

地震の化石-シュードタキライト

高木 秀雄¹⁾

はじめに

シュードタキライト (pseudotachylite) という岩石名は、わが国の地質学者にはまだなじみが薄いかもれない。しかし、海外では同様の岩石の存在について19世紀初頭から報告されており、その成因について数多くの議論がなされてきた。Shand (1916) は、南アフリカ Orange Free State のパリス (Parys) 地域に存在する、黒色・緻密な、見かけ上タキライト (tachylite: 玄武岩質火山ガラス) によく似た岩石についてシュードタキライトと命名した。このシュードタキライトは、Vredefort 環状構造の中心部を構成する花崗岩体内部において認められ、脈状、ネットワーク状あるいは角礫化した部分の隙間を充填する形で存在する。

同様な岩石の産出は世界各地から報告されており、地域によって固有の名前がつけられてきた。例えば、スコットランドや Outer Hebrides 諸島では “flinty crush rock” (Clough, 1888), インド南部では “trap-shotten gneiss” (King & Foote, 1864), オーストリアでは “Gangmylonit” (Hammer, 1915), フランスでは “puree parfait” (=perfect soup: Termier & Boussac, 1911), ヒマラヤでは “cryptomylonite” 及び “hyalomylonite” (Scott & Drever, 1953), などである。なお、中国語訳では假玄武玻璃 (例えば Yang et al., 1981), 和訳でも偽玄武岩玻璃 (地団研地学事典編集委員会, 1970) として紹介されている。このような脈状岩石の最初の記載はスコットランド西方 Outer Hebrides 諸島から Macculloch (1800) によってなされたとされている。Outer Hebrides 諸島のシュードタキライトはその露出状況が大変良好で、その後も多くの地質学者が研究対象としてきた。

今回紙面を借りて、圧砕岩類の中でも特異な成因を持つシュードタキライトについてのレビューを行ない、その認定の重要性について述べたい。なお、1960年代~70年代初頭におけるシュードタキライトに関するレビューについては、Philpotts (1964), Higgins (1971), Francis (1972) がある。

シュードタキライトの形成場

シュードタキライトに関するこれまでの研究をまとめると、その形成場としては、(1)断層に伴うもの、(2)地滑りに伴うもの、(3)隕石の衝突に伴うもの、などがあげられる。これらはシュードタキライト形成の外的要因として捉えられる。いずれも地殻浅所もしくは地表付近で生じる現象で、地震の直接の原因になったり、地震に伴う可能性が高い。表題を「地震の化石」とした所以である。それでは、シュードタキライトの各形成場と成因論について詳しく述べてみよう。

1. 断層に伴うシュードタキライト (模式地: Outer Hebrides Thrust)

分 布

断層または剪断帯に伴うシュードタキライトの産出は、世界各地から報告されている。1950年代以降の主な文献を国別にあげると、イギリス (Park, 1961; Sibson, 1975, 1977 a, 1980 a; Macaudiere & Brown 1982; Brown & Macaudière, 1984; Macaudière et al, 1985; Maddock, 1983, 1986 a; Maddock et al., 1987; Thorpe, 1987; Piper & Poppleton, 1988), フランス (Passchier, 1982, 1984 a), スペイン (Doblas, 1987), オーストリア (Masch, 1973), スイス (Irouschek & Huber, 1982), ギリシャ (Andriessen et al., 1979), ノルウェー (Dietrichson, 1953; Bryn, 1959; Sinha-Roy, 1981), スウェーデン (Beckholmen, 1982), グリーンランド (Jensen, 1968; Grocott, 1981), アメリカ (Swanson, 1982, 1988; Magloughlin, 1989; Peterman & Day, 1989), カナダ (Philpotts & Miller, 1963; Philpotts, 1964; Ermanovics et al., 1972), 南アフリカ (Philpotts, 1964; Killick et al., 1988; Brandl & Reimold, 1990), ソ連 (Daskova & Sosedko, 1981), インド (Pichamuthu, 1959; Gupta 1967; Sinha-Roy & Kumar, 1985), 中国 (Yang et al., 1981; Zhai, 1988), 日本 (Toyoshima, 1990), オーストラリア (Allen, 1979; Wenk &

1) 早稲田大学教育学部 地学教室: 〒169 東京都新宿区西早稲田1-6-1

キーワード: シュードタキライト

Weiss, 1982; Hobbs et al., 1986), ニュージーランド (Walace, 1976; Sibson et al., 1981; Seward & Sibson, 1985), 南極 (Sandiford & Wilson, 1984) などである。シュードタキライト形成の時代は、始生代 (例えばカナダ, Charron 湖地域: Ermanovics et al., 1972) から第四紀更新世後期 (例えばニュージーランド, Alpine 断層: Seward & Sibson, 1985) に至るまで様々である。

産 状

断層に伴うシュードタキライトは、通常片麻岩や深成岩などの結晶質岩を母岩とし、それを貫く脈として存在する。シュードタキライトを構成する脈は、それが生々した断層脈と、断層脈から分岐する注入脈に区分できる (第1図: Sibson, 1975)。Outer Hebrides Thrust の例では、断層脈は通常面状割れ目に沿って発達しており、多くの場合母岩中の面構造にほぼ平行である。脈は部分的に膨縮することもあるが、その幅が10cmを越えることはほとんどない。一方注入脈の形態は不規則で、最大幅10mに達し (写真1)、変位を示さない展張割れ目に沿って注入している。しばしば注入脈はネットワーク状に入り乱れ (写真2)、その脈の部分が厚い場合は全体として角礫状または礫状の形態を示し、それらの“礫”の回転を伴う (口絵写真1, 2)。また、断層脈の中には、しばし

ば平行に対をなして発達するもの (paired shear) が報告されている (Grocott, 1981; Irouschek & Huber, 1982; Swanson, 1988; Magloughlin, 1989)。

シュードタキライトはスラストに伴って産するものが多いが、横ずれ断層に伴うもの (Grocott, 1981; Swanson, 1988; Peterman & Day, 1989; Toyoshima, 1990) も報告されている。Swanson (1988) は、横ずれデュプレックス構造に伴うシュードタキライトを報告している。

組 織

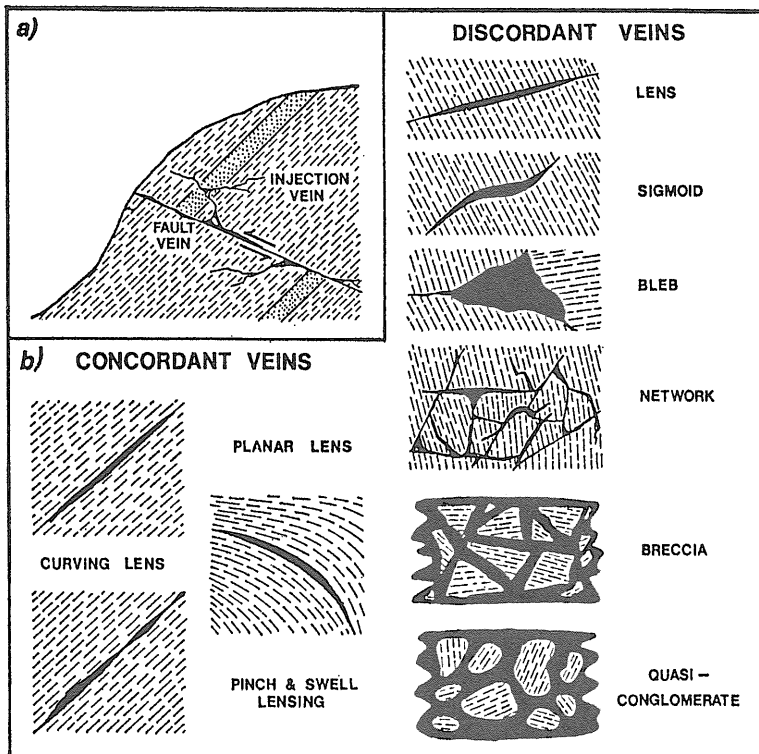
シュードタキライトの組織は、一般に母岩から由来する破片と、それを取り巻くガラス質、隠微晶質ないし微晶質の基質部から構成されている。破片は通常破碎組織が認められ、構成鉱物の波動消光が強い。基質部や破片の周縁部では、かつて融解し、急冷したと考えられる特徴がしばしば認められている。その証拠として、ガラス質物質の存在が報告されている (Park, 1961; Philpotts & Miller, 1963; Jensen, 1968; Ermanovics et al., 1972; Masch, 1973; Allen 1979; Sibson et al., 1981; Toyoshima, 1990)。しかし、多くの場合は脱ガラス作用を被っており、透過電子顕微鏡観察やX線解析からガラスの存在の確証をあげた論文は少ない。一方、融解—急冷を示す樹枝状 (dendritic)、球顆状 (spherulitic)、杏仁状 (amygdaloidal) など

