

沿岸環境研究への安定同位体比分析法の利用

横山 寿*

はじめに

私は1995年に水産庁養殖研究所南勢庁舎に異動した。ラボには数年前のバブル末期に購入された質量分析計があった。しかし、発注した研究者が異動し、埃をかぶっていた。私の任務は当時、急速に発展した魚類養殖が沿岸環境に及ぼす影響を評価し、持続的に養殖を営む条件を明らかにすることであった。研究室員が養殖に由来する有機物が環境中でどのように流れていくか、この機械を用いて飼料、漁場周辺の生物や堆積物の炭素、窒素安定同位体比を測定することにより追跡できないかと提案した。私はそのテーマに同意したが、研究室員は別の研究を行いたいと、横浜の研究所に異動した。代わりに長崎の研究所から異動してきた若い女性研究員とともに研究をスタートさせた。とはいっても、私には複雑な機械をコントロールする術はなかった。素人でも分析できるようにと元素分析計を組み合わせた自動分析システムを整えとともに、京都大学生態学研究センターの中西正己先生にお願いして学位をとったばかりの山田佳裕さんに1998年に特別研究員として来ていただき、ようやくシステムを立ち上げることができた。

私たちは最初に、五ヶ所湾内の隣り合う魚類養殖場において堆積物のコアを採取し、有機物の起源を求めた。この二養殖場は管理する漁協が異なり、生餌から配合飼料に変換した時期が異なる。その違いが30 cmのコアに見事に記録されていた¹⁾。次の調査では五ヶ所湾の湾奥から湾外にかけて調査地点を設け、堆積物とベントスの炭素、窒素安定同位体比を測定した。安定同位体の値は堆積物、ベントスとも湾外に向けて変化していく

こと、魚類養殖場の地点ではこの変化から外れる傾向があることが分かった²⁾。このことから安定同位体分析法が内湾における海陸傾度とともに養殖場が生態系に及ぼす影響を評価する方法として有効だと確信した。

そうこうする内に、新しい世紀に入り私も50歳代に入ってしまった。国の研究機関では50歳を超えると管理職となり、研究の第一線から離れるケースが多い。私にもその声はかかったが、同位体研究がうまく進みだしたので、現場に残る道を選んだ。

魚類養殖は飼料を与え成長させた養殖魚を収穫する産業である。与えた飼料のうち約2割は魚の体として回収される(図1の①)が、残り8割は残餌や糞といった粒状有機物として、あるいは尿など溶存態窒素として環境中に放出される。粒状有機物は海底に沈降し(②)、底層水の貧酸素化と堆積物からの硫化物の発生(③)をもたらす。化学的変化はベントス群集の種多様性や生物量を減少させる(④)だけでなく、養殖生物そのものにも被害を与えることがある(⑤)。ベントスの減少は自浄力を低下させ(⑥)、その結果、海底に有機物が蓄積する(⑦)ことになる。有機物が

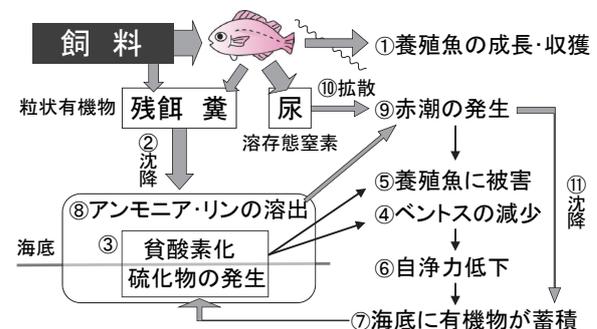


図1. 魚類養殖における有機物、栄養塩類の流れと環境の変化。①～⑩は本文を参照のこと。

*京都大学学際融合教育研究推進センター 森里海連環学教育ユニット特任教授

多量に蓄積すると貧酸素化が進み (③), ひいては硫化物が発生するとともに堆積物よりアンモニアやリンが溶出する (⑧). アンモニア, リンは植物プランクトンの栄養になり, 赤潮の原因となる (⑨). 一方, 養殖魚に食べられた飼料は, 代謝によって尿となり溶存態窒素として体外に排泄され, 水の動きにより拡散する (⑩). このような溶存態窒素は栄養塩類として植物プランクトンの大規模増殖, すなわち赤潮をもたす (⑨). 時には養殖魚に有害な赤潮も発生し, 大きな被害を被る (⑤) こともある. 有害赤潮とはならなくても大量増殖の後, 細胞が死んで沈降し (⑪), 海底に有機物がたまって (⑦), 貧酸素化を引き起こす (③) こともしばしばみられる.

