

沖積地盤で観測される地震波動の性質について

入倉孝次郎・赤松 純平・松波 孝治

EARTHQUAKE MOTIONS OBSERVED ON GROUND

by *Kojiro* IRIKURA, *Junpei* AKAMATSU and *Koji* MATSUNAMI

Synopsis

Earthquake motions are observed on the ground in the southern parts of Kyoto basin. The baserock underlying the ground consisted of alluvium and diluvium dips westwards. The wave types of the observed seismic waves are examined by drawing particle motion diagrams, and the spectra of P and S waves are studied. The peak frequencies of the spectra of seismic waves arriving westerly are lower than those arriving from the another directions.

These observational facts suggest that the responses of the ground to seismic waves depend on the relation between directions of wave propagations and the dip directions.

1. はじめに

沖積地盤で観測される地震波動は、表層内での波動の重複反射による震動特性を有することが、主として SH 波について平行層モデルで、理論¹⁾ および実験²⁾ 的に示されてきた。しかし実在の沖積地盤の構造や、その下に存在する基盤の形状は一般に複雑であるため、その震動特性は、平行層モデルでは説明できない場合も生じてきている。水平方向に不均質な媒質での地震波動の性質を議論するために、scattering³⁾ や、差分法⁴⁾ 等の数値計算法が研究されている。San Fernand 地震の際、Pacoima Dam で記録された異常に大きい振巾の加速度波形が、これらの数値計算法を用いて検討されている。複雑な構造を有する沖積地盤での、地震時の震動特性を議論するためには、観測される地震波動の性質と、地形や基盤の形状との関係を知る必要がある。今回、我々は、盆地の山ぎわに位置し、堆積層の下に存在する古生層が傾斜している京大宇治構内で、短周期地震波観測を行なった。得られた地震波動の wave type を particle motion diagrams を描くことによって調べ、P 波および S 波のスペクトルと、沖積地盤の構造との関係を吟味する。

2. 観測点の概況と観測方法

観測点 (GK 点) は、京都盆地南部の山ぎわにある (Fig. 1)。この地点の地下構造についての報告によれば、GK 点下の堆積層 ($V_p=2.0\text{km/sec.}$) は、厚さが約 350m であり、その下の古生層の岩盤は、東西方向に傾斜している⁵⁾。東方約 1.9km 離れた OB 点では、この岩盤が地表にあらわれている。この堆積層は、沖積層および洪積層から成っているが、その境界は明瞭ではない。OB 点の記録は、2 地点の P 波到達時刻の差を見るために使用された。

GK 点での観測は、速度型換振器 (固有周期: 1 秒)、直流増巾器、およびデータレコーダを用いて行なわれた。OB 点での換振器の出力が、テレメータで送信され、同じデータレコーダに集録された。

3. データと解析方法

今回解析された地震の震央が、Fig. 2 に示されている。震源は阿武山地震観測所の微小地震観測網の記録と、GK 点および OB 点の記録を用いて決定された。この際、第一層は、厚さが 5.5km で $V_p=5.5\text{km/sec}$ であり、第二層は、厚さが 25.5km, $V_p=6.2\text{km/sec}$, 第三層は、 $V_p=7.7\text{km/sec}$ の半無限媒質であるモデルを

