

断層岩の微細構造から見た野島断層の運動像

Microstructures of fault rocks in the Nojima fault and their implications for the tectonic history

林 愛明*
Aiming Lin*

Abstract: Microstructures of the foliated cataclastic rocks found along the Nojima fault in Awaji Island, were examined in field and under the microscope. The foliated textures similar to the S-C foliations usually observed in mylonitic rocks and the surface of Riedel shear (R1) can be observed clearly in the foliated cataclastic rocks. The S foliations are characterized by the collections of rigid clasts. All the clasts are angular to subangular in shape. These collections of clasts show a S-shaped asymmetric shape similar to pressure shadow observed in mylonite. The observational results of microstructures show that the Nojima fault moved with a right-lateral shear sense with some reverse component during the Quaternary which is in accord with that of the Nojima Earthquake Fault.

The ^{14}C dating age of one carbon sample (roots of grass) collected from the fault gouge associated with the Nojima fault is 8250 ± 150 y. B. P. showing that after the carbon material formed, the Nojima fault was activated again, and that at least one seismic faulting event occurred later than 8250 ± 150 y. B. P.

The observational results demonstrate that the S-C foliations and R1 shear surface observed in the foliated cataclastic rocks associated with the Nojima fault are highly reliable indicators for the sense of shear.

Key words: *Nojima fault, fault rocks, microstructure, foliation.*

はじめに

変位地形・トレンチ調査により活断層の活動履歴を調べる方法がよく知られている。一方、断層剪断帯で形成されたいわゆる断層岩の解析によって、断層の浅部から深部に至る変形環境

の変化を復元する方法が最近の十数年で重要視されるようになってきた。

断層岩は特定の環境で形成されたものであり、その組織構造は直接的にその地域の地質構造環境を反映しているので、断層岩の研究を通じて、断層運動の力学的なメカニズム、変形環

1995年11月17日受付。1996年2月26日受理。

*建設技術研究所，現在，神戸大学理学部

CTI Engineering Co. Ltd., Present address: Faculty of Science, Kobe University, Kobe 657, Japan

境およびその地域の構造発達史を解明することができると期待される。

1995年兵庫県南部地震では、淡路島北西部に既存の野島断層・水越撓曲などの活構造沿いに総延長18kmの地表地震断層が出現した(林ほか, 1995a, b, c, d; Lin & Uda, 1995a; 1996, 林・宇田, 1995)。野島地震断層の活動履歴を明らかにするためにトレンチ調査がすでに実施されている(鈴木ほか, 1995)。一方, 筆者は地表地震断層調査に伴って, 断層破砕帯, 断層ガウジの変形構造などの調査も行った(Lin & Uda, 1995b)。小論では, 野島断層の断層破砕帯の微細構造の解析結果および断層ガウジの年代測定結果を報告する。野島地震断層の詳細については, 林ほか(1995a, b, c, d), Lin & Uda (1995a; 1996)および林・宇田(1995, 1996)を参照されたい。

地質概要

調査地域は, 兵庫県淡路島の北西部に位置している(Fig. 1)。この地域を含む淡路島の北部には基盤岩の白亜系花崗岩類とそれを覆う第三紀層・第四紀層が分布している。第三紀層の最下位には, 神戸層群に属する中新統の岩屋累層が分布している。岩屋累層は海成の砂岩・頁岩・礫岩から成り, 北部の脊梁山地上や断層沿いに見られる。岩屋累層には薄い亜炭層を何枚も挟むことが多く, 局所的に珪化木が見られることもある。この岩屋累層と花崗岩類を鮮新世から前期更新世の大阪層群に属する地層が不整合に覆っている(Fig. 1)。今回調査した淡路島北部の大阪層群は, 下位の富島累層と上位の仮屋累層とに区分されている(水野, 1993)。富島累層は, 全体として礫層優勢なシルト・粘土層, 砂層, 礫層の互層から成り, 特に上半部では礫層が優勢である。また, その層厚は200~350mである。仮屋累層は, この富島累層に整合に重なり, 主にシルト・粘土層と砂層の互層から成る。仮屋累層上部は砂や礫が優勢となっており, その層厚は200~300m程度である。富島累層, 仮屋累層ともその含まれている礫は, 中~大礫

サイズの円礫から亜円~亜角礫である。さらに平野部では, 後期更新世以降の段丘堆積物や沖積層などが堆積している。これらは, 大阪層群に比べ固結度が低い。

淡路島北部には, 今回の地震に伴い淡路島北西部の北東-南西方向の海岸沿いに総延長約18kmに及ぶ野島地震断層(林ほか, 1995a, b, c), 松帆海岸線沿いに北西-南東走向を持つ松帆地震断層および東側海岸線沿いに楠本地震断層が生じた(Fig. 1)(林・宇田, 1995, Lin & Uda, 1996)。

断層岩の野外産状

本研究の調査により, 野島断層沿いに大阪層群, 神戸層群と花崗岩類の境界部に10数ヵ所で断層露頭を見つけた。その内, 露出のよい断層破砕帯の内部構造が観察できた露頭が4ヵ所あり(Fig. 1, Locs. 1~4), その一部(Locs. 1, 4)がFig. 2とFig. 3に示されている。野島断層沿いの断層破砕帯は, 全体的には幅数10cmから数mで, カタクレーサイト(cataclasis)・断層角礫(breccia)・断層ガウジ(gouge)から構成されている。次に断層破砕帯の内部構造が最もよく観察されるLoc. 1およびLoc. 4の両地点の露頭を記載する。

Loc. 1(平林地点)の露頭では, 断層はほぼ大阪層群と花崗岩との境界に生じている。花崗岩質カタクレーサイトは断層沿いに所々に露出しており, 明瞭な断層剪断面(主断層面, 今回の地震断層の断層面でもある)近傍に幅数10cmから数mで分布する。断層近傍の10数cmから数10cmの幅の部分には, フォリエーション(foliation)構造の発達したカタクレーサイトが観察される(Fig. 2; 詳細は後述)。断層角礫は未固結で主断層面の近傍の局部に幅数cmから10数cmで連続的に分布している。主断層面沿いに幅数mmから10数mmの断層ガウジが分布しており, 断層面と平行な面構造が肉眼でも観察される。この地点の断層面上には厚さ数mmの黒褐色または黒灰色の断層ガウジが発達しているため, 地表地震断層活動に伴う条線とス

