

水の酸素・水素安定同位体を用いた地球水循環研究と今後の展望

檜山 哲哉¹⁾ 阿部 理²⁾ 栗田 直幸³⁾ 藤田 耕史²⁾
池田 健一¹⁾ 橋本 重将¹⁾ 辻村 真貴⁴⁾ 山中 勤⁵⁾

¹⁾名古屋大学・地球水循環研究センター
(〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

²⁾名古屋大学大学院・環境学研究科
(〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

³⁾海洋研究開発機構・地球環境観測研究センター・水循環観測研究領域
(〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2-15)

⁴⁾筑波大学大学院・生命環境科学研究科
(〒305-8572 茨城県つくば市天王台1-1-1)

⁵⁾筑波大学・陸域環境研究センター
(〒305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1)

水の酸素・水素安定同位体（以下、水の安定同位体）を用いた水循環過程に関する重要な研究および最近の研究のレビューを行った。海水の同位体組成（同位体比）に関する知見、同位体大循環モデルを用いた全球スケールの水循環研究、降水形態による同位体比の差異や局域スケールの降水過程に関する研究、流域スケールでの流出過程、植生に関わる蒸発散過程（蒸発と蒸散の分離）の研究をレビューした。加えて、幅広い時間スケールでの気候変動や水循環変動に関する研究として、氷床コアや雪氷コアを利用した古気候・古環境復元とそれらに水の安定同位体を利用した研究についてもレビューした。最後に、水の安定同位体を利用した水循環研究の今後の展望をまとめた。

キーワード：水循環過程、水の酸素・水素安定同位体、同位体比、今後の展望

I. はじめに

水分子を構成する酸素と水素の安定同位体（以後、水の安定同位体と称する）は、従来から海洋循環や大気大循環などの広域的な水循環研究や、氷床コアを利用した古気候学的研究における気温の代替指標（プロキシ）に供されてきた。最近では、よりローカルな雪氷過程、流域流出過程、植生地の蒸発散過程や、メソスケールの降水過程にも利用されてきている。

水の安定同位体の表記としては、次式に示す同位体比（ δ 値）が一般的である。

$$\delta \equiv \left(\frac{R_s}{R_{SMOW}} - 1 \right) \quad (1)$$

ここで、

$$R \equiv \left[\frac{{}^2H}{{}^1H} \right] \quad (2)$$

あるいは

$$R \equiv \left[\frac{{}^{18}O}{{}^{16}O} \right] \quad (3)$$

である。(1)式の R_s はサンプルを、 R_{SMOW} は標準平均海水(SMOW)を意味する。(2)式の場合の δ 値は水素同位体比(δD)であり、(3)式のそれは酸素同位体比($\delta^{18}O$)である。なお(1)式は微小な値となるので1,000倍し、 δD も $\delta^{18}O$ も千分率(‰:パーミル)として表すのが一般的である。

一方、d-excessあるいはd値(‰)($=\delta D - 8 \times \delta^{18}O$)も定義される。水の安定同位体に関するこれらの指標は、蒸発・凝結時の同位体分別における平衡・非平衡過程に基づいて、水の起源の特定や、起源を異にする水の混合過程を論ずる研究等、多くの水循環

研究に用いられてきており、今後も、新たな水循環研究への可能性を十分に有している。

名古屋大学地球水循環研究センターでは、平成15年度から、センター計画研究「マルチスケールの水循環過程に対する水の酸素・水素安定同位体の応用」を企画・運営してきた(地球水循環研究センター水同位体分析システム運営委員会, 2005)。この計画研究では、各年度末に成果報告会を兼ねた研究発表会を実施し、水の安定同位体を用いた広域的な水循環過程の研究を推進するとともに、これに関係した研究を行っている日本国内の研究者間の交流を進めている。特に、観測・分析手法と同位体比測定の精度の問題から研究例が少なかった局域的な水循環過程(メソスケールの雲・降水過程等)に、水の安定同位体を用いる方法論を探り、新たな観測的・数値モデル的研究も実施している。

本総説では、この研究計画を遂行するにあたり、従来までの水循環研究に水の安定同位体がどのように応用されてきたのかを概観し、今後の展望を行うことを目的とする。本総説でレビューする内容は、陸水の起源である海水の同位体比、同位体比を利用した大気大循環モデル(AGCM)、氷床コアによる古気候復元、降水形態と同位体比、そして、降水・降雪後の重要な3つの水文過程(雪氷過程、流域流出過程、植生・蒸発散過程)、の合計7テーマである。なお、土壌水分と同位体比、特にそれらの鉛直分布に関する研究や、同位体比を用いた陸域と海洋間の水輸送に関する研究については、対象とする場の条件(特に土壌や帯水層の物理特性)によって得られる知見が大きく異なるため、本論文ではそれらの総括的なレビューを割愛した。また、降水や地下水の同位体に関する研究レビューはこれまでも数多くあり、例えばClark and Fritz (1997), Sharp (2007), 酒井・松久(1996)などに詳細が記述されているので、これらの文献を参照されたい。

II. 海水の同位体比

海水の同位体比は本質的に海洋への淡水流入量、海面からの蒸発量、流入する淡水の同位体比及び蒸発する水蒸気の同位体比、によって決まる。河川水、降水、融雪・融氷水などの淡水は一般に海水よりも低い同位体比をもつため、これらの流入により同位体比は低下する。一方、海面からの蒸発は海水から選択的に軽い水分子を除去する作用であるため、蒸

発量が大きくなると海水の同位体比は高い値を示す。これらの淡水流入及び蒸発は海水の塩分の支配要因でもあることから、流入する淡水と水蒸気の同位体比を不変とみなすことができる系において、塩分と同位体比は正相関を示す。実際に酸素同位体比と塩分、水素同位体比と塩分についてはそれぞれEpstein and Mayeda (1953)とFriedman *et al.* (1961)により初めて報告されて以降、海域による傾き・切片の違いはあるものの第一次近似としては直線関係にあると考えてよい。

同位体比と塩分の関係を示す直線の傾きの違いは主に流入する淡水の同位体比に起因する。Dansgaard (1964)が示すように、一般に降水の同位体比は高緯度になるほど低い値を示す。またこの降水が集積し流出する陸水も同様の緯度分布を示す。したがって同程度の塩分低下をもたらす淡水の希釈でも、高緯度になるにしたがって同位体比をより大きく低下させる効果を有する。

海面から蒸発する水蒸気の同位体比についてはCraig and Gordon (1965)に太平洋及び大西洋の緯度方向の分布について、洋上の観測結果(酸素同位体比のみ)と、成因に関する詳細が述べられており、現在でも広く引用されている。彼らは太平洋の観測結果から水蒸気の同位体比が第一次近似的には洋上の相対湿度とよい相関があること、及び気相-液相間の平衡同位体分別を仮定した場合に比べて低い値を示したことから、気液境界面における分子拡散による動的同位体効果を導入し、発生する水蒸気の正味の同位体比が、洋上大気の相対湿度と水蒸気同位体比によって支配されていることを示し、現在ではCraig-Gordonモデルと呼ばれる一連の理論を整備した。水蒸気の同位体比に関しては、Gat (2000)による優れたレビューがあり、そちらを参照されたい。ちなみに、Craig-Gordonモデルは現在では、気孔の開閉に伴う葉面からの水蒸気蒸散過程の解明に広く応用され(例えばFarquhar *et al.*, 1993など)、加えて、氷床コアの δ 値変動の解釈のために不可欠なモデルとなっている。

Craig and Gordon (1965)は上述の同位体比と塩分の関係についても海域別の傾きの変化を整理し、表層以深においてはいずれも保存成分であることから、海洋学分野でよく用いられるT-Sダイアグラム(水温と塩分の散布図)に比肩する利用法としての δ -Sダイアグラム(同位体比と塩分の散布図)を提唱した。海水の水温と塩分は水の密度を決める要

素であるのに対して、同位体比は水塊の起源を情報として保存するという違いがある。実際には、海水中の同位体比の小さな変化を有意に検出することは難しく、限られた研究室でのみ可能であることから、以後この解析手法が広く普及したとは言い難いものの、いくつか最近の応用例を紹介する。上述したように、 δ -Sダイアグラムにおける直線の傾きは高緯度ほど大きくなる、すなわち塩分変化に対する感度が高くなることから、極付近の海洋で応用される例が多い。

Östlund and Hut (1984) は北極海海水の酸素同位体と塩分観測結果に基づき、海水形成・融解過程と陸水・降水の流入過程の寄与を求め、年間の海水形成量と淡水流入量をそれぞれ分類して見積もった。また Weppernig *et al.* (1996) は南極ウェッデル海水の酸素同位体比、塩分及び溶存ヘリウム4の分析に基づき、棚氷由来の水 (Ice Shelf Water) が、南極底層水の起源であるウェッデル深層水及び底層水の形成に大きく寄与していることを確認した。最近では、Yamamoto *et al.* (2001, 2002) が、太平洋中層水の起源と考えられているオホーツク海由来の中層水の観測結果に基づき、海水形成時の塩分上昇に伴う北太平洋中層水の形成量の見積もりを行っている。

中・低緯度域の研究例は少ないものの、Benway and Mix (2004) は東部熱帯太平洋パナマ沖の海水試料の酸素同位体比と塩分の分布から、パナマ湾に流入する淡水のうち大西洋起源の降水として流入する成分が約半分であることを示した。また Kim *et al.* (2005) は対馬海峡の海水試料から、対馬海流の起源として、台湾海峡からの低塩分水が寄与していることを定性的ながら示した。

これら外洋を対象とした研究では、水塊の起源と混合過程を酸素同位体比と塩分の δ -Sダイアグラムによって評価する手法が一般的であるが、より閉鎖的な海域では、さらに水素同位体比を加えて三成分のボックスモデル計算も用いられる。Gat *et al.* (1996) は、東地中海域の水素及び酸素同位体比と塩分の観測とボックスモデルによる解析により、同域の蒸発量/淡水流入量比を求めた。この手法は海洋よりもむしろ湖沼でよく用いられる (例えば Dinçer, 1968; Zuber, 1983; Gibson, 2002 など)。特に淡水湖は塩分を持たないため、同位体比がより重要な測定項目となる。

最後に、アメリカ航空宇宙局のゴダード宇宙科学研究所 (NASA/GISS) による海水同位体データベ

スについて紹介する。これは最初に Schmidt (1999) により世界中の観測結果を集積し、グリッドデータとして示されたものを Bigg and Rohling (2000) が観測例を増やして、観測点データベースとして再整備したものに基いている。現在では1949年以降の約22,000の観測結果をNASA/GISSのホームページ上で閲覧することができる (Schmidt *et al.*, 1999)。また最近、LeGrande and Schmidt (2006) が、塩分とリン酸イオンの観測結果に基づく過去50年間の酸素同位体比のグリッドデータ ($1^\circ \times 1^\circ$) を計算した。このデータベースも併せて公開されており、今後の活用が期待される。

Ⅲ. 同位体大気大循環モデル

国際原子力機関 (IAEA) と世界気象機関 (WMO) が協力して収集している、月単位の全球降水同位体観測データ (GNIP; <http://isohis.iaea.org> から取得可能) をみると、全球の降水の同位体比分布には、以下の特徴があることが知られている (例えば Dansgaard, 1964; Rozanski *et al.*, 1993; Araguás-Araguás *et al.*, 2000 などを参照)。

- 1) 低緯度地域で降水の同位体比が高く、高緯度に向かうにしたがって同位体比が低くなる (緯度効果)。
- 2) 同じ緯度でも、沿岸部よりも大陸内部の同位体比が低くなる (内陸効果)。
- 3) 大陸内部では、高度が高くなると同位体比が低くなる (高度効果)。
- 4) 中・低緯度では、同位体比の変化は小さいが、降水量が多い地域で同位体比が低くなる傾向がある (量的効果)。

大気中の水の同位体比は、地表面からの蒸発、降水形成、雨滴の蒸発、そして他の水蒸気塊との混合といった複数の過程で変化しており、上記した同位体比の分布特徴は、これらすべての情報を積算した結果である。大気循環場と同位体比の関係を理解するには、現在の気候循環場を再現できる数値モデルを用いて、個々のプロセスを紐解いていかねばならない。本章では、これまでに開発された同位体大気大循環モデル (Iso-AGCM) に関して簡単にレビューをするとともに、最近のIso-AGCMを使った研究を紹介する。

