

港湾水および下水処理放流水に含まれる溶存態無機窒素が 播磨灘北東部沿岸のノリ漁場に与える影響

原田和弘^{1†}, 阿保勝之², 川崎周作³, 竹迫史裕³, 宮原一隆¹

Influence of DIN derived from ports and treated sewage effluent on nori (*Pyropia*) farms of the northeastern part of Harima Nada

Kazuhiro HARADA^{1†}, Katsuyuki ABO², Shusaku KAWASAKI³, Fumihito TAKESAKO³ and Kazutaka MIYAHARA¹

播磨灘北東部沿岸（兵庫県明石市から加古郡播磨町沖）のノリ漁場周辺における溶存態無機窒素（DIN）の動態とノリの品質を調査した。当海域の表層DIN濃度は、港湾内や下水処理水放流口周辺で高い傾向にあった。また、表層DIN濃度の水平分布は海岸線に沿った岸寄りの東西方向に比較的高い濃度域が広がり、沖合域は低かった。塩分やアンモニア態窒素濃度の観測結果から、調査海域東部沿岸に位置するノリ漁場周辺では、下げ潮時（当海域では東流）に港湾からの流出水および下水処理水からの栄養塩供給を受けている可能性が示唆された。また、数値シミュレーション結果でも、放流された下水処理水は下げ潮時に東の方向に流れ、ノリ漁場に到達すると判断された。さらに、同漁場のノリの色調は、港湾流出水や下水処理水等の影響を受けやすい沿岸側で良好であることが判明した。

キーワード：Pyropia, DIN, 港湾水, 下水処理水, 産業排水, ノリ養殖

Dynamics of dissolved inorganic nitrogen (DIN) in relation to the color of fresh nori (*Pyropia*) were examined around nori farms in the coastal waters of the northeastern part of Harima Nada (off the coast of Akashi City and Harima Town in Hyogo Prefecture). DIN concentration in surface water was higher inside the ports due to industrial effluent and rivers, and around the outfall of treated sewage effluent. Horizontal distribution of high DIN concentration in surface water extended in the east-west direction along the coastline. On the other hand, offshore concentrations were lower. The dynamics of salinity and $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration suggest that during the ebb tide (eastward flow in this area), discharge from ports and treated sewage effluent in the western area can influence the coastal nori farms east of this study area. Also, the numerical simulation method results showed that DIN supplied from the treated sewage effluent flowed eastward during the ebb tide, and reached the coastal nori farms. The quality of fresh nori produced in the eastward coastal nori farms from this study area was better than that from the offshore area, presumably influenced by the nutrients discharged from the ports and the treated sewage effluent.

Key words: *Pyropia*, DIN, water of ports, treated sewage effluent, industrial effluent, Nori culture

はじめに

全国の2014年における板のり生産量は約70.6億枚、生産金額は約690億円に上っている（くろのりとして記載され

た数値、農林水産省大臣官房統計部、2016）。また、秋谷（2006）は、のりは加工や流通分野での付加価値を含めれば、3,000億円前後の産業を形成していると推定している。

2017年7月9日受付、2017年12月4日受理

¹ 兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センター、〒674-0093 兵庫県明石市二見町南二見22-2

Fisheries Technology Institute, Hyogo Prefectural Technology Center for Agriculture, Forestry and Fisheries, Akashi, Hyogo 674-0093, Japan

² 国立研究開発法人水産研究・教育機構瀬戸内海区水産研究所、〒739-0452 広島県廿日市市丸石2-17-5

National Research Institute of Fisheries and Environment of Inland Sea, Japan Fisheries Research and Education Agency, 2-17-5 Maruishi, Hatsukaichi, Hiroshima 739-0452, Japan

³ 兵庫県漁業協同組合連合会のり海藻部兵庫のり研究所、〒674-0093 兵庫県明石市二見町南二見22

Hyogo Prefectural Federation of Fisheries Co-operative Associations, Hyogo Nori Institute, Akashi, Hyogo 674-0093, Japan

† kazuhiro_harada@pref.hyogo.lg.jp

このように、のりは外食、中食産業等の業務用や家庭用および贈答用として広く流通しており、それを支えるノリ (*Pyropia*) 養殖は国内の水産業において重要な漁業種類である。養殖ノリの生産技術はある程度成熟しているものの、その生産量および品質は気候や海況等の環境変化の影響を受けやすい。瀬戸内海では、海域の貧栄養化 (Yamamoto, 2003; 藤原, 2011; 山本, 2015) に伴い、特に溶存態無機窒素 (DIN) の不足で生じるノリの色落ちに起因する生産不調が、しばしば発生しており (鷺尾ほか, 2005; 藤原ほか, 2009; 高木ほか, 2009; 和西ほか, 2009), その影響は漁業者のみならず、のりの加工、流通業界にも波及する大きな課題と考えられる。海域の栄養塩濃度の変動に与える要因は様々であるが、貧栄養化した状況にある近年の瀬戸内海のノリ漁場では、河川水、産業排水および下水処理水等の陸域負荷が、重要な DIN 供給源になっていると考えられる (川口・高辻, 2010; 阿保ほか, 2012; 高木ほか, 2012a, 2012b, 2013; 原田・宮原, 2017)。ノリの色落ちの対応策として、瀬戸内海や有明海のノリ漁場では、ダム放流 (井山, 2007; 岩本・難波, 2009; 原田ほか, 2013), 臨海部の下水処理施設における栄養塩管理運転 (ここでは、法令による規制値内での窒素排出量増加運転を指す, 古賀, 2008; 原田ほか, 2015; 宮川ほか, 2015), 漁場への施肥 (川村ほか, 2011; 池脇ほか, 2016), 海底耕耘およびため池からの放流等 (反田・原田, 2011), 人為的手法による DIN 供給が模索されている。

本研究では、産業排水や河川水等の陸域負荷が流入している港湾水および下水処理水に由来する DIN が、瀬戸内海東部に位置する播磨灘北東部沿岸 (兵庫県明石市から加古郡播磨町沖) のノリ漁場を与える影響を、複数手法の現場調査ならびに数値シミュレーションによって明らかにするとともに、同漁場のノリの色調を調査することによって、それら窒素源からの DIN 供給がノリの生産性を与える効果を検証した。なお、本報では統計資料の表記や加工品を対象とする場合は「のり」、生物として扱う場合は「ノリ」と記す。

材料と方法

産業排水や河川水が流入する港湾からの流出水、および下水処理施設の放流水等、沿岸海域への窒素供給源がノリ漁場の近隣に存在する、播磨灘北東部沿岸 (兵庫県明石市から加古郡播磨町沖) を調査対象海域とした (Fig. 1)。なお、この海域内には兵庫県の区画漁業権漁場が3ヶ所設置されており (ノリ漁場区第9, 10, 12号), ノリ養殖が営まれている。

広域調査

2014年5月–2015年3月の毎月1回、播磨灘北東部沿岸の26定点 (Fig. 2-a) で、水塊の移動が比較的少なく、港湾水や下水処理水の流出状況が把握しやすいと考えられる潮止まり前後の時間帯に、CTD (JFE アドバンテック社製, RINKO-Profilier ASTD102) を用いて表層から海底面までの

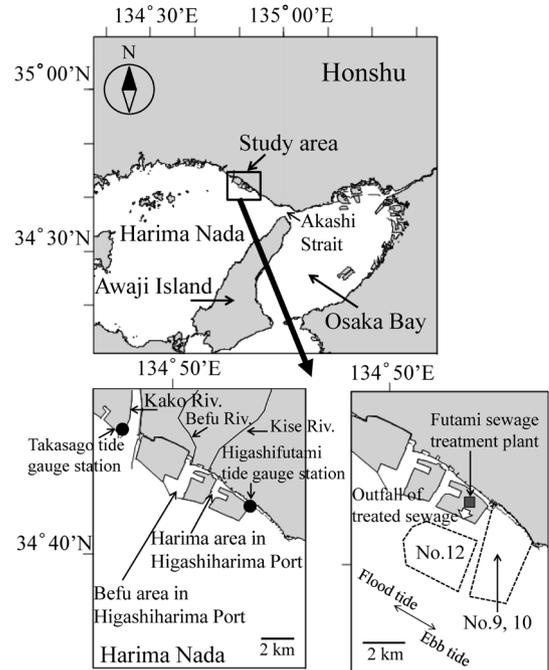


Figure 1. Location of the study area in the northeastern part of Harima Nada. Broken lines show the nori farming areas.

塩分を計測した。また、同時に DIN 分析用に表層水を採取した。2014年5月–2016年3月の毎月上旬には、栄養塩管理運転に伴う処理水の変化を調べるため、明石市二見浄化センター (以後、二見浄化センターとする, Fig. 1) で、放流直前の水を採取した。いずれの採水試料も実験室に持ち帰り、ガラス濾紙 (アドバンテック東洋社製, GA-200) を用いて濾過した後、DIN 分析に供した。分析は、真鍋・反田 (1986) に準じ、栄養塩自動分析装置 (BLTEC 社製, QuAAtro2-HR) を用いて、アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$), 亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$), 硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) を計測し、それらの合計値を DIN 濃度とした。

停泊連続調査

2015年10月29日, 2016年1月26日, 2月26日および3月28日の計4回, Fig. 2-bに示した定点 (StD) に調査船を停泊させて、上げ潮 (調査海域では西流) から下げ潮 (東流) への転流時を含む時間帯 (おおむね9時30分–16時) の30分ごとに、CTDを用いて表層から海底面までの塩分を計測した。また、同時に DIN 分析用に表層および底層水 (海底上1 m) を採取した。DIN は前述の方法により分析した。

下水処理水放流口周辺のライン調査

2016年10月19日, 11月17日および2017年2月28日の計3回, 二見浄化センター処理水放流口周辺のごく沿岸域に東西方向に設けた8定点 (Fig. 2-c) で、同一日の上げ潮および下げ潮の時間帯にそれぞれ1回調査した。いずれも、流向の最下流側の定点から上流側に向けて調査を進め、各定点ではCTDを用いて表層から海底面までの塩分を計測し

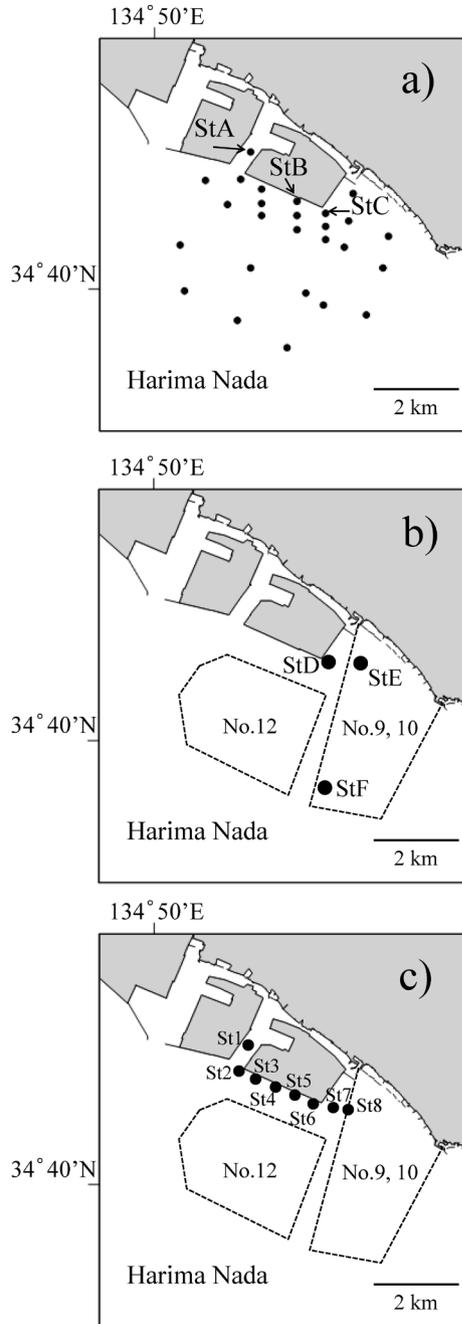


Figure 2. a) Solid circles indicate the sampling stations around the nori farming areas from May 2014 to Mar. 2015. b) Location of the sampling stations. StD: Station of continuous measurement of salinity and nutrients on Oct. 29, 2015, Jan. 26, Feb. 26, and Mar. 28, 2016. StE and StF: Observation stations for the color of fresh nori from 2016 to 2017. Broken lines show the nori farming areas. c) Observation stations for salinity and nutrients on Oct. 19, Nov. 17, 2016 and Feb. 28, 2017. Broken lines show the nori farming areas.

た. また, 同時にDIN分析用に表層および底層水(海底上1 m)を採取した. DINは前述の方法により分析した.

ノリの色調調査

植物の葉に含まれるクロロフィル濃度を簡便かつ非破壊的に測定できる葉緑素計は, 農作物の栄養診断等に用いられている. コニカミノルタ製の葉緑素計は, 農林水産省農産園芸局の土壌作物体分析機器開発事業 (Soil and Plant Analyzer Development, 略称SPAD)において開発され, 本測定器に葉を挟むだけで瞬時にクロロフィル濃度と正の直線関係を示す指数であるSPAD値を測定することができる (只木・木下, 1988; 陶山・作田, 2009). 生ノリまたは乾のりを測定したSPAD値は, それらのクロロフィル量と相関があると報告されており (藤澤ほか, 1999; 長濱ほか, 2004), 葉緑素計は簡便にノリ葉状体の色調を評価するのに適していると考え, 以下の手法によりノリの色調を計測した.

