

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540566

研究課題名(和文) 鉱物-珪酸塩メルト間元素分配挙動に対する圧力効果の解明

研究課題名(英文) Pressure effect on element partitioning between minerals and silicate melt

研究代表者

鈴木 敏弘 (SUZUKI, Toshihiro)

東京工業大学・理工学研究科・流動研究員

研究者番号：40235974

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：岩石に希土類元素など26種の元素を添加した試料を用いて、3～25万気圧の圧力範囲で融解実験を行い、鉱物-珪酸塩メルト間の元素分配係数に対する圧力効果を調べた。従来の研究では、同じ価数を持つイオン間の分配係数の相対的大小関係は、圧力が増加しても変化しないと考えられてきた。しかし本研究の結果、価数の小さなイオンほど分配係数の圧力変化には元素間の差が大きく、大小関係が逆転する事が明らかになった。最も著しい変化を示す1価イオンでは、KやRbのように常圧では鉱物中にほとんど入らない元素が、超高压下になると他の元素よりも分配係数が大きくなり得る事が明らかになった。

研究成果の概要(英文)：High pressure melting experiments on rocks doped with 26 trace elements (rare earth elements, Sc, Y, Ga, In, Sr, Li, Rb, Cs, Ce, Zr, Hf) were performed from 3 to 25 GPa, and the partitioning of elements between silicate melt and coexisting minerals (Garnet, CPx, Merwinite, K-hollandite, Ca-perovskite, Mg-perovskite) were investigated. Among ions which have the same valence, it has been believed that the ion which has the maximum partition coefficient will not change under any pressure conditions. The present experimental results, however, are clearly showing that they can change under very high pressure conditions. This effect is larger in the ions which have smaller valence. For example, among monovalent ions, K and Rb are representative incompatible elements at normal pressure conditions, but their partition coefficients can be larger than other monovalent ions under ultra-high pressure conditions.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学 岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：元素分配 超高压 鉱物 珪酸塩メルト 微量元素

1. 研究開始当初の背景

鉱物-珪酸塩メルト間元素分配挙動は、地球の化学的進化を解明するための重要な情報である。この元素分配挙動が鉱物の結晶構造と密接に関連している事を最初に指摘したのは Onuma et al. (1968)であった。彼らは、測定された分配係数をイオン半径に対してプロットすると(PC-IR 図)、同じ価数を持つイオンの分配係数は、滑らかな曲線を描き、その曲線がピークとなるイオン半径は、結晶構造中に存在する陽イオンサイトに“最適な大きさ”を示していると考えた。後に Blundy and Wood (1994)は、イオンの置換により結晶中に発生する歪みエネルギーモデル(Brice, 1975)を用いて、小沼たちの考えを定式化することに成功した。この Lattice Strain Model は、鉱物-珪酸塩メルト系での元素分配を論じる時に現在では幅広く用いられている。

Lattice Strain Model は元素分配挙動を考察する上でとても有効な手段として重用されているが、元素分配挙動のすべてを説明できているわけではない。分配係数曲線のピーク位置が、陽イオンサイトに対する最適なイオンの大きさを示しているならば、イオンの価数が異なってもピーク位置は同じはずである。実際に常圧付近で観測されている分配係数から PC-IR 図を描くと、各イオン価数でほぼ同じ位置にピークが現れる。しかし、20 万気圧を超える超高压力下で測定された分配係数から PC-IR 図を描くと、分配係数曲線の示すピーク位置は、イオンの価数によって異なっており(例えば、Corgne and Wood, 2004, Corgne et al, 2005)、元素分配挙動が圧力とともに変化する事を示唆している。しかし、元素分配挙動と圧力の関係を系統的に研究した結果はほとんど無く、ある圧力で測定された分配係数が、そのまま地球深部の元素分化過程に適用されていた。

2. 研究の目的

鉱物-珪酸塩メルト間の元素分配挙動に対して、圧力がどのような影響を与えるのかを解明するため、本研究では最高 2.5 万気圧までの範囲で岩石の融解実験を行い、得られた試料の微量元素濃度を LA-ICP-MS を用いて測定することにより、元素分配係数の圧力変化を詳しく観察した。珪酸塩メルトと共存する鉱物相は圧力とともに変化してしまうため、本研究ではメルトと共存可能な圧力範囲が広い Garnet を主に用いて、元素分配挙動の圧力変化を調べた。このほかにも、Garnet よりも大きな陽イオンサイトを持つ Merwinite や、下部マントルで安定相となる、Mg-Perovskite、Ca-Perovskite 等についても、分配係数の測定を行った。

