輔
志布志港湾事務所 二原 和教
鹿児島港湾・空港整備事務所 後田 一信 藤本 孝浩

北海道開発局

釧路開発建設部 釧路港湾事務所 青井 晃樹
釧路開発建設部 根室港湾事務所 山本 剛
帯広開発建設部 築港対策官付 千葉 俊夫 上杉 智
室蘭開発建設部 浦河港湾事務所 安永 健太 横山 慎司
室蘭開発建設部 苫小牧港湾事務所 有間 誠一 鈴木 貴秀
室蘭開発建設部 室蘭港湾事務所 下口 由晃
小樽開発建設部 小樽港湾事務所 佐伯 茂 松野 健 山田 博人
函館開発建設部 函館港湾事務所 佐藤 亘
函館開発建設部 江差港湾事務所 丸山 政行 高橋 博 新田 敦
留萌開発建設部 留萌港湾事務所 菊池 隆一 杉森 信博
網走開発建設部 網走港湾事務所 藤塚 大輔
網走開発建設部 紋別港湾事務所 齋藤 慎 桑田 一良

沖縄総合事務局

那覇港湾・空港整備事務所 吉平 健治 石垣 里彦 當銘 正秀
那覇港湾・空港整備事務所 中城湾港出張所 平山 千尋
平良港湾事務所 郷原 裕紀
石垣港湾事務所 山田 文人

都道府県

東京都港湾局 野田 聡
大阪市港湾局 永吉 修二 簾内 真 西村 孝一
中井 美佐夫 西村 和展
神戸市みなと総局 藤井 研一 鍛冶 寛典 上村 修平
静岡県田子の浦港管理事務所 佐野 光政 吉川 孝洋
宮崎県北部港湾事務所 入木田 稔 鎌田 豊子 永田 清文
池田 光祐

港湾空港技術研究所資料 No.1322

2016.6

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2016) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています