



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	太陽系始原水の発見
Author(s)	塚本, 尚義
Citation	パリティ, 23(1), 62-64
Issue Date	2008-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/48594
Type	journal article
File Information	arity_23.pdf



太陽系の始原水の発見

以本尚義

太陽系起源論の物質科学における最大の謎である太陽系の酸素同位体異常が発見されて¹⁾、今年で35年を迎える。この酸素同位体異常は、その後の研究が進んでも、発見当時の単純な規則性はそのままである。そして、太陽系の起源を語るうえで最大の謎の1つとして、依然としてわれわれを悩ませ続けている。2007年に筆者たちのグループは、この35年間の枠組みを打ち破る大きな同位体異常をもつ物質を隕石中に発見した²⁾。その物質中の酸素は、従来報告されていたものと正反対の異常をもち、しかも酸素同位体異常の単純な規則性の延長上にあった。われわれはこの物質中の酸素が、太陽系形成当時の水(始原水)の名残であると結論づけた。この始原水の発見は、力学系で議論されることが多かった従来の太陽系起源論が、原子分子レベルからの物質進化を加えた総合的な汎惑星系起源論へと発展する契機となるだろう。

■なぜ酸素の研究が 太陽系の起源に重要なのか

酸素は宇宙において水素、ヘリウムに次いで3番目に存在度の大きい元素であり、地球のような固体惑星ではもっとも存在度の大きい元素でもある。また、酸素は反応性が高く多くの元素と化合物をつく

り、固体・気体・液体の3つの相に分配される。初期太陽系の物質進化は、太陽系星雲中の固体成分と気体成分の共進化により進んだ。したがって、酸素は太陽系物質進化の中心にあった元素であり、太陽系の起源と進化を記録した最適なトレーサーである。この設定は太陽系のみならず、宇宙における惑星系一般に当てはめられる。

酸素は ^{16}O 、 ^{17}O 、 ^{18}O の3つの安定同位体からなり、それぞれの存在比はだいたい99.757%、0.038%、0.205%である。地球上では、この同位体存在比が少し変動している。この同位体比の変化の割合は δ 値で表現することが多い。酸素の場合、標準平均海水(SMOW)の酸素同位体比を基準にとり、 $\delta^{17}\text{O}_{\text{SMOW}}[\%] = \{(^{17}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{試料}} / (^{17}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}} - 1\} \times 1000$ の千分率で表す。 $\delta^{18}\text{O}$ も同様である。蒸発や凝縮、熔融や再結晶、化学反応などの熱力学が支配する過程において、同位体変動の割合、すなわち δ 値は質量依存則 $\Delta M/M$ (M は質量)に従う。この関係は、 $\delta^{17}\text{O}$ を縦軸、 $\delta^{18}\text{O}$ を横軸にとった3酸素同位体図上で考えると、1/2の傾きをもつ直線で表現される(図1)。とくに、原点(0, 0)を通る傾き1/2の直線を地球型質量分別線とよぶ。この質量分別は温度の関数でもあるので、酸素同位体比を温

度計として用いることがある。地球温暖化などで最近話題の過去の海水温変化の推定には、この性質が用いられている。

■ 酸素同位体異常とは何なのか

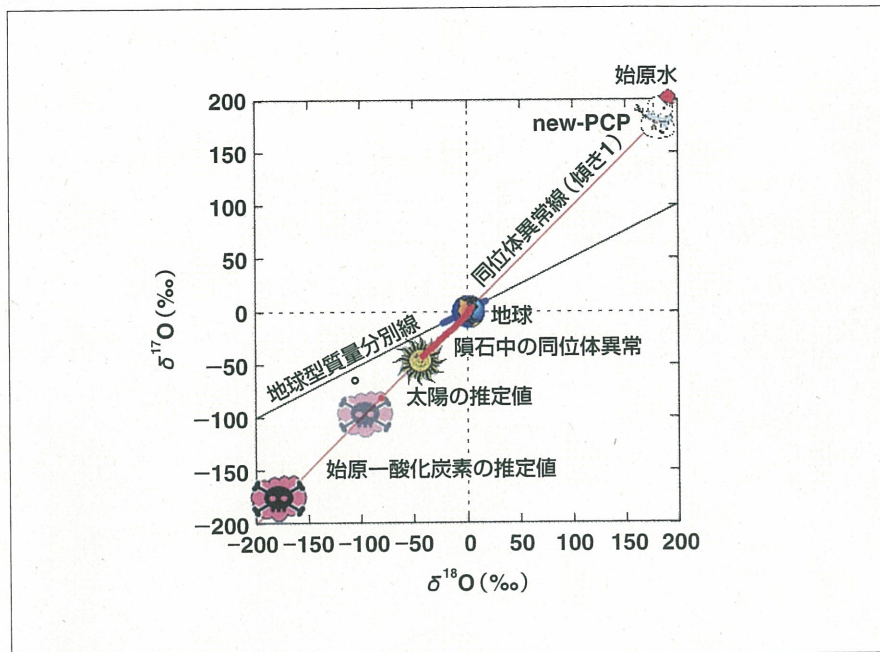
一方、地球型質量分別線から外れる酸素同位体比をもつ物質は、われわれがふだんお目にかからない特異な現象を起源とするものであることを意味する。このため、この地球型質量分別線から外れた同位体比を、酸素同位体異常とよぶ。

