

## 硝酸態窒素の連続観測による陸域からの溶存態無機窒素供給がノリの色調に与える影響

原田和弘<sup>1)</sup>・宮原一隆<sup>1)</sup>・川崎周作<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センター

<sup>2)</sup>兵庫県漁業協同組合連合会のり海藻部兵庫のり研究所

兵庫県の加古川河口東部沿岸のノリ漁場において、陸域からの溶存態無機窒素(DIN)供給が、漁場のDIN動態に与える影響を、硝酸塩自動観測機器(硝酸塩センサー)を用いて連続的に観測した。当海域表層のNO<sub>3</sub>-N(硝酸塩センサー値)とDIN濃度には有意な正の相関が認められた。連続観測の結果、当漁場表層の硝酸態窒素(NO<sub>3</sub>-N)濃度は、下げ潮時(東流)に上昇、上げ潮時(西流)に低下という潮汐流と連動した変動傾向が認められた。また、塩分もそれに同調して変動しており、漁場には陸域からの間欠的なDIN供給の影響が及んでいると考えられた。さらに、当漁場のノリの色調は、陸域からのDINの間欠的な供給によりDIN濃度が高い沿岸側で良い傾向が認められた。これらの結果から、当漁場の沿岸側では下げ潮時を中心に、加古川河口および東播磨港別府西港区から間欠的にDINの供給を受け、ノリの色調維持に繋がっていると考えられた。

キーワード: *Neopyropia*, 連続観測, 硝酸塩センサー, 栄養塩, 色調

You can see the English abstract on the last page of this article.

### 結 言

瀬戸内海では貧栄養化が指摘され(Yamamoto, 2003), ノリ(樽谷, 2009)やワカメ(牧野, 2014)など養殖藻類の色落ちが大きな問題となっている。兵庫県の瀬戸内海側は国内有数の養殖ノリ(*Neopyropia*)生産海域であるが、1990年代後半以降、ノリの不作が頻繁に生じている(鷺尾ら, 2005)。特に、主要なノリ生産海域である播磨灘では、溶存態無機窒素(DIN:Dissolved Inorganic Nitrogen)濃度の低下によるノリの色落ちが主な不作要因と考えられている(反田, 2015)。

播磨灘北部に位置する加古川河口周辺海域のノリ漁場では、加古川河川水、および東播磨港別府西港区(以後、別府西港区とする)からの流出水(下水処理水や産業排水を含む)など、陸域からのDIN供給が漁場のDIN動態に大きな影響を与えていることが、数値シミュレーションや定期観測結果から明らかにされている(阿保ら, 2012; 原田・宮原, 2017b)。また、同じく瀬戸内海東部に位置する備讃瀬戸のノリ漁場では、流入する河川からの栄養塩供給や、それに伴うノリの色調への影響が報告されている(高木ら, 2012a, b)。このように、貧栄養化した瀬戸内海のノリ漁場では、陸域からの栄養塩供給の重要性が指

摘されている。

従来、海域の栄養塩動態は、定期観測等で数日から数週間に1回の頻度で採水された試料の分析値から把握されていたが、近年、硝酸態窒素(NO<sub>3</sub>-N)等の栄養塩濃度を、連続的に自動観測できる機器が開発、市販されている。貧栄養化した瀬戸内海のノリ漁場では、河川水の流入や、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)等の栄養塩供給対策に伴う栄養塩動態の把握、および漁場の栄養塩濃度変化のきめ細かな情報発信の重要性が増しており、連続観測機器の活用が期待されている(高木, 2016; 山下ら, 2016)。

本研究では、兵庫県の加古川河口東部沿岸のノリ漁場に硝酸塩自動観測機器、流向流速計および水温塩分計を設置して、潮汐流や河川流量の変化に伴う当漁場のNO<sub>3</sub>-N濃度変化を一定期間連続的に観測した。これにより、河川水、および下水処理水や産業排水を含む港湾水等、陸域から漁場への栄養塩供給状況を把握するとともに、供給された栄養塩がノリの色調に与える影響を調べた。

