

野島断層に産出する互層状の断層ガウジとシュード タキライトから推定される地震断層イベント

Seismic events inferred from the layering structures of
fault gouge zone and pseudotachylytes in the
Nojima fault zone, Japan

重富素子*・林 愛明**

Motoko Shigetomi* and Aiming Lin**

Abstract: Layering structures were observed in the fault gouge and pseudotachylyte zone from the Nojima fault, Japan, along which the M7.2 1995 Kobe earthquake occurred. The layering is characterized by intralayered fault gouge and pseudotachylyte layers (or veins) varying from submillimeter to 1 cm in thickness, in which there are no significant mixing and confusing between the layers. The petrological and structural characteristics reveals that : (1) both the fault gouge and pseudotachylyte veins formed by cataclastic crushing without frictional melting, (2) each thin layer of the fault gouge and pseudotachylyte recorded at least one seismic faulting event, and then the 15 cm-wide fault gouge zone including the pseudotachylyte layers recorded at least 18 seismic events, and (3) rapid seismic slip occurred in fault zone narrower than a few millimeters along the master fault plane. The structural observations and interpretations of the cataclastic veins provide insight into the faulting processes in fault zones during seismic slip at shallow crustal levels.

Key words : *Nojima fault, pseudotachylyte, fault gouge, layering structure, seismic slip*

はじめに

地震発生領域内における地震破壊はどのようなスケールで考えても非常に複雑であるが、特に地質学的データの不足が実際の破壊およびすべりのプロセスを詳細な研究の妨げになっている (Scholz, 1990)。過去の地震断層イベントを知る方法としては一般的にトレンチ調査が広く知られているが、最近では断層岩の組織解析により地震断層の変形履歴を解明する手法が注目されてきている (Lin, 1996, 1997)。大地震のほとんどは既存の断層により引き起こされることがよく知られている。断層沿いに脈状・ネットワーク状に産出する断層ガウジ (林ほか, 1994, 1998, Lin, 1996, 1997 a), シュードタキライト (例えば, Sibson, 1975 ; Mad-

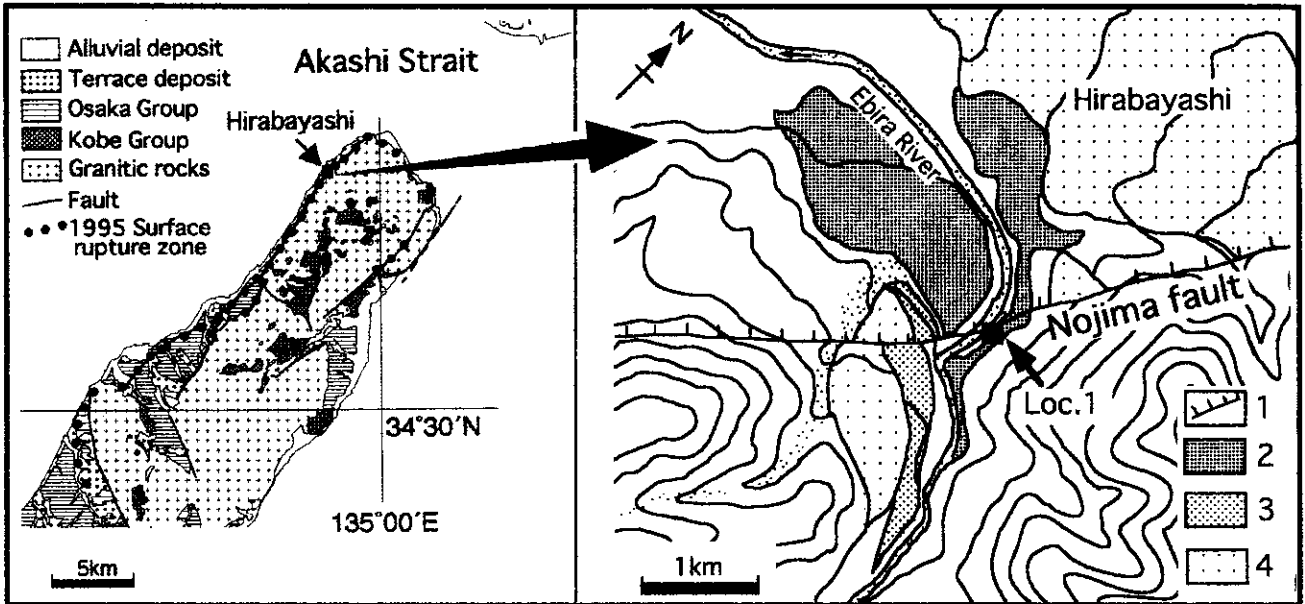
dock, 1983 ; Magloghlin, 1992 ; Lin, 1994 a, b, 1999), 断層角礫 (Sibson, 1986), 脈状カタクレサイト (Chester and Chester, 1998) などが地震断層の「化石」(すなわち断層に沿った地震性すべりイベント) を記録しているものとして広く認められている。このような脈状断層岩は地震時の断層運動において変位の増加に伴うダイナミックな(動的な)破壊作用やすべりに関連していると考えられる (Lin, 1996, 1997 a)。従って、脈状断層岩の組織構造を直接的に観察することによって地殻の比較的浅い部分で生じる地震性破壊に関する情報を得ることができ、地震研究に新しい考え方を与えることができると期待される。

本報告では、1995年兵庫県南部地震に伴って淡路島に現れた野島地震断層の平林露頭に互層状に産出する断層ガウジとシュードタキライトの組織構造解析を行うとともに、最近の地質時代における野島断層の地震断層イベントの推定を試みた。

