

## 北海道オホーツク海沿岸域における 地まきホタテガイの貝柱湿重量に与える海洋環境の影響

品田晃良<sup>1†</sup>, 三好晃治<sup>2</sup>

### Effects of marine environment on adductor muscle weight of bottom cultured Japanese scallop *Mizuhopecten yessoensis* in the coastal area of northeastern part of Hokkaido, Japan

Akiyoshi SHINADA<sup>1†</sup> and Koji MIYOSHI<sup>2</sup>

北海道オホーツク海沿岸域で漁獲される地まきホタテガイ *Mizuhopecten yessoensis* について、産地価格を決定する一つの要因である貝柱湿重量に着目して、海洋環境が及ぼす影響を評価した。解析には1992–2012年のデータを用い、応答変数は漁獲盛期である8–10月における4年貝の平均貝柱湿重量、説明変数は4–7月における各月の底層水温、底層クロロフィル *a* 濃度（餌濃度の指標）および稚内と網走の水位差（流れの強さの指標）とした。スピアマンの順位相関係数を求めた結果、平均貝柱湿重量は4月の水温とクロロフィル *a* 濃度および水位差のそれぞれと有意な正の相関を示した。さらに、これらの説明変数を使って一般化線形モデルを構築して、AICによる変数選択を行った結果、すべての説明変数を用いたモデルが選択された。以上の結果は、4月の海洋環境が地まきホタテガイの貝柱湿重量に強い影響を与えていることを示唆している。

To clarify the effects of the marine environment on the adductor muscle wet weight of bottom-cultured Japanese scallop *Mizuhopecten yessoensis* in the coastal area of the northeastern part of Hokkaido, Japan, monthly surveys were conducted from March 1992 to December 2012. Spearman's rank correlation coefficients were calculated between mean adductor muscle wet weights from August to October in four-year-olds and monthly marine environments such as water temperature, Chlorophyll *a* concentration as an indicator of food, and the sea level difference between Wakkanai and Abashiri as an indicator of Soya warm current from April to July. Significant positive correlations were found between mean adductor muscle wet weights and all marine environments in April. We used a generalized linear model (GLM) to statistically analyze these field survey data. The model used water temperature, Chlorophyll *a* concentration, and sea level difference in April as explanatory variables was selected by AIC. These results suggest that marine environments in April are important for changes in adductor muscle wet weight of bottom-cultured Japanese scallop in the coastal area of the northeastern part of Hokkaido.

**Key words:** scallop, adductor muscle, water temperature, chlorophyll, soya warm current

#### はじめに

北海道オホーツク海沿岸域はほぼ全域が砂浜地帯となっており、地まきホタテガイ *Mizuhopecten yessoensis* 漁業が盛んである。本漁業は種苗生産技術の向上、輪採制の利用による害敵生物駆除の徹底および種苗放流技術の発展により

1991年以降10–18万トン（平均15万トン）の漁獲量を維持しているが、産地価格（kg当たり）は79–207円（平均135円）の範囲を大きく変動しており経営的に不安定要素が存在する（品田・三好, 2015）。ホタテガイの産地価格は、需給関係のような外的要因のほか、貝柱歩留まり（貝

2016年2月12日受付, 2016年10月11日受理

<sup>1</sup> 北海道立総合研究機構中央水産試験場, 〒046–8555 北海道余市郡余市町浜中町238

Central Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, Hamanaka-cho, Yoichi, Hokkaido 046–8555, Japan

