

特集「水素・酸素同位体分別の起源」

太陽系における不均質な酸素同位体組成の分子雲起源説

倉本 圭¹， 垾本尚義¹

1. 主要元素の謎

地球と月の岩石，隕石，惑星間塵など，これまでに我々が手にしてきた太陽系固体物質に含まれる大部分の主要元素の同位体組成は極めて一様なことが知られている [1]。始原的隕石にppmオーダーでごく少量含まれる著しい同位体異常を持ったプレソーラー粒子の存在 [2] から確認されるように，太陽系を作った元素はもともと超新星や赤色巨星など様々な環境で合成され，同位体的に著しく不均質な状態から出発したはずだ。太陽系固体物質の示す同位体組成の均質性は，太陽系形成の際に，あるいはそれに先立って物質の著しい攪拌が起こったことを意味する。

しかし太陽系固体物質の同位体組成の均質性には重大な例外がある。それが酸素の同位体組成である。酸素は太陽系では水素・ヘリウムに次いで3番目，固体物質の中ではもっとも存在度が大きい。酸素の安定同位体には質量数が16,17,18のものがああり，地球ではそれぞれ99.757:0.038:0.205の割合（原子百分率）を占めている。酸素同位体組成は縦軸と横軸にそれぞれ $\delta^{17}\text{O}$ と $\delta^{18}\text{O}$ を取った三同位体図を用いて表すことができる。ここで δ 値は試料に含まれる酸素同位体比 $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ ， $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ について，標準試料からの偏差を千分率(‰)で表したものであり，次式で定義される

$$\delta^i\text{O} = \frac{(^i\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{試料}} - (^i\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{標準試料}}}{(^i\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{標準試料}}} \times 1000.$$

ここで $^i\text{O}/^{16}\text{O}$ ($i=17$ または 18) は酸素同位体の個数比を表す。

図1に地球と隕石物質の酸素同位体組成を示す。蒸発凝縮過程や大部分の同位体交換反応に伴う同位体分別は質量差に依存する。すなわち，より質量差が大きいほどより大きな質量分別がもたらされ， $\delta^{18}\text{O}$ 値は $\delta^{17}\text{O}$ 値の約2倍変化する。そのため地球物質はほとんどが傾き1/2の線上にのる。

しかし隕石物質，とりわけCaとAlに富む難揮発性包有物(CAI)とコンドリュールを一つ一つみると，これらは地球分別線から外れ，三同位体図上では傾き1の直線上に乗るように分布する。コンドリュールは始原的隕石の体積の過半を占め，CAIは始原的隕石に含まれるCaやAlの相当部分を担っていることに注意されたい。これらの隕石構成物質の示す酸素同位体組成の不均質性は，原始太陽系星雲において ^{16}O に選択的に富む物質リザーバーと，反対に ^{16}O に乏しい物質

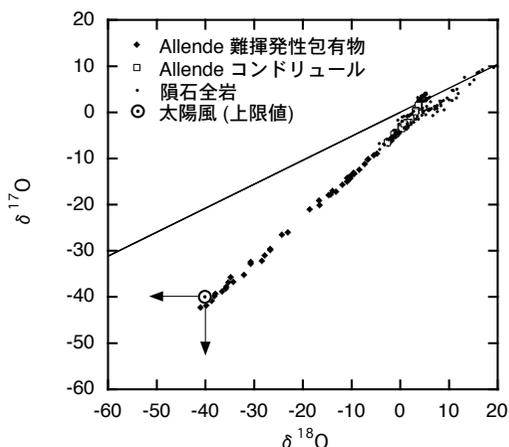


図1：地球（傾き1/2の直線），隕石物質，太陽風の酸素同位体組成。ここでの同位体比の基準（ δ 値=0）は標準海水である。隕石のデータはClaytonとその共同研究者らによる多数の文献データをプロットしている。その文献リストは [3]に譲る。太陽風のデータは[4]

