

## 高速断層運動時に生成した岩石の摩擦熔融物の の温度を測定する試み

### An Attempt to Measure the Temperature of Frictional Melts of Rocks Produced During Rapid Fault Motion

堤 昭人\*・嶋本利彦\*

Akito Tsutsumi\* and Toshihiko Shimamoto\*

**Abstract:** A series of high-speed frictional experiments on cylindrical rock specimens are conducted to measure the temperature rise and friction along simulated faults during frictional melting using a rotary-shear high-speed frictional testing machine. The temperature is measured through the use of thermocouple and radiation thermometer. From experiments conducted at the equivalent slip rates to 1.3 m/s and at normal stresses to 1.5 MPa several important results are found. (1) A dark 100  $\mu$ m thick layer of pseudotachylyte (PT) formed during experiments on monzodiorite. The PT contains ubiquitous clasts with various sizes in a fine matrix, where the clasts of biotite are rare. (2) The frictional melting begins to occur after a displacement of a few tens of meters even under such a low normal stress. The friction of monzodiorite is initially high and variable, but with the onset of frictional melting it tends to decrease to reach a steady state with the frictional coefficient of 0.5~0.6. The coefficient of friction exhibits a negative dependency on the slip rate. (3) The measured average temperature along simulated faults during the frictional melting is 1100-1150°C. (4) The temperature distribution of the specimen during the sliding is calculated as an axisymmetric problem by using a finite element method. The calculated maximum temperature on the sliding surface under steady state temperature distribution is 1300°C, which is in reasonable agreement with the measured average temperature. (5) The calculation for non-steady state temperature distribution shows that the maximum temperature on the sliding surface at 20 seconds of elapsed time is 900°C, at which the corresponding displacement is 26m. In most experiments the frictional melting begins to occur after a displacement of a few tens of meters. It is suggested that the temperature rise at asperity might have been higher than the average temperature along fault.

---

1993年11月1日受付, 1994年3月3日受理.

\*東京大学地震研究所. Earthquake Research Institute, University of Tokyo 113, Japan.

## はじめに

シュードタキライトは地震断層沿いに脈状に産出する細粒緻密で比較的稀な断層岩で、地震時の衝撃と摩擦熱によって形成されたと考えられている。近年、各地の断層沿いに産するシュードタキライトの基質部分に、樹枝状・球顆状などの融解・急冷組織やガラス、あるいは高温条件下でのみ成長可能な鉱物が存在することが報告されている(Allen, 1979; Maddock, 1983, 1992; Spray, 1988; Toyoshima, 1990; Magloughlin, 1992; Lin, 1994)。これらの様々な組織と鉱物組成は、地震時の高速断層運動に伴う摩擦発熱で岩石が熔融したことを示唆している。

これまで何人かの研究者は、断層運動に伴う岩石の温度上昇を理論的に計算し、摩擦熔融の可能性を指摘した(Mckenzie & Brune, 1972; Sibson, 1973; Lachenbruch, 1980)。またいくつかの実験では岩石の摩擦すべり時の温度が実測されており(Teufel & Logan, 1978; Lockner & Okubo, 1983; Yoshioka, 1984, 1985)、摩擦熔融の再現に成功した例もある(Friedman et al., 1974; Spray, 1987, 1988; Killick, 1990; Kennedy & Spray, 1992; 林・嶋本, 1994)。しかし、地震時の断層のように、変位速度が1 m/secに近い高速で、かつ変位が数mに達する条件下で断層面の温度が直接測定された例はない。またそのような領域での断層の力学的性質も正確に実測されていない。このために、これまでの理論計算結果の検証、あるいは摩擦熔融をも含めた高速領域での断層の力学的性質を決めることができなかった。

断層運動に伴う摩擦発熱過程の解明は、シュードタキライト形成の過程を明かにするだけでなく、以下の問題においても重要である。(1)地震時の断層運動によってなされた仕事はどのような割合で摩擦発熱・破砕物形成などのエネルギーとして消費されるのか(地震効率の問題)、(2)メルトが形成されるような高速運動時に断層はどのような力学的性質をもつのか、(3)摩擦発熱による温度上昇や摩擦熔融がどのように地震直後の(急速な?)強度回復に

影響するのか。

我々は、上述の問題を体系的に研究するために、回転式高速剪断摩擦試験機を用いて、変位速度が最大約1.3m/secという高速領域での摩擦実験を開始した。今回の実験では、高速の断層運動に伴う摩擦熔融時の力学的データの収集および、それと並行して摩擦面の温度の直接測定を試みた。本稿では、これまでに得られた実験結果を報告し、天然の断層運動に伴う摩擦発熱、摩擦熔融現象について考察する。

## 実験方法

実験には、東京大学地震研究所の回転式高速剪断摩擦試験機を用いた(嶋本・堤, 1994)。実験では一対の円筒状あるいは円柱状の岩石試料の軸方向に荷重を加え、大型モーターで一方の試料のみを回転させることで高速と大変位を得ている(なお本稿では変位速度はすべて等価変位速度(嶋本・堤, 1994を参照)で表すことにする)。得られる変位速度は最大約2.8m/sec(外径40mm, 内径30mmの円筒試料を用いた場合)、軸力は10kN(約1トン)以下である。回転式なので、変位量に制限は無い。

