

ジルコンフィッション・トラック法による岩石高速摩擦実験発熱量検出の試み
山田隆二*

Quantification of heat generation under high-speed friction
in rotary-shear using zircon fission-track method

Ryuji Yamada*

* 防災科学技術研究所, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

はじめに

地質断層露頭におけるシュードタキライトの存在などによって、鉱物を溶融するほどの断層摩擦熱が発せられることが明らかになった。放射年代測定法を利用して、この発熱現象による二次的加熱やりセットのタイミングを捉える事ができれば、断層の活動時期を同定する事が可能である。さらに、断層内部における発熱の空間分布が明らかになれば、総発熱量やその様式などを明らかにすることも可能である。

ジルコンフィッション・トラック (FT) 法は、以下の理由によりこのような目的に適している。(1) ジルコンは比較的硬い鉱物であるため断層破砕帯での力学的破壊に強い。(2) ジルコンは化学的に安定で高温流体などによる変質・風化に耐性がある。(3) 放射年代測定法の中ではFT法は閉鎖温度が低く温度変化を検出しやすい。(4) FTアニーリング特性は被熱温度・時間にのみ依存し、化学的環境、圧力などの影響を受けない。

筆者らは岩石高速剪断摩擦試験機を利用して、ジルコン粒子を挟んだ模擬断層を用いて様々な条件下で摩擦実験を行い、ジルコンFT法による発熱量の推定を試みている。この稿では、この実験に適した条件や手順の確認を目的としてジルコンサンドを用いて行った予備実験に関して報告する。

実験

ジルコン試料としては、安価に入手できるジルコンサンドを用いた。粒径約500 μm 、産地不明、砕屑性で自形結晶は少なく包有物も多く含む。平均的な自発FT密度は107 cm^{-2} 以上であり、良質な試料とは言いがたいものの、包有物が少ない透明な粒子を選べば一定の割合でFT長分析が可能である。天然条件での非加熱が保証されておらず、どのような熱史を経験したのかが

不明であるため、解析結果から被熱量を定量化することはできない。また、ジルコンの標準試料や通常の未知試料と極端に熱的特性が異なっている可能性がある。これについては、1000 $^{\circ}\text{C}$ 、1時間加熱によってジルコンサンド中のFTは全て消失

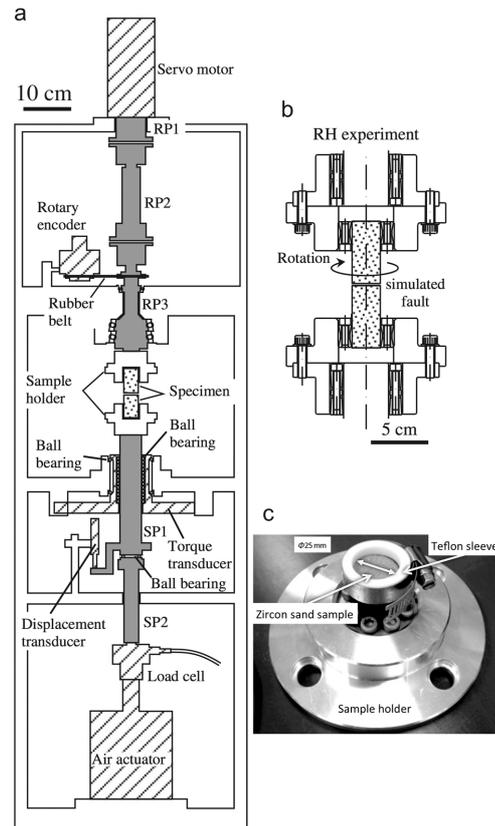


図1 (a)高速摩擦試験機の断面図。空圧式アクチュエーターを使って図中の上下方向に垂直応力をかけ、地殻内応力場を再現する。(b) サンプル保持部の拡大図。上下に設置された直径25 mmの円筒形岩石コアの間に模擬断層面が形成される。今回はこの部分にジルコンサンドを入れた。下部のコアは装置に固定され、上側のコアのみがサーボモーターによって回転する。(c) 模擬断層面中に入れられたジルコンサンド。高速摩擦実験中に上下のコアの間から試料が飛び出さないようにテフロンスリーブが取り付けられている。

表1 高速摩擦実験条件と試料分画箇所.

