平成 26 年度
(公社)日本水環境学会 中部支部講演会

平成 26 年 10 月 3 日（金）

場所：三重県教育文化会館

主催　(公社)日本水環境学会 中部支部

平成 26 年度
(公社)日本水環境学会 中部支部講演会
プログラム

日時　平成 26 年 10 月 3 日（金）　　14:20～16:15

場所　三重県教育文化会館　５階　大会議室
〒514-0003　三重県津市桜橋 2-142

講演

Ⅰ　安定同位体比から見る生態系～地域スケールの水循環
松尾　奈緒子（三重大学大学院生物資源学研究科　講師）

Ⅱ　伊勢湾の海域環境と干潟藻場再生
国分　秀樹（三重県水産研究所 鈴鹿水産研究室 主任研究員）

安定同位体比から見る生態系～地域スケールの水循環

三重大学大学院生物資源学研究科　松尾奈緒子

1．はじめに

水は水蒸気や氷へと形を変えながら地球上を循環している。この水循環がエネルギー循環を駆動し，気象や気候システムを形成する。また，水は生命や社会基盤の維持に不可欠な物質であるため，その獲得はすべての生物にとって最も重要な問題である。生態系スケールでは水は植物の蒸発散を駆動力のひとつとして循環し，炭素や窒素，リン等の生元素を輸送する媒介としての役割を果たしている。さらに，水分条件は植物相や微生物相の決定要因のひとつである。このような様々なスケールの水の動態を把握するため，水（H_2O）の中の水素安定同位体比（$^{2}H/^{1}H$，D/H とも表記する）と酸素安定同位体比（$^{18}O/^{16}O$ と $^{17}O/^{16}O$）が利用されてきた。本稿では安定同位体について概説した後，水の安定同位体を利用して生態系～地域スケールの水動態の解明を試みている研究を紹介したい。

2．水の安定同位体

2.1 安定同位体比

同じ原子番号を持つが中性子数が異なる原子（核種）を同位体といい，そのうち放射性崩壊しないものを安定同位体という。例えば，地球上の酸素原子の約 99.759%が質量数 16 の ^{16}O であるが，残りの 0.204%が質量数 18 の ^{18}O，0.037%が質量数 17 の ^{17}O である。このわずかな存在量の違いを議論するため，試料中の同位体比を国際標準物質中の同位体比からの偏差を千分率（‰，パーミル）で表すデルタ値が用いられる。例えば，酸素安定同位体比（$\delta^{18}O$）は次式で表される。

$$\delta^{18}O = (^{18}R_{sample} / ^{18}R_{standard} - 1) \times 1000 \ (‰)$$

ここで，$^{18}R_{sample}$ は試料中の $^{18}O/^{16}O$ 比，$^{18}R_{standard}$ は国際標準物質中の $^{18}O/^{16}O$ 比である。酸素と水素の国際標準物質として国際原子力機関（IAEA）が提供する Vienna Standard Mean Ocean Water 2（VSMOW2）が用いられている。

同位体は陽子数が同じなので化学的性質には違いがないが，質量数が異なるため物理的性質にはわずかな違いがある。この質量数の違いによる同位体効果のため，物理化学過程の前後で物質中の安定同位体比は変化する（同位体分別）。その結果，地球上の物質は異なる安定同位体比を持つことになるので，安定同位体比は物質の起源や移動経路を把握するトレーサーとして利用されている。また，同位体分別の大きさから反応速度や反応時の環境条件の推定が行われている。

2.2 水の相変化による同位体分別

水分子には存在量の多い順に質量数 18 の $H_2{}^{16}O$, 質量数 20 の $H_2{}^{18}O$, 質量数 19 の $^1H^2H^{16}O$（以下，$HD^{16}O$）が存在する。この他に $D_2{}^{16}O$ や $HD^{18}O$，$H_2{}^{17}O$ といった組み合わせの水分子も存在するが，存在量はきわめて少ない。以下，本稿で研究例を紹介する ^{18}O について解説する。$H_2{}^{16}O$ は $H_2{}^{18}O$ よりも質量数が小さいため飽和水蒸気圧が高く（平衡同位体効果），空気中での拡散速度が大きい（動的同位体効果）。こうした同位体効果のため，水の相変化の際に気相（水蒸気）よりも液相（水）や固相（氷）に $H_2{}^{18}O$ が多く残される。この水の相変化の際の同位体分別が地球上の水の安定同位体比の時空間分布を生じさせることを利用して，降水の起源推定や水動態の把握のためのトレーサーとして利用されている。また，同位体分別の大きさは蒸発時の湿度や温度等の環境条件に依存することから，それらの情報を知るためにも利用されている。

2.3 植物による酸素安定同位体濃縮

生態系スケールで見ると，植物が土壌中の水を吸収する際には同位体分別がおこらないため，枝の中の水の $\delta^{18}O$ を土壌水や地下水等の吸水源と予想される水の $\delta^{18}O$ と照合することによって植物の吸水源を推定することができる（Dawson 1993）。一方，葉から蒸散する際には同位体分別がおこるため，葉の中の水（以下，葉内水）の $\delta^{18}O$ は吸水源の $\delta^{18}O$ よりも高くなる（同位体濃縮）。蒸散速度の日変化に応じて葉内水の $\delta^{18}O$ も日変化する。葉内水の同位体濃縮と蒸散速度や温度，湿度，気孔開度等との関係は自由水面からの水の蒸発の際の同位体分別を予測する Craig and Gordon (1965)モデルに基づいてモデル化されている（Dongman et al. 1974）。

さらに，セルロース合成の中間物質であるトリオースリン酸のカルボニル基とその場の水との間で同位体交換がおきるため，葉のセルロース中の $\delta^{18}O$ は葉内水の $\delta^{18}O$ を反映し，したがってそのセルロースが形成された期間の蒸散量あるいは蒸散時の相対湿度や気孔開度を反映する（Barbour and Farquhar 2000）。このことを利用して葉のセルロースあるいは全有機物の $\delta^{18}O$ から気孔開度を評価できると考えられる（Matsuo 2010）。ただし，蒸散量の変動要因が飽差の変化である場合と気孔開度の変化である場合とでは蒸散量と同位体濃縮の関係が異なるため注意が必要である（Farquhar et al. 2007）。

3．地域スケールの水動態

本稿では安定同位体比を用いた地域スケールの水動態研究の一例として，紀伊半島の降水システムの解明を現地観測と数値計算に基づいて試みている著者らのグループによる研究を紹介したい（山田ら 未発表，松尾ら 2014）。日本有数の多雨地域である紀伊半島の降水システムの解明はこの地域の降雨災害の予測・防止のため不可欠である。そこで紀伊半島における降水の空間的・季節的特徴の把握とその原因の解明を目的として紀伊山脈上・東・北西の 5 地点において降水の $\delta^{18}O$ と δD を測定した。さらに，紀伊半島全域の降水の $\delta^{18}O$ と δD を Yoshimura et al. (2010)の同位体領域気候モデル（IsoRSM）を用いて推定し，観測値との比較を行った。

降水の$\delta^{18}O$ とδD の月平均値は観測値，推定値ともに春から夏にかけての降水量の増加にともない低下し，秋から冬にかけての降水量の低下にともない上昇するという季節性を示した。降水の$\delta^{18}O$，δD，降水量の観測値とモデル値の間に，同じく IsoRSM を用いた芳村・一柳 (2010)の報告と同程度の正の相関が得られた。また，毎日降水を採取している平倉演習林においても高い正の相関が得られた。これらより，IsoRSM を用いた紀伊半島の降水システムの日～月単位での考察が可能であることが確認できた。さらに 5 地点における降水の起源となる水蒸気塊がどこから輸送されてきたかを把握するため，IsoRSM により推定された降水発生時の鉛直積分水蒸気フラックスを観測地点から見て北東・南東・南西・北西の 4 方位に分類したところ，各地点とも一年を通じて降水の大半が南東方向から水蒸気が輸送されてきた時に発生することがわかった。

4. 生態系スケールの水動態

安定同位体比を用いた生態系スケールの水循環や水動態の研究にはたくさんあるが，本稿では中央アジア・キジルクム砂漠の塩生植物の生理生態特性を水および葉有機物の$\delta^{18}O$ と炭素安定同位体比（$\delta^{13}C$）を用いて明らかにした研究例を紹介したい（Matsuo et al. 2003）。キジルクム砂漠は年降水量が 120mm に満たない地域であるが，多数の塩生植物が生育している。土壌表層の塩分濃度に勾配があり，それに応じて植生が変化する場所に 6 調査区を設定し，優占種 3 種を対象に枝の中の水の$\delta^{18}O$，葉有機物の$\delta^{13}C$ と$\delta^{18}O$ の測定を行った。

土壌表層の塩分濃度が低い調査区のみ分布する C_3 植物の *Artemisia diffusa* は土壌表層の水を利用しており，蒸散速度が大きく，水利用効率が低いことがわかった。これらのことと根系分布から，土壌表層の塩分濃度が低下する雨季に集中して成長していることが示唆された。土壌塩分濃度が中程度の調査区から高い調査区にかけて分布する C_3 植物の *Tamarix hispida* は塩分濃度の低い土壌深層の水を利用しており，土壌表層の塩分濃度の上昇に対して蒸散量を減少させ塩分吸収量を抑制していることが示唆された。また，土壌表層の塩分濃度が高い場所の個体では葉の水利用効率（光合成速度/蒸散速度）を向上させていることがわかった。一方，すべての調査区に分布する C_4 植物の *Haloxylon aphyllum* は塩分濃度の低い土壌深層の水を利用し，土壌表層の塩分濃度にかかわらず 3 種のうち最も低い蒸散速度を維持していることがわかった。以上より，水と葉の安定同位体比を用いて乾燥地植物の耐塩メカニズムを評価できることが示された。

5. まとめ

本稿では安定同位体比を利用して生態系～地域スケールの水動態の解明を試みている研究例を紹介した。分野に少し偏りがあったがこの他にも，水のδD と$\delta^{18}O$ を利用して流域内の降雨流出過程を把握する研究，降水や河川水中の硝酸イオン（NO_3^-）の窒素安定同位体比（$\delta^{15}N$）と$\delta^{18}O$ から硝酸発生源や水質汚染度を推定する研究といった水環境にかかわる様々な研究が存在する。近年の分析機器の向上や新しい分析技術の開発によって以前より簡単かつ安価に分析できるようになってきている。これまでなじみのなかった方もこれを機会に興味を持っていただければ幸いである。

6. 引用文献

Barbour MM, Farquhar GD (2000) Relative humidity- and ABA-induced variation in carbon and oxygen isotope ratios of cotton leaves. Plant Cell Environ 23: 473-485.

Craig H, Gordon LI (1965) Deutrium and oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere. Proceedings of a Conference on Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Palaeotemperatures, Lischi and Figli, Pisa, Italy. pp 9-130.

Dongman G, Nurnberg HW, Forstel H, Wagener K (1974) On the enrichment of $H_2{}^{18}O$ in the leaves of transpiring plants. Radiat Environ Biophys 11: 41-52.

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, Hass AE, Farquhar GD, Eds). New York: Academic Press. pp 465-496.

Farquhar GD, Carnusak LA, Barnes B (2007) Heavy water fractionation during transpiration. Plant Physiol 143: 11-18.

Matsuo N (2010) Estimating transpiration from the oxygen isotope composition of leaf organic matter. In Earth, Life and Isotope (eds. Ohkouchi N et al.), Kyoto University Press, Kyoto, Japan. pp 303-312.

Matsuo N, Ojika K, Shuyskaya E, Radjabov T, Toderich K, Yamanaka N (2013) Responses of carbon and oxygen isotope compositions in desert plants to spatial variation in soil salinity in Central Asia. Ecol Res 28: 718-723.

松尾奈緒子・山田祐也・芳村圭・勝山正則・和田恵次・大野研・立花義裕 (2014) **紀伊半島の降水安定同位体比の季節変動と空間分布**. **水水学会** 2014 **年度研究発表会要旨集**: 152-153.

芳村圭・一柳錦平 (2009) **東アジアにおける降水** d-excess **の季節変動に関する再考察**. **水水学会誌** 22: 262-276.

Yoshimura K, Kanamitsu M, Dettinger M (2010) Regional downscaling for stable water isotopes: a case study of an atmospheric river event. J Geophys Res 115: doi. 10. 1029/2010JD014032.

伊勢湾の海域環境と干潟藻場再生

三重県水産研究所 鈴鹿水産研究室　国分秀樹

はじめに

近年「きれいな海」から「豊かな海」へと沿岸域のあり方について議論されつつある．海域で頻発している赤潮や貧酸素等の環境問題の原因は，陸域からの豊富な栄養供給により生産された植物プランクトンが，それらを摂食する二枚貝や魚類等の高次の生物へ効率的に利用されていないところにあると考えられる．これまで「きれいな海」を目指して陸域からの流入負荷削減を中心に推進されてきたが，貧酸素化と漁獲量減少が改善されていない．その原因は海域で発生した植物プランクトンが生物生産に利用されず，赤潮として海底に沈降するという，適正な物質循環が機能していないことが推測される．一方干潟や藻場は，水産生物の産卵，保育場として沿岸域の生物生産を支えていると同時に，海域の正常な物質循環機能を担う重要な役割をもつといわれている．ここでは，伊勢湾の海域環境を整理し，干潟藻場再生の重要性について検討したい．

