

## シュードタキライトに含まれる破片の円磨度 — 摩擦熔融起源の証拠として

### Roundness of fragments in pseudotachylytes as an indicator of frictional melting

林 愛明\*  
Aiming Lin\*

**Abstract:** Roundness of fragments in fault-related rocks is a special type of disintegration attributed to attrition and melt. The roundness (Rd) is defined in one plane as  $Rd = \frac{\sum_{i=1}^n (r_i/R)}{n}$ , where  $r_i$  is the radius of curvature of the corner,  $R$  is the radius of the maximum inscribed circle in the plane of measurement, and  $n$  is the number of corners of the fragments in the given plane. Roundness (Rd) is destroyed or diminished by fracturing and chipping, and high degree of roundness is, therefore, often an indication of gentle conditions of wear relative to the size, hardness and toughness of the fragments. The roundness of fragments of quartz and plagioclase included in the melting-originated Fuyun pseudotachylyte, China; Outer Hebrides Pseudotachylyte, Scotland, and the crushing-originated Iida pseudotachylyte and cataclastic rocks were measured and calculated. The measured results show that the roundness (Rd) is lower than 0.4 in the Iida cataclastic rocks and pseudotachylyte, and varies from 0.1 to 0.9 in the Fuyun and Outer Hebrides pseudotachylytes. This suggests that the rounded fragments having higher degree of roundness than 0.5 formed by melting rather than fracturing or chipping, and that the roundness may be used as a melting indicator in pseudotachylytes.

**Key words:** roundness, fragment, pseudotachylyte, cataclastic rock

#### はじめに

第四紀における地震断層活動の存在を示す“化石”は活断層に沿う地形の食い違いや第四紀地層の変位などである。それより古い地質時代における地震断層活動の存在を示す“化石”はシュードタキライトという岩石であることが最近よく知られるようになってきた。この岩石は母岩の急激なせん断作用と関連するので、よく古地震断層活動の指示物として研究されている(例えば: Sibson, 1975; Allen, 1979; Maddock, 1983; Maddock et al., 1987; Toyoshima, 1990; Lin 1991, 1994a, b)。シュードタキライトの成因については、母岩が地震断層運動の衝撃によって形成されたのか(例えば: Wenk, 1978)、地震時の急激な断層運動に伴う摩擦熱によりメルトが形成され、それが粉碎岩片と一緒に破断面に貫入して形成されたのか

(例えば: Philpotts, 1964; Sibson, 1975; Macaudiere et al., 1985; Lin, 1994a, b)について論争が続いてきたが、Lin (1991, 1994a, b) および林・戈(1994)は中国北西部のFuyun断層帯からメルトから急成長を示唆する放射状・樹枝状組織および母岩の岩石よりも遙に高温で安定な鉱物および数10%以上のガラス質のマトリクセスを含むシュードタキライトを報告している。また、熔融による組織としての微晶質(microlite)、気泡・杏仁状構造(vesicle and amygdale)と流動構造(flow structure)および破片の反応縁(reaction margin)などが多くのシュードタキライトに報告されている(例えば: Philpotts, 1964; Sibson, 1975; Wallace, 1976; Allen, 1979; Maddock, 1983; Maddock et al., 1987; Toyoshima, 1990; Magloughlin, 1992)。これはシュードタキライトは熔融起源によるものであることを示している。一方、見かけ上熔融起源のシュードタキライトに似た粉碎起源のシュードタキライトも報告されている(林ほか, 1994; Lin, 1996, 1997)。

現在までに報告されているシュードタキライトは、

1996年11月5日受付。1997年2月24日受理。

\*神戸大学理学部

Faculty of Science, Kobe University, Kobe, 657 Japan

粉碎起源のものにせよ、熔融起源のものにせよ、必ず粗粒破片と細粒基質部から構成される。円磨状 (rounded) または湾曲状 (embayed) 破片が多くのシュードタキライトに報告されており、熔融起源の根拠の1つとして挙げられている (例えば: Shand, 1916; Philpotts, 1964; Sibson, 1975; Wallace, 1976; Allen, 1979; Maddock, 1983; Lin, 1991, 1994a, b; Magloughlin, 1992;). しかし、これらの記載はほとんど定性的なもので、定量的評価が行われていない。

そこで、この小論では碎屑礫または粒子の円磨度の概念を導入して、熔融起源の Fuyun シュードタキライト、Outer Hebrides シュードタキライトおよび粉碎起源の飯田シュードタキライトと断層破碎岩に含まれた破片の円磨度の解析を行った。また、破片の円磨度をシュードタキライトの熔融起源の指標としてあつかうことの可能性について考察する。

