

高速断層運動時の断層破碎物形成過程における 熱クラックの重要性：実験的検証

Significance of Thermal Fracturing in the Generation of Fault Gouge during Rapid Fault Motion: An Experimental Verification

大友幸子*・嶋本利彦*

Yukiko Ohtomo* and Toshihiko Shimamoto*

Abstract: Gouge generation processes are important in many problems such as the growth processes of natural fault zones, and competing processes between gouge generation and frictional melting. Such processes must be studied under rapid fault motion since the fault motion along most active faults occurs seismogenically. This note demonstrates experimentally the significance of thermal fracturing in the gouge generation using a high speed frictional testing machine. Experiments were performed on hollow-cylindrical specimens (25 mm and 16 mm in outer and inner diameters, respectively), under the normal stresses to 1.6 MPa and at the slip rates to 1.6 m / s.

The normal stress that can be sustained by granite, quartzite and monzodiorite during such a rapid fault motion is smaller than their uniaxial strength by more than two orders of magnitude. This result strongly suggests that the thermally induced fractures due to rapid frictional heating dramatically lower the strength of these rocks. The results for granite and quartzite under specific conditions indicate that the frictional heating and subsequent rapid gouge generation occurs repeatedly. The heating of the sliding surface to very high temperature, which has been detected with a silicon photodiode, does appear to induce thermal fractures along fault and promote gouge generation. As the gouge drops from the unjacketed simulated fault, it takes heat away to lower the temperature in the fault zone (no emission of light). The fault is heated again and the processes repeat themselves. The effect of thermal fracturing is less pronounced in gabbro than in granite and quartzite, and quartz seems to be the critical mineral for causing the violent thermal fracturing. Thermal fracturing must always be taken into account in considering the growth processes of fault zones.

1994年1月28日受付. 1994年2月21日受理.

*東京大学地震研究所. Earthquake Res. Inst., Univ. of Tokyo.

はじめに

ほとんど全ての断層は断層破砕帯を伴っている。断層破砕帯の厚さ・構成鉱物・断層帯内部の変形様式などは、断層の力学的性質に大きな影響を与えるので、自然の断層の挙動に対する断層破砕帯の影響を論じるためには、断層の生成と成長の過程において断層破砕物がどのように蓄積されていくかを知らなければならない。

岩石力学的には、断層破砕帯の形成過程は断層の変位に伴う母岩の摩耗の問題である。これまでに岩石の摩擦実験に基づいて、摩耗に関する経験則を確立する試みがなされている (Scholz, 1990, pp. 66-73; 長濱・中村, 1994; 参照)。しかし、基になる実験データは、変位速度の低い条件下で得られているか、または断層が地震性の急激な動きをする条件下で調べられていても、総変位量が非常に限られている場合が大半である。それらの経験則を自然の断層に適用する場合には、これらの点に注意しなければならない。断層のクリープ現象は稀なので、破砕帯形成の問題を考えるためには、地震の際に断層が急激で大きな変位をする時に、どのようなプロセスでどれだけ破砕物が蓄積していくかを調べる必要がある。

東京大学地震研究所では、地震時の急激な断層運動に伴う様々な現象を体系的に調べるために、回転式高速剪断摩擦試験機を設置した (嶋本・堤, 1994)。この試験機は、岩石の一軸破壊強度に近い100 MPaまで垂直応力を加えて、高速摩擦実験をおこなえるように設計されている。ところが、試験機を製作した [株] 圓井製作所に花崗岩の試料をもちこんで試験機の試運転をしてみると、垂直応力は花崗岩の一軸強度の数十分の1にすぎないのに、試料は実験開始直後にすぐ破壊してしまった。もう一度繰り返しても結果は同じであった。そこで最後のサンプルは、破壊しないように0.1~0.2 MPaの垂直応力下で実験をおこなって、断層面で何がおこっているかを観察することにした。

その結果、高速回転(最高1,500回転/分)によって円筒形の試料は擦れあっているの、試

料面(断層面)は摩擦熱による加熱で発光するのだが、この発光が間欠的に起こることが認められた。そして発光の直後に断層面から破砕物により多く落ちてきている、という印象を受けた。この観察から、本稿の第二著者(TS)は、高速摩擦試験における岩石の著しい強度の低下は摩擦熱によって生じる熱クラックによるものと直感した。堤・嶋本(1994)によって実測されているように、高速で相対変位をしている断層面の温度は短時間で岩石を熔かすほどに上昇する。したがって、断層近傍の岩石は、岩石を真っ赤に熱して水に投げ込むのと逆のことを経験するのである。熱膨張の大きさは鉱物ごとに違い、また多くの鉱物は異方的に熱膨張をするので、加熱によって鉱物の多結晶からなる岩石中には熱クラックが発生するのである (Bauer & Johnson, 1979; Carlson et al., 1990; Jansen et al., 1993; などを参照)。上述の試験機の試運転中に認められた摩擦面の発光直後の破砕物の落下は、熱クラックの形成によって破砕物が形成されやすくなったためと考えられた。その後発光しなくなるのは、落下した破砕物が断層面から熱を運び去るからではないかとも考えられた。

