

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

EARTHQUAKE OBSERVATION BY A THREE-DIMENSIONAL SEISMOMETER ARRAY
AND ITS STRONG MOTION DATABASE

片山恒雄*・山崎文雄**・永田 茂***・佐藤暢彦****

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

A strong motion database is developed for a dense seismometer array in Chiba Experiment Station. The array system consists of a three-dimensional arrangement of borehole accelerometers and a complementary observation system for pipe and ground strains. The array system has been operating successfully and more than 160 events have been recorded since 1982. In order to utilize these valuable data effectively, the database including 27 major events has recently created. Because of the dense arrangement of seismometers, the recorded motions may be especially useful when evaluating the spatial correlation characteristics of seismic waves as well as examining soil amplification theory. Using a typical event in the database, the spatial variation of ground motion is demonstrated.

Keywords: three-dimensional array, earthquake observation, Chiba Experiment Station, database, ground motion

1. はじめに

近年、大規模構造物や地中構造物の地震時安全性の評価を行う際に、入力地震動の空間変動特性の重要性が認識されるようになってきている。このため地震動の観測に関しても、地表の1地点における観測から、地表や地中の広がりをもった複数地点に地震計を配置し、これらによって地震動を同時に記録するアレー観測が各地で行われるようになった。地震動のアレー観測は、地震動特性の解明に向けての有効な手段の1つであるため、これまでも目的に合わせて各種の形態のアレーが、各地に設けられている。アレー観測網の代表的なものとしては、台湾に設置されたSMART-1^{1),2)}があり、これは半径200 m, 1 km, 2 kmの同心円上の地点に地震計を配置した二次元アレーとなっている。このアレーは、地震動の伝播特性や空間変動特性の把握を目的として構築されたものであり、ここで得られた記録を用いて数多くの研究^{3)~6)}が行われている。

東京大学生産技術研究所では、1982年から千葉実験所構内において三次元高密度アレー観測^{7)~10)}を実施している。このアレー観測は、地震時の地盤ひずみの観測を主たる目的として開始され、7年余りを経過した現在までに160以上の地震が観測されている。このほかにも、地盤の増幅特性や非線形応答特性の研究のための鉛直一次元アレー観測^{11),12)}や、構造物・地盤の相互作用、軟弱地盤の地震時挙動、地震動の地盤・地形による影響などを評価するための三次元アレー観測^{13)~15)}が行われている。

しかし、このような観測で得られた多数の地震記録の利用に関しては、まだ多くの問題が残されている。まず第一に、システムの構築・運営に多くの費用と労力を要するため、その記録は、観測を行っている研究機関内など限られた範囲に利用が限定されることが多い。強震記録が地震工学における貴重な財産であることを考えると、一定の期間を経過した後は公開されることが望ましい。またアレー観測は、多地点の地震記録を同時に記録するようなデータ収録システムを用いているため、データ量が膨大かつデータ構造が複雑になることが多く、またそれぞれ独自のデータ形式や書式で記録を保存する場合が多い。こういったことが、各機関で得られた地震記録の広範囲な利用を困難にする要因ともなっている。

* 正会員 Ph.D. 東京大学教授 生産技術研究所
(〒106 港区六本木7-22-1)

** 正会員 工博 東京大学助教授 生産技術研究所(同上)

*** 正会員 工博 東京大学助手 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)

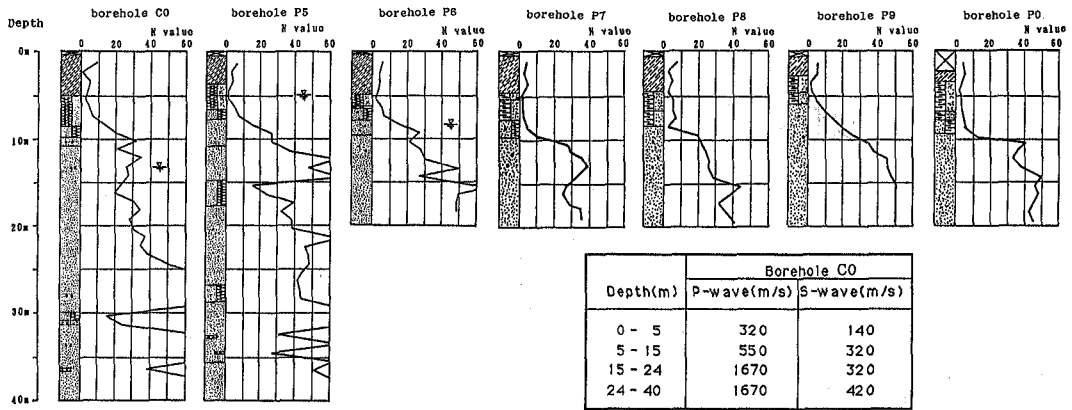


Fig. 1 Soil profiles of Chiba Experiment Station.