1. 北海道大学 大学院理学研究科

リザーバーが存在し、これらからもたらされた物質がさまざまな割合で混合することによって生じたように見える。

隕石中に酸素同位体組成の不均質が発見された当時、もっとも異常な酸素同位体組成を示すCAIは、太陽系形成時の同位体の均質化を免れたプレソーラー粒子なのではないかと考えられた [5]。しかしSiなど他の主要元素の同位体組成については、地球や他の隕石と差がなく¹、また粒径がmmサイズとかなり大きく、星間空間において形成されたとは考えにくいことから、CAIがプレソーラー粒子である可能性は低い。また、酸素以外の主要元素の同位体組成の均質性は、酸素同位体組成の変化が何らかの核反応によってもたらされた可能性も低いことを示す。なぜなら酸素原子核のみを選択的に破壊したり生成したりするような核反応は存在しそうでないからである。

一方、ある特殊な化学反応系では質量差に依存しない同位体分別が生じることが知られている。そのような化学反応系の代表例はオゾンの光分解と生成反応が同時に起きている系であり、実験室だけでなく地球の成層圏においても非質量依存の同位体分別が確認された。その後、二酸化炭素や硫黄化合物の反応系でも同様の分別が生じることが明らかにされ、これらは地球大気や地球環境の変遷史の解明に役立っている [7, 8]。原始太陽系星雲内でも同様の化学反応が起きたのではないかとこの仮説がこれまで提案されてきた [例えば7]。しかしオゾンや二酸化炭素の反応系を想定した解釈には問題点がある。第一にこれらの反応系の分子種は原始太陽系星雲の環境では微量にしか存在しないこと、第二に同位体組成の不均質が観察されるケイ酸塩に、同位体組成の変化を伝える機構が不明なことである。

1. 例外的に他の構成元素についてもかなり大きな同位体異常を持つCAIが見つかっており、これらはFUN (fractionated and unidentified nuclear effect) CAIと総称されている。その成因については不明な点が多いが、原始太陽の近傍で部分蒸発を起こすとともに、高エネルギー太陽風粒子の照射を受けた可能性が指摘されている [6]

ここまで示してきたように、太陽系物質中の酸素同位体組成の不均質性の起源は、その発見以来30年間、宇宙化学のもっとも大きな未解決問題の一つとなってきた。しかし最近、筆者らはこの問題を分子雲における一酸化炭素分子の光化学反応による非質量依存の同位体分別と、原始太陽系星雲におけるガスとダストの大規模分別によって説明する仮説 [9] を提唱し、これを支持する観測・分析データも集まりつつある。以下では我々の新しい仮説を紹介し、宇宙化学の新しい展開の可能性について述べる。

2. 星形成と分子雲の化学

星と原始惑星系円盤は分子雲コアの収縮によって誕生する。分子雲においては原子から簡単な分子が、そして簡単な分子からより複雑な分子や凝縮物が合成される反応が起きている。この分子雲の環境で酸素を扱う主要な相は一酸化炭素ガス、 H_2O 水、ケイ酸塩で

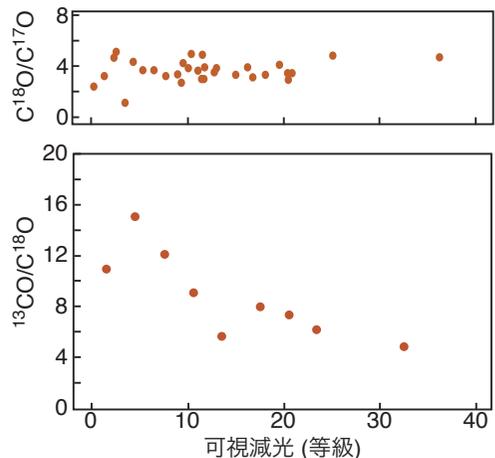


図2 : 分子雲IC5146の同位分子組成を可視減光の関数として示す。化学式の中で質量数を付していない元素記号は、その元素のうちでもっとも豊富な同位体(Cなら ^{12}C 、Oなら ^{16}O)を示す。データは[12, 13]による。 $^{12}C^{16}O$ の存在度を知ることができればベターだが、この同位分子は存在度が大きく分子輝線スペクトルが飽和しているため存在度を求めることが難しい。しかし次の発熱イオン分子反応 $^{13}C + ^{12}CO \rightarrow ^{12}C + ^{13}CO$ が効率よく進むため、 ^{13}CO の存在度は ^{12}CO の存在度に概ね比例している (^{12}C と ^{13}C の分別は小さい) と考えられる[例えば14]。

ある。ケイ酸塩は分子雲での10K前後の低温環境下ではそれ自体ほとんど反応性はなく、 H_2O などの凝縮核や表面反応の場として振舞っている [例えば10, 11].