### 円磨度の分析

礫を含む堆積物・堆積岩の運搬および堆積環境の推定に、岩片や岩塊の円磨度 (Wadell, 1932) がよく用いられている (地学団体研究会, 1983)。小論では Wadell (1932) に従い、Fig. 1 に示すように平面で観察した礫または粒子のすべての角に内接する円の半径を平均したものを内接する最大の円の半径で割った値を円磨度とする。

すなわち、

$$\text{円磨度 (Rd)} = \frac{\sum_{i=1}^n (r_i/R)}{n}$$

$r_i$  は礫 (または粒子) のすべて (個数  $n$ ) の角に内接す

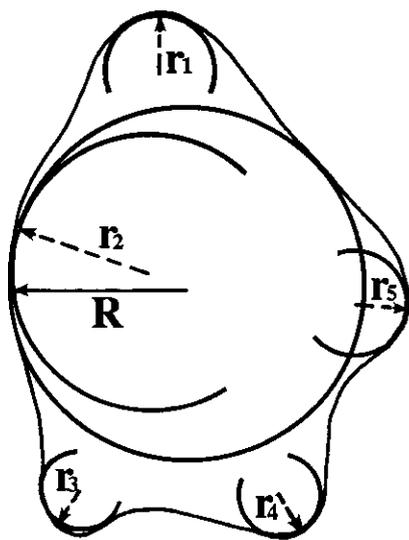


Fig. 1 Illustration of the roundness (Rd) of fragments, where  $r$  is the radius of curvature of the corner and  $R$  is the radius of the maximum inscribed circle in the plane of measurement.

る円の半径;  $R$  は礫 (または粒子) に内接する最大円の半径である。円磨度 (Rd) の最大値は 1.0 となる。また、円磨の形を読み取る円磨度印象図 (Fig. 2) (Krumbein, 1941) を用いて、破片または粒子の形状と見比べて円磨度を求めることもでき、この方法も採用した。

今回、円磨度の測定はよく知られている熔融起源の Fuyun シュードタキライト (Lin 1991, 1994a) (Fig. 3a, b) と Outer Hebrides シュードタキライト (Sibson, 1975) (Fig. 3c, d) および粉碎起源の飯田シュードタキライト (林ほか, 1994; Lin, 1996) (Fig. 4a, b)、カタクレサイト (Fig. 4c) と断層マイクロプレッチャ (fault microbreccia, Fig. 4d) について行った。この 3ヶ所の母岩はすべて花こう岩類であり、主に石英と長石から構成される。破片の円磨度は同一条件でも鉱物種に大きく依存することがよく知られている (例えば: Wadell, 1932; Krumbein, 1941)。比較するために鉱物種別に測定するのは望ましいが、顕微鏡下ですべての破片に対して長石と石英を区別するのは難しいので、今回の測定は、Outer Hebrides と飯田シュードタキライトおよび飯田断層破碎岩に対して、この二種類の鉱物を分けずに行った。ガラス質の Fuyun シュードタキライトには石英粒子しか残されていないので (Lin, 1991, 1994a)、石英粒子の測定を行った。

測定は主に偏光顕微鏡の写真および一部 SEM-BSE 像の写真で行った。粒子のサイズにおいては測定の誤差を最小限にするため同画面内にある直径  $10 \mu\text{m}$  ~  $100 \mu\text{m}$  のすべての粒子を測定した。測定した結果から求められた円磨度を Fig. 2 に示した円磨度印象図と見比べて測定ミスがあるかどうかの確認を行った。

測定結果から求められた円磨度の分布を円磨度分布のダイヤグラム (Figs. 5 ~ 9) に示す。Fuyun シュードタキライトの破片の円磨度は 0.1 から 1.0 まで大きく変化しており、0.5 以上の高い円磨度を示すものが破片全体の約 70% 占めている。Outer Hebrides シュードタキライトの破片は 0.1 ~ 0.9 の円磨度の値を示しており、0.5 以上の高い円磨度を示すものは全体の約 20% しかない。飯田シュードタキライトおよびカタクレサイト・断層マイクロプレッチャの破片のすべては 0.4 以下の値を示しており、0.3 以下のものは全体の約 90% を占めている。

