

第68回(2024年度) 北海道開発技術研究発表会論文

人工魚礁の効果検証を目的としたホッケの食性解析

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 水産土木チーム ○安 孝珍
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 水産土木チーム 森 健二

沖合域は漁業生産を支える重要な漁場であるが、調査に様々な制限があるため沿岸域に比べ知見が乏しい。本研究では、利尻島沖合の人工魚礁漁場において主要魚種であるホッケの漁獲調査を行い、漁獲物の食性解析により人工魚礁の魚体増肉効果を検証した。人工魚礁が設置されている場所と離れた場所で捕獲されたホッケの胃内容物を比較した結果、有意な差は見られなかった。

キーワード：ホッケ、人工魚礁、食性解析、増肉効果

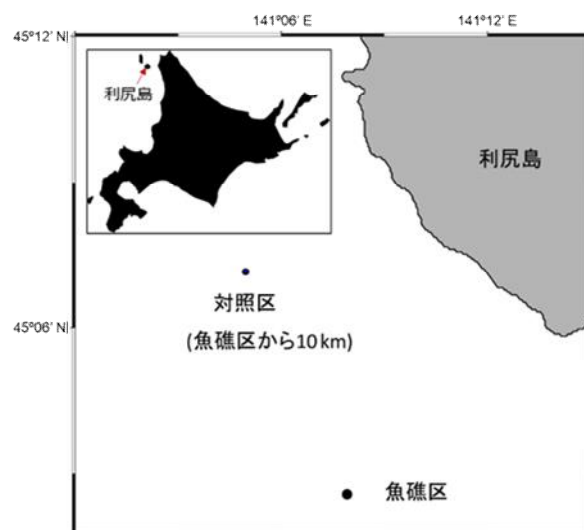
1. まえがき

北海道の海域は日本の漁業生産量の 1/4 を占める重要な漁場である 1)。北海道開発局は北海道水産業の成長産業化を目指し、水産物の安定共有のための基盤・体制の確保、環境・生態系保全とグリーン社会構築、安全安心な漁業地域づくり、漁村地域の総合的な振興のために「北海道マリンビジョン」を実施している 2)。令和 5 年 6 月から新たに策定された「北海道マリンビジョン」では、北海道の海域を 5 つに分類、それぞれの海域で浅海漁業、沿岸漁業、沖合漁業、養殖漁業が円滑に行われるよう地域の水産業に寄与している。

本研究は沖合の漁場形成に貢献されていると思われる人工魚礁の効果検証を目的とした。過去の報告により、利尻島沖合に設置されている人工魚礁の周辺から、人工魚礁がないところより多くのホッケが検出され、人工魚礁の魚類増集効果の可能性が示唆されたが 3)、ホッケが人工魚礁に集まる原因を餌料環境が良いからと仮定し、人工魚礁の魚体増肉効果を検証した。具体的には、人工魚礁が設置されているところと、設置されていないところでホッケを採集し、肥満度を計測すると同時にホッケの胃内容物を調べることで人工魚礁周辺と離れたところの餌料環境を比較した。

2. 調査方法

2023年6月8日、利尻沖に設置された人工魚礁周辺（魚礁区）と人工魚礁から北西に10 km離れた場所（対照区、図－1）で行われた刺網漁より捕獲されたホッケ（全6反分のうち3反分）を買い取り、魚体計測（魚体長、湿重量、肝臓重量、生殖腺重量、胃部重量、胃内容物重量）と同時に性別判定、年齢判定、食性解析を行った。ホッケ刺網漁に関する情報は表－1に示す。



図－1 調査海域

表－1 定置刺網の設置概要
(利尻漁業協同組合沓形支所提供)

	魚礁区	対照区
緯度（北緯）	45°02'27.66"	45°07'07.92"
経度（東経）	141°08'14.94"	141°04'56.64"
投入時間	2:48	2:00
水揚げ時間	5:30	7:10
全長(反)	6	6
高さ(m)	3.29	3.29
目合い(mm)	71	71
水深(m)	90	90.9
全漁獲量(kg)	200	350
漁獲努力量	6反x2.7時間	6反x5.17時間
CPUE(kg/反/時)	12.3	11.3