<sup>2</sup> 北海道立総合研究機構網走水産試験場, 〒099–3119 北海道網走市鱒浦1–1–1

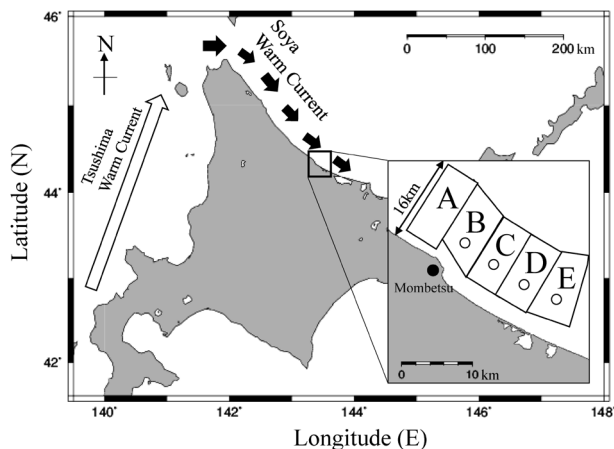
Abashiri Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, Masuura, Abashiri, Hokkaido 099–3119, Japan

† shinada-akiyoshi@hro.or.jp

柱湿重量を全湿重量で除した値)や貝柱のサイズ等で表現される貝柱湿重量の多寡で決定される。放流されたホタテガイは漁獲までの約3年間を無給餌で過ごすため、その成長は水温、餌濃度(西浜, 1994)および流れの強さ(宮園ほか, 1995; 宮園, 2000; 櫻井ほか, 2004)等の海洋環境に強く依存すると考えられている。しかしながら、これらの要因が貝柱湿重量の変動に及ぼす影響について詳細に研究された例は少ない。品田(2006)は、春季の底層餌濃度が夏季の貝柱歩留まりに影響を与えることを示しているが、貝柱歩留まりは全湿重量に占める貝柱湿重量の比率であり、貝柱湿重量の変動を正確に説明するものではなかった。一方、品田・三好(2015)は、漁獲年の8-10月にピークとなる貝柱湿重量が、その年の4-7月の海洋環境によって変化することを示唆した。そこで本研究は、漁獲年に当たる4年貝(4-5月の産卵期を起点として4年以上5年未満の経過した貝)の8-10月の貝柱湿重量を応答変数、4-7月における各月の海洋環境(水温、餌濃度および流れの強さ)を説明変数として、海洋環境が貝柱湿重量に与える影響について詳細に解析することを目的とした。

## 材料と方法

調査は、1992-2012年に北海道北東部に位置する紋別漁場で行った(Fig. 1)。紋別漁場は5海区に分割されており、それぞれの海区において4年周期で稚貝の放流と漁獲を行う「四輪採制」で漁業を行っている(A海区はホタテガイの中間育成施設およびB・E海区と併用する区域となっている)。放流密度は4-5枚・m<sup>-2</sup>、底質は礫、粗砂、細砂となっており年間約3万トンの水揚げ量がある。ホタテガイ試料は、3-12月にかけてほぼ月2回の頻度で、その年の6月に4年貝となる海区のほぼ中心(水深約40m)からホタ



**Figure 1.** Location of five fishing grounds (A to E) belonging to Mombetsu fishery cooperative. Open circles show the sampling points. Schematic representations of Tsushima warm current and Soya warm current.

テガイ桁網により採集した。そのうち調査1回あたり成長輪により4年貝を40個体抽出して貝柱を取り出し、水分をザルで切った後、湿重量を測定した(精度0.1g)。

海洋観測は、ホタテガイ試料の採集地点で同時に行った。底層水温はSTD (AST-1000, アレック電子社製)で測定した。ホタテガイの餌は、藻類、渦鞭毛虫類、繊毛虫類および無脊椎動物の幼生等があり、成長に関わる栄養の観点では珪藻などの藻類の貢献が大きい(Silina and Zhukova, 2007)。本研究では餌濃度の指標として藻類の現存量を反映するクロロフィルa量を用いた。試水はバンドン採水器でホタテガイが生息する底層(水深約40m)から採水して、GF/Cフィルター(Whatman社製)でろ過したのち分析まで凍結保存した。その後、実験室でフィルターを90%アセトンまたはDMF (N,N-ジメチルホルムアミド)で抽出し、蛍光光度法(Holm-Hansen et al., 1965; Welschmeyer, 1994)で測定した。また、本海域は、日本海から宗谷海峡を通じて流入してくる宗谷暖流水が海岸線に沿った南東方向への恒流となっており、その流速は稚内と網走の水位差によって説明されることが明らかとなっている(青田, 1975)。そこで、流れの強さとして気象庁が発表している稚内と網走の月平均水位(気象庁潮位観測資料: <http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/genbo/index.php>, 2015年5月28日)から水位差を計算した(以下、水位差)。

漁獲対象である4年貝の8-10月における平均貝柱湿重量(応答変数)に影響を与えている要因を明らかにするため、4-7月における各月の海洋環境(底層水温、底層クロロフィルa濃度および水位差の月平均値)を説明変数として統計解析を行った。まず、応答変数と各月の各説明変数間でSpearmanの順位相関係数を算出し、各説明変数の中で最も相関係数が高い月を抽出した。続いて、抽出した3つの説明変数を用いて一般化線形モデル(GLM: Generalized linear model)をあてはめた。応答変数である8-10月における平均貝柱湿重量は非負値で連続変数なので、その確率分布がガンマ分布に従うと仮定した。また、連結関数はログ関数、モデル選択はAICを用いて行った。

$$\log(p) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 \quad (1)$$

ここで、

$p$ は漁獲対象である4年貝の8-10月における平均貝柱湿重量

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ はパラメータ

$X_1$ は底層水温、 $X_2$ は底層クロロフィルa濃度、 $X_3$ は水位差

である。

なお、分散拡大要因(VIF: Variance Inflation Factor)が10以上の説明変数の組み合わせを多重共線性の判定基準とし、

Phillips-Perron test を用いて各変数の単位根検定を行った。

**結果**

貝柱湿重量は、3-5月に平均値が12.9-14.8 gまで緩やかに上昇した (Fig. 2)。その後、6月に急激に増加して、7-10月には平均値が20 g以上の高い値を記録した。底層水温は、3月には平均値が0.1°C、最低値が-1.6°Cと年間を通じて最も低い値を示し、その後9月まで上昇して平均値17.0°Cのピークを示した。底層クロロフィルa濃度は、4月と5月に平均値が約2.5 μg・l<sup>-1</sup>と年間を通じて最も高かった。その後、約1.2 μg・l<sup>-1</sup>と低い値を示した。水位差は、3-5月に平均値が79.1-178.1 mmまで急激に上昇した。その後6-10月には180.2-195.6 mmの高い値で推移した。