本来の豊かな伊勢湾

伊勢湾が豊かな要因は、淡水流入によって生じるエスチュアリー循環により豊富な栄養塩類が常時供給されること、栄養塩の回転速度が高い干潟や藻場が発達していること、湾口が狭いことにより湾内に貯留されることなどがあげられる。特に湾口が狭いという地形的特徴は、栄養塩類やプランクトン類の貯留機能を有しており、豊かな生物生産の面では長所以外の何者でもない。豊かな伊勢湾にとって湾口が狭いことは “都合の良い偶然”であるが、今日の議論の中では逆に欠点とされている．

豊かな伊勢湾を取り戻すために正常な物質循環系の確保に重点を

近年の研究の結果、かつての伊勢湾は豊富な栄養塩供給により潜在的には赤潮になりうる高い植物プランクトンの生産があるが、それらを摂食する動物プランクトンや魚類、二枚貝等の高次の生物によって生産されると同時に消費され、結果として植物プランクトン量は常時低い水準に押さえられているという機構が明らかになってきた。つまり赤潮の発生には様々な生物の摂食圧が関連しているということである。これまで赤潮や貧酸素化の改善のため，主に流入負荷削減の取り組みが行われてきたにもかかわらず，貧酸素化の状況が好転しないのは、豊富な植物プランクトン

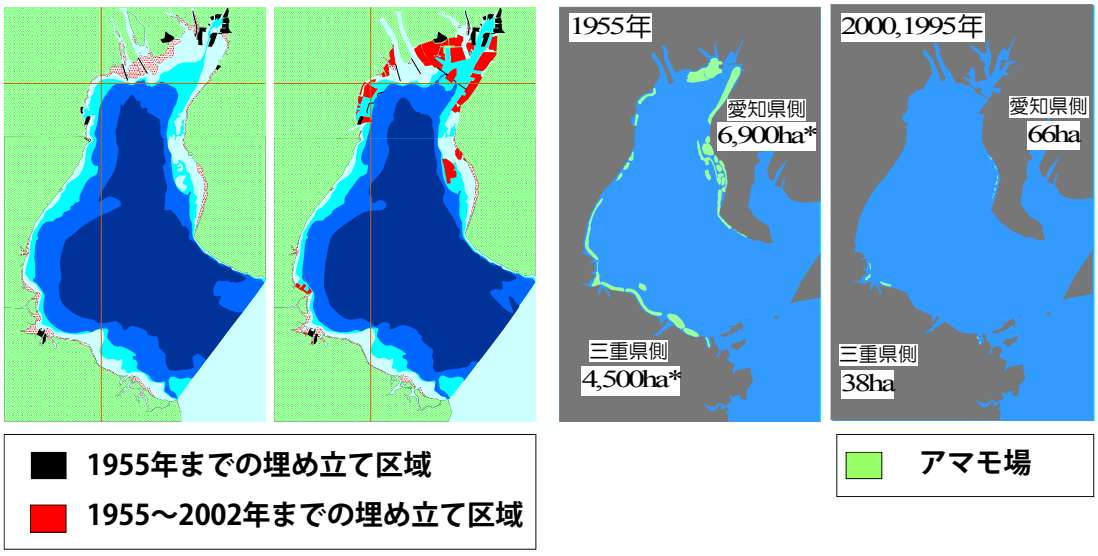

図 1. 伊勢湾の干潟藻場の推移

生産が「何らかの理由」でより高次の生物に利用されなくなり、赤潮として無駄に海底に沈降する過程で酸素が過大に消費されるためと推測できる。

伊勢湾における干潟や藻場の変化を図 1 に示す. 1950 年代より約 8000ha の干潟と約 10000ha の藻場が大規模に喪失している. それと同時に, そこに生息する豊富な生物の減少し, 全湾的な摂食圧低下につながっている可能性が推測される. 伊勢湾ではこの大規模な干潟・浅場の喪失と赤潮の多発、貧酸素化の拡大が同時期に起こっていることから、「何らかの理由」の一つが干潟・浅場の減少であると推測される。よって環境悪化原因を内湾の本来的特徴であり、豊かさの根源である湾口地形や豊富な栄養塩としているのは本末転倒と言わざるを得ない。