3.調査結果

漁協から購入したホッケ255尾（魚礁区101尾、対照区154尾）の魚体長、湿重量を計測し、肥満度指数（Body Mass Index: BMI）の算出に用いた。また魚体を捌いて生殖腺重量、肝臓重量を計り、性別判定および生殖腺重量指数（Gonad Somatic Index; GSI）、肝臓重量指数（Hepato Somatic Index: HSI）の算出に用いた。さらに胃部重量を計測、胃内容物を確認した後、胃袋のみの重量を計って差引くことで胃内容物重量を算出、空胃率および胃充満度指数（Stomach Content Index: SCI）を求めた。計測および計算結果を表－2に示す。各計算式は以下になる。

肥満度指数(BMI)=体重(g)/全長(mm)×100

生殖腺重量指数(GSI)=生殖腺重量(g)/体重(g)×100

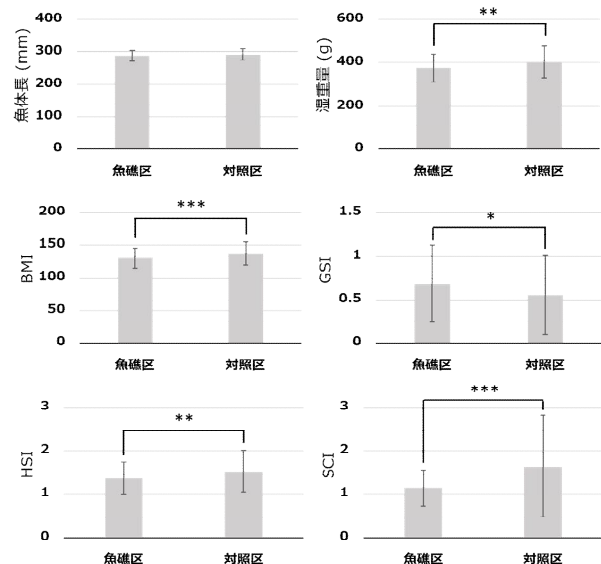
肝臓重量指数(HSI)=肝臓重量(g)/体重(g)×100

胃充満度指数(SCI)=胃内容物重量(g)/体重(g)×100

魚体計測値を統計解析した結果、魚体長は魚礁区と対照区で有意な差がないものの、体重、BMIは対照区で有意に高く、対照区のホッケが魚礁区より肥満度が高いことが示された（図－2）。またHSI、SCIが対照区で有意に高く、空胃率は対照区の方が低いことから（表－2）対照区の栄養環境がより良いと推測される。一方、性比は両区ともほぼ同じであり（表－2）、GSIは魚礁区で有意に高かった（図－2）。ホッケの産卵時期は10月から12月であり4、5、捕獲が行われた6月はまだ生殖腺の成熟前なので6）生殖腺重量が有意に高いのは栄養状態と無関係と考えられる。実際、魚を捌いた際に生殖腺が未発達な個体が複数あり、計測した体重と生殖腺重量の相関が弱く（魚礁区： $r = 0.503$ 、対照区： $r = 0.535$ ）、GSIとHSIの間に相関は見られなかった（魚礁区： $r = -0.047$ 、対照区： $r = -0.245$ ）。

表－2 捕獲されたホッケの魚体計測値（平均値）、空胃率および性比査定結果

	魚礁区	対照区
魚体長(mm)	287.5	290.6
湿重量(g)	379.0	400.7
生殖腺重量(g)	2.7	2.3
肝臓重量(g)	5.2	6.2
胃内容物重量(g)	4.5	6.6
肥満度指数	130.8	137.1
生殖腺重量指数	0.7	0.6
肝臓重量指数	1.4	1.5
胃充満度指数	1.2	1.6
空胃率(%)	21.8	11.5
性比（雄：雌）	43:57	54:46



