

南アフリカ共和国 Witwatersrand 盆地のシュードタキライト

久 田 英 子*

Review of Pseudotachylites in the Witwatersrand Basin, South Africa

Eiko HISADA *

Abstract

The Vredefort Dome, located in the central part of the Witwatersrand Basin in South Africa, is the type locality for pseudotachylite. Pseudotachylite at the Vredefort Dome is generally regarded to be of impact origin. Pseudotachylites which are closely associated with faults are, however, also known to be common along the northern and northwestern edges of the Witwatersrand Basin. In order to compare pseudotachylites from the Vredefort Dome and from the surrounding Witwatersrand Basin, different studies were undertaken in the past. Mode of occurrence, microscopic textures, geochemical analyses and chronological measurements of pseudotachylites are briefly reviewed in this paper.

In the Vredefort Dome, pseudotachylites are commonly observed except in the central part of its core. In the surrounding Witwatersrand Basin, they are reported from drill core sections and in underground workings. The matrix in pseudotachylite from the Vredefort Dome is mostly a recrystallized melt phase, while those from the surrounding Witwatersrand Basin seem to be composed of clastic material. Pseudotachylites both from the Vredefort Dome and the surrounding Witwatersrand Basin are geochemically closely related to their host rocks. Although evidence for more than one generation of pseudotachylite has been presented, both in the Vredefort Dome and the surrounding Witwatersrand Basin, it is widely believed that most of them were formed as a result of the Vredefort impact event (ca. 2.0 Ga). Other fault rocks reported from the surrounding Witwatersrand Basin are older than the pseudotachylites and therefore not related to their formation.

Key words : Vredefort Dome, Witwatersrand Basin, pseudotachylite, fault rock

キーワード : フレデフォートドーム, ウィットウォーターズランド盆地, シュードタキライト, 断層岩

1. はじめに

シュードタキライトはガラス質または極細粒のマトリックスと破碎した鉱物片から成る固結した

脆性断層岩で、一般に地震時の断層運動に伴う摩擦溶融によって形成されと考えられている。かつてシュードタキライトの成因に関して、摩擦発熱によって母岩が融解したメルトなのか（例えば、

* 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻地質学鉱物学教室

* Department of Geology and Mineralogy, Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

Present Address: Department of Geology, Rand Afrikaans University, P.O. Box 524, Auckland Park 2006, South Africa

Sibson, 1975), あるいは粉碎による超微粒岩片の集合体なのか (Wenk, 1978) が論争になったが, Spray (1995) は実験により摩擦溶融にはあらかじめ粉碎過程が必要であることを示し, マトリックス中で粉碎物とメルトとの割合は摩擦面の歪速度によって連続的に変化する可能性を示唆した。また, Shimamoto and Nagahama (1992) と Ray (1999) は天然のシュードタキライトのクラストサイズ分析から, シュードタキライトの形成過程は粉碎だけでは説明がつかず, 溶融の特徴も共存していることを示した。

シュードタキライトが溶融起源であれば, 岩石を溶かすために必要な摩擦熱から断層沿いの剪断応力を推定できるので, 地殻応力問題に関連してシュードタキライトは注目されてきた (McKenzie and Brune, 1972; Sibson, 1975, 1980b; Cardwell *et al.*, 1978; Scholz, 1980)。また, シュードタキライトとその母岩の変形様式を調べることで過去の地震発生域の環境を推定できるので, シュードタキライトは世界各地の断層または剪断帯沿いで研究されている (例えば, Clarke and Norman, 1993; Austrheim and Boundy, 1994; Obata and Karato, 1995; Karson *et al.*, 1998; Curewitz and Karson, 1999)。これらを見ると, シュードタキライトの形成条件範囲は非常に広く, 地殻浅部での正断層 (Karson *et al.*, 1998; Curewitz and Karson, 1999) から, 地殻深部でのグラニュライト相 (Clarke and Norman, 1993) やエクロジャイト相 (Austrheim and Boundy, 1994) まで, 摩擦溶融を伴う地震時の断層運動が示唆されている。また, 溶融温度の高い超苦鉄質岩のシュードタキライトも報告されている (Obata and Karato, 1995)。比較的浅部の断層沿いでは, シュードタキライトはカタクレーサイトに伴って産出するが (例えば, Sibson, 1975; Techmer *et al.*, 1992), 深部の剪断帯沿いでマイロナイトに伴って産出するシュードタキライトも多数報告されている (例えば, Sibson, 1980a; Passchier, 1982; White, 1996)。これらのシュードタキライトは形成後に塑性変形を受けているものもあり, 普段は塑性変形をしている深部のマイロナイト帯で地震性のすべりが時々起こっているこ

とを示している。

ところで, シュードタキライトの形成は地震時の断層運動に限られない。大規模な地滑りのすべり面で摩擦溶融によって形成された岩石は “hyalomylonite” と呼ばれ, 便宜的にシュードタキライトの一種とされた (Masch, 1979)。シュードタキライトと hyalomylonite が共に産するヒマラヤの Langtang で両者の相違点 (気泡が有るか無いか, マトリックスが隠微晶質かガラス質かなど) も指摘されているが (Masch, 1979; Masch *et al.*, 1985), これらの相違点はシュードタキライトの多様性の範囲内であると考えられる。しかし, 地滑りの摩擦溶融によって形成された岩石は例が少なく, 詳細はまだ明らかではない。

さらに, シュードタキライトは隕石の衝突 (インパクト) によるクレーターにも報告されている (例えば, Masaytis, 1976; Lambert, 1981; Reimold *et al.*, 1987; Dressler and Sharpton, 1997)。現在では一般に巨大インパクト構造として知られている, 南アフリカ共和国 Witwatersrand 盆地の Vredefort ドーム (例えば, Shand, 1916; Bisschoff, 1962: 口絵 2-1, 2, 3) とカナダのサドベリー構造 (例えば, Thompson and Spray, 1994; Spray and Thompson, 1995) では, 大量のシュードタキライトが産出する。このうち Vredefort ドームはシュードタキライトの模式地である。Shand (1916) が Vredefort 北の Parys という街の周辺で, 花崗岩質岩石中に見られるタキライト (玄武岩質ガラス) 様の脈を最初にシュードタキライトと命名して以来, 特異な構造を示す Vredefort ドームの成因に関連して, そのシュードタキライトは古くから多くの研究がおこなわれている (例えば, Bisschoff, 1962; Wilshire, 1971)。Vredefort ドームではシュードタキライトは至る所で見られ, Shand (1916) 以降, より大規模なシュードタキライトの露頭も報告されているが, 模式地としての特定の露頭はない。したがって, 一口に Vredefort ドームのシュードタキライトと言っても, 多くの研究者により様々な露頭から色々なタイプのシュードタキライトが報告されている。

インパクト起源のシュードタキライトには, ま

さに隕石の衝突時 (cratering stage) に圧縮条件で形成されるものと、その後のリバウンドや崩壊による隕石孔の変形時 (modification stage) に形成されるものが考えられている (Lambert, 1981; Thompson and Spray, 1994; Spray and Thompson, 1995)。後者はインパクトによって引き起こされた断層運動 (または地滑り) によるもので、規模は大きい、基本的には断層起源のシュードタキライトと同様のプロセスで形成されるのだろう (Thompson and Spray, 1994)。初期の研究では、Vredefort ドームのシュードタキライトは脈に沿って小さな変位しか認められず、断層とは関係ないとされていた (Shand, 1916; Bisschoff, 1962; Wilshire, 1971)。しかし、1980 年代後半には Vredefort ドーム以外の Witwatersrand 盆地で断層起源のシュードタキライトが報告され (Killick *et al.*, 1986, 1988; Reimold *et al.*, 1986), これらのシュードタキライトは Vredefort ドームのものと起源的に関連している可能性がある、Killick *et al.* (1988) は Vredefort ドームのものも断層運動に関係しているか見直すべきであると指摘した。これを受けて、最近では Vredefort ドームのシュードタキライトとそれ以外の Witwatersrand 盆地のシュードタキライトを比較する研究もおこなわれている (Fletcher and Reimold, 1989; Killick and Reimold, 1990; Reimold and Colliston, 1994)。

インパクト起源のシュードタキライトと断層起源のシュードタキライトが多数報告されている Witwatersrand 盆地は、Vredefort ドームの構造や形成条件を考えるためだけでなくシュードタキライトの多様性を理解する上でも重要である。小論では、模式地である Vredefort ドームのインパクト起源のシュードタキライト、その他の Witwatersrand 盆地の断層起源のシュードタキライトについて、これまでの研究をレビューしこれらの岩石を紹介する。