の組織や、マイクロライト、気孔 (vesicule)、急冷周縁相 (chilled margin, 写真3)、融食縁 (corrosion rim) などの存在が各地で報告されている (例えば Philpotts, 1964; Maddock, 1983; Maddock et al., 1987)、口絵写真3に Hebrides 諸島のシュードタキライト中の様々な融解—急冷組織を示す。

また、シュードタキライト脈内部の比較的粗粒な破片が、脈の中央部に集まる傾向が報告されている。これはチャンネルまたはパイプ内部にニュートン流体が流れる時、その速度勾配が最大の部分 (縁の部分) からゼロの部分 (中央部) に向かって粒子が移動する現象として知られている Bagnold 効果 (Barrière, 1976) によるものと考えられている (Macaudière et al., 1985)。

化学組成

シュードタキライトと母岩の全岩組成は、大体において一致している (Philpotts, 1964; Ermanovics et al.,



第1図 シュードタキライトの産状 (Sibson, 1975, Fig. 2 より抜粋)。

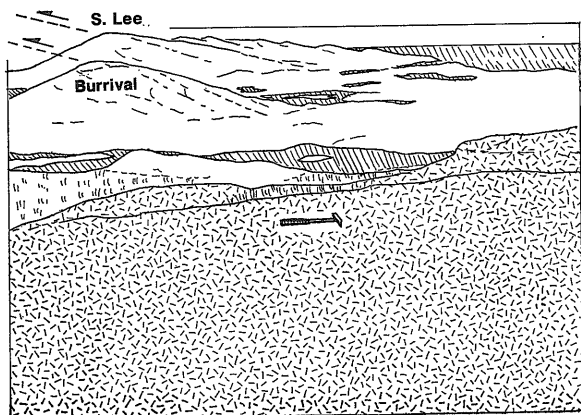
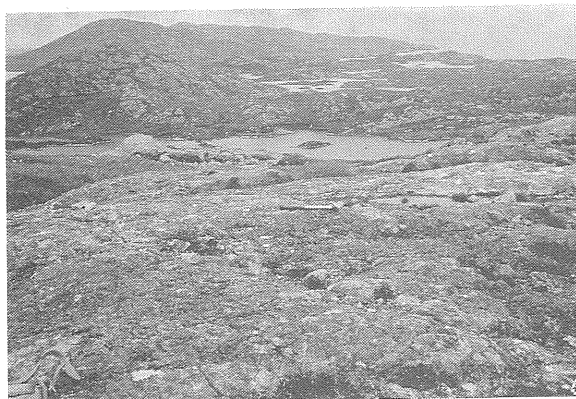


写真1 Outer Hebrides Thrust と N. Uist 島 Eaval 山中腹の Thrust 沿いに分布するシュードタキライト (下図のハッチで示した部分, 幅約10mの露頭). 多量の母岩 (Lewisian 片麻岩) を角礫状に含む. 口絵写真1参照.

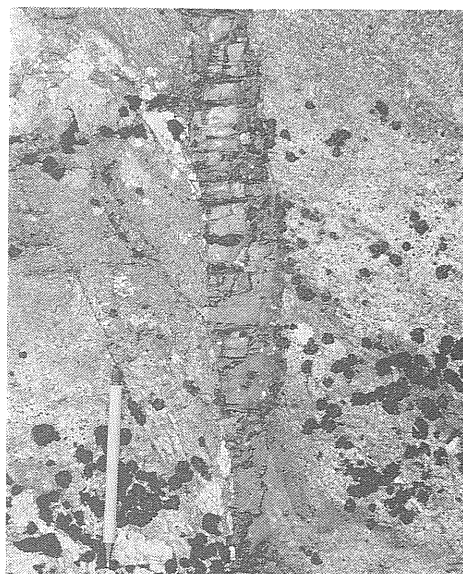


写真3 Harris 島南部 Rodel の変アノソサイトを貫くシュードタキライト脈 (中央). 周縁急冷相が認められる. 周辺の黒い斑点はコケ.

1972; Masch, 1973; Sibson, 1975; Sinha-Roy & Kumar, 1985; Macaudière et al., 1985; Maddock, 1986a; Magloughlin, 1989, Toyoshima, 1990). 従って, シュードタキライトが自家生産 (in situ) であることは疑いない. しかしながら, 各元素について詳細に見てみると, 両者の間に不一致が認められる. また, シュードタキライト脈の化学組成は, 母岩が同一でも, 脈によってあるいは同じ脈の中でも縁辺部と中央部では異なることがある (Ermakovics et al., 1972; Toyoshima, 1990). これらの不一致や不均一性の原因としては, 母岩の不均一性の反映, 鉱物種による融点の違いあるいは融解の局所性, 冷却速度の不均一性などが考えられる.

シュードタキライト脈中の鉱物破片は, 通常石英, 長石であり, 母岩中に黒雲母や角閃石が含まれる場合でも, シュードタキライト中の破片としてはほとんど認められない. これは, 含水鉱物である黒雲母や角閃石が優先的に融解することによって考えられている (Allen, 1979; Maddock, 1986a). 母岩の組成に限らずシュードタキライトが通常黒色を示すのは, 基質中に多量に存在する磁鉄鉱微晶の存在によるが, その鉄は含水苦鉄質鉱物の融解によりもたらされたものであると考えられている (Dietrichson, 1953; Philpotts, 1964).

