

## 特集：シュードタキライト

嶋本利彦(東京大学地震研究所, シンポジウム世話人)

1991年12月の岩石のレオロジー・構造地質合同シンポジウムでは、「シュードタキライトの起源と地殻応力問題の解明」と題するセッションがもうけられ、11の研究発表がなされた。もともとこのシュードタキライトに関する一連の研究は、平成2～3年度の科学研究費補助金(一般研究B, 代表者：嶋本利彦)による研究として開始されたものである。上記のセッションでは、公式・非公式にこの科研費によるプロジェクトに参加した人達と、全国で関連した研究をおこなってきた方々に講演をお願いした。発表された研究は、下記の3つを除いて本特集号に論文として収められている。

高木秀雄氏には、世界のシュードタキライトの特徴・分類・起源に関する総括的な講演をしていただいたが、これは既に素晴らしい総説として地質ニュース(437, 15-25, 1991)に報告されているので、本特集には論文は掲載されていない。また、豊島剛志氏による北海道日高帯産のシュードタキライトの研究は、既に*Jour. Struct. Geol.* (8, 507-523, 1990)に報告されている。小畑正明氏には、イタリア北部産の珍しいカンラン岩中のシュードタキライトについて報告していただいたが、残念ながら、本特集には同氏の論文を載せることができなかった。

IGC 京都・地震研改組・北海道南西沖地震の現地調査などのために世話人(嶋本)が極めて多忙になり、この特集号の出版が非常に遅れてしまった。心から関係者にお詫びいたします。掲載された論文は世話人が注意深く査読をして必要に応じて改訂をお願いしたが、考え方が本質的に違うところは著者の考えを尊重することにした。以下、プロジェクトの概要を紹介し、特集号の内容について印象を述べておきたい。

### 研究プロジェクトの概要

シュードタキライトは、断層帯の内部または近傍に脈状またはネットワーク状に産する超細粒マトリックスと粉碎岩片の集合体からなる岩石である。この岩石は、地震時の高速断層運動と衝撃によって形成されたという点に関してはほとんどの研究者の考えは一致しており、「地震の化石」とも呼ぶべき岩石である。つまりこの岩石は、断層がかつて地震性の動きをしたことを示すほとんど唯一の深部断層岩(断層深部で形成され、隆起・削剝を経て現在地表に露出している岩石)である。したがって、シュードタキライトと密接に共存する深部断層岩を調べると、地震の震源域でどのような変形が実際におこっているのかを知ることができる。断層のレオロジーと地震の発生機構に関心をもつ人達には、シュードタキライトよりもそれに付随する断層岩の方が興味深いのである。この問題は、マイロナイト・プロジェクトとして研究を進めているので、ここではこれ以上はふれない。

シュードタキライトのマトリックスが余りにも細粒であるために、その起源に関しては古くから2つの考えがあった。多くの人達は、このマトリックスは地震時の高速断層運動に伴う摩擦熔融の産物であると信じている(メルト説)。もしメルト説が正しいならば、断層の変位とシュードタキライトの厚さの関係は、剪断強度にして100 MPaを越える断層の強い相互作用を示すことになる(Sibson, R. H., *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 43, 775-794, 1975)。自然の岩石からその強度が推定できる例は極めて稀なので、このような情報は岩石のレオロジーにおいては非常に重要である。一方、シュードタキライトのマトリックスは超細粒粉碎岩片の集合であるという説も古くからある(粉碎説)。この奇異なる

岩石の起源の問題に決着をつけることは、本プロジェクトの大きな目的の一つであった。

本プロジェクトのもっと大きな目的は、シュードタキライトを形成するような高速断層運動を実験室で再現し、地震時および地震発生直後に断層帯内部でおこっている変形の様子を調べ、高速運動時の断層のレオロジーの性質を実験室で決めることであった。シュードタキライトだけに焦点を絞るのではなく、この特異な岩石の問題を「地震時の高速断層運動」というより広い立場からとらえてみたいのである。断層のクリープは世界的にみても極めて稀なので、既存の断層のほとんどは、地震性の挙動、つまり高速断層運動をしながら進化していると考えて良い。したがって、高速断層運動は地殻の変形を考える上でも非常に重要である。しかも、断層が高速で大変位をする時の性質は、これまでの試験機ではほとんど体系的に調べることができていないのである。断層の高速領域での性質は、地震発生直後の断層の挙動を予測し、地震発生の全過程をモデル化する上でも不可欠である。

