

地表付近の水の安定同位体を用いた生態水文気象診断

Diagnosing Eco-hydro-meteorological Phenomena Using Isotopic Signature of Waters above and below the Land Surface

山中 勤*

Tsutomu Yamanaka

はじめに

水分子を構成する水素と酸素の安定同位体は、自然界における水の起源や流動経路を特定するためのトレーサーとして極めて有用なツールである。これまで、採取の容易な降水や地下水の同位体を用いて大気循環や地下水循環を明らかにしようとする研究が数多くなされてきたが、近年、大気水蒸気や植物体内水などのサンプリング技術が確立され、それらの同位体情報に基づいた研究も活発に行われてきている。そうした研究は必然的に、水文学と気象学あるいは生態学といった異なる学問分野間の研究交流を促進させ、生態水文気象学とも呼ぶべき新たなディシプリンを形成しつつある。

本稿では、このような学際的領域における諸現象・諸課題に対する同位体トレーサー手法の適用事例を幾つか紹介する。そうした事例をより高次の環境循環系診断手法として位置づけ、体系化する試みは、現在抱えている様々な環境問題を解決するうえで極めて重要な一歩となるに相違ない。

蒸発散経路の同定：蒸散活性の診断

地表面からの蒸発散現象は、環境循環システムにおいて大気への水蒸気供給機能を持つと同時に、地表や大気下層の温度制御機構でもある。それゆえ、地球温暖化等の外部条件の変化や砂漠化等の地表改

変による蒸発散プロセスの変化は、地球規模あるいは地域規模のさらなる環境変化にフィードバックされ得る。

蒸発散現象には、土壌面あるいは水面からの直接的な蒸発と、植生を介した蒸散の、二つの水輸送経路が存在する。前者は同位体分別を引き起こすのに対し、後者は基本的に同位体分別を伴わないため、両フラックスの同位体 signature には明瞭な差異が生ずる。このため、水の同位体をトレーサーとした輸送経路の同定・定量的評価が可能である。

いま、蒸発散フラックス(ET)を蒸発フラックス(E)と蒸散フラックス(T)の二成分に分けて考えると、水収支式および同位体収支式は以下のように表せる。

$$ET = E + T$$

$$ET \cdot \delta_{ET} = E \cdot \delta_E + T \cdot \delta_T$$

ここで、 δ は水素あるいは酸素の安定同位体組成(表記)であり、下付き添え字は各フラックスの値を意味する。これらの式を連立的に解くと、以下の式が導かれる。

$$T / ET = (\delta_{ET} - \delta_E) / (\delta_T - \delta_E)$$

すなわち、蒸発散・蒸発・蒸散の各フラックスの同位体組成が得られれば、蒸発散に占める蒸散成分の寄与率が算定できる。

E は、湿潤土壌面からの蒸発の場合、以下の Craig-Gordon モデル (Craig and Gordon, 1965) を用いて推定できる。

$$\delta_E = \left\{ K \frac{(1/\alpha_{eq})(10^{-3}\delta_s + 1) - h^*(10^{-3}\delta_v + 1)}{1 - h^*} - 1 \right\} \times 10^3$$

ここで、 K は通常の水分子に対する重い同位体分子の水蒸気拡散係数の比、 α_{eq} は平衡同位体分別係数、 δ_s と δ_v はそれぞれ表層土壌水と大気水蒸気同位体組成、 h^* は土壌面温度で基準化された相対湿度である。

T は、植物の吸水深度 (草本植物の場合、表層数 10 cm 程度) における土壌水の同位体組成として与えられる。実際には、気孔における水の相変化の際に同位体分別が生じるが、葉から出てゆく水と入ってくる水の量が等しければそれらの同位体組成は常に等しく、蒸散フラックスの大きさに応じて葉内の水の同位体組成が変化するだけである。

以上のように、 E と T は幾つかの仮定の下で求めることができるが、 E_{ET} を求めることは難しいとされていた。なぜなら、たとえ地表面直上で水蒸気をサンプリングしたとしても、それは上空の水蒸気との混合の影響を受け、もはや蒸発散フラックスの同位体組成を示さないためである。しかしながら、Yakir and Wang (1996) は大気中 CO_2 の供給源を解析する手法である Keeling Plot (Keeling, 1958, 1961) を水蒸気同位体に適用することで E_{ET} が決定できることを示した。