断層岩の微細構造から見た野島断層の運動像

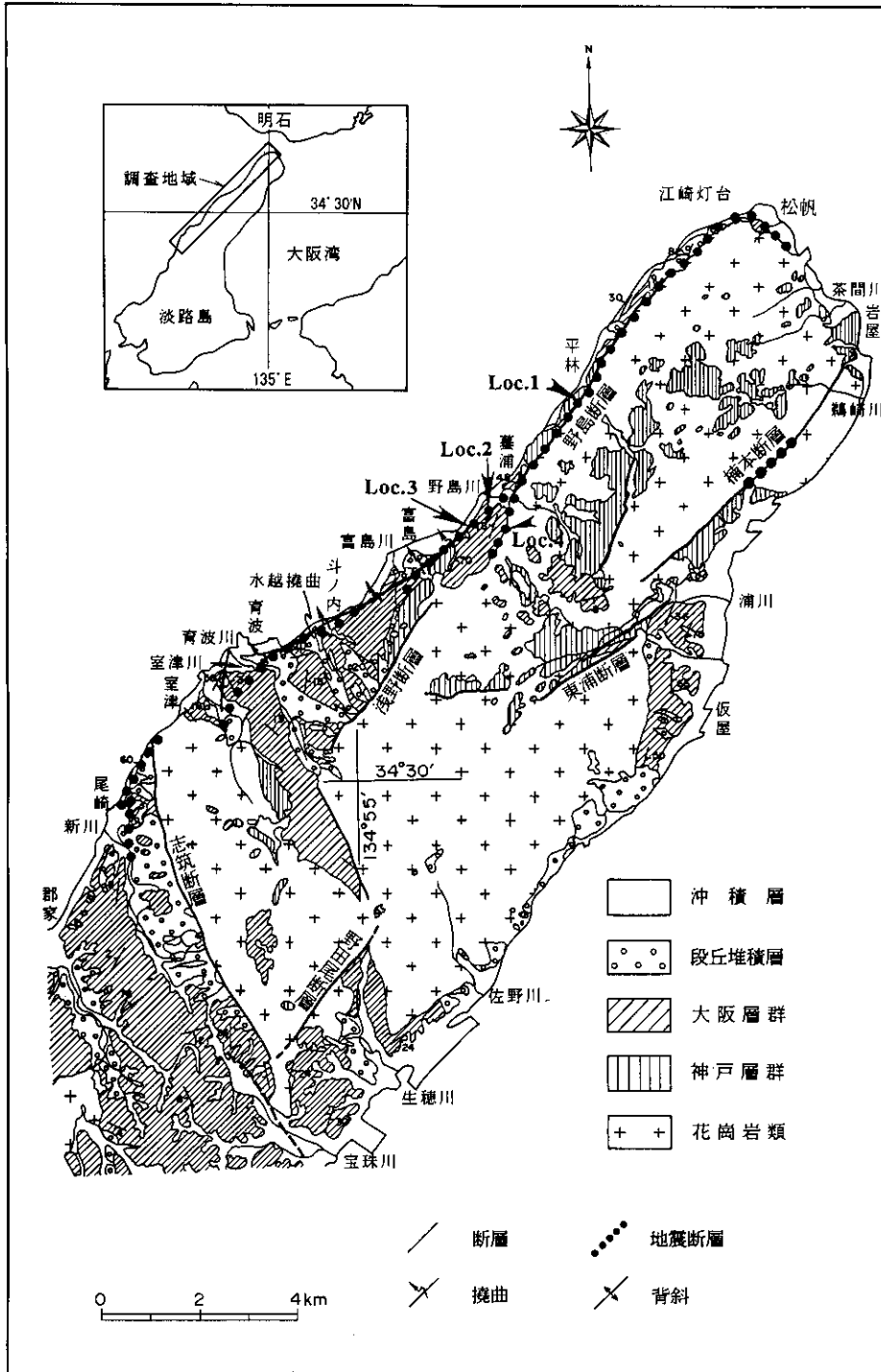


Fig.1 Geological map of the northern Awaji Island (modified from Mizuno et al., 1990; Lin et al., 1995a). Locs. 1-4: prominent outcrops of foliated cataclastic rocks. The earthquake fault occurred accompanying the 1995 Southern Hyogo Prefecture Earthquake (M=7.2).

