

## 琵琶湖北部のS波の偏向異方性

平野憲雄

### 要旨

地震予知研究センターの定常地震観測網で琵琶北部の東西に位置している浅井観測点(AZJ)、美浜観測点(MHJ) (Fig. 1参照)の水平動のデータを使ってS波のスプリッティングを調べた。S波の初動方向は発震機構の発射角に依存するが、観測された方向は、AZJでは概ねEWの方向に集中度が大きく、MHJではNW-ESの方向にやや集中していることが判った。そして、その方向は主圧力軸と地殻歪場の縮みの方向と大きさに深い関係がある。

キーワード：S波偏向、スプリッティング、ローカス、クラック、主圧力軸、地殻歪

### 1. はじめに

等媒質中ではS波はスプリッティング(splitting)しない。そしてその初動の振動方向は地震の発震機構

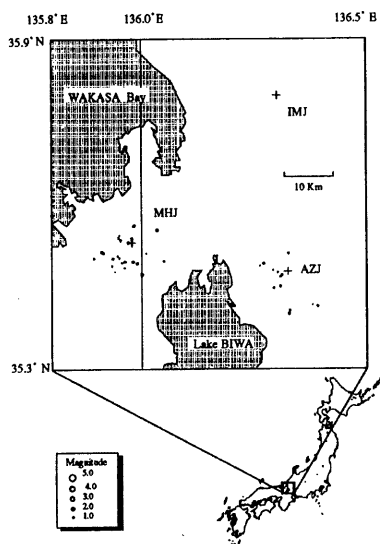


Fig. 1 Earthquakes used for shear-wave splitting analysis at stations AZJ and MHJ. (b) Enlarged seismicity maps around AZJ and MHJ.

によって決まる。ゆえに、S波の初動は水平動成分に同時に現われるはずである。一方、異方性媒質中ではS波は二つの波にスプリッティングする (Crampin, 1978)。琵琶湖周辺は東は柳ヶ瀬断層が南北に、西は花折断層南北に走行しており、それぞれの北への延長線は琵琶湖北部で交わる複雑な配置をしている。この地域は東西主圧力の応力場であり (Ando, 1976)、異方性が大きく現われる可能性がある場所でもある。

Fig. 2のAZJの波形例では、一番上に20秒間のUD成分の波形を、その下に3.5秒間の三成分波形を並べたものである。EW成分の方にNS成分より0.2秒程先行してS波が到着している。AZJでは、ほとんどのS波形

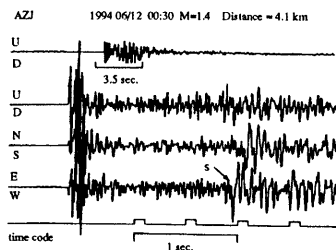


Fig. 2 An example of vertical component of waveform for the duration of 20 sec. record at AZJ (top), and expanded waveforms for the portion denoted with the bar. Below are vertical and two horizontal components of waveforms. Upper waveform is vertical component which period be enlarged seven times of with a total duration of 3.5 sec.

Table 1

Ray path and split shear wave parameters of local earthquakes recorded at AZJ and MHJ.

