

兵庫県南部地震の揺れを調べる

室井 勲*

1. はじめに

平成7年1月17日午前5時46分に発生した兵庫県南部地震(震災名:阪神・淡路大震災)は、神戸市とその周辺の都市、さらに、その他13府県に大きな被害をもたらした。今回の地震は典型的な都市直下型地震で、‘近畿地方には被害地震は発生しない’と思っていた多くの住民に大きな衝撃を与えた。これを機に、多くの中学校及び高等学校の理科の授業で、今回の地震や防災に関する教材が取り上げられ生徒も大きな関心を持っている。

地震に関する教材の中でも比較的関心が持たれるのが地面の揺れの大きさである。ここでは、関西地震観測研究協議会が10か所の地点で観測した兵庫県南部地震の記録¹⁾の中から、大きく揺れた3か所のS波の記録を使って、三つの観測点における地面の水平面の揺れ方を調べた。そして、この揺れの方向とすでに余震分布から推定されている断層の方向との関係もほぼ理論値どおりであることが分かったので、今回の地震の教材化として報告したい。

2. 地震の観測点

今回の地震記録が得られた3か所の観測点の名称などは次の表1のとおりである。

表1 観測地点名及び地震計設置点状況

観測点名(略称)	地震計設置点の状況
① 神戸大学工学部(KBU)	花崗岩のトンネル 地表下約10m, 海拔:110m
② 神戸市本山(MTY)	比較的薄い沖積層などの堆積物 海拔: 25m
③ 尼崎市(AMA)	厚い沖積層 海拔: 0m

また、これら三つの観測点の位置関係は図1に示すとおりで、本震からの水平距離(震央距離)は、

①は29.7km, ②は31.9km, ③は39.9kmである。地震計の設置点の条件は、各観測点で表1のように異なり、条件がよいのは花崗岩の硬い岩盤に位置する①地点である(図1)。

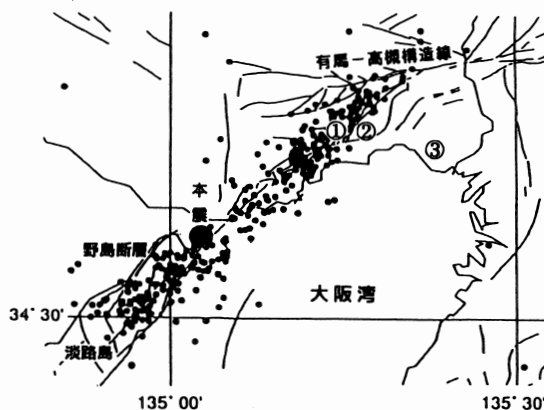


図1 観測点の位置; ①: 神戸大学工学部, ②: 神戸市本山, ③: 尼崎市. 大きい黒丸: 本震, 小さな黒丸: 余震²⁾, 〃: 活断層.

3. 地震記録

使用した兵庫県南部地震の記録は、速度型地震計の記録から時間積分して、変位を表す記録に直したものである。

3か所とも地震記録は、観測点の地面の揺れを3成分、すなわち、南北(N-S)成分、東西(E-W)成分、上下(U-D)成分という三つの方向に分けて観測し記録したものであるが、ここでは、揺れの水平成分を求めるために、3か所とも水平の2成分(N-SとE-W)だけを使用した(図2)。

図2では、P波は揺れが小さく不明瞭なので、大きな揺れを示すS波の部分だけを使う。いずれも揺れの最大値の大きさを同じにして表してある。これは元の論文¹⁾では、記録を多数並べて印刷する際に、揺れの最大値を一定値に規格化してあるためで、それぞれの揺れの最大値がcm単位で記入してある(各記録の右上に記入)。記録の縦軸は、揺れの大きさ(cm)、横軸は地震発生からの時間(sec)である。各記録線上で左端に近いところの*の位置が本震が発生した時刻である。また、各記録の揺れの最大値を示す所には●印がつけてある。