II. 地質概説

Vredefort ドームはヨハネスバーグの南西約 120 km に位置し、Witwatersrand 盆地のほぼ中心部に当たる (図 1)。この Vredefort ドームは、中央

部の始生代の花崗岩と片麻岩から成る 'core' (図 1 では Basement Granite と表記) と、その周囲の始生代と原生代の傾斜または逆転した一連の地層から成る 'collar' (図 1 では Witwatersrand Supergroup, Ventersdorp Supergroup, Transvaal Supergroup (の下部) と表記: 口絵 2-4) で構成され、南東部は顕生代の岩石 (主に Karoo Supergroup の変堆積岩とドレライト: 図 1 では Younger Cover と表記) で覆われている。

Vredefort ドームの core は変成相の変化と地球化学的研究から、中心部に向かってしだいに地殻の深部が露出していると考えられている (Slawson, 1976; Hart *et al.*, 1981a)。core は内側の Inlandsee Leucogranofels (ILG) と外側の Outer Granite Gneiss (OGG) に大きく二分される (図 1)。前者は縞状構造が発達したグラニュライト相の珪長質片麻岩から成り、後者は比較的均質で縞状構造の発達は場所によって異なり、主に角閃岩相の花崗岩と花崗岩質片麻岩から成る (Hart *et al.*, 1981b; Stepto, 1990)。なおインパクト当時、ブッシュフェルト火成活動 (2.05-2.06 Ga) による熱が広域的に残っており、インパクトによる熱と共にドーム中央部の高変成作用をもたらした可能性が示唆されている (Gibson *et al.*, 1998)。ILG と OGG は幅約 5 km にわたり苦鉄質の多様な変成岩から成る領域で漸移的に境界を定められ、この境界帯は Steynskraal Metamorphic Zone (SMZ) (Hart *et al.*, 1981a, b) または Steynskraal Formation (SF) (Stepto, 1990) と呼ばれていた。しかし、Hart *et al.* (1990) は地球化学的研究から OGG と ILG の境界はシャープ (いわゆる Vredefort Discontinuity) であることを示し、これをテクトニックな不連続と考えた。彼らによると、この境界帯では ILG の岩石も OGG の岩石も著しく破碎され、シュードタキライトが集中的に産出する。彼らは Vredefort Discontinuity のすぐ下のリユーコグラノフェルスとチャーノッカイトがほぼ同量産する領域をチャーノッカイトゾーンと呼び、ILG の最上部に位置付けている。Fletcher and Reimold (1989) も露頭観察と広域的な構造から、シュードタキライトが多産する Vredefort

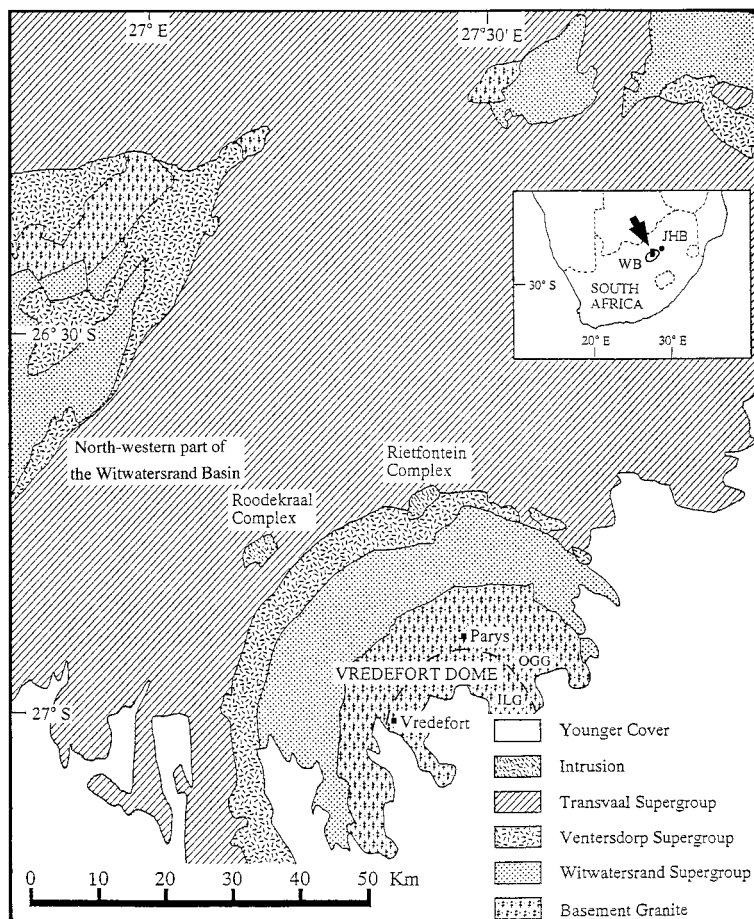


図 1 Vredefort ドームと Witwatersrand 盆地北西部の地質図。
Smit (1986) と Killick *et al.* (1988) を簡略化。
JHB : ヨハネスバーグ, WB : Witwatersrand 盆地, OGG : Outer Granite
Gneiss, ILG : Inlandsee Leucogranofels

Fig. 1 Regional setting of the Vredefort Dome in the
Witwatersrand Basin.
Simplified after Smit (1986) and Killick *et al.* (1988).
JHB : Johannesburg, WB : Witwatersrand Basin, OGG : Outer Granite
Gneiss, ILG : Inlandsee Leucogranofels

Discontinuity がテクトニックな不連続（水平に近い断層）である可能性を示唆した。しかし、Reimold and Gibson(1996)は経験的に OGG と ILG の境界は構造的な不連続というより、漸移的な岩相の変化であるとしている。このように OGG-ILG 境界の構造については、まだ一致した見解がない。

Vredefort ドームの collar は core と不整合で接する Dominion Group の一部から、Witwatersrand

Supergroup, Ventersdorp Supergroup, Transvaal Supergroup の下部へと、内側から外側に向かって順次若い層準が露出しており、collar の幅は 15-20 km に及ぶ（図 1 では Dominion Group は省略されている）。図 1 には示されていないが、幅数十メートルで連続性の良いグラノフィアダイクが主に core と collar の境界沿いに分布し、より小規模のものは core の中（OGG, ILG 共）にも見られ

る (Willemse, 1937; Bisschoff, 1972; Therriault *et al.*, 1996)。特異な化学組成を示すこれらのグラノフィアダイクは、マグマに既存の岩石 (頁岩や珪岩など) が混ざり込んだ火成岩との考えもあったが (Willemse, 1937; Bisschoff, 1972), 現在ではインパクトメルトと考えられている (French and Nielsen, 1990; Koeberl *et al.*, 1996; Therriault *et al.*, 1996)。

Vredefort ドームから離れた Witwatersrand 盆地の北部と北西部は Transvaal Supergroup に覆われているが、ボーリングコアや鉱山の地下の露頭から、Witwatersrand Supergroup 内の多くの層面断層、Witwatersrand Supergroup と Ventersdorp Supergroup の間の Ventersdorp Contact Reef (VCR) 内の断層帯、Transvaal Supergroup の最下部の Black Reef Decollement Zone (BRDZ) などにシュードタキライトが報告されている (Reimold *et al.*, 1986; Killick *et al.*, 1988; Fletcher and Reimold, 1989; Killick and Reimold, 1990; Reimold and Colliston, 1994: 図 2)。これらの層面断層の他、ほぼ南北走行の正断層沿いにもシュードタキライトが報告されている (Reimold *et al.*, 1986; Fletcher and Reimold, 1989; Killick and Roering, 1995)。

III. Vredefort 論争

本題に入る前に、本章では Vredefort 論争についてその概略を述べる。Vredefort ドームの成因が隕石の衝突によるもの (インパクト起源) か地球内部の力によるもの (ガス爆発またはテクトニック起源) かは長年にわたって議論され、Vredefort 論争と呼ばれている (Grieve, 1982; Bisschoff, 1988; Nicolaysen, 1990 など参照)。インパクト起源の支持者は、シュードタキライト、シャッターコーン、シリカ鉱物の高圧相、石英中の面状微細構造などの存在を挙げて、これらはインパクトによるショック波に関連した高圧・高歪速度によって形成されたと主張し、前述のように現在では Vredefort ドームは巨大インパクト構造として落ち着いたようである。しかしながら、まだいくつかの問題点も残っている。