Iso-AGCMの歴史は、Joussaume *et al.* (1984) らによって、フランス気象力学研究所 (LMD) で開発さ

れた大気大循環モデルに同位体物理過程を組み込み込まれたのが最初であり、その後、Jouzel *et al.* (1987) らが、NASA/GISSで開発された大循環モデルを使って、初めて全球の同位体比分布の再現に成功した。現在では、ドイツのMax Planck研究所で開発されたECHAM4 (Hoffmann *et al.*, 1998)、オーストラリアのメルボルン大学で開発されたMUGCM (Noone and Simmonds, 2002)、そしてNASAのGISS-Eモデル (Schmid *et al.*, 2005) を使った研究が数多く行われているとともに、これらのモデル間の比較を行う、水安定同位体相互比較グループ (SWING) とよばれるモデルの相互比較プログラムも行われている。これまでに6つのIso-AGCMが報告されているが、SWINGには上記の3つのみが参加している。日本では、CCSR/NIES/FRCGCによって開発されたMIROC3.2に同位体物理過程が組み込まれており、その結果が報告され始めている。

これまでのIso-AGCMを使った研究としては、過去の水循環の履歴が氷床コアや堆積物に保存されているという同位体の利点を反映して、以下に示す古気候復元研究に広く使われてきた。

- 1) 氷床コアを用いた古気候復元に用いられる、気温と同位体比といった経験式について、全球応用可能かどうかの汎用性、そして古環境でも使えるかどうか、その普遍性を調べる (例えばJouzel *et al.*, 1997; Jouzel *et al.*, 2003など)。
- 2) 同位体トレーサーに加えて、仮想水トレーサー (起源毎にタグをつける) を合わせてシミュレーションを行い、仮想水トレーサーによって推定された氷床域の降雪起源の検証を、モデルで再現された降雪の同位体比と観測値の比較を通じて行う (例えばKoster *et al.*, 1992; Charles *et al.*, 1994; Delaygue *et al.*, 2000bなど)。
- 3) 最終氷期など、ある特定の時代における同位体比分布を再現し、各地域の氷床コアに記録された同位体比との対応を調べながら、当時の大気循環場を含む古環境復元を行う (例えばJouzel *et al.*, 2000; Hoffmann *et al.*, 2000; Werner *et al.*, 2001など)。

最近では、計算機の能力が進歩し、Iso-AGCMを使って高解像度かつ長期積分を行う研究が可能となり、大気大循環モデル相互比較実験 (AMIP) 型実験を行うなどして、過去数十年間の年々の同位体比変化を再現する研究が行われている (Vuille *et al.*, 2003a, 2003b; Brown *et al.*, 2006)。これらの研究で

は、各地域の同位体比の年々変動が、どのような環境因子によって支配されているか解析するとともに、年々の記録が残る氷床コアや珊瑚の同位体比変動との比較を行っている。また、エルニーニョ・南方振動 (ENSO) などの気候変動やモンスーンの変動による大気循環場の変化に伴って、熱帯域全体で気温、降水量、そして水蒸気起源の変化が起こり、これらが複合的に作用することで、熱帯から亜熱帯地域の広域にわたり、降水同位体比の変化を引き起こしていることがモデル研究から明らかになってきた。低緯度地域の雪氷コアから得られる同位体比変動を再現することによって、過去の大気循環場の変化が復元されつつある (Hoffmann *et al.*, 2003; Vuille *et al.*, 2005; Vuille and Werner, 2005)。

上述のように、これまでは、Iso-AGCMを使った気候変動研究が数多く行われてきたが、近年では、同位体物理過程を組み込んだ陸面モデルが普及しつつあり、大陸規模水循環研究にも同位体が応用されはじめている。Iso-AGCMの出力を陸面モデルに導入し、各地域の水文特性を明らかにするとともに、その地域間比較を行うといった研究が盛んに行われている。さらに、iPILPS (同位体を用いた陸面パラメタリゼーションスキーム相互比較プロジェクト) を通じて、モデルも進歩しつつある (Henderson-Sellers, 2006; Henderson-Sellers *et al.*, 2006)。

しかし、大気データを与えて、陸面応答を調べるモデル研究が数多く行われている一方で、同位体陸面モデルをIso-AGCMと結合し、大陸規模での大気陸面間の相互作用を解析する研究はまだ行われていない。過去に行われた降水の同位体比を使った解析研究成果から、大陸内部の降水の同位体比は降水の再循環の強度に応じて大きく変化することが知られており (Salati *et al.*, 1979; Rozanski *et al.*, 1982; Koster *et al.*, 1993; Kurita *et al.*, 2004)、同位体トレーサーは、大気陸面間の相互作用を研究するためのよい指標であると考えられている。また、夏季の大陸内部における降水の同位体比は、陸面から大気に放出される蒸発散由来の水の同位体比を強く反映して変化する。さらに、蒸発散する水の起源である土壌水の同位体比は降水の季節平均値になるため、土壌水のメモリー効果 (土壌水の鉛直移動速度や滞留時間に応じて降水の同位体比が復元できること) を考慮することによって、同位体トレーサーは、大気陸面間の相互作用研究を行う際に強力な武器となる。このように、同位体トレーサーを用いた大気陸面間の相互

作用研究を行うためには、複雑な地表面過程を含む Iso-AGCMを開発するとともに、モデルの検証を行うための同位体比の観測データが必要である。最近では、Iso-AGCMとiPILPSに参加した陸面モデルを結合させるようなモデル開発の動きがある。検証用のデータ採取に関しては、IAEAの主導で、生物圏大気圏水蒸気同位体観測プロジェクト (MIBA) や、全球河川水同位体観測ネットワーク (GNIR) が進行している。

上記のように、Iso-AGCMが高度化するにつれて、気候研究だけでなく、水循環研究に対しても、同位体の活用が益々着目され始めている。さらに最近では、上述したIso-AGCMだけでなく、領域モデルに同位体を含む物理過程が組み込まれ (Sturm *et al.*, 2005), より短い時間スケールの解析も可能になりつつある。しかし、モデルの結果には、水輸送過程だけでなく、同位体に関する物理過程も反映されている。同位体比を水循環の指標として用いるためには、同位体比を変化させるような水の相変化を伴う地表面過程 (植生・蒸発散過程) や、降水形態の差異や水蒸気輸送にも十分着目した雲物理過程など、水循環の素過程に関する研究が益々求められる。したがって、それらの素過程を解明するための観測的研究や、モデルの検証を行うためのデータの取得も引き続き必要である。まだ発展途上段階にあるが、水循環研究に資するための解析ツールと観測データは徐々に増えてきており、近い将来、同位体比がより身近なツールとして、水文・気象分野に応用されるものと期待される。

IV. 氷床コアにおける同位体比 —降水の季節性に着目して—

南極氷床やグリーンランド氷床で掘削された氷の柱状サンプル (氷床コア) は、過去の気候変動を読み解く上で貴重な試料である。その氷床コアの氷に含まれる様々な成分の中でも、同位体比は気温の指標として最も基本的な要素であると言ってよく、氷期—間氷期の温度変化を示す図は様々な所で引用されている。とはいえ、同位体比そのものが気温と直接に関係しているわけではなく、水蒸気起源である海洋から氷床コア掘削地点である氷床内陸への輸送過程における「水蒸気の除去・蒸留の程度」が気温によって決まることで、同位体比と気温の間に関係が成り立っていることは心に留めておく必要がある。

実際に用いられる同位体比と気温の関係は、季節

変動や年々変動といったような時間的に得られたデータに基づいているわけではなく、地理的分布によって得られた関係式を時系列試料である氷床コアに適用していることも重要な点である。極域氷床における同位体比と気温の地理的な関係式は、表面の雪試料をある程度 (数十cm~1 m程度) まとめて採取・分析することで季節変化や数年の変動が打ち消された同位体比を求め、雪温についても季節振幅が無くなる10 m 深の温度を測定し、この同位体と雪温の組み合わせを広い範囲 (例えば沿岸から内陸千キロにかけて) について得ることで確立される。ただし、これまでに地理的な観測によって同位体比と気温の関係式を求めた例はそれほど多くなく (Johnsen *et al.*, 1989; Lorius and Merlivat, 1977; Dahe *et al.*, 1994; Satow *et al.*, 1999), その経年変化は把握されていない。一方、南極氷床内陸における降雪中の同位体比の時間的な変化を観測した例はわずか三例を数えるにすぎない (Jouzel *et al.*, 1983; Motoyama *et al.*, 2005; Fujita and Abe, 2006)。この三例とも季節変化をみたもので、同位体比—気温の関係が年々でどのように変化しているか、あるいはしていないかについて明らかにするためには、内陸での継続的な観測が期待されるが、実現は極めて難しいと思われる。

我々は現在、間氷期のなかの温暖期に生きており、氷期における気温と同位体比の関係が地理的に求めた現代の回帰直線の上に乗っているかどうかを確かめるすべはない。このため、氷期における同位体比を用いた気温の検証は、同位体比とは独立した手法である掘削孔温度から復元された温度によっておこなわれている。氷床内部の温度は表面から雪、氷を伝達する伝導熱によって決まり、表面から10 mで温度の季節振幅が消えることからわかるように、氷期の深度 (ドームふじで約500 m, Watanabe *et al.*, 2003) ではわずかな温度アノマリーにしかならず、復元のためには精密な温度測定が要求される。掘削孔から復元された氷期の温度は同位体比から予想される温度よりも、グリーンランド氷床コアプロジェクト (GRIP) で約11 °C (Dahl-Jensen *et al.*, 1998)、南極のVostok基地で約5 °C (Salamatin *et al.*, 1998) も低いことが明らかにされている。このことは、同位体比の時間変動が地理的關係から予想されるよりも小さく、復元される温度変化幅が過小評価されていることを意味している。同様の傾向は窒素やアルゴンのガスの安定同位体を利用した研究によっても

指摘されている（例えば、Severinghaus and Brook, 1999）。

一方、氷床コア中の同位体比の変動をもたらす要因を探るために、安定同位体に関する素過程を組み込んだ同位体大気大循環モデルを用いた研究は盛んに進められてきた（第III章を参照）。大気大循環モデルの中では主に、海水温や氷床・海陸分布などについて現在気候と最終氷期の境界条件を与えた再現実験の比較などがおこなわれ、初期のものとしては、Charles *et al.* (1994) によるグリーンランドにおける降水の水蒸気起源の変化を論じた研究があげられる。彼らは、海洋上での蒸発からグリーンランド氷床上での降水に至るまで、同位体比の変化を計算するとともに、それぞれの水蒸気起源に「タグ」をつけ、氷期一問氷期における各起源の寄与率とその変化を求めた。それによると、氷期は現在の気候に比べ、海水と北米氷床の影響でグリーンランド近傍からの水蒸気の寄与が減り、北および熱帯大西洋からの寄与が相対的に増加することで、より遠方からの水蒸気の寄与が多くなる。その結果、現在の降水にみられる気温と同位体比の関係よりも、さらに同位体比が小さかったとしている。この報告に対し、Steig *et al.* (1994) は、氷床コアを形成するのは降水そのものであり、降水がなければその時の気温がいくら変動していても氷床コアには記録されないという、いわば当たり前の事実が忘れられているとコメントした。彼らは、グリーンランド沿岸で記録された約100年の気温を降水量で重み付けすることで、単純平均の気温と比較した場合よりも氷床コアの同位体比の変動とより良い相関をもつようになることを示し、氷期一問氷期の問題を扱う上では降水の季節性の変化を注意深く扱うべきであると主張した。この指摘に対しては、Charles *et al.* (1995) が反論を展開したものの、その後のAGCMの改善にともない、グリーンランドにおける同位体比の変動幅の過小評価はSteig *et al.* (1994) の指摘通り、降水の季節性が氷期一問氷期で変化することが主な原因であるとの認識に落ち着いている（Krinner *et al.*, 1997; Werner *et al.*, 2000）。すなわち、氷期におけるグリーンランド内陸では、冬季の水蒸気発生を遮断する海水の面積が増加し（Krinner *et al.*, 1997）、冷たく乾燥した北方からの空気塊の移流が増加する（Werner *et al.*, 2000）ことによって、現在気候に比べて冬の降水量が著しく減少し、結果として氷床コアの同位体比は夏季の情報を多く含むようになる。したがっ