* 大阪府教育センター

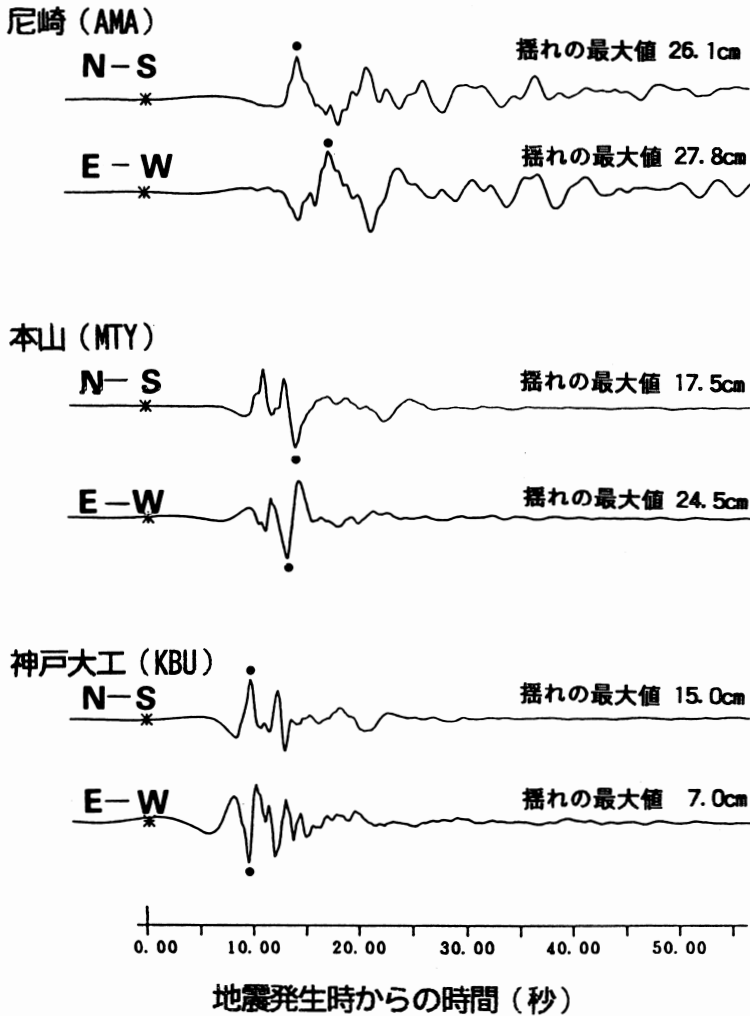


図2 3か所の地震の記録（水平の2成分のみ）¹⁾。

*：地震が発生した時刻。横軸はここからスタートしている。小さな点●：最大値の位置。

4. 揺れの求め方

(1) 記録の読み取り

印刷された地震記録の読み取りをしやすくするために、この記録の横軸の時間間隔の0.25secを1mmの幅にまで拡大した。この時、揺れの幅は、どの成分も各記録の最大の揺れ幅を一定値に規格化して示してあるので、各記録相互間の揺れの大小の比較ができない。しかし、記録には各成分ごとに最大値の大きさがcm単位で記入してあるので、読み取った後に実際の揺れの大きさになおすことができた。

読み取りは、3か所とも記録の水平2成分（東西と南北）の最も大きな揺れが見られるところ及びその前後のところ、恐らくS波と見なされる部分について行った。図2の記録の横軸は、地震の発生時刻をスタート時（0.0秒）としているので、これを基準として3か所の記録の読み取りをした時間幅を表すと、神戸大工は6秒から15秒までの9秒間、本

山は7秒から16秒までの9秒間、尼崎は12秒から41秒までの29秒間になる。教材として活用できるように読取値は次のページに載せておく（表2）。

(2) 揺れの描き方

3成分の記録のうち水平2成分を読み取って組み合わせて合成し、揺れの軌跡を平面上に表す、という一般的な方法を行う。具体的には、観測点の地面の水平面での揺れを描くことになる。

