

熱力学的結晶作用シミュレーションによるメルト粘性スケールの信頼性の検討 (序報)

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学地球科学教室 公開日: 2018-08-06 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 石橋, 秀巳, 鈴木, 琉斗 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00025658

熱力学的結晶作用シミュレーションによる メルト粘性スケールの信頼性の検討 (序報)

石橋秀巳^{1*}・鈴木琉斗²

Reliability of melt viscosity scale examined by thermodynamic simulation of crystallization differentiation: A preliminary result

HIDEMI ISHIBASHI^{1*} and RYUTO SUZUKI²

Abstract Thermodynamic simulations of crystallization differentiation using “Rhyolite-MELTS” program are performed for a relatively undifferentiated basaltic melt from Fuji Volcano to examine the relationship between viscosity and SiO₂ content of melt. The relations between viscosities and SiO₂ contents of initially H₂O-rich melts, with initial melt H₂O contents > ~2wt.%, are consistent with the melt viscosity scale (MVS) proposed by Takeuchi (2015). However, viscosities of initially H₂O-poor melts, with initial melt H₂O content < ~2wt.%, are larger than those predicted by MVS. The deviation from MVS occurs during the early stage of crystallization characterized by increases of FeO* and TiO₂ contents without significant increase of SiO₂ content in melt, due to absence of Fe-Ti oxide minerals in crystallized phases. In the middle stage of crystallization characterized by increase of SiO₂ content and decreases of FeO* and TiO₂ contents, chiefly due to crystallization of Fe-Ti oxide minerals, the melt viscosity-SiO₂ content relations are almost parallel with MVS. Therefore, once melt viscosity deviates from MVS, it remains larger than MVS even the melt H₂O content becomes > 2wt.%, suggesting that melt H₂O content is not necessarily an adequate criterion for judging whether MVS is applicable or not. Alternatively, we propose new criteria for MVS application based on SiO₂-Al₂O₃-FeO*-TiO₂ relation of melt, which is useful for a melt sample of unknown H₂O content.

Key words: melt, viscosity, crystallization, Rhyolite-MELTS

1. はじめに

マグマのダイナミクスを理解するうえで、ケイ酸塩メルトの粘性率に関する理解の重要性は論を俟たない。マグマは一般に、ケイ酸塩メルト中に結晶・気泡が浮遊する混相流体であるが、そのバルク粘性率はケイ酸塩メルトの粘性率に比例する (e.g., Mader *et al.*, 2013)。また、マグマ中の気泡や結晶の成長・移動速度は、メルト

の粘性率に強く依存する。それ故、メルトの粘性率は、火道上昇するマグマの脱ガス・破碎のふるまいや、その結果として噴火ダイナミクスにも影響を及ぼすと考えられる。天然のケイ酸塩メルトの粘性率は、その主成分化学組成・温度・含水量などのパラメータに依存して、 $\sim 10^1$ Pa s から $\sim 10^7$ Pa s の幅広い範囲で変動する (e.g., Takeuchi, 2011, 2015)。ケイ酸塩メルトの粘性率に関する実験的研究がこれまで多数行われ、これらのデータ

2018年3月27日受付。2018年7月6日受理

Received: 27 March 2018. Accepted: 6 July 2018.

¹静岡大学理学部地球科学科

²静岡県立浜松北高等学校

¹Department of Geoscience, Faculty of Science, Shizuoka University, Ohya 836, Suruga-ku, Shizuoka, 422-8529, Japan

²Shizuoka Prefectural Hamamatsu Kita High School

*Corresponding author

に基づいて、主成分化学組成・温度・含水量の関数としてメルトの粘性率を精度よく計算可能な一般モデルが現在では提案されている (e.g., Giordano *et al.*, 2008).

一方で近年、鉱物相と平衡共存するメルトの粘性率は、幅広い温度・含水量条件の範囲で、そのSiO₂量のみと良い相関を示すことがTakeuchi (2015) によって明らかにされた。Takeuchi (2015) は、天然および平衡実験試料で鉱物相と平衡共存するメルトの化学組成・温度・含水量条件データをコンパイルし、Giordano *et al.* (2008) のモデルを用いて計算したメルト粘性率とSiO₂量を比較したところ、

$$\log \eta = 0.146 X_{\text{SiO}_2} - 6.3 \quad (1)$$

の関係を示すことを明らかにし、これをメルト粘性スケール (melt viscosity scale; 本研究ではMVSと略す) と名付けた。ここで、 η はメルト粘性率 (Pa s), X_{SiO_2} は無水換算したメルトのSiO₂量 (wt.%) である。Takeuchi (2015) によると、MVSは含水量>2wt.%のサブアルカリメルトの粘性率を±0.4 log unit (Root mean-square deviation) で再現できる。MVSが成り立つ原因として、Takeuchi (2015) は以下のように議論している。メルト組成を一定に保つ場合、温度上昇・含水量増加に対してメルト粘性率は減少する。一方で、鉱物相と平衡共存するメルトのSiO₂量を一定に保つ場合、相平衡の制約より温度と含水量が負の相関を示す。このため、メルト粘性率に及ぼす温度と含水量の影響が相殺し、メルト粘性率はSiO₂量のみと良い相関を示す。噴火時および地下深部でのマグマのダイナミクスを理解するうえでメルト粘性率を見積もることは重要であるが、一方でそのために必要なメルトの温度や含水量の決定は必ずしも容易ではない。温度・含水量の情報なしにメルト組成の実測値から直接的に粘性率を見積もることが可能であるMVSは非常に実用的であるが、それ故にその信頼性を慎重に評価することは重要であると言えよう。

ところで近年、マグマの熱力学的性質の理解と計算技術の進歩により、天然のマグマと同等の化学組成系において、信頼度の高い熱力学的相平衡シミュレーションが可能になってきた。中でもRhyolite-MELTSプログラム (Gualda *et al.*, 2012) は現時点で最も信頼性が高く、頻繁に使われるモデルである (e.g., 石橋・天野, 2017)。このプログラムを使えば、幅広い圧力・温度・含水量条件下で、鉱物相と平衡共存するメルトの化学組成を見積もることができるため、Giordano *et al.* (2008) のメルト粘性率モデルと組み合わせることで、MVSの性質の検討とその信頼性評価に利用できると考えられる。そこで本研究ではRhyolite-MELTSプログラムを用い、富士山の玄武岩組成メルトを初期物質とした分別結晶作用シミュレーションを行い、鉱物相と平衡共存するメルトの組成・

