

断層の高速摩擦と地震の発生過程

現状と展望

嶋 本 利 彦* 廣 瀬 丈 洋** 溝 口 一 生*
野 田 博 之*

High-Velocity Friction of Faults and Earthquake Generating Processes: Current Status and Future Perspectives

Toshihiko SHIMAMOTO *, Takehiro HIROSE **, Kazuo MIZOGUCHI *
and Hiroyuki NODA *

Abstract

To understand not only the mechanisms of earthquakes, but also the origins of the diverse behavior of faults and plate boundaries, one must integrate (1) *field* studies on faults to understand deep intrafault processes, (2) *laboratory* work to reproduce those processes and determine mechanical and transport properties of fault zones, (3) *theoretical and numerical* studies analyzing fault motion, including earthquake generation processes, based on the constitutive properties determined by laboratory studies, and (4) *seismological and geodetic* studies revealing dynamic fault motion during earthquakes and diverse aseismic fault behavior. Ideally, such integrated studies should be carried out for a selected fault that produced an earthquake with good seismic/geodetic records so the predictions from (1) to (3) can be fully tested against (4) rather than selecting favorite data from the literature. The 1999 Taiwan Chi-chi earthquake is an ideal example for such integrated studies because the fault motion during the earthquake is clearly analyzed based on very good near-field strong motion data, and because the Chelungpu fault zone, which caused the earthquake, is exposed on land and has been drilled at several places. Also, the IODP drilling project into seismogenic zones in the Nankai Trough will provide rare opportunities for such integrated fault and earthquake studies in the near future.

This paper focuses on high-velocity frictional properties of faults for which frictional heating plays a crucial role, with special reference to dynamic fault motion during large earthquakes. Recent progress in high-velocity friction studies, particularly those in frictional melting, thermal pressurization, and high-velocity gouge behavior, are rapidly filling the gap between field/laboratory studies on faults and seismological/geodetic studies on earthquakes. Representative results from our recent studies are presented, revealing that the field/laboratory data can predict slip weakening distance, D_s , of the same order as determined

* 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

** スイス連邦工科大学地球科学教室

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

** Department of Earth Sciences, Swiss Federal Institute of Technology (ETH)

by seismic data. We also show highlight data on frictional melting and argue that the effect of frictional melting on the dynamic fault property can be predicted by solving a Stefan problem with moving boundaries. Seismic fault motion may be predicted not so long in the future based on the measured properties of a fault that caused an earthquake. Transition from ordinary friction to high-velocity friction that has been poorly explored to the present, should control the initial phase of earthquake generation and perhaps is critical to an understanding of the physical bases of earthquake prediction. This is perhaps the most important area for systematic studies in the near future.

Key words : fault, fault rocks, high-velocity friction, frictional melting, thermal pressurization, pore pressure, permeability, earthquake mechanism

キーワード : 断層, 断層岩, 高速摩擦, 摩擦熔融, 摩擦加熱, 間隙圧, 浸透率, 地震発生機構

I. はじめに

地震の発生機構を明らかにするためには、(1) 断層帯深部で実際におこっている変形・反応・物質移動などのプロセスを明らかにするための断層研究、(2) 同じプロセスを実験室で再現して断層の力学的性質、流体移動に関する性質などを決める実験的研究、(3) 実験で決まった性質を用いた理論・シミュレーションによる断層挙動の解析、(4) 断層の多彩な挙動を明らかにする地震学的・測地学的研究を融合する必要がある。実験と理論・シミュレーションは、断層研究と地震学・測地学を結ぶ架け橋として極めて重要である。しかし、これまでの理論・シミュレーションにおいては、研究者が好みの実験結果を選択し、時にはパラメタの値を変えて地震の発生過程を解析することが多かった。理想的には、断層と地震の総合的研究は、1つの断層(または断層系)とそれが引き起こした地震を対象としておこなうべきである。つまり、対象とする断層に対して決まった性質に基づいて、地震学的・測地学的に決まった断層の挙動を定量的に説明できてこそ、断層の挙動が予測できたとと言える。

1999年台湾・集集地震は、おそらく、このような総合的研究に世界でもっとも適した地震である。史上最高と言われる地震記録によって地震時の断層の挙動は詳細に解析されている。しかも、地震

を引き起こした車籠埔断層の断層帯はいくつかの場所で見事に露出しており、すでに複数のボーリングによって断層帯が掘削されている。また、車籠埔断層を2 km近く掘削するICDPプロジェクトも2003年12月に始まっている。集集地震をおこした断層の挙動が再現できるかどうかは、断層と地震の総合的研究の試金石となる。一方、数年後に始まる「ちきゅう」による南海トラフ・震源域掘削も、沈み込み帯における断層研究と地震・地殻変動の研究を総合したプロジェクトとして極めて重要である。このような状況を反映して、2003年地球惑星関連学会合同大会では上記のテーマに関連したセッションが4つも開かれるほど、断層と地震に関する総合的研究への関心が高まっている。一方、米国においても、2002年8月には、39機関が参加した南カリフォルニア地震センター(SCEC)コンソーシアムの中にFARM(Fault and Rock Mechanics)グループが結成され、毎年9月のSCEC総会においてワークショップを開き、上記4分野の研究者が集まって今後の重要課題を模索している。

本稿では、最近急速に研究が進展しつつある断層の高速摩擦に焦点をあてて、断層研究と地震学的研究が急接近しつつある状況を示す。高速摩擦(high-velocity friction または high-speed friction)とは、地震時に断層が高速で大きな変位をするときの断層の力学的性質であり、摩擦加熱

が重要な役割をはたしている。とくに、摩擦熔融、摩擦熱による間隙圧上昇 (thermal pressurization)、断層ガウジの高速摩擦挙動に関して、筆者らの最近の主な成果をまとめて示し、おぼろげに見えてきた高速摩擦の全体像と今後の課題について論じたい。

大地震をおこす断層運動に関してこの 10 年以上問題とされてきたのは、 D_c パラドックスと呼ばれる問題である。問題をやや単純化して説明すると、地震は断層がすべることによって強度を失い、断層に作用する応力に耐えきれなくなって発生する (図 1)。従って、強度低下量と強度低下がおこるすべり量 (D_c , slip-weakening distance) が地震発生と地震時の断層の挙動を規定する重要なパラメタである (大中・松浦, 2002; Scholz, 2002 参照)。速度・状態に依存する断層の構成則 (rate-and-state dependent constitutive law) においても、速度の急変にともなって断層の状態が変わるのに必要な特性距離が使われている (Dieterich, 1978, 1979, 1986; Scholz, 2002 参照)。しかし、実験で決まるこのような特性距離は $10^{-5} \sim 10^{-3}$ m となるのに対して、地震学的には D_c は $10^{-1} \sim 1$ m のオーダーに決まりつつある (Ide and Takeo, 1997; Fukuyama *et al.*, 2003; Mikumo *et al.*, 2003)。両者の間の数桁に及ぶ違いは、スケール則で説明されることが多かった (Scholz, 1988; Marone and Kilgore, 1993; Ohnaka and Shen, 1999 など)。本稿では、最近の高速摩擦の研究によって、実験と自然界における変形集中域の幅の違いを考慮しながらも、別の視点から D_c 問題が解決できる可能性が強くなったことを示す。摩擦加熱の影響を重視する点においてこれまでのスケール則とは異なるアプローチであり、その根拠は天然の断層帯で認められる摩擦加熱の痕跡である。

II. 摩擦熔融と Stefan 問題

第一著者 (嶋本) が高速摩擦の重要性を認識したのは、1980 年代前半に、シュードタキライトと呼ばれる細粒・緻密な脈状岩が断層沿いに形成されていることを知ったのがきっかけであった。地

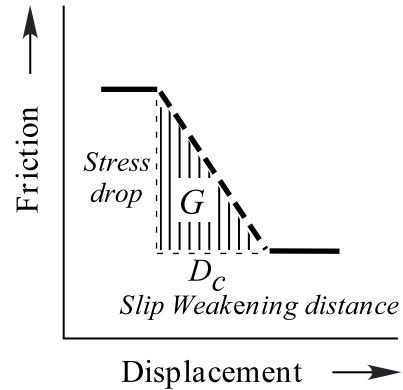


図 1 簡単な slip weakening モデル。断層は、 D_c すべる間に強度低下をおこす。 G は破壊エネルギー。

Fig. 1 A simple slip weakening model in which a fault weakens over slip weakening distance, D_c . Shaded area G denotes fracture energy.

震時の断層運動によって岩石が熔融するほど温度上昇がおこれば、断層の力学的性質に大きな影響を与えるはずだと直感したのである。当時でも、Sibson (1973, 1975) の優れた研究によって、シュードタキライトが地震性断層運動を理解する上で重要であることは広く認識されていた。またこの岩石固有の魅力から、地質学者はシュードタキライトの産状、変形・熔融組織、構成鉱物と形成条件などに関する多くの研究をおこなってきた (シュードタキライトとその成因に関する論争については高木 (1991) の総説と嶋本・長濱 (1991) を参照)。一方、McKenzie and Brune (1972) に代表される理論的研究は、摩擦加熱によって条件次第では岩石が熔融するほど断層内部の温度が上昇することを示した。しかし、これらの地質学的・理論的研究は、摩擦熔融そのものが断層の力学的性質にどのような影響を与えるかを明らかにするものではなかった。筆者らの回転剪断式高速摩擦試験機は、このような認識に基づいて、摩擦加熱の力学的効果を調べるために設計・製作されたものである (嶋本・堤, 1994)。

1) 摩擦熔融実験

摩擦熱によってパイプなどを溶接する機械を

使って、岩石の摩擦熔融現象を実験的に再現したのは Spray (1987, 1988) が最初であった。彼の研究は天然のシュードタキライトを再現することを目的としており、残念ながら、現在に至るまで断層の力学的性質を測定していない。一方、筆者らの高速摩擦試験機では断層沿いの剪断応力の測定が可能であり、地震時の断層運動にほぼ相当する 1.6 m/s の変位速度と無制限の変位を達成できる。しかし、摩擦加熱にともなう岩石が熱破壊をおこし、一軸破壊強度が数 100 分の 1 に減少するので、断層に垂直な応力は数 MPa しかかけることはできない (大友・嶋本, 1994)。つまり、それ以上の軸荷重をかけると母岩がすぐに破壊してしまっ、実験にならない。地下深部の高い発熱速度は我々の試験機でも達成できてはいない。しかし、ガプロのように比較的熱破壊に強い試料を使うことによって、摩擦熔融にともなう断層の性質を調べることが可能になったのである。