星形成の起きている分子雲では、先に誕生した星々などからの紫外線放射がそこでの化学に大きな影響を及ぼしている。図2に星形成を伴う分子雲のCO分子の同位体比を可視減光（星間物質による背景の星の可視減光を等級で表したもの）の関数として示す。 $^{13}CO/C^{18}O$ 比は可視減光が小さい領域ほど大きくなる一方、 $C^{18}O/C^{17}O$ 比は可視減光に依存せずほぼ一定である。すなわち分子雲においてはきわめて強い、質量に依存しない同位体分別が起こっていることがわかる。これはCO分子の紫外線による光解離と自己遮蔽効果による。

CO分子は波長911～1118Åの紫外線の線吸収によって前期解離する。前期解離とは、光子を吸収した分子が一度高い電子エネルギー準位の中間状態へ励起され、その後の緩和過程で解離することを言い、連続吸収ではなく線吸収となることが特徴である。異なる同位体分子は振動回転エネルギー準位が異なるため、吸収線波長が異なる。主同位体分子を解離する波長の紫外線は、1等程度の可視星間減光が起こるまでに減衰してしまう（自己遮蔽効果）のに対して、これと異なる波長の紫外線はより分子雲の内部領域まで到達でき、微量同位体分子を選択的に解離させる[15]。これが分子雲においてCO分子の同位体分別が起こっている原因である。

$C^{17}O$ と $C^{18}O$ はともに微量同位体分子であり、それら自身による自己遮蔽は可視星間減光が数十等以上になるまで効かない（ダストの吸収による減光は強いが、これは同位体分別効果を持たない）。一方で太陽のような低質量星は、可視星間減光が数～20等前後の分子雲コアが収縮して形成される。したがって分子雲におけるCOの光解離反応は、星と原始惑星系円盤の材料となったガス中のCO分子を、質量差には依存せずに $C^{17}O$ と $C^{18}O$ に乏しく、 $C^{16}O$ に富むものにしてたと予想される。

CO分子が解離して生成されたO原子の行き先は、ダスト粒子表面で生成される H_2O 水だと考えられる。水として分子雲に豊富に存在することが確認されている H_2O 分子は、気相反応では十分に作る事ができず、主にダスト粒子表面で吸着酸素原子や水酸基ラジカルの水素化反応により生成されると考えられている[16]。分子雲の内部領域ではCOの光解離によって同位体分別を受けた酸素原子が材料となり、質量差によらずに ^{17}O と ^{18}O に富む H_2O 水が生成されるであろう。

太陽のような低質量星を作る母体となった分子雲コアにおける分別の大きさは、CO同位体比の観測とCO同位体比分別の数値的研究[14]を参考にすると、COガスは分子雲の平均組成に対して-60%以下、それとの対として H_2O は+100%以上の $\delta^{17,18}O$ 値を持つと評価される[9]。 H_2O が相対的に $^{17,18}O$ に富んだ組成を持つことは、原始太陽系星雲中で金属鉄が H_2O によって酸化されて生じたと考えられる非平衡化普通コンドライト隕石中の磁鉄鉱粒子の酸素同位体組成 [17]とも整合的である。

もう一つの重要な酸素のリザーバーであるケイ酸塩は、分子雲が形成される以前に高温条件下で凝縮したものであり、その際に周囲のガスとの同位体分別はほとんど起きないと考えられる²。そこで以下の議論ではケイ酸塩に含まれる酸素の平均同位体組成は分子雲の平均組成と等しいとする。ただしこのことは個々の鉱物粒子レベルでも同位体組成がはじめてから一様と仮定しているわけではないことに注意しておく。

