

2026 年 7 月 14 日

国立大学法人東北大学
国立大学法人北海道大学

マグマ中での結晶生成の電子顕微鏡直接観察に成功 —高数密度ナノ結晶は地表付近で核形成—

【発表のポイント】

- 約 1000℃のマグマ中での結晶生成を電子顕微鏡下で直接観察することに成功しました。
- 噴火様式の遷移を記録する高数密度のナノ結晶は、マグマの液体部分が組成ゆらぎにより 2 相に分離したのち核形成した可能性があります。
- マグマの 2 相分離とナノ結晶の生成は火道浅部や地表付近で起こり、噴火様式に影響を与える可能性があります。
- 一方、ナノ結晶の生成がマグマ溜りや火道深部で爆発的噴火を誘発するという既往研究のモデルは否定されます。

【概要】

火山噴火の爆発性が何によって決定されているのかは、火山学における最大の未解決問題の一つです。近年、火山噴出物中のガラスだと思われていた部分に高数密度のナノ結晶（図 1）がみつかり、それが火山噴火の爆発性に与える影響が注目されていました。

東北大学大学院理学研究科地学専攻 無盡真弓助教（現：北海道大学大学院理学研究院地球惑星科学部門）、中村美千彦教授は、約 1000℃のマグマ中でナノ結晶が高数密度で生成する様子を電子顕微鏡下で直接観察することに成功し、それらが液相不混和^{（注 1）}と呼ばれる現象を経て核形成している可能性があることを明らかにしました（図 2）。このことは、そのような結晶を含むマグマが、火道浅部や地表付近を比較的ゆっくり上昇したことを意味します。液相不混和やナノ結晶の生成は、噴火の爆発性を変化させる可能性がある一方（図 3）、マグマが火道深部やマグマ溜りのような地下深部で生成し、爆発的な噴火を誘発するという既往のモデルは成り立たないと言えます。

本成果は、日本時間 7 月 9 日に地球科学分野のトップジャーナル「Geology」に掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

火山噴火の爆発性は、一般に、マグマの粘性に大きく左右されると考えられており、粘性が低く引き延ばされやすい苦鉄質なマグマは溶岩流のような非爆発的噴火に、粘性が高い珪長質なマグマは千切れて軽石や火山灰となり、爆発的噴火になりやすいと考えられています。一方で、同じ化学組成のマグマでも、一連の活動の中で爆発的噴火と非爆発的噴火の両方を起こす場合もあり、噴火の爆発性が何によって決定されているのかは、現代の火山学の解決すべき問題の一つになっています。近年、本研究の著者らの研究が端緒となり、マグマ中に高数密度で含まれる Fe 酸化物のナノ結晶が注目され始めました（図 1）。その理由は主に二つあり、一つはナノ結晶の生成がマグマの粘性を増加させるため、もう一つは、コップの壁面に気泡が付くように、ナノ結晶が不均質核形成と呼ばれる現象の下地となることで、マグマの発泡を促す効果があるためです。もしナノ結晶がマグマだまりのような深いところから存在していれば、これらの効果はマグマの上昇開始時点から噴火の爆発性に対して影響を与える可能性があり、火山防災を考えるうえでも重要です。しかし、ナノ結晶が、実際にいつ、どのように晶出するのかはよくわかっていませんでした。

今回の取り組み

そこで本研究では、ナノ結晶の晶出条件や晶出メカニズムを明らかにするために、マグマ中での結晶化の様子を、高倍率観察が可能な電界放出型の走査型電子顕微鏡（FE-SEM）で直接観察しました。その場で直接観察することで、ナノ結晶が晶出するタイミングや成長する様子がわかるというメリットがあります。マグマの結晶化を再現するために、FE-SEM に加熱試料ステージを挿入し、結晶が含まれていない天然の火山ガラスを急加熱してマグマを生成し、起こる変化を直接観察しました。その結果、到達温度がソリダス温度^{（注 2）}より低温の実験では、ナノ結晶が比較的高数密度で核形成し、その後ほとんど大きく成長することがなかったのに対し、ソリダス温度よりも高温の実験では、比較的低数密度で核形成し、その後、時間とともに成長する様子が観察されました（図 2）。さらに、その場観察実験後の急冷生成物を、FE-SEM よりも高倍率で観察可能な透過型電子顕微鏡（TEM）を用いて観察したところ、ソリダス温度より低温の実験産物では、ナノ結晶の周囲のガラスがナノメートルスケールの化学組成の不均質を呈していたのに対し、ソリダス温度より高温の実験産物には、化学組成の不均質は見られませんでした。このことから、ソリダス温度より低温の実験では、1 相だったマグマの液体部分が、Fe が豊富な部分と Si が豊富な部分の 2 相に、スピノーダル型と呼ばれる分離（液相不混和）を起こすことで、Fe が豊富な部分から Fe 酸化物のナノ結晶が容易に核形成できたと考えられます。スピノーダル型の液相不混和では液-液界面の生成によるエネルギー