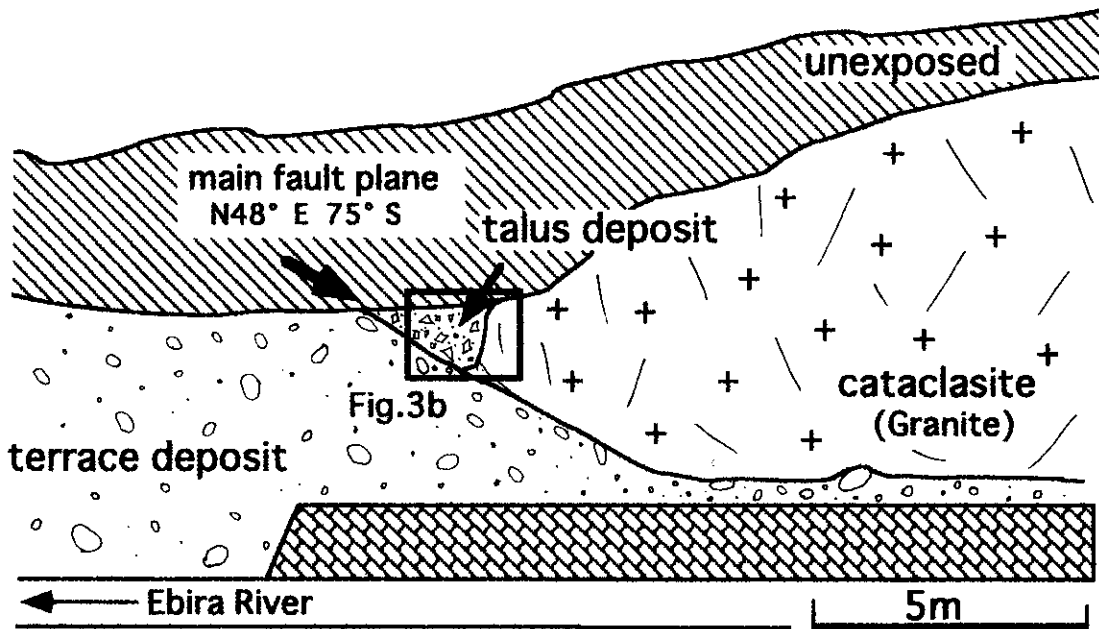
1999年3月24日受付, 1999年6月25日受理。

* 神戸大学大学院自然科学研究科
Graduate School of Science and Technology, Kobe
University Kobe 657-8501, Japan

** 神戸大学理学部
Faculty of Science, Kobe University Kobe 657-8501, Japan



第1図 淡路島北部地質図（水野ほか，1990 および林ほか，1995 を一部改定）と平林露頭周辺地形分類図。Loc. 1 は平林露頭の位置である。1：1995年兵庫県南部地震の際に現れた断層崖（平林断層崖）；2：最低位段丘面；3：低位段丘面；4：低位段丘上位面。



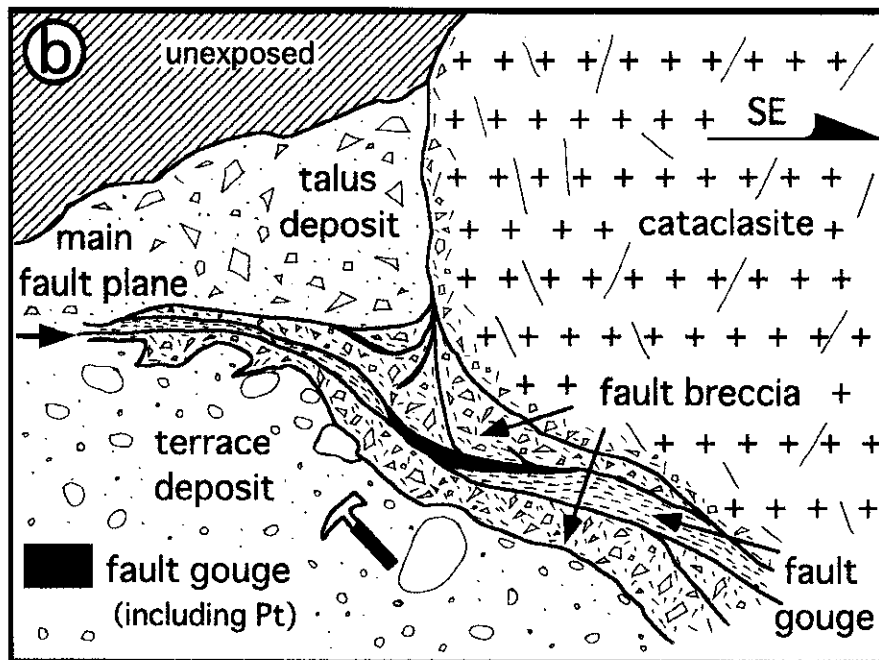
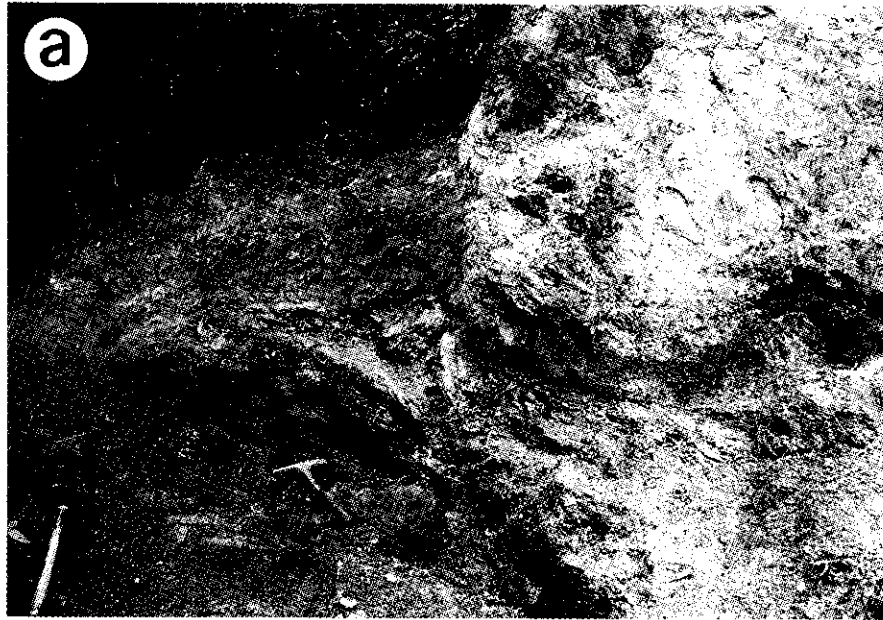
第2図 平林露頭の概略スケッチ。最低位段丘堆積層上に基盤の花崗岩が衝上している。