なお、本報では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。

## 材料および方法

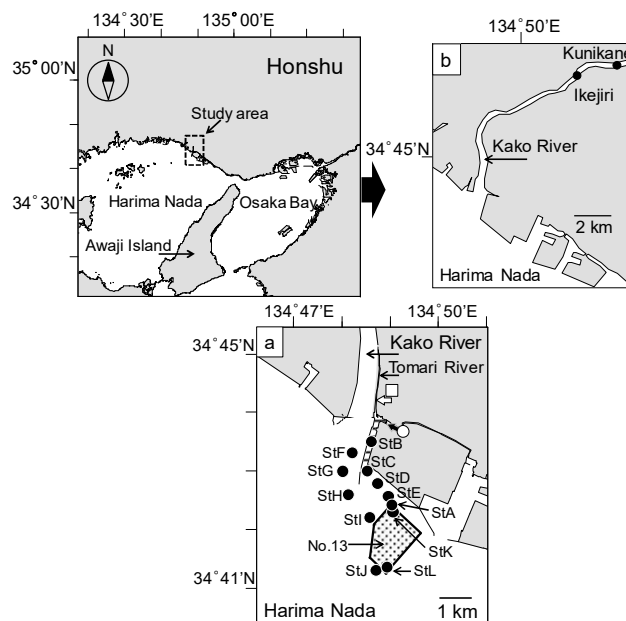
### 1 連続観測

兵庫県に加古川河口東部沿岸に位置するノリ漁場区第13号の定点(StA, Fig. 1-a)に、水中紫外線硝酸塩アナライザー(Sea-Bird Scientific社製SUNA V2, 以後、硝酸塩センサーとする)、流向流速計(JFEアドバンテック社製Infinity-EM)およびワイパー式メモリー水温塩分計(JFEアドバンテック社製Infinity-CTW)を設置して、2015年1月26日–2月12日の間、表層の水質を連続的に自動観測した。硝酸塩センサーは海面下50–60 cm, 流向流速計と水温塩分計は海面下約30 cmにブイから垂下し、硝酸塩は1時間、流向流速および水温塩分は10分毎に数値を記録した。硝酸塩センサーの観測値は、定時から概ね1秒間隔で2分間を計測した値(異常値を除く)の平均値を算出するように設定した。また、硝酸塩センサーの測定部位には、付着生物の着生

防止のため、メッシュ状の銅カバーを装着した。

硝酸塩センサーの観測値は、有色溶存有機物(CDOM: Colored Dissolved Organic Matter)の影響を受けるため、現場の水を比色分析したNO<sub>3</sub>-N濃度の値(以後、実測値とする)を用いた補正が必要とされる(高木ら, 2013, 2015)。本報における硝酸塩センサー観測値は、当センターで保有する本機の観測値と実測値を播磨灘北部沿岸の海域で比較した補正式 $y = 0.568x + 0.011$ ( $y$ : NO<sub>3</sub>-N濃度実測値,  $x$ : 硝酸塩センサー観測値, 原田・宮原, 2017a)を用いて、NO<sub>3</sub>-N濃度に換算した(以後、補正式により換算した値を硝酸塩センサー値と記す)。

流向流速の観測結果は、流速ベクトルを東西成分および南北成分に分けて算出、解析した。なお、加古川河川水がStAに与える影響の解明には、観測期間中の加古川(国包, Fig. 1-b)の日平均流量(国土交通省近畿地方整備局姫路河川国道事務所調べ)を用いた。



**Fig. 1** Location of the observation area. The area with horizontal stripes shows the Befunishi area in Higashiharima Port. The area with dots shows the nori farming area No.13. The open square indicates the Lower Kakogawa River wastewater treatment center. The open arrow indicates the outlet of treated sewage. The open circle indicates the outlet of industrial effluent.