Tsutsumi and Shimamoto (1996, 1997a, b) の一連の研究によって、摩擦加熱にともなう温度上昇が実測され、摩擦熔融が断層の力学的性質に与える影響のほぼ全体像が明らかにされた。しかし、これらの研究では組織観察が不完全であったために、摩擦熔融現象を解くための物理モデルを提唱するには至らなかった。その後、廣瀬丈洋らは段階的に実験を中断してメルト層の成長過程を組織解析によって調べ、断層の力学的挙動と比較して摩擦熔融の物理モデルを提唱した (Hirose, 2002; 廣瀬・嶋本, 2002; Hirose and Shimamoto, 2003a, b)。その結果、摩擦熔融現象は数学的には移動境界を扱う Stefan 問題にすぎないことが明らかになった (廣瀬・嶋本, 2002)。摩擦熔融は理論的解析の段階に達したと考えられるので、以下に代表的な実験データを示して摩擦熔融の物理モデルを紹介しておく。

図 2 は、インド産ガプロの無水条件下における典型的な高速摩擦挙動である (Hirose, 2002)。図の a 点の摩擦強度を過ぎて断層を変位させると、断層の強度は低下を続けて b 点付近では摩擦係数が 0.4 前後まで低下する。通常の摩擦実験では a 点を過ぎた直後に実験が中断するので、このよう

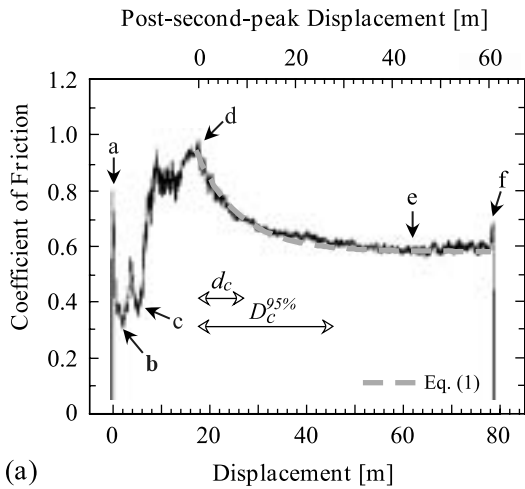
な大きな強度低下は認められない。b 点付近では摩擦係数が一時的にほぼ一定になり、図 2b の a から b への変化は、図 1 の slip weakening 曲線とよく似ている。ここではこれを第 1 の slip weakening と呼ぶ (D_c は数 10 cm になっていることに注意)。b 点を過ぎたあたりから断層面沿いにパッチ状のメルトが形成されているので、a から b に向けて断層面沿いのアスペリティ先端部の局所的加熱・熔融からメルトパッチへの成長がおこっている。Rice (1999) の flash heating の理論がほぼ適用できるのはこの範囲と考えられる。ちなみに、彼の理論によって、Tsutsumi and Shimamoto (1997a) のメルト層が形成しない場合の実験データはうまく説明されている。第 1 の slip weakening は地震の発生を考える上で非常に重要であるが、熔融が局所的であるために、筆者らの知る限りでは同様のプロセスは天然の断層沿いではまだ確認されていない。

メルトパッチが形成され始めると摩擦強度は急増し、図 2a の d 点付近で第 2 の強度ピークを過ぎてから第 2 の slip weakening をおこす。この摩擦係数 μ のほぼ指数関数的な減少は、第 2 の強度ピーク以降の変位を d 、第 2 の強度ピークにおける摩擦係数を μ_{max} 、ほぼ定常状態における摩擦係数を μ_{ss} とすると、次式で表現できる (図 2a の波線)。

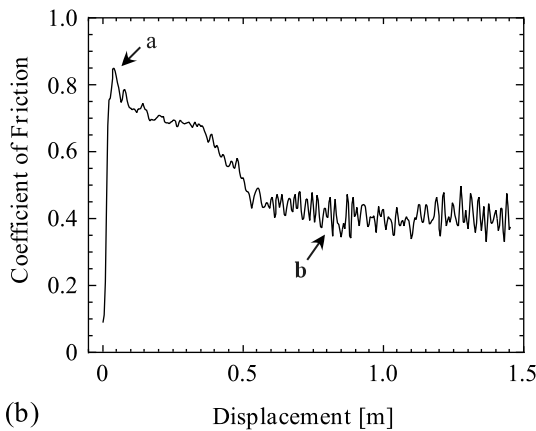
$$\mu = \mu_{ss} + (\mu_{max} - \mu_{ss}) \exp(-d/d_c) \quad (1)$$

ここで d_c は slip weakening を示すパラメータで、 $(\mu - \mu_{ss})$ が $(\mu_{max} - \mu_{ss})$ の $\exp(-1) = 0.368$ 倍まで減少するのに要する変位である。 $(\mu - \mu_{ss})$ が $(\mu_{max} - \mu_{ss})$ の 95% ほど低下するのに要する変位を $D_c^{95\%}$ とすると、 $D_c^{95\%} = 3d_c$ となり、 $D_c^{95\%}$ は図 1 の D_c にイメージとして近い量になる。図 2a の実験結果に対しては、 $\mu_{max} = 0.89 \pm 0.001$ 、 $\mu_{ss} = 0.6 \pm 0.0005$ 、 $d_c = 9.4 \pm 0.08$ m が得られる。

このような挙動は何によって決まるのかを考えよう。図 3a は、最初の slip weakening 後の変位を横軸にとり、縦軸にメルト層の厚さの面積平均 (薄片上でメルトの占める総面積を観察した断層



(a)



(b)

図 2 (a)摩擦係数と変位の関係で示したインド産ガブロの典型的な高速摩擦挙動,(b)は曲線の初期部分の拡大図.

実験条件は、変位速度が 0.85 m/s、垂直応力が 1.5 MPa である。曲線に見られる小さな上下変動は、試料がやや片あたりをするために一回転ごとにトルク計が少しこねられて生じる出力である。(a)の d から e に至る薄い波線は、第 2 強度ピークから定常摩擦に向かって指数関数的に減少する関数(第(1)式)を使った最小自乗法近似(カレイダグラフを使用)。

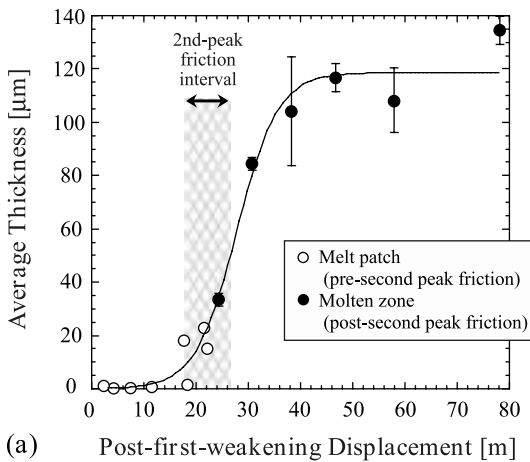
Fig. 2 (a) Representative mechanical behavior of Indian gabbro at a velocity of 0.85 m/s and under a normal stress of 1.5 MPa, shown as a frictional coefficient versus displacement curve, and (b) a close-up figure showing the initial part of the curve in (a).

Two stages of slip-weakening are recognized (a to b and d to e). Periodic fluctuations on the curves is due to distortion of torque gauge at each revolution caused by small misalignments of facing specimens. Dashed line in (a) is a least-squares fit to the second slip-weakening behavior with an exponential decay to a steady state, equation (1), using Kaleida Graph software.

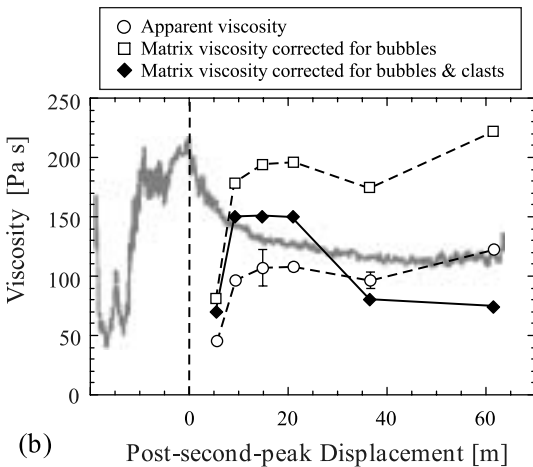
の長さで割って求めた厚さ)を示している。メルト層は最初変位とともに指数関数的に増加し、最終的には厚さの増加の割合が指数関数的に減少してほぼ定常的な厚さに近づく。式と係数は示さないが、図中の実線のように、この変化はロジスティック曲線で表現できる。図 3a に示されたパッチ状メルト層の急増にともなって断層の摩擦強度は急増している。この結果は多くの人が抱くイメージと異なるかもしれないが、粘っこくて薄いメルト層の形成は断層の強度を増加させる。仮にメルト層が無限に薄いならば、剪断歪速度(変位速度をメルト層の厚さで割った値)は無限に大

きくなり、これに粘性率をかけて得られる剪断応力も無限に大きくなるのである。実際にはメルトパッチの初期の厚さは約 20 μm なので応力は無限にはならない。メルトパッチはやや厚くなりながら側方に成長し、第 2 の強度ピーク付近で合体して断層面を覆うメルト層が形成される。その後は、このメルト層の急速な成長にともなって第 2 の slip weakening がおこる。

図 3b は、メルト層の粘性率の変化を第 2 の強度ピーク以降の変位に対して示したものである。白丸は、変位速度を薄片上で実測したメルト層の平均層厚で割って平均剪断歪速度を求め、実測され



(a) Post-first-weakening Displacement [m]



(b) Post-second-peak Displacement [m]

た剪断応力とこの平均剪断歪速度から求めたメルト層全体の粘性率である。この結果にメルト層中の気泡（含水鉱物の熔融による）の影響を補正し（白抜き四角）、最後に岩片（クラスト）の補正を加えてメルト部分の粘性率を求めた（ぬりつぶした菱形）。メルトの粘性率は最初約 65 Pa s から 2.3 倍ほど急増し、その後やや減少してほぼ 70 ~ 80 Pa s のレベルで一定になる。粘性率の増加にも関わらず断層の剪断抵抗が減少するのは、メルト層が厚くなり剪断歪速度が 3 倍以上も減少するからである。Jaeger (1969, 140-142) に示されているように、非常に薄いメルトは断層沿いに容易には動けない。しかし、メルト層が厚くなると

図 3 (a) 面積平均で求めたメルト層の厚さと第 1 の slip weakening 後の変位 (図 2 の b 点以後の変位) の関係。実線は、ロジスティック曲線を用いた最小自乗近似である。(b) メルトの粘性率と第 2 強度ピーク以降の変位 (図 2a の d 点以降の変位) の関係。

(b) の白丸は、測定された剪断応力をメルト層全体の平均剪断歪速度で割って求めたメルト層の見かけ上の粘性率を示す。また、白抜きの四角は気泡の補正を加えたメルト層の粘性率（メルトと岩片の粘性率）を示し、ぬりつぶした菱形は気泡と岩片の補正を加えたメルト部分の粘性率を示す。

Fig. 3 (a) The area-averaged thickness of molten layer plotted against displacement immediately after the first slip-weakening (point b in Fig. 2) at which melt patches begin to form. Solid line is a least-squares fit to the data using a logistic curve. (b) Viscosity of molten layer plotted against post-second-peak displacement.