て、夏季と冬季の降水量に大きな差が無く、どちらの情報も含んでいる現在気候に比べて、より気温が低かったものと予想される氷期における同位体比が、それほど低くならないのである。

一方、南極氷床は周辺を海洋に囲まれているために、氷期一問氷期で水蒸気輸送の経路が大きく変化せず、降水の季節性の影響は少ないと言われているものの（Krinner *et al.*, 1997; Delaygue *et al.*, 2000a）、南極内陸での降雪をモデルで再現できているかどうかについて、検証のための観測データがそもそも得られていないこともあり、議論の余地が残されている。南極内陸における降水に関する研究はBromwich *et al.* (2004), Massom *et al.* (2004), Bindshadler *et al.* (2005) によるものがあるが、どちらかという氷床全体の質量収支に焦点を当てており、氷床コアの解釈に結びつくような研究は今のところ見あたらないのが現状である。

降雨・降雪によって、水蒸気が大気から除去される際に生じる水蒸気同位体比の変化についてはおおむね理解・再現されている現在、水蒸気起源の海水温度とそこでの蒸発過程、水蒸気の輸送経路とともに、降水がどのように氷床内陸にもたらされているかについての観測的研究と新たなトレーサーと研究の切り口が必要とされている。この他の氷床コア中における同位体比に関する話題は、Johnsen *et al.* (2001), Jouzel *et al.* (1997) およびJouzel *et al.* (2003) によるレビューに詳しいが、日本語では植村 (2007) による網羅的な解説が秀逸であり、そちらを参照されたい。

V. 降水形態と降水の同位体比

過去の降水同位体比の変動を知ることができるのは、高緯度や標高の高い地域に限ったことではない。高緯度の氷床コアを利用する以外にも、中・低緯度における樹木の幹のセルロース（Epstein *et al.*, 1976）や湖底に堆積した炭酸塩（Hammarlund *et al.*, 2002）から、過去に遡って降水同位体比を推定することが可能である。また、鍾乳洞内の石筍の炭酸カルシウムの酸素同位体比にも、洞内の気温変動の影響も含まれてはいるが、洞内の水、すなわちその地域の降水の同位体比変動が記録されている（Hendy and Wilson, 1968）。このようにして、中・低緯度地域からも過去の降水同位体比の時間変動が取り出されるわけであるが、それが古環境復元に有効に利用

されるかどうかについては、その変動が何に起因して生じたものか、明確な因果関係が証明されているかに依っている。

量的効果としてよく知られているように、降水量が増えると降水同位体比は低くなる。特に熱帯では、月降水量とその同位体比の間に負の相関をもつ観測地点が多く (Dansgaard, 1964)、東アジアの長江以南の地域でも、この関係はみられる (Araguás-Araguás *et al.*, 1998)。これは、降水効率と降水量が増加した結果、降水同位体比が低くなったためと考えられている。加えて、雨滴が落下する際に周囲の水蒸気と同位体交換をおこなったり、蒸発したりすることによって同位体比は高くなる一方、降水強度が大きくなるとこの効果が小さくなり、降水の同位体比が低くなることが知られている (Dansgaard, 1964)。ただ、これらの説明では、降水形態が降水同位体比形成に及ぼす影響については言及されていない。熱帯では対流性降水が卓越し、全降水量に対する対流性降水の割合が高く、降水形態による降水同位体比の変化は考慮しなくても良いのかもしれない。また東アジアでは、その割合は層状性降水の割合と拮抗し、さらに、その割合が季節変化することが報告されている (Fu and Liu, 2003)。こうした地域で、安易に量的効果で降水の同位体比変動を説明すると、古環境復元における同位体の信憑性に問題が生じてくる。地点毎に、経験的ではなく、理論に裏打ちされた降水同位体比の変動要因の解明が望まれる。また、ここで強調したいことは、あくまでもこの関係は観測から得られた季節変動を説明したに過ぎず、年々変動に適用できる関係であるか否かについての確認が必要ではないか、ということである。特に、降水量のみならず、大気循環パターンや降水形態の変化が、降水同位体比に及ぼす影響について、年々変動スケールの観点から詳細に解明されなければならない。

現在、このような研究が皆無であるということはない。オーストラリアのタスマニア島での5年間にわたる毎日の降水試料の同位体分析から、量的効果を示唆する結果が得られたが、その機構は、以前唱えられたものとは異なり、総観気象場と密接に関わっていることが明らかになっている (Treble *et al.*, 2005)。また、アメリカのニューヨークで観測された量的効果は、対流性降水と層状性降水の割合に起因することが示されている (Gedzelman *et al.*, 1987)。

さらに興味深い研究結果として、メキシコ湾や熱

帯太平洋での観測から、降水同位体比に大きく影響する降水起源の大気下層の水蒸気が、吹走中にその経路近くで発生した擾乱の影響を受けてCraig-Gordonモデルで考えられる値と比べても小さな同位体比をもつことがわかっている (Lawrence and Gedzelman, 2003)。この影響を受ける水蒸気を起源とする降水がある地域では、量的効果では説明できない降水同位体比変動が生じることになる。

このように、降水同位体比の決定要因が地域毎の特徴をもっていることが、過去の研究から明らかである。このことは、量的効果を普遍性があるように利用するのではなく、降水形態の地域性を考慮した上で同位体を古環境復元に利用することが必要であることを明示している。また、環境が変われば降水機構も変化することが予想されるため、対象とする地域の降水の同位体比の形成過程は異なってくるであろう。現在の様々な地域において降水同位体比が変動する機構を明確に理解することで、過去の降水形態の変化に応じた降水同位体比の変動を復元することが可能になると思われる。その結果、量的効果だけで議論した場合よりも、大気水循環や古気候研究において、同位体の信憑性がさらに高まるものと考えられる。

Ⅵ. 積雪中の同位体比変化

本章では、降雪後の積雪中の同位体比の鉛直分布に着目する。特に中・低緯度の標高が高い地域に存在する氷河を念頭に、降雪後、圧密によって氷となり掘削されるまでを雪氷過程として取り上げる。

IV章では南極氷床やグリーンランド氷床で採掘された氷の柱状サンプルを氷床コアと呼んだが、場所を限定しない氷の柱状サンプルを雪氷コアと呼ぶ。雪氷コアの同位体比から過去の気候を復元する際に問題となるのが、採取した雪氷コアが「降雪時の同位体比を保存しているか」という点である。堆積後の同位体比に影響を与える変化には、削剥や再配分、氷河や氷床の流動とともに、融解や蒸発に伴う相変化がある。このため、雪氷コアを採取するにはこれらの影響の最も少ないところを選択する。ちなみに南極氷床やグリーンランド氷床で得られる氷床コアの場合、極低温という気候条件のため、融解や昇華、あるいは凝結の影響は無視できるものと考えられている。

氷床コアのみに依存した過去の気候の復元には限

界がある。古気候を全球的に復元するためには、中・低緯度の山岳氷河で採取された雪氷コアを用いる必要がある。しかしながら、雪氷コアの場合には、融解や昇華の影響を無視することはできない。“現在”採取した雪氷コアから得られた同位体比を用いて、降雪した当時である“過去”の降雪同位体比を推定するという観点において、雪氷過程における同位体比の研究が重要視される理由はここにある（例えば、Aizen *et al.*, 1996；Thompson *et al.*, 2000；Duan and Yao, 2003；Kreutz *et al.*, 2003など）。

降雪ではなく、積雪の同位体比の地域特性に着目したKrouse *et al.* (1977) の論文は特筆すべき論文である。この論文により、中・低緯度の山岳氷河で雪氷コアを採取し解析することで、高緯度に偏らない地域においても、地域別に百年スケールの過去の気候を明らかにできることが指摘された。特に、積雪中を鉛直分布別に、同位体比が時間変化することがこの論文で確認されている。

対象となる積雪として、季節性の積雪（次の降雪期がくるまでに融けてしまう積雪）と多年性の積雪（次の降雪期まで融けずに残っている積雪）がある。多年性の積雪は圧密して氷となる（これを積雪の変質過程と呼ぶ）。積雪の変質過程における同位体比の変化については、Friedman *et al.* (1991) に詳しい。積雪の同位体比が変化するのは変質過程のみではなく、風によって運ばれてきた雪によって変化する（上田, 1993）ことや、積雪中の温度勾配による水蒸気輸送によって変化する（Sommerfeld *et al.*, 1991；Hachikubo *et al.*, 1997）こと、寒冷でかつ乾燥した地域で昇華によって変化する（Ginot *et al.*, 2001；Stichler *et al.*, 2001）ことが報告されている。

季節性の積雪の研究においては、融雪期の同位体比の変化が特に興味ある現象である。一方で多年性の積雪においても夏季に融解を経験する地域もあることから、積雪の融解は重要なプロセスの一つに挙げられる。積雪表面で融解により生成された液相の水が積雪層内部へと浸透する間に、積雪との間で同位体交換を起こすことで積雪の同位体比は変化する。このような融解に伴う積雪の同位体比の変化については、鈴木（1993）やHashimoto *et al.* (2002)、Hashimoto *et al.* (2005) を参考にされたい。

雪氷コアから得られた同位体比から降雪時の同位体比を推定するためには観測で得られた結果を実証する必要がある。この検証として室内実験を行った例は多い。室内実験における最大のメリットは、環

境をコントロールできることにある。融解を伴う積雪においてはLehmann and Siegenthaler (1991) のような固相—液相間の同位体分別係数を求める必要がある。固相と液相が混在する場合における同位体比の変化について実験した例としてNakawo *et al.* (1993) が挙げられる。これらの固相と液相の水が混在する状態は融解を伴う積雪の状態に似ているため、融解期の同位体比の定量的な変化を理解するのに適している。

一方で液相の水が存在していない積雪においても、同位体比が変化する現象が実証されている。例えば、積雪層中の水蒸気輸送による同位体比の変化は、Hachikubo *et al.* (2000) によって確認されている。さらに積雪表面にできるサンクラスト現象（日射によって積雪表面直下で融解と再凍結が生じ、光沢のある硬い層が形成される現象）によっても、同位体比が変化する（Ozeki and Akitaya, 1998）。

このように融解を伴う地域で採取された雪氷コアは、古気候復元において非常に興味のある対象であり、降雪が堆積し氷となるまでの同位体比変化のプロセスを解明することが必要である。最近では積雪の同位体比の時間変化について研究が進められている。積雪表面で融解した水が下方移動あるいは水平移動する過程で起こる積雪中の同位体比の変化について、今後、益々研究が行われることが期待される。さらに雪氷コアより得られた同位体比を解釈するために、室内実験で得られた結果と合わせることで、定量的にモデル化されることが望まれる。

Ⅶ. 流域流出過程の研究におけるトレーサーの利用

本章では、同位体比などのトレーサーを用いた流域スケールでの流出過程や水流発生機構を含む流出過程に関し、これまでの理解と問題点についてレビューを行う。

1. 洪水ハイドログラフ成分分離における矛盾

「流域に雨が降ったら、どのような経路で雨水は川へ流れ出るか?」、すなわち、流域の水流発生機構に関する研究は、1940年代から水文学の中心課題であった。水流発生機構は、おおまかに以下の諸項目に整理される。

- 1) 洪水流出水の起源 (source)
- 2) 降雨から流出に至る経路 (path)

3) 流出に至るまでの時間 (residence time)