平林露頭の概略

調査地域の野島断層周辺の地質は基盤岩である領家帯の花崗岩とそれを覆う第三紀の神戸層群および鮮新世-前期更新世の大阪層群から構成される（水野ほか，1996；第1図）。箆川に沿った断層沿いの低地には、更新世後期以降の段丘堆積物や沖積層などが堆積している。1995年兵庫県南部地震に伴って、既知の野島断層と水越撓曲沿いに富島を経て南西部の一宮町尾崎まで総延長18 kmに達する野島地震断層が現れた（林ほ

か，1995；林・宇田，1996；Lin and Uda，1996，Lin，1997 b）。調査地点の平林付近では、鉛直130 cm，横ずれ180 cm，ネットスリップ215 cmと地震断層の変位量が最も大きい明瞭な地震断層崖（以下平林断層崖と呼ぶ）が現れた（林ほか，1995；林・宇田，1996）。

本研究で調査を行った平林露頭は、平林断層崖の北東延長部の筋川の右岸（北東側）の斜面に現れた（Loc. 1，第1図）。第2図に示すように地震断層は段丘堆積層上に基盤の花崗岩が衝上する形態で出現している。断層によって変位された最低位段丘面は現河床

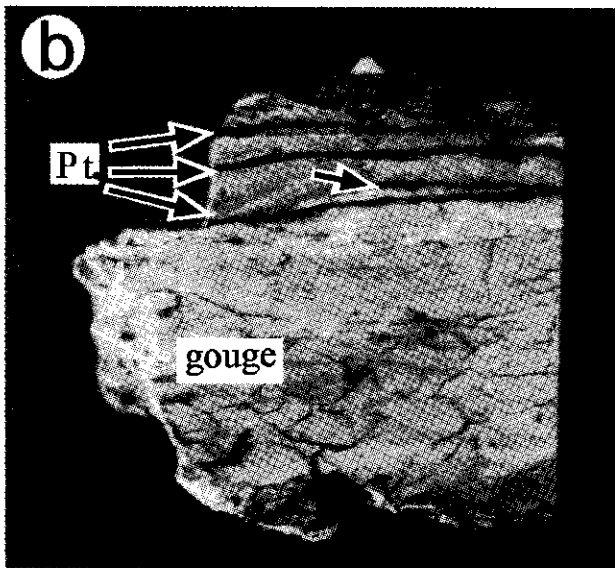
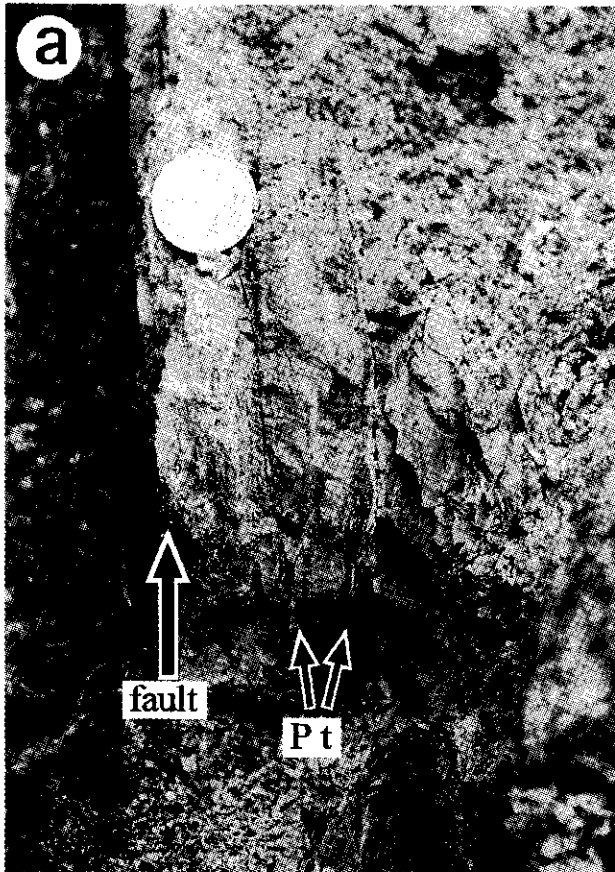


第3図 平林露頭(第1図のLoc. 1)の写真(a)と詳細スケッチ(b)。断層破砕帯は花崗岩側に形成されカタクレーサイト・断層角礫・断層ガウジおよびシュードタキライトから構成される。

部から約7mの比高をもっている。この段丘面の正確な年代がわからないが、これより二段高いAT火山灰を含む低位段丘面は9.5m垂直方向に変位しており、2万年前～完新世に形成されたものであるとされている(水野ほか, 1990)ことから、この最低位段丘面は完新世前後に形成されたものと推定される。この最低位段丘面にも基盤の花崗岩が鉛直4m以上衝上しているため、本地点では古い段丘面ほど変位を大きく累積していることが認められ、完新世にも複数回の地震イベントがあったと推定される。

断層破砕帯の産状

第3図に露頭の写真と詳細なスケッチを示す。花崗岩が未固結な段丘砂礫層に衝上する形態で野島断層およびそれに伴う断層破砕帯が露出しおり、断層面の走向・傾斜はN48°E, 75°SEである。花崗岩側の断層破砕帯は主断層面から幅約15cmの断層ガウジと薄いシュードタキライトとの互層、幅20～30cmの断層角礫帯および数m以上のカタクレーサイトから構成される。