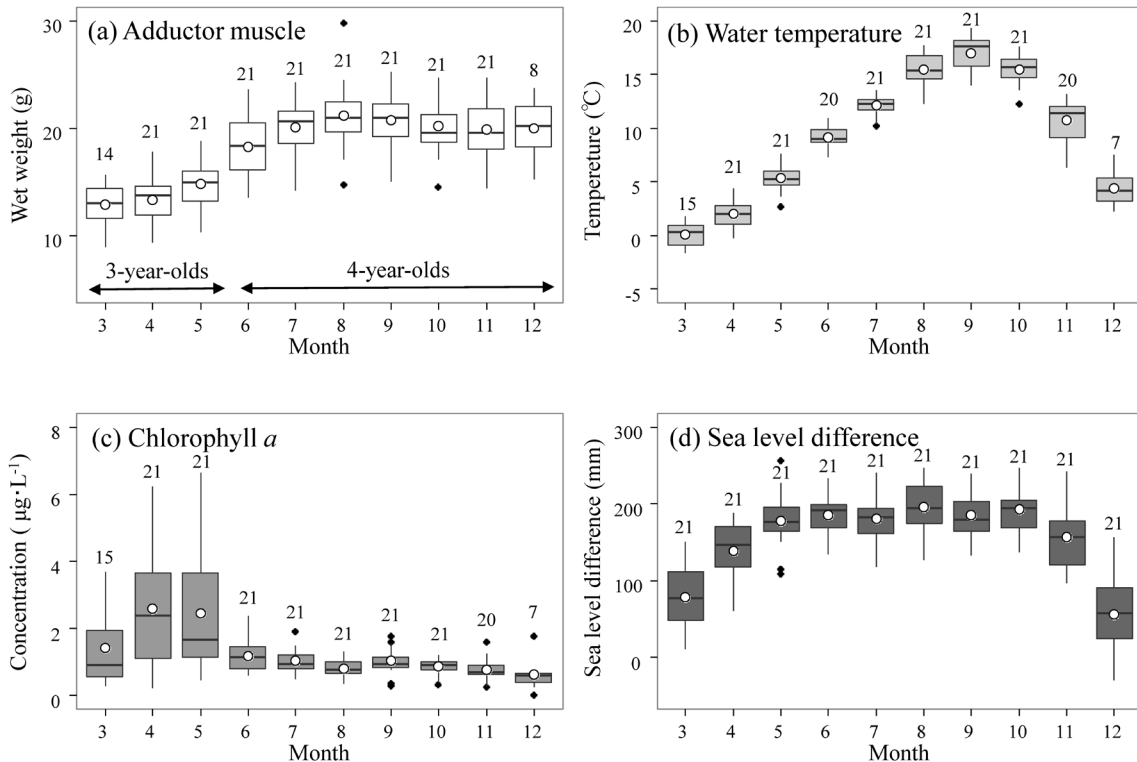
4-7月における各月の底層水温、底層クロロフィルa濃度および水位差と漁獲対象である4年貝の8-10月における平均貝柱湿重量の相関関係を示す (Fig. 3)。底層水温との関係は、4月に有意な正の相関係数が認められた ( $r=0.53, p<0.05$ )。5月にも比較的高い正の相関係数を示したが ( $r=0.41, n.s.$ )、6-7月は明瞭な関係が見いだせなかった。底層クロロフィルa量については、4月にのみ有意な正の相関

係数がみられた ( $r=0.45, p<0.05$ )。水位差については、4-7月にかけて比較的高い正の相関係数がみられ、特に4月に有意な正の相関係数がみられた ( $r=0.54, p<0.05$ )。