酸素同位体異常はすべての隕石で検出されており、とくにコンドライトとよばれる隕石中の構成鉱物で大きい。その異常の分布は、3酸素同位体図上で傾き1の直線を形成し、大きさは約50%に及ぶ(図1)。ほかの元素の同位体異常は、酸素の場合の1/10以下である。このような太陽系における酸素同位体異常の概要は、約30年前にすでに明らかにされていた³⁾。

すべての元素中で酸素にもっとも大きな同位体異常が起きていることは驚きであった。宇宙における酸素の存在度は大きいため、ある種の特異な成分が偶然にまぎれ込んだためと片づけることはできず、酸素同位体異常は宇宙における大事件、またはグローバルで普遍的な出来事を反映した結果であると考えるのが自然だからである。

■ 太陽系始原水の発見前夜

われわれのグループは、太陽系の原材料となったプレソーラー粒子の種類を決定するため、同位体顕微鏡という装置を用い多数の隕石中を広範囲にサーベイしていた⁴⁾。2004年に大学院生の坂本直哉が撮影した数十枚の酸素同位体画像を整理していたボスドクの永島一秀が、そのなかの1枚にプレソーラー粒子ではない変な物体が写っているのを発見した(図2)。この変な物体は、1990年にアルジェリアの砂漠で採集されたAcfer 094という隕石中にあった。われわれはただちにそれが何者であるか検証したかったが、できなく



〈図1〉 3酸素同位体図

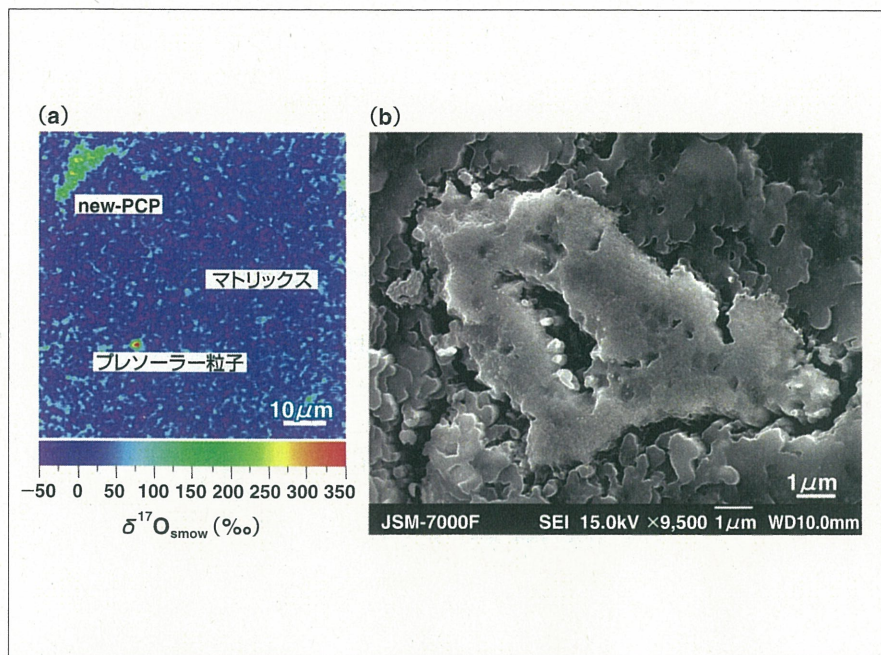
原点は標準平均海水。地球の酸素は原点を通る傾き1/2の地球型分別線上に乗っている(青線)。隕石の酸素(赤丸)は、傾き1の酸素同位体異常線上に乗る。今回発見されたnew-PCPは、太陽系の始原水を記憶していると考えられ、酸素同位体異常線の右上(雪だるま印)に位置する。太陽系平均を示す太陽の酸素は地球の左下にあり、それより下方に太陽系の始原-酸化炭素(どくろ印)があると推定されている。この推定に対応する酸素同位体比が、隕石の測定より報告されている(左下に離れた赤丸)。

なっていることに気がついた。Acfer 094隕石はドイツの大学から貸し出されていたのだが、観察が終わっていたため返却してしまったところだったのだ。われわれは四方手を尽くしてAcfer 094隕石を探しまわったが、これは特別に貴重な隕石であり、なかなか手に入れることができなかった。そして、ようやく2006年に、1枚の隕石薄片を借り受けることに成功した。このときまでに坂本は、手持ちのすべての分析データを洗い直し、この未知物質のたいの化学組成を推定することに成功していた。

