

論文の内容の要旨

論文題目 **Origin of Alkaline Basalt Volcanism Inferred from Noble Gas Isotopic Systematics: Implications for Mantle Dynamics in Back Arc Region of Subduction Zone**

希ガス同位体組成に基づくアルカリ玄武岩の起源に関する地球化学的研究：沈み込み帯の背弧におけるマンテル内物質循環の解明に向けて

氏名 角野 浩史

日本列島などの沈み込み帯においては、スラブの脱水分解反応に起因する流体成分がウェッジマンテルに供給され、その融点を下げることによってマグマが生成する。しかし沈み込み帯の背弧域、特に背弧海盆の周辺にみられるアルカリ玄武岩は、その微量元素組成に沈み込んだ物質の影響が見られないことや、直下の上部マンテルにスラブが到達してしない地域でも噴出することから、通常の沈み込み帯の火成活動とは異なるプロセスによると考えられている。その起源としては、海洋島玄武岩と類似する微量元素組成や Nd-Sr 同位体組成、あるいは他の大陸周縁域に比べて高い上部マンテルの温度から、マンテル深部を上昇源とするプルームが有力視されているが、プルームの存在そのものやその上昇源については明らかにされていない。希ガス、特に He は大気中の存在度が小さく、地球の各所で同位体比 ($^3\text{He}/^4\text{He}$) の変動が大きいため、火成活動の起源に対して重要な制約を与える。例えば大気中の $^3\text{He}/^4\text{He}$ ($R_A=1.4\times 10^{-6}$) を基準とすると、中央海嶺玄武岩 (MORB) に代表される上部マンテル物質は $8 R_A$ 程度、海洋島玄武岩から推定される下部マンテル物質は $37 R_A$ 以上、そして大陸地殻物質は $0.02 R_A$ 以下であることが知られている。その他の希ガスの同位体比や元素比も同様に地球の各所で異なり、これらの希ガス同位体組成から火成活動に関与した物質を推定できる。本研究では、西南日本の背弧域に産するアルカリ玄武岩とマンテル捕獲岩の希ガス同位体組成を測定することによって、アルカリ玄武岩火成活動の起源を探り、

沈み込み帯の背弧域におけるマントル内の物質循環を明らかにすることを目的とした。

ホットスポットや大陸リフト帯に産するアルカリ玄武岩の希ガス同位体組成に関する研究は多くなされているが、島弧地域については非常に限られている。これは試料中の希ガス量が極めて少ないため、測定可能な試料が限られていることによる。そこで本研究では既存の希ガス分析システムに (1) 検出系にイオンカウンティングを導入することにより検出下限を二桁向上させ、(2) 測定用計算機プログラムを改良し、(3) 希ガス精製ラインを改良し一試料あたりの測定時間を短縮するなど手を加え、改良前に比べて二桁少ない He 量 (^3He で 4×10^{-18} mol) に対しても 10% の精度での同位体比測定を可能にした。また試料から希ガスを抽出するための破碎チャンバーと加熱炉を作製した。

試料としては、九州北西部の東松浦半島周辺と北松浦半島周で採取したアルカリ玄武岩中のかんらん石と輝石の斑晶を用いた。これは玄武岩の石基部分の希ガスが噴出時に大気と平衡に達し、マグマ本来の同位体組成を失っているのに対して、これらの斑晶はマグマ溜まりで早期に晶出したためマグマ本来の希ガス同位体組成を保持していることによる。斑晶を除いた石基部分は、K-Ar 法による年代測定に用いた。また九州北西部と韓国・済州島に産するマントル捕獲岩を採取し、同様に希ガス同位体測定に用いた。鉍物試料からのガス抽出には真空中で機械的に破碎する破碎法と、真空中で加熱し完全に融解・脱ガスさせる加熱法を用いた。

アルカリ玄武岩について測定した各希ガス同位体比のうち、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ と $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ を図 1 に示す。K-Ar 法による年代測定では東松浦の全試料が 3Ma の噴出年代を示したのに対し、北松浦の試料は 7Ma 前後と 3Ma

に分かれた。東松浦のかんらん石の $^3\text{He}/^4\text{He}$ は MORB より若干低い $6.1 \sim 7.4R_A$ であったが、北松浦の 7Ma のかんらん石は $3R_A$ 前後の低い値を示した。また輝石は同じ玄武岩のかんらん石よりも低い $^3\text{He}/^4\text{He}$ を示す傾向がみられた。これらの $^3\text{He}/^4\text{He}$ は、鉍物中の流体包有物からガスを選択的に抽出する破碎法を用いて得られたため、結晶中の U、Th の放射壊変によって噴出後に生成する、放射壊変起源の ^4He の寄与は考えなくてよい。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ が高く、かんらん石と輝石の $^3\text{He}/^4\text{He}$ に差がない東松浦の