試験機の設計者としては、この試運転の結果には大いに落胆させられた。もちろん熱クラックの発生はある程度予期していたが、それが岩石の一軸強度(つまり加えることのできる垂直応力)を2桁以上も低下させるとは思っていなかった。これが、筆者らが断層の高速運動時に熱クラックが非常に重要であることを認識したきっかけであった。本研究では、予察的だが注意深い実験によって断層破砕物形成における熱クラックの重要性を検証することを試みた。

実験方法

地震時の急激な断層運動は、地震研究所の高速剪断摩擦試験機(堤・嶋本, 1994)を使って再現した。実験では、円筒形の試料を回転軸に設置し、空気圧によって1トンまでの軸荷重を加えた状態で、片方の試料をサーボ・モータで高速回転(1,500回転/分以下)させる。我々の実

験では、外径25mm、内径16mmの円筒形試料を用いたので、垂直応力は約35 MPaまで加えることができる。また、最高変位速度は試料の擦れあう部分(以下、模擬断層または単に断層と呼ぶ)の外周部で約 2 m/秒、内周部で約 1.25m/秒である。嶋本・堤(1994)で定義された等価変位速度は最大約1.6m/秒である。等価変位速度とは、単位時間の摩擦による仕事が [(断層の面積)×(剪断応力)×(等価変位速度)] で与えられるように定義した変位速度であるが、以下、単に変位速度と言った場合には等価変位速度を意味するものとする。

実験試料としては、中粒普通角閃石黒雲母花崗岩(以下花崗岩と略)・輝石普通角閃石黒雲母モンゾ閃緑岩(以下モンゾ閃緑岩と略)・珪岩の石材を用いた。石材の産地はいずれも不明である。実験は、1.6 MPa までの垂直応力および最高1.6m/秒の変位速度のもとでおこなった。

今回の実験では、断層面周辺の岩石の加熱の状態と破砕物形成の速度を、どのように計測するかが鍵である。断層が高速運動時に赤熱して発光することから(Fig. 1)、我々は簡便な方法として、断層面から発する光の強度をシリコン・フォトダイオード(浜松ホトニクス, S 2281型)を使って測光した。フォトダイオードで捕らえられた光はフォトセンサンプ(浜松ホトニクス, C 2719型)によって電圧に変換・増幅し、その電圧値をデジタルレコーダ(TEAC, DR-F1型)に記録した。このフォトセンサンプは1 kHz まで平坦な周波数応答性をもっており、高速で変動する光の強度を測定するのに適している。断層面が肉眼的には一様に輝いて見えても、実際に発光するのは断層面間で接触してすれあうアスペリティの部分のほゞだから、発光そのものは多数の瞬時に消える点に近い光源から繰り返しおこっている可能性がある。光の強度の変化をなるべく実際に近い形で測るには、上記のような高速応答性をもったフォトセンサンプが不可欠である。断層面の温度と光の強度間の定量的な関係は決められていないが、定性的には発光量から断層面が加熱して光を発する状態にあるかどうかを、簡単

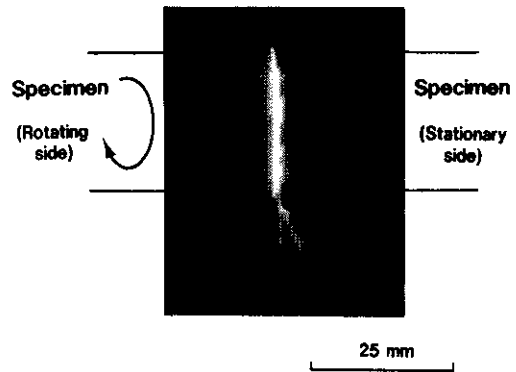


Fig. 1 A hollow cylindrical specimen of monzodiorite under frictional melting, emitting bright-orange light. The intensity of this light was measured with a photodiode and a photosensor amplifier (Hamamatsu Photonics Co. Ltd., C2281 and C2719). Note tracks of thrown-out frictional melts.