温度・含水量条件と粘性率の関係を定量的に検討した。更にこのデータをMVSと比較し、その信頼性と適用条件の検討を行った。

なお、本研究は、平成29年度科学技術振興機構グローバルサイエンスキャンパス、静岡大学「未来の科学者養成スクール」で、第2著者の鈴木が取り組んだ研究の成果に一部追加データを加え、石橋がまとめたものである。

2. 研究方法

本研究では、シミュレーションの初期メルト組成として、富士火山印野丸尾溶岩の化学組成 (高橋ほか, 2003; Table 1) を用いた。この初期メルトをINMメルトと呼称する。印野丸尾溶岩は西暦450年頃に富士山東麓で噴出した玄武岩質溶岩であるが (山元ほか, 2011)、斑晶鉱物をほとんど含まないため、その全岩組成をメルト組成とみなすことができる (山田・石橋, 2015)。また、印野丸尾溶岩は、過去2200年間の富士火山噴出物の中で最もMgOに富み、比較的未分化である (山田・石橋, 2015)。より未分化なメルト組成を初期条件とすることで、結晶作用シミュレーションのメルト組成幅をより広げられる利点がある。

Rhyolite-MELTSプログラム (Gualda *et al.*, 2012) は、Ghiorso & Sack (1995) によって開発された熱力学的相平衡シミュレーションプログラムMELTSの改良版である。Rhyolite-MELTSプログラムの詳細については、石橋・天野 (2017) で解説しているの、そちらを参照されたい。このプログラムでは、系 (結晶作用する前のメルト) の主成分化学組成、含水量、温度、圧力、酸素フュガシティの条件を与えると、メルト-結晶間の化学ポテンシャルの釣り合いと質量保存を同時に解くことで、晶出した結晶と残液メルトそれぞれの質量と化学組成を計算できる。また、n回目の計算で得られたメルト組成を、n+1回目の系の組成として、次の温度ステップで繰り返し計算を行うことが可能であり、この機能を用いると分別結晶作用を模したシミュレーションも可能である。

富士火山では、およそ20kmより深部に主要な玄武岩質マグマだまりが存在すると考えられている (e.g., 藤井, 2007)。地殻密度を2500kg/m³すると、深さ20kmでのリソスタティックな圧力はおおよそ500MPaである。また、富士火山噴出物中のオリビン斑晶に含まれるメルト包有物の含水量の上限はおおよそ3wt.%である (飯田ほか, 2004; 菅野, 2018MS)。そこで本研究では、100MPa, 300MPa, 500MPaの圧力条件、0.5wt.%, 1wt.%, 2wt.%, 3wt.%の初期メルト含水量条件、島弧マグマに一般的なNi-NiOバッファの酸素フュガシティ条件で、INMメルトのリキダス温度から750°Cまで1°C間隔で分別結晶作用

Table 1 The starting melt composition

wt.%	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total
INM	51.0	1.50	16.3	11.9	0.20	5.8	9.7	2.4	0.80	0.30	100.0

Table 2 Pressure, initial melt H₂O content and liquidus temperature conditions of the simulations

Run#	P(MPa)	H ₂ O (wt.%)	T _{liq} (°C)
fss1005	100	0.5	1165
fss1010	100	1.0	1133
fss1020	100	1.5	1116
Fss3005	300	0.5	1182
Fss3010	300	1.0	1167
Fss3020	300	2.0	1140
Fss3030	300	3.0	1123
Fss5005	500	0.5	1219
Fss5010	500	1.0	1202
Fss5020	500	2.0	1173
Fss5030	500	3.0	1152

シミュレーションを行った。INMメルトのリキダス温度は、Rhyolite-MELTSプログラムを用いて計算した。シミュレーションを行った圧力・初期含水量・リキダス温度の条件をTable 2に示す。

本研究では、Rhyolite-MELTSプログラムによる分別結晶作用シミュレーションで得られたメルトの化学組成・含水量・温度のデータセットを用いて、それらの粘性率を計算した。メルト粘性率の計算は、Takeuchi (2015)と同じく、Giordano *et al.* (2008)のメルト粘性率モデルを使用した。このモデルでは、メルトの粘性率はその化学組成・含水量・温度の関数として、

$$\log \eta = -4.55 + B/[T(K) - C] \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 $T(K)$ は絶対温度、 B と C はメルトの化学組成と含水量の関数である。このモデルは、無水および含水メルトの粘性率の実験測定値を±0.4 log unit (1 σ)で再現する (Giordano *et al.*, 2008)。

3. 結果と考察

3-1. メルトの化学組成・温度・含水量条件

Fig. 1に、メルトのSiO₂量および含水量と温度の関係を示す。今回のシミュレーションのメルト組成と含水量—温度条件は、天然のメルトの範囲 (Takeuchi, 2015)と概ね一致する。結晶作用の初期にSiO₂量の大きな変化を伴わず (51–52wt.%), 温度が大幅に低下する。また、

SiO₂量 > 70wt.%の領域では、SiO₂がほぼ一定もしくはわずかに減少しながら温度が低下し、含水量が増加する。SiO₂量が52–70wt.%では、SiO₂の増加とともに温度低下・含水量増加がおこる。ただし、fss1020のRunでは、およそ3.8wt.%程度で含水量の増加が止まり、ほぼ一定値をとる。これは、メルト中でH₂Oが飽和したためである。