### 考 察

カタクレサイトや断層ガウジのような断層破碎岩に含まれる断層角礫や破片はさまざまな形状を示しており、その組織形状はそれぞれの形成環境で受ける異なった営力やプロセスを反映していると考えられる。孫・韓 (1985) は断層破碎帯の断層角礫の形状は断層タイプ (逆断層、正断層と横ずれ断層) と密接な関係があり、逆断層の破碎帯の礫には円磨状のものが多く、正

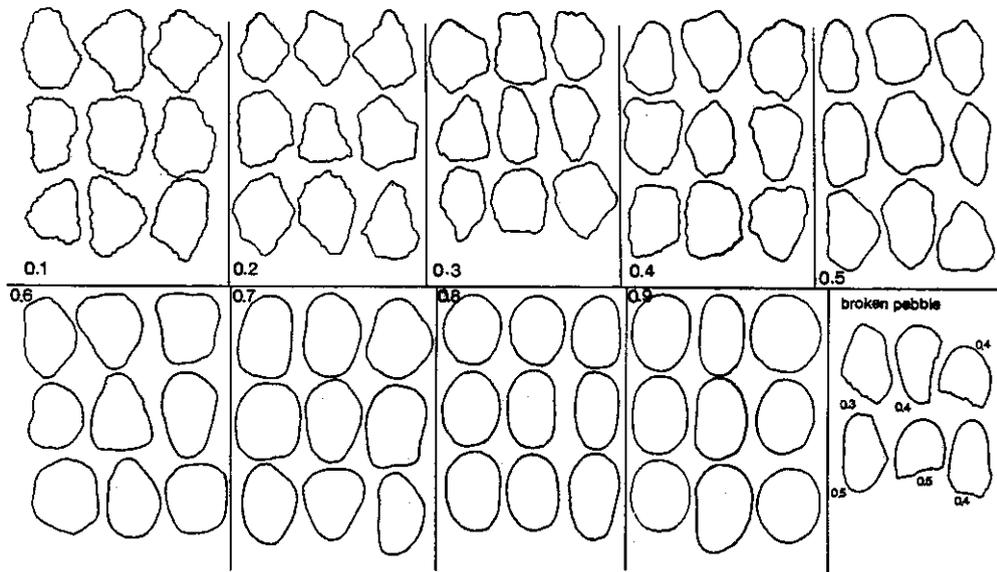


Fig.2 Image graph of the roundness (Rd) of fragments. Value of Rd varies from 0.1 to 1.0.

断層の破碎帯には角礫が多い傾向があると指摘している。このような断層タイプの違いによる断層角礫の円磨度の違いの要因としてはせん断摩擦応力の大きさの違いが考えられる(孫・韓, 1985)。逆断層は、水平圧縮応力場において形成され、断層面に働く垂直応力が大きいと考えられる。このため、断層面における断層摩擦が大きいので断層角礫が円磨されると考えられる。正断層の場合、水平引張り応力場において母岩が破碎されるので、逆断層のものほど摩擦が小さくない。このため、断層角礫があまり強く円磨されないので円礫が少ないと思われる。横ずれ断層の場合、この二者の中間的性質を示す。

碎屑岩の運搬過程やボールミル下での粒子の円磨度は回転を伴う衝突量の違いや礫の岩石種、サイズなどが円磨度に大きく影響する要因として知られている。シェードタキライトに含まれる破片は急激な断層運動に伴う破碎作用により母岩が破碎されて形成したものである。このような破片の円磨度に大きく関わる要因としては破片の鉱物種とサイズのほかに、断層運動による研磨作用と熔融作用などもあると考えられる。

円磨状または湾曲状の破片が摩擦熔融の組織を示す特徴として多くのシェードタキライトに報告されている(例えば, Shand, 1916; Philpotts, 1964; Sibson, 1975; Maddock, 1983; Lin, 1991, 1994a, 1994b)。シェードタキライトに含まれる破片の摩擦熔融による円磨状化のメカニズムとしては、破片の角部は体積あたりの表面積が大きいので、熱エネルギーを吸収しやすいことと、破片内部の等温度分布面は破片の角の周辺部に円形状分布することから破片の角から優先的に熔融することによって、破片が丸くなると考えられる(Sibson, 1975)。ガラス質のFuyunシェードタキ

ライトに含まれている破片のほとんどは石英破片から構成され(Lin, 1991, 1994a), 粉碎起源の飯田シェードタキライトとカタクレーサイトおよびマイクロプレッチャの長石と石英破片より全体的に高い円磨度を示している(Figs. 5~9)。したがって、Fuyunシェードタキライトの中の石英破片は熔融により円磨されたと考えられる。