年代測定

シュードタキライトは長大な地質時代の中で, 極めて

写真2(左) Harris 島西部 Scarista の変閃緑岩を貫くシュードタキライト脈

瞬時に形成したものであるもので、その年代が正確に決定できれば、断層活動即ち地震活動のパルスの1つが求まることが期待される。

Sibson (1977b) は、Outer Hebrides Thrust 沿いのシュードタキライト12試料につき、そのK-Ar 全岩年代を求めた(測定はD. Rex, S. Moorbathによる)。その結果、年代値は442~2056 Maの間で大きくばらつき、原岩の年代と一致するものから、カレドニア造山期を示すものまでである。この点については、シュードタキライト形成時の温度(1,000°C以上)が半減するまでの時間が、最大でも10分前後と短いため、K-Ar 同位体における閉鎖系が多かれ少かれ保たれたことによるものと考えられている。Peterman & Day (1989) は Superior 地域西方の始生代の横ずれ断層に沿ったシュードタキライトにつき Rb-Sr 全岩アイソクロン年代を求めた。その結果、2つの断層沿いから得られたプロットは各々ほぼ一直線上に乗り、両者は誤差範囲内でほぼ一致し、1947±23 Ma という値を得ている。この値は、シュードタキライト形成を伴う初期原生代の再活動の時期を示すと考えられた。Seward & Sibson (1985) は、ニュージーランド Alpine 断層のシュードタキライトを構成するガラスのフィッシュントラック年代を求めた。その結果、0.43±0.17 Ma という値が得られている。一方、シュードタキライトの古地磁気年代の測定が Hoar & Seyfert (1981), Piper (1981), Piper & Poppleton (1988) 等により求められている。Piper & Poppleton (1988) によると、Outer Hebrides Thrust 沿いのシュードタキライトには、原生代中期とカレドニア造山期を示すものが得られている。

成因

a) 内的成因論

シュードタキライトの成因として、古くから2つの対立する意見がある。その1つはシュードタキライト脈の一部ないし全体が摩擦熱により融解—急冷の過程を経て形成したという考え(例えば Philpotts, 1964; Sibson, 1975; Allen, 1979; Maddock, 1983; Macaudière et al., 1985; Maddock et al., 1987; Toyoshima, 1990), もう1つは、粉碎作用により著しく細粒化して形成したもので、融解の証拠は見られないとする考え方(Waters & Campbell, 1935; Wenk, 1978; Wenk & Weiss, 1982; Masch et al., 1985)である。後者はどちらかといえば少数派の意見なので、その論点とそれに対する反論について、かいつまんで述べてみたい。

Wenk (1978) は、オーストラリアの Musgrave ranges, Outer Hebrides Thrust そして北イタリアの Insbruck Line から得られたシュードタキライトについ

て透過型電子顕微鏡(TEM)による観察を行なった。その結果、それらは微小な再結晶粒子からなり、鉱物内の変形が著しく転位密度も大変高い反面、ガラスや脱ガラス作用の存在は極めて稀であることを示した。それに基づき、シュードタキライトの成因が摩擦熱融解によるという考え方に疑問を投じた。また、Wenk はその形成場として、地殻中部~深部まで考えているが、それに対する反論が Goode, Watts & Williams (1979) によってなされている。その後、Wenk & Weiss (1982) は、Musgrave ranges のシュードタキライト中に Al 富む輝石を見だし、その存在から 3 GPa という衝撃変成作用の領域の圧力のもとで形成したと考えた。そして彼らは、摩擦熱融解説に代わるシュードタキライトの形成機構として、そのような高圧力のもとでの衝撃粉碎機構を提示した。さらに Weiss & Wenk (1983) は斑孺岩の変形実験を行ない、2.0~4.0 GPa といった高い差応力のもとでシュードタキライトによく似た脈を作り上げた。その脈にはガラスが確認されているが、それが diaplectic glass (融解を伴わずに衝撃波によって形成した非晶質物質)と区別がつかないことを述べている。ただし、この様な異常に高い応力が地殻内の断層活動で生じ得るか否かについては、今後の課題として残されている。

Masch et al. (1985) はネパール Langtang とオーストリア Köfels の巨大な地滑りに伴って分布する hyalomylonite (シュードタキライト) について TEM 観察と X 線解析を行なった結果、ガラスの存在を明かにし、摩擦熱融解の存在を示した。Masch らは議論の中で、地滑り面上に生ずる摩擦熱融解は、非常に大きな変位速度(50m/sec)によって生じ、断層面での変位速度(数10cm/sec)はそれに比べると極めて遅いので、シュードタキライトと地滑りに伴う hyalomylonite の成因は同じではないことを主張している。これに対し Maddock (1986b) は Sibson (1975) を引用し次のように反論した。いま、単位面積あたりの摩擦熱発生率 Q は、

$$Q = \tau_f v \quad (1)$$

で与えられるここで τ_f は平均剪断摩擦強度、 v は平均変位速度である。もし滑り面が水平であるとすると、

$$\tau_f = \mu_k \sigma_n = \mu_k \rho g z \quad (2)$$

で表される。ここで μ_k は動摩擦係数、 σ_n は垂直応力、 ρ は密度、 g は重力加速度、 z は断層面の深度である。従って、摩擦熱発生率は変位速度のみならず剪断摩擦強度または滑り面にかかる垂直応力が効いて来るので、地表での現象(深度数100m以内)である地滑りに対し、地下数kmで活動する断層運動でも十分融解を促すだけの摩擦熱が発生しうるとした。

融解の証拠として、ガラスの存在は重要である。しかし、通常新第三紀よりも古い岩石中のガラスの存在はまれであり、多少なりとも脱ガラス作用を被っている。シュードタキライトのなかで TEM による観察でガラスの存在を示している例として、Alpine 断層沿いのものがある (Sibson et al., 1981)。このガラスの形成時期は上述のように 0.43Ma と極めて新しい。もっとも、これまで報告されているガラス質物質は火山岩が主であるので、熱水変質を伴うことが多く、もし熱と水の影響の無いところでは、ガラスはかなり安定である (Marshall, 1961)。Philpotts & Miller (1963) は、先カンブリア時代のシュードタキライト中にガラスの存在を報告しており、脱ガラス作用を免れていることから、その形成以後温度が 200°C を越えなかったものと推定している。

衝撃波による diaplectic glass は別にしても、融解を経ずに粉碎のみによってもガラス質物質が生ずることは実験的に知られている (鳥津, 1962)。それによると、石英を長時間乾式磨砕した結果、結晶の構造が乱され、非晶質シリカに変化することが確認されている。断層活動による粉碎によって、どの程度まで鉱物が細粒化するかは今後の課題であるが、ガラスの存在が必ずしも融解の証拠とはなり得ない可能性もある。

もう 1 つの融解の証拠としてしばしばあげられるのは、すでに述べたようにマイクロライト、樹枝状、球顆状、気孔、杏仁状、急冷周縁相、融食縁といった組織である。

それらのうちマイクロライトや球顆状組織は変成作用でも生じ得る (Waters & Campbell, 1935; Masch et al., 1985) として、それらが融解の証拠にはなり得ないという反論がある。しかしその様な形態を示す変成鉱物は限られており、例えば口絵写真 3 に示したような組織は明かに融解—急冷を示すものであろう (Lofgren, 1974 参照)。

以上述べてきた点を総括すると、シュードタキライト

の成因を粉碎機構のみに当てはめることは難しい。たとえ融解を示すような組織やガラスの存在が無かったとしても、Francis (1972) も述べているように、流体を含まない粉体のみの挙動で、断層脈から分岐した形態を示す注入脈が生じ得るのであろうか? という疑問が生ずる。

これまで述べてきたように、シュードタキライトの成因論は融解か、粉碎かという二元論に集中してきたきらいがある。しかし、シュードタキライトは通常粉碎破片と基質部からなり、従来の多くの観察結果や筆者が観察した Outer Hebrides Thrust 沿いのシュードタキライトでは、明かに融解を示す組織を持つものでも、必ず粉碎破片を伴っている。従って、融解か、粉碎かという議論は意味がなく、むしろ粉碎に伴って融解が部分的にせよあったか無かったかという議論をすべきであろう。