4) 流出を発生させる物理メカニズム

これらのうち、1)から3)はトレーサー無しには解決が難しい課題である。なかでも洪水ハイドログラフの成分を検討することは、水流発生機構を理解する上での基本であり、従来から様々な概念モデルや数値モデルが構築されてきた。いま、降雨中のある時刻に任意の河川断面を通過する流出水について、3つの起源水(降水成分、土壌水成分、地下水成分など)から構成されているとすると、以下の3つの物質収支式が成り立つ。

$$Q_a + Q_b + Q_c = 1 \quad (4)$$

$$C1_a Q_a + C1_b Q_b + C1_c Q_c = C1_t \quad (5)$$

$$C2_a Q_a + C2_b Q_b + C2_c Q_c = C2_t \quad (6)$$

ここで、 Q は流量、 $C1$ および $C2$ はトレーサーの濃度または同位体比、添え字の a, b, c は各々の起源水成分を、 t は総流出水を表す。 a, b, c の3つの成分(端成分: end member)によって総流出水の成分が説明できるとすれば、2つのトレーサー濃度を x 軸と y 軸にとる散布図上で、総流出水は3つの端成分を頂点とする三角形内にプロットされる。このように、 n 個の端成分によって混合成分(総流出水)を説明するためには、 $n-1$ 個のトレーサーが必要になる(Christophersen and Hooper, 1992)。以上のような、複数の端成分とトレーサーによって流出水における各端成分の割合を求める方法、すなわち流出水のsourceを特定する解析手法を、端成分混合分析(EMMA)と称する。端成分とトレーサーに複数の候補がある場合、EMMAに用いるべきそれらの候補を検討するために、主成分分析(PCA)を用いることがある(Christophersen and Hooper, 1992)。Christophersen and Hooper(1992)も指摘しているように、対象流域における流出過程を考慮しつつ、適切な端成分とトレーサーを選ぶことが肝要である。

同位体比を用いたトレーサーにより洪水ハイドログラフの流出成分分離を行った初期の代表的な研究に、Sklash and Farvolden(1979)がある。当初は単一のトレーサーを用い洪水流出を降水成分と地下水成分の2成分に分離することが一般的に行われた(例えば、Pearce *et al.*, 1986; Sklash *et al.*, 1986; Hooper and Shoemaker, 1986; Turner *et al.*, 1987; Wels *et al.*, 1991; 一柳・加藤, 1998)。こうした一連の研究によって、温帯湿潤域の森林植生に覆われた山地流域において、洪水流出に占める地下水成分が卓越する場合

が多いという事実が明らかになったことは、流域流出過程における地下水流動の重要性を示すきわめて重要な知見であった。

EMMAでは、各端成分のトレーサー濃度は解析対象期間内では一定であることが前提であった。しかし、数時間から数日程度の降水イベント中においても、降水の同位体比は、大きく変動することが報告されており(McDonnell *et al.*, 1990)、また地下水および土壌水からなる地中水については、同位体比や溶存成分の時間変動よりもむしろ空間変動や空間分布が顕著(Kendall *et al.*, 2001)であるため、地中水を2成分に分割することが行われるようになってきた(例えば、Dewalle *et al.*, 1988; McDonnell *et al.*, 1991; Bazemore *et al.*, 1994; Brown *et al.*, 1999; 勝山ほか, 2000; Katsuyama *et al.*, 2001)。特に河川近傍の地中水は、先行降雨条件や降雨規模、降雨イベントの進行段階によって、流出に寄与するエリアが異なるため、流出成分の分離に際し、どのエリアの地中水を端成分にするべきか、重要な問題である。EMMAは、物質収支の成立を仮定したシンプルな混合モデルであり、それによって流出過程を再現するものではない。しかしながら前述したように、端成分やトレーサー成分を決定する上で、流域流出過程に関する基本的な情報や見通し、あるいは作業仮説が必要になってくる。このように、EMMAの前提条件と、end memberの決定に必要な情報とは、一見矛盾するように思われる。これはEMMAを流出解析に使用する上で本質的に含まれる問題点である。とは言え、端成分を何にすべきか、そして流出成分分離の結果が他の水文データと整合的であるかどうかについて吟味することで、対象流域の流出過程の理解が進展するものなのである。

2. 基盤岩地下水の役割

1970年代以降、温暖湿潤地域の流域流出過程の研究を国際的に牽引してきたオーストラリアのMaimai試験流域における研究(McGlynn *et al.* 2002)によれば、土層中のパイプ流とマトリックス流、および基盤岩面の凹地部に貯留された地下水とが降雨イベントにともない混合し、河川に流出するというプロセスが示されている。ここでは、基盤岩面は基本的に地中水流動場の下部境界面として扱われている。しかしながら近年、基盤岩内部の地下水も源流域の流出に重要な影響を及ぼしていることが明らかになってきた(Anderson *et al.*, 1997; Torres *et al.*, 1998; 寺嶋

ほか, 1993; 小野寺・辻村, 2001; Onda *et al.*, 2001; Tsujimura *et al.*, 2001; Uchida *et al.*, 2003; 2005; 勝山ほか, 2004; Katsuyama *et al.*, 2005; Tromp-van Meerveld *et al.*, 2007).

Mulholland (1993) や Mulholland and Hill (1997) は堆積岩からなる山地流域を対象に, Ca^{2+} と SO_4^{2-} をトレーサーに用い, 流域流出成分を不飽和土壌水, 飽和土壌水, 基盤岩地下水の3成分に分離した. これらの研究は, 洪水流出の端成分として基盤岩地下水を採用した最初の論文として重要である. Onda *et al.* (2006) は, 堆積岩と花崗岩からなる2つの山地源流域を対象に, 流出特性を比較し, 堆積岩流域でしばしば観測される降雨に対する流出の遅れ現象は, 基盤岩地下水の影響であるものと判断した. Tsujimura *et al.* (2001) は同じ堆積岩流域において, 渓流水, 基盤岩湧水, 土壌水の無機溶存成分を比較し, 渓流水の水質組成が土壌水のそれと全く異なり, むしろ基盤岩湧水のそれに類似している特徴を示した.

Uchida *et al.* (2003) は, 花崗岩からなる小流域において, 降水から流出水に至る各水体の SiO_2 濃度を検討し, 渓流水に対する基盤岩湧水の影響を示し, 渓流水における基盤岩地下水成分の占める割合は50~95%に及ぶことを示している.

このように, 流域流出に及ぼす基盤岩地下水の役割の重要性が, 特に2000年代以降, 我が国を中心としたフィールド観測によって明らかにされてきたことは特筆すべきである. しかしながら, 基盤岩地下水の挙動や流出過程そのものについては, 未だ実測データが不十分な状況であり, この問題は山地流域の流出過程研究における最も重要なトピックの一つと言えることができる.

3. 流域流出過程に関する今後の課題

以上述べたように, EMMAによる流域流出解析を行う過程は, 流域流出過程を理解する上で貴重な情報をもたらすが, あくまで, シンプルな混合モデルに拠っていることを認識しなければならない. 成分分離結果は, 流出水の起源 (source) を特定するが, その水の流出経路 (path) や滞留時間 (residence time) に関する情報を直接提供するわけではない. しかし, 河川流出水のsourceが特定されれば, 次のステップとしてsourceがどのように河川に到達するのか, すなわちpathを考察しなければならない. またそのpathがもつ時間情報が, 他の手法によって推定されたsourceのresidence timeと比較し調和的であるかとい

う議論もなされるようになる. すなわち, EMMAそのものは限られた仮定のもとで限られた情報を提供するだけであるが, そこから得られた情報は, さらに流域流出過程全体を吟味する上できわめて有用である. 一方で, 数年から数十年程度の滞留時間を同定することが可能な時間情報をもつトレーサー (CFCs や ^{36}Cl など) を流域流出過程の研究に導入することも必要である. さらに, 流出経路情報を有する溶存成分等を併せることにより, source, path, residence timeからなるマルチトレーサー情報を活用した流域流出過程の研究が, 今後益々進展することになる.

Ⅷ. 植生・蒸発散過程の研究における同位体比の利用

水循環と植生の相互作用に関わる研究分野, すなわち水文学と生態学の境界領域においても, 水の安定同位体を利用したアプローチが広く普及している. 本章では, 中でも近年精力的に事例の蓄積が進められている2つのテーマに焦点を絞って紹介する. なお, 炭素フラックスや有機物の同位体研究も数多く行われており, 間接的に水循環研究と関連する部分もあるが, それらに関しては他書を参照されたい (例えば, Ehleringer *et al.*, 1993; Dawson *et al.*, 2002).

1. 植物の吸水源と種間競争

幾つかの例外 (例えば, Lin and Sternberg, 1993) を除けば, 植物根系による吸水過程において同位体分別は生じないと考えられている (Wershaw *et al.*, 1966). このことは, 同位体比既知の水を散布したポット実験によって容易に確認することができる (飯塚ほか, 2004). それゆえ, 植物樹液の同位体比と土壌水のそれとを比較照合することにより, 植物の主たる吸水深度 (吸水フラックスによる加重平均深度や複数土壌層からの寄与率) を知ることができる. また, 土壌面蒸発による同位体濃縮の影響を除けば, 地中水の同位体比はその涵養源 (降水・河川水・灌漑水・海水・雲霧水など) の値を反映していると考えられるため, 土壌水同位体比の鉛直プロフィールを詳細に実測せずとも, 植物の利用水源の特定や寄与率評価を行うことが可能である.

このような原理に基づいて行われた研究はこれまでに数多くなされてきているが, その多くは半乾燥気候下に生育する植物のユニークな水利用を対象と

したものである。例えば、Dawson and Ehleringer (1991) は、半乾燥域の河畔に生育する樹木が河川水よりも安定的な供給が見込める地下水を恒常的に利用しているという実態を見出した。また、Flanagan *et al.* (1992) は半乾燥気候下で共存する樹木と灌木の吸水深度を調べ、樹木が浅層の水を利用し、灌木が深層の水を利用するといった“水源分化”が生じていることを示した。さらに、Smith *et al.* (1997) はサヘル地域における農作物（キビの一種）とそれを取り囲む防風樹木の吸水深度を調査し、地下水表面が非常に深い地区では両者ともに浅層土壌水を利用するため水資源の獲得競争が生じるものの、地下水表面が比較的浅い地区ではキビが浅層土壌水を、樹木が地下水を利用することによって競合が回避されていることを明らかにした。こうした水源分化は、降水が乏しい半乾燥地域のみでなく、我が国のような湿潤地域においても生じうることが確認されている（山中ほか、2006）。

このように、植物種間の相互作用や個体間の差、あるいは地下水位や土壌水分量等の環境条件に対するそれらの依存性に焦点を当てた研究が世界中で行われており、温帯林・熱帯林・寒帯林・海岸林・高山林・雲霧林など、対象植生の地理的条件も多様性を増している。なお、これらの研究の多くは、酸素・水素安定同位体測定だけでなく物理的な水ポテンシャル計測や炭素・窒素安定同位体測定を併せて行うことにより、利用水源・吸水深度と水ストレス・水利用効率（＝炭素固定量/水消費量）・養分競争の関係について新たな知見を提供している（Pate and Dawson, 1999；Dawson *et al.*, 2002）。

以上の研究に関連するテーマとして近年注目を集めているものに、“ハイドロリックリフト（Hydraulic lift）”がある。ハイドロリックリフトとは、水理ポテンシャルの高い（深層）土壌から水理ポテンシャルの低い（浅層）土壌へ向かう植物根系を介した水輸送現象（Richards and Caldwell, 1987；Caldwell and Richards, 1989；Caldwell *et al.*, 1998）を指すが、Dawson (1993) によるサトウカエデの研究以降、水の安定同位体を用いたアプローチが増えている（Dawson, 1996；Dawson and Pate, 1996；Burgess *et al.*, 2000）。こうした現象の存在が生物多様性の維持に貢献しているか否か（Ludwig *et al.*, 2004）、あるいは天然のスプリンクラー機能として農業生産性の向上に役立つか（Sekiya and Yano, 2004）、といった点は大変興味深い。

しかしながら、上述の研究のほとんどはどちらかと言えば植物個体の生存戦略や生態系の機能解明といった生態学的側面に重点を置いてきた感が否めない。今後はこうした研究によって明らかにされた植物による水利用様式の多様性が当該地域の水循環に及ぼす影響を、水文学者らが詳細に調べあげてゆく必要があるだろう。