る。最近の土木学会耐震工学委員会¹⁶⁾や杉戸・亀田ら¹⁷⁾によるアレー観測記録のデータベース化や共同利用に関する研究は、このような現状を打破するための第一歩といえよう。

本論文では、千葉実験所における高密度三次元アレーの観測記録の有効利用を目的として、このアレー観測の概要を紹介するとともに、新たに構築した千葉アレー地震動データベースについて述べる。本論文の最大の主旨は、アメリカ¹⁸⁾ではすでに行われている地震記録の公開の日本における1つの試みという点にあり、記録の詳細な解析等は別途行う予定である。

2. 千葉アレーの概要

(1) 地盤条件

千葉実験所は東京から東へ約30kmのところ(東経140度6分37秒, 北緯35度37分17秒)に位置している。その地盤構造は、Fig. 1に示す地震計埋設地点で行ったボーリング調査の結果からわかるように、比較的単純ではば成層構造を成している。まず地表から深さ5mまでは、N値10以下の関東ローム層に覆われており、このローム層の下には、厚さ2~4mでN値10以下の砂質粘土が存在する。さらにその下は、N値20~30の洪積砂層が、所々にN値の小さな粘土層を挟んで続いている。各ボーリング孔における地層は、それぞれに小さな違いはあるものの、おおむね以上のような構成となっている。地表面の標高は、C0孔周辺およびP7孔が海拔約13.5mと最も高く、P9孔付近が約11.0mで最も低くなっているが、不整形性の影響は小さいといえよう。また地下水位は5m以深にある。なお図中にはボーリング孔C0で行った弾性波探査試験結果についても示している。

(2) 高密度アレーシステム

千葉実験所における地震計が設置されているボーリ

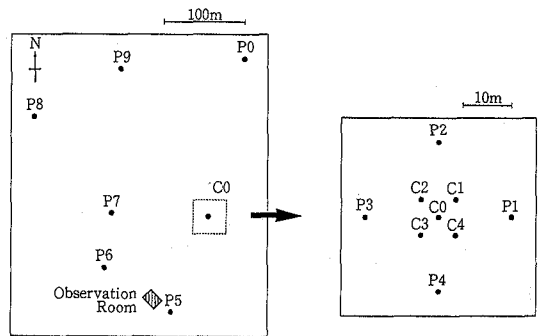


Fig. 2 Layout of boreholes in the Chiba array.

Table 1 Location of borehole accelerometers.

Depth (m)	Borehole															
	C0	C1	C2	C3	C4	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P0	
1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
20	○					○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
40	○									○						

グ孔の平面配置を Fig. 2 に、また各ボーリング孔における地震計の埋設深度を Table 1 に示す。高密度アレー観測は、C0~C4 および P1~P6 の11本のボーリング孔に埋設した地震計を用いて1982年に開始された。その後1985年にP7, P8, P9, P0の4本のボーリング孔を増設して、現在のシステムが完成した。千葉アレーでは、最大の3角形アレーを構成するボーリング孔P0-P8-P5の1辺の長さは、それぞれ約300mである。ボーリング孔C0, P7, P9は、この大三角形の各辺のほぼ中点に位置している。またボーリング孔C0の周りには、非常に高密度に地震計が設置されている。C1からC4のボーリング孔は、C0からそれぞれ5mの距離にあり、P1からP4の各ボーリング孔は、C0から15mの距離に位置している。

千葉アレーで用いている地震計は、せん断型圧電素子

をセンサーとする加速度計であり、地中埋設用の鉄製ケース(φ65×335 mm, 2.4 kg)の中に水平2成分、上下1成分の合計3成分のセンサーとチャージ・アンプが内蔵されている。この加速度計は、0.1~30.0 Hzの周波数帯域ではほぼ平坦な感度および位相特性¹⁹⁾をもっている。

1984年からは、Fig. 2に示す観測棟のダクトルーム内に圧電型加速度計、村松式速度計²⁰⁾および気象庁52C型1倍変位計²¹⁾を設置して、加速度、速度、変位の同時観測も開始している。なおこのほかに千葉実験所では、三次元アレーと共通のトリガーによって鉄骨造弱小モデル²²⁾、鉄筋コンクリート造弱小モデル²³⁾、塔状構造物²⁴⁾の地震応答観測も同時に行われている。

(3) 埋設管と地盤ひずみの観測システム

千葉実験所では地震動加速度の観測のほか、Fig. 3に示すように埋設管ひずみと地盤ひずみの観測も行っている^{19), 25)}。埋設管のひずみは、深さ1.3 mに埋設された鋼管とダクタイル鋳鉄管の2種の管について観測され

ている。鋼管については管体ひずみ(SS)が表面に貼付したひずみゲージで計測され、ダクタイル鋳鉄管については主として継手部の相対変位(DJ)がインダクタンス型変位計によって測定される。一方、地盤ひずみ観測は深さ1.3 mに設置された3基の地盤ひずみ計(G1~G3)を用いて行われている。これは直径80 cm、厚さ9 mmの2枚の鉄製円盤を長さ3 mの2重鋼管で結合したものであり、2枚の円盤の相対変位を外管の中に納められたインダクタンス型変位計により測定する機構となっている。なおこれらの変位計を用いて測定された相対変位は、長さの次元で除してひずみとして利用される。

(4) 記録装置

すべての地震センサーから送られてきた電気信号は、観測棟2階に設置された3台のデジタル記録装置(12ビットA/D変換器、1.5秒の遅延回路内蔵)によって磁気テープに記録される。記録装置は、P5孔の深さ40 m(P540)における3成分の加速度記録のいずれか1成分が1 cm/s²以上となった場合に作動を始め、これらがすべて1 cm/s²以下となって30秒を経過した時点で記録を終了する。これらの記録は、NHKラジオの時報により補正された絶対時刻とともに、0.005秒のサンプリング間隔で保存される。