3. 研究の方法

(1) 出発物質の作成

地質調査所から提供されている標準岩石

試料 JB1 (アルカリ玄武岩)の粉末に 26 元素 (Sc, Y, Ga, In, Co, Sr, Li, Rb, Cs, Ge, Zr, Hf 及び希土類元素)の酸化物、または炭酸塩試薬を 1000~2000 $\mu\text{g/g}$ 加えて良く混合し、これを 1350 で加熱、融解後に急冷し微量元素添加用ガラスを作成した。このガラスを JB1、カンラン岩(KLB)、Ca を多く含む組成(MR)の試料に 10wt%混合する事により、微量元素を 100~200 $\mu\text{g/g}$ 含んだ各種出発物質を作成した。

(2) 岩石融解実験

超高压融解実験には、東京工業大学に設置されている川井型マルチアンビルを用いた。二段目アンビルのトランケーションサイズは、3GPa までは 11mm、5~20GPa では 5mm、25GPa の実験では 3mm を用いた。試料カプセルには Graphite を用いたので、実験中の酸素雰囲気は C-CO 平衡条件で維持されていたと考えられる。ヒーターには LaCrO_3 を用い、MgO チューブにより Graphite カプセルと電気的に絶縁した。LA-ICP-MS 分析で用いるレーザービーム径よりも十分に大きな結晶 (30 μm 以上)を得るために、本研究ではまず試料を目的温度よりも 100 程度高い温度まで加熱し、その後一分間に 1~10 の早さで冷却し、目的温度まで降下させた。そして 30~120 分ほど高温高压状態を保持させた後に急冷、圧力を解放して試料を回収した。

(3) 試料組成分析

得られた試料は、断面を研磨した後、東京工業大学に設置されている EPMA を用いて主成分元素組成を測定した。微量元素の分析は、京都大学理学部、平田研究室の LA-ICP-MS 装置を用いた。レーザーには ArF エキシマ・レーザーを用いた。ICP-MS には四重極型質量分析計 (ThermoElectron VG PlasmaQuad 2) 及びセクター型質量分析計 (Nu Instruments ATTOM) を用いて、29 同位体を測定した。本研究の LA-ICP-MS 分析は、すべて信号強度の時間変化を記録する TRA モードで測定した。各測定では、まずレーザーを照射しない状態でバックグラウンドを 40 秒間測定し、その後 30~50 秒間レーザーを照射して試料からの信号を測定した。得られた信号強度の時間変化を観察する事により、試料組成の均一性も検証した。例えば、鉱物試料がごく小さなメルト含有物を含んでいた場合、液相濃集元素である La や Cs 等の信号が大きく変動する。このような変動が観察された場合には、測定結果を排除した。定量分析用の標準物質には NIST-610 を用い、EPMA により測定された Ca、または Fe の濃度を内部標準として微量元素濃度を求めた。

4. 研究成果

(1) Garnet の元素分配挙動

本研究では、元素 X の分配係数 D_x は、固相中の X のモル濃度を液相中のモル濃度で割

った値で示す。Garnet 結晶構造中には、配位数の異なる3つの陽イオンサイト、Xサイト(8配位)、Yサイト(6配位)、Zサイト(4配位)が存在する事が知られている。例えばPyrope($Mg_3Al_2Si_3O_{12}$)では、XサイトにMg、YサイトにAl、ZサイトにSiが入っている事から、Mgよりも大きな元素はXサイトに入り、Siよりも小さな元素はZサイトに入ると考えて良い。始めに述べたPC-IR図を描くと、これらの陽イオンサイトに対応して、分配係数の最大値が3ヶ所に現れる。ただし、超高压力下では $MgSiO_3$ 組成のGarnet(Majorite)が存在する、この場合、YサイトにはSiとMgが入っており、中間の大きさを持つ元素については、XとYサイト、あるいはYとZサイトのように、2つのサイトに入る可能性を考慮する必要がある。

出発物質にアルカリ玄武岩JB1を用いた実験では、3から20GPaの範囲でGarnetがメルト相と共存して出現し、分配係数の圧力変化を測定する事ができた。得られた分配係数のうち、8配位(Xサイト)に入ると考えられる元素のPC-IR図を図1に示す。