シュードタキライトはインパクト構造で特徴的に見られるわけではなく、シュードタキライトが産出しないインパクト構造も多数あるが (Reimold, 1998), 一般に大規模なシュードタキライトの存在はインパクト起源の証拠の一つとされている。しかし、地質学者と隕石学者の間でシュードタキライトに関する統一的な見解がなく、隕石学者はインパクト構造で一見シュードタキライトに似た岩石をまとめてシュードタキライトと呼んでいるようである (Reimold, 1995, 1998)。シュードタキライトという用語は成因の異なる岩石に使用されているが、Reimold (1995, 1998) は (テクトニックなまたはインパクトによって引き起こされた) 摩擦溶融によるもののみにシュードタキライトという用語を用い、インパクト溶融とは区別するよう提案している。Vredefort ドームのシュードタキライトについては、次章で詳しく述べる。

シャッターコーンは、表面に条線がある円錐形の特異な割れ目で、強いショック波によって形成されると考えられ、一般にインパクト構造の特徴とみなされている (Dietz, 1959, 1960)。Vredefort 地域のシャッターコーンは長さ 10 cm 程度までのものが多く、Witwatersrand Supergroup の珪岩を主として collar を構成する多くの岩石の表面に見られるが、シュードタキライトとグラノフィアダイクには見られない (Dietz, 1961; Hargraves, 1961; Manton, 1965)。core の岩石にもほとんど見られないが、これは core の岩石が粗粒なためシャッターコーンが形成されにくく、形成されても後の風化や浸食によって消えてしまったと考えられている (Hargraves, 1961)。地層面の方向に対するシャッターコーンの軸の方向が一定なので、シャッターコーンは地層の逆転以前に形成されていたと考えられていたが (Hargraves, 1961; Manton, 1965; Albat, 1988), 地層面の方向に依存せず、逆転後に形成されたことを示すシャッターコーンも報告されている (Simpson, 1978, 1981)。Nicolaysen and Reimold (1999) もシャッターコーンとこれに直接関係する面状-曲面状の割れ目を詳細に記載し、これらは Vredefort ドーム形成の比較的后期にできたと結論している。

Age (Ga)	Supergroup	Group	Lithofacies	Favourite localities for pseudotachylites	Thickness (Km)
2.22	TRANSVAAL	PRETORIA	Shales, siltstones and andesites with subordinate quartzites and basic sills	←BRDZ	15
		CHUNIESPOORT	Dolomite Gabbroic sill and conglomerate at base		
	VENTERSDORP	PNIEL	Basic lavas and quartzites Boulder bed at base		10
		PLATBERG	Basic lavas, shales, siltstones and quartz porphyry Boulder bed at base		
		KLIPRIVERSBERG	Basic lavas		
2.7	WITWATERSRAND	CENTRAL RAND	Quartzites and conglomerates with subordinate shales	←VCR	5
		WEST RAND	Shales and quartzites with subordinate conglomerates and basic lava	←MBF	

図 2 Witwatersrand 盆地北西部の層序。
Fletcher and Reimold (1989) を簡略化。

Fig. 2 Lithostratigraphy for the northwestern part of the Witwatersrand Basin.
Simplified after Fletcher and Reimold (1989).
BRDZ : Black Reef Decollement Zone, VCR: Ventersdorp Contact Reef,
MBF : Master Bedding Fault

シリカ鉱物の高圧相（コーサイトとスティショバイト）が collar の Witwatersrand 珪岩中の細い（< 0.5 mm）シュードタキライト脈から発見され（Martini, 1978）、TEM 観察によっても確認されている（White, 1993; Leroux *et al.*, 1994 ではコーサイトのみ確認）。これらの高圧相はシュードタキライト中だけでなく、シュードタキライトに接する母岩（境界から 1-2 mm 以内）の珪岩中からも報告されているが（Martini, 1991, 1992）、その分布は Witwatersrand Supergroup の上部に限られてお

り、より下部（Vredefort ドームの中心部）では後の変成作用によって繊維状の細粒石英や再結晶粒に変わったと考えられている（Lilly, 1979; Martini, 1991）。シリカ鉱物の高圧相（特にスティショバイト）の存在は一般にインパクト起源を強く支持すると考えられるが、これらの高圧相がショック変成作用でのみ形成されることをはっきりと証明した実験はなく、Reimold *et al.* (1992a) は相転移の体積変化を考慮した実験の必要性を指摘している。

Carter (1965) は Vredefort ドームの collar (Witwatersrand Supergroup 下部) のシャッターコーンで石英粒の多くに basal plane に平行な変形ラメラがあることを示し、これらがインパクトのショックによってできたと結論した。以来、石英中の面状微細構造は, planar deformation features, planar elements, planar fractures などと呼ばれ, それらの結晶学的方位からショック圧力を推定する研究 (Lilly, 1981; Fricke *et al.*, 1990; Grieve *et al.*, 1990), それらに沿って存在する流体包有物の研究 (Schreyer and Medenbach, 1981; Schreyer, 1983; Fricke *et al.*, 1990), 詳細な TEM 観察 (Goltrant *et al.*, 1991) などがおこなわれている。しかしながら, このような石英中の面状微細構造はインパクトに特有のものではなく, 他の動のプロセスによっても形成され得る (Alexopoulos *et al.*, 1988; Brandl and Reimold, 1990)。実際, Reimold (1990) は Vredefort ドーム内の多くの石英の微細変形構造が, Alexopoulos *et al.* (1988) のショック (インパクト) 起源による面状微細構造の定義に当てはまらないことを指摘している。さらに, Hart *et al.* (1991) もこれらの石英の面状微細構造が Vredefort ドームの中心に向かって多くなっているわけではないことを示している。

IV. Vredefort ドームのシュードタキライト

Vredefort ドームのシュードタキライトは collar にも core にも産するが, core の中心部には比較的少ない (Reimold *et al.*, 1985; Killick and Reimold, 1990)。Fletcher and Reimold (1989) はシュードタキライトが OGG-ILG 境界付近に集中的に産出し, より外側の OGG 内と collar の内側の層面断層沿いにも小規模な集中があると述べている。

1) 産状

Vredefort ドームのシュードタキライトの産状は古くから多くの研究者によって詳しく述べられている (例えば, Shand, 1916; Bisschoff, 1962; Wilshire, 1971)。これら初期の研究では, シュードタキライトは大変位の証拠が見られないので断層とは関係なく, 花崗岩中の縞状構造や堆積岩中の層理面にも依存しないとされていた。Poldervaart

(1962) も core の花崗岩中のシュードタキライト脈がマイロナイトの変形集中域にできているのではなく, 周りの岩石が急速に粉碎されて細粒のタフィサイトになっているようであると述べている。しかし, より最近の研究によると, core の花崗岩中の直線的なシュードタキライト脈は片麻状の縞に沿うものが多く, collar の岩石中のものは層理面や層面断層に沿うものが多い (Killick and Reimold, 1990; Reimold and Colliston, 1994)。collar (Witwatersrand Supergroup 下部) の泥質変成岩中では, 破断劈開沿いに不規則で不連続なさや状や細脈状のシュードタキライトが報告されている (Gibson *et al.*, 1997b)。これらの多くは幅 5 mm 以下で長さ数 cm であるが, 破断面が交わる所では幅 10 cm, 長さ数十 cm に達することもある。但し, これらの破断面は複雑なネットワーク状で層理面との関係は一定ではない。Bisschoff (1962) は Parys の東北東に位置する Otavi quarry で, シュードタキライトを傾斜の大きい脈とほぼ水平で多くの岩片を含むシートに区別し (口絵 2-1), シートはシュードタキライトが良く発達している所にのみ見られるとした。Fletcher and Reimold (1989) と Killick and Reimold (1990) は, これらのシートが低角断層である可能性を指摘している。

Martini (1991) は Vredefort ドームのシュードタキライトを A タイプと B タイプに分類した。A タイプは非顕晶質物質から成る厚さ 1 mm 以下の暗灰色の脈である。B タイプも暗色の非顕晶質物質から成るが, 岩片や鉱物を含み数メートルまでの厚さを持つ不規則な脈で, Vredefort ドームで一般によく見られるものである。彼はコーサイトやスティショバイトは A タイプのシュードタキライト中に限られ, B タイプ中には見られないことを指摘し, A タイプはショック波の通過時により高圧条件で形成され, その直後 B タイプがより低圧または伸張場で形成されたと考えた。しかし, Reimold *et al.* (1992a) は Martini のサンプリング地点を観察し, A タイプから突然 B タイプに移行している個所もあることを指摘して, A タイプ・B タイプという単純な分類を支持していない。

