特集 東北地方太平洋沖地震が海洋生態系に与えた影響の解明と漁業の復興支援：東北マリンサイエンス拠点形成事業（東北大学・JAMSTEC）による取組とその成果 Part I

宮城県女川湾における炭素・窒素安定同位体比を用いた 主要養殖生物の餌料の推定

片山 亜優,^{1*} 金子 健司,² 阿部 博哉,^{2a}
藤井 豊展,² 西川 正純,¹ 木島 明博²

¹宮城大学食産業学群, ²東北大学大学院農学研究科

Food source for major aquaculture animals estimated from stable isotope analysis in Onagawa Bay

AYU KATAYAMA,^{1*} KENJI KANEKO,² HIROYA ABE,^{2a} TOYONOBU FUJII,²
MASAZUMI NISHIKAWA¹ AND AKIHIRO KIJIMA²

¹School of Food Industrial Sciences, Miyagi University, Sendai, Miyagi 982-0215, ²Graduate school of Agricultural Science, Tohoku University, Onagawa, Miyagi 986-2242, Japan

1. はじめに

宮城県女川湾をはじめとする三陸沿岸はホタテガイやマガキ、マボヤ、ギンザケの養殖が盛んに行われている。しかし、2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震と津波により、女川湾ではほとんどすべての養殖筏が破壊され、養殖場は壊滅的な被害を受けた。また、津波により海洋環境が極めて大きく変化したと考えられる。特に養殖対象生物のうち濾過食者であるホタテガイ、マガキ、マボヤでは、底質等の環境の変化により栄養塩の供給が変化し、餌料環境へも影響があった可能性がある。一方、それらの養殖生物は天然餌料に依存する濾過食者であることから、同じ餌を捕食している可能性が考えられるが、それぞれどのような種類をどれだけ利用しているのかは明確にされていない。これら3種は隣接した施設で養殖されていることから、利用する餌が異なるのであれば、養殖する種を適切に組み合わせることで餌の競合を防ぎ、天然餌料をより効率的に利用できる可能性もある。

第3回国連防災世界会議の成果文書にある「より良い復興」（仙台防災枠組2015–2030：<https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000071588.pdf>, 2015年3月18日）を目指した養殖の復興のために、我々は炭素・窒素安定同位体比を用いて女川湾海域の養殖生物3種、ホタテガイ、マガキ、マボヤの餌の推定や餌料環境の評価を試みており、現在も進行中である。本稿ではこれまでわかってきた成果の一部を紹介する。

2. 調査方法

宮城県女川湾全体を把握することを目的として、調査定点は環境の異なる3地点を設定した（図1）。港内に位置する小乗浜海域、防波堤の外側に位置する竹浦海域、女川湾の支湾であり養殖が盛んな五部浦湾に位置する飯子浜海域の3地点とした。これらの海域では、ホタテガイ、マボヤ、マガキが垂下養殖されている。養殖水深は、海域や養殖生物により異なるが、1–15 mの範囲である。また、これら3海域では、竹浦海域でのみ3種（ホタテガイ、マガキ、マボヤ）を養殖しており、小乗浜海域ではホタテガイ、マボヤを、飯子浜海域ではホタテガイ、マガキを養殖している。本研究においては、実際に養殖されている個体を対象とした。

養殖生物の採集は2016年5月に行った。水深間でも餌の違いが生じる可能性があるため、水深別に上層（5 m以浅）、中層（5–10 m）、下層（10 m以深）の3層に分けた。各層から5個体ずつ採取し、分析に供した。

本研究では餌料推定の手法として炭素・窒素安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ ）を用いた。 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ は捕食–被食の関係により、栄養段階が1段階上がることに $\delta^{13}\text{C}$ は0–2 ‰, $\delta^{15}\text{N}$ は3–5 ‰高くなることが示されている。^{1–3)} 養殖生物の安定同位体比分析には、胃内容物の影響をさけるためホタテガイとマガキは閉殻筋を、マボヤは筋膜を用いた。前処理法は二枚貝の分析に用いられている方法に従い、⁴⁾ 分析直前に凍結乾燥後、粉末化して分析試料とした。

$\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ は、質量分析計（Thermo Fisher Scientific

* Tel : 81-22-245-2211. Fax : 81-22-245-1534. Email : katayamaa@myu.ac.jp

^a 現所属：国立環境研究所（National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, Japan）

図1 宮城県女川湾における養殖生物の採集地

図2 養殖生物3種（ホタテガイ、マボヤ、マガキ）の炭素・窒素安定同位体比
エラーバーは、各種の5個体を測定した値の標準偏差を示す。

社製 DELTA V) を用いて測定し、次式により標準試料からの相対千分偏差で示した。

$$\delta^{13}\text{C}, \delta^{15}\text{N} = [\text{R}_{\text{sample}}/\text{R}_{\text{standard}} - 1] \times 1000 (\text{‰})$$