| y          | m  | d  | h  | m  | M   | AZM<br>(deg.) | INC<br>(deg.) | Do<br>(deg.) | df<br>(deg.) | Dc<br>(deg.) | As<br>(deg.) | ds<br>(deg.) | Dt<br>(m sec.) |
|------------|----|----|----|----|-----|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| <b>AZJ</b> |    |    |    |    |     |               |               |              |              |              |              |              |                |
| 93         | 5  | 01 | 18 | 36 | 1.6 | 249.1         | 8.5           | 274          | 24           | 175          | 207          | 0            | 80             |
| 93         | 11 | 01 | 23 | 26 | 1.5 | 260.4         | 5.4           | 287          | 15           | 166          | 8            | 0            | 115            |
| 94         | 2  | 16 | 0  | 22 | 1.9 | 291.8         | 28.4          | 91           | 8            | 230          | 40           | 0            | 80             |
| 94         | 5  | 28 | 5  | 29 | 1.5 | 226.4         | 14.8          | 105          | 0            | 189          | 245          | 6            | 50             |
| 94         | 6  | 12 | 0  | 30 | 1.4 | 273.3         | 9.4           | 257          | 14           | 182          | 213          | 7            | 115            |
| 94         | 7  | 18 | 14 | 23 | 1.6 | 358.8         | 22.1          | 240          | 35           | 153          | 352          | 15           | 65             |
| 94         | 8  | 01 | 20 | 12 | 1.1 | 284.8         | 29.8          | 115          | 17           | 247          | 50           | 14           | 65             |
| 94         | 8  | 05 | 12 | 11 | 1.2 | 143.1         | 23.9          | 107          | 18           | 70           | 228          | 57           | 85             |
| 94         | 9  | 23 | 16 | 29 | 1.5 | 178.0         | 21.8          | 141          | 30           | 134          | 198          | 37           | 50             |
| 94         | 11 | 11 | 22 | 06 | 2.1 | 179.7         | 24.2          | 111          | 22           | 107          | 29           | 0            | 25             |
| 94         | 11 | 15 | 6  | 52 | 1.7 | 138.3         | 29.1          | 271          | 8            | 43           | 356          | 36           | 45             |
| 94         | 12 | 21 | 23 | 58 | 1.7 | 214.6         | 12.2          | 58           | 6            | 182          | 130          | 9            | 55             |
| 95         | 1  | 17 | 18 | 12 | 0.8 | 282.0         | 11.9          | 299          | 27           | 37           | 152          | 36           | 45             |
| <b>MHJ</b> |    |    |    |    |     |               |               |              |              |              |              |              |                |
| 94         | 6  | 20 | 9  | 44 | 1.3 | 5.8           | 16.7          | 339          | 35           | 281          | 230          | 49           | 50             |
| 94         | 6  | 20 | 12 | 48 | 1.3 | 8.7           | 17.2          | 357          | 10           | 285          | 90           | 10           | 55             |
| 94         | 6  | 21 | 14 | 07 | 2.0 | 60.6          | 25.5          | 96           | 22           | 318          | 187          | 0            | 25             |
| 94         | 7  | 07 | 20 | 41 | 2.2 | 300.1         | 4.9           | 205          | 0            | 276          | 310          | 0            | 60             |
| 94         | 7  | 16 | 6  | 01 | 0.5 | 196.8         | 17.4          | 79           | 6            | 271          | 168          | 32           | 85             |
| 94         | 7  | 29 | 23 | 01 | 1.8 | 359.4         | 5.9           | 110          | 20           | 279          | 193          | 78           | 30             |
| 94         | 10 | 03 | 20 | 34 | 1.8 | 250.4         | 28.0          | 236          | 8            | 270          | *            | *            | *              |
| 96         | 5  | 19 | 2  | 3  | 0.5 | 125.2         | 16.6          | 325          | 4            | 280          | 230          | 10           | 50             |
| 96         | 6  | 16 | 11 | 38 | 1.6 | 179.1         | 18.2          | 60           | 20           | 274          | *            | *            | *              |
| 96         | 8  | 07 | 21 | 31 | 1.6 | 229.5         | 23.3          | 314          | 10           | 273          | *            | *            | *              |
| 96         | 10 | 31 | 9  | 45 | 1.7 | 252.7         | 24.6          | 285          | 8            | 276          | *            | *            | *              |
| 96         | 11 | 19 | 0  | 22 | 1.8 | 165.7         | 17.8          | 300          | 12           | 275          | 350          | 20           | 25             |
| 96         | 11 | 23 | 1  | 56 | 2.1 | 176.3         | 18.1          | 261          | 8            | 274          | *            | *            | *              |
| 97         | 1  | 11 | 9  | 52 | 1.2 | 205.7         | 22.4          | 223          | 10           | 274          | 70           | 5            | 25             |
| 97         | 2  | 8  | 21 | 19 | 1.4 | 219.5         | 25.4          | 292          | 10           | 273          | *            | *            | *              |
| 97         | 2  | 12 | 6  | 19 | 1.3 | 218.4         | 22.4          | 311          | 8            | 273          | 43           | 55           | 25             |
| 97         | 2  | 20 | 17 | 36 | 1.4 | 226.1         | 17.7          | 321          | 23           | 273          | *            | *            | *              |
| 97         | 4  | 08 | 6  | 30 | 1.5 | 120.5         | 26.5          | 283          | 4            | 285          | 170          | 20           | 15             |
| 97         | 4  | 18 | 10 | 04 | 1.9 | 284.1         | 9.9           | 299          | 4            | 277          | *            | *            | *              |
| 97         | 5  | 25 | 14 | 07 | 1.2 | 289.1         | 13.3          | 323          | 15           | 269          | *            | *            | *              |
| 97         | 5  | 25 | 15 | 43 | 1.1 | 299.5         | 13.3          | 322          | 13           | 269          | *            | *            | *              |
| 97         | 5  | 28 | 1  | 12 | 0.6 | 210.0         | 27.6          | 321          | 10           | 273          | *            | *            | *              |
| 97         | 6  | 30 | 5  | 39 | 1.8 | 152.1         | 26.2          | 32           | 14           | 269          | 135          | 10           | 30             |
| 97         | 7  | 02 | 5  | 00 | 1.4 | 248.8         | 25.3          | 298          | 7            | 272          | *            | *            | *              |
| 97         | 7  | 02 | 19 | 26 | 2.0 | 162.2         | 26.2          | 32           | 10           | 272          | 118          | 35           | 35             |
| 97         | 7  | 02 | 22 | 07 | 1.3 | 161.9         | 25.9          | 27           | 7            | 270          | 130          | 20           | 20             |
| 97         | 7  | 03 | 23 | 17 | 2.0 | 162.3         | 26.7          | 26           | 14           | 270          | 118          | 5            | 25             |