3. 千葉アレーの地震動データベース

(1) 地震記録の選択

千葉アレーでは、1982年の観測開始以来160以上の地震が観測され、15000成分以上の地震動が記録されている。しかし、できる限り多くの記録を得ることを目的

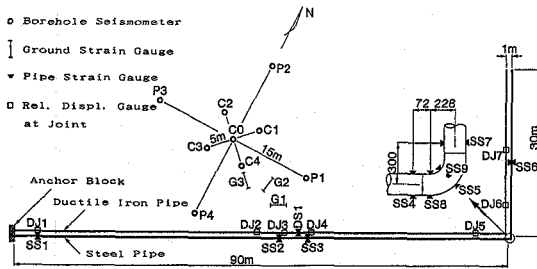


Fig. 3 Layout of complementary observation system.

Table 2 Basic information on earthquake records in Chiba array database.

NO.	IEQK	Trigger Time at P540	Focal Depth (km)	JMA Magnitude	Azimuth (deg.)	Epicentral Distance (km)	Max. Acceleration at C001 (cm/s ²)			Max. pipe Strain (x10 ⁻⁶)	T ₀ /T _r (s)
							EW	NS	UD		
1	8205	82. 7. 23 23:24:30	30	7.0	68.9	178	28.3	26.1	11.7	-	216/322
2	8307	82. 2. 27 21:14:33	72	6.0	6.6	35	47.4	55.7	13.2	15.7	80/182
3	8401	84. 1. 1 18:04:47	388	7.3	234.4	373	25.5	24.2	12.7	6.9	141/223
4	8406	84. 3. 6 11:19:03	452	7.9	187.2	702	22.9	28.0	7.8	11.1	281/347
5	8414	84. 9. 14 8:49:33	2	6.8	276.3	232	3.3	4.5	1.8	18.8	281/307
6	8416	84. 9. 19 2:03:32	13	6.6	142.5	219	13.8	14.5	7.8	5.1	181/216
7	8420	84.12.17 23:49:59	78	4.9	240.1	5	22.1	24.1	40.8	6.7	37/ 63
8	8510	85. 6. 8 1:29:11	64	4.8	128.1	16	27.4	29.6	12.6	5.5	39/ 64
9	8519	85.10. 4 21:26:05	78	6.1	9.0	28	59.2	82.2	23.5	18.2	55/156
10	8525	85.11. 6 0:31:00	63	5.0	158.2	32	75.7	71.6	28.3	14.7	35/ 80
11	8601	86. 2. 12 11:59:58	44	6.1	44.5	125	15.4	14.3	5.2	4.3	98/140
12	8602	86. 6. 24 11:53:29	73	6.5	147.7	105	54.0	40.7	21.5	15.3	229/245
13	8611	86.11.22 9:42:14	15	6.0	204.3	131	5.2	6.0	2.7	19.5	185/199
14	8706	87. 2. 6 22:17:00	35	6.7	46.7	219	11.3	14.0	6.3	10.2	170/218
15	8717	87. 6. 30 18:17:21	57	4.9	358.2	62	20.7	32.5	12.1	4.8	43/ 68
16	8722	87.12.17 11:08:27	58	6.7	128.1	45	213.6	327.1	124.8	55.6	39/282
17	8723	87.12.17 11:15:14	52	4.6	128.2	46	17.2	21.2	16.4	6.4	51/ 64
18	8725	87.12.17 14:07:18	58	4.4	126.5	42	23.8	13.8	9.3	3.9	28/ 44
19	8726	87.12.17 15:30:07	42	4.0	128.8	52	22.5	30.4	18.0	5.6	24/ 39
20	8802	88. 1. 5 10:09:17	42	4.2	128.3	37	40.6	40.8	10.1	7.8	17/ 39
21	8806	88. 1.16 20:42:20	48	5.2	133.3	38	54.9	97.8	19.8	15.9	37/ 81
22	8808	88. 1.18 19:37:24	32	4.1	243.6	17	19.0	26.2	9.6	4.4	19/ 34
23	8816	88. 3.18 5:34:45	96	6.0	276.3	42	48.4	59.8	15.2	18.3	59/188
24	8823	88. 8.12 14:15:18	69	5.3	200.8	62	46.4	35.2	12.0	11.6	44/ 70
25	8901	89. 2.19 21:27:21	55	5.6	337.6	48	55.7	49.1	25.4	12.8	54/118
26	8903	89. 3. 6 23:39:56	56	6.0	81.5	55	27.5	28.9	13.2	9.4	81/141
27	8904	89. 3.11 16:12:33	45	4.9	52.0	52	41.0	21.9	15.3	6.5	29/ 51

T₀ : duration for database. Azimuth : clockwise from north
T_r : duration of original record

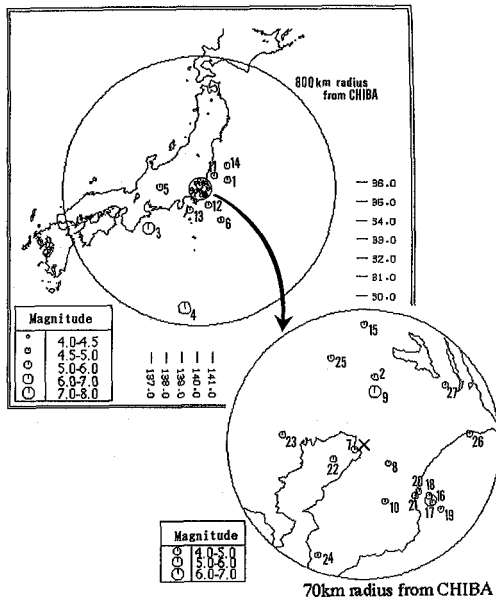


Fig. 4 Epicenters of events in Chiba array database.