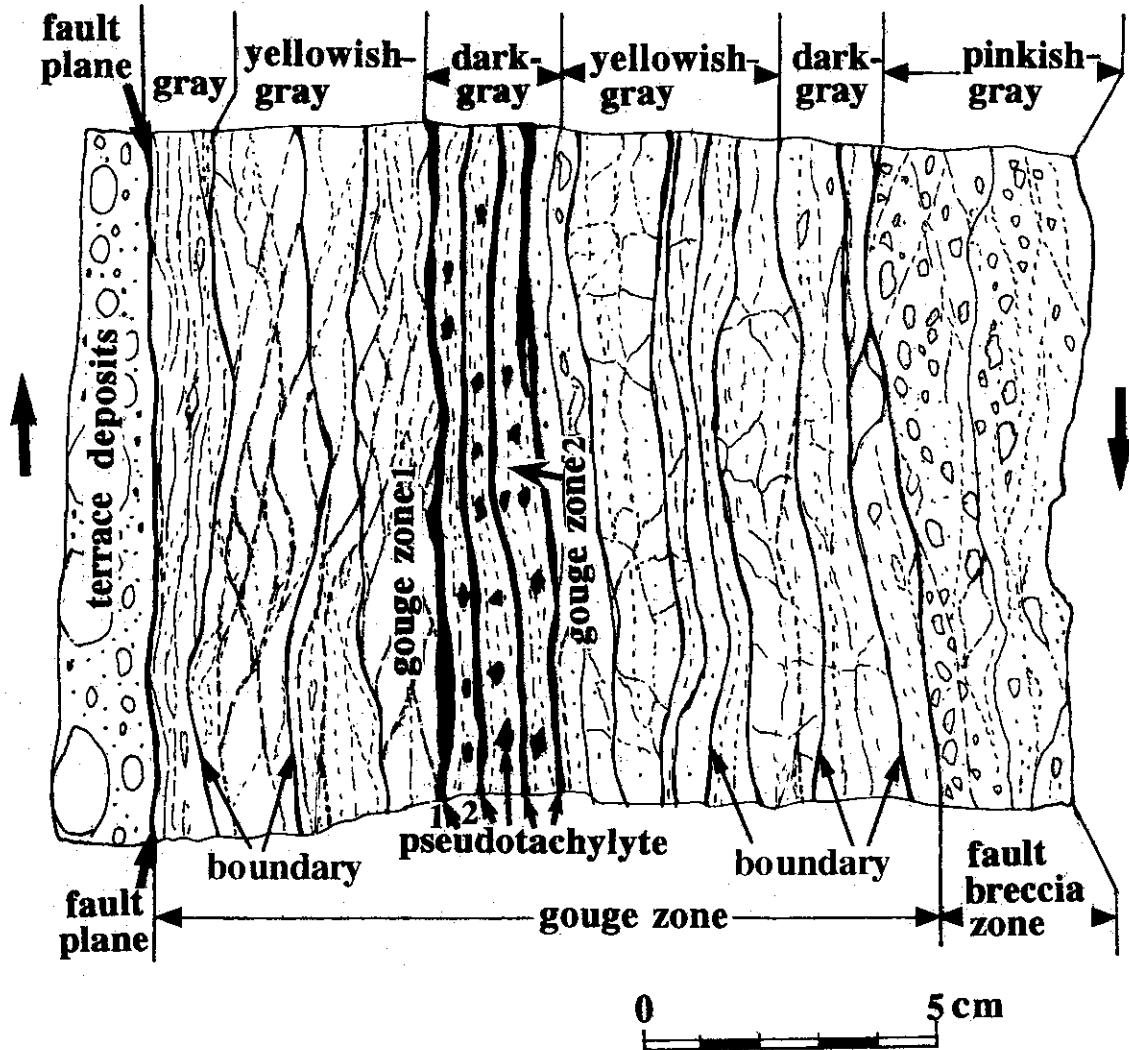
第4図 互層状に産出する断層ガウジーシュードタキライトの写真。a: 露頭の産状; b: サンプルの研磨面。Pt: シュードタキライト。

主断層面（1995年の地表地震断層面）に沿って肉眼で観察される断層ガウジとシュードタキライトとの互層は、数mm～3cmの断層ガウジと1～3mmの薄いシュードタキライトから構成されており、断層面に平行な面状構造が発達している。断層ガウジは幅1mm～数mmの灰色～黒灰色～黄褐色を呈する未固結の薄層と一部の弱固結した薄層から構成され、この薄層と薄層との境界面に沿って非常に剝離しやすい。シュードタキライトはこの断層ガウジ帯の中に挟まれており（第4図）、黒色を呈しているので、肉眼でも断層ガウジと容易に区別することができる。断層角礫は未固結で灰色～褐灰色を呈し、主断層面の近傍に幅約20～30cmで分布している。カタクレーサイトは灰色～褐灰色を呈し、原岩である花崗岩の組織・固結性を明瞭に残している。

組織構造観察およびXRD解析

上記の平林露頭で互層状に産出する断層ガウジおよびシュードタキライトの定方位試料を採取し、光学顕微鏡・電子顕微鏡による観察、XRD解析を行った。第5図に断層ガウジ帯のXZ面で肉眼により観察された構造を示す。断層ガウジ帯とその両側に接触している段丘堆積物と断層角礫帯との境界は非常にシャープである。断層ガウジ帯は断層面と平行な姿勢を示す1mm～数mm程度の薄い断層ガウジ層とシュードタキライトの互層から構成され、肉眼で観察できただけでも18枚が確認された。これらの互層は1枚1枚が色や組織が明らかに違うもので非常にシャープな境界面で接している。シュードタキライトはガウジの互層と同様に断層面と平行して約1～3mm幅で産出しており肉眼では4枚確認できる（第4b図）。周囲のガウジと較べて非常に固く、細粒・緻密かつ黒色を示しておりその固さの違いは研磨の際に明らかであった。シュードタキライトを挟む弱固結で灰色を示す断層ガウジ中にはシュードタキライトの大きささまざまな角張ったクラストが見られる（第5図）。シュードタキライトは非常に細粒・緻密で、肉眼でその組織構造を観察することができない。これに対して断層ガウジ帯では右横ずれの変位センスを示す非対称構造が観察される（第5図）。断層ガウジの層は未固結で、明るい色を呈している。

露頭スケール、サンプルスケールで観察された上述の互層状構造は顕微鏡下でも同様に観察できる（第6図）。断層ガウジ中にはシュードタキライトのクラストが多量に含まれている（第6図）。シュードタキライトは周囲のガウジと比較して非常に細粒であるため光学顕微鏡下でも組織を観察することができなかったの、電子顕微鏡下で高倍率の観察を行った。第7図に示すように肉眼～光学顕微鏡下での観察と同様に