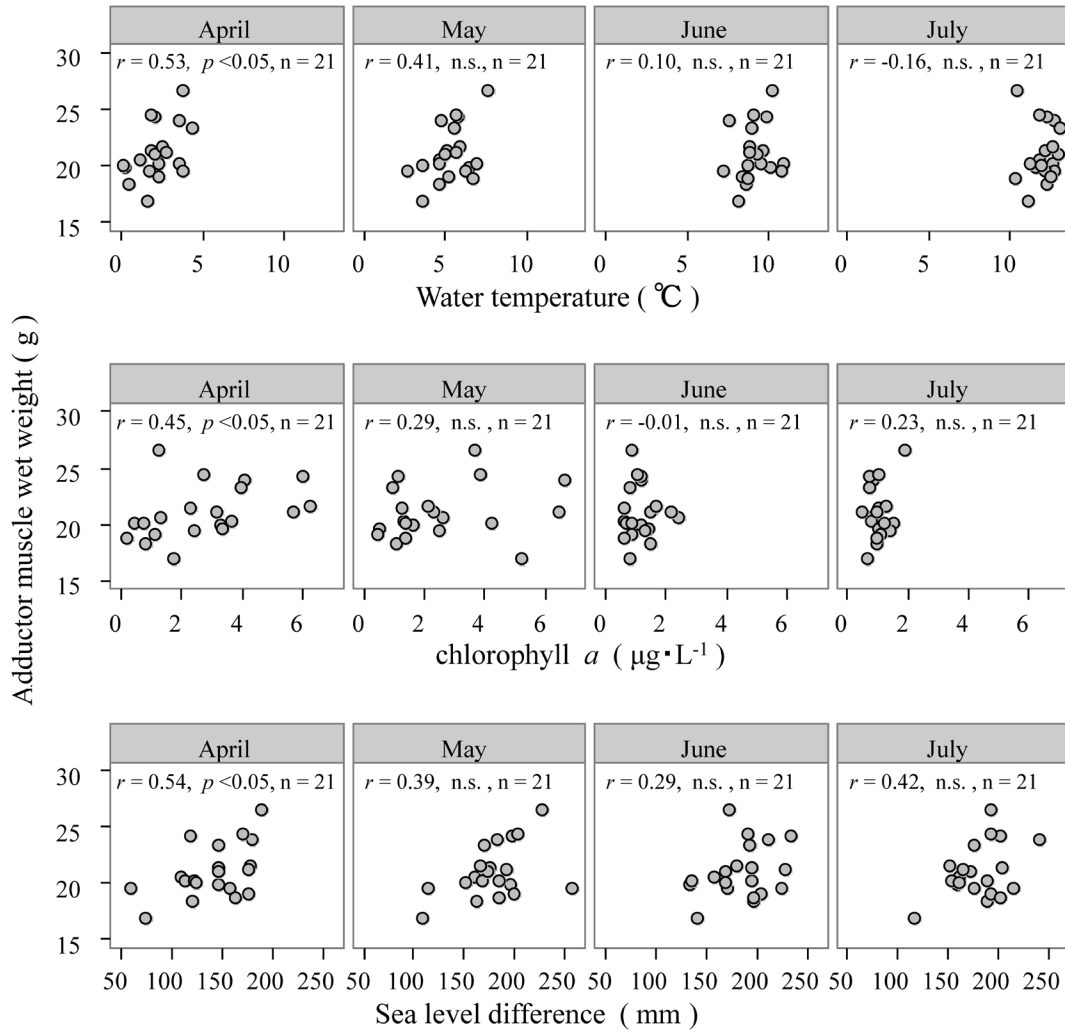
相関分析の結果、有意な正の関係が認められた4月の底層水温、底層クロロフィルa濃度および水位差のVIFは2以下であり (底層水温1.32, 底層クロロフィルa濃度1.21, 水位差1.12)、これらの変数間に明らかな多重共線性は認められなかった。また、単位根検定の結果、すべての変数が定常過程と判定された (平均貝柱湿重:  $p<0.05$ , 4月底層水温:  $p<0.01$ , 4月底層クロロフィルa濃度:  $p<0.01$ , 4月水位差:  $p<0.01$ )。そのため、これらの変数を説明変数として、一般化線形モデルをあてはめ、AICによりモデル選択を行った (Table 1)。今回の一般化線形モデルによる変数選択の結果は、サンプルサイズが大きくなり、バイアスの影響を受けていた可能性はあるが、4月の説明変数をすべて用いたモデルが選択された。

**考察**

オホーツク海の放流ホタテガイは水温18°Cまでは水温が高いほど代謝活動が活発になると報告されている (蔵田,



**Figure 2.** Seasonal changes in (a) adductor muscle of 3-year-olds and 4-year-olds, (b) water temperature, (c) Chlorophyll a concentration and (d) sea level difference between Wakkanai and Abashiri as an indicator of current speed using data from 1992 to 2012. The bottom and top of the box show the first and third quartiles, and the band inside the box show median values. The lower whiskers extend from the lower quartiles to the lowest values within 1.5\*IQR (interquartile range). The higher whiskers extend from the upper quartiles to the highest values within 1.5\*IQR. The closed and open circles show outlier and mean values, respectively. Numbers on each box show the number of data used.



**Figure 3.** Adductor muscle wet weight in relation to water temperature (top), Chlorophyll *a* concentration (middle), and sea level difference (bottom) observed yearly between 1992 and 2012. *r*: Spearman's rank correlation coefficient. n.s.: not significant. *n*: the number of data used.