シェードタキライト形成時の摩擦熔融は、融解および分解温度の低い鉱物が優先的にメルト化することが自然のシェードタキライトまたは実験的な研究により明らかにされている(例えば, Allen, 1979; Maddock, 1983; Maddock et al., 1987; Toyoshima, 1990; Lin, 1991, 1994a, b; 林・嶋本, 1994; Spray, 1987, 1992)。林・嶋本(1994)の実験研究により、花こう岩の摩擦熔融実験研究では、シェードタキライト形成時、母岩にある含水鉱物、雲母や角閃石が優先的に融解し、融点の高い石英は融解しにくいことが報告されている。融点の高い石英破片は融点の低い長石よりも高い円磨度を示すことから、Fuyunシェードタキライトの円磨状(rounded)または湾曲状(embayed)の石英破片は研磨作用によるものではなく、熔融作用によるものと考えられる。

円磨度は粒径(サイズ)と強い相関があり、細粒のものほど円磨されにくい傾向があることが堆積岩の粒子でよく知られている(堆積学研究会, 1989)。断層破碎帯の中に粒径が数cmから数十cmまでの円磨状~亜円磨状断層角礫の存在がしばしば報告される(孫・韓, 1985)が、本研究の断層破碎岩中の径数mmから数 $\mu$ mまでの破碎粒には円磨状粒子の存在がほとんど認められない。Kanaori(1982)は断層ガウジに含まれた石英粒子の表面構造の研究から、石英粒子の表面組織構

