

結晶と気泡を含むマグマ中での地震波の伝播を数学的に予測

マグマに含まれている気泡の割合が変化すると、その中で伝播する地震波の速度などが変化します。本研究では、マグマ中における地震波のP波の伝播を表現する方程式を数学的に導出し、気泡だけでなく、結晶の割合の増加がP波の伝播速度と波形変化に与える影響を明らかにしました。

火山噴火の予測において、地下のマグマだまり中に含まれている結晶と気泡の割合は重要なパラメータです。しかし、直接の観測が容易ではないことから、地表で観測される地震波のP波を用いて、それらを推定する試みがなされてきました。しかしながら、これまでの研究は主に気泡の増加に着目しており、結晶の増加が与える影響を考慮したものは多くありません。また、従来の理論研究はP波の伝播速度と振幅の減衰のみに対する解析にとどまっており、具体的な波形変化などを記述できる数理モデルは確立されていません。

本研究では、理論的な手法により、マグマ流動を表す2種類の数理モデルから、結晶と気泡を含むマグマ中のP波伝播を表現する新しい方程式を導出しました。その結果、気泡と結晶の割合が増加するとP波の伝播速度が減少すること、その度合いは結晶に比べ気泡の方が著しく大きいことを明らかにしました。一方、減衰に与える影響は、気泡よりも結晶の方が顕著であることも分かりました。また、2種類のモデルの間で、周波数や気泡の割合に対する波形の依存性に違いが見られました。

本成果により、マグマ中に含まれる結晶や気泡の割合などのパラメータからP波の波形の時間発展を計算することが可能となりました。今後はこの方程式と機械学習を組み合わせ、P波の波形から結晶や気泡の割合を推定し、火山噴火の予知システムの構築を目指します。

研究代表者

筑波大学システム情報系

金川 哲也 准教授

研究の背景

地下のマグマだまり中の発泡マグマは、液体であるケイ酸塩メルト^{注1)}（融液）、固体粒子である結晶、揮発性溶融物^{注2)}を主成分とする気泡（気体）から成る固気液三相流体です。マグマ中に含まれている結晶と気泡の割合は、火山噴火の時期や規模を予測する上で重要なパラメータですが、直接の観測が容易ではないことから、地表で観測される地震波の P 波^{注3)}を用いてそれらを推定する試みがなされてきました。例えば、P 波はマグマが気泡を含む場合に伝播速度が大幅に減少することが知られており、この特性を活かした推定方法が提案されています。

しかしながら、これまでの研究の多くは主に気泡の増加のみに着目しており、結晶の増加が与える影響を考慮したものは限られています。また、従来の理論研究は、P 波の伝播速度と振幅の減衰のみに対する線形（微小振幅）解析にとどまっています。振幅の大きな波で生じる非線形効果^{注4)}を考慮した数理モデル^{注5)}は確立されていません。

研究内容と成果

本研究ではまず、マグマの流動を表現する2つの数理モデルとして、マグマを結晶とメルトの混合物と気泡の二相から成るとみなす実効二流体モデル方程式と、さらに気泡まで混ぜた混合物の単相とみなす三相混合体モデル方程式の2種類を構築しました（参考図）。次に、約10本の方程式から構成される両モデルに理論近似を行い、マグマ中のP波伝播を表現する1本の方程式をそれぞれ導出しました。これら2種類の方程式について、P波の伝播速度と波形の時間変化を調べました。

その結果、どちらのモデルでも、気泡と結晶の割合は増加とともにP波の伝播速度を減少させ、その割合は結晶に比べ気泡の方が著しく大きくなることが明らかになりました。一方、減衰に与える影響は結晶の方が顕著であることも分かりました。さらに、2種類のモデルの間では、P波の周波数に対する波形の依存性と、気泡の増加がP波の減衰に与える傾向において違いがあることも確認されました。以上の成果は、観測が困難な発泡マグマの挙動の予測として重要な知見です。

今後の展開

本研究により、マグマ中に含まれる結晶や気泡の割合などのパラメータからP波の波形の時間発展を計算することができる方程式が得られました。この方程式は、ガラスや水あめなど、マグマ以外の高粘度材料にも適用が期待できるものです。今後は、この方程式と機械学習を組み合わせ、地上で得られたP波の波形から、直接観測できない地下深部の結晶や気泡の割合を推定し、将来的には火山噴火の予知を可能とするシステムの構築を目指します。