図－2 魚体長、湿重量、BMI、GSI、HSI、SCIの区間比較結果（平均±標準偏差）

（Welch's-t検定、*： $p < 0.05$ 、**： $p < 0.01$ 、***： $p < 0.001$ ）

性別でBMIを調べた結果、雌が雄より有意に高かった。一方、雄は魚礁区より対照区でBMIが高いものの、雌は区間の差は見られず、雄が対照区の高いBMIに寄与していることが示唆された（図－3）。

各区100個体分のホッケの頭部から耳石を摘出し、年齢判定を実施した。捕獲されたホッケの年齢は0歳から5歳までであり、2歳魚と3歳魚が多かった（両区ともにおよそ75%）。同じ年齢でも体長と体重のばらつきが大きく、年齢と体長、体重、生殖腺重量の間に正の相関はあるものの弱かった（図－4）。また前述通り、6月はまだ成熟前の時期であるため、未成魚の0歳魚と1歳魚を除いても体重とGSIの相関は弱く（魚礁区： $r = 0.225$ 、対照区： $r = 0.424$ ）、HSIとGSIの間に相関は見られなかった（魚礁区： $r = 0.003$ 、対照区： $r = -0.222$ ）。今後、季節ごとの調査を行うことで、ホッケの生態に関するより正確な情報が得られると考えられる。年齢別にBMIを算出、統計解析した結果、2歳魚と3歳魚のみ対照区で有意に高く、他の年齢では区間の差は見られなかった（図－5）。