融解—急冷を経たものと粉碎のみによるものとは全く形成機構が異なるので、本来の定義に従えば、シュードタキライトという語は何等かの融解の証拠が得られたものに対して限定すべきであり、全く融解の証拠が無いものについてはウルトラカタクラサイトと呼ぶべきである。しかし、これまで述べてきたように、野外はもとより薄片でも両者を区別するのが困難な場合がある。従って、岩石名をつける場合は両者を含めざるを得ないであろう。以上をふまえ、第 1 表にシュードタキライトの分類を示す。

b) 形成条件

次にシュードタキライトの形成条件について述べてみよう。dry な条件の場合、摩擦すべりによる温度上昇 ΔT は次式で与えられる (Sibson, 1975)。

$$\Delta T = \frac{Q}{k} \sqrt{\frac{Kd}{\pi v}} = \frac{\mu_k \rho g z}{k} \sqrt{\frac{Kd v}{\pi}} \quad (3)$$

ここで K は熱拡散率、 k は熱伝導度である。ここで一般的な定数を与え、深度 5km の断層につきすべり速度 v を

第 1 表 シュードタキライトの分類 (Classification of pseudotachylite)

外因 内因	摩擦型		衝突型
	断層型 Fault-generated	地滑り型 Landslide-generated	Impact-generated
融解型 partially or totally fused with crushing	断層—融解型 Fault-fused type	地滑り—融解型 Landslide-fused type	衝突—融解型 Impact-fused type
粉碎型 crushed only	断層—粉碎型 Fault-crushed type	地滑り—粉碎型 Landslide-crushed type	衝突—粉碎型 Impact-crushed type

50 cm/s とすると、 $\Delta T \sim 800^\circ\text{C}$ といった値が得られる。

上式は融解開始の領域でのみ意味を持つので、変位量 d は最も薄い断層脈について得られた値 0.5 cm に見積っている (Sibson, 1975)。一方、注入脈を平板と仮定した場合、その中心部における温度の半減期については、

$$t_{\frac{1}{2}} = 0.27 a^2 K^{-1} \quad (4)$$

という式で与えられる。ここで a は脈の幅である。いま $K = 0.007 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ とすると、幅 1cm の脈の場合温度半減期は 40 秒となる (Sibson, 1975)。従って、大部分の脈は数分以内で冷却すると考えられる。

摩擦熱の発生については、多くの理論的研究 (McKenzie & Brune, 1972; Cardwell et al., 1978; Lachenbruch, 1980; Sibson, 1980b; Mase & Smith, 1985) がある。一方、実験的に摩擦熱を発生させ、ガラスの存在を報告したものとして、Friedman et al. (1974), Jackson & Dunn (1974), Weiss & Wenk (1983); Spray (1987, 1988) がある。また、ボーリングや掘削を通して人工的に発生した摩擦部分よりガラスの存在が報告されている (Bowen & Arousseau, 1923; Spray, 1989; Killick, 1990)。これらの実験で、融解は $800^\circ\text{C} \sim 1700^\circ\text{C}$ といった温度で生じている。シュードタキライトの融解温度も、その組成から 1100°C (Outer Hebrides Thrust: Sibson, 1975) や 750°C (Alpine Fault Zone: Wallace, 1976) といった値が見積られている。Toyoshima (1990) は、複輝石マイクロライトの地質温度計から、 1100°C といった融解温度を見積っている。ただし、断層のすべりに伴う粉碎—細粒化や、含水鉱物からの水の放出などにより、融点が低下する可能性が高いので、厳密に融解温度を求めるのは難しい (Cardwell et al., 1978; Allen, 1979)。

シュードタキライトの形成深度については、ガラスや急冷組織の存在と、粉碎作用を伴っていることから、地殻浅所であることは疑う余地がない。Sibson (1975) はシュードタキライトの形成深度については、地震を伴う深度 10km 以内 ($T < 250^\circ\text{C}$) の領域であり、断層の応力—摩擦強度の解析から 4~5km の可能性が高いとした。Allen (1979) はシュードタキライト中のガラスの存在から、その形成深度が 5 km を越えることはないとした。Seward & Sibson (1985) は、アルパイン断層のシュードタキライトのフィッシュトラック年代から、第四紀の隆起速度 (5 mm/年) と地温勾配 ($25 \sim 30^\circ\text{C}/\text{km}$) を仮定して、シュードタキライトの形成深度を約 2.2 km とした。Maddock et al. (1987) は、グリーンランドのシュードタキライト中の気孔の体積比と H_2O , CO_2 の溶解度の圧力依存性 (Macpherson, 1984) から、その形成深度を 1.6km と見積った。Toyoshima (1990) は、安山岩質マグマ中の水の溶解度から、噴帯のシュードタキライ

トの形成深度を 4 km と見積った。以上をまとめると、シュードタキライトの形成深度は 1~5km の間であるというのが大半の研究者の意見の一致する所である。これは断層の断面 (Sibson, 1977 a) を考えた場合、完全に脆性的な領域であり、マイロナイトの形成深度 ($> 10 \sim 15 \text{ km}$) とシュードタキライトの形成場にはギャップがあると考えざるを得ない。Outer Hebrides Thrust をはじめ、多くの断層では、シュードタキライトはマイロナイトと密接に伴っており、断層脈は多くの場合マイロナイトの面構造に平行である。しかし、この点は、必ずしもマイロナイトとシュードタキライトが同時に形成したということの意味ではない。これまでの多くの報告では、シュードタキライトは、マイロナイト形成以降の脆性領域における変形であることが明らかにされている (例えば Allen, 1979; Ermanovics et al., 1972; Sibson, 1977 a)。筆者の観察した Outer Hebrides Thrust の場合、注入脈は明らかにマイロナイト面構造を切っており、シュードタキライトが集中している場所とマイロナイト化の最も強い場所が必ずしも一致してはいない。

これに対し、シュードタキライトがウルトラマイロナイトに移化しているという注目すべき報告がある (Sibson, 1980 a; Passchier, 1982)。Passchier (1982) はピレネー山脈 Saint Barthelemy Massif に分布するウルトラマイロナイトの細脈の少なくとも一部が、変形し面構造を有するシュードタキライト脈から生々したことを明らかにした。変形時の条件は緑色片岩相高温部 ($450 \sim 550^\circ\text{C}$) で、石英中の流体包有物中の CO_2 濃度から圧力は 2~3.5 kb と見積られている (Passchier, 1984 b)。それによると、シュードタキライトの形成深度は、10km 前後あるいはそれ以上の場合もあり得ることになる。Hobbs et al. (1986) も、オーストラリア中部 Redbank 剪断帯でマイロナイトと密接に伴うシュードタキライトを報告しており、少なくとも一部のシュードタキライトは塑性流動していることを示した。これらの報告から、シュードタキライトとマイロナイトの形成深度に重複した領域が存在する可能性があり、今後さらに詳しい検討が期待される。

2. 地滑りに伴うシュードタキライト (模式地: オーストリア Köfels)

既に述べたように、摩擦熱融解の証拠は、断層のみならず巨大地滑りでも報告されている。その有名な例として、ネパールヒマラヤのカトマンズ北方 Langtang (Mansch & Preuss, 1977) と、オーストリア・インスブルック西方の Köfels (Preuss, 1974; Erismann, 1979) があげら

れている。Langtang のシュードタキライト (hyalomylonite) はかつて Scott & Drever (1953) がスラストに伴うものと考え、摩擦熱融解によって形成したガラスを最初に記載したものとして有名である。Masch et al. (1985) によると、地滑り面の直径は約 4 km、移動量の水平成分は 2.2 km におよぶ。地滑りの時期は氷河地形の証拠から少なくとも 2.5~3 万年前であると推定されている。