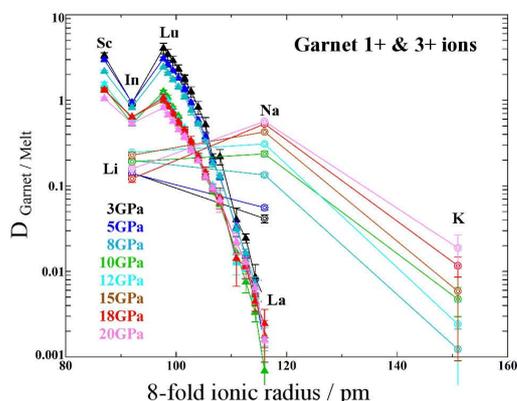


図1 JB1の高圧融解実験で得られた、GarnetXサイトに入る1価、3価イオンのPC-IR図。5GPa以下ではGarnet中のK濃度が検出限界以下であったため、分配係数は測定できなかった。

1価イオンはLiのイオン半径がMgとほぼ同じ事から、すべてのイオンがXサイトに入っていると考えられる。それぞれの分配係数を見ると、 D_{Li} は圧力が変化してもほぼ同じ値を示しているが、 D_{Na} と D_K は圧力の上昇とともに分配係数が増加している事が分かる。

3価イオンの場合、全体的に圧力の上昇とともに分配係数が減少する傾向が観察された。図1の3価イオンの曲線を見ると、Inの分配係数が異常な値を示している事が分かる。Inは3価だけでなく1価イオンとなる可能性もあるため、このような異常な値を示すのではないかと推察されている(例えば、Van Westrepen et al., 1999)。図1には示されていないが、AlはYサイトに入ると考えられ、Yサイトに対応した分配係数のピークはこの付近にあると考えられる。GaはX、Yサイト

の中間の大きさを持っているため、 D_{Ca} が小さな値を示していた。このYサイトに関連していると考えられる D_{Al} 、 D_{Ca} については、明瞭な圧力依存性は認められなかった。

図には示していないが、2価イオンの場合どの元素もMgよりも大きなイオン半径を持っているため、今回測定したすべての元素はXサイトに入っていると考えられるが、PC-IR図上にプロットしても単純な形を示さなかった。これは、2価イオンに多い遷移金属元素の分配係数が、配位子場効果によって変化するためと解釈されている(例えば、Matsui et al., 1978)。そこで遷移金属以外の3元素(Mg、Ca、Sr)だけを見ると、単純なピークと見なす事が出来た。この3元素のうち、 D_{Sr} は圧力の上昇とともに増加しているが、 D_{Mg} と D_{Ca} はあまり変化していなかった。4価イオンについては、明確な分配係数のピークは認められなかったが、SiがZサイトに入る事から考えて、Siの位置付近にZサイトに対応するピークが現れていると考えられる。

今回得られたGarnet元素分配挙動の圧力依存性のなかで、注目されるのはPC-IR図に現れる分配係数ピーク位置の圧力変化である。図1に示されているように、3GPaでのピーク位置は1価、3価ともに90pm付近に存在する。しかし20GPaでは3価のピーク位置は殆ど変化していないのに対し、1価のピーク位置は110~120pmへと大きく変化している。このようなイオンの価数ごとに圧力効果が異なる原因は、イオン圧縮率の差が原因であると考えられ、本研究ではGarnetだけでなく後述するように他の鉱物でも確認されている。この圧力による分配係数ピーク位置の変化については、後に詳しく述べる。

(2)CPxの元素分配挙動

JB1組成の高圧融解実験では、3から12GPaの圧力範囲でCPxが出現し、元素分配係数を測定できた。図2に1価と3価イオンのPC-IR図を示す。

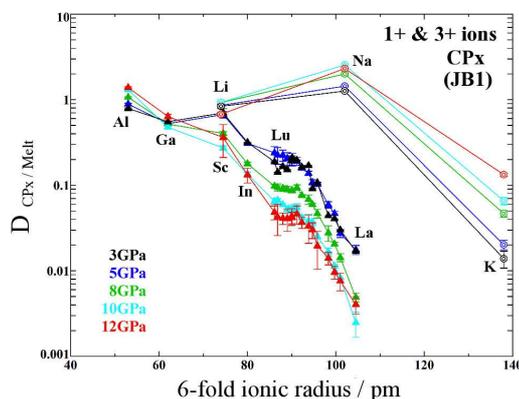


図2 CPxで測定された1価、3価イオンのPC-IR図。

CPxの場合もGarnetと同じように3種類の陽イオンサイト、M1サイト(6配位)、M2サイト(8配位)、Tサイト(4配位)を持っている。

しかし、M1 サイトと M2 サイトの大きさが比較的近いため、分配係数のピークは相互に重なり合っており、各イオンがどのサイトに入っているかを判別するのは難しい。このため、図2には測定したすべての元素を、6 配位イオン半径を用いて PC-IR 図にプロットした。