**Table 1.** Estimates of the regression coefficient based on generalized linear model for predicting the adductor muscle weight.

Explanatory variables	Intercept		TEMP		CHL		SLD		df	AIC
	E	SE	E	SE	E	SE	E	SE		
TEMP+CHL+SLD	2.7004	0.094	0.0274	0.0198	0.0210	0.0133	0.0016	0.0007	17	95.9
CHL+SLD	2.6958	0.096	—	—	0.0280	0.0126	0.0019	0.0007	18	96.1
TEMP+SLD	2.7345	0.095	0.0395	0.0189	—	—	0.0015	0.0007	18	96.8
SLD	2.7476	0.103	—	—	—	—	0.0020	0.0007	19	99.3
TEMP+CHL	2.8922	0.050	0.0418	0.0210	0.0203	0.0148	—	—	18	99.5
TEMP	2.9226	0.046	0.0531	0.0194	—	—	—	—	19	99.7
CHL	2.9471	0.047	—	—	0.0319	0.0148	—	—	19	101.8
Null	3.0317	0.029	—	—	—	—	—	—	20	104.5

E: Estimate, SE: Standard Error, df: degree of freedom, AIC: Akaike's information criterion, TEMP: water temperature, CHL: chlorophyll *a* concentration and SLD: Sea level difference between Wakkanai and Abashiri.



1996). 底層水温は4-7月まで平均値2.0-12.1°Cに最適水温に向かって上昇する傾向にある (Fig. 2). よって, この時期の底層水温が高いほど摂餌活性が高まり貝柱湿重量が増加する可能性がある. 実際に, 本研究においては4-6月の各月の底層水温が高いほど8-10月の4年貝の平均貝柱湿重量が大きい傾向が認められ, 特に4月の底層水温が有意な影響を及ぼしていることが示された (Fig. 3, Table 1).

ホタテガイは生殖巣が十分発達しているという条件の下に, 水温の急上昇が刺激となって放卵・放精することが知られている (西浜, 1994). 本海域のホタテガイは4月に生殖巣が十分発達するので (宮園・中野, 2000), 水温上昇期である4月の水温が高い年は放卵・放精が例年に比べ早く行われると考えられる. また, ホタテガイは放卵・放精の前後で摂餌エネルギーの配分を生殖巣から貝柱へ切り替えることが知られている (Fuji and Hashizume, 1974). このため, 4月の底層水温が高い年は放卵・放精が早く行われ, 摂餌エネルギーの配分を生殖巣から貝柱へ切り替える時期が早まることで, 摂餌エネルギーが貝柱へ配分される期間が例年に比べ長くなる. この結果, ホタテガイは長期間にわたりエネルギーを貝柱の成長に使用して, 8-10月に向けて貝柱湿重量を増加させるのであろう. よって, 4月の底層水温が応答変数との相関係数が高く, 予測モデルに選択された要因として, 摂餌を活性化させることに加え, 放卵・放精の時期を介して摂餌エネルギーの配分期間に影響を与えるプロセスが存在していることが示唆された.

地まきホタテガイ漁業は放流から漁獲までの約3年間を無給餌で過ごすため, 現場の餌環境がホタテガイの成長に影響を及ぼす (西浜, 1994). 北海道オホーツク海沿岸では毎年4-5月に植物プランクトンの大増殖 (春季ブルーム) が発生し (品田, 2006), 亜寒帯域では春季ブルームによって年間基礎生産の数分の一が生産されるので (Kudo and Matsunaga, 1999), その規模は懸濁態有機物のろ過食者であるホタテガイの餌環境に大きな影響を与えられると考えられる (工藤ほか, 2011). 実際, 4月の底層クロロフィルa濃度と漁獲対象である4年貝の8-10月における平均貝柱湿重量に有意な相関関係が認められており (Fig. 3), 一般化線形モデルによる変数選択の結果でも4月の底層クロロフィルa濃度を用いたモデルが選択されている (Table 1). これらの結果は, 4月の底層クロロフィルa濃度が, 本海域の春季ブルームの指標となり, 地まきホタテガイの摂餌エネルギー量に影響をあたえていることを示唆している. 今後は, 底層クロロフィルa濃度の変動機構を宗谷暖流水との関連等に注目して解明することが課題となる.

