

課題別総括：環境同位体トレーサー

Summary of Studies Using Environmental Isotope Tracers

山中 勤*

Tsutomu YAMANAKA*

Ⅰ はじめに

陸域環境研究センターでは、熱収支・水収支観測圃場等の施設を活用しながら地表面—大気間の水・熱・物質交換過程に関する研究を行うとともに、全球・大陸規模の気候変動に関わる陸域環境変動の研究を実施してきた。その際、時空間スケールの異なる上記二つの研究を繋ぐツールとして、実験・観測に密着した数値モデルを用いた研究も併せて推進された。しかしながら、物理的手法による観測データのみで数値モデルの検証を行うには限界があり、多面的な検証手段が必要とされる。天然に存在する同位体（環境同位体）等をトレーサー（追跡子）とするアプローチは、それ単独でもマルチスケールの現象解明に有用であるばかりでなく、より高度な数値モデルの検証手段としても効果的である。そこで本センターでは、第2期中期計画における「陸域および流域における水・物質・エネルギー循環に関する基礎研究」の一つとして「環境同位体を用いた水・物質循環トレーシング」を加え、学内外の研究者と協力しながら推進してきた。

2005年12月には本センター主催で「環境循環系診断のための同位体トレーサー技術：環境システムの代謝機能を構造的に診る」と題したワークショップを開催し、これまでに実用化されてきた

各種技術を総覧しながら新たな展開の可能性を探った。そこでの発表論文10編は本センター電子モノグラフNo.2（山中, 2006）として取り纏められている。また、学外の研究者と共同で既往研究のレビューを行い、今後の研究指針を提示した（檜山ほか, 2008）。

環境同位体トレーサー技術は、地球化学・水文科学・大気科学・生態学等の様々な研究領域において高度化が図られてきたが、近年になって、この技術と地理情報システム・数値モデルとを効果的に結びつける *Isoscape* アプローチが提案され、科学捜査など新たな方面での応用の道が開けつつある。こうした学術動向を見据えながら、第3期中期計画では「トレーサーインフォマティクスによる水・物質循環系の解明」を研究推進課題の一つに掲げて、同位体トレーサー技術と情報技術の融合ならびにその応用範囲の拡充と汎用性の検証、既存理論・手法の高度化・精緻化等が図られた。

本稿では、こうした一連の研究を①水文気象学、②生態水文学、③地下水水文学、④流域水文学および⑤ *Isoscape* の5領域に大別し、その成果の概要を記すこととする。

* 筑波大学陸域環境研究センター

II 水文気象学

1. 降水同位体を用いた研究

Yamanaka *et al.* (2004b, 2007c) は、大気水循環過程に関する基礎研究として、東アジア（中国およびモンゴル）における降水の同位体変動をモニタリングし、降水の原料となる水蒸気の起源や大気中の水輸送経路との関連性を検討した。その結果、アジアモンスーンの進行に伴って中国・華北平原に降水をもたらす水蒸気の起源海域が南シナ海から東シナ海あるいは黄海へと北上すること、またモンゴル南東部においてもモンスーン循環の影響を受けて中国・華南地域で蒸発した水蒸気が到達している可能性があることが明らかにされた。

また、若本（2004）は降水同位体組成の変動を高い時空間分解能でモニタリングし、メソ γ ~ β スケールにおける同位体組成の空間分布パターンが起源の異なる水蒸気塊の混合を反映している可能性があることを指摘している。なおこの研究は、降水セル内の同位体変動をラグランジュ的に追跡しながら解析するという意欲的な目標も併せ持っていたが、残念ながらその点では観測対象領域の広さや解像度の点でなお不十分であり、今後の研究が待たれるところである。

2. 大気水蒸気同位体を用いた研究

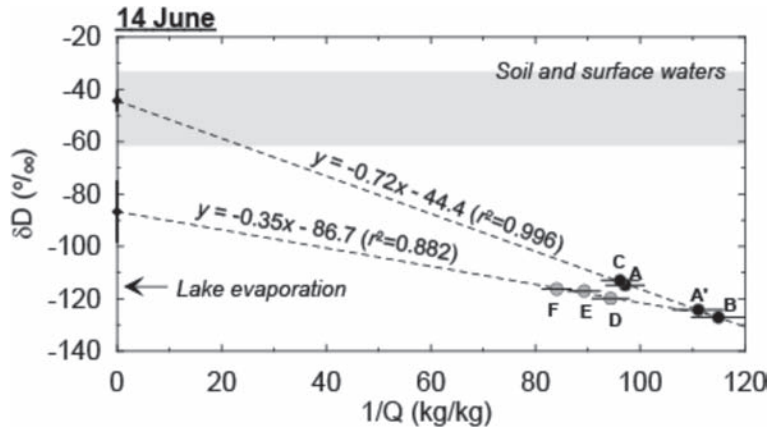
一方、従来のような降水の同位体組成を用いた研究に加えて、水蒸気同位体組成の実測も様々な条件下で試みられた。清水（2005）は関東平野における水蒸気同位体組成の空間分布を様々な空間スケールで明らかにし、マイクロスケールでは水蒸気の同位体組成はほぼ均質とみなせるものの、森林キャノピーの内外では有意に異なることを見出した（清水・山中, 2005）。Tsujimura *et al.* (2007) はモンゴルにおいて、地上観測と航空機観測を同期させることにより、大気境界層における水蒸気同位体組成の鉛直分布を明らかにし

た。綱川（2004）は陸域環境研究センターの草地圃場において水蒸気同位体組成の季節変化をモニタリングし、日中はほぼ常に地表面に近いほど水蒸気の δ 値が高くなることを確認している。

以上のような基礎研究の成果に基づいて、水蒸気の供給源を同定し混合率を定量化する手法が開発され、霞ヶ浦起源の水蒸気が周辺地域の下層大気水蒸気に占める割合が推定された（Yamanaka and Shimizu, 2007；第1図）。また、同位体データによって校正された領域気候モデルを用いて、モンゴルの降水の起源や地域別寄与率を推定する試みもなされた（Sato *et al.*, 2007）。これらの研究はいずれも、降水の発生・維持において、ローカル起源の水蒸気よりもむしろ外部起源水蒸気の寄与が大きいことを示唆しており、外部起源水蒸気の変動によって陸域の水循環が受動的に応答するという別のアプローチによる研究結果（Yamanaka *et al.*, 2007a, b）と整合している。こうした知見は、乾燥・半乾燥地域における干ばつの特性（鈴木, 2004；鈴木・山中, 2004）を理解するうえで有益なものである。