Open circles in (b) give the apparent viscosity of molten layer (*i.e.*, measured shear stress divided by the average shear strain of gross molten layer), open squares show viscosity corrected for bubbles, and filled lozenges exhibit melt viscosity corrected for clasts and bubbles. For reference, mechanical data in Fig. 2a are shown without a vertical scale.

急速に動きやすくなり（2 次元の場合には厚さの 3 乗に比例）、メルトは実験では空中に飛び散り、天然では母岩中の割れ目中に注入するようになる（図 4b）。図 2a の e 点付近のほぼ定常状態では、メルトの生成と断層外に失われる量がほぼ釣り合っており、メルト層の厚さはほぼ一定になる（図 3a）。このようなプロセスをまとめると、断層の安定性を議論する上で重要な D_c は、メルトが側方に移動し始める厚さに関係なく、つまり主に熔融速度によって決まることになる。

2) 摩擦熔融の物理モデルと Stefan 問題

上述のような摩擦熔融のプロセスは、図 4a のようにモデル化することができる。第 2 の強度ピーク

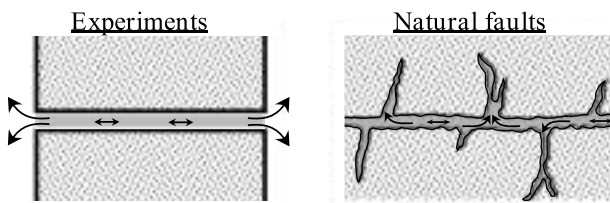
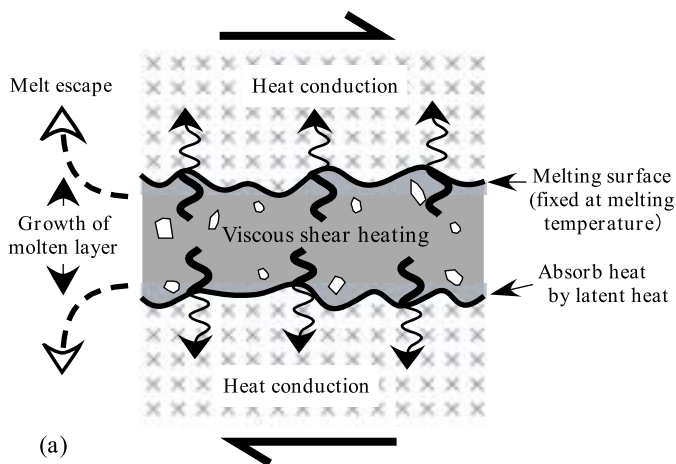


図 4 (a) 摩擦熔融現象に関与したプロセスを示す模式図。(b) メルトが断層面から逃げるプロセスの模式図。実験ではメルトは空中に飛び散るが(左),天然の断層では母岩中の破断面に貫入してシュードタキライト脈をつくる(右)。

Fig. 4 (a) A schematic diagram showing the physical processes involved with frictional melting, and (b) sketches for the melt escape from fault zones for frictional melting experiments (left) and for frictional melting along a natural fault forming pseudotachylite veins (right).

ク付近でメルト層が形成されると、母岩は固体接触をしないので、粘性剪断が熱源になる。つまり、メルト層内部の剪断歪速度と粘性率の分布に応じて熱源も分布し、当然温度分布が両者に影響を与える。熱は岩石を溶かしてメルト層を成長させ、その一部は母岩中に伝わって失われる。このように境界面が移動する問題は Stefan 問題と呼ばれている (Hill, 1987; Alexiades and Solomon, 1993 など)。一般的に工学の分野で扱われる熔融・凍結などの問題と違って、摩擦熔融の場合に

は熱源がメルト層内部に分布している点が複雑である。熔融の場合には結晶成長と違って結晶核の生成が必要ないので、固体部の温度が融点を越えることはほとんどない (Alexiades and Solomon, 1993)。従って、熔融問題では、熔融面の温度は融点温度であると仮定して解かれている。熔融にともなう潜熱によって熱が奪われるので、熔融面は熱のシンクとして働く。平衡熔融であれば、熔融面付近の余剰な熱は潜熱で奪われ、系の温度は融点にとどまるが、地震時の断層運動のように数

秒から数 10 秒の現象では、発生源から余剰の熱が熔融面に全て伝わる時間はない。従って、メルト層内部の温度が融点を越えることもあり得るし、図 3b におけるメルトの粘性率の変化が示唆するようにメルト部の温度変化もおこり得るのである。 D_c を決める上で重要な、熔融速度は熔融面にどれだけ効率よく熱が伝わるかによって決まる。初期の粘性率の急増は、主にメルト層の急成長にともなって熱が奪われることに起因すると考えられる。

地震との関連で重要なのは、高速摩擦実験で決まる D_c (図 2a) が地震学的に決まる値よりもはるかに大きいことである。しかし実験でも、すべり速度または垂直応力を大きくして発熱速度を上げると、 D_c は減少することが確認されている。天然のシュードタキライトを含む断層に対して D_c を推定するのは容易ではない。そこで廣瀬・嶋本(2002)は、メルト層の厚さの変化を示すパラメータが断層の slip weakening のパラメータ d_s とほぼ同じ値になることに注目した(図 2a と図 3a を比較)。Sibson(1975)は、スコットランド・Outer Hebrides 諸島のシュードタキライトの厚さが図 3a の結果とよく似た変化を示すことを報告している。ただし、実験ではメルト層が形成されてから 10 数 m で厚さの増加する割合が減少するのに対して、Sibson が調べたシュードタキライトでは、数 10 cm の変位で厚さの増加する割合が減少している。この対比から、廣瀬・嶋本(2002)は、Sibson が報告した天然の断層の D_c は地震学で決まるように数 10 cm のオーダーになることを見積もった。

理論・シミュレーションによって深部条件下の摩擦熔融現象を解く場合には、上述のメルトが失われる効果を含めることが重要である。図 4a のモデルでは一見垂直応力 σ_N は現象に影響を与えないように見えるが、 σ_N が大きいほどメルトが断層面から絞り出されてメルト層は薄くなり、メルト層全体の剪断歪速度が大きくなって剪断抵抗が増加する。また発熱が薄いメルト層内部でおこるので、熔融速度も速くなり D_c も小さくなるはずである。天然の断層の場合には、母岩中の破断面中にメルトが注入するときに冷却・固化するので、

モデル化に際してもっとも扱いが複雑かもしれない。さらに、メルト中に気泡と岩片が形成することと、岩片からも熔融がおこることも問題を複雑にしている(第 1 近似としては無視してよいと考えるが)。

このようにメルト層が形成してからの摩擦熔融は、物理プロセスがわかりやすい問題である。里見・城野(2003)は、メルトが失われる効果は無視しているものの、図 4a のモデルに従って摩擦熔融現象をシミュレーションで解き、実験結果とよく似た結果を得ている。1916 年に S.J. Shand がこの岩石を命名してから 90 年近くが経過し、やっと摩擦熔融現象のモデル化が可能になりつつある。

III. 摩擦熱による間隙圧上昇

Sibson(1973)は、シュードタキライトが天然ではまれである理由の 1 つとして、断層帯内部に水が存在する場合には、水が摩擦熱を吸収して間隙圧 P_p (pore pressure)が上昇し、有効圧を下げ断層の強度低下をもたらす可能性があることを指摘した。“Thermal pressurization”の概念の提唱である(簡潔ではないが、本稿では、誤解が生じないように「摩擦熱による間隙圧上昇」と訳しておく)。その後、Lachenbruch(1980)、Mase and Smith(1987)らによってこのような熱と流体移動が連動した問題が解かれた。しかし、断層帯の流体移動に関する性質がほとんど調べられなかったために、天然の断層帯内部において、摩擦熱がどの程度 P_p を上昇させるかの議論は中途半端に終わっていた。筆者らがガス圧式変形透水試験機を製作し、流体移動実験の優れた機能をもたせた当面の目的は、断層帯の浸透率構造(permeability structure)を調べて摩擦熱による P_p 上昇を定量的に見積もるためであった。

1) 断層帯の内部構造と浸透率構造

断層帯の浸透率構造が調べられるようになったのは比較的最近のことである。Caine *et al.*(1996)と Evans *et al.*(1997)は、断層帯が(1)断層角礫と破壊した母岩(パラパラにはなっていないけれども強く破壊した岩石)からなるダメージ・ゾーン(damage zone)と(2)断層の

すべりにともなう剪断変形が集中した断層コア (fault core) からなることを示した。大断層の場合、ダメージ・ゾーンは数 10 m 以上の幅をもつことが多く、流体を通しやすい(例外的に、多孔質堆積岩中の断層帯は、母岩よりも流体を通しにくいことが多い)。一方、断層コアは著しく細粒化して変質を受けやすく、粘土質断層ガウジからなることが多いので、流体は通りにくい。断層コアという用語はそれほど定着していないので、ここでは断層ガウジという用語を用いる。断層ガウジの幅は、大断層でもせいぜい数 10 cm 程度であることが多く、野島断層では約 10 cm である。断層ガウジは長時間の断層運動の結果形成されたものであり、1 回の断層運動における変形集中帯の幅はガウジの厚さよりも狭い。個々のイベントにおける変形集中域の幅はいつも認定できるとは限らないが、筆者らが調べた 7 ~ 8 例の断層では、数 mm から 10 数 mm であった。実は、後述のように、この変形集中域の幅が slip-weakening distance D_s を決める上で決定的に重要なのである。