3. 原始惑星系円盤におけるダストとガスの分別

分子雲においてCOガス、 H_2O 分子、ケイ酸塩の間に作られた酸素同位体組成の不均質は、原始惑星系円盤に時間的空間的な酸素同位体組成の不均質をもたら

2. オゾン反応系の質量によらない同位体分別効果の理論的説明に成功したノーベル化学賞受賞者 Marcum は、酸化鉱物の凝縮反応時にオゾン反応系に似た同位体分別が起こる可能性を指摘している [18] が、これまでのところその実験的な裏づけは得られていない。

すと考えられる。分子雲内部には不均一な流体運動が存在し、分子雲コアは必然的にいくばくかの回転運動を持つ。このような分子雲コアが重力収縮すると、角運動量の保存則のために円盤状につぶれる。その後、磁気乱流などに由来する粘性によって角運動量を外縁部のガスへ逃がすことにより、ガス円盤の大半の物質は中心に向かって降着し、中心星を成長させる。これが降着ガス円盤であり、原始太陽系星雲もこのような降着円盤として生まれたはずだ。

降着円盤内ではガスと固体粒子は相対的な速度成分を持つ。ここで重要な相対運動には2種類ある。その一つはガスとの摩擦による角運動量の損失に伴う固体粒子の中心星方向への移動であり、もう一つは固体粒子の円盤赤道面への沈降である [例えば19]。これらはいずれも原始惑星系円盤内にガス成分とダスト成分の分別をもたらす。

降着率は基本的に時間とともに減少する。質量降着の激しい初期段階ではガス円盤に強い乱流が生じ、ガスと固体粒子はよくかき混ぜられていたに違いない。そのような段階では降着による重力エネルギー開放によって円盤内側領域に高温の環境がもたらされ、そこでは物質間の同位体組成の不均質はもとの平均組成へリ

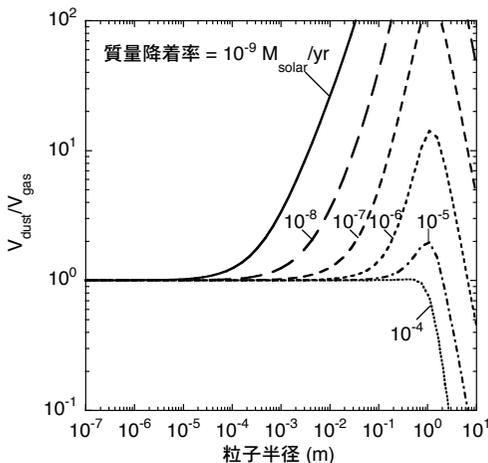


図3：降着ガス円盤中の固体粒子とガスの動径速度の比。mmからmサイズの固体粒子は降着率の減少に伴って、より選択的に中心へ向かって移動する。計算の詳細は[3, 9]参照。

セットされたであろう。CAIは始原的隕石の中で最も古い年代を示し、原始太陽系において最も初期に形成された固体粒子である。CAIは高温で凝縮する元素を選択的に含んでおり、強い質量降着の起きていた環境で形成された可能性が高い。もしこれが事実なら、CAIに代表される地球物質に比べて ^{16}O に富む酸素同位体組成は、分子雲の平均的な酸素同位体組成を反映していると考えられる³

一方、降着率が減少して円盤内の乱流が弱くなると、ガスと固体粒子の相対運動が重要になってくる。図3は中心星方向への固体粒子とガスの移動速度の比を、粒子サイズの関数として求めたものである [3]。ここから降着率が 10^{-8} 太陽質量/年程度(古典的T-Tauri型星に観測される典型値)まで減衰すると、mmサイズの固体粒子はガスの数倍の速さで中心星へと落ち込んで行くことが分かる。このような固体粒子の選択的な移動は、円盤内側領域の著しい H_2O の濃集を引き起こす。 H_2O は約150K以上に達すると蒸発しガスに取り込まれる。冷たい円盤外側領域から H_2O 氷を纏った固体粒子が選択的に落ちこんでくると、暖かい内側領域は固体粒子から蒸発した H_2O が濃集することになる。降着率が下がるほど、より固体粒子とガスの移動速度比が増し、内側領域における H_2O の濃集は進む。