### 2 ノリ漁場へのDIN供給源に関する解析

加古川河口周辺海域の栄養塩動態に関する報告(阿保ら, 2012; 原田・宮原, 2017b)から、ノリ漁場区第13号への主たる栄養塩供給源は、加古川河川水および別府西港区からの流出水であると考えられて

いる。陸域からノリ漁場区第13号表層へのDIN供給状況は、表層から採水した試料のNO<sub>3</sub>-N、亜硝酸態窒素(NO<sub>2</sub>-N)およびアンモニア態窒素(NH<sub>4</sub>-N)濃度を用いて解析した。試料は、2010年10月–2011年2月および2011年10月–2012年2月に毎月1回(計10回)、加古川下流の池尻橋流心部(非感潮域)、別

府西港区 (StB) および加古川河口域からノリ漁場区第 13 号周辺 (StC–StJ) で得た (Fig. 1-a, b). 採水試料は、何れもガラス濾紙 (ADVANTEC 社製, GA-200) を用いて濾過した後、比色分析に供した。比色分析は、眞鍋・反田 (1986) に準じ、栄養塩自動分析装置 (BLTEC 社製, QuAAtro2-HR) を用いて、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$  および  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度を計測し、それらの合計値を DIN 濃度とした。また、同観測時に池尻橋を除く定点において、CTD (JFE アドバンテック社製, ACL215-PDK または RINKO-Profiler ASTD102) を用いて表層から海底面の塩分を計測した。

解析は、池尻橋、別府西港区 (StB) およびノリ漁場区第 13 号周辺 (StE, StI, StJ) における  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$  および DIN 濃度の平均値を Tukey 法で比較した。また、海域の定点における塩分 (海面下約 0.5 m) と  $\text{NO}_3\text{-N}$  および DIN 濃度を、加古川河口からノリ漁場 (StF, StG, StH, StI, StJ) および別府西港区からノリ漁場 (StB, StC, StD, StE, StJ) に至る 2 ライン (Fig. 1-b) に分けて解析した。さらに、池尻橋と StB を除く定点の  $\text{NO}_3\text{-N}$  と DIN 濃度の関係、および加古川河口の StF から StH、別府西港区の水が港湾から海域に流出する StC から StE における  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度と塩分の関係を、Pearson の相関係数を用いて検討した。

### 3 ノリ漁場におけるノリの色調調査

農作物の栄養診断等に用いられている葉緑素計は、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。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) において開発されたコニカミノルタ製の葉緑素計は、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 (SPAD 値) を測定できる (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 (藤澤ら, 1999; 長濱ら, 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。

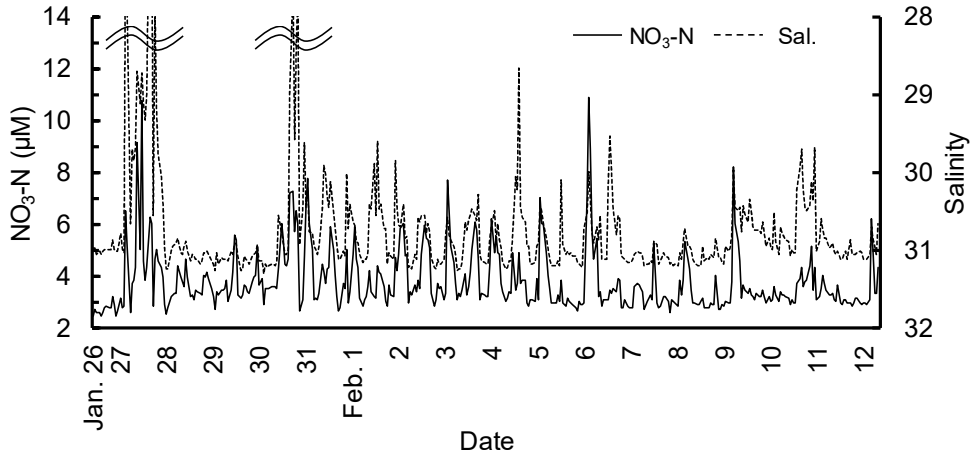
加古川河口域のノリ漁場区第 13 号は、既報 (原田・宮原, 2017b) から、漁場内のより沿岸側ほど DIN

濃度が高い傾向にあることが推測される。そこで、ノリ漁場区第 13 号内 (Fig. 1-b) の沿岸側 (StK) と沖合側 (StL) の定点で、2016 年度漁期の本張りから冷凍網に網替えるまでの期間 (2016 年 12 月 13 日–2017 年 2 月 16 日)、同じ日の同一時間帯に養殖ノリの葉状体を定期的に採取して、その色調を葉緑素計 (コニカミノルタ社製, SPAD-502) を用いて計測した。採取した葉状体の先端付近から切り取った試料を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。ノリの色調は、それぞれの定点における各調査時の SPAD 値の平均を Welch's *t*-test で比較した。また、同時に現場の表層水を採取して DIN 濃度を計測した。DIN 濃度は前述と同様の方法で分析、算出した。

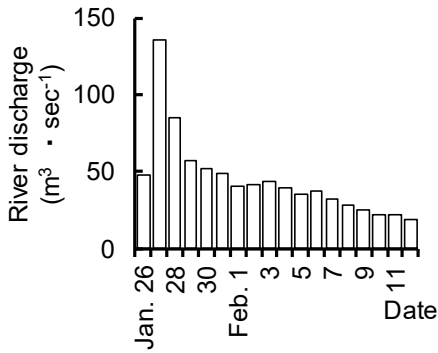
## 結 果

### 1 連続観測

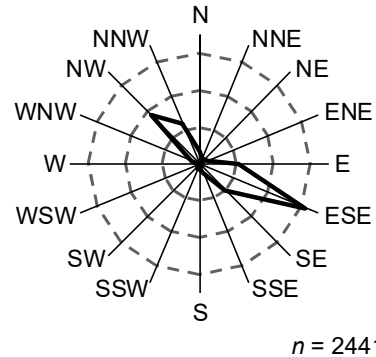
観測期間中の StA における塩分は 25–32、硝酸塩センサー値は 2–11  $\mu\text{M}$  の範囲で推移した。両者には、硝酸塩センサー値の上昇時に塩分は低下、硝酸塩センサー値の低下に伴って塩分は上昇という同調した変動傾向が認められた (Fig. 2)、観測期間中の加古川の流量は 2015 年 1 月 27 日が最も多く (Fig. 3)、同日の StA では高い硝酸塩センサー値と低塩分を示した。StA における流向は、北西と東南東方向の往復流が卓越していた (Fig. 4)。StA の東方分速は、正の値を示す場合  $60 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$  以上に達する場合もあったが、負の最大値は約  $36 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$  であった。また、北方分速の正の値の最大値は約  $38 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ 、負の最大値は約  $26 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$  であった。概ね東方分速が正の値および北方分速が負の値 (何れも StA では下げ潮にあたる) の時間帯に、硝酸塩センサー値が上昇する明瞭な変動傾向が認められた (Fig. 5)、また、StA における硝酸塩センサー値、東方分速、北方分速および塩分の変動は、東方分速が負から正、北方分速は正から負の値への転換開始もしくは転換から 2, 3 時間後に、硝酸塩センサー値は上昇、塩分は低下する傾向を示した。また、硝酸塩センサー値の上昇した状態は、概ね 6 時間程度継続した (Fig. 6: 調査期間のうち、2015 年 2 月 2–4 日のデータを抜粋)。