に知ることができる。

破砕物形成の速度は、変位計を用いて試料の短縮量を測定することによって見積もった。今回の実験では、円筒形の試料を高速で回転し続けるために試料にジャケットをかぶせていない。したがって、形成された破砕物は断層面から落下し、試料全体は短縮する。後で述べるように解釈にはやや注意を要するが、試料の短縮量から破砕物が形成される様子を知ることができる。なお、断層面の相対変位速度と総変位量の測定は、エンコーダを用いて試料の回転速度と総回転数を計測しておこなった。

今回の実験で鍵となるのは、断層面の加熱と破砕物の形成をややゆっくり起こして、両者の関係を見ることができるとどうかである。例えば、垂直応力と変位速度が共に大きいと、断層面は摩擦発熱によってほゞ連続的に発光した状態になり、加熱と破砕物形成の関係を検討できなくなる。それに摩擦熔融が顕著に起こってしまったら、現象が複雑になって破砕物形成の問題を浮き彫りにすることができなくなる。逆に、垂直応力が小さすぎたり変位速度が遅いと摩擦熱による加熱が少なくなり、断層面の加熱の状

態をフォトダイオードで検出できなくなる。したがって、断層面は加熱によって発光する状態にはなるけれども、摩擦熔融はそれほど顕著に起こらない条件を選ぶ必要がある。花崗岩質な岩石では、変位速度が1.6m/秒の場合には、このような条件は垂直応力が0.2~0.3 MPa(軸荷重にして50~100 N)の狭い範囲に限られることがわかった。このように、本稿で報告する実験は、焦点をしばり、非常に限定された条件下でおこなったものである。

実験結果

まず、断層が高速で動くときの岩石の強度についてまとめておこう。Table 1は、通常の低速下における一軸圧縮破壊強度(文献に報告されている値)と、今回の高速摩擦実験にお

Table 1 A comparison of the uniaxial strength (compiled from the literature) and the normal stress that can be sustained by specimen during high-speed friction experiments, for granite, quartzite and mafic plutonic rocks.

Rock types	Uniaxial Compression test	High-speed friction exp.
Granites	208 MPa ^{#1} (Matsumoto) 108 MPa ^{#1} (Ibaragi) 167 MPa ^{#2} (Inada) 163 MPa ^{#3} (Vermont)	0.4 MPa (unknown origin)
Quartzites	322 MPa ^{#1} (Former Soviet Union) 359 MPa ^{#3} (Minnesota)	0.31 MPa (unknown origin)
Mafic plutonic rocks	279 MPa ^{#1} (Former Soviet Union)	1.6 MPa (Monzodiorite, unknown origin)

^{#1}Chigaku-dantai-kennkyukai, Chigaku-Jiten Editors (1981), ^{#2}Yamaguchi & Nishimatsu (1991), ^{#3}Handin (1966)

いて試料が破壊するまでに耐えた垂直応力を示したものである。実験結果は同じ試料を用いて得られたものではないが、花崗岩・珪岩・塩基性火成岩のいずれにおいても、高速断層運動時の強度は一軸圧縮強度よりも2桁以上小さい。この強度差は珪岩で特に顕著であり、ほぼ3桁に及んでいる。

発光の強さと試料の短縮量の関係についての代表的な結果をFigs. 2~4に示す。いずれの図においても、横軸は実験開始後の経過時間を秒であらわしており、縦軸は試料の短縮量とフォトセンサアンプからの出力値であらわした発光の強さを示している。破砕物の形成と断層面からの落下が定常状態にある時には、破砕物形成の速度は試料の短縮量-時間曲線の傾斜によって与えられる。光の強さは光度計などでカリブレーションをしていないので、値は定量的だがスケールは任意である。垂直応力と変位速度は各々の図に示された通りである。

著しい発光は、いずれの場合も間欠的に起こっており、花崗岩と珪岩の場合には、発光の前後に試料の短縮速度に特徴的な変化が認められる。Fig. 2に示された花崗岩の例では、顕著な発光にやや先行して図のa付近で試料は短縮から伸張に転じている。その後同図のb付近から試料は早い速度で短縮し、短縮速度はcからd付近にむかって徐々に減少している。断層面からの発光は、全体としてみると、試料が伸張に転じてから元の短縮速度に戻る間(Fig. 1のaからcの間)で顕著である。cからfを経てc付近に至る部分における試料の伸張・短縮の様子と発光の関係は、aからe~cに至る部分の関係と全体的にはよく似ている。実験中のこのような発光と試料の短縮速度の乱れは、数10秒程度の不規則な間隔で繰り返しおこっている。

珪岩に関しても、発光と試料の短縮速度の乱れの関係は花崗岩と類似の傾向を示す(Fig. 3)。この場合、実験がはじまって約10秒後に大規模な変位の逆戻り(試料の伸張)がおこるとほぼ同時に激しい発光が起こり始め(図のa)、試料が短縮に転じて短縮速度が低下するにつれて発光も終わっている。Fig. 3のd-e-fと発光