Fig. 2は、メルトのSiO₂量と総アルカリ量 (= Na₂O + K₂O) の関係を示したものである。結晶作用によって、メルトは玄武岩質から流紋岩質まで分化し、その化学組成トレンドは天然のサブアルカリメルトの範囲 (Takeuchi, 2015)に含まれる。結晶作用の初期には、SiO₂量の大きな変化を伴わず (51–52wt.%), 総アルカリ量が増加する。一方でSiO₂量 > 70wt.%の領域では、SiO₂量がほぼ一定もしくはわずかに減少しながら総アルカリ量が増加する。SiO₂量が52–70wt.%では、SiO₂量と総アルカリ量がともに増加する。Fig. 1およびFig. 2から、INMメルトの結晶作用では、SiO₂量が大きく変化せずに総アルカリ量が増加する初期、SiO₂量と総アルカリ量がともに増加する中期、そして再びSiO₂量が大きく変化せずに総アルカリ量が増加する後期の3つの段階があることがわかる。このうち後期は、シリカ鉱物の晶出で特徴づけられ、メルトはSiO₂に飽和するので、その濃度は大きく変化しなくなる。初期と中期のちがいは、晶出する鉱物組み合わせにFe-Ti酸化物が含まれるかどうかを反映している。結晶作用の初期では、Fe-Ti酸化物が含まれないため、晶出する鉱物相 (斜長石・かんらん石・輝石)のSiO₂量の平均値とメルトのSiO₂量の差が小さい。このため、結晶作用が進行しても、メルトのSiO₂量はあまり増加しない。なお、富士山の噴出物の多くはSiO₂ ~ 50–52wt.%であるが (高橋ほか, 2003), これについて藤井 (2007)は、比較的深部のマグマだまりで輝石の結晶分化が卓越することにより、メルトのSiO₂濃縮がおこらないことが原因であると議論している。一方で結晶作用の中期では、Fe-Ti酸化物鉱物 (磁鉄鉱・イルメナイト)の晶出が始まる。これらの鉱物にはSiO₂が含まれないため、晶出鉱物相のSiO₂量の平均値が下がり、メルトへのSiO₂の濃縮がおこる。これによって一旦、メルトのSiO₂量と斜長石・輝石とのSiO₂量の平均値との間の差が大きくなると、斜長石・輝石の晶出によってもメルトへのSiO₂の濃縮が進行するようになる。

Fig. 3に、メルトのSiO₂量と主成分元素含有量との関係を示す。結晶作用の初期では、Fe-Ti酸化物が晶出せず、斜長石・かんらん石・輝石の晶出が卓越する。このため、SiO₂量は大きく増加せず、FeO* [= FeO + 0.9Fe₂O₃]とTiO₂はともに濃縮し、Al₂O₃, MgO, CaOは減少する。ところが、Fe-Ti酸化物の晶出が始まると、SiO₂量が増加し、FeO*とTiO₂の濃度が低下する。Fe-Ti酸化物の晶出が始まるタイミングは主にメルトの初期含水量に依存しており、H₂Oに富む方がケイ酸塩鉱物に対するFe-Ti酸化物の晶出開始のタイミングが早まる傾向が見られる。これは、メルト含水量が増加すると、斜長石や輝石などのケイ酸塩鉱物のリキダスが著しく低下するのに対し、Fe-Ti酸化物のリキダスはメルト含水量の影響をあまり受

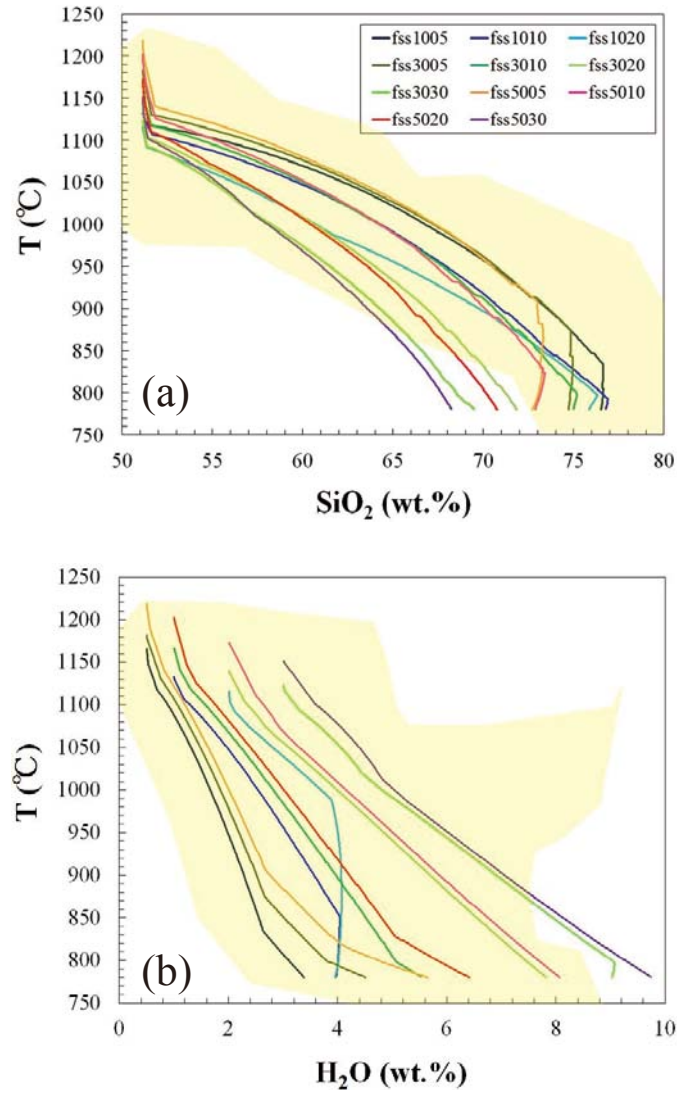


Fig. 1 Melt SiO₂ contents, (a), and melt H₂O contents, (b), are plotted against temperatures. The yellow hatched areas indicate the ranges of natural magmas (Takeuchi, 2011).

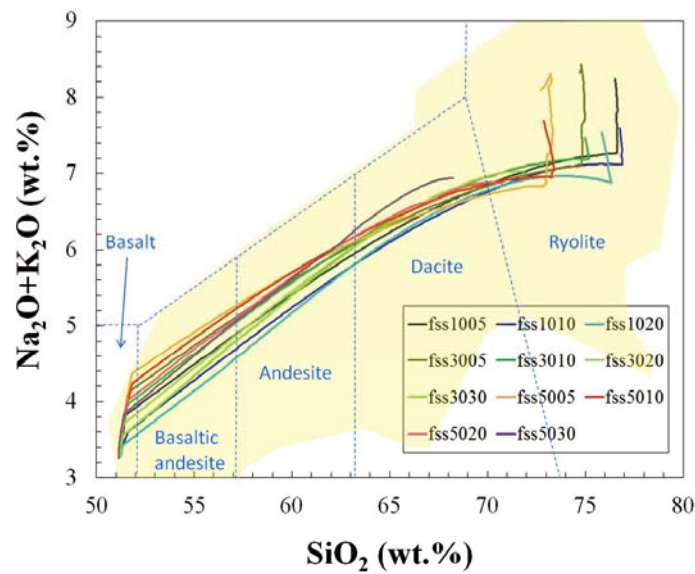


Fig. 2 Total alkali contents (= Na₂O + K₂O) are plotted against melt SiO₂ contents. The yellow hatched area indicates the range of natural subalkaline melts (Takeuchi, 2015).