一障壁が発生しないため、マグマが非常に細かく2相に分離し、それがFe酸化物ナノ結晶の極めて高い数密度の原因になると考えられます。液相不混和が生じる条件は、これまでの相平衡実験などから、火道の浅部や地表付近の環境下であると考えられます。このことから、そのような高数密度のナノ結晶を含む火山噴出物中では、マグマが浅いところ（火道の浅部や地表付近）まで上昇したのち液相不混和と結晶化が起こるだけの時間を経てから噴火したことを示すと考えられます。この結論は、一部の既往論文で主張されたような、マグマだまりのような深い場所でナノ結晶が晶出し爆発的噴火を引き起こすというモデルを否定するものです（図3）。

今後の展開

火山噴出物中に含まれる高数密度のナノ結晶を調べることは、地表付近で噴火の爆発性が変化する仕組みの解明につながると考えられます。また、マグマのようなケイ酸塩の熔融体でも、液相不混和が結晶の核形成頻度を増大させる可能性を示す結果として、火山学のみならず、結晶成長学・材料科学の分野にも波及効果があると期待されます。

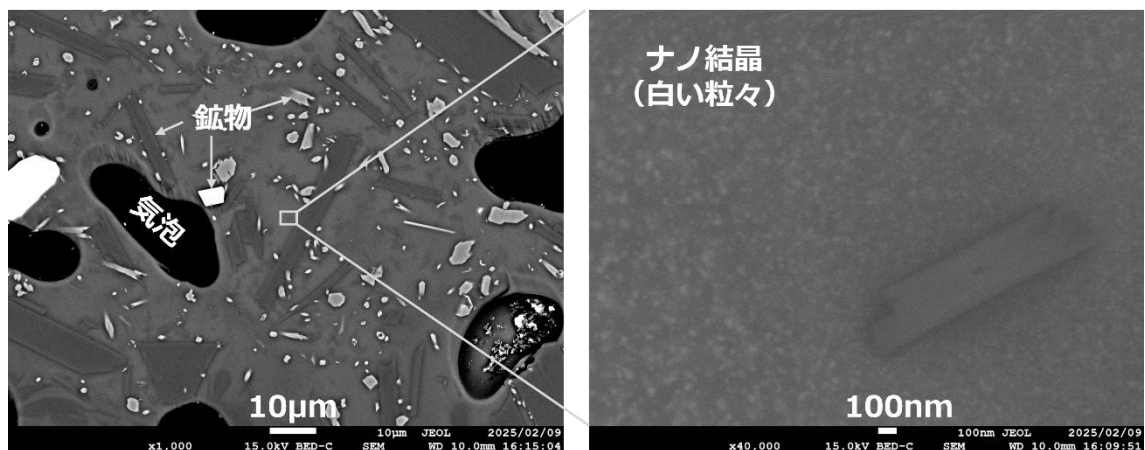


図 1. (左) 天然の火山噴出物中（霧島火山新燃岳 2011 年噴火）に観察されるナノ結晶の電子顕微鏡像（反射電子像）と、その均質な火山ガラスに見える場所（□）を拡大したもの（右）。ナノ結晶（明るい粒々）が晶出していることがわかる。輝度の違いは化学組成の違いを示し、種類の異なる鉱物が含まれていることを示す。

