

大阪平野及びその周辺地域における 広周波数帯域・広動帯域地震波観測

松波 孝治・入倉孝次郎・岩田 知孝
藤原 広行・松井 一郎

SEISMIC OBSERVATIONS IN AND AROUND OSAKA PLAIN USING
SEISMOGRAPH SYSTEMS WITH WIDE DYNAMIC CHARACTERISTICS
OVER BROAD FREQUENCY BAND (0.0017 TO 30 HZ)

By *Koji MATSUNAMI, Kojiro IRIKURA, Tomotaka IWATA,*
Hiroyuki FUJIWARA and Ichiro MATSUI

Synopsis

We started to observe seismic waves from small to large earthquakes at two ground sites in the plain of Osaka and a rock site around the northern edge of the plain to elucidate and predict vibrational characteristics for strong ground motion. From comparisons between the seismograms from earthquakes occurring in different source regions, we found that the seismic motions at the ground sites are characterized by strong excitation in the coda parts of S waves. This S-coda excitation shows the following characteristics: it is composed of dispersive long-period (1 to 4 sec) wave motions; it becomes conspicuous about 10 to 20 sec late for the arrivals of the principal S-parts and is of long duration (for several tens of seconds); it does not depend on directions of the wave arrivals; it is remarkable even at a epicentral distance where Rayleigh waves generating in the source region do not yet fully grow.

1. はじめに

地震動部門では、西日本において中枢的都市機能を持つ大阪平野およびその周辺地域において震害予測方法ならびに防災・減災対策上不可欠な強震動予測方法の確立のための基礎資料を得ることを目的とした地震動観測を開始した。大阪地域では他の大都市と同じく産業施設の集中・巨大化が進み、とくに固有周期の長い高層構造物や長大構造物が多数出現している。一方、大阪平野は、六甲・生駒・和泉そして大阪湾を隔てて淡路の山系に囲まれた中に海成層が厚く堆積した堆積盆地構造の一部と見なすことができ、平野部における基盤岩までの深度は深い所で2~3 kmと考えられている¹⁾。このような固有周期の長い構造物の増加並びに厚い堆積層からなる不規則形状の地盤構造により、周期が1秒以上の長周期地震動特性の解明が重要課題となっている。

大阪平野で観測される地震動の性質として、鳥海²⁾は「あとゆれ」的震動の出現を指摘した。我々が行っている観測によれば、これはS波主要動後およそ10秒くらいからS波部分と同程度の振幅を有する周期のやや

長い(1秒~4秒)震動が長く継続する現象をさすものと考えられる。不規則な境界を有する媒質内における波動伝播に関する近似計算結果^{3)~5)}によれば、堆積盆地周縁部では表面波が2次的に励起され盆地内を伝播する。これゆえ、この継続時間が長く周期がやや長い震動は2次的に励起された表面波群から構成されているものと見られている^{2),6)}。固有周期の長い構造物の減衰定数は一般に小さいため、このような構造物はやや長周期の後続波群により強く励起されることが予想される。したがって地震動特性としては振幅のみならず継続時間も重要な要素となる。このように大阪地域における震害予測および強震動予測のためには、地盤によるS波主要動部分の増幅特性のみならず上述の後続波群の振幅特性および継続時間等も定量的に明らかにする必要がある。

Sコード部分に見られる顕著な後続波群による震動特性を求めるには、まずこれら波群を波動論的に吟味しその生成・伝播過程を解明する必要がある。このための基礎資料を得るには、大阪平野の基盤構造が複雑なため、平野部およびその周辺地域に長周期震動まで観測可能な地震計を展開しなければならない。さらに、後続波群による震動の時刻歴や継続時間は、地震波の入射角および入射方位に依存することが予想されるため、様々な方向から到来する近地地震波データを必要とする。