実験試料には、細粒モンゾ閃緑岩および細粒花崗岩を用い(産地不明)、円柱状(直径25mm)あるいは円筒状(外径25mm, 内径16mm)に整形した(長さ約48mm)。モンゾ閃緑岩は主に斜長石・カリ長石・単斜輝石・斜方輝石・黒雲母・磁鉄鉱などからなり、花崗岩は石英・斜長石・カリ長石・黒雲母などから構成されている。今回の実験では、軸応力( $\leq 1.5$ MPa)一定の条件下で一方の試料に軸回転(等価変位速度 $\leq 1.3$ m/sec)を加え、摩擦強度・摩擦速度・摩擦熔融時の摩擦面の温度などの測定を試みた。

摩擦面の温度測定には、熱電対(PR型, CR型)を用いた直接測定と、放射温度計を用いた間接測定の2通りを試みた。放射温度計は、被測定物の放射エネルギーの量を測定することによって、測定物体の温度を求める測定機器である。今回の実験に使用したMINOLTA-TR-630は、最小直径0.4mmの面積における平均的温度的

測定が可能である(測定距離=20cm)。熱電対を用いた場合には、固定側の試料に熱電対用の穴(直径1mm)をあけ、アルミナの絶縁管に通した熱電対を埋め込んだ後、アルミナ粉末と耐熱セメント(THERMON-T63)で固定した(Fig. 1)。熱電対用の穴の先端の位置、深さについては以下の2つの点に留意した。

1)変位が進行するに従って熱電対の先端は摩擦面に近づいてゆき、最終的には回転側の摩擦面に接して破損する。熱電対が摩擦熔融物に接触することが期待される唯一の機会、この破損直前の、先端が摩擦面に顔を出した瞬間である。そこで実験開始後1分前後で、熱電対が摩擦面に到達できるように熱電対の先端を摩擦面から約1mmの深さにうめ込んだ(Fig. 1b)。

2)円柱状の試料を用いた場合、変位速度は中心から外側に向かって増大し、摩擦面に対してなされる仕事は最も外側の部分で最大になる。一方、試料は外気と接触しているために必ず試料表面から熱が大気中に失われるので、結果的には、摩擦面の中心と外周の中間の位置で、最

も温度が上昇すると考えられる。そこで外周から5mm前後の位置に熱電対の先端がくるようにした(Figs. 1a, b)。

実験データの収集にあたっては、低域通過フィルター(バタワース特性を有するVCVS型3次フィルター、カットオフ周波数=1kHz)で高周波ノイズを除去した後、200Hz以上のサンプリング間隔でトルク・軸荷重・軸方向の試料短縮量の変換器からの出力をデジタル化し、デジタル記録計(TEAC-DRF1)に収録した。ただし温度のデータを取り込む際にはこのフィルターはかけていない。データの解析において、必要な場合にはデジタルデータに低域通過型のデジタルフィルター処理(移動平均)をおこなっている。

## 実験結果

### 組織の観察

実験後、軸荷重を取り除いた後の試料(モンゾ閃緑岩)は、ガラス光沢を呈する黒色の薄層(~100 $\mu$ m)によって熔着された状態になっていた。摩擦面に垂直な面内で薄片を作り、顕微鏡およびSEMを用いた摩擦面の観察をおこなった。母岩と摩擦生成物との境界は不規則に入り組んだ複雑な形状を呈する。しかし個々の鉱物に着目して見ると、輝石・磁鉄鉱との境界は角張っているものが多いのに対して、斜長石・黒雲母には非常に丸味をおびているものも認められる(Fig. 2d)。また摩擦面上の黒雲母にはしばしばキンク状の変形が認められる(Fig. 2c)。黒色の薄層部分は、丸味をおびた垂円状から角状のものまで大小様々の粉砕岩片と気泡の抜けた孔、およびそれらの間を充填する基質部分からなる。粉砕岩片には母岩を構成する輝石・斜長石・カリ長石などが認められる。それにたいして黒雲母の岩片は、SEM-EDSも利用して調べたが殆ど含まれていない。

### 力学的性質

円筒状のモンゾ閃緑岩の摩擦強度と試料の軸方向の短縮量の変化の典型例を、時間を横軸に

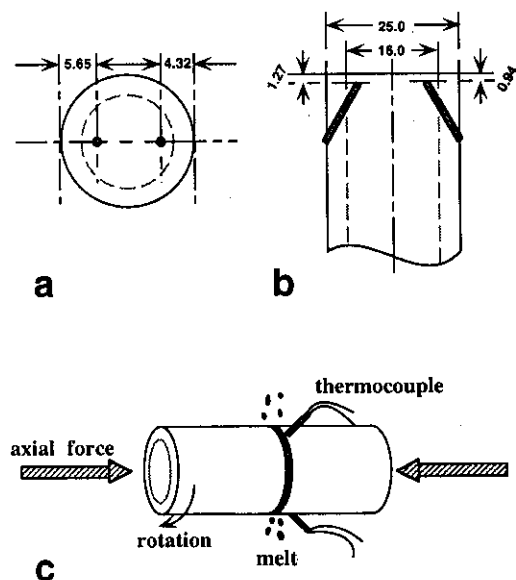


Fig. 1 (a) Top and (b) cross-sectional views of a cylindrical specimen showing thermocouple locations. (c) A schematic sketch showing the specimen assembly for frictional melting experiment.