として、トリガーレベルを小さく設定しているため、これらの多くは小さな地震記録である。このため地震動データベースの構築にあたり、これらの記録の中から比較的大きな地震動記録を選択することにした。この選択にあたっては、C0孔の深さ1m (C001)での最大加速度が 20 cm/s^2 以上、または埋設鋼管の直管部 (SS1-SS3)における最大ひずみが 5×10^{-6} 以上という一応の基準を設けた。これを用いて選択された27地震の震源情報、千葉アレーにおける記録開始時刻、C001における最大加速度などをTable 2に示す。またこれらの地震の震央位置の分布をFig. 4に示す。この中で最大の地震は、1987年12月17日の千葉県東方沖地震であり、 300 cm/s^2 以上の地表面最大加速度と 5×10^{-5} 以上の埋設管ひずみが観測されている。その他の地震記録は、千葉県東方沖地震と比べるとかなり小さい。

(2) データベースの構築

千葉アレーの地震動データベース構築の手順をFig. 5に示す。まず地震計やひずみゲージから送られてきたアナログ信号は、記録装置によってデジタル信号に変換された後、3本の磁気テープに記録される。そこで、

① 大型計算機によって読み取ったこれらの記録に校正係数を乗じて、それぞれ加速度、速度およびひずみの値に変換する。このとき加速度・速度記録に対しては、全継続時間における振幅の平均値が零となるような基線補正も合わせて行う。またひずみ記録は、時間経過とともに基線が変化する場合があるため、最初の1.5秒の遅延時間内での振幅平均値を零とするように、基線補正を行う。

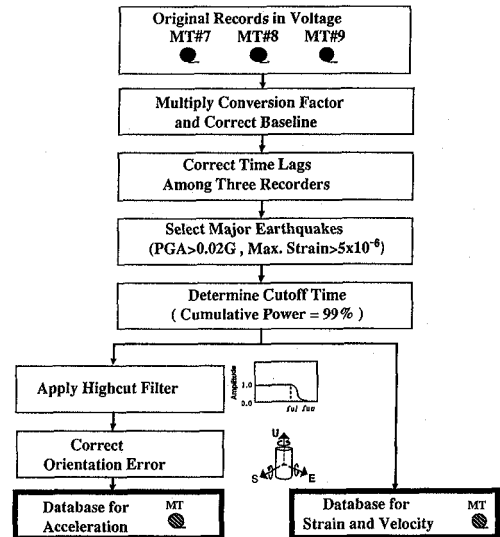


Fig. 5 Procedure for construction of Chiba array database.

② 千葉アレーでは3台の記録装置を使用しているが、これらは互いに非常にわずかな記録開始時間ずれ(通常、 $0.005 \sim 0.05 \text{ s}$ 程度)を生じ、その時間ずれが地震ごとに異なっていることが確認された。このため、3台の記録装置に共通に入力されているP501, P540地点の合計6成分の波形を用いて、これらの相互相関が最大となるように記録開始時間を補正する。

③ 以上の基本的な補正を行った後、前述した基準に従って地震記録を選択し、記録の継続時間を決定する。地震記録の継続時間は一般に非常に長いので、全記録をデータベースに納めることは困難である。そこで、C001の水平加速度成分の累積パワーが全継続時間のパワーの99%以上となったところまで記録を打ち切る。また記録の零時刻をP波到達を確認してから0.5秒さかのぼった時点となるように、静止状態の記録を一部カットしている。しかし小さな地震波の場合、アレーのトリガーレベルの関係で、1.5秒間の遅延時間以前にP波が到達しているものもあり、そのような場合には記録開始時刻を零時刻としている。

④ ①～③の手順によって、ひずみ・速度記録に関する処理は完了し、これらはひずみ・速度データベースに保存される。一方、加速度記録についてはさらに以下の補正を行う。

⑤ 圧電型加速度計の高振動数域での精度を考慮して、cosine型の高域遮断フィルター処理($F_{ul}=27.0 \text{ Hz}$, $F_{uu}=33.0 \text{ Hz}$)を行う。

⑥ アレー観測開始直後より、地震計の埋設方位にかなりの誤差があることが判明している。この対応策として、記録間の相関より水平面内でのねじれ角を推定し補

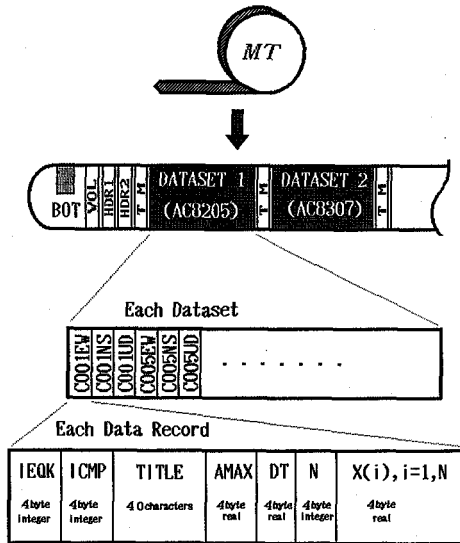


Fig. 6 Organization of Chiba array database.