ここで、R は $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ あるいは $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ である。標準試料は、 $\delta^{13}\text{C}$ は Pee Dee Belemnite (PDB), $\delta^{15}\text{N}$ は大気中の窒素を用いた。

3. 養殖生物3種の餌料推定

全ての調査地においてホタテガイ、マガキ、マボヤで異なる値を示した (図2)。3種が養殖されている竹浦海域におけるホタテガイの $\delta^{13}\text{C}$ は $-17.4 \pm 0.3 \text{ ‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ は $6.8 \pm 0.3 \text{ ‰}$ であった。マガキの $\delta^{13}\text{C}$ は -18.1 ± 0.6

‰ , $\delta^{15}\text{N}$ は $7.5 \pm 0.2 \text{ ‰}$ とホタテガイの値よりも $\delta^{13}\text{C}$ は低く, $\delta^{15}\text{N}$ は高い傾向がみられた。さらにマボヤでは大きく異なり, $\delta^{13}\text{C}$ は $-20.3 \pm 0.1 \text{ ‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ は $6.8 \pm 0.2 \text{ ‰}$ と $\delta^{13}\text{C}$ はホタテガイと比較して約3‰も低い値となった。この傾向は全ての海域と同様であり, マボヤの $\delta^{13}\text{C}$ が最も低い値であった。

既往の知見より, 栄養段階が1段階上がることにより $\delta^{13}\text{C}$ は0-2‰高くなると考えると, マボヤの餌の $\delta^{13}\text{C}$ は $-20 \sim -18 \text{ ‰}$, ホタテガイやマガキでは $-18 \sim -16 \text{ ‰}$ であると推測される。珪藻類の $\delta^{13}\text{C}$ (浮遊性: $-21 \sim -18 \text{ ‰}$, 付着性 $-18 \sim -12 \text{ ‰}$) から判断すると, $\delta^{13}\text{C}$ の種間の違いは, 浮遊性微細藻類と付着性微

図3 竹浦海域における水深別の炭素・窒素安定同位体比

細藻類の摂取割合が異なることに起因しており、マボヤは浮遊性微細藻類を主に摂取し、ホタテガイやマガキは付着性微細藻類をマボヤより多く摂取していると考えられる。

さらに、竹浦海域の養殖生物3種の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ は、水深が深くなるほど高くなる傾向がみられることから(図3)、水深間で餌が異なり、下層ほど付着性微細藻類の寄与が高くなると考えられる。一方、これらの養殖生物は水深帯で成長が異なり、全ての養殖生物で下層ほど成長が悪い傾向があった(未発表)。浮遊性微細藻類の環境中の現存量の指標となるクロロフィル a 量は、年間を通して養殖水深である約15m付近までは水深間ではば差はなく、成長差を生む環境要因として考えられる水温や塩分、栄養塩に関しても年間を通して養殖水深間では顕著な違いはなかった(未発表)。しかし、上層に比べて下層では浮遊性微細藻類を利用できる割合は小さく、浮遊性微細藻類が環境水中に存在するにも関わらず、付着性微細藻類の利用割合が大きくなっていると考えられる。餌料の供給量に関わる水深間における流れの違いや、餌の種類と成長との関係についても、今後は検討していく必要がある。

4. 同一湾内における調査水域間の炭素・窒素安定同位体比の比較

各海域における養殖生物の炭素安定同位体比を図4

に、窒素安定同位体比を図5に示した。同一湾内においても調査水域間で異なる傾向を示し、 $\delta^{13}\text{C}$ はホタテガイおよびマガキともに飯子浜で低くなる傾向があった。また $\delta^{15}\text{N}$ も調査水域間で異なる傾向であった。3海域に共通して養殖されているホタテガイを比較すると、港内に位置する小乗浜海域で $\delta^{15}\text{N}$ が最も高く $7.5 \pm 0.2\%$ と、港外の竹浦海域の $6.8 \pm 0.3\%$ より高い値を示した。さらに、これら3種の養殖が盛んである飯子浜海域は、 $7.2 \pm 0.2\%$ と小乗浜海域と竹浦海域の間にあった。海域により利用する餌が異なる可能性が考えられるが、同じホタテガイが海域により栄養段階の異なる餌を利用するとは考えにくい。基礎生産者の $\delta^{15}\text{N}$ は人工排水などの人間活動により供給される高い $\delta^{15}\text{N}$ を反映することから、⁶⁾ホタテガイにみられた $\delta^{15}\text{N}$ の差は餌の違いではなく、その場の溶存態窒素などの栄養塩環境の違いが餌の安定同位体比に反映したことによると推測される。