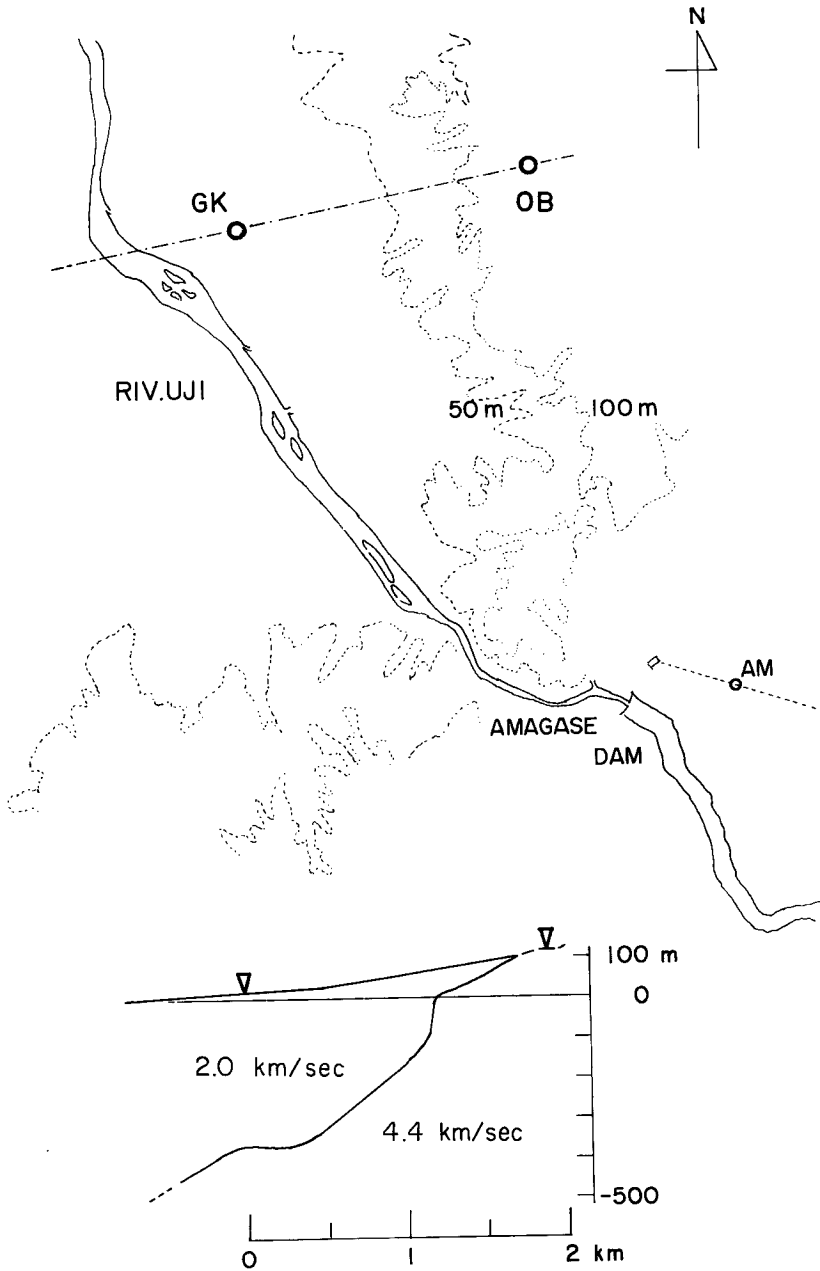


Fig. 1. Topographical map near sites and vertical cross section of geological structure along GK-OB line.

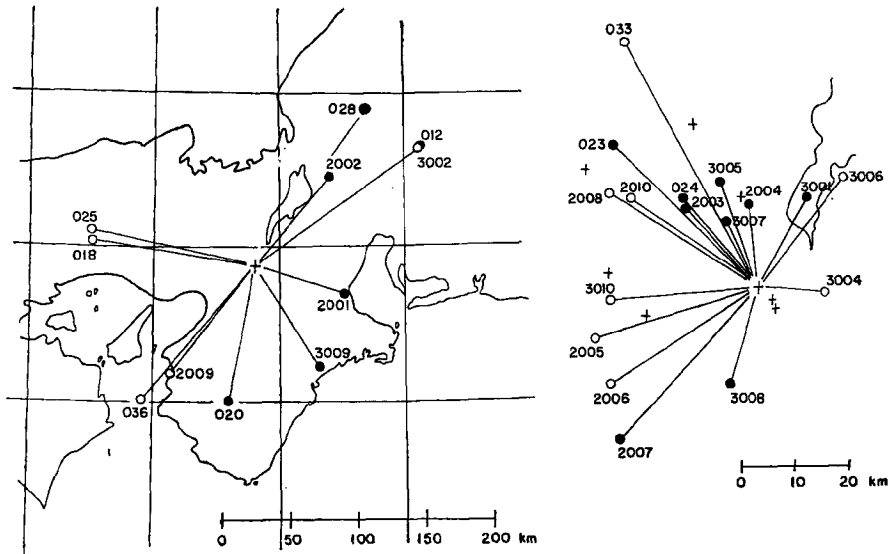


Fig. 2. Distribution of epicenters and initial motions of P waves. Open circles denote dilatation and solid ones compression.

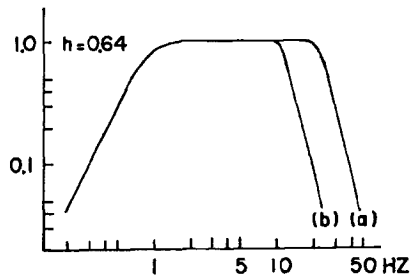


Fig. 3. Overall instrumental velocity response, using low-pass filters with a corner of 25 Hz (a) and of 10 Hz (b).

使用した⁶⁾。一部、地震月報の震源のデータを用いた。

P 波初動の見かけ周波数は、S-P time (t_{s-p}) が約 9 秒以下の地震では、15~16Hz であり、 t_{s-p} が約 9 秒以上のものは、10Hz 以下であるため、AD 変換を行なう際、より高周波の noise を除くために、それぞれ 25Hz、10Hz のシャ断周波数を持つ low-pass filter を使用した。サンプリングインターバルは、シャ断周波数が 25Hz の場合は、9msec、10Hz の場合は、18msec とした。AD 変換されるまでの総合周波数特性を Fig. 3 に示す。