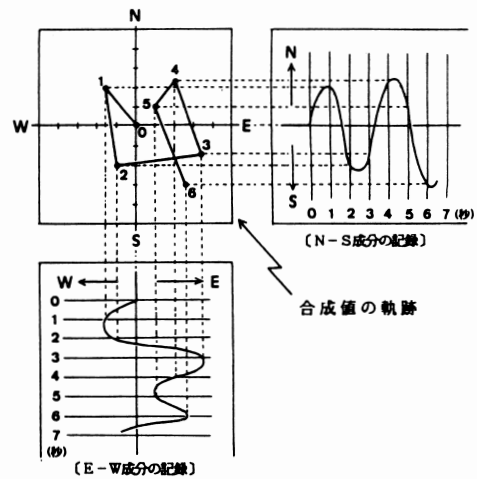


図3 地震記録からの読み取り方と合成値の記入及び軌跡の描き方。

いま、図3のように記録のN-S成分とE-W成分を、それぞれの揺れの方向に一致するように置くと、両者の時間軸は直交するようになる。揺れの大きさを読み取るのは、同じ時刻でのN-S成分及びE-W成分の揺れである。この同一時刻の2成分の揺れの大きさを示す二つの数値を、すなわち、N-S成分及びE-W成分からそれぞれ一つずつの数値を読み取り、一つの点として別に用意したグラフ用紙（四つの方位；北N、南S、東E、西Wを表す座標軸を記入した方眼紙で、縦軸はN-S成分、横軸はE-W成分を表す）にプロットする。このとき原点Oからの長さが、この水平面での揺れの大きさになる。さらに、それぞれの点を時刻の経過の順番（図中の番号0→1→2→3→4→5→6）に結ぶと揺れの軌跡が得られる。

5. 揺れを描く

上述のようにして得た3か所の水平成分の読取値から描いた地面の揺れの軌跡を図4[※])に示す。

表2 兵庫県南部地震記録(変位)読取值

(単位: mm)

① 神戸大工学部				② 神戸本山				③ 尼崎(つぎ)			
時刻 (秒)	W—E	S—N		時刻 (秒)	W—E	S—N		時刻 (秒)	W—E	S—N	
6:00	16.6		5.0	7:00	17.5	0.0		24:00		111.0	65.2
6:25	14.1		2.0	7:25	12.2	3.8		24:25		74.0	37.3
6:50	7.5	2.0		7:50	5.2	8.7		24:50		55.5	9.3
6:75	0.0	10.0		7:75	0.0	13.7		24:75		46.3	3.7
7:00		15.1	17.0	8:00		8.7	20.0	25:00		46.3	0.0
7:25		27.7	25.0	8:25		15.7	23.7	25:25		37.0	7.5
7:50		37.7	32.9	8:50		29.7	31.2	25:50		11.1	46.6
7:75		45.2	45.9	8:75		43.7	41.2	25:75	0.0		87.6
8:00		46.8	56.9	9:00		52.4	42.5	26:00	33.3		80.1
8:25		37.7	64.9	9:25		55.9	40.0	26:25	38.9		55.9
8:50		15.1	64.9	9:50		55.9	37.5	26:50	40.7	0.0	
8:75	7.5	20.0		9:75		43.7	25.0	26:75	44.4		63.4
9:00	35.2		25.0	10:00	17.5		25.0	27:00	37.0		83.9
9:25	70.4		49.9	10:25	34.9		50.0	27:25	9.3		104.4
9:50	37.7		109.8	10:50	29.7		58.7	27:50		7.4	121.1
9:75		30.2	149.8	10:75	52.4		144.8	27:75		5.6	121.1
10:00		65.4	99.8	10:88	69.9		168.6	28:00	22.2		102.5
10:25		52.8	30.0	11:00	52.4		156.1	28:25	38.9		65.2
10:50		35.2	20.0	11:25		52.4	99.9	28:50	55.5		28.0
10:75		15.1	28.0	11:50		96.1	0.0	28:75	70.3		41.0
11:00		7.5	15.0	11:75		61.2	33.7	29:00	66.6		50.3
11:25		27.6	20.0	12:00	17.5		18.7	29:25	37.0		50.3
11:50	20.1	43.9		12:25	78.6		5.0	29:50	0.0		50.3
11:75	60.3	5.0		12:50	157.2		0.0	29:75		18.5	52.2
12:00	50.3		49.9	12:75	218.4		74.9	30:00		50.0	50.3
12:25	25.1		99.8	12:88	244.6		124.9	30:25		70.3	41.0
12:50		10.1	89.9	13:00	235.9		118.6	30:50		72.2	35.4
12:75		30.2	0.0	13:25	131.0		43.7	30:75		50.0	28.0
13:00		30.2	109.8	13:50		34.9	37.5	31:00		27.8	31.7
13:25		10.1	70.0	13:75		174.7	162.3	31:25		5.6	39.1
13:50	30.2	15.0	15.0	14:00		230.6	174.8	31:50	1.9		39.1
13:75	5.0	10.0	10.0	14:25		209.7	137.4	31:75		7.4	14.9
14:00		10.1	16.0	14:50		148.5	87.4	32:00		29.6	0.0
14:25		17.6	17.0	14:75		87.4	62.4	32:25		31.5	28.0
14:50	20.1	15.0	15.0	15:00		17.5	37.5	32:50		7.4	55.9
14:75	25.1		4.0	15:25	17.5		25.0	32:75	27.8		83.9
15:00	20.1		5.0	15:50	17.5		6.2	33:00	64.8		87.6
				15:75	12.2		12.5	33:25	92.5		93.2
				16:00		3.5	25.0	33:50	114.7		83.9
								33:75	112.9		55.9
								34:00	111.0		42.9
								34:25	64.8		29.8
								34:50	18.5		29.8
								34:75		18.5	44.7
								35:00		64.8	46.6
								35:25		85.1	31.7
								35:50		87.0	0.0
								36:00		79.6	55.9
								36:25		87.0	83.9
								36:50		96.2	102.5
								36:75		103.6	98.8
								37:00		92.5	55.9
								37:25	0.0		0.0
								37:50	74.0		37.3
								37:75	111.0		54.0
								38:00	129.5		50.3
								38:25	129.5		42.9
								38:50	120.3		28.0
								38:75	92.5		18.6
								39:00	74.0		18.6
								39:25	27.8		29.8
								39:50		9.3	42.9
								39:75		22.2	44.7
								40:00		33.3	37.3
								40:25		44.4	28.0
								40:50		64.8	24.2
								40:75		79.6	13.0
								41:00		88.8	3.7
											11.2