3. サンプリング手法の改良

降水や水蒸気の同位体組成を測定する場合、サンプリングの方法によっては甚大な誤差がもたらされる。そこで、同位体分析に最適なサンプリング手法の検討も行われた。若本・山中（2004）は、降雨イベント内での同位体組成変動をモニタリングする際に降水分取器内部で生じる蒸発濃縮の影響を検討し、これを回避するには予め分取器内にオイルを添加しておく必要があること、またパラフィンオイルよりもシリコンオイルのほうが効果的であることを示した。綱川・山中（2005）はcryogenic法によって大気水蒸気を採取する際の誤差を検討し、水素安定同位体については汎用凝結トラップと液体窒素を使用することで正確な分析値が得られることを実証した。その後、トラップ内にビーズを充填することで雪片の流出を防げ



第1図 つくば地域 (A ~ C) および霞ヶ浦周辺地域 (D ~ F) 計6地点における大気水蒸気の水素安定同位体組成 (δD) と混合比の逆数の関係 (Yamanaka and Shimizu, 2007). A' のみ高度 30 m, 他は 1 m での測定値. 2本の回帰直線の交点はバックグラウンド大気の状態を表わすと考えられ, それぞれの y 切片はローカル起源 (湖面蒸発および陸域蒸発散) 水蒸気の δD を反映する. このダイアグラムから, 霞ヶ浦からの蒸発によって供給された水蒸気の寄与率が 16 (± 4) % と推定された.

ば, 酸素安定同位体についても十分な精度が得られることが明らかとされ, 後述する蒸発散研究で多用された.

4. 基礎理論の再検討

こうした手法面での改良に加えて, 同位体水文学の基礎理論を再検討し, 詳細な野外観測によって検証する試みもなされた. 恩田 (2006) は水面蒸発時の同位体分別を記述する Craig-Gordon モデルを野外条件下で検証すべく, 牛久沼に湖上観測システムを構築してモニタリングを行った. Shimizu (2007) はその結果を受けて, 動的同位体分別係数の新たなパラメタリゼーションスキームを提案した. Onda (2008) はそのスキームを用いた湖沼水収支推定法を開発し, 物理的手法による水収支観測値と比較したところ, 豪雨時を除いて両者の間には良好な一致が認められた. このことは, 動的同位体分別のパラメタリゼーションスキームの妥当性を示すと同時に, 同位体トレーサーを用いた湖沼水収支推定手法の有効性を強く支持している.

II 生態水文学

1. 根系吸水域の推定

根系による吸水過程では同位体分別は生じないため, 土壌水と植物体内水の同位体組成を照合することにより吸水深度を特定することができる. また, 複数種の植物の吸水深度を比較することで, 植物種ごとの水利用戦略を明らかにすることができる (Yamanaka, 2009). こうした原理にもとづいて, まず植物体内水の同位体分析に関する技術的問題が検討され (飯塚ほか, 2004), 引き続き様々な種の水利用戦略とその環境条件との関連性に関する研究がなされた.

まず, 本センターに隣接するアカマツ林を対象とした研究により, 我が国のような温帯湿潤気候下にあっても共存植物種間で水資源の使い分け (水源分化) が生じていることが明らかにされた (飯塚, 2004; Yamanaka *et al.*, 2004a). すなわち, 先駆種のアカマツは深層 (80 cm 以深) から吸水するのに対し, 侵入種のシラカシは表層 (40 cm 以浅) からの吸水が多く, 下層植生であ

るアズマネザサは両者の中間的な深度帯から主に吸水していた。アカマツの根系はシラカシよりも深部に及ぶとはいえ、表層で最も多い分布傾向に大きな差異は無い（山中ほか、2005）。当該林分はアカマツの衰退によって水収支構成が変化してきていることが明らかにされており（Hayashi, 2012）、そうした植生遷移の進行に伴って植物種間の水獲得競争が激化し、これを緩和するために水源分化が図られたことが示唆される（山中ほか、2006）。そこで、松尾（2006）は筑波大学農林技術センターのアカマツ単純林を対象として同様の研究を行い、種間競合がない場合はアカマツも比較的浅い深度 40 cm 程度での吸水が主であることを見出した。

しかしながら、Matsuo（2008）による筑波大学菅平高原実験センターのアカマツ林での研究では、侵入種の存在にもかかわらずアカマツは深度 40 cm 程度を中心に吸水しており、表層水源に依存する下層植生のクマイザサとほぼ完全に競合してしまっていることが明らかとなった。また、浅根性のヤマナラシやズミがアカマツよりも深層から吸水している傾向も見出され、競争相手との生態学的優劣関係によって弱者の側が水源を変更するという仮説が導き出された。

上述の研究では、吸水域の代表深度に焦点が当てられ、その空間構造については詳しい検討がなされてこなかったが、その後正規分布型吸水密度プロファイルを逆解析によって推定するアルゴリズムを開発し、様々な試験サイトの比較研究によってその有用性を確認するとともに、上述の仮説の妥当性を実証した（Yamanaka *et al.*, 2008；木村、2010；第 2 図）。この手法は、より複雑な吸水域構造にも対応できるようにさらなる修正が加えられ、かつ推定結果の信頼性を保証するため数値シミュレーション手法による推定結果との比較が試みられた（木村、2012）。しかしながら、両者の間には必ずしも良好な一致は認められなかった。その原因は現在のところ未だ確定できて

いないが、目視によって測定される根系分布と吸水に寄与しているアクティブな根系分布の間に差異がある可能性が示唆されている。この点については、今後さらに多様な地理条件・植生条件のもとでの観測データを蓄積する必要がある。

