

加速度・速度・変位地震計の同時観測に基づく記録精度の検討

COMPARISON OF THE EARTHQUAKE RECORDS OBTAINED BY ACCELEROMETER, VELOCITY TYPE SEISMOMETER AND JMA DISPLACEMENT TYPE SEISMOMETER

永田 茂*・片山恒雄**・山崎文雄***・佐藤暢彦****

By Shigeru NAGATA, Tsuneo KATAYAMA, Fumio YAMAZAKI and Nobuhiko SATO

A displacement type seismograph of the Japan Meteorological Agency (JMA), a velocity type seismograph developed by Muramatsu and a piezoelectric accelerometer were installed on the ground floor of the observation building at Chiba Experiment Station of Institute of Industrial Science, University of Tokyo, to obtain a better and more comprehensive understanding of the earthquake ground motions recorded by different kinds of seismographs. Simultaneous observation using these three kinds of seismographs has been conducted since December, 1985 and a total of 47 earthquake events have been successfully recorded. Using these earthquake records, the performance of the JMA displacement type seismometer and piezoelectric accelerometer was examined with the aid of the coherence function, transfer function and phase lag between the records.

Keywords: JMA displacement type seismometer, Muramatsu velocity type seismometer, piezoelectric accelerometer, simultaneous observation

1. はじめに

著者らは東京大学生産技術研究所千葉実験所において、52C型1倍強震計、村松式速度計、圧電型加速度計を用いた地震動の1地点同時観測を行っている。この観測の目的の1つは、地震動の長周期成分まで観測可能な1倍強震計や村松式速度計を用いた観測により、この領域の地震動特性に関する基礎データを収集することであり、この中には1倍強震計記録の長周期成分の信頼度の検討も含まれている。もう1つの目的は、著者らが同実験所で行っている三次元高密度アレー観測^{1),2)}(図-1)で使用している圧電型加速度計記録の信頼度の把握にある。長周期地震動特性に関する議論を行うためには、今後も観測を継続し、さらに多くの記録を収集する必要がある。しかし、これまでの観測により1倍強震計記録や圧電型加速度計記録の信頼度の検討を行えるだけの記録が得られたため、本論文でその成果を報告することにし

た。

1倍強震計記録の長周期成分の信頼度に関しては、これまでも多くの研究が行われてきた。篠・片山³⁾は振動台実験から、1倍強震計の2~20秒(0.05~0.5 Hz)の長周期成分の測定精度を検証するとともに、1倍強震計記録の読み取り方によって短周期側の精度が低下することを指摘している。山田・野田^{4),5)}は同一地点あるいは比較的近接した地点で得られた変位計、速度計記録と1倍強震計記録との比較や、1倍強震計を含む複数の地

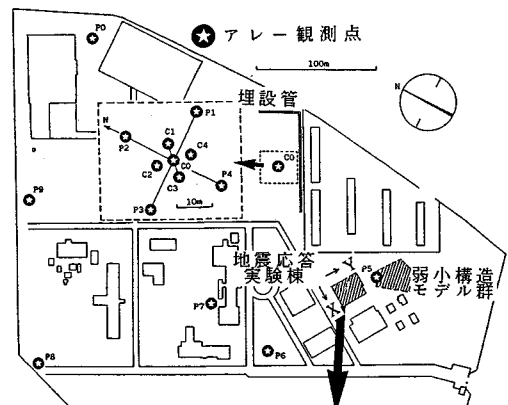


図-1 千葉実験所内のアレー観測網と地震応答実験棟

* 正会員 工博 東京大学助手 生産技術研究所
(〒106 港区六本木7-22-1)

** 正会員 Ph. D. 東京大学教授 生産技術研究所
(同上)

*** 正会員 工博 東京大学助教授 生産技術研究所
(同上)

**** 正会員 工修 東京測振(株)
(〒116 荒川区西日暮里2-25-1 鹿野LKビル8F)

震計を用いた振動台実験から、これらの地震計記録の定性的、定量的な信頼度の検討を行い、1倍強震計記録が約5.5～20秒の帯域で高い信頼度が得られることを報告した。さらに、岡田^{6),7)}は1倍強震計を特に対象とはしていないものの、地震動の長周期成分の信頼度評価のための検討項目を体系的に整理している。

本論文の特徴は、1倍強震計記録の長周期成分の信頼度を、同一地点での地震動観測から得られた1倍強震計記録と村松式速度計記録の比較から定量的に評価していることである。たとえ長周期地震動であっても、記録の信頼度を検討する場合には、本研究のように同一地点の観測記録を用いる必要性が指摘されている⁸⁾。かなり慎重な実験を行ったとしても、振動台実験では長周期成分の再現そのものに多くの困難を伴ったり、加振時に生じるロッキング成分が地震計の振子の動きに影響を与えるなどさまざまな誤差が含まれることが考えられる。したがって、同一地点に設置された異なる地震計記録の比較検討の意義は大きいと思われる。

前述したように本研究のもう1つの目的は、著者らが地震時地盤ひずみ特性の把握を目的として行っている、三次元高密度アレー観測で得られた圧電型加速度計記録の信頼度を検討することである。著者らは、加速度計を用いたアレー観測から地震時の地盤ひずみを求めるために、複数観測点の加速度計記録を積分して求めた変位波形から観測点間の相対変位を計算し、さらにこれを入力とする三次元有限要素法解析から地盤ひずみを求める方法^{9),10)}を提案している。加速度計記録を積分して求めた変位波形に含まれる長周期成分の誤差は地盤ひずみの計算結果に影響を与えるため、加速度計記録の信頼度を的確に把握する必要がある。このため、同時観測が開始されて間もない時点で村松式速度計記録と圧電型加速度計記録の比較、さらには振動台実験から加速度計記録の信頼度の評価を行っている。しかし、これらの解析に用いた地震の数が非常に限られており、長周期成分に関する振動台実験そのものに多くの誤差要因が考えられることから、本研究では村松式速度計記録と圧電型加速度計記録の定量的な比較により加速度計記録の信頼度を検討する。

2. 変位・速度・加速度の同時観測

(1) 観測システムの概要

千葉実験所内の地震応答実験棟(図-2)の1階床において、1倍強震計を用いた変位観測が開始されたのは1984年9月のことである。この約1年後の1985年12月下旬から村松式速度計・圧電型加速度計を用いた速度・加速度の観測が加わり、1地点における3種類の地震動記録の同時観測が開始された。これらのうち速度お