ノリ漁場区第9, 10号内 (Fig. 2-b)の沿岸側 (StE)と沖合側 (StF)で, 2016年度ノリ漁期の本張りから冷凍網に網替えるまでの期間, ノリの葉状体を定期的に採取して, その色調を葉緑素計 (コニカミノルタ製, SPAD-502)を用いて計測した (SPAD値). また, 同時に現場の表層水を採取して, 前述の方法によりDIN分析に供した. 採取した葉状体の先端付近から切り取った試料は, カバーガラス上に広げ, 2枚重ねて置き, 上からカバーガラスをかけた後, 葉緑素計を用いてそれぞれの定点試料について5検体のSPAD値を計測した. なお, ノリの色調については, 各調査時の平均値をWelch's *t*-testで比較した.

下水処理水の動向に関する数値シミュレーション

中山ほか (2009) および中山 (2011) のモデルをベースとした三次元物理-低次生態系結合モデルを用いて下水処理水の動向を計算した. 流動モデルとしてはPrinceton Ocean Model (Mellor, 1998)を使用し, 低次生態系の計算にはKKYSモデル (Kawamiya et al., 1995)を組み込んでいる. 計算対象海域は播磨灘北東部沿岸とし, 計算領域は100 mメッシュ (計算格子数236×220), 鉛直10層とした. 東西および南側の開境界条件には瀬戸内海全域モデル (中山ほか, 2009)の計算結果 (水温, 塩分, 水位, 流速)を与え, 気象条件はメソ数値予報モデルの地上データ (風向, 風速, 気温, 相対湿度) および大阪管区気象台の地上気象観測データ (全天日射量)を用いた. また, 二見浄化センターからの流入負荷量は2009年の実績に基づき, 放流量 $32,970 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$, TN濃度 $16.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN負荷量 $0.55 \text{ tonN} \cdot \text{day}^{-1}$ の条件で設定した. なお, 本研究では下水処理水の短期的な動向把握を目的としたため, DINは保存物質として計算した.

結果

広域調査

表層のDINと $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は, 東播磨港播磨港区 (StA),

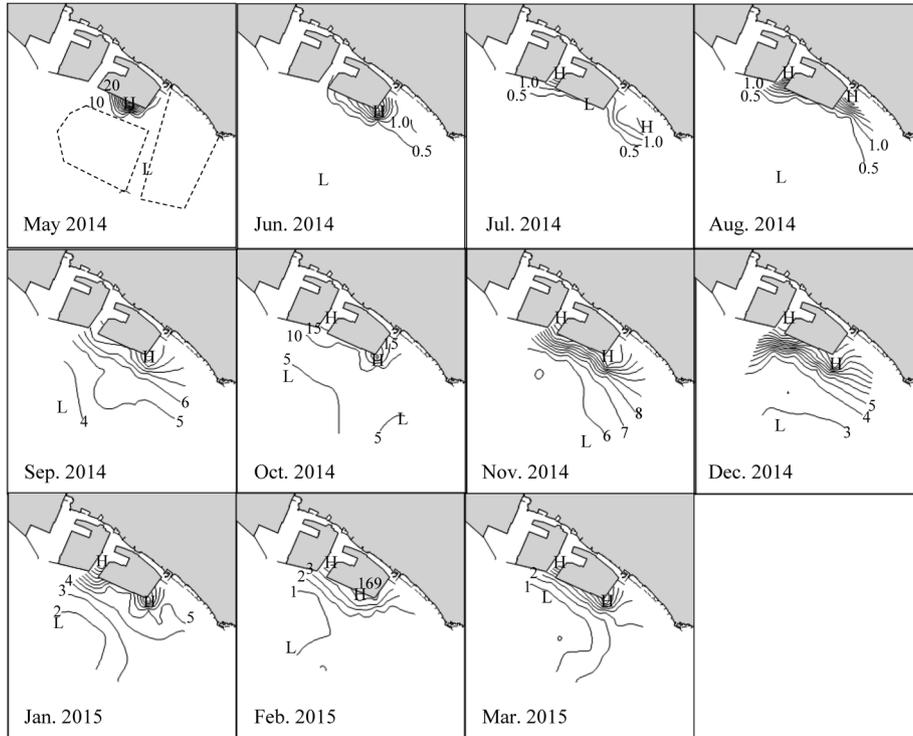


Figure 3. Horizontal distributions of DIN concentration (μM) in surface water from May 2014 to Mar. 2015. Broken lines show the nori farming areas. The data for station StB in Feb. 2015, is excluded in the isolines for high concentration. “H” or “L” in the figure indicate high or low DIN concentration, respectively.

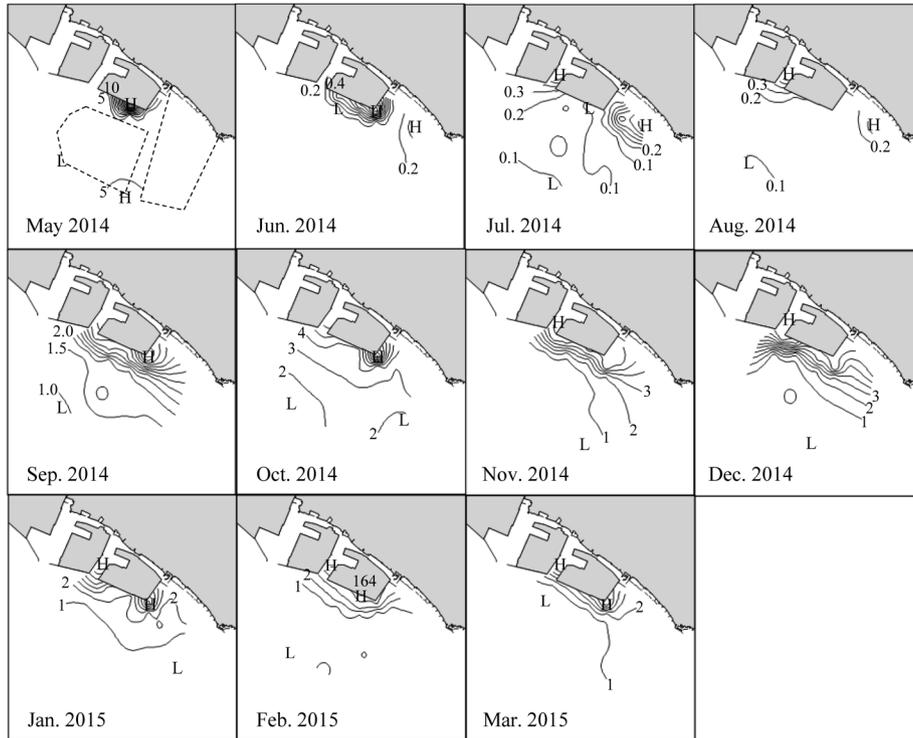


Figure 4. Horizontal distributions of $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration (μM) in surface water from May 2014 to Mar. 2015. Broken lines show the nori farming areas. The data for station StB in Feb. 2015, is excluded in the isolines for high concentration. “H” or “L” in the figure indicate high or low $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration, respectively.

