

学位論文題名

Extreme^{17,18}O-rich materials from the
Acfer 094 carbonaceous chondrite

(炭素質コンドライト Acfer094中の非常に^{17,18}Oに富む物質)

学位論文内容の要旨

本論文では、始原的な隕石である炭素質コンドライト Acfer 094 から発見した、非常に¹⁷Oと¹⁸Oに富む物質について岩石学的・同位体的研究を行った。隕石にみられる¹⁷O/¹⁸O比がほぼ一定な質量に依存しない酸素同位体の異常は、¹⁶O-richと^{17,18}O-richの2つの端成分が混合した結果であると考えられている。隕石中に含まれる高温鉱物から、地球の標準海水(SMOW)と比べ¹⁶O-rich(-80‰<δ^{17,18}O_{SMOW}<0‰)な酸素同位体組成を持つものが見つかることから、¹⁶O-richな端成分は、星雲中での高温凝縮物であると示唆されている。従来の^{17,18}O-richな太陽系物質は、10%ほどの異常を示すメタル鉄が水質変質したマグネタイトと、月の鉄粒子の表面層から50%ほどの報告があるが、その起源については未解明である。本研究の目的は、^{17,18}O-richな端成分について制約を与え、太陽系の酸素同位体不均一の起源を解明することである。

第二章では、本研究で用いた試料と分析手法について記している。試料には、母天体上で熱変成や水質変質を受けた証拠がない始原的な炭素質コンドライト Acfer 094 と水質変質を受けているCM2コンドライト Murchisonの研磨薄片を用いた。岩石学的研究にはFE-SEM-EDSとATEMを用い、同位体的研究には、同位体顕微鏡システムによる高精度同位体比イメージング法と従来の点分析法を用いた。同位体顕微鏡システムは、投影型二次イオン質量分析装置と研究室で開発した二次元イオン検出器を組み合わせた独自の分析機器であるため、特長と動作原理について記してある。

第三章では、発見した物質の元素組成、存在度、酸素同位体組成の分析結果とFe-O-S系の熱力学計算について記している。主にFe、Ni、O、Sからなる特徴的な元素組成を持ち、典型的にはFe: 61.6 wt%、Ni: 5.4、O: 19.3、S: 9.6、Mg: 0.1、Si: 0.2であった。周辺には、しばしば裂開したFeSを伴っていた。透過型電子顕微鏡によると、この物質は10nm~200nmの結晶集合体であり、100nmサイズの結晶から得た電子線回折パターンはマグネタイトに似た基本構造をもっており(空間群Fd3m, 格子パラメータa ≈ 0.83 nm)、3倍周期の超構造を示す弱いスポットを伴う。Murchison隕石中でよくみられるPoorly Characterized Phase (PCP)も同様の元素から構成されるが、O/S比が4倍異なっている。このような物質は未報告であるため、本論文ではnew-PCPと呼ぶ。new-PCPの特徴的な元素組成に基づいて探索した所、Acfer 094

マトリックス中のあらゆる場所に散らばっている事が分かった。11mm²の領域を7μm²の空間分解能で探索した結果、23個のnew-PCPが見つかった。その平均サイズは28μm²で、そのマトリックスにおける存在度は94ppmであった。10個のnew-PCPについて酸素同位体比イメージングを行い、すべてのnew-PCPが周囲のマトリックスに比べ^{17,18}O-richであった。その内の1個について点分析を行った。比較の為に、マトリックスと高温鉱物についても点分析を行い、Murchison隕石中のPCPについて酸素同位体比イメージングを行った。マトリックスと高温鉱物は、従来の報告と同様の酸素同位体組成であった。PCPはマトリックスに近い酸素同位体組成であり、CMコンドライトの水質変質モデルによる同位体分別線に沿っていたのに対し、new-PCPの典型的な酸素同位体組成は、 $\delta^{17,18}\text{O}_{\text{SMOW}}=+180\%$ であった。この値は太陽系物質の中で最も大きく、^{17,18}O-richな新しい端成分である。また、従来の酸素同位体不均一の範囲を3倍に広げるものである。new-PCPの形成条件を求めるために、Fe-O-S系の熱力学計算を行った。岩石学的研究から、new-PCPはFeメタルとFeSの酸化と硫化によって形成したと示唆されるため、これらの反応について熱力学計算を行った。その結果、星雲ガスの全圧とは関係なく360K以下でマグネタイトとFeSが共存して形成する事が分かった。ここで、原始太陽系星雲での典型的な $\text{P}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{P}_{\text{H}_2}$ 比の値が $\sim 5 \times 10^{-4}$ と一定であると仮定したが、 $\text{P}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{P}_{\text{H}_2}$ が増加すると形成温度は上がる傾向であった。

第四章では、new-PCPの形成環境について議論している。まず、星雲中でnew-PCPが形成した場合を考える。原始太陽系星雲において主要な酸化剤は水であり、氷の昇華温度は高々200Kであるため、熱力学計算の結果を適用すると、new-PCPは内惑星領域で水蒸気によって酸化されたと考えられ、おそらくnew-PCPの酸素同位体組成は水の組成を反映している。よって、原始太陽系星雲の始原的な水は^{17,18}O-richであったと考えられる。もし、Acfer 094母天体上で形成したとすると、周囲のマトリックスと同位体交換する前に形成したと考えられる。このような形成過程は、MurchisonのPCPのような従来の母天体上での水質変質モデルでは説明できない。これらの形成環境は、従来報告されているAcfer 094が熱変成、水質変質を受けていないという岩石学的観察と調和的である。