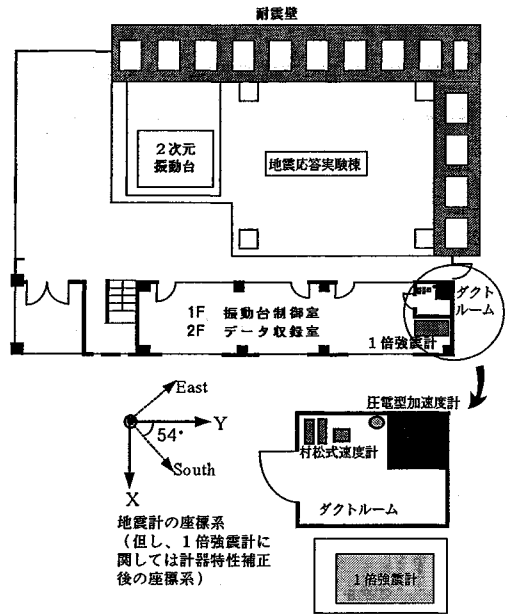


図-2 地震応答実験棟内の同一場所に設置された3種類の地震計

よび加速度計は、アレー観測網のP5地点の深さ40mの加速度が 1 cm/s^2 となった場合に記録開始のトリガーがかかるように設定されている。観測記録は地震応答実験棟2階に設置されたデータ収録装置により磁気テープにデジタル値として記録されるため、簡単な補正を行うだけで使用できる。一方、1倍強震計記録は記録紙上にアナログデータとして得られるため、記録の使用にあたって、デジタル化や各種の補正が必要となる。以上のように、速度・加速度計と1倍強震計では記録方法やトリガーの設定が異なるため、3種類の記録が同時に得られない場合も多い。

(2) 地震計の特性

同時観測で使用している3種類の地震計の特徴を以下に示す。

a) 52C型1倍強震計

52C型1倍強震計(気象庁1倍強震計,(株)勝島製作所)は、その原型モデルの製作が1952年から開始されたペン書き記録方式(記号Cはペン書きを表す)の機械式変位計であり、その振幅倍率は1倍である。気象庁が開発した1倍強震計には、このほかにすす書き式の50型、51型などもあるが、現在最も多く稼働しているのはこのタイプである。この地震計は他のものに比べて地震動の長周期成分や継続時間の長い地震動を精度よく記録できるなどの特徴を有する。

b) 村松式速度計¹¹⁾

村松式速度計(東京測振(株))は、測定可能な帯域が

表一 3種類の地震計の仕様の概要

各地震計の仕様の概要			
	52C型1倍強震計	村松式速度計	圧電型加速度計
センサー	-	マグネソンサー	せん断型圧電素子
測定周波数帯域	0.05-0.5Hz (2-20s)	0.025-20Hz (0.05-40s)	0.1-30Hz (0.033-10s)
最大測定範囲	水平成分±30mm 上下成分±25mm	±100cm/s	±1000cm/s ²
検出感度 信号(記録方式)	1mm/mm ドラムへペン書き 1200D×1000W×600H 約150kg	0.05-5V/(cm/s) アナログ信号 水平268W×123D×125H 上下268W×123D×168H 水平:5.0kg 上下:5.5kg	0.005V/(cm/s ²) アナログ信号 φ65×335H 約2.5kg
細目	振子形式 水平:水平振子 上下:ユーイング 振子周期 水平:6.0±0.2s 上下:5.0±0.2s 記録ドラム回転速度 30mm/s	振子形式 たすきかけ振子 振子周期 水平:1.6s 上下:1.2s A/D変換後の 最小単位 0.004883~0.04883 cm/s	A/D変換後の 最小単位 0.479cm/s ²

表二 データ収録装置の概要

データ収録装置の概要	
チャンネル数	64チャンネル
入力信号	-5v~5v
入力インピーダンス	100k
フィルター	ローパスフィルター (バンド幅0-30Hz)
A/D変換器	12ビット
サンプリング周期	200Hz (0.005sec)
遅延時間	1.5秒
タイマーと時刻補正	月日時分秒 時分秒はNHKラジオにより補正
トリガーレベル	0.1cm/s ²
記録媒体	デジタル磁気テープ 9トラック, 1600bpi
寸法・重量	570(W)×1500(H)×800(D)mm, 75kg

表三 変位・速度・加速度の観測が行われた主要17地震の一覧表

NO.	IEQK**	気象庁発表の発震時間		震央位置		震源深さ (km)	気象庁 マグニチュード	震央位置
				北緯	東経			
1*	8601	86. 2. 12	11:59:31	36°25.0'	141° 5.0'	44	6.1	茨城県沖
2*	8602	86. 6. 24	11:53:09	34 49.4	140 43.2	73	6.5	房総半島南東沖
3*	8611	86.11.22	9:41:44	34 32.8	139 31.5	15	6.0	伊豆大島近海
4	8706	87. 2. 6	22:16:15	36 57.7	141 53.8	35	6.7	福島県沖
5	8717	87. 6. 30	18:17:07	36 11.0	140 5.3	57	4.9	茨城県南東部
6*	8722	87.12.17	11:08:16	35 22.3	140 29.8	58	6.7	千葉県東方沖
7	8723	87.12.17	11:15:11	35 21.7	140 30.7	52	4.6	千葉県東方沖
8	8725	87.12.17	14:07:06	35 23.6	140 29.1	58	4.4	千葉県東方沖
9	8726	87.12.17	15:29:56	35 19.5	140 33.5	42	4.0	千葉県東方沖
10	8802	88. 1. 5	10:09:02	35 24.7	140 26.0	42	4.2	千葉県東方沖
11	8806	88. 1. 16	20:42:11	35 23.2	140 24.8	48	5.2	千葉県東方沖
12	8808	88. 1. 18	19:37:14	35 33.2	139 56.6	32	4.1	東京湾
13	8816	88. 3. 18	5:34:29	35 39.7	139 38.8	96	6.0	東京都東部
14	8823	88. 8. 12	14:14:53	35 5.7	139 52.0	69	5.3	千葉県南部
15	8901	89. 2. 19	21:27:17	36 1.1	139 54.5	55	5.6	茨城県南西部
16	8903	89. 3. 6	23:39:44	35 41.6	140 42.8	56	6.0	千葉県北部
17	8904	89. 3. 11	16:12:17	35 54.5	140 33.8	45	4.9	茨城県南部

