

摩擦熔融は平衡熔融か, それとも 非平衡熔融か?

Is Frictional Melting Equilibrium Melting, or Non-Equilibrium Melting?

嶋本利彦*・林 愛明**

Toshihiko Shimamoto* and Aiming Lin**

Abstract: In order to test whether or not the frictional melting during rapid fault motion occurs in chemical equilibrium, we have conducted dry frictional melting experiments on (1) pairs of albitite and quartzite specimens, which have eutectic relationship, and on (2) anorthosite specimens (Ab-An solid solution). Experiments were done on solid-cylindrical specimens of 25 mm in diameter at the equivalent slip rate of 1.3 m/s, under a normal stress of 1 MPa, and with the total circumferential displacement of about 30 m for (1) and about 80 m for (2), using our rotary-shear high-speed frictional testing machine. The results indicate that albitite with lower melting temperature melted in the first case and that the composition of the fused glass is the same as that of the plagioclase constituting anorthosite. Thus, the frictional melting clearly is not equilibrium melting, and this must be kept in mind when one estimates the temperature reached during the formation of natural pseudotachylytes. Temperature distribution can be quite heterogeneous within a fault zone during and immediately after seismogenic fault motion.

はじめに

地震時の高速断層運動による断層帯内部の温度上昇は, 例えば, シュードタキライトの厚さと変位の関係から断層の摩擦強度を見積もる上で決定的に重要である(Sibson, 1975). 天然の変形した岩石から断層の強度を見積もることのできる例は少ないだけに, このような強度の推

定は貴重である(嶋本・長濱, 1991; 参照). シュードタキライト形成時の温度は, しばしば, マイクロライト・ガラス質マトリックスなどの化学組成, 化学平衡のもとでの鉱物の安定条件, 岩石の熔融温度などから見積もられている(林・戈, 1994; など). しかし, 地震時の摩擦熔融は数秒から10数秒程度の短時間におこるのだから, メルトが固化するまでの時間を含めて

1994年3月4日受付. 1994年3月18日受理.

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

**建設技術研究所,
Construction Engineering Institute, Co. Ltd.

も、本当に化学平衡が成立する時間があるかどうかは明白ではない。しかも、断層帯内部の変形は極めて複雑だから、地震直後の断層帯内部の温度分布も非常に不均一なはずであり、それが瞬時に均一化することはないと思われる。

我々は、摩擦熔融時に化学平衡が成立するかどうかを検証するために、共融関係にあるアルバイトと石英および固溶体の一つである斜長石を用いて摩擦熔融の実験をおこなった。前者については、アルバイトと珪岩の円筒形試料を対にして用いて、断層の全面でアルバイトと石英が必ず摩擦接触をしているように工夫した。後者については、斜長岩どうして摩擦熔融の実験をおこなった。このような試料が化学平衡下で熔融すれば特徴的な組成のメルトが形成されるはずだから(都城・久城, 1977; 参照), 摩擦熔融によって形成されるメルトの組成を調べることによって、平衡がどうかを検討できるはずである。

実験方法

実験には地震研究所の回転式高速剪断摩擦試験機(嶋本・堤, 1994)を用いた。この試験機では、外径25mmの円筒形または円柱形試料を回転軸にとりつけて、空気圧アクチュエータで10kN以下の軸荷重を加え、7.5kwのサーボモータを使って1,500rpm以下の回転速度で片側の試料を直接回転させることができる。

我々は円柱形試料を用いたので、最大回転速度のもとでの変位速度は、試料の中心から外周部にかけて0から約2m/sまで変化する。断層の力学的性質を測定する場合には、このように変位速度が場所ごとに大きく変わる状況は好ましくない。しかし、本研究の目的は摩擦熔融によって形成されるメルトの化学組成を検討することだから、なるべく高い垂直応力のもとで実験をするために、熱クラックによって壊れにくい円柱形試料を用いた。嶋本・堤(1994)によって定義された等価変位速度は、回転速度が最大の時に約1.3m/sである。等価変位速度とは、単位時間の摩擦による仕事[$(断層の面積) \times$