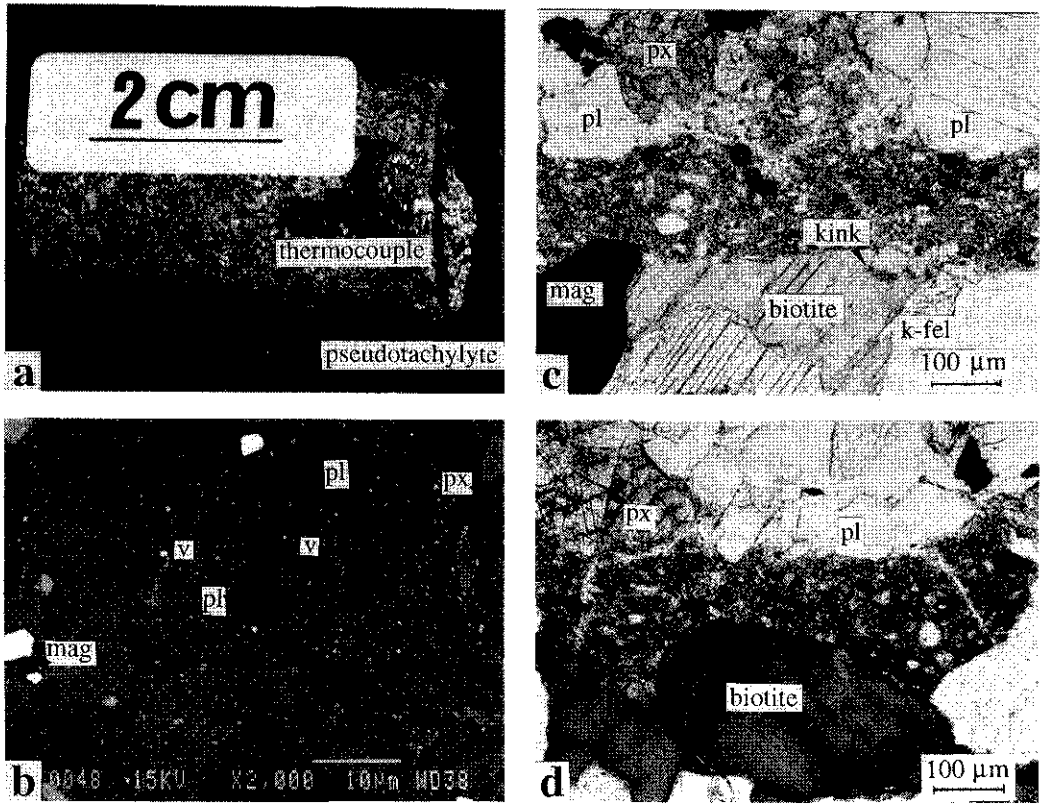


Fig. 2 (a) Side view of a monzodiorite specimen (run # HFR064) after experiment. A fragment of the matching specimen, welded to the specimen across a dark layer of pseudotachylyte ( $100\ \mu\text{m}$  thick), can be seen in the lower-right side. A small white rod is an alumina bead used as the guard for the thermocouple. (b) BSE photograph of the experimentally produced pseudotachylyte (run # HFR070). Note ubiquitous clasts with various sizes scattered in a fine matrix. (c), (d) Photomicrographs of pseudotachylyte (run # HFR068) in a section cut normal to the simulated fault plane. Plane polarized light. In all photographs the boundary between the host rock and the pseudotachylyte layer is horizontal. Biotite adjacent to the pseudotachylyte layer often exhibits kinking (c) and rounded interface (d).

として Fig. 3 に示した。この例では、軸応力 (1.5MPa) を一定に保ちながら、変位速度のみを  $0.93\text{m/sec}$ ,  $0.42\text{m/sec}$ ,  $0.26\text{m/sec}$  と変化させた。実験開始直後には岩石の摩擦強度(摩擦係数)に激しい変動が認められた。その後変位の進行に伴って摩擦面の温度が上昇してくると、間欠的に摩擦面が明るい赤色に変化する状態を経て、試験開始後、約14秒後(248回転、外

周部の総変位量約19.5m)に連続的な摩擦熔融が認められるようになった。摩擦熔融の開始に伴って摩擦係数は低下して、 $0.5\sim 0.6$ の範囲で安定化した。一方軸方向の試料の短縮速度は、連続的な摩擦熔融が開始する以前の段階では約  $6\ \mu\text{m/sec}$  であったのに対し、摩擦熔融の開始に伴い短縮速度は徐々に増加して約  $100\ \mu\text{m/sec}$  に達した。実験開始後約80秒および107秒で、

