

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 科学研究費助成事業

## 研究成果報告書



平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287124

研究課題名(和文)炭質物ラマンスペクトルを用いた断層における摩擦発熱温度指標の構築

研究課題名(英文)Detection of frictional heating on faults using Raman spectra of carbonaceous material

研究代表者

氏家 恒太郎(UJIE, Kohtaro)

筑波大学・生命環境系・准教授

研究者番号：40359188

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,200,000円

研究成果の概要(和文)：高速すべりを記録したシュードタキライト及び断層ガウジに含まれる炭質物のラマン分光分析を実施し、炭質物のラマンスペクトルが断層における摩擦発熱の指標となり得ることを実証した。また、この摩擦発熱指標は、断層がその後変質作用を受けても維持されることから、極めて有効であることを示した。更にラマンデータを基に、地震時の断層における剪断強度を見積もる手法を開発することに成功した。これらの研究成果をインパクトファクターの高い査読付き国際学術誌に発表した。

研究成果の概要(英文)：The Raman spectra of carbonaceous material in natural and experimental pseudotachylytes and fault gouges were analyzed to detect increased heating on faults. The results indicate that the Raman spectra can successfully detect increased carbonization associated with frictional heating. This increased carbonization can occur in ~4-16 s and is preserved even after alteration of fault materials. The comparison between experiment and Raman data demonstrated that there is a correlation between the average shear stress and the Raman spectra. Using the correlation, the average coseismic shear stress was estimated. Raman analysis of carbonaceous material-bearing faults will be useful for estimation of coseismic fault strength.

研究分野：地質学

キーワード：摩擦発熱 断層強度 炭質物 ラマンスペクトル シュードタキライト 断層ガウジ

## 1. 研究開始当初の背景

断層における摩擦発熱温度指標の構築は、地震性すべりの地質学的証拠を見出し、地震時の断層挙動評価を行う上で極めて重要である。近年、石炭の一種で、陸上植物由来であるピトリナイトの反射率増加が、断層における摩擦発熱の指標になりうるとして注目された。しかし、数値モデリングやピトリナイトと断層物質の混合試料を用いた高速摩擦実験により、短時間急速加熱のみの効果ではピトリナイト反射率は増加しないことが明らかとなった。つまり、ピトリナイト反射率増加を断層における摩擦発熱指標として扱うには問題が多く、また地震時の摩擦発熱による到達温度も見積もられていない。更に、ピトリナイトは陸上植物由来であるため、断層物質が陸源性碎屑物起源である必要があり、汎用性・適用性に欠ける。ピトリナイト反射率に代わる新たな摩擦発熱温度指標の構築が必要である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、炭質物ラマンスペクトルを用いて断層における摩擦発熱温度指標を新たに構築することにある。これにより、断層から地震時の摩擦発熱による温度異常を見出し、剪断強度を見積もることで、断層挙動評価につなげる。

## 3. 研究の方法

本研究の手法は、(1) 摩擦実験、(2) ジュラ紀付加体中の断層岩分析、(3) 四万十付加体中のシュードタキライト解析に大別される。

### (1) 摩擦実験

炭質物と粘土質断層ガウジの混合試料を用いた摩擦実験を低速～高速、無水・含水条件下で行い、あわせて温度計測・解析を実施した。その後、回収した試料を用いて炭質物のラマン分光分析を実施し、摩擦発熱により炭質物ラマンスペクトルが変化する条件を検討した。

### (2) ジュラ紀付加体中の断層岩分析

炭質物を多く含むジュラ紀付加体中のカタクレサイトとシュードタキライトを対象に炭質物のラマン分光分析を実施し、熱物性測定と熱モデリング計算を組み合わせることで、炭質物ラマンスペクトルが変化する温度を検討した。

### (3) 四万十付加体中のシュードタキライト解析

四万十付加体中に発達するシュードタキライト及び高速摩擦実験で形成されたシュードタキライトを用いて炭質物のラマン分光分析を実施し、摩擦発熱や平均剪断応力増加に伴う炭質物ラマンスペクトル変化を検討した。

## 4. 研究成果

炭質物のラマン分光分析を行い、得られた

D1 ラマンバンドと D2 ラマンバンドの強度比、面積比、ピーク位置、半値幅を検討した。その結果、強度比が炭質物の熟成度変化を表すのに最も適していることが判明した。以下は、強度比に基づいた結果である。

### (1) 摩擦実験

0.15 mm/s の低速すべりや 1.3 m/s の高速すべりでも含水条件下では強度比に明瞭な変化は認められなかった。しかし、無水条件下の高速すべりでは強度比の顕著な増加が認められた (図 1)。