(剪断応力: 変位速度に依存しないと仮定) \times (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。以下、変位速度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、新潟県糸魚川産のアルバイト(地科学社から購入)、ブラジル産の緑色珪岩(武甲園, 埼玉県児玉郡児玉町, から購入)、ScotlandのOuter Hebrides産の斜長岩(早稲田大学・高木秀雄氏提供)を用いた。アルバイトは新鮮な岩石だがクラックをかなり含んでおり、クラックをさけて試料を作成せざるを得なかった。珪岩と斜長岩はほとんどクラックを含まず、非常に緻密で堅い岩石であった。この珪岩は、大友・嶋本(1994)の顕微鏡下での加熱実験に用いられたのと同じ試料である。石英の試料としては、人工水晶の単結晶・天然の石英脈・チャートを用いて実験を試みたが、いずれも熱破壊が激しくて試料がすぐに割れてしまい、摩擦熔融の実験は成功しなかった。Table 1に実験で使用した岩石の化学組成を示した。

Table 1. Bulk chemical compositions of albitite from Itoigawa, Niigata Prefecture, greenish quartzite from Brazil, and anorthosite from Outer Hebrides, Scotland, that have been used in the frictional melting experiments.

Wt. %	Albitite	Quartzite	Anorthosite
SiO ₂	81.68	96.87	51.52
TiO ₂	0.02	0.09	0.16
Al ₂ O ₃	11.93	1.79	29.71
FeO*	0.43	2.72	1.26
MnO	0.01	0.26	0.02
MgO	0.18	0.59	0.63
CaO	0.27	0.28	14.35
Na ₂ O	6.82	0.03	3.12
K ₂ O	0.04	0.20	0.20
P ₂ O ₅	0.05	0.09	0.02
Total	101.43	102.92	100.99
Normative mineral compositions:			
albite	56.9	0.3	25.7
anorthite	1.4	0.8	67.9
quartz	40.2	89.6	0.5
others	1.5	9.3	5.9

アルビタイトは、Table 1 下欄のノルム鉱物組成にも示されているように、アルバイトとともに相当量の石英を含んでいる。本来はもっと純粋なアルバイトを使用したかったが、高速摩擦実験で使用できる大きさの堅いサンプルを入手することはできなかった。しかし、アルバイトと石英以外の鉱物はほとんど含まれていないので、本研究の目的には使用できると思われる。アルビタイト側にも石英が含まれているので、断面では石英と石英の擦れあう部分もあることになる。珪岩は約90%が石英から構成されている。Fig. 1は、シリカ鉱物とアルバイトの共融関係を示した図であるが、珪岩およびアルビタイト中のアルバイトとシリカの重量比(ノルム計算による)をそれぞれAB, CDで示した。

斜長岩は90%以上が斜長石から構成されており、斜長石の組成はほぼAn72.5である。Fig. 2は斜長石固溶体の融解平衡を示す図だが、この実験試料の組成はHCで示されている。

実験結果

試料が限られていたために、実験は円柱形試料の両端を用いて、アルビタイト/珪岩および斜長岩どうしの組み合わせでそれぞれ2回ずつおこなった。実験条件は、軸荷重が500N(垂直応力 = 1 MPa)、回転速度が1,490rpm(等価変位速度 = 1.3m/s)であった。摩擦熱によって形成される熱クラックの影響(大友・嶋本, 1994)で試料が破壊されるので、これ以上の軸荷重を加えることはできなかった。

アルビタイトと珪岩の実験では、数秒経過後に断面から火花が出始め、約10秒経過すると赤燈色のメルトが形成されて周囲に飛び散り始めた。メルトは4~5秒間形成されたが、その後試料が数mmの大きさに破壊して、実験は中断した。斜長岩どうしの実験では、2~3秒経過時点で白黄色の火花が出始め、数秒で摩擦面が赤黄色に変わって、7~8秒後には赤燈色のメルトが形成され始めた。その後約30秒余り実験を続けたが、試料が大きく破壊されることはなかった。円柱形試料の外周部における総変