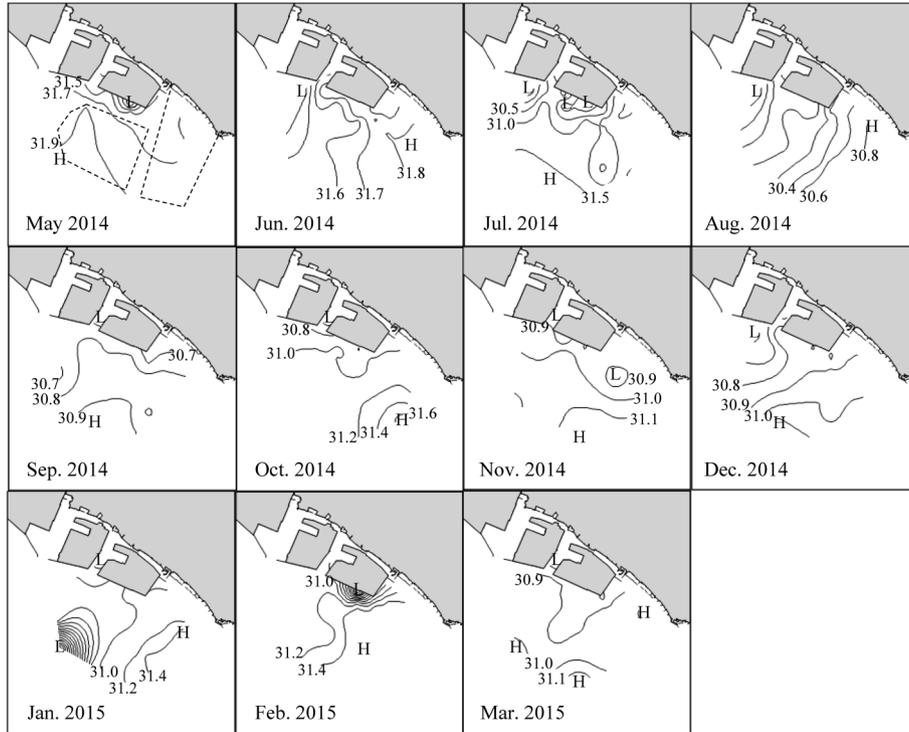


Figure 5. Horizontal distributions of salinity in surface water from May 2014 to Mar. 2015. Broken lines show the nori farming areas. “H” or “L” in the figure indicate high or low salinity, respectively.

下水処理水放流口直近 (StB) および StC で高い値を示す場合が多かった。濃度分布は、概ね海岸線に沿った沿岸の東西方向に高い濃度域が広がり、沖合の濃度は低い傾向にあった (Figs. 3, 4)。塩分は、StA および調査海域の西寄りの定点で低い傾向にあった (Fig. 5)。

二見浄化センターでは、2014 および 2015 年度ともおおむね 10 月中旬–4 月下旬に栄養塩管理運転が実施された。放流直前の処理水の DIN 濃度は、おおむね栄養塩管理運転期間中に高くなる傾向が認められ、DIN の構成も $\text{NH}_4\text{-N}$ 主体へと大きく変化しており、二見浄化センターにおける運転方法 (硝化抑制運転) に伴う変化が顕著に現れていた (Fig. 6)。

停泊連続調査

調査海域近隣の東二見検潮所 (Fig. 1) における調査時の潮位変化 (<http://hyogo-kouwan.info/jsp/>, 2017 年 7 月 7 日) を Fig. 7-a に示した。いずれの調査でも下げ潮時の時間帯には、表層、底層とも上げ潮時に比べて塩分が低下し、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が上昇する傾向が認められた。表層の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は、上げ潮から下げ潮の転流時に急激に上昇するのが、すべての調査で確認された (Fig. 7-b)。また、塩分と $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度には有意な負の相関があった (Fig. 8, *Pearson* の相関係数, $P < 0.001$)。

下水処理水放流口周辺のライン調査

3 回の調査とも同様の傾向を示したため、ここでは代表例

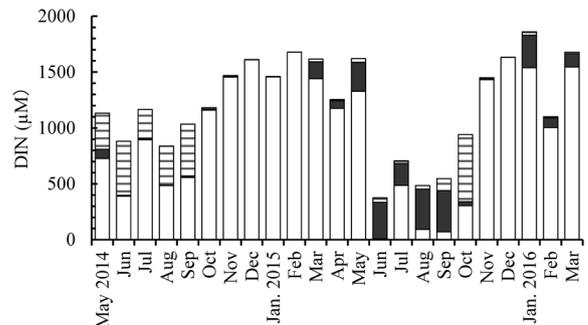


Figure 6. DIN concentration in treated sewage effluent of the Futami sewage treatment plant. Open, solid, and striped bars respectively indicate $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations.

として 2016 年 11 月 17 日の調査結果を示す。上げ潮時における定点ライン上の塩分鉛直分布は、St6, 7 の辺りに塩分フロントが明確に認められたが、下げ潮時にそのような分布は確認できなかった (Fig. 9)。また、St7, 8 では表層、底層とも上げ潮時に塩分が高く、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が低い傾向にあったが、下げ潮時は塩分が低下して $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が上昇する状況に転じた (Fig. 10)。一方、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ のような顕著な変化傾向は認められなかった。また、東播磨港播磨港区内 (St1) では、他の定点に比べ比較的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高く、塩分が低い傾向にあった (Fig. 10)。

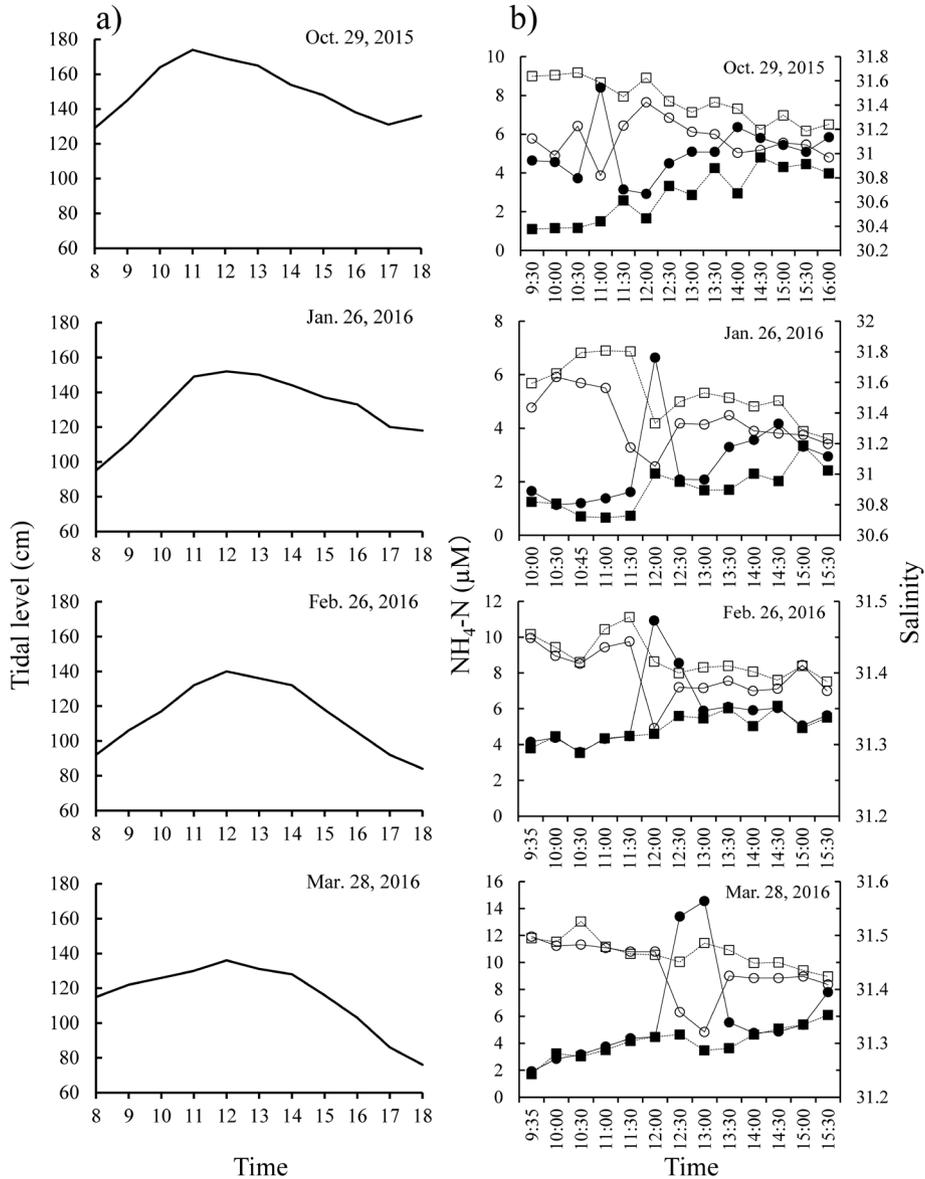


Figure 7. a) The tidal level of Higashifutami tide gauge station. b) Salinity and $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration at StD. Solid circles indicate $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration of surface water. Solid squares indicate $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration of bottom water. Open circles indicate salinity of surface water. Open squares indicate salinity of bottom water.

ノリの色調調査

DIN濃度は、沖合側 (StF) に比べて、沿岸側 (StE) で高い傾向を示した (Fig. 11). 調査期間中のノリの色調 (SPAD値) の平均値は、StEでは8.4–14.1, StFは0.6–11.9を示した (Table 1). また、各調査時のStEとStFのSPAD値の平均値をWelch's *t*-testで比較した結果、2016年12月26日を除いて、いずれの調査時ともStEの値は、StFよりも有意に高い傾向が認められた (Table 1).

下水処理水の動向に関する数値シミュレーション

二見浄化センターから放流された処理水の動向 (DIN) の一例をFig. 12に示した. なお、例示した日は日潮不等が

大きく、昼間の下げ潮および上げ潮時の潮位差は小さい. 下げ潮時に処理水は東向きに流れ、ノリ漁場区第9, 10号に波及していた. 処理水は放流口南側のノリ漁場区第12号にも波及するが、その濃度は低かった. また、上げ潮時には海岸線に沿って西向きに流れた. その後の下げ潮時には、海岸線に沿って東向きに流れ、ノリ漁場区第9, 10号の沿岸側を通り、さらに東側まで達したが、ノリ漁場区第12号にはほとんど波及しなかった. また、転流時には処理水放流口周辺に高濃度域が認められた.

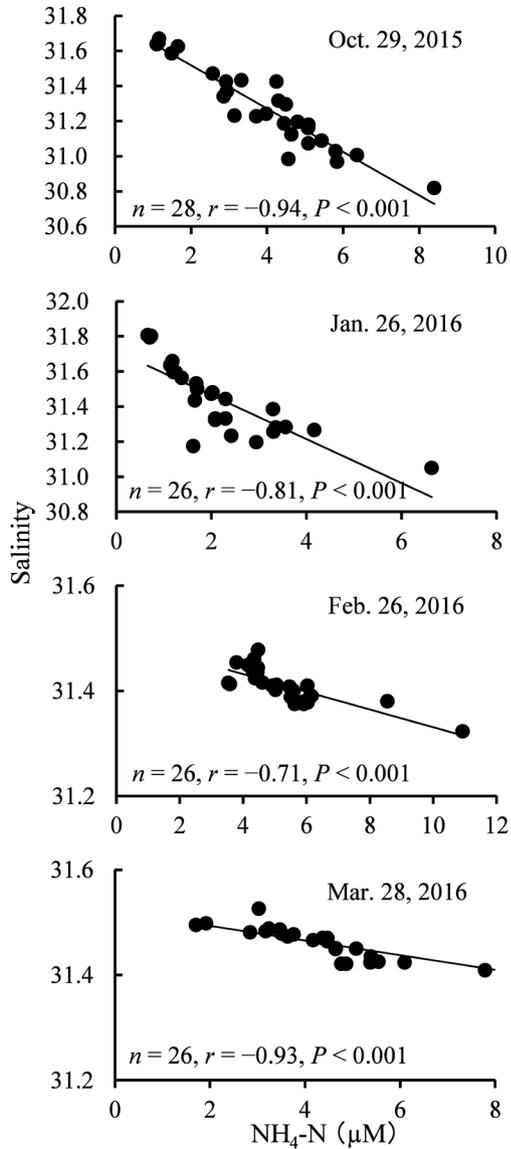


Figure 8. The relationship between salinity and $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration at StD.

考察

今回の調査海域における DIN および $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は、東播磨港播磨港区や二見浄化センター処理水放流口周辺で高い傾向にあり、沖合への高濃度域の広がりには小さかった。また、停泊連続調査定点の表層では、転流時に $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の急激な上昇が確認された。これらの調査結果は、数値シミュレーションで得られた潮汐流に伴う二見浄化センターの処理水の動向に関する計算結果とほぼ一致していた。

二見浄化センターの栄養塩管理運転は、硝化抑制によって通常運転時よりも処理水中の窒素量を増加させる手法であり、管理運転期間中の放流水は $\text{NH}_4\text{-N}$ が主体となっていた。また、2011年度の加古川河口周辺海域の調査時に、東播磨港別府港区内の表層栄養塩濃度を測定した結果、同

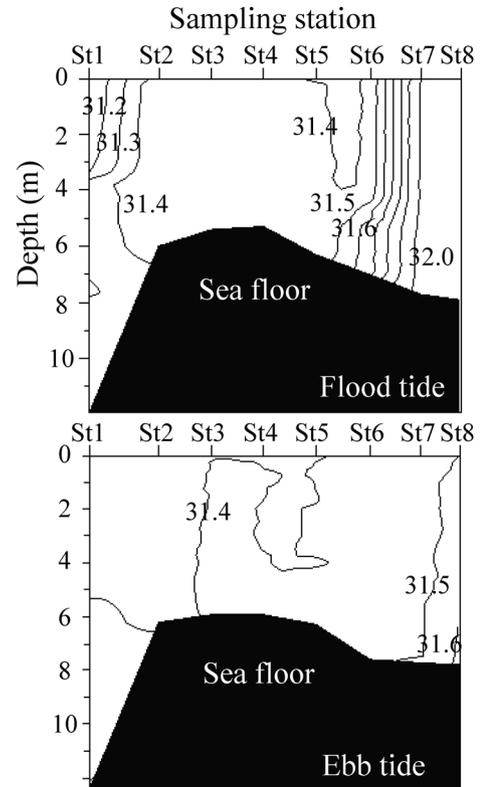


Figure 9. Vertical distribution of salinity from St1 to St8 on Nov. 17, 2016.

港区の DIN 濃度は産業排水等の影響により、周辺海域に比べて高く (原田・宮原, 2017), その中でも特に $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高いことが特徴的であり (2011年9月-2012年2月に毎月1回計測した $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の平均値は, $\text{NH}_4\text{-N}$: $11.1 \pm 4.3 \mu\text{M}$, $\text{NO}_2\text{-N}$: $1.7 \pm 1.0 \mu\text{M}$, $\text{NO}_3\text{-N}$: $5.4 \pm 3.7 \mu\text{M}$), 今回の調査時の港区内における水質も同様の傾向であったと推測される。一方、下水処理水放流口周辺のライン調査と同時期における明石海峡周辺の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は、調査海域よりも低く (2016年10月12日 $0.6\text{--}0.7 \mu\text{M}$, 2016年11月14日 $0.4\text{--}1.0 \mu\text{M}$, 2017年3月1日 $0.9\text{--}1.2 \mu\text{M}$, 兵庫県水産技術センターまたは兵庫県漁連調べ, 未発表), 表層塩分は高い傾向にあった (2016年10月12日調査 $32.08\text{--}32.21$, 2016年11月14日調査 $32.37\text{--}32.60$, 2017年3月1日調査 $31.49\text{--}31.63$, 兵庫県水産技術センターまたは兵庫県漁連調べ, 未発表)。これらのことから、下水処理水放流口周辺のライン調査の St7, 8 や停泊連続調査で確認された潮汐流に伴う $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度および塩分の変化は、下げ潮時には西方に位置する港湾 (東播磨港別府港区および播磨港区等) からの流出水や二見浄化センター処理水が、上げ潮時には明石海峡周辺に由来する水塊が当海域に影響することを示した結果と考えられる。また、停泊連続調査で捉えられた転流時の表層における $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の急激な上昇は、周辺海域の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度から考えると二見浄化セン

ター処理水の影響による変化を示した可能性が高い。さらに、二見浄化センター処理水の動向に関する数値シミュレーションから、放流された処理水は下げ潮時には、ノリ漁場区第9,10号の沿岸側に波及する結果が得られている。これら複数の調査結果および数値シミュレーションによる解析結果から総合的に判断すると、調査海域東部に位置するノリ漁場区第9,10号の特に沿岸側では、下げ潮時に、高いNH₄-N濃度が特徴的な港湾水（東播磨港別府港区、播磨港区等）ならびに二見浄化センター処理水に由来する水塊の影響を受けていると推察された。また、二見浄化センターの栄養塩管理運転により増量した窒素も、同じ経路

をたどりノリ漁場に達することで生産性の維持、安定化に寄与していると考えられる。

さらに、ノリ漁場区第9,10号の沿岸側で生産されたノリの色調（SPAD値）は、同一漁場の沖合側のノリよりも有意に高い傾向が認められた。この結果は、沿岸側の漁場ほど港湾流出水や二見浄化センター処理水によるDIN供給の影響を受けやすく、良質なノリの生産に繋がっていることを裏づけている。

室内培養実験では、DINが枯渇した状態（0.5 μM）からDIN濃度が高い培養液（7 μM）に1日60分以上浸漬することによって、ノリ葉体の色調が回復することが確認されている（藤原, 2011）。また、周辺海域が貧栄養化した状態でも河口域のノリ漁場では、間欠的な河川系水の供給を受けてノリの色調は維持されることが報告されている（高木ほか, 2012b）。これらの報告は、間欠的でもDINの供給を一定時間受けることでノリの色調が維持されることを示している。比較的潮流が速く、開放型水域である今回の調査海域でも、ノリ漁場の位置次第では、潮汐流に伴い港湾等の高濃度窒素源に由来した水塊の影響を一定時間受けることによって、比較的安定したノリ生産が可能であることが明らかとなった。

以上の結果から、当海域では貧栄養化に伴うノリ漁場へのDIN供給手法として、臨海部の下水処理施設における栄

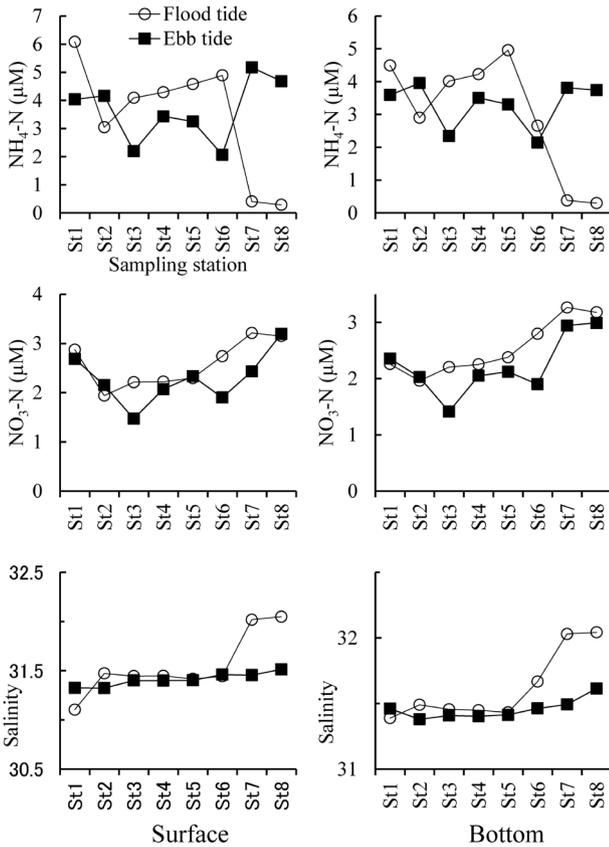


Figure 10. Salinity and nutrients of surface and bottom water from St1 to St8 on Nov. 17, 2016.

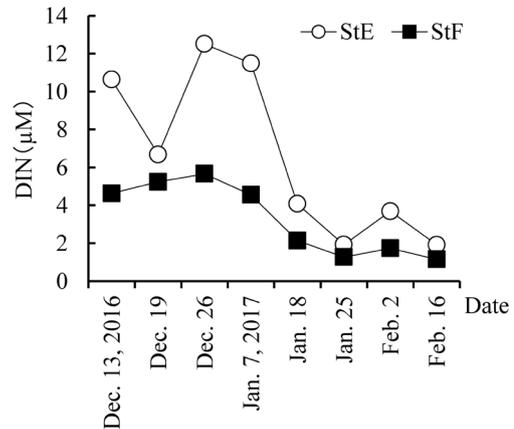


Figure 11. DIN concentrations in the surface water at StE and StF.

Table 1. Comparison of chlorophyll meter (SPAD) values of fresh nori from StE and StF by Welch's *t*-test ($n=5$). The SPAD values were measured for two-ply (two sheets overlaid) of the thalli.

Date		Dec. 13	Dec. 19	Dec. 26	Jan. 7	Jan. 18	Jan. 25	Feb. 2	Feb. 16
		2016			2017				
SPAD value	StE	13.7±0.5	12.7±0.3	11.7±0.5	14.1±0.6	12.4±1.2	11.5±0.9	13.1±0.8	8.4±1.3
	StF	8.9±0.8	10.7±1.3	11.9±0.6	9.1±0.7	8.6±0.6	4.9±0.5	4.4±0.4	0.6±0.2
<i>P</i>		<0.001	<0.05	0.600	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

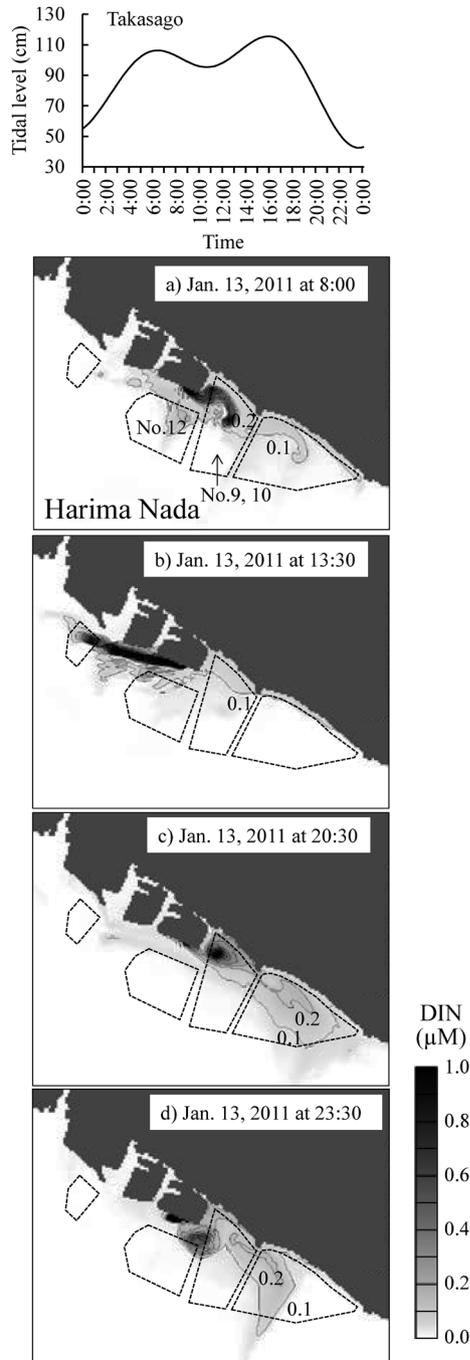


Figure 12. Results of numeral simulation on the behavior of treated sewage effluent discharged from Futami sewage treatment plant. a) Ebb tide; b) Flood tide; c) Ebb tide; d) Reversal current (change from ebb tide to flood tide). Broken lines show the nori farming areas.

養塩管理運転の有効性が示された。瀬戸内海の貧栄養化 (特に DIN の不足) には、陸域負荷の減少 (原田・反田, 2011), 外海水の影響 (武岡ほか, 2005), 底泥からの溶出フラックスの減少 (山本, 2008), 隣接海域からの低栄養

水塊の移流 (阿保ほか, 2006) および植物プランクトンによる消費 (堀ほか, 2008) 等, 様々な要因が関連していると考えられる。喫緊の課題である瀬戸内海の貧栄養化に伴うノリの不作への対応策は, 現段階では, 漁業者による養殖管理 (摘採方法による管理 (二羽・原田, 2015) および各地の漁場周辺で調査された栄養塩の情報提供に基づく養殖管理) を除けば, 人為的手法による DIN の供給に限られる。ノリ漁場を対象とした人為的手法による DIN の供給は, ダムやため池からの放流, 海底耕耘および浅海域の環境改善による適切な物質循環の回復等, 自然界の窒素源を人為的な手法で活用するものと, 下水処理施設の栄養塩管理運転や漁場への施肥等, 人為的に海域に窒素を添加する手法に大別される。後者の手法については今回の調査結果を含め, ノリ漁場への効果を認める報告 (川村ほか, 2011) はあるが, 水質や生態系への影響に対する懸念等, 様々な意見があることは水産行政も認識しており, 実施にあたっては関係機関との協議, 調整が必要である。

謝 辞

本研究は平成25-29年度水産庁補助事業「漁場生産力向上のための漁場改善実証試験」の一部として取り組んだ。下水処理水の採取等にご協力を賜った明石市二見浄化センター職員の皆様に厚く感謝の意を表す。また, 研究を進めるにあたり, 現場観測にご協力頂いた兵庫県漁業・環境調査船乗組員の皆様に深謝する。

引用文献

- 阿保勝之・榎谷賢治・原田和弘・宮原一隆・中山哲巖・八木 宏 (2012) 加古川河口域ノリ養殖場に及ぼす陸域からの栄養塩供給の影響. 土木学会論文集B2 (海岸工学), **68**, 1116-1120.
- 阿保勝之・杜多 哲・藤原建紀 (2006) 冬季の東部瀬戸内海における残差流と栄養塩環境. 海岸工学論文集, **53**, 1096-1100.
- 秋谷重男 (2006) 最近の海苔消費・流通の動向と共販を巡る諸変化. H17水産物調整保管事業調査研究事業報告書第2部, 30 pp.
- 藤澤邦康・小橋啓介・野坂元道 (1999) 牛窓ノリ養殖場におけるノリの色素量変化と水質環境について. 岡山県水産試験場報告, **14**, 4-7.
- 藤原宗弘 (2011) ノリの栄養塩取り込み—ノリは間欠的な栄養塩供給を利用できるか—. 日本水産学会誌, **77**, 113.
- 藤原宗弘・松岡 聡・山賀賢一・吉松定昭 (2009) 香川県におけるノリ養殖生産の現状と問題点. 香川県水産試験場研究報告, **10**, 17-24.
- 藤原建紀 (2011) 瀬戸内海の貧栄養化. 水環境学会誌, **34**(A)2, 34-38.
- 原田和弘・近藤敬三・川崎周作・中谷明泰・水田 章・高木英男・西川哲也 (2013) 加古川水系の平荘ダム一時放流による加古川河口周辺海域への栄養塩供給効果の検討. 兵庫県立農林水産技術総合センター研究報告 (水産編), **43**, 11-16.
- 原田和弘・宮原一隆 (2017) 河川水および港湾域からの栄養塩供給が加古川河口周辺海域のノリ漁場に与える影響の検証. 水産海洋研究, **81**, 222-229.
- 原田和弘・宮原一隆・近藤敬三 (2015) 下水処理施設の栄養塩管理運転に伴う周辺水域の溶存態無機窒素 (DIN) 濃度の動態. 兵庫県立農林水産技術総合センター研究報告 (水産編), **44**,

- 29-33.
- 原田和弘・反田 實 (2011) 播磨灘の溶存態無機窒素 (DIN) の濃度変動に及ぼす降水量および陸域負荷の影響. 兵庫県立農林水産技術総合センター研究報告 (水産編), **42**, 83-86.
- 堀 豊・望月松寿・島本信夫 (2008) 播磨灘北部海域におけるノリ色落ちと漁場環境の変遷. 水産海洋研究, **72**, 107-112.
- 池脇義弘・牧野賢治・西岡智哉・平野 匠・上田幸男 (2016) ゼラチンを用いた藻類養殖用施肥剤の開発. 日本水産学会誌, **82**, 917-922.
- 岩本俊樹・難波洋平 (2009) 児島湾周辺のノリ漁場に及ぼすダム上乗せ放流を含む河川水の影響 (平成17-19年度). 岡山県水産試験場報告, **24**, 63-69.
- 井山 聡 (2007) 筑後川・有明海の環境保全に向けた河川水量の確保について. 日本水産学会誌, **73**, 108-111.
- 川口 修・高辻英之 (2010) 広島県東部海域における溶存態無機窒素動態とノリ色落ちへの影響. 日本水産学会誌, **76**, 849-854.
- Kawamiya, M., M. Kishi, Y. Yamanaka and N. Sugihara (1995) An ecological-physical coupled model applied to station papa. *J. Oceanogr.*, **51**, 635-664.
- 川村嘉広・久野勝利・横尾一成 (2011) 佐賀県有明海で実施されている栄養塩供給の現状. 佐賀県有明水産振興センター研究報告, **25**, 81-87.
- 古賀みな子 (2008) 「マニュアルにはない水質管理 お金をかけずに求められる水を」. 環境新聞社, 東京, 148 pp.
- 眞鍋武彦・反田 實 (1986) 海水中に含まれる微量の反応性珪酸, 反応性リン酸, アンモニア, 亜硝酸および硝酸の同時自動分析法について. 海と空, **62**, 25-37.
- Mellor, G. L. (1998) User's guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model. Program in Atmospheric and Oceanographic Sciences Report, Princeton University, Princeton, 41 pp.
- 宮川昌志・益井敏光・赤井紀子・末永慶寛・石塚正秀 (2015) 下水処理調整運転による栄養塩管理. 海洋と生物, **218**, 261-268.
- 長濱敏子・張 経華・大脇博樹・石橋康弘・藤田雄二・山崎素直 (2004) 乾燥のり中の元素含量とクロロフィル含量指標 SPAD 値との相関性. 分析化学, **53**, 123-125.
- 中山哲厳 (2011) 瀬戸内海の流動と栄養塩に関するレビューと流動・低次生産モデルの開発. 水産総合研究センター研究報告, **34**, 49-70.
- 中山哲厳・八木 宏・藤井良昭・伊藤 靖・三浦 浩・安信秀樹・杉野博之・山田達夫 (2009) 瀬戸内海全域を対象とした流動・低次生産モデルの開発及びマコガレイ幼稚仔分散過程への適用. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), **65**, 1126-1130.
- 二羽恭介・原田和弘 (2015) 養殖ノリ葉体の窒素欠乏と添加に関する生理的応答. 海洋と生物, **218**, 243-249.
- 農林水産省大臣官房統計部 (2016) 平成26年漁業・養殖業生産統計年報, 211 pp.
- 陶山健一郎・作田耕太郎 (2009) 葉緑素計 (SPAD-502) によるシダレザクラとソメイヨシノの葉中のクロロフィル濃度の比較. 九州森林研究, **62**, 90-93.
- 只木良也・木下真実子 (1988) 葉緑素計 SPAD-501 を用いて測定した樹木の葉のクロロフィル濃度. 日本林学会誌, **70**, 488-490.
- 高木秀蔵・藤澤節茂・藤原建紀 (2009) 備讃瀬戸のノリ養殖の現状と河川からの栄養塩供給. 海洋と生物, **181**, 118-122.
- 高木秀蔵・難波洋平・藤沢節茂・渡辺康憲・藤原建紀 (2012a) 備讃瀬戸に流入する河川水の広がりノリ漁場への栄養塩供給. 水産海洋研究, **76**, 197-204.
- 高木秀蔵・清水泰子・草加耕司・藤沢節茂・藤原宗弘・渡辺康憲・藤原建紀 (2012b) 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.
- 高木秀蔵・清水泰子・草加耕司・小林志保・藤原建紀 (2013) 安定同位体比を用いた河川からノリ漁場への栄養塩供給の評価. 日本水産学会誌, **79**, 1002-1008.
- 武岡英隆・速水祐一・兼田淳史 (2005) 瀬戸内海における環境の長期変動. 沿岸海洋研究, **43**, 45-50.
- 反田 實・原田和弘 (2011) 貧栄養化への対策事例と将来への課題. 水環境学会誌, **34**(A)2, 54-58.
- 和西昭仁・小柳隆文・畑間俊弘 (2009) 周防灘における栄養塩の減少とノリ養殖の衰退. 海洋と生物, **181**, 150-153.
- 鷲尾圭司・島本信夫・堀 豊・岡本繁好・上田隆敏 (2005) 兵庫県における栄養環境の変化とノリ養殖漁業の盛衰. 海洋と生物, **158**, 238-245.
- Yamamoto, T. (2003) The Seto Inland Sea: Eutrophic or oligotrophic? *Mar. Pollut. Bull.*, **47**, 37-42.
- 山本民次 (2008) 瀬戸内海底泥からのリン・窒素の溶出. 「瀬戸内海の内海環境」柳 哲雄編, 恒星社厚生閣, 東京, 61-75.
- 山本民次 (2015) 瀬戸内海の貧栄養化—その原因, プロセス, メカニズム. 「海と湖の貧栄養化問題 水清ければ魚棲まず」山本民次, 花里孝幸編著, 地人書館, 東京, 55-87.