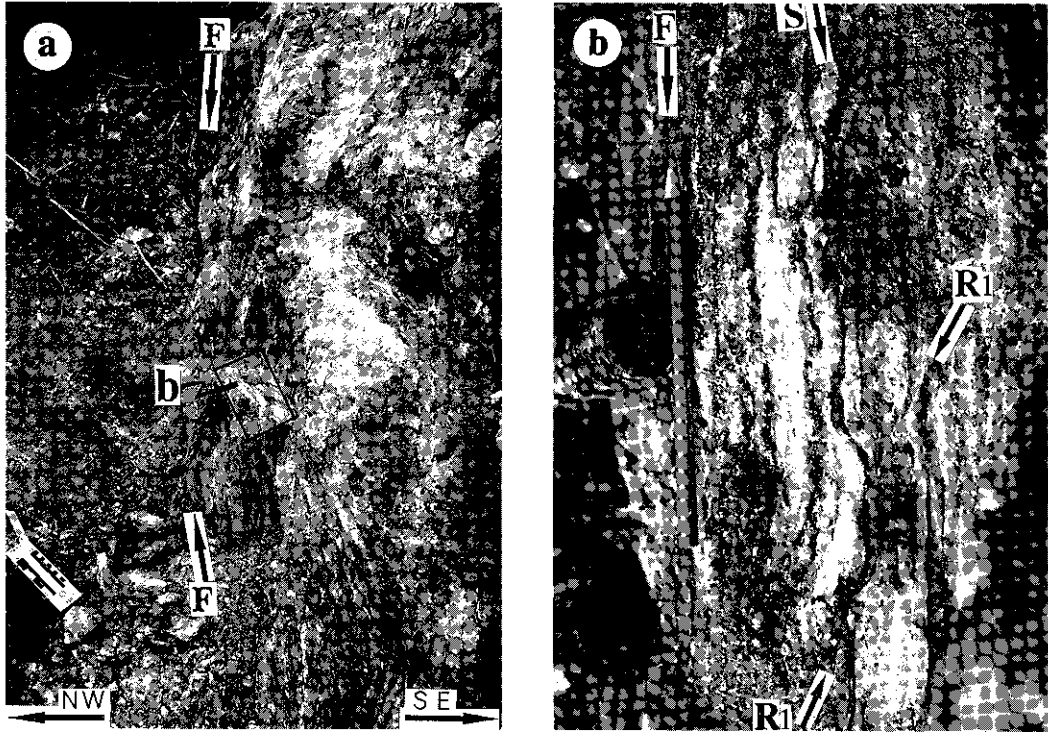


Fig.2 Photographs showing the Hirabayashi fault outcrop (Loc. 1). (a): fault fractured zone showing foliation structures. (b): local enlargement of photo (a) (XZ section). F: main fault plane, S: foliation (S), R1: Riedel Shear.

トップがこの薄い断層ガウジに刻まれて、容易に確認することができる。Loc. 1の断層面で観察された条線はその傾斜が変化し、ゆるく下に凸の曲線を描いているものもある(林ほか, 1995a, b)。地表地震断層により生じた断層条線はある程度のばらつきがあるが、全体的にはNE20°-35°プランジに集中している(林ほか, 1995a)。

Loc. 4(折ヶ谷池地点)の露頭では、折ヶ谷池の右岸堤体側で地表地震断層が花崗岩と神戸層群との境界部にあたるほぼ既存の断層剪断帯沿いに、境界部の神戸層群中に生じている(Fig. 3a)。明瞭な地表地震断層沿いに露出している断層破碎帯の幅は数10cmから2mで、その中、肉眼で観察できるフォリエーション構造を持つ剪断帯の幅は約20cm~100cmである。Fig. 3bとcに示すように、神戸層群の黑色亜

炭層(一部木片)が断層剪断帯に取りこまれて変形を受けており、断層面方向に引きずられて、非対称のレンズ状を呈している。神戸層群の砂岩・亜炭層は破碎され、径数mmから数10cmの楕円状または偏平状破片となって断層破碎帯沿いに平行またはやや斜交配列している(Fig. 3c)。水平断面では、明瞭なレンズ状非対称構造、不連続面構造が観察される(Fig. 3d)。断層面に沿って、幅数mmの灰黄色~灰色~黒灰色の断層ガウジが数枚発達している。明瞭な地表地震断層の断層面から花崗岩と神戸層群の境界までの数mの部分の神戸層群には、今回の地震断層運動に伴って生じた小断層、または割れ目が多く観察される。地震断層面上に局部的には、今回の地震断層による断層条線が認められるが、大部分の条線については古いものか今回の地震断層によるものかの判断ができない。