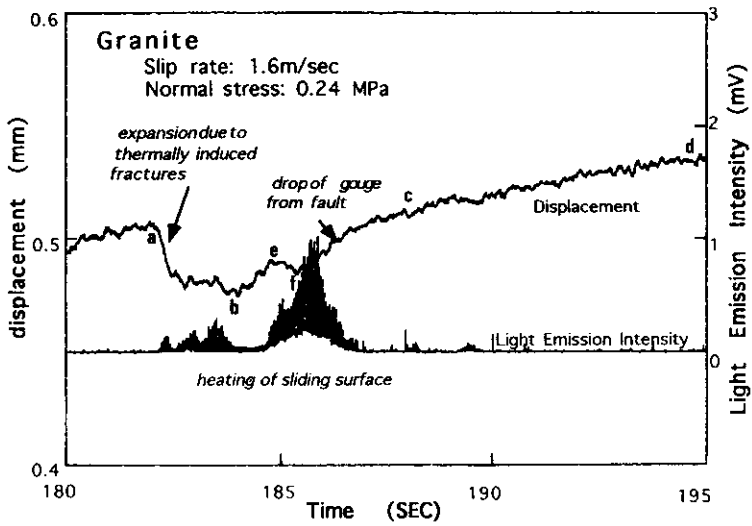


Fig. 2 The intensity of emitted light (shown in terms of the output voltage from the photosensor amplifier) and the axial shortening of a hollow cylindrical specimen of granite of unknown origin, plotted against the elapsed time in seconds since the onset of experiment (normal stress = 0.24 MPa, slip rate = 1.6 m / s).

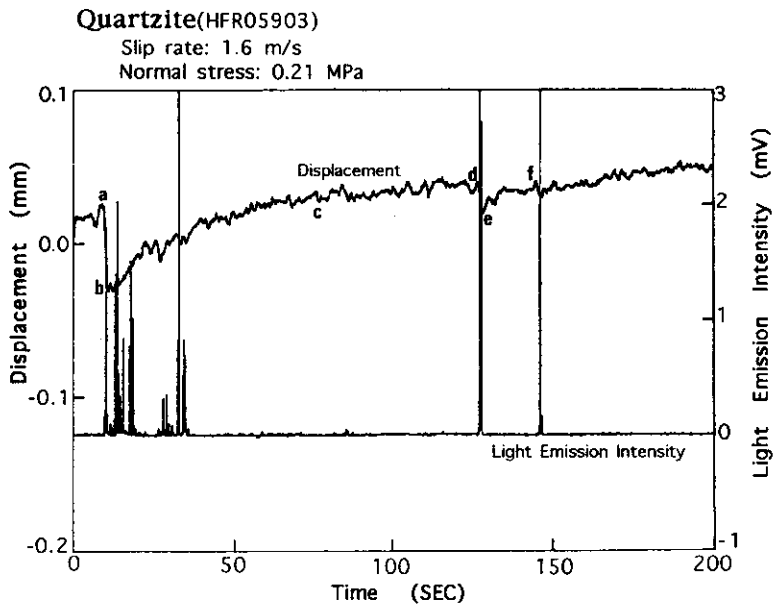


Fig. 3 The intensity of emitted light and the axial shortening of a specimen of quartzite, plotted against the elapsed time (normal stress = 0.21 MPa, slip rate = 1.6 m / s).

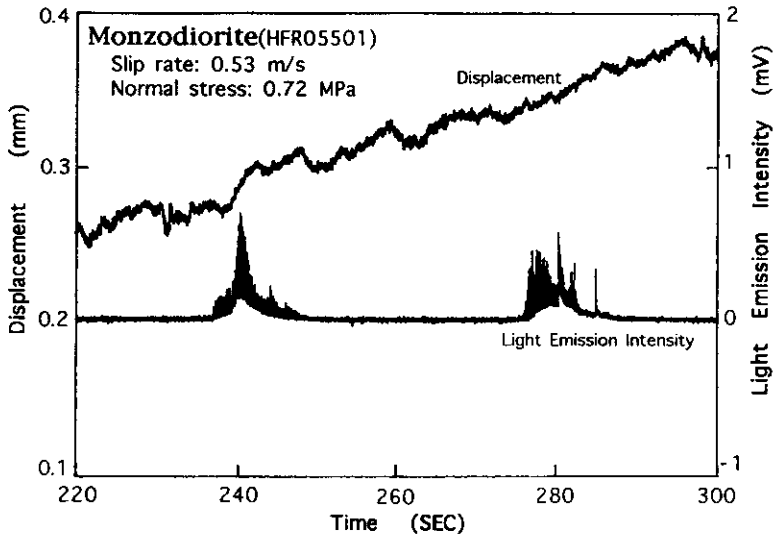


Fig. 4 The intensity of emitted light and the axial shortening of a specimen of monzodiorite, plotted against the elapsed time (normal stress = 0.72 MPa, slip rate = 0.53 m/s).