* 加速度、速度記録とともにデジタル化可能な1倍強震記録が得られた地震

** 千葉アレーデータベースで用いている地震番号

0.05~40.0秒(0.025~20.0Hz)と広範囲にわたり、特に0.1~20.0秒(0.05~10.0Hz)を精度よく記録することができる。

c) 圧電型加速度計¹²⁾

せん断型圧電素子をセンサーとする加速度計(リオン(株))であり、可動部がないきわめて簡素な構造、小型で高感度などの特徴を有する。このため、地中埋設用の地震計として用いられることが多い。この地震計は、仕様書ならびに著者らが行った振動台実験では、相対感度特性、位相特性ともに0.033~10.0秒(0.1~30.0Hz)で良い精度が得られている。

以上の3種類の地震計の主な仕様を表一、速度・加速度計記録のデータ収録装置の概要を表二に示す。

(3) 観測記録の概要

同時観測の開始から4年を経過した1989年12月の時点で、速度・加速度が同時に観測された地震数は70を

超え、1倍強震計で観測された地震数は47である。これらのうち、1倍強震計記録がデジタル化可能な振幅を有し、速度・加速度が観測されたものは4地震である。観測記録中、最大のものは千葉県東方沖地震(1987年12月17日)の際に得られており、最大加速度200cm/s²以上、最大速度14cm/s以上、さらに最大変位4cm以上であった。

表一には、変位・速度・加速度の観測が行われた地震の中から、主要17地震の発生日時、震源位置(東経、北緯、震源深さ)、マグニチュード、震央距離などを示す。表二には、各地震で観測された3種類の記録の最大振幅を示しており、変位は円弧補正ならびに計器補正後の1倍強震計記録の最大変位であり、速度・加速度は各地震計記録の基線補正後の最大値である。なお、表一のXとYは図二の座標系に従い、Zは鉛直方向で下向きを正とする。

表-4 主要17地震の変位、速度、加速度記録の最大振幅

No.	速度・加速度計の トリガー・タイム			3種類の地震計で観測された最大振幅								
				加速度 (cm/s ²)			速度 (cm/s)			変位 (cm)		
				X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1*	86. 2. 12	11:59:58	9.4	9.3	3.7	0.58	0.54	0.21	0.21	0.17	0.25	
2*	86. 6. 24	11:59:29	57.9	36.3	15.8	4.01	2.76	0.83	1.83	1.39	0.39	
3*	86. 11. 22	9:42:14	6.2	5.2	2.9	0.70	1.04	0.46	0.74	1.17	0.45	
4	87. 2. 6	22:17:00	11.9	10.1	4.4	1.09	0.97	0.35				
5	87. 6. 30	18:17:21	15.6	15.2	7.0	0.63	0.59	0.15				
6*	87. 12. 17	11:08:27	205.7	198.5	85.5	14.84	14.16	4.20	1.43	4.71	1.18	
7	87. 12. 17	11:15:14	11.1	9.8	8.2	0.73	0.49	0.15				
8	87. 12. 17	14:07:18	14.5	10.5	4.4	0.44	0.34	0.16				
9	87. 12. 17	15:30:07	22.4	12.5	10.2	0.73	0.39	0.20				
10	88. 1. 5	10:09:17	29.0	15.5	12.7	1.12	0.44	0.33				
11	88. 1. 16	20:42:20	80.2	38.7	17.0	4.59	1.51	0.51				
12	88. 1. 18	19:37:24	13.2	10.4	7.9	0.45	0.36	0.10				
13	88. 3. 18	5:34:45	67.3	68.3	13.6	3.03	3.22	0.44				
14	88. 8. 12	14:15:08	37.3	36.4	10.6	2.15	2.05	0.03				
15	89. 2. 19	21:27:21	41.8	24.0	13.8	1.66	1.51	0.05				
16	89. 3. 6	23:39:56	32.9	22.1	8.7	1.51	1.17	0.05				
17	89. 3. 11	16:12:33	19.8	15.9	9.5	0.60	0.47	0.05				

*加速度、速度記録とともにデジタル化可能な1倍強震記録が得られた地震

3. 同時観測記録の比較

広範囲の振動数帯域が測定されている村松式速度計記録を基準として、1倍強震計記録と圧電型加速度計記録の信頼度について検討する。まず、デジタル化の後に各種の補正を施した1倍強震計記録と村松式速度計記録を周波数積分して求めた変位波形について、コヒーレンス、フーリエ振幅比、位相差、応答スペクトル、波形形状を指標として、1倍強震計記録の0.05~0.5 Hzのやや長周期成分の信頼度を調べる。次に、村松式速度計記録と圧電型加速度計記録から求めた2つの変位波形、加速度波形について上記の指標に関する検討を行い、加速度計記録の長周期側と短周期側の信頼度を検討する。

これらの解析では、速度・加速度計記録の積分時の解の発散を防ぐために、すべての波形に対して0.02~0.025 HzでCOSINE型に変化して零になる低域遮断フィルター処理を行い、3種類の地震計の仕様上明らかに測定不可能な長周期成分を除去している。また、前述した理由により速度・加速度計記録と1倍強震計記録では記録時刻が異なっているため、速度計記録から求めた変位波形の2~10秒の帯域波と1倍強震計記録の同一の帯域波の相互相関関数が最大となるように、1倍強震計記録の時刻を補正している。なお、以下では記号Dは変位波形、Aは加速度波形を表わし、下添字のDは1倍強震計記録、Vは村松式速度計記録、Aは圧電型加速度計記録を用いていることを表わしている。

(1) 1倍強震計記録と速度計記録の比較

4地震12成分の1倍強震計記録から求めた変位波形D_bと村松式速度計記録から求めた変位波形D_vについて、式(1)~(4)に示すコヒーレンスγ_{dv}(f)、フー