上述の観点から、当部門では大阪平野部の堆積層上で2点および平野周辺部の岩盤上(京大阿武山地震観測所坑道内)で1点の計3点で広帯域な周波数特性を持つ村松式強震計による観測を開始し、複数点での同一地震記録を蓄積しつつある。さらに岩盤上観測点には圧電型加速度計を設置している。これは震源における高周波地震波の発生機構や、地殻内不均質と地震波の散乱・減衰特性との関係を解明するための基礎データを得ることを目的としている。本稿では大阪平野およびその周辺地域における地震観測の序報として、まず観測システムの概要を述べ、次にこれまでに観測された地震記録の比較から推定できるS波主要動後に現われる後続波群の性質を報告する。

2. 観測点と観測方法

Fig. 1に観測点(ABU, OSA, WOS)の位置を▼印で示す。ABUは京大阿武山地震観測所地下坑道内の岩盤上、OSAは大阪管区気象台地下室の地震計台上、そしてWOSは西大阪治水事務所本津川水門地下道内にある。これまでの人工地震探査結果¹⁾によれば、観測点下の基盤岩までの深さはOSAではおよそ0.8 km、WOSでは2 kmくらいと推定できる。

Table 1. Specification of the seismograph systems at ABU, OSA and WOS.

STATION	SEISMOMETER (TYPE)	FREQUENCY BAND (Hz)	LOW-PASS FILTER (42 dB/oct) CUT OFF FREQ. (Hz)	SAMPLE RATE (Hz)	PRE MEMORY (SEC)	SENSITIVITY (DYNAMIC RANGE)	RECORDING SYSTEM/MEDIA
ABU	SP VS-3 (VELOCITY)	$1.67 \cdot 10^{-3}$ -60	30	100	8	0.25V/KINE 2.5V/KINE (86db)	PS9000,14bitADC ($\pm 5V$)/3.5inchFD
	ACCEL (PZT)	1.0-200	55	200	8	50.0mV/gal 1.0V/gal (87db)	PS9000,14bitADC ($\pm 5V$)/3.5inchFD
	LP VS-3 (VELOCITY)	$1.67 \cdot 10^{-3}$ -60	5	10	unfixed	2.5V/KINE (72db)	DR-F1,14bitADC ($\pm 5V$)/3.5inchFD
OSA	VS-3 (VELOCITY)	$1.67 \cdot 10^{-3}$ -60	30	100	10	0.25V/KINE 2.5V/KINE (80db)	SAMTAC,16bit- ADC($\pm 10V$)/CT
ABU	VS-1 (VELOCITY)	$2.5 \cdot 10^{-2}$ -20	30	100	10	0.50V/KINE 5.0V/KINE (76db)	SAMTAC,16bit- ADC($\pm 10V$)/CT