この H_2O 濃集の結果、ケイ酸塩の活発な蒸発凝縮と再平衡化が継続的に起こっていると考えられる円盤の内側領域は、次第に H_2O のみならず $^{17,18}\text{O}$ に富んだ酸素同位体組成へと変化したと考えられる。年代学的にコンドリュールはCAIよりもさらに200万年～300万年の長期間に渡って形成されたことがわかっている [例えば21]。コンドリュールの酸素同位体組成はより $^{17,18}\text{O}$ に富んでおり、原始惑星系円盤の進化に伴った H_2O 濃集による同位体組成の変化のシナリオと整合的である。地球物質はコンドリュールに近い酸素同位

3. 最近筆者らの一人は共同研究者と $\delta^{17,18}\text{O} = -80\text{‰}$ にも達する極端に ^{16}O に富んだコンドリュールを発見した [20]。後述するようにコンドリュールはCAIの形成期にも作られていたことが分かってきており [21]、この ^{16}O に富むコンドリュールはCAIと同時期に形成された可能性が高い。

体組成を持つことから，地球の原材料物質の大部分もH₂Oの濃集が起きた環境下で形成されたと考えられる。

ガス降着が終息し円盤内の乱流が収まると，固体粒子の赤道面への沈降がすすみ，固体粒子が十分に濃集した場合には重力不安定による微惑星の形成も起きたであろう。この場合H₂O氷の蒸発していない冷たい領域では，ケイ酸塩とH₂O氷を取り込んだ微惑星が形成される。このような微惑星の平均的な酸素同位体組成もまたH₂Oの組成を反映して，分子雲の平均組成よりも^{17,18}Oに富むものになったと考えられる。実際に水質変成の進んだCIコンドライトの酸素同位体組成は^{17,18}Oに富んだものになっている。

4. 原始太陽系星雲における自己遮蔽効果の可能性

我々とは異なり原始太陽系星雲におけるCOの自己遮蔽効果によって太陽系の酸素同位体組成不均質を説明するモデルも提案されている。その一つはClayton [22]による原始太陽近傍領域での自己遮蔽を想定したもので，もう一つはLyonsとYoung [23]による外惑星領域での自己遮蔽を想定したものである。

Clayton説では太陽紫外線によってC^{17,18}Oが選択的に光分解を受け^{17,18}Oに富む酸素原子ラジカルが生じ，これらが化学反応を通じてケイ酸塩に取り込まれることによってコンドリュールのように相対的に¹⁶Oに乏しい固体が作られる。原始太陽系星雲の内側領域での気体とケイ酸塩の活発な平衡化反応を想定する点は我々のモデルと共通する。しかしこの説の難点として，始原的隕石の示す¹⁶Oに乏しいH₂Oの生成を説明することが難しいこと，星雲内縁部の高温環境下では，逆反応によって同位体の分別が消去されてしまうと考えられることが挙げられる。我々のモデルではガスとダストの分別によって内側領域の平均同位体組成そのものが変化すると考えているので，このような平衡化反応によって同位体組成が太陽（分子雲）組成に戻っ

てしまう心配はない。

Lyons-Young説では外惑星領域の原始太陽系星雲の表面へ原始太陽あるいは外部からの紫外線が照射され，これによって分子雲過程と同様に相対的に¹⁶Oに富むCO分子と，¹⁶Oに乏しいH₂O分子が生じる。その後の進化については我々のガス-ダスト分別モデルに拠っている。彼らは化学反応ネットワークの数値モデルでそのような分別が起こるかどうかが調べ，紫外線フラックスと光化学反応の活発な星雲表層領域（そのままではその場のCOが消費されるだけで星雲全体に分別を起こすことができない）と内部領域間の対流運動の活発さに強く依存することを示した。彼らの用いた数値モデルは対流運動があるにも関わらずガス降着を無視しており，また初期状態として全ての炭素がCOガスとして存在するなどの単純化がなされており，今後の更なる検討が必要である。