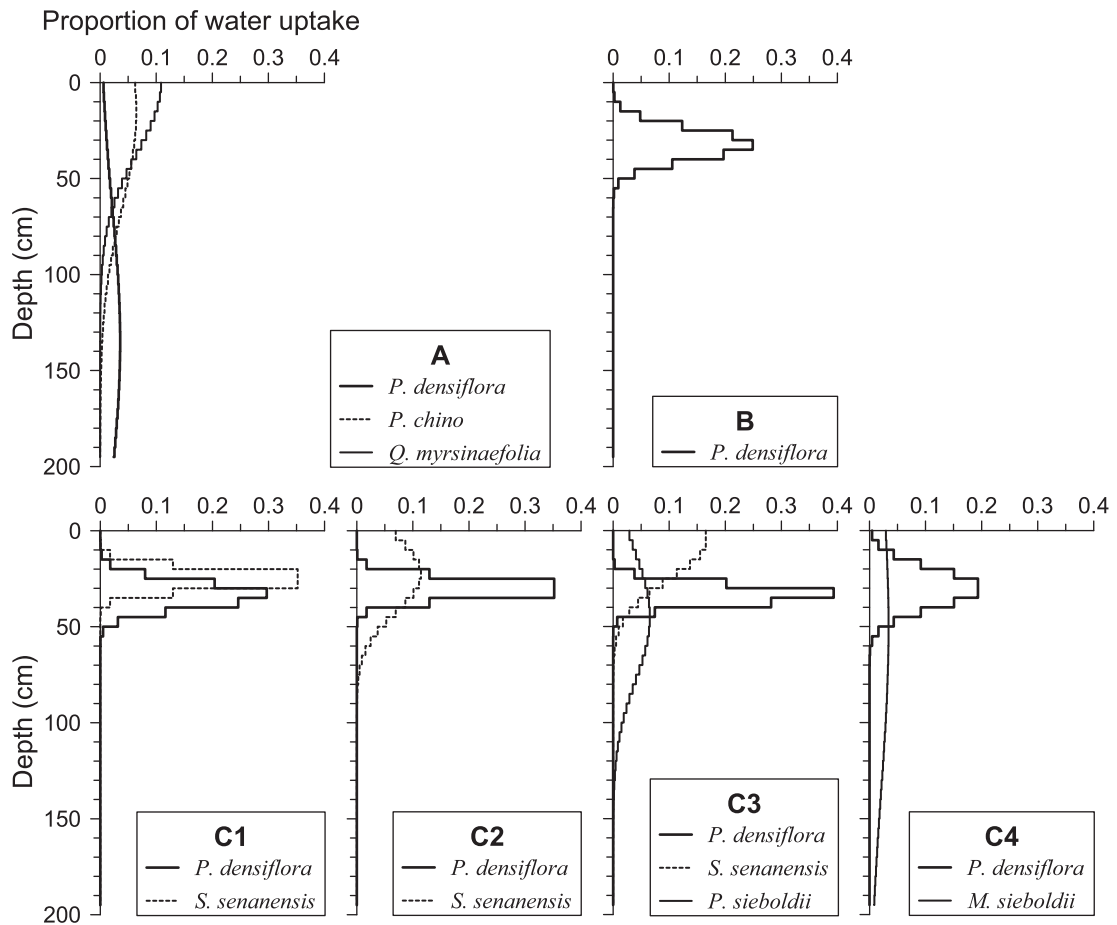
2. 蒸発散の成分分離

降水量から蒸発散量を差し引いた水量を水資源賦存量というが、農作物や自然植生からの蒸散によって失われる水は農業生産活動あるいは人間社会にとって好適な環境の維持に必要なコストであると考えられる。一方、土壤面蒸発によって失われる水は、気候緩和機能に寄与しているとはいえ不可欠な要素ではない。このような観点から、河川水や地下水といったいわゆる水資源をブルーウォーター、蒸散によって消費される水をグリーンウォーター、土壤面蒸発によって無駄に失われる水をホワイトウォーターと呼んで区別するようになってきている（Yamanaka, 2009）。

蒸発散量に占める蒸発・蒸散の割合を物理的計測手段で求めることは容易でない。チャンパー法や茎熱収支法などを用いてそれぞれを独立して測定したとしても、測定値の空間的代表性が低いためである。一方、同位体トレーサー手法による蒸発散の成分分離は群落平均的な値が得られるため、近年の適用事例が急増している。

本センターの草地圃場を対象とした Yamanaka and Tsunakawa（2007）によれば、植生成長に伴う蒸散割合（＝蒸散量／蒸発散量）の変化は LAI（葉面積指数）の関数として近似することができ、LAI が 1 を超えるような状態では蒸散が圧倒的となる。また、有効放射エネルギーに占める潜熱フラックスの割合と蒸散割合が高い相関を有するという結果も得られている。一方、モンゴルのステップ草原における蒸散割合は 0.35 ～ 0.59 程度の低い値をとる（Tsujimura *et al.*, 2007）。

ところで、上述の研究では蒸散水の同位体組成が根系で吸収された水のそれに等しいと仮定され



第2図 正規分布型の根系吸水域を仮定した同位体トレーサーによる吸水密度プロファイルの逆推定結果 (Yamanaka *et al.*, 2008). Aは陸域環境研究センター, Bは農林技術センター, C1～C4は菅平高原実験センターである. アカマツ (*Pinus densiflora*) の吸水深度はAのみ1 m以深に及んでいるが, その他では深度40 cm付近を中心としている.

ているが, 近年この仮定に対する疑義が提出されている. 例えば, 蒸散活動の日変化のために葉内水の同位体組成が定常状態に至っていない場合, 葉に流入する水の同位体組成と蒸散する水の同位体組成には若干の差異が生ずる. また, 仮に定常状態に至っていたとしても蒸発サイトの同位体組成と個葉全体の平均的な同位体組成が異なっている可能性もある (これをペクレ効果という). そこで, 土壌-植物-大気連続系における熱・水収支モデル (Wang and Yamanaka, 2012) に同位体過程を組み込んだ新たなモデルを開発し, 豊富

な同位体実測データをもとにこれらの問題点を再検討した. その結果, 蒸散・蒸発比の日変化を詳細に解析する場合には非定常状態およびペクレ効果を考慮する必要があるものの, 正午付近のデータで蒸散・蒸発比の季節変化を把握する場合には従来の簡略化されたモデルでも比較的良好な結果が得られることが判明しつつある. こうした研究は, 蒸発散の成分分離という観点のみならず, 同位体トレーサーによって大気大循環モデルや地域気候モデルの陸面スキームを検証するうえでも重要な知見を提供する.