3 価イオンでは Al から La まで分配係数が連続的に減少しているように見えるが、最も小さな Al は T サイトと M1 サイトに入る事が可能で、一方希土類元素の多くは M2 サイトに入ると考えられるので、3 つのサイトに関連したピークが重なっていると考えられる。また、Sc より大きなイオンは圧力の上昇に伴い分配係数が減少しているが、Al だけは分配係数が上昇している。これは、Ga を境にしてイオンの入っているサイトが変化しているためと考えられる。

(3)Merwinite の元素分配挙動

Merwinite の端成分は $\text{Ca}_3\text{MgSi}_2\text{O}_9$ で、Si の入る 4 配位サイト、Mg の入る 6 配位サイト、Ca の入る 9 配位サイトの 3 種類の陽イオンサイトを持っている。特に、9 配位サイトは Garnet や CPx の 8 配位サイトよりも大きいため、Merwinite には大きなイオンが入りやすい。MR 組成の融解実験から得られた 1 価と 3 価イオンの PC-IR 図を図3に示す。9 配位サイトに対応して、100pm 以上の大きなイオン半径の位置にピークが現れている。

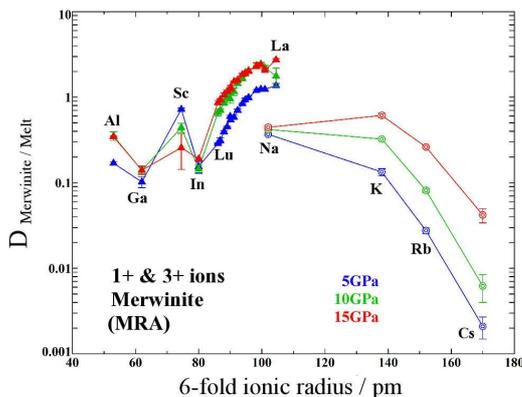


図3 Merwinite で測定された 1 価、3 価イオンの PC-IR 図。

図3に示されている 1 価イオンはすべて 9 配位サイトに入ると考えられる。D_{Na} は圧力が変化してもほぼ同じ値を示しているが、他の元素は圧力とともに上昇している事が分かる。図には示していないが、2 価イオンについても類似した傾向が見られ、圧力の上昇とともに分配係数が増加している元素が多く、特に D_{Sr} と D_{Ba} が大きく上昇している。

3 価イオンの場合、La よりも大きな元素が存在しないため、分配係数曲線のピーク位置を正確に決定するのは難しいが、1 価、2 価イオンとは異なり、ピーク位置の移動は認められない。また、9 配位サイトに入る希土類元素の分配係数は圧力とともに上昇しているが、6 配位サイトに入る Sc の分配係数は逆

に減少する傾向をしめした。

(4)K-Hollandite の元素分配挙動

20GPa における JB1 組成の融解実験では、K-Hollandite が出現した。得られた PC-IR 図を図4に示す。

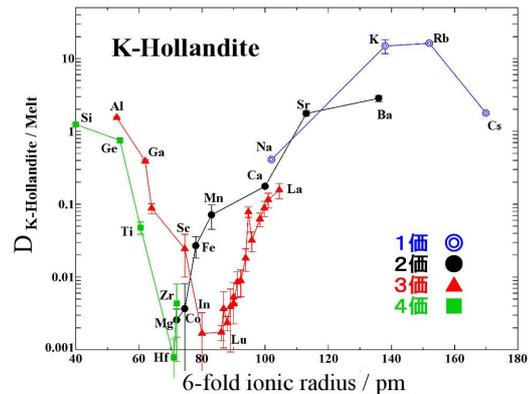


図4 20GPa で得られた K-Hollandite の PC-IR 図

PC-IR 図には、Hollandite 構造の持つ“トンネル状”の巨大な陽イオンサイトに対応した分配係数のピークと、小さな 6 配位サイトに対応したピークが現れるため、70~80pm 付近に分配係数の“谷間”が現れている

