



# アイソトポマーの開く未来

吉田 尚弘 研究室～環境理工学創造専攻



吉田 尚弘 教授

吉田研究室は、アイソトポマー（isotopomer: 同位体分子種）に関するさまざまな研究をしている。大気中や物質中に含まれるアイソトポマーを利用すると、水や大気物質循環の仕組みをより正確に推定できる。その一例が大気中の $N_2O$ に関する研究である。この論文はNatureに採用され、さらにある新聞では1面で取り上げられた。ここまで関心を集めた先生の研究はどんなもので、そこで取り扱われていたアイソトポマーはどのような場面で利用されているのだろうか。また地球環境にはどのように貢献しているのだろうか。



## アイソトポマー基礎講座

アイソトポマーとは、アイソトープ（isotope: 同位体原子）が組み込まれている分子やイオンなどのことをいう。今までは物質循環の仕組みを解明するのに、分子内のある原子のアイソトープに注目してきた。そうすると例えばその生物の住んでいるだいたいの地域を特定することができるのだ。生物が飲んだ水のO原子は体液を経由して骨や歯のO原子となる。したがって、骨や歯のO原子のアイソトープの構成比率を調べることでその生物の住んでいるおおよその地域を特定できる。

この手法は考古学に应用されている。

このように、アイソトープに注目してもさまざまな応用が考えられる。しかし組み合わせ、つまりアイソトポマーとして認識すれば、応用できる場面がさらに多くなる。図1を見てもらいたい。この図は $H_2O$ のアイソトポマーを環境中での存在率が大きい順に左から並べたものだ。我々の身近な $H_2O$ でさえ4種類もある。このように、一つの分子を何種類の分子とみなすことができるのだ。

アイソトポマーに注目した例として、吉田研究室で扱っているテーマの一つであるメタンの例をみてみよう。メタンは $CO_2$ を還元する微生物と、酢酸を発酵させる微生物の両方から発生する。そこでアイソトポマーに注目すれば、その地域のメタンがどちらの微生物から多く発生したのかが分かる。両過程で発生したメタンでアイソトポマーの構成比率が違うからだ。そこから、その土地が還元させやすい環境か発酵させやすい環境かが分かる。このように、アイソトポマーの構成比率を調べることで、その発生過程や発生環境の傾向が推定できるのだ。

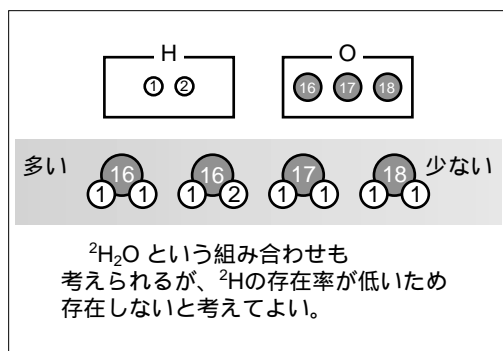


図1  $H_2O$  のアイソトポマー



## 吉田研究室の大きな成果

吉田研究室ではこのアイソトポマーを利用して物質循環の定量的な解析や地球環境変化の解析を行っている。適用範囲は成層圏の大気から南極の氷までと広い。その中でも大きな研究成果の一つであるN<sub>2</sub>Oの循環の研究についてみてみよう。

先生は温暖化ガスであるとともにオゾン層にも関連する物質でもあるN<sub>2</sub>Oに目をつけた。N<sub>2</sub>Oは対流圏（地上～10km上空）では安定だが、成層圏（10km～50km上空）では紫外線により分解を起こし濃度が減少するということは分かっていた。しかし対流圏と成層圏との間でどのような現象が起きているかは分かっていなかった。吉田研究室では、実際に大気を採取してアイソトポマーに注目することで、この対流圏と成層圏との関係を明らかにしたのだ。