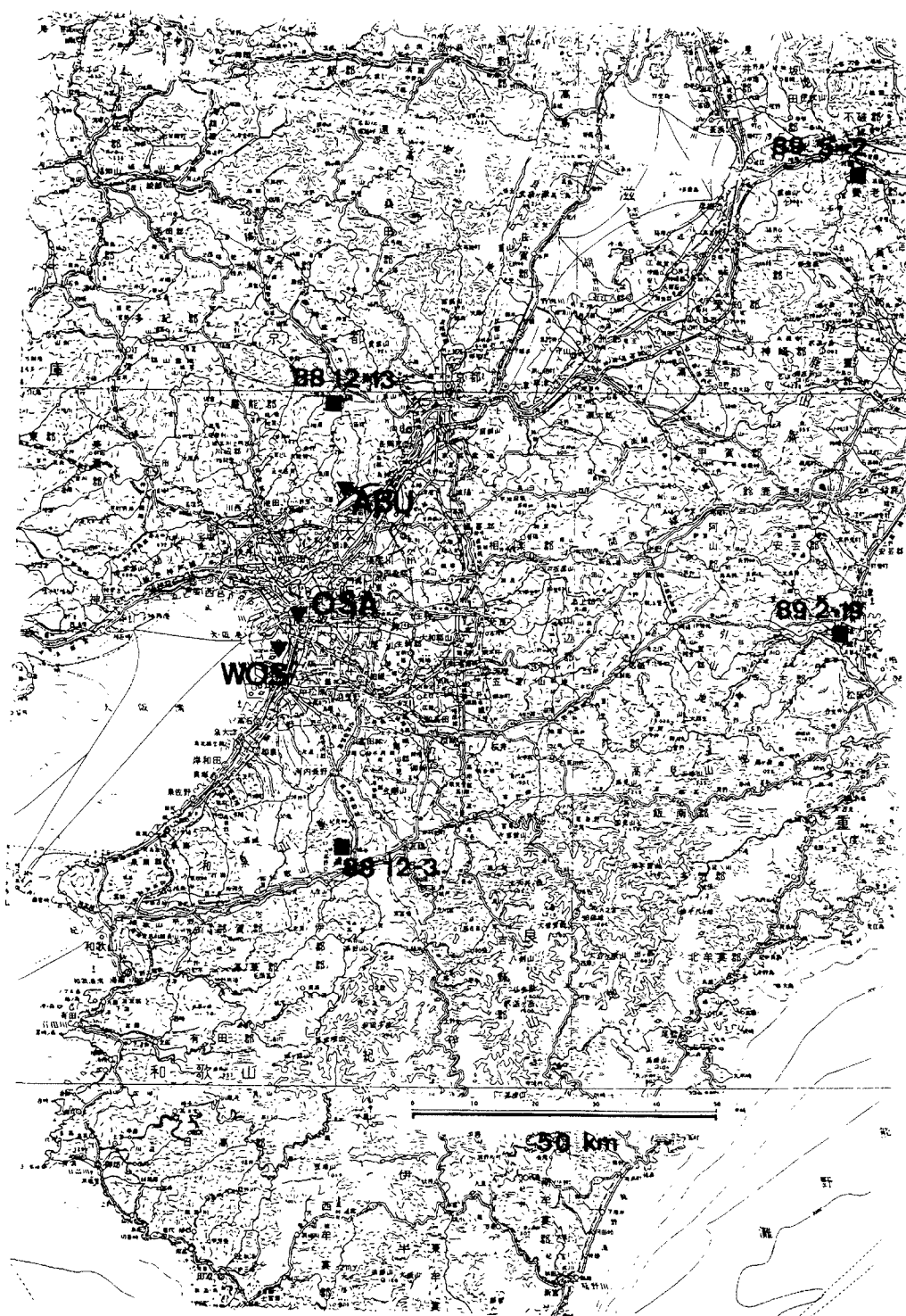


Fig. 1. Epicenters and seismograph stations. Epicenters and the Station locations are shown by the solid closed squares and triangles, respectively.