1 価イオンの分配係数曲線は K と Rb の間にピークが現れている。分配係数曲線にピークが認められるのは 1 価イオンだけで、他のイオンでは 140pm 以上の大きなイオン半径をもつ元素がないため、ピークを確認する事が出来ない。2 価イオンの場合には D_{Ba} が最大値を示し、イオン半径の減少とともに分配係数は連続的に減少していた。3 価イオンでも希土類元素の分配係数はイオン半径が減少するに従って、La から Lu へと連続的に減少した。しかし、Sc よりも小さくなると逆に分配係数が増加し、6 配位サイトに入ると考えられる D_{Al} が最大値を示していた。

(5)Ca-Perovskite の元素分配挙動

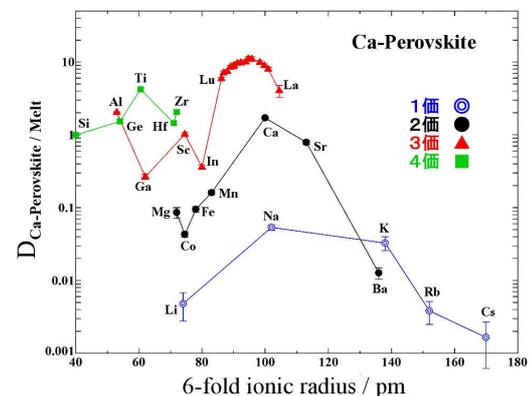


図5 17.5GPa で得られた Ca-Perovskite の PC-IR 図

Ca-Perovskite は、ほぼ理想な立方晶に近い Perovskite 構造を持っており、Ca の入る

12 配位サイトと、Si が入る 6 配位サイトの 2 種類の陽イオンサイトを持っている。MR 組成の融解実験では 17.5GPa でのみ Ca-Perovskite が出現したので、その PC-IR 図を図 5 に示す。

1 価イオンの分配係数曲線を見ると、大きな 12 配位サイトに対応した分配係数のピークは、Na よりもやや大きなイオン半径付近に位置している事が分かる。2 価イオンの場合、遷移金属イオンは配位子場効果を受けている可能性があるため他のイオンだけで考えると、Ca のイオン半径に相当する位置に分配係数のピークが存在するように見える。3 価イオンの場合、 D_{In} は異常な値を示しているが、希土類元素群で見ると、そのほぼ中央に分配係数のピークが現れている。最も小さな Al の分配係数も高い値を示しているが、これはイオン半径が小さな位置に 6 配位サイトに対応するピークが存在するためと考えられる。このように、Ca-Perovskite では分配係数曲線に現れる 12 配位サイトに対応したピーク位置は、イオンの価数によって変化している。これは Garnet や Merwinite で観測されているように、超高压下では分配係数曲線のピーク位置が移動するためと考えられる。

4 価イオンの中では D_{Ti} が最高値を示しているが、Ti は遷移金属元素であるため配位子場効果を受けている可能性があり、単純には 6 配位サイトのピーク位置と判断出来ない。ただし、本来の Perovskite の組成は $CaTiO_3$ であるので、Perovskite 構造の 6 配位サイトには Ti イオンが最適な大きさである可能性は高い。

(6) Mg-Perovskite の元素分配挙動

かんらん岩組成 (KLB) を用いた 25GPa の融解実験から得られ Mg-Perovskite の PC-IR 図を図 6 に示す。

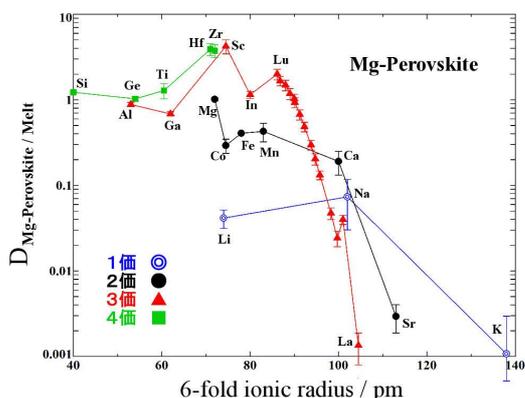


図 6 25GPa で得られた Mg-Perovskite の PC-IR 図。

Mg-Perovskite は、結晶構造学的には Perovskite 構造に分類されているが、大きな陽イオンサイトに入るべき Mg イオンが小さいため、本来は 12 配位である大きな陽イオンサイトが“潰れて”8 配位となっている。このため得られた PC-IR 図を他の鉱物と比較