ここで、「値」という概念を導入する。これは、同位体の存在率の大小を自然界平均の存在率との相対的な数値で表したもので、

$$(\text{値}) = \frac{(\text{ある場所の存在率}) - (\text{自然界の存在率})}{(\text{自然界の存在率})}$$

と定義される。例えば、地球上ではCは平均して1.11%ほど<sup>13</sup>Cが存在している。もし、ある地点で<sup>13</sup>Cが1.10%含まれているならば、そこでの<sup>13</sup>Cの値は-0.9%となる。

N<sub>2</sub>Oのアイソトポマーは図2にあるように5種類存在する。そのうち<sup>14</sup>N<sup>14</sup>N<sup>16</sup>Oがほとんどで、残りは数%ずつ存在している。ここでは中央と端のN原子に注目するので、O原子の違いは考えないことにしよう。

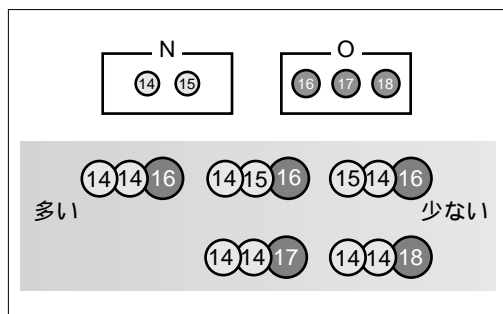


図2 N<sub>2</sub>Oのアイソトポマー

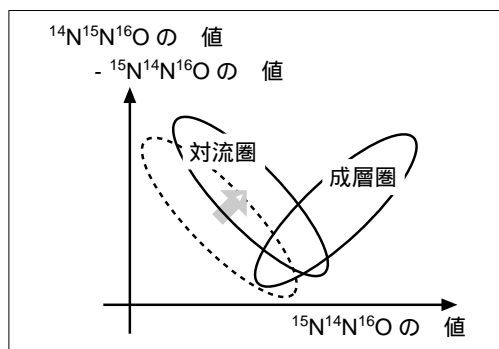


図3 N<sub>2</sub>Oの傾向

図3はN<sub>2</sub>Oの傾向を表したものである。横軸は<sup>15</sup>N<sup>14</sup>N<sup>16</sup>Oの値だ。つまり右に行くほど<sup>15</sup>N<sup>14</sup>N<sup>16</sup>Oは多くなる。縦軸は(<sup>14</sup>N<sup>15</sup>N<sup>16</sup>Oの値) - (<sup>15</sup>N<sup>14</sup>N<sup>16</sup>Oの値) すなわち上に行くほど中央に、下に行くほど端に<sup>15</sup>Nが含まれている割合が多いということを表す。

このグラフで対流圏のデータが一点に固まらずに分布しているのには理由がある。N<sub>2</sub>Oは工場や土壌や森林など発生源が多様であり、その発生源ごとにアイソトポマーの構成比率が異なるため、図で示したように分布するのだ。

また成層圏のデータがグラフの中央から右上に並んでいるということも、以下のように説明できる。光分解反応は中央が<sup>14</sup>NであるN<sub>2</sub>Oの方が起こりやすい。だから<sup>14</sup>N<sup>14</sup>N<sup>16</sup>Oを始めとした分子が減少していく。そのため<sup>14</sup>N<sup>15</sup>N<sup>16</sup>Oの存在率が上昇するから値も上昇する。よって成層圏のデータは右にいくほど分解が進んだ場所のものだと分かる。さらに<sup>15</sup>N<sup>14</sup>N<sup>16</sup>Oの方が<sup>14</sup>N<sup>15</sup>N<sup>16</sup>Oより分解しやすいので、中央に<sup>15</sup>Nが含まれているN<sub>2</sub>Oが残って成層圏のデータは右上に並ぶのだ。