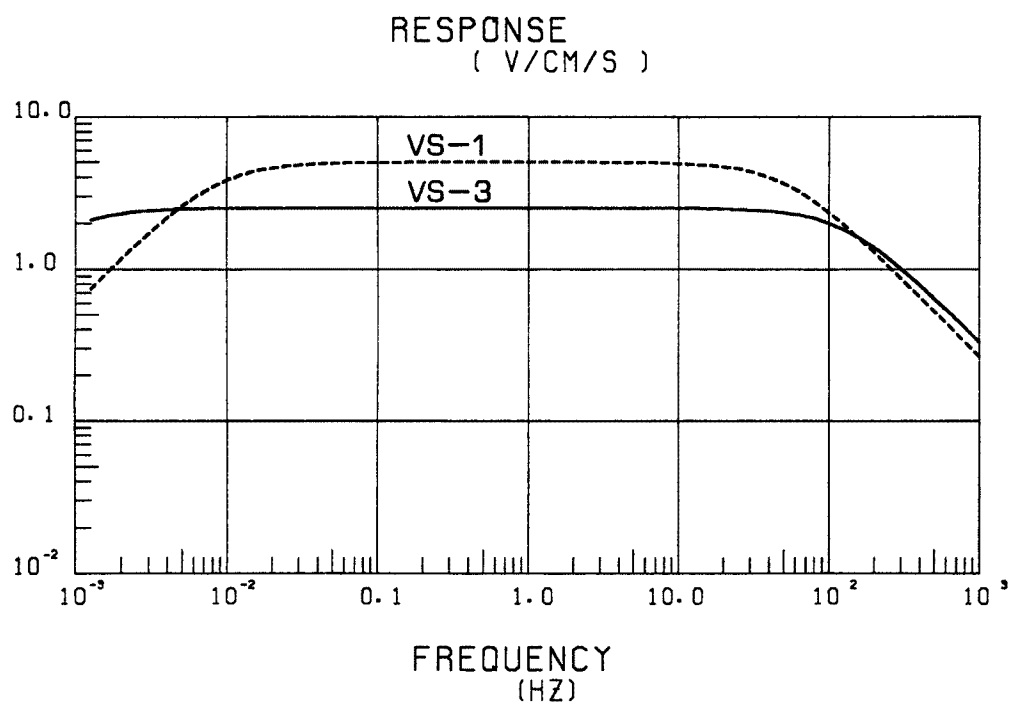


Fig. 2. Frequency responses of the seismographs.

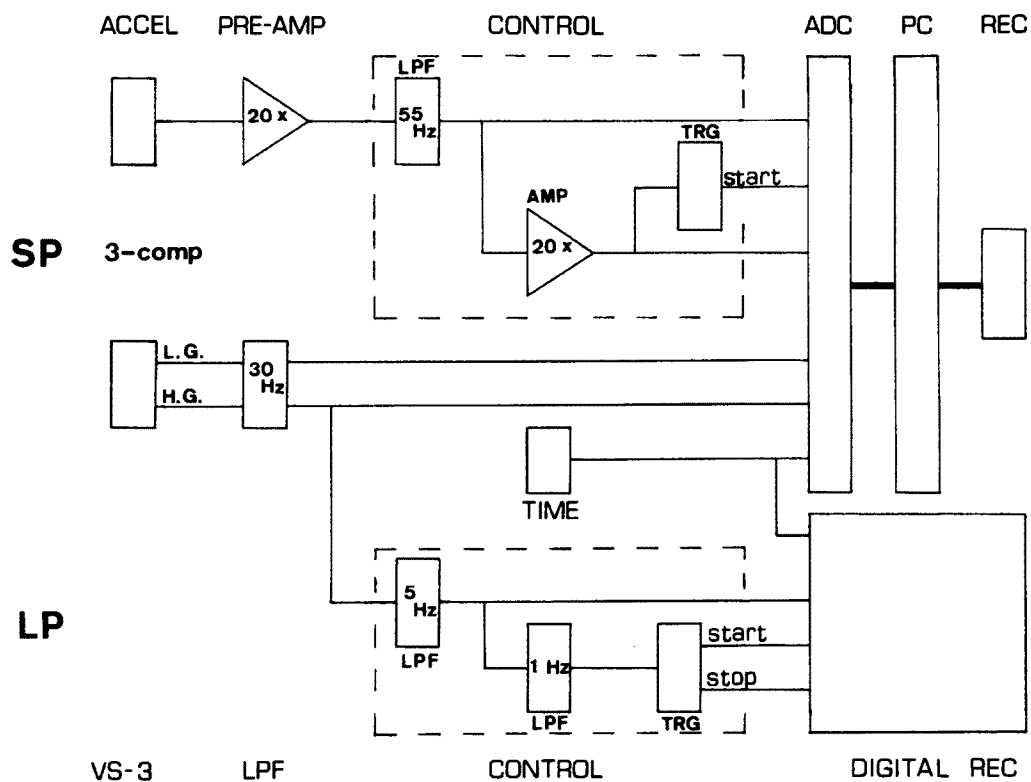


Fig. 3. Block diagram of the seismograph system at ABU. The specification of the system is shown in Table 1.

