

日本海中部地震時の気象庁1倍強震計記録に基づく 周期10秒前後の地震動特性

山田 善一・野田 茂・富本 信

CHARACTERISTICS OF RELATIVELY LONG-PERIOD (5 TO 15 SEC) GROUND MOTIONS USING JMA'S SEISMOGRAPH RECORDS DURING THE 1983 NIHONKAI-CHUBU EARTHQUAKE

By *Yoshikazu YAMADA, Shigeru NODA*
and *Makoto TOMIMOTO*

Synopsis

This paper attempts to study the characteristics of long-period ground motions during the 1983 Nihonkai-chubu earthquake from direct information of JMA's displacement-type seismograph records obtained at over 26 observation sites. The levels of displacement, velocity and acceleration amplitudes of digitized and corrected records are first examined. Secondly, the characteristics of the records are investigated by using the response spectra and evolutionary power spectra, etc. The displacement time histories and response spectra calculated from the digitized seismograph records at typical stations agree very well in the period range from 2 to 20 s with the ones from some other strong-motion seismographs. It is found that JMA's seismograms can be adequately available for their engineering purpose. However, the reliability of long-period ground motions obtained by SMAC-B₂ accelerographs is very low. Finally, the properties obtained above are compared with those known from previous researches primarily on acceleration strong-motion records.

1. 緒 論

最近、大型石油タンク、長大橋梁、超高層ビルなど固有周期が5秒以上にも達する構造物が、建設されるようになってきた。通常の工学式強震加速度計では、この帯域の地震動を精度よく記録できないこともあって、大地震時の応答評価は不十分なのが現状である。このようなことを勘案すると、短周期地震動よりもや長周期地震動（主に、表面波が対象となる）に対する安全性の検討を加えることが必要であろう。

実情としては、巨大地震による良質な記録が現在までのところ少なく、また巨大地震の発生がまれであることから、近い将来に巨大地震時のやや長周期の記録が豊富に得られることも期待できない。このような問題意識に立脚して、近年、断層モデルと表面波動起理論を組み合わせ、過去の大規模地震時における地震動変位波形の理論的再現を試みる研究がいくつか行われている^{1),2)}。その結果、単純な断層の破壊過程に対して、周期5～10数秒以上ならば、理論波形は、実波形によく一致することが明らかになってきた。

ところで、SMAC型加速度強震計は、1953年から、建築物、橋梁、ダム、港湾施設などの各種構造物に設置されている。これらは地盤上に設置されているものも少なくないが、主に前述の構造物に設置されていて、その地震応答の観測を通じて耐震設計に必要な基礎データを取得するという工学的な性格の強いものである。ところが、前述のように、最近の構造物の長大化にともない、この強震計の性能に不十分な点が目立ちはじめた。刻時精度の悪いこと、初動部分の記録が得られないこと、などである。なかでも最も本質的な問題は、この強震計のカバーする周波数帯域およびダイナミック・レンジが狭いという点である。

一方、気象庁変位型強震計は機械式で、振子の相対的な動きをペンに伝え、記録紙上に可視記録を得るもので、倍率1倍の変位比例記録が得られる。振子の固有周期が水平動成分で6秒、上下動成分で5秒なので、主としてそれ以下の周期帯域をカバーしている。この強震計は3cm(水平成分)を超える振幅で飽和してしまうだけでなく、気象庁震度Vの地震動にさらされると復旧不可能な障害が発生することもある。そこまで致らないまでも、3cm/minという紙送り速度では高周波地震動の波形に関する情報は、はじめから望むべくもない。しかし、やや長周期地震動の把握においては威力を発揮するであろう。

さて、1983年の日本海中部地震により、震源から約270kmも離れた新潟市において、大型石油タンクのスロッシング現象が見られた。これは主に地震波の長周期成分によるものと考えられる。大型タンクだけでなく長大橋梁などの長周期構造物が建設されている現在、10秒前後の長周期成分を正しく評価することが必要である。

本研究の目的は、1983年の日本海中部地震時のやや長周期帯域(5~15秒)における大地震動の特性を検討することである。本研究では、前述したことを勘案して、気象庁1倍強震計(以下JMAと略す)記録を用いることにした。JMAの地震計は日本全国広範囲にわたって設置されている。また、この地震計は一般に長周期成分を正しく評価しているとされている。したがって、本研究の解析には適していると考えられる。

2. 日本海中部地震時のやや長周期地震動の性質

2.1 概 説

気象庁震源速報による、本震(5月26日11時59分、JST)後における余震の震源分布を示したのが、Fig. 1である。同図には、6月9日の21時49分の余震と6月21日の最大余震の位置を●印で、本震の震央を■印でプロットしている。余震域は日本海盆の東縁に位置し、その形状は南北に長い逆「く」の字型を呈している。

著者らは、本震発生後の7月上旬から、北海道・東北・関東・中部地域における、各管区・地方気象台および測候所(43観測地点)から、1倍強震計と100倍の電磁式地震計の記録(本震 $M=7.7$ 、6月9日の2つの余震 $M=6.1$ と6.0、最大余震 $M=7.1$)のコピーを入手した。このうち、今回数値化を実施した観測点はFig. 2に示す26地点である。

Fig. 3は、苫小牧と森における本震時の1倍強震計記録である。その他の代表的な観測点の波形は文献②)に示している。震源域近くの観測点としては、本震の震央から約110km離れた秋田と青森の気象台がある。これらの観測点や酒田(震央距離=約175km)での地震記録は初動直後にover scaleしている。震源から約190km離れた盛岡および約210kmの八戸と約215kmの函館ではじめて、

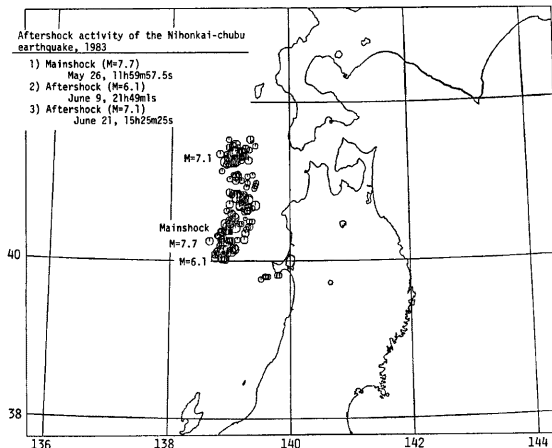


Fig. 1 Epicenters of mainshock and some aftershocks during the 1983 Nihonkai-chubu earthquake

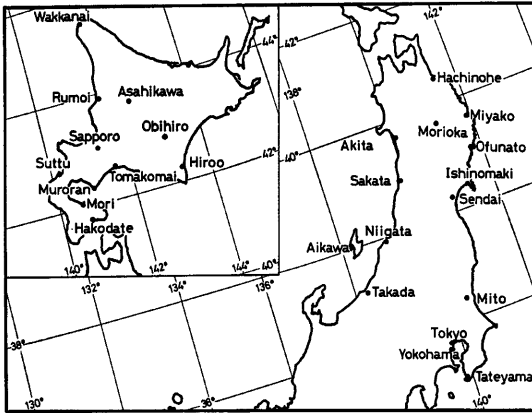


Fig. 2 Map showing locations of JMA's stations used in this study

over scaleのない記録となっている。注目すべきことは、震源から270kmのところにある新潟地方気象台の記録の水平成分の振幅が振り切れていることである。なお、気象庁1倍強震計記録の特徴については、既に文献2)で述べているので、ここでは割愛する。

各官署における記録を収集するとともに、強震計の計器特性に関する詳細なアンケート調査を実施した。なお、記象の各種補正に当たっては、各観測所での計器の整備状態や定数の経年変化が生ずるため、地震発生日に

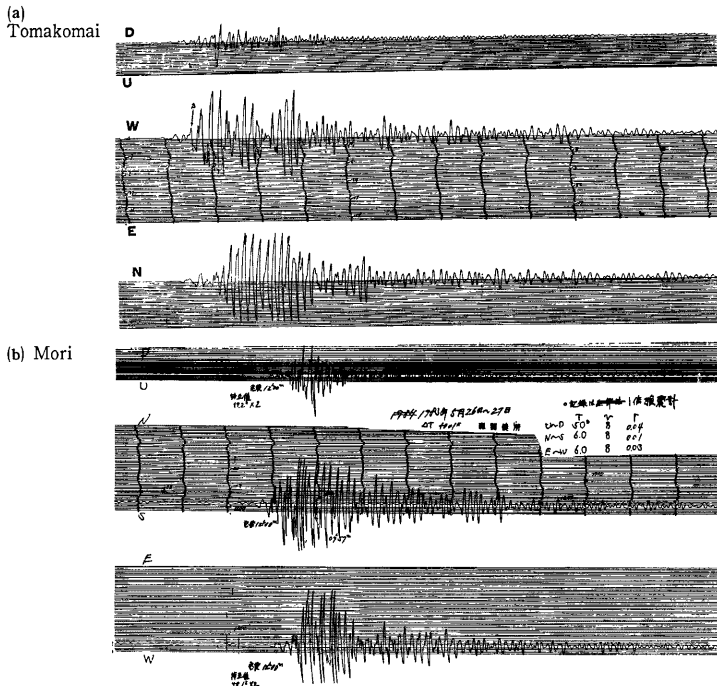


Fig. 3 Siesmograms of the 1983 Nihonkai-chubu earthquake (mainshock) recorded at typical stations of JMA

Table 1 Instrumental characteristics of JMA's seismographs at typical stations

(a) Akita					
Component \ Instrumental Constants	Natural Period T (sec)	Damping Ratio ν	Friction r (mm)	Length of Arm l (mm)	Delay Time from Standard Time (sec)
UD	5.1	7	0.05	250	-12.0
NS	6.0	7	0.04	300	- 9.4
EW	6.0	7	0.04	300	0
Static Magnification $V=1$					
(b) Niigata					
Component \ Instrumental Constants	Natural Period T (sec)	Damping Ratio ν	Friction r (mm)	Length of Arm l (mm)	Delay Time from Standard Time (sec)
UD	5.2	9	0.05	250	-13.0
NS	6.0	9	0.05	300	0
EW	6.0	8	0.04	300	- 1.2
Static Magnification $V=1$					
(c) Tokyo					
Component \ Instrumental Constants	Natural Period T (sec)	Damping Ratio ν	Friction r (mm)	Length of Arm l (mm)	Delay Time from Standard Time (sec)
UD	4.9	7.9	0.05	250	- 4.2
NS	6.1	8	0.01	300	-15.4
EW	5.9	8	0.065	300	0
Static Magnification $V=1$					

最も近い日に検定されたデータを採用した。具体的には、固有周期、制振度、振り部のアーム長、摩擦係、ならびに各成分間の時間の同時性を確保するために、基準時刻からの各ペンの起動の遅れを調整する時刻量を調べた。Table 1 は、代表的な観測点（秋田・新潟・東京）における、変位型強震計の時定数である。

2.2 数値化および各種補正により得られた地動

記録の数値化は、京都大学工学部土木工学教室計算機室所有のディジタイザーを用いて行なった。

機械式地震計の記録には、零線、紙送りむら、円弧、波形のゆがみ、成分間の時間の同時性、摩擦や計器特性などの各種の補正を施した。なお、零線補正、円弧補正、 θ 補正、 \cos 補正については、文献3)と4)を参照した。また、ペンの摩擦力を含めた非線形な運動方程式を解くことにより、記録波形から計器補正を考慮し、かつ摩擦の影響を除いた地動の変位が得られる。求めた波形は、チェビシェフ型の等リップル漸化フィルタ⁶⁾のうち、特にバンドパスフィルタ（2～20秒の範囲）を通してている。Fig. 4はこのフィルタの振幅特性を示したものである。このフィルタを用いて、加速度記録から変位を算出する際の精度と有効性については、既に文献5)で論じられている。

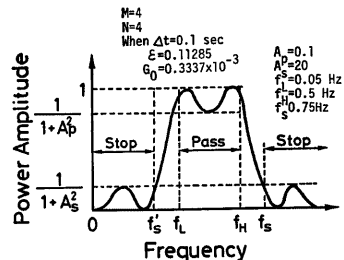


Fig. 4 Frequency characteristics of the Chebyshev filter with equiripple passband (band-pass filter) used in this analysis. The notations of M , N , G_0 , A_p and A_s et cetera are identical to Saito (1978).