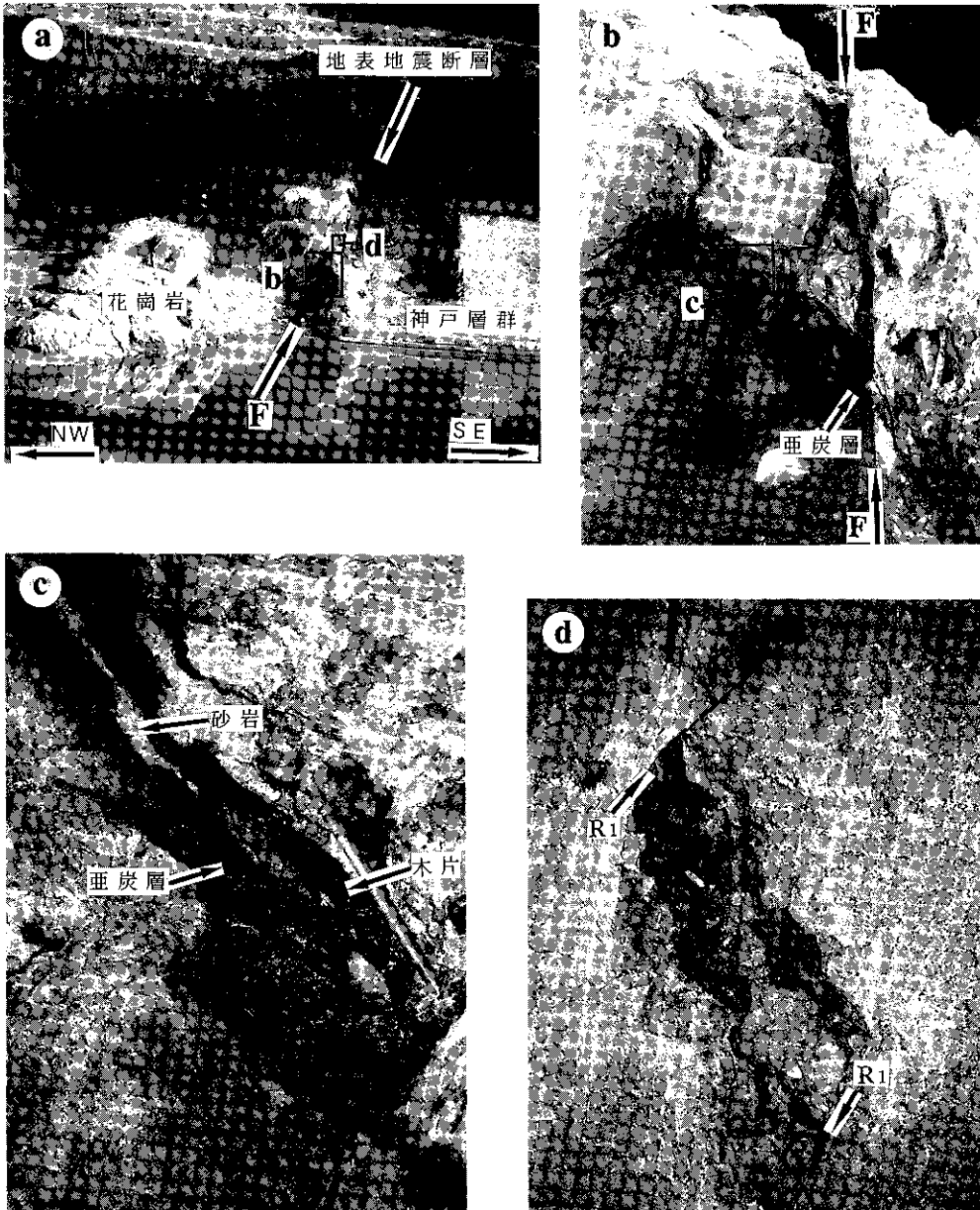


Fig.3 Photographs showing the Origaya-ike fault outcrop (Loc. 4). (a): all views of the fault fractured zone along the boundary between the granitic rock (left side on the photo) and the Kobe Group (right side on the photo). (b): earthquake surface rupture (arrows point the position) formed along the geological fault where the Kobe Group was deformed cataclastically to show foliation textures. (c): clasts of the Kobe Group arranged subparallel to the fault plane. (d): foliation textures observed on the horizontal section, showing a right-lateral shear sense. F: main fault plane, S: foliation (S), R1: Riedel Shear.

微細組織の観察

断層岩の微細組織構造を観察するため、断層剪断帯の露頭(Locs. 1と4)および定方位サンプル(Locs. 2, 3)について、3方向の断面(Fig. 4のXZ, XY, YZ面)の観察を行った。Xは断層剪断方向、Zは断層剪断面と直交する方向、Yは断層剪断方向と直交する剪断面の方向である。XZ面は、線構造の伸び方向と平行、面構造と直交する面で、微細構造の観察にはもっとも重要な断面である。XZ断面では、断層剪断帯の内部構造(破断面を含む微小構造、非対称構造など)がもっともよく観察される。Loc. 1およびLoc. 4の断層剪断帯のXZ断面は約20°NEに傾斜しており、断層面上に観察された地震断層による断層条線とはほぼ平行している。この2ヵ所のXZ断面で観察される構造をFig. 5に示している。Loc. 2およびLoc. 3の微細構造は野外でよく観察できないので、採取したサンプルを用いて微細構造を観察した。Fig. 6およびFig. 7は、Loc. 2およびLoc. 3のサンプルのXZ面上の微細構造を示している。これらの露頭およびサンプルのXZ断面からFig. 8に示すような剪断帯の主要な面構造のうち、フォリエーション(S)、C面、R1面とT面が観察さ

れた。

一般的には、延性剪断帯に発達するフォリエーションはSフォリエーション(一種の片理chistosity)とも呼ばれている(Berthe et al., 1979)。C面は剪断帯とはほぼ平行なすべり面であり、S面と共存する場合が多いので、S面とともにS-C構造と呼ばれている(Berthe et al., 1979)。S-C構造が延性剪断帯に発達する組織であるが、それに類似した組織が断層ガウジヤカクレーサイトにも認められるので、便宜的にこの名称を用いた。R1はリーデル剪断面の一種で、剪断帯とおなじすべりのセンスを示すすべり面である。T面は引っ張り性の割れ目であり、連続性のよくない面である。以下に、本研究で観察された面構造を記載する。

フォリエーション(S)構造：断層剪断帯でよく観察されるフォリエーション(S)は、マイロナイトでよく観察されるS-C構造のS面に似ている。フォリエーション(S)はほとんど母岩の破片の集まりで、プレチャーシャドーのようなS字形の非対称構造を呈している(Figs. 2b, 5, 6)。これらの破片のほとんどは、角礫状、一部歪凹礫状を示しており、脆性的な破壊により母岩の破砕からまぬがれたポーフイロクラスト(porphyroclast)である。このような

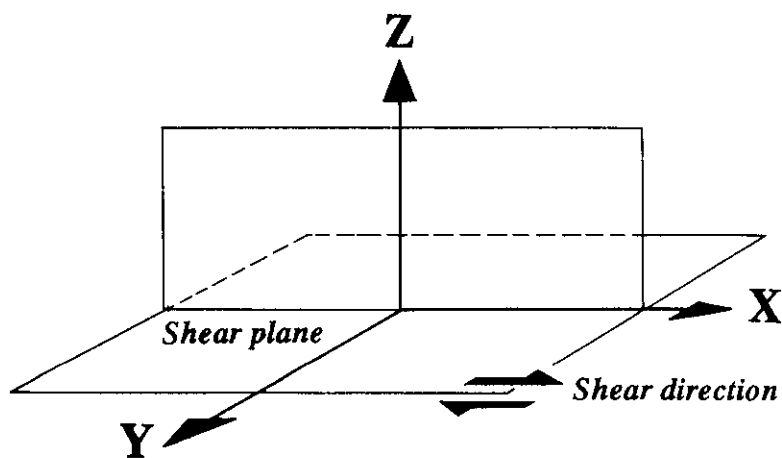


Fig. 4 Conceptions used to describe local shear zone attitude by three perpendicular directions. X: shear direction Y: pole perpendicular to X and Z, Z: pole to a shear plane.