観測システムがABUと他の2点(OSA, WOS)では異なるためそれぞれに分けて説明する。また観測システムの総合感度等はTable 1にまとめられている。

ABUにおける観測システムのブロックダイアグラムをFig. 2に示す。ABUには低倍率(1倍)と高倍率(10倍)出力を備えた村松式速度型強震計3成分(VS-3: 1倍出力は0.25 V/kine; 10倍出力は2.5 V/kine)と圧電型加速度計3成分(ACCEL: 2.5 mV/gal)が設置されている。Fig. 3に示されている様に、VS-3は周期600秒から60 Hzまで平坦な周波数特性を持つ。この広帯域の特性を活かすために、収録システムを短周期波形記録システム(SP)と長周期波形記録システム(LP)とに分けた。SPでは波形は最終的に100 Hzのサンプリング周波数でデジタル化するため、30 Hzにしゃ断周波数(fc)を持つlow-pass filter(LPF: 減衰傾度42 dB/oct)をVS-3の出力に直結している。ACCELは1 Hzから200 Hzまで平坦な周波数特性を持つが200 Hzサンプリングでデジタル化するため、前置増幅器(20倍)からの出力をfcが55 Hzのlow-pass filterに通した。このLPFからの出力は低倍率出力ともう一段増幅(20倍)した高倍率出力とに分けられる。VS-3およびACCELの出力波形は、分解能14ビット、チャンネル数32 CHのAD変換器(入力電圧範囲 ± 5 V)により200 Hzのサンプリング周波数でデジタル化される。このAD変換器は最大16 Kのデータバッファを備えているため、トリガー前の波形データを確保(プリトリガー機能)できる。AD変換開始のスタート信号はACCELの高倍率出力3成分の振幅レベルを設定スレッショルドレベルと比較することにより作られる。AD変換器の制御、データ転送、データ処理および記録媒体(3.5 inch フロッピーディスク)への書き込みはパーソナルコンピュータ(PS-9000)により行われる。VS-3の波形データは最終的に100 Hzサンプリングのデータに間引かれる。またVS-3の高・低倍率出力およびACCELの低倍率出力は最大振幅が設定レベル以上の場合のみ記録される。一方、長周期波形記録システム(LP)では、VS-3からの高倍率出力波形を20 Hzサンプリングでデジタル化するためにfcが5 Hzのlow-pass filterに通した後、分解能14 bit、チャンネル数8 CHのデジタルレコーダに記録される。これもデータバッファを持っているためプリトリガー機能を有する。記録媒体は3.5 inchのフロッピーディスク(FD: 容量1 Mバイト)である。記録開始および停止の信号はコントローラ内のTRG回路で作られる。この際、VS-3からの3成分の出力波形はまずfcが1 Hzのlow-pass filterを通過したのち積分回路に入る。次にTRG回路で3成分の振幅レベルを設定スレッショルドレベルと比較することによりスタートおよびストップの信号が作られる。なおストップ信号は3成分共にスレッショルドレベル以下になって3分後(可変)に発生するようになっている。この短周期・長周期波形記録システムにより、VS-3については周期600秒から周波数30 Hzの広帯域で最大20 kineからおおよそ1 mkine(VS-3の電子回路ノイズ特性および観測条件に依る)までの約86 dBのダイナミックレンジを確保できる。またACCELについては、1 Hzから55 Hzの帯域で最大100 galからおおよそ4 mgalまでの約87 dBのダイナミックレンジを確保できる。

OSAとWOSでの観測システムのブロック図をFig. 4に示す。OSAではABUと同じくVS-3が、一方WOSではVS-1(低倍率: 0.5 V/kine, 高倍率: 5 V/kine)がそれぞれ使われている。Fig. 3に示されているようにVS-1は周期40秒から周波数20 Hzまで平坦な周波数特性を持っている。OSAとWOSでは地震計以外のシステムは全く同じである。出力波形を100 Hzサンプリングでデジタル化するために、まずfcが30 Hzのlow-pass filterに通した後デジタルレコーダに収録する。このレコーダ(チャンネル数: 8 CH, 分解能: 16 bit, 入力電圧範囲: ± 10 V)はメモリーを持っているので100 Hzサンプリングで10秒の遅延機能を有している。また時刻校正回路付のタイムコードジェネレータを内蔵している。記録開始および停止の