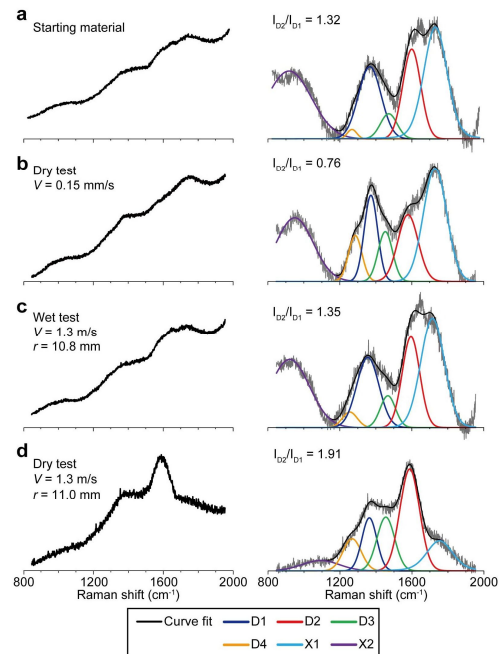


図 1 摩擦実験前後での炭質物のラマンスペクトル変化。(a)出発物質。(b)低速すべり。(c)含水条件高速すべり。(d)無水条件高速すべり。(d)においてのみラマン強度比が増加し、炭質物の熟成度が増加する。

実験データに基づいて算出した power density (温度上昇率に比例) 及び温度計測・解析結果から、高速すべり時の power density が 0.52 MW/m<sup>2</sup> 以上で、摩擦発熱温度が 500 を越えると、強度比は明瞭に変化し、炭質物の熟成度が増加することが明らかとなった。これにより、炭質物ラマンスペクトルは、断層における摩擦発熱検出に有効で、その際の検出可能条件を到達温度と power density を用いて定量的に評価することに成功した。

### (2) 断層岩分析

ジュラ紀付加体中の断層岩を対象にラマン分光分析を行った。その結果、母岩と比較して、カタクレサイトの強度比は変化しないのに対し、シュードタキライトとその近傍 2 ミリの母岩では強度比が明瞭に増加することが明らかとなった (図 2)。このことは、幅 10 センチに渡り分散化した変形を示すカタクレサイトの温度上昇率が低いのに対

し、幅数ミリに渡って局所化した変形を示すシュードタキライトの温度上昇率が高いと予想されることが調和的である。また、熱物性測定と熱モデリング計算により、シュードタキライト近傍2ミリで強度比が明瞭に増するのは、母岩であるチャートの高い熱拡散率により500以上の急速加熱を被ったことが原因であることが明らかとなった。これにより、天然の断層からも炭質物ラマンスペクトルは断層における摩発熱検出に有効であることが実証され、その際の到達温度が見積もれることが明らかとなった。

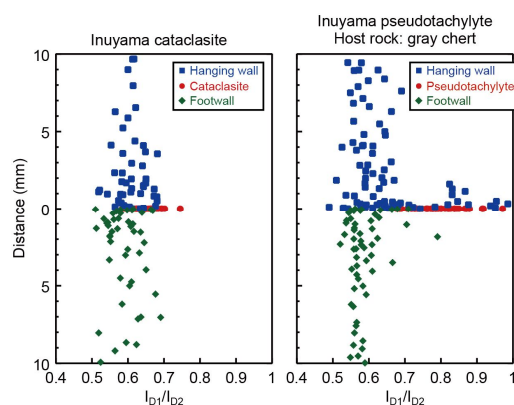


図2 犬山地域ジュラ紀付加体中に発達するカタクレサイト（左）とシュードタキライト（右）のラマン強度比。

### (3) シュードタキライト解析

四万十付加体中に発達するシュードタキライト及び高速摩擦実験で形成されたシュードタキライトを対象にラマン分光分析を行った。その結果、どちらも母岩に比べ強度比が明瞭に増加し、炭質物の熟成度が増加することが明らかとなった(図3、4)。また、この炭質物の熟成度増加は、4-16秒と極めて短時間のうちに起こり、シュードタキライトマトリックスが脱ガラス化・粘土化した後も維持されることが分かった。