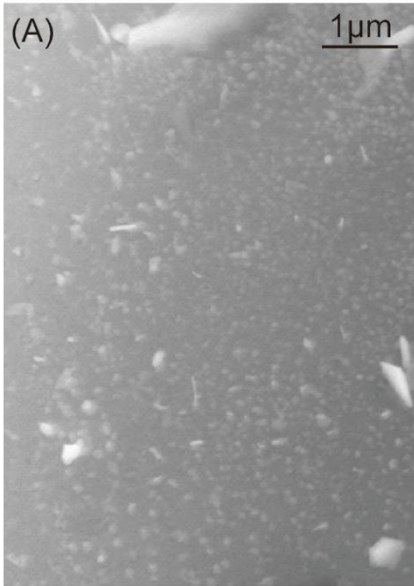
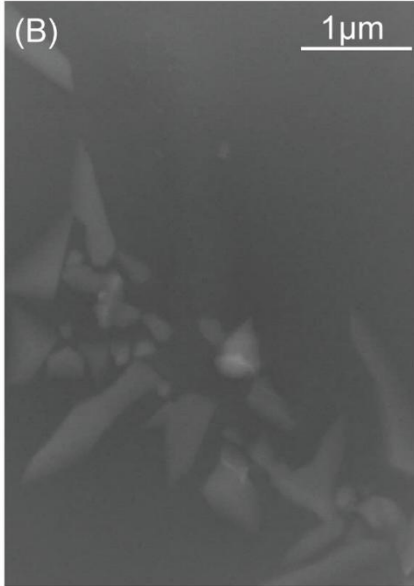
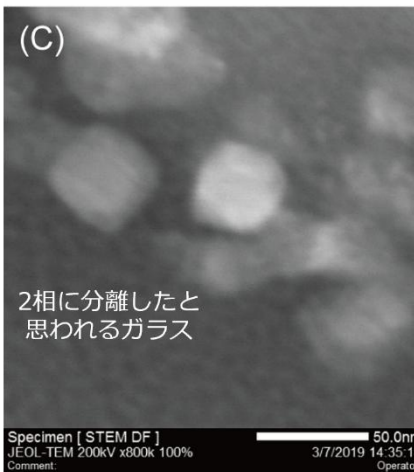
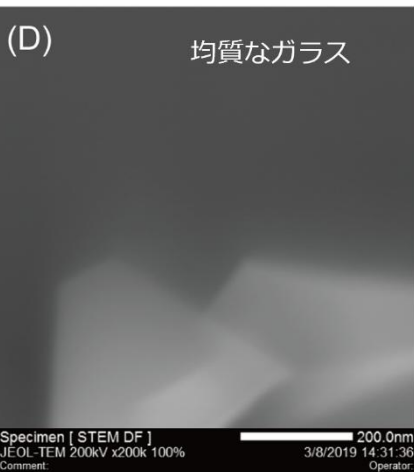
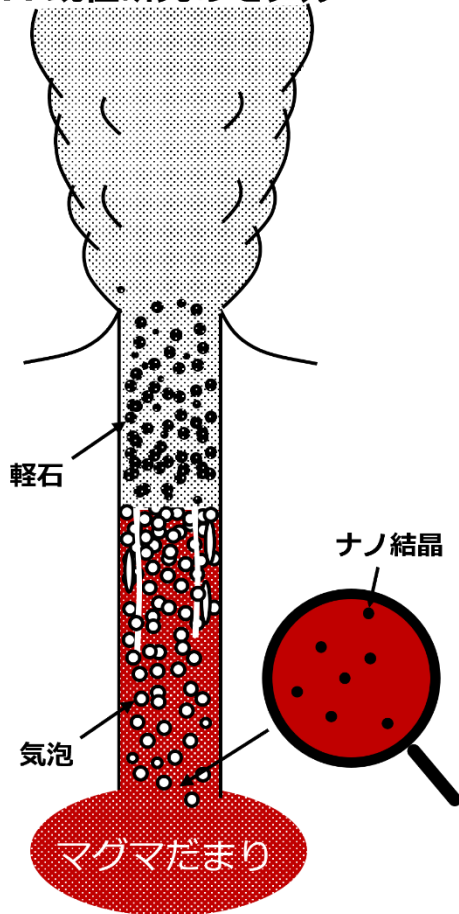
	ソリダス温度より低温 900℃	ソリダス温度より高温 950℃
その場観察 実験中の 二次電子像	(A) 	(B) 
その場観察 実験後の 高倍率観察	(C)  Specimen [STEM DF] JEOL-TEM 200kV x800k 100% 3/7/2019 14:35:14 Operator	(D)  Specimen [STEM DF] JEOL-TEM 200kV x200k 100% 3/8/2019 14:31:36 Operator