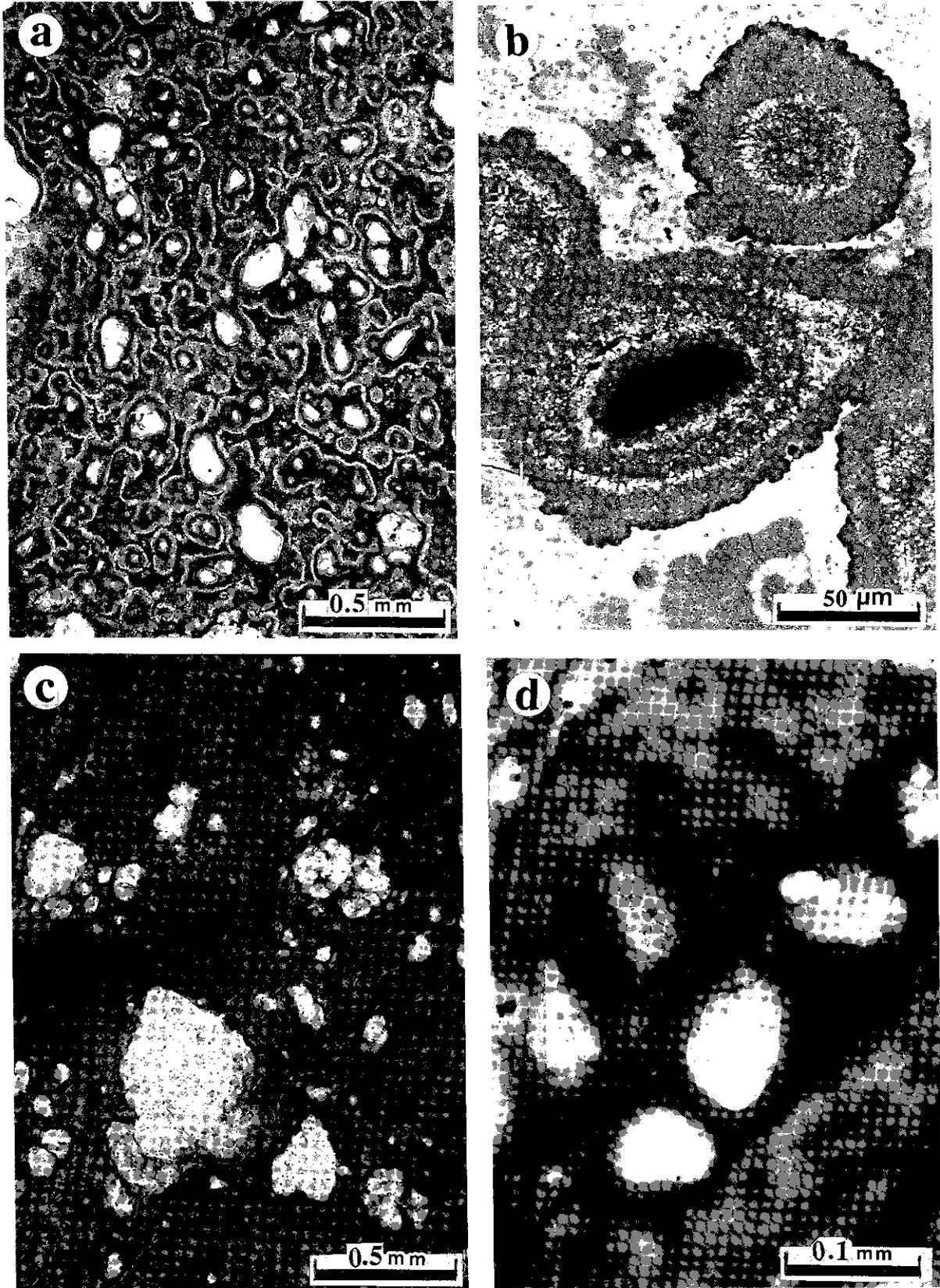


Fig.3 Photomicrographs showing the textures of rounded fragments included in the melting-originated pseudotachylytes. (a) and (b): Fuyun pseudotachylyte, China; (c) and (d): Outer Hebrides pseudotachylyte, Scotland. (a), (c), and (d):plane polarized light. (b):BSE photograph.