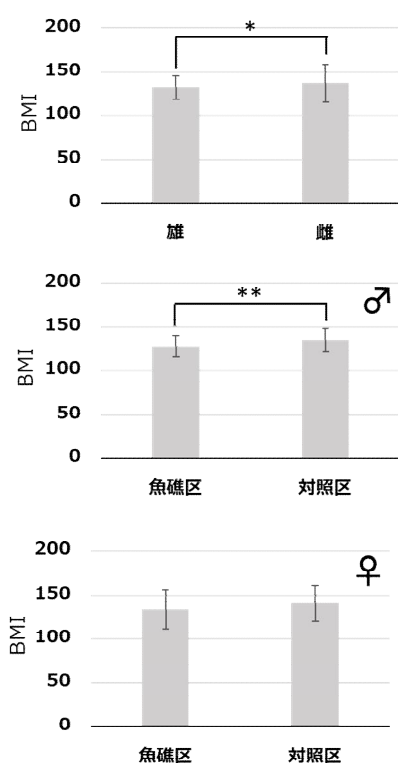


図-3 BMIの性別・区間比較結果（平均±標準偏差）
（Welch's-t検定、*： $p < 0.05$ 、**： $p < 0.01$ ）

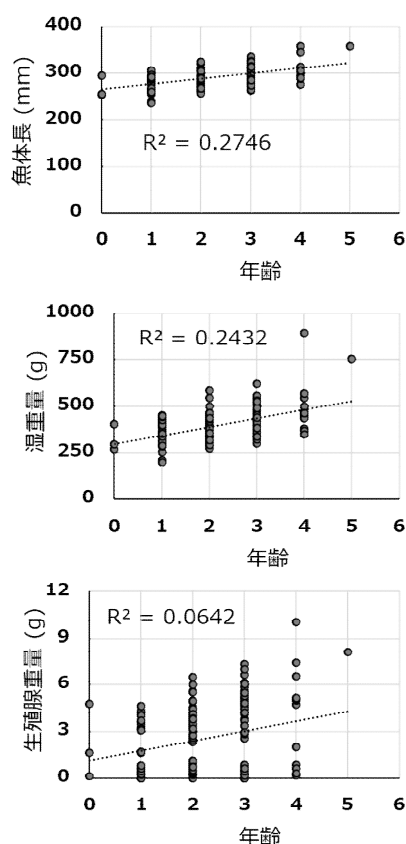


図-4 魚の年齢と体長、湿重量、生殖腺重量の相関

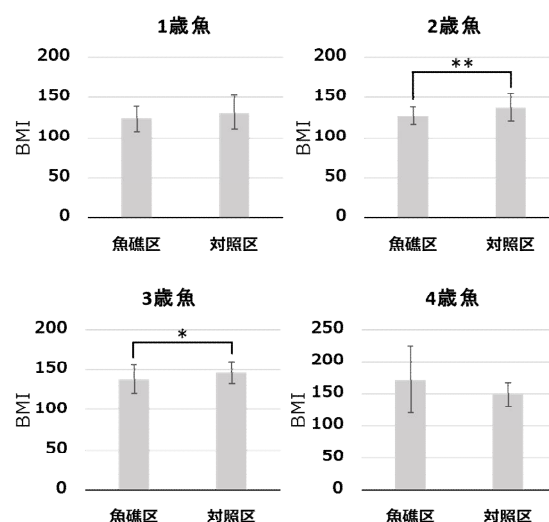


図-5 BMIの年齢別・区間比較結果（平均±標準偏差）
（Welch's-t検定、*： $p < 0.05$ 、**： $p < 0.01$ 、
0歳魚と5歳魚は $n \leq 2$ で統計処理不可）

応答変数をBMI、説明変数を区、性別、年齢、SCIと設定し、一般化線形モデル解析をした結果、ホッケのBMIに影響を与えるのは区 ($p < 0.01$)、性別 ($p < 0.05$)、年齢 ($p < 0.001$)であり、SCIの影響は有意ではなかった（表-3）。つまり、SCIの結果から対照区の栄養環境が魚礁区より良いと推測されるが、それが魚体の増肉に直接影響していないことを示す。また、性別と年齢がBMIに影響するのは環境よりもホッケの個体の生物的特徴であり、魚は成長期で年齢を重ねることで大きくなる。また雌が雄より成長が良いことはマコガレイ、マダイ、マルアジ他の魚種でも報告されている7-9)。

表-3 一般化線形モデルの結果

	Estimate	SE	T value	P
(Intercept)	121.671	4.288	28.378	<2E-16
区	-8.313	2.588	-3.212	0.00155
性別	-5.734	2.486	-2.306	0.02217
年齢	8.971	1.446	6.204	3.43E-09
SCI	1.063	1.331	0.799	0.42548

区がホッケの増肉に与える影響については、物理環境と生物環境が複雑に関わるが、2023年には環境調査を行ってないため、原因を突き止めるのは難しい。2021年の夏季（7月－8月）に同じ海域で実施した環境調査の結果、水温、塩分、栄養塩など水質は両区ではほぼ同じであった。一方、流向は魚礁区の底層では北西と北東で高頻度の流れが見られたのに対して、対照区の底層では北西と南東向きの流れが観察された。また、流速は対照区（底層）の方で有意に早かったものの ($p < 0.001$, Wilcoxon 検定)、両区とも流速は15 cm/s 未満と非常に緩やかだった（図-6）。区間で最も顕著な差が見られるのは底質粒度組

成であり、魚礁区を含む人工魚礁周辺は中礫分が多いが、対照区では細砂分が多い底質であった（図-7）。この組成は人工魚礁が設置された2015年より前から変わらなかった（図-10）、人工魚礁により造成された環境ではない。底質の差による有機物や底生微細藻類、底生生物など生物環境の違いが区間でみられるかもしれないが、2021年に採集された単一のサンプルだけでは考察まで至らないため、今後続けて調査を行う必要がある。

