

令和2年度 日本海学研究グループ支援事業報告書

富山の沿岸海域から深海域まで～環境指標生物種から探る持続的な資源利用～

吉田 光佑、勝田 裕大（富山大学 理工学教育部 生物圏環境科学専攻）

松本 碧人（富山大学 理学部 生物圏環境科学科）

1. はじめに

日本三大深海湾の一つである富山湾は、沖に向かって急激に深くなる海底地形を持つことから、日本海を流れる対馬暖流水及び日本海固有水が沿岸付近まで流入するという特徴を持つ外洋性内湾である。さらに陸域では沿岸からほど近く 3000 m 級の山岳地帯が存在し、降水量も多いことから、降雨由来の陸水が河川水や海底湧水として多量に富山湾に流れ込んでいる。以上のように、富山湾の沿岸域には対馬暖流水、日本海固有水、河川水、海底湧水といった多様な水塊構造が存在しており、日本海に生息する約 800 種の魚類のうち約 500 種が富山湾にて確認されている。これらのことから、多様な水塊構造に多種の海洋生物が生息している富山湾は日本海の縮図とみなせる。近年、日本海は地球温暖化による水温上昇が他の日本近辺の海域に比べて著しく高いという報告があり（気象庁）、地球温暖化の影響による海洋環境の変化をモニタリングするにあたり富山湾は格好の研究海域であると考えられる。

本研究室で行った過去の研究によって、沿岸域に生息するイガイ類や日本海沖合に生息し、富山湾内にて産卵を行うホタルイカが環境指標種として有効であることが明らかになっている。また、昨年度はイガイ類、ホタルイカに加え、深海底域の環境指標種としてベニズワイガニが利用可能かを炭素・窒素安定同位体比から検討し、富山湾における持続的な資源利用に関する知見収集を行った。炭素・窒素安定同位体比解析は、採餌によって炭素・窒素の取り込みが起きることを利用しており、“食う－食われる”の関係にある生物間において一定の幅を持って変動することが知られている。炭素安定同位体比は栄養段階の上昇に伴い、0~1 ‰程度の僅かな上昇であることから餌源の推定に、窒素安定同位体比は栄養段階の上昇に伴い、 3.4 ± 1.1 ‰上昇することから栄養段階の推定に用いられている（Minagawa and Wada, 1984 ; DeNiro and Epstein, 1978）。一定期間に採餌した餌の情報が分かることから、生態系における基礎生産から高次消費者までの食物網や炭素及び窒素の物質循環の流れを解明する手法として用いられる。

昨年度の研究から、沿岸域では河川を通して富山湾に流入する栄養塩量が多いこと、富山湾表層では温暖化に伴い、ホタルイカに変化が起きていること、深海底域では深海底特有の食物網の存在がそれぞれ明らかとなった。しかしながら、陸域から富山湾へ流入する栄養塩量、ホタルイカの変化要因、深海底の食物網における栄養源は未だ明らかとなっていない。そこで今年度は、持続的な資源利用への活用を目指し、沿岸域において河川によって陸域から富山湾に流入する栄養塩量の把握、富山湾表層において、ホタルイカにおける変化要因の推定、富山湾深海底域において、深海底特有の食物網の栄養源の検討を行った。

2. 試料及び分析について

・沿岸域

河川水試料は2020年2月から11月の期間に黒部川、片貝川、早月川、常願寺川、神通川、庄川、小矢部川の7河川にて採取した。採取試料は0.2 μm メンブレンフィルターを用い、ろ過を行った。

・ホタルイカ

ホタルイカは富山県富山市と兵庫県浜坂町にて水揚げされたホタルイカを用いた。採取期間は富山市の試料は1月中旬から5月中旬まで、浜坂町の試料は2月下旬から5月中旬までである。炭素窒素安定同位体比分析の他、外套長の測定も行った。

・底生生物

ベニズワイガニは久栄丸（新湊漁業協同組合）、栄進丸（魚津漁業協同組合）、漁盛丸（上越漁業協同組合能生支所）が漁獲した個体を用いた。また、同時に捕獲されたヒトデ類、イソギンチャク類、腹足類も試料とした。

・動物プランクトン

入善海洋深層水活用施設（採取水深384m）にて採取を行った。採取期間は2019年2月から2020年12月である。また、長崎大学水産学部所属練習船「長崎丸」NN55次航海（2020.7.18-23）に参加し、東シナ海の数地点において、ガマロ式プランクトンネット（網目100 μm ）を用いて水深0~600 mの動物プランクトンの採取を行った。