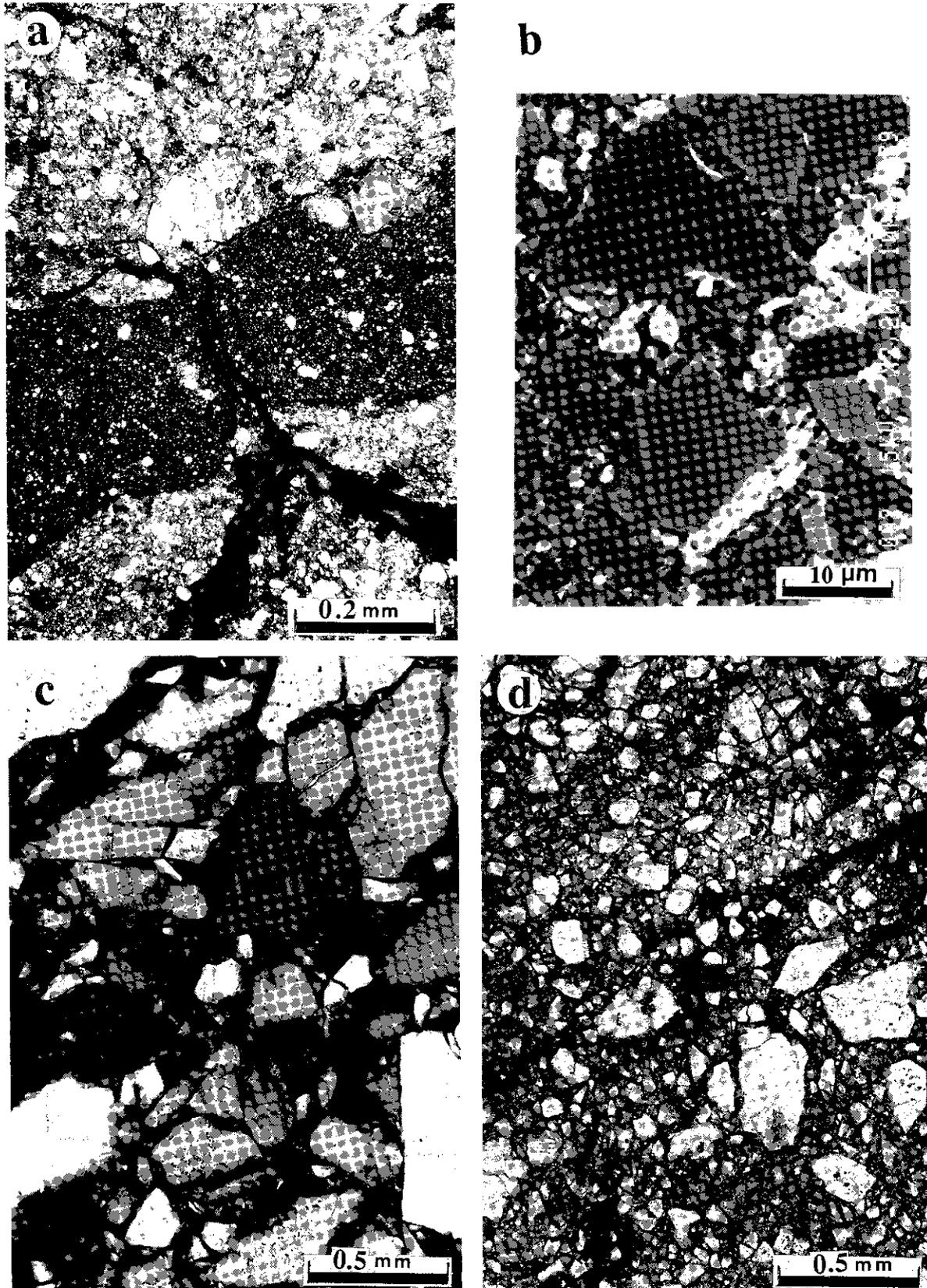


Fig.4 Photomicrographs showing the textures of fragments included in the crushing-originated pseudotachylyte and the cataclastic rocks generated in the Iida-matsukawa fault. (a):pseudotachylyte vein. (b):BSE photograph of pseudotachylyte; (c):cataclasite; (d):fault microbreccia. (a), (b), and (c):plane polarized light.

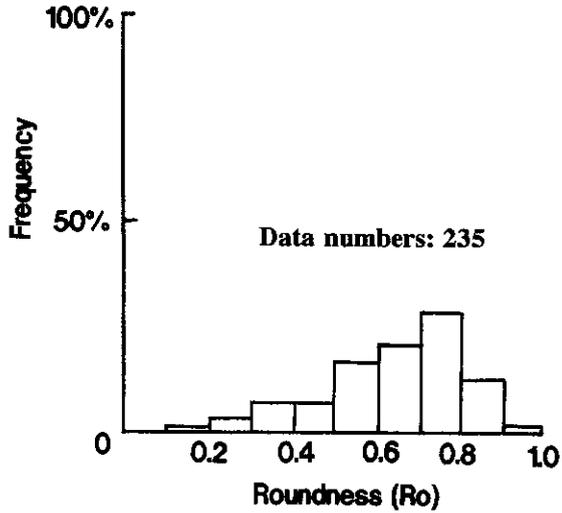


Fig.5 Roundness-frequency diagram showing the roundness of fragments in the Fuyun pseudotachylyte, China.

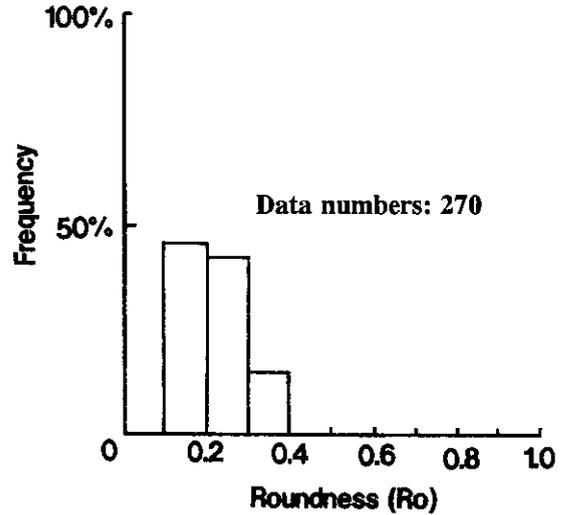


Fig.8 Roundness-frequency diagram showing the roundness of fragments in the cataclastic rocks generated in the Iida-Matsukawa fault.

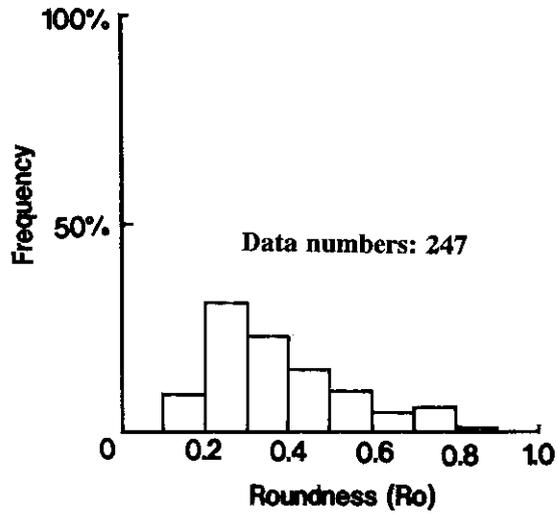


Fig.6 Roundness-frequency diagram showing the roundness of fragments in the Outer Hebrides pseudotachylyte, Scotland.

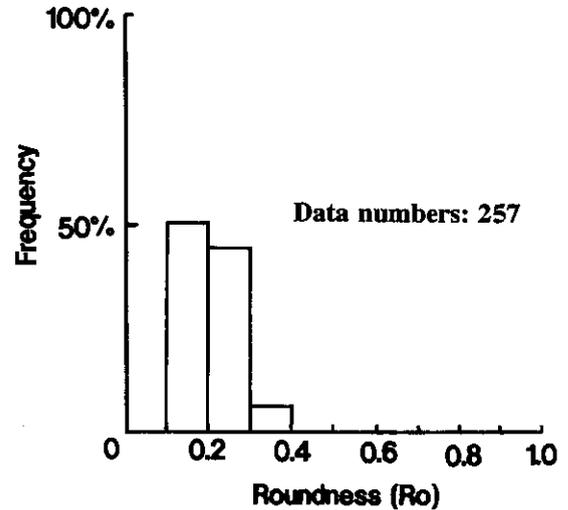


Fig.9 Roundness-frequency diagram showing the roundness of fragments in the fault microbreccia generated in the Iida-Matsukawa fault.

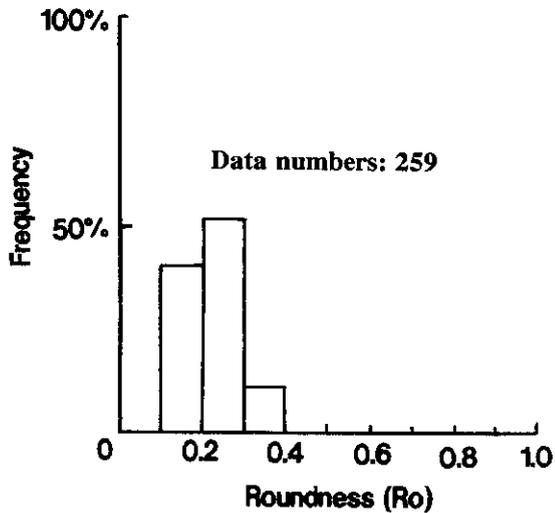


Fig.7 Roundness-frequency diagram showing the roundness of fragments in the pseudotachylyte generated in the Iida-Matsukawa fault.

造をⅠ～Ⅳの4グループに分類し、それぞれ新しい形成年代から古い形成年代と対応するものと推定している。この4つのグループの石英粒子の表面形状を Fig. 2 と見比べると、これらの石英粒子のほとんどは円磨度0.5以下のものである。本研究で測定した粉碎起源の飯田シュードタキライトとカタクレサイトおよび断層マイクロプレッチャの石英と長石破片も0.5以下の円磨度を示している (Figs. 7～9)。これらの結果は、断層ガウジ中では断層せん断運動に伴う研磨作用(および一部の地下水溶解作用)によって径数 $\mu\text{m}$ から数 $\text{mm}$ の、円磨度の高い( $R_d > 0.5$ )破片がほとんど形成されないことを示している。一般的には、断層マイクロプレッチャや断層ガウジは繰り返し断層運動

に伴う母岩の破碎・摩擦により形成されたものであると考えられる。しかし、断層マイクロブレッチャや断層ガウジ中の破片は円磨度の高い( $R_d > 0.5$ )ものがほとんど認められない。したがって、断層破碎帯中の円磨度の高い( $R_d > 0.5$ )破碎粒子は回転を伴う衝突量の影響によるものではないと考えられる。一方、熔融起源のFuyunシェードタキライトとOuter Hebridesシェードタキライトに含まれた破片の円磨度は0.2から1.0までの高い円磨度を示している(Figs. 5, 6)。特に、Fuyunシェードタキライトには円磨度0.5以上の破片は破片全体の70%ほど占めており、熔融起源による組織を示していると考えられる。

### おわりに

以上をまとめると、本研究で分析した3ヶ所のシェードタキライトに含まれた破片の円磨度の違いは直接的にシェードタキライトの粉碎成因と熔融成因を反映していると考えられる。この3ヶ所のシェードタキライトと断層破碎岩の破片の分析結果から、円磨度0.5以上の破片は熔融によるものと考えられるが、今後、断層ガウジを含む断層岩および他のシェードタキライトについてもこのような傾向があるかどうかを検討する必要がある。