正する方法²⁶⁾をすでに提案しているが、データベース化にあたり、さらに2つの立体ねじれ角も考慮した三次元埋設方位補正を新たに検討した。この方法については別途報告する予定ではあるが、地震によらず安定した結果が得られたため、今回はこの結果を用いて補正を行っている。なおこのような地中地震計の埋設方位誤差は、千葉アレーに限られた問題ではなく、いくつかの他のアレーにおいても確認されている。

以上の①~⑥の処理によって、加速度データベースが完成する。

(3) データベースの構成

Fig. 6に千葉アレー地震動データベースの構成を示す。加速度データベースとひずみ・速度データベースは、それぞれ別々の磁気テープに可変長書式のEBCDICコードで保存される。それぞれのデータベースは、各地震ごとの27の順編成ファイルから構成され、各順編成ファイルはさらに、加速度については最大135成分、ひずみ・速度については最大37の成分の記録によって構成されている。各成分記録は、ヘディングデータと時刻歴データによって構成される。ヘディングデータ部分は地震番号(IEQK)、成分番号(ICMP)、地震名、最大振幅値、時間刻み、時刻歴データの総数から成り、時刻歴データがこれらの後に続いている。データベースでは、地震番号IEQKと成分番号ICMPの組合せによって任意の地震記録を抽出することができるようになっている。なおデータベースの全記録については、波形を図化することにより、記録異常の有無を調べてある。

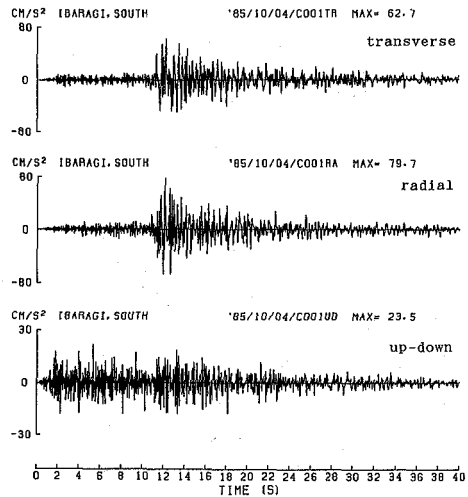


Fig. 7 Acceleration time histories for the Ibaragiken-Nanbu Earthquake at C001 point.

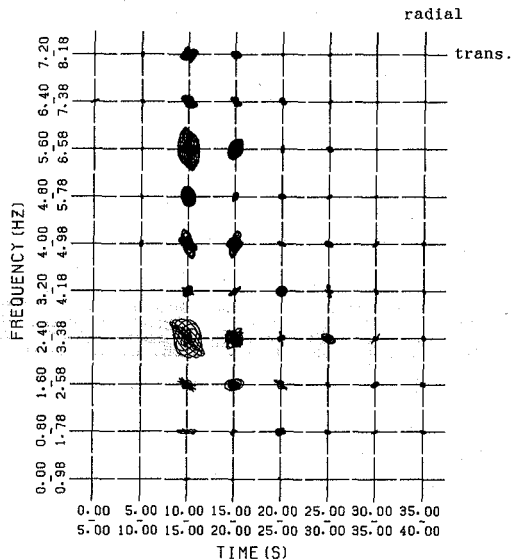
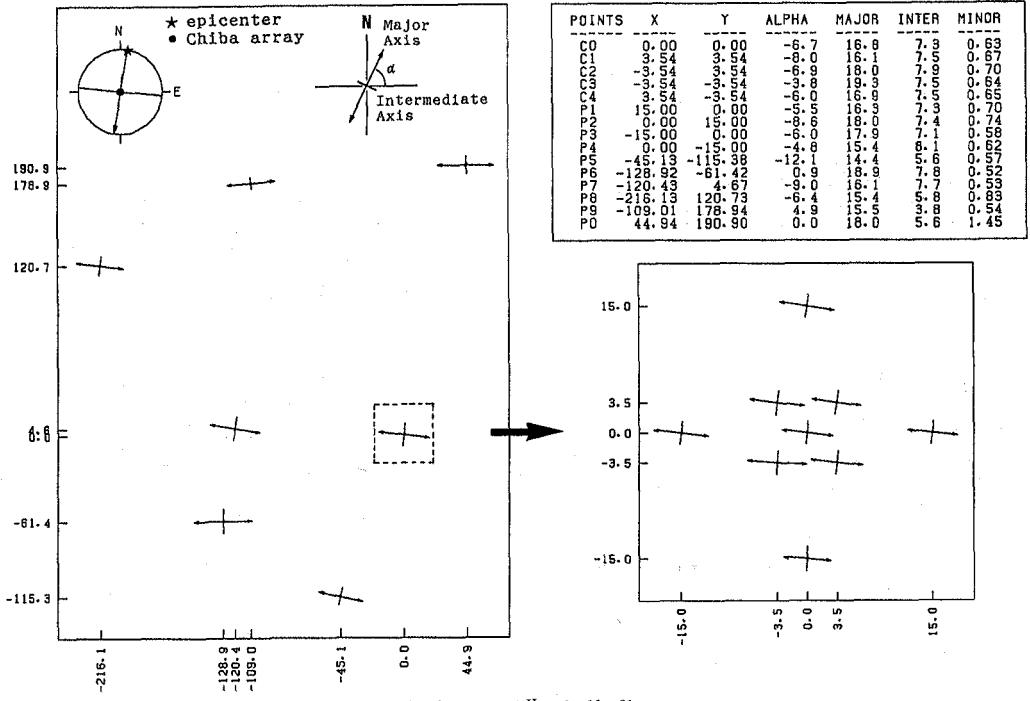