AZM and INC are the azimuth from station to epicenter measured clockwise from north and incidence angle to the surface. Do and As indicate the directions of polarization of faster and slower shear waves on the horizontal particle motion diagram, and the shear wave radiation after splitting. Ambiguity in manual reading of Do and As is represented as df and ds (in deg.), which is calculated from a feasible focal mechanism (Fig. 32). Dc is the direction of S-wave particle motion determined from P-wave nodal plane solution. Dt indicates the delay time between faster and slower shear waves, measured on the rotated seismograms. Symbol \* denotes the emergent arrival of the slower S wave.

がこのように時間差を持って到着をしている。

AZJで観測した全てのS波について、S波初動のローカスを描き、S波初動の振動方向とその振動方向が直角方向に変わるまでの時間を調べたFig. 3に震央の位置にその振動方向と、時間差を表示した。時間差は線分の長さに比例している。おもしろいことに、AZJから離れた震源であってもS波初動の方向は震央の位置に関係なく西北西-東南東にそろっていることが判る。このように震源の位置にかかわらずS波の振動方向が一方に揃うのは、震源の発生に原因を求めるのではなく、AZJの近傍の地下構造の異常を原因とするのが妥当である。そして、考えられる構造の異常として、同一方向に並んだクラックの存在があり、その方向がEW方向に並んでいるとすると、EW成分にS波の初動が先行して現われることになる (Crampin 1978, Kaneshima 1990)。

## 2. 解析

AZJ, MHJ, IMJの三つの観測点について、採用したデータは次の条件を満たすものである。

1) 観測点の近傍 (S-Pタイムが5秒以内、深さは24km以内) の地震。

2) 観測点への波形の入射角が30度以内。

3) S波の振幅が飽和していないもの、ただし、波形が飽和していてもS波の初動方向が明瞭に読み取れる場合は採用することにした。

期間は2ヶ月間であるが、MHJではS波の初動方向がばらつくので期間を延長した。

Fig. 3はAZJのS波のローカスを描いた例である。この地震ではS波の初動方向がN50Wの方向 (t1) にまず揺れ始め、115ミリ秒後に振動方向が直交方向に変わる (t2) までを描いている。この図はパソコンによって波形の一部を取り出して解釈し易い形に描いたものである。