共通摩擦実験条件 静岩圧 3 MPa	摩擦時間 (概数, s)	すべり量 (概数, m)	分画 箇所
#1 ジルコン粒子 1g 60 rpm, 52 rev.	52	2.7	下外
			下中
			下内
#2 ジルコン粒子 1g 300 rpm, 278 rev.	56	14.3	下外
			下内
#3 ジルコン粒子 1g 1500 rpm, 305 rev.	12	15.3	下外
			下中
			下内
#4 ジルコン粒子 1g + ジルコンパウダー2g 300 rpm, 329 rev.	67	17.2	下外
			下中
			下内
			上外
			上中
			上内

した事を確認した.

上下に配した高速摩擦実験試供体（直径25mmのガブロコア）中にジルコン粒子を挟み、直接岩石摩擦環境下に曝す（図1；Mizoguchi and Fukuyama (2010; Fig. 2)を一部修正）. 高速回転によって上下のコアの間から試料が飛び出さないようにテフロンスリーブを取り付けた. 高速摩擦試験は4回行った. いずれの回も断層ガウジなどの天然断層物質は挟んでいない. 表1に高速摩擦実験条件と試料分画箇所を示す. すべり量はMizoguchi and Fukuyama (2010) におけるequivalent slip rateから算出した. これは、コア半径の約1/3の箇所の円周における変位量に相当する. 図2に、摩擦実験時の摩擦速度、摩擦係数、垂直変位量の試験機による実測値を示す. 各回とも上下コアの間に約1 gのジルコンサンドを挟んだ. 高速回転をさせる前に、上下コア間のすき間を減じるために空擦りを行う. 空擦り後の厚

みは約1mmとなった. 4回目の実験では、ジルコン粒子の他に、遊星ボールミルによってジルコン粒子を粉砕して製作したパウダー（中央粒径約10 μ m）を約2g入れ、空擦り後の厚みは約3mmとなった.

高速摩擦実験後、コアからテフロンスリーブを外し、摩擦発熱を被った試料を分画採取する（図3）. 各分画試料の微粉末を取り除いたのち、通常のFT長分析（例えばMurakami et al. 2006）と同様にハンドピック、マウント、研磨を行ったのち、アルカリエッチング（KOH + NaOH, 252 $^{\circ}$ C, 5時間）を行い、horizontal confined trackを対象にFT長分析を行った.

この実験における観点の一つは、実際的高速岩石摩擦実験によってジルコンFTはリセットするかどうかを見ることである. さらに、リセットするような高温を発生する激しい摩擦条件下でジルコン粒子は生き残るのかを確認する. もう一つの観点は、摩擦試料中の空間温度分布を知ることである. 用いた摩擦試験機の構造上の特性として、最大主応力軸方向が重力場と同じであり、また回転により変位を達成しているため、回転半径によって実際の変位量が異なる. そのため、摩擦試験体内での発熱・被熱には不均質性があることが考えられる. 従来は放射温度計や岩石試料に埋め込んだ熱電対等により間接的に計測していたが、この実験では、サンプルを分画採取し、上盤/下盤、動径方向の差違を見る事によって、断層面内部の鉱物から直接被熱量と空間分布を見積もることを試みる.