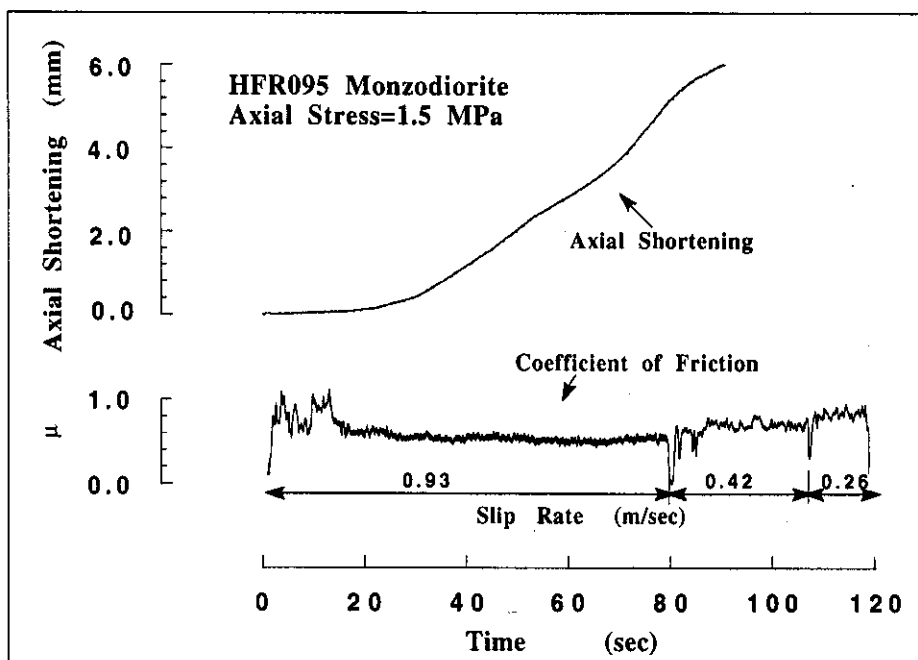


Fig. 3 Frictional coefficient versus time and axial shortening versus time records from a high-speed frictional experiment on monzodiorite (run # HFR095). Frictional melting initiates in about 14 seconds, after a circumferential displacement of about 19m. Friction is initially high and variable, but with the onset of frictional melting it tends to decrease to reach a steady state with the frictional coefficient of 0.5~0.6. The onset of the frictional melting markedly increases the rate of axial shortening. The coefficient of friction exhibits a negative dependency on the slip rate; i.e. higher friction at lower slip rate as confirmed toward the end of this experiment.

変位速度をそれぞれ0.42m/sec, 0.26m/secとそれぞれ変化させた。その結果、摩擦熔融は連続的に継続しながらも、変位速度の減少と共に摩擦強度が増加する傾向が見られた。

#### 温度の測定結果

熱電対を利用した温度測定には細粒モンゾ閃緑岩(HFR072のみ細粒ハンレイ岩)の円柱状試料を用い、軸応力(≤1.1MPa)と変位速度(≤1.3m/sec)を一定に保った条件下で実験をおこなった(Table 1)。Figs.4,5に実験結果の一例を示す。この図では熱起電力の変化を時間を横軸にとって示した。またFig. 6には熱起電力

を温度に換算したものを、測温点から摩擦面までの距離を横軸にとって示す(Fig. 5の実験)。測温点である熱電対の先端は変位の増大とともに試料が短縮するにつれて徐々に摩擦面に近付いてゆく。これに伴い、熱電対の先端が位置する点の温度も徐々に上昇し、1100℃付近の温度を記録した時点で熱電対が破損した。Figs. 4b, 4c, 5bは各々の実験で最高温度を記録した付近あるいは熱電対の破損する直前の記録の時間軸を拡大したものである。これらの図からわかるように、今回の一連の熱電対を利用した実験では、当初期待したような、熱電対が摩擦面に顔を出して破損する直前に摩擦熔融物に触れ、

## 考 察

瞬間的に高温を検知するという事はなかった。熱電対を用いた今回の温度測定結果から、摩擦面の平均的な温度は少なくとも約1100℃に達している (Table 1)。

放射温度計を用いた温度測定には、細粒モンゾ閃緑岩に加えて細粒花崗岩も用いた。実験は軸応力(0.8~1.0MPa)と変位速度( $\leq 1.3$ m/sec)を一定に保った条件でおこなった。温度測定の結果を Fig. 7 に示す。摩擦面の平均的な温度は、細粒モンゾ閃緑岩については最高1169℃ (Fig. 7a)、細粒花崗岩については最高1145℃ (Fig. 7b)に達しているという結果を得た。この測定結果は熱電対を用いて測定した値とほぼ一致している。

## 摩擦熔融のプロセス

はじめに、今回の実験で再現された摩擦熔融のプロセスを検討してみる。前述したように、モンゾ閃緑岩から形成した破砕物にはほとんど黒雲母が含まれていなかった。測定した摩擦熔融時の摩擦面の平均温度は約1100~1150℃に上昇しており、黒雲母の大気中での分解温度(約650℃, Clark, 1966)を遥かに越えている。粉砕岩片の中に黒雲母のみが殆ど観察されないことから判断すると、この摩擦熔融は融解(分解)温度の低い鉱物が優先的にメルト化するという選択熔融現象であろう (Spray, 1992; Lin, 1994 ;

Table 1 Summary of data from the frictional melting experiments.

Run number and sample	$\sigma$ (MPa)	v (m/sec)	Total disp.(m)	Temp.-measuring device	Measured max. Temp. (°C)
HFR057 di	0.41	0.87	1443	CA	760
HFR061 di	1.04	1.31	871	CA	—
HFR062 di	1.14	1.31	320	CA	—
HFR063 di	1.02	1.30	270	PR	1090
HFR064 di	1.02	1.31	226	PR	1070
HFR065 di	0.82	1.31	650	PR	950
HFR066 di	0.92	1.31	135	PR	1100
HFR067 di	0.86	1.31	320	PR	1124
HFR068 di	0.80	1.30	192	PR	1102
HFR069 di	0.80	1.31	257	CA	1085
HFR070 di	0.81	1.31	574	PR	1100
HFR071 di	0.82	1.31	261	PR	—
HFR072 gb	0.82	1.30	174	PR	—
HFR073 di	0.61	0.87	391	PR	—
HFR074 di	1.03	1.30	530	RD-THERM	1169
HFR075 di	0.82	1.31	522	RD-THERM	1082
HFR076 gr	0.82	1.30	97	RD-THERM	1145
HFR077 gr	1.02	1.30	102	RD-THERM	1130
HFR078 di	1.02	0.88	654	RD-THERM	1090
HFR095 di	1.50	0.26-0.93	89		no data

— Thermocouple failed and came off the sample before reaching the sliding surface. di, monzodiorite; gb, gabbro; gr, granite; PR, PR-thermocouple; CA, CA-thermocouple;  $\sigma$ , axial stress; v, equivalent velocity which is defined as  $v = 4\pi rR/3$  for solid cylindrical specimen, where r is outer diameter and R is rotation per unit time (Shimamoto & Tsutsumi, this special issue). Total displacement refers to the displacement at the outer edge of the cylindrical specimen.