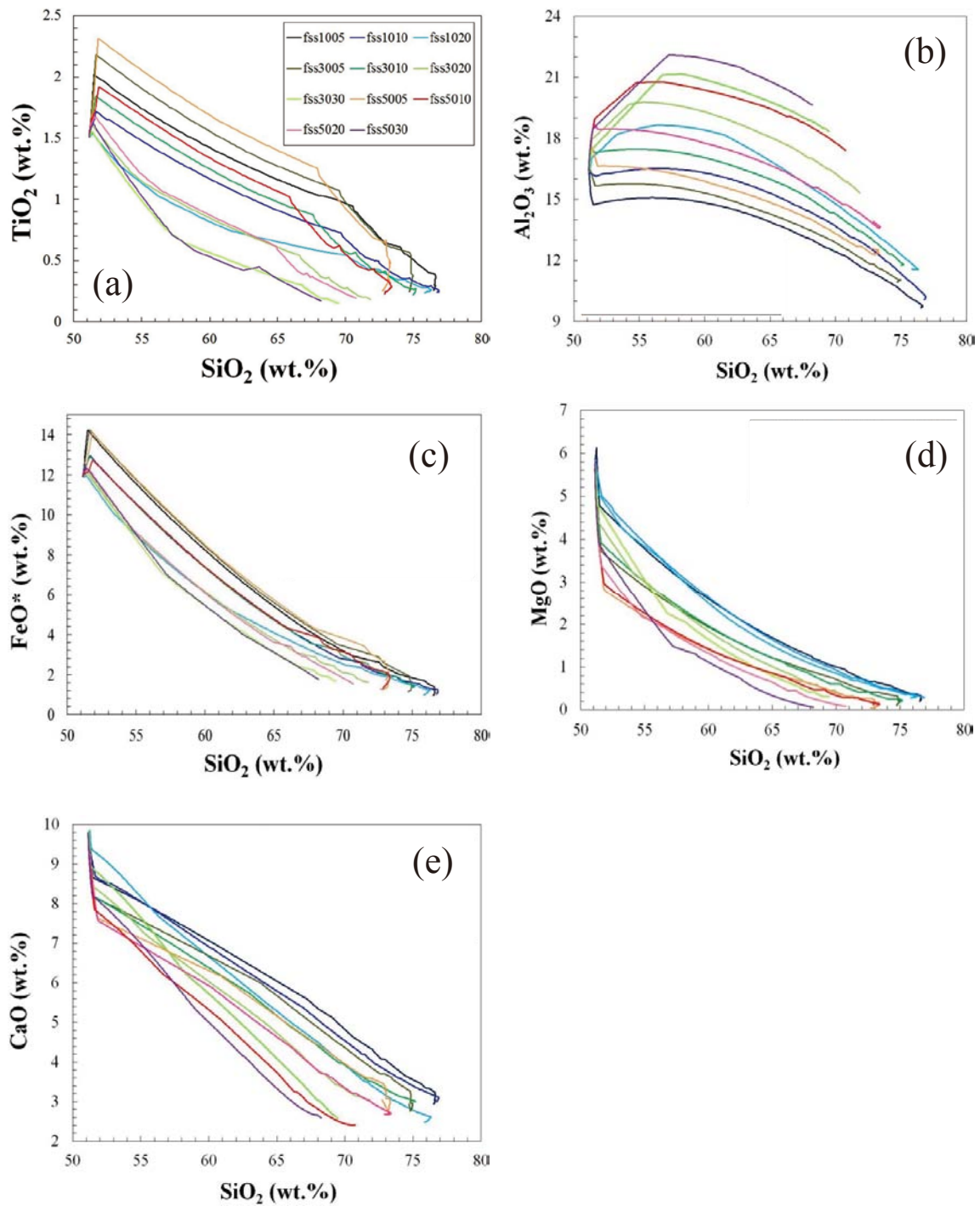


Fig. 3 TiO_2 , (a), Al_2O_3 , (b), FeO^* , (c), MgO , (d), and CaO contents, (e), are plotted against melt SiO_2 contents.

けにくいためである。結果として、初期含水量の多いRunでは、早期にFe-Ti酸化物の晶出が開始するため、 FeO^* と TiO_2 の濃縮がほとんど起こらず、 SiO_2 量が増加しはじめる。

3-2. メルトの粘性率

Fig. 4に、メルトの SiO_2 量と粘性率の関係を示す。結晶作用の初期を除いて、図中の SiO_2 量に対する粘性率の傾きがMVSと概ね平行になる。初期含水量の多いRunに

ついては、メルト粘性率- SiO_2 量の関係はMVSと整合的である。しかし、初期含水量の少ないRunについては、MVSに比べて系統的にやや高粘性を示す。メルトの粘性率とMVSとの関係をわかりやすくするため、Fig. 5に ΔMVS を縦軸にとったグラフを示す。ここで ΔMVS は、
$$\Delta\text{MVS} = \log \eta_G - \log \eta_{\text{MVS}} \quad (3)$$
と定義した。 η_G と η_{MVS} は、Giordano *et al.* (2008)モデルおよびMVSによってそれぞれ計算したメルト粘性率である。今回のシミュレーションでは、 ΔMVS は最大~1.2