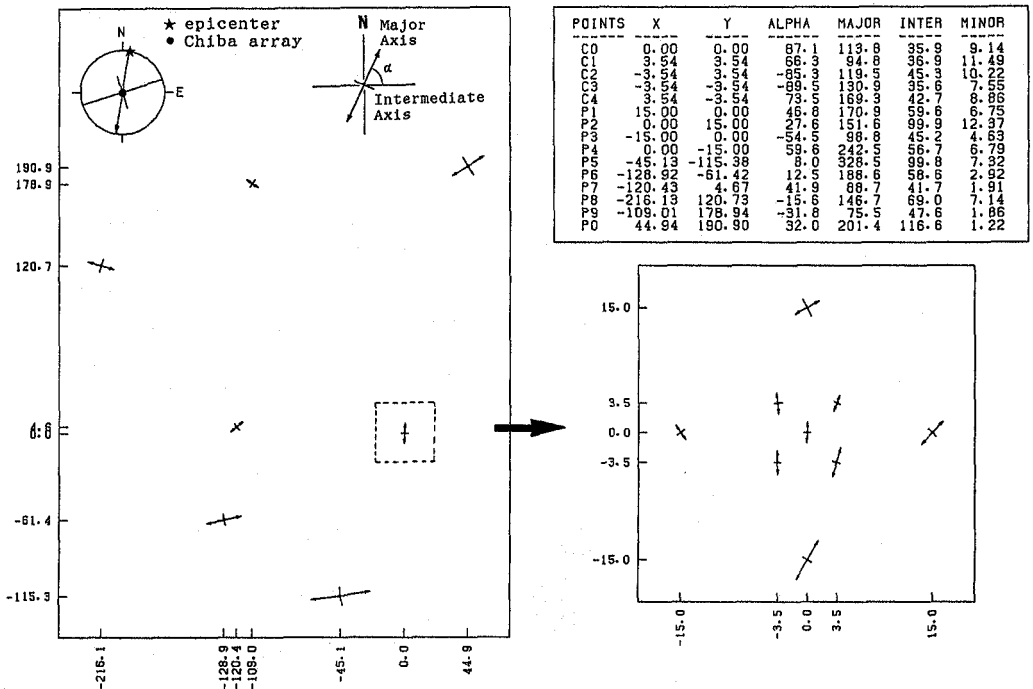
Fig. 8 Orbit spectrum of the Ibaragiken-Nanbu Earthquake for radial and transverse components.

4. 地震動の空間変動特性

データベースの紹介を兼ねて、1985年10月4日茨城県南部地震(M6.1)の記録の空間変動特性を検討する。この地震は、震央方位が観測地点からN9°E、震央距離28 km、震源深さ78 km、C001地点における最大加速度は、東西方向59.2 cm/s²、南北82.2 cm/s²、上下23.5 cm/s²である。千葉アレーの記録の中では、千葉県東方沖地震が格段に大きな振幅をもつが、それに続くレベルのものである。C001地点における加速度波形を震央-観測点方向(S9°W)およびその直交方向(N°81 W)



(a) $f=1.0\sim 2.0$ Hz, $t=11\sim 21$ s



(b) $f=5.0\sim 6.5$ Hz, $t=11\sim 21$ s

Fig. 9 Distribution of principal axes for filtered waves of the Ibaragiken-Nanbu Earthquake.