一方、Köfels は、Preuss (1974) によって初めて地滑りによる摩擦熱融解説が提唱された場所である。地滑り面の直径は約 5 km、地滑りの時期は ^{14}C から 8710 年前であるとされている。Langtang の地滑りがかつてはスラストと考えられたのに対し、Köfels の地滑りに伴うガラスは、火山活動、あるいはもう一つのシュードタキライトの外的要因である隕石の衝突によってもたらされた (Storzer et al., 1971; Kurat & Richter, 1972; Tollmann, 1977) と考えられてきた点、大変興味深い。ただし、Köfels 地域で隕石の衝突の明確な証拠はあがない (Preuss, 1974; Masch et al., 1985)。Masch et al. (1985) は Langtang の地滑りにともない、圧力 20 MPa のもとのシリカガラスの存在から、その生々温度を少なくとも 1520°C と見積っている。

地滑りに伴うシュードタキライトと、断層帯に伴うシュードタキライトの成因論の対比については、前項でも述べた。Sibson (1975) は断層に伴うシュードタキライト形成の条件として、dry な環境をあげている。これは、構造水として鉱物中に含まれる水については含めていない。融解が黒雲母などの含水鉱物から優先的に進むことは、既に述べた通りである。むしろ問題は間隙水の存在であり、特に地滑りの場合、間隙水の存在の可能性が高いので、摩擦熱発生に関してはそれを考慮に入れる必要がある。即ち、滑り面内の間隙水圧の上昇は、剪断強度の低下をもたらすので、温度上昇率も低下させる (Voight & Faust, 1982)。Langtang と Köfels の地滑りは、母岩がそれぞれミグマタイトと片麻岩であり、生々したガラス中の水が少なく (Scott & Drever, 1953; Masch et al., 1985)、変質も報告されていないので、dry な環境であったと思われる。両者は、その規模の大きさから考えても、摩擦熱融解を伴った地滑りのまれな例であると言えるかも知れない。

3. 衝突に伴うシュードタキライト (模式地: 南アフリカ Vredefort 環状構造)

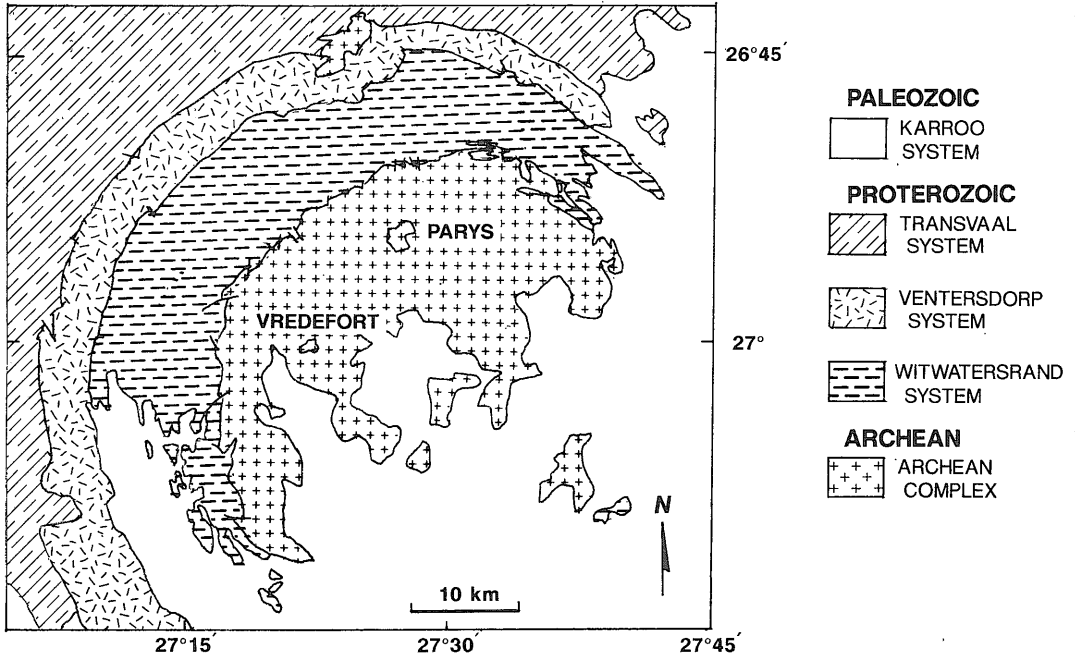
衝突に伴うシュードタキライト (“Astrobleme pseudotachylite”) についての研究は、南アフリカ Vredefort 環

状構造に集中している (Shand, 1916; Hall & Molengraaff, 1925; Willemse, 1937; Diez, 1961; Bisschoff, 1962; Wilshire, 1971; Schreyer & Abraham, 1978; Schwarzman et al., 1983; Reimold et al., 1985, 1990; Fricke et al., 1990 など)。Vredefort 環状構造以外では、カナダの Charlevoix 環状構造 (Rondot, 1968)、フランスの Rochechouart クレーター (Reimold et al., 1987)、ナミビアの Roter Kamm クレーター (Reimold & Miller, 1989) などの隕石孔からシュードタキライトの産出が報告されている。Shand (1916) によるシュードタキライトの最初の定義は、Vredefort 地域の研究によってなされた。従って、ここで Vredefort 地域のシュードタキライトについて、少し詳しく述べてみたい。

Vredefort は南アフリカの首都ヨハネスブルグの南西約 100 km に位置する。Vredefort 環状構造は、直径約 100 km に達し、地球上で最も大きい cryptoexplosion 構造であるとされている。始生代の花崗岩を中心とするドーム状構造をなし、外側に向かって原生代の Witwatersrand 系の堆積岩、Ventersdorp 系の安山岩類そして Transvaal 系の堆積岩が取り巻き、その南半部は石炭紀 Karroo 系の堆積岩に覆われている (第 2 図)。Vredefort 環状構造が、隕石の衝突の跡であると考えられるようになった証拠として、シャッターコーンの存在 (Diez, 1961)、coesite および stishovite の産出 (Martini, 1978)、石英中の高压を示す変形ラメラの存在 (Lilly, 1981; Grieve et al., 1990) などがあげられている。

Vredefort 地域のシュードタキライトの産状は、脈状、ネットワーク状、角礫状などを示し (Shand, 1916)、すでに述べた断層沿いのシュードタキライトの産状とよく似ている。脈の幅は 1 mm から 20 m に至る。このシュードタキライトは、母岩の化学組成との類似性 (Shand, 1916; Willemse, 1937; Hall & Molengraaff, 1925; Wilshire, 1971) と多くの脈が母岩中に孤立して存在すること (Diez, 1961) から、自家生産であることが示されている。しかし、断層に伴うシュードタキライトと異なる点として、Vredefort 地域のシュードタキライトの母岩には全く剪断の影響が見られない点があげられている (Shand, 1916)。

Vredefort 地域のシュードタキライトの組織は、断層沿いのシュードタキライトの組織と同様である。融解の証拠となるような組織として、マイクロライト、球顆状組織、急冷周縁相、融食縁などが知られている (Shand, 1916; Bisschoff, 1962)。しかし、そのような融解を示す証拠はむしろまれで、多くの場合は粉碎—細粒化といった機械的な機構が優勢であるとされている (Wilshire, 1971; Schwarzman et al., 1983)。



第2図 Vredefort 環状構造の地質概略図 (Grieve et al., 1990, Fig. 1 より作成).