シュードタキライトは Vredefort ドーム内の多

くの岩石中に見られるが、グラノフィアードイク中には見られないので、グラノフィアードイクよりも古いか同時期に形成されたと考えられる (Dietz, 1961)。また、グラノフィアードイクに切られ、より古いことを示すシュードタキライトもある (Bisschoff, 1962, 1972, 1982)。Vredefort の南西と Vredefort ドーム南東部では、古いシュードタキライトが新しいシュードタキライトに切られたり取り込まれたりしており、シュードタキライトの形成時期が複数回あったことが示されている (Killick and Reimold, 1990)。

2) 組織

Vredefort ドームのシュードタキライトは様々な組織を示し、研究者によって異なるタイプ分けがされている。

Shand (1916) は Parys で OGG 中に産するシュードタキライトのマトリックスを 3 タイプに分けた。細い脈中に見られ細粒な磁鉄鉱の集合体を含む最も不透明なもの、ある程度の結晶化が起きており部分的に小さな磁鉄鉱の八面体が識別できるもの、黒色だが不透明鉱物が少なく蜂の巣状の多角形のスフェルライトまたは長石のマイクロライトを多く含むものの 3 タイプである。Willemse (1937) はシュードタキライトに再結晶タイプと極微細タイプが認められるとし、どちらもメルトからの固化ではなく、前者は固相状態で再結晶したもので、後者は岩石が細かく破碎されたものであると結論した。彼はシュードタキライトの周縁相を、細粒またはガラス質のためではなく、磁鉄鉱などの不透明鉱物が多いためであるとしているが、Bisschoff (1962) も指摘しているように周縁相は不透明鉱物も多いが内側よりも細粒である (口絵 2-5, 6, 7, 8)。Bisschoff (1962) は、再結晶したシュードタキライトの組織を、微晶質で支配的な構造を持たない非貫入性タイプと、周縁部に対して急冷相を持ち流動構造で特徴付けられる貫入性タイプに区別できるとし、前者が多数を占めるとした。Reimold and Colliston (1994) はシュードタキライトのマトリックスを、非顕晶質で小さな磁鉄鉱のクリスタライトを多く含む局所的に長石・輝石・ホルンブレンドの結晶化などの脱ガラス化組織を

示すものと、微晶質で主に細粒のサブオフィチック、充填状、球顆状組織を示すものに二分できるとした。彼らによると、主なマイクロライトは斜長石・輝石・角閃石・黒雲母・磁鉄鉱で、最も主要な変質鉱物は緑泥石・セリサイト・緑簾石である。

Leroux *et al.* (1994) は core の OGG-ILG 境界帯のシュードタキライトを TEM 観察し、脈を構成しているのは非常に細粒の物質 (ほとんどは粒径約 0.2 μm の石英) でガラスは無く、小さなクリスタライトは皆同じ大きさで平衡な組織に見えるので、これらの微晶質の脈はおそらくもとのメルト (ガラス) 相の再結晶によってできたのだらうと結論した。彼らはまた、北東部の collar の珪岩中のシュードタキライトも TEM 観察し、それらが細粒の再結晶したシリカ (平均粒径約 0.1 μm) と少量の鉄の酸化物から成り、非晶質物質は見られないとした。

3) 化学分析

シュードタキライトの化学分析も古くからおこなわれている (例えば、Shand, 1916; Willemse, 1937; Wilshire, 1971)。シュードタキライトのマトリックスからクラストを分離することが難しいため、これら初期の結果の多くは、シュードタキライトの組成が母岩の全岩組成に近いことを示していた。微量元素について、Wilshire (1971) は母岩よりもシュードタキライト中で Pb が多いことを最初に述べた。Killick and Reimold (1990) は微量元素の濃集についてそれまでのデータをコンパイルし、Pb だけでなく Sn, Cu, U, Zr, Sb がシュードタキライト中で多く、As が少ないことを示した。

Schwarzman *et al.* (1983) はマイクロプローブを用いて精度良くシュードタキライトのマトリックスの分析をおこない、OGG 中のシュードタキライトは平均して母岩よりも SiO_2 に乏しく、 Al_2O_3 , Na_2O , CaO , K_2O に富むことを示した。また、平均値では明らかな違いは見られないが、個々のシュードタキライトとその母岩を比べると、シュードタキライト中に Fe と Mg が多いことを示した。シュードタキライトの形成に対する母岩の鉱物組成の影響は詳しく調べられていなかったが、

Reimold *et al.* (1985) も珪長質片麻岩のゾーンよりも黒雲母や角閃石に富む苦鉄質ゾーンの方がシュードタキライトが形成されやすいと述べた。その後、Reimold (1991) は Vredefort ドームのシュードタキライトが化学的にその母岩と密接に関係していることを示した。つまり、花崗岩中のシュードタキライトは SiO_2 に乏しく TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MgO に富み、苦鉄質岩中のシュードタキライトは CaO に乏しく K_2O に富むことが見られたが、母岩の組成からの系統的な逸脱は見られない。また、微量元素については、Sc と長石に関係する元素 (Ba, Rb など) がシュードタキライト中でしばしば富むが、一般的な傾向は見られないとした。彼はシュードタキライトは苦鉄質鉱物 (特に含水の苦鉄質鉱物) の選択的な溶融と少量の長石類の溶融によって形成されたと結論した。

4) 年代測定

Vredefort ドームのシュードタキライトに関する年代測定の研究を表 1 にまとめた。

Reimold *et al.* (1990) は Vredefort ドームの core と collar の 6 地点から、シュードタキライトの全岩サンプルを ^{40}Ar - ^{39}Ar 段階加熱法と K-Ar 法を用いて年代測定し、 $2.25 \pm 0.04 \sim 1.09 \pm 0.10$ Ga という結果を得た。彼らはこれを Vredefort でシュードタキライトの形成時期が複数回あったことを示していると考えた。Reimold *et al.* (1992b) はこれらのサンプルのうち二つのシュードタキライトの母岩から鉱物分離したサンプルを、同様に ^{40}Ar - ^{39}Ar 段階加熱法を用いて年代測定し、2 Ga より若いシュードタキライトの存在を確かめた。つまり、母岩の鉱物はブッシュフェルト火成岩体の貫入や OGG の広域的な火成活動に関連した古い年代 (2.07 ± 0.01 Ga, 3.03 ± 0.03 Ga) を示しその後の Ar の喪失がないので、シュードタキライトから得られた年代 (1.44 ± 0.08 Ga) は後のイベントで改変されたものではなくその形成年代を示す。また、もう一つのシュードタキライト (1.39 ± 0.08 Ga) 自身は熱水変質作用を受けていないが、これに接する母岩は変質作用を受けており、これはシュードタキライトの形成時の変質と考えられるので、変質を受けた母岩の鉱物の年代 ($1.76 \pm 0.04 \sim 1.39$

± 0.01 Ga) はシュードタキライトの形成年代を示す。

Spray *et al.* (1995) はレーザーマイクロプローブ ^{40}Ar - ^{39}Ar 法を用いて、シリカ鉱物の高圧相を含む collar のシュードタキライトと OGG 内のシュードタキライトの年代測定をし、Vredefort の超高压イベントは 2018 ± 14 Ma に起こったと結論した。彼らはほとんどのシュードタキライト (特にシリカ鉱物の高圧相を含む脈と大きな岩脈状のもの) はこの時に形成されたとしている。Kamo *et al.* (1996) は Vredefort ドームの中心部の再結晶したシュードタキライト中から、ショック変形を受けていないジルコンの結晶を U-Pb 法を用いて年代測定し、シュードタキライトの形成は 2023 ± 4 Ma という $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年代を得た。

シュードタキライトそのものではないが、Moser (1997) は core の中心部の岩石 (ILG と再結晶したノーライト) からジルコンとモナズ石の単結晶を U-Pb 法を用いて年代測定し、インパクトと変成作用の年代として 2020 ± 3 Ma という $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年代を得た。Gibson *et al.* (1997a) も core の中心部の花崗岩からジルコンの単結晶を U-Pb SHRIMP 分析し、ショック後の花崗岩の結晶化の年代として 2017 ± 5 Ma という $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年代を得た。また、Vredefort ドーム形成時のインパクトメルトと考えられているグラノフィアードイクに関して Walraven *et al.* (1990) はそれまでの年代測定の研究結果をまとめ、グラノフィアードイクの年代を 2002 ± 52 Ma と推測した。Allsopp *et al.* (1991) はグラノフィアードイク中の黒雲母集合体を ^{40}Ar - ^{39}Ar 段階加熱法を用いて年代測定し、 2006 ± 9 Ma という年代を得た。(Kamo *et al.* (1996) はグラノフィアードイク中のジルコンを U-Pb 法を用いて年代測定し、形成年代は約 3.1 Ga で、約 2.0 Ga に Pb の喪失があったと結論している。) 彼らは、多くのシュードタキライトを形成したショックイベントの年代と考えられる。

V. Vredefort ドーム以外のシュードタキライト

Vredefort ドーム北部の Rietfontein 複合岩体と Vredefort ドーム北西部の Roodekraal 複合岩体中、

表 1 Vredefort ドームのシュードタキライトに関係する年代測定値.

