魚類養殖の環境インパクトと持続的生産

横 山 寿

(株)水産総合研究センター養殖研究所

Impacts of fish farming on environments and sustainable aquaculture

HISASHI YOKOYAMA

National Research Institute of Aquaculture, Fisheries Research Agency, Minami-Ise, Mie 516-0193, Japan

1. はじめに

わが国では1960年代以降、海面を使用した給餌型魚類養殖が発展し、2006年には養殖業を含む沿岸漁業の中で生産量の10%、生産額の22%を占めるようになった。その一方で、負酸素化や硫化物の発生などいわゆる自家汚染と呼ばれる現象が頻発し、持続的な養殖生産に疑問が生じるようになった。魚類養殖が周辺環境に及ぼすインパクトを正しく把握し、好適な立地条件のもとそれぞれの漁場が有する環境収容力の範囲内で養殖を営むこと、および適正給餌量を知り、過剰給餌を防止することが自家汚染防止の鍵になる。養殖による有機物負荷が環境収容力の範囲内に止まれば、養殖由来有機物はバクテリアにより好氣的に分解されたり、底生動物に餌として取り込まれ、生態系の中に円滑に組み込まれる。しかし、環境収容力や適正給餌量を把握することは難しく、現在、その算定手法の確立が求められている。これらの観点から、筆者らは環境収容力や適正給餌量の推定手法や養殖由来有機物の環境中での流れを追跡する手法を検討している。本稿ではこれらの概要を紹介する。

2. マクロベントス群集を用いた環境収容力の推定

マクロベントスは環境指標性に優れるとともに、負荷有機物の分解に寄与することから、その生物学的特性と漁場の環境情報を重ね合わせることで漁場の評価・管理に役立てることができる。横山ら^{1,2)}は熊野灘沿岸の22ヶ所の魚類養殖場において夏季と冬季に行ったマクロベントス調査より以下の結論を得た。1)マクロベントスの生物量と堆積物の化学分析項目との関係から、漁場の環境管理指針とすべき底質の数値基準が求められる。2)湾口の幅と水深、湾口から漁場までの距離および漁場の水深から計算される「内湾度指数(ED)」を導入することにより、漁場の物理環境と養殖による有機物負荷から動物群集や水質・底質環境の変化を把握できる。3)マクロベントスの群集型から漁場環境を健全、要注意、危機的の3区域に区分できる。4)3区域を内湾度指数と養殖生産量の座標軸の中に位置づけることによ

り、適正養殖量を推定できる。

投入された飼料が残餌や養殖魚の糞となって海底に到達する単位面積あたりの量は「水深×流速」に反比例する。一方、海底での有機物の分解速度は酸素供給量に比例し、酸素供給量は流速に比例する傾向がある。従って、「水深×流速」と「流速」を乗じた値「水深×流速²」が環境収容力を示すことになる。Yokoyama *et al.*³⁾はこれを「養殖適地度指数 (ISL)」と名づけ、その有効性を検討するために、五ヶ所湾と尾鷲湾の8魚類養殖場の20地点で海底上1mにはほぼ同時に設置した石膏球により平均流速を推定し、ISLとマクロベントス群集や化学分析項目との関係を検討した。その結果、1)EDを用いた場合と同様に、漁場環境は健全、要注意、危機的の3区域に区分されること、2)水質、底質、動物群集諸項目の値は魚類生産量・ISL傾度の中で規則的に変化したことから、ISLが環境収容力を示すより汎用性のある指数となることが示された。

3. 堆積物中の養殖由来有機物の定量

養殖由来有機物(AOM: 残餌+養殖魚の糞)の拡散範囲や環境への影響を評価し、生態系におけるAOMの流れを追跡するには堆積物中有機物(SOM)に含まれるAOMを定量する必要がある。そこで、Yokoyama *et al.*⁴⁾は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検討した。堆積物中の有機物が残餌、養殖魚の糞および自然有機物の混合物であり、これら3者の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ が明確に異なれば、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ の測定により3者の割合が求まる。実際に、三重県五ヶ所湾のマダイ養殖場における3者の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ はそれぞれ、 -20.2‰ 、 9.7‰ (飼料)、 -24.3‰ 、 6.3‰ (魚糞)および -19.9‰ 、 5.5‰ (養殖場外のSOM)と互いに大きく異なっていた(図1)。飼料・糞間で $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ が異なったのは、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ がともに高い魚粉や生餌の成分が消化吸収されたのに対し、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ の低い小麦粉や大豆油粕など陸上植物の成分が消化されず糞中に排出されたためと推察される。養殖場とその周

図1 五ヶ所湾魚類養殖場に投入された飼料（残餌）、養殖マダイの糞、自然有機物（対照地点の堆積物中有機物）と養殖場内外41地点の堆積物中有機物（●）の炭素、窒素安定同位体比

例えば、地点20の堆積物中有機物の中で残餌が占める割合は $\{b/(a+b)\} \times 100\%$ 、糞が占める割合は $\{d/(c+d)\} \times 100\%$ となる。Yokoyama *et al.*⁴⁾ を改変。

辺部における大多数の堆積物の値は図1において3者の値を頂点とする三角形の内部に位置したので、3ソースモデル（図1の説明文参照）により漁場堆積物の中で占める残餌と糞の割合が求まった。残餌と糞を定量した結果、1)生簀より約300 mまでAOMが拡散していたこと、2)養殖場内ではSOM中残餌が平均28.8%、糞が平均11.9%を占めていたこと、3)生簀直下でも平均流速が 8 cm s^{-1} を超えると堆積物中にAOMがほとんど蓄積しないことが判明した。本手法を用いると、魚類養殖が底層環境に及ぼす有機物負荷の程度と範囲を明確に示せる。さらに、残餌と糞の分別定量により、給餌量や給餌方法の適正度を評価できる。

4. マダイ養殖場における給餌量削減の効果

五ヶ所湾マダイ養殖場の堆積物中には残餌が糞より約2.4倍多く含まれていたことから、過剰給餌の可能性が高いと判断し、養殖業者に給餌量を約2割削減して当歳マダイを養殖し、マダイの成長や死亡率および環境への負荷を比較する現場実験を提案した。9ヶ月間のモニタリングにより次の結果を得た。⁵⁾ 1)通常給餌区と比べ制限給餌区ではマダイの成長に有意の差はなく、死亡数は通常給餌区の44%に半減した。2)養殖場における沈降物の量は対照区の約4~5倍であり、給餌量との間に有意の正の相関があったが、両区間で沈降物の量の相違を見出すことはできなかった。3)沈降物の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ をもとに3ソースモデル（3ソースは飼料、魚糞および養殖場外の沈降物）を適用して沈降物の組成を求めると、冬期を除き漁場沈降物の大部分は養殖由来有機物であった。その組成は季節的に変化し、両区とも10月ま

でと1月以降は残餌の割合が高く、過剰給餌の可能性が高いのに対し、10月下旬~12月は糞の割合が高く、適正な給餌量に近いことが示された。4)漁場のSOM中AOMの割合は約50%で、沈降物よりAOMの割合が低かった。これは堆積物中では養殖由来有機物の分解が進んでいることを示している。SOM中の残餌量と糞量の季節変動のパターンは異なり、前者は9~10月に多く、後者は12月に多い。5)給餌量削減区におけるSOM中の残餌量は通常給餌区より約2割少なかった。以上の結果より、2割の給餌量削減は餌料効率の向上、死亡率の低下、環境負荷の低減および飼料コスト削減に寄与したことが明らかである。

5. ベントスによる養殖由来有機物の摂取

漁場周辺の生態系への養殖由来有機物の流れを追跡するために、五ヶ所湾の湾軸に沿った地点よりマクロベントスを採取し、 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ を求めた。⁶⁾ 生簀直近ではマクロベントスの種別 $\delta^{13}\text{C}$ のモードが $-21 \sim -19\%$ と漁場周辺の他地点におけるモード（ $-18 \sim -16\%$ ）より低く、養殖場内外で $\delta^{13}\text{C}$ 頻度分布が明らかに異なった。また、漁場内外にともに出現した16種のうち14種は漁場内で採集された個体のほうが $\delta^{13}\text{C}$ が低かった。漁場内に生息する動物の $\delta^{13}\text{C}$ の低下は、陸上植物成分を多く含む魚糞の選択的摂取を反映していると考えられる。一方、漁場の優占種あるいは亜優占種として出現する多毛類のコオニスピオ、*Ophiodromus* sp., カタマガリギボシイソメおよび*Schistomeringos* sp.については漁場内のほうが $\delta^{15}\text{N}$ 値が高かった。また、湾軸に沿った複数地点から採集された同種個体の $\delta^{15}\text{N}$ を比較すると、湾奥から養殖漁場がある湾央に向けて値が増加し、湾央から湾外に向けて値が減少する傾向にあった。このような $\delta^{15}\text{N}$ の上昇をもたらす要因として魚類養殖場から排出された $\delta^{15}\text{N}$ の高い残餌の直接的摂取や $\delta^{15}\text{N}$ の高い養殖魚の尿や飼料からのドリップを栄養源として同化した微生物や一次生産者を通じた間接的摂取が推察される。

6. おわりに

魚類養殖は残餌や養殖魚の糞尿の処理を自然の浄化力に頼って、いわば生態系からサービスを受けて、成り立つ産業である。養殖由来有機物の負荷が環境収容力を上回ると、自家汚染により持続的な養殖生産が困難となる。したがって、養殖を持続的に成立させるには、環境収容力を正しく把握し、適正給餌量を知ることが重要である。ベントス是有機物負荷に伴う環境変化に鋭敏に応答するとともに、養殖に伴い排出される有機物を摂食、分解し、上位の消費者へ転送する重要な役割を果たしている。本稿では、ベントス研究を養殖による環境への影響評価だけでなく、環境収容力を推定し漁場の環境管理に利用する方法を提案した。また、炭素・窒素安定同

位体比分析法を用いると堆積物や沈降物に含まれる残餌と糞の分別定量が可能になり、適正給餌か否かを評価できる。さらに、安定同位体は生態系における養殖由来有機物の流れを追跡するトレーサともなる。これらの手法は養殖業が生態系からサービスを受けるに必要な条件を探る有用なツールとなろう。

文 献

- 1) 横山 寿, 西村昭史, 井上美佐. 熊野灘沿岸の魚類養殖場におけるマクロベントス群集と堆積物に及ぼす養殖活動と地形の影響. 水産海洋研究 2002a; **66**: 133-141.
- 2) 横山 寿, 西村昭史, 井上美佐. マクロベントスの群集型を用いた魚類養殖場環境の評価. 水産海洋研究 2002b; **66**: 142-147.
- 3) Yokoyama H, Inoue M, Abo K. Estimation of the assimilative capacity of fish-farm environments based on the current velocity measured by plaster balls. *Aquaculture* 2004; **240**: 233-247.
- 4) Yokoyama H, Abo K, Ishihi Y. Quantifying aquaculture-derived organic matter in the sediment in and around a coastal fish farm using stable carbon and nitrogen isotope ratios. *Aquaculture* 2006; **254**: 411-425.
- 5) Yokoyama H., Takashi T, Ishihi Y, Abo K. Effects of restricted feeding on growth of red sea bream and sedimentation of aquaculture wastes. *Aquaculture* in press.
- 6) Yokoyama H, Ishihi Y. Variation in food sources for the macrobenthos along a land-sea transect: a stable isotope study. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2007; **346**: 127-141.