

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 人間・環境学 )	氏名	近藤 望
論文題目	Major element composition of the Hadean crust: constraints from Sm-Nd isotope systematics and high-pressure melting experiments (冥王代地殻の主成分元素組成: Sm-Nd同位体系と高圧融解実験からの制約)		
(論文内容の要旨)			
<p>地球表層を覆う地殻は、マンツルの部分融解によって形成されることでマンツルから様々な元素を抽出するとともに、形成後の風化・侵食によってそれらの元素を地球表層に供給する。従って、地球形成直後の時代である冥王代(46~40億年前)にどのような化学組成を持った地殻が形成されたかを知ることは、地球内部と表層の物質の化学的な進化がどのような条件から出発したのかを解明する上で重要である。しかし、冥王代の地質記録はほとんど現在の地球に残っておらず、後の時代に形成された堆積岩の中に、冥王代に形成されたジルコンが砕屑鉱物として残されているのみである。このような、物的証拠に乏しい冥王代に形成された地殻について、本論文では、地球の岩石および隕石のサマリウム (Sm) -ネオジム (Nd) 同位体系の地球化学的データと、高温高圧融解実験を組み合わせることで、その主成分化学組成を決定することを目指した。</p> <p>第1章では、地球の材料物質であるコンドライト隕石と地球のマンツル由来の岩石との間の放射起源Nd同位体比 (<math>^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}</math>, <math>^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}</math>) の系統的な差を制約条件として、このNd同位体比の差をつくるのに必要な親元素/娘元素比 (Sm/Nd) の分化が、冥王代におけるマンツルの部分融解による地殻形成によるものであるとの前提のもとに、Sm-Nd同位体系のモデル計算により部分融解の温度圧力条件を決定した。その結果、冥王代の最初期に3~7 GPaにおけるごく微小な部分融解度で部分融解が起これば、Nd同位体比の制約を満たすことが明らかとなった。次に、高温高圧発生装置を用いたマンツルカンラン岩の融解実験を7 GPaにおいて行い、極小部分融解度で生成される融解液(メルト)の主成分元素組成を決定した。融解実験には、改良繰り返しサンドイッチ実験法と呼ばれる、極小部分融解度でメルト組成を正確に決定する方法を採用した。この実験結果と、先行研究の実験結果を合わせて検討したところ、3~7 GPaの圧力におけるマンツルカンラン岩の極小部分融解度での融解では、鉄・チタン・アルカリ元素に富んだピクライト質からコマチアイト質のメルトが生成することがわかった。これらのメルトの主成分元素組成をもとに、メルトを構成する酸化物成分とマンツル鉱物の状態方程式を用いた計算によりメルトの密度を求めたところ、これらのメルトはマンツルカンラン岩の密度よりも有意に小さくなることがわかった。従って、これらのメルトは、冥王代のマンツル中を上昇することが可能であり、冥王代において地殻を形成することができると結論できる。極小部分融解度での融解は、100~200km程度の厚いリソスフェアの直下におけるマンツルの減圧融解によって起こる可能性が高く、これは、先行研究で示されている冥王代マンツルの対流</p>			

様式に関するモデルと整合的である。上述のSm-Nd同位体系のモデル計算では、Nd同位体比の差をつくるための地殻形成は45.3億年前より以前であるという制約も得られた。これは月を形成した巨大衝突（45.0億年前以降）よりも以前である。この結果から、冥王代の最初期に形成された地殻は巨大衝突によって地球から失われた可能性が高いことが示された。

第2章では、太古代（40～25億年前）の地球のマントル由来岩石にみられる $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比の多様性を制約条件として、この多様性を形成するために必要な地殻形成の条件について、第1章と同様のSm-Nd同位体系のモデル計算によって決定した。その結果、 $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比の多様性を説明するには、冥王代の44.2億年前より以前においてマントルの部分融解によって地殻が形成される必要があることが明らかとなった。その部分融解条件は、第1章で推定された冥王代初期のリソスフェアの厚さを考慮に入ると、3～7 GPaにおいて6%以下の部分融解度であることが必要であることが示された。この条件で形成されるメルトの組成を、第1章の高圧実験および先行研究の実験結果をもとに推定したところ、鉄・チタン・アルカリ元素に富んだピクライト質からコマチアイト質であることがわかった。従って、この化学組成を持つ地殻が冥王代最初期以降にも形成されていれば、太古代に見られるNd同位体比の多様性が説明できる。これらの結果から、冥王代初期にマントルの部分融解によって形成された地殻（一次地殻）は、鉄・チタン・アルカリ元素に富んだピクライト質からコマチアイト質の組成を持っていたことが明らかとなった。

第3章では、第2章で明らかとなった冥王代の一次地殻の化学組成をもとにして、この一次地殻がマントルに沈み込んで部分融解することで形成される地殻（二次地殻）の化学組成を高温高圧実験によって決定した。冥王代は初期から海洋が存在していた可能性が高いため、冥王代一次地殻は海洋下で含水化していたと想定される。そこで、チタン・アルカリ元素に富んだコマチアイト組成の出発物質を含水条件で高温高圧で部分融解させ、生成されたメルトの組成を求めた。その結果、生成されるメルトの主成分元素組成はチタンとリンに富んだ玄武岩質からピクライト質となることがわかった。しかし、この組成のメルトからはジルコンは晶出しない可能性が高く、冥王代のジルコンの存在を説明するには、二次地殻がさらに融解や分別結晶作用を受けるような過程が必要であることが示唆された。