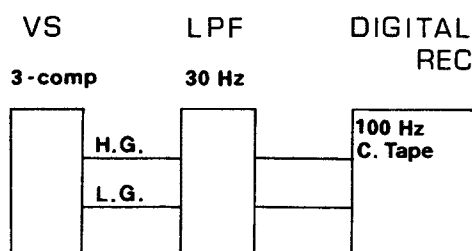


Fig. 4. Block diagram of the seismograph system of OSA and WOS. The specification of the system is shown in Table 1.

トリガー信号は内部で作られる。なお停止信号は3成分の振幅レベルが設定スレッシュホールドレベル以下になって30秒後に発生する。記録媒体にはカートリッジテープ(CT:450 ft 長)を用いる。100 Hz サンプリングの場合5時間30分記録可能である。この観測システムにより、OSA では周期600秒から周波数 30 Hz の帯域で最大 40 kine からおよそ 4 mkine までの約 80 dB の、一方 WOS では周期40秒から 20 Hz までの帯域で最大 20 kine からおよそ 3 mkine までの約 76 dB のダイナミックレンジをそれぞれ確保できる。

3. 記録例

上下動成分の観測記録例を示す。震央位置は Fig. 1 に■印で示されている。Fig. 5 に、1989年12月3日に生じた奈良・和歌山県境付近に震央を持つマグニチュード (M) 4.5、震源の深さ (H) 71 km のやや深い地震の WOS と ABU での記録波形を示す。大阪平野に南の方向から到来する地震波の例である。また震源の深さ (71 km) と WOS の位置 (震央距離およそ 30 km) を考えた場合、震源域で生成される primary な Rayleigh 波が発達するのは震央から見て WOS 以遠であるため、Rayleigh 波成分の大阪平野への入射を無視し得る例である。S 波部分でトリガーされたので P 波部分は欠測している。WOS と ABU の記録の S 波部分以後の波形を比較するため S 波部分の位置をほぼ一致させて示した。ABU では S 波の到来後すぐに減衰するのに対し WOS では S 主要動後およそ 10 秒くらいから周期のやや長い震動が長く続いている。Fig. 6 に 1988 年 12 月 13 日に ABU に近い亀岡市付近で生じた M=4.1, H=13.6 km の浅い地震の WOS と ABU での記録波形を示す。大阪平野にほぼ北の方向から入射してくる地震波の例である。S 波主要動後からおよそ 8 秒間ほど、primary な表面波群の位相の対応が見られ、その後 WOS では周期のやや長い波群が励起されている。Fig. 7

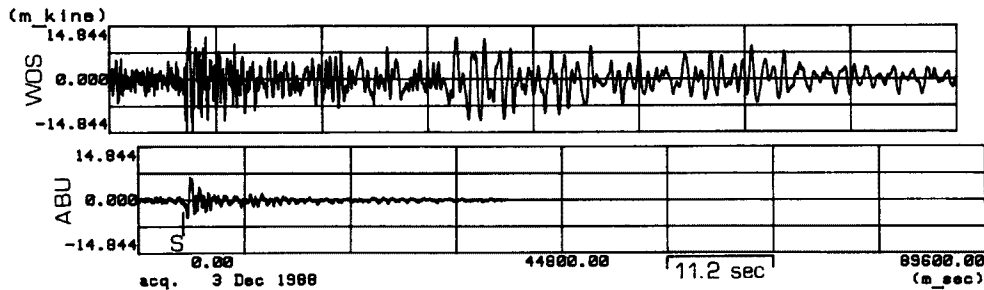


Fig. 5. Comparison of wave forms observed at WOS and ABU for the earthquake (1988 Dec. 3, M=4.5, H=71 km) near Nara-Wakayama border. Traces are vertical components of particle velocity.