Table 1 Summary of the reported age dating studies concerned with Vredefort pseudotachylites.

Sample	Method	Age	Reference
Matrix of pseudotachylites in collar and core (both OGG and ILG)	K-Ar ⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar stepheating	2.25 ± 0.04 ~ 1.09 ± 0.10 Ga	Remold <i>et al.</i> (1990)
Biotite and hornblende from charnockitic gneiss (host rock of pseudotachylite) in core (between OGG and ILG)	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar stepheating	2.07 ± 0.01 Ga 3.03 ± 0.03 Ga	Reimold <i>et al.</i> (1992b)
Biotite, hornblende, plagioclase and microcline from granitic gneiss (host rock of pseudotachylite) in OGG		1.76 ± 0.04 ~ 1.39 ± 0.01 Ga	
Matrix of coesite-and stishovite-bearing pseudotachylites in collar Matrix of pseudotachylites in OGG	Laser microprobe ⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	2018 ± 14 Ma	Spray <i>et al.</i> (1995)
Zircons from recrystallized pseudotachylite in ILG	U-Pb	2023 ± 4 Ma	Kamo <i>et al.</i> (1996)
Zircons and monazites from gneiss in ILG Zircons from recrystallized norrite in ILG	U-Pb	2020 ± 3 Ma	Moser (1997)
Zircons from granite in ILG	U-Pb SHRIMP	2017 ± 5 Ma	Gibson <i>et al.</i> (1997)
Zircons from granophyre	U-Pb	2002 ± 52 Ma	Walraven <i>et al.</i> (1990)
Biotite concentrates from granophyre	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar stepheating	2006 ± 9 Ma	Allsopp <i>et al.</i> (1991)

また Roodekraal 複合岩体の北の珪岩中にもシュードタキライトが報告されている (Bisschoff, 1962)。最近では、シュードタキライトは Vredefort ドーム地域に限られるのではなく、Witwatersrand 盆地に広く産出することが知られている (Killick *et al.*, 1986, 1988; Reimold *et al.*, 1986)。しかし、これらのほとんどはボーリングコアや鉱山の地下の露頭からの報告であり、地表での露頭はまれである。

1) 産状

Witwatersrand 盆地北西部では多くのシュードタキライトが Master Bedding Fault (MBF) と Black Reef Decollement Zone (BRDZ) 沿いに報告されている (Fletcher and Reimold, 1989)。MBF は West Rand Group 上部の層面断層で、幅 15 m のカタクラスティックゾーンであり、BRDZ は Transvaal Supergroup の最下部の厚さ 130 m に及

ぶ断層帯で、どちらも南東へ緩く傾斜している。Fletcher and Reimold (1989) によると BRDZ のうちの 30% までをシュードタキライトが占め、新旧 2 種類のシュードタキライトが認められている。古いシュードタキライトは褶曲した地層に沿っており、新しいシュードタキライトは主に BRDZ の上部と下部の境界に見られる。

Witwatersrand 盆地北部では、Witwatersrand Supergroup と Ventersdorp Supergroup の間の Ventersdorp Contact Reef (VCR) 内の断層帯からシュードタキライトが報告されている (Killick *et al.*, 1988)。彼らによると、シュードタキライトに関連した変形は非常に脆性的で、隣接する岩石との境界はシャープである。また、fault veins も injection veins も観察され (Sibson, 1975 参照)、fault veins 沿いにはかなりの変位があるかもしれないと述べている。VCR で古いシュードタキライ

トをクラストとして含むカタクレサイトが、新しいシュードタキライトに切られている様子も記載されている (Killick and Reimold, 1990 の Fig. 6d)。この他、ほぼ南北走向の Bank Fault 沿いにもかなりのシュードタキライトが産出し、少なくとも 2 回のシュードタキライトの形成が認められている (Reimold *et al.*, 1986; Fletcher and Reimold, 1989)。

Killick and Roering (1995) は Witwatersrand 盆地北部の West Rand Goldfield を含むより広い範囲で、地下の露頭とボーリングコアからシュードタキライトを産する多くの断層を調査し、シュードタキライトは West Rand Group 上部から Pretoria Group までの母岩中に見られると述べた。これらの断層には、層面断層だけでなくほぼ南北走向のもの (West Rand Fault や Panvlakte Fault) も含まれている。彼らはシュードタキライトの fault veins の極をステレオ投影し、それらが一つの大円上にのるので同時に形成されたと考えた。また、Killick and Roering (1998) は同じ調査地域で層序と浸食された岩石の厚さを考慮し、シュードタキライトは深さ 1.9–6.6 km で形成されたと推定した。彼らはさらにこの深さに基づいてシュードタキライトの形成条件を計算し、間隙流体圧は静水圧に近く、剪断応力は約 75 MPa と推定している。

2) 組織

MBF と BRDZ 沿いのシュードタキライトの組織は記載されていないが、Witwatersrand 盆地北部の VCR のシュードタキライトは Killick *et al.* (1988) によって詳細に記載されている。彼らによると、最も多いシュードタキライトは塊状の淡青–灰色から茶褐–緑色で、マトリックス中に珪質のクラストを多く含み、火成岩の流動綫状構造に似た構造を示す所がある。シュードタキライトのマトリックスは非常に細粒で、鉄の酸化物のために汚れたように見えるので鉱物組成の同定は難しいが、彼らは X 線回折により、この岩石の結晶度が高く、多い順に石英・緑泥石・セリサイト・硫化物鉱物から成ることを記している。また、最も多いポーフィロクラストは強い歪を受けた石英で、

コロナで取り囲まれている (細粒の石英に富む縁が不透明鉱物に囲まれている) ものものもある。これらの灰色から緑色のシュードタキライトに対して、Ventersdorp 溶岩中にはえび茶色のものがよく見られ、この色の違いはシュードタキライト中の化学組成の違いを反映していると考えられている (Killick *et al.*, 1988)。

Reimold *et al.* (1999) は Witwatersrand 盆地北部と北西部の MBF, BRDZ, VCR 沿いのシュードタキライトを研究し、シュードタキライト形成時の強い熱水作用と形成後の変質の証拠を示した。彼らはこれらのほとんどのサンプルでマトリックスの 98% 以上が碎屑物質から成っているようであり、普通マトリックスの 70% 以上がメルト相である Vredefort ドームの core のシュードタキライトとはこの点で著しく異なっていると指摘している。

3) 化学分析

Killick *et al.* (1986, 1988) は、Witwatersrand 盆地北部の VCR のシュードタキライトとその母岩の全岩分析をおこなった。その結果、緑灰色のシュードタキライトは母岩の堆積岩 (主に珪岩) に、えび茶色のシュードタキライトは母岩の塩基性溶岩に類似した組成を示し、どちらのシュードタキライトもこれら二つの母岩の中間的な組成になる。また、緑灰色のシュードタキライト中の SiO_2 含有量は母岩の堆積岩に比べて少ないが、えび茶色のシュードタキライト中の SiO_2 含有量は母岩の溶岩に比べて多く、どちらのシュードタキライトでも Pb 含有量は母岩よりも多い。Killick (1994) も、Witwatersrand 盆地北部のより広い範囲で同様の研究をおこない、シュードタキライトの主成分元素は二つの異なる母岩の混合となることと、母岩中よりシュードタキライト中にいつも多い元素は S, Pb, Au で、シュードタキライト形成前または形成時に断層沿いに硫化物を含む流体相が存在した可能性を示した。Reimold and Koeberl (1991) と Reimold (1994) も、シュードタキライトを産する断層沿いに、Au やその他の金属元素が局所的に濃集している可能性を指摘している。

近年では、Witwatersrand 盆地北部と北西部でも断層帯の化学分析がおこなわれている

(Reimold *et al.*, 1999)。彼らによると、珪岩中のシュードタキライトは母岩に比べて SiO_2 に乏しく TiO_2 と Al_2O_3 に富み、溶岩中のシュードタキライトは母岩に比べて SiO_2 に富み TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , Al_2O_3 にもやや富む。また、熱水変質作用は主に断層帯内に限られているが、部分的に上盤と下盤にも影響を与えており、U, Th, Au, Sc, Ga などの微量元素は断層帯近傍で局所的に移動・再沈殿している。