2. 蒸発散成分分離

陸域からの蒸発散フラックスに占める蒸散の割合を定量化することは、水文学における重大な関心事の一つであるが、蒸散量は個体ごとに異なるため、物理的計測手段によって群落平均的な値を求めることは容易ではない。しかし、大気境界層中の水蒸気同位体比は、領域積分情報を有するため、これを用いて蒸散割合（transpiration fraction）の群落平均値を求めることができる。この手法は、まずKeeling plot法（Keeling, 1958；1961；Yakir and Wang, 1996）によって蒸発散フラックスの同位体比を求め、Craig-Gordonモデルから推定される蒸発フラックス同位体比を一方の端成分、同位体分別が無いものと仮定して得られる蒸散フラックス同位体比をもう一方の端成分とし、成分分離を行うものである。

これまでの報告によれば、森林の蒸散割合は草原のそれよりも大きいという傾向が確認されている。例えば、アマゾンでは草原の蒸散割合が48%であるのに対して、森林のそれは64-99%に及んでいる（Moreira *et al.*, 1997）。また、モンゴルにおいても、森林の蒸散割合（60-73%）は草原（35-59%）と比較して有意に大きい（Tsujimura *et al.*, 2007）。ただし、草本植物であっても密に植栽された小麦畑や葉面積指数（LAI）の大きな長草草原などでは100%に近い蒸散割合が報告されている（Wang and Yakir, 2000；山中ほか、2005）。また、半乾燥気候下の疎林草原では、蒸発散量全体のおよそ70%が樹木からの蒸散、15%程度が下層草本植生からの蒸散、残りの約15%が土壌面蒸発である、という結果が得られている（Yepez *et al.*, 2003）。前述した吸水深度の研究によれば、（幾つかの例外はあるものの）木本植物は草本植物よりも深い土層の水を利用する傾向が強い（Ehleringer *et al.*, 1991；Weltzin and McPherson, 1997）。表層土壌が乾燥しやすい乾燥・半乾燥気候下では、そうした利用水源の違いが蒸散割合の変化を伴うことは想像に難くないが、同位体手法の適用によって初めて定量的な議論が可能になってきたと言

える。

しかしながら、蒸散割合は時間的に一定ではなく、季節や時間帯あるいは先行降雨・土壌水分条件によって変化し得る（例えば、Yepez *et al.*, 2005）。それゆえ、本来は蒸散割合の時間変動特性を把握しておく必要がある。これまでは同位体分析のための水蒸気採取が容易でないために蒸散割合の評価も短期間かつ単発的なものにならざるを得なかった。幸いにも、最近ではレーザー分光法（TDLAS）の開発とめざましい技術の進歩によって、水蒸気同位体比がその場で観測可能になりつつあり、蒸散割合の長期連続モニタリングも夢ではなくなりつつある。

なお、同様の手法はプロットスケールの研究だけでなくメソスケールの水蒸気混合過程にも拡張して適用され、例えば、霞ヶ浦周辺の接地境界層内の水蒸気に占める湖面蒸発成分・陸面蒸発成分・バックグラウンド成分の寄与率評価ならびにその妥当性の検証が既に行われている（Yamanaka and Shimizu, 2007）。しかしながら、Keeling plot法による蒸発散フラックスの同位体比の推定精度は、水蒸気同位体比の鉛直勾配に大きく依存しており、蒸発散起源水蒸気とバックグラウンド水蒸気との間に同位体シグナルの明確な差が存在する必要がある。したがって、本手法が適用可能な時期・地理的条件はある程度限定されるものと予想されるが、そのような限界を探る上でも今後の研究事例の蓄積が望まれるところである。

IX. おわりに

本総説のおわりに、水の安定同位体を用いた今後の水循環研究において、重要と思われる研究課題を列挙し、展望を述べる。

Iso-AGCMの同位体物理過程に非常に関連することもあり、雪氷過程のみならず、降水形態に着目した降水過程や、植生活動を含む蒸発散過程に対して水の安定同位体を用いた研究が多くなってきている。蒸発散過程に着目すると、水面からの蒸発時には同位体の非平衡分別がある。第II章で示したようにCraig and Gordon (1965) は気液境界面における分子拡散による動的同位体分別効果として物理的に解釈し、相対湿度などをパラメータとしたモデル化を行っている（Craig-Gordonモデル）。第VIII章で示したように、植生に関する蒸発散過程においても、例えば蒸発と蒸散の成分分離の研究に、Craig-Gordonモデルが多

用されている。しかしながら、芳村ほか（2006）の報告にもあるように、Craig-Gordonモデルを様々な気象（気温・湿度）条件下で検証・修正するためには、水蒸気同位体比についての多くの観測事例が必要である。このような背景から、レーザー分光法によるその場での直接的な水蒸気同位体比計測が、今後益々進展することが期待されており、その実現可能性は非常に高い。本総説で特に強調したいのは、地上での水蒸気同位体比計測のみならず、航空機を利用して、大気境界層や雲層・対流雲内においてもレーザー分光法によりその場で水蒸気同位体比計測を実施するような観測計画の企画や技術開発が必要である、という点である。このような航空機観測が実現すれば、植生による蒸散割合を求める際に用いられてきたKeeling plot法の適用限界（時間的・地理的条件）を明らかにすることも可能となり、加えて、メソスケールでの雲・降水過程の進展にも繋がることになろう。

Iso-AGCMの視点から今後の水循環研究を展望した場合、モデルの検証に必要な日単位での降水や水蒸気のサンプリングと、それらの同位体比の計測が必要不可欠である。特に、データ空白域での観測データが求められており、我が国は、アジアでの降水や水蒸気同位体比観測ネットワークの確立を行うべきである。加えて、第III章や第IV章で示したように、過去の大気大循環変動を復元するために、様々な場所（氷床・堆積物・年輪）に残されている同位体比情報を同位体大気大循環モデルの検証に用いるような研究の方向性も必要である。その場合、中・低緯度における降水は、主に数千 kmスケールから数百 kmのメソスケール擾乱によってもたらされることから、単純な気温効果や量的効果を適用した議論を行うことは、現象の時空間スケールに即した研究とは言えないことに注意すべきである。高緯度域のみならず中・低緯度域での観測ネットワークを樹立する場合、水蒸気の輸送過程や降雨・降雪の時空間スケールに注意をはらい、メソスケール同位体気象学的視点での研究が必要となる。

一方、氷床コアにおいては、降雪の同位体比と気温の季節変化をそのまま年々変化に拡張し、ある一地域における観測結果を様々な氷床コアに適用しているのが現状である。そのため、古気候復元に際し、大きな誤差を生じている可能性が高い。南極内陸における降雪中の同位体比と気温との関係を調べるなど、より多点で空間的に密な観測と、降雪の季節性

を意識した系統的な観測が必要である。

今後も、水の安定同位体を活用した様々なスケールでの地球水循環過程に関する観測的・モデル的研究が発展することを願ってやまない。

謝辞

本総説の企画段階から様々なコメントを頂いた、名古屋大学地球水循環研究センターの中村健治教授に感謝申し上げます。

本総説の執筆にあたり、名古屋大学地球水循環研究センターの計画研究「マルチスケールの水循環過程に対する水の酸素・水素安定同位体の応用」(研究代表者：檜山哲哉)の研究経費の一部と、日本学術振興会・科学研究費補助金・基盤研究A(課題番号：17204041)(研究代表者：中村健治)の一部を使用した。ここに記して感謝申し上げます。

略語一覧

- AGCM : Atmospheric General Circulation Model (大気大循環モデル)
- AMIP : Atmospheric Model Intercomparison Project (大気大循環モデル相互比較実験)
- CCSR : Center for Climate System Research, The University of Tokyo (東京大学気候システム研究センター)
- CFCs : chlorofluorocarbons (クロロフルオロカーボン)
- ECHAM : GCM based on ECMWF forecast models, modified and extended in HAMBURG (独・マックスプランク研究所大循環モデル)
- EMMA : End-members Mixing Analysis (端成分混合分析)
- ENSO : El Niño Southern Oscillation (エルニーニョ・南方振動)
- FRCGC : Frontier Research Center for Global Change (海洋研究開発機構・地球環境フロンティア研究センター)
- GISS : Goddard Institute for Space Studies (ゴダード宇宙科学研究所)
- GNIP : Global Network of Isotopes in Precipitation (降水中同位体全球ネットワーク)
- GNIR : Global Network of Isotopes in Rivers (全球河川水同位体観測ネットワーク)
- GRIP : Greenland Ice Core Project (グリーンランド氷床コアプロジェクト)
- IAEA : International Atomic Energy Agency (国際原子力機関)

iPILPS : isotopes in the Project for the Intercomparison of Land-surface Parameterization Schemes (同位体を用いた陸面パラメタリゼーションスキーム相互比較プロジェクト)

Iso-AGCM : Isotope-Atmospheric General Circulation Model (同位体大気大循環モデル)

- LAI : Leaf Area Index (葉面積指数)
- LMD : Laboratoire de Meteorologie Dynamique (フランス気象力学研究所)
- MIBA : Moisture Isotopes in Biosphere and Atmosphere (生物圏大気圏水蒸気同位体観測プロジェクト)
- MIROC : Model for Interdisciplinary Research on Climate (大気・海洋・陸面結合モデル)
- MUGCM : The Melbourne University atmospheric General Circulation Model (メルボルン大学大気大循環モデル)
- NASA : National Aeronautics and Space Administration (アメリカ航空宇宙局)
- NIES : National Institute for Environmental Studies (国立環境研究所)
- PCA : Principal Components Analysis (主成分分析)
- SMOW : Standard Mean Ocean Water (標準平均海水)
- SWING : Stable Water Isotope Intercomparison Group (水安定同位体相互比較グループ)
- TDLAS : Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (レーザー分光法)
- WMO : World Meteorological Organization (世界気象機関)

参考文献

- 上田豊 (1993) : 南極みずほ基地における飛雪の酸素同位体組成の年変化と積雪層の同位体組成, 南極資料, 37, pp.24-31.
- Aizen V, Aizen E, Melack J, Martma T. 1996. Isotopic measurements of precipitation on central Asian glaciers (southeastern Tibet, northern Himalayas, central Tien Shan). *Journal of Geophysical Research* 101 (D4) : 9185-9196. doi : 10.1029/96JD00061.
- Anderson SP, Dietrich WE, Montgomery DR, Torres R, Conrad ME, Loague K. 1997. Subsurface flow paths in a steep, unchanneled catchment. *Water Resources Research* 33 : 2637-2654. doi : 10.1029/97WR02595.
- Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. 1998. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia. *Journal of Geophysical Research* 103 (D22) : 28,721-28,742. doi : 10.1029/98JD02582.
- Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. 2000. Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture. *Hydrological Processes* 14 : 1341-1355. doi : 10.1002/1099-1085 (20000615) 14 : 8 <1341 : : AID-HYP983>3.0.CO ; 2-Z.