上述の研究目標を達成するために、本科学研究費補助金による研究では、回転式高速剪断摩擦試験機を設計・製作・調整することが大きな目標であった。試験機の基本設計と現状については、嶋本・堤(本特集号)にまとめてある。

### シュードタキライトの起源

シュードタキライトの細粒マトリックス中には大小様々な粉碎岩片が普遍的に含まれている。これらは明らかに母岩の粉碎物であるが、岡村・北村(日本鉱物学会講演予稿集, 47頁, 1990)はこれらの粉碎岩片の粒径が破壊に特徴的なフラクタル分布を示すことを見いだした。この粒径分布則は、ある範囲の粒径をもつ岩片の数と別の範囲の粒径をもつ岩片の数の間には分布則によって規定される特定の関係があり、したがって両方の範囲の粒径をもつ岩片の占める面積の間にも特定な関係があることを示している。

嶋本・長浜(月刊地球, 13, 416-427, 1991)は、この粒径分布則を用いてシュードタキライトの粉碎説を検証する方法を提唱した。つまり、もしこの岩石の細粒マトリックスが微粒粉碎物から構成されているならば、マトリックスの占める面積は粒径分布則から予測される量と同じオーダーになるはずだと考えたのである。オーストラリア中央部・Musgrave山地産のシュードタキライトについての解析結果は、シュードタキライトの細粒マトリックスの占める面積が粒径分布則から予測される面積よりもほぼ1桁大きいことを示した。したがって、この岩石のマトリックスの占める面積は粉碎説では説明できないことになる。

長濱ほか(本特集号)は、世界の3カ所のシュードタキライトを用いて、この岩石中の粉碎岩片の粒径が修正フラクタル分布則によってより良く記述できること、およびマトリックスの占める面積はこの分布則から予測される値よりも3桁以上も大きいことを示した。数 $\mu\text{m}$ 以下の岩片の数は急激に少なくなり、この修正フラクタル分布則は粒径の下限の存在を記述できるようにフラクタル分布則を修正したものである。全く同じ粒径分布則は、実験的に形成されたシュードタキライト中の粉碎岩片についても認められた(堤, 本特集号)。この新しい粒径分布則は、他にも多くの適用例があると思われる。

粉碎岩片の粒径分布からの予測以上に粉碎説によって説明が困難なのは、数 $\mu\text{m}$ 以下の岩片が非常に少ないことである(嶋本・長浜, 1991, 上述; Shimamoto & Nagahama, *Jour. Struct. Geol.*, 14, 999-1006, 1992)。つまり、粉碎説の立場に立てば、マトリックスを構成する微粒粉碎岩片は、1から数 $\mu\text{m}$ の間の粒径をほとんど飛び越して細粒化していることになる。そのようなことは物理的には考えられない。私自身は、シュードタキライト中の粉碎岩片の粒径の特徴から粉碎説は否定されたと思っている。

典型的なシュードタキライト中には、メルトからの急成長を示唆する微鉱物粒の放射状・樹脂状組織、シュードタキライト形成時の条件よりも遥かに高温で安定な鉱物、融食を示す粉碎

岩片などがしばしば認められる(林・戈, 本特集号; 参照). これらは, シュードタキライトの細粒マトリックスがメルト起源であることを強く示唆している. さらに, 中国北西部の富蘊断層帯からは, X線回折によって数10%以上のガラスが確認できるという驚くべきシュードタキライトが見つかった(林・戈, 本特集号). シュードタキライトに関する一連の重要な研究をしたR. H. Sibsonは, 「彼のいく所では必ずシュードタキライトが見つかる」とまで言われている人である. この富蘊のサンプルは, かのSibsonをして「こんな新鮮なシュードタキライトは見たことがない」と唸らせた(於: 地震研, 1990年秋). これは, シュードタキライトが間違いなくメルト起源であることを示す貴重なサンプルである.

地震研の高速摩擦試験機を用いて最初におこなったのが, 摩擦熔融についての実験であった. その結果, 低圧下でも摩擦熔融は比較的簡単に起こること, 摩擦熔融は非平衡現象であること(嶋本・林, 本特集号), 摩擦熔融時には低融点鉱物の選択熔融が起こること(林・嶋本, 本特集号), などが明らかになった. とくに, 石英の融点は高いので, 母岩が石英を含む場合には, 熔融ガラスの組成は母岩よりもシリカにやや乏しくなる. このことは富蘊断層沿いのシュードタキライトについて認められ, 実験的にもほぼ定量的に再現された(林・戈, 本特集号; 林・嶋本, 本特集号).

最近, J. G. Spray (*Jour. Struct. Geol.*, **9**, 49-60, 1987; *Contrib. Mineral. Petrol.*, **99**, 464-475, 1988; *Jour. Struct. Geol.*, **11**, 895-905, 1989) および L. A. Kennedy & J. G. Spray (*Tectonophysics*, **204**, 323-337, 1992) らによって, 摩擦熔融の現象が実験的に調べられた. しかし, 上述の非平衡熔融を検証する実験と選択熔融を定量的に示す実験は, これまで試みられていなかった. さらに, 我々の研究は, 摩擦熔融現象だけでなく断層のレオロジー的性質を決めることも大きな目標としており, これらの研究よりも広い視点から断層の高速運動にまつわる問題をとらえようとしている.

摩擦熔融に関する実験的研究はシュードタキライトの起源に急速に光をあてつつあるが, 摩擦熔融のプロセスの詳細は未だによくわかっていない. 岡本・北村(本特集号)は, 北西スコットランド産のシュードタキライトの解析結果から, 「摩擦熔融の前に母岩がまず細粉化し, 粉体間の化学反応によって熔融が促進される」というモデルを提唱した. 私自身, このモデルを検証する実験を考え続けているが, 今のところ名案は浮かんでいない.

ここで強調しておきたいのは, 報告例は少ないが, 林ほか(本特集号)の予察的な報告で指摘されているように, 粉碎起源のシュードタキライト(様岩)も存在する可能性が高いことである. この岩石は, 細粒・暗黒色で脈状またはネットワーク状に産する点では典型的なシュードタキライトに似ている. しかし, 岩石中で粉碎物の占める割合が大きいこと, 粉碎岩片がほとんど全て角ばっていること, メルトからの急冷を示唆する組織も高温で安定な鉱物も含まれていないこと, ガラス光沢にも乏しいこと, などの点において典型的なシュードタキライトとは明らかに違っている. 今後, このような岩石のより詳しい記載と解析が望まれる.

### 摩擦熔融と断層破砕物形成の競合

シュードタキライトの起源を考える時に避けて通れないのが, 「シュードタキライトは何故稀なのか?」という古くて新しい問題である. 実際, 実験では簡単に摩擦熔融をおこすことができるのに, なぜ天然の断層帯には至るところでシュードタキライトが産出しないのであろうか. 嶋本・長浜(月刊地球, 1991, 上述)は, 摩擦熔融と断層破砕物形成の競合過程がこの問題を解く鍵になることを提唱した. つまり, 幅広い断層帯が形成されてしまうと変形が断層帯内部で分散し, 局所的な摩擦発熱がおこらなくなって, 摩擦熔融がおこりにくくなるであろう(R. H. Sibson, *Nature, Phys. Sci.*, **243**, 66-68, 1973). したがって, シュードタキライトが稀であるという事実は, 長期的には破砕物形成の

方が摩擦熔融に克つことを示唆している(例外もあるが)。本特集号の長濱・中村および堤・嶋本の論文は、それぞれ破砕物形成過程と摩擦熔融の energetics を確立し、上記の競合過程を定量的に評価するための基礎研究である。