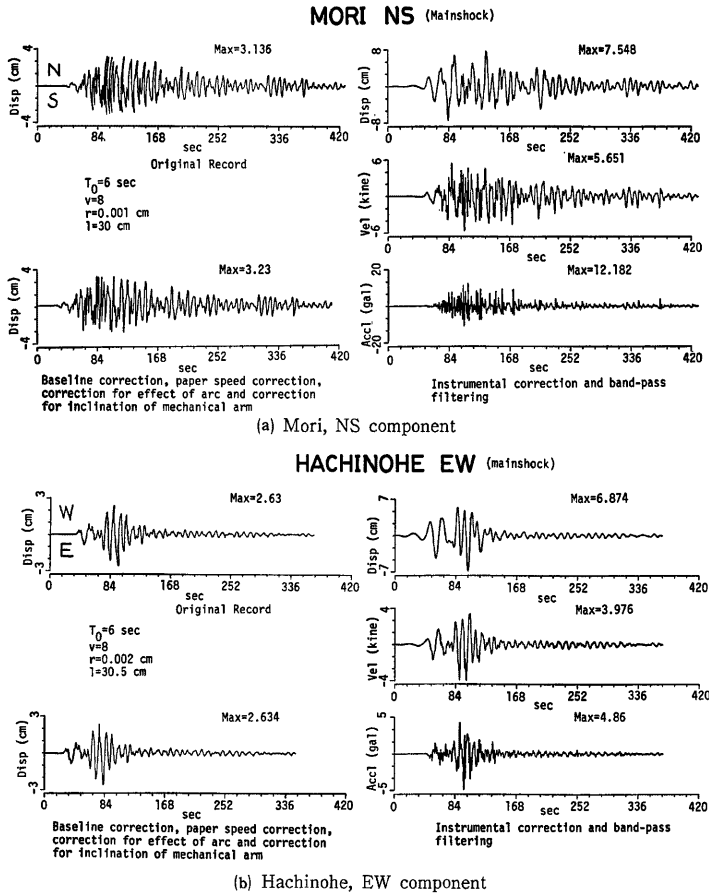


Fig. 5 Examples of seismogram corrections at some observatory stations of JMA due to mainshock

このような手続により、本震時における森の NS 成分と八戸の EW 成分を数値化した。Fig. 5 は、原記録、計器補正前の記録および地動の変位・速度・加速度波形について比較したものである。森の原記録には円弧歪の影響が強く出ている。しかし、計器補正後の波形を見ると、その影響が除かれている様子が理解できる。計器補正後の地動の変位波は、原記録の初動後約 2.4 分間における記録と比べると、かなり長周期の成分が出現しており、様子が全く異なっている。また、その最大振幅は原記録の振幅値の 2.5 倍程度となっていることがわかる。八戸 EW 成分に関しては強震部の継続時間が短い。しかし、森の NS 成分の波形は比較的継続時間が長く、八戸の波形に比し、短周期成分が勝っている。

2.3 強震計のアーム長の変化が地動に及ぼす影響

気象庁1倍強震計のアーム長は水平動で 3cm、上下動で 2.5cm である。振幅レベルが大きくなると、

ペンアームの円弧や零線のずれ・傾斜の影響が顕著になることがある。そこで、地震計のアーム長が不明としたとき、記象上の振幅の大きい箇所、アーム長が最大地動や波形にどの程度影響を及ぼすかを検討してみた。実際、戦前の中央気象台式の強震計の時定数は観測原簿に記されているが、アーム長はよくわからないことが多い。

Fig. 6 は、本震時における苫小牧の NS 成分と森の EW 成分の記録を数値化し、アーム長を 20~40 cm と変化させたときの、各種の補正後に計算した最大地動をプロットしたものである。縦軸の最大変位・最大速度・最大加速度は、アーム長が 30 cm としたときの値で正規化して示している。ここで、地震計の固有周期、制振度、摩擦値は同一にしている。Fig. 5 に示すように、地震記録の最大振幅は 3 cm 程度で、振幅の大きいレベルでは円弧の影響が大きく、アーム長の効果を調べるには適当と考えられる。

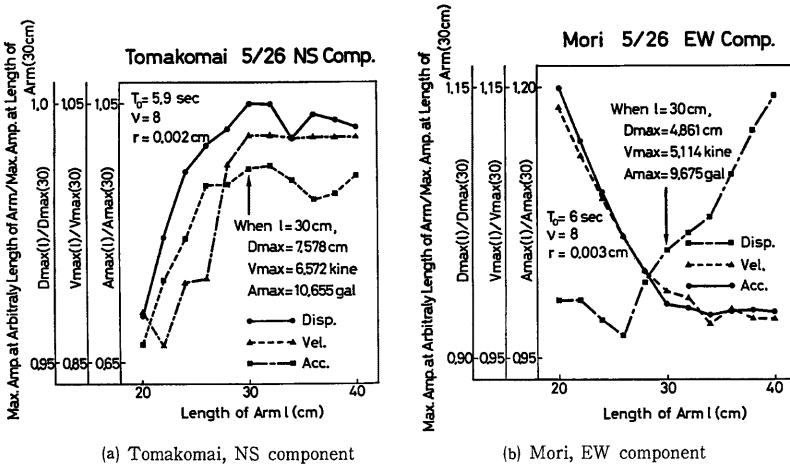


Fig. 6 Influence of finite length of mechanical arm on maximum ground motions at JMA's stations due to main shock

Fig. 6 より、アーム長が 20 cm から 30 cm と長くなるほど、苫小牧の NS 成分の最大地動は次第に大きくなり、それ以上のアーム長に対しては頭打ちか微減の傾向を示している。森における水平 EW 成分の最大速度と最大加速度はアーム長が長くなるほど (20~32 cm) 激減しているが、それより長いアームに対しては変化がない。一方、最大変位については、アーム長が 26 cm までは小さくなりつつあるが、それ以上になると、逆に増大している。

アーム長が 20, 30, 40 cm のときの変位と速度の波形 (森の EW 成分) は、Fig. 7 のようである。

記録の円弧補正とアームの傾斜の影響の除去に関する式 (文献3)の式 (3-14) ~ (3-16) から、以下のことがわかる。アーム長 l が長いほど、回転角の θ は小さくなり、 l と θ の相乗作用により、振幅と時間の補正量は大きくなることが考えられる。森のように、原記録 (Fig. 3(b)) の主要部に比較的短周期成分が卓越しており、計器補正によって地動変位 (Fig. 7(b)) に周期10秒前後の波が出現する状況を考えてみる。このときには、零線ずれとペンアームの円弧補正を施すと、アーム長が短いほど時間の補正量が小さくなるので、短周期成分が卓越する。Fig. 7 のように、この短周期成分はやや長周期地動の波形に付随した形で現われている。しかし、アーム長が長くなると、ゆっくりした波が卓越するから、短周期成分は消失してくる。Fig. 7 に示すように、初動部から135秒ほどの区間の波形 (原記録の振幅の大きい範囲) は、このよう

な状況を如実に表わしている。これより長い時間領域では、アーム長が変化しても、基本的には波の形は同一である。

一方、ここでは図示していないが、アーム長の変化に伴う、苫小牧のNS成分の地動の波形の変化は、先に示した森の例ほどあまり顕著ではなかった。ただし、アーム長が短くなるほど、変位・速度・加速度の順に、すなわち高周波成分になるほど、その最大振幅のレベルは標準のアーム長 ($l=30\text{cm}$) のときの振幅レベルに比べて、低下が激しくなっている。これは、自記紙上の記録にもとも周期10秒前後の波が卓越しており、しかも各種補正後の地動変位の波とはほぼ類似していることが原因と考えられる。

以上述べたことで工学上重要と考えられる点は、以下のようなものである。気象庁1倍強震計(52年C型)のアーム長は既知なので、本節で示したようなことは問題ない。しかし、1950年以前の比較的古い巨大地震の記録を対象にすると、地震計のアーム長は不明確である。この場合、適当な方法でアーム長を与えて記録の解析を行うと、本解析結果でわかるように、真の値からずれてしまい、重大な誤りとなることがある。

2.4 走時解析

今回の地震の本震と最大余震について、地震月報⁷⁾に基づき走時曲線を作成してみると、Fig.8 のようになる。本震時の観測点は26地点であり、余震時は17地点としている。変位地震記象から読みとられたP波初動の走時を●印で、S波の走時を■印で示している。本震時のP波とS波の走時には、明らかに全体の傾向からかけ離れたデータが見られる。これらのデータを除き、本震と最大余震時の走時を統計回帰したのが、図中の直線である。これより、震源から観測点までに至る実体波の伝播経路には、P波速度7.2~7.4km/secとS波速度4.2km/secを有する地盤層が存在していることが予想できる。本震時の震源深さは14km、余震時には9kmほどである。人工地震による解析の結果、日本海沿岸の地殻の深さは20km程度であり、約12km以深にはP波速度7km/secの地層が存在することがわかっている⁸⁾。本研究の走時解析で得た結果は、既往の資料とよく対応している。

2.5 地震記象の最大振幅の補正に関する一提案

気象庁1倍強震計記象の最大振幅は、その計器特性から考えると、周期6秒以下の帯域における地動変位の最大値に近いと考えられる。しかし、日本海中部地震のように周期10秒前後の地動が卓越することがあり、

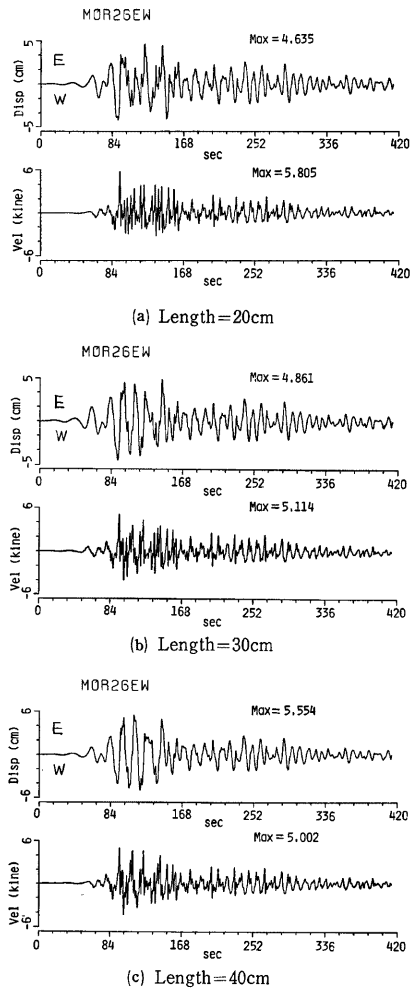


Fig. 7 Influence of finite length of mechanical arm on waveforms of ground motions (mainshock) at Mori JMA

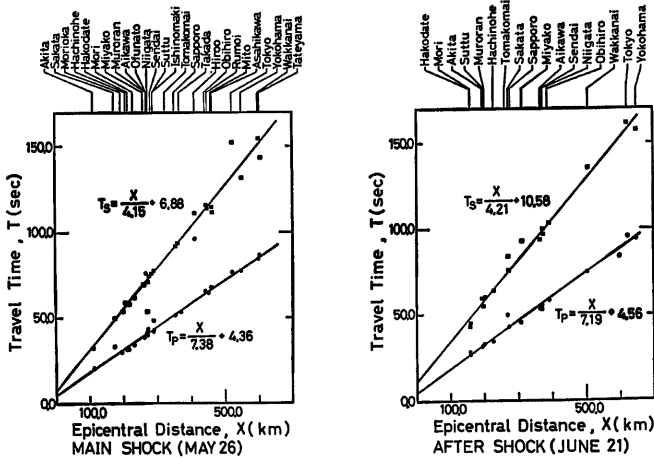


Fig. 8 Epicenter-oriented P- and S-wave arrival time curves of mainshock and large aftershock

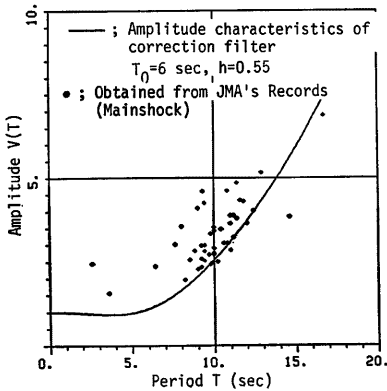


Fig. 9 Analytical check on accuracy of simplified estimation method for maximum ground displacements based on peak values and predominant periods of JMA's seismograms