③ 尼崎			③ 尼崎(つぎ)		
時刻 (秒)	W—E	S—N	時刻 (秒)	W—E	S—N
12:00		5.6	18:00		129.5
12:25		7.4	18:25		46.3
12:50		1.9	18:50		44.4
12:75	0.0	55.9	18:75		27.8
13:00	31.5	29.8	19:00	27.8	46.6
13:25	74.0		19:25	40.7	
13:50	111.0	37.3	19:50	25.9	13.0
13:75	157.3	93.2	19:75	33.3	13.0
14:00	185.0	167.7	20:00	74.0	3.7
14:25	166.5	232.9	20:25	148.0	37.3
14:50	83.3	260.9	20:50	222.0	93.2
14:75	59.2	186.4	20:75	259.0	167.7
15:00	37.0	111.8	20:88	259.0	180.8
15:25	11.1	93.2	21:00	203.5	156.5
15:50	64.8	74.5	21:25	129.5	111.8
15:75	74.0	7.5	21:50	99.9	18.6
16:00	18.5	55.9	21:75	74.0	46.6
16:25		59.6	22:00	46.3	39.1
16:50		65.2	22:25		9.3
16:75	111.0	83.9	22:50		28.0
17:00	165.5	111.8	22:75		9.3
17:25	240.5	111.8	23:00	129.5	28.0
17:50	277.5	111.8	23:25	153.6	65.2
17:75	222.0	74.5	23:50	153.6	87.6
18:00	165.5	74.5	23:75	133.2	89.5
18:25	142.5	167.7			

① 神戸大学工学部

最大の揺れの大きさは南北方向で、北に約15cm、南に約11cm、合計して約26cmの揺れになる。揺れの軌跡は、大小合わせて四つのループが見られる。3か所の中では最も小さな揺れである。花崗岩という硬い岩盤の地点でもこれ程も揺れた(図4(a)[※])。

② 神戸市本山

北方に16cmにも達する右回りの揺れ、その後は西北西に28cmと南東に29cm、合わせて57cmになる二つの細長い揺れが大きく、特に⑦秒から⑯秒までの揺れの曲線上の数字13から14までの1秒間は顕著である。大きな揺れのループを眺めるだけでなく、実

際にたどってみるとよい。ここは震度階級の最大値を示した「震度7の地域」であり、揺れがいかに大きかったかが実感できよう(図4(b)[※])。

③ 尼崎市

ここは、今回の地震の記録の中で最も大きな揺れを記録した観測点である。図4(c)[※]で、細長いループ状の揺れの長い方向に沿った大きさは、北側では北西方向に約31cm、南側では東の方向に約28cm、往復では50cmを超えている。この図で⑫秒から⑳秒までの曲線の中で、大きな軌跡は14秒→17秒→18秒→21秒→23秒といくつかのループが見られる。複雑ながらも大きなループは、ほぼ北西-南東の方向で先