春季ブルームの終息期である5月の底層クロロフィルa濃度と8-10月の4年貝の平均貝柱湿重量との関係については, 明確ではなかった (Fig. 3). 本海域の春季ブルームは, 宗谷暖流水に含まれる低濃度の栄養塩を利用するものと, 沖合から接岸してくる中冷水に含まれる高濃度の栄養塩を

利用するものがある (工藤ほか, 2011). 5月は春季ブルームの後期にあたるので, この時期の春季ブルームは主に接岸した中冷水の栄養塩を利用していると考えられる. 中冷水の接岸機構については不明な点が多いが, 本調査の頻度は月2回であることから, 5月に発生する春季ブルームの経年変動を正確に反映していない可能性もある. 今後は, データロガーによる連続観測値を解析に加えることが, 春季ブルームの規模を正確に把握するために重要となると考えられる.

北海道オホーツク海沿岸に沿って南下する宗谷暖流は対馬暖流を起源とし, オホーツク海にみられる唯一の暖流である. その勢力は, 流水退去後の3月から急速に増大して, 9月以降急激に減少する (青田, 1975). その流速は稚内と網走の水位差によって説明されることが示されており (青田ほか, 1993), 本研究でも水位差が3-5月にかけて急激に増加している (Fig. 2). 応答変数である8-10月の4年貝平均貝柱湿重量と4-7月における各月の水位差に相関分析の結果, すべての月で比較的高い相関係数が認められた (Fig. 3). 前述のように, 水位差は宗谷暖流の流速と比例するので, 水位差が大きいほど移動能力の乏しいホタテガイが餌に遭遇する機会が増大すると考えられる.

ホタテガイは餌を効率良く摂取するため摂餌器官を流れに向けるが, 流速  $30 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  以上で自発的に摂餌器官を流れに向けることができなくなることが水槽実験により示されている (Sakurai and Seto, 1999). 蔵田 (1987) は, 紋別漁場の下流である常呂漁場の海底流速を測定しており, 宗谷暖流の平均流は6月で最大  $18.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 7月で  $25.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  であることを示した. 本研究でも水位差は3-5月に増加後, 5-7月は約200 mmで一定となり, 青田ほか (1993) の式と各月の最大水位差を用いて流速を計算した5月以降は約  $33-37 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  の流速が推定された. よって, 現場では5月以降に流速が  $30 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  を超える場合があることが想定され, 自発的な定位が出来ず摂餌効率が低下している可能性もある. そのため, 5月以降の水位差と4年貝の8-10月における平均貝柱湿重量の相関係数が4月に比べ低くなったと考えられる.

これまでの研究で, 地まきホタテガイの貝柱歩留まりと海洋環境の関係が検討され, 春季の底層クロロフィルa濃度との関係が指摘されてきた (品田, 2006). 本研究は, 品田・三好 (2015) が示した「貝柱湿重量の変動が漁獲年の4-7月の海洋環境の影響を受けている可能性」を踏まえ, 応答変数を貝柱歩留まりから貝柱湿重量へ変更して再解析を試みたものである. その結果, 春季の底層クロロフィルa濃度のみではなく, 春季の底層水温および水位差 (宗谷暖流の指標) との関係を見いだすことができた. これらの結果は, 地まきホタテガイの貝柱の成長が春季の海洋環境に強く依存していることを改めて示している.