5. 分子雲起源仮説からの予測と検証

我々の仮説によればCAIに代表される¹⁶Oに富む酸素同位体組成は，太陽系の材料物質の平均組成を反映している。したがって太陽系の大部分の質量を占める太陽も¹⁶Oに富むと予想される。太陽の酸素同位体組成の正確な測定は分光学的には困難なため，太陽風物質の分析が待たれてきた。太陽風のサンプルリターンを行ったGenesisは残念ながら着陸に失敗し，太陽風粒子の採取プレートは地球物質の汚染を受けてしまった。しかし今後地球物質の汚染の影響を取り除いた分析が複数のグループによって試みられる予定になっている。結果を楽しみにしたい。

一方，橋爪とChaussidonは月面から回収されたソイル中の金属粒に着目し，そこに含まれる酸素の同位体比を測定した[4]。打ち込まれた太陽風粒子を同定したと考えられる成分は $\Delta^{17}\text{O} \leq -25\%$ という値⁴を持

4. $\Delta^{17}\text{O}$ 値は三同位体図上で地球分別線からの縦軸方向の距離を表し，次式で定義される

$$\Delta^{17}\text{O} = \delta^{17}\text{O} - 0.52\delta^{18}\text{O}.$$

ち、この結果は我々の仮説からの予測と整合的である。月ソイルの金属粒子中の酸素同位体組成の測定は Irelandらによっても試みられている[24]が、彼らは興味深いことに $\Delta^{17}\text{O}$ が正という橋爪らとは逆センスの結果を報告している。橋爪らも注意している通り、月ソイルの金属粒子に含まれる酸素には回収後の地球環境下での汚染成分だけでなく、月面に衝突した隕石や彗星などの小天体からの放出成分も混入している。 $\Delta^{17}\text{O}$ が正の成分は、実は彗星等からもたらされた H_2O に由来する酸素を見ているのかもしれない。橋

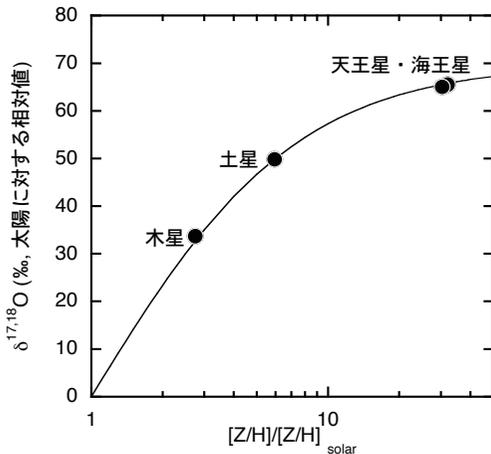


図4：木星型惑星に予想される酸素同位体組成 ([3]に基づく) を重元素濃集度の関数として示す。ここで $[Z/H]$ は水成分よりも揮発性に乏しい任意元素の対水素存在度比をあらわす。各惑星の酸素同位体比 $\delta^{17,18}\text{O}_{\text{planet}}$ は次式から求めた。

$$\delta^{17,18}\text{O}_{\text{planet}} = \left\{ \delta^{17,18}\text{O}_{\text{sun}} + \delta^{17,18}\text{O}_{\text{planetesimal}}(z-1)f \right\} / \left\{ 1 + (z-1)f \right\}.$$

ここで $\delta^{17,18}\text{O}_{\text{sun}}$ 、 $\delta^{17,18}\text{O}_{\text{planetesimal}}$ はそれぞれ太陽と氷微惑星の酸素同位体組成を表し、 z は各惑星の重元素濃集度、 f は原始太陽系雲における酸素の H_2O およびケイ酸塩への分配率である。ここでは氷微惑星の平均酸素同位体組成は太陽組成を基準に $\delta^{17,18}\text{O}=70\%$ とした。これはケイ酸塩と H_2O 氷の δ 値をそれぞれ0%と100% (後者は分子雲中に期待される下限値、本文参照) とし、ケイ酸塩と H_2O 氷が1:2の割合で酸素原子を担っているとして概算した数値である。また木星型惑星における太陽組成に対する重元素濃集度の下限は、分光あるいはプローブ観測から求められた各惑星の大気中の炭素濃集度(木星、土星、天王星・海王星でそれぞれ $C/H=3, 6, 30 \times$ 太陽組成比[27,28])に等しいとし、 $f=0.5$ とした。氷微惑星はより大きな δ 値を持っていた可能性もあるが、その場合は曲線の成長率が大きくなる。重要な点は、木星型惑星の重元素濃集と酸素同位体組成には相関があると予想されることである。