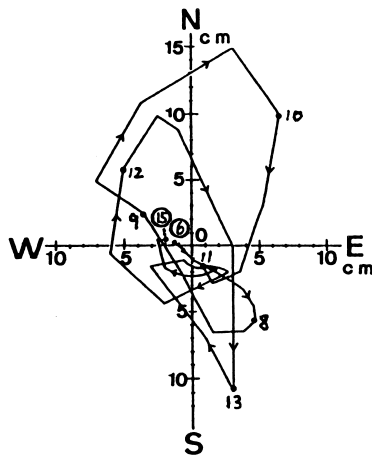


図4(a)[※] 神戸大学工学部における揺れの軌跡 (⑥秒から⑮秒まで)

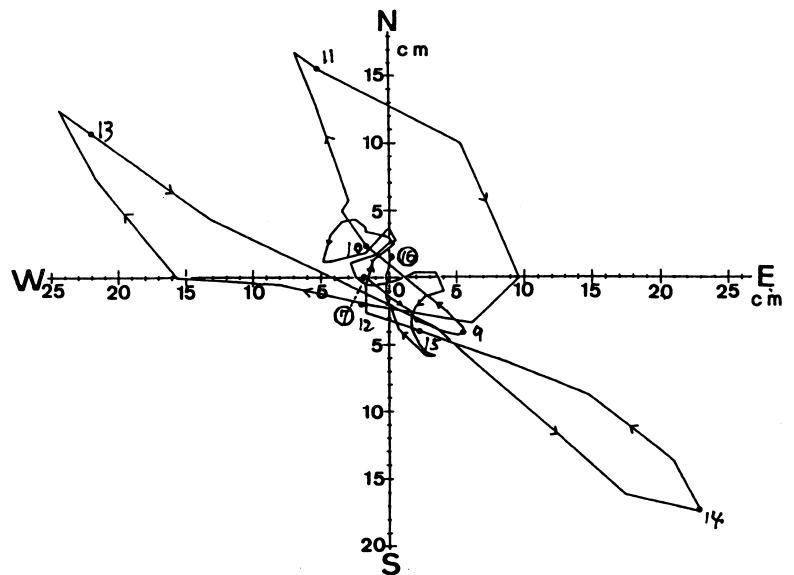
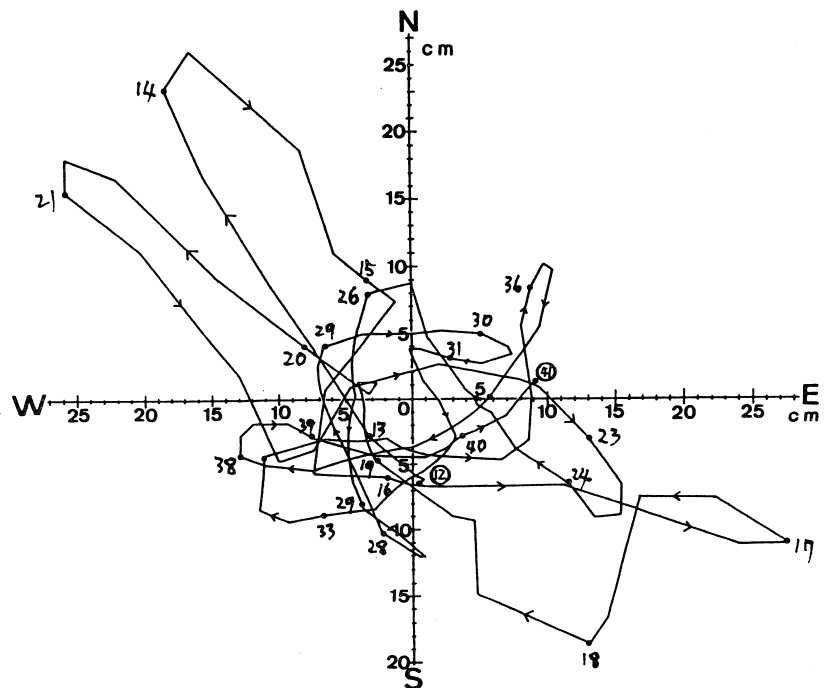


図4(b)[※] 神戸市本山における揺れの軌跡 (⑦秒から⑯秒まで)

図4(c)[※] 尼崎市における揺れの軌跡 (⑫秒から⑳秒まで)



※: 図4は、いずれも0.25秒間隔で読み取ってプロットしてあるが、曲線の途中の数字は、大きな揺れの部分にのみ1秒間隔で時間を記入した(単位: 秒)。長さのスケールは3地点とも同じである。