リエ振幅比η_{dv}(f)、位相差θ_{dv}(f)を計算し、これらを指標とした比較を行った。

コヒーレンスは、2つの波形の周波数領域での相関の程度を表わしており、1.0に近いほど相関が高い。フーリエ振幅比は、2つの波形のスペクトル強度の比を表わしており、1.0のときにスペクトル強度が一致する。さらに位相差は2つの波形の位相ずれの指標である。

$$\gamma_{dv}(f) = \frac{|P_{dv}(f)|^2}{P_b(f) \cdot P_v(f)} \dots\dots\dots (1)$$

$$\eta_{dv}(f) = \left(\frac{P_b(f)}{P_v(f)} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

$$\theta_{dv}(f) = \tan^{-1} \left(\frac{Q_{dv}(f)}{C_{dv}(f)} \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$|P_{dv}(f)| = \sqrt{C_{dv}^2(f) + Q_{dv}^2(f)} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、P_{dv}(f)は変位波形D_bとD_vの相互スペクトル、P_b(f)はD_bのパワースペクトル、P_v(f)はD_vのパワースペクトル、C_{dv}(f)はコ・スペクトル(cospectrum)、Q_{dv}(f)はクオッド・スペクトル(quadspectrum)である。なお、コヒーレンス等の計算では、約0.05~0.5 Hzの観測精度を比較するため、帯域幅0.04 HzのParzenのスペクトル・ウインドーを使用した。スペクトル・ウインドーの帯域幅を変化させて計算を行ったところ、ほぼ傾向的に同様な結果が得られたが、特に帯域幅を広く取った場合にはスムージング効果が大きすぎ、微妙な変化を読み取ることが困難なため、ここでは0.04 Hzの結果を示している。

図-3には、X、Y、Z成分ごとに4地震のコヒーレンス、フーリエ振幅比、位相差を示している。D_bとD_vのX、Y成分では約0.05~0.3 Hzの帯域でコヒーレンスとフーリエ振幅比がほぼ1.0となり、位相差もほぼ零

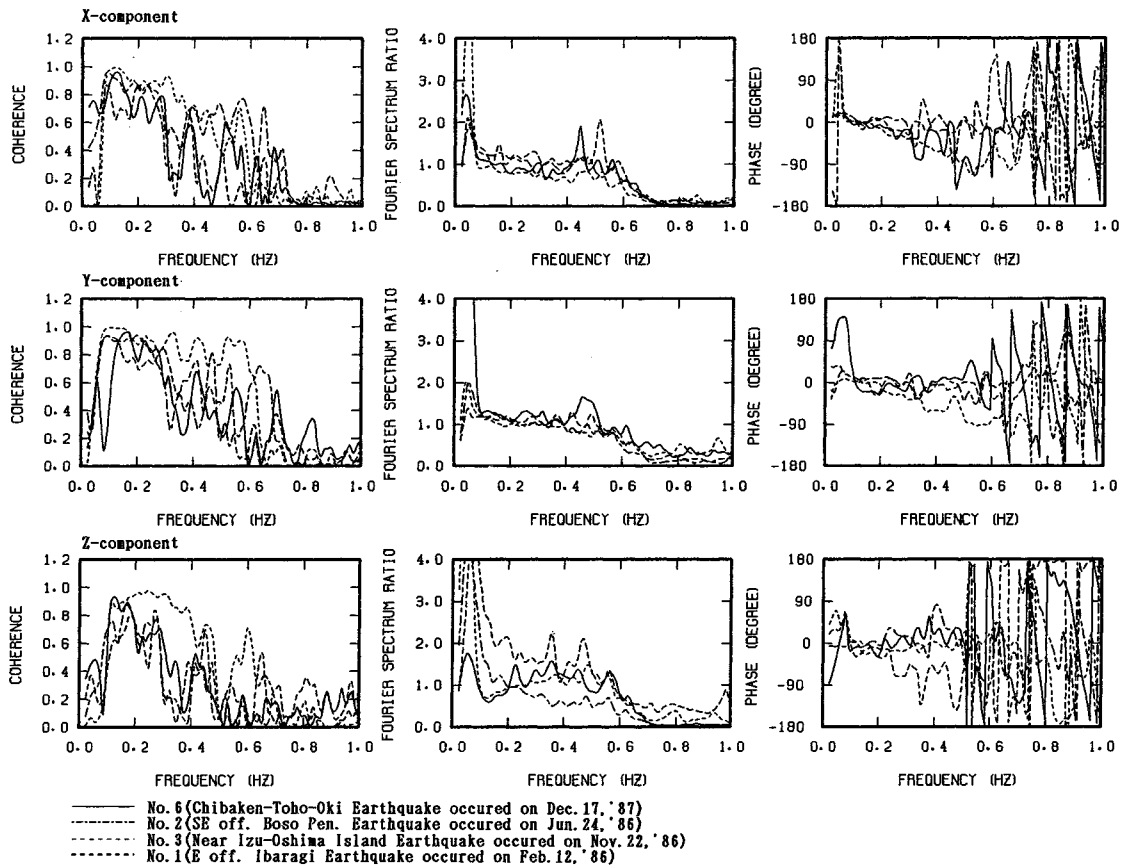


図-3 1倍強震計記録から求めた変位波形と村松式速度計記録から求めた変位波形のコヒーレンス、フーリエ振幅比、位相差

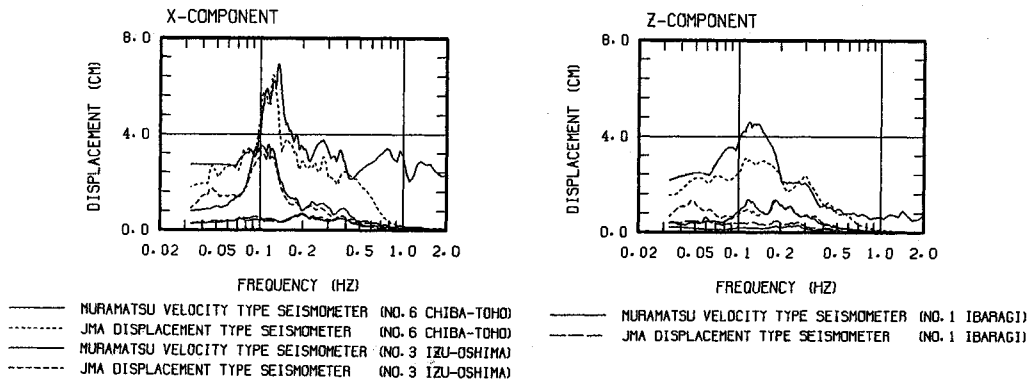


図-4 1倍強震計記録の変位応答スペクトル S_{Dv} と村松式速度計記録の変位応答スペクトル S_{Dv} (減衰定数5%)

