

富山の陸域から沖合・深海まで～食物網から探る物質循環の姿～
浦沢知紘・大塚朋貴（富山大学大学院 理工学教育部 生物圏環境科学専攻）

1. はじめに

日本三大深海湾の一つである富山湾は、大陸棚の幅が狭く、沖に向かって急激に深くなる海底地形を持つことから、日本海沖合の表層から深層を流れる対馬暖流水及び日本海固有水が沿岸 10km 付近まで流入する水塊構造を有する内湾である。一方、陸域には海岸から水平距離 50km 圏内に 3000m 級の山岳地帯が存在し、降水量も多いことから、山岳地帯に降った降雨由来の陸水が河川水や海底湧水として多量に流れ込んでいる。このため、富山湾の沿岸域には多様な水塊構造が存在しており、様々な水温を好む海洋生物がそれぞれの水塊に生息し、日本海に生息する 800 種の魚類のうち約 500 種が記録されている。以上のことから、多様な水塊構造に多様な海洋生物が生息している富山湾は日本海の縮図とみなすことができる。

近年、日本海は地球温暖化による水温の上昇が他の日本周辺海域に比べて著しいことが報告されており（気象庁）、日本海の縮図である富山湾は地球温暖化の影響をいち早くとらえるためのモニタリング海域として最適である。本研究では、将来的な地球温暖化の影響による生態系への影響を明らかにするために、富山湾の食物網の特徴を解析し、現時点における生態系内での物質循環の解明を目的とした。これまでの研究では、富山湾内で一生を過ごすシラエビの環境指標種としての有効性の検討や、富山湾沿岸域の陸水流入による影響の現状把握を行ってきた。本年度は前年度に引き続き、生物生産が最も盛んであり、水産生物の生育場としても重要な役割を果たす沿岸域において、陸域から流入する河川水などが、沿岸の食物網に与える影響に着目し、前年度に行った沿岸生物試料の解析に加え、海水試料や河川水試料中の解析を行った。さらに、富山湾の沖合の食物網をより詳細に解析するため、富山湾沖合で捕獲された魚類とその餌と考えられる動物プランクトンや、表層堆積物なども対象に研究を行った。本報告書では主に本年度行った調査結果に関して報告する。

本研究では食物網解析の手法として、炭素・窒素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$) 解析を行った。 $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ 解析は生態系内での物質輸送の指標として様々な分野で用いられている。 $\delta^{13}\text{C}$ は食物網を通して低次から高次栄養段階の生物に利用されてもほとんど値が変わらず、一栄養段階あたり約 1‰程度しか変化しないことが報告されている（DeNiro and Epstein, 1987 ; Rau *et al.*, 1983）。一方で、食物網内の餌源となる陸上植物由来の有機物や底生微細藻類、植物プランクトン

の $\delta^{13}\text{C}$ はそれぞれ値の差が大きいため (横山, 2008 ; 伊藤ら, 2009)、対象生物の $\delta^{13}\text{C}$ を測定することで食物網の起点となった餌源を推定することができる。一方、 $\delta^{15}\text{N}$ は餌と捕食者の間で大きく変化することが報告されており、平均値として一栄養段階あたり約 3.4‰ 上昇することが知られている (DeNiro and Epstein, 1981 ; Minagawa and Wada, 1984)。このため、 $\delta^{15}\text{N}$ は生物の栄養段階の推定に用いられている。この $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ を合わせて用いることにより、対象生物の食物網の構造や食物網内での炭素・窒素の利用状況を把握することができる。また、食物網の $\delta^{13}\text{C}$ は餌源として利用した基礎生産者の種類によって異なる値を示すが、食物網の $\delta^{15}\text{N}$ は生物の栄養段階に加え、餌源である基礎生産者が用いた溶存無機態窒素の $\delta^{15}\text{N}$ によって決まる。したがって、本研究では生物試料の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ に加え、溶存無機態窒素の主要形態である NO_3^- の $\delta^{15}\text{N}$ ($\delta^{15}\text{N NO}_3^-$) 及び、 NO_3^- の起源を推定するために NO_3^- の $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O NO}_3^-$) の解析も行った。

2. 試料採集・測定

2-1. 沿岸域の生物

富山湾の沿岸域は東西で沿岸環境が異なっており、東部地域は一級河川や海底湧水が多数存在していることから陸水流入量が多いと考えられる。一方で西部地域は大規模な河川が存在しておらず、加えて反時計回りの沿岸流の影響により (内山, 1993)、付近の河川の影響も受けにくいと考えられる。東西での沿岸生物への陸水流入による影響の差を比較するため、東部地域の 3 地点 (経田漁港、魚津港、岩瀬浜海水浴場) 及び付近の流入河川 (片貝川、早月川、神通川)、さらに西部地域の 2 地点 (宇波漁港、小境海水浴場) 及び西部地域の流入河川 (庄川、小矢部川) で生物試料及び水試料の採取を行った。