4) 年代測定

Vredefort ドーム以外の Witwatersrand 盆地のシュードタキライトを年代測定した研究は少ない。

Trieloff *et al.* (1994) は Witwatersrand 盆地北部の Elandsrand Gold Mine と西部の Vaal Reef Gold Mine の VCR に産出するシュードタキライトを ^{40}Ar - ^{39}Ar 段階加熱法を用いて年代測定し、 $2006 \pm 17 \text{ Ma}$ という結果を得た。彼らは、この年代は Vredefort ドームの形成時期とほぼ等しいので、同時に形成されたのだろうと考えた。

Killick and Roering (1995) は年代測定はおこなっていないが、Witwatersrand 盆地北部で構造の観察から、ほとんどのシュードタキライトは Hekpoort (Pretoria Group 内) 後に形成されたことを示し、相対的な年代からこのシュードタキライトが Vredefort ドームのシュードタキライトと関連している可能性を示唆している。

VI. その他の断層岩類

Vredefort ドームでマイロナイトやカタクレサイトなどの断層岩はほとんど報告がない。Schwarzman *et al.* (1983) はマイロナイトについては述べていないが、彼らの図の中に Vredefort ドームの core で幅 1 mm 程度のマイロナイト化したシュードタキライトの母岩 (OGG) が見られる (Schwarzman *et al.*, 1983 の Fig. 6)。これはシュードタキライトに漸移しており、シュードタキライトの形成時にマイロナイト化したようにも見える。Vredefort ドームの collar (Witwatersrand Supergroup の下部) で破断劈開沿いに産するシュードタキライトの母岩 (泥質変成岩) は、幅 1 mm 以下の狭い範囲でプロトマイロナイト化している部

分がある (Gibson *et al.*, 1997b)。

Vredefort ドーム以外の Witwatersrand 盆地では、シュードタキライトの他にも断層岩が報告されている。Truter (1936) は Witwatersrand 盆地北西部の Potchefstroom 地域を研究し、衝上断層に切られる Hospital Hill 珪岩 (Witwatersrand Supergroup の上部) から Daspoort 珪岩 (Transvaal Supergroup の Pretoria Group) の岩石が、衝上断層から約 800 m にわたってマイロナイト化している所があると述べている。しかし、これらのマイロナイト化した岩石とシュードタキライトとの関係については触れられていない。McCarthy *et al.* (1986) も、Witwatersrand 盆地北部で MBF 沿いに厚いマイロナイトと角礫岩が発達していることを述べているが、これらの詳しい記載やシュードタキライトとの関係には触れていない。Witwatersrand 盆地北部ではほぼ南北走向の Bank Fault 沿いに、シュードタキライトとマイロナイトが産することが報告されているが、これも詳しい記載はない (Fletcher and Reimold, 1989)。

Killick *et al.* (1986, 1988) は、Witwatersrand 盆地北部の VCR から、シュードタキライトの他カタクレサイトやマイロナイトも報告している。彼らによると、カタクレサイトとアルトラカタクレサイトは比較的少なく、幅は 20 cm までで一般に無構造である。カタクレサイト中のシュードタキライトは、シャープな境界とマトリックスの様子の違いから、既存のカタクレサイトゾーンを利用して形成されたと解釈されている。粉碎が進んだアルトラカタクレサイトはシュードタキライトと似ているが、アルトラカタクレサイトは比較的きれいなマトリックス (鉄の酸化物が無い) と緑泥石化したクラストがより多いことでシュードタキライトと区別できる (Killick *et al.*, 1988)。マイロナイトについては、多くの場合マイロナイト帯は幅数センチのプロトマイロナイトであるが、幅 20 cm のものもある。彼らはシュードタキライトと隣接する岩石との境界はシャープであると述べているが、シュードタキライトに切られている溶岩はマイロナイト化している部分がある (Killick *et al.*, 1988 の Fig. 2d)。これはシュード

タキライトの形成時にできたようにも見えるが、彼らはこの断層帯は長期間にわたり断続的な活動を繰り返し、マイロナイトやカタクレサイトはシュードタキライト形成以前に形成されていたと結論している。

Witwatersrand 盆地の南部ではボーリングコアからかなりの量のマイロナイトが見られるが、これらのマイロナイト中の石英のクラストには、Vredefort ドームの石英に見られる面状微変形構造はない (Fletcher and Reimold, 1989)。

VII. ま と め

Vredefort ドームのインパクト起源のシュードタキライトとその他の Witwatersrand 盆地の断層起源のシュードタキライトについて、これまでにおこなわれてきた研究をみてきた。小論で述べた内容をまとめると以下になる。

1) Vredefort ドームでは中心部以外で至る所にシュードタキライトが産出し、その産状や組織は場所によって様々である。これらの多くのシュードタキライトのマトリックスは再結晶しているが、詳細な観察からもとはメルト相であったと考えられている。

2) Vredefort ドーム以外の Witwatersrand 盆地では、シュードタキライトの産出地点はボーリングコアや鉱山の地下の露頭に限られており、これらのシュードタキライトは断層帯に沿っている。まだ多くの報告はないが、これらのシュードタキライトのマトリックスのほとんどは碎屑物質から成っているようである。

3) Vredefort ドームでもそれ以外の Witwatersrand 盆地でも、シュードタキライトの化学組成は各々の母岩に密接に関係しており、複数回のシュードタキライトの形成が報告されている。それらのうちのほとんどは地球化学的および構造的に同時期 (約 2.0 Ga) に形成されたと考えられている。

4) Vredefort ドームの core ではシュードタキライトと母岩との境界はシャープであり、マイロナイトやカタクレサイトなどの断層岩はほとんど報告がない。collar のシュードタキライトは層面

断層に関係している所もあるので、今後これらの断層岩が報告される可能性がある。Vredefort ドーム以外の Witwatersrand 盆地ではシュードタキライト以外の断層岩も報告されているが、これらの断層岩はシュードタキライトの形成以前にすでに形成されていたと考えられている。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、University of the Witwatersrand の W.U. Reimold 教授には多くの文献をいただき、フィールドのロカリティーも教えていただいた。Rand Afrikaans University の K. Hisada 博士と C.A. Smit 博士にはフィールドへ連れて行っていただいた。C.A. Smit 博士には West Rand Goldfield のシュードタキライトのサンプルも提供していただいた。以上の方々に厚くお礼申し上げる。また、しばらくの間 Rand Afrikaans University に滞在させていただき、多くの方々にお世話になった。査読者からは有益なご指摘をいただき本稿の改善に役立った。記してお礼申し上げる。なお、本研究には日本学術振興会特別研究員の研究奨励金を使用した。