### 謝 辞

本研究を進めるにあたり、熊本大学理学部(元東京大学地震研究所)松田時彦教授および東京大学地震研究所嶋本利彦教授にご指導をいただいた。2名の査読者には貴重なコメントをいただいた。記して謝意を表す。

### 文 献

- Allen, A. R., 1979, Mechanism of frictional fusion in fault zones. *J. Struct. Geol.*, **1**, 231-243.
- Kanaori, Y., 1982, Fracturing mode analysis and relative dating of faults by surface textures of quartz grains from fault gouges. *Engineering Geology*, **19**, 261-281.
- Krumbein, W. C., 1941, Measurement and geologic significance of shape and roundness of sedimentary particles. *J. Sed. Petrol.*, **11**, 64-72.
- Lin, A., 1991, Origin of fault-generated pseudotachylites. *Doctoral thesis*, the University of Tokyo. 108p.
- Lin, A., 1994a, Glassy pseudotachylites from Fuyun fault zone, northwest China. *J. Struct. Geol.*, **16**, 71-83.
- Lin, A., 1994b, Microlite morphology and chemistry in pseudotachylite, from the Fuyun Fault Zone, China. *J. Geol.*, **102**, 317-329.
- Lin, A., 1996, Injection veins of crushing-originated pseudotachylite and fault gouge formed during seismic faulting. *Engineering Geology*, **43**, 213-224.
- Lin, A., 1997, Fluidization and rapid injection of crushed fine-grained materials in fault zones during episodes of seismic faulting. In Zheng et al., ed., *Proc. 30th Int'l. Geol. Cong.*, **14**, 27-40, VSP.
- 林 愛明・戈 澍漠, 1994, 中国北西部富 蘊断層沿いに産出するガラス質シェードタキライト. *構造地質*, **39**, 9-33.
- 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・嶋本利彦, 1994, 実験的に形成されたシェードタキライトの化学組成. *構造地質*, **39**, 85-101.
- Macaudiere, J., Brown, W.L. and Ohnenstetter, D., 1985, Microcrystalline textures resulting from rapid crystallization in a pseudotachylite melt in a meta-anorthosite. *Contr. Miner. Petrol.*, **89**, 39-51.
- Moddock, R. II., 1983, Melt origin of fault-generated pseudotachylites demonstrated by textures. *Geology*, **11**, 105-108.
- Maddock, R. H., Grocott, J. and Van Nes, M., 1987, Vesicles, amygdules and similar structures in fault-generated pseudotachylites. *Lithos*, **20**, 419-432.
- Magloughlin, J. F., 1992, Microstructural and chemical changes associated with cataclasis and frictional melting at shallow crustal levels: the cataclasis-pseudotachylite formation. *Tectonophysics*, **204**, 243-260.
- Philpotts, A. R., 1964, Origin of pseudotachylites. *Am. J. Sci.*, **259**, 542-550.
- 孫 岩・韓 克従, 1985, 断裂構造帯的劃分. 科学出版社, 163p. (中国語)
- Shand, S. J., 1916, The pseudotachylite of Parijs (Orange Free State), and its relation to 'trap-shoten gneiss' and 'flinty crush-rock'. *Uuart. J. Geol. Soc. London*, **72**, 198-221.
- Sibson, R. H., 1975, Generation of pseudotachylite by ancient seismic faulting. *Geophys. J. Royal Astro. Soc.*, **43**, 775-794.
- Spray, J. G., 1987, Artificial generation of pseudotachylite using friction welding apparatus. *Contrib. Mineral petrol.*, **99**, 464-475.
- Spray, J. G., 1992, A physical basis for the frictional melting of some rock-forming minerals. *Tectonophy-*

- sics, **205**, 19-34.
- 堆積岩研究会, 1983, 堆積岩の研究法—礫岩・砂岩・泥岩. 地学双書, **24**, 377p.
- Toyoshima, T., 1990, Pseudotachylite from the Main Zone of the Hidaka metamorphic belt, Hokkaido, northern Japan. *J. Metamorph. Geol.*, **8**, 507-523.
- Wadell, H. A., 1932, Volume, shape, and roundness of rock particles. *J. Geol.*, **40**, 1074-1106.
- Wallace, R. c., 1976, Partial fusion along the Alpine Fault Zone, New Zealand. *Bull. Geol. Soc. Am.*, **87**, 1225-1228.
- Wenk, R. H., 1978, Are pseudoachylites products of fracture or fusion. *Geology*, **6**, 507-511.