AD 変換の際、シャ断周波数が 25Hz、および 10Hz の low-pass filter を通した記録の例を Fig. 4 に示す。

4. 堆積層による P 波到達時刻の遅れ

GK 点、OB 点で同時に観測された地震波記録と、発破点のわかっている発破記録の、P 波到達時刻の差を

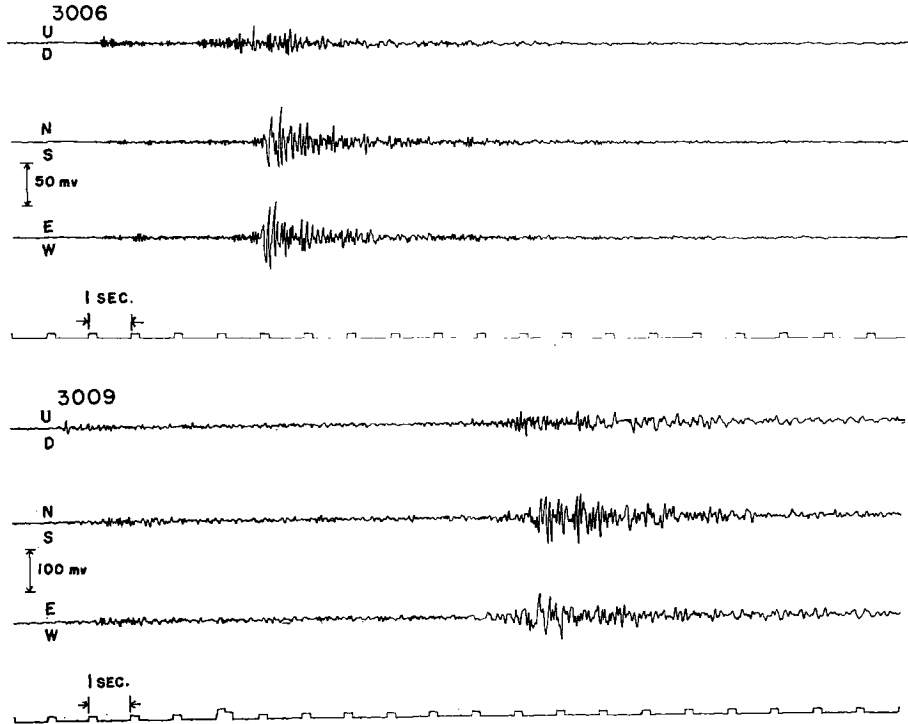


Fig. 4. Examples of local earthquakes observed on the ground (GK pt.). Upper 3 traces are 25 Hz low-pass filtered seismograms from the event No. 3006 occurring at southern Shiga (S-P time: 3.8 sec.) and lower 3 traces are 10 Hz low-pass filtered ones from the event No. 3009 at southern Mie (S-P time: 10.9 sec.).

用いて、堆積層による P 波到達時刻の遅れを調べた。Fig. 5 に、GK 点と OB 点の P 波到達時刻の差が、中心から震央方向へ向かう棒の長さで示されている。白丸は GK 点の遅れ、黒丸は進みを示している。GK 点の遅れの最大値は、東方向に示される 0.37 秒である。この値は、2 地点を結ぶ線分の延長上約 4km 東に位置する採石場の発破震動によるもので、Fig. 1 の地下構造の断面図から予想される最大の遅れに対応すると考えられる。北東方向の 012 (0.31 秒の遅れ)、および、ほぼ西方向の 018 (0.18 秒の進み) の t_{S-P} は、それぞれ 17.6 秒、14.1 秒であり、3 節で用いた地殻構造モデルによると、P 波初動は、7.7km/sec の層からの head wave と考えられる。Fig. 5 の左下に示される簡単化したモデルにおいて、7.7km/sec 層からの head wave を考えるならば、GK 点の OB 点に対する P 波初動の最大の遅れは約 0.3 秒であり、最大の進みは約 0.18 秒となる。左下のモデルに平面 P 波が入射する場合に計算される GK 点の遅れが実線で、進みが破線で示されている。入射角 i は、7.7km/sec 層、6.2km/sec 層からの head wave を想定して、それぞれ、 36° 、 48° とした。観測された 2 地点の P 波到達時刻の差は、堆積層から推定される遅れ時間にほぼ一致している。

5. particle motions

観測された地震波動の wave type を吟味するために、地震波到来方向と、水平および垂直面内の particle motion の方向との関係を調べた。Fig. 4 の記録例からわかるように、P 波初動では、垂直方向の震動が卓越し、水平面内の震動は小さくて、SN 比が悪い。これは堆積層と基盤の速度コントラストが大きいためと考え

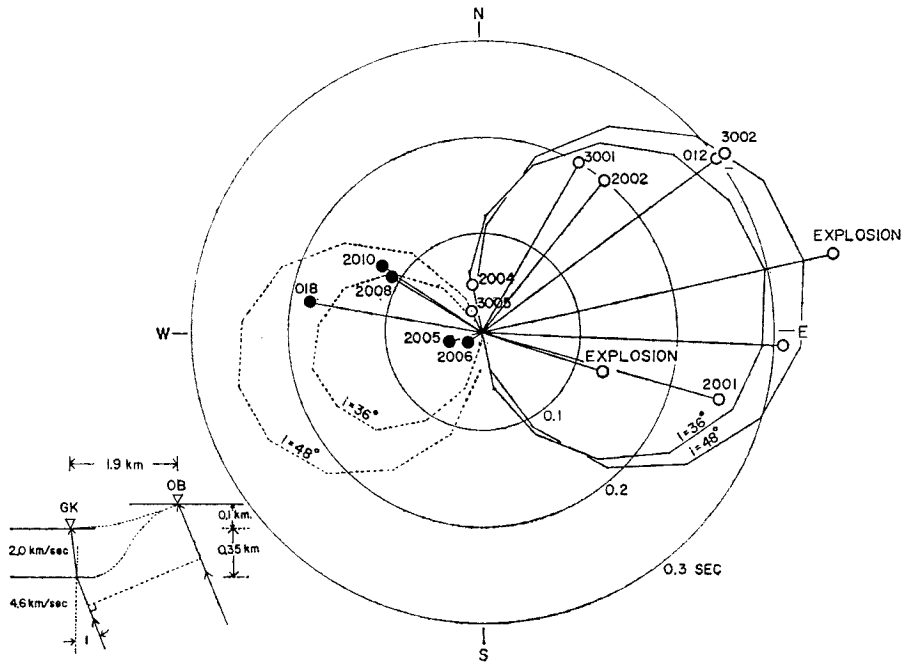


Fig. 5. Differences of P onset times between GK and OB. Open circles show delay of P onsets of GK pt. in comparison to those of OB, and close circles show gain of P onsets of GK pt. to those of OB. The time lags are shown by the length of lines toward epicenters. The simplified model for the interpretation of the observed time lag is illustrated.

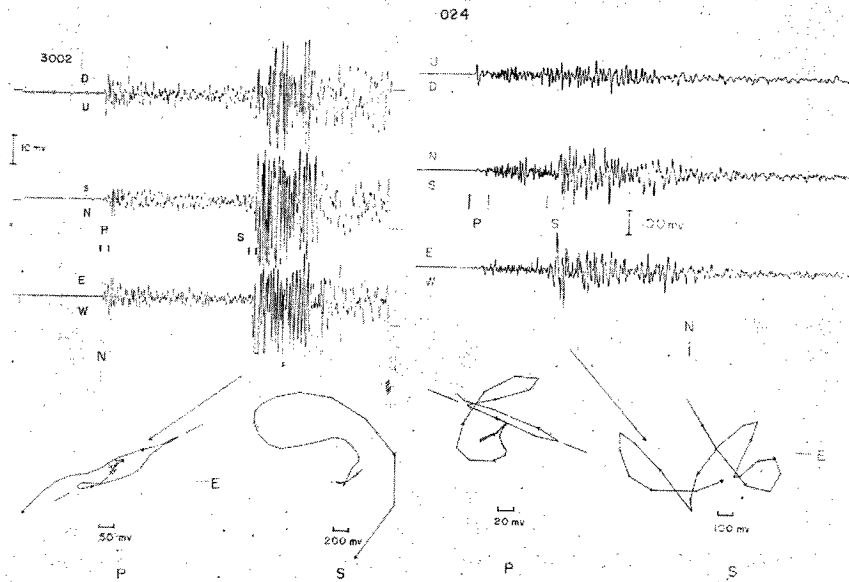


Fig. 6. Seismograms of event No. 3002 and No. 024, and particle motion diagrams of P and S wave on the horizontal plane. Directions of propagations are shown. The intervals for the particle motion diagrams are shown in the seismograms.

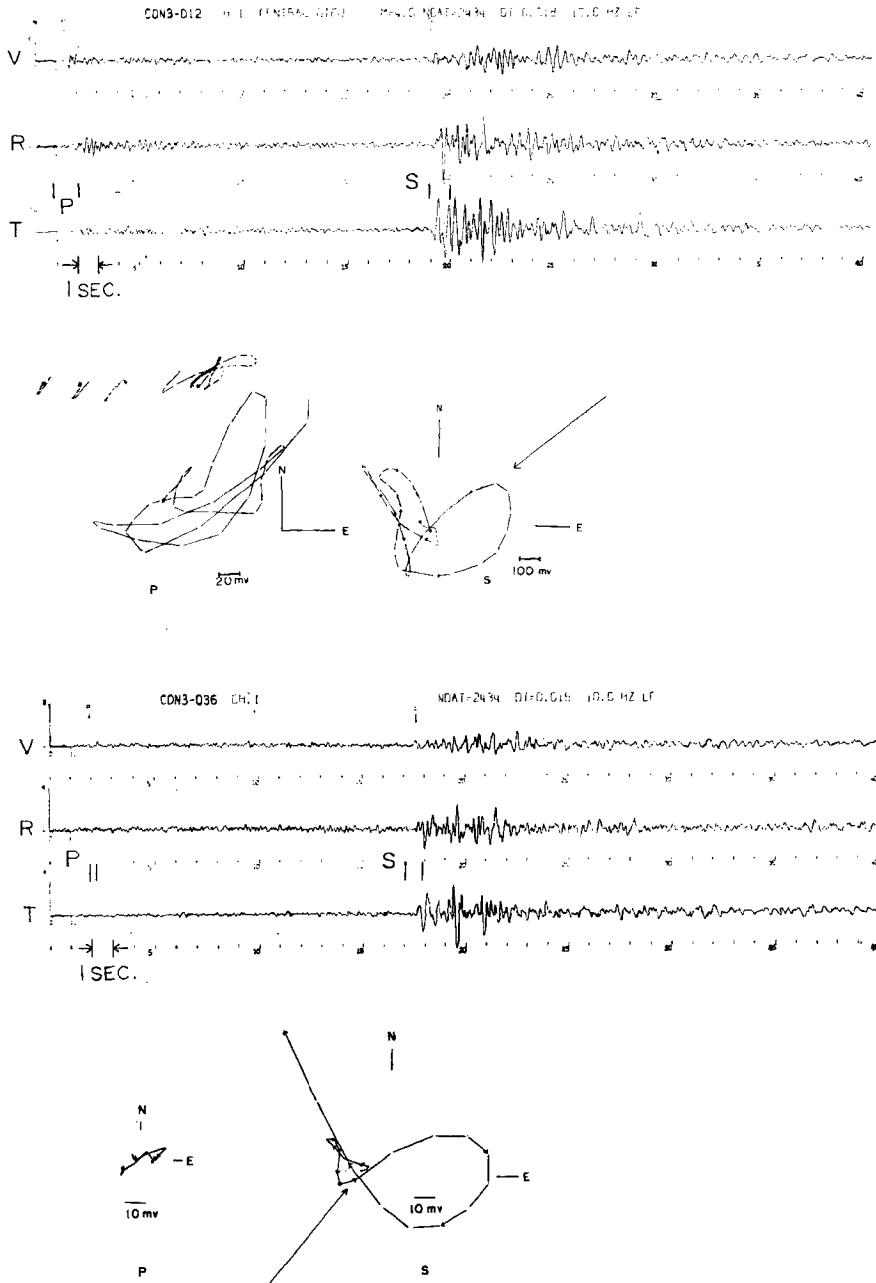


Fig. 7. Seismograms of event No. 012 and No. 036, and particle motion diagrams of P and S waves on the horizontal plane.