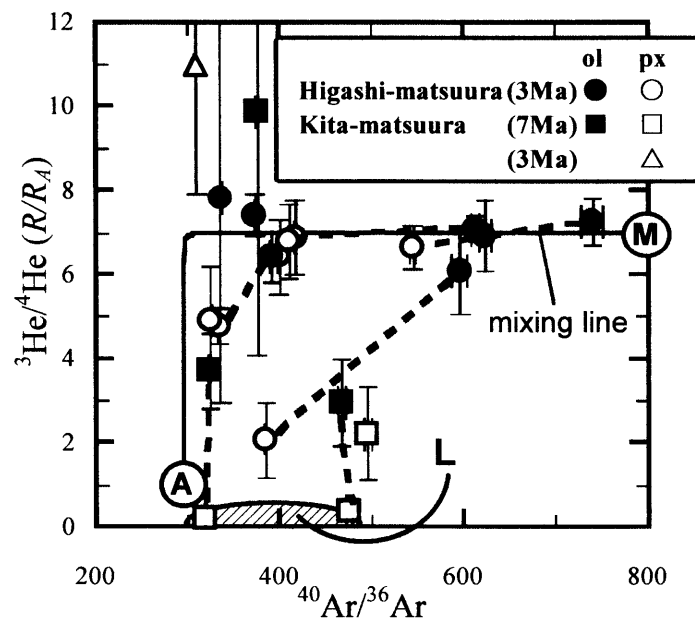


図 1. アルカリ玄武岩斑晶の He-Ar 同位体組成。点線は同一玄武岩中のかんらん石(ol)と輝石(px)、“mixing line”はアルカリ玄武岩マグマの起源マントル(M)と大気(A)の混合曲線を示す。L(斜線部)は推定された九州地下の最上部マントル。

試料から、アルカリ玄武岩の起源マントルは図1のMのような同位体組成であったと推定できる。そして噴出時あるいは噴出後に混入した大気他に、Lのような同位体組成の希ガスを含む物質がマグマに混入している。マグマの温度における輝石とかんらん石中の希ガスの拡散速度を考慮すると、混入はマグマの上昇過程で起こったと考えられる。Lに近い同位体組成を示す北松浦の玄武岩には、地殻とマントルの境界付近(深さ約25km)に滞留し、やや分化したマグマが混入した形跡が見られる。従ってこのマグマがLの希ガス同位体組成を持っていたと考えることができる。滞留したマグマの同位体組成を変化させたのは、(1)マグマ溜まり周囲の上部マントル物質か、(2)マグマ溜まり上の下部地殻物質のいずれかと考えられるが、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比や主成分元素組成から(1)である可能性が高い。すなわち九州地下の比較的浅い上部マントルは、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ が $0.2R_A$ 以下、 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ が300~500程度と、MORB起源の上部マントル($^3\text{He}/^4\text{He} = 8 \pm 1R_A$ 、 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} > 28000$)とは大きく異なる。これは九州地下の上部マントルの一部が、過去の沈み込みによってもたらされた、 ^4He の親元素であるUやThと、大気由来のArによって汚染されていることを示唆している。

九州北部のマントル捕獲岩のうち、佐賀県唐津市高島で採取した試料のHe及びAr同位体組成は、図2に示す三成分の混合で説明される。三成分のうち一つは大気で、他の二成分は $^3\text{He}/^4\text{He}$ がMORBより若干低く、 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ が高い端成分(M)と、MORBより有意に高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ をもち、 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ が低い端成分(P)である。希ガス含有量が高く、かつ特徴的な $^3\text{He}/^4\text{He}$ を示す二試料(図2のA、B)に対し、段階破碎法を用いて希ガスを測定した。バルクで低い $^3\text{He}/^4\text{He}$ を示す試料Aは比較的一定した $^3\text{He}/^4\text{He}$ を示すのに対し、バルクで高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ を示す試料Bは、破碎の進行とは無関係に $^3\text{He}/^4\text{He}$ が大きく変動し、その範囲は $8.5 \sim 11.8R_A$ であった(図3)。このことは試料Bに、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ の異なる流体包有物が含まれていることを示唆している。これらの試料中の流体包有物を鏡下で観察したところ、試料Aには閉じたク

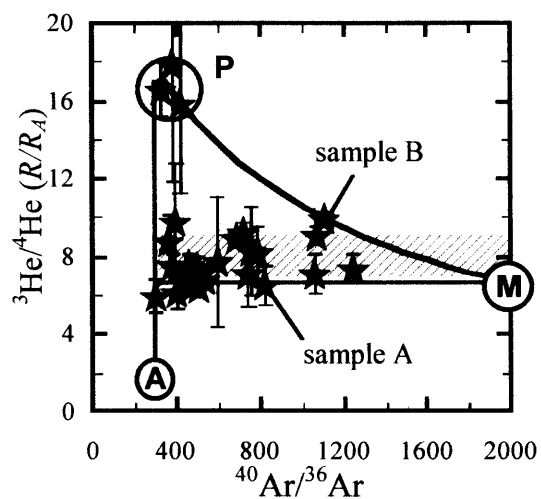


図2. 高島に産するマントル捕獲岩のHe-Ar同位体組成。曲線はそれぞれ大気(A)、プリューム(P)、アルカリ玄武岩マグマ(M)による混合曲線を示す。斜線部はMORB。