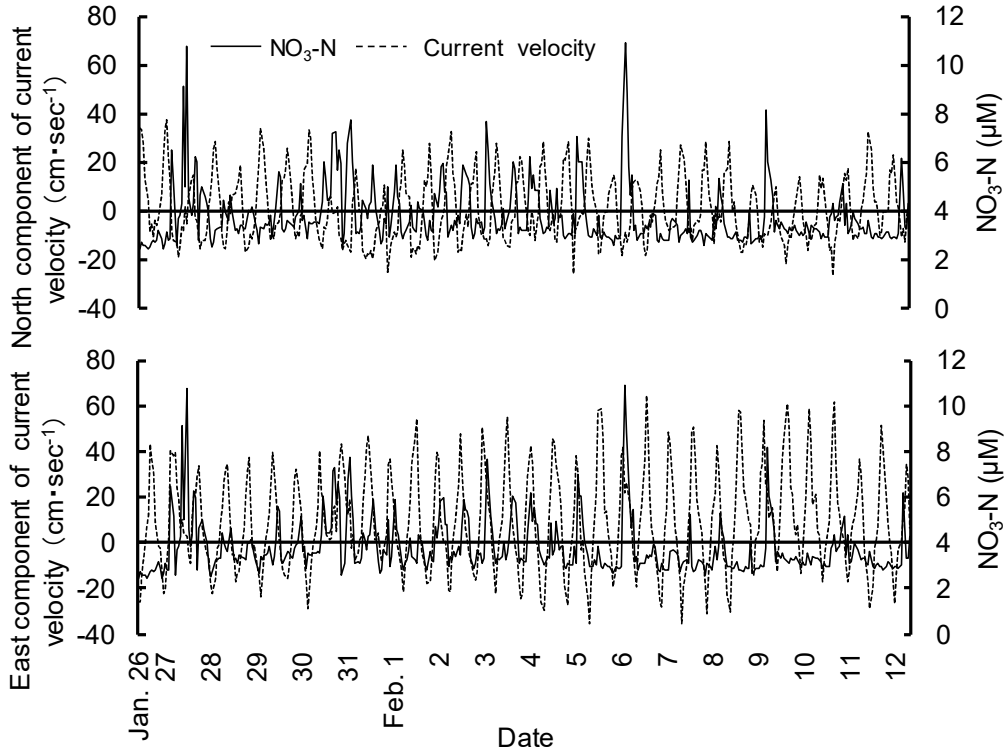
**Fig. 2** Relationship between  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentrations measured by the  $\text{NO}_3\text{-N}$  sensor and salinity at StA in 2015. Note: the axis for salinity is inverted.



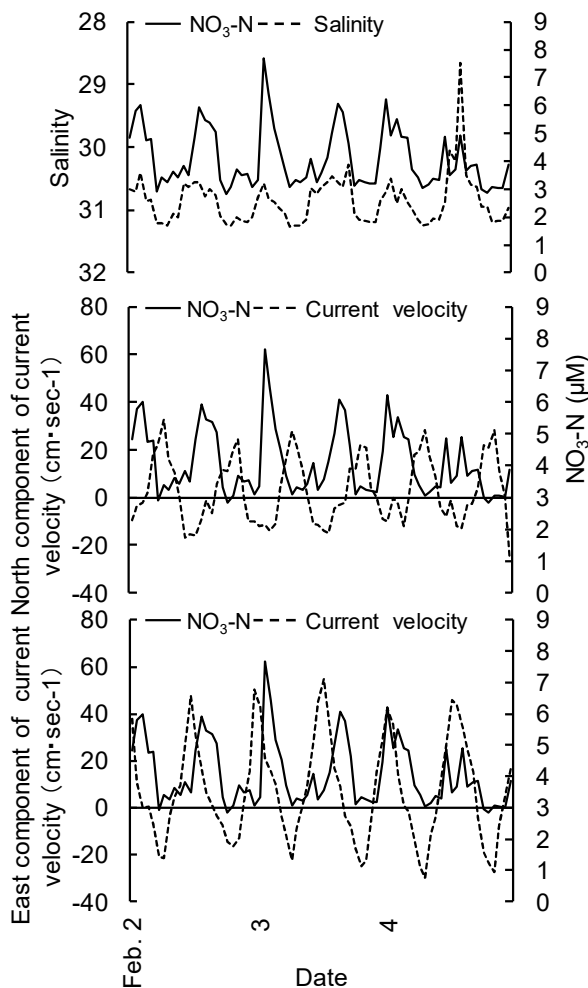
**Fig. 3** Discharge of the Kako River during the survey in 2015.



**Fig. 4** Frequency distribution of flow direction (%) at StA in 2015.



**Fig. 5** Relationship between  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentrations measured by the  $\text{NO}_3\text{-N}$  sensor, as well as north and east component current velocity at StA in 2015.



**Fig. 6** Relationship between  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentrations measured by the  $\text{NO}_3\text{-N}$  sensor, salinity and current at StA on Feb. 2–4, 2015 (extracted from Fig. 2 and Fig. 5). Note: the axis for salinity is inverted.