の本山の②観測点で見られた軌跡の方向に近い。

この③観測点は沖積層という最も新しく、柔らかい地層が厚く堆積しているために、揺れは複雑になり、しかも、かなり増幅されたものと思われる。

6. S波の最大の揺れの方向について

図4の(a), (b), (c)で、最大の揺れの方向を見ると、(a)が南北方向を示すが、他の二つはほぼ北西-南東方向に近い。このS波の最大の揺れの方向と断層の方向とはどんな関係があるのだろうか。

(1) 地震の起こり方

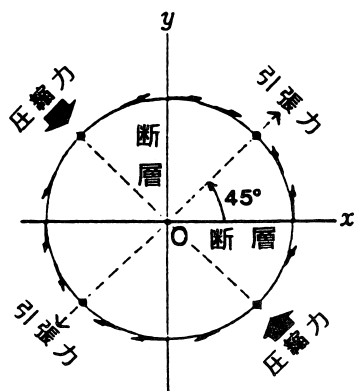
地震とは、断層におけるずれという破壊現象がもたらすものである。この破壊が最初に始まった点を震源と定義している。そして、震源で発生するのがP波とS波という振動である。

詳細は省略するが、いま無限弾性体中で水平方向の圧縮力の集中によって発生した地震の震源から離れた点におけるS波による変位は、図5のように原点Oを中心とした円の円周上に示した接線方向の矢印（向きと大きさを示す）のようになる。図5は変位の初動の向きを示しており、後はこれが交互に振動することになる。

この時、原点Oが震源になり、断層は理想的には図5のx軸及びy軸の位置に相当し、直交してできることになる。

S波の変位の最初の方向は、この断層方向（x軸）では直交して垂直に向き、震源を中心にして断層方向（x軸）から反時計回りに中心角度をとって円を描いたとき、この円の接線方向になる。この角度が45°では変位が0になる。90°では変位の方向は水平方向、すなわち、断層（x軸）と同じ方向になる。180°（-x軸）ではまた垂直になり、270°（-y軸）では90°の時と同じくx軸に平行になる。

図5 S波による変位³⁾（矢印のついた細い実線）。実線の矢先は向きを、長さは揺れの大きさを表す。



(2) 岩石の破壊実験でつくる断層

圧縮によって交差する断層ができる実験を示そう。

均質で等方な岩石の円柱（テストピース）を互いに直交する3本の主応力軸に沿って、異なる圧縮力（ $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ）で破壊させる室内実験では、完全に直交はしないが、互いに交差する破壊（断層）が確かめられている（図6）⁴⁾。

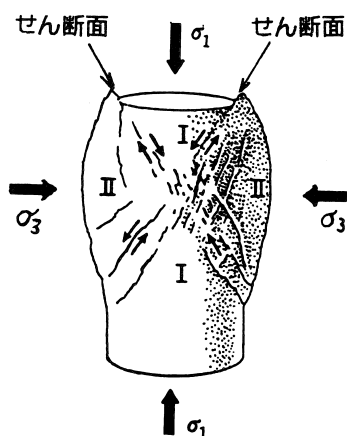


図6 岩石の3軸圧縮による破壊実験⁴⁾。
 σ_1 は最大圧縮応力。
 σ_2 は紙面に直交する方向に働いている（図には示していない）。

図6は、せん断破壊（割れ目に沿ってずれが起きる破壊）が発生した様子である。円柱を斜めに切るような方向に、互いに交差する2系列の割れ目ができる。これをせん断面（ずれを伴った割れ目の面）といい、理論的にも説明される破壊である。このせん断面に沿って押し込む側の上下のブロック（I）と開く側の左右のブロック（II）との間に相対的に反対方向の運動が起こっていることが分かる。このせん断面が断層面に相当し、これをはさむように互いに逆向きの矢印が記入され、これが断層のずれの向きを表している。圧縮によってできた互いに交差する割れ目（断層）のでき方に注目してほしい。

自然界では、地質構造が不均質なために一方向の断層ができるか、または、すでに存在している断層でも一方向の断層がずれることが多い。

(3) S波の最大の揺れの方向

いま、図5全体を反時計回りに約40°回転すると、x軸の方向が本震を通る断層の方向に向き、圧縮力の方向が東西方向になる。そこで、この本震を通る断層の方向とS波の最大の揺れの方向との関係を考えてみる（図7）。