生物試料はそれぞれの地点間の差をみるために、移動性が低い貝類や甲殻類、多毛類と、移動性の低い魚類を用いた。また、食物構造の解析を行うため、異なる食性をもつ生物を対象とした。貝類は懸濁物食である二枚貝 (*S. virgatus* ムラサキインコガイ、*M. galloprovincialis* ムラサキイガイ) と石面の付着有機物を歯舌でそぎ取り捕食する腹足類 (*C. grata* ベッコウカサガイ)、さらにこれらの貝類を餌として捕食する肉食性の腹足類 (*T. bronni* レイシガイ) を用いた。甲殻類は蔓脚を用いて懸濁物 (動物プランクトン等) を捕食する *C. mitella* (カメノテ) と海藻や貝類等を捕食する雑食性の *H. sanguineus* (イソガニ) を用いた。魚類は *H. poecilopterus* (キュウセン)、*H. tenuispinnis* (ホンベラ)、*H. tenuispinnis* (キジハタ)、*A. schlegeli* (クロダイ)、*G. punctata* (メジナ)、*T. porphyreus* (マフグ)、ヒガンフグ (*T. pardalis*) 及びネズミゴチ (*R. curvicornis*) を用いた。沿岸生物の餌源となる基礎生産者としては海洋の植物プランクトン、

底生微細藻類、陸上由来懸濁態有機物を対象とし、それぞれ試料として沿岸及び沖合の懸濁態有機物 (Particulate organic matter : POM)、石面付着有機物 (Epilithic Organic matter : EOM)、河川の POM を用いた。

2-2. 富山湾沖合の生物

魚類は水深 200m 以深と 200m 以浅の魚津沖合で漁獲された試料を用いた。動物プランクトンは入善海洋深層水活用施設で毎月試料採取を行った。また、長崎大学附属練習船の研究航海 NN413・NN425 次航海において日本海及び富山湾内でサンプリングを行った (図 1、2)。航海で採取したものは水深 200m 以深と 200m 以浅においてノルパック式プランクトンネットを用い鉛直的に曳きあげた。懸濁態有機物 (POM)、沈降粒子、海底堆積物も長崎大学附属練習船の研究航海 NN413・NN425 次航海において日本海及び富山湾内でサンプリングを行った (図 1、2)。沈降粒子は魚津沖においてセジメントトラップを設置し、採取を行った。海底堆積物はアシュラ採泥器を用い、表層 0~3cm のものを試料として用いた。

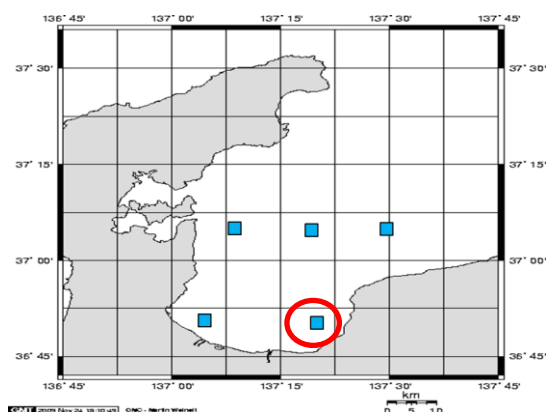


図 1 富山湾試料採取地点 (赤丸：魚津沖)