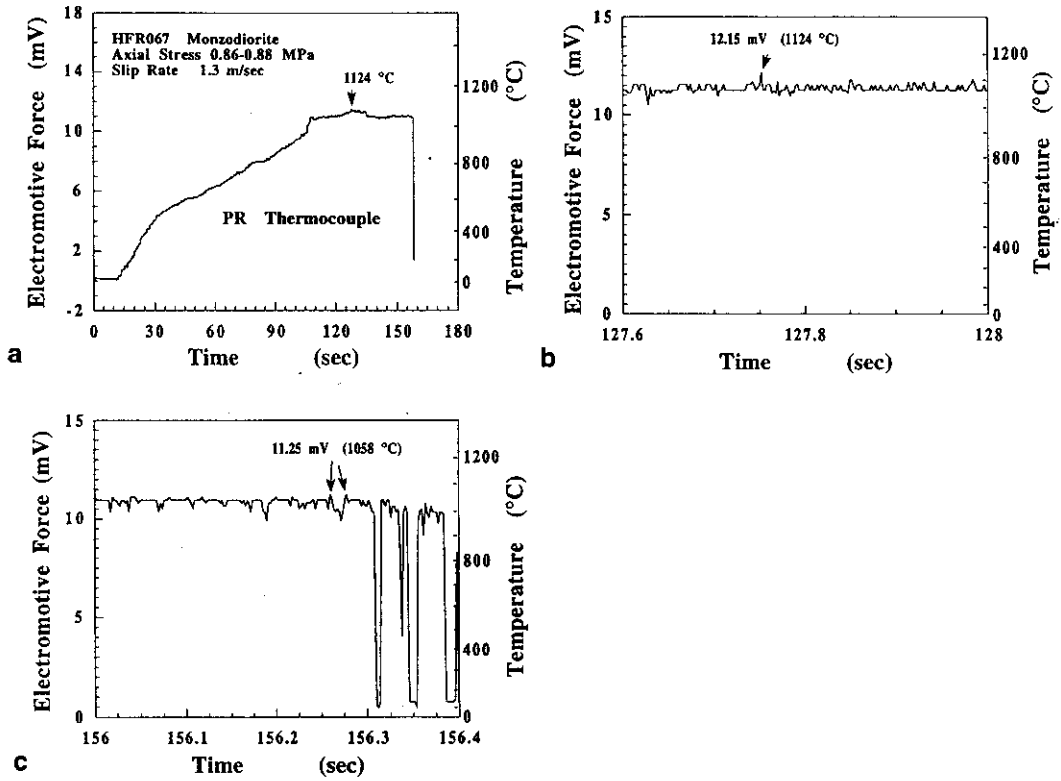


Fig. 4 Temperature rise along a simulated fault in terms of electromotive force and  $^{\circ}\text{C}$  in a monzodiorite specimen, plotted against the elapsed time during run # HFR067. (a) Temperature versus time records for the whole experiment. (b), (c) Enlargements of the record near the maximum temperature (b), and near the final portion (c) at which the thermocouple failed yielding very irregular output. Temperature is measured with a PR-thermocouple cemented at a distance of about 2mm from the fault.

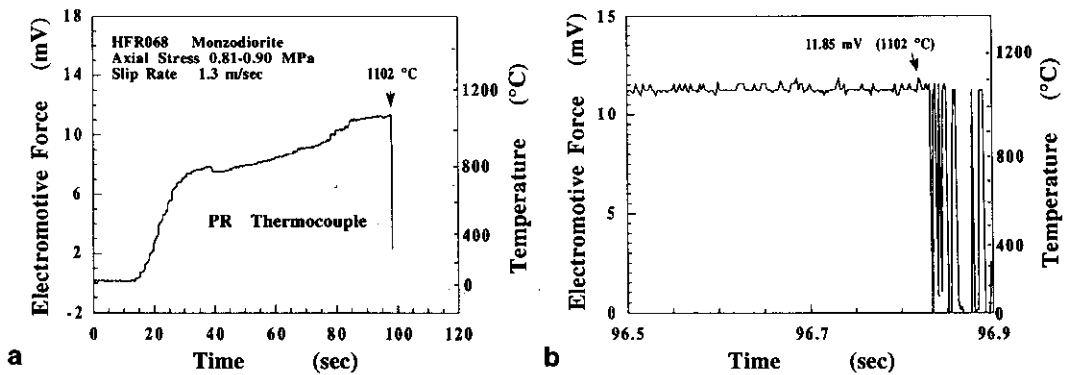


Fig. 5 Temperature rise in terms of electromotive force and  $^{\circ}\text{C}$  for a monzodiorite specimen (run # HFR068), during the frictional melting. (a) is the entire record, and (b) is an enlargement of its final portion leading to the thermocouple failure.