このような場合、地動の最大変位は変位記象の最大振幅よりも大きくなることが予想される。

本震時における変位計記象（水平2成分）の最大振幅を A_{max} 、この最大振幅を与える卓越周期を T 、数値化して各種の補正を施した後の地動の最大水平変位（NS, EW 成分）を $A_{R,max}$ とする。ただし、 A_{max} と T の値は地震月報²⁾に記載されている。さらに、気象庁変位強震計の固有周期を T_0 、減衰定数を h とすれば、地震計の振幅特性を補正する係数 $V(T)$ は、次式のようになる。

$$V(T) = \sqrt{\{(T/T_0)^2 - 1\}^2 + 4h^2(T/T_0)^2} \dots\dots(1)$$

なお、ここでは水平成分に着目するので、 $T_0 = 6$ sec, $h = 0.55$ とした。

Fig. 9 では、横軸に T をとり、その T に対し、縦軸に $A_{R,max}/A_{max}$ を●印で、また $V(T)$ を曲線で示している。同図からわかるように、地動の最大変位 $A_{R,max}$ は、計器補正係数 $V(T)$ を地震記象の変位最大振幅 A_{max} に乗じた値に完全にはならない。

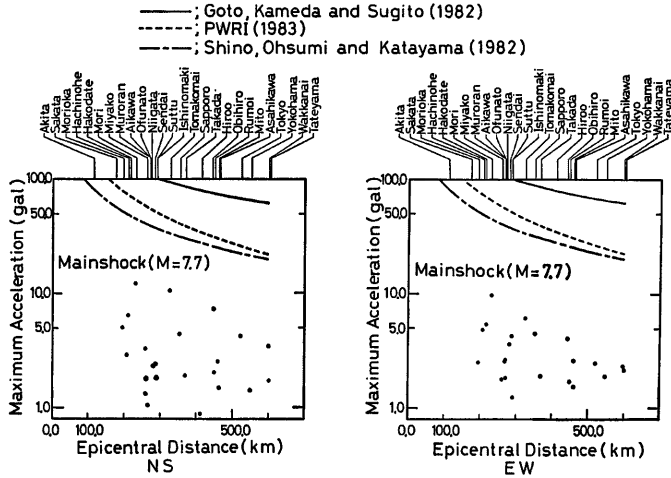
すなわち、 $A_{R,max} = V(T)A_{max}$ とはならず、 $A_{R,max}$

$= (1 \sim 2) V(T)A_{max}$ の関係がほぼ成立していることがわかる。このことは、大地震時に周期6秒以上の波が卓越するとき、1倍強震計の最大振幅 A_{max} や地震記象の卓越周期 T を用いて、変位計最大振幅 A_{max} に計器補正係数 $V(T)$ を乗じた値を、地動の最大変位とみなすことは過小評価につながることを示している。また、変位記象の卓越周期と地動変位の卓越周期が完全に一致しないことも、重要なことである。やや長周期地震動の変位波の卓越周期は、地震の規模と破壊のメカニズム、伝播経路や対象地点の地盤構造などを勘

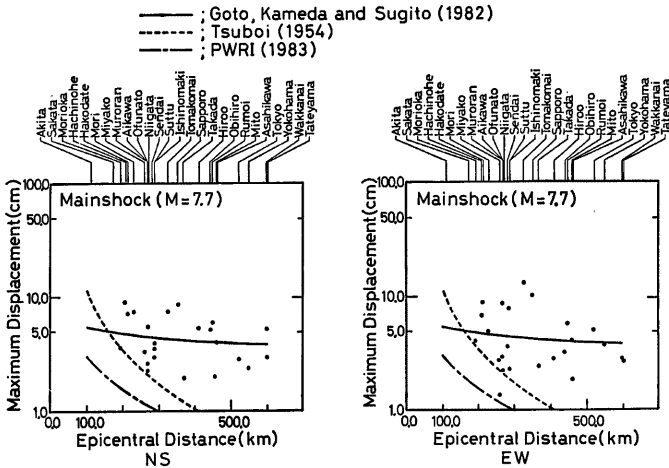
案して決めるべきもので、地震月報に記されている卓越周期と同等とするのは早計である。

2.6 最大地動のアテニュエーション特性

日本海中部地震による本震時の気象庁1倍強震計記録を数値化し、これを計器補正（補正範囲2～20秒）後、求めた加速度波形と変位波形から計算した最大地動の距離減衰特性を示すと、Fig. 10 のようになる。



(a) Acceleration



(b) Displacement

Fig. 10 Comparison of attenuation of peak values of ground motion records with corresponding curves obtained from Japanese empirical relations

最大加速度と最大変位とも、水平2成分(NS, EW)の距離減衰で示している。いずれの場合も、震央距離が比較的同じであっても、かなりのばらつきを有していることがわかる。このことは、断層の破壊が Fig. 1 に示す余震域を北上したことに密接なつながりがあることは言うまでもない。

最大変位は遠距離になるほど減衰して小さくなるとは限らない。例えば、震央距離が598 kmの稚内のNS成分の最大変位は5.2cm、522kmの東京のEW成分で5.05cm、549kmの横浜EWで3.69cm、601kmの館山で2.96cmである。これらに対し、半分程度の震央距離に位置する相川のNS-EW成分の最大変位は2.59, 2.93cmであって、遠距離の観測点の最大変位の5割になっている。このことは、稚内・東京・横浜・館山などが一般に長周期帯域で揺れやすい性質をもっていること⁹⁾と関係があることを意味する。

Fig. 10には、比較のため、現在までに我が国で提案されている主要な最大加速度と最大変位の予測式(距離減衰式)を、 $M=7.7$ に対して示している。最大加速度の推定式としては、1)後藤・亀田・杉戸¹⁰⁾、2)篠・大角・片山¹¹⁾、3)建設省土木研究所によるもの¹²⁾、最大変位には1)と3)による研究成果以外に、坪井公式によるものを採用した。坪井公式を除き、いずれの距離減衰式も強震加速度記録(主にSMAC地震計)から求めたものである。

後藤らの推定式は、震央距離が10~300kmの沖積および洪積地盤(道路橋耐震設計指針の第2種および第3種地盤に相当)に対するものである。28地震による84成分の記録を用いて、統計回帰式を求めている。計器特性の補正フィルターの範囲は0.15~10Hzとしている。従って、周期7秒程度までの長周期成分に注目していることになる。篠らの最大加速度の予測式は、我国の地盤上で得られた723成分の記録を用いて、道路橋示方書の地盤種別法に従い、1~4種に分類した式である。Fig. 10(a)には第3種地盤の最大加速度の距離減衰を示している。なお、この予測式は、記録の計器補正を実施しておらず、未補正記録(原記録)の最大加速度をもとに求められている。一方、建設省土木研究所では我国の地盤上で得られた2@197組の記録を対象に、水平2成分の合成により、最大地動の推定式を求めている。この解析に用いた地震動は1/3~12Hzの振動数帯域に限定している。低振動数側の遮断振動数から判断して、周期4~5秒以上の成分は考慮されていないことになる。Fig. 10には、2種+3種地盤の結果を示している。

一方、坪井の式は強震加速度の2回積分から求めた変位ではなく、Wiechert式地震計(一部は気象庁変位強震計)により観測された変位(水平2成分合成)をもとに求められたものである。ただし、震源深さ60km以下の地震で震央距離500kmまでのデータを用いている。地震計の特性からして、周期5, 6秒程度までの地動を対象にしており、振り切れていないデータから求めた式に相当している。

Fig. 10(a)からわかるように、気象庁変位強震計の記録から計算した地動の最大加速度は、強震計記録から求めたものよりもはるかに小さい。本研究では、数値化された周期2~20秒の帯域における地動に注目している。それに対し、統計予測式ではここで対象としている振動数範囲よりも相当高い振動数の加速度を考えている。このことが原因で、本解析結果と他の結果に大きな差が生じているのである。既往の最大地動の予測結果がお互いに異なっているのは、使用したデータの質の違いによる影響ではないかと考えられる。なお、変位を算出する際に用いるフィルター(振動数帯域)が個々の研究者ごとに同一ではないので、これらを考慮しないと厳密な意味では相互に比較できない。Fig. 10(b)から、本研究で求めた地動最大変位は、後藤らの式から推定した結果と比較的調和している。

前述したように、坪井公式は周期6秒以下の地震動最大変位の平均的な値を推定するときには妥当である。しかし、それ以上の周期あるいは変位計の最大振幅が3cm以上にまで適用するにはあまり適切ではない。日本海中部地震では卓越周期8秒以上の地点が多いため、このことが原因で、坪井公式から求めた最大地動変位と本解析による結果に開きがあるのである。このような場合、周期5, 6秒以下の帯域から得られた、100km程度以遠の地点の地動変位の予測式(坪井公式)を周期20秒程度にまで拡張するためには、Fig. 9の結果を勘案し、以下の式を適用すればよい。

$$A_{g,max} \approx 1.5V(T)A_{T,max} \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 $A_{r,max}$ は坪井公式から得られる変位である。上式で1.5の値を採用したのは、Fig. 9 から予測式まわりの実測値のばらつきを考慮した結果である。工学的に対処していく上で、現段階では式(2)による最大変位の予測法が現実的だと考えられる。

2.7 応答スペクトルの性質

減衰定数2%の変位応答スペクトルと加速度応答スペクトル（周期2～20秒）のピーク値を与える周期（卓越周期）とその周期におけるスペクトル値の関係を示したのが、Fig. 11 である。変位応答スペクトルを見ると、10秒ほどの固有周期を有する構造物が最も揺れやすくなることがわかる。一方、加速度応答スペクトルのピーク値を与える周期は2～4秒ほどに集中している。しかし、観測点によれば、周期10秒前後で加速度応答が最も大きくなる地点もあることがわかる。以上のことは、Mamula・工藤・嶋¹³⁾が最近指摘したように、日本各地における地震動の揺れやすさ・揺れにくさが周期の関数として与えられることと共通した特徴である。

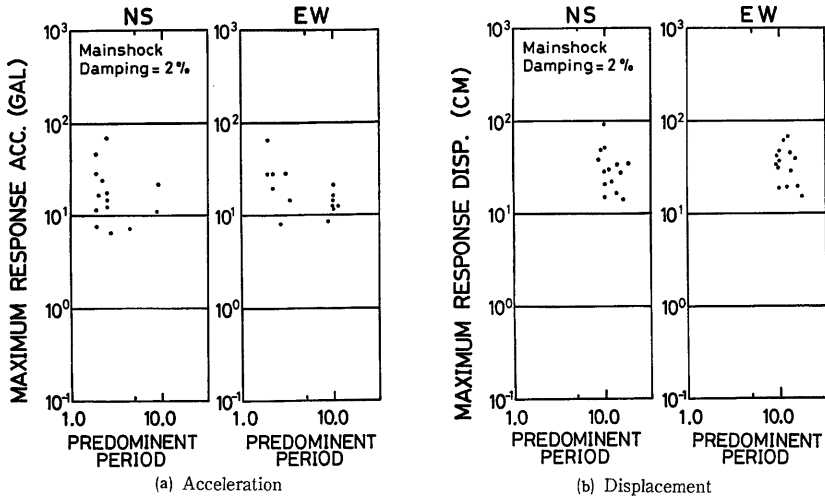


Fig. 11 Distribution of predominant periods of response spectra(damping=2%) calculated from data used in this study

岡田・鏡味⁹⁾は日本各地の観測点で得られた JMA 変位型強震計記録の最大振幅を統計的に整理し、日本各地の揺れやすさの定量的評価を行なっている。Fig. 12 に、岡田らが求めた揺れ度指数と今回数値化して求めた本震時の最大変位振幅の関係を示した。両者は震央距離を説明変数として分析していないので、あまり相関性はよくない。相川における観測点と東京・館山・横浜におけるグループを比較してみる。東京などにおける揺れ度指数は相川のもの倍以上となっている。これらの地点が遠距離にもかかわらず、長周期帯域における地動の最大変位が大きくなっていることは、各地の揺れ度指数を相対的に比較することにより、ある程度予測できることがわかる。

Fig. 13 は、本震時の速度応答スペクトルを求めたものである。超高層ビル・吊橋の上部構造物などの減衰定数は約2%、石油タンクではスロッシングに対して0.1%程度といわれている。ここでは減衰定数として0.1と2%を採用した。水平成分の応答計算をした観測点は、札幌・八戸・函館・帯広・稚内・森・寿都・苫小牧・留萌・東京・横浜である。一方、上下動に対しては、秋田・新潟・酒田・八戸・函館・森・寿都を

