

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 21 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340151

研究課題名(和文) 高速域における断層強度の変位速度依存性および温度依存性の物質科学的解明

研究課題名(英文) Materials-science aspects on the velocity and temperature dependence of fault strength at high slip velocities

研究代表者

金川 久一 (KANAGAWA, Kyuichi)

千葉大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40185898

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,600,000円、(間接経費) 4,680,000円

研究成果の概要(和文)：温度上昇に伴ってドレライトの摩擦強度が室温から400℃まで低下し、その後800℃まで増加し、1000℃まで再度低下するという変化が認められ、800℃までの摩擦強度は非晶質物質・鉄酸化物含有量とそれぞれ負・正の相関があり、1000℃では輝石の酸化分解反応生成物の粒状流動により摩擦強度が低下したことが判明した。

粉碎時間の異なるドレライト試料について広範な変位速度下で摩擦強度を調べた結果、低変位速度では粉碎時間の長い試料ほど摩擦強度が大きく、高変位速度では逆に粉碎時間の長い試料ほど摩擦強度が小さくなった。このような粉碎時間による摩擦強度の違いが、非晶質物質に吸着した水分量に起因することが判明した。

研究成果の概要(英文)：With increasing temperature, frictional strength of dolerite decreases up to 400 degrees C, then increases up to 800 degrees C, and decreases again up to 1000 degrees C. The frictional strength up to 800 degrees C has a negative correlation with the amount of amorphous phase, while it has a positive correlation with the amount of iron oxides. At 1000 degrees C, granular flow of oxidation reaction products derived from pyroxenes likely reduced the frictional strength.

We also conducted friction experiments on dolerite gouges ground for different periods of time at low to high slip velocities. Gouges ground for longer periods of time were stronger at slip velocities slower than 4 cm/s, whereas they were weaker at slip velocities faster than 4 cm/s. We revealed that such difference in frictional strength according to grinding time is attributed to the amount of water adsorbed in a morphous gouge.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地質学

キーワード：断層 摩擦強度 高温高速摩擦実験 変位速度依存性 温度依存性 物質解析

1. 研究開始当初の背景

1990年代半ば以後、高速摩擦試験機などを使用して地震発生時に匹敵する高変位速度 (\leq 数 m/s) における様々な岩石試料の摩擦実験が行われ、高速域 (≥ 1 cm/s) では断層が変位速度増加に伴って著しい強度低下を起こすことが明らかとなった (例えば Tsutsumi and Shimamoto, 1997, *GRL*)。その原因として、摩擦熔融により形成されたメルトによる潤滑 (Hirose and Shimamoto, 2005, *JGR*)、非晶質ゲルの生成 (Di Toro *et al.*, 2004, *Nature*)、構成鉱物の熱分解による極細粒状物質の生成 (Han *et al.*, 2007, *JGR*)、摩擦熱による間隙水圧上昇 (Wibberley and Shimamoto, 2005, *Nature*)、および微小アスペリティの瞬時発熱 (Rice, 2006, *JGR*) などが考えられているが、まだ解明には至っていない。そもそも高速断層運動では摩擦発熱によって断層面の温度も上昇するので、従来のような温度制御不能な実験では、断層強度の変化が変位速度の影響によるものなのか、温度上昇の影響によるものなのか、区別が困難であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、第一に高速域における断層強度の変位速度依存性と温度依存性を実験により別々に明らかにすること、第二にその変位速度依存性と温度依存性が何に起因しているのかを物質科学的に解明することである。

3. 研究の方法

本研究では、変位速度と温度の両方を制御できる高温高速摩擦試験機を使用して、温度一定で異なる変位速度の実験から断層強度の変位速度依存性を明らかにし、変位速度一定で異なる温度の実験から断層強度の温度依存性を明らかにする。また、実験後の試料の解析に基づいて、断層強度の変位速度依存性と温度依存性がそれぞれ何に起因しているのかを物質科学的に解明する。

4. 研究成果

(1) ドレイイトの摩擦強度の温度依存性

高温高速摩擦試験機を使用して、アイルランド産ドレイイト試料について、垂直応力 1 MPa、変位速度 1 cm/s の条件で、摩擦強度の温度依存性を調べた。その結果、定常摩擦係数 μ_{ss} は室温では 0.77 程度と大きいが、200°C および 400°C では 0.55 程度まで大きく低下し、400°C から 800°C までは 0.73 程度にまで増加し、800°C から 1000°C までは 0.52 程度まで再度大きく低下するという複雑な変化が認められた (図 1)。