S波がこのように二つの振動方向に分かれるモデルとしてFig. 4のクラックの存在 (S Kaneshima,

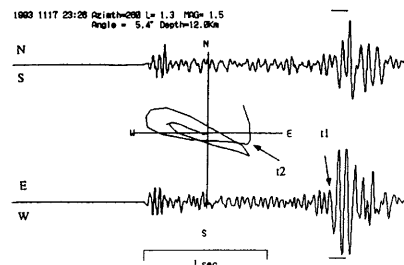


Fig. 3 An example of vertical component of waveform for the duration of 20 sec. record at AZJ (top), and expanded waveforms for the portion denoted with the bar. Below are vertical and two horizontal components of waveforms. Upper waveform is vertical component which period be enlarged seven times of with a total duration of 3.5 sec.

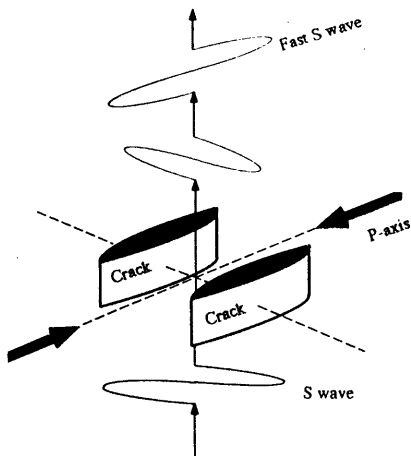


Fig. 4 Schematic diagrams showing the splitting of vertically incident shear-wave due to crack alignments.

M.Ando 1987) が出されている。S波がこのクラック群を通過する場合、この並びに平行な方向の成分はそのまま伝わり、直角方向に振動する成分は遅れて伝わる。これは、平行な方向の成分と直角方向に振動する成分との二つのS波に分離することであり、クラックのサイズや数の多さに比例して、早く到着したS波と遅れたS波の時間差が観測されるものとなる。しかし、Fig. 3のようにいつも直角方向に振動する成分が現われる訳ではない。P波の反射波や散乱波などが伝わってきて解りにくくしている場合が多いからである。従って、スプリットングを明らかにする方法は、多数の地震についてS波初動の振動方向の分布を調べることにした。

Fig. 5はMHJにおける15Hzのローパスフィルターを通したS波のローカスを描き、S波初動の方向に矢印を書き込んだ例である。描くソフトはSACを使用した。

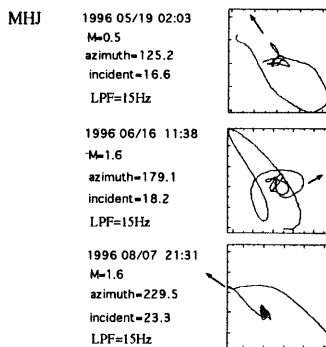


Fig. 5 An example of article motions of events at MHJ.

一方、直角方向に振動する成分が明らかになった地震について、最初に到着したS波と遅れてきたS波との立ち上がりの時間差に注目し、その時間差の空間的、時間的な変化をも調べてみた。

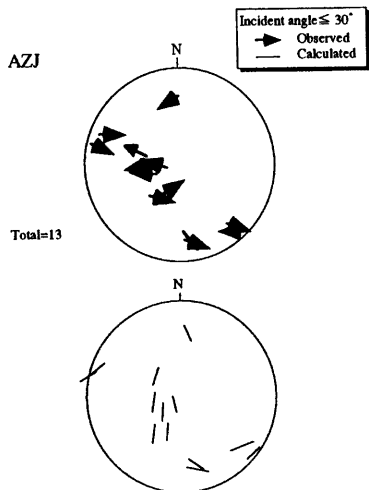


Fig. 6 Diagrams showing distribution of the faster shear wave polarization at AZJ. Arrows plotted with the equal-area projection of the upper hemisphere. Directions of short lines are polarization angles calculated from thick focal planes by each mechanism in Fig. 8. The outer solid circles represent an incident angle of  $30^\circ$ .