第5図 平林露頭に産出する互層状断層ガウジシュードタキライトのXZ面の組織構造。右横ずれの剪断センスを示す非対称構造が観察される。長い矢印は剪断センスを示す。Pt:シュードタキライト。

シャープな境界（境界は入り組んでいるが、漸移していない）で接する互層状構造が見られる。周囲の断層ガウジのクラストと較べるとシュードタキライトのクラストは非常に細粒であることが明らかである。シュードタキライト層は角張ったクラストの集合体から構成されその90%以上が粒径1 μ m以上のクラストである（第7b図）。Lin (1994 a, b, 1999) に示されるようなマイクロライトや円磨状クラストなど熔融起源のシュードタキライトに特有な組織構造はほとんど観察されない。

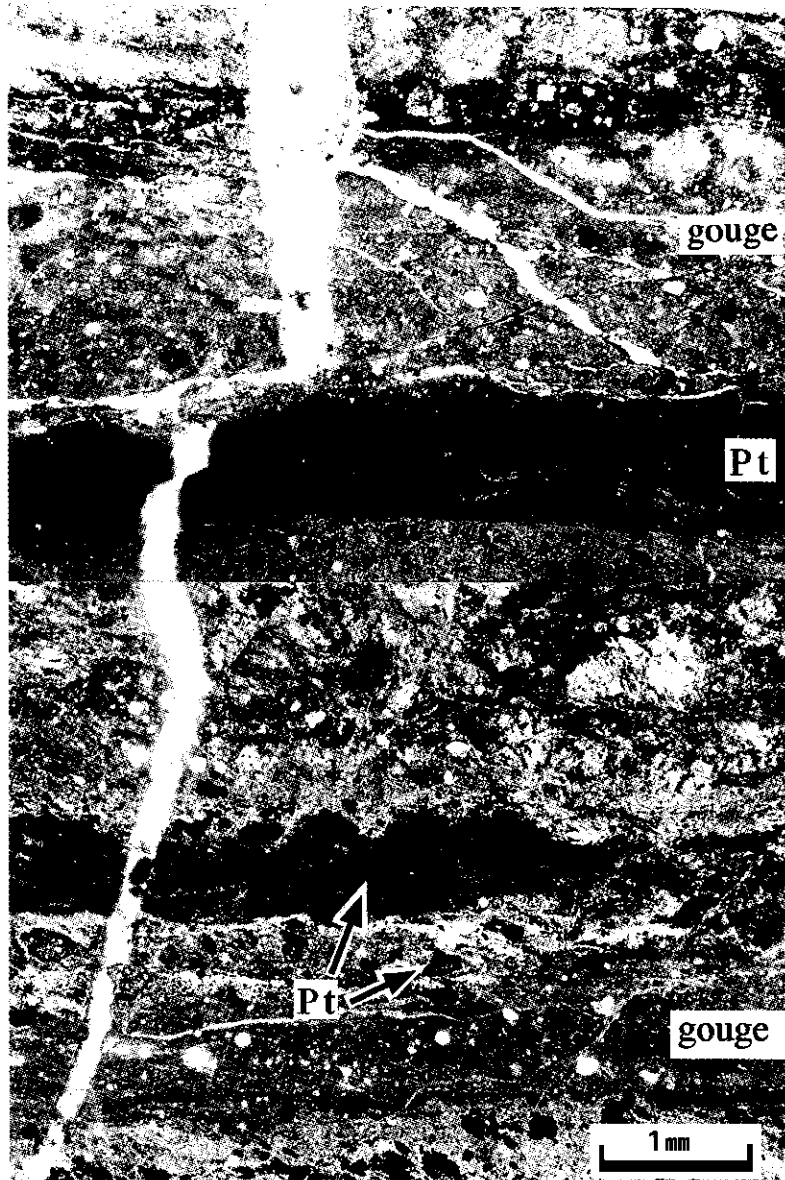
この互層の断層ガウジとシュードタキライトの鉱物構成と細粒部を調べるため、RINT 2200 X線分析装置を用いて、断層ガウジとシュードタキライトそれぞれ2層（第5図に示した gouge-1 と gouge-2 および pseudotachylite-1 と pseudotachylite-2）を1枚ずつ剥がし粉末試料にしてXRDの分析を行った。X線分析条件およびこれらのサンプルの粉末X線回折チャートを第8図に示す。また、これと比較するため、野島

断層の掘削コアの断層ガウジのX線回折チャート（林ほか、1998）を第8図に示す。断層ガウジとシュードタキライトのサンプルは花崗岩サンプルとほとんど同じ回折パターンを示している。一般に非晶質物質やガラス質のシュードタキライトのX線回折チャートの低角度側に幅広い盛り上がりバンドを示す（Lin, 1994 a, b）が、分析したサンプルのどちらにもこのような反射バンドが認められない。

考 察

1. 野島平林のシュードタキライトの成因

断層成因のシュードタキライトは世界各地の多くの断層で発見され（例えば、Sibson, 1975 ; Lin, 1994 a, b, 1999）、地震断層の「化石」として注目されている。シュードタキライトは断層摩擦による熔融起源のものが多く研究されている（例えば、Philpotts, 1964 ; Sibson, 1975 ; Austrheim and Boundy, 1994 ; Lin,

