

宮城県長面浦における栄養塩の供給経路と 高濃度のクロロフィル a の維持機構

金子健司^{1*†}, 奥村 裕², 原 素之¹

Supplying path of nutrients and mechanism maintaining chlorophyll a at a high concentration in Nagatsura-ura Lagoon, Miyagi, Japan

Kenji KANEKO^{1*†}, Yutaka OKUMURA² and Motoyuki HARA¹

宮城県長面浦はマガキ養殖が盛んな海域であるが、その高いマガキの生産性を支える栄養塩の供給過程や植物プランクトン生産の維持機構は不明である。本研究では、2014–2015年にかけて、栄養塩濃度と植物プランクトン生産の指標としてクロロフィル a (Chl a) 濃度の季節変化を調べることで、その維持機構を明らかにした。長面浦のChl a 濃度は3月下旬から9月まで高く、特に6月以降に顕著に高い値を示した。高いChl a 濃度が観測された3–9月は、長面浦に近接する新北上川の流量が増加することに加え、北東よりの風が吹くことにより、硝酸態窒素とケイ酸態ケイ素を多く含む河川水が長面浦に流入しやすくなるためと推測された。さらに6月以降は長面浦の底層の水温上昇と貧酸素化の影響により、海底から溶出するリン酸態リンとアンモニア態窒素濃度が上昇したことで、植物プランクトンの増殖が促進され、長期間にわたり高いChl a 濃度が維持されたと推測された。

キーワード：クロロフィル a , 栄養塩, 長面浦, マガキ養殖

Nagatsura-ura Lagoon is the main sea area producing oysters in Miyagi, Japan. However, there is little information regarding the nutrient supply process or the primary production process that maintains high productivity of oysters in the lagoon. Seasonal changes in nutrients and chlorophyll a concentration (as an indicator of primary production) were surveyed in the lagoon and the surrounding area from 2014 to 2015. Chlorophyll a concentration was found to be high from late March to September, and especially high from June to September. The amount of river water containing rich nutrients ($\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{SiO}_2\text{-Si}$) flowing from the Shin-Kitakami River into the lagoon increased from March to September due to increases in both the river flow rate and the frequency of northeast winds blowing from the mouth of the river to the lagoon. Moreover, the release rate of certain nutrients ($\text{PO}_4\text{-P}$ and $\text{NH}_4\text{-N}$) from the sediment of the sea-floor increased due to rising water temperature and decreasing dissolved oxygen concentrations at the bottom layer of the lagoon after June. It was concluded that the high chlorophyll a concentration over the long period from March to September is due to the supply of nutrients from the river and from the sediment in the lagoon.

Key words: chlorophyll a , nutrients, Nagatsura-ura Lagoon, oyster culture

2018年7月10日受付, 2019年7月4日受理

¹ 東北大学大学院農学研究科, 〒980–8572 仙台市青葉区荒巻字青葉468–1

Graduate School of Agricultural Science Tohoku University, 468–1 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980–8572, Japan

² 国立研究開発法人水産研究・教育機構東北水産研究所, 〒985–0001 宮城県塩釜市新浜町3–27–5

Tohoku National Fisheries Research Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency, 3–27–5 Shinhama-cho, Shiogama, Miyagi 985–0001, Japan

* 現所属：福山大学生命工学部海洋生物科学科, 〒722–2101 広島県尾道市因島大浜町452–10

Department of Marine Bio-Science, Faculty of Life Science and Biotechnology, Fukuyama University, 452–10 Ohama-cho, Onomichi, Hiroshima 722–2101, Japan

† kkaneko@fukuyama-u.ac.jp

はじめに

長面浦は宮城県三陸南部の追波湾の新北上川河口近くに位置する面積1.41 km²の汽水湖である (Fig. 1). この海域はマガキ *Crassostrea gigas* 養殖が盛んな海域で, 三陸海域のマガキ養殖では通常種ガキを垂下した翌年に収穫が行われるが (宮城県, 1994), 長面浦では成長がよいことから, 垂下した年に収穫が行われる (五十嵐, 2006). 過去に長面浦では, 貧酸素化が原因と考えられる養殖マガキの斃死がたびたび発生したことから (五十嵐, 2006), 海水交換などの流動特性や溶存酸素の変動に関して研究が行われてきた (岡島ほか, 2004; 高崎・田中, 2004; 金里ほか, 2005; Purwanto et al., 2005; Purwanto et al., 2007; 渡辺ほか, 2009). その結果, 追波湾と長面浦をつなぐ水路を通り長面浦に流入する新北上川の河川水が長面浦の塩分や溶存酸素などの水質環境に影響を与えていることが示唆された. しかし, マガキの生産に関わる栄養塩や植物プランクトンに関する研究は行われておらず, 高い生産性がどのように維持されているのかは明らかにされていない.

2011年に発生した東日本大震災 (以降震災と呼ぶ) は, 東北地方太平洋側各地の沿岸部で, 土砂の浸食あるいは堆積による地形の変化を引き起こし (例えば, 田中ほか, 2011; 日高ほか, 2012; 加藤ほか, 2012; 田中ほか, 2012; 有働ほか, 2013; 大村ほか, 2014), 下水処理場や港湾施設を破壊した (例えば, 酒井, 2012; 菅野, 2012; 八木ほか, 2012; 坂巻・西村, 2014). その結果, 水質, 底質, 植物プラン

クトンなどの海洋環境の変化が報告されている (例えば, 村上ほか, 2013; Kamiyama et al., 2014; 横山ほか, 2014; 石川ほか, 2015; 内記ほか, 2015; 山本ほか, 2015; Fukuda et al., 2016; Okumura and Kaga, 2017; Matsuoka et al., 2018).

長面浦は, 以前は長さ1.7 km, 幅30 m, 最大水深2 m程度の, 浅く狭い水路で追波湾とつながっていたが, 震災によって水路の入り口付近に存在した砂浜が消失し, 水路は最大幅約200 mまで大きく広がった. さらに水路の水深も深くなり, 最大水深で約8 m, 最も浅い部分でも約5 mとなった. このように, 長面浦付近でも, 震災によって水路付近の地形が大きく変化したことから, 栄養塩の大きな供給源の一つである河川水の流入状況が変化し, マガキの生産に影響を与えた可能性がある. しかし, 震災後の長面浦では水温, 塩分, 溶存酸素などについて限定的な調査がなされたものの (玖津見ほか, 2013), 新北上川からの河川水の流入状況, 長面浦の栄養塩濃度および植物プランクトン生産の指標となるクロロフィル *a* (Chl *a*) 濃度などのマガキの餌料環境は明らかにされていない.

そこで本研究では, 震災後に長面浦においてデータロガーを用いた長期連続観測と毎月の定点観測を行うことで新北上川からの河川水の流入状況を調べ, 栄養塩の供給経路 (河川水および沢水からの流入や海底からの溶出) を推定し, 栄養塩とChl *a*濃度の関係を把握した. また, 近隣のマガキ養殖場と餌料環境 (Chl *a*濃度) を比較することで, 長面浦におけるマガキ養殖場の特徴を明らかにした.

材料と方法

現地調査

2014年1月~2015年12月の間に月に1~3回の頻度で調査を行った. 長面浦の水深は北側ではほぼ3 m以浅, 南側でやや深く4~10 mであり, マガキの養殖場は水深7 m以深の湾奥部に位置し, 主に0.5~5 mの水深にマガキが垂下されている (Fig. 1). 本研究では, 沖合水や新北上川の河川水の長面浦への流入を把握するため, 長面浦の養殖場 (St. A, 同浦の中央部付近), 前面海域 (St. B, 水路の入り口付近) および沖 (St. C, 水深約43 m) において, 多項目水質計 (Rinko-Profilor JFEアドバンテック社製) を使い, 海面から海底上まで水深0.5 m間隔で水温, 塩分, 溶存酸素濃度, クロロフィル蛍光強度 (本論文ではChl *a*濃度とする) を測定した. 栄養塩を分析するため, 沖では毎月1回, 長面浦と前面海域では6~8月の高水温期を中心とした計12回の調査において, バンドン採水器により採水を行った. 長面浦と前面海域では表層 (水深0.5 m), 中層 (水深3 m), 底層 (水深6 m) の3層から, 沖では表面から海底まで水深10 m間隔の水深に加え海底から2 m上の水深でそれぞれ採水した. 採取した海水は親水性PVDFフィルター (Millex-HV, 孔径0.45 μm, メルク社製) で懸濁粒子を除去し, 栄養塩 (硝酸態窒素: NO₃-N, アンモニア態窒素: NH₄-N, リン

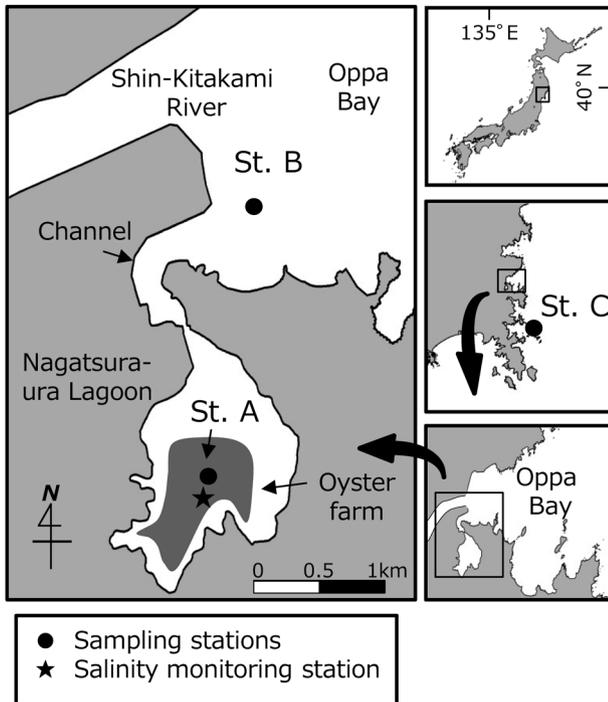


Figure 1. Map showing sampling stations in Nagatsura-ura Lagoon.

酸態リン：PO₄-P，ケイ酸態ケイ素：SiO₂-Si) の分析に供した。栄養塩はビーエルテック社製のオートアナライザー3型 (NH₄-N および SiO₂-Si)，SYNCA (NO₃-N) および QuAAtro (PO₄-P) で分析した。本機器で同一試料を12回測定した誤差はいずれの栄養塩でも4%以内であった。

さらに、長面浦への淡水の流入状況を把握するため、St.A 付近のマガキ養殖筏において多項目水質計 (DS-5 Hydrolab 社製) を水深1 mに固定し、30分間隔で塩分を連続的に測定した。

周辺環境データ

長面浦へ流入する淡水の供給起源である新北上川と沢水の流量を推定するために、新北上川の宮城県登米市登米および石巻市倉塚における流量データ (<http://www1.river.go.jp/>, 2018年3月1日) と長面浦の集水域近隣の宮城県石巻市雄勝への降水量 (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>, 2018年3月1日) を利用した。新北上川の流量は新北上川と旧北上川の分岐点の上流に位置する登米の流量から分岐後の旧北上川に位置する倉塚の値を引くことで算出した。また、近隣の宮城県女川町江ノ島の風向風速データ (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>, 2018年3月1日) について、北から東南東の風向 (以降、まとめて北東風と呼ぶ) で風速 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上となる風の出現頻度を1日ごとに算出した。

データ解析

周辺環境データを各月の上旬、中旬、下旬毎に平均した値を用いて、連続観測により得られた長面浦の表層 (水深1 m) の塩分の期間平均値を従属変数に、降水量、河川流量および東風の出現頻度を独立変数として重回帰分析を行い、長面浦の表層の塩分に及ぼす降水量、河川流量および風の影響を明らかにすることで、長面浦への淡水の供給起源を検討した。分散拡大係数 (Variance Inflation Factor) は1.1–1.3であったことから、独立変数間の相関は低く多重共線性は生じていないと判断された。

結果

長面浦の表層塩分と周辺環境の季節変化

長面浦付近の風向風速には季節的な変動パターンが認められた (Figs. 2, 3a)。2014年の1–5月中旬および11月上旬–12月の秋季から春季には、風速 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度の強い西よりの風が卓越し、北東風の頻度は20%以下であったのに対し、5月下旬以降は風速が弱まるとともに北東風の頻度がやや増加し、8–9月にかけて30–80%の高い値を示した。2015年も2014年と類似した傾向が認められたが、2–4月にかけて北東風の頻度が2014年よりもやや高い点が異なった。

長面浦付近の降水量は年による違いが大きいが、2014年、2015年とも降水量の少ない時期は1–2月で、平均 $5 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 以下であった (Fig. 3b)。一方、降水量が多い時期は2014

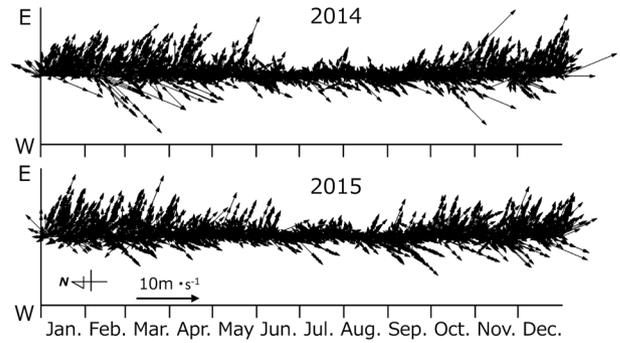


Figure 2. Seasonal changes in wind vectors at Enoshima, which is located near Nagatsura-ura Lagoon. Values refer to the data provided at <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>.

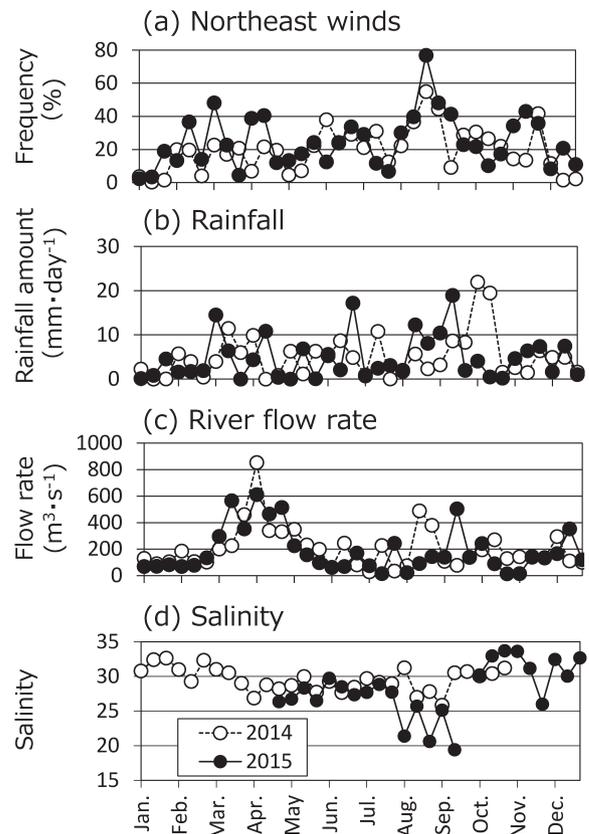


Figure 3. Seasonal changes in the frequency of northeast winds at Enoshima (a), the amount of rainfall at Ogatsu, which is located near Nagatsura-ura Lagoon (b), the flow rate of the Shin-Kitakami River (c), and the salinity of the surface layer in Nagatsura-ura Lagoon (d). Open and closed circles indicate data obtained in 2014 and 2015, respectively. Wind values were calculated using the data provided at <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>, and rainfall and flow rate values refer to the data provided at <http://www.jma.go.jp/jma/index.html> and <http://www1.river.go.jp/>, respectively.

年では3-4月および9-10月で、平均5-22 mm・d⁻¹の降水量があった。2015年では8-9月に降水量がやや多く、平均8-20 mm・d⁻¹であった。

新北上川の流量の季節変動パターンは2014年と2015年ではほぼ一致していた (Fig. 3c)。1-2月には100 m³・s⁻¹程度であったが、3月上旬から上昇し始め、4月上旬には500-800 m³・s⁻¹に達し、6月上旬に再び100 m³・s⁻¹程度まで減少した。6月以降の流量は一時的に500 m³・s⁻¹まで上昇する場合もあったが、多くは200 m³・s⁻¹以下の流量であった。

長面浦の表層 (水深1 m) の塩分の季節変動に注目すると、2014年と2015年で類似した季節変動パターンを示した (Fig. 3d)。1-3月中旬は比較的高くほぼ30以上であったが、それ以降はやや低下し25-30程度となった。8-9月中旬にかけてさらに塩分が低下し、特に2015年は塩分が20付近まで大きく低下したが、9月下旬以降はほぼ30以上の比較的高い値を維持した。

塩分の変動と環境との関係に注目すると、北東風の頻度と長面浦の塩分の低下には対応が見られ、北東風の頻度が増加すると、その直後に長面浦の表層 (水深1 m) の塩分が低下する場合が多かった (Fig. 4)。特に、2014年と2015年とも北東風が継続的に続くことが多かった8-9月にかけて、数日から数週間の長期間にわたって塩分は30以下に

低下し、一時的に20以下の値も見られた。一方で、この時期には北東風により表層の塩分が大きく低下した場合でも、北東風が収まれば数日以内に塩分が速やかに上昇することが多かった。

また、新北上川の流量が顕著に増加する3月中旬-5月中旬には、北東風の頻度は高くはないが、塩分が低下する場合が多かった (Fig. 4)。特に2014年4月上旬には北東風の頻度が低いにもかかわらず、塩分が30未満となる期間が約2週間継続した。逆に新北上川の流量が顕著に低下した2015年10月中旬-11月上旬の期間は、北東風が吹いた場合および降雨があった場合 (2015年11月2日、8時間の降水量18 mm) でも塩分の低下は見られなかった。

長面浦の表層の塩分と、降水量、河川流量および北東風の頻度を重回帰分析した結果、長面浦表層の塩分は北東風の頻度および新北上川の流量と有意な負の相関が認められたのに対し、降水量とは有意な相関は認められなかった (Table 1)。標準偏回帰係数は北東風の頻度が-0.54、流量が-0.31であり、塩分の低下には流量よりも北東風の頻度の影響が強いと判断された。

海洋環境の鉛直構造の季節変化

水温は、長面浦で4.4-28.7°C、前面海域で4.4-25.4°C、沖

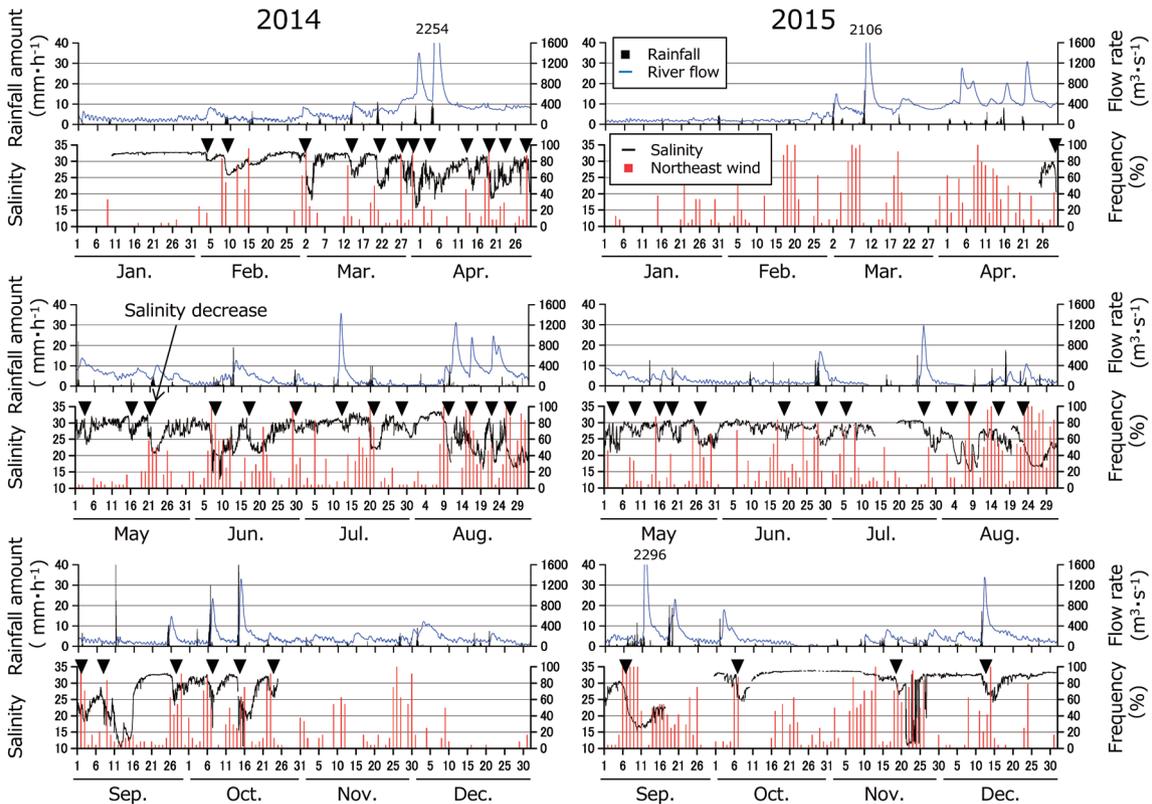


Figure 4. Temporal changes in the frequency of northeast winds, the amount of rainfall in the vicinity, the flow rate of the Shin-Kitakami River, and the salinity of the surface layer in Nagatsura-ura Lagoon (see also the legend for Fig. 3).

で4.5–21.0°Cで変化し、夏季に長面浦で最も高い水温を示した (Fig. 5a). 長面浦では3–10月の間、表層の水温が上昇することで、底層との温度差が大きくなった.

塩分は、長面浦で14.2–33.6, 前面海域で4.9–33.9, 沖で28.3–34.0で変化し、長面浦と前面海域の表層で低い場合が多かった (Fig. 5b). 前面海域では塩分32未満の海水が一時的に水深4 m付近まで観察されることもあったが、多くの期間で水深1–2 m程度までであった. 一方、長面浦では塩分32未満の海水がより下層の水深3–4 m程度まで分

布する場合が多かった.

Chl *a*濃度は、長面浦で0.2–51.3 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$, 前面海域で0.2–17.4 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$, 沖で0–9.1 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ で変化し、長面浦で高い値を示した (Fig. 5c). Chl *a*濃度はいずれの海域でも3月下旬から上昇したが、3 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ を超えたのは前面海域や沖では5月下旬までであった. 一方、長面浦では10月頃まで長期間にわたり5 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ を超える高い値が持続し、特に中層から底層にかけて10 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ を超える顕著に高い値も観測された.

溶存酸素濃度は、長面浦で0.2–19.0 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$, 前面海域で6.6–14.8 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$, 沖で6.5–16.0 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ で変化した (Fig. 5d). いずれの海域でも夏季に低く、冬季に高いが、前面海域や沖では夏季の海底付近でも6 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 程度にしか下がらないのに対して、長面浦の海底付近では5月下旬から低下し始め、6–10月下旬まで3 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ を下回る貧酸素水が出現した. その後、水温および密度成層の消失と同時に貧酸素水は消失した. つまり、長面浦では10月下旬の密度成層の消失に伴いChl *a*濃度の低下と貧酸素水の消失がほぼ同時に起こっていた.

Table 1. Summary of the multiple regression analysis of the salinity of the surface layer in Nagatsura-ura Lagoon vs. the frequency of northeast wind, flow rate of the Shin-Kitakami River, and amount of rainfall.

Variable	Standardized correlation coefficient	<i>p</i> -value
Wind	-0.54	<0.0001
Flow rate	-0.31	<0.01
Rainfall	-0.02	0.87

Adjusted $R^2=0.36$ ($p<0.0001$)

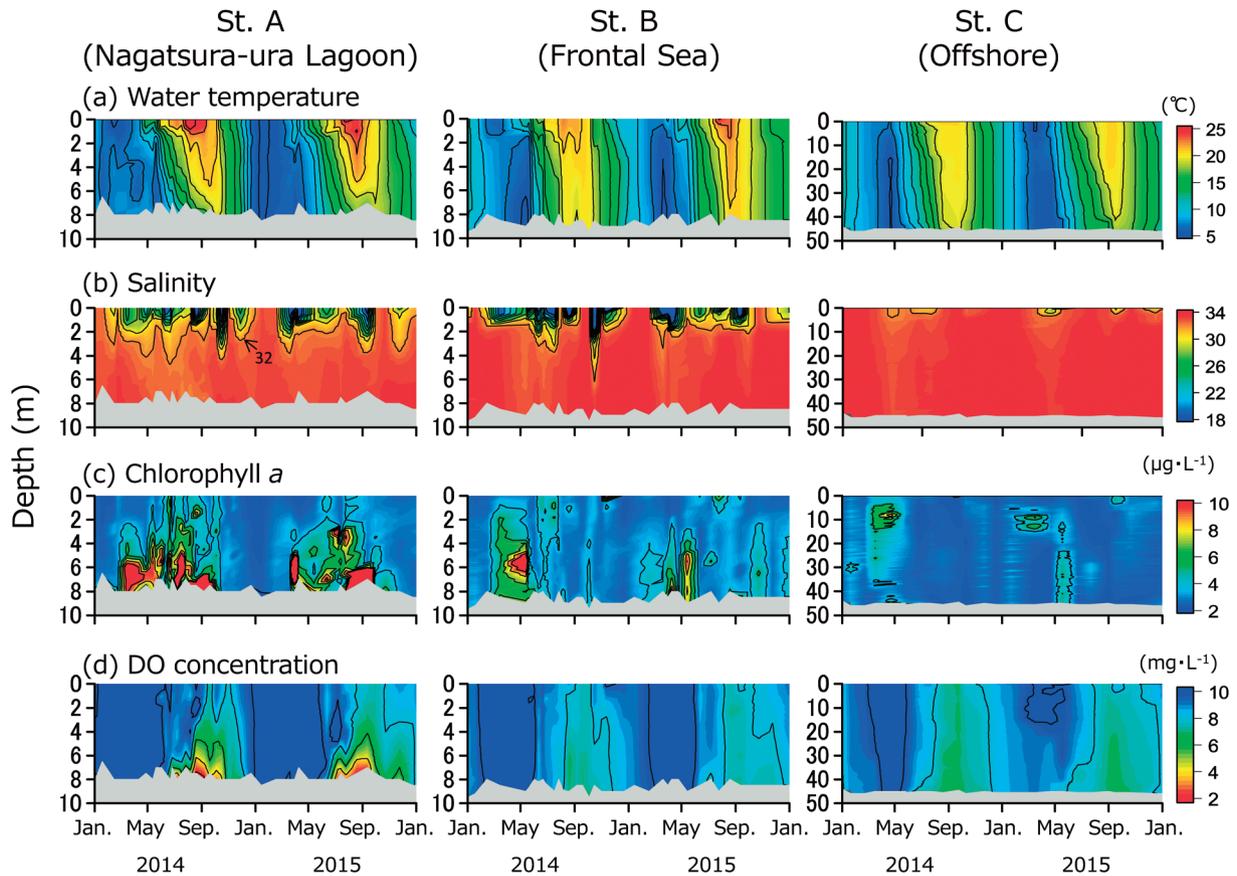


Figure 5. Seasonal changes in the vertical profile of water temperature, salinity, chlorophyll *a* concentration, and dissolved oxygen concentration at Site (St.) A (Nagatsura-ura Lagoon), St. B (frontal sea) and St. C (offshore).

栄養塩濃度の季節変化と海洋環境との関係

NO₃-N濃度とSiO₂-Si濃度は前面海域の表層で高く、NO₃-Nでは20 μmol・l⁻¹以上、SiO₂-Siでは100 μmol・l⁻¹以上の値が観測された (Fig. 6). 一方、NH₄-N濃度とPO₄-P濃度は長面浦の底層で最も高い値を示し、NH₄-Nでは5 μmol・l⁻¹以上、PO₄-Pは2 μmol・l⁻¹以上の値が観測された. 沖ではいずれの栄養塩濃度もやや低く、最大でNO₃-Nは10.1 μmol・l⁻¹、NH₄-Nは3.1 μmol・l⁻¹、PO₄-Pは0.8 μmol・l⁻¹、SiO₂-Siは21.9 μmol・l⁻¹であった.

前面海域の表層から中層にかけての栄養塩濃度の季節変動パターンは塩分の変動と対応し (Figs. 5b, 6), 低塩分の時に栄養塩濃度が高い傾向が見られた. 前面海域の表層ではいずれの栄養塩でも塩分と有意な負の相関が見られ (Fig. 7a, スピアマンの順位相関係数の検定, $p < 0.05$), 特にNO₃-NとSiO₂-Siで高い相関が見られた ($p < 0.01$). 長面浦の表層でもNO₃-NとSiO₂-Siについては、前面海域と同様に低塩分の時に高い値を示す場合が多く (Figs. 5b, 6), 有意な負の相関が見られた (Fig. 7a, スピアマンの順位相関係数の検定, NO₃-N: $p < 0.05$, SiO₂-Si: $p < 0.01$). それ以外の栄養塩については塩分との間に有意な関係は見られなかった.

底層では、長面浦内のNH₄-NとPO₄-Pの濃度は、貧酸素化が進行する6-10月下旬に高かった (Figs. 5d, 6). 長面浦の底層における栄養塩濃度は、NO₃-Nを除いて水温とは正、溶存酸素濃度とは負の有意な相関が認められ (Fig. 7b, スピアマンの順位相関係数の検定, $p < 0.05$), 特にPO₄-PとSiO₂-Siで相関が高かった ($p < 0.01$). 一方、前面海域ではいずれの栄養塩も底層では低濃度であり、NH₄-Nのみ溶存酸素濃度との間に有意な負の相関が認められた ($p < 0.05$).

考察

長面浦への淡水の流入

河川からの栄養塩の供給は近接する海域の基礎生産に影響を与える (例えば、芳村・工藤, 2003; 高木ほか, 2012). そのため、河川水の流入状況を把握することは、栄養塩の供給過程を知るうえで極めて重要である. 長面浦には直接河川の流入はないが、震災前の観測によると、北東風が吹いた場合、追波湾に流入した新北上川の河川水の湾外への拡散が抑制され、河川水が新北上川河口から長面浦の前面海域付近に滞留するため、長面浦に流入しやすくなることが報告されている (岡島ほか, 2004). 本研究の結果でも、

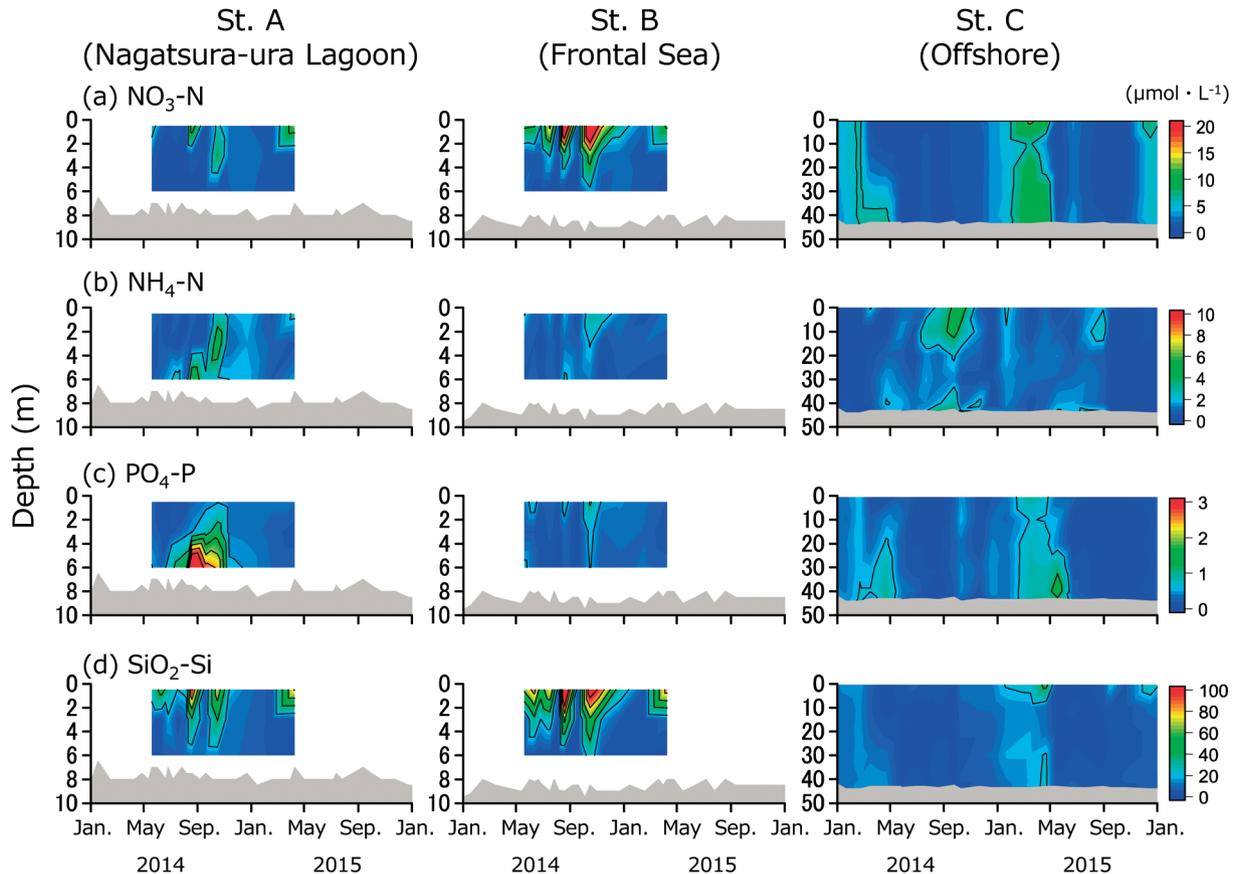


Figure 6. Seasonal changes in the vertical profile of nutrient concentrations (NO₃-N, NH₄-N, PO₄-P and SiO₂-Si) at Sts. A (Nagatsura-ura Lagoon), B (frontal sea) and C (offshore).

長面浦の表層塩分（水深1 m）は、北東風（北から東南東の風向で風速 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上の風）の頻度が増加すると低下する傾向が見られ、特に北東風が継続的に続くことが多かった8-9月にかけて、長期間にわたり30以下に低下した（Fig. 4）。さらに、重回帰分析からも北東風の頻度が表層塩分と関係していることが示唆されたことから、北東風が表層塩分の低下に影響を与える主要因となっていたと考えられた。したがって、震災は長面浦と海をつなぐ水路部を大きく変化させたが、地形の変化は長面浦への新北上川の河川水の流入状況にほとんど影響しなかったと推測された。

北東風の吹く頻度がやや低い3月下旬-5月中旬にも長面浦の表層塩分が長期間低下した（Fig. 4）。3月下旬-5月中旬は新北上川の流量が多い時期にあたり、重回帰分析からも新北上川の流量の増加が表層塩分の低下に影響を与えていることが示唆された。そのため、北東風に加えて新北上川の流量の増加によっても長面浦の前面海域に河川水が滞留し長面浦の表層の塩分が低下しやすくなると考えられた。逆に、10-2月にかけて長面浦の表層塩分は高かったが、こ

の期間は強い西よりの風が吹きやすいことに加え（湾外へ拡散しやすい）、新北上川の流量も小さいため、河川水は長面浦に流入しにくく、長期間の塩分の低下は起こりにくいと推測された。

高崎・田中（2004）は、長面浦の水量と集水面積への降水量から長面浦の全水深と水深2 mについて降雨による塩分の変化を試算した結果、降雨が長面浦の塩分低下に及ぼす影響は小さいと推測している。本調査でも、新北上川の流量が顕著に低下した2015年の秋季には、降雨があっても表層塩分（水深1 m）は低下せず、重回帰分析の結果でも長面浦の集水域への降水量は長面浦の表層塩分を説明する要因にはならなかった。さらに、長面浦の集水面積 8 km^2 （高崎・田中，2004）は北上川の集水面積 10150 m^2 （旧北上川を含む http://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen/jiten/nihon_kawa/, 2018年3月1日）の約0.08%と極めて小さく、長面浦の集水域に $100 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ の降雨があり、その全てが長面浦に流入したとしてもその平均流量は $9.3 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ であり、新北上川の2014年と2015年の平均流量 $199.4 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ の5%にも満たない。したがって、長面浦の集水域への降

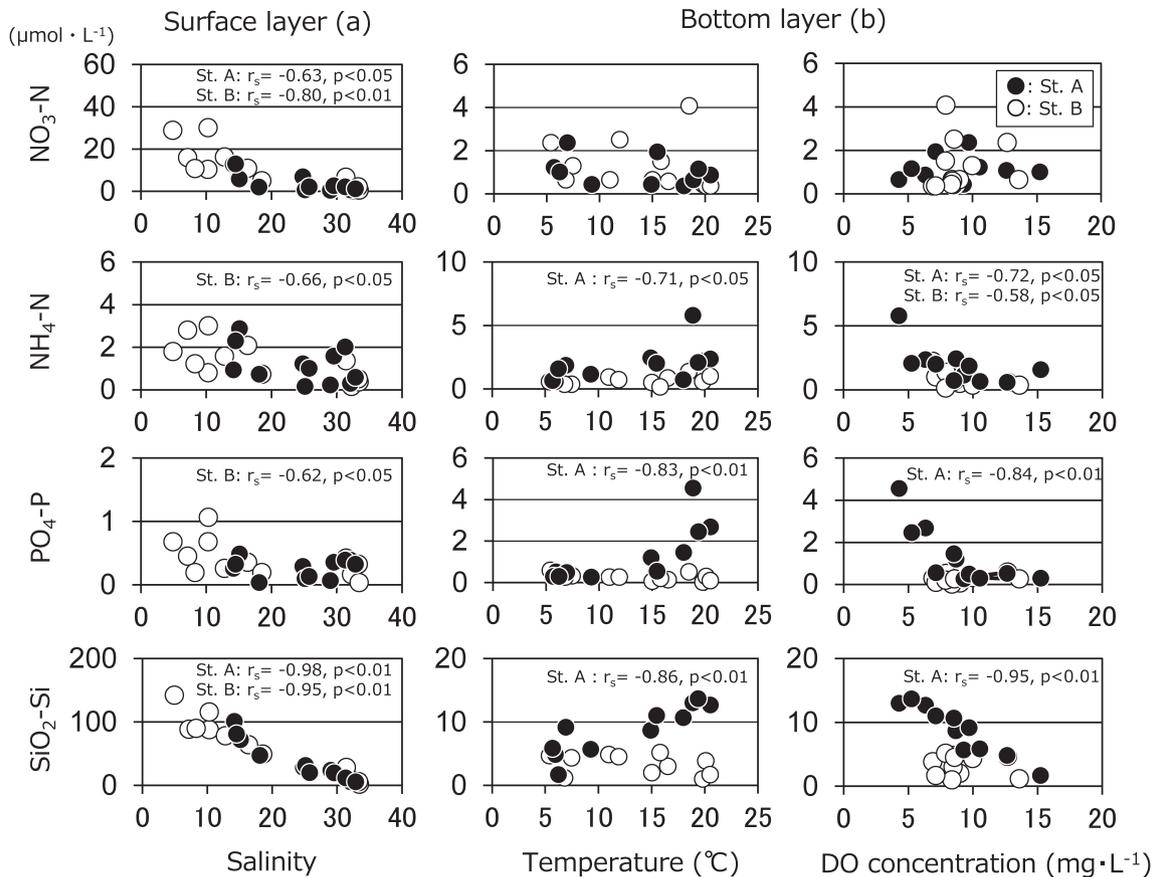


Figure 7. Relationship between salinity and nutrients ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, and $\text{SiO}_2\text{-Si}$) in the surface layer (a), and relationships among temperature, dissolved oxygen concentration, and nutrients in the bottom layer (b). Closed and open circles indicate data from St. A (Nagatsura-ura Lagoon) and St. B (frontal sea), respectively.

雨は一時的に極表層の塩分を低下させる可能性はあるが、年間を通して考えた場合、長面浦の集水域への降雨(沢水)起源の淡水の流入は少なく、流入する淡水の多くは新北上川起源と推測された。

長面浦の栄養塩の供給源

前面海域の表層では、栄養塩、特に $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{SiO}_2\text{-Si}$ が塩分低下時に高くなり、塩分との間に高い負の相関が認められた (Fig. 7a)。このことから、前面海域の栄養塩の主な供給源は外洋水ではなく新北上川の河川水であると考えられた。一方、長面浦の表層でも同様に $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{SiO}_2\text{-Si}$ が塩分との間に負の相関が認められた。長面浦に流入する淡水は、集水域への降雨(沢水)よりも新北上川の河川水が多いと推測されることから、長面浦の表層の栄養塩は前面海域から流入する新北上川が主な供給源と考えられた。

長面浦の底層では、貧酸素化が進行する6-10月下旬に $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度と $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が顕著に増加し、底層の水温と正の相関、溶存酸素濃度との間に負の相関が認められた (Fig. 7b)。したがって、水温の上昇と溶存酸素濃度の低下に伴う海底からの溶出(細川ほか, 1982)が起こっていたと推測された。加えて、調査地点の長面浦奥部ではマガキ養殖が行われており、マガキの排泄物などの有機物が海底に堆積し、水温の上昇に伴い無機化された影響も考えられた。周辺の含泥率は90%以上で、底質の化学的酸素要求量(COD)は $30\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 以上と極めて高い有機物含有量であった(金子ほか, 未発表)。そのため、有機物の無機化や溶存酸素濃度の低下により $\text{NH}_4\text{-N}$ や $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出が起こりやすい環境と考えられた(左山, 1998)。一方、底層の $\text{SiO}_2\text{-Si}$ は表層と比較して濃度は低いが、水温と高い正の相関があった (Fig. 7b)。 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ の溶出速度は高水温で促進され溶存酸素濃度には影響されないことから(神山ほか, 1997)、水温の上昇により海底の有機物が無機化され溶出したと推測された。

以上のことから、長面浦では3-9月の期間は新北上川の流量の増加や北東風が吹くことにより、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{SiO}_2\text{-Si}$ を多く含む新北上川の河川水が長面浦に流入しやすい状態になり、6-10月は海底の水温の上昇と貧酸素化の進行により、海底からは $\text{PO}_4\text{-P}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ が供給されることが明らかとなった。一般に直接河川の流入のない汽水湖では、海からの栄養塩の供給が重要であるのに対して(菅ほか, 2011; 西野ほか, 2014b)、河川の流入のある汽水湖では、海からの栄養塩の供給よりも河川と海底からの栄養塩の供給の重要性が報告されている(近藤ほか, 1994; 陸・青木, 2010; 神谷ほか, 2016)。長面浦は直接河川の流入はないが、近接する新北上川の河川水の流入によって、河川の流入のある汽水湖と同様の栄養塩の供給源があると推測された。

長面浦における餌料環境 (Chl *a* 濃度) の特徴

マガキ養殖において植物プランクトンは餌料として重要であることから(徳田ほか, 1993; 増田・杉野, 2006; 早川ほか, 2012)、Chl *a*濃度は過密養殖となっていないかマガキ養殖場を評価する上で重要な指標となる。前面海域や沖では3月下旬からChl *a*濃度が上昇し、高い値を示したのは5月までだったのに対し、長面浦では前面海域や沖と同様に3月下旬から上昇し、春季の植物プランクトンのブルームが通常終了する6月以降も10月頃まで長期間にわたり $5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ を超える高い値が持続した (Fig. 5c)。一方、長面浦付近の三陸南部海域でマガキ養殖が行われている女川湾内の観測結果では(金子ほか, 未発表)、Chl *a*濃度は本調査の沖と同様に3月から上昇したが高くても $2\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 程度であり6月には低下した。さらに、栄養塩濃度も沖と同様の傾向を示し、長面浦よりも低い場合が多かった。加えて、女川湾では長面浦のような塩分の低下や貧酸素化が認められないことから、河川水や海底からの栄養塩の供給は少なく、ほぼ外洋水から供給されていると考えられた。これに対して、長面浦は外洋水以外にも2つの大きな栄養塩の供給源があり、特に春季のブルームが終わる6月以降も10月頃まで高いChl *a*濃度が維持されたと推測された。

長面浦では10月下旬にChl *a*濃度が低下するが、ほぼ同時に密度成層の消失、底層における貧酸素水の消失および $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の低下が起こっていた (Figs. 5, 6c)。貧酸素の回復後にChl *a*濃度の低下が起こる現象は高崎・田中(2004)にも報告されており、外海との海水交換が主要因と考察されている。この時期には新北上川からの流量が低下し栄養塩の供給量が減少することに加え、密度成層の消失に伴い長面浦に流入した海水が底層へ進入したことにより貧酸素化が解消され、海底からの栄養塩の供給量も減少し、季節的な水温や光量の低下も重なることによって、植物プランクトンの増殖が収束したと推測された。

他の汽水湖でも通常ブルームが観察される春季や秋季以外でも高いChl *a*濃度を示す報告がみられるが(近藤ほか, 1994; 植田ほか, 2004; 玉井ほか, 2008; 西野ほか, 2014a)、Chl *a*濃度の高い時期はそれぞれで異なり、例えば、鳥根県の中海では冬季も高いChl *a*濃度が観測されている(近藤ほか, 1994)。汽水湖における多くの報告ではChl *a*濃度の変動要因として主に栄養塩の供給との関係が示唆されていることから(例えば、近藤ほか, 1994; 菅ほか, 2011; 西野ほか, 2014a)、長面浦では新北上川の河口との地理的な位置関係や風が栄養塩の供給に影響したように、栄養塩の供給に関わる地理、地形、水質などの様々な環境の違いによって、それぞれの汽水湖で特有のChl *a*濃度の変動パターンを示すと考えられる。

以上のように、長面浦では、主に新北上川の河川水と海底から供給される栄養塩により、通常植物プランクトンの春季ブルームが終わる6月以降も10月頃まで長期間にわた

り高いChl *a*濃度が維持されており、近隣のマガキ養殖場と比べて有利な餌料環境が形成されていると考えられた。一方で、長面浦では6-10月下旬に底層で3 mg·l⁻¹を下回る貧酸素化が確認された。震災後には貧酸素による養殖マガキへの被害は報告されていないが、長面浦では春季から秋季にかけて、表層を低塩分高水温の海水が覆うことにより密度成層が形成されやすいため、海水交換が起りにくく、貧酸素化が進行しやすい。今後さらに貧酸素化が進行した場合、貧酸素水が養殖水深まで上昇してくることも考えられることから、長面浦の溶存酸素量やその低下の要因となる底質の有機物含有量などを継続的に監視するとともに、適正なマガキの養殖密度などを明らかにすることで、安定的な養殖生産の維持につなげていくことが必要である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、宮城県漁業協同組合河北町支所神山庄一元運営委員長には多大なるご協力を頂いた。心より感謝申し上げる。本研究は文部科学省による「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）」によって行われた。

引用文献

- Fukuda, H., R. Katayama, Y. Yang, H. Takasu, Y. Nishibe, A. Tsuda and T. Nagata (2016) Nutrient status of Otsuchi Bay (northeastern Japan) following the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *J. Oceanogr.*, **72**, 39-52.
- 早川康博・伴 佳一郎・加茂 崇・江崎恭志 (2012) 博多湾における養殖マガキの餌料指標としてのクロロフィル *a* の変動。水産大学校研究報告, **61**, 1-10.
- 日高正康・涌井邦浩・神山享一・鷹崎和義・西 隆一郎・山下 善・林 健太郎 (2012) 福島県松川浦の東日本大震災津波前後での底質・地形変化。土木学会論文集B3 (海洋開発), **68**, 186-191.
- 五十嵐輝夫 (2006) 長面浦における養殖カキ斃死時の環境—2004年10月を例にして—。宮城県水産研究報告, **6**, 41-50.
- 石川哲郎・日下啓作・押野明夫・西谷 豪・神山孝史 (2015) 東日本大震災後の宮城県気仙沼における *Alexandrium* 属の栄養塩細胞とシストの分布パターンおよび二枚貝類の毒化。日本水産学会誌, **81**, 256-266.
- 神谷 宏・菅原庄吾・嵯峨友樹・野尻由香里・江角敏明・神門利之・大城 等 (2016) 汽水湖穴道湖における高頻度現場調査から観測された堆積物からの窒素・リンの溶出。陸水学雑誌, **77**, 305-313.
- 神山孝史・玉井恭一・辻野 陸 (1997) 海底堆積物からの栄養塩再生産過程に及ぼす底質・溶存酸素条件。南西水研研報, **30**, 209-218.
- Kamiyama T., H. Yamauchi, S. Nagai and M. Yamaguchi (2014) Differences in abundance and distribution of *Alexandrium* cysts in Sendai Bay, northern Japan, before and after the tsunami caused by the Great East Japan Earthquake. *J. Oceanogr.*, **70**, 185-195.
- 金里 学・田中 仁・高崎みつる・山路弘人 (2005) 入退潮に伴う長面浦の水質変動機構に関する現地観測。水工学論文集, **49**, 1261-1266.
- 加藤史訓・野口賢二・諏訪義雄・坂上敏彦・佐藤祥昭 (2012) 津波による地形変化に関する現地調査。土木学会論文集B3 (海洋開発), **68**, 174-179.
- 近藤邦男・清家 泰・橋谷 博 (1994) 汽水湖中海における栄養塩類および植物プランクトンの鉛直分布を支配する塩分躍層の役割。陸水学雑誌, **55**, 47-60.
- 玖津見将史・寺田一美・内田 理・福江潔也・長 幸平 (2013) 宮城県石巻市長面浦における東日本大震災後の水質特性。土木学会論文集B2 (海岸工学), **69**, 1096-1100.
- Matsuoka, K., Y. Ikeda, S. Kaga, Y. Kaga and T. Ogata (2018) Repercussions of the Great East Japan Earthquake tsunami on ellipsoidal *Alexandrium* cysts (Dinophyceae) in Ofunato Bay, Japan. *Mar. Environ. Res.*, **135**, 123-135.
- 増田恵一・杉野雅彦 (2006) 兵庫県相生養殖漁場における漁場環境とマガキの育成。兵庫県立農林水産技術総合センター研究報告, **39**, 17-22.
- 宮城県 (1994) 「宮城県の伝統的漁具漁法VII 養殖編 (かき)」。宮城県, 55 pp.
- 村上明宏・堺 茂樹・村上和男・中村由行・岡田知也・高尾敏幸・柴木秀之 (2013) 東北太平洋沖地震津波後の大船渡湾の水質・底質の現状。土木学会論文集B2 (海岸工学), **69**, 496-500.
- 西野康人・佐藤智希・塩本明弘・谷口 旭 (2014a) オホーツク沿岸海跡湖能取湖における一次生産特性—サイズ別クロロフィル *a* と溶存態無機窒素の動態—。東京農大農学集報, **59**, 11-20.
- 西野康人・佐藤智希・谷口 旭 (2014b) 北海道東部の海跡湖能取湖における海洋環境—水温・塩分・溶存酸素・栄養塩の動態—。Eco-Engineering, **26**, 3-9.
- 岡島直也・田中 仁・金里 学・高崎みつる・山路弘人 (2004) 長面浦における溶存酸素の変動機構。海岸工学論文集, **51**, 936-940.
- Okumura Y. and S. Kaga (2017) Retrospective analysis of phytoplankton assemblages on the Iwate coast before and after the 2011 tsunami using cryopreserved DNA samples. *Fish. Oceanogr.*, **26**, 234-250.
- 大村森香・下園武範・佐藤慎司 (2014) 福島県勿来海岸における東北地方太平洋沖地震津波による大規模土砂移動と海岸地形変化。土木学会論文集B2 (海岸工学), **70**, 1416-1420.
- Purwanto B. S., 金里 学・金山 進・田中 仁・高崎みつる・山路弘人 (2005) 感潮海跡湖としての長面浦の流動特性について。海岸工学論文集, **52**, 871-875.
- Purwanto B. S., 田中 仁・金山 進・高崎みつる・山路弘人 (2007) 南三陸長面浦における海水交換機構に関する研究。海岸工学論文集, **54**, 1016-1020.
- 酒井敬一 (2012) 宮城県における水産業の被害状況と復興への取り組み。日本水産学会誌, **78**, 285-287.
- 坂巻隆史・西村 修 (2014) 震災による宮城県沿岸における生態系の変化。土木学会論文集B3 (海洋開発), **70**, 31-36.
- 左山幹雄 (1998) 堆積物表層における物質循環と栄養塩の溶出。「沿岸の環境圏」平野敏行監修。フジ・テクノシステム, 東京, 104-116.
- 細川恭史・三好英一・堀江 毅 (1982) 沿岸底泥からの栄養塩の溶出過程のモデル化。海岸工学講演会論文集, **29**, 570-574.
- 菅 夏海・柴沼成一郎・山田俊郎・檜垣直幸・門谷 茂 (2011) 亜寒帯汽水湖の火散布沼 (北海道) における栄養塩の時空間分布とその起源。海の研究, **20**, 19-36.
- 高木秀蔵・清水泰子・草加耕司・藤沢節茂・藤原宗弘・渡邊康憲・藤原建紀 (2012) 河川から間欠的に供給される栄養塩によるノリ色調の回復。日本水産学会誌, **78**, 246-255.
- 菅野高弘 (2012) 平成23年東北地方太平洋沖地震による港湾施設被害。コンクリート工学, **50**, 30-50.
- 高崎みつる・田中 仁 (2004) 南三陸長面浦における溶存酸素濃度の変動に関する現地調査。水工学論文集, **48**, 1411-1416.
- 玉井 翠・藤原広和・久保田光彦・長崎勝康・濱田正隆・楠 昌文 (2008) 小川原湖の水域環境およびヤマトシジミの発生について。水工学論文集, **52**, 1255-1260.
- 田中 仁・真野 明・有働恵子 (2011) 2011年東北地方太平洋沖地震津波による海浜地形変化。土木学会論文集B2 (海岸工学),

- 67, 571–575.
- 田中 仁・Adityawan M. B.・真野 明 (2012) 東北地方太平洋沖地震津波後の七北田川河口閉塞とその後の地形変化. 土木学会論文集B2 (海岸工学), **68**, 601–605.
- Taniuchi Y., T. Watanabe, S. Kakehi, T. Sakami and A. Kuwata (2017) Seasonal dynamics of the phytoplankton community in Sendai Bay, northern Japan. *J. Oceanogr.*, **73**, 1–9.
- 徳田真孝・濱田弘之・神菌真人・江藤拓也 (1993) 豊前海における養殖カキの特性と環境要因との関係. 福岡水技研報, **1**, 155–163.
- 内記公明・山田美和・加賀新之助・渡邊志穂・神山孝史・加戸隆介・緒方武比古・難波信由・林崎健一・山田雄一郎・山下哲郎 (2015) 2011年東北地方太平洋沖地震により発生した津波による岩手沿岸内湾域の底質変化. 日本水産学会誌, **81**, 447–455.
- 有働恵子・田中 仁・真野 明・武田百合子 (2013) 東北地方太平洋沖地震津波による宮城県仙台湾南部海岸の海浜変形特性. 土木学会論文集B2 (海岸工学), **69**, 1391–1395.
- 植田真司・近藤邦男・築地由貴・清家 泰・三田村緒佐武 (2004) 汽水湖尾駁沼における植物プランクトンの出現特性. 陸水学雑誌, **65**, 27–35.
- 渡辺一也・田中 仁・金山 進・Purwanto B. S. (2009) 感潮狭水路水深がラグーン内水位応答および流入塩分に及ぼす影響. 土木学会論文集B2 (海岸工学), **65**, 416–420.
- 八木 宏・杉松宏一・中山哲巖・西 敬浩・奥野正洋・小池 哲・林 健太郎・五十嵐雄介 (2012) 東北地方太平洋沖地震津波による女川漁港の漁港施設における被災メカニズムの検討. 土木学会論文集B2 (海岸工学), **68**, 1346–1350.
- 山本光夫・加藤孝義・多部田茂・北澤大輔・藤野正俊・小豆川勝見・松尾基之・田中 潔・道田 豊 (2015) 東日本大震災後の釜石湾における海域環境変化. 日本水産学会誌, **81**, 243–255.
- 横山勝英・原 良輔・河野益近・島田克也・吉永郁生 (2014) 気仙沼湾における海底堆積物に対する津波の影響. 土木学会論文集B2 (海岸工学), **70**, 496–500.
- 芳村 毅・工藤 勲 (2003) 噴火湾における河川からの栄養塩負荷量およびそれらが湾内の基礎生産に与える影響. 海の研究, **12**, 185–193.
- 陸 真姫・青木伸一 (2010) 猪鼻湖における水質と栄養塩動態の季節変化に関する研究. 土木学会論文集B2 (海岸工学), **66**, 976–980.