Keeling plot とは、気体濃度 (水蒸気の場合、混合比や絶対湿度) の逆数を横軸、その気体の δ 値を縦軸としたダイアグラムのことで、気体分子とその同位体の質量保存を基礎としている。例えば、混合比 (Q_{bg}) と水蒸気同位体組成 (δ_{bg}) が一様なバックグラウンド大気に、一定の同位体組成 (例えば、

E_{ET}) をもつ蒸発散起源水蒸気が混入するような状況を想定すると、以下の式が得られる。

$$Q_v = Q_{ET} + Q_{bg}$$

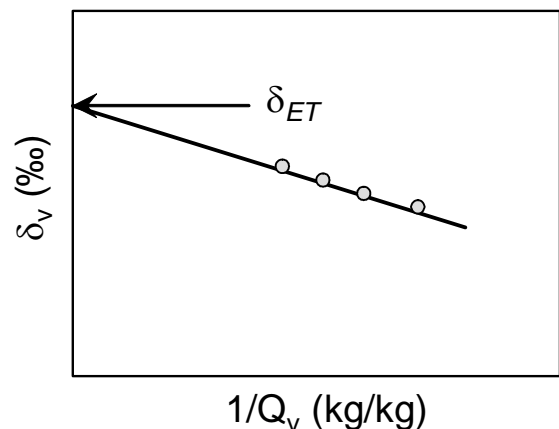
$$Q_v \cdot \delta_v = Q_{ET} \cdot \delta_{ET} + Q_{bg} \cdot \delta_{bg}$$

ここで、 Q_v と δ_v はそれぞれ任意の空気塊の水蒸気混合比と水蒸気同位体組成であり、 Q_{ET} はその空気塊に含まれる蒸発散起源の水蒸気混合比である。これらの式を連立させ、 δ_v について解くと、以下の式が得られる。

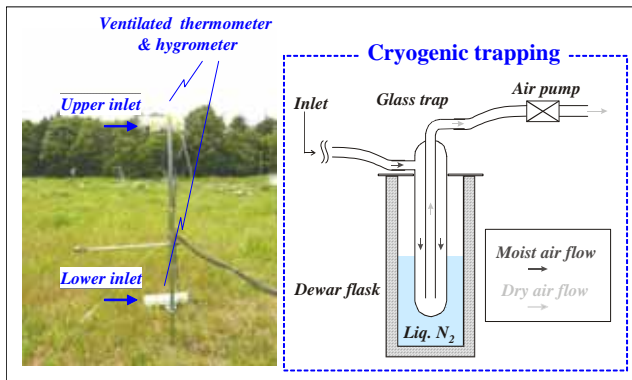
$$\delta_v = a \cdot (1/Q_v) + \delta_{bg}$$

ここで、 $a = Q_{bg} \cdot (\delta_{bg} - \delta_{ET})$ である。すなわち、 Q_{bg} 、 δ_{bg} および δ_{ET} が時空間的に一定であるような場合、混合比の逆数と δ 値の関係 (すなわち Keeling plot) は一つの直線で近似でき、その切片が E_{ET} となる (第 1 図)。逆に言えば、Keeling plot におけるデータの直線的分布は上記の前提が満たされていることを示唆する。

一方、このような決定法は、大気境界層内の物質輸送理論からも同様に導くことができる (He and Smith, 1999)。その場合の前提条件はボーエン比法と同じであり、このことからプロファイル観測高度の 100 倍から数百倍程度のフェッチが要求されることが分かる。