■ 重い酸素同位体異常をもつ物質new-PCP

試料が到着するやいなや、坂本は研究室の走査電子顕微鏡を連日、連夜独り占め

し、彼が推定した変な物体の化学組成と形態を手がかりに、いくつかの候補を片っ端から選び出し始めた。そして一睡もせず夜が明けるや、となりで分析していた同僚から同位体顕微鏡のマシントイを譲り受け、選び出した物体の酸素同位体比を分析した。予想したとおり、選び出した物体は探していた未知物質と同じ重い酸素同位体異常を示し、その典型的値は($\delta^{17}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O}$)=(+180‰, +180‰)であった。この物質は5~10 μm の大きさで不規則な外形を呈し、1 μm 以下の大きさの微粒子から構成される地球の酸素同位体比とほぼ等しい値をもつ基質中に埋まっていた(図2)。また精密な化学分析により、この物質はFe, Ni, O, Sの4元素から構成されており、その化学組成はいままでに報告されているどの鉱物にも一



〈図2〉 太陽系の始原水の痕跡をとどめる新物質 new-PCP

(a) Acfer 094 コンドライトの基質部の酸素同位体比 $\delta^{17}\text{O}$ の分布写真。大部分の基質は地球の酸素同位体比とほぼ等しい値をもつが、そのなかに ^{17}O 成分の過剰を示すプレソーラー粒子と、new-PCP が写っている。プレソーラー粒子も酸素同位体異常をもつが、その異常は3酸素同位体図上の傾き1の直線上にのらないことが知られている⁴⁾。(b) 基質中に埋まったnew-PCPの走査電子顕微鏡写真。表面に見えるナノスケールの細かい模様が、複雑な微細構造を示している。

致しないことが判明した。この未知物質をわれわれは、new-PCP (poorly characterized phase) と名づけることにした。もしこの物質に磁鉄鉱 Fe_3O_4 が含まれていたら、この重い酸素は初期太陽系に存在していた特別な水の酸素同位体比を表していることになる。なぜなら、隕石中の磁鉄鉱は金属鉄の酸化により生成され、その酸化剤は H_2O なのだ。

new-PCP に磁鉄鉱が含まれているかどうかを調べるためには走査電子顕微鏡の分解能では足りず、透過電子顕微鏡が必要である。われわれは、となりの鉱物学研究室でポストドクをしている瀬戸雄介の助けを仰ぐことにした。われわれは収束イオンビーム法という最先端ナノテクノロジーにより new-PCP を隕石薄片から取り出すことに成功し、透過電子顕微鏡に

より観察した。予想どおり、new-PCP 中には磁鉄鉱が存在していた。そして、磁鉄鉱は硫化鉄鉱物と複雑にからみ合ったナノスケールの微細構造をもっていた。このようなナノ構造はいままで報告されていない特異な構造であり、new-PCP の特殊な形成環境を反映していると考えられるので、現在も解析を続けている。

この結果を受けて、同僚の倉本圭は、原始惑星系円盤における磁鉄鉱と硫化鉄の共存条件を化学熱力学を用いて計算した。結果は、90℃以下の温度で共存可能であった。原始惑星系円盤における H_2O 氷の昇華温度は、一声、-70℃。したがって、-70℃から90℃の間の温度環境で、硫化鉄は H_2O の水あるいは水蒸気と酸化反応を起こして磁鉄鉱となり、new-PCP が生成したのだ。硫化鉄は金属鉄の

硫化反応により原始惑星系円盤中で生成されるので、new-PCP の原料として困らない。

■ new-PCPをつくった水は太陽系の始原水なのか？

われわれは、太陽系の始原水は重い酸素同位体比をもっていることを、独自の酸素同位体異常形成理論⁵⁾により予言していた。今回発見されたnew-PCPの酸素同位体異常は、この理論の予言する酸素同位体比に等しい。つまり、重い酸素同位体異常をnew-PCPにもたらした初期太陽系の特別な水は、太陽系の始原水そのものである。

この理論によると、酸素同位体異常は太陽系のみならず、惑星系では普遍的な現象である。そして今回の始原水の発見は、この理論が妥当であることを支持する。将来、望遠鏡を使って系外惑星系の始原水の酸素同位体比が観測できるようになるだろう。すると、酸素同位体は系外惑星系の物質多様性を特徴づける指標になり、銀河におけるわれわれ太陽系の特殊性と一般性が理解できるようになると期待される。

参考文献

- 1) R. N. Clayton *et al.*: Science **182**, 485 (1973).
- 2) N. Sakamoto *et al.*: Science **317**, 231 (2007).
- 3) 小沼直樹：自然 **32**, 71 (1977)；『宇宙化学・地球化学に魅せられて』, 109, サイエンスハウス (1987) に再録。
- 4) 坂本尚義：学術月報 **59**, 173 (2006)。
- 5) H. Yurimoto and K. Kuramoto: Science **305**, 1763 (2004)。