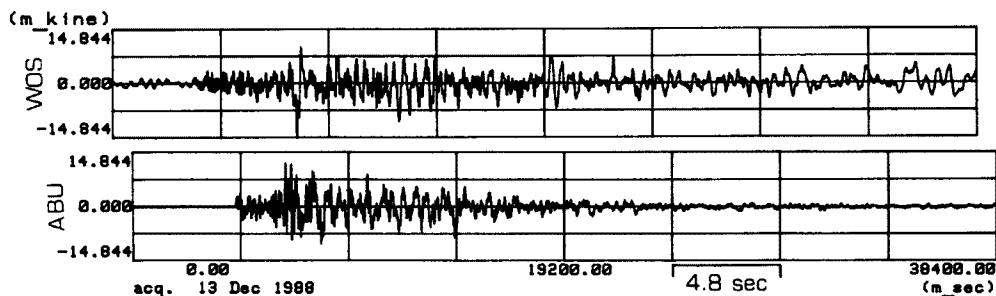


Fig. 6. Comparison of wave forms observed at WOS and ABU for the earthquake (1988 Dec. 13, M=4.1, H=13.6 km) near Kameoka city in the Kyoto prefecture. Traces are vertical components of particle velocity.

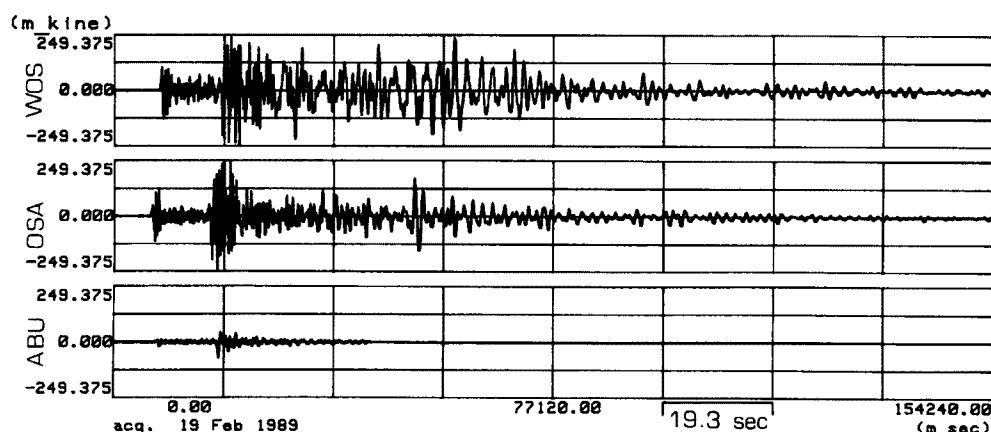


Fig. 7. Comparison of wave forms observed at WOS, OSA and ABU for the earthquake (1989 Feb. 19, $M=5.3$, $H=52$ km) in the central part of the Mie prefecture. Traces are vertical components of particle velocity.

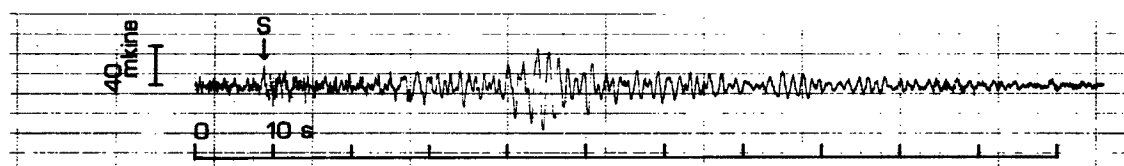


Fig. 8. Wave form observed at OSA for the earthquake (1989 May 2, $M=4.1$, $H=32$ km) near Shiga-Gifu border. Trace is a vertical component of particle velocity.