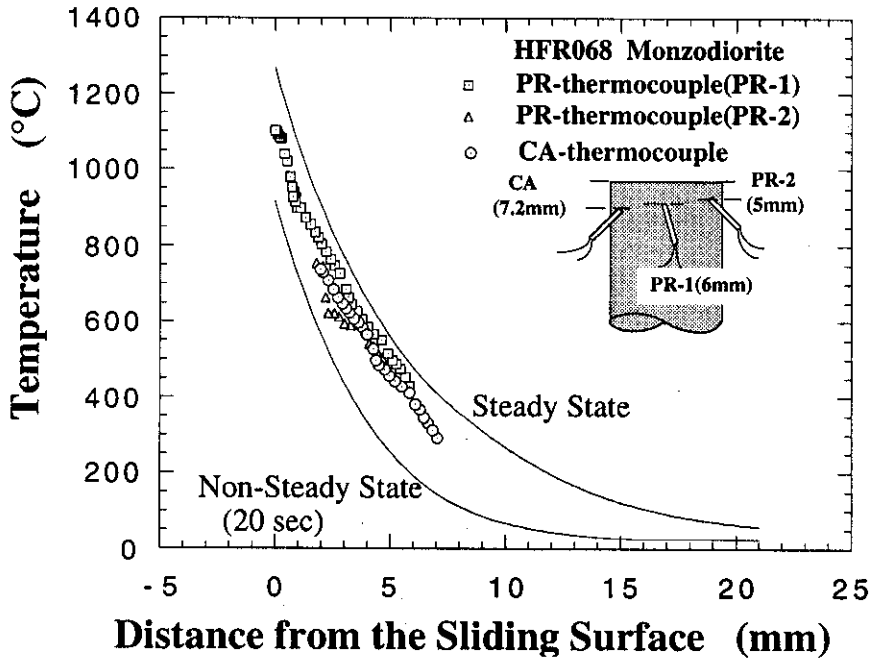


Fig. 6 Temperature as measured with three thermocouples, plotted against the distance from the sliding surface (run # HFR068). The initial distance of each thermocouple from the sliding surface is, 6mm for PR-1(open square), 5mm for PR-2(open triangle) and 7.2mm for CA(open circle), respectively. Solid lines are the steady state and non-steady state temperature distributions, calculated as an axisymmetric problem by using a finite element method. The non-steady state calculation is made at an elapsed time of 20 seconds, at which the corresponding circumferential displacement is 39m.

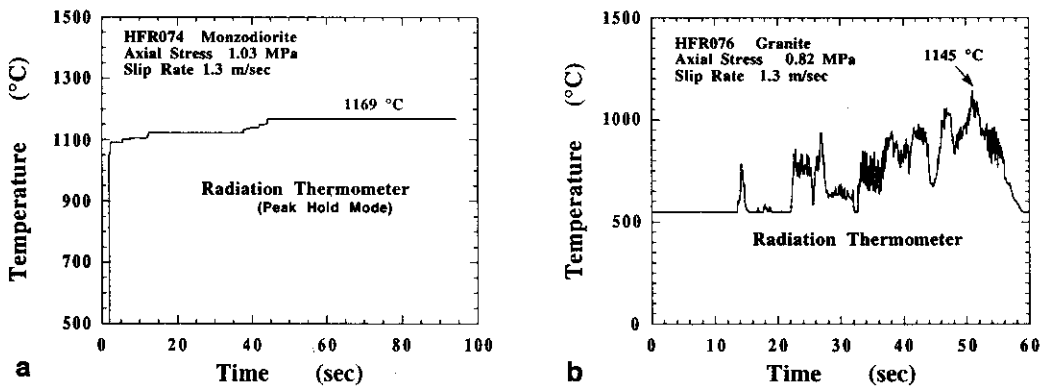


Fig. 7 Averaged temperature along the sliding surface as measured by a radiation thermometer, plotted against the elapsed time. (a) Experiment on monzodiorite (run # HFR074). Peak hold mode is chosen in this case, and the record does not display real temperature change after the maximum temperature is reached. (b) Experiment on granite (run # HFR076).



林・嶋本, 1994). 一方, 摩擦面に接した母岩中および破碎岩片中の鉱物の形態に着目したときに, 輝石・磁鉄鉱は角張ったものが多いのに対して, 斜長石・黒雲母には非常に丸味を帯びたものも認められた. 磁鉄鉱の融点約1590℃に対して斜長石(アンデシン,  $Ab_{60}An_{40}$ )は約1200℃で融け始める. このことから, 摩擦熔融が選択的な熔融現象であることがうかがえる. 鉱物の種類による形態の違いは熔融(分解)温度の差を反映しているのだろう. また, 斜長石の丸みを帯びた形態と, その融解温度が今回測定した摩擦面の平均温度より高いことから, 摩擦面の温度は, 実測した平均温度よりも局所的には高温に達していたと考えられ, 摩擦面の温度の不均一性が示唆される.

### 摩擦熔融時の断層の力学的性質

今回の実験で, 摩擦熔融の開始は岩石の摩擦強度を減少させること, およびこの速度領域では変位速度の増加とともに摩擦強度が減少することが示された. これまで, 摩擦の速度依存性は変位速度の増加とともに velocity weakening から velocity strengthening に変わることが示されていた (Shimamoto, 1986; Shimamoto & Logan, 1986; Blanpied et al., 1987). 今回の実験結果は変位速度をさらに増加させると, この性質が再び velocity weakening に変わることを示している. この結果は地震の発生過程をモデル化する上で極めて重要であり, 今後様々な条件でのより詳しい実験が必要である.