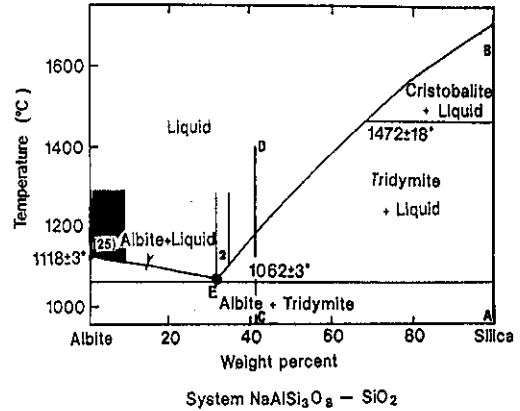


Fig.1. A diagram showing equilibrium eutectic melting of $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-SiO}_2$ system (see Fig. 23.4 of Miyashiro & Kushiro, 1977). The figure also shows the initial composition of quartzite (AB), the initial composition of albitite (CD), and the range of compositions of fused glass from the frictional melt (region decorated with vertical bars together with the number of chemical analysis).

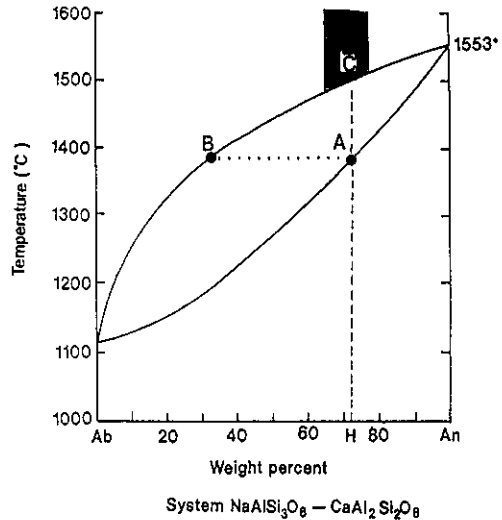


Fig.2. A diagram showing equilibrium melting of plagioclase (albite-anorthite solid-solution) under the atmospheric pressure (see Fig. 24.21 of Miyashiro & Kushiro, 1977). The initial composition of anorthosite and the range of compositions of fused glass from the frictional melt are shown by AH and by vertical lines, respectively.

位量は、アルビタイト/珪岩の実験で30m弱、斜長岩どうしの実験で約80mであった。高い垂直応力をかけることができない分だけ、変位を大地震時の変位よりもさらに大きくとってある。

形成されたメルトが固化したガラスの組成(以下、これも単にメルトと呼ぶ)を、Tables 2, 3と Figs. 1, 2に示した。アルビタイトと珪岩の摩擦熔融によってできるメルトについては、27の試料の分析をおこなった。Table 2には代表的な分析値が示してある。分析結果の内、2例を除いて(Table 2の8・9列)、メルトの組成は共融点の組成ではなくてアルビタイトに近い組成を示している。一方、斜長岩のメルトの組成も元の斜長岩の組成とほとんど変わらない(Table 1の3列, Table 3, Fig. 2)。

実験結果の考察と結論

アルビタイトと石英の混合物が化学平衡を保ちながら融解すると、最初に形成されるメルトは共融点の組成、つまりFig. 1のE点の組成をもつはずである(都城・久城, 1977; 参照)。しかも、今回の実験では、アルビタイトと石英は断層面の両側から接する状態で熔融実験がおこなわれているので、一方の鉱物が熔融し尽してメルトの組成が変化し始める状況にはなり得ない。したがって、摩擦熔融が平衡熔融であるならば、形成されるメルトの組成はE点の組成のはずである。ところが、アルビタイトと珪岩の摩擦熔融実験によって形成されるメルトの組成は、アルビタイト中にもかなりの石英を含んでいたにも関わらず、アルビタイトの組成に非常

Table 2. Chemical compositions of the glass matrix generated by frictional melting experiment on paired specimens of albitite and quartzite. Nine representative results out of 27 chemical analyses are presented here.