一例として、破壊面が形成された直後でまだ断層破砕物が形成されていない状態を考えてみよう。長濱・中村(本特集号)によれば、断層変位  $\Delta d$  と形成される破砕物の層の厚さ  $\Delta h$  の間には

$$\Delta h / \Delta d = a \tau^b \quad (1)$$

のような経験則が成り立つ( $\tau$ : 剪断応力,  $a, b$ : 物質常数)。 $\Delta$  は、小さいが有限な増分量を示している。一方、摩擦の仕事がこの破砕物層中でのみ熱に変わると仮定すると、この層内の温度上昇  $\Delta T$  は

$$\Delta T = \frac{\eta \tau \Delta d}{\rho C_p \Delta h} = \frac{\eta}{\rho C_p a \tau^{b-1}} \quad (2)$$

で与えられる( $\eta$ : 摩擦発熱の効率,  $\rho$ : 密度,  $C_p$ : 比熱)。熱は母岩中にも発散するので、この温度上昇は最大推定値である。

母岩の温度を  $T$  とすると、 $(T + \Delta T)$  が岩石の融点より大きければ断層破砕帯全体が摩擦熔融をするだろうし、融点よりも小さければ破砕物形成の方が摩擦熔融に卓越するはずである。摩擦熔融と破砕物形成の競合過程を解くためには、このような解析を高速・大変位のもとでおこなう必要があるのである。「シェードタキライトがなぜ稀か」という問題は、「断層破砕帯がどのように成長していくか」という視点からとりあげるべきである。大友・嶋本(本特集号)は、断層が高速運動をする時には摩擦発熱に起因する熱破壊によって岩石の強度が2桁以上も低下することを示した。破砕物形成の経験則は、このような熱破壊が卓越する条件下でも決める必要がある。現状は、やっと問題点がしぼられてつつある段階と言えよう。

### 高速運動時の断層のレオロジー

高速剪断摩擦試験機は、(1)地震発生時に断層帯内部でおこる変形様式の研究、(2)高速領域における断層のレオロジー的性質の測定、(3)地震時の摩擦発熱と間隙水圧の相互作用、などを総合的に調べるために設計されている。上述のように、(1)に関しては、天然のシェードタキライトとほとんど同じ特徴をもつ岩石を実験室でつくることができ、断層破砕物形成過程・熱破壊の重要性など、断層の高速運動に伴う変形過程についても体系的に調べる準備が整った。

(2)は、地震時に断層が動き始めてからどのような挙動をするか、そして地震時の摩擦発熱が地震直後の断層の急速な強度回復にどの程度影響を与えるか、という問題に関連して重要である。これについては、断層が高速で動く時に velocity weakening の性質(高速ほど定常的な摩擦が小さくなる性質)が初めて確認されたことが大きい(堤・嶋本, 本特集号)。断層が高速で大きく変位すると、摩擦発熱の影響などで当然摩擦抵抗も減ることが予想されていたが、今回それが初めて確かめられた。これは、地震発生の全過程をモデル化する上で非常に重要である。今後、より正確な力学データを得るためには、試料ホルダの改良と新しいトルク-軸力変換器を開発する必要がある。また、熱破壊の影響を抑えるために、封圧下で高速摩擦実験ができる試験機を開発することが、将来の大きな課題である。

(3)は、地震時の高速断層運動に伴う摩擦熱で間隙水圧が高くなり、地震発生時の断層の摩擦抵抗は非常に小さくなるはずだ、という予測である。この問題は、以前からその重要性が指摘されながら、体系的な研究がなされてこなかった。摩擦抵抗が減れば摩擦発熱も小さくなるので、これは明らかに非線形な相互作用の問題である。また、素過程として重要になるのは、断層帯内部の発熱部と間隙水の間の熱交換の過程と間隙水圧上昇後の水の挙動である。高速摩擦試験機はこの問題を単純化した形で検討できるように設計されており(嶋本・堤, 本特集号)、今後体系的な研究をする予定である。