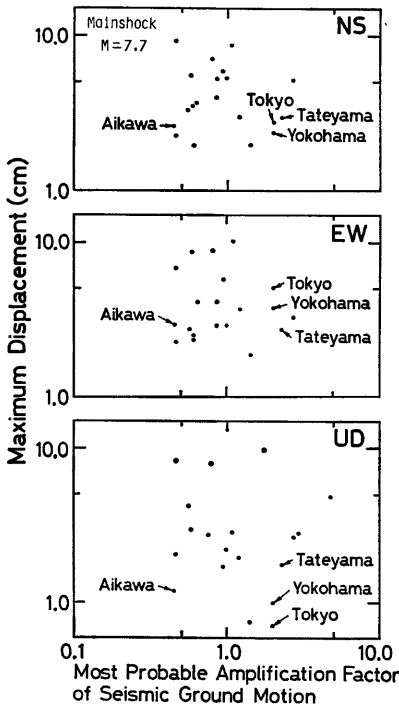


Fig. 12 Relationship between maximum displacements computed from JMA records and long-period ground-motion amplification factors obtained by Okada and Kagami (1978)

上も続く。構造物の減衰が小さい場合には、地震動の有効波数が多いほど、減衰の差による応答スペクトルの値の差が大きくなる。震源が浅く表面波が十分に発達する条件下では、大規模地震が長周期構造物の耐震上注意すべきものとなる。

2.8 非定常パワースペクトル

次に、最大余震時における東京と新潟の変位型強震計記録の水平動成分に対し、非定常スペクトル解析を行った。NS成分とEW成分に対して非定常スペクトル解析を施した結果が、Fig. 14である。図には、上側に加速度波形（周期2～20秒）、下側に振動数と時間の2つの変数にわたって計算した非定常パワースペクトル（evolutionary power spectrum）を示す。計算法として、本研究では、亀田¹⁴⁾の開発した手法を踏襲している。ただし、フィルターの減衰定数としては5%とした。

なお、東京と新潟の観測点は最大余震の震源位置のほぼ真南に位置している。従って、地動のNS、UD成分は主としてRayleigh波が、EW成分はLove波が寄与していると考えられる。

図を見ると、東京のNS成分を除き、主要動部のスペクトルの非定常性に一定の規則性がみられる。すなわち、各周期のスペクトルの時間的変動をたどると、ピークとなる時間が周期によって異なり、しかも、

計算の対象としている。

長周期構造物の代表例として、本州四国連絡橋公団で規定されている耐震設計基準（いわゆる本四スペクトル）は40kineを、高層建築技術指針としては47kine（上限）を、自治省告示（石油タンクのスロッシング）によると110kineほどを定めている。現行の耐震規程において対象とする周期帯域は、大型石油タンクではスロッシングの1次固有周期が数秒～15秒程度、高層ビルにおいては固有周期が2～6秒程度、また長大吊橋においては固有周期が2～10秒程度である。Fig. 13より、周期10秒前後で100kineにも及ぶ応答を示す例は苫小牧である。また、苫小牧は長大橋梁の基準値に近い値を示している。新潟・青森・酒田・秋田のように、記録上で針が振り切れてしまっていて数値化できなかった記録のことを考え合わせると、現行の各種の大型構造物の耐震基準を再検討する必要があるかもしれない。

周期8秒以下の応答値は各観測点によりかなりばらつきがある。例えば、留萌の地域のように、周期帯によれば、平均よりも揺れやすいこともあり、逆に揺れにくくなることもある。かなりの数の地域で周期によって著しく速度応答が変化している。また、森のように、周期によらず、ほぼ一定の速度応答スペクトル振幅を示す例もある。一般に、観測点の差による応答の分布幅は長周期成分（10秒前後）の地震動ほど小さい。この周期帯では、各観測点の地下構造の差にあまり依存しないということである。

ここでは図示していないが、周期の長い系ほど振動の成長が早く、最大応答値の出現も早かった。減衰の小さい系では、最大応答値に匹敵する大振幅が数分以

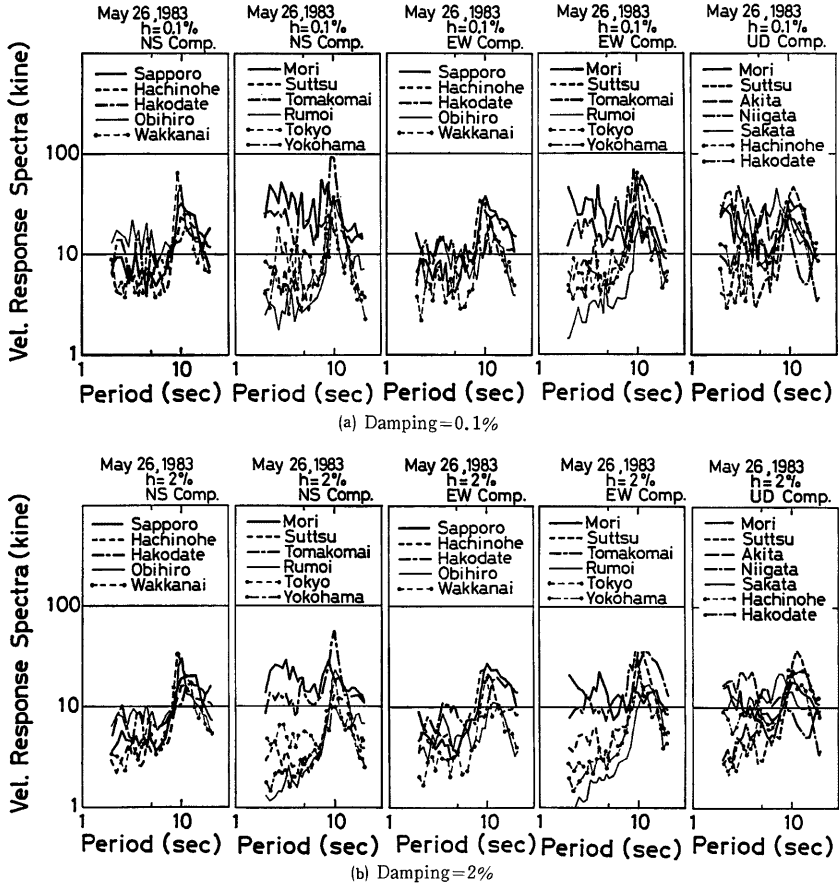


Fig. 13 Velocity response spectra computed from JMA's seismograms at various stations

各周期の局所的なスペクトルのピークをつらねたコンターに規則的な凹凸形状がみられる。このように、非定常スペクトルマップにみられる各周期のスペクトル振幅のピークとなる時間が一定の規則に従い異なるということは、そもそも観測点に到達する波動の到達時間が周期によって変わるということ意味する。これは、波動の伝播速度が周期によって規則的に異なるということである。すなわち、ここでの非定常スペクトルの規則的な変化現象は波動論的考察に限ると、表面波の分散性に起因すると考えられる。

工藤⁸⁾が求めた新潟の群速度分散曲線から Love 波の理論的到達時刻を求めると、到達時間関数の極小となる部分が新潟 EW 成分の非定常スペクトルマップの振幅極大となる部分に比較的良好に対応している。これは、群速度分散曲線の群速度が極小となる周期で表面波の振幅が極大となる性質を反映したものである。この点からも、非定常スペクトルの変化は表面波特性と合致することがうかがえる。

以上の波動特性を考えると、ここで議論している変位型強震記録（周期2～20秒）の主要動は分散性を有する表面波の特性が強いと考えられる。

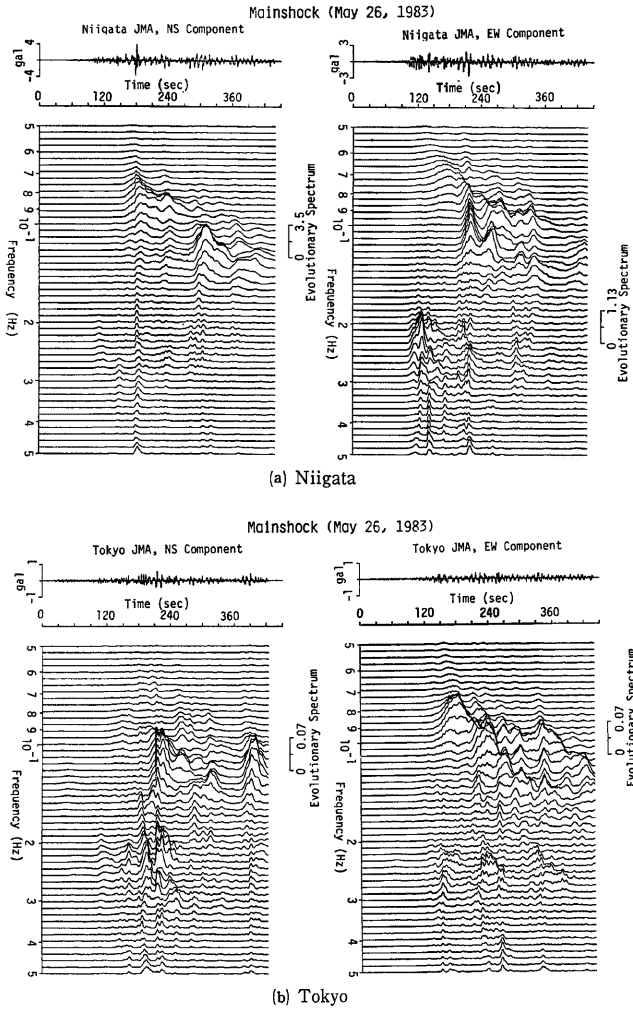


Fig. 14 Typical examples of evolutionary power spectra with acceleration time history

3. SMA C型加速度計と気象庁変位型強震計記録の比較

3.1 概 説

気象庁1倍強震計は全国的な地震観測網として敷設されている。しかも、やや長周期帯域の地震動を精度よく記録するものとして知られている。この強震計は変位振幅の低いレベルで常時作動しており、加速度が10 gal 以下の低いレベルでも十分に感応する。記録可能な最大振幅は、水平動で3cm、上下動で2.5cm

である。従って、大地震時には、特に震央距離の小さい (<100km) とところで、振り切れてしまう。

一方、SMAC-B₂型地震計に代表される強震加速度計はある加速度レベルでトリガーし、変位型強震計記録の飽和するような震央距離の範囲でも、観測が可能である。このSMAC強震加速度計の固有振動数は7.14Hz、減衰定数は1である。従って、SMAC-B₂型強震計の振幅特性は、周期が1秒より長いと、ほぼフラットである。しかし、固有周期が0.14秒ほどと短いため、周期数秒以上の地震動をどの程度の精度で捉えているかには疑問がある。このようなことから、これまで、SMAC-B₂型強震計記録のやや長周期成分(約5秒以上)の精度について、加振実験や数値解析によるシミュレーションがいくつか検討されてきた^{15)~20)}。

本章では、同一地域にあって近接した地点で得られた、気象庁1倍強震計記録とSMAC-B₂型加速度記録から計算した加速度応答スペクトル(減衰定数2%, 周期範囲2~20秒)を比較することにより、両者の一致度を検討した。後述するように、長周期帯域における気象庁1倍強震計記録は高い信頼度を有しており、それほど問題のないことを提示した。このことより、本章の議論は、SMAC型強震加速度記録の周期10秒前後の精度について、特に注目するものである。

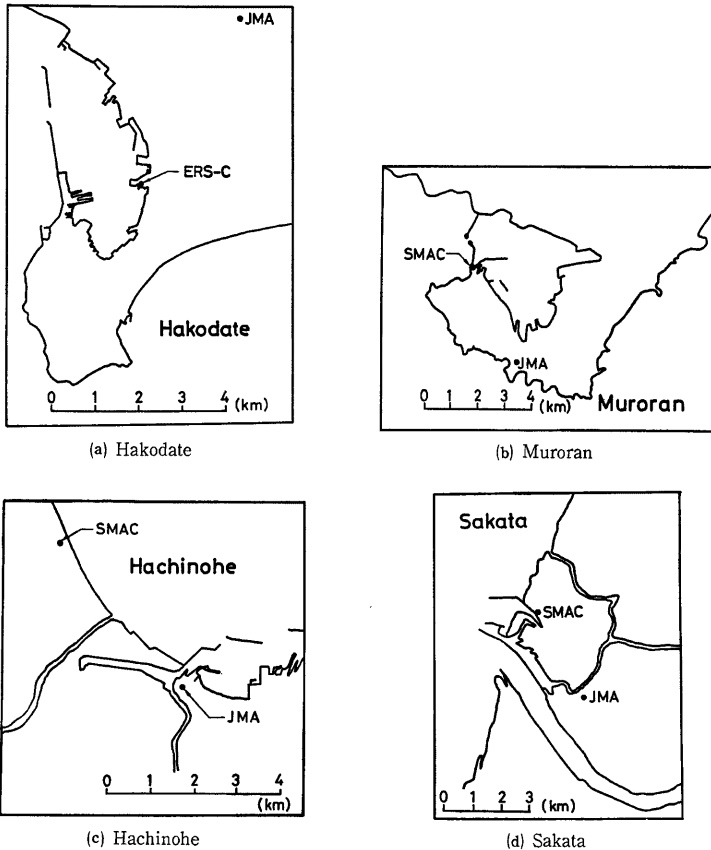


Fig. 15 Map showing locations of recording stations of PHRI and JMA

Fig. 15 は、函館・室蘭・八戸・酒田における、各気象台・測候所の位置 (JMA で示す) と、運輸省港湾技術研究所が各港に設けている強震観測地点 (SMAC あるいは ERS で示す) を地図上に示したものである。なお、秋田気象台と土崎港の位置関係は、後に示す Fig. 18 のようである。