となっている。一方、フーリエ振幅比は従来の研究成果と同様に約0.05~0.5 Hzの帯域で1.0となっており、1倍強震計はこの帯域の振幅強度を精度よく観測していることがわかる。このように、1倍強震計記録と速度計記録のフーリエ振幅比が約0.05~0.5 Hzの帯域で良く一致しているにもかかわらず、約0.3~0.5 Hzの帯域でコヒーレンスや位相差に関して良い一致がみられないの

は、1倍強震計記録のデジタル化作業の精度の低下や1倍強震計記録の読み取りに使用しているデジタルライザの最小分解能が0.1 mmであることに起因していると考えられる。また、Z成分についても、一般に水平動成分に比べて振幅が小さく、デジタル化作業に起因すると考えられる誤差が相対的に大きくなるため、X、Y成分よりも地震ごとのばらつきが大きくなっている。

図-4では、工学的観点から両地震計記録の精度の検討を行うため、1倍強震計記録の変位応答スペクトル S_{D_0} (破線) と村松式速度計記録の変位応答スペクトル S_{D_v} (実線) (減衰定数5%) を X, Z 成分について比較している。茨城県沖地震や伊豆大島近海地震 (表-3, 4 の No. 1, 3) のように振幅が小さい場合や、特にやや長周期成分が卓越していない場合にも、X 成分の両者の応答スペクトル強度は 0.05~0.5 Hz でよく一致している。

図-5は No. 1~3, 6 の 1倍強震計記録の最大値 $D_{D \max}$ と速度計記録から求めた変位波形の最大値 $D_{U \max}$ の比を縦軸に取り (変位波形は両者とも 0.05~0.5 Hz の帯域波)、横軸に取った 1倍強震計記録の最大値との

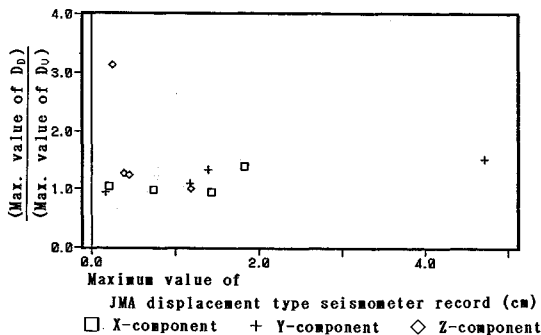


図-5 1倍強震計記録の最大値 $D_{D \max}$ と村松式速度計記録から求めた変位波形の最大値 $D_{U \max}$ の比較 (0.05~0.5 Hz の帯域波による比較)

関係を示したものである。0.05~0.5 Hz の帯域における2つの変位波形の最大振幅比は、振幅レベルの大小にかかわらず、ほぼ1.0近辺に分布している。唯一、最大振幅比が約3程度のものであるが、これは小振幅のZ成分の記録であり、デジタル化の誤差が原因と考えられる。

図-6は房総半島南東沖地震 (No. 2) と千葉県東方沖地震 (No. 6) の変位、速度計記録から求めた変位波形の 0.05~0.5 Hz の帯域波を比較したものであり、実線は1倍強震計記録から求めた変位波形 D_D 、点線は速度計記録から計算した変位波形 D_U である。 D_D と D_U の波形形状は、千葉県東方沖地震の Y 成分の初動部分で不一致の箇所もみられるが、全体的に水平成分は良く一致しており、前で示したスペクトル解析の結果をよく反映している。これ以外の地震に関しても同様な比較を行っているが、 D_D と D_U の水平2成分に関しては良く一致した。

以上の検討結果から、良好な状態に整備された1倍強震計の記録を注意深く読み取ることによって、0.05~0.5 Hz の振動数帯域におけるやや長周期地震動を抽出することは十分可能であることがわかる。なお、今回の解析から、1倍強震計記録の振幅レベルが小さい場合や特にやや長周期成分が卓越していない場合でも、デジタル化を慎重に行いさえすれば、記録の信頼度は非常に高いことがわかった。

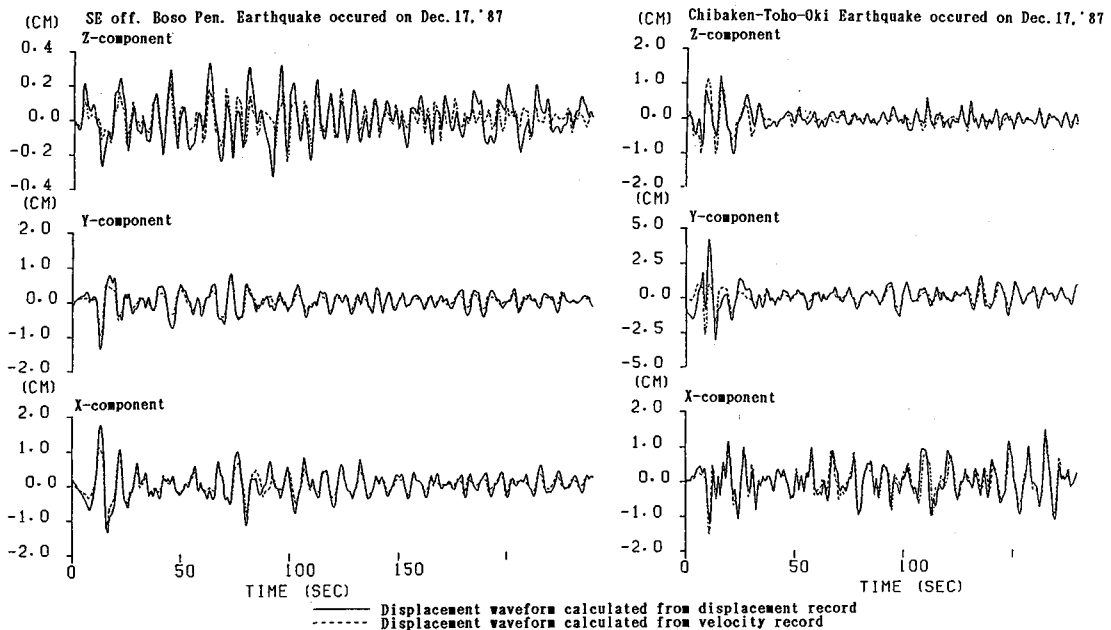


図-6 1倍強震計記録から求めた変位波形と村松式速度計記録から求めた変位波形の比較 (房総半島南東沖地震、千葉県東方沖地震の 0.05~0.5 Hz の帯域波)