## 2 ノリ漁場への DIN 供給源に関する解析

$\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の平均値は、池尻橋で  $57.7 \pm 11.1 \mu\text{M}$  (平均値  $\pm$  標準偏差), 別府西港区 (StB) で  $40.6 \pm$

$28.6 \mu\text{M}$  であり、ノリ漁場区第 13 号周辺 (StE, StI, StJ) に比べて数十倍高く、有意な差が認められた (Table 1-1, 1-2,  $P < 0.05$ ,  $n = 10$ ). また, StB の  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度 ( $101.9 \pm 61.7 \mu\text{M}$ ) は、池尻橋, StE, StI および StJ に比べて数十倍以上高く、有意な差が認められた (Table 1-1, 1-2,  $P < 0.05$ ,  $n = 10$ ). さらに、池尻橋の DIN 濃度 ( $58.8 \pm 11.2 \mu\text{M}$ ) は StI と StJ に比べて有意に高かった (Table 1-1, 1-2,  $P < 0.05$ ,  $n = 10$ ). StB の DIN 濃度 ( $150.7 \pm 90.3 \mu\text{M}$ ) は、池尻橋, StE, StI および StJ に比べて有意に高かった (Table 1-1, 1-2,  $P < 0.05$ ,  $n = 10$ ).

また, StF から StJ に至るライン上では, StF から StH までは概ね加古川河口からの距離が遠い定点ほど塩分は上昇,  $\text{NO}_3\text{-N}$  および DIN 濃度は低下する傾向にあった. StI では StH および StJ に比べて  $\text{NO}_3\text{-N}$  および DIN とも濃度は高かった. また, StB から StJ に至るライン上では, 概ね別府西港区からの距離が遠い定点ほど, 塩分は上昇,  $\text{NO}_3\text{-N}$  および DIN 濃度は低下する傾向にあった (Fig. 7). StF から StI に至るライン上の塩分鉛直分布は, 概ね海面下 2 m までの表層に低塩分水が認められ, StB から StE に至るライン上でも同様の傾向が確認された (Fig. 8).

また, 池尻橋と StB を除いた全定点における  $\text{NO}_3\text{-N}$  と DIN 濃度には有意な正の相関があった ( $n = 80$ ,  $r = 0.90$ ,  $P < 0.001$ , Fig. 9). さらに, StF から StH ( $n = 30$ ,  $r = -0.64$ ,  $P < 0.001$ ) および StC から StE ( $n = 30$ ,  $r = -0.81$ ,  $P < 0.001$ ) の定点における  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度と塩分には, 有意な負の相関が認められた (Fig. 10).

**Table 1-1.**  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$  and DIN concentrations ( $\mu\text{M}$ ) in the surface water collected at Ikejiri, StB, StE, StI and StJ ( $n = 10$ ).

Sampling station	Ikejiri	StB	StE	StI	StJ
$\text{NO}_3\text{-N}$	$57.7 \pm 11.1$	$40.6 \pm 28.6$	$3.8 \pm 3.9$	$3.2 \pm 3.0$	$2.6 \pm 3.1$
$\text{NO}_2\text{-N}$	$0.5 \pm 0.1$	$8.2 \pm 4.5$	$0.8 \pm 0.8$	$0.6 \pm 0.6$	$0.5 \pm 0.6$
$\text{NH}_4\text{-N}$	$0.5 \pm 0.6$	$101.9 \pm 61.7$	$4.2 \pm 2.7$	$2.7 \pm 4.4$	$0.9 \pm 1.2$
DIN	$58.8 \pm 11.2$	$150.7 \pm 90.3$	$8.8 \pm 6.8$	$6.6 \pm 6.4$	$4.0 \pm 3.8$

## 3 ノリ漁場におけるノリの色調調査

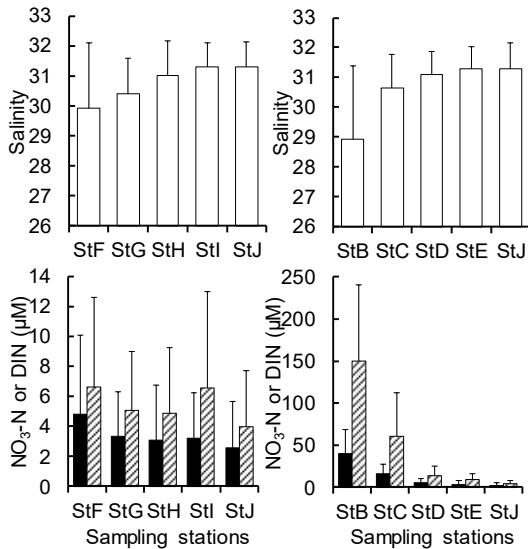
調査期間中のノリの色調 (SPAD 値) の平均値は, StK では 7.1–12.5, StL は 1.9–10.3 を示した. また, StL の SPAD 値は 2017 年 1 月 18 日以降, 急激に低