III 地下水水文学

1. 地下水涵養源の寄与率評価

地下水の涵養高度の推定や流動系区分を目的とした同位体トレーサー研究は古くから行われているが、その多くは定性的な議論に留まるものであった。そこで本センターでは、地下水と地表水の交流が活発な扇状地を対象として、複数の地下水涵養源からの寄与率を定量的に評価する研究を展開した。まず、栃木県那須扇状地扇央部を対象として、地下水涵養に対する降水・河川水・田面水の寄与率を同位体トレーサー手法で評価した(涌井, 2005; 涌井・山中, 2006)。その結果、扇央部で完全に伏流する蛇尾川の近傍では河川水の寄与が5割以上を占め、また箒川近傍でも一定の寄与が認められた。一方、河川から離れた地点では降水の寄与が多く、田面水の寄与はさほど顕著ではなかった。透水性の高い砂礫で覆われた扇状地では、一般に水田からの浸漏が地下水涵養に果たす役割が大きいと考えられている。上述の結果はそういった認識と異なるものであるが、扇頂から扇央にかけては水田の分布が局所的であり、そのため顕著な田面水の寄与が検出できなかったものと解釈された。そこで、前田(2007)は扇端部を含めた研究を行い、田面水の寄与率が扇端部で高くなる傾向を確認した。しかし、扇端部では涵養よりも流出が卓越し、地下水の鉛直流動成分は上向きになりやすいため、他の扇状地で指摘されているほど顕著な田面水の寄与はやはり認められなかった。

Liu and Yamanaka (2012) は同様の手法を足尾山地と関東平野の境界に位置する足利地域に適用し、河川起源の地下水が右岸(南岸)側に広がっていることや、向斜構造が認められる地域では山体岩盤地下水の寄与が他と比較して高いことを見出している(第3図)。

こうした寄与率評価は同位体測定値の年間平均を用いて行われたが、水フラックスおよび同位体

組成は季節変化するため、それにより無視できない誤差がもたらされている可能性も考えられた。

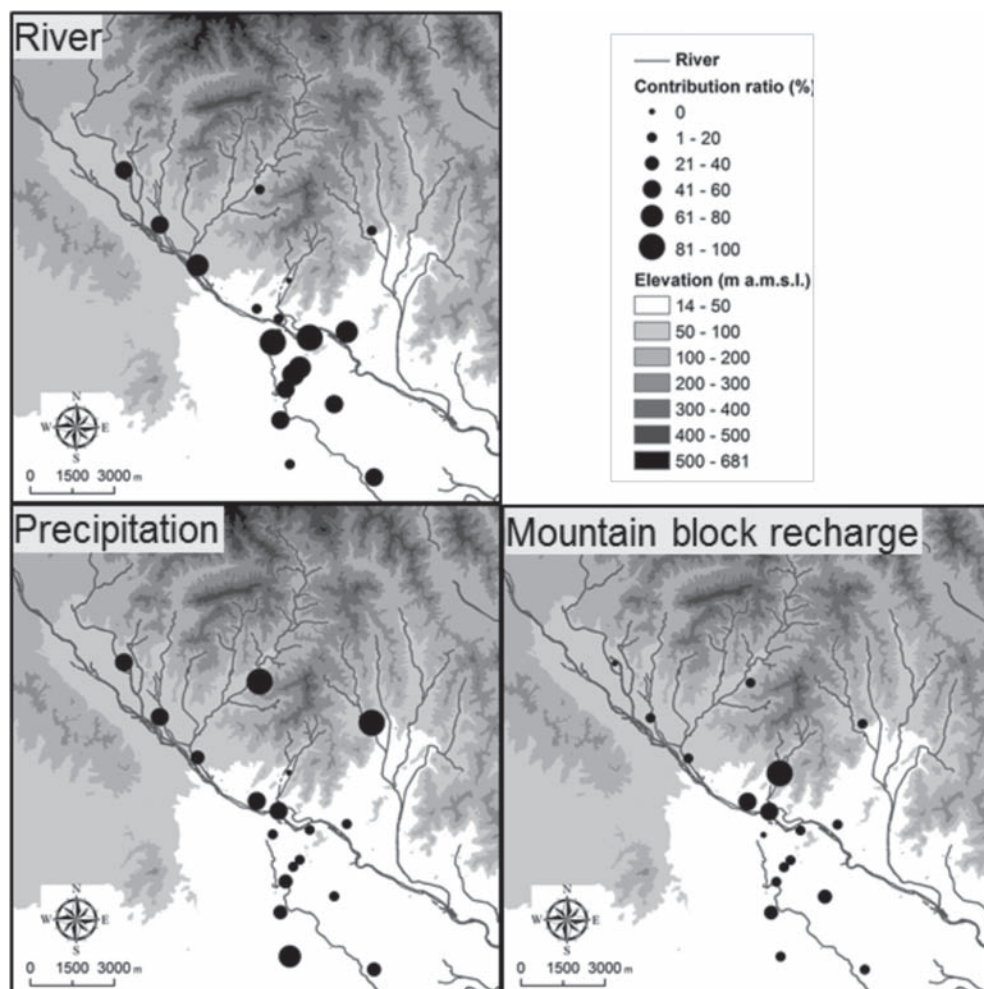
そこで、比較的単純な数値モデルを構築して順問題的に地下水涵養源の寄与率評価を行い、同位体トレーサーによる逆推定結果と比較したところ、両者の間には良好な一致が認められた(Wakui, 2007; Yamanaka and Wakui, 2009)。Liu (2012) は、汎用3次元地下水流動・溶質輸送モデルと同位体トレーサーを併用し、同様の結果を得ている。また、複数の地域を対象とした比較研究により、地下水-河川相互作用の時空間構造、ならびにその地理・地質条件との関係を明らかにした。

2. 過剰揚水の影響評価

地下水の過剰な汲み上げは地下水位の低下と地盤沈下を引き起こす。かつて我が国においても東京や大阪でこのような問題が生じ、条例による揚水規制などにより現在では沈静化しているが、発展著しいアジアのメガシティでは同様の現象が繰り返し起こっている。こうした問題に対処するうえで、広域的な地下水流動系が過剰揚水によっていかなる攪乱を受けてきたかを正確に把握する必要がある。

Yamanaka *et al.* (2011b) は、水の安定同位体と塩素イオンをトレーサーとしてタイ王国・バンコク首都圏の地下水流動系を描き出し、過剰揚水が今なお続いている東西の工業地域一帯で顕著な攪乱が生じていることを明らかにした。また、かつて首都圏中心部で行われていた揚水活動により、表層の塩水もしくは汽水が下位帯水層に引き込まれたものの、その後東西の大規模な水位降下円錐の狭間に位置することで郊外からの地下水流入が生じにくくなっていることを見出した。

三木田(2009)は、そうした過剰揚水が誘発涵養を引き起こしたか否かを数値シミュレーションによって検討した。その結果、過剰揚水によって首都圏一帯で地下水涵養速度が増加し、その増加率は特にバンコク粘土層が薄くなる北西部で大き



第3図 同位体トレーサー手法によって推定された栃木県足利地域の浅層地下水に対する河川水・降水・山体岩盤地下水の寄与率分布 (Liu and Yamanaka, 2012)。渡瀬川が北西から南東に向けて流れており、中流部南岸側に河川水寄与率の高い領域が広がっている。図の中央付近は向斜構造になっており、そこでのみ山体岩盤地下水の寄与が僅かに高い。

いことが明らかとなった。また一方で、自然状態で涵養が生じる山地－平野境界領域においても誘発涵養が生じるものの、首都圏と比較して時間遅れを伴っており、また揚水活動の鈍化に伴う涵養速度の減少もまた緩やかであることが示された (Mikita *et al.*, 2011)。

Yamanaka *et al.* (2011a) は同一の数値モデルを用いて、こうした誘発涵養によって地下水の入

れ替えがどの程度進んだかを解析した。計算結果によれば、最上位の帯水層では 50% 以上の地下水が入れ替わった場所がある一方で、帯水層全体でみると入れ替え率は 1% に満たなかった。これは、バンコク首都圏の深度 600 m 以上におよぶ帯水層群の地下水貯留量が莫大であるためである。こうしたシミュレーション結果の妥当性は、炭素・水素の放射性同位体を用いて確認された。

上述のシミュレーションによれば、バンコク首都圏の全帯水層の平均滞留時間は 1950 年代前半では約 5 万年であり、その後揚水活動によって 2 ～ 3 千年に短縮されたと推定される。しかしながら、依然として古い地下水が多く残存している。このため、地下水の安定同位体組成の 3 次元的分布状況は海進・海退を含む氷期－間氷期スケールの地下水流動変化を反映しているはずである。そこで Mikita (2011) は、海水の混入によって生じる密度流を考慮した 2800 年間の数値シミュレーションを実施し、この地域の降水としては異常に低い δ 値を持つ地下水が、山岳部で涵養されたものではなく、氷期に涵養されたものであることを示した。また、首都圏中心部の中位帯水層でみられる相対的に高い δ 値を持つ地下水が、海進時に粘土層中に封入された海水が揚水活動に伴う粘土層の収縮によって絞り出されたものであると結論付けた。

以上の研究は、東京・大阪・ソウル・台北・バンコク・ジャカルタ・マニラの 7 都市を対象とした総合地球環境学研究所の共同プロジェクトの一環として行われ、その成果は成書 (山中, 2011a, b) に取り纏められている。アジアの都市域は地下水の利用とそれに伴う弊害といった点で同じような問題を抱えていながらも、地理・地質条件の違いによってその特徴は異なり、それに合わせた対策が必要である。ここで紹介した数値シミュレーションと同位体トレーサーの融合研究は、そうしたオーダーメイドの対策を講ずる際の汎用ツールに成りえる。例えば、Jelassi (2011) は小田原地域における地下水利用が沿岸帯水層への塩水侵入に及ぼす影響を解析するにあたって同様の手法を適用し、内陸部における揚水活動が距離的に離れた沿岸部での水平塩水侵入を助長することを明らかにしており、今後の地下水管理の在り方に新たな一石を投じた。

3. 湧水のキャプチャーゾーン推定

近年、都市化の進行による湧水の水量低下や水質悪化が各地において報告されており、つくば市においても同様の傾向が認められる (大森, 2010)。地下水が地表に湧き出でる湧水は、かけがえのない親水空間として特に都市住民の間で保全意識が強いが、保全すべき空間を正確に認識するためには、そのキャプチャーゾーンを明らかにする必要がある。

加納 (2011) は、非定常 3 次元地下水流動モデルと溶質輸送モデルを用いて、後方粒子追跡によってつくば市内の崖線湧水のキャプチャーゾーン推定を行った。その際、モデルによって再現された地下水流動系の信頼性を確認するために、同位体トレーサー手法を併用した。推定されたキャプチャーゾーンは、同位体組成の時間変動特性からみて概ね妥当と考えられたが、シミュレーションと同位体トレーサー手法それぞれ単独で求めた滞留時間推定値は必ずしも一致しなかった。これは、同位体組成の時間変動の振幅を用いて滞留時間を推定するアルゴリズムに問題があると考えられる。そこで、Yamanaka and Wakui (2009) や Liu (2012) と同様に、同位体トレーサーを数値シミュレーションに組み込んで検証を行う予定である。また、崖線湧水のほか、山麓湧水などの他の湧水タイプについてもこの手法を適用し、キャプチャーゾーンの構造や滞留時間にどのような差異があるかについても現在検討中である。

IV 流域水文学

1. 流域通過時間の推定

滞留時間という専門用語は、水の年齢とほぼ同義であったり、ある系を通過するまでの時間という意味であったりと、複数の定義が存在するが、流域における水・物質循環を考える場合、流域に降水が与えられてから河川としてある地点を通過するまでに要する時間、すなわち catchment

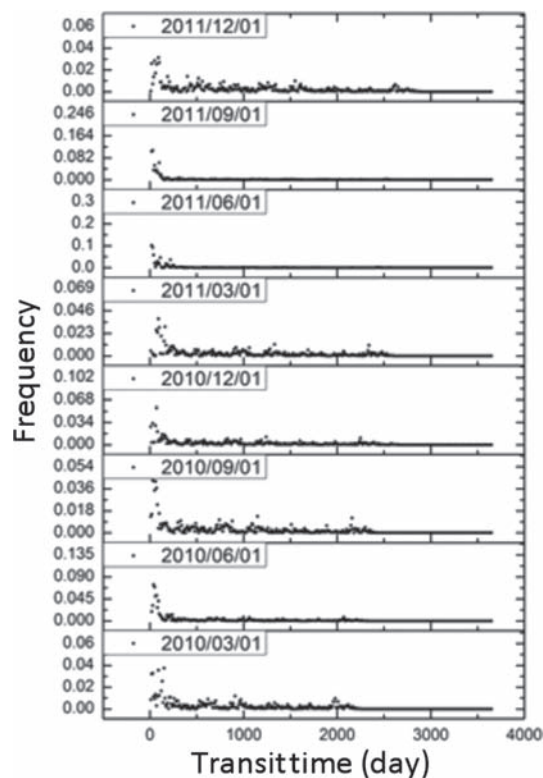
transit time が重要である。ここでは混乱を防ぐため、流域通過時間と呼ぶ。この値は、同一の地点であっても個々の水分子によって異なり、また時間的にも一定とは限らない。しかしながら、既往の研究では比較的単純な仮定に基づいてその平均値だけを問題とすることが多かった。

Ma *et al.* (2012) は、流出解析に用いられるタンクモデルと同位体トレーサーを併用することにより、流域通過時間の頻度分布を明らかにすると同時に、(ある地点の全水分子に対する) 平均通過時間の時間変動を推定するアルゴリズムを開発し、富士川流域に適用した。その結果、流域通過時間分布関数は従来仮定されてきた指数関数型と移流分散方程式の解析解の中間的な特徴を有し、かつ降水量の変動に応じて季節変化することが示された(第4図)。しかしながら、タンクモデルは集中パラメータ型的水文モデルであるため、地形や土地利用の空間的不均質性を十分に考慮できていない。そこで現在は、分布型水文モデルを用いて同様の解析を試みるとともに、同位体トレーサーのみを用いる簡便な流域通過時間推定手法の改良を図っている。

2. 土地利用変化による水・物質循環影響評価

総合的な流域管理の視点において、都市化をはじめとする土地利用の変化が流域の水・物質循環に及ぼす影響を把握することは重要な課題の一つである。

大城(2010)はつくばエクスプレス開通に伴う都市化が著しい牛久沼流域を対象として、GISを用いて河川水質と小集水域の土地利用の関係を解析し、水田以外の農用地が卓越する地域で特に硝酸態窒素濃度が高く、森林が卓越する地域では逆に濃度が低い傾向を見出した。沼倉(2011)は定期的な水質測定に加えて流量観測を実施し、同様に土地利用と窒素負荷量の間にも高い関係性があることを明らかにした。これらの結果を踏まえ、Ohshiro(2012)は分布型水文モデルを構築し、



第4図 同位体トレーサーで校正されたタンクモデルによる富士川流域における流域通過時間分布の推定結果(Ma *et al.*, 2012). 対象とする季節によって分布形状が若干変化している。

河川流量と窒素負荷量の実測値によって校正・検証を行った。その結果、肥料等によるインプットの推定に不確定性が大きい窒素負荷量の再現性には若干の課題が残されたものの、河川流量に関しては良好な再現性が確認された。また、土地利用／土地被覆の変化に対する窒素負荷量の感度分析から、上流域における農用地への施肥の影響が最も大きいことが示された。さらに、都市化シナリオのもとでの窒素負荷量の将来予測を行った結果、農用地から住宅地への転換は河川の窒素負荷量の減少をもたらし、牛久沼の水質改善に寄与する可能性を指摘した。上述のように、モデルの信頼性については未だ不十分な点が残されているが、今後同位体トレーサーと融合させることによ

り予測精度の向上が期待できる。

同様のアプローチは、森林が水・土砂流出に及ぼす影響を評価・予測する際にも有効である。三好（2012）は北関東のスギ・ヒノキ人工林流域を対象として、強度間伐の影響を評価するための前段階として水・物質収支の季節変化を明らかにしたが、間伐影響と季節変化・年々変動を分離するのは容易でない。そこで今後は、数値モデルと同位体トレーサーを融合させたアプローチによってこれらを合理的に分離し、間伐のみの影響評価を試みる予定である。

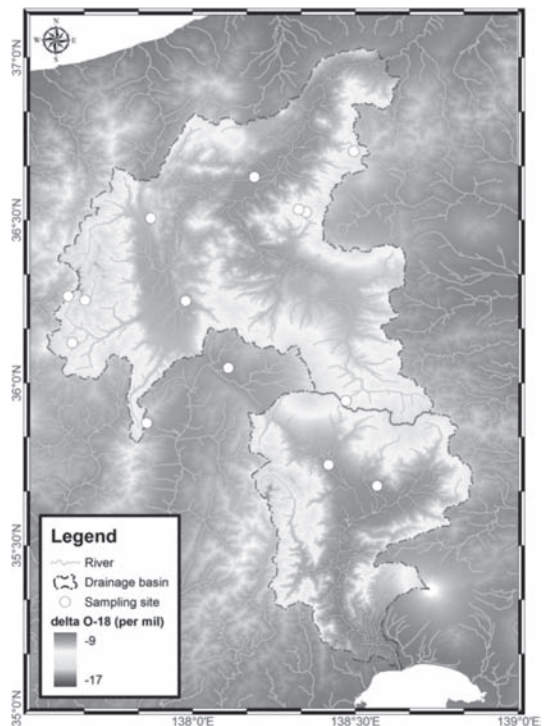
V Isoscape

Isoscape とは、isotope と landscape を組み合わせた造語であり、様々な物質の同位体組成の地理的変動パターンを意味する。すなわち Isoscape アプローチとは、点として得られた同位体観測データをもとに時空間変動を支配する物理過程や統計学的・地球統計学的関係などを経験的あるいは理論的にモデル化することで空間内挿や時間発展の予測を行い、その背後にある物質の移動を追跡・復元するものである。よくキャリブレートされた Isoscape モデルは、地質学的・生物学的素材の起源に関する“指紋”を取るのに用いることができ、元素分析や濃度測定だけでは簡単に得ることのできない情報をもたらしてくれる。例えば、動物や人間の体組織や骨を構成する水素・酸素の同位体組成は、飲用水の同位体組成に大きく左右されることから、渡り鳥の移住行動や人間の旅行履歴を復元することが原理的には可能である。また、農産物の産地偽装や違法物質の供給源を解き明かすなど、科学捜査分野でも実際に応用されつつある。

我が国においては、降水や陸水の同位体組成の空間分布に関する研究が既に行われているが、山がちな国土であるにもかかわらず高標高域の観測データが不足している現状にある。そこで本セン

ターでは、農林技術センター八ヶ岳演習林、菅平高原実験センター、ならびに信州大学や岐阜大学とも連携しながら中部山岳地域における降水同位体モニタリングを開始し（脇山ほか，2012），降水同位体マップを作成した（牧野，2011；丸山，2011；牧野ほか，2012；第5図）。また併せて河川水・土壌水の同位体組成の多点観測を定期的に行い，降水同位体マップの精度評価や流域水循環の特性把握に利用している。さらに長野県・山梨県の水道供給事業者の協力を得ながら，上水道原水の同位体マップを作成中であり，水道水の涵養標高推定などに利用する予定である。また，調査対象地域を日本海側にまでで拡大し，温暖化が融雪出水に及ぼす影響の解明にも着手している。

こうした研究の主目的は，トレーサビリティの向上によって淡水資源の安全保障強化を図るこ



第5図 単相関モデルを用いて作成された千曲川・富士川流域における降水同位体マップ（牧野ほか，2012）。

とにあるが、isoscape アプローチは今後も予期せぬ分野で画期的な応用へと発展する可能性が高く、そうした事態に備えて情報基盤を整備しておくという観点も重要である。