爪らは太陽高エネルギー粒子 (SEP) しか侵入できないような深さから負の $\Delta^{17}\text{O}$ を持つ酸素を見出しており、太陽風以外の起源を持つとは考えにくい、今後のさらなる検証が必要である。

我々の分子雲仮説は原始太陽系星雲において H_2O 分子がもっとも ^{16}O に乏しい ($^{17,18}\text{O}$ に富む) 組成を持った化学種であったことを予想する。星雲中の H_2O がこのような“重い”酸素同位体組成を持つことは、もっとも著しい水質変成を受けたコンドライトが隕石の中でもっとも大きな $\Delta^{17}\text{O}$ 値を示す傾向があることから暗示されてきた [25]。さらに前述したようにChoir [17]はコンドライト中の H_2O によって金属鉄が酸化されて生じた磁鉄鉱の酸素同位体組成を測定し、原始太陽系星雲において H_2O がもっとも大きな $\Delta^{17}\text{O}$ 値を持つことを裏付けている。

一方で分子雲仮説からの CO 分子が ^{16}O に富む組成を持つとの予想は、彗星の詳しい観測によって確認できるかもしれない。地上からの分光観測では百分率オーダーの分解能での同位体組成の決定は難しく、質量分析計によるその場測定が望まれる。ESAの打ち上げた彗星探査機RosettaはChuryumov-Gerasimenko彗星にプローブを降ろすだけでなく、この彗星を至近距離から長期間観測する。観測項目の中には高分解能質量分析計による彗星揮発性物質中の酸素同位体比の分析があり[26]、所期の性能が発揮できれば分子雲仮説からの予想が検証できる。さらに将来には、探査機搭載型の高分解能質量分析計、あるいは地上からの超高分解能分光観測技術などによる探索が行われるようになることを期待したい。

隕石全岩の酸素同位体組成は、 $\Delta^{17}\text{O}$ 値が $-5 \sim +2\%$ までの比較的狭い範囲に収まる。これは地球の材料物質も含めて内惑星領域の物質の大部分が、 H_2O に濃集した星雲環境下での物理化学過程を経験したことを示唆する。これまで金星と水星については酸素同位体組成の測定は行われていないが、これらも地球と同様に太陽組成に比べて ^{16}O に乏しい同位体組成を持つと予想される。

木星型惑星は太陽組成に比べて重元素に濃集している。これらの惑星の取り込んだ重元素のかかりの割合は、水成分に由来する。したがって重元素の濃集の割合に応じて、これらのガス惑星は太陽組成に比べより ^{16}O に乏しい酸素同位体組成を持つと予想される。

木星型惑星大気中では H_2O は大気深部で凝結してしまい、分光学的な大気観測からその存在度を決めることは難しい。これに対して CO の揮発性が高いことから、炭素は原始太陽系星雲中で部分的にしか凝縮していなかったであろう。したがって木星型惑星大気に観測される炭素の濃集度は、惑星全体の重元素濃集度の下限を与えると考えられる。図4にこの重元素濃集度の推定を元に木星型惑星に予想される平均酸素同位体組成を示した。もしも酸素同位体不均質の起源としてLyonsとYoungの説が正しいとすると太陽系の領域によって分別の大きさは異なると考えられ、外惑星系の酸素同位体組成は我々の仮説の予測するような系統的变化を持たない。

惑星本体の酸素同位体比の測定は困難かもしれないが、これらの惑星の衛星の表面の物質の同位体測定はより可能性があるかもしれない。木星型惑星の順行衛星は原始惑星へのガスと固体成分の集積に伴って形成されたsubnebula（周惑星円盤）に起源を持つと考えられるため、その同位体組成は母惑星に近いと期待される。今後、酸素同位体組成の分布が彗星や木星型惑星まで含めて明らかになれば、太陽系の起源、とりわけ、惑星を形作る物質の起源と分化についての理解が飛躍的に進むに違いない。