今回の地震では、本震を通る南西-北東方向に顕著な地震断層として、淡路島の北西海岸にほぼ平行に野島断層が現れた。神戸側には地表にはっきり現れた地震断層は発見されていないが、主たる断層の方向は余震の分布が示すように野島断層の延長方向であろう。このように、地表には現れないが余震の分布などから地下に推定される断層を推定断層とい

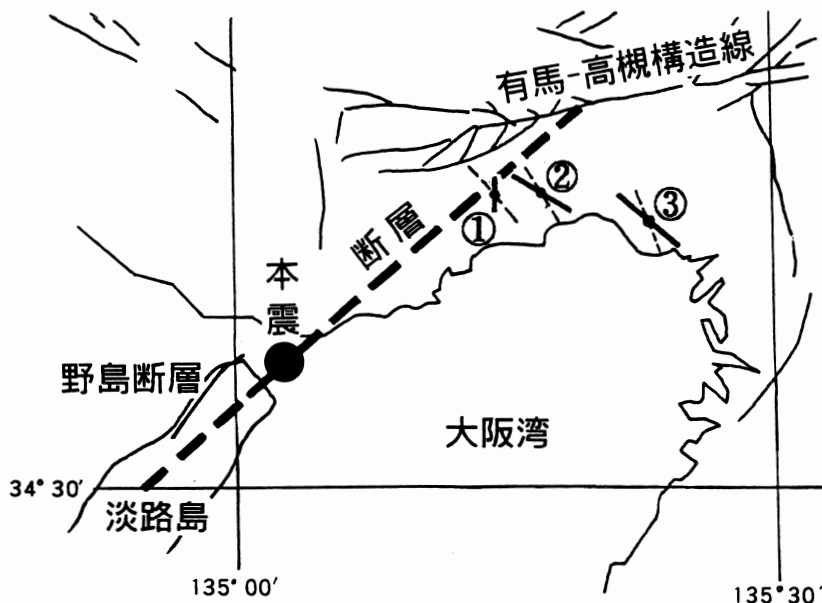


図7 今回の断層の方向とS波の揺れの方向（各観測点の太線の方向）。点線は計算上の方向。

っている。この推定断層の方向は南西－北東方向であり、S波の揺れの方向は北西－南東方向になっている。上述の3か所は、ほぼこの断層方向に沿って位置しているとして、S波の揺れの方向を見ると、①神戸大工では理論通りではないが、②本山と③尼崎の2地点の方はほぼ直角（理論）に近い角度の揺れとみなしたい。もちろん、地盤を構成するものは複雑であり、ファジーな要素が多く、揺れも方向も計算通りにはならないが、2地点では理論値に近い。

7. 活用について

地震の記録というと、P波とS波からなる波形を眺めて終わることが多く、実感がわいてこない。手間がかかって面倒ではあるが、上述のように揺れの軌跡を描くことにより、揺れの大きさ、形、方向などの特徴が具体的に分かり、場所は違っても過去に体験した揺れが現実のように思い出されるだろう。

ここで取り上げた3か所の揺れの軌跡（図4）は、

表2の読取値を使えば描けるので、大きい方眼紙に必ず実寸で表してみてほしい。データを増やしてパソコンに入力して描かせたり、この軌跡から地面の運動を考える材料にもなる。中学校及び高等学校の授業では、地震記録から入って揺れの軌跡まで実施できれば十分と思っているが、さらにこれを被害にまで結びつければ、理想的な地震教材になるだろう。

8. まとめ

S波による地面の水平面での揺れを描いてみた結果、尼崎市の観測点の最大の揺れは50cm以上にも達していることが分かった。内陸でこれほど大きな揺れを起こす地震はほとんどない。また、観測点が断層に近いために、2地点での

揺れの方向は、断層方向に直交に近いものになっていた。

この揺れの軌跡はいろいろな活用ができ、生徒の地震への関心を高める教材になるものと思っている。

謝辞：貴重な地震記録及び資料を使用させていただいた地震観測研究協議会の岩崎好規氏に心から感謝を申し上げます。

引用・参考文献

- 1) 岩崎好規：「阪神大震災」緊急合同報告会資料集，日本地質学会・他（1995）p.1～27
- 2) 京都大学防災研究所地震予知研究センター，1995
- 3) 宮村攝三編：地震・火山・岩石物性，共立出版（1968）p.39～46
- 4) 藤田和夫：日本の山地形成論，蒼樹書房（1983）p.103～109