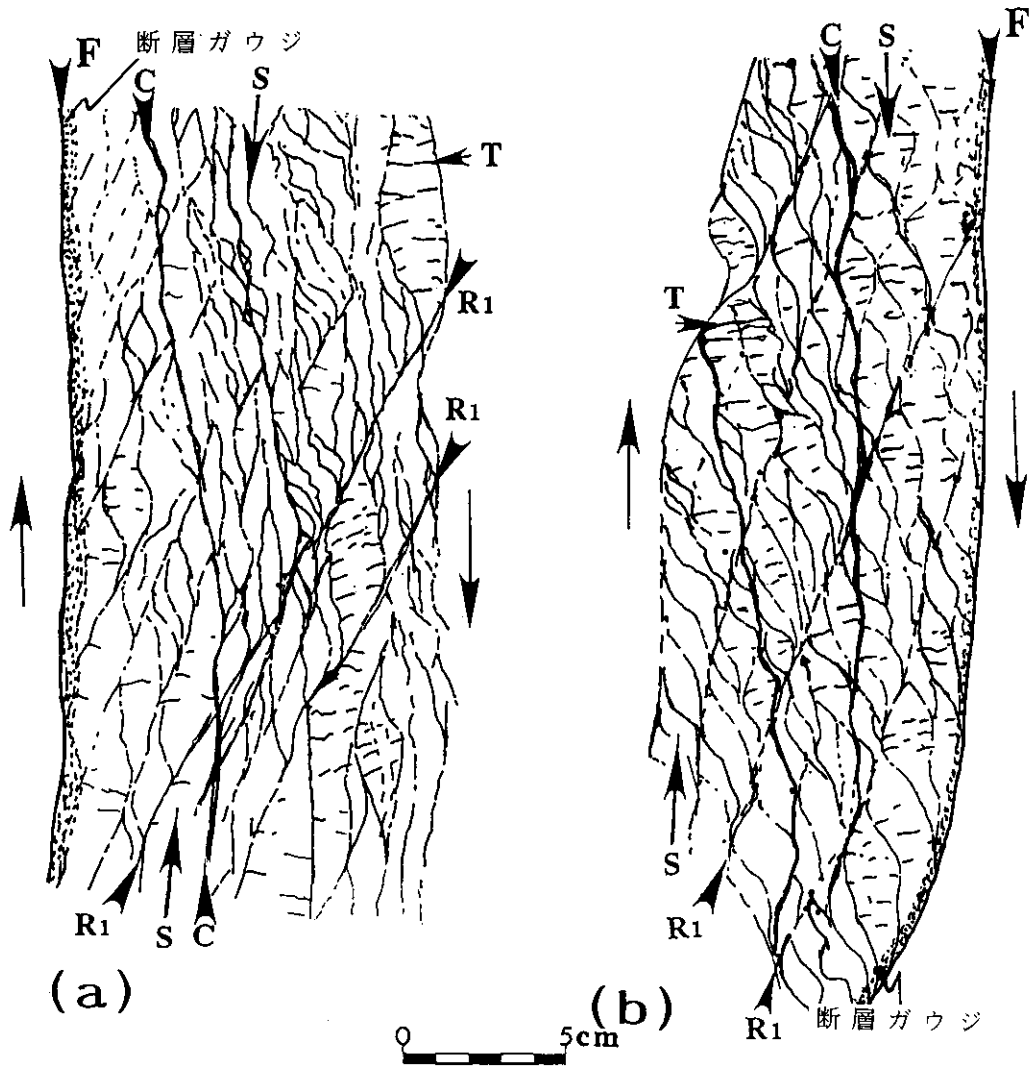


Fig.5 Sketches of foliated fault rocks found at the Hirabayashi (Loc. 1) (a) and Ori gaya-ike (Loc. 4) (b) locations. These sketches were drawn with trace papers put on the XZ section at outcrops. The long arrows show the shear sense. R1: Riedel shear, S: foliation (S), C: C-type shear plane, F: main fault plane, T: tension crack.