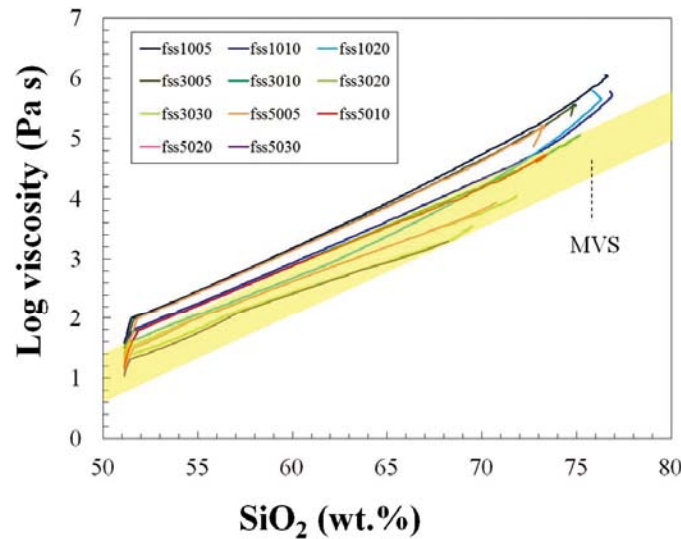


Fig. 4 Calculated melt viscosities are plotted against melt SiO₂ contents. The yellow hatched area indicates the melt viscosity scale (with ± 0.4 log unit error).

まで増加した。ΔMVSは、SiO₂量があまり変化しない結晶作用初期 (SiO₂量~51-52wt.%) に増加する (Fig. 5a)。特に初期含水量が低いRunでは、ΔMVSの増加は著しい (Fig. 5b)。SiO₂量が増加する結晶作用中期以降では、ΔMVSはほぼ一定もしくは緩やかに低下する (Fig. 5a)。したがって、結晶作用初期にΔMVSが著しく増加することが、初期含水量が低いメルトの粘性率がMVSから外れる原因であることがわかる。一旦、MVSから高粘性側に外れてしまうと、メルト含水量が2wt.%をこえても、MVSの範囲から外れたままである (Fig. 5b)。このことは、メルト含水量が必ずしも、MVSの適用の可否を判断する基準にならないことを示している。なお、メルトがH₂Oに飽和すると、ΔMVSは増加する傾向がみられる (Fig. 5b)。これは、H₂O飽和条件下ではメルト含水量をそれ以上増加することができないため、温度低下とそれに伴う結晶分化によるSiO₂量の増加が粘性率に及ぼす効果を、含水量の増加で相殺することができないためと考えられる。

Fig. 5c および 5d には、FeO* および TiO₂ 含有量と ΔMVS の関係を示す。ΔMVS の急増する結晶作用初期には、FeO*・TiO₂ 含有量も増加する一方で、ΔMVS が一定となる結晶作用中期以降では FeO*・TiO₂ は減少する。この結果は、Fe-Ti 酸化物鉱物の晶出が、ΔMVS をほぼ一定に保つために重要であることを示唆している。Fe-Ti 酸化物鉱物の晶出ししない結晶作用初期では、温度低下に伴ってメルトの粘性率が変化しても、SiO₂ 量はあまり変化しない。このため、MVS で予言されるようなメルト粘性率と SiO₂ 量の関係が実現されない。一方で Fe-Ti 酸化物鉱物の晶出開始後は、相平衡コントロールによるメルト SiO₂ 量の変化が大きくなることにより、MVS の関係が成立すると考えられる。初期含水量の少ない Run で ΔMVS が大きくなり、逆に初期含水量の多い Run では ΔMVS が小さくなった原因は、メルト含水量が多いほどケイ酸塩鉱物のリキダス温度が低下し、Fe-Ti 酸化物鉱物の晶出開始のタイミングが早まることで、ΔMVS の増加

が抑えられたためと考えられる。Fig. 5e は Al₂O₃ 含有量と ΔMVS の関係を示す。結晶作用に伴う Al₂O₃ 含有量の変化は複雑であるが、初期含水量の少ない Run の方が系統的に高 Al₂O₃ 含有量となり、ΔMVS も高い値を示す傾向が見られる。これは、初期含水量が高い Run では斜長石の晶出が相対的に抑えられるためである。MgO、CaO、Na₂O + K₂O 含有量と ΔMVS の間には明瞭な相関が見られない (Fig. 5f-h)。

結晶作用に伴う SiO₂ 量の変化の大きさが、MVS との整合性に影響を及ぼす事実は、Takeuchi (2015) の提案したような相平衡コントロール下での温度と含水量の効果の相殺だけによっては、MVS が成立する理由は説明できないことを示唆している。そこで、粘性率に及ぼすメルトの含水量と温度の効果が完全に相殺される場合の温度-含水量条件を計算し、本シミュレーションで得られたメルトの温度-含水量関係と比較した (Fig. 6)。まず、SiO₂ 含有量が 51.5wt.%, 55.5wt.%, 60.5wt.%, 65.5wt.%, 70.5wt.%, 75.5wt.% のときの粘性率を MVS (1式) で計算し、この粘性率を Giordano *et al.* (2008) のモデル (2式) が実現する温度-含水量条件をそれぞれ計算した (Fig. 6中の点線)。以後、この温度-含水量関係を“相殺条件”とよぶ。次に、本シミュレーションで計算されたメルトのうち、SiO₂ 含有量が 50-51wt.%, 55-56wt.%, 60-61wt.%, 65-66wt.%, 70-71wt.%, 75-76wt.% のものを選び、それらの温度-含水量条件を相殺条件と比較した。その結果、比較を行った全ての SiO₂ 含有量範囲で、シミュレーションによるメルトの大部分の温度-含水量条件が、相殺条件よりも低温・低含水量側に逸脱した。相殺条件よりも低温・低含水量側に逸脱することは、ΔMVS が正の値の側に逸脱することに相当する。この結果は、相平衡コントロール下での温度と含水量の効果の相殺だけによっては、MVS が成立する理由を説明できないという上の結果を支持する。