・懸濁態有機物（POM）

長崎大学水産学部所属練習船「長崎丸」NN55次航海（2020.7.18-23）に参加し、東シナ海の数地点において採取を行った。測定した炭素・窒素安定同位体比は一般的な植物プランクトンの値と近似していたことから、POMの測定値を植物プランクトンの代表値として扱った。

・試料の測定及び前処理

各種生物試料は凍結乾燥後、クロロホルム：メタノール（2:1）混合溶液を用いて脱脂を行った。また動物プランクトン試料は種類ごとに大別し、凍結乾燥機にて乾燥させた。作成した試料は総合地球環境学研究所の元素分析・同位体比質量分析計を用いて、炭素・窒素安定同位体比の測定を行った（測定精度： $\delta^{13}\text{C}$ ： $\pm 0.03\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ ： $\pm 0.1\text{‰}$ ）。



図1. 五大河川における
採水地点

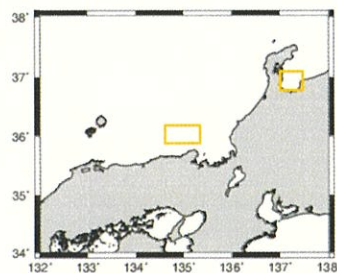


図2. ホタルイカの
採集地点

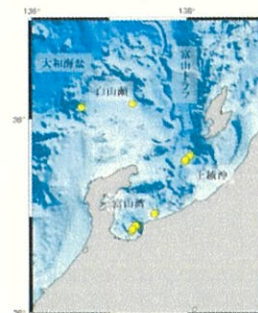


図3. 底生生物の
採集地点

3. 結果と考察

・沿岸域に流入する栄養塩

1980 年以降における 5 地点（朝日・魚津・富山・伏木・砺波）の降雪量データ（気象庁）を使用し、解析を行った結果、富山県の降雪量は約 50%減少していた。また、年により降雪量の増減がみられた。降雪量の増減が顕著な年を抽出するため、年平均降雪量に対する割合を 1992～2020 年の期間で算出したところ、降雪が多かった年、少なかった年は、それぞれ 3 年ずつであった。降雪が多かった年（2018 年）と少なかった年（2020 年）を比較したところ、降雪が少なかった年では、融雪期（3～5 月）における河川流量も減少していた。この結果より、降雪量減少に伴い、富山湾へ流入する河川流量も減少することが示唆された。

また、富山湾への栄養塩供給量の変化に着目した。陸域から富山湾への栄養塩供給量の影響は時期により異なると考えられる。富山湾において冬季では鉛直混合が起こり深層からの栄養塩供給が活発になるため、陸起源の栄養塩の寄与は小さくなると考えられる。一方融雪期から初夏にかけては、表層の水温が上昇し鉛直混合が弱化するため、陸起源の栄養塩供給はより重要な役割を果たしていると考えられる。そのため、4～6 月の期間の栄養塩供給量に着目して比較を行った。栄養塩供給量は河川流量 (m^3/s) $\times$ 栄養塩濃度 (μM , mg/L) にて算出した。その結果、降雪が少なかった年は、多かった年と比較して、窒素フラックスの積算値はやや減少し、リンフラックスの積算値は大幅に減少していた。さらに、沿岸生物の基礎生産に重要なレッドフィールド比、特に N/P 比に着目すると、降雪が多かった年の N/P 比は 16 よりも高い値を示した。このことから、降雪が多かった年の富山湾はリン制限であったと考えられる。加えて、降雪が少なかった年では、多かった年に比べ、さらに N/P 比が高かった。以上より、気候変動による降雪量減少は、融雪期における富山湾のリン制限をさらに強化し、沿岸における基礎生産力の低下をもたらすことが懸念された。

・ホタルイカの変化要因の推定

2011、2013、2019、2020 年における外套長測定の結果、大型個体（外套長 60 mm 以上の個体）の割合の変動は富山県、兵庫県産共に海水温変化の挙動と一致した。一般的なイカ類では卵から孵化する際の海水温が高ければ、孵化した個体サイズは小さくなり（Vidal *et al.*, 2002）、またイカ類の成長は指数関数的であるため、孵化した個体の大きさが小さければ成体の大きさも小さくなる（Pecl and Jackson, 2008）ことが知られている。しかしながら、大型個体の割合は海水温が高いときに高くなっていることから、海水温は、直接的な要因ではないと考えられた。そこで、海水温上昇を引き起こす要因として気温上昇と対馬暖流の流動強化が報告されている（環境研究総合推進費 終了研究成果報告書（s-13-3）, 2019）ことから対馬暖流に着目した。対馬海峡起源の栄養塩の寄与率は、日本海南部の水深 0～50m の積算クロロフィル a 量に対して通年 80 %以上（環境研究総合推進費 終了研究成果報告書（s-13-3）, 2019）であり、対馬海

峡からの無機窒素フラックスの増加は日本海南部海域の Chl-a 量を増加させる

(Shibano *et al.*, 2019) ことから、対馬暖流由来の栄養塩供給の増加がホタルイカの餌資源量の増加を促し、その結果として大型のホタルイカ個体が増加した可能性が示された。富山県と兵庫県で採取されたホタルイカの炭素・窒素安定同位体比に、有意差検定を行ったが、有意差は認められなかった。また、CN マップに「食うー食われる」の関係を示す直線を引いたところ、植物プランクトン、動物プランクトン、ホタルイカが直線上に乗ったことからホタルイカは植物プランクトンを起点とした食物網にあることが明らかになった。ホタルイカの窒素安定同位体比の経年変化に着目すると、2011、2013、2019、2020 年では年変動が殆ど認められなかったことから、ホタルイカの餌の種類、摂餌割合はほとんど変化していないと考えられた。

一方、炭素安定同位体比の経年変化について着目すると、2011~2019 年までは上昇傾向がみられたが、2020 年では下降した。一般的に、海洋の炭素安定同位体比が高くなる要因としては植物プランクトンの急激な増殖が報告 (Takahashi *et al.*, 1991) されており、ホタルイカはこの影響を受けると考えられる。また、海水温が高くなると植物プランクトンが増殖する (R. W. Eppley, 1972) ことから、2011~2020 年の 3~6 月の富山湾と山陰・若狭沖の海水温に着目した。その結果、海水温と同位体比の間に関係性は認められなかった。そこで、外套長と同様に対馬暖流由来の栄養塩供給量に着目すると、2011 年から 2013 年にかけての栄養塩供給量の変動と同位体比の変動が一致したことから、対馬暖流由来の栄養塩供給量の変動がホタルイカの同位体比変動の要因であると考えられた。

・深海底域の栄養源の検討

白山瀬、上越沖で採取されたベニズワイガニの $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ に有意な差はみられなかったのに対して、富山湾内で採取された個体は 2 地域と比較して高い $\delta^{13}\text{C}$ ($p < 0.01$)、低い $\delta^{15}\text{N}$ ($p < 0.01$) で特徴づけられた。また水深に伴って、ベニズワイガニの $\delta^{15}\text{N}$ は上昇しており、海洋表層からの沈降物質を利用している可能性があると考えられた。これは沈降過程において、バクテリアが炭素と比して窒素を優先的に消費する (Lee *et al.*, 2004) ことに伴い、軽い ^{14}N が優先的に消費されたためであると考えられる。

また、調査地とした地域で採取した底生生物の $\delta^{13}\text{C}$ は、上越沖における $\delta^{13}\text{C}$ メタン (Hiruta *et al.*, 2015) とは大きく異なる値を示していたことから、メタンを利用していないと考えられた。しかしながら、Seabrook *et al.* (2019) は、ミゾズワイガニの安定同位体分析、脂肪酸分析、胃内容物の分析から、メタンの利用を指摘しており、更なる調査の必要があると考えられる。

さらに、富山湾および上越沖の底生生物の一部個体 (ヒトデ類 ; 富山湾、腹足類 ; 上越沖) では、より高い $\delta^{13}\text{C}$ を示しており、沈降物質以外の栄養源の利用が示唆された。一方で、魚類やカイメン類などでは植物プランクトンに由来する栄養源の利用が示唆され、富山湾周辺海域の深海底生態系では栄養形態が複雑であることが考えられた。

4. まとめ

富山県の降雪量は減少傾向にあることが明らかとなった。富山湾沿岸域に流入する4～6月の栄養塩量は降雪量が少ない年では多い年と比較して減少していた。また、富山湾はリン制限の海域であるが降雪量減少に伴い、リン制限がさらに強化されることが示唆された。これにより、基礎生産が低下することが予想され、湾内の水産資源が減少する可能性が考えられた。

ホタルイカの外套長測定及び炭素安定同位体比測定結果よりホタルイカの異変は日本海における海水温の変化によるものではなく、それを引き起こす対馬暖流が要因であることが明らかとなった。その中でも対馬暖流由来の栄養塩供給量の変動が最も強い要因であることが示唆された。

また、深海底域の調査より、ベニズワイガニをはじめとした底生生物の多くは、沈降物質を主な栄養源としていることが明らかとなった。一方で、ヒトデ類やバイガイといった生物では、未知の異なる栄養源の利用も認められた。

本研究では、富山湾の多様な水塊の内、陸水、対馬暖流水、底層水のそれぞれの環境における食物網やエネルギー源等を明らかにすることが出来た。今後も継続した調査を行うことで、富山湾の継続的な資源利用へ貢献することが可能であると考えられる。