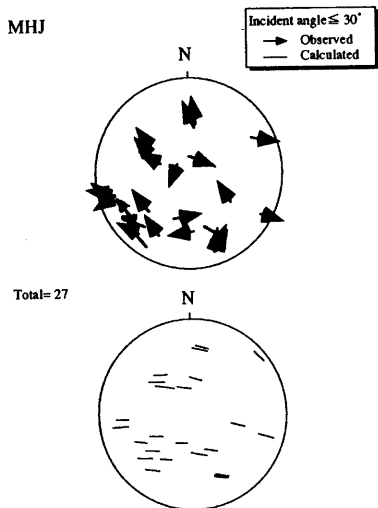


Fig. 7 Diagrams showing distribution of the faster shear wave polarization at MHJ.

### 3. 結果

#### 3.1 S波の初動方向分布

Fig. 6は、AZJのローカスの図から求めたS波の初動方向分布を上半球に等積投影で示したものである。

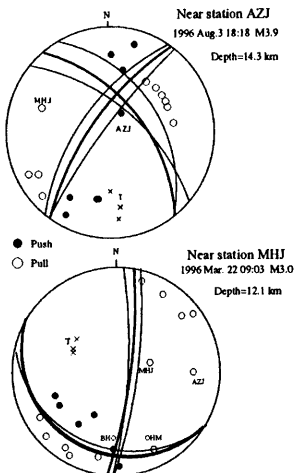


Fig.8 Focal mechanism plotted on the upper hemisphere. The upper is for an event near station AZJ, the bottom for an event near MHJ. Open and solid circles denote pull and push first P motions, respectively.

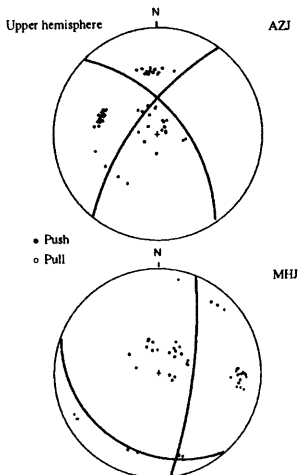


Fig. 9 Composite plot of P first-motions of about 20 events on the upper hemisphere of the equal-area projection for AZJ (upper) and MHJ (bottom). Nodal lines shown in the figure are consistent with those for events (Table 1) whose individual mechanism is ascertained.

外円の大きさが入射角30度の範囲である。また、下の図は発震機構 (Fig.8) から計算によって求められるS波の初動方向分布である。同様にMHJの場合をFig. 7に示す。矢印の記入位置は観測点からみた方位角と入射角から求めたものである。

Fig. 8は観測点に近い所で起きた大きめの地震、AZJではM3.9をMHJではM3.0からそれぞれノードラインをいくつか描き、太線は平均と思われる位置に描いたラインである。採用したデータは波形の飽

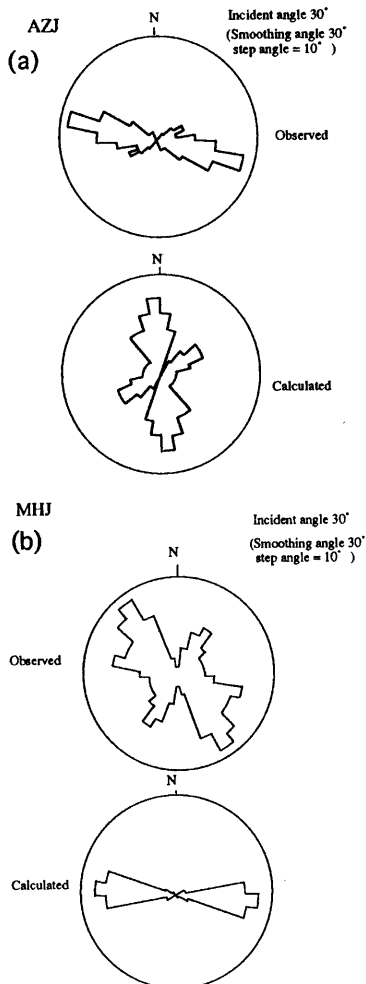


Fig. 10 Diagrams showing distribution of direction of the faster shear wave polarization at AZJ (a) and MHJ (b). These directions are smoothed over a 30° window, rotating each by 10°. Bottom shows directions of S-wave first motions calculated from the nodal plane solution (thick lines) in Fig. 8.