港湾地域強震観測では、2つの型式の強震計が使われている。一つは、Fig. 15(a)に示す函館地点のように、電磁気的な機構を主体とした ERS 強震計である。もう一つは、SMAC-B₂ 強震計と呼ばれ、機械的な機構を主体とした強震計である。ERS-C 強震計の計器特性補正をするため、換振器の振動数特性として、固有振動数=3Hz、減衰定数=17を、記録器の振動数特性として、固有振動数=250Hz、減衰定数=0.7を用いた。これより、地動加速度に対して記録される強震計の加速度は、周期10秒で2割ほど低下する。

気象庁1倍強震計と SMAC 型強震計はともにペン書き式である。両者の記録を比較するには、地震計の特性、数値化、各種の補正、計器補正、数値微分などの精度のほかに、地盤条件の違いを考慮することが必要である。Figs. 15 と 18 からわかるように、各地の気象台・測候所は主に市街地の中心部に位置し、比較的地盤が良いと考えられる。一方、港湾は軟弱な地盤である。地図上で判断する限り、地盤条件の差が一番極端なのは函館であろう。JMA と SMAC の両地点は数 km ほど離れている。

3.2 応答スペクトルからみた SMAC 型加速度記録の信頼度について

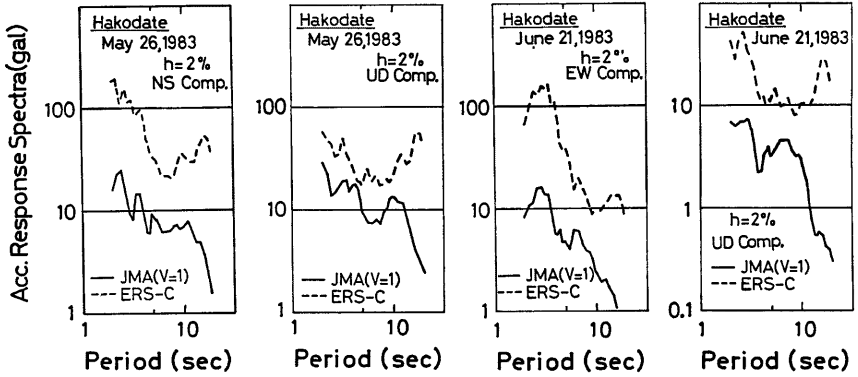
本震 (5月26日) と余震 (6月9日 $M=6.1$, 6月21日 $M=7.1$) 時の加速度応答スペクトルの一例を示したのが、Fig. 16 である。観測地点が近接しておれば、気象庁1倍変位計記録と SMAC あるいは ERS 型強震計記録から求めた加速度応答スペクトルは、理論的には同じような値を有するはずである。図によれば、5月26日における函館 UD 成分の固有周期5秒と10秒、同じく室蘭 NS 成分の固有周期5~10秒、EW 成分の10~20秒、八戸 UD 成分の固有周期3~10秒、6月9日における秋田 EW 成分の2~10秒ほどの範囲で、両者がおおむね同程度の値をとるものがある。しかし、一般に、SMAC 型強震計記録から求めた加速度応答スペクトルの方が気象庁1倍強震計記録から求めたものよりも常に系統的に大きく、その比は数倍に達している。また、ERS-C 強震計が設置されている函館に代表されるように、両者の比が10倍強になることもある。

強震加速度記録の継続時間は、本震時 (5月26日) の酒田・秋田・室蘭・函館・八戸でのおおの、120, 120.5, 59.5, 90, 90.5 (EW 成分は91) 秒、最大余震時 (6月21日) の室蘭・函館では各61, 88.5秒、6月9日の余震時の秋田では30秒であった。一方、変位型強震計に対しては、本震時における秋田と酒田 (ともに UD 成分)、さらに最大余震も含めた室蘭で7分、八戸 (本震) と秋田 (6月9日) で約6分、最大余震時の函館で4分ほどの記録を数値化した。ただし、函館気象台における本震時の記録は起動から1分40秒ほどで停止している。このように、加速度記録の継続時間は変位型のものに比べてかなり短い。大きな地震は、加速度記録が示すよりもずっと長い継続時間にわたって、長周期の変位地震動が発生する。従って、両地震記録の継続時間が応答スペクトルに及ぼす影響は、長周期成分の有無によって異なってくると考えられる。

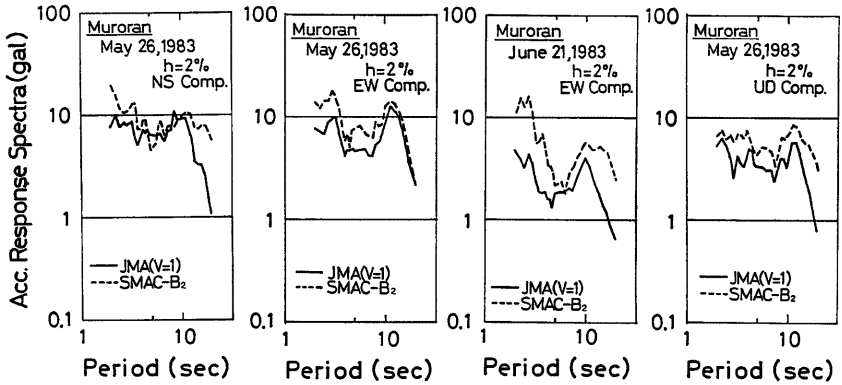
加速度記録そのものに周期数秒以上の長周期成分が十分含まれている場合、両地震記録から求めた応答スペクトルは同程度になると考えられる。しかし、振幅レベルが小さく、長周期成分の少ない加速度記録の場合、両者から求めた加速度応答には大きな開きがあり、強震加速度記録による応答の推定は過大評価になる。もちろん、このほかに、両地点の地盤条件の著しい差や、SMAC 型地震計自体の問題が原因で、相乗作用により過大評価につながる事が考えられる。

気象庁1倍変位計と加速度強震計の両者による加速度応答スペクトルの特徴としては、1) 同一の地震記録でも、成分によれば比較的良好な特性を示したり (例えば、本震時の八戸で得られた応答は、水平成分の対応が悪いが、UD 成分は固有周期3~10秒ほどの範囲で比較的一致している)、2) 同一の地震の一つの成分 (例えば、6月9日の秋田の EW 成分) であっても、詳細にみると、固有周期のある帯域では相互に比較的良好に一致しているが、その他の周期範囲では後者の地震計によるスペクトルの方が前者のスペクトルよりも常に大きくなっている、ことなどが挙げられる。

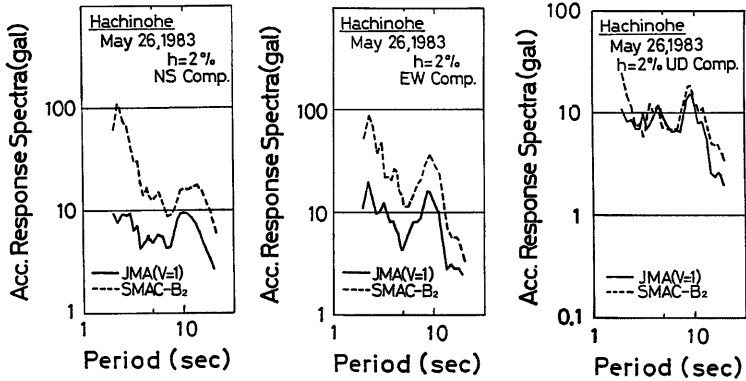
SMAC-B₂ 型の正弦波加振実験¹³⁾によれば、加速度記録から地動変位を求めたとき、周期10秒前後において10~20%程度の誤差を有することが知られている。実強震記録では多くの振動数成分が混在するため、誤差



(a) Hakodate



(b) Muroran



(c) Hachinohe

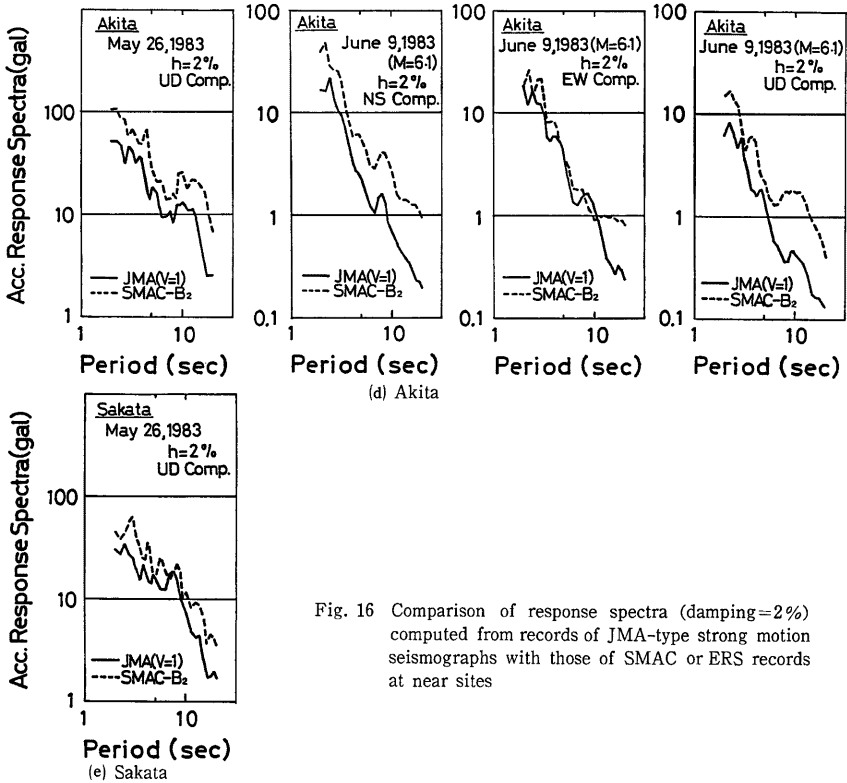


Fig. 16 Comparison of response spectra (damping=2%) computed from records of JMA-type strong motion seismographs with those of SMAC or ERS records at near sites

はさらに大きくなることが予想される。また、川島ら¹⁸⁾¹⁹⁾は、地動変位や加速度応答スペクトルの再現性検討加振実験を、強震記録を用いて実施している。その結果、低振動数側の遮断振動数を 1/3 Hz 程度とした場合、2 回積分から求めた地動変位や応答スペクトルは基準変位波や基準加速度のスペクトルをよく再現するとしている。後藤ら¹⁷⁾は、補正フィルターの低振動数側の遮断振動数を 0.03Hz から 0.3Hz まで変化させ、変位波形や最大振幅に与える影響を検討している。低振動数成分の除去とともに最大振幅が減少する傾向を示しているが、その傾向は入力地震動ごとに変化している。低域遮断振動数としては、平均的に 0.125 ~ 0.15Hz が適当であるとしている。

上記の誤差の原因としては、記録ペンのたわみ、記録の蛇行・変形、数値化に伴う読み取り誤差、有限記録長による誤差、地震計の機械的誤差、刻時マークによる紙送り速度のむら、などが考えられる^{19),21),22)}。一方、土岐ら²³⁾は、SMAC 加速度強震計から求めた応答が長周期帯域で過大なることを、ペンと記録紙の間に存在する摩擦の現象が原因であるとして、数値シミュレーションにより追求した。摩擦力による不感加速度は $\omega_0 r$ (SMAC 加速度計の場合、 $\omega_0=7.14$ Hz) である。ペン圧が 2~3gr とすると、不感加速度は 3gal 程度となる。このことを勘案し、Fig. 16 を見ると、この摩擦の影響で、やや長周期帯域での SMAC 記録の応答が大きくなったことが容易に考えられる。しかし、函館や八戸のように、摩擦力だけでは説明がつかないほど、加速度計から求めた加速度応答が変位計から計算した応答よりも異常に大きくなっている。これらの点について、さらに詳細に定量評価する必要がある。