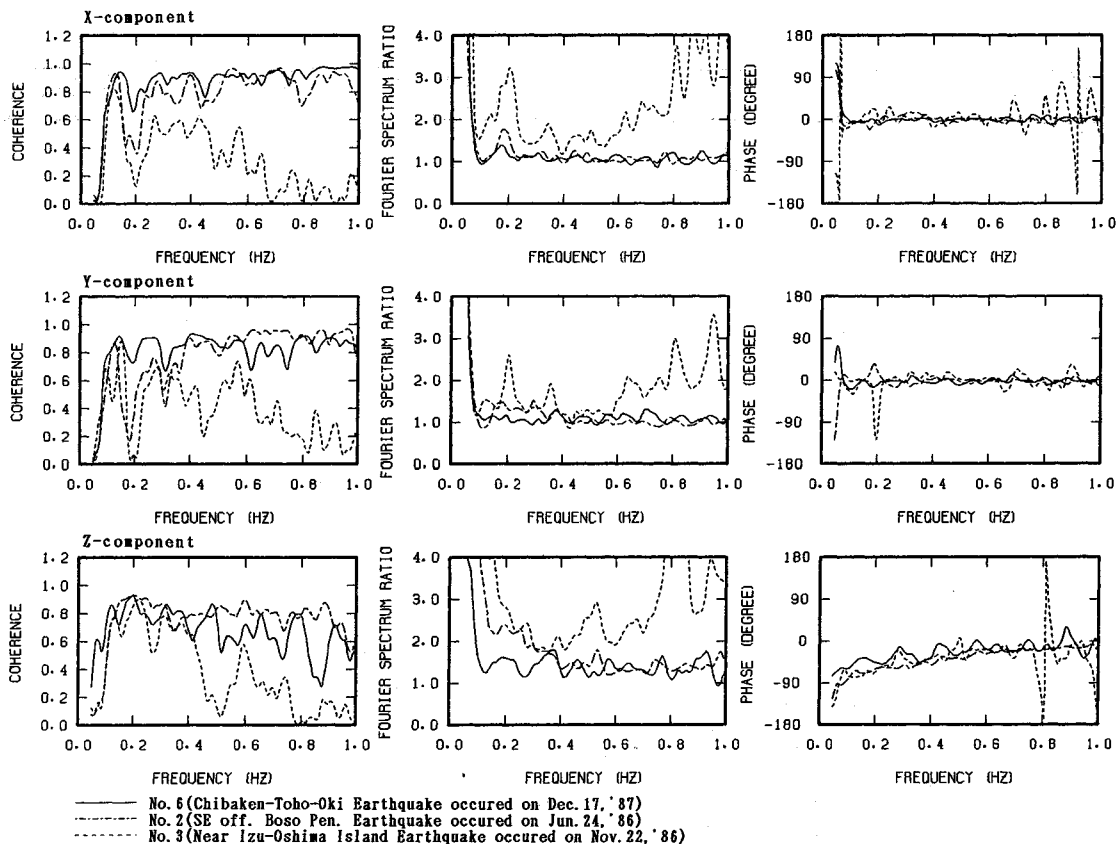


図-7 村松式速度計記録から求めた変位波形と圧電型加速度計記録から求めた変位波形のコヒーレンス，フーリエ振幅比，位相差

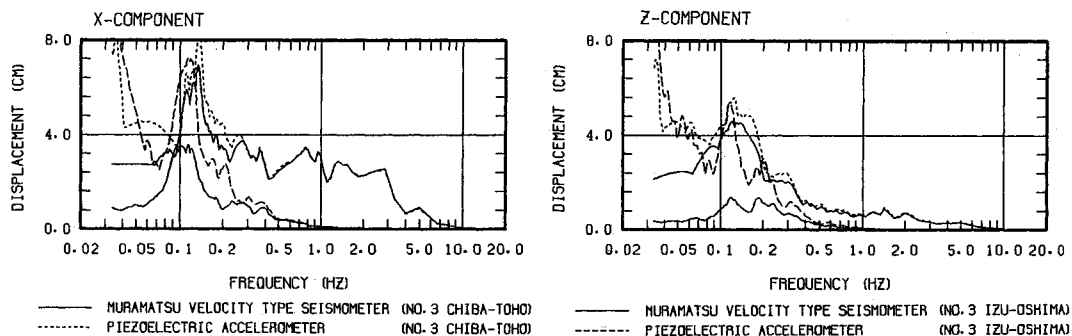


図-8 圧電型加速度計記録の変位応答スペクトル S_{D_A} と村松式速度計記録の変位応答スペクトル S_{D_V} (減衰定数 5%)

(2) 速度計記録と加速度計記録の比較

村松式速度計記録を周波数領域で積分して求めた変位波形 D_V と圧電型加速度計記録を周波数領域で積分して求めた変位波形 D_A のコヒーレンス，フーリエ振幅比，位相差を計算し，各成分ごとに図-7に示している。計算式は式(1)~(4)の下添字 D を A に置き換えたものである。この計算でも帯域幅 0.04 Hz の Parzen のスペクトル・ウィンドーを使用した。図-8では，圧電型

加速度計記録の変位応答スペクトル S_{D_A} と村松式速度計記録の変位応答スペクトル S_{D_V} (減衰定数 5%) を比較している。

図-7をみると，約 0.1 Hz 以下の低振動数成分ではコヒーレンスの急激な低下，位相差とフーリエ振幅比の大きな変化がみられる。村松式速度計が仕様の 0.05 Hz 程度の長周期成分まで観測できることを考慮に入れると，圧電型加速度計記録の長周期成分は 0.1 Hz 程度

までを信頼できるといえよう。しかし、伊豆大島近海地震 (No. 3) の記録や Z 成分のように、圧電型加速度計記録の振幅レベルが小さい場合、特に最大値が約 20 cm/s² 以下の場合には、0.1 Hz 以上の低振動数成分に関してもコヒーレンスの低下、フーリエ振幅比や位相差の大きな変化は顕著に現われる。