以上の結果から、冥王代では、マントルの部分融解によって直接形成される一次地殻と、一次地殻が再融解して形成される二次地殻のどちらも、アルカリ元素などの液相濃集元素に顕著に富んだ苦鉄質から超苦鉄質の化学組成を持っていた可能性が高いことが明らかとなった。

(論文審査の結果の要旨)

本申請論文は、地球誕生直後の冥王代(46~40億年前)に地球表層を覆っていた地殻の主成分元素組成を、サマリウム(Sm)-ネオジウム(Nd)同位体系のモデル計算と高圧実験を組み合わせた独自の方法で明らかにしたものである。冥王代にどのような化学組成を持った地殻が形成され、それがどのような性質を持っていたかを知ることは、地球の表層および内部物質のその後の進化を解明する上で重要な知見となる。しかし、冥王代は地質記録が残っていない時代であり、後の時代に形成された堆積岩の中に、冥王代に形成されたジルコンが砕屑鉱物として残されているのみである。このように、冥王代の物的証拠はほとんど残っていないため、その時代の地殻組成を明らかにするための制約条件を見出すのは極めて困難であった。

第1章では、地球の材料物質と考えられているコンドライト隕石と、現在の地球のマントル由来の岩石との間の、放射起源のNd同位体比( $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ )の系統的な差を制約条件として、Sm-Nd同位体系のモデル計算と高圧融解実験結果を結びつけて議論し、冥王代の最初期に形成された地殻の主成分元素組成がマグネシウムに富むピクライト質からコマチアイト質であった可能性が高いことを示した。冥王代最初期地殻の主成分元素組成が具体的な値として示されたのはこれが初めてであり、初期地球の物質科学として非常に意義のある成果である。また、ここで用いられた方法は、「マントルの融解によって地殻が形成される際のSm/Nd比の分別の度合いを反映しているのがNd同位体比であるため、その分別度合いから融解条件を導き出すことができ、さらにそこから主成分元素組成を制約することができる」という申請者自身の新たな着想をもとに考え出されたものであり、極めて独創性の高いものである。さらに、高圧融解実験で得られた融解液(メルト)について状態方程式を用いた計算によって密度を求め、冥王代最初期地殻の形成過程を物理的な側面からも議論をしており、その点にも新奇性が認められる。

第2章では、上述した独自の方法を太古代(40~25億年前)の地球の岩石にみられる $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比の多様性に適用し、同様のSm-Nd同位体系のモデル計算と、高圧実験データのコンパイルによって、冥王代最初期以降にも、冥王代最初期地殻と同様の主成分元素組成を持った一次地殻(マントルの部分融解によって形成される地殻)が形成されていたこと明らかにした。さらに第3章では、冥王代におけるマントル対流とプレートの沈み込み様式に関する先行研究の系統的なレビューをもとにして、冥王代において地殻がマントルへと沈み込んだ蓋然性が高いことを示し、高圧融解実験によって、地殻が沈み込んで再融解することで形成されると想定される二次地殻の主成分元素組成がチタン・リンとマグネシウムに富んだ玄武岩質からピクライト質であったことを示した。これらの結果は、冥王代に形成された地殻が、従来考えら

れてきたような、ジルコンを晶出するのに適したケイ素に富む組成ではないことを示したという点で画期的であり、初期地球における物質分化過程の理解に大きく貢献するものと認められる。

本論文で特筆すべきは、物的証拠が極めて少なく制約条件を見出すことが難しい冥王代について、その時代に形成された地殻の主成分元素組成に、Sm-Nd同位体系のデータと岩石の融解相平衡関係とを結びつける新たな方法で迫り、実際に主成分元素組成を決定した点にある。Sm-Nd同位体系を用いて地球形成初期のマントル-地殻分化過程の解明に迫る研究は数多くあるが、Sm・Ndともに、岩石中には数十ppmレベルでしか含まれていない微量元素であるため、本論文のように、岩石の主成分元素（0.1wt.%を超える濃度で含まれている元素）組成を直接制約した例はこれまでになかった。Nd同位体比の差から微量元素の分別条件を制約することで、その分別を起こした部分融解条件を推定して、それをもとにメルトの主成分元素組成を決める、という発想は、従来の研究には見られない斬新なものである。主成分元素組成は、岩石の密度・粘性などの物理的性質を支配する要因であるため、冥王代の地殻の主成分元素組成を明らかにできたことは、地球の表層や内部の物質進化の解明に、化学的側面だけでなく物理的側面からも大きく貢献するものである。

また本論文では、改良繰り返しサンドイッチ法という、複雑な手順の実験方法で精度高くメルト組成を決めたこと、また、実験中の酸素フガシティーを精密に制御するために特別に工夫された高圧パーツを用い、実験生成物の分析の際にも最新の研磨法を適用して丁寧に研磨することで確度の高いデータを得たことなど、高圧実験の技術面でも最新の工夫がいくつもなされており、得られたデータの質も高いものとなっている。

以上のように本論文は、地球誕生直後の物質進化の実態解明に大きく貢献するものであり、地球・宇宙のダイナミクスと進化の講究を目的の一つとする相関環境学専攻自然環境動態論講座地球環境動態論分野にふさわしい内容を備えたものである。

よって、本論文は博士（人間・環境学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成30年1月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、未発表部分が学術論文に掲載されるまでの間は、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 年 月 日以降