落下したガウジの X 線回折分析から、室温から 800°C までの摩擦強度は非晶質物質含

有量と負の相関があり、また 400~800°C での温度上昇に伴う非晶質物質含有量の減少および摩擦強度の増加は、含鉄鉱物の酸化によって生じた磁鉄鉱・赤鉄鉱含有量の増加に対応していることが、明らかとなった (図 1)。室温から 200°C への温度上昇に伴う急激な摩擦強度の低下には、ガウジに吸着した水分の蒸発も関与していると考えられる。一方、800°C 以上での温度上昇に伴う摩擦強度低下については、1000°C の実験試料のすべり面付着物質の微細構造観察と結晶方位解析の結果、輝石の酸化分解反応生成物の断層面での粒状流動に起因していることが明らかとなった。

図 1 に示されるように摩擦強度の温度依存性は大きく、従って、従来観察されている変位速度増加に伴う摩擦強度の著しい低下に対しても、摩擦発熱による温度上昇の影響が大きく寄与していると考えられる。

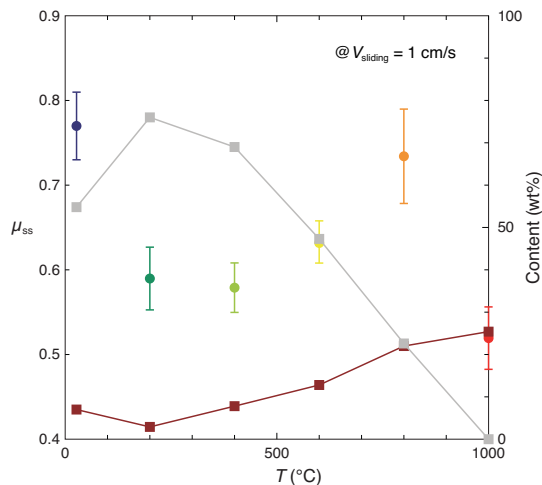


図 1. 変位速度 $V_{sliding} = 1$ cm/s におけるドレイイトの定常摩擦係数 μ_{ss} 、非晶質物質および (磁鉄鉱 + 赤鉄鉱) 含有量の温度依存性 (Noda *et al.*, 2011, *JGR*). ■: 定常摩擦係数の平均値と変動幅, —■: 非晶質物質含有量, —■: (磁鉄鉱 + 赤鉄鉱) 含有量。

(2) ドレイイト粉砕ガウジの摩擦強度の非晶質物質含有量・変位速度依存性

鉄乳鉢で粉砕しふるいにかけた、粒径 500 μm 以下のアイルランド産ドレイイト粉砕試料をさらに自動瑪瑙乳鉢で粉砕し、10 分間、6 時間、12 時間、以後 12 時間毎に 60 時間まで粉砕した。粉末 X 線回折分析の結果、粉砕時間 10 分間の試料には非晶質物質は含まれず、粉砕時間の増加に応じて非晶質物質含有量が約 40 wt% まで増加した (図 2)。また、6 時間以上粉砕した試料には、非晶質微粒子から成る球状粒子が多く含まれることが明らかとなった。この球状粒子は、火山豆石のように、非晶質微粒子が帯電と水分の吸着により凝着して形成されたものと考えられる。実際、熱重量分析により、粉砕時間が長く非晶質物質を多く含む試料ほど水分を多く含む (最大約 14 wt%) ことが明らかとなった (図 2)。