以上を総合的に判断すると、SMAC型の工学式加速度強震計は周期6~7秒以上の長周期成分を評価する際、必ずしも十分な精度をもたないことがわかる。従って、超高層ビル・長大橋梁や石油タンク（特にスロッシング）の耐震性を検討するに当たっては、SMAC型強震計記録をそのまま使用するようなことは極力避けることが重要である。

4. やや長周期帯域における変位型強震計記録の精度

4.1 概 説

前章で示したように、SMAC強震計は加速度計であり、かつアナログ式であるため、SN比が低いことに禍いされて、やや長周期帯域における十分な情報が得られないことがわかった。このようなとき、固有周期5~6秒の気象庁1倍強震計の記録を解析することは有用と考えられる。この変位型の記録が解析に耐えるものであることは、既にいくつか示されている^{31),24),25)}。

本研究では、日本海中部地震の本震と余震時の1倍強震計記録を用いて、ダイナミック・レンジと周波数レンジの広い、他の強震計の記録と比較することにより、変位型強震計が長周期まで精度よく解析できることを定量的に検討した。以下に示すように、周期2~20秒の範囲における地動の変位波形と加速度応答スペクトルの精度に関して、これだけの広範囲のデータを統一的に比較・検討した研究例は他に見当たらない。

4.2 解析に用いた地震計の特性と設置位置

気象庁1倍強震計記録（以下 JMA と称する）との比較のため、次の5つの地震計を採用した。
 1)大森式長周期地震計（以下 OMORI と略す）

Table 2 Instrumental characteristics of Omori's long-period seismograph at Tokyo

Instrumental Constants Component	Natural Period T (sec)	Damping Ratio ν	Friction r (mm)	Length of Arm l (cm)	Static Magnification V
NS	31.0	1.8	0.019	103.5	1.44
EW	19.9	2.1	0.003	99.4	1.34

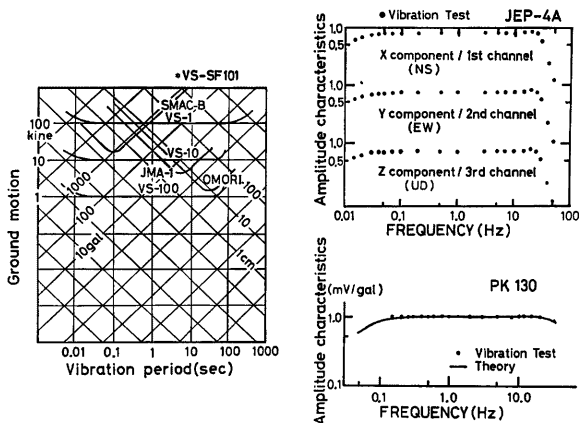


Fig. 17 Sensitivity of JMA's low-magnification displacement seismograph and some other strong motion seismographs used currently

この変位型地震計は東京大学地震研究所の地震計室に設置されている²⁶⁾。Table 2 はその特性値である。固有周期が数10秒でかつ減衰定数が小さいため、水平2成分とも固有周期の付近において、振動倍率が高くなる。しかし、周期10数秒以下の特性曲線 (Fig. 17 参照) はフラットであるため、この帯域の地震記録はほぼ地動の変位記録とみなしてよい。この地震計記録の数値化および各種の補正法は、基本的に2.2で述べた方法と同じである。

2) 村松式速度型強震計 (SF101)

この地震計は東京測振製で、秋田大学の鉱業博物館 (TEG) と秋田市土崎港の運輸省港湾土木事務所 (TUC) に設置され、5月31日から余震観測がされている。Fig. 17 からわかるように、周期0.5~50秒の範囲で、速度感度はフラットな特性を示す。3段階の増幅器 (VS-1, VS-10, VS-100) を内蔵しており、ダイナミック・レンジは0.05mkine~100kine までの地動を記録できるように設計されている。本研究では、1倍, 10倍, 100倍の観測データをAD変換し、そのうち高倍率でかつ波形の振り切れていない記録を用いた。また、AGCの機構を有しているため、振幅があるレベル以上になると、その時刻以降の波の振幅は1/2に低下する。この修正を施すため、AGC作動後の波形を2倍に拡大した。なお、地震計の計器補正は実施しなかった。

3) 明石製加速度強震計 (ATBS)

秋田地方気象台の気象庁1倍強震計が設置されている同じ台上に加速度計が設置され、余震観測が行なわれた。加速度計の諸元表から判断すると、0.03~25Hzの範囲で加速度応答はフラットである。地震計はサーボ型換振器を使用している。このことより、ここでは計器補正を施さなかった。ただし、原記録には5秒前後の周期波が全体的に含まれていたため、スプライン補間により、この波を除去した。

4) 明石サーボ型加速度強震計 (JEP-4A)

本震観測は東京都中野区野方で、余震観測は秋田大学鉱業博物館で実施された。この強震観測装置の様子は文献²⁷⁾に示されている。Fig. 17の総合振幅特性試験結果からわかるように、0.05~20Hzの領域で特性はほぼフラットである。そのため、換振器の計器補正は必要ない。

5) 動コイル型加速度計 (PK 130)

新潟地方気象台において、加速度計による余震観測が実施された。地震計は速度帰還型である。固有振動数は3Hz、減衰定数は水平成分で20、上下成分で19となっている。Fig. 17には、動作試験によるこの加速度計の振幅特性を●印でプロットしてあり、また時定数の設計値をもとにして求めた理論的な振幅特性を実線で示した。同図より、0.1Hz前後で感度が低下するため、ここでは原加速度記録に計器特性に関する補正を施した。ただし、速度帰還型であるため、速度に関する振幅特性に注目した。なお、原記録は16進コードで表記されているため、プログラムを作成し、10進コードに変換した。

Fig. 18は、東京・新潟・秋田における各地震計の配置図を示したものである。なお、秋田市の港湾技研の強震観測点 (土崎港) にはSMAC-B₂型の加速度計が設置されている。この加速度計は村松式速度型強震計と同一の構内にある。

以下、各地震記録から計算された地動の変位波形と加速度応答スペクトル ($h=2\%$) を相互に比較・検討した。た

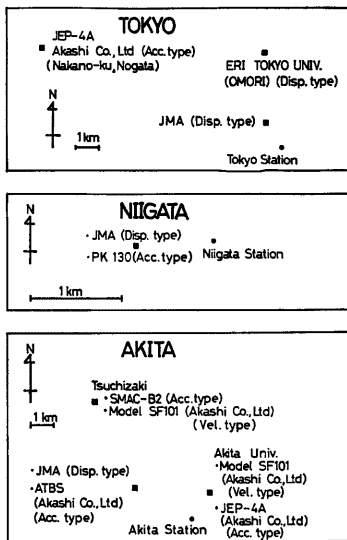


Fig. 18 Map showing locations of some seismographs at three cities

だし、地震動記録は、いずれもチェビシェフ型のバンドパス・フィルター（2～20秒）を通してている。

4.3 各種の地震計記録を用いた変位波形の比較

Fig. 19 は、東京管区気象台における気象庁1倍強震計と大森式長周期地震計から計算した地動（最大余震における水平成分）を比較したものである。地震計の OMORI から求めた最大変位振幅は JMA によるものよりも若干大きくなっている。観測点は同じではないが、細かい短周期側のリップルを除けば、変位波の相や卓越周期は一致している。また、周期10秒付近で振幅が大きくなることも共通であり、全体として長周期側で振幅が大きい傾向は類似している。両記録による変位波はほぼ完全に一致しており、2つの地震計の特性差による誤差は無視できると考えられる。

岡田²⁸⁾は、本震時の震央から520km離れた東京に設置された加速度計 JEP-4A の記録を用いて、気象庁1倍強震計記録との比較を行っている。すなわち、JEP-4A による加速度波形（NS 成分）を2回積分して変位に直した後、1倍強震計の計器特性を convolve して作られた記録と、1倍強震計記録を比較している。両地震記録の継続時間はともに7分ほどである。岡田が実施した結果によれば、初動後の160秒間における波形は互いにおおむね一致している。このことは、固有周期6秒、減衰定数0.55を有する構造物の振動変位に注目するならば、JMA の記録は十分解析に耐えることを示している。

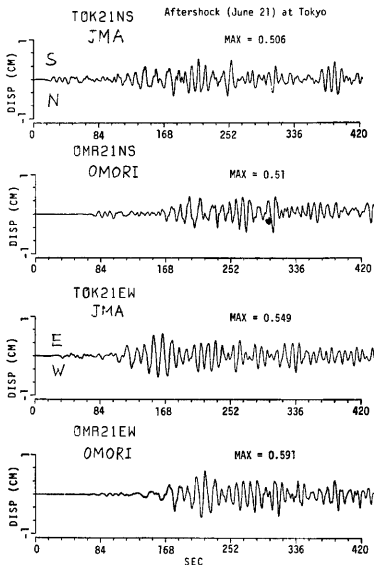


Fig. 19 Comparison of displacement waveforms of ground motions calculated from JMA records of large aftershock with those from Omori's long-period seismograph at Tokyo

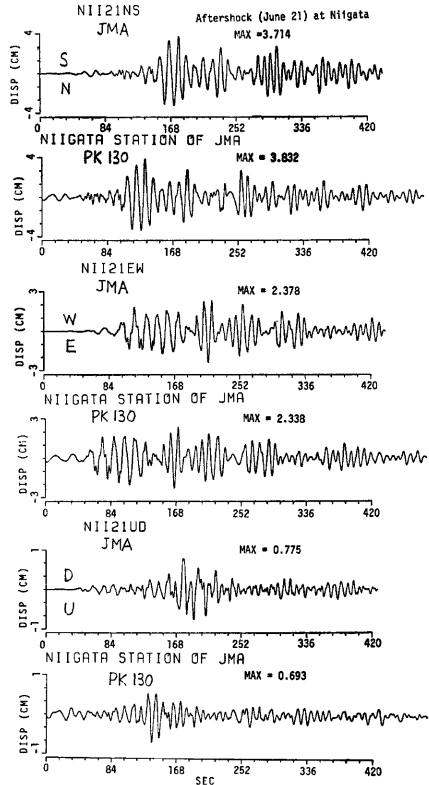


Fig. 20 Comparison of displacement waveforms of ground motions calculated from JMA records of large aftershock with those from strong motion accelerograph (PK 130) at Niigata JMA

次に、新潟地方気象台の同一場所で観測された、JMA の変位計と PK 130 の加速度計による最大余震の記録から求めた地動の変位波を比較したのが、Fig. 20 である。ただし、PK 130 の加速度計による記録器は起動後約 4 分間作動した後、13秒間停止し、その後再起動している。そこで、2つの加速度波形は空白時間の13秒間を介して繋ぎ合せた。PK 130 の波形の zero zone の時間帯を境に前後の波形を、JMA による波形に重ね合わせると、特に水平動について非常によく一致していることがわかる。PK 130 による上下動の最大変位は、JMA によるものの約 9 割である。上下動の最大加速度は 0.6gal ほどであり、記録の最小分解能が 0.05gal という点を勘案すれば、この誤差はそれほど問題ではないと考えられる。図からわかるように、PK 130 による加速度記録は初動の部分から得られていないため、変位地動の初めの部分は不自然である。しかし、トリガーから数10秒後の波形は、もともと小さな 2gal 以下の加速度であったにもかかわらず、2つの波形の対応は非常に満足できるものである。工藤ら⁹⁾は、この加速度記録にローパス・フィルターをかけ、さらに気象庁 1 倍強震計の振子特性を考慮した記象を求め、JMA の観測波形と比較し、両者がほぼ一致することを示している。