文 献

- Albat, H.M. (1988): Shatter cone/bedding interrelationship in the Vredefort Structure: Evidence for meteorite impact? *S. Afr. J. Geol.*, **91**, 106-113.
- Alexopoulos, J.S., Grieve, R.A.F. and Robertson, P.B. (1988): Microscopic lamellar deformation features in quartz: Discriminative characteristics of shock-generated varieties. *Geology*, **16**, 796-799.
- Allsopp, H.L., Fitch, F.J., Miller, J.A. and Reimold, W.U. (1991): $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ stepheating age determinations relevant to formation of the Vredefort Dome, South Africa. *S. Afr. J. Sci.*, **87**, 431-442.
- Austrheim, H. and Boundy, T.M. (1994): Pseudotachylites generated during seismic faulting and eclogitization of the deep crust. *Science*, **265**, 82-83.
- Bisschoff, A.A. (1962): The pseudotachylite of the Vredefort dome. *Trans. Geol. Soc. S. Afr.*, **65**, 207-226.
- Bisschoff, A.A. (1972): The dioritic rocks of the Vredefort Dome. *Trans. Geol. Soc. S. Afr.*, **75**, 31-45.
- Bisschoff, A.A. (1982): Thermal metamorphism in the Vredefort Dome. *Trans. Geol. Soc. S. Afr.*, **85**, 43-57.
- Bisschoff, A.A. (1988): The history and origin of the Vredefort Dome. *S. Afr. J. Sci.*, **84**, 413-417.
- 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.
- 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.
- Carter, N.L. (1965): Basal quartz deformation lamellae—A criterion for recognition of impactites. *Am. J. Sci.*, **263**, 786–806.
- Clarke, G.L. and Norman, A.R. (1993): Generation of pseudotachylite under granulite facies conditions, and its preservation during cooling. *J. Metamorphic Geol.*, **11**, 319–335.
- Curewitz, D. and Karson, J.A. (1999): Ultracataclasis, sintering, and frictional melting in pseudotachylites from East Greenland. *J. Struct. Geol.*, **21**, 1693–1713.
- Dietz, R.S. (1959): Shatter cones in cryptoexplosion structures (meteorite impact?). *J. Geol.*, **67**, 496–505.
- Dietz, R.S. (1960): Meteorite impact suggested by shatter cones in rock. *Science*, **131**, 1781–1784.
- Dietz, R.S. (1961): Vredefort Ring structure: meteorite impact scar? *J. Geol.*, **69**, 499–516.
- Dressler, B.O. and Sharpton, V.L. (1997): Breccia formation at a complex impact crater: Slate Islands, Lake Superior, Ontario, Canada. *Tectonophysics*, **275**, 285–311.
- Fletcher, P. and Reimold, W.U. (1989): Some notes and speculations on the pseudotachylites in the Witwatersrand Basin and Vredefort Dome, South Africa. *S. Afr. J. Geol.*, **92**, 223–234.
- French, B.M. and Nielsen, R.L. (1990): Vredefort Bronzite Granophyre: chemical evidence for origin as a meteorite impact melt. *Tectonophysics*, **171**, 119–138.
- 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.
- Gibson, R.L., Armstrong, R.A. and Reimold, W.U. (1997a): The age and thermal evolution of the Vredefort impact structure: A single-grain U-Pb zircon study. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **61**, 1531–1540.
- Gibson, R.L., Reimold, W.U. and Wallmach, T. (1997b): Origin of pseudotachylite in the lower Witwatersrand Supergroup, Vredefort Dome (South Africa): Constraints from metamorphic studies. *Tectonophysics*, **283**, 241–262.
- Gibson, R.L., Reimold, W.U. and Stevens, G. (1998): Thermal-metamorphic signature of an impact event in the Vredefort dome, South Africa. *Geology*, **26**, 787–790.
- Goltrant, O., Cordier, P. and Doukhan, J.-C. (1991): Planar deformation features in shocked quartz; A transmission electron microscopy investigation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **106**, 103–115.
- Grieve, R.A.F. (1982): The Vredefort structure still not understood. *Nature*, **295**, 644–645.
- 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.
- Hargraves, R.B. (1961): Shatter cones in the rocks of the Vredefort ring. *Trans. Geol. Soc. S. Afr.*, **64**, 147–154.
- Hart, R.J., Nicolaysen, L.O. and Gale, N.H. (1981a): Radioelement concentrations in the deep profile through Precambrian basement of the Vredefort structure. *J. Geophys. Res.*, **86**, 10639–10652.
- Hart, R.J., Welke, H.J. and Nicolaysen, L.O. (1981b): Geochronology of the deep profile through Archean basement at Vredefort, with implications for early crustal evolution. *J. Geophys. Res.*, **86**, 10663–10680.
- Hart, R.J., Andreoli, M.A.G., Tredoux, M. and De Wit, M.J. (1990): Geochemistry across an exposed section of Archean crust at Vredefort, South Africa: With implications for mid-crustal discontinuities. *Chem. Geol.*, **82**, 21–50.
- Hart, R.J., Andreoli, M.A.G., Reimold, W.U. and Tredoux, M. (1991): Aspects of the dynamic and thermal metamorphic history of the Vredefort cryptoexplosion structure: Implications for its origin. *Tectonophysics*, **192**, 313–331.
- Kamo, S.L., Reimold, W.U., Krogh, T.E. and Colliston, W.P. (1996): A 2.023 Ga age for the Vredefort impact event and a first report of shock metamorphosed zircons in pseudotachylitic breccias and Granophyre. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **144**, 369–387.
- Karson, J.A., Brooks, C.K., Storey, M. and Pringle, M.S. (1998): Tertiary faulting and pseudotachylites in the East Greenland volcanic rifted margin: Seismogenic faulting during magmatic construction. *Geology*, **26**, 39–42.
- Killick, A.M. (1994): The geochemistry of pseudotachylite and its host rocks from the West Rand Goldfield, Witwatersrand Basin, South Africa: Implications for pseudotachylite genesis. *Lithos*, **32**, 193–205.
- Killick, A.M. and Reimold, W.U. (1990): Review of the pseudotachylites in and around the Vredefort 'Dome', South Africa. *S. Afr. J. Geol.*, **93**, 350–365.
- Killick, A.M. and Roering, C. (1995): The relative age of pseudotachylite formation in the West Rand region, Witwatersrand Basin, South Africa, as deduced from structural observations. *S. Afr. J. Geol.*, **98**, 78–81.
- Killick, A.M. and Roering, C. (1998): An estimate of the physical conditions of pseudotachylite formation in the West Rand Goldfield, Witwatersrand Basin, South Africa. *Tectonophysics*, **284**, 247–259.
- Killick, A.M., Thwaites, A.M., Schoch, A.E. and Germs, G.J.B. (1986): A preliminary account of the tectonites near the interface between the Ventersdorp and Witwatersrand Supergroups, West Rand Area, South Africa. *Ext. Abstr. Geocongr. '86, Geol. Soc. S. Afr., Johannesburg*, 35–38.
- 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.
- Koeberl, C., Reimold, W.U. and Shirey, S.B. (1996): Re-Os