### 摩擦面の温度上昇の理論的検討と今後の課題

フーリエの法則が成り立つ場合の物質内の熱伝導の微分方程式は

$$\alpha \nabla^2 T - \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

であたえられる(例えば Carslaw & Jaeger, 1959).  $\alpha$  は温度伝導率で, 物質の密度を  $\rho$ , 比熱を  $c$ , 熱伝導率を  $k$  とすれば  $\alpha = k/\rho c$  である. 対象とする物質の温度分布は式(1)を解き, その一般解に境界条件を与えることで求め

られる. 今回の摩擦実験の場合, 単位時間当たり摩擦によりなされる仕事は摩擦面の中心から外周方向に向かって増大する. いま摩擦面において同心円状の領域(半径  $r_1, r_2$ )を考えると, 摩擦により単位時間当たり発生する熱量は,

$$Q = \left( \int_{r_1}^{r_2} 4R \mu \sigma \pi^2 r^2 dr \right) / J \quad (2)$$

で与えられる.  $R$  は1秒当りの回転数,  $\mu$  は動摩擦係数,  $\sigma$  は軸応力,  $J$  は仕事当量である. 一方試料表面からの放熱量は, ニュートンの冷却法則が成り立つものと仮定し, 軸方向の長さが  $dx$  の微小領域を考えると,

$$dQ = 2h \pi r (T - T_0) dx \quad (3)$$

であたえられる( $h$ : 熱伝達係数).

今回これらの境界条件で有限要素法による熱伝導解析を行い, 摩擦面の温度上昇を推定してみた. なお解析には下関・藤沼(1988)による有限要素法解析ソフトを使用し, 軸対称問題として解いた. 摩擦係数  $\mu$  には, 今回のモンゾ閃緑岩を用いた実験での摩擦熔融時の値(約0.55, Fig. 3)を, また  $k = 0.007 \text{ cal/cm}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  (Clark, 1966),  $R = 25 \text{ r.p.s.}$ ,  $\sigma = 0.8 \text{ MPa}$ ,  $h = 0.02 \text{ cal/cm}^2 \text{ s}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  の値をそれぞれ用いておこなった. Fig. 8 に解析の結果得られた試料の温度分布を示す. また Fig. 6 には解析結果を熱電対を用いた実測値と比較して図示した. 摩擦面での温度は外周から4 mmの位置で最も高く, 中心および外周に向かって減少するという分布になり, 最高温度は約1300℃と求まった. この結果は今回実測した1100~1150℃という平均温度と良く対応しており, また摩擦面からの距離の増大に伴う温度の減少の仕方も実測した結果と矛盾しない(Fig. 6).

この解析結果ははたして, 天然の地震時の断層運動による温度上昇を再現しているのだろうか. 上記の単純化した解析では摩擦面での全面接触を仮定している. しかし, 実際の摩擦面においては, 個々のアスペリティーの接触部ではより高温に達しているはずである. 一方で断層運動は必ず破碎物の形成とその細粒化を伴うが

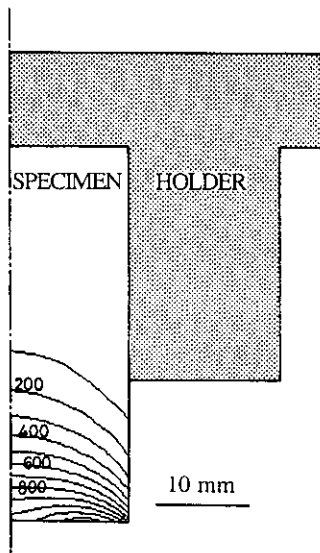


Fig. 8 The calculated steady state temperature distribution of the specimen under the experimental conditions for frictional melting of monzodiorite (run # HFR068). Only a half of the symmetric cross section of the specimen and the sample holder is illustrated here. The temperature are calculated as an axisymmetric problem by using a computer program of finite element method. Intervals of the isothermal curves are 100°C.

(後述)、上記の解析ではこのことは考慮していない。さらに、ここに示した実験結果および解析結果は定常状態の温度分布を対象としている。しかし実際に天然の断層運動に伴う摩擦発熱を論じる上で大事なのはむしろ熱の発生と冷却過程が定常的になる以前の非定常な挙動であろう。Fig. 6には定常状態での解析結果とあわせて非定常状態(20秒後)での解析結果も示している。今回の解析では断層が動き始めてから20秒後の摩擦面の最高温度は約900°Cと求まった。一方実験では断層面に変位を与えてから10数秒で摩擦熔融が開始した(Fig. 3)。従って、摩擦熔融は断層面の平均的な温度が900°C以下でも起こり得る可能性がある。今後、様々な変位速度、軸応力下での実験を行い、並行して真の接触面積、破砕物の形成などを考慮した非定常状

態での温度上昇のより現実的な検討が必要である。

今回の高速摩擦実験は、その変位速度(1.3m/sec)と変位量において地震時の断層運動を再現した。一連の実験で摩擦面の温度は約1100~1150°C以上という高温に達しており、また摩擦熔融も比較的容易に再現された。この結果は一見すると、天然のシェードタキライトの産出が非常に稀であるというフィールドの観察事実と相反するように見える。しかし注意しなければならないのは、天然の断層はほとんどの場合に破砕物の形成を伴うということである。今回の実験では試料の変位はすべてすべり面でまかなわれ、容易に摩擦面の温度が高温に達することができた。一方、Sibson(1973)が指摘するように、断層破砕帯中で変位が分散した場合には、岩石を熔融させるまで温度を上昇させることは難しい。つまり破砕物の存在は断層帯の温度上昇を妨げる役割をし、シェードタキライトが稀である1つの要因であると考えられる。これに対し、断層が新たに形成されたときには、今回の実験のように断層の動き始めにおいて破砕物を伴わないので、容易に摩擦熔融が起こる可能性がある(嶋本・長濱, 1991)。今後、摩擦発熱の問題を扱う場合に、破砕物形成のプロセスとの競合作用を実験的に調べていく必要がある。

今回の実験結果をまとめると、

(1)熱電対、放射温度計を用いた測定によれば、軸応力~1.5Mpa、変位速度約1.3m/secの条件での試料の摩擦面の平均温度は少なくとも1100~1150°C以上に到達している。