の関係も、a-b-cと発光の関係に似ているが、fの後の短時間の発光のように短縮速度の乱れの傾向が不明瞭な場合がみられる。また、実験条件が似ているにも関わらず、aからcに至る1サイクルに要する時間が花崗岩の場合よりも長いのも珪岩の特徴である。珪岩の場合には、発光が間欠的に起こる条件は花崗岩の場合よりも狭い。

Fig. 4はモンゾ閃緑岩についての実験結果を示したものである。モンゾ閃緑岩の場合には、発光そのものは間欠的に起こるものの、花崗岩・珪岩でみられたような、発光と試料の短縮速度の間の明瞭な関係は認められなかった。モンゾ閃緑岩の場合には、花崗岩・珪岩の場合よりもより大きい垂直応力を加えることができるので(Table 1)、比較的大きい垂直応力下で実験をおこなうことによって、容易に摩擦熔融を起こすことができる。

実験結果の考察

断層の高速運動時に岩石の強度が一軸圧縮強度よりも2桁以上も低下する要因としては、摩

擦発熱によって多数の熱クラックが発生したためとしか考えようがない(Table 1)。Bauer & Johnson (1979)は花崗岩のゆっくりした加熱(1.5℃/分以下の加熱速度)に伴う様々な物理的性質の変化を実験的に調べ、AEの計測・試料の観察などによって、変化のもっとも大きな要因が熱クラックにあると結論している。ブラジル引張破壊試験で決められた強度(Brazilian tensile strength)と温度の関係は非常に興味深いので、彼らの結果をFig. 5に示した。強度は温度が100℃を越えるあたりから徐々に低下し、強度の低下する割合は500~600℃で顕著に大きくなる。強度は、その後再び徐々に低下して、1,000℃を越えると室温下の強度の数十分の1にまで低下する。断層の高速摩擦試験における強度の低下はこれよりも著しいが、加熱速度の違いと摩擦試験では軸力の作用下で試料が摩擦熱によって加熱されること、などがこの違いの要因なのかも知れない。(なお余談だが、第二著者が大学院時代に摩擦実験おこなっていた頃、隣でBauerが上述の論文に報告された熱クラックの実験に汗を流していたのを思い出す。)

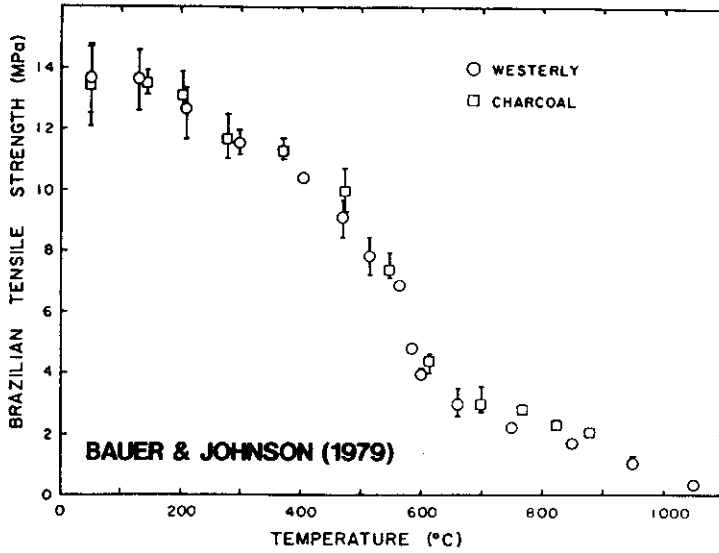


Fig. 5 Brazilian tensile strength versus maximum temperature raised during the experiments on thermal cracking (quoted from Bauer & Johnson, 1979). Vertical bar denotes the range of experimental results.

熱クラックは、鉱物間における熱膨張率の違いと鉱物の熱膨張の異方性などによって生じると考えられている (Bauer & Johnson, 1979; Bruner, 1979; Bauer & Handin, 1983; Fredrich & Wong, 1986; Wang et al., 1989; Carlson et al., 1990; Jansen et al., 1993. などを参照). つまり、大きく膨張する鉱物とかある方向に大きく膨張する鉱物があると、隣の鉱物との粒境界付近が歪んで、岩石が内部破壊をしてしまうのである。花崗岩類では、80°C前後の温度でクラックが形成・成長を始めることが示されている(上記論文)。クラックの形成は岩石中を流体が通りやすくするために、最近では、放射性廃棄物からでる熱が貯蔵庫周辺の岩石に与える影響とも関連して、熱クラックが調べられている。