参考図

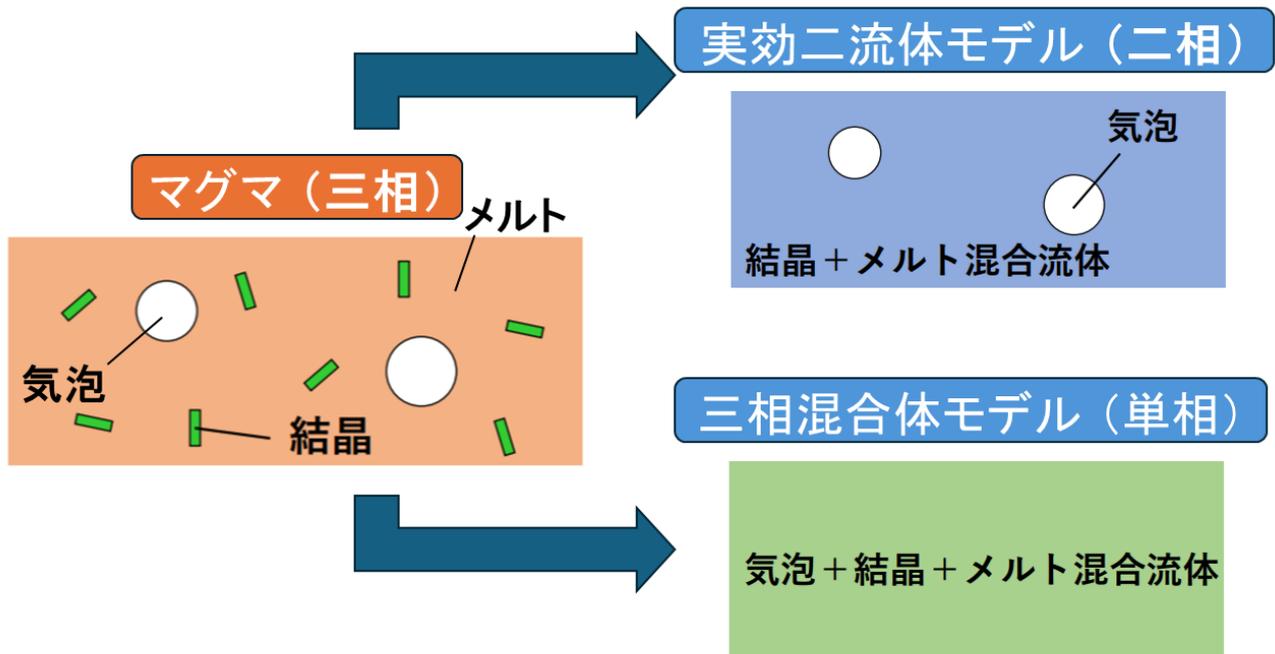


図 本研究で用いたマグマの数理モデルの概要図

固気液三相媒質であるマグマ（図左）を、結晶とメルトの混合流体を仮想的に1つの相とみなした実効二流体モデル（図右上）と、さらに気泡まで混ぜた三相混合体モデル（図右下）の2種類でモデル化した。

用語解説

注1) ケイ酸塩メルト (silicate melt)

地球のマントルの主成分であるケイ酸塩鉱物が高温で溶けて液体になったもの。マグマの主成分。

注2) P波 (P-wave)

地震を伝える波動のうち、素早く微弱変動を伝える縦波。

注3) 揮発性溶融物 (volatile-rich melt)

マグマ中に溶け込んだ気体成分（水蒸気や二酸化炭素など）を多く含む液体状の物質。圧力の低下により、容易に気化する。

注4) 非線形効果

振幅が大きな波において、波形が変形したり衝撃波が形成されるなど、非線形な現象が生じること。

注5) 数理モデル (mathematical model)

実際の現象を数式で表し、計算によってその性質を再現できるようにしたもの。

研究資金

本研究は、JSPS 科研費 (21J20389、22K03898)、NEDO 官民による若手研究者発掘事業マッチングサポートフェーズ (JPNP20004)、大学×国研×企業連携によるトップランナー育成プログラム TRiSTAR (文部科学省：世界で活躍できる研究者戦略育成事業) の一環として実施されました。

掲載論文

【題 名】 Weakly nonlinear wave propagation in magma containing crystals and bubbles
(結晶と気泡を含むマグマ中の弱非線形波動の伝播)

【著者名】 倉田 大地 (筑波大学大学院理工情報生命学術院 博士前期課程2年)、鮎貝 崇広 (筑波大学大学院理工情報生命学術院 博士後期課程、研究当時)、金川 哲也 (筑波大学システム情報系 准教授)

【掲載誌】 *Physics of Fluids*

【掲載日】 2025年4月9日

【DOI】 10.1063/5.0251612

問い合わせ先

【研究に関すること】

金川 哲也 (かながわ てつや)

筑波大学 システム情報系 准教授

URL: <https://kanagawa.kz.tsukuba.ac.jp>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp