東日本大震災後の宮城県雄勝湾における垂下式養殖ホタテガイの 水深による成育の違いと生産性の評価

長澤 一衛,^{1,2a} 高橋 大介,^{3a} 伊藤 直樹,^{1b} 高橋 計介,¹ 尾定 誠^{1*}

(2015 年 12 月 14 日受付, 2016 年 2 月 15 日受理, 2016 年 4 月 29 日 J-STAGE 早期公開)

¹東北大学大学院 農学研究科 水圏動物生理学分野,

²東北大学大学院 農学研究科 東北大学マリンサイエンス復興支援室 雨宮キャンパス,

³東北大学大学院 農学研究科 東北大学マリンサイエンス復興支援室 女川フィールドセンター

Growth of Japanese scallop *Mizuhopecten yessoensis* farmed by the ear-hanging method between different water layers and estimation of the productivity for farmed scallops in Ogatsu Bay (northeastern Japan) following the 2011 Great East Japan Earthquake

KAZUE NAGASAWA,^{1,2a} DAISUKE TAKAHASHI,^{3a} NAOKI ITOH,^{1b}
KEISUKE G. TAKAHASHI¹ AND MAKOTO OSADA^{1*}

¹Laboratory of Aquacultural Biology, Graduate School of Agricultural Science, Tohoku University, Sendai, Miyagi 981-8555, ²Tohoku Ecosystem-Associated Marine Science (TEAMS), Graduate School of Agricultural Science, Tohoku University, Sendai, Miyagi 981-8555, ³Tohoku Ecosystem-Associated Marine Science (TEAMS), Graduate School of Agricultural Science, Tohoku University, Onagawa, Miyagi 986-2242, Japan

This study evaluated the productivity of farmed bivalves in Ogatsu Bay after the tsunami disaster in 2011. We focused on the Japanese scallop farmed by the ear-hanging method to analyze the growth status between different water layers and its productivity. We also monitored marine environmental changes (seawater temperature, chlorophyll *a* concentration) at neighboring farming sites in order to assess the feeding environment. As a result, the productivity decreased in 2014. This drop was mainly due to the increase of farming facilities and the stagnation of production amount in 2014. Since chlorophyll *a* concentration (i.e., phytoplankton) did not decrease from 2013 to 2014, the drop in 2014 was suspected to be due to overproduction of the farmed scallop. Specifically, significant differences were seen in shell size, soft body weight, and adductor muscle weight between the upper and lower layers in 2013 and notably in 2014. Therefore, it seems that the increase of farming facilities caused feeding competition in the lower layer, resulting in the decline of growth rate. These results indicate that the present number of scallop farming facilities may be already above the sustainable carrying capacity in Ogatsu Bay for the best growth performance.

キーワード：クロロフィル *a*, 餌料環境, 垂下養殖, 生産性, 成長, 閉殻筋指数

ホタテガイ *Mizuhopecten yessoensis* は、全国漁獲量の中で養殖生産が占める割合がこの 10 年において約 4 割であり、市場への安定した供給を維持するためには養殖生産が不可欠な水産上有用種である（平成 15–26 年度魚種別漁獲：http://www.maff.go.jp/j/tokei/seiryu/

kaimen_gaisu.html, 農林水産省, 2015 年 11 月 16 日）。宮城県の養殖ホタテガイの生産量は、北海道、青森県に続いて全国第 3 位であり、県における重要な養殖対象種である。そのため、試験研究の歴史も古く多くの試みがなされ、現在の養殖技法が確立されている。近

年の宮城県沿岸におけるホタテガイ養殖は、短期間で高成長が見込める耳吊り方式による垂下式養殖が一般的に広く採用されている（伝統的漁具漁法ホタテガイ：<http://www.pref.miyagi.jp/soshiki/mtsc/>, 宮城県水産技術総合センター, 2012年10月12日）。具体的には、中間育成を行った稚貝を購入して耳吊りし、約1年の垂下養殖を行った後に成貝（2歳齢）として出荷することにより、1年周期で安定した収益が見込める養殖生産を行っている。しかし、2011年3月の東北地方太平洋沖地震による巨大津波は、東北沿岸域の海面養殖施設に壊滅的な被害をもたらした。その震災被害により宮城県の養殖ホタテガイ生産量は、震災前2010年の12,822 tから翌2011年の1,003 tと10分の1以下まで落ち込んだが、養殖施設の復旧や養殖再開に伴い、2014年には8,700 tまで回復している（大海区都道府県振興局別養殖魚種別収獲量平成26年概数値：http://www.maff.go.jp/j/tokei/seiryu/kaimen_gaisuu.html, 農林水産省, 2015年11月16日）。この未曾有の巨大津波が与えた海洋環境と養殖生物への影響に関する研究は前例がなく、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」（<http://www.i-teams.jp/j/index.html>）において現在も精力的な調査と解析が進行中である。本報告はその一環として、宮城県雄勝湾における餌料環境、水温を指標にした海洋環境と、そこで垂下養殖されたホタテガイの育成状況を調査・解析した。

これまでの研究より、ホタテガイの餌は珪藻類を中心とする植物プランクトンのほかデトリタスと考えられていることから、餌料環境の評価はクロロフィル a 濃度を指標とするのが一般的であり、地まき増殖を行う北海道・青森県を中心にホタテガイの育成と餌料環境に関する精力的な調査が行われている。^{1,2)}しかし、これまでに垂下式養殖された本種の育成状況と餌料環境に着目した植物プランクトン量の関係を調べた報告は非常に少ない。特に垂下式養殖では垂下連の上下で約15 mの深度差があることから、深度による植物プランクトンの濃度差が地まき増殖よりも顕著に育成に影響すると考えられる。実際にこれまで、垂下養殖されたホタテガイの上・下層部で成長に差が生ずることが示唆されていたが、³⁻⁵⁾この成長差が深度による植物プランクトンの濃度の違いに起因するのかは不明であった。したがって本報告では、異なる深度におけるホタテガイの育成状況と餌料濃度との関係を検証することを目的とし、震災後3年間において継続的な調査を実施した。さらに、震災前の結果を考慮することで、震災後の餌料環境を背景に生産されるホタテガイの育成状況と、雄勝湾が有するホタテガイの生産性を評価した。本湾は、震災以前より良好な成長が得られる養殖ホタテガイの主要生産地として知られており、恵まれた漁場環境を活かすための養殖技法が、

漁業者間で管理・統一されている湾である。そのため、復興の途中である2014年度においても宮城県第2位の生産量を誇っており、今後もホタテガイの養殖漁場としての持続的な利用が期待されている。本湾における詳細な栄養塩状態の解析は報告されていないものの、三陸地方を中心とする東北沿岸は、栄養塩を豊富に含む親潮が流入することで高い基礎生産が賄われると考えられている。⁶⁾特に、本湾はホタテガイと同じ懸濁物食性であるマガキ *Crassostrea gigas* の養殖生産の割合が他の海域に比べて非常に低いため、餌料競合種となる養殖生物の影響を受けにくいことから養殖ホタテガイの環境収容力を評価し易い環境といえる。その他、考慮すべき餌料競合種として、本湾においてもホタテガイ養殖施設に付着するイガイ類やホヤ類等が挙げられるが、生物量や摂餌量は未解析であることから、これらを考慮することは現段階では困難である。したがって、本報告では震災後における養殖環境の評価と養殖生物の育成状況を迅速に把握するため、雄勝湾全体の生産量の把握が可能な養殖ホタテガイについて調査を実施し、生産量と育成状況を餌料環境にもとづいて比較・解析することで、本湾における養殖ホタテガイの適正収容数と生産性の関係を考察した。

材料と方法

養殖ホタテガイの計測 毎年12-1月に、北海道より購入した殻長約6 cmのホタテガイ稚貝を無作為に抽出して耳吊りし、宮城県雄勝湾内の2地点（Fig. 1a, b, 星印が養殖地点を示す）において約1年間の垂下養殖に供した。続いて、垂下養殖された出荷サイズの2歳齢ホタテガイを、震災前の2001年12月と、震災後の3年間（2012年12月, 2013年12月, 2015年1月）においてそれぞれ採取した。深度別における成長評価を行うために、約150枚のホタテガイが耳吊りされている垂下連のロープを、2001年は3等分して上・中・下層部より各15枚ずつ採取した（Fig. 1c, 左）。2012年から2015年の3年間は、解析個体数を増やすため耳吊りロープ1連（約150枚）を上・下層部に2等分し全て採取した（Fig. 1c, 右）。採取したホタテガイの殻長、殻高および殻幅を計測した後（2001年は未取得）、開殻と解体を行い、軟体部全体、生殖腺および閉殻筋の重量を測定した。また、生殖腺指数（gonad index, GI: %）を $100 \times \text{生殖腺重量 (g)} / \text{軟体部重量 (g)}$ により、閉殻筋指数（adductor muscle index, AMI: %）を $100 \times \text{閉殻筋重量 (g)} / \text{生殖腺を除いた軟体部重量 (g)}$ により算出した。その後、独立 t 検定（unpaired t -test）による統計処理を行い、垂下水深の違いによる成長差を比較した。2001年のデータについては、Kruskal-Wallis検定後にDunnの事後比較を行うことで多重比較検定を

実施し比較を行った。

水温とクロロフィル *a* 濃度のモニタリング 2012 年 12 月から 2015 年 1 月までの期間において、毎月 1 回の頻度で多項目水質計（RINKO-profiler, ASTD102, JFE アドバンテック社製）による海洋環境調査を実施した。2012 年 12 月～2013 年 6 月および 2013 年 9 月は A.2-6 の 5 地点、2013 年 8, 10, 12 月、2014 年 2, 4, 6 月は A.1-6 を含めた合計 22 地点、2013 年 7, 9 月と 2014 年 1, 3, 5, 7-12 月および 2015 年 1 月は A.1-6 の 6 地点において、海面から海底まで 0.5 m 間隔で水温とクロロフィル *a* 濃度を測定した（Fig. 1b, 黒点が調査地点を示す、2013 年 11 月のみ未測定）。雄勝湾の各水層におけるクロロフィル *a* 量には、Fig. 1b の黒線で示した境界線により湾内の範囲を規定し、養殖ホタテガイの垂下範囲である水深 5-18 m（以下、全層と

表記）と、これを上下に 2 等分した上層部である水深 5-11.5 m（以下、上層と表記）と下層部である水深 11.5-18 m（以下、下層と表記）の積算値を得ることで求めた。まず、湾全域を網羅する 22 地点でクロロフィル *a* 濃度が測定された 2013 年 8, 10, 12 月、2014 年 2, 4, 6 月の 6 回分のデータから、全層と上層のクロロフィル *a* 積算値を第一段階として算出した。具体的には、22 地点において海面から海底まで 0.5 m 間隔で測定されたクロロフィル *a* 濃度を、各水深で影響半径 1.4 km、e-folding スケール 0.7 km のガウス関数によって緯度・経度 $0.03' \times 0.03'$ の格子に補間し、それらを湾内の全層と上層で各々積算することによって、各層のクロロフィル *a* 積算値を算出した。次に A.2-6 の 5 地点および A.1-6 の 6 地点のみのデータを用い、同様の方法で全層と上層のクロロフィル *a* 積算値を算出した。その後、22 地点のデータから算出した 6 回分のクロロフィル *a* 積算値を目的変数とし、5-6 地点のみのデータから算出したものを説明変数とした単回帰分析を行った。得られた 4 つの回帰直線の決定係数は全て 1 に近い値を示しており、いずれの回帰モデルも統計的に有意であった（Table 1）。これらの回帰直線を用いて、2013 年 8, 10, 12 月、2014 年 2, 4, 6 月以外の月の 5-6 地点のデータから算出したクロロフィル *a* 積算値を、22 地点のデータから求めたものに換算した。2013 年 11 月のクロロフィル *a* 積算値については、2013 年 10 月と 2013 年 12 月の積算値を用いて線形補間することによって求めた。最終的に得られた全層のクロロフィル *a* 積算値より、上層のクロロフィル *a* 積算値を差し引くことによって下層のクロロフィル *a* 積算値を求めた。上述の方法により、2012 年 12 月から 2015 年 1 月における月毎の全層および上・下層それぞれのクロロフィル *a* 積算値を求めた。

Fig. 1 Location (a) and bathymetry maps (b) of Ogatsu Bay, Japan. b) Farming sites (stars: St. 1; $38^{\circ}49'N$, $141^{\circ}50'E$, St. 2; $38^{\circ}50'N$, $141^{\circ}51'E$) and positions on CTD casts (dots) are indicated. Contour interval for the bottom topography is 5 m. The black line shows the boundary between the areas inside and outside the bay, and the domain inside the line is defined as the bay in this study. c) Schematic representation of ear-hanging method for scallop farming. Approximately 150 scallops per hanging rope were reared for one year. For the sampling, all scallops on a hanging rope were equally divided into three groups (i.e., upper, middle and lower layers) in 2001 or two groups (i.e., upper and lower layers) in 2012–2014 and used for scaling and weighing.

Table 1 Linear regression lines between the amount of chlorophyll *a* over Ogatsu Bay estimated using data at stations A.2–A.6 (5 CTD stations) or A.1–A.6 (6 CTD stations) and that estimated using data at 22 CTD stations (see Fig. 1b).

Number of CTD stations for estimation of <i>x</i>	Water layer depth (m)	Linear regression line	Coefficient of determination
5	5–18	$y = 0.949x + 4.735^*$	0.999
5	5–11.5	$y = 0.892x + 4.758^*$	0.998
6	5–18	$y = 0.949x + 4.042^*$	0.999
6	5–11.5	$y = 0.894x + 4.122^*$	0.998

For estimating the amount, the chlorophyll *a* was integrated between depths of 5 and 18 m and of 5 and 11.5 m (upper layer) during the period of August 2013–June 2014. The linear regression lines were defined as $y = Px + Q$, where *x* and *y* represent the amount of chlorophyll *a* estimated using data at 5 or 6 CTD stations and that estimated using data at 22 CTD stations, respectively. Asterisks indicate statistically significant linear regression lines at $p < 0.001$, and the statistical significance was assessed by the *F*-test.

雄勝湾における養殖ホタテガイの養殖筏の台数と生産量調査 宮城県漁業協同組合雄勝湾支所が管理する、2009年から2014年までの過去6年間分の湾全体におけるホタテガイ養殖筏の台数と総生産量を集計した。本湾におけるホタテガイ養殖では、湾支所が筏1台への稚貝の収容数や養殖密度などの養殖方法を厳密に定め、全ての漁業者がその養殖方法を遵守し毎年同様の垂下養殖を行っている。具体的には、ホタテガイ稚貝150枚を垂下ロープに耳吊りし、これを養殖筏1台に160連垂下する。この養殖筏1台あたりの収容数自体に年による変動は無く、実際に本研究で調査を実施した2009年から2014年の過去6年間においてもその収容数は一定である。したがって、生産量と筏台数をもとに、養殖連1連あたりが有する生産性 (kg/連) を以下の計算式から求めた。

生産性 (kg/連)

$$= \frac{\text{生産量 (t) / 筏台数}}{\text{筏1台から垂下されている連数 (=160)}}$$

これらの年変動を比較することで、震災前後での雄勝湾における養殖ホタテガイの生産性の変化を比較した。

結 果

水温の経月・経年変化 本解析で用いたホタテガイが養殖されていた近傍の観測地点 A.4, 5 の両地点における水温は、2-5 月に最も低く、8-9 月に最も高くなる経年変化を示した (Fig. 2a, b)。垂下連の下層に位置する水深 11.5-18 m の水温が最低となる時期は、2013 年および 2014 年ともに表層に比べて 1-2 ヶ月程遅れてお

Fig. 2 Depth-time diagrams of water temperature at (a) station A.4 and (b) station A.5 during the period of December 2012–January 2014. Contour interval for the water temperature is 1.0°C. Horizontal broken lines denote depths of 5, 11.5 and 18 m. Black arrowheads indicate monitoring dates.

り、それぞれ4月と5月であった。2013年と2014年の水温の最低値は、それぞれ6°Cと5°C以下であり2014年の方がより低温であった。一方、水温の鉛直構造に注目すると、2013年は6-7月に、2014年は6-8月に上・下層の水温差が最大5°C程度となったが、両年ともに10-3月における水温差は2°C以下であった。

クロロフィルa濃度の経月・経年変化 観測地点 A.4, 5 の両地点におけるクロロフィルaの濃度分布は、2013年と2014年においてはほぼ同様の経月変化を示した。これらは3-5月に生じる水柱全体での濃度上昇によって特徴づけられ、3-5月のクロロフィルa濃度の極大は5-10 µg/L程度であった。このクロロフィルa濃度の上昇は春季ブルームに相当するものであり、2013年は下層、2014年は上層でそれぞれ最大となった。春季ブルームに着目すると、2013年は4月のみ5 µg/L以上を示したのに対して、2014年は3-5月において5 µg/L以上を示しており、2013年に比べて2014年の方

Fig. 3 Depth-time diagrams of chlorophyll a concentration at station A.4 (a) and station A.5 (b) and time series of the amount of chlorophyll a integrated over Ogatsu Bay during the period of December 2012–January 2014 (c). a, b) Contour interval for the chlorophyll a concentration is 1 µg/L. Horizontal broken lines denote depths of 5, 11.5 and 18 m. c) Thick, thin and broken lines show the amount of chlorophyll a integrated between depths of 5 and 18 m (all layers), of 5 and 11.5 m (upper layer), and of 11.5 and 18 m (lower layer) over the bay, respectively. Black arrowheads indicate monitoring dates.

が春季ブルームは長く継続していた (Fig. 3a, b)。また、濃度分布図の比較から 2014 年の冬季 (1 月), 春季ブルーム時 (4–5 月), 夏季から秋季ブルームに移行する時期 (7–10 月) において, 観測地点 A.4 のクロロフィル *a* 濃度が A.5 より僅かに高かった。このクロロフィル *a* 濃度の変化は, 全層のクロロフィル *a* 積算値の推移にも反映されており (Fig. 3c), 2013 年と 2014 年のクロロフィル *a* 積算値は両年とも 4 月に最大となった。これらの積算値を上・下層に分割した結果, 春季ブルームの時期以外は, 上層における積算値が下層よりも高いことが明らかになった (Fig. 3c)。また, 両年 4 月におけるクロロフィル *a* 積算値は, 2014 年に比べて 2013 年の方が高かったほか (それぞれ 325 kg および 406 kg), 春季のブルーム時の特徴的な相違点として, 2013 年は 4 月にのみ高い値を示したのに対し, 2014 年は 3–5 月に 300 kg 程度と継続的に高いレベルを維持した点が挙げられた。一方, 2013 年と 2014 年において, 全層のクロロフィル *a* 積算値の年間平均値は, それぞれ 107 kg と 138 kg であり (Table 2), 垂下水深のみに注目すれば年間平均クロロフィル *a* 濃度は, 2013 年に比べて 2014 年の方が高かった。また, 上層と下層におけるクロロフィル *a* 積算値の年間平均値は, 2013 年はそれぞれ 52 kg と 55 kg であり, 2014 年は 81 kg と 57 kg であった。したがって, 2013 年は上・下層のクロロフィル *a* の寄与率がほぼ同等であったのに対し, 2014 年は上層の寄与率の方が 59% と僅かに高かったと考えられる。また, 2014 年における上層部のクロロフィル *a* 積算値の上昇が, 全層のクロロフィル *a* 積算値の年間平均値の増加に主に寄与していた。

養殖ホタテガイの成育状況 震災後の養殖ホタテガイの St. 1 と St. 2 における生残率は, 震災翌年の 2012 年でそれぞれ 54.7% と 74% と 3 年間の中で最も低い値を記録したが, 2013 年では 71% と 94% に回復していた (Table 3)。その後, 2014 年においては 88% と 82.7% であった。2012 年は, 計測に用いたホタテガイにヨーロッパザラボヤ *Ascidella aspersa* が特に多く付着していたが, 2013 年および 2014 年はほとんど観察されなかった。同時に, 2012 年では本種の付着による考えられるホタテガイの斃死が多く観察されたが, 付着の仕方上・下層で大きな差は見られなかった。また, これら 3 年間においては, 上層と下層もしくは養殖地点間で生残率における一貫した傾向は見られなかった。続いて, 養殖ホタテガイの成育状況を解析するため, 貝殻サイズの比較を震災後の 3 年間に行なった。2 地点 (St. 1, 2) で養殖された個体を上・下層でそれぞれ比較した結果, 殻長は 2012 年の St. 2 において下層部の方が有意に大きく, 2013 年では両地点でも上・下層で有意な差は認められなかった (Fig. 4a)。こ

Table 2 Annual mean of the amount of chlorophyll *a* integrated between depths of 5 and 18 m, of 5 and 11.5 m (upper layer), and of 11.5 and 18 m (lower layer) over Ogatsu Bay during the period of December 2012–November 2013 and December 2013–November 2014.

Year	Water layer depth (m)	Annual mean of the amount of chlorophyll <i>a</i> (kg)
2013 (Dec. 2012–Nov. 2013)	5–18	107
	5–1.5	52
	11.5–18	55
2014 (Dec. 2013–Nov. 2014)	5–18	138
	5–11.5	81
	11.5–18	57

Table 3 Numbers of scallops analyzed in this study

Production site	Water layer	2001	2012	2013	2014
St. 1	Upper	15	46	65	57
	(Middle)	15			
	Lower	15	36	42	75
Total (survival rate)			82 (54.7%)	107 (71.3%)	132 (88%)
St. 2	Upper	15	45	70	58
	(Middle)	15			
	Lower	15	66	71	66
Total (survival rate)			111 (74%)	141 (94%)	124 (82.7%)

In 2001, 15 scallops were sampled from three different water layers equally divided similarly to Fig. 1c. From 2012 to 2014, around 116 scallops on average were harvested from a hanging rope and were equally divided into two groups (i.e., upper and lower layer groups). Survival rate (%; total number/150 × 100) for a hanging rope is calculated since 150 juvenile scallops were initially ear-hung on a rope at the beginning of rearing.

れに対し, 2014 年では両地点ともに下層の個体の殻長が有意に小さいという結果が得られた。また, 殻高を比較したところ 2013 年と 2014 年において, 両地点ともに下層の個体が有意に小さく (Fig. 4b), この傾向は殻幅を比較した際にも共通して観察された (Fig. 4c)。特に, 2013 年と 2014 年の貝殻サイズを比較すると, 2014 年の St. 2 の上層部と, 両地点における下層部がともに小さかった。続いて, 軟体部全体と生殖腺および閉殻筋のそれぞれの重量を上・下層で比較した結果, 全てにおいて下層の個体の有意な重量低下が 2013 年および 2014 年で観察された (Fig. 5a–c)。この深部側における生殖腺および閉殻筋を含めた軟体部全体の重量低下は, 震災前の 2001 年においても見られた。この 2001 年における貝殻サイズと軟体部の重量の計測結果は, その前年である 2000 年に実施した計測結果とはほぼ同様であった (データ未掲載)。したがって, 本研究では 2001

Fig. 4 Sizes of the scallop shells between different water layers. Significant differences between the upper and lower layer groups at each point are indicated by asterisks (unpaired *t*-test; *, **, and *** indicate $p < 0.05$, $p < 0.005$, and $p < 0.0005$, respectively). U, upper layer; L, lower layer.

年の結果を震災前の値の一例として比較に用いることとした。さらに生殖腺指数を比較したところ、2012年から2014年における両地点の上・下層で有意な差は認められなかったが、2014年の生殖腺指数が両地点ともに2012年と2013年に比べて高かった (Fig. 5d)。また、閉殻筋指数を比較したところ、2013年の St. 2 と 2001 年の St. 1 でのみ下層における有意な減少が認められたが、その他の区では上・下層で有意な差は認められなかった (Fig. 5e)。以上の結果から、2014年の貝殻サイズ、生殖腺、閉殻筋を含めた軟体部全体の重量の低下が、下層の個体で顕著に観察された。一方、養殖地点間における成長差を比較したところ、2012年と2013年では差異がないものの2014年では貝殻サイズ、軟体部全体と生殖腺および閉殻筋の重量において差が見られた (Figs. 4a-c, 5a-e)。

養殖筏台数と生産量から見た生産性の推移 ホタテガイ養殖筏の台数は震災前の2009年、2010年ともに794台が稼働していたが、震災により2011年では0台となった。その後、2012年には317台、2013年には392

Fig. 5 Weight of the scallop organs and their indices between different water layers. U, upper layer; M, middle layer; L, lower layer; AM, adductor muscle; GI, gonad index (%), $100 \times \text{gonad weight} / \text{soft body weight}$; AMI, AM index (%), $100 \times \text{adductor muscle weight} / \text{soft body weight}$. For 2001, significant differences among the three different water layer groups at each sampling point are indicated by asterisks (Kruskal-Wallis test; *, **, and *** indicate $p < 0.05$, $p < 0.005$, and $p < 0.0005$, respectively). In 2012–2014, significant differences between the upper and lower layer groups at each sampling point are indicated by asterisks (unpaired *t*-test; *, **, and *** indicate $p < 0.05$, $p < 0.005$, and $p < 0.0005$, respectively).

Fig. 6 Transition of the total number of scallop farms (a), amount of production (b), and production efficiency (c) in Ogatsu Bay. The data were summarized by the fisheries cooperative of Ogatsu Bay from 2009 to 2014.

台と徐々に復旧し、2014年には震災以前の約66%に当たる552台にまで回復した (Fig. 6a)。また、雄勝湾全体の生産量は、養殖筏の台数の増加に伴って2012年には1,228 t、2013年には1,937 tに回復しており、震災から3年後の2014年には震災前年の76%に当たる1,979 tにまで生産量が増加した (Fig. 6b)。さらに、筏台数と生産量から養殖連1連あたりの生産性を算出した結果、震災前の2009年は25.0 kg/連、2010年は21.9 kg/連となり、震災のあった2011年を除いた過去6年間に於いて2010年が最も低い値となった。その後、震災翌年の2012年には25.8 kg/連、2013年には32.9 kg/連と上昇傾向を示したが、2014年は前年から減少に転じて25.3 kg/連となった (Fig. 6c)。

考 察

水温と成長の関係 本研究で用いたホタテガイが垂下されていた近傍の観測地点A.4, 5の間の水温分布に差異は無く、水温環境は2地点でほぼ同様であったといえる。概説すれば、両地点は2013年、2014年ともに6-7月において上層と下層の間で2-5℃程度の差が生ずる水温環境であり、2014年は全体的に2013年よりも低水温の傾向にあった。これまでの知見から、ホタテガイの好適水温範囲は5-20℃であり、⁷⁾ 高温限界は22-23℃とされている。⁸⁾ また低水温環境では、-1.5℃程度で代謝活性が下がるものの順調に生殖腺は成熟する。⁹⁾ したがって、一般的に見ればホタテガイは低温に対する耐性が高い典型的な冷水性（寒海性）の二枚貝であるといえる。しかし山本⁷⁾ が示す通り、0-20℃の範囲では水温上昇に伴って鰓纖毛運動速度を増すことから、一時的な低水温環境が摂餌量を減少させている可能性も払拭できない。北海道噴火湾における先行研究⁴⁾ では、垂下連の上層で観察される高成長は、成長期（夏季：6-8月）の表層と水深20 mにおける水温差（最大約5℃）が要因であると考察している。本研究における雄勝湾の水温差に注目すると、両年ともに表層と水深20 mの水温差が約5℃となるのは、6-7月であり、噴火湾と同程度の

水深による水温差が夏季の雄勝湾でも観測されていた。したがって、本研究においても夏季の水温の鉛直分布が、ホタテガイの成長差を引き起こす一因となっていたことが推測される。一方、丸、小原¹⁰⁾ は冬季における極度の低水温環境が、ホタテガイの代謝機能を低下させ成長の休止を引き起こすことを示している。また、嶋田ら³⁾ は冬季から春季が比較的高水温で春季ブルームの規模が大きい場合に、ホタテガイは活発に摂餌し成長することを示している。今回、雄勝湾における観測では、上・下層の水温差が2014年の冬季から春季に観測された。よって2014年の穀長に代表される上・下層での成長差は、この水温差も一因となっていたと推測される。今後は、夏季および冬季におけるホタテガイの成育状況を短期的に調査することで、夏季の上層における高水温環境、または冬季から春季の下層における低水温環境がおよぼす成長差を分割して精査してゆく必要があるであろう。

クロロフィルa濃度と成長の関係 雄勝湾で養殖されたホタテガイが、年間を通じて何をどれくらい摂餌しているかを把握することは困難である。一方、クロロフィルa濃度を指標とした植物プランクトン量の測定から、餌料環境とホタテガイの成長との関連がこれまでに示されている。¹⁾ また炭素・窒素安定同位体比を用いた解析から、ホタテガイは浮遊珪藻と底生珪藻の両者を捕食・吸収している可能性が示唆されている。¹¹⁾ したがって、養殖海域の植物プランクトン量を深度ごとに把握することは、垂下養殖におけるホタテガイの餌料環境の観点から、今後も持続的かつ効率的な養殖生産を実現させるうえで重要である。今回、雄勝湾における餌料環境の調査結果から、クロロフィルa濃度分布は、2013年と2014年では特に以下の差異が明らかになった。まず、春季ブルームが継続した期間は2013年に比べ2014年が長かった。さらに、上層でのクロロフィルa積算値は2014年が2013年に比べて高かった。以上より、クロロフィルaの濃度分布と積算値を指標として雄勝湾の餌料環境を評価すると、2013年より2014年の方が良好

であったことが推察される。また、上・下層のクロロフィル *a* 積算値を比較した場合、2013 年は餌料環境に差がなく、2014 年は上層の餌料環境が下層よりも良好であったと推測できる。このような餌料環境を背景に成育したホタテガイの 2013 年と 2014 年における成長差は、それぞれ垂下養殖を開始した時期や遺伝的背景の違いから単純比較はできない。しかし、貝殻サイズと軟体部全体および閉殻筋重量を比較した結果、2014 年の St.2 の上層部および両地点の下層部で 2013 年に比べて小型化の傾向が見られた。一方、2014 年の生殖腺指数が両地点ともに 2013 年に比べて高いことから、2014 年の成熟による生殖腺の重量増加が 2013 年よりも早期に起こっていたと考えられる¹²⁾。また、養殖地点間における貝殻サイズ、軟体部全体と生殖腺および閉殻筋重量における成長差では、2013 年では St. 1, 2 の間で差異がないものの、2014 年では St. 1 で垂下された個体が St. 2 より高成長を示していた。両地点のクロロフィル *a* 濃度の分布パターンを濃度分布図で比較すると (Fig. 3a, b)、2013 年は両地点でほぼ同様の分布パターンを示していたのに対し、2014 年では 1 月、4-5 月、7-10 月において St. 1 のクロロフィル *a* 濃度が St. 2 に比べて僅かに高い結果となっている。したがって、この 2014 年の養殖地点間の成長差は、年間を通した僅かなクロロフィル *a* 濃度の差に起因すると推測される。これに対し、上・下層における成長差は両地点の両年において明確に検出された。これは、上層におけるクロロフィル *a* 積算値が 1 年を通して高いことから、餌料となる植物プランクトンの存在量の違いが、上・下層の成長差を引き起こす一因となっているといえる。また、クロロフィル *a* 積算値は、両年の春季ブルーム時では下層で一時的に高くなったものの、それ以外の時期は年間を通じて上層で高く維持されており、こうした長期的な餌料条件の差異が上層の高成長に繋がっていると考えられる。

養殖ホタテガイの収容数と上・下層における成長の関係 天然の餌料環境に左右される二枚貝養殖では、その生産性を維持する上で、各々の海域が有する生産性の評価は重要課題である。しかし、各海域の地理的・海洋環境の特性や養殖生物を含む懸濁物食者の組成の違いから、一概に評価を下すことは容易ではない。一方、閉鎖性海域である雄勝湾は、ホタテガイに注力した養殖事業を長年にわたり継続していることから、生産性を経年観察する好条件が整っているといえる。今回得られた過去 6 年間における養殖ホタテガイ生産量の調査結果より、震災後完全に 0 になったホタテガイの養殖筏の台数と生産量は、2012 年から 2014 年まで年々増加傾向であったことが明らかになった。その反面、養殖連 1 連あたりの生産量でみた生産性 (kg/連) は、2013 年を境に減少に転じていることが示された。この生産性の低下

は、クロロフィル *a* 積算値の年間平均値が 2013 年より 2014 年が上・下層ともに高かったことから餌料環境の悪化によるものではなく、収容数の増加が餌の競合を生じさせ、生産性の低下を招いたのではないかと推察される。注目すべきことにこの傾向は、下層の個体の貝殻サイズの減少、軟体部重量の低下という形で表出することが震災後 3 年間の調査から初めて明らかとなった。すなわち、現在の雄勝湾の海洋環境において、「収容数の増加」と「下層部の良好な成長」はトレードオフの関係にあり、震災後増加し続ける収容数の増加に対して近年の下層部における餌料の競合が深刻化しつつある傾向が示された。そのため今後は、出荷サイズである 2 歳齢ホタテガイの下層の個体の貝殻サイズ、軟体部重量を注視することで、雄勝湾で収容しうるホタテガイの生産量を調整し、効率的で持続的な養殖生産を展開していくことが可能になると期待される。また近年、雄勝湾におけるマボヤの生産量が増加傾向にあることから (宮城県漁業協同組合雄勝町雄勝湾支所からの聞き取り調査による)、同じ懸濁物食者であるマボヤの生産量と垂下水深等も考慮したうえで、養殖ホタテガイの適正な収容数を推定し、漁業者にとって有益な雄勝湾の利用基準を提示していくことが重要になるであろう。

雄勝湾における養殖ホタテガイの新たな生産管理方法の提言 以上の結果より、現在の雄勝湾の餌料環境では増加する養殖施設数 (収容数) に対し、最良の成育を保障できない水準に移行していることが推察された。特に、2014 年に顕著に見られた深度による成長差、生産性の低下は過剰な垂下状態を暗示しており、均一で良好な成育に基準を置く養殖生産方式の場合は、雄勝湾が本来有する生産性から逸脱しつつある状態と判断できる。一方で、下層における小型化は単価の低下を引き起こすものの、低単価であっても生産量を増やしたいという漁業者がいることも事実であり、これらの意向に対して生産量の制限を実施することは非常に困難である。これを打開するため、本研究から得られた知見をもとに新たな養殖管理法を提言する。基本的な概念は、餌料の競合を回避させることで餌料環境の有効利用を図り、養殖ホタテガイを均一かつ良好に成長させることにある。本研究における震災後 3 年間の結果から上・下層における適正な収容数を判断すると、上層 (5-11.5 m) の利用に関しては、2014 年と同様もしくはそれ以上をさらに収容しても現在と同様の成長が期待できる。しかし、2014 年の収容数では下層 (11.5-18 m) における成長の停滞が起ることから、その収容数を 2013 年程度とする必要があると示唆される。具体的には、従来の垂下深度を用いた連に加え、上層 (5-11.5 m) のみに稚貝を垂下する連を組み合わせる利用する。これにより上層の密度を上げ、下層の密度を下げることで、高成長を保ちながら

総生産量を維持または増加させることが可能であると予想される。今後、本管理法が実際に有効であるかを検証するためには追跡調査が不可欠であり、雄勝湾における試験研究等を湾支所の方々と連携し実施・検討していく予定である。

謝 辞

調査に際して多大なご協力を頂きました、宮城県漁業協同組合雄勝町雄勝湾支所 阿部貴之氏、伊藤 進氏、伊藤文彦氏、東北大学大学院農学研究科女川フィールドセンター 平塚豊一氏と職員の皆様、東北マリンサイエンス復興支援室 金子健司氏、峰岸有紀氏をはじめとする職員の皆様に深く感謝いたします。本研究は、宮城県沿岸の養殖ホタテガイの持続的かつ効率的な湾の養殖利用法を次世代へ提言することを目的とし、東日本大震災の被災地における新たな水産業の再興を模索する東北マリンサイエンス拠点形成事業（Tohoku Ecosystem-Associated Marine Sciences: TEAMS）の一環として実施されました。東日本大震災の犠牲になられた方々に対しまして哀悼の意を表するとともに、被害に遭われました皆様に対して心よりお見舞いを申し上げます。被災地の一日も早い復興を心よりお祈り申し上げます。

文 献

- 1) 三好晃治, 品田晃良, 宮園 章, 栗原康裕, 多田匡秀, 照本昂之, 工藤 勲. 2013 年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高成長と餌料環境. 日本水産学会誌 2015; **81**: 468-470.
- 2) 小谷健二, 吉田 達, 伊藤良博, 東野敏及, 川村 要. ホタテガイ増養殖安定化推進事業地まき増殖ホタテガイ実態調査. 平成 24 年度青森県産業技術センター水産総合研究所事業報告, 青森県産業技術センター, 青森. 2014; 331-340.
- 3) 嶋田 宏, 西田芳則, 伊藤義三, 水島敏博. 噴火湾八雲沿岸における養殖ホタテガイの成長, 生残と漁場環境要因の関係. 北海道立水産試験場研究報告 2000; **58**: 49-62.
- 4) 中尾 繁. 付着生物が垂下養殖ホタテガイの成長に与える影響. 水産学シリーズ 144「ベントスと漁業」(林 勇夫, 中尾 繁編) 恒星社厚生閣, 東京. 2005; 87-100.
- 5) 中尾令子. ホタテガイの中樞神経とエストロゲンシグナリングによるビテロゲン合成の内分泌調節機構. 博士論文, 東北大学, 仙台. 2007.
- 6) Sakurai Y. An overview of the Oyashio ecosystem. *Deep Sea Res. II* 2007; **54**: 2526-2542.
- 7) 山本護太郎. 陸奥湾におけるホタテガイ増殖. 水産増養殖書, 水産資源保護協会. 1964; 77.
- 8) 丸 邦義. ホタテガイの発育初期における温度と比重耐性. 北海道立水産試験場研究報告 1985; **27**: 55-64.
- 9) 和久井卓哉. サロマ湖の水結期における生物生産状況, 流水期における沿岸海洋状況の特性と生物に与える影響に関する研究. 流水災害に関する特別研究報告書, 科学技術庁研究調整局. 1975; 263-288.
- 10) 丸 邦義, 小原昭雄. ホタテガイ *Patinopecten yessoensis* (JAY) の生態に関する研究 1 成長と年齢形. 北海道立水産試験場研究報告 1967; **7**: 72-83.
- 11) 吉田 達, 小坂善信, 篠原由香, 鹿内満春. 陸奥湾における窒素・炭素安定同位体比を用いた食物網解析. 平成 16 年度青森県水産総合研究センター増養殖研究所事業報告書, 青森県産業技術センター, 青森. 2006; 249-254.
- 12) 丸 邦義. ホタテガイの生殖に関する研究 第 1 報 養殖ホタテガイの生殖周期. 北海道立水産試験場研究報告 1976; **18**: 9-26.