今までは対流圏のN<sub>2</sub>Oは図3点線部で示されるような場所にデータが並ぶと考えられていた。しかし実際のデータをグラフにするとその予想よりも右上方向にずれていることに先生は注目した。このデータから、成層圏のN<sub>2</sub>Oが対流圏に戻ってきたために中央のN原子の値も端のN原子の値も多少大きいN<sub>2</sub>Oが混ざって右上方向にずれたのではないかという結論に至ったのである。

ところで、このような理論はさらに環境問題にも応用できる。どこからどれくらい $\text{N}_2\text{O}$ が発生しているかが分かるからだ。吉田研究室では、データを $\text{N}_2\text{O}$ 発生量の計算による細かい予想が正確かどうかを確認するために利用している。

その他にも吉田研究室では、さまざまな研究を



## 採取も楽ではない

成層圏大気の採取のために、文部省の宇宙科学研究所のグループに気球を上げてもらう。しかしここでいくつかの困難がある。

第一に、成層圏大気の希薄さだ。昔は20リットルほどの真空容器を用意して採取していた。しかし成層圏は低圧であるから、少量しか集められない。現在は液体ヘリウムで容器ごと冷却して凍らせることで、2リットルの容器に10～20気圧分も集めることができるようになった。

第二に、日本で気球を使って採取するという点での難しさだ。気球に人が乗れないので、大気そのものの入った容器を地上に落として測定しなくてはならない。ところが、日本の場合は人口が密集していて危ないので海上に落とさなくてはならない、しかし回収のことを考えるとなるべく陸地

している。例えば、世界各地からいろいろな物質を採取してきて調査したり、室内で模擬実験をしてどの同位体が反応しやすいかという知識を得たり、大陸規模、さらには地球規模での物質循環についてのシミュレーションもしている。

の近くに落としたい……。だから対流圏では海の方へ流れ、成層圏では陸に戻って来るような風を選ばなければならない。そのような時期は5月から6月と8月から9月にかけての限られた期間しかない。日本ではいつでも好きな時期に気球が飛ばせるわけではないのだ。

さらに気球がいつ飛ばせるかは、その日になってみなければ分からないという難点もある。最良の風というものは、そうは吹かない。雨も降ってはいけない。だから思った日程通りに気球が飛ばせることはなかなかなく、とても大変な液体ヘリウムの充填作業を何度もやる羽目になる。そして、全員の集中力がなくなりかけたころようやくいい風が吹いてきたりする。試料の採取だけでも一筋縄にはいかないのだ。



## 2つの計測法

これまでアイソトポマーを実際にどう計測するかについては触れてこなかったが、これも吉田研究室の扱っているテーマである。アイソトポマーの計測法には質量分析法とレーザー分光法があるが、吉田研究室ではともに研究の対象である。

質量分析法はフレミング左手の法則が鍵である。まず、試料に電子をぶつけ最外殻電子を取り去り陽イオン化する。それを磁場に流すと試料の流れは曲げられるがその曲げられ方は質量に依存する。これで質量数1程度の違いは分けることができる。ところが、 $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$ と $^1\text{H}^1\text{H}^{17}\text{O}$ などの小数点以下での質量数の区別まではできない。そのため、磁場に加え、電場、そして4つの電極により作られる四重極場を駆使することによって変位を大きくする方法を開発した。この方式は日本では特許になっている。なお $\text{N}_2\text{O}$ の場合は一部を $\text{NO}^+$ に分離して区別をつけているそう。

一方、レーザー分光法は同位体シフトという現象を利用している。物質はある特定波長の光を吸収する性質を持っている。ところが同じ化学式で表される分子でも、アイソトポマーでレーザーを吸収する波長が多少違うのだ。この現象を「同位体シフト」という。例えば、 $^{12}\text{CH}_4$ と $^{13}\text{CH}_4$ はそれぞれ1.666  $\mu\text{m}$ 、1.670  $\mu\text{m}$ に吸収量のピークがある。そこでこの2箇所の吸収量の比を取れば、そのまま $^{12}\text{CH}_4$ と $^{13}\text{CH}_4$ の存在率の比になるのだ。しかし現在民間で使っている赤外線半導体レーザーの波長は1.3  $\mu\text{m}$ 周辺と1.5  $\mu\text{m}$ 周辺で、そのままではメタンの計測に使えない。そこで民間と共同で長い波長のレーザーを出す装置を作っている。