すると、同じ Perovskite 構造に分類される Ca-Perovskite よりも、どちらかと言えば Garnet に類似しているように見える。しかし、4 価イオンの分配係数曲線は、Garnet とは大きく異なっている。Garnet の場合は D_{Si} が最も大きな値を示し、イオン半径が増加するに従い分配係数は連続的に減少していた。しかし、Mg-Perovskite では D_{Zr} 、 D_{Hf} が最も高い分配係数を示していた。この事は、Garnet の場合には 4 価イオンは主に最も小さな 4 配位サイトに入り、他のサイトには入りにくかったが、Mg-Perovskite では大きな 8 配位サイトへ 4 価イオンが非常に入りやすい事を示している。

また、Mg-Perovskite の場合でも、8 配位サイトに対応する分配係数曲線のピーク位置がイオンの価数ごとに異なっており、圧力の上昇に伴い、ピーク位置が移動したと結果だと考えられる。

(7) 分配係数ピーク位置の圧力変化

初めに述べたように、鉱物 - 珪酸塩メルト間の元素分配挙動は、鉱物の結晶構造と密接に関連しており、PC-IR 図に描かれる分配係数曲線のピーク位置は、結晶構造中に存在する陽イオンサイトに最適なサイズを示していると考えられ、価数が異なってもほぼ同じ位置にピークが現れる。しかし、本研究の結果から明らかなように、超高压下ではイオンの価数ごとにピーク位置が異なっている。

このピーク位置の圧力変化について詳しく解析するため、Garnet の 8 配位サイトについて、得られた分配係数を Lattice Strain Model (Blundy & Wood, 1994) を用いて最小自乗法でフィッティングを行い、そのピーク位置 (R_0) を求めた結果を図 7 に示す。

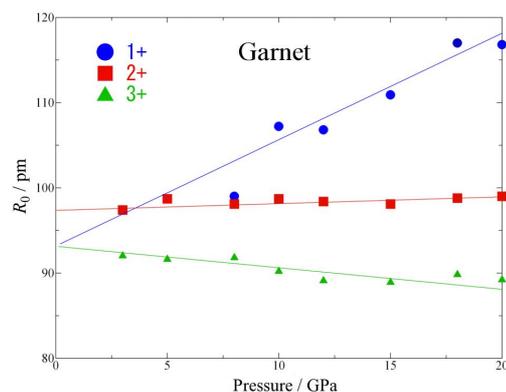


図 7 Garnet 8 配位サイトに対応する分配係数曲線ピーク位置 (R_0) の圧力変化。

3 ~ 5GPa では Garnet に含まれる K 量が EPMA 分析の検出限界以下であったため、 D_K が測定できず、 R_0 が計算できなかったが、10GPa 付近からは Garnet 中の K 量が増加し R_0 を計算する事ができた。その結果、圧力とともに 1 価の R_0 は増加し、20GPa では Na のイオン半径付近に移動している事が明らかになった。一方、3 価イオンの R_0 は 1 価イオンの場合とは

逆に、僅かに減少している傾向が見られた。また、常圧付近での R_0 値はどの価数でも 95pm 前後で、ほぼ同じ値である事がわかった。

Merwinite 9 配位サイトの R_0 の圧力変化を 図 8 に示す。

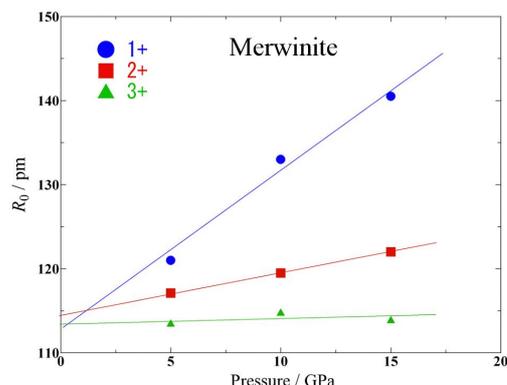


図 8 Merwinite 9 配位サイトに対応する分配係数曲線ピーク位置 (R_0) の圧力変化。

Garnet の場合と同様に、Merwinite でも、常圧付近での R_0 はイオンの価数によらずほぼ同じであるが、圧力の増加とともに価数が小さなイオンほど急激に増加している。