Fig. 6 は鉱物の温度と体積膨張の関係を示しているが、石英は長石よりも2倍以上も大きな体積膨張を示し、とくに α - β 転移の手前の500°Cを越えたあたりから著しい熱膨張を示す。500~600°Cにおける急速な強度の低下(Fig. 5)は、主として石英のこの急激な体積膨張によるものであろう。この転移点を過ぎると石英は収

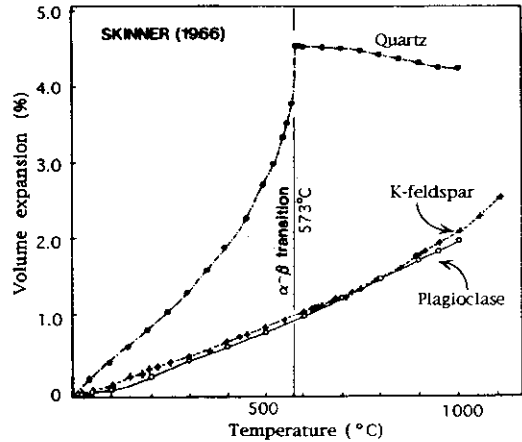


Fig. 6 Thermal expansion of quartz, plagioclase (An_{23}) and orthoclase at temperatures shown on the abscissa (data compiled by Skinner, 1966).

縮に転じており、強度の低下の割合も小さくなる。カリ長石と斜長石は、石英のような温度上昇に伴う著しい熱膨張率の変化を示さない。高速摩擦試験においても、石英を含む珪岩と花崗岩の方が、石英をほとんど含まないモンゾ閃緑岩よりも、摩擦加熱による強度の低下が著し

かった(Table 1). この違いも、温度上昇に伴う体積膨張の著しい石英が存在するかどうかによって生じるのであろう。

我々も、熱クラックの発生を直接観察するために、顕微鏡用加熱装置(ジャパンハイテック, TH-1500 MH)を用いて、偏光顕微鏡下で珪岩の予備的な加熱実験をおこなった。実験試料としては、高速剪断摩擦試験に用いたものと同じ珪岩を、直径5 mm 前後・厚さ2~3 mm のディスク状に加工し、ダイヤモンドペーストで研磨して用いた。この研磨片を平均1℃/sの速度で1500℃まで加熱し、その後温度を室温まで下降させた。加熱および冷却中に顕微鏡観察と写真撮影をおこない、顕微鏡に接続したビデオカメラでクラックの発達する様子を収録した。

Figs. 7 a, 7 bは、それぞれ、実験前および実験後の珪岩試料の反射顕微鏡写真である。実験後の試料にはクラックが多数形成されている様子が、一目瞭然である。熱クラックは、温度が200℃を越えるあたりから鏡下でもめだって形成されるようになるが、著しく発達するのは500~600℃の範囲であった。また、600℃以上および温度降下時には、クラックの形成はそれほど顕著ではなかった。2回の予備実験にすぎないが、これも温度上昇時に熱クラックが発生することを直接うらづける結果である。

さて、Figs. 2, 3の実験結果の解釈には一瞬戸惑わされる。とくに、それらの図のaからbの部分における試料の短縮量の逆戻り(つまり試料が長くなる現象)を、どう解釈するべきであろうか。我々は、断層破砕物の形成は、(1)熱クラックの発生、(2)強度の著しい低下と破砕物の形成、(3)断層面からの破砕物の落下の順に進行すると推察した。(1)と(2)は試料の体積膨張を伴うので、試料全体の長さは増えることになり、これが試料が短縮から伸張へ逆戻りすることに対応するのであろう(Figs. 2, 3のa-b)。その後、断層面にたまっていた破砕物は断層面から落下するので、この落下に伴って試料の短縮速度は増加することになる(Figs. 2, 3のb-c)。その前後で断層面の発光が終わっていることから、高温の破砕物が断層面から落下