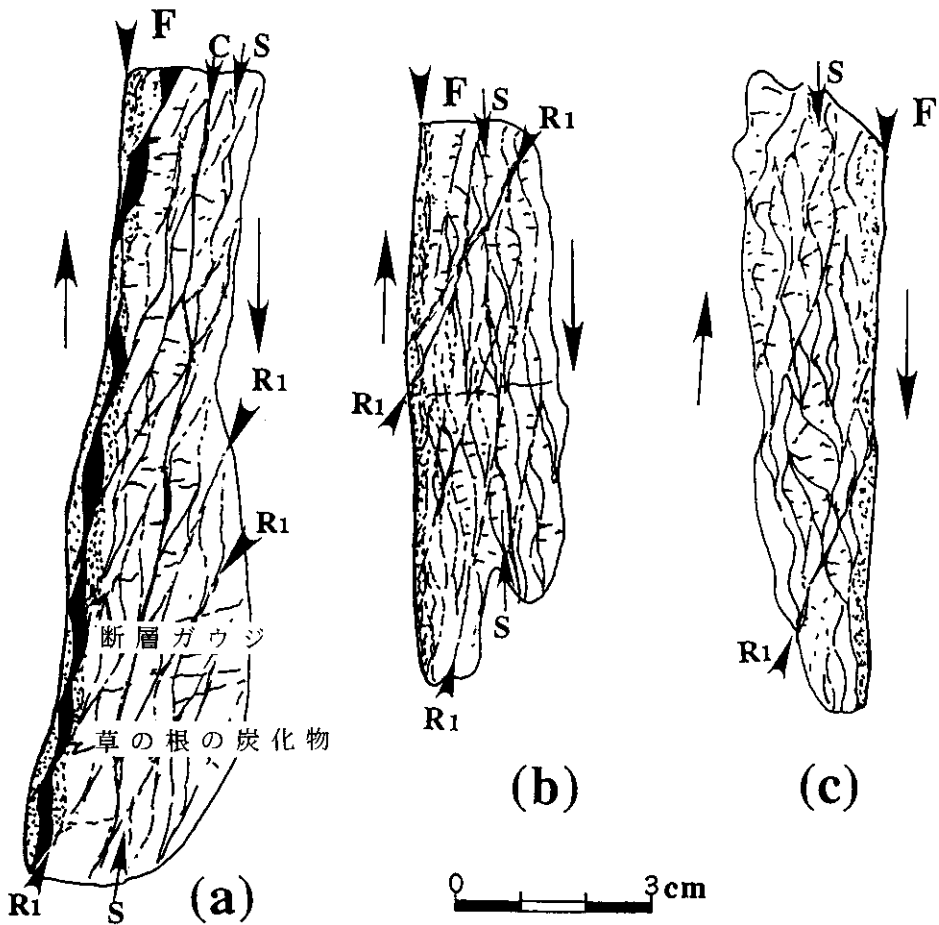


Fig.6 Sketches (XZ section) of hand samples collected from Loc. 2 (a) and Loc. 3 (b). The long arrows indicate the shear sense. The black part is the carbon material originated from roots of grass, showing $8265 \pm 150y. B. P. ^{14}C$ dating age. R1: Riedel shear, S: foliation(S), C: shear plane, F: main fault plane.

破片の集まりの中央部はより大きい破片から構成されており、両端部は非常に細粒の破砕物または粘土鉱物から構成されている。

C面：C面は上記のフォリエーション(S)構造をなすポーフィロクラストの周囲に細粒の基質、または粘土、細粒結晶からなる幅数mmの縞状構造であり、Figs. 3, 5, 6に示すように主断層剪断面と平行またはやや斜交している。この面は力学的には弱面になっており、面沿いに非常に剝離しやすい。また、C面上には薄い

粘土層および条線も観察される。この面に沿って偏平状の破片が配列しているところも見られる。

R₁面：R₁面は上記のフォリエーション(S)構造のS字状の非対称構造の尾を切るような不連続面で(Figs. 2b, 5, 6)、主断層剪断面と約20°-30°の角度で斜交している。この面は、XZ断面では直線状、シャープな不連続面として、非常に観察しやすい面構造の1つである。R₁面はフォリエーション(S)構造およびC面構造とと

断層岩の微細構造から見た野島断層の運動像

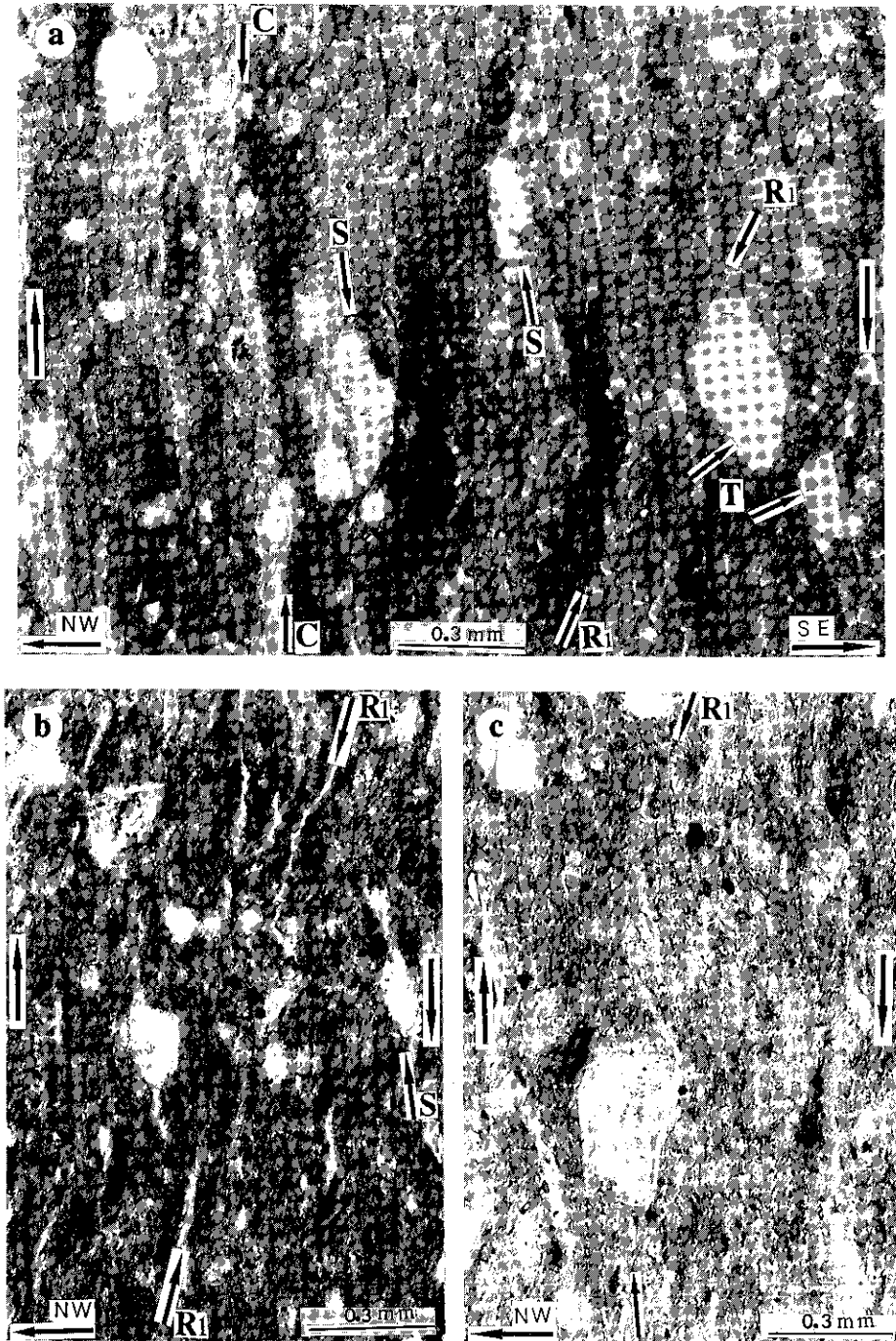


Fig.7 Photomicrographs showing the foliated textures (XZ section) of the fault gouge taken from Loc. 2 (a) and Loc. 3 (b, c). Large arrows show the shear sense. R1: Riedel Shear, S: foliation(S), C: shear plane, T: tension crack.