結果と議論

表2に非加熱のジルコンサンドと高速摩擦試験試料のFT長測定の結果を示した. 左側のTOTAL STATISTICS欄には各分画の中で測定されたFTの

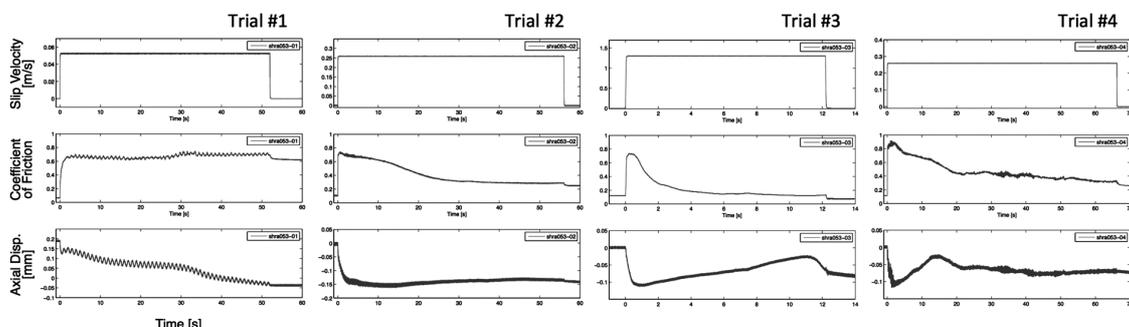
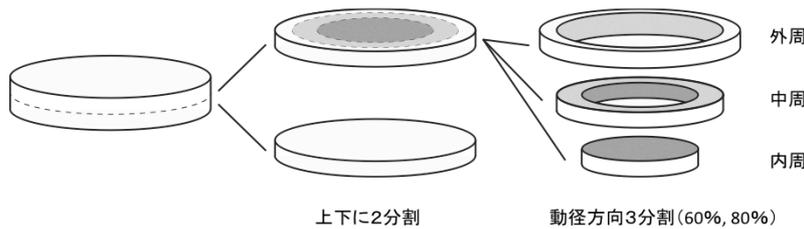


図2 高速摩擦試験条件の実測値. 各実験とも上段から摩擦速度、摩擦係数、垂直変位量の経時変化を示す. 摩擦速度は動径方向で中心から半径の約1/3位置での速度に該当する（本文参照）. 実験番号はそれぞれ表1に示した番号に対応する.

高速摩擦実験後



試料の分画採取



拡大写真の例

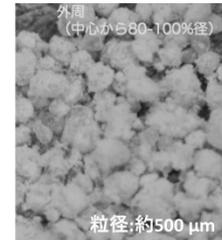


図3 摩擦試験後の試料の採取と分画法。試験後、テフロンスリーブを丁寧にずらし上下のコアに分ける。上下各コアから分画後の体積がほぼ等しくなるように動径方向に内周、中周、外周の3部分に分けてそれぞれ採取し、薬包紙に入れて保管する。実験後のジルコン粒子にはジルコンが粉碎されたと思われる微粒子が付着している。ジルコンサンドの粒径は約500 μm 。

数、平均長、標準偏差 (2σ)、最小値、最大値を示し、図4に各分画の平均長をプロットした。エッチング後のジルコンサンドには、極端に表面トラック密度が低いものも見られたが、もともと非加熱試料においてもトラック密度のばらつきが大きいので、加熱によるものかどうかは判断できない。

非加熱試料のFT長は、平均10.4 μm と標準的な試料 (例えば仁左平デバイス = 11.05 μm ; Murakami et al., 2006) と比較するとやや短いものの、二次的加熱の影響は強くないと考えられる。各分画の平均長をプロット上で比較すると、全体として、非加熱試料の平均長と 2σ の誤差内では一致しており、特に強い加熱の影響は見られない。しかし、各分画における最短長を比較すると、実験#2を除き、非加熱試料に対して大きく短くなっている試料が見られる。一方これらの分画の最大長はどれも非加熱試料と同等であり、二次的加熱の影響を受けてFT長のばらつきが大きくなっていると見て取れる。ジルコンサンドの粒子の質は一般的に悪いため、適度な自発FT密度を持ち分析に適した数少ない粒子からのFT長測定数が多くなる傾向が見られた。そこで、表2右側のSINGLE GRAIN欄には同一粒子からのFT長測定値の平均値を求め、その最小値と

