

ちか頃の話題

■ 安定同位体を利用した水循環研究

—人工衛星による観測—

水が海洋、大気、陸上の間をどのように循環するかは、気象学的、水文学的に重要なばかりではなく、人間社会の活動にとっても極めて大切な問題である。地球表層の水の約99%が海洋に存在している。人間活動に利用できる水のほとんどはもともと陸上に降り注いだ水であり、その多くは海洋から大気を通して運ばれたものであるにも関わらず、大気中に浮遊している水の量は、全体の0.001%に過ぎない（大気を通過していく量としても浮遊量の数十倍程度である）。つまり、非常に細いパイプを通して海から陸に運ばれているわけである。

このような水の循環、つまり、蒸発、輸送、凝結、落下、さらに再蒸発などといった水の動きを理解するために水の安定同位体が利用されている。水の同位体というのは、水分子を構成する水素と酸素の原子が通常よりも中性子を多く含む重い原子でできているもので、水の場合HDOとH₂¹⁸Oが主なものである。この同位体分子の存在比率は、一般には重い原子と軽い原子の存在比率に比例している。しかし、液体の水が蒸発して気体になったり、気体の水が凝結して液体に戻ったりする過程において常にその比率が一定に保たれているわけではない。通常の分子と同位体分子とでは化学的性質は同じであるものの、分子量の違いから気化に必要なエネルギーなどが微妙に異なるため、温度や蒸発速度などに依存して気体側に入る分子の比率が変化するのである。具体的には、液体が蒸発するときには重い同位体はなかなか蒸発せず液体側に留まり、気体側には軽い（つまり通常のH₂O）分子がより多く入り込むことが起きる（これを同位体分別と呼ぶ）。蒸発とは逆に気体が凝結するときには、重い分子（つまりHDOやH₂¹⁸O）の方がより早く凝結する。そして、それらの割合が温度や蒸発速度に依存して決まるわけである。その性質を逆手にとって、観測された雨

水や水蒸気中に含まれる同位体の割合から、水が蒸発したり凝結したりした環境の温度や大気状態を推定しようというのが同位体を利用した水循環研究である。

同位体の比率は非常に小さいためその変化量を分かりやすく表現するために、例えばHDOについては以下のように定義される同位体比が用いられる。

$$\delta D = \left[\frac{(D/H)}{(D/H)_{SMOW}} - 1 \right] \times 1000,$$

ここでSMOW（Standard Mean Ocean Water）は基準となる海水を表す。また、単位は%の1/10の‰（パーミル）である。この定義に従えば、例えば海面から蒸発した水蒸気中では、一般に海水中よりもDが少ないため第1項は1よりも小さく、 δ 値としては-20‰とか-30‰といった負の値を示すことになる。つまり、負の値の絶対値が大きいほど“軽い”ことを意味する。同様にH₂¹⁸Oについても $\delta^{18}O$ を定義する。これら2つの値は、1つの空気塊から水蒸気が凝結して取り除かれていく過程では、互いに直線的な関係にある変化をする。ただし、その直線をグラフにした場合の $\delta^{18}O$ 軸の切片の値は、最初にその空気塊に水蒸気が注ぎ込まれるときの環境に大きく影響される。その切片の値を“d-excess”と呼び、 δD 、 $\delta^{18}O$ と併せ蒸発時の環境を示す指標として利用される。

海面から水が蒸発したり、あるいは水蒸気が凝結して水滴ができたりする場合など、その変化がゆっくりとしている場合には、液相と気相との間で同位体の分別が平衡状態となる（平衡分別）。一方、海面上の湿度が低く強い風が吹いているときなど、水蒸気の蒸発が急激に起きる場合には、水面付近における分子の拡散速度が分別の比率に影響を及ぼしてくる（動的分別）。このとき、分子量の違いが拡散係数の違いを通じて分別係数の違いとして表れ、さらにその効果がHDOとH₂¹⁸Oとで異なっていることから、蒸発した水蒸気の“d-excess”の値に違いが生じる。つまり、この値が分かれば蒸発が起きた場所における大気状態に関する情報を得ることができるわけである（図1の概念図参照）。

水蒸気の蒸発時におけるような同位体分別は、凝結時においても起こる。今、凝結した水滴を徐々に落下させながら上昇している気塊を考える。このとき、気塊中の水蒸気と凝結する水滴との間で同位体分別が起こり、水滴側に重い同位体分子が、水蒸気側に軽い分子が多くなる。その軽い水蒸気を含む気塊がさらに上昇し凝結して