Vredefort 地域のシュードタキライトの成因論としては、様々な説が提示されている。Shand (1916) は、剪断作用によるものではなく、地下深部での爆発的なイベントもしくは gas-fluxing というような機構を考えた。Bischoff (1962) は貫入岩体からもたらされたガスの注入により形成した、貫入性の凝灰岩 (tuffsite) の一種であるとした。それに対し Diez (1961) は、隕石の衝突により 10 GPa 余りの圧力によって生じた “shock impactite” であるとし、衝撃による融解を示唆した。Wilshire (1971) も、シュードタキライト中に存在する高圧型変形ラメラや、シャッターコーン構造を有する岩片の存在などから、衝突に関係した衝撃変形により形成したと考えた。Schwarzman et al. (1983) は、衝突にひき続く構造運動に伴ったカタクレーシスによって形成したと考えた。Fricke et al. (1990) はシュードタキライトの母岩中の石英に見られる面構造から、その形成条件を 7.5~10 GPa 以上と見積った。また、流体包有物の研究から、シュードタキライトは diaplectic glass の再結晶したものとみなした。

この様に、近年多くの研究者は、Vredefort 地方のシュードタキライトの成因を隕石の衝突に関係づけているが、異論もある。Schreyer & Abraham (1978) は、シュードタキライトと母岩の変成作用の研究から、シュードタキライトは母岩の変成時に混入したもので、隕石の衝突ではなくむしろ Vredefort 内部の高歪速度の変形に

よって形成したと考えた。また、Reimold et al. (1990) はシュードタキライトの $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代測定から、Vredefort 地方のシュードタキライトは、単一の catastrophic なイベントで形成したものではなく、2.2~1.1 Ga の間で何回かの地震を伴う変形によって形成した可能性を示した。

以上のように、Vredefort 環状構造のシュードタキライトの成因については、研究者の間で必ずしも意見が一致してはおらず、今後さらに詳細な検討が必要であろう。

おわりに

これまで述べてきたように、19世紀初頭に認定されたシュードタキライトの成因論については、様々な意見が出されており、おそらく今後ともこの特殊な岩石の成因論について議論が続くものと思われる。わが国では、シュードタキライトのまとまった研究は Toyoshima (1990) による日高帯からの報告が最初であるが、そのほかの地域からもその産出が認められており (例えば林, 1989)、今後その発見が相次ぐものと思われる。シュードタキライトの研究は地震を伴う断層活動の形成場や形成時期を考察する上で大変重要であり、今後の研究が期待される。

謝辞：本解説は、筆者が 1989 年夏に Outer Hebrides

Thrust を訪れ、多くのシュードタキライト脈を観察したことがきっかけとなった。当地を案内していただいた M. Lailey 博士、Tiree 島の試料を提供していただいた A. J. Barber 博士に厚く御礼申し上げる。なお、口絵写真 3 (1), (2) に掲げた試料 (HT89072701 a) は、地質標本館に寄贈された。

文 献

- Allen, A. R. (1979): Mechanism of frictional fusion in fault zones. *J. Struct. Geol.*, **1**, 231-243.
- Andriessen, P. A. M., Boelrijk, N. A. I. M., Hebeda, E. H., Priem, H. N. A., Verdurmen, E. A. T. and Verschure, R. H. (1979): Dating the events of metamorphism and granitic magmatism in the Alpine Orogen of Naxos (Cyclades, Greece). *Contrib. Mineral. Petrol.*, **69**, 215-225.
- Barrière, M. (1976): Flowage differentiation: limitation of the "Bagnold effect" to the narrow intrusions. *Contrib. Min. Petrol.*, **55**, 139-145.
- Beckholmen, M. (1982): Mylonites and pseudotachylites associated with thrusting of the Köli Nappes, Tännforsfältet, central Swedish Caledonides. *Geol. Fören. Stockh. Förh.*, **104**, 23-32.
- Bisschoff, A. A. (1962): The pseudotachylite of the Vredefort dome. *Geol. Soc. South Africa Trans.*, **65**, 207-230.
- Bowen, N. L. and Aourousseau, M. (1923): Fusion of sedimentary rocks in drill-holes. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **34**, 431-448.
- Brandl, G. and Reimold, W. U. (1990): The structural setting and deformation associated with pseudotachylite occurrences in the Palala Shear Belt and Sand River gneiss, Northern Transvaal. *Tectonophysics*, **171**, 201-220.
- Brown, W. L. and Macaudiere, J. (1984): Microfracturing in relation to atomic structure of plagioclase from a deformed meta-anorthosite. *J. Struct., Geol.*, **6**, 579-586.
- Bryn, K. O. (1959): Et funn av pseudotachylitt i S. Trøndelag, og en teori for dannelsen. *Norges Geol. Undersøkelse*, no. 211, 8-17.
- Cardwell, R. K., Chinn, D. S., Moore, G. F. and Turcotte, D. L. (1978): Frictional heating on a fault zone with finite thickness. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **52**, 525-530.
- 地学団体研究会地学事典編集委員会 (1970): 地学事典, 平凡社.
- Clough, C. T. (1888): The geology of the Cheviot Hills. *England and Wales Geol. Surv. Mem.*, 60 p.
- Dashkova, A. D. and Sosedko, T. A. (1981): Veshchestvennyy sostav psevdotakhilitov Ukrainskogo shchita (The composition of pseudotachylites of the Ukrainian Shield). *Byulleten Moskovskogo Obshchestva Ispytateley Prirody, Otdel Geologicheskoy, 56*, 87-96.
- Dietrichson, B. (1953): Pseudotachylit fra de kaledonske skyvesoner i Jotunheimens forgårder, Gudbrandsdalen, og deres dannelsesbetingelser. *Norges Geologiske Undersøkelses (Skrifter)*, **184**, 23-70.
- Dietz, R. S. (1961): Vredefort ring structure: meteorite impact scar? *J. Geol.*, **69**, 499-516.
- Doblas, M. (1987): Paleoseismicity in the Spanish Central Range; evidence from the pseudotachylites. *Geogaceta*, **2**, 47-48.
- Erisman, T. H. (1979): Mechanisms of large landslides. *Rock. Mech.*, **12**, 15-46.
- Ermanovics, I. F., Helmstaedt, H. and Plant, A. G. (1972): An occurrence of Archean pseudotachylite from southeastern Manitoba. *Can. J. Earth Sci.*, **9**, 257-265.
- Francis, P. W. (1972): The pseudotachylite problem. *Comments on Earth Sci., Geophys.*, **3**, 35-53.
- Fricke, A., Medenbach, O. and Schreyer, W. (1990): Fluid inclusions, planar elements and pseudotachylites in the basement rocks of the Vredefort structure, South Africa. *Tectonophysics*, **171**, 169-183.
- Friedman, M., Logan, J. M. and Rigert, J. A. (1974): Glass-indurated quartz gouge in sliding-friction experiments on sandstone. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **85**, 937-942.
- Goode, A. D. T., Watts, M. J., Williams, G. D. and Wenk, H. R. (1979): Comments and reply on 'Are pseudotachylites products of fracture or fusion?' *Geology*, **7**, 162-163.
- Grieve, R. A. F., Coderre, J. M., Robertson, P. B. and Alexopoulos, J. (1990): Microscopic planar deformation features in quartz of the Vredefort structure: Anomalous but still suggestive of an impact origin. *Tectonophysics*, **171**, 185-200.
- Grocott, J. (1981): Fracture geometry of pseudotachylite generation zones: a study of shear fractures formed during seismic events. *J. Struct. Geol.*, **3**, 169-178.
- Gupta, L. N. (1967): Pseudotachylites from central gneisses, Dharmasala, Himalayas. *Indian Mineral.*, **8**, 75-77.
- Hall, A. L. and Molengraaff, G. A. F. (1925): The Vredefort mountain land in the southern Transvaal and the northern Orange Free State. *Koninkl. Akad. Wetensch. Amsterdam Verh.*, **24**, 93-113.
- Hammer, W. (1915): Das Gebiet der Bündnerschiefer im Tirolischen Oberinntal. *Geol. Reichsanstalt. Wien, Jahrb.*, **64**, 443-567.
- Higgins, M. W. (1971): Cataclastic rocks. *Geol. Surv. Prof. Paper*, 687, 97 p.
- Hoar, T. M. and Seyfert, C. K. (1981): Paleomagnetism of pseudotachylites along the Outer Hebrides Thrust zone. *Eos, Trans., Amer. Geophys. Union*, **62**, 270-271.
- Hobbs, B. E., Ord, A. and Teyssier, C. (1986): Earthquakes in the ductile regime? *PAGEOPH*, **124**, 309-336.
- Irouschek, A. and Huber, M. (1982): Pseudotachylite zones in the Leventina gneiss (Leontine Alps, Ticino, Switzerland). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, **62**, 313-325.
- Jackson, R. E. and Dunn, D. E. (1974): Experimental sliding friction and cataclasis of foliated rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **11**, 235-249.
- Jensen, V. (1968): Pseudotachylite in the Agto Area. *Geol. Surv. of Greenland, Rept.*, no. 15, 22-23.
- Killick, A. M. (1990): Pseudotachylite generated as a result of a drilling "burn-in". *Tectonophysics*, **171**, 221-227.
- Killick, A. M., Thwaites, A. M., Germs, G. J. B. and Schoch, A. E. (1988): Pseudotachylite associated with a bedding-parallel fault zone between the Witwatersrand and Ventersdorp Supergroups, South Africa. *Geol. Rundsch.*, **77**, 329-344.
- King, W. and Foote, R. B. (1864): On the geological structure of portions of the districts of Trichonopoly,