に変換し、Fig. 7に示す。この図から0秒付近におけるP波の到来と、11秒付近におけるS波の到来が観察できる。

またこの波形を5秒刻みの時間帯域に分割し、振動数領域でのバンドパスフィルターを通して、加速度軌跡スペクトルを求め Fig. 8に図示する。水平動は、振動数

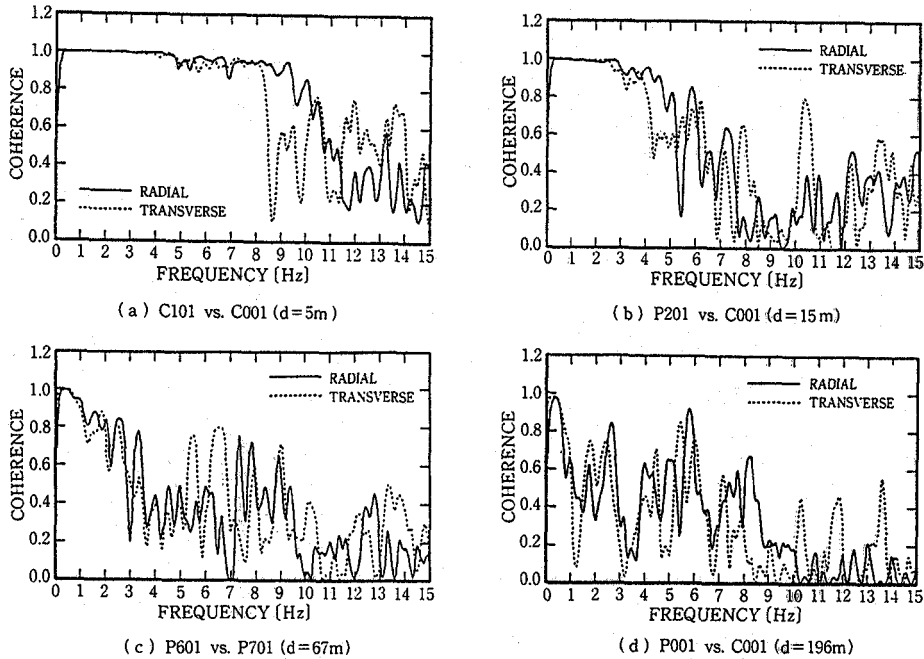


Fig. 10 Coherence functions calculated from records of the Ibaragiken-Nanbu Earthquake.

2.4~3.4 Hzの間および5.6~6.6 Hzの間に大きな振幅をもち、水平面内で回転するような軌跡を示していることがわかる。なお上下成分を含む軌跡はここでは省略するが、11秒以前の初動部を除けばその振幅は、水平成分に比べて小さかった。

次に地震動の空間変動を調べるために、深さ1 mの15地点における記録の主要動部(11~21 s)を用いて、地震動の三次元主軸^{27), 28)}を計算した。Fig. 9は振動数領域でのフィルター波形に対して、最大および中間主軸の方向とそれらのエネルギーの大きさを水平面上にプロットしたものである。また図中の表は、各地点の座標、最大主軸の方向、さらに3つの主軸の固有値を示している。これより帯域1.0~2.0 Hzの低振動数領域においてはSH波が卓越し、観測点によらず振動エネルギーの方向・大きさともよく似ていることがわかる。一方、帯域5.0~6.5 Hzの振動数領域になると、観測点によってSH波またはSV波が卓越し、エネルギーの大きさと卓越方向は空間的に大きくばらつくようになる。たとえばC0地点からわずか15 m離れたP1-P4地点においてさえC0地点とは明瞭な差異が見受けられる。このようにフィルター波の主軸によっても、地震動の空間的な変動を把握することが可能である。なおこの時間帯域では、最小主軸はほぼ上下方向であった。

さらにFig. 10に、2地点における波形の振動数ごとの相関強さをコヒーレンス関数 $\text{coh}^2(f)$ を用いて表わした。図中の4つのグラフは、それぞれ5, 15, 67, 196

m離れた2地点における震央および震央直交方向の波形のコヒーレンス関数であり、バンド幅0.4 HzのParzenウィンドウを用いて計算した。Fig. 10(a)から、距離5 mにおいては8~10 Hz以下の振動数でコヒーレンスは1に近く、非常に波形間の相関が高いことがわかる。コヒーレンスの値は、2点間距離が大きくなるとともに、また振動数が高くなるとともに低下する傾向が顕著に見受けられる。したがってコヒーレンスを2点間距離と振動数の関数としてモデル化²⁹⁾するのはもっともといえよう。今後このデータベースを活用してこのような解析を幅広く行い、特に5~300 mの近距離に着目した地震動の空間変動モデルを提案したいと考えている。

5. まとめ

本論文では、東京大学生産技術研究所千葉実験所で行っている高密度三次元アレー観測についてその概要を紹介した。また7年余りにおよび観測によって得られた主要27地震の記録を整理して、地震動データベースを構築した。このデータベースには、各地震ごとに135成分の加速度記録と37成分のひずみ・速度記録が、各種の補正を行った後、利用しやすい形で納められている。データベースの応用例として、1985年茨城県南部地震の記録を用いて地震動の空間変動特性を検討した。この結果、振動数帯域により空間内で非常に相関の高い地震動成分とばらつきのある大きな成分があることが明らかとなった。

千葉アレーは、地震計が高密度かつ三次元的に配置されているため、その地震動データベースは、地震動の空間変動特性や増幅特性を研究するうえで、今後大いに役立つものと期待している。なおこのデータベースは、利用を希望する国内外の研究機関に対して公開している。