VI まとめ

水の循環とそれに伴って輸送される物質の循環は、異なる時空間スケールをもつ様々なプロセスで構成されている。環境同位体トレーサーは特定の時空間スケールに制約されることなく、応用範囲が極めて広い。しかも、複数のスケールの現象を同一のツールで理解することにより、スケール間の相互作用を正確に捉えることができるメリットがある。また、大気科学や生態学、あるいは社会科学といった既存学問領域を超えた利用が進んでおり、学際領域研究において特に強みを発揮する。しかし一方で、物理的な裏付けが不十分なままに同位体情報を誤って解釈してしまうと、荒唐無稽な結論を導いてしまう危険性もある。第3期中期計画で掲げられた同位体トレーサー技術と数値シミュレーション等情報技術の融合はそうした欠点を補完し、より信頼性の高い研究成果を上げることには寄与するはずである。本稿で紹介した研究事例は、そのことを部分的ながらも立証している。

本センターが中心となってこれまでに行われた研究は、大気水輸送・降水・蒸発・蒸散・根系吸水・地下水涵養・湧水・不圧地下水流動・被圧地下水流動・河川流出など、水文循環のほぼ全てを網羅しており、トレーサー水文学の体系化に一定の寄与を果たせたものと考えられる。今後は、放射性物質の環境拡散などの問題も含め、社会に実装できる画期的な環境診断技術を確立するため、国内外の研究者と共同しながら Isoscape アプローチをさらに発展・深化させてゆくことが肝要であろう。

参考文献

- 飯塚幸子 (2004): 同位体トレーサーを用いた植物の土壌水利用戦略の研究. 筑波大学卒業論文, 42p.
- 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, 81–86.
- 大城慶彦 (2010): 牛久沼流域における河川水質の空間分布と土地利用の関係. 筑波大学卒業論文, 48p.
- 大森 浩 (2010): つくば市における湧水の湧出量と水質の時間変動特性. 筑波大学卒業論文, 36p.
- 恩田 真 (2006): 水面蒸発フラックスの同位体組成に関する観測的研究: Craig-Gordon モデルの野外検証. 筑波大学卒業論文, 41p.
- 加納正也 (2011): 筑波台地崖線における湧水のキャプチャーゾーンの推定. 筑波大学卒業論文, 63p.
- 木村健夫 (2010): 植物根系における吸水深度の選択を規定する要因について. 筑波大学卒業論文, 56p.
- 木村建夫 (2012): 樹木の吸水深度推定手法に関する比較研究. 筑波大学修士論文, 94p.
- 清水亮介 (2005): 水蒸気同位体組成の空間分布特性とそのスケール依存性. 筑波大学卒業論文, 56p.
- 清水亮介・山中 勤 (2005): 微気象学的スケールにおける大気水蒸気同位体組成の空間構造. 筑波大学陸域環境研究センター報告, 6, 3–9.
- 鈴木和美 (2004): モンゴルを対象とした Palmer Drought Severity Index (PDSI) の適用可能性. 筑波大学卒業論文, 44p.
- 鈴木和美・山中 勤 (2004): Palmer Drought Severity Index (PDSI) を用いたモンゴルの旱魃の解析. 筑波大学陸域環境研究センター

- 報告, **5**, 3–12.
- 綱川明芳 (2004): 草地上の大気水蒸気および蒸発散フラックスの同位体組成. 筑波大学卒業論文, 39p.
- 綱川明芳・山中 勤 (2005): 安定同位体分析のための大気水蒸気サンプリング手法の信頼性. 水文・水資源学会誌, **18**, 306–309.
- 沼倉智紀 (2011): 土地利用・土地被覆が河川の物質負荷量に及ぼす影響の評価: 牛久沼流入河川の事例. 筑波大学卒業論文, 37p.
- 檜山哲哉・阿部 理・栗田直幸・藤田耕史・池田健一・橋本重将・辻村真貴・山中 勤 (2008): 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. 水文・水資源学会誌, **21**, 158–176.
- 前田明大 (2007): 栃木県那須扇状地における水田灌漑が地下水涵養に果たす役割. 筑波大学卒業論文, 82p.
- 牧野裕紀 (2011): 千曲川流域における天然水の水素・酸素安定同位体マップの作成. 筑波大学卒業論文, 55p.
- 牧野裕紀・脇山義史・山中 勤・鈴木啓助 (2012): 中部山岳地域における降水同位体マッピングとその検証. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, AHW28-11.
- 松尾大悟 (2006): アカマツの水利用様式に関する同位体生態水文学的研究: アカマツ単純林における事例. 筑波大学卒業論文, 35p.
- 丸山浩輔 (2011): 富士川流域における天然水の水素・酸素安定同位体マップの作成. 筑波大学卒業論文, 42p.
- 三木田 慎 (2009): タイ国バンコク首都圏における揚水活動に伴う深層地下水涵養過程の数値解析. 筑波大学卒業論文, 69p.
- 三好史哉 (2012): スギ・ヒノキ人工林流域における水・物質収支～季節変化と間伐影響に着目して～. 筑波大学卒業論文, 47p.
- 山中 勤 編 (2006): 環境循環系診断のための同位体トレーサー技術. 電子モノグラフ No.2, 筑波大学陸域環境研究センター, 68p.
- 山中 勤 (2011a): 第 6 章 3 節 バンコク首都圏の水環境と水問題. 「アジアの都市と水環境」(谷口真人・吉越昭久・金子慎治 編), 古今書院, 167–178.
- 山中 勤 (2011b): 第 3 章 地下水涵養. 「地下水流動－モンスーンアジアの資源と循環」(谷口真人 編), 共立出版, 45–64.
- 山中 勤・松尾大悟・矢野 翠・角張順一・飯田真一・涌井久司・清水亮介・田中 正 (2005): 遷移過程のアカマツ二次林における植物種間の根系分布の差異. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **6**, 39–44.
- 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**, 458–464.
- 若本実希 (2004): 高分解能モニタリングによる降水システムの同位体水文学的研究. 筑波大学卒業論文, 50p.
- 若本実希・山中 勤 (2004): 降水分取器内部での蒸発に伴う試水の同位体濃縮について. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **5**, 73–79.
- 脇山義史・牧野裕紀・山中 勤・鈴木啓助 (2012): 中部山岳地域における降水安定同位体組成の時空間変動特性. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, AHW28-05.
- 涌井久司 (2005): 安定同位体組成からみた那須扇状地の地下水－地表水相互作用. 筑波大学卒業論文, 54p.
- 涌井久司・山中 勤 (2006): 安定同位体組成からみた那須扇状地扇央部における地下水涵養源とその地域性. 地下水学会誌, **48**, 263–277.
- Hayashi, A. (2012): Effects of Vegetation Succession on Forest Water Balance at Single-tree and Forest-stand Scales. Ph. D. Thesis, University of Tsukuba, 140p.