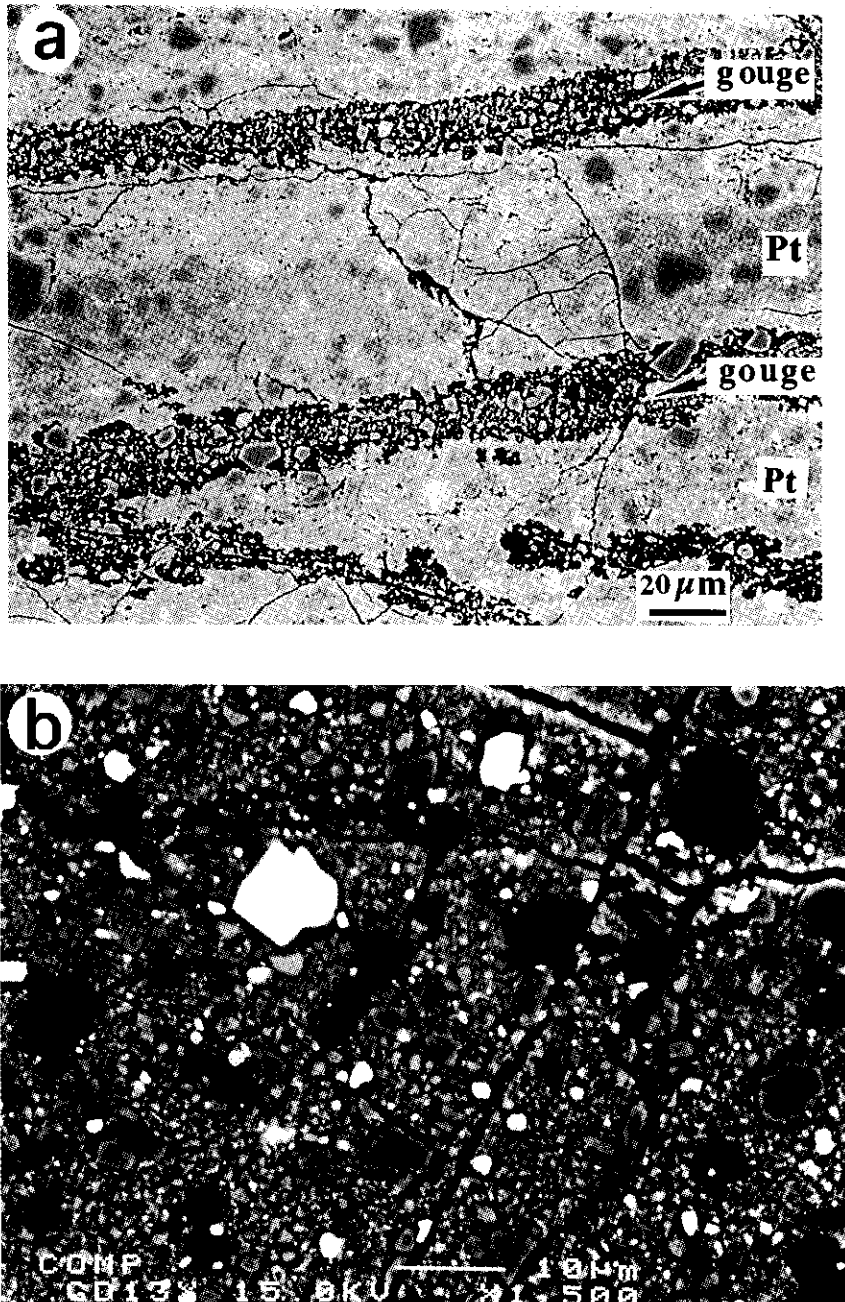


第6図 断層ガウジとシュードタキライト互層の顕微鏡写真。断層ガウジ中にはシュードタキライトのクラストが多量に含まれる。Pt: シュードタキライト。

1994 a, b, 1999 ; Lin and Shimamoto, 1998) が、断層摩擦破碎による粉碎起源のものも報告されている (林ほか, 1994 ; Lin, 1996, 1997 a ; 1999)。粉碎起源のシュードタキライトは見掛け上熔融起源のシュードタキライトに似ているが、その細粒基質部はほとんど細粒破碎物から構成される。粉碎起源のシュードタキライトと熔融起源のシュードタキライトとも地震時急激な断層運動により形成されるものであるため、シュードタキライトの研究は地震断層運動のメカニズムの解明に重要な情報を提供すると考えられる。

本研究の調査露頭の南西側の平林断層崖の南西側の農道では黒色シュードタキライト様岩の産出が報告されている (大槻ほか, 1995 ; 皆川ほか, 1995)。このシュードタキライト様岩の細粒基質にはガラス質らし

いものと急冷によると思われる開口性の割れ目が存在し、このシュードタキライトは断層の摩擦運動に伴って熔融・急冷して形成されたシュードタキライトである可能性が高いと指摘されている (皆川ほか, 1995)。しかし、本研究で観察したシュードタキライトはSEM像ではそのほとんどが非常に細粒な角張ったクラストの集合体であることが明らかである。また、マイクロライトや円磨状クラストなどの熔融起源のシュードタキライトに特徴的な組織構造は見られなかった。さらに、シュードタキライトのXRD回折パターンは周囲の断層ガウジや花崗岩とほぼ同じ回折パターンを示し、熔融起源のシュードタキライトに見られるようなガラスの存在を示す低角度の盛り上がりバンドは見られなかった。Lin (1994 a) によると、