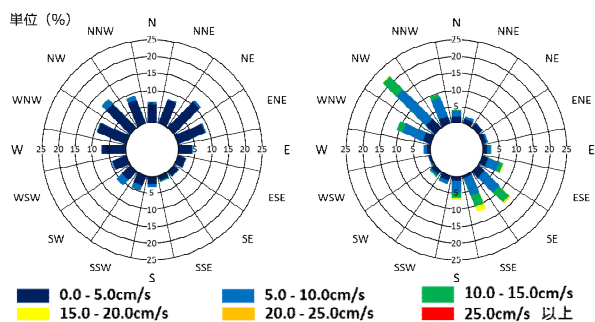


図-6 底層の流向流速（左：魚礁区、右：対照区）

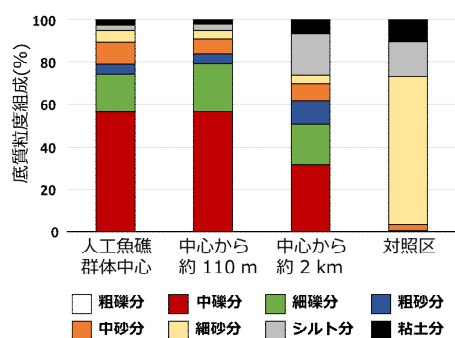


図-7 調査海域の粒度組成

本研究ではホッケの胃内容物を調べることで食性を調べると同時に各区の生物環境を推測した。胃内容物の査定方法として胃部摘出時のマクロ観察のほか検鏡、DNA網羅的解析、安定同位体比分析を実施した。マクロ観察の結果、対照区の複数個体（計154個体のうち30個体）からカタクチイワシと思われる魚類の残骸が見つかり、他にもアミ類やカイアシ類など動物プランクトン、ナマコ綱など底生生物が検鏡で観察された。全体的に魚礁区は対照区より消化が進んでおり6割の個体の胃内容物が識別不可能な消化物であった。その中でも中身が十分残っている胃内容物については、DNA解析（魚礁区21、対照区29サンプル）と安定同位体比分析（魚礁区11、対照区31サンプル）に用いた。

DNA解析には、塩基配列からの種査定やコンタミネーション処理は省略し、外周先から送られてきたパイプラインの解析結果をそのまま使った。計50サンプルから131種が検出されたが、10サンプル以上で検出されたのは25種のみであり、そのうち10種は動物プランクトンで

あった。マクロ観察および検鏡で魚礁区の1個体でしか見つからなかったカタクチイワシは、両区で多くDNAが検出された（魚礁区61.9%、対照区89.6%）。カタクチイワシは過去調査海域で実施した環境DNA調査でも報告された11, 12)。また胃内容物のDNAで検出された複数の魚種のうち、ニシン、マイワシ、ヒレグロ、アカガヤ、ツマグロカジカ、サラサガジ、カレイ科の魚種、マダラ属の魚種、メバル属の魚種、ヨコスジカジカ属の魚種、メダマギンボ属の魚種、トラフグ属の魚種が環境DNA調査でも検出され、そのうちアカガヤとメバル属の魚種はホッケの胃内容物のマクロ観察でも報告された（未発表データ）。魚類と動物プランクトンの他にも軟体動物、環形動物、棘皮動物、刺胞動物、藻類と菌類のDNAが検出された。得られたDNA結果を基に胃内容物から検出された種数を比較した結果、魚礁区が有意に多かった（ $p < 0.05$, Wilcoxon 検定）。またShannon-Wiener多様度指数も魚礁区が高かった（図-8）。一方、主座標分析の結果、魚礁区と対照区の種組成は大きくオーバーラップしており（図-8）、類似度解析の結果でも区で分かれることはなかった（図-9）。多様度と類似度の統計解析の際は、次世代シーケンサーからのリード数を生物量に換算できないため、種の在・不在に基づいて計算するzaccard指数を採用した。