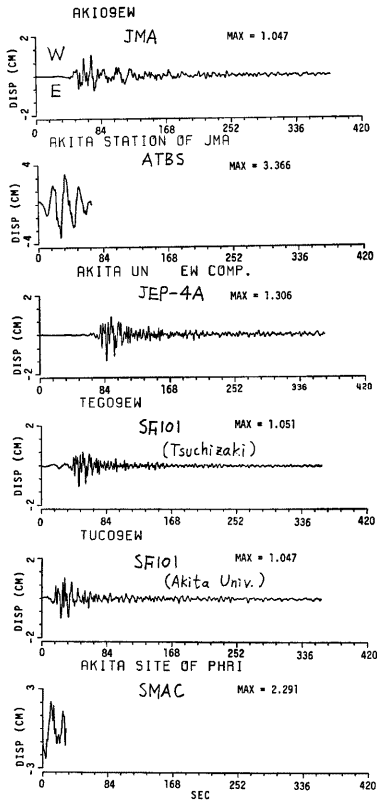
秋田は震源域から約 110km と近いこともあり、本震直後から余震観測がいくつかなされた。本研究では土崎港の港湾土木事務所 (TUC と称す、SMAC-B₂ 型加速度計と村松式速度型強震計 SF101)、秋田地方気象台 (JMA の変位型 1 倍強震計と加速度型強震計 ATBS)、秋田大学鉱業博物館 (TEG と称す、加速度型強震計 JEP-4A と村松式速度型強震計 SF101) における記録を採用した。これらのうち、TUC での SMAC-B₂ 型加速度記録は文献²⁹⁾に、TUC と TEG での SF101 の速度記録および秋田地方気象台での加速度記録は文献³⁰⁾に原データが示されている。2回の余震による各地震計の記録から求めた地動の変位波形を、Fig. 21 に示す。Fig. 21(a)は 6 月 9 日 21 時 49 分の余震による水平 EW 成分、(b)図は最大余震による NS 成分、(c)図は同じく EW 成分である。

JMA の記録から求めた地動の変位・速度・加速度波形 (6 月 9 日の余震) が文献³¹⁾に示されている。そこで、本研究で実施した数値化および各種の補正の有効性を吟味するため、文献³¹⁾の波形と比較してみた。その結果、本研究で計算した波形とよく一致することがわかった。

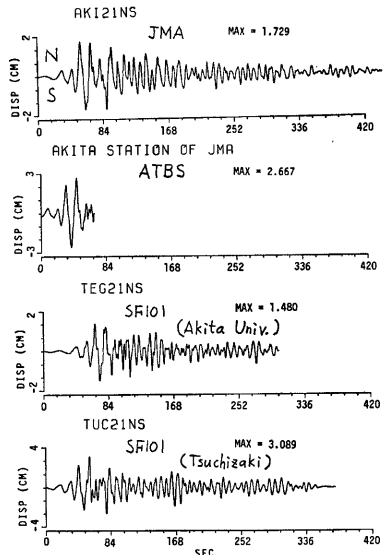
$M=6.1$ の余震 (6 月 9 日) に関して、TEG での 2 つの地震計、すなわち JEP-4A と SF101 による地動の波形は、1) 同一地点で観測されていること、および 2) 周波数レンジの広い地震計の記録 (未補正記録) であることから、ほぼ一致しているといえる。Fig. 18 から、TUC と TEG の地点は約 6km 離れている。最大余震 ($M=7.1$) のように地震が大きくなると、長周期成分が卓越することが顕著ではある。Fig. 21(b) と(c)から、TUC での振幅値は TEG よりも 1.4~2 倍大きい、初動部の位相は極めてよく一致している。ただし、主要動の後のコーダ部の特性は若干異なっている。

TUC では SMAC-B₂ 型加速度計の観測が実施されており、SF 101 による速度型強震計の記録と直接の比較が可能である。土崎港の観測点は軟弱な沖積層からなる地盤上にあり、岩盤上の観測点などと比べると、長周期成分の卓越する傾向にある。SMAC-B₂ と SF 101 による TUC での変位波形は類似していない。SMAC-B₂ 型に代表される工学式強震計が、数秒以上の長周期成分について必ずしも十分な精度をもたないことを、ここで改めて確認できた。

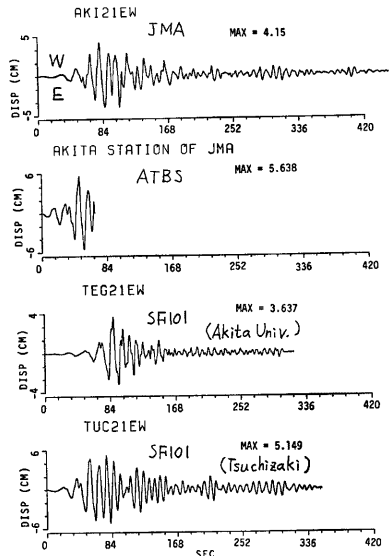
次に、秋田気象台での JMA の記録と加速度強震計 ATBS の記録を比較した。6 月 9 日の余震について、ATBS による変位波は周期 15 秒前後が卓越しており、その最大振幅は JMA によるものよりも 3 倍ほど大きい。最大余震の変位波形についてみると、ATBS における卓越周期はおよそ 10 秒である。ATBS による記録は初動後約 65 秒間しかないけれども、記録範囲については振幅が JMA によるものよりも少し大きい、位相は極めてよい一致を示している。Fig. 21 (b) と(c)からわかるように、地動変位は 10 数秒の波が卓越している。JMA と ATBS の変位波形の相はよく一致しているが、振幅に相違が見られるのは、強震計の記録器に問題があったのか、あるいは地震計が台上に固定されていないことによる震動の影響があるのかもしれない。現時点では両者の差を定量的に説明することはできないが、今後この原因について解明をする予定である。



(a) EW Component of ground displacement on June 9, 1983



(b) NS Component of ground displacement on June 21, 1983



(c) EW Component of ground displacement on June 21, 1983

Fig. 21 Comparison of displacement waveforms of ground motions calculated from JMA records with those from some other (velocity-and acceleration-type) strong-motion seismographs at Akita

入倉ら³⁰⁾は、最大余震について、ATBSの記録より2回積分して得られた変位記録と1倍強震計の記録を比較している。それによると、両者の振幅、位相と波の形はよく対応しており、卓越周期が6~8秒ということも共通である。しかし、重要なことは、変位型地震計の記録上で正確に再現できたとしても、地動の波形に変換したときによい一緻性を示さなければ、あまり意味がない。

最後に、JMAの1倍強震計記録とTEGでの速度型強震計SF101の記録から計算した地動の変位波形を比べた。2つの観測点は約3kmほど離れている。Fig. 21(b)と(c)より、2つの波形はおおむね対応しているのではないかと考えられる。秋田は東京や新潟に比べて震源に近く、地震の規模が大きいほど、震源過程、波動伝播や地盤条件が複雑に影響し合う。しかし、両地点のように比較的近接しているとき、地震計の種別にかかわらず、やや長周期帯域では同じ波形を示すのが理想的なので、さらに検討を続ける必要がある。

以上要するに、気象庁1倍強震計記録は周期10秒前後の地震動解析の使用に際し十分堪えることができ、信頼度も高いと言える。

4.4 加速度応答スペクトルに対する検討

各種の地震計記録より求めた変位波形の振幅や位相がお互いに整合していても、構造物の応答の面から検討すると、応答スペクトルがある周期帯域で異なった様相を呈することが考えられる。そこで、本節では、減衰定数2%の加速度応答スペクトルを計算し、気象庁1倍強震計より求められた応答スペクトルの精度について調べた。

Fig. 22は、最大余震時の東京における加速度応答スペクトル(水平2成分)を、JMAとOMORIの地震計から求めたものである。EW成分における6秒以下の固有周期を除けば、全体として両者のスペクトルはよく似た傾向を示す。この周期帯域において、大森式長周期地震計から求めたスペクトルは、JMAより求めたものよりも大きくなっている。これは、OMORIによる地動のEW成分はJMAによる地動よりも高周波成分を多く含んでいるからである。ちなみに、EW成分の最大速度と最大加速度は、JMAで0.385kine, 0.349gal, OMORIで0.575kine, 0.727galであった。

2回の余震(6月9日, 21日)において、JMAの1倍変位計と加速度型強震計PK130の両者により、新潟地方気象台で得られた記録の加速度応答スペクトルが、Fig. 23である。地震の規模が大きい最大余震

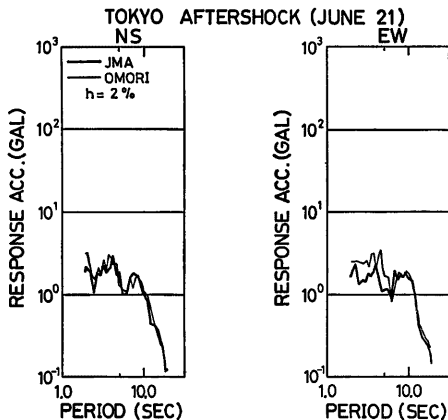


Fig. 22 Comparison of acceleration response spectra ($h=2\%$) obtained through JMA records with those computed from Omori's long-period seismograph at Tokyo

時のUD成分のスペクトルは、6月9日の余震のスペクトルよりも、両記録の一緻度は改善されている。これは、前述したように、地震記録の分解能に起因するものと考えられる。一部の周期範囲(例えば、6月9日のEW成分で2~3秒, 10~15秒ほど, 6月21日のUD成分で2~3秒, 15~20秒ほど)を除けば、加速度応答スペクトルは相互に比較的似た特性を示している。これらの結果は、気象庁1倍強震計記録が種々の観点から工学的に利用できることを我々に提起している。

同じ2つの余震について、変位・速度・加速度型地震計から求めた秋田の加速度応答スペクトルを、Fig. 24に示す。まず、6月9日の応答スペクトルを見ると、秋田地方気象台の加速度計ATBSによるスペクトルの固有周期10秒程度以上を除けば、全体として地震計の種別により、極端に加速度応答が異なることはない。ATBSによる応答が約10秒以

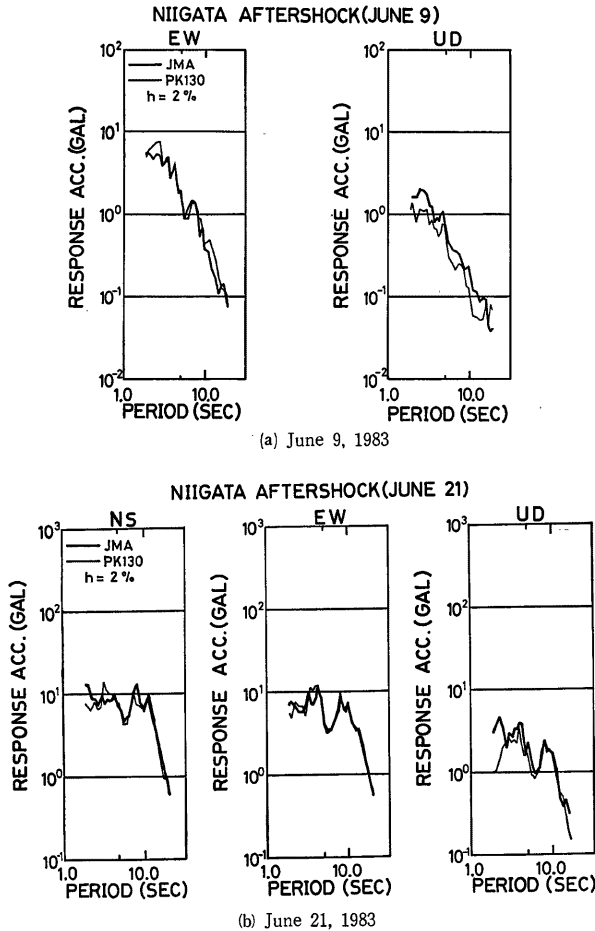


Fig. 23 Comparison of acceleration response spectra ($h=2\%$) obtained through JMA records with those computed from strong motion accelerograph (PK 130) at Niigata JMA

上で異常に大きくなっているのは、前節で述べた理由以外に、記録の継続時間も大いに関与しているのではないかと考えられる。一般に、一部の帯域を除けば、速度・加速度型強震計から求めた応答スペクトルの方が、JMAの1倍変位計より求められるものよりも大き目の値を与えている。速度型地震計による秋田大 (TEG) と土崎港 (TUC) における結果には少し開きがある。両者の波形もあまり似通っていなかったの、これは地盤条件の差に起因していると推察される。なお、秋田大のSF101とJEP-4Aの2つの地震記録による加速度応答は比較的似ていた。