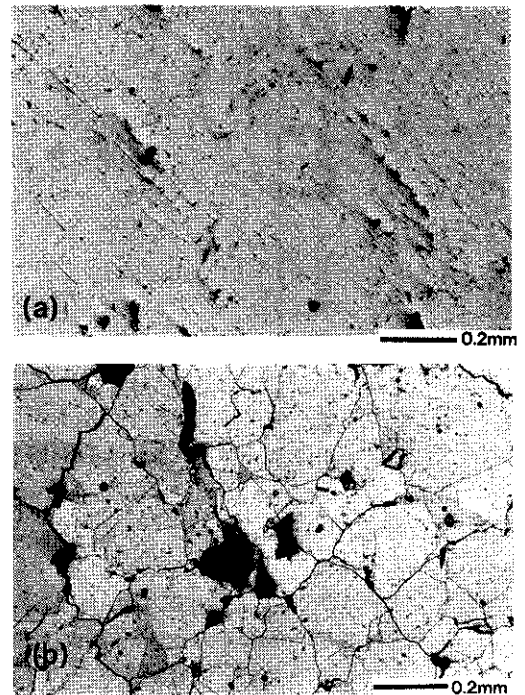


Fig. 7 Photomicrographs of polished quartzite under reflected light (a) before and (b) after the heating experiments for the in situ observation of thermal cracking. Fine striations in (a) are wear grooves due to the polishing of the specimen. Dark spots in (a) and (b) are depressions on the surfaces that do not reflect light. Likewise cracks can be seen as dark mosaics in (b). (a) and (b) are not the same specimens.

することによって熱を取り去り、断層近傍の温度が低下して、断層面の発光が終わったと解釈される。

我々の想定したプロセスを模式的に示したのがFig. 8である。断層の高速運動がさらに続くと、断層面近傍は再び加熱されてよく似たプロセスが繰り返すことになる。しかし、実際のプロセスはもっと複雑で、Fig. 2を詳細にみると、aからcにかけての一連の現象は小さな2回のサイクルの複合したものであるのが読み取れる。

Figs. 2, 3に見られるようなサイクルは、モンゾ閃緑岩では明瞭ではない(Fig. 4)。この岩石には石英がほとんど含まれていないので、

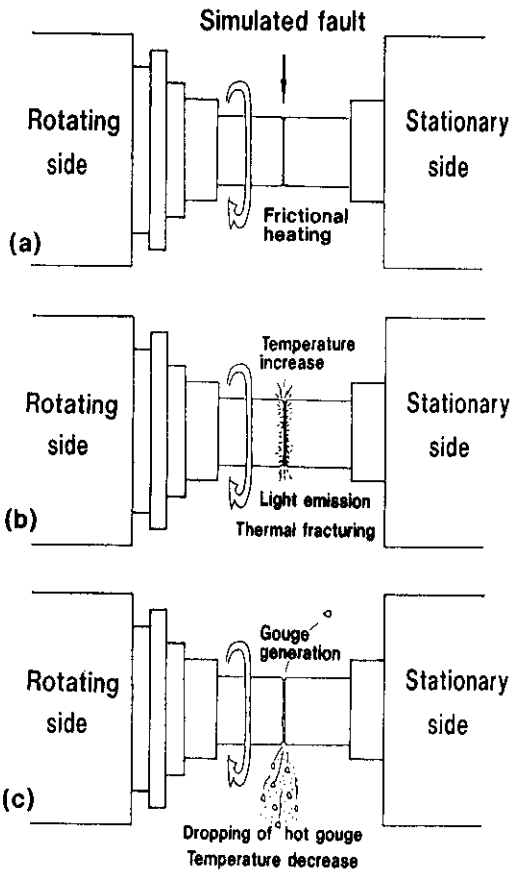


Fig. 8 A schematic diagram showing the frictional heating and thermal cracking [(a) to (b)], and the resulting enhanced production of fault gouge (c). The hot gouge that drops from the fault zone removes heat from the fault zone to lower the average temperature along the fault, and the entire processes repeat themselves.

熱クラックの効果が花崗岩・珪岩の場合ほど顕著ではないのであろう。断層面の加熱・熱クラックの発生・破砕物形成の促進の各現象が分離して起こるのは非常に限られた条件下であることを、もう一度強調しておきたい。花崗岩の場合でも、本研究で紹介したよりも少し垂直応力を上げて実験すると、全ての現象が急速に進みすぎて、我々の実験方法では、実際のプロセスをかいまみることにはできないのである。

断層面が発光するほど温度上昇がおこらない

条件下では、形成された破砕物(gouge)は少量で粒度も細かく、実験後の断層面はなめらかで条線が形成されている。それに対して、摩擦熱による発光がおこっている場合には、破砕物是不淘汰で量も多く、実験後の断層面は著しく凸凹に富んでいる。これらの観察結果も、摩擦熱による熱クラックの発生が母岩の内部に及んでおり、破砕物の形成を促進していることを示している。モンゾ閃緑岩を用いた実験でも、同様に不淘汰な破砕物が形成されており、熱クラックの重要性を示唆している。

まとめと今後の課題

まだ予備的段階であるが、本研究から次のような結論が得られた。

(1) 断層の高速運動に伴う摩擦熱によって断層周辺の母岩中に熱クラックが発生し、母岩の軸圧縮強度を2桁以上も低下させる。

(2) この強度低下は、石英を多量に含む珪岩と花崗岩で2~3桁に達しており、石英をごく少量しか含まないモンゾ閃緑岩でも2桁前後に及んでいる。石英が熱クラックの発生を促進するのは、石英の熱膨張率が大きいことと、 $\alpha-\beta$ 転移付近における著しい熱膨張に起因する可能性が高い。