- Bazemore DE, Eshleman KN, Hollenbeck KJ. 1994. The role of soil water in stormflow generation in a forested headwater catchment: synthesis of natural tracer and hydrometric evidence. *Journal of Hydrology* 162: 47-75. doi: 10.1016/0022-1694(94)90004-3.
- Benway HM, Mix AC. 2004. Oxygen isotopes, upper-ocean salinity, and precipitation sources in the eastern tropical Pacific. *Earth and Planetary Science Letters* 224: 493-507. doi: 10.1016/j.epsl.2004.05.014.
- Bigg GR, Rohling EJ. 2000. An oxygen isotope data set for marine waters. *Journal of Geophysical Research* 105 (C4): 8527-8536. doi: 10.1029/2000JC900005.
- Bindschadler R, Choi H, Shuman C, Markus T. 2005. Detecting and measuring new snow accumulation on ice sheets by satellite remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 98: 388-402. doi: 10.1016/j.rse.2005.07.014.
- Bromwich DH, Guo Z, Bai L, Chen QS. 2004. Modeled Antarctic precipitation. Part I: spatial and temporal variability. *Journal of Climate* 17: 427-447.
- Brown VA, McDonnell JJ, Burns DA, Kendall C. 1999. The role of event water, a rapid shallow flow component, and catchment size in summer stormflow. *Journal of Hydrology* 217: 171-190. doi: 10.1016/S0022-1694(98)00247-9.
- Brown J, Simmonds I, Noone D. 2006. Modeling $\delta^{18}\text{O}$ in tropical precipitation and the surface ocean for present-day climate. *Journal of Geophysical Research* 111: D05105. doi: 10.1029/2004JD005611.
- Burgess SOS, Pate JS, Adams MA, Dawson TE. 2000. Seasonal water acquisition and redistribution in the Australian woody phreatophyte, *Banksia prionotes*. *Annals of Botany* 85: 215-224. doi: 10.1006/anbo.1999.1019.
- Caldwell MM, Richards JH. 1989. Hydraulic lift: water efflux from upper roots improves effectiveness of water uptake by deep roots. *Oecologia* 79: 1-5. doi: 10.1007/BF00378231.
- Caldwell MM, Dawson TE, Richards JH. 1998. Hydraulic lift: consequences of water efflux from the roots of plants. *Oecologia* 113: 151-161. doi: 10.1007/s004420050363.
- Charles CD, Rind D, Jouzel J, Koster RD, Fairbanks RG. 1994. Glacial-interglacial changes in moisture sources for Greenland: Influences on the ice core record of climate. *Science* 263: 508-511.
- Charles CD, Rind D, Jouzel J, Koster RD, Fairbanks RG. 1995. Seasonal precipitation timing and ice core records. *Science* 269: 247-248.
- 地球水循環研究センター水同位体分析システム運営委員会(阿部理・池田健一・大田啓一・栗田直幸・坂井亜規子・中尾正義・中村健治・檜山哲哉・藤田耕史・三野義尚・三宅隆之・李在鎔)(2005): 名古屋大学地球水循環研究センターにおける水安定同位体組成分析の現状, 水文・水資源学会誌, 18, pp.531-538.
- Christophersen N, Hooper RP. 1992. Multivariate Analysis of stream water chemical data: the use of principal components analysis for the end-member mixing problem. *Water Resources Research* 28: 99-107. doi: 10.1029/91WR02518.
- Clark I, Fritz P. 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis Publishers: New York; 328.
- Craig H, Gordon LI. 1965. Deuterium and oxygen 18 variations in the ocean and the marine atmosphere. In *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleo-temperatures*, Tongiorgi E (ed). Consiglio Nazionale Delle Ricerche Laboratoric di Geologia Nucleare: Pisa; 9-130.
- Dahe Q, Petit JR, Jouzel J, Stievenard M. 1994. Distribution of stable isotopes in surface snow along the route of the 1990 International Trans-Antarctica Expedition. *Journal of Glaciology* 40: 107-118.
- Dahl-Jensen D, Mosegaard K, Gundestrup N, Clow GD, Johnsen SJ, Hansen AW, Balling N. 1998. Past temperatures directly from the Greenland ice sheet. *Science* 282: 268-271.
- Dansgaard W. 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus* 16: 436-468.
- Dawson TE. 1993. Water sources of plants as determined from xylem-water isotopic composition: perspectives on plant competition, distribution, and water relations. In *Stable Isotopes and Plant Carbon-Water Relations*, Ehleringer JR et al. (eds). Academic Press: San Diego; 465-496.
- Dawson TE. 1996. Determining water use by trees and forests from isotopic, energy balance and transpiration analyses: the roles of tree size and hydraulic lift. *Tree Physiology* 16: 263-272.
- Dawson TE, Ehleringer JR. 1991. Streamside trees that do not use stream water. *Nature* 350: 335-337. doi: 10.1038/350335a0.
- Dawson TE, Pate JS. 1996. Seasonal water uptake and movement in root systems of Australian phreatophytic plants of dimorphic root morphology: a stable isotope investigation. *Oecologia* 107: 13-20. doi: 10.1007/BF00582230.
- Dawson TE, Mambelli S, Plamboeck AH, Templer PH, Tu KP. 2002. Stable isotopes in plant ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics* 33: 507-559.
- Delaygue G, Jouzel J, Masson V, Koster RD, Bard E. 2000a. Validity of the isotopic thermometer in central Antarctica: limited impact of glacial precipitation seasonality and moisture origin. *Geophysical Research Letters* 27: 2677-2680. doi: 10.1029/2000GL011530.
- Delaygue G, Masson V, Jouzel J, Koster RD, Healy RJ. 2000b. The origin of Antarctic precipitation: a modelling approach. *Tellus* 52B: 19-36. doi: 10.1034/j.1600-0889.2000.00951.x.
- Dewalle DR, Swistock BR, Sharpe WE. 1988. Three-component tracer model for stormflow on a small Appalachian forested catchment. *Journal of Hydrology* 104: 301-310. doi: 10.1016/0022-1694(88)90171-0.
- Diñçer T. 1968. The use of oxygen-18 and deuterium concentrations in the water balance of lakes. *Water Resources Research* 4: 1289-1305.
- Duan K, Yao T. 2003. Monsoon variability in the Himalayas under the condition of global warming. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 81: 251-257.
- Ehleringer JR, Phillips SL, Schuster WSF, Sandquist DR. 1991. Differential utilization of summer rains by desert plants. *Oecologia* 88: 430-434. doi: 10.1007/BF00317588.
- Ehleringer JR, Hall AE, Farquhar GD. 1993. *Stable Isotopes and Plant Carbon-Water Relations*. Academic Press: San Diego; 555.
- Epstein S, Mayeda T. 1953. Variation of O^{18} content of waters from natural sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 4: 213-224. doi: 10.1016/0016-7037(53)90051-9.
- Epstein S, Yapp CJ, Hall JH. 1976. The determination of the D/H ratio of non-exchangeable hydrogen in cellulose extracted from aquatic and land plants. *Earth and Planetary Science Letters* 30: 241-251. doi: 10.1016/0012-821X(76)90251-X.
- Farquhar GD, Lloyd J, Taylor JA, Flanagan LB, Syvertsen JP, Hubick KT, Wong SC, Ehleringer JR. 1993. Vegetation

- effects on the isotope composition of oxygen in atmospheric CO₂. *Nature*, 363: 439-443. doi: 10.1038/363439a0.
- Flanagan LB, Ehleringer JR, Marshall JD. 1992. Differential uptake of summer precipitation among co-occurring trees and shrubs in a pinyon-juniper woodland. *Plant, Cell & Environment* 15: 831-836. doi: 10.1111/j.1365-3040.1992.tb02150.x.
- Friedman I, Schoen B, Harris J. 1961. The deuterium concentration in Arctic sea ice. *Journal of Geophysical Research* 66: 1861-1864.
- Friedman I, Benson C, Gleason J. 1991. Isotopic changes during snow metamorphism. In *Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein*, Taylor HP et al. (eds). The Geochemical Society: San Antonio; 211-221.
- Fu YF, Liu GS. 2003. Precipitation characteristics in mid-latitude east Asia as observed by TRMM PR and TMI. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 81: 1353-1369.
- Fujita K, Abe O. 2006. Stable isotopes in daily precipitation at Dome Fuji, East Antarctica. *Geophysical Research Letters* 33: L18503. doi: 10.1029/2006GL026936.
- Gat JR. 2000. Atmospheric water balance - the isotopic perspective. *Hydrological Processes* 14: 1357-1369. doi: 10.1002/1099-1085(20000615)14:8<1357::AID-HYP986>3.0.CO;2-7.
- Gat JR, Shemesh A, Tziperman E, Hecht A, Georgopoulos D, Basturk O. 1996. The stable isotope composition of waters of the eastern Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research* 101 (C3): 6441-6452. doi: 10.1029/95JC02829.
- Gedzelman SD, Lawrence JR, White JWC, Smiley D. 1987. The isotopic composition of precipitation at Mohonk Lake, New York: the amount effect. *Journal of Geophysical Research* 92 (D1): 1033-1040.
- Gibson JJ. 2002. Short-term evaporation and water budget comparisons in shallow Arctic lakes using non-steady isotope mass balance. *Journal of Hydrology* 264: 242-261. doi: 10.1016/S0022-1694(02)00091-4.
- Ginot P, Kull C, Schwikowski M, Schotterer U, Gäggeler HW. 2001. Effects of postdepositional processes on snow composition of a subtropical glacier (Cerro Tapado, Chilean Andes). *Journal of Geophysical Research* 106 (D23): 32,375-32,386. doi: 10.1029/2000JD000071.
- Hachikubo A, Motoyama H, Suzuki K, Akitaya E. 1997. Fluctuation of δ¹⁸O of surface snow with surface hoar and depth hoar formation under radiative cooling. *Proceedings of the NIPR Symposium on Polar Meteorology and Glaciology* 11: 94-102.
- Hachikubo A, Hashimoto S, Nakawo M, Nishimura K. 2000. Isotopic mass fractionation of snow due to depth hoar formation. *Polar Meteorology and Glaciology* 14: 1-7.
- Hammarlund D, Barnekow L, Birks HJB, Buchardt B, Edwards TWD. 2002. Holocene changes in atmospheric circulation recorded in the oxygen-isotope stratigraphy of lacustrine carbonates from northern Sweden. *The Holocene* 12: 339-351.
- Hashimoto S, Zhou S, Nakawo M, Sakai A, Ageta Y, Ishikawa N, Narita H. 2002. Isotope studies of inner snow layers in a temperate region. *Hydrological Processes* 16: 2209-2220. doi: 10.1002/hyp.1151.
- Hashimoto S, Zhou S, Nakawo M, Shimizu M, Ishikawa N. 2005. Temporal isotope changes in wet snow layers in association with mass exchange between snow particles and liquid water in between the particles. *Annals of Glaciology* 40: 128-132.
- Henderson-Sellers A. 2006. Improving land-surface parameterization schemes using stable water isotopes: Introducing the 'iPILPS' initiative. *Global and Planetary Change* 51: 3-24. doi: 10.1016/j.gloplacha.2005.12.009.
- Henderson-Sellers A, Fischer M, Aleinov I, McGuffie K, Riley WJ, Schmidt GA, Sturm K, Yoshimura K, Irannejad P. 2006. Stable water isotope simulation by current land-surface schemes: Results of iPILPS Phase 1. *Global and Planetary Change* 51: 34-58. doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.01.003.
- Hendy CH, Wilson AT. 1968. Palaeoclimatic data from speleothems. *Nature* 219: 48-51. doi: 10.1038/219048a0.
- Hoffmann G, Werner M, Heimann M. 1998. Water isotope module of the ECHAM atmospheric general circulation model: A study on timescales from days to several years. *Journal of Geophysical Research* 103 (D14): 16,871-16,896. doi: 10.1029/98JD00423.
- Hoffmann G, Jouzel J, Masson V. 2000. Stable water isotopes in atmospheric general circulation models. *Hydrological Processes* 14: 1385-1406. doi: 10.1002/1099-1085(20000615)14:8<1385::AID-HYP989>3.0.CO;2-1.
- Hoffmann G, Ramirez E, Taupin JD, Francou B, Ribstein P, Delmas R, Dürr H, Gallaire R, Simões J, Schotterer U, Stievenard M, Werner M. 2003. Coherent isotope history of Andean ice cores over the last century. *Geophysical Research Letters* 30: 1179. doi: 10.1029/2002GL014870.
- Hooper RP, Shoemaker CA. 1986. A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation. *Water Resources Research* 22: 1444-1454.
- 一柳錦平・加藤喜久雄 (1998): δ¹⁸Oをトレーサーとした流出成分の分離, 水文・水資源学会誌, 11, pp.260-265.
- 飯塚幸子・山中 勤・田中 正 (2004): 安定同位体分析のための植物体からの水の抽出について—ポット試験による検討—, 筑波大学陸域環境研究センター報告, 5, pp.81-86.
- Johnsen SJ, Dansgaard W, White JWC. 1989. The origin of Arctic precipitation under present and glacial conditions. *Tellus* 41B: 452-468.
- Johnsen SJ, Dahl-Jensen D, Gundestrup N, Steffensen JP, Clausen HB, Miller H, Masson-Delmotte V, Sveinbjörnsdóttir AE, White J. 2001. Oxygen isotope and palaeotemperature records from six Greenland ice-core stations: Camp Century, Dye-3, GRIP, GISP2, Renland and North GRIP. *Journal of Quaternary Science* 16: 299-307. doi: 10.1002/jqs.622.
- Joussau S, Sadourny R, Jouzel J. 1984. A general circulation model of water isotope cycles in the atmosphere. *Nature* 311: 24-29. doi: 10.1038/311024a0.
- Jouzel J, Merlivat L, Petit JR, Lorius C. 1983. Climatic information over the last century deduced from a detailed isotopic record in the South Pole snow. *Journal of Geophysical Research* 88 (C4): 2693-2703.
- Jouzel J, Russell GL, Suozzo RJ, Koster RD, White JWC, Broecker WS. 1987. Simulations of the HDO and H₂¹⁸O atmospheric cycles using the NASA GISS general circulation model: the seasonal cycle for present-day conditions. *Journal of Geophysical Research* 92 (D12): 14,739-14,760.
- Jouzel J, Alley RB, Cuffey KM, Dansgaard W, Grootes P, Hoffmann G, Johnsen SJ, Koster RD, Peel D, Shuman CA, Stievenard M, Stuiver M, White J. 1997. Validity of the temperature reconstruction from water isotopes in ice cores.