- Salem and South Arcot, Madras, included in sheet No. 79 of the Indian Atlas. Mem. Geol. Surv. India, 4, 223-379.
- Kurat, G. and Richter, W. (1972): Impactite von Kölfels. Tirol. Tschermarks Mineral. Petrogr. Mitt., 17, 23-45.
- Lachenbruch, A. H. (1980): Frictional heating, fluid pressure, and the resistance to fault motion. J. Geophys. Res., 85, 6097-6112.
- Lilly, P. A. (1981): Shock metamorphism in the Vredefort collar: Evidence for internal shock sources. J. Geophys. Res., 86, 10689-10700.
- Lofgren, G. (1974): An experimental study of plagioclase crystal morphology: isothermal crystallization. Am. J. Sci., 274, 243-273.
- Macaudière, J. and Brown, W. L. (1982): Transcrystalline shear fracturing and pseudotachylite generation in a meta-anorthosite (Harris, Scotland). J. Struct. Geol., 4, 395-406.
- Macaudière, J., Brown, W. L. and Ohnenstetter, D. (1985): Microcrystalline textures resulting from rapid crystallization in a pseudotachylite melt in a meta-anorthosite. Contrib. Miner. Petrol., 89, 39-51.
- Macculloch (1800): A Description of the Western Island of Scotland. London, Hurst Robinson & Co.
- Macpherson, G. J. (1984): A model for predicting the volumes of vesicles in submarine basalts. J. Geol., 92, 73-82.
- Maddock, R. H. (1983): Melt origin of fault-generated pseudotachylites demonstrated by textures. Geology, 11, 105-108.
- Maddock, R. H. (1986 a): Partial melting of lithic porphyroclasts in fault-generated pseudotachylites. Neues Jb. Miner. Adh., 155, 1-14.
- Maddock, R. H. (1986 b): Frictional melting in landslide-generated frictionites (hyalomylonites) and fault-generated pseudotachylites—Discussion. Tectonophysics, 128, 151-153.
- Maddock, R. H., Grocott, J. and Van Nes, M. (1987): Vesicles, amygdales and similar structures in fault-generated pseudotachylites. Lithos, 20, 419-432.
- Magloughlin, J. F. (1989): The nature and significance of pseudotachylite from the Nason terrane, North Cascade Mountains, Washington. J. Struct. Geol., 11, 907-917.
- Marshall, R. R. (1961): Devitrification of natural glass. Geol. Soc. Am. Bull., 72, 1493-1520.
- Martini, J. E. J. (1978): Coesite and stishovite in the Vredefort Dome, South Africa. Nature, 272, 715-717.
- Masch, L. (1973): Untersuchung der Aufschmelzung und Deformation der Pseudotachylite der Silvretta (Österreich, Schweiz). Neues Jb. Miner. Mh., 11, 485-509.
- Masch, L. and Preuss, E. (1977): Das Vorkommen des Hyalomylonits von Langtang, Himalaya (Nepal). Neues Jahrb. Mineral., Abh., 129, 292-311.
- Masch, L., Wenk, H. R. and Preuss, E. (1985): Electron microscopy study of hyalomylonites—evidence for frictional melting in landslides. Tectonophysics, 115, 131-160.
- Mase, C. W. and Smith, L. (1984/85): Pore-fluid pressures and frictional heating on a fault surface. PAGEOPH, 122, 583-607.
- McKenzie, D. and Brune, J. N. (1972): Melting on fault planes during large earthquakes. Geophys. J. R. Astr. Soc., 29, 65-78.
- Park, R. G. (1961): The pseudotachylite of the Gairloch district, Ross-shire, Scotland. Am. J. Sci., 259, 542-550.
- Passchier, C. W. (1982): Pseudotachylite and the development of ultramylonite bands in the Saint-Barthélemy Massif, French Pyrenees. J. Struct. Geol., 4, 69-79.
- Passchier, C. W. (1984a): The generation of ductile and brittle shear bands in a low-angle mylonite zone. J. Struct. Geol., 6, 273-281.
- Passchier, C. W. (1984b): Fluid inclusions associated with the generation of pseudotachylite and ultramylonite in the French Pyrenees. Bull. Minéral, 107, 307-315.
- Peterman, Z. E. and Day, W. (1989): Early Proterozoic activity on Archean faults in the western Superior Province—Evidence from pseudotachylite. Geology, 17, 1089-1092.
- Philpotts, A. R. and Miller, J. A. (1963): A Pre-Cambrian glass from St. Alexis-des-Monts, Quebec. Geol. Mag., 100, 337-344.
- Philpotts, A. R. (1964): Origin of pseudotachylites. Am. J. Sci., 262, 1008-1035.
- Pichamuthu, C. S. (1959): Trap-shotten rock from the Biligirirangan Hills, Mysore State, India. Nature, 183, 483-484.
- Piper, J. D. A. (1981): Palaeomagnetism of pseudotachylites from the Ikertoq shear belt, and their relationship to the kimberlite-lamprophyre province, central-west Greenland. Geol. Soc. Den., Bull., 30, 5161 p.
- Piper, J. D. A. and Poppleton, T. J. (1988): Paleomagnetic dating of pseudotachylite formation in the Lewisian Complex. Scott. J. Geol., 24, 263-272.
- Preuss, E. (1974): Der Bimsstein von Kölfels im Ötztal/Tirol. Ver. Schutz Alpenpflanzen Tiere, 39, 85-95.
- Reimold, W. U., Andreoli, M. and Hart, R. J. (1985): A geochemical study on pseudotachylite and parent rocks from the Vredefort structure. Meteoritics, 20, 740-742.
- Reimold, W. U., Oskierski, W. and Huth, J. (1987): The pseudotachylite from Champagnac in the Rochecouart meteorite crater, France. J. Geophys. Res., 92, E 737-E 748.
- Reimold, W. U. and Miller, R. McG., (1989): The Roter Kamm impact crater, SWA/Namibia. Proc. Lunar & Planetary Sci. Conf., 19, 711-732.
- Reimold, W. U., Jessberger, E. K. and Stephan, T. (1990): ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of pseudotachylite from the Vredefort dome, South Africa; a progress report. Tectonophysics, 171, 139-152.
- 林 愛明 (1989): 伊那谷南部飯田地域の活断層の ESR および TL 年代測定. 活断層研究 no. 7, 49-62.
- Rondot, J. (1968): Nouvel impact météoritique fossile? La structure semi-circulaire de Charlevoix. Can. J. Earth Sci., 5, 1305-1317.
- Sandiford, M. and Wilson, C. J. L. (1984): The structural evolution of the Fyfe Hills—Khmara Bay region, Enderby Land, East Antarctica. Austral. J. Earth Sci., 31, 403-426.
- Schreyer, W., Abraham, K. (1978): Symplectic cordierite-orthopyroxene-garnet assemblages as products of contact metamorphism of pre-existing basement granulites in the Vredefort Structure, South Africa, and their relations to pseudotachylite. Contrib. Mineral. Petrol., 68, 53-62.