最大値を示した。単一粒子あたりのFT長測定数は数本であり、統計的な意味合いが小さいため表に標準偏差値を掲載するのを省略したが、FT長が短い試料は総じてばらつきが小さかった。単粒子あたりの最短長を比較すると、ほとんどの分画において非加熱試料と同等あるいは短くなっており、二次的加熱の影響を示唆する。例外なのは#2下外の分画であり、最短長が非加熱試料より長い。これについては、例えば他よりも強い加熱を受けた結果、短縮ではなく消失してしまったなどの解釈も可能ではあるが、測定数が7本と他分画に比べて少ないため、ここではその原因について言及しない。

FT長と分画箇所 (コアの上下、内・外周) との統計的な相関は今回の分析結果からは得られなかった (表2)。同様に、高速摩擦試験条件による相関も不明瞭である。これは、元となる非加熱試料のFT長分布に大きな広がりがあり、またFT長の測定数が結晶の質が悪いため多くなかったことが要因である。ジルコンサンドを用いた故の分析・検出の限界であるが、それでも今回の実験結果からは次の3点が指摘できる。

(1) 分画の中でのFT長のばらつきが大きくなった可能性がある。これはおそらく、短縮した粒子としなかった粒子が存在するためである。

表2 FT長分析結果. TOTAL STATISTICS欄は各分画の中で測定されたFTの数, 平均長, 標準偏差 (2σ), 最小値, 最大値を示す. SINGLE GRAIN欄は各分画の中で粒子平均長 (粒子ごとに算出した平均長) の最小値, 最大値を示す.

共通摩擦実験条件 静岩圧 3 MPa	分画箇所	TOTAL STATISTICS					SINGLE GRAIN	
		No. of tracks	Mean (μm)	2σ (μm)	Min. (μm)	Max. (μm)	Min. (μm)	Max. (μm)
-	非加熱	25	10.36	1.58	9.09	12.34	9.09	11.55
#1 ジルコン粒子 1g 60 rpm, 52 rev.	下外	13	9.76	3.44	4.39	11.27	6.79	11.18
	下中	20	10.29	3.05	4.39	11.78	8.88	11.22
	下内	15	10.44	1.93	7.83	11.71	8.20	11.19
#2 ジルコン粒子 1g 300 rpm, 278 rev.	下外	7	10.81	0.59	10.34	11.27	10.76	10.87
	下内	10	10.48	1.54	9.18	11.48	9.43	11.34
#3 ジルコン粒子 1g 1500 rpm, 305 rev.	下外	24	9.23	3.29	5.74	11.52	8.57	11.36
	下中	29	9.58	2.92	6.72	11.91	8.18	10.49
	下内	25	9.61	2.80	6.48	11.98	8.46	10.88
#4 ジルコン粒子 1g + ジルコンパウダー2g 300 rpm, 329 rev.	下外	15	10.46	2.16	7.78	12.15	8.93	10.80
	下中	47	9.38	2.56	6.34	11.99	8.26	11.05
	下内	51	10.67	1.59	8.52	12.28	9.03	11.61
	上外	11	10.19	1.70	8.61	11.22	8.61	10.83
	上中	50	9.83	1.93	7.40	11.90	8.96	10.32
	上内	24	9.35	2.51	6.36	11.94	8.01	11.33