- Journal of Geophysical Research* 102 (C12) : 26,471- 26,488. doi : 10.1029/97JC01283.
- Jouzel J, Hoffmann G, Koster RD, Masson V. 2000. Water isotopes in precipitation : data/model comparison for present-day and past climates. *Quaternary Science Reviews* 19 : 363-379. doi : 10.1016/S0277-3791(99)00069-4.
- Jouzel J, Vimeux F, Cailion N, Delaygue G, Hoffmann G, Masson-Delmotte V, Parrenin F. 2003. Magnitude of isotope/temperature scaling for interpretation of central Antarctic ice cores. *Journal of Geophysical Research* 108 (D12) : 4361. doi : 10.1029/2002JD002677.
- 勝山正則・大手信人・内田太郎・浅野友子・木本秋津 (2000) : 降雨流出過程の相違が渓流水質形成機構に与える影響, 水文・水資源学会誌, 13, pp.227-239.
- Katsuyama M, Ohte N, Kobashi S. 2001. A three-component end-member analysis of streamwater hydrochemistry in a small Japanese forested headwater catchment. *Hydrological Processes* 15 : 249-260. doi : 10.1002/hyp.155.
- 勝山正則・大手信人・小杉賢一朗 (2004) : 風化花崗岩山地源流域の渓流水NO₃⁻濃度形成に対する水文過程のコントロール, 日本林学会誌, 86, pp.27-36.
- Katsuyama M, Ohte N, Kabeya N. 2005. Effects of bedrock permeability on hillslope and riparian groundwater dynamics in a weathered granite catchment. *Water Resources Research* 41 : W01010. doi : 10.1029/2004WR003275.
- Keeling CD. 1958. The concentration and isotopic abundances of atmospheric carbon dioxide in rural areas. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 13 : 322-334. doi : 10.1016/0016-7037(58)90033-4.
- Keeling CD. 1961. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in rural and marine air. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 24 : 277-298. doi : 10.1016/0016-7037(61)90023-0.
- Kendall C, McDonnell JJ, Gu W. 2001. A look inside 'black box' hydrograph separation models : a study at the Hydrohill catchment. *Hydrological Processes* 15 : 1877-1902. doi : 10.1002/hyp.245.
- Kim KR, Cho YK, Kang DJ, Ki JH. 2005. The origin of the Tsushima Current based on oxygen isotope measurement. *Geophysical Research Letters* 32 : L03602. doi : 10.1029/2004GL021211.
- Koster RD, Jouzel J, Suozzo RJ, Russell GL. 1992. Origin of July Antarctic precipitation and its influence on deuterium content : a GCM analysis. *Climate Dynamics* 7 : 195-203. doi : 10.1007/BF00206861.
- Koster RD, Perry de Valpine D, Jouzel J. 1993. Continental water recycling and H₂¹⁸O concentrations. *Geophysical Research Letters* 20 : 2215-2218. doi : 10.1029/93GL01781.
- Kreutz KJ, Wake CP, Aizen VB, Cecil LD, Synal H-A. 2003. Seasonal deuterium excess in a Tien Shan ice core : Influence of moisture transport and recycling in Central Asia. *Geophysical Research Letters* 30 : 1922. doi : 10.1029/2003GL017896.
- Krinner G, Genthon C, Jouzel J. 1997. GCM analysis of local influences on ice core δ signals. *Geophysical Research Letters* 24 : 2825-2828. doi : 10.1029/97GL52891.
- Krouse HR, Hislop R, Brown HM, West K, Smith JL. 1977. Climatic and spatial dependence of the retention of D/H and ¹⁸O/¹⁶O abundances in snow and ice of North America. *International Association of Hydrological Sciences (IAHS) Publication* 118 : 242-247.
- Kurita N, Yoshida N, Inoue G, Chayanova EA. 2004. Modern isotope climatology of Russia : A first assessment. *Journal of Geophysical Research* 109 : D03102. doi : 10.1029/2003JD003404.
- Lawrence JR, Gedzelman SD. 2003. Tropical ice core isotopes : Do they reflect changes in storm activity? *Geophysical Research Letters* 30 : 1072. doi : 10.1029/2002GL015906.
- LeGrande AN, Schmidt GA. 2006. Global gridded data set of the oxygen isotopic composition in seawater. *Geophysical Research Letters* 33 : L12604. doi : 10.1029/2006GL026011.
- Lehmann M, Siegenthaler U. 1991. Equilibrium oxygen- and hydrogen-isotope fractionation between ice and water. *Journal of Glaciology* 37 : 23-26.
- Lin G, Sternberg LdaSL. 1993. Hydrogen isotopic fractionation by plant roots during water uptake in coastal wetland plants. In *Stable Isotopes and Plant Carbon-Water Relations*, Ehleringer JR et al. (eds). Academic Press : San Diego ; 497-510.
- Lorius C, Merlivat L. 1977. Distribution of mean surface stable isotope values in East Antarctica : Observed changes with depth in the coastal area. *International Association of Hydrological Sciences (IAHS) Publication* 118 : 127-137.
- Ludwig F, Dawson TE, Prins HHT, Berendse F, de Kroon H. 2004. Below-ground competition between trees and grasses may overwhelm the facilitative effects of hydraulic lift. *Ecology Letters* 7 : 623-631. doi : 10.1111/j.1461-0248.2004.00615.x.
- Massom RA, Pook MJ, Comiso JC, Adams N, Turner J, Lachlan-Cope T, Gibson TT. 2004. Precipitation over the interior east Antarctic ice sheet related to midlatitude blocking-high activity. *Journal of Climate*, 17 : 1914-1928.
- McDonnell JJ, Bonell M, Stewart MK, Pearce AJ. 1990. Deuterium variations in storm rainfall : Implications for stream hydrograph separation. *Water Resources Research* 26 : 455-458. doi : 10.1029/89WR03000.
- McDonnell JJ, Stewart MK, Owens IF. 1991. Effect of catchment-scale subsurface mixing on stream isotopic response. *Water Resources Research* 27 : 3065-3073. doi : 10.1029/91WR02025.
- McGlynn BL, McDonnell JJ, Brammer DD. 2002. A review of the evolving perceptual model of hillslope flowpaths at the Maimai catchments, New Zealand. *Journal of Hydrology* 257 : 1-26. doi : 10.1016/S0022-1694(01)00559-5.
- Moreira MZ, Sternberg LdaSL, Martinelli LA, Victoria RL, Barbosa EM, Bonates LCM, Napstad DC. 1997. Contribution of transpiration to forest ambient vapour based on isotopic measurements. *Global Change Biology* 3 : 439-450. doi : 10.1046/j.1365-2486.1997.00082.x.
- Motoyama H, Hirasawa N, Satow K, Watanabe O. 2005. Seasonal variations in oxygen isotope ratios of daily collected precipitation and wind drift samples and in the final snow cover at Dome Fuji Station, Antarctica. *Journal of Geophysical Research* 110 : D11106. doi : 10.1029/2004JD004953.
- Mulholland PJ. 1993. Hydrometric and stream chemistry evidence of three storm flowpaths in Walker Branch Watershed. *Journal of Hydrology* 151 : 291-316. doi : 10.1016/0022-1694(93)90240-A.
- Mulholland PJ, Hill WR. 1997. Seasonal patterns in streamwater nutrient and dissolved organic carbon concentrations : Separating catchment flow path and in-stream effects. *Water Resources Research* 33 : 1297-1306.

- doi: 10.1029/97WR00490.
- Nakawo M, Chiba S, Satake H, Kinouchi S. 1993. Isotopic fractionation during grain coarsening of wet snow. *Annals of Glaciology* 18: 129-134.
- Noone D, Simmonds I. 2002. Associations between $\delta^{18}\text{O}$ of water and climate parameters in a simulation of atmospheric circulation 1979-1995. *Journal of Climate* 15: 3150-3169.
- Onda Y, Komatsu Y, Tsujimura M, Fujihara J. 2001. The role of subsurface runoff through bedrock on storm flow generation. *Hydrological Processes* 15: 1693-1706. doi: 10.1002/hyp.234.
- Onda Y, Tsujimura M, Fujihara J, Ito J. 2006. Runoff generation mechanisms in high-relief mountainous watersheds with different underlying geology. *Journal of Hydrology* 331: 659-673. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.06.009.
- 小野寺真一・辻村真貴 (2001): シンポジウム「山地流域の降雨流出過程と山体地下水」, 日本水文科学会誌, 31, pp.17-18.
- Östlund HG, Hut G. 1984. Arctic Ocean water mass balance from isotope data. *Journal of Geophysical Research* 89 (C4): 6373-6381.
- Ozeki T, Akitaya E. 1998. Energy balance and formation of sun crust in snow. *Annals of Glaciology* 26: 35-38.
- Pate JS, Dawson TE. 1999. Assessing the performance of woody plants in uptake and utilisation of carbon, water and nutrients: Implications for designing agricultural mimic systems. *Agroforestry Systems* 45: 245-275. doi: 10.1023/A:1006210109339.
- Pearce AJ, Stewart MK, Sklash MG. 1986. Storm runoff generation in humid headwater catchments: 1. Where does the water come from? *Water Resources Research* 22: 1263-1272.
- Richards JH, Caldwell MM. 1987. Hydraulic lift: substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentata* roots. *Oecologia* 73: 486-489. doi: 10.1007/BF00379405.
- Rozanski K, Sonntag Ch, Munnich KO. 1982. Factors controlling stable isotope composition of modern European precipitation. *Tellus* 34: 142-150.
- Rozanski K, Araguás-Araguás L, Gonfiantini R. 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. In *Climate Change in Continental Isotopic Records*, Swart PK et al. (eds). *Geophysical Monograph* No.78, American Geophysical Union: Washington; 1-36.
- 酒井均・松久幸敬 (1996): 安定同位体地球化学, 東京大学出版会, 403pp.
- Salamatin AN, Lipenkov VY, Barkov NI, Jouzel J, Petit JR, Raynaud D. 1998. Ice core age dating and paleothermometer calibration based on isotope and temperature profiles from deep boreholes at Vostok Station (East Antarctica). *Journal of Geophysical Research* 103 (D8): 8963-8977. doi: 10.1029/97JD02253.
- Salati, E, Dall'Olio A, Matsui E, Gat JR. 1979. Recycling of water in the Amazon basin: an isotopic study. *Water Resources Research* 15: 1250-1258.
- Satow K, Watanabe O, Shoji H, Motoyama H. 1999. The relationship among accumulation rate, stable isotope ratio and surface temperature on the plateau of East Dronning Maud Land, Antarctica. *Polar Meteorology and Glaciology* 13: 43-52.
- Schmidt GA. 1999. Forward modeling of carbonate proxy data from planktonic foraminifera using oxygen isotope tracers in a global ocean model. *Paleoceanography* 14: 482-497. doi: 10.1029/1999PA900025.
- Schmidt GA, Bigg GR, Rohling EJ. 1999. "Global Seawater Oxygen-18 Database". <http://data.giss.nasa.gov/o18data/> (参照: 2007/10/01).
- Schmidt GA, Hoffmann G, Shindell DT, Hu Y. 2005. Modeling atmospheric stable water isotopes and the potential for constraining cloud processes and stratosphere-troposphere water exchange. *Journal of Geophysical Research* 110: D21314. doi: 10.1029/2005JD005790.
- Sekiya N, Yano K. 2004. Do pigeon pea and sesbania supply groundwater to intercropped maize through hydraulic lift? - hydrogen stable isotope investigation of xylem waters. *Field Crops Research* 86: 167-173. doi: 10.1016/j.fcr.2003.08.007.
- Severinghaus J, Brook EJ. 1999. Abrupt climate change at the end of the last glacial period inferred from trapped air in polar ice. *Science* 286: 930-934.
- Sharp Z. 2007. Principles of Stable Isotope Geochemistry. Pearson Prentice Hall: New Jersey; 344.
- Sklash MG, Farvolden RN. 1979. The role of groundwater in storm runoff. *Journal of Hydrology* 43: 45-65. doi: 10.1016/0022-1694(79)90164-1.
- Sklash MG, Stewart MK, Pearce AJ. 1986. Storm runoff generation in humid headwater catchments. 2. A case study of hillslope and low-order stream response. *Water Resources Research* 22: 1273-1282.
- Smith DM, Jarvis PG, Odongo JCW. 1997. Sources of water used by trees and millet in Sahelian windbreak systems. *Journal of Hydrology* 198: 140-153. doi: 10.1016/S0022-1694(96)03311-2.
- Sommerfeld RA, Judy C, Irving F. 1991. Isotopic changes during the formation of depth hoar in experimental snowpacks. In *Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein*, Taylor HP et al. (eds). The Geochemical Society: San Antonio; 205-209.
- Steig E, Grootes PM, Stuiver M. 1994. Seasonal precipitation timing and ice core records. *Science* 266: 1885-1886.
- Stichler W, Schotterer U, Fröhlich K, Ginot P, Kull C, Gäggeler H, Pouyaud B. 2001. Influence of sublimation on stable isotope records recovered from high-altitude glaciers in the tropical Andes. *Journal of Geophysical Research* 106 (D19): 22,613-22,620. doi: 10.1029/2001JD900179.
- Sturm K, Hoffmann G, Langmann B, Stichler W. 2005. Simulation of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation by the regional circulation model REMOiso. *Hydrological Processes* 19: 3425-3444. doi: 10.1002/hyp.5979.
- 鈴木啓助 (1993): 融雪水の酸素同位体組成変化と積雪の層構造, 雪氷, 55, pp.335-342.
- 寺嶋智巳・森綾子・石井治男 (1993): 花崗岩山地の二小流域における深部地下水浸透量の比較研究, 日本水文科学会誌, 23, pp.105-118.
- Thompson LG, Yao T, Mosley-Thompson E, Davis ME, Henderson KA, Lin P-N. 2000. A high-resolution millennial record of the South Asian Monsoon from Himalayan ice cores. *Science* 289: 1916-1919.
- Torres R, Dietrich WE, Montgomery DR, Anderson SP, Loague K. 1998. Unsaturated zone processes and the hydrologic response of a steep, unchanneled catchment. *Water Resources Research* 34: 1865-1874. doi: 10.1029/98WR01140.
- Treble PC, Budd WF, Hope PK, Rustomji PK. 2005. Synoptic-scale climate patterns associated with rainfall $\delta^{18}\text{O}$ in southern Australia. *Journal of Hydrology* 302: 270-282. doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.07.003.