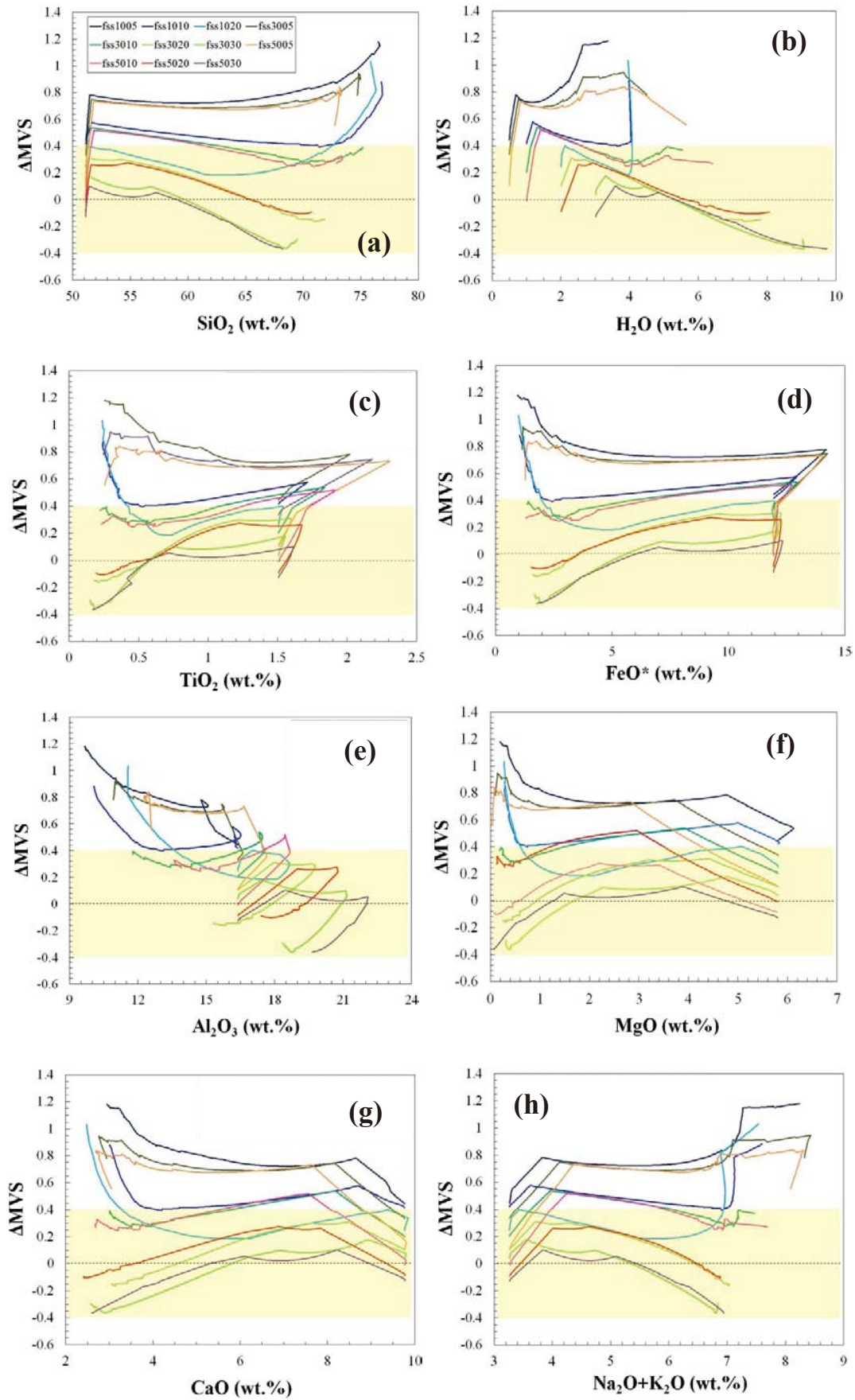


Fig. 5 Δ MVS is plotted against concentrations of SiO_2 , (a), H_2O , (b), TiO_2 , (c), FeO^* , (d), Al_2O_3 , (e), MgO , (f), CaO , (g), and $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, (h), in melt. The yellow hatched areas indicate the range of MVS.