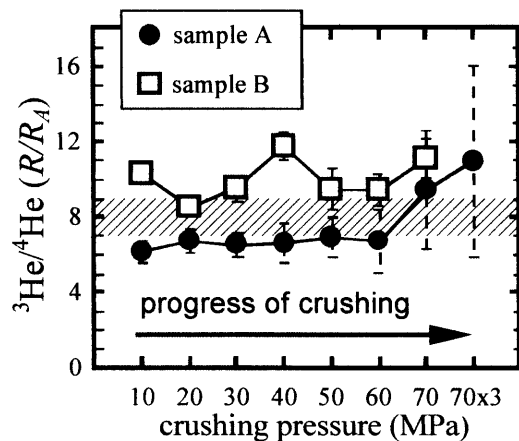


図3. 段階破碎法による捕獲岩A、BのHe同位体比。横軸は破碎に用いた油圧プレスの圧力。斜線部はMORBの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 。

ラック状に取り込まれた二次的流体包有物が非常に多く含まれていた。一方試料 B には二次的流体包有物の他、捕獲岩の形成時もしくは二次的流体包有物より以前に取り込まれた、粒径が比較的大きく点在する流体包有物（便宜上初生的流体包有物と呼ぶ）が多く見られた。従って、低い ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ の He は二次的流体包有物、高い ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ の He は初生的流体包有物にそれぞれ含まれていると考えられる。捕獲岩が存在したマントルの推定温度（1000-1100°C）と He の拡散速度から、二種の流体包有物のうちいずれかは噴出直前に捕獲岩に取り込まれた必要がある。高島とその周囲（東松浦）で採取した玄武岩が二次的流体包有物とほぼ等しい ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ を示すことと、それぞれの流体包有物の形態を考慮すると、その希ガスは捕獲岩が玄武岩マグマに取り込まれた際にマグマから混入したものと結論できる。

一方初生的流体包有物に含まれる高い ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ は、本研究で測定したアルカリ玄武岩の噴出以前に、下部マントル由来の He が上部マントルに存在したことを示している。アルカリ玄武岩の噴出以前、島弧火成活動が盛んであった頃の九州北部では、直下に沈み込んだ太平洋プレートが存在していたため、下部マントル由来の物質が上昇してきたとは考えにくい。アルカリ玄武岩が海洋島玄武岩に似た地球化学的特徴を示すことを考慮すると、その起源物質が下部マントル由来の He をもたらしたと考えるのが妥当である。本研究で測定したアルカリ玄武岩に高い ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ は見出されていないが、ハワイなどのホットスポット地域においては、プルーム上昇の初期にプルーム本来の希ガスを多く含む玄武岩が噴出し、以後は周囲の上部マントルによる希ガスの混染を大きく受けた玄武岩が噴出したことが知られている。これと同様に、本研究で扱ったアルカリ玄武岩の噴出以前に、プルーム由来の希ガスを多く含むマグマあるいは流体が上昇し、のちに捕獲岩として噴出した一部のマントル物質に高い ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ を残した可能性がある。済州島のマントル捕獲岩の ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ から、プルーム周囲の上部マントルは MORB と同程度か、それより若干低い値をもつと考えられる。本研究で測定したアルカリ玄武岩が示す MORB より若干低い ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ は、揮発性成分が初期のメルトに持ち去られたあと、この様な上部マントルから He の供給を受けたことにより、プルーム自体の ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ が年代とともに変化した結果であると説明することができる。この考えは、北松浦や東松浦のアルカリ玄武岩が、西南日本のアルカリ玄武岩では最も MORB に近い Nd-Sr 同位体組成を示すことと矛盾しない。

本研究で得られた希ガス同位体組成によって、アルカリ玄武岩火成活動の起源が、下部マントルを上昇源とするマントルプルームであることが示された。Nd-Sr 同位体組成からは、アルカリ玄武岩の起源物質に沈み込んだ陸源堆積物あるいは変質した海洋地殻が含まれていると考えられている。また西南日本下のマントルにおいては、沈み込んだスラブが上部・下部マントル境界に滞留していることが地震波トモグラフィーから示唆されている。従ってアルカリ玄武岩火成活動を引き起こしたプルームは、下部マントル付近まで沈み込んだ地殻物質が再び上昇（リサイクル）してきたものである可能性がある。海洋島玄武岩の地球化学的端成分のうち一つは、地殻物質のリサイクルに起源をもつという説が最近有力であるが、沈み込み帯の背弧域はまさにそのリサイクルが直接行われている場所かもしれない。