Lockner *et al.* (2000) は野島断層の掘削コアを用いてより詳しい浸透率の測定をおこなって、Evans らと同様の浸透率構造を得た。また、溝口ほか(2000) は地表から採取した断層岩の試料を用いて浸透率の測定をおこない、Lockner らと同様な野島断層の浸透率構造を得た。この結果は、地表でも新鮮な試料を使えば掘削コアを用いた場合と同様の結果が得られることを示した点で重要である。さらに、Wibberley(2002)と Wibberley and Shimamoto (2003) は、中央構造線の有名な月出露頭(三重県・天然記念物)において浸透率と貯留係数の測定をおこなった。摩擦熱による間隙圧 P_p の上昇を見積もるためには、断層帯の浸透率構造のみならず、貯留係数の測定が必要である。とくに後者の測定は難しいが、貯留係数は摩擦熱による P_p 上昇の見積もりと、 P_p の増加にともなう非定常な流体移動の計算のためには不可欠である。Wibberley らの測定によって、摩擦熱による間隙圧上昇を検討できるデータが、ようやく報告され始めたのである。

2) 摩擦熱による間隙圧上昇と D_s

中央構造線・月出露頭における粘土質ガウジは、圧力下での浸透率は $10^{-20} \sim 10^{-21} \text{ m}^2$ に達するほど小さい値を示している。Wibberley (2002) は測定値を Mase and Smith (1987) の理論にあてはめて、摩擦熱で加圧された水は断層帯からほとんどぬけることができないことを示し、摩擦熱による間隙圧の著しい上昇がおこる可能性が高いことを論じた。流体が断層帯に保持される場合には Mase and Smith (1987) の解析解があり、月出露頭における粘土質断層ガウジの厚さ約 50 mm を変形ゾーンの上限とみると、約 10 cm の D_s が得られる。これは、地震学的に決まる D_s と同じオーダーである。Thermal pressurization の機構に対して D_s が求まった最初の例である。

その後、野田博之は滋賀県今津町の途中谷露頭において花折断層の浸透率構造を調べ、断層帯中心部の粘土質断層ガウジは圧力下(有効圧 180 MPa 以下)では $10^{-17} \sim 10^{-19} \text{ m}^2$ 程度の浸透率をもつことを示した。この浸透率はかなり低いが、中央構造線・月出露頭のガウジよりも流体を通しやすく、摩擦熱による P_p の上昇にともなって流体が変形集中域からぬけでる効果を見積もる必要がある。野田は、花折断層で実測された浸透率構造に対して Mase and Smith (1987) および Lachenbruch (1980) の理論式を 1 次元差分法で解き、多数の熱流体移動の計算をおこなっている(野田・嶋本, 2003; Noda *et al.*, 2003)。

1 例として、図 5 に変形集中域の幅の影響を調べた結果を示した。断層の変位速度は 1 m/s に固定し、浸透率としては深さ 3 km に相当する値を用いた。この条件下では、解析で重要な断層帯中心部の浸透率は、変形集中域と考えられる黒色の粘土質断層ガウジでは $4.6 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 、すぐ外側の灰色断層ガウジでは $2.9 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ と実測されている。深さ 3 km では前者の方がやや流体を通しやすいが、より高压下では両者の浸透率は逆になる。窒素ガスに対する貯留係数は $2.5 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ と実測されており、水と窒素ガスの圧縮率の比を用いて間隙水に対する貯留係数を求めると $2.5 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$ が得られる。計算ではこの値を

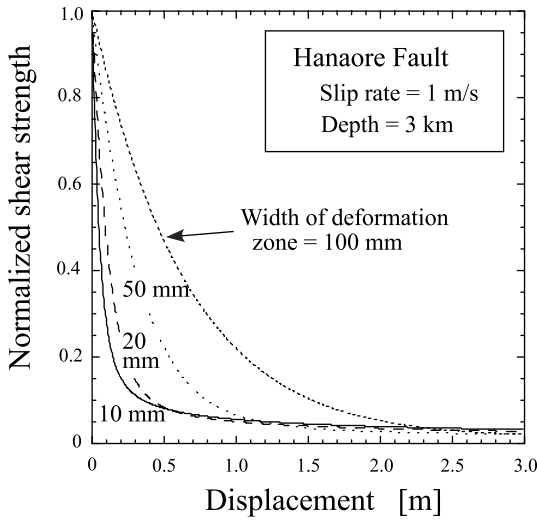


図 5 摩擦加熱による間隙圧上昇を考慮して計算した花折断層の強度低下曲線。

深さ 3 km に相当する浸透率と貯留係数の実測値 (本文参照) を用いて, Lachenbruch (1980) の理論式を 1 次元差分法で数値的に解いた。断層のすべり速度は 1 m/s と固定し, 変形集中域の幅は 10 mm から 100 mm に変化させた。摩擦係数は 0.4 と仮定し, 断層の剪断強度は有効圧の法則を使って求め, 剪断応力の初期値に対して規格化して縦軸に示した。

Fig. 5 Slip-weakening curves due to thermal pressurization, calculated for the Hanaore fault zone at a slip rate of 1 m/s, assuming different widths of deformation zone (10 to 100 mm).

A one-dimensional finite-difference calculation based on Lachenbruch's (1980) theory was performed using measured permeability and storage capacity values at an effective pressure corresponding to 3 km in depth. Fault strength is shown as a normalized shear stress with respect to the initial shear stress, assuming that the shear stress depends on the effective normal stress.

用いた。水の物性値と岩石の熱的性質は, 日本機械学会 (1983) と Schön (1996) の値を使用した。断層岩の熱的性質は, 母岩である頁岩の性質で代用させたが, 将来実測する必要がある。変形集中域内部の変形様式はよくわからないので, 計算では剪断歪速度の分布は一定であると仮定した。摩擦熱によって P_p が上昇すると有効圧が下がり,

それともなって断層ガウジの浸透率も上昇する。この変化は正確に実測されているので, 計算ではステップごとに浸透率に補正を加えた。ちなみに, 浸透率は最大で, 変形帯中心部では $2.5 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ まで, 隣接する断層ガウジでは $6.9 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ まで増加した。変形帯内部で浸透率変化が大きいのは, 摩擦熱による間隙圧の増加が大きいからである。実際には, 間隙圧の変化が変形様式の変化をもたらすはずだが, 今回の解析では, 変形は均一で変わらないと仮定している。有効圧の変化にともなう貯留係数の変化はそれほど大きくないので, 計算では一定と仮定した。断層運動が始まる時点の剪断強度は, 摩擦係数を 0.4 と仮定して求め, P_p の上昇にともなう剪断強度の低下は, 同じ摩擦係数を使って有効垂直応力 (= 垂直応力 - 間隙圧) から計算した。図 5 の縦軸は, 初期剪断応力で規格化した剪断強度を示している。

4 つの計算結果では, 剪断強度は変位とともにほぼ指数関数的に減少している。変形集中帯の幅が狭いほど, 摩擦発熱は狭い領域に集中するので, 変位の増加とともに P_p が上昇する割合が高くなり, 断層はより急速に強度を失うことになる。上述のように, 天然の断層では変形集中帯の幅は数 mm から 10 数 mm のことが多く, その場合には D_c は数 10 cm のオーダーになり (図 5), 地震学的に決まる値と非常に近くなる。花折断層中心部の黒色粘土質ガウジの厚さは最大 50 mm であるが, これが何回のイベントで形成されたかは判別できていない。仮にこの幅を変形集中帯の上限とした場合には, D_c は 1 m 前後になる。図 5 の結果以外にも, 断層の深さの影響, 変位速度の影響などで興味深い結果が得られているが, ここでは省略する。

2003 年 9 月の SCEC 総会における FARM ワークショップでは, Noda *et al.* (2003) の発表と同時に, 摩擦熱による間隙圧上昇の計算結果が Jim Rice によって発表された (計算には一部 Wibberley の中央構造線の浸透率と貯留係数の測定結果を使用)。Rice の結果も, 野田の結果と非常によく似たものであった。Rice はさらに, 図 5 のような強度低下曲線の下面積から破壊エネルギーを求め (図 1 参照), 7 つの大地震について彼

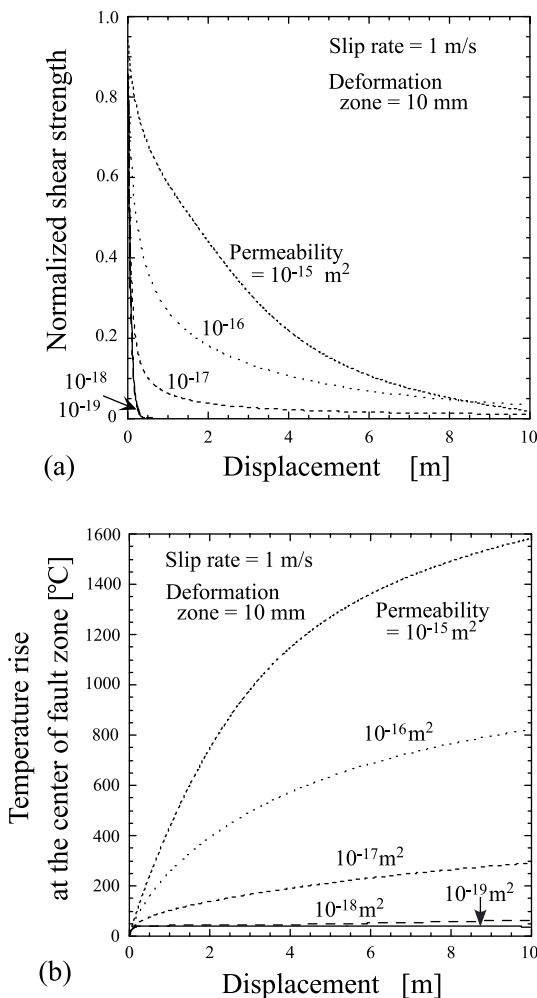


図 6 浸透率を変えたときの (a) 強度低下曲線と (b) 変形集中域中心部における温度上昇曲線。変位速度と変形集中域の幅は、それぞれ 1 m/s および 10 mm と固定し、浸透率は変形集中域と周囲の断層帯の間で均一と仮定した。変形集中域内部における変形は均一であると仮定し、図 5 の花折断層の場合と違って、 P_p の変化にともなう浸透率の変化は考慮していない。摩擦係数は 0.4、間隙水に対する貯留係数は $2.5 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$ で一定と仮定し、花折断層の解析と同じ数値解析方法を用いた。

Fig. 6 (a) Strength-reduction curves and (b) temperature-rise curves plotted against displacement, for different permeability values as shown on each curve and at a fixed slip rate of 1 m/s.