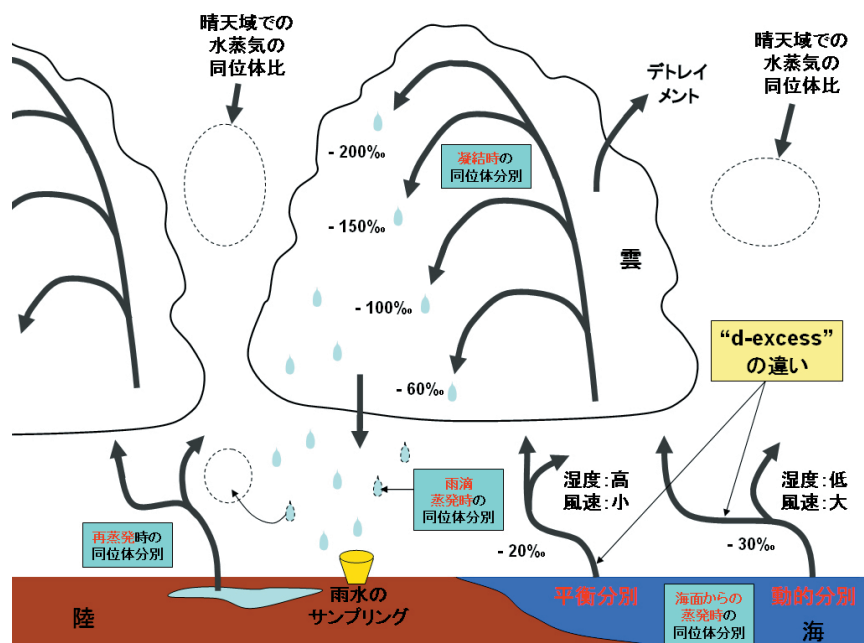


図1 同位体分別に関する概念図。

できた水滴は、周りの水蒸気よりは重いものの、それ以前に凝結した水滴よりは軽いものとなる。したがって低い高度で早い時期に落下した水滴の同位体比は大きく（重い同位体が多く）、より上層から降った雨の同位体比は小さい（重い同位体が少ない）というような傾向が現れてくることになる。このように、実際に地上で観測される降水には、蒸発と凝結のすべての過程における分別作用の履歴が反映されることになる。

同位体を用いた水循環の研究対象となる気象現象のスケールは様々である。国際原子力機関（IAEA）は世界的な規模で観測網を整備し、長期間にわたる均質なデータを提供している。このデータを用いては大陸規模のような広域的な水循環の研究が行われている。一方、一つの低気圧や前線帯といった、いわゆるメソスケールのシステム中における水循環の研究においても水蒸気の起源や凝結過程に関する情報を得る手段として同位体データは利用されている。さらに小さなスケールの対象としては、1個の雲（ひょう）粒子の内部に形成された層構造に対応して見られる同位体比の分布から、雲が雲内で経験する温度履歴などを推測する研究のようなものもある。また、変わったところでは、ワインの中の水同位体比からブドウの収穫された年の降水の特徴を探ろうなどという研究もある。

このような同位体の研究は、ほとんどが地上における降水の分析に基づくものであり、大気中に残った水蒸気の分析を行った例は極めて少ない。それは、上空の水蒸気の同位体比を測定するには、その値を変化させずに採

取し分析しなければならず、それを行うためには高度な測定技術が必要となるからである。しかし、空気塊から凝結して落下してきた雨水のみの情報からでは、雨を降らせた元の空気塊に関する情報がすべて得られるわけではなく、また、雨を降らせない気塊についてはまったく情報が得られないことになってしまう。そのため、何らかの方法で大気中の水蒸気の同位体比を求めることができれば、水循環の研究に役立つ情報が飛躍的に増えることになる。

このように上空にある気塊の情報を得る方法として最も有力なのはリモートセンシング技術である。近年、気球や飛行体に搭載した高分解能な赤外分光装置を用いて、太陽を光源とした光吸収法により成層圏における水の同位体比を測定した報告が相次いでいる。これらの観測結果からは、メタン分解による水の生成や対流圏と成層圏との間の物質交換過程に関する情報が得られ、詳細なモデル計算とも併せ成層圏における水の起源に関する研究は飛躍的に進歩した。しかし、この測定手法では大気を横に透かして見るため、対流圏ではほとんどすべてのケースで観測視野内に雲が入り、データを取得することができなくなる。そのため、これまで対流圏の水同位体をリモートセンシング手法により観測した例はなかった。

我々の研究グループでは、1996年に打ち上げられた日本のADEOS衛星に搭載された旧通産省の温室効果気体センサーIMGのデータ解析から、対流圏の水蒸気の同位体比（ δD ）の緯度分布を得た（図2: Zakharov et al., 2004）。これはリモートセンシング手法によるものとしては世界