- Schwarzman, E.C., Meyer, C.E. and Wilshire, H.G. (1983): Pseudotachylite from the Vredefort Ring, South Africa, and the origins of some lunar breccias. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **94**, 926-935.
- Scott, J.S. and Drever, H.I. (1953): Frictional fusion along a Himalayan Thrust. *Proc. R. Soc. Edinb.*, **65B**(2), 121-142.
- Seward, D. and Sibson, R.H. (1985): Fission-track age for a pseudotachylite from the Alpine Fault Zone, New Zealand. *New Zealand J. Geol. Geophys.*, **28**, 553-557.
- Shand, S.J. (1916): The Pseudotachylite of Parijs (Orange Free State), and its relation to 'trap-shotten gneiss' and 'flinty crush-rock'. *Q. J. Geol. Soc. Lond.*, **72**, 198-221.
- 島津正司 (1962): 乾式機械磨砕によるシリカ鉱物の構造変化について (I), セキエイについて, 鉱物雑, **5**, 291-310.
- Sibson, R.H. (1975): Generation of pseudotachylite by ancient seismic faulting. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **43**, 775-794.
- Sibson, R.H. (1977a): Fault rocks and fault mechanisms. *J. Geol. Soc. Lond.*, **133**, 191-213.
- Sibson, R.H. (1977b): The Outer Hebrides Thrust: its structure, mechanism and deformation environment. Unpublished Ph. D. thesis, University of London.
- Sibson, R.H. (1980a): Transient discontinuities in ductile shear zones. *J. Struct. Geol.*, **2**, 165-171.
- Sibson, R.H. (1980b): Power dissipation and stress levels on faults in the upper crust. *J. Geophys. Res.*, **85**, 6239-6247.
- Sibson, R.H., White, S.H. and Atkinson, B.K. (1981): Structure and distribution of fault rocks in the Alpine Fault Zone, New Zealand. In: Thrust and Nappe Tectonics, McClay and Price (Eds.), *Geol. Soc. Spec. Pub.*, no. 9, 197-210.
- Sinha-Roy, S. (1981): Pseudotachylite from a thrust zone in mylonitic gneisses of Major Bergen Arc, South West Norway. *Neues Jb. Miner. Abh.*, **141**, 150-160.
- Sinha-Roy, S. and Kumar, G.R.R. (1985): Pseudotachylites of the Bavali fault zone, Cannanore District, North Kerala. *J. Geol. Soc. India*, **26**, 182-190.
- Spray, J.G. (1987): Artificial generation of pseudotachylite using friction welding apparatus: simulation of melting on a fault plane. *J. Struct. Geol.*, **9**, 49-60.
- Spray, J.G. (1988): Generation and crystallization of an amphibolite shear melt: an investigation using radial friction welding apparatus. *Contrib. Miner. Petrol.*, **99**, 464-475.
- Spray, J.G. (1989): Slickenside formation by surface melting during the mechanical excavation of rock. *J. Struct. Geol.*, **11**, 895-905.
- Storzer, D., Horn, P. and Kleinmann, B. (1971): The age and the origin of the Köfels structure, Austria. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **12**, 238-244.
- Swanson, M.T. (1982): Pseudotachylite generation zones of southern Maine and New Hampshire. *Geol. Soc. Am. Abs. W. Prog.*, **17**, 65.
- Swanson, M.T. (1988): Pseudotachylite-bearing strike-slip duplex structures in the Fort Foster Brittle Zone, S. Maine. *J. Struct. Geol.*, **10**, 813-828.
- Termier, P. and Boussac, J. (1911): Sur les mylonites de la région de Savone. *Comptes rendus*, **152**, 1550-1556.
- Thorpe, R.S. (1987): Pseudotachylite from a Precambrian shear zone in the Malvern Hills. *Proc. Geol. Assoc.*, **98**, 205-210.
- Tollmann, A. (1977): *Geologie von Österreich. 1. Die Zentral-Alpen*. Deuticke, Wien, 766 p.
- Toyoshima, T. (1990): Pseudotachylite from the Main Zone of the Hidaka metamorphic belt, Hokkaido, northern Japan. *J. Metam. Geol.*, **8**, 507-523.
- Voight, B. and Faust, C. (1982): Frictional heat and strength loss in some lapid landslides. *Géotechnique*, **32**, 43-54.
- Wallace, R.C. (1976): Partial fusion along the Alpine Fault Zone, New Zealand. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **87**, 1225-1228.
- Waters, A.C. and Campbell, C.D. (1935): Mylonites from the San Andreas Fault zone. *Am. J. Sci.*, **29**, 473-503.
- Weiss, L.E. and Wenk, H.R. (1983): Experimentally produced pseudotachylite-like veins in gabbro. *Tectonophysics*, **96**, 299-310.
- Wenk, H.R. (1978): Are pseudotachylites products of fracture or fusion? *Geology* **6**, 507-511.
- Wenk, H.R. and Weiss, L.E. (1982): Al-rich calcic pyroxene in pseudotachylite: an indicator of high pressure and high temperature? *Tectonophysics*, **84**, 329-341.
- Willemse, J. (1937): On the Old Granite of the Vredefort rigion and some of its associated rocks. *Trans. Geol. Soc. S. Africa*, **40**, 43-119.
- Wilshire, H.G. (1971): Pseudotachylite from the Vredefort Ring, South Africa. *J. Geol.*, **79**, 195-206.
- Yang Zhen, Ying Shihuai, Lin Chuanyong and Yu Libao (1981): The characteristics of fault rocks and earthquake potential proof. *Dizhen Dizhi [Seismology and Geology]*, **3**, 1-14.
- Zhai Chun (1988): Origin of pseudotachylite in ductile shear zones in the northern part of Tongbai, Heinan Province. *Dizhi Lun'ing [Geological Review]*, **34**, 203-212.

TAKAGI Hideo (1991): Pseudotachylite.

<受付: 1990年9月12日>