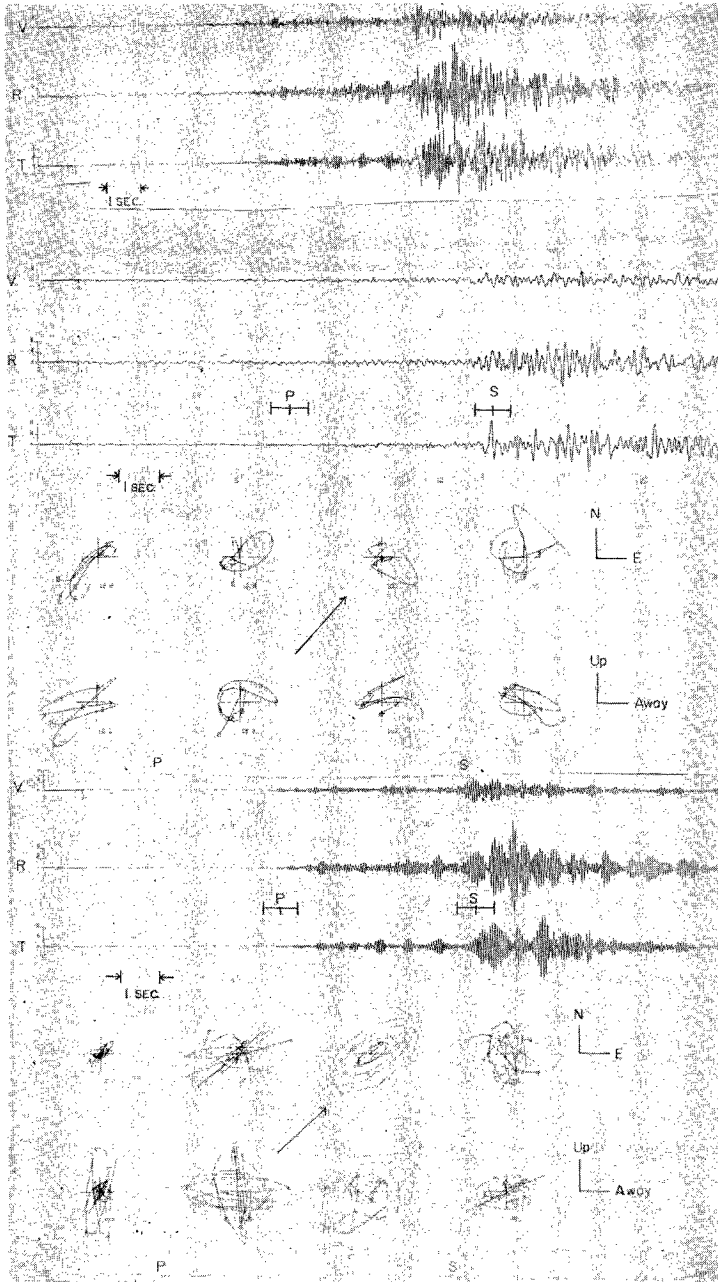


Fig. 8. Comparison of 25 Hz low-pass, 7 Hz low-pass and 16 Hz narrow band-pass filtered seismograms. Particle motion diagrams drawn from 7 Hz low-pass and 16 Hz band-pass filtered traces are shown under the respective traces.

られる。**Fig. 6** に SN 比の良い 3002 および 024 の記録と、P 波初動の水平面内の particle motion diagrams を示す。北東方向から伝播してくる 3002 の particle motion は、ほぼ震央方向を向いているが、北西方向から伝播してくる 024 は震央方向を向かない。このように、GK 点で観測される P 波の particle motion の方向からは、地震波到来方向を決めることは困難である。

S 波を、particle motion の polarization を用いて検出するには、地震波の伝播方向を知る必要があるが、以上述べたように、P 波の particle motion からは、求めるのが困難であった。従ってここでは、地震波到来方向が震央方向と一致していると仮定する。

Fig. 7 に t_{s-p} が 15.7 秒と 17.6 秒の地震波記録と、S 波初動部の水平面内の particle motion diagrams を示す。北東方向に震源を有する 012 の S 波初動の particle motions は transverse 方向に震動し、次に radial 成分も大きくなる。地震波記録では、transverse 成分は、radial 成分に比して振巾が大きい。S 波についてのこの傾向は、南西方向より伝播する 036 にも顕著に見られる。今回解析された t_{s-p} が約 9 秒以上の地震の S 波初動部分は、ほぼ transverse に polarize している。

Fig. 8 に、 t_{s-p} が 5.1 秒の地震波を、震央方向に座標変換して得られた地震波記録を示す。3 成分とも、15~16Hz の高周波成分によって乱されている。従って、低周波成分を取り出すために、シャ断周波数が 7Hz の high-cut filter によって高周波成分を除き、低周波成分を吟味する。**Fig. 8** に示される 7Hz high-cut filter による S 波の水平面内での particle motions は、transverse に polarize し、垂直面内では、入射方向に対してほぼ直角な方向に polarize している。初動部分では、transverse 成分の振巾は、radial 成分に比して大きい。このように、7Hz 以下の低周波の記録からは、SV 波および SH 波が明瞭に検出される。

最後に、16Hz に中心周波数を持つ band-pass filter を通した地震波記録と、P 波および S 波部分の particle motion diagrams が示されている。地震波記録から見られるように、P 波および S 波とも、水平成分の震動が異常に大きい。しかし particle motion の方向は、この震動が震源から伝播してきた P 波あるいは S 波ではないことを示している。

以上述べたように、 t_{s-p} が 9 秒以下の地震波では、7Hz 以下の低周波成分に限れば、SV 波および SH 波がともに明瞭であり、初動は SH 波が卓越している。

6. フーリエスペクトル

前節で述べたように、P 波初動部分で、vertical 成分が卓越し、S 波初動部分では、7Hz 以下の低周波成分に限れば、transverse 成分が卓越する。ここでは、堆積層による地震波動の増巾度と、周波数との関係を調べるために、P 波 vertical 成分および S 波 transverse 成分のフーリエスペクトルを吟味する。