Temperature rise is for the central part of the 10 mm-wide deformation zone. It is assumed that permeability is homogeneous between deformation zone and the surrounding fault zones and remains constant with P_p build-up, that frictional coefficient is 0.4, that the storage capacity with respect to pore water is fixed at $2.5 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$, and that deformation is homogeneous within the concentrated shear zone. Numerical procedures are the same as in the previous figure.

自身が決めた破壊エネルギーと比較して、両者がほぼ同じオーダーになることを示した。この結果は、断層研究と地震学とが急速に接近しつつあることを強く参加者に印象づけることになった。摩擦熱による間隙圧上昇 (thermal pressurization) は、本稿の最初に述べた断層研究から地震学をつなぐ4分野の研究がつながる最初の機構になる可能性がある。実際に、この機構を組み込んだ地震の発生過程の解析も始まっている (Andrews, 2002)。

図 5 の結果は、地震学でいうアスペリティとは何かを考えさせてくれる。断層はすべりとともに急速に強度を失うほど、つまり強度低下量が同じ

であれば D_c が小さいほど不安定である。強震動の専門家である S. Day の私信によれば、 D_c が数 m もあれば強い地震動は発生しないそうである。筆者らは、断層が直線的でシャープな変形集中域をもつ部分が、強い地震波を出すアスペリティになるのではないかと思い始めている。幅が数 10 m の幅広い断層帯であっても、たかだか数 10 mm 程度の狭い変形集中域が断層の性質を決めていることは興味深い。

3) 断層帯内部における温度上昇

摩擦熱による間隙圧上昇の機構は魅力的だが、この機構が常に作動するわけではない。問題を単

純にするために一様な浸透率をもつ断層を想定し、変位速度と変形集中域の幅をそれぞれ 1 m/s および 10 mm に固定して、摩擦熱による P_p の上昇に対する浸透率の影響を調べた。浸透率が $10^{-18} \sim 10^{-19} \text{ m}^2$ の場合には、図 6a 左下のカーブのように結果がほとんど重なってしまい、20 ~ 30 cm のすべり量で強度はほとんどゼロに低下してしまう。このケースは、図 5 の変形集中域の幅が 10 mm のケースに非常によく似ているが、図 6 の計算では一定の浸透率を仮定しているため、 P_p が増加しても浸透率は低い状態にとどまる。その結果、図 6a の場合には、剪断強度がほとんどゼロまで低下しているのである。浸透率の増加とともに強度が低下する割合は顕著にゆっくりとなり、浸透率が 10^{-15} m^2 に達すると D_c は数 m のオーダーに達する（図 6a）。摩擦熱による P_p 上昇の機構が、地震発生の時間スケールで有効に働いていないことが明瞭である。摩擦熱による P_p の上昇は、浸透率が 10^{-17} から 10^{-18} m^2 に近づくにつれて有効に作動し始めることがわかる（Mase and Smith, 1987 参照）。

流体圧の変動は岩石中に痕跡を残しにくいので、摩擦熱によって P_p が上昇したかどうかを、断層岩の組織から判断するのは非常に難しい。筆者らは、摩擦熱による温度上昇が有効な判断基準になるのではないかと感じている。図 6b は、図 6a の挙動に対応する変形集中域・中心部の温度上昇を示している。内陸最大級の地震を想定して、変位量 10 m まで計算してある。まず驚くのは、浸透率が $10^{-18} \sim 10^{-19} \text{ m}^2$ の場合には、温度上昇量はせいぜい 50 程度にすぎないことである。これは、摩擦熱によって P_p が急上昇し、断層の強度が急速に下がるために摩擦発熱そのものが大きく減少するためである。一方、温度上昇は浸透率の増加とともに顕著になり、浸透率が 10^{-15} m^2 に達すると非常に大きな地震の場合には、岩石が熔融してもおかない温度に達する。ただし、後述のように、この顕著な温度上昇を反映して別の強度低下の機構が働く可能性が高いので、計算通り摩擦熔融がおこるかどうかは即断できない。

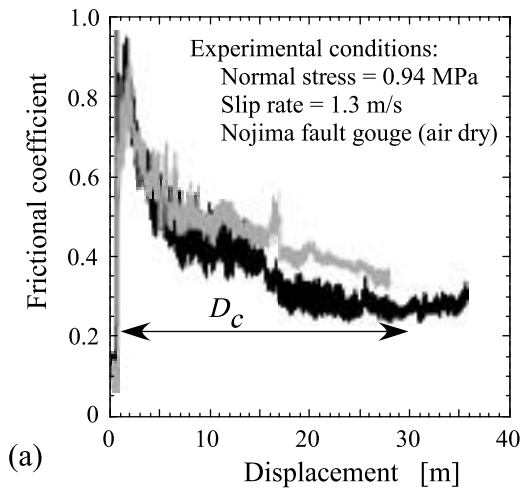
このように、変形集域内部における地震時の温

度上昇は、摩擦熱による顕著な P_p 上昇があったかどうかの、判断基準になり得る。本稿では説明しないが、福地龍郎・平賀章三たちと筆者らは、数年前から「熱パルス検出プロジェクト」を立ち上げている。地震時の断層帯内部の温度は急上昇してすぐに低下してしまうので、我々はそれを「熱パルス」と表現した。変成・変質反応の速度が遅いため、鉱物の安定条件を用いた通常の岩石学的手法は使えない。我々は、ESR、TL、磁性鉱物の変化などのように熱に敏感な信号を使って、熱パルスの検出方法を開発しつつある。結果のみを、簡単に次章で紹介する。

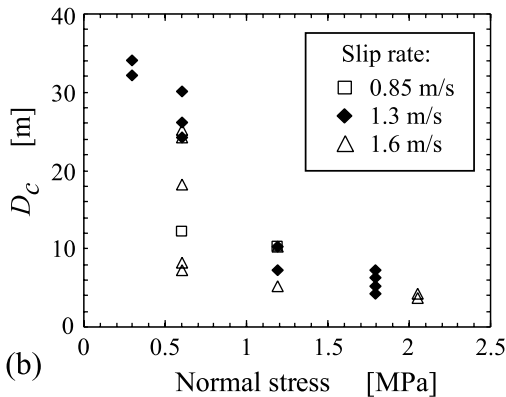
IV. 断層ガウジの高速摩擦

天然の断層は例外なく破砕帯をもっている。断層ガウジを用いて高速摩擦実験をおこなうことは、筆者らの長い間の願いであった。しかし、円筒形試料に挟んだガウジは、試料の回転にともなうすぐに落下してしまうので、実験は非常に難しい。前節で述べたように、筆者らが摩擦熱による間隙圧 P_p の上昇（thermal pressurization）の過程を調べる方法として、水を含んだガウジを用いて直接このプロセスを再現することを試みなかった最大の理由は、ガウジを用いた高速摩擦実験の難しさである。第一著者（嶋本）は、変形透水試験機を製作して断層帯の浸透率構造を調べ、シミュレーションと合わせてこのプロセスを調べることにしたのである。これは、正しい判断であったと思っている。

ガウジの高速摩擦実験に辛抱強く取り組んだのが溝口一生である。彼は、固定側の円筒形試料の軸を回転側試料の回転軸に正確にあわせ、ガウジを挟んだ円柱形試料の周囲にテフロン・スリーブを取りつけて高速実験をおこなった。試料とテフロン・スリーブ間の摩擦の補正が難しいこと、摩擦熱によってテフロンが熔ける場合があることなど、技術的困難はまだ解消はしていない。しかし、とりあえず、ガウジの高速摩擦実験が可能になった。図 7a は、野島断層の平林トレンチサイトで採取した断層ガウジを用いた実験結果である（変位速度 = 1.3 m/s、垂直応力 = 0.94 MPa）。使った



(a)



(b)

試料は、シュードタキライトによく似た黒色ガウジ帯の花崗岩側の隣接部から採取した青灰色面状ガウジである。それほど粘土質なガウジではないが、X線回折によってスメクタイトが確認できている。

図7aに同じ試料を用いた2つの結果を示した。同じ条件で変位量を変えておこなった6つの実験でほとんど同じ結果が得られるので、実験の再現性は高い(2つ以外は、結果が重なるので図には示していない)。摩擦係数と変位曲線の細かい上下変化は、図2bの結果と同様に試料1回転ごとのトルク計の出力であるが、ガウジの方がやや変動幅が大きい。少し大きめの上下変化の原因はよくわからないが、母岩とテフロン・スリーブの間に

図7 (a) 摩擦係数と変位の関係で示した野島断層ガウジ(大槻憲四郎による平林トレンチサイトで採取)の典型的な高速摩擦挙動。変位速度 1.3 m/s, 垂直応力 0.94 MPa における2つの実験結果を示す。

(b) 垂直応力に対してプロットした slip weakening distance, D_c 。実験は図中に示した3つのすべり速度のもとでおこなった。

(a)の曲線における小さい上下変動は、試料のわずかな片あたりに起因して一回転ごとにトルク計が少しこねられて生じる出力である。

Fig. 7 (a) Two representative results showing high-velocity frictional behavior of Nojima fault gouge, collected at the Hirabayashi trench site conducted by K. Otsuki, shown as frictional coefficient versus displacement curves. Experiments were done at a velocity of 1.3 m/s and under a normal stress of 0.94 MPa.

(b) Slip weakening distance, D_c , plotted against the normal stress, for runs at three slip rates shown in the inset window.

Periodic fluctuation on the curves in (a) is due to distortion of torque gauge caused by small misalignments of facing specimens.

押し出されたガウジが挙動に影響を与えているかもしれない。初期の摩擦係数は約0.8である。岩石の摩擦係数としてはおかしくないが、テフロンと回転側試料との摩擦が少し高めの摩擦係数を与えている可能性はある。通常の摩擦実験では初期摩擦強度を過ぎた直後に実験が終了するが、そのまますべらせると、摩擦強度は変位の増加とともに低下して、図7aの条件では変位量約30mでほぼ定常状態が達成されている。定常状態では、摩擦係数は初期の値から半部以下に低下してほぼ0.3まで下がっている。

強度低下がおこる変位量 (slip-weakening distance, D_c)は図7aの条件下では約30mであるが、垂直応力を上げると、つまり摩擦発熱の速度を大

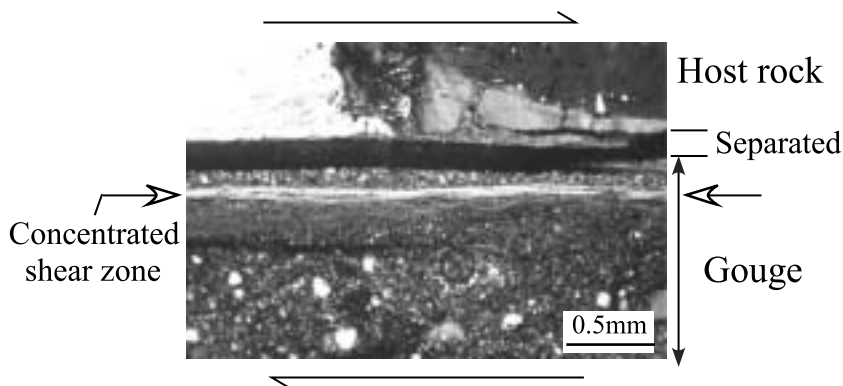


図 8 高速摩擦実験をおこなった野島断層ガウジの顕微鏡写真（直交ニコル下で撮影）。

実験条件は前図と同じで、断層変位は約 15 m、変形後のガウジの厚さは約 1 mm を少し越える程度、母岩のガプロとガウジの間が実験後に少し分離している。ガウジ中の著しい変形集中域に注意。上部の母岩が回転側で、変位のセンスは右ずれである。

Fig. 8 A photomicrograph under crossed polarized light showing Nojima fault gouge deformed by a high-velocity experiment under the same conditions as in the previous diagram and at a displacement of about 15 m.

The final thickness of the gouge is slightly larger than 1 mm, and the host rock-gouge interface was separated after the run. Note the highly concentrated shear zone within the relatively undeformed gouge. Host rock in the photo is the moving side and sense of shear is right-lateral.

きくすると D_c は 2 m 前後まで小さくなり、地震から決まる値にかなり近づく（図 7b）。結果はばらつくが、すべり速度を上げて D_c は減少している。より深部の条件下では、ガウジの高速摩擦においても D_c パラドックスが説明できる可能性がある。

図 8 に野島断層ガウジの顕微鏡組織を 1 例だけ示した。実験後に写真下部のガウジと上部の母岩の間が分離したので、直交ニコル下で黒く見えている。ガウジはまだ熔融はしていない（熔融すると母岩同士がくっついて離れない）。ガウジの下半部では、比較的大きな岩片（クラスト）がガウジ中に散在しており、ガウジはそれほど強い変形は受けていない。実験前に、ガウジをいったんバラバラにしてセットしているので、実験前の変形組織は残っていない。母岩との境界では全体としてガウジは細粒化しており、そのゾーンの中でも変形は幅 40 ~ 70 μm の領域に集中している。この著しい変形集中は、回転側の母岩とガウジの境界よりやや内側でおこっている。小さな実験試料

でも、天然の断層帯と同様に、ガウジ全体よりもはるかに狭い領域に変形が集中しているのである。この変形集中域は偏光顕微鏡の直交ニコル下で薄片を回転させるとある位置で著者に明るくなり、図 8 で白く写っているのはそのためである。また変形集中域がニコルの振動方向と平行になったときにほぼ同時消光がおこるので、この領域の内部では、層状鉱物が明らかに剪断面とほぼ平行に配列して面状断層ガウジをつくっている。この試料は図 7a と全く同じ条件下で変形させているが、変位量は約 15 m なので、図 8 は slip-weakening のほぼ中間の組織である。層状鉱物が平行配列すると岩石は褶曲しやすくなり、定常状態においては図 8 の面状ガウジが複雑に褶曲したり、ちぎれて褶曲したブロックが形成されたりする。平林の野島断層帯でよく似た組織が認められ、それらはシュードタキライトの組織と解釈されることが多いが、熔融組織ではない。同じ組織は再現できているが、ここでは省略する。

図 7a で認められた高速・大変位における著しい強度低下が何によるものかは、現状ではわからない。無水状態の実験なので、摩擦熱による間隙圧上昇 (thermal pressurization) はその原因ではあり得ない。また、ガウジ全体が熔融した痕跡は全くなく、熔融初期におこる摩擦抵抗の顕著な増加 (図 2a の c から d) もおこっていない。高速摩擦実験では、Fukuchi (2003) が平林トレンチサイトにおける野島断層ガウジで認定した鉄鉱物の加熱にともなう変化が再現できているので、実験では 500 を越えるガウジの温度上昇がおこった可能性が高い。1 つの可能性として、この摩擦加熱と空中の湿気によってすべり境界面沿いで界面反応が促進され、界面水和のような反応がおこって図 7a の強度低下を引き起こしている可能性がある。しかし、筆者らは表面分析ができないので、分析で界面反応を調べていない。図 7a とよく似た挙動は、Goldsby and Tullis (2002) による石英質岩石を用いた無水条件下の摩擦実験でも認められた。彼らのすべり速度は数 mm/s 程度であるが、高圧下で実験をおこない、1 m 前後の D_c を得ている。この実験でも強度低下の機構は不明で、彼らは空中の水分によって摩擦面にシリカゲルが形成されたかもしれないと推論している。しかし、変形機構は解明されていない。

Fukuchi and Imai (2001) は、京都大学防災研究所がおこなった野島断層の 500 m 掘削において、断層ガウジの ESR 測定をおこなった。この結果と Fukuchi (2003) の結果をあわせて判断すると、コア中の変形集中域 (幅約 5 mm) の温度上昇は 300 のオーダーであることがわかる。この結果と地殻応力の測定結果をあわせて見積ると、兵庫県南部地震時の野島断層沿いの摩擦係数 (一定と仮定) は、0.4 ~ 0.5 と求まっている (別論文で論じる)。図 7a の高速摩擦実験の結果では、摩擦係数は 0.8 から 0.3 に減少しているため、平均的にみると ESR による見積もりとほぼ一致している。ガウジの強度低下の機構はわからないが、興味深いのは、全く違った方法でつじつまの合う結果が得られつつあることである。筆者らは、両者の一致は、摩擦熱による温度上昇が野島断層ガウ

ジの強度低下をおこすことを示唆していると感じている。

V. まとめと今後の課題

1) 本研究のまとめ

我々のグループが断層の高速摩擦の研究を始めて約 10 年が経過した。本論文では、摩擦熔融、摩擦熱による間隙圧上昇 (thermal pressurization)、断層ガウジの研究を例にして、高速摩擦の現状と重要性をまとめた。主要な結果は以下の通りである。

(1) ガプロを用いた高速摩擦実験の結果、アスペリティ先端部の flash heating による第 1 の強度低下 (slip weakening)、摩擦熔融の開始にともなう急速な強度増加、メルト層の成長にともなう第 2 の強度低下がおこることがわかった (図 2)。摩擦熔融が断層に与える影響は、熔融境界の移動を扱う Stefan 問題 (図 4) を解くことによって予測することができる。

(2) 中央構造線と花折断層で実測された断層ガウジの浸透率と貯留係数を用いて、摩擦熱による間隙圧増加 (thermal pressurization) の過程を数値的に解き、この機構が作動するときには、臨界すべり量 (slip-weakening distance, D_c) が地震学的に決まる値と非常に近くなることを示した。断層帯内部の変形集中域の浸透率がほぼ 10^{-17} m^2 以上になるとこの機構が有効に作動しなくなり、断層帯内部の温度は顕著に上昇する。

(3) ガウジを用いた高速摩擦実験が可能になった。強度低下の機構は未解明であるももの、野島断層ガウジは無水条件下で変位量の増加とともに顕著な強度低下を示し、地震学的に決まる値またはそれ以上の D_c をもつことが明らかになった。

上記全てのケースにおいて、過去 10 数年間問題とされた D_c パラドックスが解決できる可能性がでてきた。断層の構成則を決める実験的研究と地震学・測地学の垣根は急速に埋まりつつあり、とくに米国では高速摩擦に対する関心が非常に高まっている。

2) 高速摩擦の体系化に向けて

高速摩擦に関与したプロセスの相互関係を描く

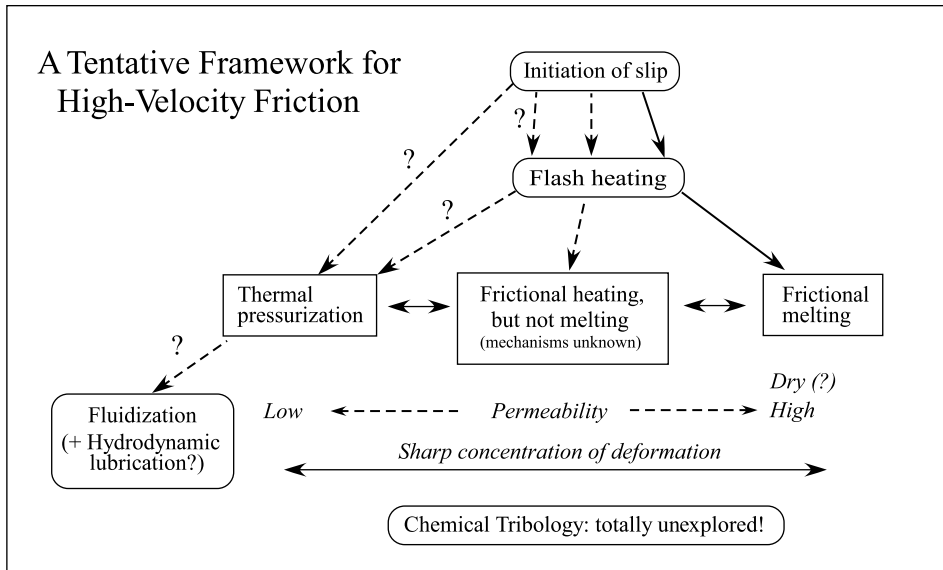


図 9 高速摩擦のプロセスの相互関係を示す予察的な体系図。岩石の高速摩擦に対する摩擦化学的效果に関する体系的研究が切望される。

Fig. 9 An emerging framework of high-velocity friction with important mechanisms related to each other.

Systematic studies are needed for tribochemical effects on rock friction, *i.e.*, the effects of interfacial reactions forming hydrous phases enhanced by frictional heating under fluid-rich environments.

と、図 9 のようになる。本研究で扱った 3 つのプロセスが中央に列記してある。断層のすべりが始まると、まず高速でこすれ合うアスペリティ先端部で温度が上昇し、部分的な熔融がおこる場合もある (flash heating: Rice, 1999 参照)。最終的に摩擦熔融がおこる場合には、flash heating を経てメルト層の形成に至る (図・右側の実線矢印のライン)。Flash heating から摩擦熔融に至る過程は、理論解析の段階に達したと考えている。

ガウジの高速摩擦においても、ガウジそのものは加熱されているので、ガウジを構成する破碎岩片間のこすれ合う部分では、加熱がおこっている可能性が高い。しかし、今のところ、ガウジの場合には flash heating と呼べるほど顕著な局所的加熱がおこっているかがわからないので、中央のラインは破線で示してある。ガウジ中の変形・反応・熱変化を浮き彫りにする詳細な組織解析が望まれる。断層は破碎帯をもつので、flash

heating の理論が有効であるかどうかは、断層ガウジで局所的な加熱がどの程度有効に働いているかによって決まるはずである。

摩擦熱による間隙圧上昇のプロセスが有効に働く場合には、変形集中域内部ではほとんど温度上昇がおこらない (図 6b)。従って、この場合に flash heating の段階を経るか、それともほとんど直接 P_p 上昇の段階に至るかはわからない (図 9 では破線に疑問符をつけて示した)。この問題を検討するには、実験で摩擦熱による P_p 上昇のプロセスを再現することが望ましい。しかし、図 5、図 6a の結果が示すように、この初期フェーズはすぐに終わってしまうので、筆者らはこの部分にこだわり過ぎる必要はないと感じている。それよりも早急に検討が必要なのは、変形集中域における剪断変形の実体 (歪み速度の分布など) と剪断変形そのものが P_p 変化に与える影響である。 P_p 上昇の計算結果は剪断変形のパターンによって変わる

し、 P_p の上昇にともなって剪断変形の様式がどのように変化するかは全くわかっていない(本研究では均一変形を仮定)。さらに、変形にともなって膨張がおこればこの P_p 上昇(thermal pressurization)をうち消す効果をもつし、圧密がおこれば逆に P_p 上昇をさらに促進する。Uehara and Shimamoto(2003)は三軸試験機を用いて、カタクレサイトは破壊前に膨張をおこし、断層ガウジは変形とともに圧密をおこすことを示した。カタクレサイトが形成される断層深部では、摩擦加熱の効果と破壊前の膨張の効果が相殺して、摩擦熱による P_p 上昇がおさえられる可能性がある。ガウジが断層沿いで常に圧密をするかどうか、検討が必要である。また本論文で強調したように、変形集中域の幅は D_c の大きさを決める上で極めて重要である。この変形集中域の幅が何によって決まるかも、本質的で困難な課題である。変形の局所化の理論を岩石について発展させる必要がある。

これらの機構のどれが有効に働くかは、断層の浸透率が重要な判断基準になる(図6b参照)。また、天然の断層帯でどの機構が有効に働いたかを判断するには、熱パルスの検出が有効である。断層帯が流体を通しやすい場合に、図6bに示されたような顕著な温度上昇があれば、それを反映して別の強度低下の機構が働く可能性がある。おそらく非常に重要だが岩石について全く調べられていないのが、図9の下に掲げた摩擦化学(tribochemistry)の効果である。実際に、トライボロジーの分野では、摩擦面に水和物などの準安定相が形成されて摩擦強度が大きく低下する実験結果が報告されている(Heinicke and Heinicke, 1993参照)。摩擦加熱によって界面反応が促進されて摩擦面沿いに強度の弱い化合物ができれば、断層の強度は低下するはずである。この機構は、おそらく含水条件下で摩擦熱による温度上昇がおこるときに、つまり図9の右側でより有効に働き、摩擦熔融をおさえるように働く可能性がある。摩擦化学効果は、「摩擦熔融は無水条件下のみでおこるのか、それとも摩擦熔融は含水条件下でもおこるのか」という問題に答える上でも重要である。

摩擦化学効果が非常に重要であれば、含水条件下では摩擦熔融はおこらないであろう。筆者らは、含水条件下で高速摩擦試験ができるように改良された高速摩擦試験機2号機によって、摩擦化学の問題に取り組む予定である。

摩擦熱による間隙圧上昇に関連して興味深いのは、Lin(1997)によるガウジの流動化(fluidization)説である。この流動化説は、何らかの原因で間隙圧が上昇し、ガウジが流動化して破断面に注入することを提唱したものである。Linは間隙圧上昇の機構を限定しているわけではないが、1つの可能な機構は摩擦熱による間隙圧上昇である(図9の左下)。しかし、このプロセスによってガウジの流動化にまで至るかどうかは微妙である。有効圧のサイクル試験をおこなうと、加圧とともに浸透率は顕著に減少するが、有効圧を減らしていても浸透率は最高圧時の値を保持する傾向がある。つまり、最大有効圧下で形成された岩片の骨組みは減圧しても容易には崩れないので、摩擦加熱によって間隙圧が上昇するとすぐに流動化するとも言えないのである。現時点でははっきり言うことは、摩擦熱による間隙圧上昇が有効に働くためにはシャープな変形集中域が必要とされることである(図5)。発熱がおこる変形集中域の幅は狭いので、流動化がおこったとしても、間隙水の量は非常に少ない。例えば、変形集中域の幅が10mm、ガウジの間隙率が10%だとすると、水の量を集めても厚さ1mm程度にしかならない。間隙率はゼロにはならないので、余剰にあふれる水はこれよりも少ない。従って、この機構では規模の大きい流動化はおこり得ない。このことが、流動化のみならず、「摩擦熱による間隙圧上昇が天然の断層でおこったかどうか」を組織によって判断することを非常に難しくしている。

最近注目を集めているのが、Brotsky and Kanamori(2001)による動的流体潤滑(hydrodynamic lubrication)モデルである。大変魅力的な説だが、筆者らは断層ガウジが粘性流体としてふるまうという仮定が納得できない。間隙水が存在する条件下でも、高圧下で断層ガウジが粘性流体として挙動するという報告は聞かないし、

そもそもガウジが粘性流体として挙動するならば、地震がおこらないはずである。唯一、思いつくのは、摩擦熱による間隙圧上昇 (thermal pressurization) の極限においてガウジが流動化し、動的流体潤滑の機構が働く可能性である。この説は、母岩の形状効果によってガウジ内に動的に圧力が発生し、その圧が上載岩圧を支えて断層の強度が低下することを述べているので、Lin の流動化よりもさらに限定したプロセスを提唱しているのである (図 9 の左下参照)。また、ごく小さい断層を除くと、変形集中帯 (断層ガウジ) に隣接するのは同じような強度をもったやや粗粒なガウジ、粘土質でないガウジ、断層角礫などである。母岩の硬いアスペリティがガウジ帯をかきわけて動くイメージとは異なっている。

ガウジの流動化以外にも、泥火山・蛇紋岩ダイアピルのように深部で流動化がおこったらしい現象があるので、筆者らも、深部条件下における液化化の条件を将来調べてみたいと考えている。その上で、ガウジの流動化と動的潤滑も問題を再検討したい。

地震時の断層運動に関しては、本論文でとりあげた以外にも、断層と母岩の境界面を高速で伝わるパルス状の波が動的摩擦を減少させるとする理論 (Ben-Zion and Huang, 2002 参照) など、いくつかの興味深い説が提唱されている。しかし、筆者らは実測された断層の性質の基づいてそれらの説を検討していないので、ここではコメントをひかえたい。

3) スケール則と高速摩擦

D_c パラドックスをスケール則で議論する場合には、断層すべり面の形状に関するスケール則を用いる場合 (Scholz, 1988; Ohnaka and Shen, 1999; 大中・松浦, 2002 など) と、実験試料と天然の断層間における変形集中域の幅の違いに着目する場合 (Marone and Kilgore, 1993) がある。高速摩擦の研究は、摩擦加熱を重視する点においてこれらの研究にはなかった新しい側面を扱っている。さらに、高速摩擦の領域では、 D_c のようなパラメータも断層に固有な物質定数ではない。高速摩擦は、断層の変位の履歴そのものによって断層

の性質が決まる非線形の世界なのである。天然の断層帯内部で高速摩擦のプロセスが実際に働いているかの判断においては、摩擦発熱の検出が鍵を握っており、本稿で述べたように、大地震の発生時には高速摩擦が働いている可能性が高い。

本稿で扱った摩擦熱による間隙圧上昇の解析においては、実験と天然の断層間における変形集中域の幅の違いを考慮している。つまり、Marone and Kilgore (1993) が通常の構成則パラメータで評価した変形集中域の幅の影響を、高速摩擦でも考慮しているのである。図 8 の実験では、変形集中域の幅は数 10 ミクロンであるのに対して、筆者らが検討した天然の断層では数 mm から 10 数 mm のことが多かった。図 6 の計算では、当然ながら、天然の断層に対する変形集中域の幅を用いている。すべり面の形状のスケール効果については、実験データは明快で理解できるが、断層破砕帯をもつ天然の断層帯において、ごく一部の例外を除いて、どの部分の形状を測ればよいのが筆者らにはわからない。

筆者らとは全く独立に、米国では Jim Rice が 1980 年代末頃から高速摩擦の重要性を訴え続けていた。筆者らはシュードタキライトのような加熱の証拠から高速摩擦の世界にはいったが、Rice は「同じ断層沿いに大地震と小地震がともにおこっている」ことの意味を考えて、高速摩擦の重要性を認識したらしい。彼は、2002 年 9 月の SCEC 会議での議論の中で、自分の考えを次のように表現した。「天然の断層がスケール則によって非常に大きな D_c をもつならば、微小地震は排除されてしまう。全ての地震は微小地震なのだが、何かの理由である地震は大地震に成長し、高速摩擦によって D_c も大きい値をもつようになる。」もちろん Rice は通常の構成則パラメータにスケール依存性がないと言っているのではない。このスケール則だけでは不十分で、大地震に固有な高速摩擦の世界があることを主張しているのである。

4) 今後の研究に向けて

本稿では、高速摩擦の問題をとりあげたが、断層の多彩な挙動と地震発生の初期過程を理解するには、通常の摩擦の構成則が重要であることは言

うまでもない。通常の構成則にも大きな課題があるので、別に機会に論じたい。高速摩擦は、大地震の発生時に断層がどのような動的挙動をするかを理解する上で重要である。通常の構成則から高速摩擦に至る中速領域における断層の性質は、大地震発生の初期過程(地震の「はじまり」)を規定している可能性が高く、地震予知の物理的基礎を確立する上で重要だが、現在でも体系的な研究がなされていない。今後は、これらのバランスのとれた研究が必要である。

