

平成 2 7 年度

地球環境「自然学」講座

第 1 1 回

テーマ

森と海をつなぐ河口域生態系を探る

講師

北海道大学水産科学研究院教授

笠井 亮秀

平成 2 7 年 9 月 2 6 日(土)
N P O 法人シニア自然大学校

講師略歴 か さ い あ き ひ で
笠井 亮秀

【学歴・職歴】

1965 年 兵庫県神戸市生まれ。香川県丸亀市育ち。
1989 年気象大学校卒業。1994 年 東京大学理学
研究科博士課程単位取得後退学。

京都大学農学部助手、ウェールズ大学バンガー
校研究員、京都大学農学研究科助教授、京都大
学フィールド科学教育研究センター准教授を経
て、2015 年より北海道大学水産科学研究院教授。
東京大学農学博士。



【受賞歴】

2012 年度 日本水産学会進歩賞

2015 年度 水産海洋学会宇田賞

【研究内容】

専門は水産海洋学および沿岸海洋学。特に、河口・沿岸域の物理現象とそれが海洋環境や生態系に及ぼす影響について、現場観測と数値シミュレーションを用いて研究している。

著書に、「海流と生物資源」、「栽培システム学」、「森川海のつながりと河口・沿岸域の生物生産」、「海は百面相」、「Connectivity of Hills, Humans and Oceans: Challenge to Improvement of Watershed and Coastal Environments」など（いずれも共著）。

森と海をつなぐ河口域生態系を探る

笠井亮秀

北海道大学水産科学研究院

はじめに

沿岸域には河川を通じて陸上から様々な物質が流れ込んでいる。その中で最も多いのは、陸上植物由来の有機物である。森林の草木や落ち葉は、図1に示すように、鹿などの草食動物やシロアリ、ミミズ、センチュウ（1 mm以下の小さな糸状の生物）、あるいはバクテリアなどの微生物によって破碎・分解される。その一部は陸上生態系に取り込まれるが、また一部は河川を通じて最終的には海まで流れ込む。それらがあまりに多量に海域に負荷されると、有機汚濁や富栄養化を招き、赤潮の発生や貧酸素化（水中の酸素濃度が低くなり、生物に悪影響を及ぼす状態）などの環境悪化につながる。

その環境悪化を食い止めているのが、河口域に形成される干潟だといわれている。河口干潟には豊かな生態系が築かれており、河川から流入する大量の陸起源有機物は、河口域生態系に取り込まれ有効利用された後、その一部は食物連鎖を通して系外に除去される。河口域生態系の中でも、近年特に注目されているのが二枚貝による水質浄化である。河口域でしばしば優占する二枚貝は、水中の有機物を大量に濾過することで、河口域および内湾の水質浄化に大きく貢献していると考えられてきた。しかし水中の有機物には多様な物質が含まれているため、この二枚貝の水質浄化能力を評価するためには、その食性を明らかにする必要がある。二枚貝は本当に陸起源有機物を食べているのだろうか？

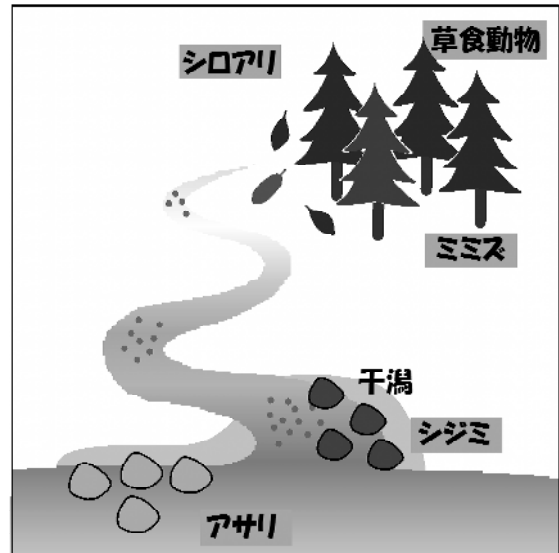


図1. 森林から河川を通じ海域にいたる草木がたどる運命。

二枚貝の餌を推定する方法

実はこれまでアサリやシジミは、海で増殖する植物プランクトンなどを食べている、と言われていたものの、よく分かっていなかった。これは、二枚貝の食性を調べるといっても、捕食行動は観察できないし、消化管の中身を観察してもデトライタス（有機物の残骸）が多かったり未消化物が多く残存していたりして何が含まれているかを特定できない、といった困難さに起因している。しかし、もし二枚貝が植物プランクトンだけを食べているとすれば、陸起源有機物を除去して水質の浄化に役立つという理論は、成り立たなくなってしまう。

これに対し、近年、動物の餌の推定に安定同位体比分析（用語解説を参照）が用いられるようになった。これは動物の体内に含まれる炭素や窒素の同位体比は、食べた餌の同位体比を反映し、炭素で約 1‰、窒素で約 3‰高い値をとる、という法則に基づいている。よって複数の餌候補があり、それらの安定同位体比が異なる場合、それぞれの餌候補と対象とする動物の同位体比を比較することで、その動物がどの餌料に

最も依存しているかを特定することが可能となる。二枚貝が生息している水域の小さなサイズの有機物には、陸起源有機物や植物プランクトン、底生微細藻類（海底に付着している小さな藻類）が挙げられる。そしてこれら3種類の有機物の同位体比は、一般に異なっている。よってこれらと二枚貝の同位体比を比較することで、二枚貝がどの餌を最も多く消化・吸収しているかを特定することができる。

二枚貝の餌は何か？

図2は河口域に生息する二枚貝および水中懸濁物の炭素・窒素安定同位体比を示したものである。二枚貝が生息している場所の水中懸濁物の値は陸起源有機物の値に近い。これは水中懸濁物には陸起源有機物が多く含まれている、ということを示している。一方アサリの同位体比は、陸起源有機物の同位体比よりも明らかに高く、植物プランクトンや底生微細藻類に近い。同位体比と有機炭素・窒素含量からそれぞれの起源を計算すると、懸濁物には約90%の陸起源有機物が含まれているが、アサリの餌料源としての貢献度は10%にすぎないと推定された。つまり水中には陸起源有機物がたくさん含まれているにも関わらず、あまりアサリの餌にはなっていない。これはアサリが体内に取り込んだ有機物をそのまま消化・吸収しているのではなく、その中の植物プランクトンや底生微細藻類を選択していることを示している。アサリは案外グルメなのである。

これと同様の分析を、アサリよりも低塩分域に生息しているヤマトシジミについても行った（ヤマトシジミは汽水域に生息し、日本のシジミ類の中では最も生息数が多い。食卓にあがるシジミのほとんどがヤマトシジミである）。その結果、ヤマトシジミの同位体比はアサリとは異なり、陸起源有機物に近い値をとっていた（図2の◆）。また、同位体比は上流側ほど低く下流側ほど高い傾向を示し、 $\delta^{13}\text{C}$ で -24.8‰ から -16.1‰ 、 $\delta^{15}\text{N}$ で 8.6‰ から 11.8‰ まで大きく変化した。つまり、特に上流側に生息しているヤマトシジミにとっては、底生微細藻類や植物プランクトンよりも、陸起源有機物の方が餌として重要ということになる。ではなぜ、アサリとシジミでこのような違いが生まれるのであろうか？

セルロースの分解過程

植物プランクトンや底生微細藻類は、陸上植物に比べてタンパク質の含有率も高く分解もしやすいので、動物にとっては非常に栄養価の高い餌料であり、生態系の上位へとつながりやすい。その一方で、陸起源有機物は、そのかなりの割合がセルロースで占められている。セルロースとは陸上植物の細胞壁を構成する主成分であり、地球上最もバイオマスの大きな炭水化物である。しかしセルロースは、非常に分解されにく