Wt. %	Ab1	Ab2	Ab3	Ab4	Ab5	Ab6	Ab7	Ab8	Ab9
SiO ₂	68.12	67.91	67.74	67.98	67.92	67.98	67.63	74.23	76.51
TiO ₂	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.05	0.00	0.00	0.10
Al ₂ O ₃	20.29	19.34	19.40	20.39	19.82	20.05	19.96	14.78	12.76
FeO*	0.10	0.06	0.06	0.00	0.04	0.04	0.24	0.30	0.04
MnO	0.00	0.00	0.01	0.07	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00
MgO	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.07
CaO	0.58	0.03	0.08	0.39	0.24	0.45	0.61	0.32	0.26
Na ₂ O	10.51	11.16	10.92	11.00	10.51	10.68	10.29	7.04	8.29
K ₂ O	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.11	0.09	0.15
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03	0.05	0.01	0.00	0.19
NiO	0.00	0.05	0.07	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.22
P ₂ O ₅	0.38	0.24	0.42	0.45	0.50	0.53	0.25	0.16	0.57
SeO	0.72	0.75	0.64	0.53	0.56	0.89	0.52	0.16	0.57
Total	100.74	99.56	99.36	100.82	99.65	100.76	99.78	97.08	99.73
Normative mineral compositions:									
Albite	90.0	95.8	94.1	93.3	90.7	91.3	88.2	62.0	63.2
Quartz	6.7	3.1	4.4	4.2	6.7	6.1	6.6	33.3	30.4
Others	3.3	1.1	1.5	2.5	2.6	2.6	5.2	4.7	6.4
Ab/Qz	93/7	97/3	96/4	96/4	93/7	94/6	93/7	65/35	68/32

摩擦熔融は平衡熔融か、それとも非平衡熔融か？

Table 3. Chemical compositions of the glass matrix generated by frictional melting experiment on anorthosite specimens.

Wt. %	An1	An2	An3	An4	An5	An6	An7	An8	An9
SiO ₂	48.79	49.75	48.99	51.57	49.72	49.73	49.93	66.88	49.24
TiO ₂	0.51	0.34	0.63	0.00	0.33	0.31	0.37	0.01	0.04
Al ₂ O ₃	29.25	29.21	27.81	31.67	30.60	30.27	28.75	20.11	30.75
FeO*	2.82	2.66	3.39	0.11	1.78	1.99	2.61	0.00	1.55
MnO	0.25	0.00	0.14	0.00	0.04	0.07	0.00	0.00	0.00
MgO	1.93	1.55	2.40	0.00	0.97	0.88	1.44	0.52	0.77
CaO	13.41	13.04	12.54	10.42	13.28	13.36	13.48	0.00	13.61
Na ₂ O	2.43	2.85	3.13	3.50	2.97	2.64	3.31	11.14	2.78
K ₂ O	0.24	0.31	0.42	0.01	0.15	0.20	0.39	0.02	0.18
Cr ₂ O ₃	0.03	0.04	0.25	0.00	0.00	0.09	0.07	0.00	0.14
NiO	0.28	0.00	0.00	1.74	0.21	0.29	0.09	0.00	0.14
P ₂ O ₅	0.00	0.21	0.37	0.05	0.13	0.31	0.09	0.57	0.03
SeO	0.31	0.00	0.05	1.76	0.71	0.00	0.17	0.91	0.42
Total	100.25	99.96	100.12	100.83	100.89	100.14	100.70	100.16	99.65
Plagioclase composition:									
An/Ab	76/24	73/27	70/30	64/36	72/28	75/25	70/30	0/100	74/26