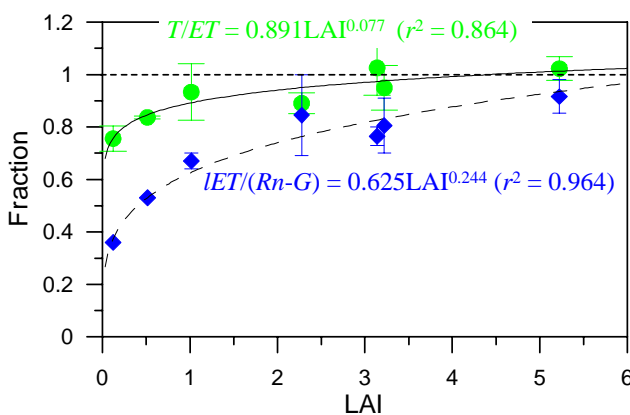
第 1 図 Keeling plot による E_{ET} の決定



第2図 観測装置概要

以上の手法をテストするため、筑波大学陸域環境研究センターの草地圃場において、二高度での水蒸気サンプリングと温湿度計測を実施した(第2図; Yamanaka et al., 2006)。予備実験により、水蒸気採取時に同位体変化が生じないことを確認している(綱川・山中, 2005)。また、降水および土壌水(5深度)の同位体組成をモニタリングした。水蒸気サンプリング実施時には、正味放射量と地中熱流量の測定を併せて行い、ボーエン比 熱収支法によって蒸発散フラックスを求めた。

第3図に、 T/ET と葉面積指数(LAI)の関係を示す。LAIの増加とともに T/ET は対数関数的に増加し、 $LAI > 3$ で T/ET は概ね1に等しくなる。LAIが1未満の場合も T/ET は0.7以上と比較的高い値を示しているが、これは刈り取った植物残渣が地表を被覆し、土壌面蒸発を抑制したためと考えられる。有効放射エネルギー($Rn - G$)に占める潜熱フラッ



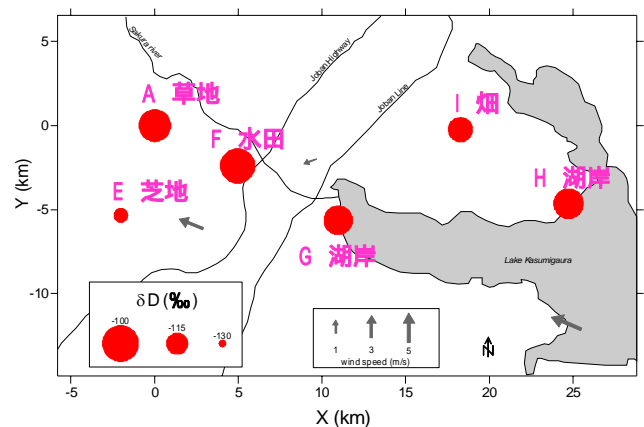
第3図 葉面積指数(LAI)と T/ET および $IET/(Rn - G)$ の関係 (Yamanaka et al., 2006)

クス(IET)の割合も T/ET と同様に、LAIの対数関数として近似できる。以上の結果から、植物の成長が蒸散活性を通じて地表面熱収支を制御している実態が明確に示された。

大気水蒸気供給源の同定: メソ大気の診断

Keeling plotを広域的な水蒸気同位体情報に適用すると、大気水蒸気の供給源に関する手がかりが得られる。なお、節で示したように、地表面直上の水蒸気同位体の鉛直プロファイルは局所的な蒸発散フラックスの影響を強く受けているが、値そのものは2 km程度のスケールでは水平的に均質化されている(ただし、森林キャノピーなどの閉じた空間を除く)ことが確認されている(清水・山中, 2005)。

第4図に、霞ヶ浦周辺域における大気水蒸気D(高度1 m)の空間分布を示す。この図から、霞ヶ浦との位置関係や土地利用が大気水蒸気同位体組成に及ぼす影響を読み取ることは難しい。しかしながら、Keeling plotでは、東部3地点と西部3地点(ただし、A地点では高度1 mと30 mの2高度で測定)のデータが異なる傾向線上にプロットされることが分かる(第5図)。西部3地点の回帰直線の切片は-44‰で、周囲の土壌水や田面水の値(-30 ~ -60‰)にほぼ等しい。すなわち、これらの地点では、蒸散による水蒸気供給が卓越していることが示唆さ



第4図 霞ヶ浦周辺域のDの空間分布 (矢印は風向・風速を示す)

れる。一方、東部 3 地点の回帰直線の切片は - 87‰ で、霞ヶ浦からの蒸発フラックスの同位体組成 (- 115‰; Craig - Gordon モデルにより算出) により近い。いま、蒸散フラックスの同位体組成を西部地域のものと同じと仮定し、これと湖面蒸発フラックスとの混合によって東部地域の切片の値が決定されて

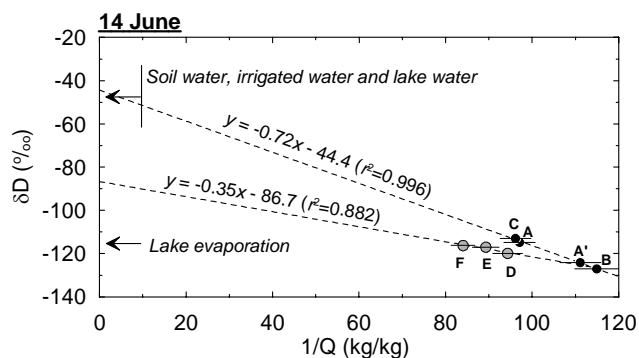
いると考えると、湖面蒸発と蒸散の量的割合は 3:2 となる。さらに、2 本の回帰曲線の交点をバックグラウンド大気値 (- 125‰) と考えると、ローカルソース成分 (湖面蒸発と蒸散の和) とバックグラウンド成分の比は 1:3 となる。以上の試算結果から、霞ヶ浦に近接した東部 3 地点では、高度 1m 程度の大気中に含まれる水蒸気のうち、15% が霞ヶ浦起源、10% が水田や畑など周囲の陸面起源、残りの 75% が外部起源であると見積もられる (Shimizu and Yamanaka, 2006)。

しかしながら、外部起源とされる水蒸気の実体は定かでない。関東平野程度の空間規模では内陸に向かうにつれ水蒸気 値が低下する傾向と霞ヶ浦近傍での局所的な落ち込みが認められるが (第 6 図) Keeling plot 上ではデータのばらつきが大きく (第 7 図) バックグラウンド大気値の非一様性が示唆される。こうした空間スケールでの水蒸気同位体組成空間分布構造の形成機構については現在のところ不明な部分が多いが、海陸風や山地 盆地風などとも関係している可能性があり、その説明はメソ気候循環系の診断に関して有益な情報をもたらすものと期待できる。

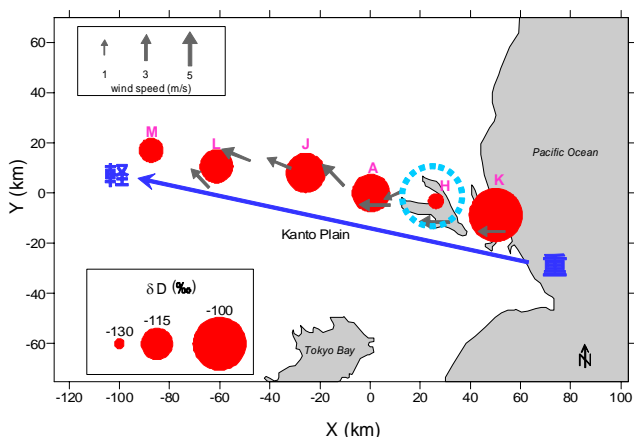
植物吸水源の同定：種間競合の診断

節で述べたように、草本植物は主に浅層の土壌水を利用しているが、樹木や灌木では環境や種によって吸水深度が異なることが近年数多く報告されるようになってきた。

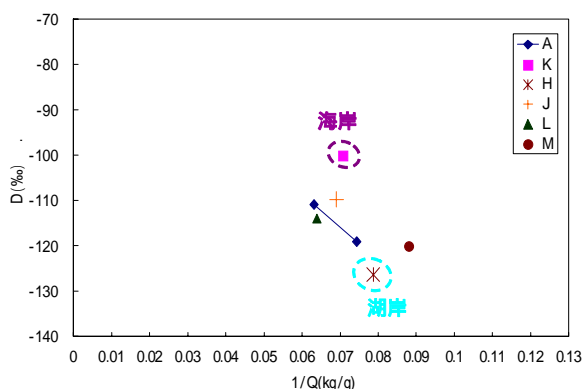
例えば Dawson and Ehleringer (1991) は、樹液・河川水・地下水・降水の同位体組成の比較から、半乾燥域の河畔に生育する樹木が河川水ではなく地下水を利用しているという実態を見出している。またその理由として、洪水によって流路が頻繁に変化する河川よりも安定した供給が見込める地下水を利用したほうが、干ばつ時の生存確率を向上させることができるためであろうと推論している (Dawson, 1993)。同様の手法によって、Flanagan et al. (1992)



第 5 図 霞ヶ浦周辺域データの Keeling plot (Shimizu and Yamanaka, 2006)



第 6 図 関東地域の D の空間分布 (矢印は風向・風速を示す)

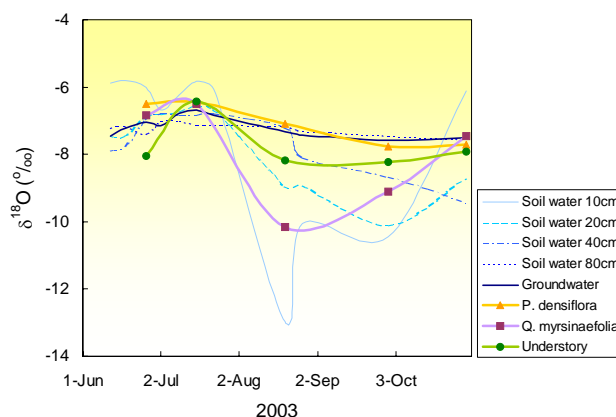


第 7 図 関東地域データの Keeling plot

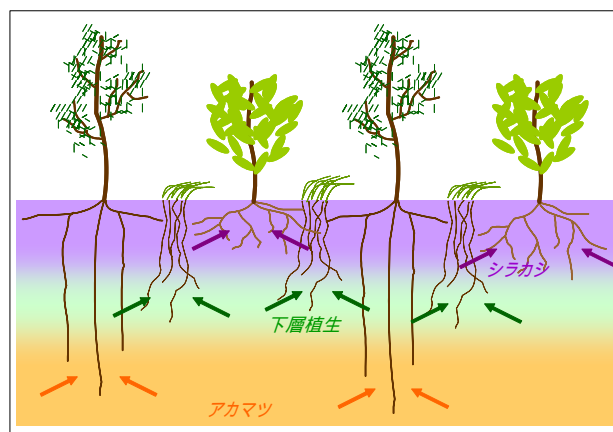
は半乾燥気候下で共存する樹木と灌木の吸水深度を調べ、灌木のほうがより深層から吸水していることを明らかにした。彼らは、水資源の獲得競争や種毎の耐乾性の差異などの観点から、樹木 - 灌木間の水利用様式の差異を論じている。一方、Smith et al. (1997)はサヘル地域における農作物(キビの一種)とそれを取り囲む防風樹木の吸水深度を調査し、地下水面が非常に深い場合には両者とも浅層土壌水を利用するため水資源の獲得競争が生じるものの、地下水面が比較的浅い場合にはキビが浅層土壌水を、樹木が地下水をそれぞれ利用することによって競合が回避されていることを明らかにした。

以上のような先行研究結果を考慮し、筆者らは陽樹(アカマツ)林から陰樹(シラカシ)林への遷移過程にある林分において、植物種毎の吸水源を調査した。対象としたのは筑波大学陸域環境研究センターのアカマツ二次林で、シラカシのほか、アズマネザサなどの下層植生の進入が顕著である。そこで、アカマツ・シラカシ・下層植生の3つのカテゴリーから枝・幹などの植物組織をそれぞれ3サンプルずつ、月1回の頻度で採取し、真空蒸留法(飯塚ほか, 2004)によって樹液を抽出した。また、地下水・土壌水も同時に採取し、樹液とともに同位体組成を測定した。

測定結果を第8図に示す。浅層土壌水の値は降水の同位体的変化を反映して大きく変化しているが、その振幅は深くなるほど小さくなり、また位相が遅れている。そして、深度80cmの土壌水の値は地下水のそれとほぼ等しくなっていた(地下水面深度はほぼ1.3mで不変)。アカマツ(*Pinus densiflora*)樹液の値は、深層土壌水あるいは地下水の値に概ね等しく、時間変化の振幅は小さい。一方、シラカシ(*Quercus myrsinaefolia*)樹液の値の振幅は大きく、深度10~20cm程度の土壌水の値に近い。下層植生の値は両者のほぼ中間に位置する。以上の結果から、アカマツが深層の土壌水もしくは地下水、シラカシが浅層土壌水、そしてアズマネザサ等の下層植生が中間の深度帯の土壌水をそれぞれ利用していることが明らかである(第9図)。すなわち、我



第8図 土壌水・地下水・植物樹液の同位体組成 (Yamanaka et al., 2004)



第9図 植物種ごとの吸水深度の差異

が国のような湿潤気候下でも、共存植物種間で吸水深度に差異があることが示された。このような結果は、それぞれの植物種の根群域の分布とも整合的であった(山中ほか, 2005)。一方、競合相手のない単純林では、アカマツも深度40cm程度までの浅層水源を利用していることが最近の調査で明らかになっており(松尾, 2006) 植生遷移に伴う水資源獲得競争を避けるために、植物種間の水源分化が生じたものと解釈される。

このような共存植物種間の水源の使い分けは、棲息空間という資源を異種間で使い分ける“棲み分け”と同様に、ニッチ分化(松田, 2004)の1形態とみなすことができる。多様な植物種の共存メカニズムを探る上で、様々なニッチ分化に関する理解の重要

性が再認識されつつあるが (Silvertown, 2004)、植物の吸水源に関わるニッチ分化のメカニズムは未解明である。今後、様々な遷移段階にある植物生態系を対象とした調査事例を蓄積するとともに、根系の発達や機能変化の調査を併せて行う必要がある。

まとめ

本稿では、安定同位体情報に基づく環境循環系診断手法の実例として、地表付近の水の起源や輸送経路の同定について述べた。これらの試みは、植生を含む大気 - 陸面系の水循環構造に関して新たな知見を提供すると同時に、適切な土地利用管理や生物多様性の保全に関しても重要な示唆をもたらさう。今後は、より高精度な測定結果を得るためにサンプリング技術・分析技術の向上を図るとともに、同位体トレーサーの強みを生かした適切な研究デザインの設定が鍵になるう。

引用文献

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号, 81-86.

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.

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号, 3-9.

松田裕之 (2004) : ゼロからわかる生態学 環境・進化・持続可能性の科学. 共立出版.

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 -. 筑波大学第一学群自然科学類卒業論文.

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号, 39-44.

Craig, H. and Gordon, L.I. (1965) : Deuterium and oxygen 18 variations in the ocean and the marine atmosphere. In: Tongiorgi, E. (Ed.), *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*, Spoleto, Italy, 9-130.

Dawson, T.E. (1993) : Water sources of plants as determined from xylem-water isotopic composition: perspectives on plant competition, distribution, and water relations. In: Ehleringer, J.R., Hall, A.E., Farquhar, G.D. (Eds), *Stable Isotopes and Plant Carbon-Water Relations*. Academic Press, San Diego, 465-496.

Dawson, T.E. and Ehleringer, J.R. (1991) : Streamside trees that do not use stream water. *Nature*, 350, 335-337.

Flanagan, L.B., Ehleringer J.R., and Marshall, J.D. (1992) : Differential uptake of summer precipitation among co-occurring trees and shrubs in a pinyon-juniper woodland. *Plant Cell Env.*, 15, 831-836.

He, H., and Smith, R.B. (1999) : Stable isotope composition of water vapor in the atmospheric boundary layer above the forests of New England. *J. Geophys. Res.*, 104, 11657-11673.

Keeling, C.D. (1958) : The concentration and isotopic abundance of atmospheric carbon dioxide in rural areas. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 13, 322-334.

Keeling, C.D. (1961) : The concentration and isotopic abundance of carbon dioxide in rural and marine air. *Geochim. Cosmochim. Acta*,

24, 277-298.

Shimizu, R. and Yamanaka, T. (2006) : Diagnosis of sources and mixing of atmospheric moisture using its isotopic signature: a case in the vicinity of a lake. *Geophys. Res. Lett.*, submitted.

Silvertown, J., 2004. Plant coexistence and the niche. *Trends Ecol. Evol.*, **19**, 605-611.

Smith, D.M., Jarvis, P.G., Odongo, J.C.W., 1997. Sources of water used by trees and millet in Sahelian windbreak systems. *J. Hydrol.*, **198**, 140-153.

Yakir, D., Wang, X.-F., 1996. Fluxes of CO₂ and water between terrestrial vegetation and the atmosphere estimated from isotope measurements. *Nature*, **380**, 515-517.

Yamanaka, T., S. Iizuka, and T. Tanaka (2004) : 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., Tsunakawa, A., and Smith, R.B. (2006) : Isotopic signature of evapotranspiration flux and its use for partitioning evaporation/transpiration components. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, submitted.