このような影響を減らし, 持続的に養殖を続けるには, まず (1) 養殖活動が環境に及ぼすインパクトを質的, 量的に把握し, つぎに (2) その漁場でどれだけ魚を飼えるか (養殖許容量) を判定し, さらに (3) 残餌を減らす, (4) 養殖廃物を回収する, といった環境修復に向けての取り組みが必要である.

私はこの考えにたって, 三重県熊野灘沿岸の魚類養殖場を主なフィールドとして調査研究を行ったが, 本稿では, そのうち安定同位体比を用いた研究事例を紹介したい. また, 2012年に養殖研究所を定年退職した後, 京都大学の大学院生を対象にした沿岸の環境保全に関する講義を担当することになった. この中で扱った瀬戸内海など沿岸の環境問題についても若干, 触れたい.

2. 残餌と糞の定量

最近, 養魚飼料の価格が高騰している中で, 残餌を最小限に止めることは経営にとっても環境にとってもプラスになる. 養殖現場において残餌と養殖魚の糞の割合を知ることができれば, 給餌の適正性を評価することができる. 私たちは, 炭素, 窒素安定同位体分析により養殖場の堆積物に含まれる残餌と魚糞を定量する方法を考案した (図2)³⁾. この方法は, 魚粉と陸上植物 (大豆油粕,

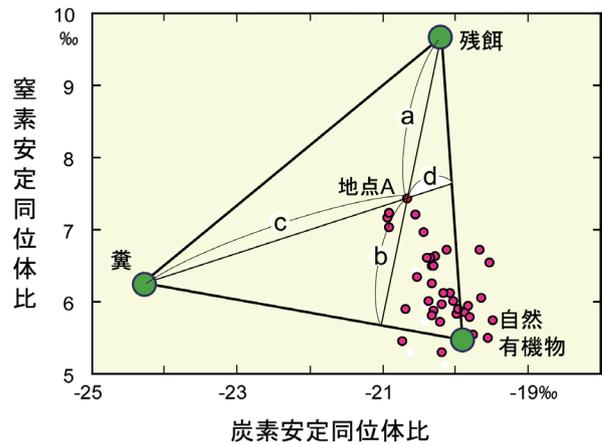


図2. 堆積物中有機物 (赤丸) に含まれる残餌と養魚の糞の割合 (%) の計算法³⁾. 残餌は $100b/(a+b)$, 糞は $100d/(c+d)$ となる.

小麦粉など) からなる配合飼料の成分のうち魚粉は養殖魚に効率的に同化されるのに対し, 陸上植物成分は消化吸収されず糞として排出されないこと, 残餌 (配合飼料), 糞および自然有機物 (海洋植物プランクトン) の同位体比組成がそれぞれ異なることに基づいている. 五ヶ所湾の魚類養殖場内外の堆積物中有機物に含まれる残餌と糞の割

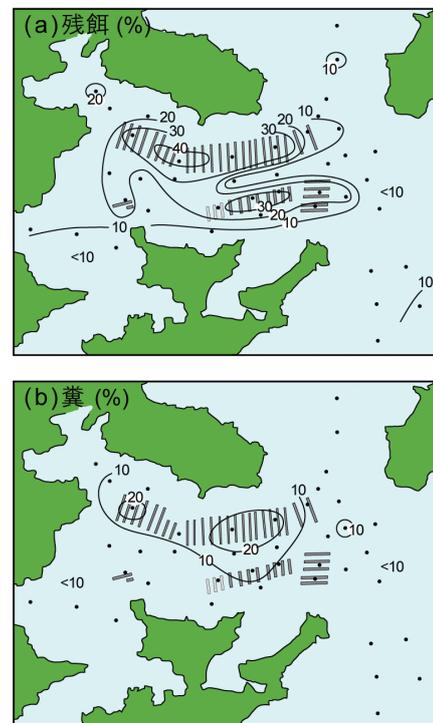


図3. 五ヶ所湾の魚類養殖場における堆積物中有機物に占める残餌 (a) と養魚の糞 (b) の割合³⁾. 濃いグレイの長方形は魚類を収容している生簀列, 薄いグレイの長方形は魚類を収容していない生簀列.