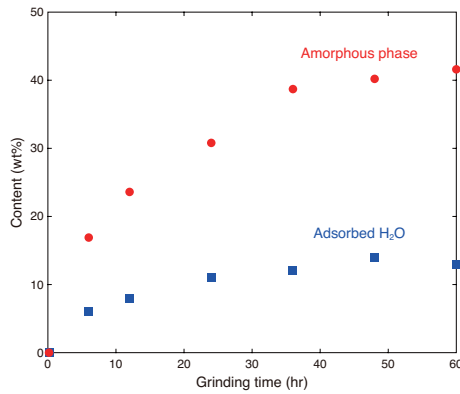


図 2. ドレライト試料の粉碎時間による非晶質物質含有量と吸着水分量の変化。

上記ドレライト粉碎試料を、直径 25 mm、長さ 20 mm の円柱状のはんれい岩ブロック対の間にガウジとして挟み、室温、垂直応力 2 MPa、変位速度 20 $\mu\text{m/s}$ ~ 1.3 m/s の範囲で回転剪断実験を行った。はんれい岩ブロックの一方の外周から内側約 5 mm の位置に熱電対を埋め込み、実験中のガウジ層の温度計測も行った。1.3 cm/s 以下の低変位速度ではガウジ層の温度は 78°C 以下、定常摩擦係数 μ_{ss} は 0.59~0.75 で、同一変位速度では粉碎時間の長い試料ほど μ_{ss} が大きくなる傾向が認められた (図 3)。変位速度 4 cm/s ではすべり面の温度が 100°C 以上に達し、 μ_{ss} は 0.60~0.66 で、粉碎時間による有意な差が認められなくなった (図 3)。変位速度 13 cm/s 以上ではすべり面の温度が 180°C 以上に達し、変位速度の増加に伴って μ_{ss} が大きく低下し、同一変位速度では粉碎時間の長い試料ほど温度が低く μ_{ss} が小さくなる傾向が認められた (図 3)。

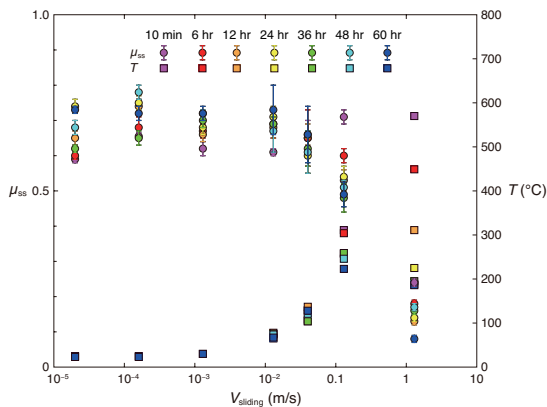


図 3. ドレライト粉碎ガウジの定常摩擦係数 μ_{ss} とガウジ層温度 T の変位速度 $V_{sliding}$ による変化。

このような粉碎時間によるドレライト粉碎ガウジの摩擦強度の違いは、非晶質ガウジに吸着した水分量の差に起因すると考えられる。1.3 cm/s 以下の低変位速度では、すべり面の温度が 100°C 未満のため非晶質ガウジに吸着した水分が保持され、水分を多く吸着した粉碎時間の長い試料ほど非晶質粒子間の毛管凝縮によって凝着力が高まり、摩擦

強度が大きくなったと考えられる。一方、変位速度 4 cm/s では、摩擦発熱によりすべり面の温度が 100°C 以上に達し、非晶質ガウジが脱水して非晶質ガウジ粒子間の凝着が失われたため、粉碎時間による摩擦強度の違いが小さくなったと考えられる。さらに、13 cm/s 以上の高変位速度では、水分を多く吸着していた粉碎時間の長い試料ほど非晶質ガウジからの脱水による水蒸気発生量が多いため、潜熱によって温度上昇が抑制され、温度が低くなったと考えられる。また、水蒸気の発生速度がそのリーク速度より大きくなって、水蒸気がガウジ層内に保持されたため間隙圧が上昇し、その結果、水分を多く吸着していた粉碎時間の長い試料ほど間隙圧が大きく上昇して、定常摩擦強度が小さくなったと考えられる。実際、粉碎時間 10 分間、12 時間および 60 時間の試料について、はんれい岩ブロック対の一方を多孔質砂岩に置き換えて変位速度 13 cm/s で実験を行ったところ、定常摩擦強度に粉碎時間による差が認められなくなった (図 4)。多孔質砂岩を通じて水蒸気がリークして、間隙圧の上昇が起こらなかったためと考えられる。