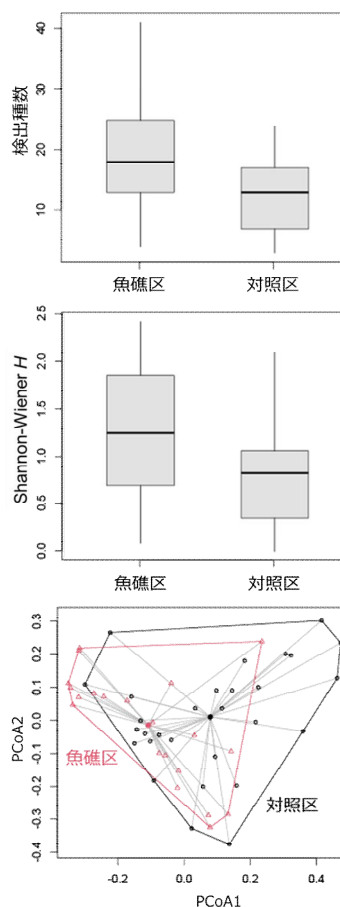


図-8 胃内容物のDNAから検出された生物の種数、多様度指数、主座標分析結果

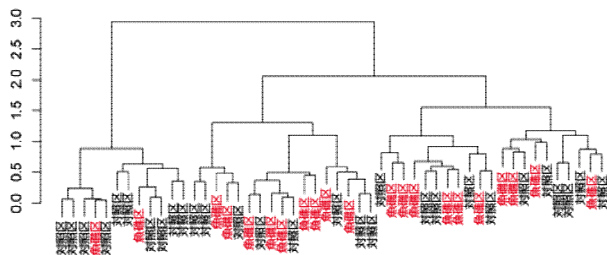


図-9 胃内容物のDNAから検出された種の類似度解析結果

安定同位体比分析には栄養段階での差を見るため胃内容物とともに、ホッケの筋肉（背中から摘出）を用いた。分析のため胃内容物を凍結乾燥する前に、顕微鏡観察を実施、その結果を図-10に示す。胃内容物から海藻片が検鏡とDNA解析からも検出されたが、ホッケが栄養源として利用しているとは考えにくく13)、摂餌や飲水の際に飲み込んだと思われるため、海藻片は他の胃内容物と分離して分析した。海藻片の値を外し、両区の炭素・窒素安定同位体比のマップを作成した結果、栄養段階による $\delta^{15}\text{N}/\delta^{13}\text{C}$ は魚礁区で1.01、対照区で1.04とほぼ同じであった（図-11）。この値は報告されている海洋生態での食物網モデルの $\delta^{15}\text{N}/\delta^{13}\text{C} = 1.53 (\pm 0.25)$ より若干低かった14)。これは先行研究のモデル作成に藻類、植物プランクトン、動物プランクトン、環形動物および魚類などの多様な生物含む長期間のデータベースが使われたためと考えられる。調査海域においても、2021年に実施した底生微細藻類と有機物（直接採集）を含めた安定同位体比分析結果では、ホッケ筋肉と胃内容物のみでは $\delta^{15}\text{N}/\delta^{13}\text{C}$ が1.36であったが、底生微細藻類と有機物を合わせると5.25と大幅に上昇した（未発表データ）。胃内容物は多様な生物が混在しているため、安定同位体比を用いた食物網の解析には各栄養段階の試料を確保し、精度を上げる必要がある。また、餌-魚体間のターンオーバー速度により、採取時の胃内容物の安定同位体比がホッケ筋肉の安定同位体比に反映されてない可能性も十分考えられるため、月毎あるいは季節ごとなど定期的にサンプリングを行うことが望ましい。