に近い。27の分析結果の内の2例はかなり共融点に近い組成を示すが(Fig. 1), これは、石英の微粒粉砕物が分析領域に含まれていたためかもしれない。または、珪岩とアルビタイト中の石英どうしが擦れあって部分的に石英のメルトが形成された可能性もある。何れにせよ、今回の実験によって形成されたメルトの組成は、アルバイットの組成に非常に近い。

一方、Fig. 2のCHの組成をもつ斜長石が平衡熔融をして最初に形成されるメルトの組成は、B点の組成をもつはずである(都城・久城, 1977; 参照)。しかも、摩擦熔融の全過程において斜長岩と斜長岩は常に接触を保ちながら摩擦熔融をしているので、擦れあうアスベリティの接触部で新たに形成されるメルトは、平衡熔融であるならばB点に近い組成をもつはずである。しかし、実際に形成されたメルトは元の斜長石に近い組成をもっている(Fig. 2, Table 3)。但し、An8の組成は非常にアルバイットの組成に近く、これは、未確認だが斜長岩の中に少量のアルバイトが含まれていたためかも知れ

ない。この分析値も、平衡熔融によっては説明不可能である。

このように、今回おこなった2種類の実験において形成されたメルトは、平衡熔融から予測される組成をもたない。摩擦熔融は、明らかに非平衡熔融である。アルビタイトと珪岩の実験では、林・嶋本(1994)で示されたように、融点の低いアルバイトが選択的に熔融したのであろう。斜長岩どうしの摩擦熔融では、斜長石の全熔融(total melting)が起こったと思われる。摩擦熔融時の断層面の温度は、少なくとも、前者の場合には1,118℃以上、後者の場合には約1,500℃以上に達したと推定される。摩擦熔融が非平衡な現象であることから、天然のシュードタキライト形成時の物理条件の推定などにおいて、平衡条件下で得られた鉱物の安定条件などを使用する際には、極めて慎重におこなう必要がある。

摩擦熔融が平衡熔融か、それとも非平衡熔融かを検証するもう一つの方法は、1相からなる物質が摩擦熔融をおこした時に、メルトの温度

が融点を越えるかどうかを実測することである。平衡熔融であるならば、メルトは熔融が完了するまで融点の温度に保たれるはずである。この点については、堤・嶋本(1994)によって試みられている摩擦面の温度の直接測定によって、いずれは確かめられるはずである。本論文と林・嶋本(1994)によって示されたように、非平衡条件下における低融点鉱物の選択熔融が起こっているならば、熔融量の違いこそあれ、融点の違う鉱物が同時に摩擦熔融をしていることになる。したがって、摩擦熔融時に融点のovershootingは間違いなく起こっているはずである。実際に、摩擦熱はアスベリティとか粉碎岩片の接触部で集中的に発生するはずである。したがって、地震発生直後の断層帯内部の温度分布はかなり不均一であったと思われる。

謝辞：本実験で使用した斜長岩のサンプルは早稲田大学の高木秀雄氏に提供していただいた。心から感謝を申し上げます。また、本研究には平成2～3年度文部省科学研究費補助金(一般研究B, 課題番号 02452068, 研究代表者：嶋本利彦)を使用した。

文 献

- 都城秋穂・久城育夫, 1977, 岩石学Ⅲ, 共立全書 214, 245頁.
- 大友幸子・嶋本利彦, 1994, 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, 本特集号.
- 林愛明・戈澍漠, 1994, 中国北西部富蘊断層沿いに産するガラス質シュードタキライト, 本特集号.
- 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.
- 嶋本利彦・長濱裕幸, 1991, シュードタキライトの起源と地殻応力問題, 月刊地球, **13**, 416-427.
- 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.
- Sibson, R. H., 1975, Generation of pseudotachylite by ancient seismic faulting. *Geophys. J. Royal Astro. Soc.*, **43**, 775-794.
- 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.