- Jelassi, H. (2011): Hydrogeochemical and numerical simulation approaches to reveal mechanisms regulating groundwater quality in the coastal aquifer of Odawara region, Japan. Ph. D. Thesis, University of Tsukuba, 132p.
- Liu, Y. (2012): Spatiotemporal structure of the groundwater-river interaction at mountain-plain transitional landscapes. Ph. D. Thesis, University of Tsukuba, 176p.
- Liu, Y. and Yamanaka, T. (2012): Tracing groundwater recharge sources in a mountain-plain transitional area using stable isotopes and hydrochemistry. *Journal of Hydrology*, 464–465, 116–126.
- Ma, W., Yamanaka, T., Wakiyama, Y. and Makino, Y. (2012): Estimation of catchment transit time in Fuji River basin by using an improved lumped model. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, AHW28-12.
- Matsuo, D. (2008): Influence of competition among co-occurring plants on water use of Japanese red pine. Ms. Thesis, University of Tsukuba, 84p.
- Mikita, M. (2011): Numerical Experiments on the Origin of Groundwaters with Extreme Isotopic Composition in the Bangkok Basin, Thailand. Ms. Thesis, University of Tsukuba, 72p.
- Mikita, M., Yamanaka, T. and Lorphensri, O. (2011): Anthropogenic changes in a confined groundwater flow system in the Bangkok Basin, Thailand, part I: was groundwater-recharge enhanced? *Hydrological Processes*, 25, 2726–2733.
- Ohshiro, Y. (2012): Influence of Land Use and Land Cover on River Water Quality and Nutrient Loads: a Case of the Watershed of Lake Ushiku-numa. Ms. Thesis, University of Tsukuba, 134p.
- Onda, M. (2008): Estimation of lake water balance using environmental tracers. Ms. Thesis, University of Tsukuba, 69p.
- Sato, T., Tsujimura, M., Yamanaka, T., Iwasaki, H., Sugimoto, A., Sugita, M., Kimura, F., Davaa, G., Oyunbaatar, D. (2007): Water sources in semiarid northeast Asia as revealed by field observations and isotope transport model. *Journal of Geophysical Research*, 112, D17112, doi:10.1029/2006JD008321.
- Shimizu, R. (2007): Isotopic composition of lake origin vapor and its mixing with regional atmospheric vapor. Ms. Thesis, University of Tsukuba, 83p.
- Tsujimura, M., Sasaki, L., Yamanaka, T., Sugimoto, A., Li, S-G., Matsushima, D., Kotani, A. and 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.
- Yamanaka, T. (2009): Interdisciplinary perspectives on hydrological cycle in arid zones. *Annals of Arid Zone*, 48, 341–357.
- Yamanaka, T. and 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.
- Yamanaka, T. and Tsunakawa, A. (2007): Isotopic signature of evapotranspiration flux and its use for partitioning evaporation/transpiration components. *Tsukuba Geoenvironmental Sciences*, 3, 11–21.
- Yamanaka, T. and Wakui, H. (2009): Intensive

- groundwater-surface water interaction in an alluvial fan: assessment using a numerical model and isotopic tracer. Taniguchi, M., Burnett, W.C., Fukushima, Y., Haigh, M. and Umezawa, Y. (Eds.): *From Headwaters to the Ocean: Hydrological Changes and Watershed Management*, Taylor and Francis, 321–327.
- Yamanaka, T., Iizuka, S. and Tanaka, T. (2004a): An isotope-ecohydrological study on water use strategy of plants in a suburban secondary forest. *EOS Trans. AGU*, **85(28)**, West. Pac. Geophys. Meet. Suppl., Abstract B12A-05.
- Yamanaka, T., Shimada, J., Hamada, Y., Tanaka, T., Yang, Y., Wanjun, Z. and Chunsheng, H. (2004b): Hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in a northern part of the North China Plain: Climatology and inter-storm variability. *Hydrological Processes*, **18**, 2211–2222.
- Yamanaka, T., Kaihotsu, I., Oyunbaatar, D. and Ganbold, T. (2007a): Characteristics and controlling factors of regional-scale surface soil moisture variability over semi-arid grassland in Mongolia. *Journal of Meteorological Society of Japan*, **85A**, 261–270.
- Yamanaka, T., Kaihotsu, I., Oyunbaatar, D. and Ganbold, T. (2007b): Summertime soil hydrological cycle and surface energy balance on the Mongolian steppe. *Journal of Arid Environments*, **69**, 65–79.
- Yamanaka, T., Tsujimura, M., Oyunbaatar, D. and Davaa, G. (2007c): Isotopic variation of precipitation over eastern Mongolia and its implication for the atmospheric water cycle. *Journal of Hydrology*, **333**, 21–34.
- Yamanaka, T., Matsuo, D. and Hirota, M. (2008): Application of normal distribution model to estimate root water uptake profile by an isotopic approach. Paper presented at American Geophysics Union 2008 Fall Meeting, San Francisco, USA, 15–19 December.
- Yamanaka, T., Mikita, M., Lorphensri, O., Shimada, J., Kagabu, M., Ikawa, R., Nakamura, T. and Tsujimura, M. (2011a): Anthropogenic changes in a confined groundwater flow system in the Bangkok Basin, Thailand, part II: how much water has been renewed? *Hydrological Processes*, **25**, 2734–2741.
- Yamanaka, T., Shimada, J., Tsujimura, M., Lorphensriand, O., Mikita, M., Hagihara, A. and Onodera, S. (2011b): Tracing a confined groundwater flow system under the pressure of excessive groundwater use in the Lower Central Plain, Thailand. *Hydrological Processes*, **25**, 2654–2664.
- Wakui, H. (2007): Numerical simulation on isotopic changes in groundwater in the Nasu fan, Tochigi Prefecture. Ms. Thesis, University of Tsukuba, 73p.
- Wang, P. and Yamanaka, T. (2012): Application of a two-source numerical model to partitioning evapotranspiration and its controls in a temperate grassland ecosystem. *Agricultural Water Management*, submitted.