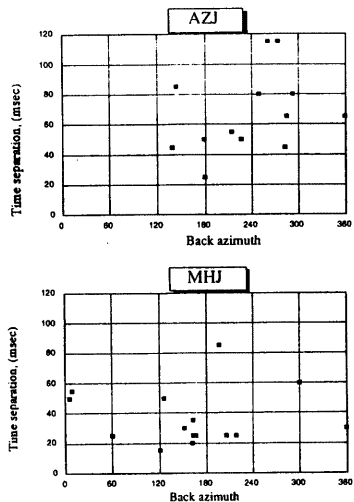


Fig. 11 Frequency of time separation between faster and slower S waves vs. azimuth.

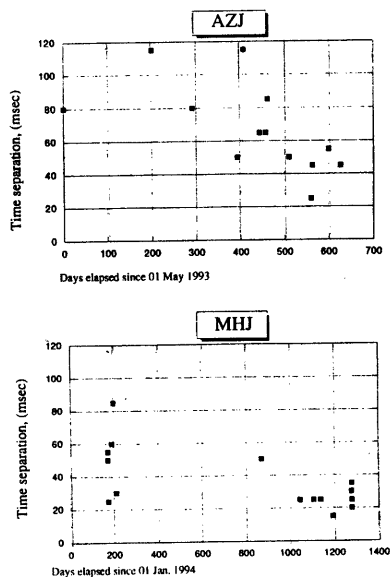


Fig. 12 Frequency of time separation between faster and slower S waves vs. elapsed time in days. The starting day for AZJ is 01 May 93 (upper), and for MHJ, 01 Jan 94 (lower).

和がない条件だから、大きな地震と異なるメカニズムを持つ可能性がある。そこで、Fig. 9では採用した地震のP波の押し引きを重ね合わせたものである。Fig. 8のノードラインを書き込んでみても同じようなメカニズムを持つとしても矛盾しない、この太線でのメカニズムからAZJ, MHJのそれぞれのS波の初動方向を計算された方向とした。

AZJは13個と少ないデータであるが、S波の初動方向は系統的な方向は西北西-東南東の方向が多い。一方、MHJは27個とデータを増やしたがAZJと比較するとばらつきは大きいものの北西-東南の方向が多い。この振動方向の平均の方向を見るために、Fig. 10に矢印の方向の平均をローズダイアグラムにして描いた。ただし、震央方向が30度の範囲にある地震の個数を平均した値を採用している。そしてその30度の範囲を10度毎にずらして移動平均した数を円の中心からの距離で示している。

### 3.2 time separation

time separationをS波の初動の到着時刻と遅れて到着した時刻との差と定義する。time separationと震央方向との関係をFig. 11に示す。特に震央方向との関係は見られない。また、time separationが時間と共にどのように変化するかをFig. 12に示す。時間を日数にして示しているが、AZJ, MHJとも強いて言えば減少傾向にあるように見える。クラックのサイズが時間と共に小さくなるか、あるいはクラックの数が減るとすれば理屈には合う。しかし、この短い期間のデータ量とばらつきでは確定的なことは言えない。

### 4. 考察

以上のようにS波の振動方向が震央方向に関係なく一定の方向に揃うのは、一様に並んだクラックによ

るものと証明できよう (Kaneshima, 1990)。これはスプリットिंगが原因であるすればこれらの図より、AZJでは西北西-東南東方向に、MHJでは北西-東南方向にクラックが並んでいることになる。