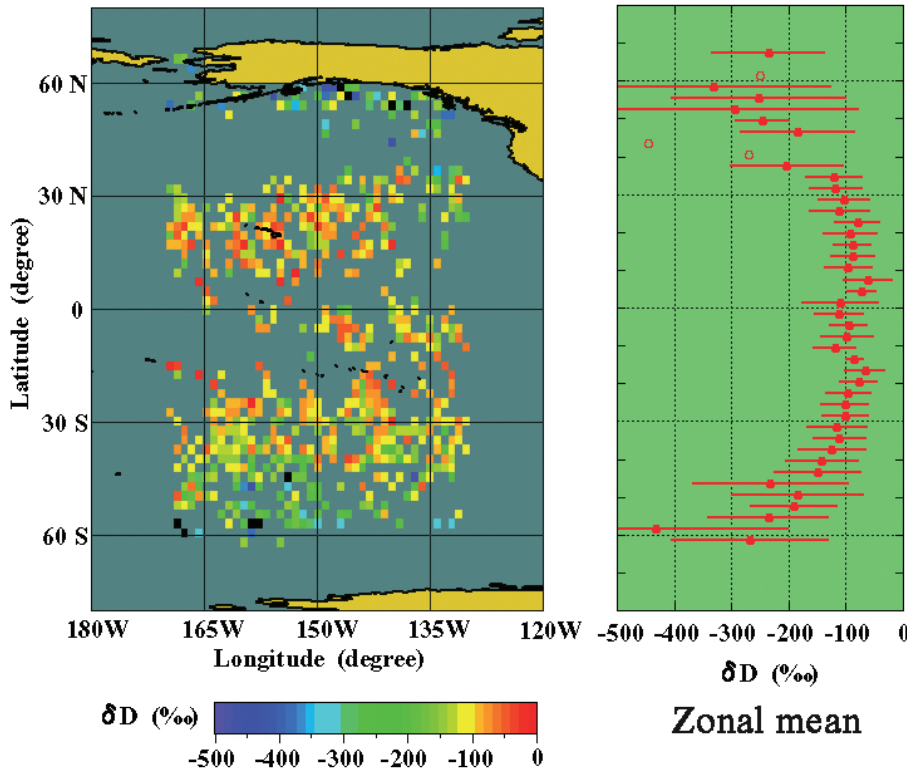


図2 ADEOS衛星搭載IMGセンサーのデータ解析から得られた大気中の水蒸気中の同位体 (HDO) 比の空間分布。右図は緯度3°毎の区間における平均値。データは1996年12月から1997年6月までの間の晴天域において取得されたもの。

[Zakharov et al., 2004]

で初めての結果である。IMGセンサーは地球の出す波長 $3.3 \sim 15 \mu\text{m}$ の熱赤外放射スペクトルを測定するもので、上記成層圏用センサーとは異なり衛星からまっすぐ下向きにセンサーを向けているため、測定対象地点以外の場所の雲の影響を受けずに観測ができる。そのことにより対流圏の同位体比の測定が可能となったわけである。データ解析方法等の詳細は原著論文を参照頂きたいが、この解析で得られた結果は、水蒸気の蒸発、輸送、凝結に関する緯度ごとの特徴を示唆するものであり、現在、気象情報と併せた詳細な解析を進めているところである。

同位体を大気大循環モデル(AGCM)に導入し、モデル中での水輸送過程の検証と、それを踏まえての水循環研究を行おうという研究はAGCMが広く用いられるようになった頃から行われている。現在、世界的には5~6カ所の研究グループが活発に研究を行っている。気候システム研究センターにおいても、CCSR/NIES Ver.5.4 に故沼口敦氏が同位体プロセスを導入し、いくつかの研究報告が行われた(科研費報告:11640426など)。このモデルは、その後北大の山中康裕氏、石崎安洋氏(現、東大生産研)および、地球観測フロンティアの研究グループに引き継がれ、詳細な計算結果の検証や、上位バージョンのAGCM等への移植が始められている。我々のグループでは、メソβからγスケールでの現象に関連した観測データの解析を進めていることから、今後、非静力学モデル(NHM)の開発グループと共同で、このスケール

での水同位体循環のモデル化を行うべく準備を進めているところである。AGCMからNHMが対象とするいずれの現象スケールにおいても、これまでモデル計算結果との比較、検証には、主として地上における降水中の同位体データが用いられ、水蒸気の同位体についてはほとんど利用できるデータがなかった。しかし、今回、我々が衛星データ解析から水蒸気の同位体比データを得たことで、モデル計算との比較研究は新たな局面を迎えることになると考えている。今年6月には、IMGとほぼ同性能の対流圏観測用センサーTESが米国NASAのグループにより打ち上げられる。米国の研究グループとしては標準成果品として同位体比データを提供するとはしていないが、放射スペクトルデータの供給さえあれば、我々のグループで同位体比を計算し、研究ベースでデータを提供することも可能と思われる。今後、地上における降水の同位体測定結果と併せ、衛星による水蒸気の同位体測定結果が水循環研究用の基礎データとして広く用いられるようになるものと期待される。

参考文献

Zakharov, V.I., R. Imasu, K.G. Gribanov, G. Hoffmann, and J. Jouzel (2004), Latitudinal distribution of the deuterium to hydrogen ratio in the atmospheric water vapor retrieved from IMG/ADEOS data, *Geophys. Res. Lett.*, in press.

(東京大学気候システム研究センター助教授 今須良一)