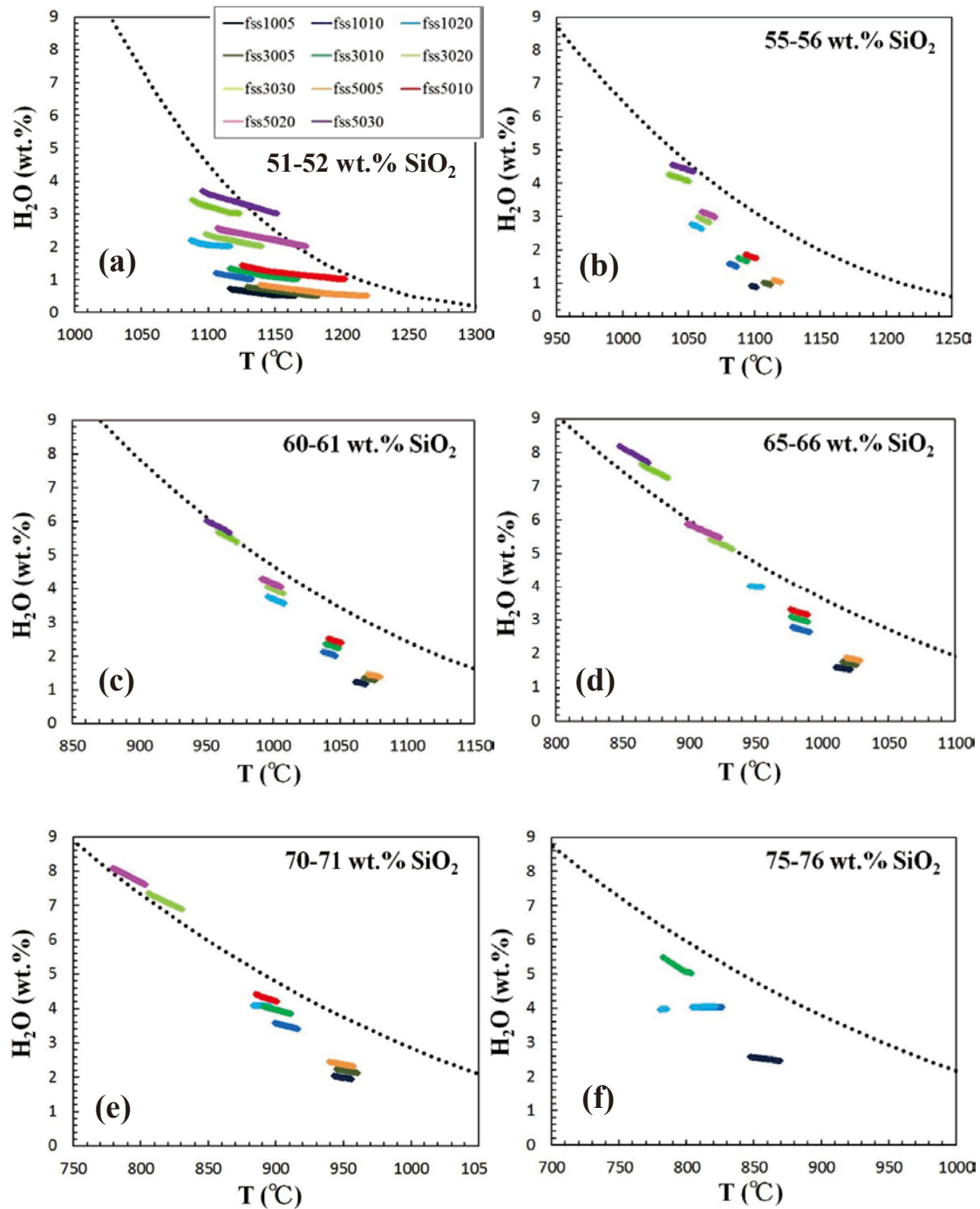


Fig. 6 Relations between temperatures and H₂O contents of the simulated melts are shown for SiO₂ contents of 51–52 wt.%, (a), 55–56 wt.%, (b), 60–61 wt.%, (c), 65–66 wt.%, (d), 70–71 wt.%, (e), and 75–76 wt.%, (f), respectively. Colors of the symbols are the same as those in Fig. 5. The dotted curves indicate the melt H₂O content-temperature relations of which the effects of temperature and H₂O content on melt viscosity are perfectly counterbalanced (see details in the manuscript).

3-3. MVSの適用条件

Takeuchi (2015) は、MVSの適用条件としてメルト含水量が2wt.%以上であることをあげた。しかし、本研究の結果、初期含水量の少ないメルトの結晶作用では、分化の進んだメルトの含水量が2wt.%をこえても、MVSから高粘性側に逸脱したままであることが示された (Figs. 5b, 6a)。このことは、メルトの含水量が必ずしも、MVS

の適用条件の基準として適さない可能性を示唆する。そこでH₂O以外の成分の含有量によって、MVSの適用の可否を判定できないか探るため、メルトの主成分元素組成と Δ MVSとの関係を検討した。Fig. 7中の赤点は Δ MVS > 0.4、緑点は $-0.4 < \Delta$ MVS < 0.4をそれぞれ示す。今回のシミュレーションでは、 Δ MVSは -0.4 以下にはならなかった。検討の結果、SiO₂ ~ 52wt.%では含水量が

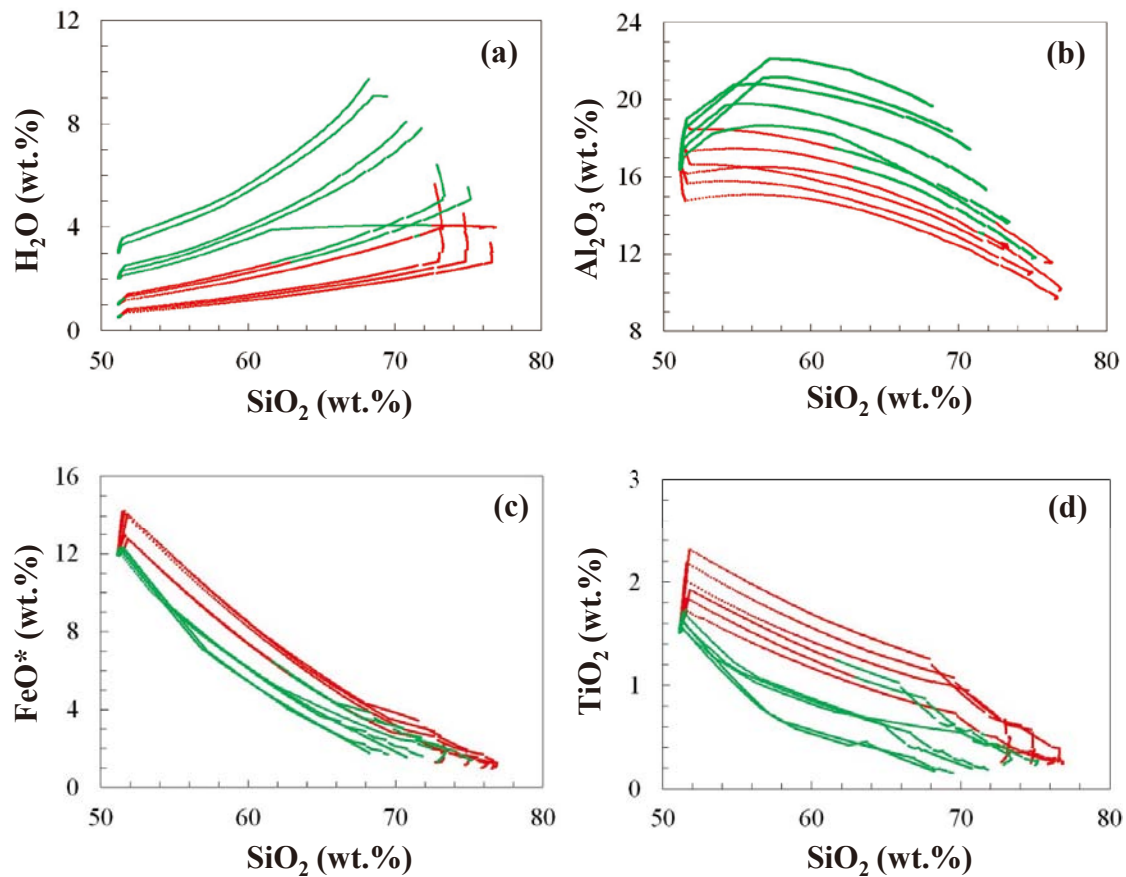


Fig. 7 Concentrations of H_2O , (a), Al_2O_3 , (b), FeO^* , (c), and TiO_2 contents, (d), are plotted against melt SiO_2 contents. Green and red symbols indicate $\Delta\text{MVS} < 0.4$ and $\Delta\text{MVS} > 0.4$, respectively.