Fig. 1 に示されている地下構造を、堆積層の厚さが 350m の平行層モデルで近似すれば、堆積層の震動特性をあらわすピーク周波数は、P 波については、fundamental mode で 1.3Hz, first higher mode で 4.1Hz である。S 波の場合は、それぞれ、0.5Hz, 1.2Hz である。P 波部分の解析を行なう際、上述の周波数領域のスペクトルを、精度よく求めるためには、4 秒程度の解析区間が必要と考えられるが、later phase の混入によるスペクトルへの影響を吟味するために、4.6 秒と 2.3 秒の二つの区間のスペクトルを解析した。**Fig. 9** に、解析された地震波の、P 波スペクトルが描かれている。実線は、4.6 秒の区間の場合を示し、破線は、2.3 秒の場合を示す。両者とも、4.0Hz 以下の低周波領域では、スペクトルのピークの位置が、ほぼ一致している。このため、4.6 秒間のスペクトルの、4.0Hz 以下の周波数領域について吟味する。S 波の解析区間も 4.6 秒である。

フーリエ変換は、Cooley and Turkey の方法により行なわれ、その後、Hamming-Turkey の方法で smoothing された。

解析された P 波 vertical 成分のスペクトルは、ピーク周波数の違いにより、二つのグループに分けられる。これは地震波到来方向の違いに対応している。**Fig. 9** の左に、GK 点より西方から到来した地震波のスペクトル

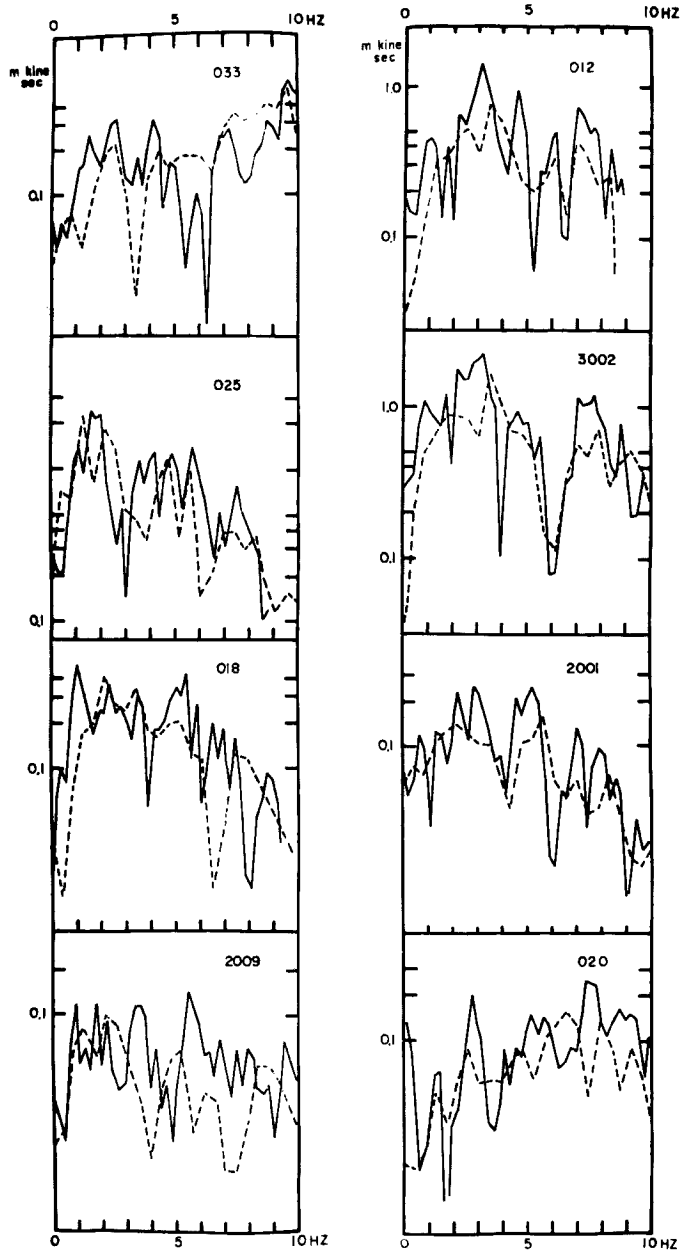


Fig. 9. Spectra of initial parts of P waves calculated over the time windows of length 4.6 sec (solid line) and 2.3 sec (dotted line). Spectra of the seismic waves arriving westerly are shown in the left, and ones from another directions in the right.

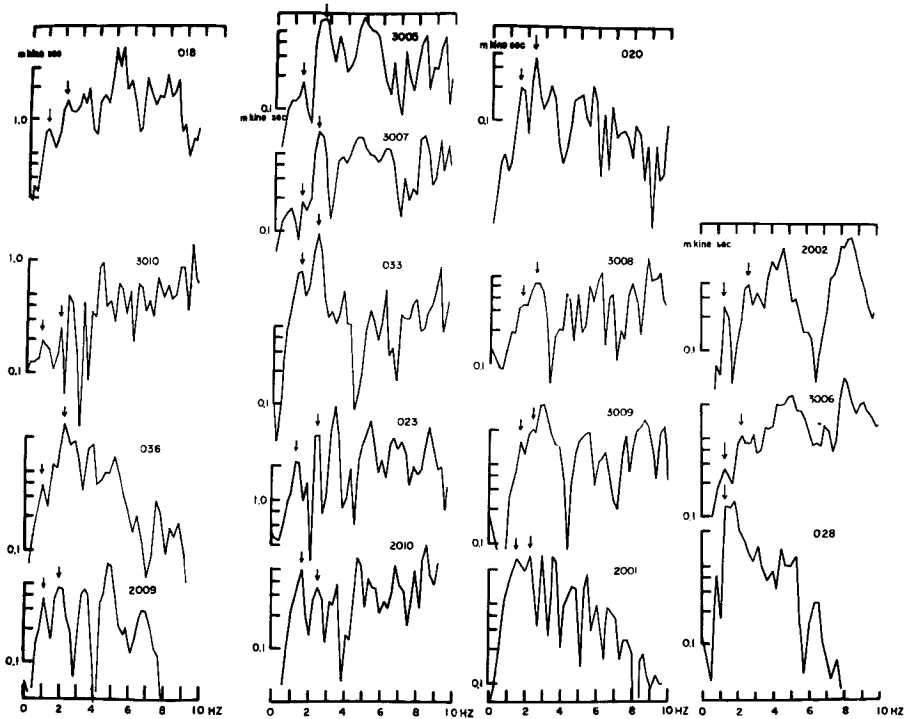


Fig. 10. Spectra of initial parts of S waves calculated over the time window of length 4.6 sec. Spectra of the seismic waves arriving westerly are shown in the left, and ones from another directions in the right 3 rows.