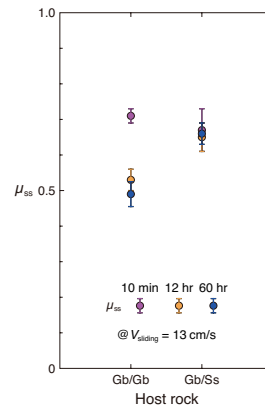


図 4. 粉碎時間 10 分間、12 時間および 60 時間のドレライト粉碎ガウジを、はんれい岩ブロック対に挟んだ場合 (Gb/Gb) とはんれい岩ブロックと多孔質砂岩ブロックに挟んだ場合 (Gb/Ss) の、変位速度 $V_{sliding} = 13 \text{ cm/s}$ における定常摩擦係数 μ_{ss} 。前者の場合は粉碎時間が長いほど μ_{ss} が小さいが、後者の場合は μ_{ss} に粉碎時間による有意な差が認められない。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Noda, H., Kanagawa, K., Hirose, T. and Inoue, A. (2011) Frictional experiments of dolerite at intermediate slip rates with controlled temperature: Rate-weakening or temperature-weakening? *Journal of Geophysical Research* (査読有), **116**, B07306, doi:10.1029/2010JB007945.

[学会発表] (計 8 件)

- ① 和田純一・金川久一・大橋聖和・井上厚行・

高橋美紀・北島弘子・安東淳一・廣瀬丈洋
(2014) ドレライト粉砕ガウジの低～高速
摩擦特性. 日本地球惑星科学連合 2014 年
大会, SSS32-05, 2014 年 5 月 1 日, パシフ
ィコ横浜会議センター.

②田中伸明・和田純一・金川久一 (2014) 窒
素雰囲気下におけるドレライトの摩擦強
度の温度変化と摩耗物質中の非晶質物質
含有量との関係. 日本地球惑星科学連合
2014 年大会, SSS32-P06, 2014 年 5 月 1 日,
パシフィコ横浜会議センター.

③田中伸明・和田純一・金川久一 (2013) 窒
素雰囲気下におけるドレライトの摩擦強
度の温度依存性. 日本地質学会第 120 年
学術大会, R13-P-2, 2013 年 9 月 16 日, 東
北大学川内北キャンパス.

④和田純一・金川久一・大橋聖和・高橋美紀・
北島弘子・井上厚行・廣瀬丈洋・安東淳一
(2013) ドレライト粉砕ガウジの吸水と低
～高速摩擦特性に対する影響. 日本地質
学会第 120 年学術大会, R13-P-3, 2013 年 9
月 16 日, 東北大学川内北キャンパス.

⑤和田純一・野田博之・岡崎啓史・大橋聖和・
北島弘子・高橋美紀・金川久一 (2013) ド
レライト粉砕ガウジの低～高速摩擦特性.
日本地球惑星科学連合 2013 年大会,
SSS29-10, 2013 年 5 月 24 日, 幕張メッセ
国際会議場.

⑥和田純一・野田博之・岡崎啓史・安東淳一・
金川久一・井上厚行・廣瀬丈洋・片山郁夫
(2012) ドレライトガウジの非晶質化と摩
擦特性に対する影響. 日本地質学会第
119 年学術大会, R12-P-2, 2012 年 9 月 17
日, 大阪府立大学.

⑦和田純一・金川久一・中谷正生・望月裕峰・
廣瀬丈洋・安東淳一・古川 登・井上厚行
(2012) 粉砕によるドレライトの非晶質化
とその摩擦特性に対する影響. 日本地球
惑星科学連合 2012 年大会, SSS29-P21,
2012 年 5 月 22 日, 幕張メッセ国際会議場.

⑧Wada, J., Kanagawa, K., Nakatani, M.,
Mochizuki, H., Hirose, T., Ando, J.,
Furukawa, N. and Inoue, A. (2012)
Amorphization of dolerite gouges and its
effects on their frictional properties.
*International Conference on a New
Perspective of Great Earthquakes along
Subduction Zones*, Poster #109, 2012 年 2
月 28~29 日, 高知市文化プラザかるぼー
と.

6. 研究組織

(1)研究代表者

金川 久一 (KANAGAWA, Kyuichi)
千葉大学大学院理学研究科・教授
研究者番号：40185898

(2)研究分担者

(3)連携研究者

廣瀬 丈洋 (HIROSE, Takehiro)
海洋研究開発機構高知コア研究所・主任研
究員
研究者番号：40470124

井上 厚行 (INOUE, Atsuyuki)
千葉大学大学院理学研究科・教授
研究者番号：30150270