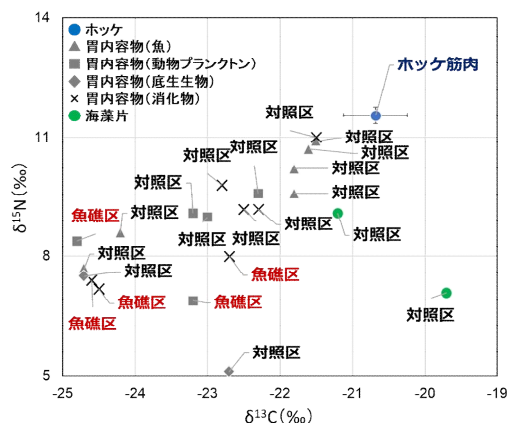


図-10 安定同位体比分析結果

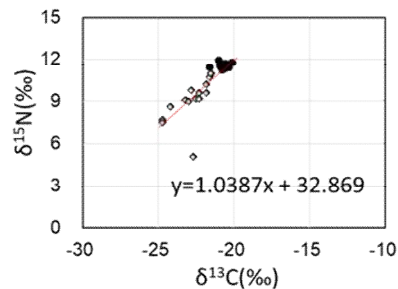
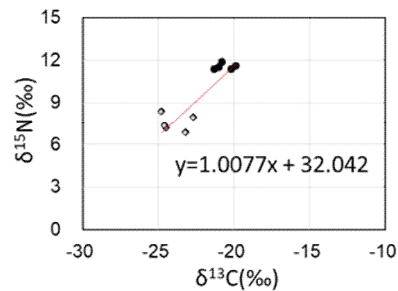


図-11 安定同位体比分析結果（上：魚礁区、下：対照区）

（●：ホッケ筋肉、◇：胃内容物）

加えて、胃内容物の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ は対照区で有意に高く、C/N mol比は魚礁区で有意に高かった（図-12）。両区のDNAでの種組成が大きく変わらず（図-9）、栄養段階の勾配もほぼ同じものの（図-11）、安定同位体比やC/N mol比に有意差があることから、両区の餌生物の種割合や栄養源の利用状況の違いなどにより餌生物自体の体組成が異なる可能性が示唆された。これも各種の餌生物とともに、餌生物の栄養源となる栄養段階の低い生物や有機物を詳細に調べることで明らかになると考えられる。一方、ホッケの筋肉からは区間の差が見られなかった（図-12）。胃内容物の生物がまだホッケに反映されていないこともあり得るが、過去に捕れたホッケの筋肉（2019年から2021年、 $n=13$ ）とも安定同位体比に有意差がなかったことから、調査海域のホッケは区にかかわらず同じ安定同位体比を持つ可能性もある。胃内容物のDNA解析結果においても同様な生物相であったため、長期的にみると遊泳魚であるホッケが広い範囲で摂餌行動をしたとも推測される。今後、バイオテレメトリー実験によりホッケの行動を観察することで正確な情報が得られると期待される。

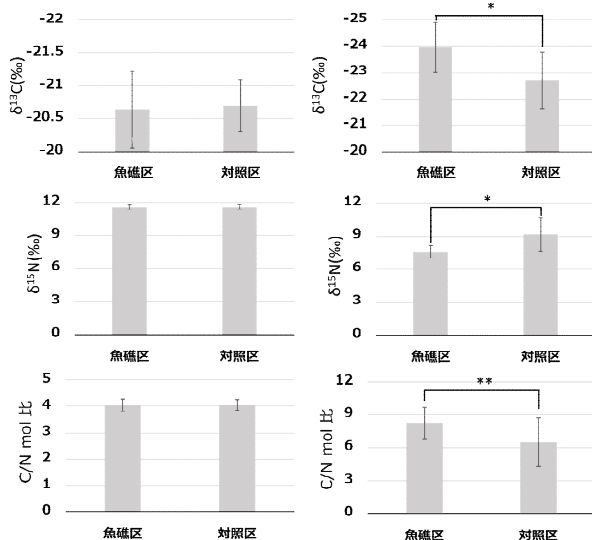


図-12 C/N mol 比の区間比較結果
(平均±標準偏差、左：ホッケ筋肉、右：胃内容物)
(Wilcoxon検定、*：p<0.05、**：p<0.01)