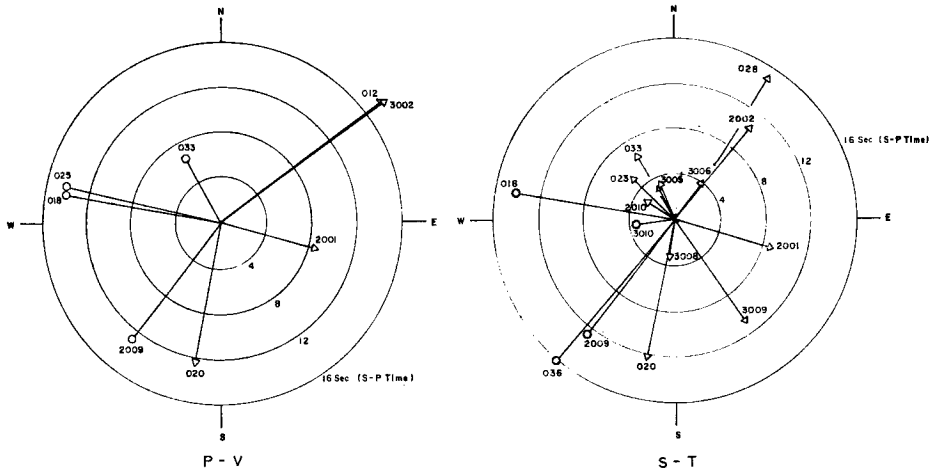


Fig. 11. Relation between directions of propagations and peak frequencies of seismic waves. Peak frequencies of the events shown with open circles are from 1.5 to 2.5 Hz for P waves, and 1.0 and 2.0 Hz for S waves and ones with solid circles are from 2.5 to 3.0 Hz for P, and 1.5 and 2.5 Hz for S.

ルが示されており、1.5~2.5Hz にピークを有する。右には、東方から到来した地震波のスペクトルが示されており、2.5~3.0Hz にピークを有する。

S 波のスペクトルは、震央方向に座標変換を行なって、transverse 成分を解析した。S 波の場合も、P 波の場合と同じように、ピーク周波数の違いにより、二つのグループに分けられる。これは地震波到来方向のちがいに対応している。Fig. 10 に示されている 4 個の地震 (018, 3010, 036, 2009) は、ほぼ西方から到来する。この 4 個の地震波のグループと、それ以外の地震波とでは、ピーク周波数が異なる。図中、矢印で示されているように、前者は、1.0Hz 付近と 2.0Hz 付近にピークを持ち、後者は、1.5Hz 付近と 2.5Hz 付近にピークを持つ。

Fig. 11 に、地震波到来方向とピーク周波数の関係を示す。左図に、P 波スペクトルのピーク周波数が、1.5~2.5Hz の地震波を丸印で、2.5~3.0Hz の地震波を三角印で示す。右図に、S 波スペクトルのピーク周波数が、1.0Hz 付近と 2.0Hz 付近にある地震波を丸印で、1.5Hz 付近と 2.5Hz 付近にある地震波を三角印で示す。

Fig. 11 において、ほぼ西方から到来する地震波のマグニチュード (M) は、2.3~5.1、S-P time は 3.4 秒~15.7 秒の範囲にある (Table 1)。これらの地震波のスペクトルは、P 波については、1.5~2.5Hz、S 波については、1.0Hz 付近と 2.0Hz 付近にピークを有する。これらの地震波のスペクトルに共通しているピーク周波数は、地盤の震動特性をあらわしていると考えられる。これ以外の方向の地震波のスペクトルは、P 波については、2.5~3.0Hz、S 波については、1.5Hz 付近と 2.5Hz 付近に共通するピークを有する。このピーク周波数の位置は、ほぼ西方から到来する地震波のグループに比して、P 波および S 波スペクトル共に高周波にずれている。これらの地震の M は、2.1~4.2、S-P time は、2.9 秒~17.6 秒であり (Table 1)、M や S-P time の範囲は、西方のグループとほぼ同じである。このように、地震波到来方向の違いによって、地盤の震動特性が異なることは、平行層モデルでは解釈できない。

7. おわりに

Table 1 に、解析された地震のリストおよび解析結果を震央方位順に示す。

1) GK 点と OB 点の P 波到達時刻の差は、東方より到来する地震波の場合の方が、西方から到来する地震波の場合よりも大きい。これは、GK 点より西方に存在する堆積層によって、GK 点での P 波初動が遅れるためである (Fig. 5)。

2) 沖積地盤上にある GK 点で観測される P 波初動は、垂直方向の震動が卓越し、水平成分は小さい。これは、沖積層と古生層の速度のコントラストが大きいためと考えられる。P 波初動の水平面内の particle motion は、震央方向を向かない場合がある。

3) 7Hz 以下の低周波成分に限れば、S 波初動部分の particle motion の polarization は、SH 波および SV 波の性格を示している。特に S 波初動では、SH 波が卓越している。

4) GK 点で観測される P 波および S 波のスペクトルは、地震波到来方向に依存して異なったピーク周波数を持っている。これは、地盤の震動特性が方位特性を有することを示唆している。

今後、地盤の震動特性の方位依存と、基盤の形状との関係をさらに吟味するために、堆積層上 (GK 点) および古生層上 (OB 点) で観測される地震波の性質を比較して検討する。

謝 辞

終りに終始ご指導下さった吉川宗治教授、データをお貸し下さった阿武山地震観測所の岡野健之助助教授、ならびに平野勇氏に深謝いたします。また解析にご協力下さった西正男技官・瀬川一恵事務官に心からお礼を申し上げます。

なお、データ処理に際しては防災研究所資料センターの電子計算機 FACOM 230-25 を使用した。

Table 1. Summarized list of observed earthquakes.