酸素同位体組成の不均質と並んで、太陽系のもう一つの基本的な物質科学的特徴である金属元素の同位体的均質性についても、分子雲仮説の枠組みを拡張することで説明が可能かもしれない。分子雲仮説では原始太陽系星雲内部領域での活発な固相と気相との酸素原子の交換を想定する。そしてこの過程にはガス降着をもたらす乱流運動が伴っている。金属元素はそのほとんどが固体成分に閉じ込められているために、微粒子同士の乱流混合と、その後の熱変成による均質化によ

って、もともとの不均質が消去されていったと考えることができる。このような混合と均質化は分子雲の段階でも起きたかもしれない。酸素が均質化を免れることができるのは、酸素が固体にも気体にも分配される元素だからである。今後、始原的隕石に閉じ込められた物質科学的記録を徹底的に読み解くことで、このような混合と均質化の過程についても実証的に解き明かすことができるであろう。

謝辞

香内晃教授には的確な査読をしていただいたことに感謝します。また本稿の一部には2005年10月にアメリカ・テネシー州で開催されたNASA LPI主催のワークショップOxygen in the earliest solar systemにおける議論を反映しています。

参考文献

- [1] Clayton, R. N. et al., 1988, *Phil. Trans. Roy. Soc. London., Ser. A, Math. Phys. Sci.* 325, 483.
- [2] Nagashima, K. et al., 2004, *Nature* 428, 921.
- [3] Kuramoto, K. & Yurimoto, H., 2005, in *Chondrites and the Protoplanetary Disk*, eds. Krot, A. N. et al., *Astron. Soc. of the Pacific Conf. Series* 341, 181.
- [4] Hashizume, K. & Chaussidon, M., 2005, *Nature*, 434, 619.
- [5] Clayton, R. N. et al., 1972, *Science* 182, 485.
- [6] Lee, T. 1988, in “Meteorites and the early solar system”, (eds. J. F. Kerridge & M. S. Matthews), *Univ. Arizona Press, Tucson*, p.1063.
- [7] Thiemens, M., 1999, *Science* 283, 341.
- [8] Farquhar, J. et al., 2000, *Science* 289, 756.
- [9] Yurimoto, H. & Kuramoto, K., 2004, *Science* 305, 1763.

- [10] Greenberg, J. M., 1988, *Astron. Astrophys.* 330, 375.
- [11] Langer, W. D. et al., 2000, in "Protostars and Planets IV" , eds. Mannings, V. et al., Univ. Arizona Press, Tucson, p.29.
- [12] Lada, C. J. et al., 1994, *Astrophys. J.* 429, 694.
- [13] Bergin, E. A., 2001, *Astrophys. J.* 557, 209.
- [14] Warin, S. et al., 1996, *Astron. Astrophys.* 308, 535.
- [15] van Dishoeck, E and J. H. Black, 1988, *Astrophys. J.* 334, 771.
- [16] Aikawa, Y. et al., 2003, *Astrophys. J.* 593, 906.
- [17] Choi, B. et al., 1998, *Nature* 392, 577.
- [18] Marcus, R. A., 2004, *J. Chem. Phys.* 121, 8201.
- [19] 渡邊誠一郎・井田茂, 1997, 『比較惑星学 (岩波講座地球惑星科学第12巻)』収, 岩波書店, p.131
- [20] Kobayashi, S. et al., 2003, *Geochem. J.* 37,663.
- [21] Krot, et al., 2005, *Nature* 434, 998.
- [22] Clayton, R. N., 2002, *Nature* 415, 860.
- [23] Lyons, J. R. & Young, E. D., 2005, *Nature* 435, 317.
- [24] Ireland, T. R. et al., 2005, 36th Ann. Lunar Planet. Sci. Conf., abstract no.1572.
- [25] Clayton, R. N., 1993, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 21, 115.
- [26] Wright, I. P. and Pillinger, C. T., 1998, *Adv. Space Res.* 21, 1537.
- [27] Gautier, D. & Owen, T., 1989, in "Origin and evolution of planetary and satellite atmospheres" , eds. S. K. Atreya, J. B. Pollack & M. S. Matthews (Tucson: University of Arizona Press), p. 487.
- [28] Atreya, S. K. et al., 1999, *Planet. Space Sci.* 47, 1243.