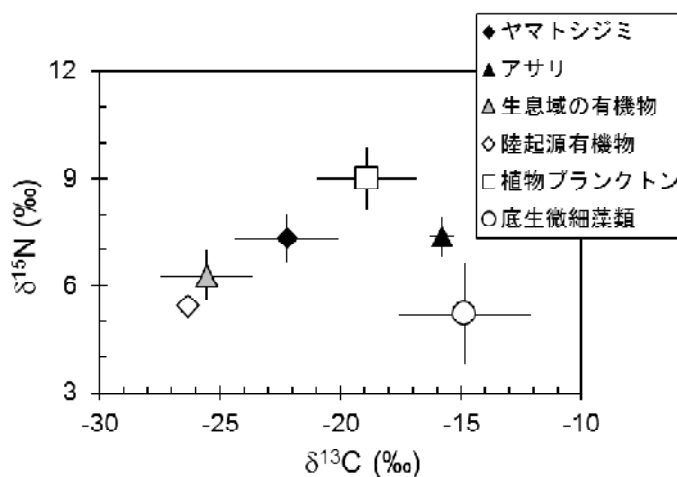


図2. 三重県櫛田川河口域における二枚貝及び水中懸濁物の安定同位体比。エラーバーは標準偏差を表す。ただし二枚貝の値は炭素で1‰、窒素で3‰補正したもの。アサリは植物プランクトンや底生微細藻類に近い値をとる一方、ヤマトシジミは陸起源有機物に近い。

いという特性を持っている。植物は自らの体にセルロースをまとふことにより、容易に動物に食べられることを防いでいると考えることもできる。しかしセルロースの構成成分はブドウ糖なので、一旦分解してしまえば栄養源として利用しやすい物質でもある。草食動物が草木だけを食べて生きていけるのは、その消化管にセルラーゼ（セルロースを分解するための特別な酵素）を持つ原生動物やバクテリアを寄生させているからである。木材を食べることで有名なシロアリも従来はこのような寄生生物のセルラーゼに頼っていると考えられていたが、1998年にゲノム上に自前のセルラーゼ遺伝子を持っていることが発見された。その後、葉を食べる様々な昆虫に加え、ミミズやセンチュウなども自前のセルラーゼ遺伝子を持っていることが続々と明らかにされつつある。

そこで陸起源有機物を栄養源として取り込んでいるヤマトシジミが、自前のセルラーゼを持っているかどうかを調べた。すると面白いことに、シジミもシロアリのものと非常によく似たセルラーゼを持っており、その活性も非常に高いことがわかった(図3)。一方、アサリのセルラーゼ活性は微弱であった。これまでは河川に入り込んだ陸上植物に由来するセルロースは、水底に棲むバクテリアなどの微生物が分解すると考えられてきた。しかしシジミも河口域で、森林におけるシロアリのような役目を果たし、水質浄化に貢献しているのである。

干潟の役割

安定同位体比を用いたこれまでの研究結果を見ると、海で我々が目にする動物のほとんどは植物プランクトンや底生微細藻類を基礎とする生態系に入っており、陸起源有機物を直接利用できるのはシジミやゴカイ類など河口干潟に生息するごく限られた生物のみである。多くの動物にとってセルロースを多く含む陸起源有機物は、餌として不適なのであろう。森林などからもたらされる大量のセルロースは、干潟などに生息する一部の動物によって適切に分解されれば、その後植物プランクトンなどに利用された後、生態系の上位につながっていく。しかしながら干潟が減少している今日では、その多くは未分解のまま海に流れ込んでいる。河川を人体における消化管に例えると、消化機能が低下したために未分解の栄養分がそのまま排泄されていることになる。その結果、沿岸域は貧酸素化などの環境悪化にさらされ、水産資源ばかりでなく地球環境にも重大な影響が及んでいる。大阪湾で底泥中の有機物の炭素同位体比を測定した結果も、河口から約10kmまで陸起源有機物の影響が及んでいることを示している。これが湾奥（淀川河口域付近）の貧酸素化を助長している。干潟の再生は、地球という大きな生き物を本来の健康な状態に回復させるための重要なカギを握っているといえる。