(2)上記の条件では摩擦面において岩石の摩擦熔融が起こり、形成されたメルト中には黒雲母が殆ど含まれていなかった。このことは融解温度の低い鉱物粒の選択的な熔融によって説明される。

(3)摩擦熔融の開始は摩擦強度の低下を伴う。また、摩擦熔融の起こっている時に変位速度を減少させると、摩擦強度は増大した(velocity weakening)。これについては、今後より詳しい実験が必要である。

**謝辞：**試料の観察、分析には東京大学理学部のSEM-EDSを使わせて頂いた。また株式会社ミノルタには放射温度計の使用に便宜をはかって頂いた。記して感謝します。なお本研究は文部省科研費補助金(一般研究B, 02452068, 研究代表者：嶋本利彦)を用いて製作した試験機を使用しておこなった。また研究の一部に、学振特別研究員科研費補助金を使用した。

### 参考文献

- Allen, A. R., 1979, Mechanism of frictional fusion in fault zones. *J. Struct. Geol.*, v.1, 231-243.
- Blanpied, M. L., Tullis, T. E. and Weeks, J. D., 1987, Frictional behavior of granite at low and high sliding velocities. *Gephys. Res. Let.*, v.14, 554-557.
- Carlsaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1959, Conduction of Heat in Solids. *Oxford University Press*, 386 pp.
- Clark, Jr. S. P., 1966, Thermal conductivity, Handbook of Physical Constants, *Geol. Soc. America Memoir* 97, 459-482.
- Friedman, M., Logan, J. M. and Rigert, J. A., 1974, Glass-indurated quartz gouge in sliding-friction experiments on sandstone. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v.85, 937-942.
- Kennedy, L. A. and Spray, J. G., 1992, Frictional melting of sedimentary rock during high-speed diamond drilling: and analytical SEM and TEM investigation. *Tectonophysics*, v.204, 323-337.
- Killick, A. M., 1990, Pseudotachylyte generated as a result of a drilling "burn-in". *Tectonophysics*, v.171, 221-227.
- Lachenbruch, A. H., 1980, Frictional heating, fluid pressure, and the resistance to fault motion. *J. geophys. Res.*, v.85, 6097-6112.
- Lin, A., 1994, Glassy pseudotachylyte veins from the Fuyun fault zone, northwest China. *J. Struct. Geol.*, v.16, 71-83.
- 林 愛明・嶋本利彦, 1994, 実験的に形成されたシュードタキライトの化学組成. 本特集号.
- Lockner, D. A. and Okubo, P. G., 1983, Measurements of frictional heating in granite. *J. Geophys. Res.*, v.88, 4313-4320.
- Maddock, R. H., 1983, Melt origin of fault-generated pseudotachylytes demonstrated by textures. *Geology*, v.11, 105-108.
- Maddock, R. H., 1992, Effects of lithology, cataclasis and melting on the composition of fault-generated pseudotachylytes in Lewisian gneiss, Scotland. *Tectonophysics*, v.204, 261-278.
- Magloughlin, J. F., 1992, Microstructural and chemical changes associated with cataclasis and frictional melting at shallow crustal levels: the cataclasite-pseudotachylyte connection. *Tectonophysics*, v.204, 243-260.
- McKenzie, D. P. and Brune, J. P., 1972, Melting on fault planes during large earthquakes. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, v.29, 65-78.
- Shimamoto, T., 1986, Transition between frictional slip and ductile flow for halite shear zones at room temperature. *Science*, 231, 711-714.
- Shimamoto, T. and Logan, J. M., 1986, Velocity-dependent behavior of simulated halite shear zones: An analog for silicates. *Geophys. Monogr. Ser.* 37, 49-63.
- 嶋本利彦・長濱祐幸, 1991, シュードタキライトの起源と地殻応力問題. 月刊地球, v.13, 416-427.
- 嶋本利彦・堤 昭人, 1994, 新しい高速摩擦試験機：その概要と研究目的. 本特集号.
- 下関正義・藤沼平一, 1988, 有限要素法／非定常熱応力プログラミング. 日刊工業新

- 聞社.
- Sibson, R. H., 1973, Interactions between temperature and pore-fluid pressure during earthquake faulting and a mechanism for partial or total stress relief. *Nature*, v.243, 66-68.
- Spray, J. G., 1987, Artificial generation of pseudotachylyte using friction welding apparatus: simulation of melting on fault plane. *J. Struct. Geol.*, v.9, 49-60.
- Spray, J. G., 1988, Generation and crystallization of an amphibolite shear melt: an investigation using radial friction welding apparatus. *Contr. Miner. Petrol.*, v.99, 464-475.
- Spray, J. G., 1992, A physical basis for the frictional melting of some rock-forming minerals. *Tectonophysics*, v.204, 205-221.
- Teufel, M. D. and Logan, J. M., 1978, Effect of displacement rate on the real area of contact and temperatures generated during frictional sliding of Tennessee sandstone. *Pure Appl. Geophys.*, v.116, 840-865.
- Toyoshima, T., 1990, Pseudotachylyte from the Main zone of the Hidaka metamorphic belt, Hokkaido, northern Japan. *J. metamorphic Geol.*, v.8, 507-523.
- Yoshioka, N., 1984, A method for estimating the shear stress distribution from temperature measurements during sliding of rocks. *J. Phys. Earth*, v.32, 1-12.
- Yoshioka, N., 1985, Temperature measurement during frictional sliding of rocks. *J. Phys. Earth*, v.33, 295-322.