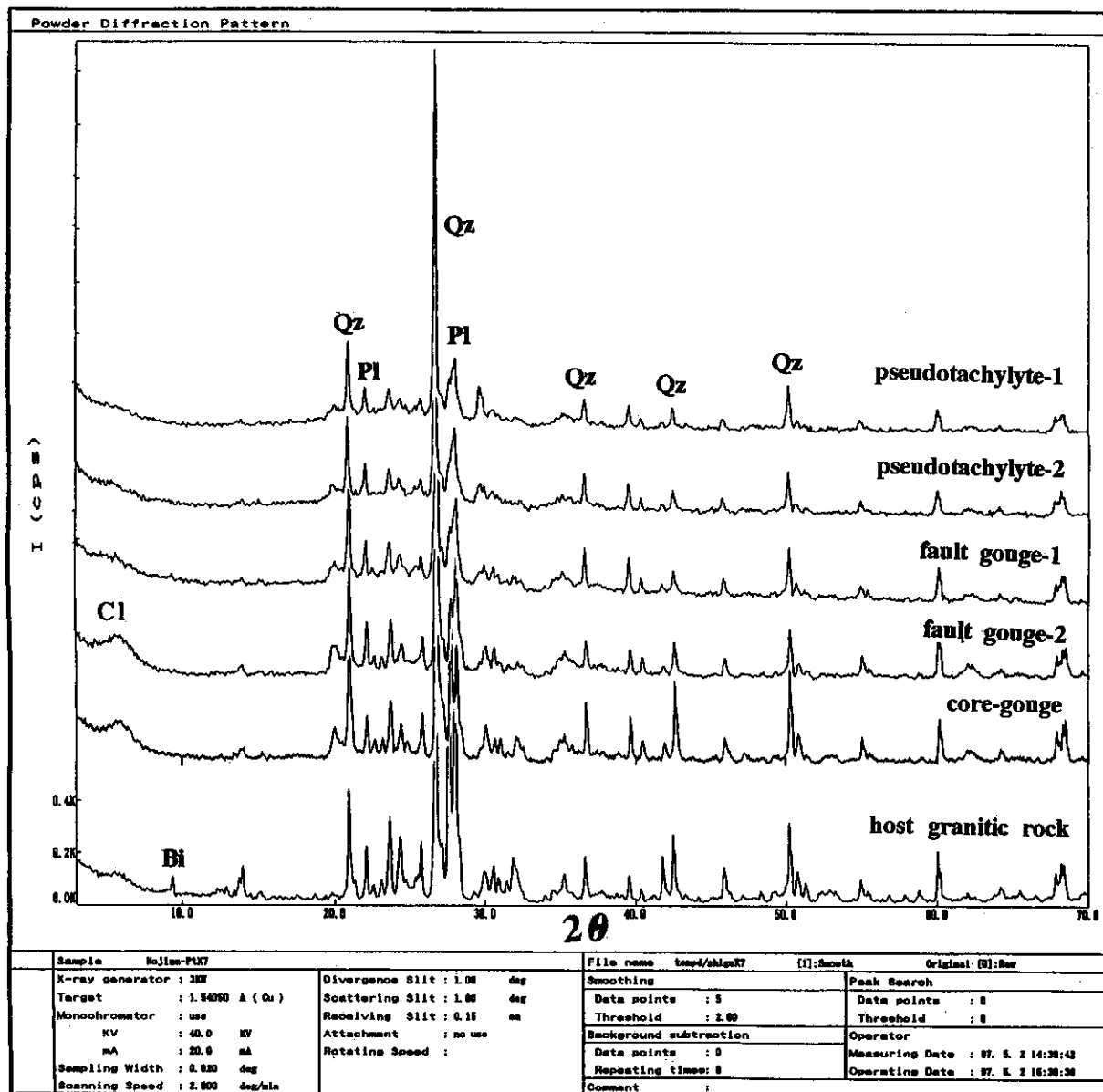
第7図 断層ガウジとシュードタキライト互層のSEM像(XZ面)。a:断層ガウジの薄層にさらにシュードタキライトの薄層が含まれる。b:aの拡大。Pt:シュードタキライト。

シュードタキライトには5~10%のガラス質の基質が含まれれば、X線回折チャートにこのような盛り上がりバンドが認められる。従って、本研究で分析したシュードタキライトは90~95%以上の母岩花崗岩の細粒クラストから構成されることが明らかである。これらのことから、このシュードタキライトは断層運動時の摩擦熔融によって形成されたものではなく機械的な粉砕作用によって形成された細粒破碎物の集合体であると考えられる。

2. 地震断層イベント

上述したように、互層状の断層ガウジとシュードタ

キライトは互いに非常にシャープな境界面で接している構造が肉眼・光学顕微鏡・電子顕微鏡のいずれにもよく観察される。これらの一枚一枚がそれぞれ1回の断層運動を現しているかは明らかでないが、1回の断層運動でこのように固結度の違う形態を示しさらに互いに非常に色や粒度の違うシャープな境界をなす断層ガウジおよびシュードタキライトの層が複数枚形成されるとは考えにくい。また、今回の地震により乱された断層面沿いの断層ガウジの厚さはわずか数mmであること(林ほか, 1995; 林, 1996)から考えても幅15cm断層ガウジ帯は今回の地震の以前に複数回の地



第8図 断層ガウジとシュードタキライトの粉末X線回折パターン。core gouge: 小倉地点500mボーリングコア中の花崗岩起源断層ガウジ(林ほか, 1998)。host granitic rock: 母岩花崗岩。fault gouge-1とfault gouge-2およびpseudotachylyte-1とpseudotachylyte-2のサンプル位置は第5図に示される。Qz: 石英; Pl: 長石; Bi: 黒雲母; Cl: 緑泥石。

震断層運動イベントにより形成されたものであると推定される。さらに、今回の地震断層摩擦により主断層面からわずか数mm程度の断層ガウジのESR信号が影響されることが明らかである(Fukuchi and Imai, 1998)。これも一回の地震断層運動イベントにより影響される断層ガウジの幅は数mmであることを示している。一枚の断層ガウジまたはシュードタキライトは複数回の地震断層運動により形成される可能性あると考えられる。これは、上述したように、シュードタキライトと隣接した断層ガウジ層には大小さまざまなシュードタキライトのクラスト含まれていることから暗示される。これらのことから、この断層ガウジとシュードタキライトの一枚一枚がそれぞれ少なくとも

1回以上の地震断層運動を現していると推定される。平林地点では少なくとも18枚の断層ガウジとシュードタキライトとの互層が確認できる。この幅15cm断層ガウジ帯が少なくとも18回以上の地震断層イベントを記録したと推定される。また、一枚一枚の断層ガウジとシュードタキライト層は幅1mm~数mmであることから、1回の地震断層スベリゾーン(slip zone)は幅数mmであると考えられる。

1995年兵庫県南部地震後、最近の地質時代における活断層の活動史や運動像を解明するためのさまざまな試みがなされてきた。地震後の調査では、例えば断層岩の微細構造と断層ガウジに取り込まれて変形した炭化した草の根の¹⁴C年代測定(林, 1996)やトレンチ

の調査結果(鈴木ほか, 1995)により, 野島断層が完新世において1995年より前に少なくとも1回の地震断層イベントがあったと推定される。また, 前述したように, 平林の露頭で観察される段丘の累積変位からも完新世にも複数回の地震イベントがあったと推定される。従って, 野島断層は, 2万年前~完新世に地震の震源断層として繰り返し活動していることが明らかである。未固結の断層ガウジは地殻の比較的浅い部分(<4km)で形成されるとされているので, 本研究の平林露頭に産出する断層ガウジとシュードタキライトとの互層は比較的新しい地質時代にできたものであると考えられる。