最も $\delta^{15}\text{N}$ が高い小乗浜海域は港内に、次いで $\delta^{15}\text{N}$ が高い飯子浜海域は五部浦湾の湾奥に、 $\delta^{15}\text{N}$ が最も低い竹浦海域は港外にそれぞれ位置している。すなわち、閉鎖的な海域で $\delta^{15}\text{N}$ が高く、外洋からの海水の流入の影響を受ける海域で $\delta^{15}\text{N}$ が低い傾向にある。小乗浜海域は津波により破壊された防波堤が再建築されることにより閉鎖的になり、飯子浜ではホタテガイ等の養殖に加えて、ギンザケ養殖も盛んに行われるようになった。両

図4 各採集地における養殖生物別の炭素安定同位体比
エラーバーは、各種の5個体を測定した値の標準偏差を示す。

図5 各採集地における養殖生物別の窒素安定同位体比
エラーバーは、各種の5個体を測定した値の標準偏差を示す。

海域ともに富栄養化が進んでいることから、 $\delta^{15}\text{N}$ の海域間の違いは基礎生産の違いを示しているのかもしれない。

これまでの現地観測の結果では3海域で栄養塩濃度に顕著な差は認められていないが、栄養塩濃度の測定値は観測時の一時的なものであるのに対して、養殖生物の $\delta^{15}\text{N}$ は栄養塩濃度の変化を受けた餌である微細藻類の積算値を反映することから、短期的に変動しやすい栄養塩濃度の観測値よりも環境の変化を捉えるのに有効であると考えられる。養殖生物の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ を継続的に測定することで、環境の変化をとらえられる可能性がある。小乗浜海域では震災前からホタテガイの $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ の分析を継続して行っていることから、⁷⁾震災前から現在までの安定同位体比の時系列的な変化と環境中の栄養塩の変化を追跡することで、震災やその後の防波堤建設および市街地の復興等の人為的な影響が海域環境に与える影響についても検討していきたい。

5. 今後の課題

現在までホタテガイ、マガキ、マボヤは植物プランクトンが主要な餌と考えられ、餌の指標としてクロロフィルa量が用いられてきた。しかし、本研究において主要

な餌料が養殖生物の種類により異なる可能性が示唆された。さらに、水深間においても下層では付着性微細藻類の摂取割合が高く、浮遊性微細藻類は海水中に存在するにも関わらず、浮遊性微細藻類を利用できる割合が水深間で異なる可能性が考えられた。

より正確な餌料評価を行っていくために、さらに餌の供給量および供給メカニズムを捉える必要がある。安定同位体比による推定だけでなく、環境水中および消化管内容物の微細藻類の観察や脂肪酸分析による推定など複数の手法を用いることで、餌の供給メカニズムを質と量の両面から解明し、より効率的な養殖方法を検討していく。

震災後、7年が経過し、養殖筏数や生産量も震災前と同レベルにまで回復してきている。しかし、現在も防波堤の建設や沿岸部の工事は続いており、これらが海域に与える影響は大きいと考える。養殖生物の窒素安定同位体比から影響が見えつつあるが、貧酸素の発生など、人工構造物の建設によると推測される影響も徐々に出てきている。震災復興に伴う人為的な影響も継続的に捉えていかなければならないと考える。

謝 辞

養殖生物の採集にご協力頂きました宮城県漁業協同組合女川町支所の皆様に厚く御礼申し上げます。この研究の一部は文部科学省・海洋生態系研究開発拠点機能形成事業「東北マリンサイエンス拠点形成事業（海洋生態系の調査研究）」の一環として行われた。

文 献

- 1) Deniro MJ, Epstein S. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1978; **42**: 495-506.
- 2) Deniro MJ, Epstein S. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1981; **45**: 341-351.
- 3) Minagawa M, Wada E. Stepwise enrichment of $\delta^{15}\text{N}$ along food chains: Further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1984; **48**: 1135-1140.
- 4) Kasai A, Toyohara H, Nakata A, Miura T, Azuma N. Food sources for the bivalve *Corbicula japonica* in the foremost fishing lakes estimated from stable isotope analysis. *Fish. Sci.* 2006; **72**: 105-114.
- 5) 伊藤絹子. 浮遊性および底生性珪藻類の炭素・窒素安定同位体比について. 日本陸水学雑誌 2002; **63**: 166-168.
- 6) 田中寛繁. 小型浮遊魚類の生態研究への応用. 「安定同位体スコープで覗く海洋生物の生態」(富永 修, 高井則之編) 恒星社恒星閣, 東京. 2008; 97-109.
- 7) 伊藤絹子. 付着生物でつながる海洋の生物生産システム～二枚貝養殖漁場を例として～. *Sessile Organisms* 2010; **27**: 77-83.