- Tromp-van Meerveld HJ, Peters NE, McDonnell JJ. 2007. Effect of bedrock permeability on subsurface stormflow and the water balance of a trenched hillslope at the Panola Mountain Research Watershed, Georgia, USA. *Hydrological Processes* 21 : 750-769. doi : 10.1002/hyp.6265.
- Tsujimura M, Onda Y, Ito J. 2001. Stream water chemistry in a steep headwater basin with high relief. *Hydrological Processes* 15 : 1847-1858. doi : 10.1002/hyp.243.
- Tsujimura M, Sasaki L, Yamanaka T, Sugimoto A, Li S-G, Matsushima D, Kotani A, Saandar M. 2007. Vertical distribution of stable isotopic composition in atmospheric water vapor and subsurface water in grassland and forest sites, eastern Mongolia. *Journal of Hydrology* 333 : 35-46. doi : 10.1016/j.jhydrol.2006.07.025.
- Turner JV, MacPherson DK, Stokes RA. 1987. The mechanisms of catchment flow processes using natural variations in deuterium and oxygen-18. *Journal of Hydrology* 94 : 143-162. doi : 10.1016/0022-1694(87)90037-0.
- Uchida T, Asano Y, Ohte N, Mizuyama T. 2003. Seepage area and rate of bedrock groundwater discharge at a granitic unchanneled hillslope. *Water Resources Research* 39 : 1018. doi : 10.1029/2002WR001298.
- Uchida T, Asano Y, Onda Y, Miyata S. 2005. Are headwaters just the sum of hillslopes? *Hydrological Processes* 19 : 3251-3261. doi : 10.1002/hyp.6004.
- 植村立 (2007) : 水の安定同位体比による古気温推定の研究—極域氷床コアからの数千年スケールの気候変動の復元—, 第四紀研究, 46, pp.147-164.
- Vuille M, Bradley RS, Werner M, Healy R, Keimig F. 2003a. Modeling $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over the tropical Americas : 1. Interannual variability and climatic controls. *Journal of Geophysical Research* 108 (D6) : 4174. doi : 10.1029/2001JD002038.
- Vuille M, Bradley RS, Healy R, Werner M, Hardy DR, Thompson LG, Keimig F. 2003b. Modeling $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over the tropical Americas : 2. Simulation of the stable isotope signal in Andean ice cores. *Journal of Geophysical Research* 108 (D6) : 4175. doi : 10.1029/2001JD002039.
- Vuille M, Werner M. 2005. Stable isotopes in precipitation recording South American summer monsoon and ENSO variability : observations and model results. *Climate Dynamics* 25 : 401-413. doi : 10.1007/s00382-005-0049-9.
- Vuille M, Werner M, Bradley RS, Keimig F. 2005. Stable isotopes in precipitation in the Asian monsoon region. *Journal of Geophysical Research* 110 : D23108. doi : 10.1029/2005JD006022.
- Wang X-F, Yakir D. 2000. Using stable isotopes of water in evapotranspiration studies. *Hydrological Processes* 14 : 1407-1421. doi : 10.1002/1099-1085(20000615)14:8<1407::AID-HYP992>3.0.CO;2-K.
- Watanabe O, Jouzel J, Johnsen S, Parrenin F, Shoji H, Yoshida N. 2003. Homogeneous climate variability across East Antarctica over the past three glacial cycles. *Nature* 422 : 509-512. doi : 10.1038/nature01525.
- Wels C, Cornett RJ, LaZerte BD. 1991. Hydrograph separation : A comparison of geochemical and isotopic tracers. *Journal of Hydrology* 122 : 253-274. doi : 10.1016/0022-1694(91)90181-G.
- Weltzin JF, McPherson GR. 1997. Spatial and temporal soil moisture resource partitioning by trees and grasses in a temperate savanna, Arizona, USA. *Oecologia* 112 : 156-164. doi : 10.1007/s004420050295.
- Weppernig R, Schlosser P, Khaliwala S, Fairbanks RG. 1996. Isotope data from Ice Station Weddell : Implications for deep water formation in the Weddell Sea. *Journal of Geophysical Research* 101 (C11) : 25,723-25,740. doi : 10.1029/96JC01895.
- Werner M, Mikolajewicz U, Heimann M, Hoffmann G. 2000. Borehole versus isotope temperatures on Greenland : Seasonality does matter. *Geophysical Research Letters* 27 : 723-726. doi : 10.1029/1999GL006075.
- Werner M, Heimann M, Hoffmann G. 2001. Isotopic composition and origin of polar precipitation in present and glacial climate simulations. *Tellus* 53B : 53-71. doi : 10.1034/j.1600-0889.2001.01154.x.
- Wershaw RL, Friedman I, Heller SJ. 1966. Hydrogen isotope fractionation of water passing through trees. In *Advances in Organic Geochemistry*, Hobson F, Speers M (eds) . Pergamon : New York ; 55-67.
- Yakir D, Wang X-F. 1996. Fluxes of CO_2 and water between terrestrial vegetation and the atmosphere estimated from isotope measurements. *Nature* 380 : 515-517. doi : 10.1038/380515a0.
- Yamamoto M, Tanaka N, Tsunogai S. 2001. Okhotsk Sea intermediate water formation deduced from oxygen isotope systematics. *Journal of Geophysical Research* 106 (C12) : 31,075-31,084. doi : 10.1029/2000JC000754.
- Yamamoto M, Watanabe S, Tsunogai S, Wakatsuchi M. 2002. Effects of sea ice formation and diapycnal mixing on the Okhotsk Sea intermediate water clarified with oxygen isotopes. *Deep-Sea Research-I* 49 : 1165-1174.
- Yamanaka T, Shimizu R. 2007. Spatial distribution of deuterium in atmospheric water vapor : diagnosing sources and the mixing of atmospheric moisture. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71 : 3162-3169. doi : 10.1016/j.gca.2007.04.014.
- 山中 勤・網川明芳・Smith RB (2005) : 水蒸気フラックスの同位体測定とその蒸発散成分分離への応用, 水文・水資源学会2005年研究発表会要旨集, pp.78-79.
- 山中 勤・飯塚幸子・田中正 (2006) : 共存植物種間の水源分化 : 同位体生態水文学的アプローチ, 水文・水資源学会誌, 19, pp.458-464.
- Yepez EA, Williams DG, Scott RL, Lin G. 2003. Partitioning overstory and understory evapotranspiration in a semiarid savanna woodland from the isotopic composition of water vapor. *Agricultural and Forest Meteorology* 119 : 53-68. doi : 10.1016/S0168-1923(03)00116-3.
- Yepez EA, Huxman TE, Ignace DD, English NB, Weltzin JF, Castellanos AE, Williams DG. 2005. Dynamics of transpiration and evaporation following a moisture pulse in semiarid grassland : a chamber-based isotope method for partitioning flux components. *Agricultural and Forest Meteorology* 132 : 359-376. doi : 10.1016/j.agrformet.2005.09.006.
- 芳村圭・藤田耕史・栗田直幸・阿部理 (2006) : International Workshop on Isotopic Effects in Evaporation —Revisiting the Craig-Gordon Model Four Decades after its Formulation—参加報告, 水文・水資源学会誌, 19, pp.420-423.
- Zuber A. 1983. On the environmental isotope method for determining the water balance components of some lakes. *Journal of Hydrology* 61 : 409-427.

(受付 : 2007年7月31日, 受理 : 2007年12月4日)

Review and Perspective on the Water Cycle Processes using Stable Isotope of Water

Tetsuya HIYAMA ¹⁾ Osamu ABE ²⁾ Naoyuki KURITA ³⁾
Koji FUJITA ²⁾ Kenichi IKEDA ¹⁾
Shigemasa HASHIMOTO ¹⁾ Maki TSUJIMURA ⁴⁾ Tsutomu YAMANAKA ⁵⁾

¹⁾ Hydrospheric Atmospheric Research Center (HyARC), Nagoya University
(Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan)

²⁾ Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University
(Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan)

³⁾ Institute of Observational Research for Global Change,
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)
(2-15 Natsushima-cho, Yokosuka-city, Kanagawa 237-0061)

⁴⁾ Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba
(1-1-1 Ten-noudai, Tsukuba, Ibaraki 305-8572)

⁵⁾ Terrestrial Environment Research Center (TERC), University of Tsukuba
(1-1-1 Ten-noudai, Tsukuba, Ibaraki 305-8577)

Important studies on water cycle processes using stable isotope of water were reviewed. The objective papers on the global-scale water cycle were studies including isotopic ratios of ocean surface water and those of water vapor over the ocean as well as studies on atmospheric circulations using AGCM (atmospheric general circulation model) with stable isotope of water. Regional-scale studies on runoff processes, evapotranspiration or vegetation-related processes, and meso-scale precipitation processes were also revisited. Additionally studies on the paleoclimate and cryospheric processes, which closely related to temporal variations of water cycle processes, were focused. Finally, perspectives on the water cycle study using stable isotope of water were summarized.

Key words : water cycle processes, stable isotope of water, isotopic ratio, perspective