第五章では、本論文の研究をまとめ、太陽系星雲の酸素同位体不均一の起源と進化について結論を示す。新しい^{17,18}O-richな端成分を、炭素質コンドライトAcfer 094中の主にFe-(Ni)-O-Sからなる特徴的な元素組成を持つnew-PCPから発見した。new-PCPはFeまたはFeSが水と反応して形成したと考えられ、その酸素同位体は水の組成を反映していると示唆した。よって原始太陽系星雲の水は^{17,18}O-richであったと考えられる。

本研究により、太陽系星雲における酸素同位体不均一に、従来の3倍の変動があったことが明らかになった。また、太陽系の酸素同位体不均一の起源となる、¹⁶O-richな端成分が高温凝縮物であるのに対し、^{17,18}O-richな端成分の起源が水であったことが示唆された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 塚 本 尚 義
副 査 教 授 藤 野 清 志
副 査 准教授 角 皆 潤

学位論文題名

Extreme^{17,18}O-rich materials from the Acfer 094 carbonaceous chondrite

(炭素質コンドライト Acfer094中の非常に^{17,18}Oに富む物質)

太陽系にみられる酸素同位体比の特異な変動については発見以来 35 年の年月がたつにもかかわらず、その変動の原因が不明である。

本論文では、始原的な隕石から非常に ¹⁷O と ¹⁸O に富む物質を発見し、岩石学的・同位体的研究を行った。隕石には ¹⁷O/¹⁸O 比がほぼ一定な質量に依存しない酸素同位体の異常がみられる。これは ¹⁶O-rich と ^{17,18}O-rich の 2 つの端成分が混合した結果であると考えられている。¹⁶O-rich な端成分は、隕石から ¹⁶O-rich (-80‰ < d^{17,18}O_{SMOW} < 0‰) な高温鉱物が見つかるため、星雲中での高温凝縮物であると示唆されているが、^{17,18}O-rich な端成分は未解明である。本研究の目的は、^{17,18}O-rich な端成分について制約を与え、太陽系の酸素同位体不均一の起源を解明することである。

第二章では、本研究で用いた試料と分析手法について記している。試料には、炭素質コンドライト Acfer 094 と Murchison の研磨薄片を用いた。岩石学的研究には FE-SEM-EDS と ATEM を用い、同位体的研究には、同位体顕微鏡システムによる高精度同位体比イメージング法と点分析法を用いた。

第三章では、発見した物質の元素組成、存在度、酸素同位体組成の分析結果と Fe-O-S 系の熱力学計算について記している。Acfer 094 から Fe、Ni、O、S で構成される物質を発見し、典型的な元素組成は Fe: 61.6 wt%、Ni: 5.4、O: 19.3、S: 9.6、Mg: 0.1、Si: 0.2 であった。周辺には、しばしば裂開した FeS を伴っていた。透過型電子顕微鏡によると、この物質は 10nm~200nm の微結晶集合体であり、電子線回折パターンはマグネタイトを示した。Murchison 中の Poorly Characterized Phase (PCP) も同様の元素から構成されるが、O/S 比が 4 倍異なるため、本論文では new-PCP と呼ぶ。特徴的な元素組成に基づいて、Acfer 094 隕石の 11mm² の領域を 7μm² の空間分解能で探索した結果、23 個の new-PCP を発見した。平均サイズは 28μm² で、マトリックスにおける存在度は 94ppm であった。10 個の new-PCP について酸素同位体比イメージングを行い、その内の 1 個について点分析を行った。また、Murchison 中の PCP についても酸素同位体比イメージングを行った。PCP は地球に近い酸素同位体組成を持ち、水質変質モデルによる同位体分別線に沿っていたのに対し、分析したすべての

new-PCP は非常に ^{17}O 成分と ^{18}O 成分に富んでいた ($d^{17,18}\text{O}_{\text{SMOW}}=+180\text{‰}$)。これは太陽系物質の中で最も $^{17,18}\text{O}$ -rich であり、従来の太陽系の酸素同位体不均質の範囲を 3 倍に広げるものである。熱力学計算の結果、星雲ガスの全圧と無関係に 360K 以下でマグネタイトと FeS が共存して形成する事が分かった。

第四章では、new-PCP の形成環境について議論している。まず、星雲中で new-PCP が形成した場合を考える。原始太陽系星雲において主要な酸化剤は水であり、水の昇華温度は高々 200K であるため、熱力学計算の結果を適用すると、new-PCP は内惑星領域で水蒸気によって酸化されたと考えられる。もし、Acfer 094 母天体上で形成したとすると、周囲のマトリックスと同位体交換する前に水と反応して形成したと考えられる。このような形成過程は、従来の水質変質モデルでは説明できない。これらの形成環境は、従来報告されている Acfer 094 が熱変成、水質変質を受けていないという岩石学的観察と調和的である。よって、原始太陽系星雲の始原的な水は $^{17,18}\text{O}$ -rich であったと考えられる。

第五章では、本論文の研究をまとめ、太陽系星雲の酸素同位体不均質の起源と進化について結論を示す。Acfer 094 から非常に $^{17,18}\text{O}$ -rich な物質を発見した。主に Fe、Ni、O、S から構成され、初期太陽系の始原的な水との反応で形成したと考えられた。

本研究により、太陽系星雲における酸素同位体不均一に、従来の 3 倍の変動があったことが明らかになった。また、太陽系の酸素同位体不均一の起源となる、 ^{16}O -rich な端成分が高温凝縮物であるのに対し、 $^{17,18}\text{O}$ -rich な端成分の起源が水であったことが示唆された。

これを要するに、著者は、太陽系起源の最大問題の 1 つである酸素同位体異常に関して、重い酸素同位体成分に富む新物質を発見し、酸素同位体異常が従来の 3 倍の大きさがあったことを明らかにしたものであり、宇宙化学の進展に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。