合を計算したところ、養殖場内では堆積物中有機物に占める残餌の割合が平均 29%、糞が平均 12%であり、残餌の割合が高いことが分かった(図 3)。

これより過剰給餌の恐れがあると判断し、この養殖場内の 1 つの生簀において給餌量を通常より約 2 割削減し、他の生簀では通常の給餌量にて、養魚家にマダイを 9 ヶ月間飼育してもらい、その間の成長、死亡率や環境に及ぼす影響を比較した⁴⁾。その結果、給餌量削減生簀下の堆積物に含まれる残餌量が通常給餌生簀より少なくなったことに加え、通常の生簀と餌を減らした生簀の間でマダイの成長に差はなく、給餌量削減生簀での死亡数は通常給餌生簀の 44%と半減したことが分かった(図 4)。これらの結果は、給餌量の削減が環境負荷の低減だけでなく、飼料コストの節約や死亡率の低下にも寄与したことを示している。この例は、安定同位体分析により給餌が適正かどうかを客観的に評価できること、養魚家が給餌量、養魚の成長速度、死亡尾数をチェックすることにより給餌の妥当性を確認できることを示している。

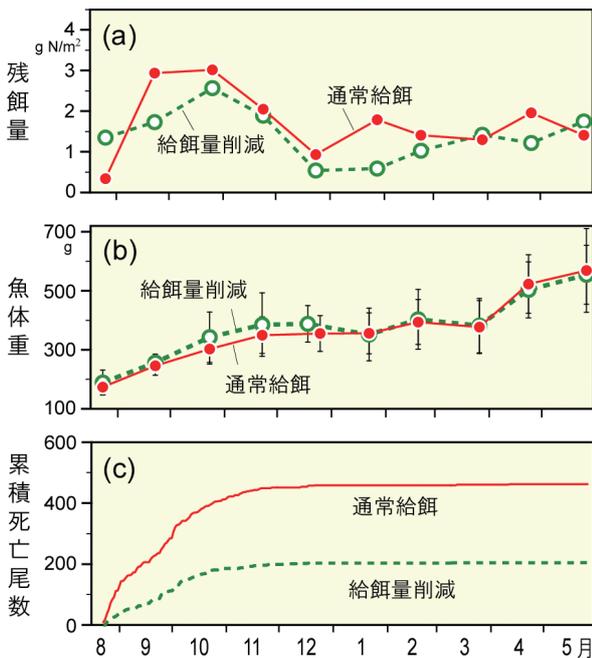


図 4. 給餌量の削減がマダイ養殖生簀下、底泥堆積物中の残餌量 (a)、マダイの平均体重 (b) および累積死亡尾数 (c) に及ぼす影響⁴⁾。

3. 養殖廃物の回収

魚類養殖では、生簀に投じられた飼料の中に含まれる窒素の 60%以上が魚の尿などとなって環境中に拡散し、前述のように、植物プランクトンの増殖を促し、時には赤潮となって養殖業に被害をもたらす。そこで、私たちは養殖由来窒素を回収する方法を緑藻のアオサ類を使って検討した。

まず、養殖場内や生簀から 1.2 km までのブイなどに付着していたアオサ類の窒素安定同位体比と乾重あたりの窒素量を測定したところ、生簀からの距離が増すほどこれらの値が低下する傾向があった⁵⁾。また、グリーンタイドを引き起こす種として知られているミナミアオサを丸く切り抜き、アクリルチューブに入れて魚類養殖場内と対照地点で 2 週間培養したところ、養殖場のアオサの窒素安定同位体比と窒素量は対照地点より値が高くなり、日間生長率は、養殖場では 16~21%、対照地点では 0~16%で、生長はいずれの月においても養殖場のアオサが勝った(図 5)。これらの結果は、養殖場のアオサが養殖魚から排泄された窒素を吸収・同化して、速く生長できたことを示している。1日あたりアオサ 1 g (乾重) が固定する窒素量は 4~14 mg となり、対照地点を 4~11 mg 上回った。ミナミアオサの生長率は今までに複合養殖が試みられたどの海藻より高く、しかも大多数の海藻が枯死するかほとんど生長しない



図 5. 魚類養殖場内外で行ったミナミアオサ培養実験⁵⁾。ミナミアオサを径 14 mm に丸く切り抜き、透明のアクリルパイプに入れて魚類養殖場内と対照地点で水深 50 cm で 2 週間培養した結果。

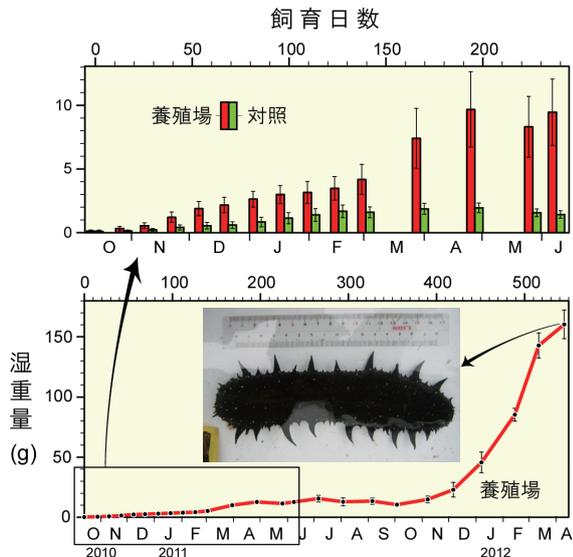


図6. 魚類養殖場内外で行ったマナマコ飼育実験⁶⁾. 約0.1 gのマナマコを両端を網で覆った塩ビパイプに入れて水深6.5 mの生簀下と対照地点で飼育した結果(上図). 飼育開始238日後に網籠に入れてさらに飼育した(下図).

水温の高い夏によく生長するので、魚類養殖場由来窒素の浄化に利用可能なバイオフィルタとして有望である。

一方、養殖により排出された粒状有機物は、ベントスの食物源となりうる。そこで、私たちは養殖由来粒状有機物を回収する方法をマナマコを使って検討した。平均湿重量0.1 gのマナマコを1個体ずつ容器に入れてマダイの生簀下で垂下飼育したところ、545日後には出荷可能な180 gまで成長した⁶⁾(図6)。これらのマナマコは、安定同位体比分析により、飼料中の小麦粉や大豆油粕など陸上植物成分を摂取していることが分かった(図7)。また、同様の実験をマガキの養殖筏で行ったところ、マナマコの成長は対照区より速く、この場合は植物プランクトンを起源とするマガキの糞を摂取していた⁷⁾。マナマコ類のような堆積物食者を複合養殖種として配置することにより養殖廃物を有価の水産物として回収できれば、環境へのインパクトの低減と同時に養殖経営の改善に寄与できる。

4. 沿岸生態系の栄養構造解析

DeNiro & Epstein (1978) により動物・餌間

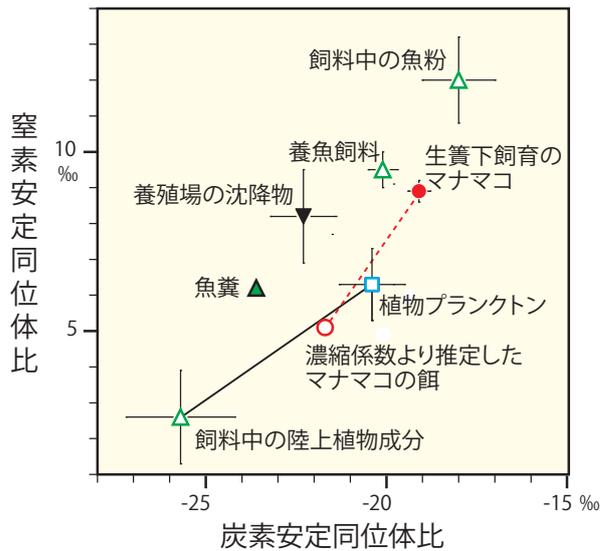


図7. 魚類養殖生簀下で飼育したマナマコおよびその餌有機物の炭素・窒素安定同位体比。飼育実験により求めた¹³C、¹⁵N濃縮係数(それぞれ、2.6%、3.8%)から計算したマナマコの餌の値が飼料中の陸上植物成分(小麦粉、大豆油粕など)と五ヶ所湾の植物プランクトンを結ぶ線上に位置していたことから、マナマコはこれらの混合物を摂取していることが分かる。

の¹³C濃縮係数に関する論文が発表された後1980年代中ごろにかけて¹⁵N濃縮係数の情報も加わって、本分析法が生態系の栄養構造解析のツールとして急速に広まった。Brian Fryは本法をテキサス州の沿岸生態系に適用し、日本では和田英太郎先生が東北地方の汽水・沿岸域に適用した。

本手法の開発により、胃内容分析では分からなかった小動物の食物源が推定できるようになった。沿岸域では、それまで陸起源有機物のデトリタスから栄養を得ていると考えてきたベントスの多くが同位体分析法によりフレッシュな微細藻類に依存していることが明らかになってきた。とくに干潟や浅海域では底生微細藻が主要な餌生物となっていること、一方、陸起源有機物は汽水性の二枚貝やゴカイなど一部の動物を除くと、直接利用されていないことが報告されている。私たちの調査でも、五ヶ所湾では湾奥の干潟では底生微細藻と海洋植物プランクトンがともにベントスの餌となっているが、沖に向かうに従い植物プランクトンの重要性が増す²⁾こと、火山砕屑物を起源とし栄養塩類を保持しにくい粗砂が堆積している白川

河口干潟のベントスは海洋植物プランクトンが主要な餌となっている⁸⁾こと、潮差が大きく潮流の速い有明海では干潟、潮下帯とも底生微細藻と海洋植物プランクトンがともに重要な餌となっていること⁹⁾が示された。

瀬戸内海では、1960年代、高度経済成長にもなって急速に富栄養化が進行し、赤潮や貧酸素化にもなう漁業・養殖業被害が頻発した。このため、1973年、「瀬戸内海環境保全臨時措置法」とこれに続く「瀬戸内海環境保全特別措置法」が施行され、以後40年以上にわたって有機物、窒素、リンの流入負荷が削減された。これに合わせて、有機物、栄養塩類の減少とともに赤潮の発生回数や発生水域も減少した。一方、瀬戸内海における漁獲量は1981年から1986年にかけて45万トン前後で推移した後、減少の一途をたどり2014年度には16万トンを下回るようになった。他方、法律の施行により瀬戸内海での埋立ては減少傾向を示すようになったが、施行前まで(1898~1973年)にすでに326 km²が埋立てられた。法律施行後も空港島建設やゴミ処分のために埋立ては続き、2009年までの埋立て免許累計面積は457 km²となっている(環境省)。また、瀬戸内海では1898年~2006年の間に130 km²の干潟が、1960年~1996年の間に160 km²の藻場が消失した(瀬戸内海環境保全協会)。

瀬戸内海における漁獲量低下が栄養塩類の減少に基づく植物プランクトン生産量低下、すなわち「貧栄養化」にあるとして、流入負荷削減政策を転換しようとする動きがある。一方、瀬戸内海では埋立てにより広大な干潟や藻場、浅海域が失われたままである。私は、底生微細藻が沿岸ベントスの重要な餌料となっている事実より、埋立てにより底生藻類の一次生産力が低下したことが漁獲量低下の一因になっていると考えている。これが真実であるならば、流入負荷の増加は植物プランクトンの増殖、ひいては赤潮の頻発を招くだけで、底生性の高次消費者(有用魚介類)の増加には結びつかない。喫緊の検討が必要である。

5. おわりに

私は、大学は農学部水産学科に入り、その後、大阪市環境科学研究所、水産庁養殖研究所と応用科学の分野に身をおいたせいか、社会が要求する課題に科学的な手法を用いて取り組むという研究スタイルが身についた。異動先に未使用の質量分析計が存在したために、同位体研究に足を踏み入れたが、社会の要請に応じた課題に切り込むには格好の機会となった。

この機会を生かすことができたのは、人とのつながりであったと思う。学生時より存じていた中西先生にこの質量分析計を動かす相談に伺ったのは生態学研究センターが琵琶湖湖畔にあった1997年であった。1999年には山田氏、養殖研究所の石樋由香研究員の努力によって日常的に稼働させることができるようになった。それから10年余り、2012年に養殖研究所を定年退職するまで存分に使った。この間、長崎大学の玉置昭夫教授や京都大学フィールド科学教育研究センターの山下洋教授のグループとの共同研究にも発展した。私はまもなく勤めを終える。素晴らしい人々との出会いのもと、楽しい研究生生活を送ることができたことに感謝している。

参考文献

- 1) Fisheries Science, 69: 213-215 (2003).
- 2) Marine Ecology Progress Series, 346: 127-141 (2007).
- 3) Aquaculture, 254: 411-425 (2006).
- 4) Aquaculture, 286: 80-88 (2009).
- 5) Aquaculture, 310: 74-83 (2010).
- 6) Aquaculture, 372-375: 28-38 (2013).
- 7) Aquaculture Research, 46: 825-832 (2015).
- 8) Marine Ecology Progress Series, 304: 101-116 (2005).
- 9) Estuarine, Coastal and Shelf Science, 82: 243-253 (2009).