この地域の圧縮軸の方向をFig. 13に震応の位置に示した。P軸とクラックの方向の関係はS. Kaneshima, M. Ando (1987)らによって、最大主圧力軸方向に調和的であると結論づけられている。ただし、全てのクラックがP軸に揃うわけではない。1984年の長野県西部地震の余震観測で求めた非常に浅い地震 (S-P時間が0.5秒以内) のS波初動方向の報告 (平野 1988や Kaneshima, 1989) でP軸の方向との不一致を指摘している。今回の解析ではAZJではS波の初動方向分布と圧縮軸の方向が調和的であるが、MHJでは45度ほど方向が異なることが判った。

ここで視点を変えて、Fig. 14に示す国土地理院発表の過去100年間の地殻歪分布から考察を述べる。この図からAZJの周辺は東西方向の強い縮みが出ているがMHJの周辺では伸びと縮みの差が小さいのが判る。MHJでのS波の初動方向がAZJと比較してばらつくのは縮み方向が顕著でないがためと考えられる。従って、P軸の方向よりも地殻歪の縮みの方向に大きく影響を受け、縮みの大きいほどS波の初動方向がその方向に揃やすいと言える。

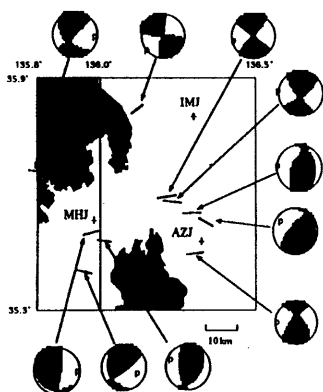


Fig. 13 Compressional axes determined from the focal mechanisms of crustal earthquakes shown in the figure (Hirano et al., 1994). Solid lines represent the P axis for each event and the letter p on the focal mechanisms show the location of P axis.

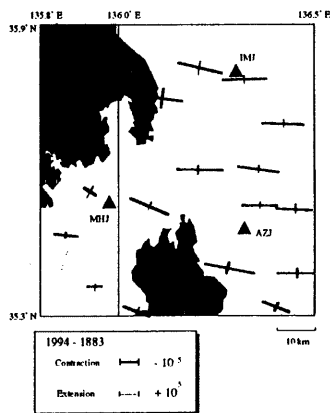


Fig. 14 Strain field for the last 100 years obtained from the precise triangulation and trilateration surveys by the Geographical Survey Institute (after Earthquake Research Committee, 1997).

### 謝辞

本論文の作成にあたっては安藤教授及びDr. Anshu Jinに多大なるご教示をいただいた。ここに記してお礼を申し上げます。

### 参考文献

- 平野憲雄,(1988), 震源直上における極浅発地震の観測  
(3) S波偏向異方性: 月間地球, 719- 722.

- Ando, M., The stress field of the Japan Islands in the last 0.5 million years. *Earth Mon., Symposium.* 7 541-546, 1976.
- Crampin, S., 1978. Seismic wave propagation through a cracked solid: polarizations as a possible dilatancy diagnostic. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 53: 467-496.
- Kaneshima, S. and Ando, M. (1987). Shear wave splitting above small earthquakes in the Kinki district of Japan. *Physics of the Earth and the Planetary Interiors*, 45, 45-581.
- Kaneshima S., Itoh, H., and Ando, M. (1989), Shear wave polarization anisotropy observed in a rift zone in Japan. *Tectonophysics*, 157, 281-300.
- Kaneshima S. (1990), Origin of Crustal Anisotropy: Shear Wave splitting Studies in Japan. *Journal of Geophysical Research*, 95 11, 121-11, 133.

## Shear Wave Polarization Anisotropy Observed in Noth Lake Biwa.

Norio HIRANO

### Synopsis

We chose 13 events recorded at station AZJ and 27 events at station MHJ to determine the S-wave polarization direction. The fast S-wave polarization is approximately in the WNW-ESE direction at station AZJ, and in the NW-ES direction at station MHJ. It is believed that the polarization anisotropy is mainly caused by S-wave splitting under each station. It can be concluded from the results from the analysis of S-wave splitting that the direction of the cracks are parallel to the direction of the principal axis of maximum compression of the studied area.

Keyword: S-wave; polarization direction; crack; splitting; stress; the principal axis of maximum compression