図-8 では、振幅レベルは小さいが、比較的やや長周期成分が卓越している伊豆大島近海地震 (No. 3)、さらに観測記録中で最大の加速度が得られた千葉県東方沖地震 (No. 6) について、加速度計記録と速度計記録の変位応答スペクトルの比較を行っている。これらを比較すると、小振幅の加速度計記録が得られた伊豆大島近海地

震の方が 2 つの地震計記録から求めた応答スペクトルの差が大きくなっている。さらに図-9 には、圧電型加速度計記録から求めた変位波形の最大値 $D_A \max$ と速度計記録から求めた変位波形の最大値 $D_U \max$ の比を縦軸に取り (変位波形は両者とも 0.1~0.5 Hz の帯域波)、横軸の観測された最大加速度との関係を図示したが、小振幅の加速度計記録から求めた $D_A \max$ の誤差は大きくなることがわかる。

以上の解析結果を考慮し、変位波形 D_U と D_A の 0.1~0.5 Hz の帯域波の波形形状を比較した。図-10 は房総半島南東沖地震 (No. 2) と千葉県東方沖地震 (No. 6) の D_U と D_A を X, Y, Z 成分について比較したものであり、これらは振幅の小さな房総半島南東沖地震の Z 成分を除いてよく一致している。このほかの地震に関しても波形形状の比較を行っているが、圧電型加速度計の最大加速度が約 20 cm/s² 以上の D_A と D_U の水平 2 成分は特に良く一致していた。

以上の検討の結果、最大加速度が 20 cm/s² を越える圧電型加速度計記録は、0.1 Hz 程度までのやや長周期成分を精度良く記録できていることを確認した。一方、20 cm/s² 未満の加速度計記録については、加速度計の測定精度内と考えられているこの範囲までのやや長周期成分に関しても、十分な信頼性が得られないことがわかった。このような結果となる主な原因は、速度・加速度計記録の記録装置で用いている 12 ビット A/D 変換器の最小分解能が約 0.5 cm/s² と比較的粗いため、記録

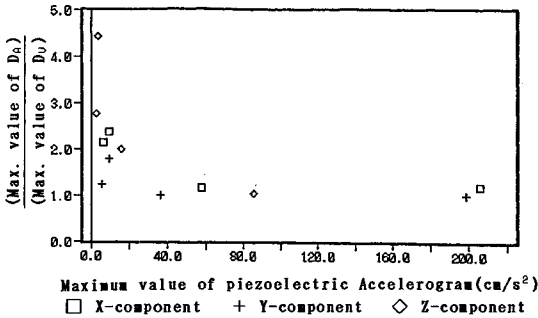


図-9 圧電型加速度計記録から求めた変位波形の最大値 $D_A \max$ と村松式速度計記録から求めた変位波形の最大値 $D_U \max$ の比較 (0.1~0.5 Hz の帯域波による比較)

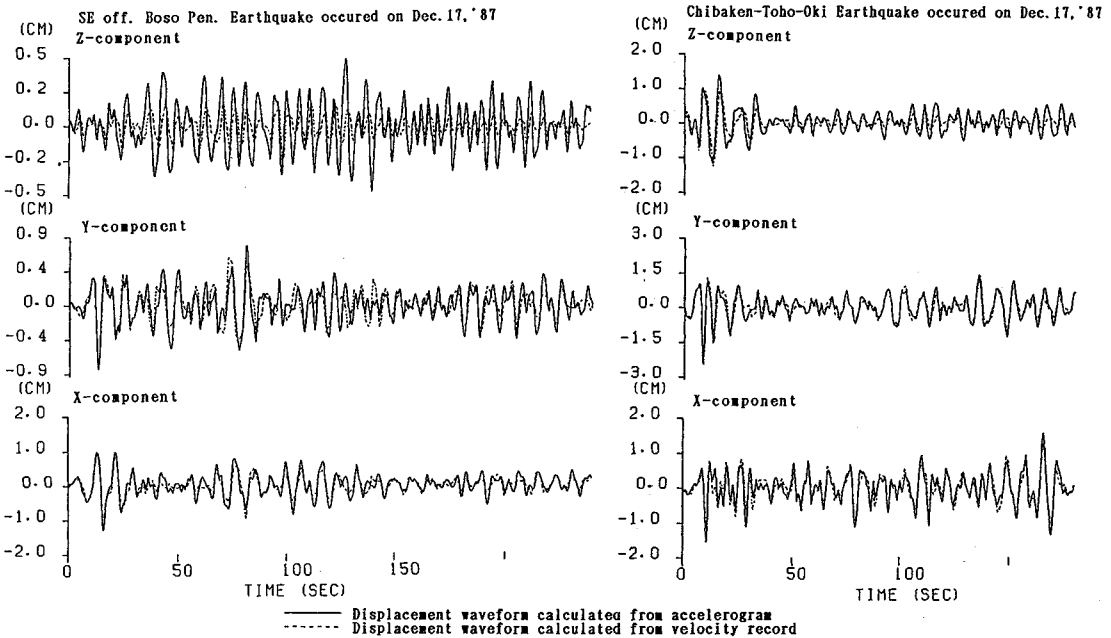
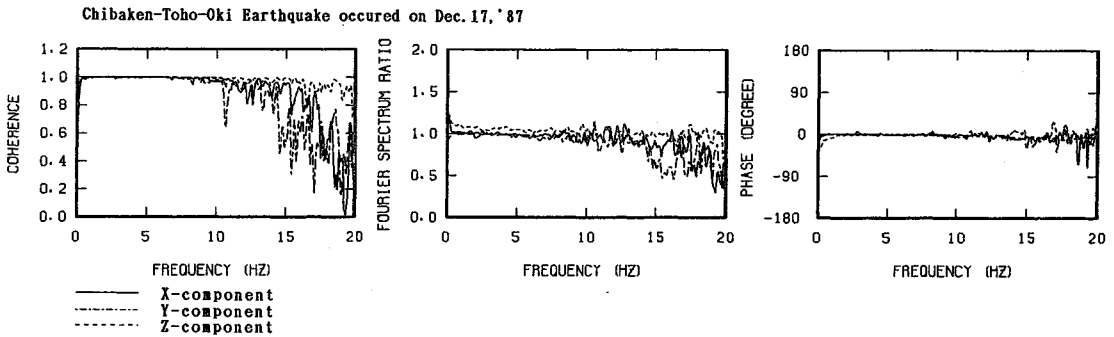