吉田研究室では試料の性質を考慮に入れ、この二つの方法を適切に使いつけてアイソトポマーを計測している。



## 地球環境問題とのかかわりあい

今まで述べてきた研究が、現実の環境問題に対してどのような位置にあるのかを先生に伺った。

地球環境問題は一種の社会問題だと先生は考えている。それを理解して良くするためには現象解明と影響対策の2つの方策があるという。

先生はこの両方が同じ割合で必要なのだと主張する。環境問題の場合、現象がよく分からないうちにいろいろな悪影響が出てきてしまい、影響対策が遅れがちになる。だからといって訳も分からず影響対策をすると、えてしてそれが間違っ

た影響対策でありがちだ。実際にどういう現象が起きているかを正確に理解することが大事なのである。したがって、影響対策をするタイミングは政府や国際機関が現象解明と影響対策の両方をもとに決定すべきなのだという。

先生の研究成果は、例えば「農場で温暖化ガスがたくさん出ているから減らすように努力すべきだ」というような形で政策側にも提言され、影響対策にフィードバックされていくことになるのだ。



## 研究のルーツから実現まで

さてここで、先生の研究の経緯を追いかけてみよう。先生の研究のルーツは学部卒業研究のときにまでさかのぼる。それは火山ガスをアイソトープで調べて地球内部の仕組みを解明するという研究であった。しかし先生は微生物の関係する化学もやりたかった。その行きついた先が現在のテーマである地球環境の研究である。

ところがアイソトープを研究し出すと、その研究をアイソトポマーで考えた方が有利だと気がついた。しかし、そのためには前述のような計測機械から作らなくてはならない。資金が必要なのである。だからアイソトープでスタートしなくてはならなかった。

転機は1996年度に訪れた。吉田先生を代表者とする「アイソトポマーの計測と環境物質の起源測定」という研究テーマが科学技術庁の科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業（CREST）において5年間にわたる「環境低負荷型の社会システム」というプロジェクトの一課題として採択されたのだ。もちろん吉田研究室がこのプロジェ

クトの中心である。このプロジェクトは、質量分析法の開発・レーザー分光法の開発・環境への適用・解析法の開発の4グループに分かれており、それぞれ分担して研究を推進している。

この外側に、世界的に「アイソトポマー・ネットワーク」というものができつつある。ここでは従来アイソトープで行われていた研究をアイソトポマーレベルで塗り替えたり、アイソトポマーの世界標準物質を決めて管理したりしている。

また、このアイソトポマー・ネットワークの核となっている研究室の中でも吉田研究室とドイツのMax Planck Inst. of Chemistryとアメリカのカリフォルニア工科大学の3研究室はトップレベルでの競争関係にある。しかし、互いに完全な敵対関係にあるわけではなく、スポーツ選手のように互いを尊重しあい、情報交換をきちんとしている。

このように大小のネットワークが研究を推し進めている。アイソトポマーはまだできたばかりの研究テーマである。だから理解して研究の輪に加わってくれる人が大切なのだ。

冒頭で先生の研究が新聞で取り上げられたことを紹介したがこの報道について先生は、「新聞の1面に『アイソトポマー』という単語が載ったという事実、それ自体がうれしい。DNAはわずかに10年でメジャーな単語になったが、『アイソトポマー』という言葉も新聞や雑誌などにあふれ、21

世紀の学問体系のキーワードになるといいな」と語られた。

最後に、お忙しいところ取材に応じていただいた吉田先生ならびに研究室の方々に感謝を申し上げます。

（小原 俊樹）