本研究では主断層面に沿って生じる高速地震性すべりに関係した断層ガウジ・シュードタキライトの互層状構造および地殻浅部で生じる大地震時の主断層内すべりの脈状カタクラシック断層岩とスリップゾーンの研究は理論的なシミュレーションと摩擦実験とを結び付ける架け橋として地震性断層破壊のプロセスを明らかにすることができると期待される。

まとめ

以上をまとめると, 平林露頭の断層ガウジとシュードタキライトの研究から次の3点を結論とすることができる。

1) 平林露頭に産出するシュードタキライトはX線解析や電子顕微鏡での観察から, 断層運動時の摩擦熔融によるものではなく地震断層運動に伴う粉碎作用によって形成されたものであると推定される。

2) シャープな境界面を持ち, 互層状に産出する断層ガウジとシュードタキライトの一枚一枚がそれぞれ1回または複数回の地震断層イベントを現していると推定される。幅15cm断層ガウジ帯は最近の地質時代に平林地点では少なくとも18回以上の地震断層イベントを記録していると考えられる。

3) 1回の地震断層のスベリゾーンの幅は数mm以下であると推定される。

謝辞

現地調査において, 神戸大学大学院生丸山 正氏にご協力頂いた。神戸大学理学部宮田隆夫教授にご助言を頂いた。査読者の大友幸子, 小林健太両氏には, 本稿を改善する上で有益なコメントをいただいた。以上の方々に深くお礼申し上げる。なお, この研究にあたって文部省科学研究費補助金(基盤研究C, 課題番号09640544)の一部を使用した。

文献

- Austrheim, H. and Boundy, T.M., 1994, Pseudotachylytes generated during seismic faulting and eclogitization of the deep crust. *Science*, **265**, 82-83.
- Chester, F.M. and Chester, J.S., 1998, Ultracataclastic structure and friction processes of the Punchbowl fault, San Andreas system, California. *Tectonophysics*, **295**, 199-221.
- Fukuchi, T. and Imai, N., 1998, Resetting experiment of E'centres by natural faulting-The case of the Nojima Earthquake Fault in Japan. *Quaternary Geochronology*, **17**, 1063-1068.
- Lin, A., 1994 a, Glassy pseudotachylytes from the Fuyun fault zone, northwest China. *Jour. Geol.*, **102**, 317-329.
- Lin, A., 1994 b, Microlite morphology and chemistry in pseudotachylyte, from the Fuyun fault zone, China. *Jour. Struct. Geol.*, **16**, 71-83.
- 林 愛明, 1996, 断層岩の微細構造からみた野島断層の運動像. 構造地質, no. **41**, 17-29.
- Lin, A., 1996, Injection veins of crushing-originated pseudotachylyte and fault gouge formed during seismic faulting. *Eng. Geol.*, **43**, 213-224.
- Lin, A., 1997 a, Fluidization and rapid injection of crushed fine-grained materials in fault zones formed during seismic faulting. *Proceed. 30th Int'l Geol. Cong.*, VSP, **14**, 27-40, Zheng et al. (eds).
- Lin, A., 1997 b, Relations between the surface ruptures, aftershocks associated the M7.2 1995 Southern Hyogo prefecture earthquake and the pre-existing geological structures. *Bulletin of the Seismological Association of the Far East*, **3**, No. 2, 45-68.
- Lin, A., 1999, Roundness of clasts in pseudotachylytes and cataclastic rocks as an indicator of frictional melting. *Jour. Struct. Geol.*, **21**, 473-478.
- 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, 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.
- Lin, A., Maruyama, T. and Miyata, T., 1998, Paleoseismic events and the Keicho-Fushimi large earthquake produced by a slip on the Gosukebashi fault at the eastern Rokko Mountains, Japan. *The Island Arc*, **7**, 621-623.
- 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ュードタキライト: 粉体起源のシュードタキライト? 構造地質, no. **39**, 51-64.
- 林 愛明・宇田進一, 1996, 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.
- Lin, A. and S. Uda, S., 1996, Morphological characteristics

- of the earthquake surface ruptures which occurred on Awaji Island, associated with the 1995 Southern Hyogo Prefecture Earthquake. *The Island Arc*, **5**, 1-15.
- 林 愛明・重富素子・嶋本利彦・宮田隆夫・竹村恵二・田中秀実・宇田進一・村田明広, 1998, 断層岩からみた野島断層の活動史と運動像. 月刊地球, 号外 no. **21**, 208-212.
- Lin, A. and Shimamoto, T., 1998, Selective melting process as inferred from experimentally-generated pseudotachylytes : *Journal of Asian Earth Sciences*, **16**, 433-445.
- Maddock, R.H., 1983, Melt origin of fault-generated pseudotachylytes demonstrated by textures. *Geology*, **11**, 105-108.
- Magloughlin, J.F., 1992, Microstructural and chemical changes associated with cataclasis and frictional melting at shallow crustal levels : the cataclasis-pseudotachylyte formation. *Tectonophysics*, **204**, 243-260.
- 皆川 潤・大槻憲四郎・青野正夫・大友淳一・中村教博, 1995, 野島地震断層の性状. *応用地質*, **36**, 54-63.
- 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, 90 p.
- 大槻憲四郎・皆川 潤・青野正夫・中村教博, 1995, 野島地震断層の性状—断層破砕帯内部構造とシュードタキライト様岩—. 第5回環境地質学シンポジウム講演論文集, 地質学会環境地質研究委員会, 99-102.
- Philipotts, A.R., 1964, Origin of the Pseudotachylytes. *American Journal of Science*, **262**, 1008-1035.
- Scholz, C.H., 1990, *The mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge University Press, Cambridge, 433 p.
- Sibson, R.H., 1975, Generation of pseudotachylite by ancient seismic faulting. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **43**, 775-794.
- Sibson, R.H., 1986, Brecciation processes in fault zones : inferences from earthquake rupturing. *Pure Applied Geophysics*, **124**, 159-176.
- 鈴木康弘, 1995, 野島断層のトレンチ調査. 古地震を探る (大田陽子・島崎邦彦編), 210-215, 古今書院.