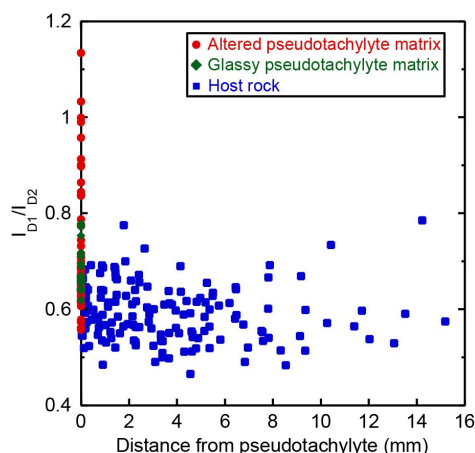


図3 四万十付加体中に発達するシュードタキライトのラマン強度比。

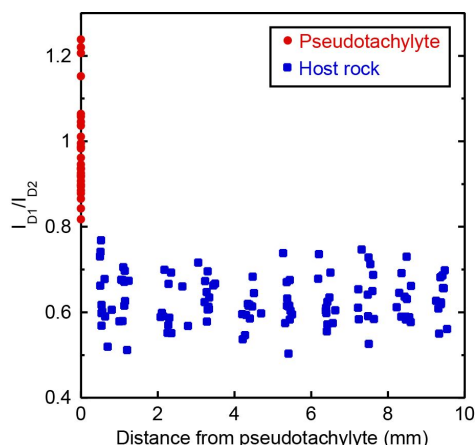


図4 高速摩擦実験で形成されたシュードタキライトのラマン強度比。

更に、高速摩擦実験データとラマンデータの比較を行い、強度比の標準偏差と平均剪断応力の間に負の非常に良い相関(相関係数1.0)があることを見出した(図5)。これは、平均剪断応力の増加に伴って温度上昇率が増加すると、断層における炭質物の熟成度により均質になることを示唆する。この相関関係を用いて、四万十付加体中に発達するシュードタキライトの炭質物ラマンデータから地震時の平均剪断応力を見積もったところ、1.8 MPa という値が得られた。このシュードタキライトは深度4-6 kmで形成されたことが分かっているので、静水圧条件を仮定すると地震時の摩擦係数は0.03-0.05となる。このことは地震時に断層で熔融潤滑(melt lubrication)が起こったことを示しており、別の手法により見出された先行研究結果とも調和的である。このことから、炭質物ラマンスペクトルは地震時の剪断強度見積もりに有効であることが示された。

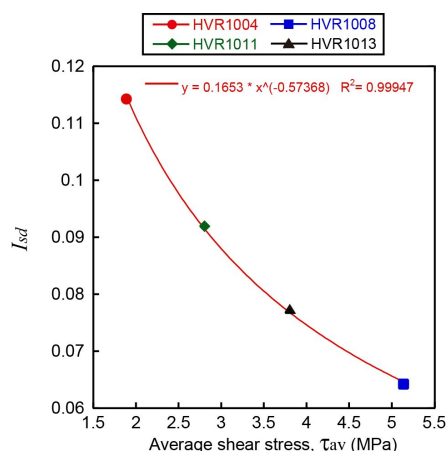


図5 ラマン強度比の標準偏差と高速摩擦実験データから求めた平均剪断応力の関係。

## 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12件)

- (1) \*Ito, K., K. Ujiie, and H. Kagi (2017), Detection of increased heating and estimation of coseismic shear stress from Raman spectra of carbonaceous material in pseudotachylyte, *Geophysical Research Letters* 44, 1749-1757, doi:10.1002/2016GL072457. 査読有 \*研究代表者が指導する学生(研究協力者)
- (2) Ujiie, K., T. Inoue, and J. Ishiwata (2016), High-velocity frictional strength across the Tohoku-Oki megathrust determined from surface drilling torque, *Geophysical Research Letters* 43, 2488-2493, doi:10.1002/2016GL067671.
- (3) \*Furuichi, H., K. Ujiie, Y. Kouketsu, T. Saito, A. Tsutsumi, and S. Wallis (2015), Vitrinite reflectance and Raman spectra of carbonaceous material as indicators of frictional heating on faults, *Earth and Planetary Science Letters* 424, 191-200, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2015.05.037>. 査読有 \*研究代表者が指導する学生(研究協力者)

### 〔学会発表〕(計20件)

- (1) \*伊東 慶祐、\*田畑 皓輝、氏家 恒太郎、鍵 裕之、シュードタキライトにおける炭質物のラマンスペクトル、日本地質学会第123年学術大会、2016年9月12日、日本大学文理学部キャンパス(東京都世田谷区)\*研究代表者が指導する学生(研究協力者)
- (2) 氏家 恒太郎、\*田畑 皓輝、瀬瀬 佑衣、鍵 裕之、林 為人、炭質物のラマンスペクトルを用いた断層における摩擦発熱検出、Japan Geoscience Union Meeting 2016、2016年5月26日、幕張メッセ(千葉県千葉市)\*研究代表者が指導する学生(研究協力者)
- (3) \*古市 裕之、氏家 恒太郎、瀬瀬 佑衣、斎藤 翼、堤 昭人、ウォリス サイモン、炭質物を用いた断層における摩擦発熱指標の構築、Japan Geoscience Union Meeting 2015、2015年5月24日、幕張メッセ(千葉県千葉市)\*研究代表者が指導する学生(研究協力者)

### 〔図書〕(計1件)

- (1) 日本地質学会「海洋底科学の基礎」編集

委員会、共立出版、海洋底科学の基礎、2016年、389ページ(179-187, 344-347)

## 〔その他〕

ホームページ等

[http://www.geol.tsukuba.ac.jp/~kohtaro/Kohtaro\\_Ujiie/Home.html](http://www.geol.tsukuba.ac.jp/~kohtaro/Kohtaro_Ujiie/Home.html)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

氏家 恒太郎(UJIE, KOHTARO)  
筑波大学・生命環境系・准教授  
研究者番号: 40359188

### (2)研究分担者

堤 昭人(TSUTSUMI, AKITO)  
京都大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号: 90324607

### (3)研究協力者

伊東 慶祐(ITO, KEISUKE)  
筑波大学・生命環境科学研究科・修士1年

田畑 皓輝(TABATA, HIROKI)  
筑波大学・生命環境科学研究科・修了

古市 裕之(FURUICHI, HIROYUKI)  
筑波大学・生命環境科学研究科・修了