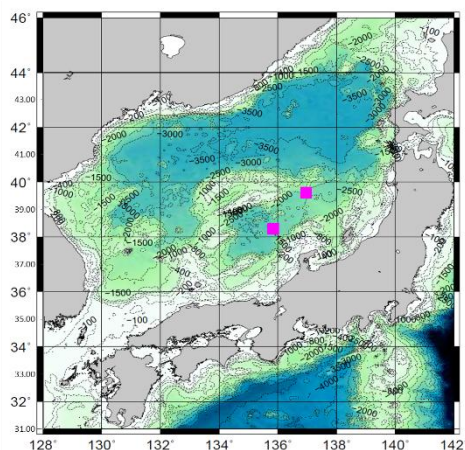


図 2 日本海試料採取地点

2-3. 試料測定

生物試料はそれぞれ筋肉部を採取し、脱塩、脱脂、凍結乾燥、粉碎を行った。POM、EOM 試料は GF/F フィルター上に集めた後、凍結乾燥、炭酸塩の除去を行った。これらの試料は還元銅、酸化銅、白金と共に石英管に詰め、真空ポンプに接続されたガラスラインにおいて真空封管した。その後、マッフル炉を用いて石英管内の試料を燃焼させ (500°C で 30 分、850°C で 10 時間)、試料をガス化した。石英管内でガス化した試料は寒材を用いて CO₂、N₂ ガスに分離した。以上のガラスラインを用いたガスの精製を行った試料は質量分析計 (Prism、Optima) で同位体比を測定し、その他の試料は元素分析計 (Flash EA1112) に接続された質量分析計 (Delta V) で測定を行った (総合地球環境学研究所)。これ

らの同位体比は国際標準試料からの相対千分比率で表した。測定精度はガラスラインを用いた測定で $\delta^{13}\text{C}=\pm 0.02\%$ 、 $\delta^{15}\text{N}=\pm 0.1\%$ 、EA-IRMS の測定で $\delta^{13}\text{C}=\pm 0.1\%$ 、 $\delta^{15}\text{N}=\pm 0.2\%$ であった。

水試料の $\delta^{15}\text{N}$ NO_3^- 、 $\delta^{18}\text{O}$ NO_3^- は脱窒菌法を用いて NO_3^- を N_2O に還元し、測定を行った。 N_2O ガスはヘリウムガスを用いて測定機器に導入し、 CO_2 や H_2O 等を除去し、さらに液体窒素により試料をトラップした後ガスクロマトグラフによるガスの分離を行い、質量分析計 (MAT253 測定精度： $\delta^{15}\text{N}=0.1\%$ 、 $\delta^{18}\text{O}=0.3\%$) で $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ を測定した (東京工業大学 吉田・山田研究室)。

3. 結果・考察

3-1. 沿岸生物の食物網の特徴

富山湾の沿岸生物は、前年度の結果と同様に、 $\delta^{13}\text{C}$ が高く、 $\delta^{15}\text{N}$ が低い特徴がみられ、 $\delta^{15}\text{N}$ は特に東部の生物において低い傾向がみられた。沿岸生物の $\delta^{13}\text{C}$ は本年度新たに測定を行った EOM と POM の中間的な値であったことから、 $\delta^{13}\text{C}$ の低い陸由来懸濁態有機物は餌源として利用されておらず、沿岸生物は底生微細藻類と植物プランクトンの両方を餌源として用いていたことが明らかとなった。EOM 及び POM の同位体比をもとに、沿岸生物がそれぞれの餌源をどの程度の割合で利用していたのかを、底生微細藻類の寄与率として求めると、沿岸生物の餌源への底生微細藻類の寄与率は 35~60%程度であった。このことから、沿岸生物の餌源として底生微細藻類が重要な役割を果たしていることが示された。沿岸域における底生微細藻類の重要性は他の海域でも報告されており (Cahoon and Cooke, 1992 ; Page and Lastra, 2003 ; Takai *et al.*, 2004 等)、富山湾の沿岸域においてもこれらの海域と同様に海底面での生物生産が食物網内で重要な役割を果たしていることが明らかとなった。一方、沿岸生物の $\delta^{15}\text{N}$ は他の海域に比べて低い傾向がみられ、前年度同様、特に東部地域の沿岸生物の $\delta^{15}\text{N}$ が低い傾向がみられたことから、 $\delta^{15}\text{N}$ が低い傾向は陸水流入による影響であると考えられた。本年度測定を行った流入河川河口付近の NO_3^- の $\delta^{15}\text{N}$ は、佐竹ら (2004) により、生活排水などの影響を受けていることが指摘されている小矢部川を除き、他の地域で報告されている河川下流域の $\delta^{15}\text{N}$ (Wankel *et al.*, 2006 ; Johannsen *et al.*, 2008 ; Miyajima *et al.*, 2009 等) に比べ、極めて低い値を示していた。さらに、沿岸域の海水中の NO_3^- の $\delta^{15}\text{N}$ も、人為的な排水等の流入が示唆された魚津港を除き、実際に日本海沖合や富山湾の深層水に比べて低い値を示しており、特に東部の地点でより低い値を示していた。以上の結果から、富山湾沿岸域は河川から $\delta^{15}\text{N}$ の低い NO_3^- が流入しており、この $\delta^{15}\text{N}$ の低い NO_3^- を基礎生産者が利用することで食物網全体の $\delta^{15}\text{N}$ が低くなっており、特に陸水流入量の多い県東部でこの影響が顕著に表れているものと考えられた。