## 謝 辞

本稿を終えるにあたり, 野外調査および測定に長年従事されてきた紋別漁業協同組合, 網走地区水産技術普及指導所ならびに北海道立総合研究機構水産研究本部網走水産試験場の方々に謹んで御礼申し上げます。また, 故西浜雄二博士は本論文のデータとなった地まきホタテガイ漁業のモニタリング体制を構築された先見に深く感謝申し上げます。なお, 本研究は北海道立総合研究機構水産研究本部が北海道ほたて漁業振興協会より受託している「ホタテガイ成長モニタリング調査」の一部である。

## 引用文献

- 青田昌秋 (1975) 宗谷暖流の研究. 低温科学・物理編, **33**, 151–172.
- 青田昌秋・石川正雄・松山優治・山田俊郎・鶴林隆久 (1993) 宗谷暖流の流れの特徴. 沿岸海洋研究ノート, **31**, 49–56.
- Fuji, A. and M. Hashizume (1974) Energy budget for a Japanese common scallop, *Patinopecten yessoensis* (Jay), in Mutsu Bay. Bull. Fac. Fish. Hokkaido Univ., **25**, 7–19.
- Holm-Hansen, O., Lorenzen, C. J., Holmes, R.W. and J. D. H. Strickland (1965) Fluorometric determination of chlorophyll. J. Cons. Cons. Int. Explor. Mer, **30**, 3–15.
- Kudo, I. and K. Matsunaga (1999) Environmental factors affecting the occurrence and production of the spring phytoplankton bloom in Funka Bay, Japan. J. Oceanogr., **55**, 505–513.
- 工藤 勲・フローラン アヤ・高田兵衛・小林直人 (2011) オホーツク海沿岸域の海洋構造と生物生産. 沿岸海洋研究, **49**, 13–21.
- 蔵田 護 (1987) 網走湾におけるホタテガイの成長阻害要因に関する調査. 昭和61年度網走水試事業報告書, 193–200.
- 蔵田 護 (1996) オホーツク海における放流ホタテガイの呼吸量. 北水試研報, **49**, 7–13.
- 宮園 章 (2000) 流水水槽におけるホタテガイの成長と生理活性に及ぼす流れの強さの影響. 北水試研報, **58**, 41–47.
- 宮園 章・多田匡秀・小松輝久 (1995) 網走におけるホタテガイ漁場の流動, 沈降粒子束とホタテガイの成長について. 水産海洋研究, **59**, 389–397.
- 宮園 章・中野 広 (2000) 北海道オホーツク海沿岸域における地まきホタテガイの閉殻筋中のタンパク質とグリコーゲン量の季節変化. 北水試研報, **58**, 23–32.
- 西浜雄二 (1994) 「オホーツクのホタテ漁業」. 北海道大学図書刊行会, 札幌, 218 pp.
- Sakurai, I. and M. Seto (1999) Movement and orientation of the Japanese scallop *Patinopecten yessoensis* (Jay) in response to water flow. Aquaculture, **181**, 269–279.
- 櫻井 泉・下野 学・今野繁基・水野勝彦・成田伝彦 (2004) 養殖ホタテガイの成長に及ぼす流れの影響. 日本水産学会誌, **70**, 1–7.
- 品田晃良 (2006) 地まきホタテガイの成長不良に対する水温および餌濃度の影響. 日本ベントス学会誌, **61**, 41–44.
- 品田晃良・三好晃治 (2015) 漁獲ホタテガイ貝柱湿重量の決定時期について (短報). 北水試研報, **87**, 89–92.
- Silina, A. V. and N. V. Zhukova (2007) Growth variability and feeding of scallop *Patinopecten yessoensis* on different bottom sediments: Evidence from fatty acid analysis. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., **348**, 46–59.
- Welschmeyer, N. A. (1994) Fluorometric analysis of chlorophyll *a* in the presence of chlorophyll *b* and pheopigments. Limnol. Oceanogr., **39**, 1985–1992.