図 2. (A・B) 目標温度到達後約 40 分での電子顕微鏡像（二次電子像）と (C・D) 実験終了後に急冷回収した試料の高倍率観察の結果。比較的低温（本実験条件下でソリダス温度より低温）ではナノ結晶が晶出したままほとんど成長せず、比較的高温（ソリダス温度より高温）では、結晶が大きく成長したことがわかる。

※電子顕微鏡の画像は原論文の画像と同じものを使用し、一部改変しています。

A : 既往研究のモデル



B : 本研究のモデル

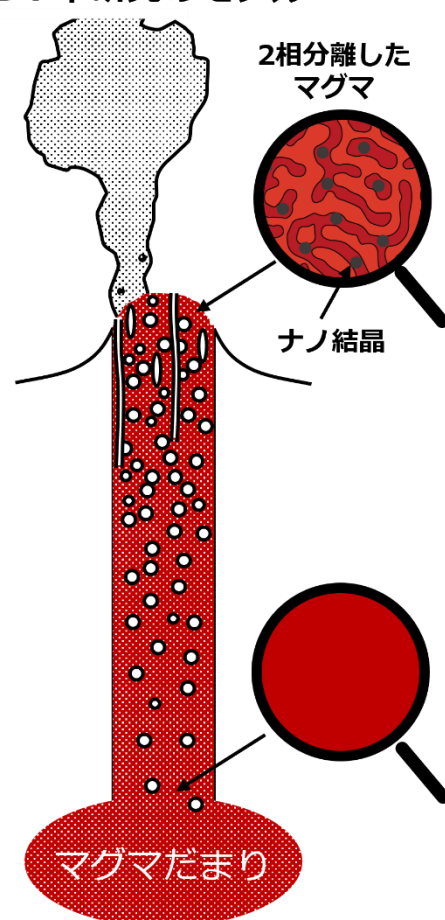


図 3. 想定されるナノ結晶の晶出場所。既往研究（A）は、マグマが火道深部やマグマ溜りのような深いところに存在した時点で生成することを想定しているのに対し、本研究（B）では、ナノ結晶の生成は火道浅部や地表付近で起こることが示された。

【謝辞】

本研究は JSPS 科研費課題番号 16H06348・22H00162・19K21048・22K14111、文部科学省による「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト」の助成・支援を受けたものです。

【用語説明】

注1. 液相不混和：液相不混和とは、水と油のように液体が分かれる現象で、ここでは均一な状態のマグマの液体部分が、液体のまま二つの相に分離する現象を言う。液相不混和には、核形成を伴い、液—液間の界面を持つ液滴が生じるバイノーダル型と、核形成や界面の形成を伴わずに、組成のゆらぎによって二つの相に分離するスピノーダル型の二種類の分かれ方がある。

注2. ソリダス温度：化学平衡状態で、マグマの結晶化が完了する（岩石が融け始める）温度。実際のマグマでは、過冷却状態となってソリダス温度以下でも液体部分が残る。

【論文情報】

タイトル：When and how Fe-oxide nanocrystals form: Insights from in situ FE-SEM and implications for eruption dynamics

著者：Mayumi Mujin^{*,1,#} and Michihiko Nakamura¹

*責任著者：東北大学大学院理学研究科地学専攻（現：北海道大学大学院理学研究院地球惑星科学部門） 無盡 真弓（むじん まゆみ）

¹東北大学大学院理学研究科地学専攻

#現所属：北海道大学大学院理学研究院地球惑星科学部門

掲載誌：Geology

DOI：10.1130/G54466.1

URL：https://doi.org/10.1130/G54466.1

【問い合わせ先】

（研究に関すること）

東北大学大学院理学研究科地学専攻

教授 中村 美千彦（なかむら みちひこ）

TEL：022-795-6636

Email：michihiko.nakamura.e8@tohoku.ac.jp

北海道大学大学院理学研究院 地球惑星科学部門

助教 無盡 真弓（むじん まゆみ）

電話：011-706-4642

Email：mujin@sci.hokudai.ac.jp

（報道に関すること）

東北大学大学院理学研究科

広報・アウトリーチ支援室

TEL：022-795-6708

Email：sci-pr@mail.sci.tohoku.ac.jp

北海道大学社会共創部広報課

TEL：011-706-2610

Email：jp-press@general.hokudai.ac.jp