- isotope and geochemical study of the Vredefort Granophyre: Clues to the origin of the Vredefort structure, South Africa. *Geology*, **24**, 913–916.
- Lambert, P. (1981): Breccia dikes: Geological constraints on the formation of complex craters. In Schultz, P.H. and Merrill, R.B. eds.: *Multi-ring basins*. Proc. Lunar Planet. Sci., 12A, 59–78.
- Leroux, H., Reimold, W.U. and Doukhan, J.-C. (1994): A TEM investigation of shock metamorphism in quartz from the Vredefort dome, South Africa. *Tectonophysics*, **230**, 223–239.
- Lilly, P.A. (1979): Coesite and stishovite in the Vredefort, South Africa. *Nature*, **277**, 495–496.
- Lilly, P.A. (1981): Shock metamorphism in the Vredefort collar: Evidence for internal shock sources. *J. Geophys. Res.*, **86**, 10689–10700.
- Manton, W.I. (1965): The orientation and origin of shatter cones in the Vredefort Ring. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, **123**, 1017–1049.
- Martini, J.E.J. (1978): Coesite and stishovite in the Vredefort Dome, South Africa. *Nature*, **272**, 715–717.
- Martini, J.E.J. (1991): The nature, distribution and genesis of the coesite and stishovite associated with the pseudotachylite of the Vredefort Dome, South Africa. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **103**, 285–300.
- Martini, J.E.J. (1992): The metamorphic history of the Vredefort dome at approximately 2 Ga as revealed by coesite-stishovite-bearing pseudotachylites. *J. Metamorphic Geol.*, **10**, 517–527.
- Masaytis, V.L. (1976): Astroblemes in the USSR. *Int. Geol. Rev.*, **18**, 1249–1258.
- Masch, L. (1979): Deformation and fusion of two fault rocks in relation to their depth of formation: The hyalomylonite of Langtang (Himalaya) and the pseudotachylites of the Silvretta nappe (Eastern Alps). *Proc. 8th Conf. on Analysis of Actual Fault Zones in Bedrock. U.S. Geol. Surv., Open-file Report 79-1239*, 528–533.
- Masch, L., Wenk, H.R. and Preuss, E. (1985): Electron microscopy study of hyalomylonites – Evidence for frictional melting in landslides. *Tectonophysics*, **115**, 131–160.
- McCarthy, T.S., Charlesworth, E.G. and Stanistreet, I.G. (1986): Post-Transvaal structural features of the northern portion of the Witwatersrand Basin. *Trans. Geol. Soc. S. Afr.*, **89**, 311–323.
- McKenzie, D. and Brune, J.N. (1972): Melting on fault planes during large earthquakes. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **29**, 65–78.
- Moser, D.E. (1997): Dating the shock wave and thermal imprint of the giant Vredefort impact, South Africa. *Geology*, **25**, 7–10.
- Nicolaysen, L.O. (1990): The Vredefort structure: An introduction and a guide to recent literature. *Tectonophysics*, **171**, 1–6.
- Nicolaysen, L.O. and Reimold, W.U. (1999): Vredefort shatter cones revisited. *J. Geophys. Res.*, **104**, 4911–4930.
- Obata, M. and Karato, S. (1995): Ultramafic pseudotachylite from the Balmuccia peridotite, Ivrea-Verbano zone, northern Italy. *Tectonophysics*, **242**, 313–328.
- Passchier, C.W. (1982): Pseudotachylite and the development of ultramylonite bands in the Saint-Barthélemy Massif, French Pyrenees. *J. Struct. Geol.*, **4**, 69–79.
- Poldervaart, A. (1962): Notes on the Vredefort dome. *Trans. Geol. Soc. S. Afr.*, **65**, 231–248.
- Ray, S.K. (1999): Transformation of cataclastically deformed rocks to pseudotachylite by pervasion of frictional melt: Inferences from clast-size analysis. *Tectonophysics*, **301**, 283–304.
- Reimold, W.U. (1990): The controversial microdeformations in quartz from the Vredefort Structure, South Africa—A discussion. *S. Afr. J. Geol.*, **93**, 645–663.
- Reimold, W.U. (1991): The geochemistry of pseudotachylites from the Vredefort Dome, South Africa. *N. Jahrb. Miner. Abh.*, **162**, 151–184.
- Reimold, W.U. (1994): Hydrothermal Witwatersrand gold mineralization caused by the Vredefort mega-impact event? *Lunar Planet. Inst. Contrib.*, **825**, 92–93.
- Reimold, W.U. (1995): Pseudotachylite in impact structures — Generation by friction melting and shock brecciation?: A review and discussion. *Earth-Sci. Rev.*, **39**, 247–265.
- Reimold, W.U. (1998): Exogenic and endogenic breccias: A discussion of major problematics. *Earth-Sci. Rev.*, **43**, 25–47.
- Reimold, W.U. and Colliston, W.P. (1994): Pseudotachylites of the Vredefort Dome and the surrounding Witwatersrand Basin, South Africa. In Dressler, B.O., Grieve, R.A.F. and Sharpton, V.L. eds.: *Large meteorite impacts and planetary evolution*. Geol. Soc. Am. Spec. Pap., 293, 177–196.
- Reimold, W.U. and Gibson, R.L. (1996): Geology and evolution of the Vredefort Impact Structure, South Africa. *J. Afr. Earth Sci.*, **23**, 125–162.
- Reimold, W.U. and Koeberl, C. (1991): Chemical relationships between Witwatersrand pseudotachylites and their host rocks: evidence for fault-controlled hydrothermal activity? *EUG VI, Terra Abstr.*, **3**, 408.
- Reimold, W.U., Andreoli, M. and Hart, R. (1985): Pseudotachylite from the Vredefort Dome. *Lunar Planet. Sci.*, **XVI**, 691–692.
- Reimold, W.U., Fletcher, P., Snowden, P.A. and Wilson, J.D. (1986): Pseudotachylite – A general Witwatersrand Basin phenomenon! *Lunar Planet. Sci.*, **XVII**, 701–702.
- Reimold, W.U., Oskierski, W. and Huth, J. (1987): The pseudotachylite from Champagnac in the Rochechouart meteorite crater, France. *J. Geophys. Res.*, **92**, E737–E748.
- 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.
- Reimold, W.U., Colliston, W.P. and Wallmach, T. (1992a): Comment on "The nature, distribution and genesis of the coesite and stishovite associated with the pseudotachylite of the Vredefort Dome, South Africa" by J.E.J. Martini. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **112**, 213–217.
- Reimold, W.U., Stephan, T. and Jessberger, E.K. (1992b): Testing younger than 2 Ga ^{40}Ar - ^{39}Ar ages for pseudotachylite from the Vredefort structure. *S. Afr. J. Sci.*, **88**, 563–573.
- Reimold, W.U., Köberl, C., Fletcher, P., Killick, A.M. and Wilson, J.D. (1999): Pseudotachylitic breccias from fault zones in the Witwatersrand Basin, South Africa: Evidence of autometasomatism and post-brecciation alteration processes. *Mineral. Petrol.*, **66**, 25–53.
- Scholz, C.H. (1980): Shear heating and the state of stress on faults. *J. Geophys. Res.*, **85**, 6174–6184.
- Schreyer, W. (1983): Metamorphism and fluid inclusions in the basement of the Vredefort Dome, South Africa: Guidelines to the origin of the structure. *J. Petrol.*, **24**, 26–47.
- Schreyer, W. and Medenbach, O. (1981): CO_2 -rich fluid inclusions along planar elements of quartz in basement rocks of the Vredefort Dome, South Africa. *Contrib. Miner. Petrol.*, **77**, 93–100.
- 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. *Bull. Geol. Soc. Am.*, **94**, 926–935.
- Shand, S.J. (1916): The pseudotachylite of Parijs (Orange Free State), and its relationship to 'trap-shotten gneiss' and 'flinty crush-rock'. *Quart. J. Geol. Soc. London*, **72**, 198–221.
- Shimamoto, T. and Nagahama, H. (1992): An argument against the crush origin of pseudotachylites based on the analysis of clast-size distribution. *J. Struct. Geol.*, **14**, 999–1006.
- Sibson, R.H. (1975): Generation of pseudotachylite by ancient seismic faulting. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **43**, 775–794.
- 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.
- Simpson, C. (1978): The structure of the rim synclorium of the Vredefort Dome. *Trans. Geol. Soc. S. Afr.*, **81**, 115–121.
- Simpson, C. (1981): Occurrence and orientation of shatter cones in Pretoria Group quartzites in the collar of the Vredefort 'Dome': Impact origin precluded. *J. Geophys. Res.*, **86**, 10701–10706.
- Slawson, W.F. (1976): Vredefort core: A cross-section of the upper crust? *Geochim. Cosmochim. Acta*, **40**, 117–121.
- Smit, P.J. (1986): 1 : 250000 geological series 2626 Wes-Rand. Geological Survey, Republic of South Africa.
- Spray, J.G. (1995): Pseudotachylite controversy: Fact or friction? *Geology*, **23**, 1119–1122.
- Spray, J.G. and Thompson, L.M. (1995): Friction melt distribution in a multi-ring impact basin. *Nature*, **373**, 130–132.
- Spray, J.G., Kelley, S.P. and Reimold, W.U. (1995): Laser probe argon-40/argon-39 dating of coesite- and stishovite-bearing pseudotachylites and the age of the Vredefort impact event. *Meteoritics*, **30**, 335–343.
- Stepto, D. (1990): The geology and gravity field in the central core of the Vredefort structure. *Tectonophysics*, **171**, 75–103.
- Techmer, K.S., Ahrendt, H. and Weber, K. (1992): The development of pseudotachylite in the Ivrea-Verbano Zone of the Italian Alps. *Tectonophysics*, **204**, 307–322.
- Therriault, A.M., Reimold, W.U. and Reid, A.M. (1996): Field relations and petrography of the Vredefort Granophyre. *S. Afr. J. Geol.*, **99**, 1–21.
- Thompson, L.M. and Spray, J.G. (1994): Pseudotachylitic rock distribution and genesis within the Sudbury impact structure. In Dressler, B.O., Grieve, R.A.F. and Sharpton, V.L. eds.: *Large meteorite impacts and planetary evolution*. Geol. Soc. Am. Spec. Pap., 293, 275–287.
- Trieloff, M., Reimold, W.U., Kunz, J., Boer, R.H. and Jessberger, E.K. (1994): ^{40}Ar - ^{39}Ar thermochronology of pseudotachylite at the Ventersdorp Contact Reef, Witwatersrand basin. *S. Afr. J. Geol.*, **97**, 365–384.
- Truter, F.C. (1936): Observations on the geology and tectonics of a portion of the Potchefstroom District. *Trans. Geol. Soc. S. Afr.*, **39**, 441–456.
- Walraven, F., Armstrong, R.A. and Kruger, F.J. (1990): A chronostratigraphic framework for the north-central Kaapvaal craton, the Bushveld Complex and the Vredefort structure. *Tectonophysics*, **171**, 23–48.
- Wenk, H.R. (1978): Are pseudotachylites products of fracture or fusion? *Geology*, **6**, 507–511.
- White, J.C. (1993): Shock-induced melting and silica polymorph formation, Vredefort Structure, South Africa. In Boland, J.N. and Fitz Gerald J.D. eds.: *Defects and processes in the solid state: Geoscience applications (The McLaren Volume)*. Elsevier, Amsterdam, 69–84.
- White, J.C. (1996): Transient discontinuities revisited: Pseudotachylite, plastic instability and the influence of low pore fluid pressure on deformation processes in the mid-crust. *J. Struct. Geol.*, **18**, 1471–1486.
- Willemse, J. (1937): On the old granite of the Vredefort region and some of its associated rocks. *Trans. Geol. Soc. S. Afr.*, **40**, 43–120.
- Wilshire, H.G. (1971): Pseudotachylite from the Vredefort ring, South Africa. *J. Geol.*, **79**, 195–206.

(2000年3月15日受付, 2000年12月11日受理)