河川を通して富山湾に供給される NO_3^- の起源を推定するため、 NO_3^- の $\delta^{15}\text{N}$ に加え、 $\delta^{18}\text{O}$ の測定結果もみてみると、富山県の河川水中の NO_3^- の $\delta^{18}\text{O}$ は降水由来や硝酸態肥料由来の NO_3^- の $\delta^{18}\text{O}$ に比べて明らかに低い値を示していた。このため、富山湾に流入する NO_3^- はアンモニア態の肥料や有機物が分解された際に生成されたアンモニアがバクテリアによって硝化されることによって生成された NO_3^- であることが示唆された。

3-2. 富山湾沖合の食物網の特徴

表層の食物網

富山湾の表層で捕獲された魚類、動物プランクトンは植物プランクトン（懸濁態有機物）を起点とする食物網に位置した。一方でカワハギ・コノシロは他の表層魚に比べ高い $\delta^{13}\text{C}$ を示しており、底生微細藻類も利用していると考えられた。

深層の食物網

表層魚と深層魚の安定同位体比を比較すると、深層魚は表層魚に比べ高い $\delta^{15}\text{N}$ を持つ種が多くみられた。これは表層ではみられなかった高い $\delta^{15}\text{N}$ を持つヤムシやアミといった肉食性動物プランクトンや、腐肉食性の貝類が深層でみられたことが理由として考えられ、深層は表層に比べ栄養段階が高くなる傾向にあると考えられた。また、富山湾の深層で捕獲された魚類、動物プランクトンは植物プランクトン（懸濁態有機物）を起点とする食物網に位置した。一方、従来深層生物の餌源として考えられてきた沈降粒子や海底堆積物は植物プランクトンに比べ高い $\delta^{13}\text{C}$ を示し、魚類や動物プランクトンの餌源でないことが分かった。これら沈降粒子や海底堆積物は河川 POM と近い $\delta^{13}\text{C}$ を示し、河川由来の炭素を含む有機物が沖合の深層まで多量に運搬されていることも確認された。

日本海沖と入善の動物プランクトン

$\delta^{13}\text{C}$ に着目すると、富山湾の動物プランクトンは日本海沖に比べ高い値を示し、クロロフィル濃度も富山湾は日本海沖に比べて高かった。これは、基礎生産者である植物プランクトンの増殖速度が富山湾の方が速いためと推測された。さらにホタルイカは富山湾の魚類に比べ高い $\delta^{13}\text{C}$ を示しており、日本海の指標生物として考えられるホタルイカも植物プランクトンの生育速度を反映していたと考えられる。

入善海洋深層水活用施設で採取された動物プランクトンの安定同位体比の季節変化に着目すると種類によって異なる変動を示していた。特に端脚類は4月から7月までの間に激しい変動を示していた。また、カイアシ類は小型のものと大型で似た変動を示していた一方、ヤムシや端脚類は異なる変動を示してい

た。このような季節変動の要因として、季節による動物プランクトンの種構成の変化や食性の変化等が考えられる。今後は同位体比に変動を及ぼす要因等も調査を行い、魚類の餌料生物として重要な動物プランクトンの季節変化の詳細を把握していく予定である。

3-3. まとめ

富山湾沿岸域には陸水を通じて $\delta^{15}\text{N}$ の低い NO_3^- が供給され、海水中の $\delta^{15}\text{N}$ NO_3^- が低くなっていた。これに伴い、沿岸域の食物網の $\delta^{15}\text{N}$ も低くなっていたことから、沿岸生物の $\delta^{15}\text{N}$ は陸域からの窒素供給状況を反映しており、陸域から供給される NO_3^- を窒素源として利用していることが示唆された。また、食物網への窒素や炭素の供給源として、植物プランクトンに加え、EOM等の底生微細藻類が重要な役割を果たしており、陸域から供給される懸濁態有機物は炭素源として利用されていないことが示された。

富山湾沖合の水生生物は、表層・深層とも表層 0m 付近の植物プランクトン(懸濁態有機物)を起点とする食物連鎖上に位置し、海面付近で生産された植物プランクトンが基礎生産者であると考えられた。また深層魚は表層魚に比べ高い窒素安定同位体比を示し、栄養段階が高くなる傾向にあることが分かった。動物プランクトンの安定同位体比は富山湾に比べ日本海は低い $\delta^{13}\text{C}$ を示しており、日本海の指標種であるホタルイカにも同様の傾向がみられた。また、入善で採取された動物プランクトンは種によって異なる季節変化を示していた。動物プランクトンは魚類の餌料生物としても重要である為、今後季節変化を引き起こす原因の把握が課題となっている。