本特集の題目にも使われているように、断層または震源域の「物質科学」という魅力的な標語のもとに、断層研究に新たな流れが生まれつつある。大変好ましい流れではあるが、「断層の物質解析をすれば地震の発生機構がわかる」と考えると大きな間違いである。本稿でとりあげたシュードタキライトがよい例で、多数の物質・組織解析がなされたが、それらの研究によって摩擦熔融が断層の性質に与える影響が解かれたわけではない。地震の謎に挑むためには、断層解析、実験、理論・シミュレーション、地震・地殻変動の研究を融合させる必要がある。「物質解析のみが強調され、結局地震現象は解けなかった」ということにならないように、巨大プロジェクトにおいても、公平でバランスのとれた物的・人的資源配分をお願いして本稿を終えたい。

謝 辞

本稿では、筆者らのグループが最近の5年間におこなってきた高速摩擦に関する研究をハイライトとしてまとめた。共同研究と有益な議論をしていただいたC.A.J. Wibberley氏および堤 昭人氏をはじめとした嶋本研究室の人たち、本特集を中心となって企画・推進して下さった笠原順三氏と藤本光一郎氏、迅速な査読をして下さった鳥海光弘氏ともうひとりの査読者の方から感謝いたします。本研究の一部には、科研費補助金(課題番号 08454120, 10440150, 09354006; 研究代表者は嶋本利彦)と21世紀COEプログラム(京都大学, G3)の予算を使用させていただいた。

文 献

- Alexiades, V. and Solomon, A.D. (1993) *Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes*. Hemisphere Publishing Corporation.
- Andrews, D.J. (2002) A fault constitutive relation accounting for thermal pressurization of pore fluid. *J. Geophys. Res.*, **107**, 2363, doi:10.1029/2002JB001942, ESE15-1 ESE15-8.
- Ben-Zion, Y. and Huang, Y. (2002) Dynamic rupture on an interface between a compliant fault zone layer and a stiffer surrounding solid. *J. Geophys. Res.*, **107**, 10.1029/2001JB000254, ESE6-1 ESE6-13.
- Brodsky, E.E. and Kanamori, H. (2001) Elastohydrodynamic lubrication of faults. *J. Geophys. Res.*, **106**, 16357 16374.
- Caine, J.S., Evans, J.P. and Forster, C.B. (1996) Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, **24**, 1025 1028.
- Dieterich, J.H. (1978) Time-dependent friction and mechanics of earthquakes. *Pure and Appl. Geophys.*, **116**, 790 860.
- Dieterich, J.H. (1979) Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations. *J. Geophys. Res.*, **84**, 2161 2168.
- Dieterich, J.H. (1986) A model for the nucleation of earthquake slip. *Geophys. Monogr., Amer. Geophys. Union*, **37**, 37 47.
- Evans, J.P., Forster, C.B. and Goddard, J.V. (1997) Permeability of fault-related rocks, and implications for hydraulic structure of fault zones. *J. Struct. Geol.*, **19**, 1393 1404.
- Fukuchi, T. (2003) Strong ferromagnetic resonance signal and magnetic susceptibility of the Nojima pseudotachylyte in Japan and their implication for coseismic electromagnetic changes. *J. Geophys. Res.*, **108**, 2312, doi:10.1029/2002JB002007, ETG14-1 ETG14-8.
- Fukuchi, T. and Imai, N. (2001) ESR and ICP analyses of the DPRI 500 m drill core samples penetrating through the Nojima Fault, Japan. *The Island Arc*, **10**, 465 478.
- Fukuyama, E., Mikumo, T. and Olsen, B. (2003) Estimation of the critical slip-weakening distance: Theoretical background. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **93**, 1835 1840.
- Goldsby, D.L. and Tullis, T.E. (2002) Low frictional strength of quartz rocks at subseismic slip rates. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1844, doi: 10.1029/2002GL015240, 25-1 25-4.
- Heinicke, G. and Heinicke, G. (1993) *Tribochemistry*. Hanser Verlag.
- Hill, J.M. (1987) *One-dimensional Stefan Problems: An Introduction*. Longman Scientific & Technical, Essex.

- Hirose, T. (2002) *Experimental and Field Studies on the Frictional Melting along Faults and their Implications to the Earthquake Generation Processes*. Doctoral thesis, Kyoto University.
- 廣瀬文洋・嶋本利彦 (2002) 摩擦熔融に伴う断層の強度低下機構. 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, G061-004.
- Hirose, T. and Shimamoto, T. (2003a) Fractal dimension of molten surfaces as a possible parameter to infer the slip-weakening distance of faults from natural pseudotachylites. *J. Struct. Geol.*, **25**, 1569 1574.
- Hirose, T. and Shimamoto, T. (2003b) An experimental study on frictional melting along faults and its implications for earthquake generation processes. *International Conference on Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics, St. Malo, France, April*, p. 81.
- Ide, S. and Takeo, M. (1997) Determination of constitutive relations of fault slip based on seismic wave analysis. *J. Geophys. Res.*, **102**, 27379 27391.
- Jaeger, J.C. (1969) *Elasticity, Fracture and Flow with Engineering and Geological Applications*. 3rd edition, Methuen.
- Lachenbruch, A. (1980) Frictional heating, fluid pressure, and the resistance to fault motion. *J. Geophys. Res.*, **85**, 6097 6112.
- Lin, A. (1997) Fluidization and rapid injection of crushed fine-grained materials in fault zones formed during episodes of seismic faulting. Zheng *et al.* eds.: *Proc. 30th Int. Geol. Congress. VSP*, **14**, 27 40.
- Lockner, D., Naka, H., Tanaka, H., Ito, H. and Ikeda, R. (2000) Permeability and strength of the Nojima core samples from the Nojima fault of the 1995 Kobe earthquake. *USGS Open File Report*, 00-129, 147 152.
- Marone, C. and Kilgore, B. (1993) Scaling of the critical slip distance for seismic faulting with shear strain in fault zones. *Nature*, **362**, 618 621.
- Mase, C.W. and Smith, L. (1987) Effects of frictional heating on the thermal hydrological, and mechanical response of a fault. *J. Geophys. Res.*, **92**, 6249 6272.
- McKenzie, D. and Brune, J.N. (1972) Melting on fault planes during large earthquakes. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **29**, 65 78.
- Mikumo, T., Olsen, K.B., Fukuyama, E. and Yagi, Y. (2003) Stress-breakdown time and slip-weakening distance inferred from slip-velocity functions on earthquake faults. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **93**, 264 282.
- 溝口一生・廣瀬文洋・嶋本利彦 (2000) 野島断層の透水性構造 兵庫県津名郡北淡町舟木露頭の解析. 月刊地球, 号外, **31**, 58 65.
- 日本機械学会編 (1983) 技術資料 流体の熱物性値集. 丸善.
- 野田博之・嶋本利彦 (2003) 摩擦発熱による間隙圧の上昇と断層の強度低下 花折断層を例として. 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, J063 020.
- Noda, H., Shimamoto, T., Mizoguchi, K., Tanikawa, W. and Saito, Y. (2003) Thermal pressurization and strength reduction of a fault. *2003 SCEC (Southern California Earthquake Center) Annual Meeting, Oxnard, CA, Proceedings and Abstracts*, vol. XIII, 120 121.
- Ohnaka, M. and Shen, L.-F. (1999) Scaling of the rupture process from nucleation to dynamic propagation: Implications of geometric irregularity of the rupturing surfaces. *J. Geophys. Res.*, **104**, 817 844.
- 大中康譽・松浦充宏 (2002) 地震発生の物理学. 東京大学出版会.
- 大友幸子・嶋本利彦 (1994) 高速断層運動時の断層破砕物形成過程における熱クラックの重要性: 実験的検証. 構造地質, **39**, 135 144.
- Rice, J.R. (1999) Flash heating at asperity contacts and rate-depend friction. *EOS Trans AGU*, **80**, 681.
- 里見和人・城野信一 (2003) 高速摩擦における摩擦係数及び D_c の変化の数値シミュレーション. 日本地震学会秋季大会講演予稿集, B006.
- 嶋本利彦・長濱裕幸 (1991) シュードタキライトの起源と地殻応力問題. 月刊地球, **13**, 967 973.
- 嶋本利彦・堤 昭人 (1994) 新しい回転式高速剪断摩擦試験機: その基本設計と研究目的. 構造地質, **39**, 65 78.
- Scholz, C.H. (1988) The critical slip distance for seismic faulting. *Nature*, **336**, 761 763.
- Scholz, C.H. (2002) *The Mechanics of Earthquakes and Faulting, Second Edition*. Cambridge University Press.
- Schön, J.H. (1996) *Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics*. Pergamon, Elsevier Science Ltd.
- Sibson, R.H. (1973) Interactions between temperature and pore fluid pressure during an earthquake faulting and a mechanism for partial or total stress relief. *Nature*, **243**, 66 68.
- Sibson, R.H. (1975) Generation of pseudotachylite by ancient seismic faulting. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **43**, 775 794.
- 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. Mineral. Petrol.*, **99**, 464 475.
- 高木秀雄 (1991) 地震の化石・シュードタキライト. 地質ニュース, **437**, 15 25.
- Tsutsumi, A. and Shimamoto, T. (1996) Frictional

- properties of monzodiorite and gabbro during seismogenic fault motion. *J. Geol. Soc. Japan*, **102**, 240-248.
- Tsutsumi, A. and Shimamoto, T. (1997a) High-velocity frictional properties of gabbro. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 699-702.
- Tsutsumi, A. and Shimamoto, T. (1997b) Temperature measurements along simulated faults during seismogenic fault motion. *Proceedings of the 30th IGC, Beijing*, **15**, 223-232.
- Uehara, S. and Shimamoto, T. (2003) Gas permeability evolution of cataclasite and fault gouge in triaxial compression and implications for changes in fault permeability structure through the earthquake cycle. *Tectonophysics*, in press.
- Wibberley, C.A.J. (2002) Hydraulic diffusivity of fault gouge zones and implications for thermal pressurization during seismic slip. *Earth Planets Space*, **54**, 1153-1171.
- Wibberley, C.A.J. and Shimamoto, T. (2003) Internal structure and permeability of major strike-slip fault zones: The Median Tectonic Line in Mie Prefecture, Southwest Japan. *J. Struct. Geol.*, **B**, 59-78.

(2003年12月22日投稿, 2003年12月25日受理)