次に、最大余震の応答スペクトルについて検討する。この場合、ATBSによる加速度応答は、水平2成

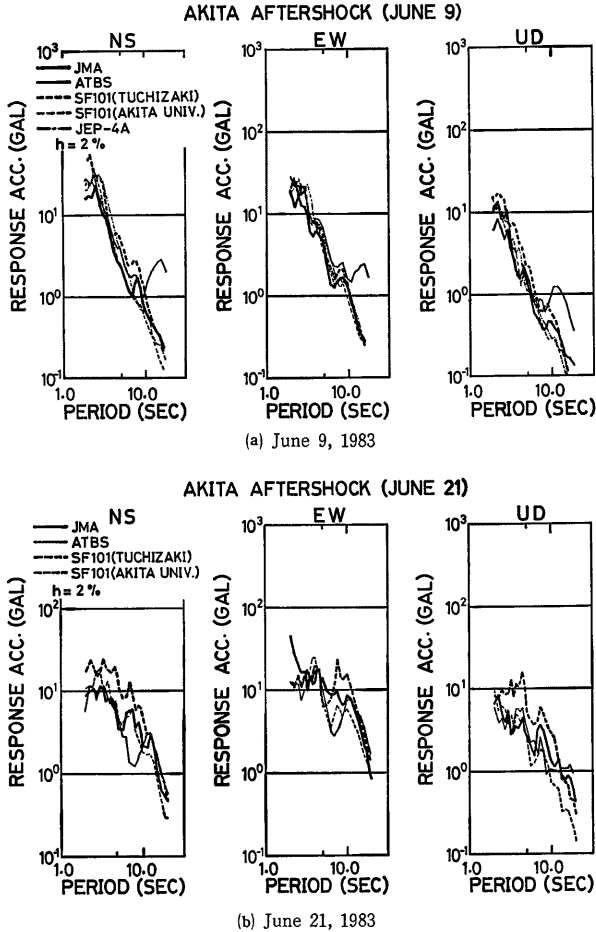


Fig. 24 Comparison of acceleration response spectra ($h=2\%$) obtained through JMA records with those computed from some other (velocity- and acceleration-type) strong motion seismographs at Akita

分の周期5～10秒の帯域において JMA による応答よりもかなり小さくなっている。しかし、この帯域を除けば、JMA と ATBS による応答はほぼ調和していると言える。また、概略的に言うと、NS, UD 成分に対する、土崎港 (TUC) の加速度応答は10秒以下で JMA による応答よりも大きく、逆に秋田大 (TEG) の応答は8秒以上で JMA によるものよりも小さくなっている。TUC での速度型強震計 SF101 と JMA の変位型強震計による加速度応答の差は、明らかに地盤条件の差だと考えられる。

5. 結 論

最近、土木構造物の大型化に伴ない、従来あまり注目されなかった長周期帯域（例えば5～15秒）における地震動解析の重要性が認識されてきた。そこで、本研究では、全国的な観測網が敷設されていることなどで魅力的と考えられる、気象庁1倍強震計記録を用いて、種々の観点から、日本海中部地震時の周期10秒前後の地動を定量的に解析することを試みた。

その結果、以下のようなことが明らかになった。

(1)1983年日本海中部地震による本震と余震について、合計135成分の気象庁1倍強震計記録を数値化した。地震計の時定数についてはアンケート調査を実施した。1つの地震について、これだけの数値化が実施された例は他にあまり見当たらない。なお、アームの長さが最大地動や波形に及ぼす影響は記録において卓越する周期成分により異なるが、現行の気象庁変位型強震計に対してはそれほど大きくないと言える。

(2)今回の地震は、観測点によらず、ほぼ10秒前後の周期の地震動成分を多量に含んでいた。速度応答スペクトル ($h=0.1, 2\%$) の性質を検討した結果、1)観測点ごとに周期の関数としての揺れやすさ・揺れにくさが生じている、2)長周期帯域に関する現行の耐震設計基準に近いあるいは超過するような応答を示す例がある、ことなどがわかった。

(3)地動の最大変位のアテニュエーション特性は、強震記録の統計解析から得られたものと大局的に整合する例があった。気象庁1倍変位強震計記録の最大振幅に計器補正係数を乗じて、地動の最大変位を推定する式は、真の地動変位を $1/(1\sim 2)$ あるいは平均的に $1/1.5$ ほど過小評価する。また、地震記録に見られる卓越周期は地震動変位の卓越周期とかなり異なることがある。

(4)同一地点あるいは比較的近接した位置で得られた、気象庁変位型強震計記録と、大森式長周期地震計、周波数レンジの広い速度型および加速度型強震計記録を比較することを試みた。観測点としては東京・新潟・秋田を採用した。地震記録より求めた地動の変位波形（周期2～20秒）と加速度応答スペクトル ($h=2\%$) は、相互に一致した特性を示した。なお、震源に近い秋田における記録 ($M=6.1, 7.1$) を見ると、1)地震規模が大きいほど長周期成分が出現し、2)共通の地盤条件の地震記録による地動の変位波と応答は比較的良好に似ている、ことなどがわかった。すなわち、周期10秒前後（5～15秒）の耐震解析を実施する際、変位型強震計記録は工学的に十分使用可能であるといえる。

(5)これまでに蓄積が多い SMAC-B₂ 型加速度強震計記録が、やや長周期帯域においてどの程度地震動特性を正しく捉えているかを検討するため、変位型強震計記録と比較した。対象地点は、函館・室蘭・八戸・酒田・秋田である。ERS-C 強震計が設置されている函館を除き、他の観測点では SMAC-B₂ 強震計が使用されている。加速度応答スペクトルについて相互に比べると、ある周期帯域でおおむね調和していることもあるが、全体として SMAC 記録による応答の方が数倍～10倍程大きなスペクトル振幅を与えた。SMAC 加速度記録を用いた地震動解析を行なう場合、やや長周期の帯域（例えば6～15秒）での記録の信頼度が低いことに留意しなければならない。

謝 辞： 日本海中部地震時における気象庁1倍強震計記録のコピーの送附や時定数のアンケート調査を快く引き受けて頂いた、気象庁をはじめとする各地の気象台・測候所の方々にお礼を申し上げます。本研究で用いた強震記録は、東京大学地震研究所の島崎邦彦助教授と工藤一嘉助手、京都大学防災研究所の吉川宗治教授と入倉孝次郎助教授、北海道大学工学部の太田裕教授と岡田成幸助手、岐阜大学教育学部の村松郁栄教授ならびに運輸省港湾技術研究所の御厚意により提供されたものである。また、地震記録の非定常パワースペクトルの算出プログラムの使用に当っては、京都大学工学部の亀田弘行助教授にお世話頂いた。ここに記して深謝の意を表する次第である。

さらに、本研究における計算は、京都大学大型計算機センターの FACOM M382 システムによったことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 山田善一・野田茂：表面波による相対地盤震動を推定するための理論的な試み，土木学会論文報告集，第335号，1983，pp. 41-50.
- 2) 山田善一・野田茂：地盤特性および震源特性によるやや長周期地震動の感度解析，自然災害科学，Vol. 3, No. 2, 1984, pp. 1-28.
- 3) 建設省土木研究所地震防災部振動研究室：気象庁1倍強震計記録に基づく長周期地震動特性の解析—1968年十勝沖地震記録の解析—，土研資料第1869号，1983.
- 4) 表俊一郎：1975年大分県中部地震による九州各地の1倍強震計記録の解析，文部省科学研究費 (No. A-53-1) 自然災害特別研究成果「長大構造物の地震動災害とその防止に関する研究 (研究代表者・小林啓美)」，1978，pp. 49-69.
- 5) 武尾実・阿部勝征：漸化フィルター法による加速度記録解析，地震，第2輯，第34巻，第3号，1981，pp. 351-364.
- 6) 斎藤正徳：漸化式デジタル・フィルターの自動設計 (技術報告)，物理探鉱，第31巻，第4号，1978，pp. 112-135.
- 7) 気象庁：昭和58年 (1983年) 日本海中部地震調査報告—災害時自然現象報告書，気象庁技術報告第106号，1984.
- 8) 工藤一嘉・坂上実：1983年日本海中部地震による石油タンク被害と地震動の特徴について—新潟における石油溢流の問題点—，地震研究所彙報，Vol. 59, 1984, pp. 361-382.
- 9) 岡田成幸・鏡味洋史：日本各地におけるやや長周期の地盤特性の定量評価の試み，日本建築学会論文報告集，第267号，1978，pp. 29-38.
- 10) 後藤尚男・亀田弘行・杉戸真太：地震動の最大地動予測における N 値を用いた地盤条件の評価法について，土木学会論文報告集，第317号，1982，pp. 69-78.
- 11) 篠原・大角恒雄・片山恒雄：強震データの統計解析における問題点，土木学会第37回年次学術講演会講演概要集，第1部，1982，pp. 659-660.
- 12) 建設省土木研究所振動防災部振動研究室：最大地震動および地震応答スペクトルの推定法—(その4) 最大加速度，速度，変位および加速度応答スペクトルの距離減衰式の再検討—，土木研究所資料第1993号，1983.
- 13) Mamula, L., K. Kudo and E. Shima : Distribution of Ground-Motion Amplification Factors as a Function of Period (3-15sec), in Japan, 地震研究所彙報，第59号，第4冊，1984，pp. 467-500.
- 14) 亀田弘行：強震地震動の非正常パワースペクトルの算出法に関する一考察，土木学会論文報告集，第235号，1975，pp. 55-62.
- 15) 栗林栄一・土岐憲三・若林進：SMAC 型強震計による地動の再現性について，第4回日本地震工学シンポジウム (1975) 講演集，1975，pp. 153-160.
- 16) 伯野元彦・松井芳彦・藤野陽三：強震記録による長周期構造物応答計算の精度，土木学会論文報告集，第275号，1978，pp. 127-130.
- 17) 後藤尚男・亀田弘行・杉戸真太・今西真人：デジタル・フィルターによる SMAC-B₂ 加速度計記録の補正について，土木学会論文報告集，第277号，1978，pp. 57-69.
- 18) 岩崎敏男・川島一彦・若林進・高木義和：地震応答スペクトルに及ぼす SMAC 型強震計特性に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第309号，1981，pp. 13-23.
- 19) 川島一彦・高木義和・相沢興：ディジタルイザによる SMAC 型強震計記録の数値化精度，土木学会論文報告集，第323号，1982，pp. 67-75.

- 20) 川島一彦・高木義和・相沢興：数値化精度を考慮した SMAC-B₂ 型強震計記録の計器補正法および変位計算法，土木学会論文報告集，第325号，1982，pp. 35-44.
- 21) 馬場俊介・二宮公紀：強震記録の読み取り誤差が構造物の応答に及ぼす影響の確率論的評価，土木学会論文報告集，第340号，1983，pp. 11-18.
- 22) Crouse, C. B. and T. Matsuchka: Digitization Noise and Accelerograph Pen Offset Associated with Japanese Accelerograms, B. S. S. A., Vol. 73, No. 4, 1983, pp. 1187-1196.
- 23) 土岐憲三・中瀬仁：SMAC 強震記録における記録計の摩擦の影響，第21回自然災害科学総合シンポジウム講演要旨集，1984，pp. 169-172.
- 24) 小野崎誠一・川上保：一倍強震計の振動試験，測候時報，Vol. 38, 1971, pp. 103-105.
- 25) 小林芳正：地震規模・地盤と地震動の周期特性，文部省科学研究費自然災害特別研究研究成果 (No. A-55-2) 「地盤の動特性および地下構造物の動的挙動に関する研究」(研究代表者・久保慶三郎)，1980，pp. 51-61.
- 26) 岩田孝行・唐鎌郁夫・渡辺政雄・渡辺唯夫：東京および筑波における1974年伊豆半島沖地震の記録，地震研究所研究速報，第14号，1974，pp. 17-22.
- 27) Okada, S., N. Goto and Y. Ohta: Experiments Onto Renewal of Strong Motion Observation Instruments, Proc. of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1984, pp. 71-78.
- 28) 岡田成幸：地震観測装置の開発 10. 観測の実施と記録にもとづく2・3の考察，地震学会講演予稿集昭和58年度秋季大会，No. 2, 1983, pp. 233.
- 29) 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，運輸省港湾技術研究所，1983.
- 30) 入倉孝次郎・岩田知孝・村松郁栄：強震観測，文部省科学研究費 (No. 58022002)・自然災害特別研究突発災害研究成果，「1983年日本海中部地震による災害の総合的調査研究」(研究代表者・乗富一雄)，1984，pp. 55-68.
- 31) 川島一彦：気象庁変位強震計記録と加速度強震計記録の比較，昭和59年度科学研究費補助金(総合研究 A) 研究成果報告書 (No. 58350025) 「長周期(約2~20秒)地震動の工学的特性に関する総合研究」(研究代表者・片山恒雄)，1985，pp. 65-80.