図-10 村松式速度計記録から求めた変位波形と圧電型加速度計記録から求めた変位波形の比較 (房総半島南東沖地震、千葉県東方沖地震の 0.1~0.5 Hz の帯域波)



図一11 村松式速度計記録から求めた加速度波形と圧電型加速度計記録から求めた加速度波形のコヒーレンス, フーリエ振幅比, 位相差

時の分解能が低下するためと考えられる。しかし、加速度計記録の長周期成分の精度を検討する場合、それに含まれる長周期成分の強さも問題となると考えられるため、この点からも今後検討を進める必要がある。

最後に、村松式速度計記録と圧電型加速度計記録の高振動数成分の比較を行った。千葉県東方沖地震 (No. 6) の速度・加速度計記録から求めた2つの加速度波形 A_v , A_a のコヒーレンス, フーリエ振幅比, 位相差を求め (帯域幅 0.25 Hz の Parzen のスペクトル・ウインドーを使用), 図一11 に示した。計算式は, 式 (1)~(4) の下添字 D を A と置き, パワースペクトルや相互スペクトルなどは両地震計記録の加速度波形から求めている。なお, これらの計算を行う際には, 時間刻み 0.005 秒の記録を用いるとともに, 30 Hz の高振動数遮断フィルターを用いてエイリアシングが生じないように配慮している。

この結果, X , Y 成分に比べて短周期成分を多く含む Z 成分のコヒーレンス, フーリエ振幅比, 位相差は, ほぼ 20 Hz 程度まで安定している。一方, X , Y 成分に関しては, 千葉県東方沖地震の加速度記録そのものが約 15 Hz 以上の高振動数成分をほとんど含んでいないため, Z 成分に比べコヒーレンス等の変動が大きくなるが, おおむね良好な結果が得られている。加速度計記録の高振動数側の信頼限界を調べるためには, 異なる加速度計記録との比較が最良であるが, 以上の結果も1つの指標と考えられる。

4. まとめ

東京大学生産技術研究所千葉実験所内の同一場所に設置された 52C 型 1 倍強震計, 村松式速度計, 圧電型加速度計の地震観測記録をもとにして, 1 倍強震計記録と圧電型加速度計記録の信頼度を検討し, 以下の結果が得られた。

(1) 1 倍強震計記録と村松式速度計記録を周波数領

域で積分して求めた変位波形についてコヒーレンス, フーリエ振幅比, 位相差, 変位応答スペクトル, 波形形状の比較を行った。この結果, ほぼ 2~20 秒のやや長周期領域における 1 倍強震計記録の信頼度を定量的に把握することができた。

(2) 村松式速度計記録と圧電型加速度計記録を周波数領域で積分して求めた変位波形について, コヒーレンス, フーリエ振幅比, 位相差, 変位応答スペクトル, 波形形状の比較を行った。この結果, 最大加速度が約 20 cm/s^2 を超える圧電型加速度計記録に関しては, 10 秒程度のやや長周期成分まで信頼できることがわかった。一方, 最大加速度が 20 cm/s^2 未満の加速度計記録については, 加速度計の測定精度以内と考えられている 10 秒程度までのやや長周期成分においても, 十分な信頼度が得られない場合があった。

謝 辞: 1 倍強震記録の数値化を進めるにあたり, 足利工業大学の篠 泉助教授には適切な助言をいただいた。また, 数値化作業は当時, 中央大学卒論生の秋葉伸一氏 (大成エンジニアリング (株)) ならびに前田 悟氏 ((株)熊谷組) によるところが大きい。各位に深謝の意を表わす次第であります。

参考文献

- 1) 研究代表者 片山恒雄: 地震動の工学的距離相関特性に関する実証的研究, 昭和 60 年度科学研究費 (一般研究 A) 研究成果報告書, 1986.
- 2) 片山恒雄・山崎文雄・永田 茂・佐藤暢彦: 高密度三次元アレーによる地震動観測と記録のデータベース化, 土木学会論文集, 第 422 号, pp. 313~321, 1990.
- 3) 篠 泉・片山恒雄: 気象庁 1 倍強震記録による地震の再現性の検討, 第 18 回地震工学研究発表会講演概要, 土木学会, pp. 69~76, 1985.
- 4) 山田善一・野田 茂: 長周期領域 (2~20 秒) における気象庁変位強震計と SMAC 型加速度計記録の信頼度について, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 379 号,

- pp. 1~14, 1987.
- 5) 山田善一・野田 茂・岡市明大：加振実験による長周期帯域での地震記録の評価，構造工学論文集，Vol. 34 A，pp. 923~935, 1988.
 - 6) 岡田成幸：強震観測装置の開発に関する研究—第1報在来型強震計の観測能力評価と改善への方向—，日本建築学会構造系論文報告集，第339号，pp. 45~56, 1984.
 - 7) 岡田成幸：強震観測装置の開発に関する研究—第2報仕様の検討と装置の実現—，日本建築学会構造系論文報告集，第355号，pp. 60~69, 1985.
 - 8) 佐久間隆憲・翠川三郎・中山浩明：「長周期帯域（2~20秒）における気象庁変位強震計とSMAC型加速度計記録の信頼度について」に対する討議，日本建築学会構造系論文報告集，第387号，pp. 98~100, 1988.
 - 9) Farjoodi, J., Katayama, T. and Sato, N. : Estimation of Seismic-induced Ground Strains by Dense Seismometer Array Observation, 第17回地震工学研究発表会講演概要，土木学会，pp. 69~104, 1983.
 - 10) Farjoodi, J., Katayama, T. and Sato, N. : Ground Strain Characteristics Deduced by Dense Seismograph Array Data, 第18回地震工学研究発表会講演概要，土木学会，pp. 101~104, 1985.
 - 11) 村松郁栄：速度型強震計の製作，地震Ⅱ，第30巻，pp. 317~338, 1977.
 - 12) 佐藤暢彦・片山恒雄：地震動と地盤ひずみの観測，生産研究，Vol. 35, No. 9, pp. 22~26, 1983.

(1990. 4. 14・受付)