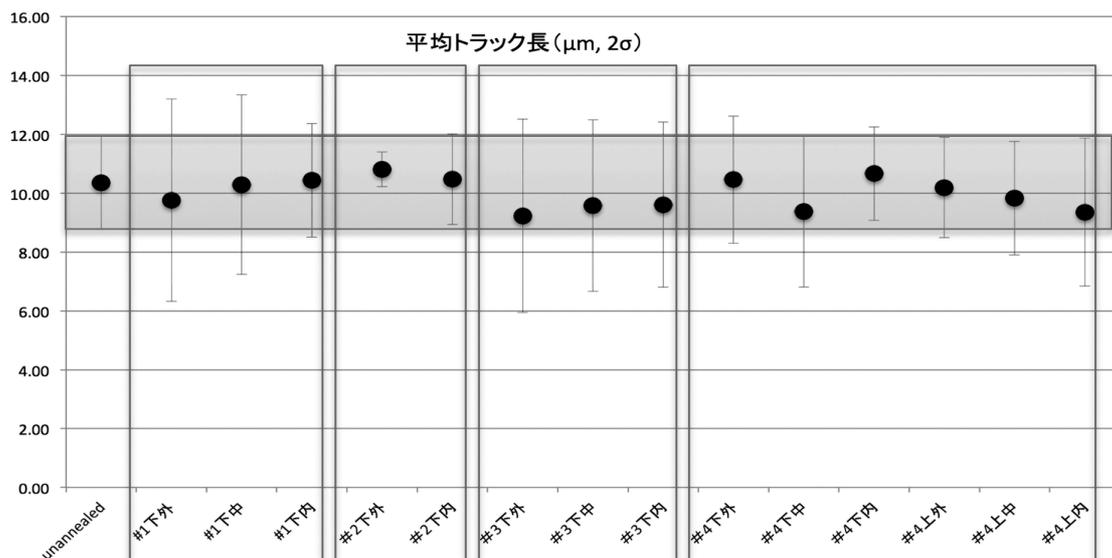


図4 FT長測定結果図. 平均FT長と 2σ 誤差をプロットした. 摩擦試験条件ごとに枠で囲んだ. 長さ約9 - 12 μm の部分の帯状の背景は, 非加熱試料の誤差範囲を表す.

(2) 試料を採取した分画ごと, 特に, 内外周による違いは見られないか, 少なくとも顕著ではない.

(3) 高速摩擦試験条件による違いも顕著ではなかった. ジルコンサンドの有無の影響は不明である.

このうち, (1)と(2)は, 高速摩擦試験中にジルコン粒子が上下のコアに挟まれた模擬断層

中を移動したことにより説明できる. 実際に, テフロンスリーブがない場合には高速回転による遠心力によってコア間から試料が飛び出してしまう. スリーブを着けていたにもかかわらず, 内周と外周の間で試料が移動している可能性もある. 回転摩擦試験中の試料の移動に伴う被熱の不均質さは, 単純に内外周の違いなのか, コア表面近傍と両面の中間部の違いなのか, あるいはパッチ状

に発生するものなのかについて理解するためには、更に空間分解能を上げた分画手法を要するだろう。また、分析すべきパラメータについて、粒子が動くことによるFT長のばらつきが想定されることから、分画ごとの統計よりも、単粒子の分析が有効であろう。そのためには、できるだけFT密度が高い試料を用いることで、単粒子から複数のFT長測定が可能である事が望ましいと言える。(3)の摩擦パラメータとの関連については、分画はそれほど重要ではないかもしれない。各摩擦実験における全体の平均長、あるいは粒子単位のFT長分析結果の比較が有用であると思われる。また、今回実施した4つの実験条件は、従来の同種の実験条件からはそれほどかけ離れたものではない(例えばMizoguchi and Fukuyama, 2010)。少なくともこれらの実験条件においては明瞭な二次的加熱の影響が認められなかったことから、摩擦発熱による二次的加熱を捉えるには、例えばアパタイトFTなどより感度の高い鉱物・手法組合せが必要なかもしれない。あるいは、断層露頭で見られたシュードタキライトから採取されたジルコンFTに熱影響が残っていること(例えばMurakami and Tagami,

2004)から、実際にメルトが生成されるような摩擦条件下での実験が必要であろう。この場合、ジルコン単体あるいはジルコンパウダーを挟むと溶融温度が非常に高くなるため、ジルコン粒子と天然の断層物質を共存させる事でより現実に近い溶融温度条件を実現できる可能性がある。

文献

- Mizoguchi, K., and Fukuyama, E., 2010, Laboratory measurements of rock friction at subseismic slip velocities, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 47, 1363–1371.
- Murakami, M., and Tagami, T., 2004, Dating pseudotachylyte of the Nojima fault using the zircon fission-track method, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L12604, doi: 10.1029/2004GL020211.
- Murakami, M., Yamada, R., Tagami, T., 2006, Short-term annealing characteristics of spontaneous fission tracks in zircon, *Chem. Geol.* 227, 214–222.