(3) 断層の高速運動に伴う母岩の熱クラックが、断層破砕物の形成に大きな役割を果たしている。

自然界では断層クリープが極めてまれであることから、断層運動の大半は地震性であると考えねばなるまい。断層破砕物形成のプロセスは、断層帯の成長様式を規定する大きな要因である。今後、断層破砕帯の成長過程、つまり断層に沿う母岩の摩耗の過程を調べる研究(長濱・中村, 1994; 参照)では、熱クラックの影響を考慮に入れる必要がある。これまでの摩耗に関する実験では、熱クラックの効果が十分に組み込まれていないので、自然の断層に適用するには注意が必要である。今後は、例えば断層を定常的な温度状態に保って(堤・嶋本, 1994; 参照)、様々な温度下で摩耗のプロセスを調べ

る必要があろう。

断層が高速で大変位をする状況下で熱クラックの影響を調べる際に非常に難しいのは、「地下深部の圧力の影響をどう実験に組み込むか」という問題である。大気圧下では、上述のように熱クラックが2桁以上も一軸圧縮強度を低下させるが、高圧下ではクラックが閉じてしまい、熱クラックによる強度低下も減少することが、Bauer & Johnson (1979)の実験結果からも読み取れる。しかし、封圧が加わった状態で高速摩擦実験を精度よくおこなうことは技術的に非常に難しいので、地下深部における熱クラックの影響を実験的に調べるのは容易ではない。さらに、断層帯の内部または近傍では、地震時の衝撃によって瞬間的・局所的に圧力が解放される状況も生まれているのかもしれない。断層破碎帯の成長の研究においては、これらの問題を研究するための突破口が望まれる。

謝辞：ジャパンハイテック社には高温顕微鏡と加熱装置(TH-1500 MH)を使用させていただいた。また堤昭人氏には、実験において様々なご協力をいただいただけでなく、実験結果の数値処理用プログラムを使用させていただいた。ともに、心から感謝いたします。

文 献

- Bauer, S. J. and Johnson, B., 1979, Effects of slow uniform heating on the physical properties of the Westerly and Charcoal granites. *Proc. 20th U. S. Symp. Rock Mechanics, Univ. Texas, Austin*, 7-18.
- Bauer, S. J. and Handin, J. W., 1983, Thermal expansion and cracking of three confined, water-saturated igneous rocks to 800°C. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **16**, 181-198.
- Bruner, W. M., 1979, Crack growth and the thermoelastic behavior of rocks. *J. Geophys. Res.*, **84**, 5578-5590.
- Carlson, S. R., Wu, M., and Wang, H. F., 1990, Micromechanical modeling of thermal cracking in granite. *Geophys. Monogr., The Heard Volume, AGU*, **56**, 37-48.
- 地学団体研究会地学事典編集委員会, 1981, 地学事典, 増補改訂版, 岩石の主要な物性一覧表, 平凡社, 1278-1279.
- Fredrich, J. T. and Wong, T.-f., 1986, Micro-mechanics of thermally induced cracking in three crustal rocks. *J. Geophys. Res.*, **91**, 12,743-12,764.
- Handin, J. W., 1966, Strength and ductility. In: S. P. Clark, ed., *Handbook of physical constants*, *Geol. Soc. Am. Memoir*, **97**, 223-289.
- Jansen, D. P., Carlson, S. R., Young, R. P., and Huchins, D. A., 1993, Ultrasonic imaging and acoustic emission monitoring of thermally induced microcracks in Lac du Bonnet granite. *J. Geophys. Res.*, **98**, 22,231-22,243.
- 長濱裕幸・中村教博, 1994, 岩石摩耗の特性について(次元解析の応用), 本特集号.
- Scholz, C. H., 1990, *The Mechanics of earthquakes and faulting*, Cambridge University Press, 439 p.
- Skinner B. J., 1966, Thermal expansion. In: S. P. Clark, ed., *Handbook of physical constants*, *Geol. Soc. Am. Memoir*, **97**, 75-96.
- 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, 本特集号.
- 堤 昭人・嶋本利彦, 1994, 高速断層運動時に生成した岩石の摩擦熔融物の温度を測定する試み, 本特集号.
- Wang, H. F., Bonner, B. P., Carlson, S. R., Kowallis, B. J., and Heard, H. C., 1989, Thermal stress cracking in granite. *J. Geophys. Res.*, **94**, 1745-1758.
- 山口・西松, 1991, 岩石力学入門. 東京大学出版会, 第三版, 331 p.