(分子量)

10万

8万

5万

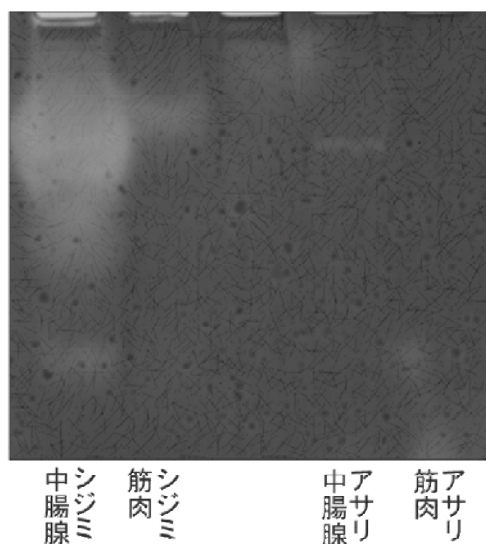


図3. セルロースを溶かし込んだゲルでヤマトシジミとアサリの中腸腺と筋肉抽出液を電気泳動した結果。セルロースを染色しているので、活性のあるところ（分解されたところ）は白く抜けている。

用語解説

安定同位体比

同一元素に属する原子の間で質量数が異なる原子を互いに同位体であるという。同位体には安定な同位体（安定同位体）と放射壊変する同位体（放射性同位体）とがある。質量数とは原子核を構成する陽子と中性子の数の和。元素のうち重い同位体の割合を同位体比というが、一般に同位体比とその変動はとても小さいので、取り扱いやすくするために以下のように表記する。

$$\delta X_{\text{sample}} = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}})-1] \times 10^3 \text{ (‰)}$$

但し X は ^{13}C や ^{15}N などの重い同位体、R は同位体比 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 、 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ など)、standard は標準資料を表す。例えば炭素であれば、

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{sample}} = \left(\frac{^{13}\text{C}_{\text{sample}}/^{12}\text{C}_{\text{sample}}}{^{13}\text{C}_{\text{standard}}/^{12}\text{C}_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000$$

となる。この値は標準資料がゼロとなるような表記なので、サンプルの同位体比がマイナスであっても、その絶対値がマイナスというわけではないことに注意。標準資料としては、窒素なら大気中の窒素ガス、炭素なら矢石類の化石(PDB)が用いられている。

同位体比は食物網を通してある一定の割合（炭素なら 1‰程度、窒素なら 3‰程度）で濃縮することが知られている。また、陸上植物の炭素同位体比 $\delta^{13}\text{C}$ は -27‰程度であるのに対し、中緯度における海洋の植物プランクトンのそれは -20‰程度と、両者の同位体比が大きく異なっている。この差を利用すれば、有機物の組成や動物の餌を推定することができる。

セルロース

ブドウ糖が β -1,4 結合という分解されにくい結合で鎖状に連結したもの。ちなみにデンプンはブドウ糖が易分解性の α -1,4 結合したもの。セルロースは陸上の高等植物、コケ植物および一部の藻類の細胞壁の主成分で、これらの植物体の乾燥重量の 1/3 ~ 1/2 を占める。多くの高等動物はセルロースを分解できないが、草食動物は胃に寄生する微生物がセルロース分解酵素（セルラーゼ）を分泌するので、セルロースを栄養源として利用できる。セルロースは製紙原料として重要であるばかりでなく、セルロースの各種誘導体が様々な工業原料として利用されている。

セルラーゼ

セルロースは 2 段階の過程を経て分解される。まず、 β -1,4 エンドグルカナーゼという酵素で大きく断片化され、生じた断片に β -グルコシダーゼという酵素が作用し、ブドウ糖が生成される。通常、セルラーゼというと前者を指すことが多く、本報においてもその意味で使用している。最近では、多くの生物からセルラーゼ遺伝子が得られており、その構造からいくつかのファミリーに分かれることが知られている。