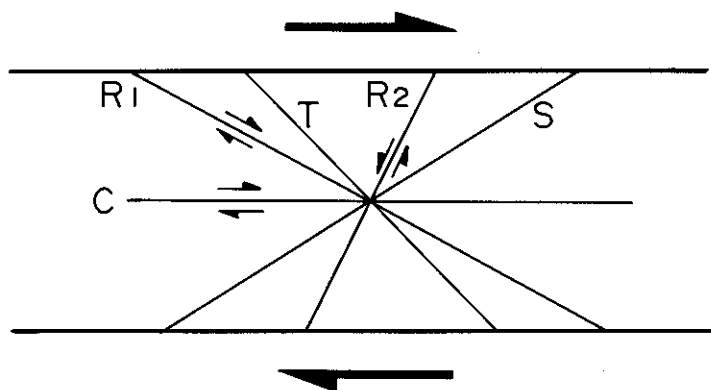


Fig.8 Schematic illustration of main structures in shear zone. The sense of shear is the same on R1 and on the fault zone, generally, as revealed by the deflection of P foliation and the shearing of included clasts.

もに野島断層の右横ずれの剪断センスを示している(Fig. 5).

T面: Fig. 5に示すようにT面は非対称構造をなすポーフィロクラストの中に発達した不連続面であり, C面と $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ の角度で斜交している. T面はC面に挟まれた範囲内にしか連続せず, 連続性のもっともよくない面構造である. この面構造沿いに発達した亀裂はよく細粒の破砕物または粘土鉱物により充填され, 引張りの亀裂の性質を呈している.

露頭およびサンプルスケールで観察された上述の面構造は顕微鏡下でも観察される(Fig. 7). 顕微鏡下の観察では, フォリエーション(S)は非対称構造をなす母岩の破片と破片の集まりおよび細粒の破砕物と粘土鉱物の形態定方向配列からなる縞模様として観察される(Fig. 7). C面は層状の断層ガウジの境界をなしており, 色の違いや破片の定方向配列の面として観察されやすい(Fig. 7a). R1面は肉眼で観察したように非対称の破片と破片の集まりの尾を切るような不連続面として観察される. T面は顕微鏡下ではあまり明瞭ではないが, 破片および破片の集まりの内部の割れ目として認められる(Fig. 7a).

^{14}C 年代測定

野島断層の剪断帯にとりこまれた木片および草の根のような年代測定できる炭素物質が, 露頭 Loc. 2および Loc. 4で採取された. Loc. 2で採取されたサンプル(No.1)は, 断層ガウジ中の草の根であり, 断層面沿いに断層ガウジとともに変形され, 非対称構造を呈するレンズ状の炭化層になっている(Fig. 6a). 草の根は炭化され, 黒褐色になっているが, 草の根の形が観察される. Loc. 4で採取されたサンプル(No.2)は神戸層群に生じた断層剪断帯中のものであり, 典型的な剪断構造を示す(Fig. 3). 木片は亜炭層に含まれており, ほとんど石炭化され, 黒褐色を呈する. このような構造は, この2つの炭素物質のサンプルとも断層剪断作用を受けてることを示している. この2つのサンプルの年代測定結果は, Table. 1に示されている.

考 察

断層岩のフォリエーションの組織構造は, マイロナイト形成のような塑性変形の環境で形成されることがよく知られている. 最近10数年,

断層岩の微細構造から見た野島断層の運動像

Table 1 ^{14}C dating ages of carbon samples collected from Loc. 2 and Loc. 4.

Code No.	Sample No.	^{14}C dating age	Carbon material
Gak-18647	No. 1(Loc. 2)	8250 \pm 150y. B.P.	Roots of grass
Gak-18761	No. 2(Loc. 4)	>35 60y.	Branches of plant

マイロナイトによく見られるようなフォリエーション構造は、カタクレーサイト、断層ガウジを形成するような地殻浅部の脆性変形の環境でも形成されることが自然の断層岩および実験の研究により明らかになっている(例えば、Logan et al., 1981; Chester et al., 1985; Rutter et al., 1986; 林ほか, 1994). このようなフォリエーション構造は、断層剪断作用に伴って破碎された母岩の破片が不連続面のすべりにより引きずられて形成されたものである(Chester et al., 1985). これらの破片は、断層剪断運動に対応して回転し、その周辺のフォリエーション構造が非対称になる。その形状から剪断のセンスが推定される。本研究では、Chester et al.(1985)およびRutter et al.(1986)に記載されたような面構造と幾何学相似性を持つ面構造から野島断層の運動方向が推定される。既に述べたように野島断層破碎帯についても、フォリエーション(S)構造、C面およびR₁面構造が露頭のスケールでも、顕微鏡のスケールでもよく観察される。これらの組織構造が野島断層の右横ずれの剪断センスを示している。XZ断面は水平面と約20°Nの傾斜角度をなしていることから、断層南東側が右横ずれ変位量の約1/3の量で隆起したと推定される。これは野島地震断層沿いに観察された水平変位量と垂直変位量の量比值とはほぼ同じである。すなわち、この微細構造から推定された断層の剪断センスは野島地震断層の断層面上の条線と断層ステップ、および地震断層の地表変位地形から示された断層の変位センス(林ほか, 1995a)とはほぼ一致している。野島断層周辺の地層の変位および変形の状況から、野島断層は鮮新世～更新世の大阪層群堆積後に活動が始まったと推定されている(水野ほか, 1990;

水野, 1993)。野島断層沿いの基盤をなす花崗岩・神戸層群・大阪層群の破碎帯のカタクレーサイトおよび断層ガウジ内に観察された微細構造は、ほぼ同じ右横ずれ、南東側隆起の運動方向を示している。また、更新世～完新世の段丘・扇状地の右横ずれ、南東側隆起の変位も報告されている(水野ほか, 1990)。したがって、断層岩の微細組織構造および変位地形から、野島断層は更新世以降の活動開始から現在まで、同一応力場において、右横ずれ、南東側隆起の変位センスで繰り返し活動していると考えられる。