4.まとめ

以上の結果から、2023年6月に捕獲されたホッケは対照区で肥満度が高く栄養環境が良いと考えられるものの、胃内容物のDNAから推測される生物相は似ており、多様性は魚礁区の方で高かった。また安定同位体比の結果から、ホッケの餌となる生物は異なる栄養源を利用していると思われ、有機物や移動が制限されるプランクトン、底生生物は魚礁区と対照区、それぞれで異なる生態系を造っている可能性が示唆された。今後、最高位捕食者であるホッケにたどり着くまでの各栄養段階の生物を季節ごとに採集、解析すると同時に環境調査を並行して行うことで、食物網をベースとする人工魚礁周辺の生態系モデルが作成できると考えられる。

参考文献

- 1) 農林水産省：海面漁業生産総計調査
https://www.maff.go.jp/j/tokai/kouhyou/kaimen_gyosei/
- 2) 国土交通省北海道開発局：北海道マリンビジョン
<https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/ns/suisan/ud49g7000000ny1b.html>
- 3) 石澤健志、安孝珍、森健二 (2023): ホッケを対象とした沖合人工魚礁における魚類分布の把握、北海道開発技術研究発表論文 第67回
- 4) 入江隆彦 (1983): 日高沿岸のホッケ *Pleurogrammus azonus* の産

卵場について、水産庁北海道区水産研究所研究報告、Vol. 48、pp. 1-9

- 5) Mitsuhiro Nakaya, Savitri Marannu, Yuta Inagaki, Keitaro Kajiwara, Yoshitaka Sato, Kota Suzuki, Tetsuya Takatsu (2017): Relationship between temperature and embryonic period of Arabesque greenling *Pleurogrammus azonus*, *Aquaculture Science*, 65(3), pp. 247-250
- 6) Sung Il Lee, Jae Hyeong Yang, Sang Chul Yoon, Young Yull Chun, Jong Bin Kim, Hyung Kee Chal, Dae Soo Chang, Jae Won Kim (2009): Maturity and spawning of the Atka mackerel *Pleurogrammus azonus* (Jordan and Metz) in the East Sea, *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 42(6), pp. 633-641
- 7) 反田實、中村行延、岡本繁好 (2007): 大阪湾・播磨灘におけるマコガレイの生殖腺態指数、肥満度および比肝重値の季節変化、*水産増殖*、Vol. 55、pp. 91-96
- 8) 長野昌子、片山知史 (2015): 日向灘におけるマダイ *Pagrus major* の生活史特徴と肥満度の経年変化、*Nippon Suisan Gakkaishi*, Vol. 81(2)、pp. 219-226
- 9) 武田保幸、原田慈雄、武田崇史 (2019): 紀伊水道周辺海域におけるマルアジ肥満度の季節変化、*和歌山県農林水研報*、Vol. 7、pp. 175-182
- 10) 内田康人、菅和哉、嵯峨山積、村山泰司、濱田誠一、川森博史、大澤賢人、仁科健二 (2003): 北海道沿岸域の地質・底質環境3、北海道立地質研究所調査報告書、第31号、北海道立地質研究所
- 11) 石澤健志、須藤賢哉、森健二 (2023): 高解像度計量魚群探知機搭載ブイによる沖合人工魚礁における魚群定量化の試み、*寒地土木研究所月報*、№ 839、pp. 40-46
- 12) 須藤賢哉、稲葉信晴、森健二 (2022): 環境DNAを用いた沖合漁場における魚類相の把握、*北海道開発技術研究発表論文*、第66回
- 13) 上田吉幸、前田圭司、嶋田宏、鷹見達也 (2003): 漁業生物図鑑—新北のさかなたち—、北海道新聞社
- 14) Maki Noguchi Aita, Kazuaki Tadokoro, Nanako O. Ogawa, Fujio Hyodo, Reichiro Ishii, S. Lan Smith, Toshiro Saino, Michio J. Kishi, Sei-Ichi Saitoh, Eitaro Wada (2011) Linear relationship between carbon and nitrogen isotope ratios along simple food chains in marine environments, *Journal of Plankton Research*, 33(11), pp. 1629-1642