参考文献

- 1) Bolt, B. A., Tsai, Y. B., Yeh, K. and Hsu, M. K. : Earthquake Strong Motions Recorded by a Large Near-Source Array of Digital Seismographs, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10, pp. 561~573, 1982.
- 2) Loh, C. H., Penzien, J. and Tsai, Y. B. : Engineering Analysis of SMART 1 Array Accelerograms, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10, pp. 575~591, 1982.
- 3) Harada, T. and Oda, T. : Probabilistic Modeling of Spatial Variation of Seismic Ground Deformation, Proc. of the 4th International Conference on Structural Safety and Reliability, Vol. II, pp. 277~286, 1985.
- 4) Harichandran, R. and Vanmarcke, E. H. : Stochastic Variation of Earthquake Ground Motion in Space and Time, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 112, No. 2, 1986.
- 5) 香川明生・山田善一・野田 茂 : SMART 1 アレーによる地震波の伝播に関する各種の解析, 第 19 回地震工学研究発表会講演概要, 土木学会, pp. 81~84, 1985.
- 6) 亀田弘行・沢田 勉・亀井紀幸 : マルチフィルターによる多地点地震動の非定常コヒーレンスの解析, 第 19 回地震工学研究発表会講演概要, 土木学会, pp. 25~28, 1987.
- 7) Katayama, T. and Sato, N. : Ground Strain Measurement by a Very Densely Located Seismometer Array, Proc. of the 6th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp. 241~248, 1982.
- 8) Katayama, T., Farjoodi, J. and Sato, N. : Measurement of Seismic Ground Strain by a Dense Seismometer Array, Proc. of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, pp. 207~214, 1984.
- 9) Farjoodi, J. and Katayama, T. : Application of Dense Seismograph Array Data to Evaluate Engineering Properties of Strong Ground Motions, Proc. of the 7th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp. 511~516, 1986.
- 10) Sato, N., Katayama, T., Nakamura, M., Iwamoto, T. and Ohbo, N. : Observation of Seismic Ground Motion and Buried Pipe Strain in a Very Dense Seismometer Array, Proc. of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. VII, pp. 29~34, 1988.
- 11) Omote, S. *et al.* : Observation of Earthquake Strong-Motion with Deep Boreholes—An Introductory Note for Iwaki and Tomioka Observation Station in Japan—, Proc. of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, pp. 247~254, 1984.
- 12) Kitagawa, Y., Ohkawa, I. and Kashima, T. : Dense Strong Motion Earthquake Seismometer Array at Site with Different Topographic and Geologic Conditions in Sendai, Proc. of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, pp. 215~220, 1988.
- 13) Tang, H. T. *et al.* : A Large-Scale Soil-Structure Interaction Experiment : Design and Construction, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. III, No. 3, pp. 371~379, 1989.
- 14) Noda, S., Kurata, E. and Tsuchida, H. : Observation of Earthquake Motions by Dense Instrument Arrays at Soft Ground, Proc. of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, pp. 221~226, 1988.
- 15) Okubo, T., Arakawa, T. and Kawashima, K. : Dense Instrument Array Program of the Public Works Research Institute and Preliminary Analysis of the Records, Proc. of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, pp. 151~158, 1984.
- 16) 土木学会耐震工学委員会強震動アレー小委員会 : 地震動アレー観測記録データベース開発に関する研究調査報告, 1988.
- 17) 杉戸真太・亀田弘行・高山 聡 : アレー強震記録データベース (SMART) の開発, 第 19 回地震工学研究発表会講演概要, 土木学会, pp. 13~16, 1987.
- 18) Lander, J. F., Angel, C. A. and Coffman, J. L. : Activities of the World Data Center in Earthquake Engineering, Proc. of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, pp. 79~86, 1984.
- 19) 佐藤暢彦・片山恒雄 : 地震動と地盤ひずみの観測, 生産研究, 東京大学生産技術研究所, Vol. 35, No. 9, pp. 430~434, 1983.
- 20) 村松郁栄 : 速度型強震計の制作, *地震*, 第 30 巻, pp. 317~338, 1977.
- 21) 岡田成幸 : 強震観測装置開発に関する研究—第 1 報 在来型強震計の観測能力評価と改善への方向—, 日本建築学会論文報告集, 第 339 号, pp. 45~56, 1984.
- 22) 田村良一・関松太郎・岡田恒男 : 鉄筋コンクリート造弱小モデルによる地震応答観測, 生産研究, 東京大学生産技術研究所, Vol. 35, No. 9, pp. 435~438, 1983.
- 23) 高梨晃一・大井謙一 : 鉄骨造構造物の地震応答観測, 生産研究, 東京大学生産技術研究所, Vol. 35, No. 9, pp. 435~438, 1983.
- 24) 半谷裕彦・龍岡文夫・佐藤暢彦 : 塔状構造物による地盤・構造物の相互作用観測, 生産研究, 東京大学生産技術研究所, Vol. 35, No. 9, pp. 435~438, 1983.
- 25) 佐藤暢彦・片山恒雄・ジャムシード ファルジュエイ : 地震動と地盤ひずみの観測 (II), 生産研究, 東京大学生産技術研究所, Vol. 36, No. 9, pp. 382~386, 1984.
- 26) 佐藤暢彦・片山恒雄 : 地中地震計の埋設方位の推定, 第 17 回地震工学研究発表会講演概要, 土木学会, pp. 115~118, 1983.
- 27) Penzien, J. and Watabe, M. : Characteristics of 3-dimensional Earthquake Ground Motions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 3, pp. 365~373, 1975.
- 28) Kubo, T. and Penzien, J. : Analysis of Three-Dimen-

- sional Strong Motions Along Principal Axes, San Fernando Earthquake, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 7, pp. 265~278, 1979.
- 29) Loh, C. H. : Analysis of the Spatial Variation of Seismic Waves and Ground Movements from SMART-1 Array Data, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 13, pp. 561~581, 1985.

(1990. 4. 11・受付)