本研究では Mg-Perovskite 等の高圧鉱物は分配係数の圧力変化は測定できなかったが、超高压力下で測定した分配係数から求めた R_0 値は、価数の小さなイオンほど大きな値をしめしており、Garnet や Merwinite と同様の圧力依存性を示していると考えて良いだろう。

以上の結果は、定性的にはイオン圧縮率の違いによって説明する事が出来る。高圧になると結晶構造もイオンも圧縮される。どちらも同じ圧縮率であれば R_0 は一定値となるが、結晶構造の方が圧縮されやすければ、サイトが小さくなるので、 R_0 は圧力とともに減少するはずである。逆にイオンの方が圧縮されやすい場合、PC-IR 図は“常圧におけるイオン半径”を用いているため、見かけ上 R_0 は圧力とともに増加することになる。1 価イオンは非常に圧縮されやすいため、 R_0 は急速に増加するが、3 価イオンの場合にはほとんど圧縮されないため、 R_0 はあまり変化しないが、やや減少傾向が観察されると考えられる。

このように本研究で明らかになった R_0 に対する圧力効果は、定性的にはイオン圧縮率の違いによって説明できるが、定量的な評価を行った場合、不明な点も残っている。Garnet の場合、3 価イオンの R_0 は常圧では約 92pm であるが 20GPa では 89pm になり、約 3% 減少している。Garnet の X サイトの体積弾性率は 115 ~ 130GPa と報告されており (Hazen and Finger, 1978)、この値を用いると X サイトは 20GPa では常圧よりも約 4% 小さくなる。このため、3 価イオンは圧縮されずに X サイトだけが小さくなると考えれば、観察された R_0 の圧力変化を説明する事が可能である。しかし、1 価イオンの場合、20GPa における R_0 は 117pm であるが、これは見かけの値で実際

には 3 価の R_0 と同じはずなので、約 90pm となっているはずである。この事から計算すると、1 価イオンは 20GPa では 20% 以上圧縮されている必要がある。しかし、NaCl や CsCl の超高压実験から求められた原子間距離 (Decker, 1971) は、20GPa まで圧縮しても 11 ~ 13% しか減少していない。一般的に陽イオンよりも陰イオンの方が圧縮されやすいため、Na や Cs はこの値よりもさらに圧縮されにくいと考えた方が良くだろう。このため、観測された R_0 の圧力変化は、大きすぎると考えられる。このため定量的な解析には、今後さらに詳しい研究が必要である。

従来の研究では、元素分配挙動は圧力が変わってもほぼ一定として扱われる事が多かった。特に、各元素の分配係数の相対的大小関係には変化がないと考えられてきた。しかし本研究の結果、圧力の増加に伴い R_0 が変化し、分配係数の大小関係が逆転する事が明らかになった。特にその変化は 1 価イオンで著しく、K や Rb のように常圧では鉱物中に入る事はほとんど無い元素が、超高压下では他の元素よりも分配係数が大きくなり得る事が明らかになった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

Suzuki, T., T. Hirata, T. D. Yokoyama, T. Imai and E. Takahashi, Pressure effect on element partitioning between minerals and silicate melt: Melting experiments on basalt up to 20 GPa. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 査読有り, Vol. 208-209, pp. 59-73, 2012.

Imai, T., E. Takahashi, T. Suzuki and T. Hirata, Element partitioning between olivine and melt up to 10 GPa: Implications for the effect of pressure. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 査読有り, Vol. 212-213, pp. 64-75, 2012.

[学会発表] (計 2 件)

鈴木 敏弘、今井 崇暢、平田 岳史、横山 隆臣、FeNi 合金 - 硫化物メルト間の微量元素分配に対する圧力効果。日本鉱物科学会 2013 年度年回(招待講演)、2013 年 9 月 11 日、筑波。

今井 崇暢、高橋 栄一、鈴木 敏弘、平田 岳史、10GPa におけるガーネット、カンラン石 / 含水メルト間の元素分配実験。第 53 回高圧討論会、2012 年 11 月 7 日、大阪。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 敏弘 (SUZUKI, Toshihiro)

東京工業大学・大学院理工学研究科・流動研究員

研究者番号：40235974