No.	Date		Time		Azimuth of Epicenter	S-P Time	Initial Motion	Magnitude	Maximum Amplitude (Max. Amp.)		Apparent Frequency***		Amplification of DC Amp.	Sensitivity of Seismometer	Cut-off Frequency of Filter	Sampling Interval	Peak Frequency of Spectra	
	M	D	Y	h					m	m/kin	Hz	Hz					P-V	S-T
CO 2004	Feb.	20	'72	14	20	- 07°	+	**1.4	4.6	15	50	1	25	9				
COL 3-3005	Mar.	25	73	16	33	*- 23	+	**2.1	8.0	13	100	1	25	9		1.5	2.5	
3007	Apr.	5	73	21	22	- 28	+	**2.2	15.8	13	20	3	25	9		1.5	2.5	
CON 3- 033	Oct.	5	73	17	58	- 29	-		25.0		10	3	25	9		1.5-2.5	2.5	
COL 3- 024	Sep.	18	73	90	42	** - 41	+	**2.2	off scale		10	3	25	9				
CO 2003	Feb.	16	72	13	42	- 44	(+)	**1.8	4.4	15	50	1	25	9				
COL 3- 023	Aug.	31	73	02	46	** - 46	+	**2.7	65.0	13	10	3	25	9		1.4	2.5	
CO 2010	Mar.	6	72	13	40	- 57	-	**2.4	10.5	11	100	1	25	9		1.7	2.5	
CO 2008	Mar.	2	72	12	31	- 58	-	**2.4	off scale		100	1	25	9				
CON 3- 025	Sep.	21	73	11	21	* - 77	-	*5.1	off scale		10	3	10	18		1.5-2.5		
CON 3- 018	May	12	73	23	08	* - 80	-	*4.1	off scale		20	3	10	18		1.5-2.5		
CO 3010	Apr.	15	73	04	38	- 97	-		15.4	13	20	3	25	9				
CO 2005	Feb.	28	72	04	23	- 105	-	**1.8	3.2	16	50	1	25	9				
CO 2006	Feb.	28	72	22	05	** - 124	-	**2.7	off scale		100	1	25	9				
CO 2007	Feb.	28	72	22	09	- 140	(+)	**2.3	5.1	13	100	1	25	9				
CON 3- 036	Nov.	21	73	16	14	- 140	-		11.3	5	10	3	10	15		1.0	2.2	
CO 2009	Mar.	4	72	00	25	* - 142	-	*3.7	5.6	3	100	1	10	18		1.5-2.5	2.0	
CO 3008	Apr.	9	73	21	04	- 167	+	**2.7	15.0	14	20	3	25	9		1.1	2.0	
CON 3- 020	Jun.	1	73	02	18	* - 170	+	*3.9	29.0	5	20	3	10	18		1.7	2.5	
CO 3009	Apr.	14	73	13	56	+ 145	+		18.7	13	20	3	25	9		2.5-3.0	2.5	
CO 2001	Feb.	15	72	05	26	+ 106	+		21.0	4	50	1	10	18		2.5-3.0	2.3	
COL 3-3004	Mar.	12	73	10	10	+ 93	-	*2.2	off scale		100	1	25	9				
CON 3-3002	Mar.	5	73	11	22	+ 54	-	*4.2	off scale		100	1	10	18		2.5-3.0		
CON 3- 012	Apr.	1	73	09	51	* + 53	+	*4.0	50.0	5	5	3	10	18		2.5-3.0		
CO 2002	Feb.	16	72	02	45	+ 40	+		16.0	8	50	1	10	18		1.3	2.6	
CO 3006	Apr.	5	73	15	22	+ 37	-	**2.5	25.8	10	20	3	25	9		1.3	2.3	
COL 3-3001	Feb.	23	73	15	57	* + 30	(+)	*3.8	off scale		100	1	25	9				
CON 3- 028	Sep.	27	73	03	36	* + 35	(+)	*4.2	23.3		10	1	10	30		1.5		

* : origins and magnitudes determined by J.M.A. ** : origins and magnitudes determined by Abuyama Seismological Observatory.

*** : apparent frequency at which seismograms show maximum.

参 考 文 献

- 1) Kanai, K.: Relation between the Nature of Surface Layer and the Amplitude of Earthquake Motions, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 30, 1952, pp. 31-37.
- 2) Yoshikawa, S., M. Shima and K. Irikura: Experimental Study on the Vibrational Characteristics of Ground, Proc. 4th Conf. Earthq. Eng., A2, 1969, pp. 68-80.
- 3) Aki, K. and K. Larner: Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH waves, J. Geophys. Res., Vol. 75, 1970, pp. 933-954.
- 4) Boore, D. M.: A note on the effect of simple topography on seismic SH waves, Bull. Seism. Soc. Amer., Vol. 62, pp. 275-284.
- 5) 狐崎長浪・後藤典俊・岩崎好規：地震探査からみた京都盆地南部の地下構造とこれに関連した地震工学上の若干の問題，京都大学防災研究所年報，第14号A，昭46.4，pp. 203-215
- 6) Okano, K. and I. Hirano: Earthquakes occurring in the vicinity of Kyoto, J. Phys. Earth, Vol. 16 Special Issue, 1968, pp. 141-152.