$> 2\text{wt.}\%$, $\text{SiO}_2 \sim 62\text{wt.}\%$ では含水量が $> 2.5\text{wt.}\%$, $\text{SiO}_2 \sim 72\text{wt.}\%$ では含水量が $> 3.5\text{wt.}\%$ の場合に $\Delta\text{MVS} < 0.4$ となった。このことは、MVSの成立するメルト含水量が、 SiO_2 量とともに変化することを示している。また、ある SiO_2 量で比較したとき、相対的に Al_2O_3 に乏しく、 FeO^* と TiO_2 に富むメルトでは、MVSから高粘性側に逸脱することがわかった (Fig. 7b-d)。 Al_2O_3 に比較的乏しく、 $\text{FeO}^* \cdot \text{TiO}_2$ に富む組成的特徴は、結晶作用の初期にFe-Ti酸化物の晶出が抑えられ、相対的に多量の斜長石が晶出されるために獲得されるものである。

火山噴出物からメルト含水量の情報を正確に抽出するのは容易ではなく、したがってメルト含水量をMVS適用可否の判定基準にするのは実用的ではないと著者らは考える。そこで本研究では、MVSの適用の可否を判定する新しい基準として、 SiO_2 と Al_2O_3 , $\text{FeO}^* \cdot \text{TiO}_2$ の各含有量の関係に基づく判定を提案したい。すなわち、MVSを適用したいメルトの化学組成をFig. 7b-dと比較し、 ΔMVS が0.4以下となる領域にプロットされるか否かを確認することで、より容易にMVS適用の可否が判定できると考えられる。ただし、Fig. 7で示した判定基準は初期メルト組成によって多少変化する可能性が考えられる。この判定基準が初期メルト組成にどの程度依存して変化するかを検討することは、今後の課題としたい。

4. まとめ

本研究では、富士火山の比較的未分化な玄武岩の組成を初期メルト組成として分別結晶作用シミュレーションを行い、Takeuchi (2015)で提案されたMVSの信頼性と適用条件について検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) MVSが成立する理由は、相平衡コントロール下において含水量と温度が粘性率に及ぼす影響の相殺だけでは完全には説明できない。
- (2) MVSを適用可能なメルトの含水量は SiO_2 量とともに変化する。
- (3) 共存する鉱物相にFe-Ti酸化物鉱物が含まれることで、相平衡コントロールによってメルト SiO_2 量が大きく変化することが、MVSが成立するための必要条件である。
- (4) SiO_2 - Al_2O_3 - FeO^* - TiO_2 含有量の関係は、MVSの適用可否を判定する基準になりうる。

本研究では、単一の玄武岩質メルトを初期組成とした、限られた条件でのシミュレーションに基づいて、MVSの主要な性質を検討してきた。この結果をより一般化するためには、(1) 初期メルト組成依存性、(2) $f\text{O}_2$ 条件に対する依存性、(3) より高含水量条件での性質などについて今後更なる検討を要する。

謝辞

本稿をまとめるにあたり，神戸大学の佐藤博明名誉教授，電力中央研究所の竹内晋吾博士，静岡大学理学部の北村晃寿教授には，原稿を改善するうえで有益なコメントをいただきました。以上の方々にお礼申し上げます。本研究は，科学技術振興機構グローバルサイエンスキャンパス，静岡大学「未来の科学者養成スクール」の経費で行いました。

引用文献

- 藤井敏嗣 (2007), 富士火山のマグマ学. 富士火山 (荒牧重雄・藤井敏嗣・中田節也・宮地直道編), 山梨県環境科学研究所, 233-244.
- Ghiorso M. S. & Sack R. O. (1995), Chemical mass transfer in magmatic processes IV A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquid-solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures. *Contribution of Mineralogy and Petrology*, **119**, 197-212.
- Giordano D., Russell J. K., & Dingwell D. B. (2008), Viscosity of magmatic liquids: A model. *Earth and Planetary Science Letters*, **271**, 123-134
- Gualda G. A. R., Ghiorso M. S., Lemons R. V. & Carley T. L. (2012), Rhyolite-MELTS: a modified calibration of MELTS optimized for silica-rich, fluid-bearing magmatic systems. *Journal of Petrology*, **53**, 875-890.
- 飯田晃子・藤井敏嗣・安田 敦 (2004), 富士火山, 貞観噴火と宝永噴火—ガラス包有物からのアプローチ—. 月刊地球号外No. 48, 131-138.
- 石橋秀巳・天野大和 (2017), 玄武岩質マグマの減圧結晶作用と噴火ダイナミクスに及ぼすプレ噴火条件の影響: 富士山1707年噴火玄武岩質マグマの例. 静岡大学地球科学研究報告, **44**, 17-29.
- 菅野拓矢 (2018MS), 玄武岩質マグマのサブプリニー式噴火の準備過程: 富士火山S-18噴火の例. 静岡大学総合科学技術研究科修士論文.
- Mader H. M., Llewellyn E. W. & Mueller S. P. (2013), The rheology of two-phase magmas: A review and analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **257**, 135-158.
- 高橋正樹・小見波正修・根本靖彦・長谷川有希絵・永井匡・田中英正・西 直人・安井真也 (2003), 富士火山噴出物の全岩化学組成—分析データ847個の総括. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, **38**, 117-166.
- Takeuchi S. (2011), Preeruptive magma viscosity: an important measure of magma eruptibility. *Journal of Geophysical Research*, **116**, B10201, doi:10.1029/2011JB008243
- Takeuchi S. (2015), A melt viscosity scale for preeruptive magmas. *Bulletin of Volcanology*, **77**, 41
- 山田早記・石橋秀巳 (2015), 富士火山で過去2200年間に噴出したマグマの分化メカニズム: 熱力学的相平衡シミュレーター“PELE”を用いた検討. 静岡大学地球科学研究報告, **42**, 37-49.
- 山元孝広・中野 俊・高田 亮・小林 淳 (2011), 富士火山東斜面における最新期火山噴出物の層序. 地質調査研究報告, **62**, 405-424.