断層破碎帯に取りこまれている草の根(Loc. 2)と木片(Loc. 4)の ^{14}C 年代測定結果は、それぞれ8250 \pm 150y. B. P.および>35,660y. B. P.の年代を示している。木片サンプルを採取したLoc. 4の露頭周辺の神戸層群の地層には、多くの木片が含まれているので、変形を受けたこの木片はもともと神戸層群堆積時にとりこまれたものであると推定される。

一方、草の根の炭化物は断層ガウジの一部であり主断層面沿いに厚さ数mmのレンズ状非対称組織構造を呈していることから、これは断層破碎帯中で成長した草の根の一部で、断層運動により断層ガウジとともに剪断作用を受け、変形していると考えられる。したがって、草の根の ^{14}C 年代値の8250 \pm 150y. B. P.以降、野島断層は少なくとも一回の断層剪断運動があったと考えられる。このサンプルの採取地点近くの場所でのトレンチ調査の結果、最近2000年の間で、野島断層は数回活動したと報告されている(鈴木ほか, 1995)。この断層ガウジの ^{14}C 年代は、トレンチ調査結果とともに最近の地質時代に野島断層が繰り返し地震を起こしていることを示している。

謝 辞

本研究は(株)建設技術研究所地質部の協力を得た。査読者および編集を担当された地質調査所の木村克己博士には本論文を改善する上で貴重なご意見を頂いた。記して感謝の意を表したい。

文 献

- Berthe, D., Choukroune, P., and Jegouzo, P., 1979, Orthogneiss mylonite and non coaxial deformation of granites: The example of the south American shear zone. *Jour. Struct. Geol.*, **1**, 1-42.
- Chester, F. M., Fridman, M., and Logan, J. M., 1985, Foliated cataclases. *Tectonophysics*, **111**, 139-146.
- 林 愛明・井宮 裕・宇田進一・飯沼 清・三沢隆治・吉田智治・精松保貴・和田卓也・川合功一, 1995 a, 兵庫県南部地震により淡路島に生じた野島地震断層の調査. 地学雑誌, **104**, 113-126.
- 林 愛明・井宮 裕・宇田進一・三沢隆治, 1995b, 野島地震断層の性状. 応用地質, **36**, 41-46.
- 林 愛明・(株)建設技術研究所地震断層調査グループ, 1995c, 兵庫県南部地震に伴って淡路島北西部に生じた野島地震断層. 日本地質学会広島大会(102年年会)特別ポスターセッション地震地質に関する調査・計測・研究要旨, 3-4.
- 林 愛明・宇田進一・三沢隆治, 1995d, 兵庫県南部地震により野島地震断層沿いに起きた瞬間型の液状化. 応用地質, **36**, 27-32.
- 林 愛明・松田時彦・嶋本利彦, 1994, 長野県飯田-松川断層沿いに産出するシェードタキライト: 粉碎起源のシェードタキライト? 構造地質, **39**, 51-64.
- 林 愛明・宇田進一, 1995, 野島地震断層のセグメンテーションと断層破壊プロセス. 地震, **48**, 375-386.
- 林 愛明・宇田進一, 1996, 明石海峡のテクトニクスと兵庫県南部地震. 応用地質, **37**, 印刷中.
- Lin, A. and Uda, S., 1995a, Morphological characteristics and fault segmentation of the Nojima Earthquake Fault. *The proceedings of symposium on the great Hanshin-Awaji earthquake and its geo-environments*. The Committee of Environmental Geology, Geological Society of Japan. シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, 15-20.
- Lin, A. and Uda, S., 1995b, Microstructures and datings of foliated cataclastic rocks in the Nojima Earthquake Fault and their implications for the tectonic history. *The proceedings of symposium on the great Hanshin-Awaji earthquake and its geo-environments*. The Committee of Environmental Geology, Geological Society of Japan. シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, 25-30.
- Lin, A. and Uda, S., 1996, Morphological characteristics of the earthquake surface ruptures occurred on Awaji Island associated with the 1995 Southern Hyogo Prefecture Earthquake. *The Island Arc*, **5**, 印刷中.
- Logan, J. M., Friedman, M., Higgs, N. G., Dengo, C., and Shimamoto, T., 1979, Experimental studies of simulated gouge and their application to studies of natural fault zones, in *Proceedings of Conference VIII: Analysis of Actual Fault Zones in Bedrock*, *Geol. Surv. Open File Rep. U. S.* **79-1239**, 305-343.
- Logan, J. M., Higgs, N. G., and Friedman, M., 1981, Laboratory studies on natural gouge from the U. S. Geological Survey Dry Lake Valley No. 1 well San Andreas fault zone in *Mechanical Behavior of Crustal Rocks: The Handin Volume*. *Geophys. Monogr. Am. Geophys. Union*, **24**, 121-134.
- 水野清秀・服部 仁・寒川 旭・高橋 浩, 1990, 明石地域の地質. 地域地質研究報告

- (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 90pp.
- 水野清秀, 1993, 淡路島. 市原 実編著, 「大阪層群」, 創元社, 340pp.
- Rutter, E. H., Maddock, R. H., Hall, S. H., and White, S. H., 1986, Comparative microstructures of natural and experimentally produced clay-bearing fault gouges. *Pure Appl. Geophys.*, **124**, 3-30.
- Scholz C.H., 1990, The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge University Press, Cambridge, 433p.
- 鈴木康弘・渡辺満久・中田 高・岡田篤正・澤祥・今泉俊文・平野信一・前杢秀明・野鳥断層トレンチ調査団, 1995野鳥断層のトレンチ調査(第2報). 日本地震学会講演予稿集, 1995年秋季大会, A70.