伊勢湾の過去 40 年間の伊勢湾の 5 年間ごとの水質平均観測値の推移を図 2 に示す。COD と DIN は減少傾向、赤潮の指標となるクロロフィルは減少傾向で透明度は上昇傾向にあり、伊勢湾の水質は「きれい」になりつつあるといえる。一方、底生生物の生息に欠かせない溶存酸素や基礎生産量は減少傾向にある。図 3 には、貧酸素水塊の最大面積を示した。伊勢湾の溶存酸素濃度（平均値）は、1970 年代には 3.5 mg/L 前後で、1995 年に一旦増加したものの、その後は 3 mg/L 前後に減少している。貧酸素水塊の最大面積も、拡大しており、最大で伊勢湾の 6～7 割程度に達する。図 4 には、三重県漁業地区別統計表（東海農政局）に記載された底生魚介類の漁獲量の推移を示したが、アサリ、エビ類、カニ類、アナゴ類、カレイ類とも減少し，豊かさの回復には至っていない。

陸からの流入負荷動向に注目し、内湾生態系の基本的構造や干潟・藻場といった極浅海域の生態系機能を過小評価してきたことが、現在の貧酸素化や漁獲量の減少の主因と考える。「豊かな伊勢湾」を取り戻すためには，元来の流入負荷削減に加え，過去に消失した干潟・藻場を再生し，本来海域が有していた物質循環機能を取り戻すことで海域の生物生産を増進する縦割りを超えた真摯な議論と行動が必要である。

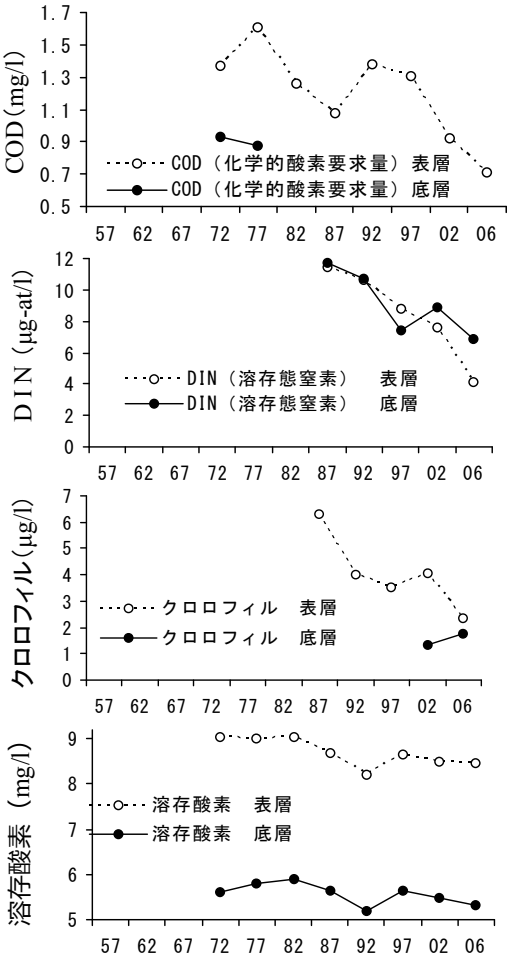

図 2. 伊勢湾の水質の推移（14 測点の 5 年平均値）

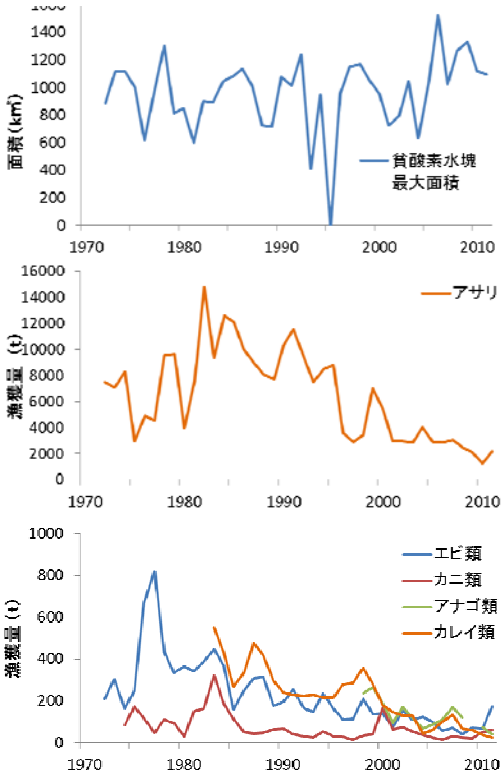

図 3. 伊勢湾の貧酸素水塊面積と底生魚介類の漁獲量推移