に1989年2月19日三重県久居市付近で生じた $M=5.3$, $H=52$ km の地震の WOS, OSA および ABU での記録波形を示す。これは大阪平野にほぼ東の方向から到来する地震波の例である。この場合 S 波の到着時刻は3観測点であまり違わないため記録波形をずらさずに示してある。WOS と OSA では S 波主要動後10~20秒くらいから周期の長い波群が顕著になっている。Fig. 8 に1989年5月2日に滋賀・岐阜県境付近で生じた $M=4.1$, $H=32$ km の地震の OSA での記録波形を示す。これは大阪平野に北東方向から入射してくる地震波の例である。これも S 波部分でトリガーされたので P 波部分は欠測している。S 波到着後およそ30秒くらいに顕著な波群が見られる。以上4例から次のような特徴が見出される。ABU 以外の WOS と OSA では、S 波主要動後およそ10秒くらいから周期1秒~4秒の S 波部分と同程度の振幅を持った震動が長く (Fig. 7 の例の場合およそ1分間程度) 続く。この性質は、いづれの地震の場合にも同じ程度に見られることより、地震波の到来方向には依存しないように見え、これは鳥海²⁾の観測結果と調和しない。一方、P 波部分と S 波部分の間のいわゆる P コーダ部分には顕著な波群は見られない。またあまり明瞭ではないが、Fig. 7 の WOS と OSA の記録波形から、S コーダ部分の後続波群は分散性を示しているように見える。Fig. 5 に示したように、震源がやや深い地震の場合、大阪平野へ入射してくる primary な Rayleigh 波成分は小さくて無視し得るにもかかわらず S コーダ部分には周期のやや長い顕著な波群が長く継続している。

4. おわりに

大阪平野において基盤深度の異なる堆積層上2点と平野周辺部の岩盤上1点での村松式強震計による地震動記録の比較から次の性質が見出された。

- (1) 堆積層上の2点では、P 波部分と S 波部分の間のいわゆる P コーダ部分には顕著な波群は見られない

が、S波主要動後およそ10秒くらいからS波部分と同程度の振幅を持った周期1秒～4秒の震動が長く(今回の観測例では1分間程度のものが見られた)続く。この性質は地震波の到来方向には依存していないように見える。

(2) 震源の深さから見て primary な Rayleigh 波(震源域で生成される Rayleigh 波)が未発達な震央距離においても、Sコーダ部分には(1)の性質を持った波群が明瞭に見られる。

(3) このSコーダ部分の波群は分散性を示しているように見えるが明瞭ではない。

(1)～(3)を総合すると、Sコーダ部分の周期のやや長い波群は、S波の入射により大阪平野周縁部で2次的に励起された表面波群から構成されていることが示唆される。今後さらに観測記録を蓄積すると共に観測点を増設し波動論的な検討を加えて行く予定である。

謝辞

本稿を終えるにあたり、観測点の設置ならびに観測の維持に多大の便宜を計っていただき、また色々な面で御協力いただいた大阪府西大阪治水事務所、大阪管区気象台観測課および京大阿武山地震観測所のすべての関係各位に心から御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 吉川宗治・町田義之・寺本光雄・横田裕・長尾英孝・梶原正章：反射法地震探査による大阪市内の深部構造調査，1982，秋季地震学会講演予稿集，pp. 140.
- 2) 鳥海 勲：大阪平野の地震動特性，日本建築学会大会学術講演概要集（近畿），1980，pp. 487-488.
- 3) Sánchez-Sesma, F. J. and J. A. Esquivel: Ground Motion on Alluvial Valleys under Incident plane SH Waves, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 69, 1979, pp. 1107-1120.
- 4) Bard, P.-Y. and M. Bouchon: The Seismic Response of Sediment-filled Valleys, Part 1, The Case of Incident SH Waves, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 70, 1980(a), pp. 1263-1286.
- 5) Bard, P.-Y. and M. Bouchon: The Seismic Response of Sediment-filled Valleys, Part 2, The Case of incident P and SV Waves, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 70, 1980(b), pp. 1921-1941.
- 6) 岩崎好規・香川敬生・澤田純男・堀家正則：大阪平野の深層構造に起因する地震動の特性解析の試み，京都大学防災研究所都市耐震センター研究報告2号，1988，pp. 153-169.