下した (Table 2). 各調査時の StK と StL の SPAD 値の平均を比較した結果, 2017 年 1 月 7 日を除いて, いずれの調査時も StK の値は StL よりも有意に高い傾向が認められた (Table 2). DIN 濃度は, StL に比べて StK で概ね高い傾向を示し, StL では 2017 年 1

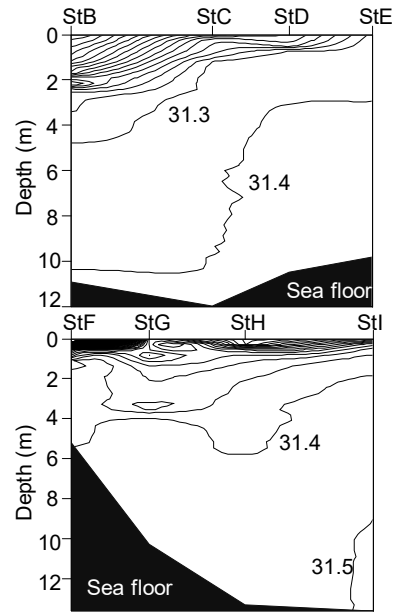
月 18 日以降, 急激に低下した (Fig. 11).

**Table 1-2.** Comparison of NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N and DIN concentrations in the surface water collected at Ikejiri, StB, StE, StI and StJ by Tukey's test (*n* = 10).

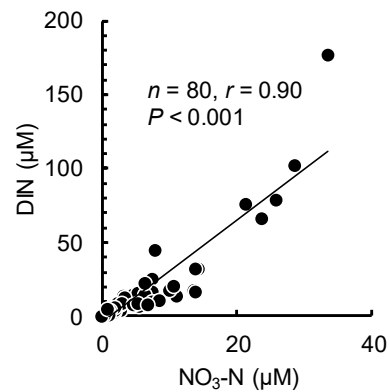
	Ikejiri	StB	StE	StI	StJ
Ikejiri	—	> 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
StB	—	—	< 0.05	< 0.05	< 0.05
StE	—	—	—	> 0.05	> 0.05
StI	—	—	—	—	> 0.05
StJ	—	—	—	—	—
<b>NH<sub>4</sub>-N</b>					
	Ikejiri	StB	StE	StI	StJ
Ikejiri	—	< 0.05	> 0.05	> 0.05	> 0.05
StB	—	—	< 0.05	< 0.05	< 0.05
StE	—	—	—	> 0.05	> 0.05
StI	—	—	—	—	> 0.05
StJ	—	—	—	—	—
<b>DIN</b>					
	Ikejiri	StB	StE	StI	StJ
Ikejiri	—	< 0.05	> 0.05	< 0.05	< 0.05
StB	—	—	< 0.05	< 0.05	< 0.05
StE	—	—	—	> 0.05	> 0.05
StI	—	—	—	—	> 0.05
StJ	—	—	—	—	—



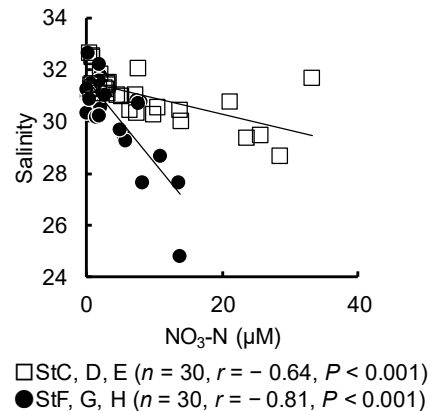
**Fig. 7** Average of salinity, NO<sub>3</sub>-N and DIN concentrations in the surface water from StB to StJ and from StF to StJ in 2010–2012 (*n* = 10). The solid and striped bars respectively indicate NO<sub>3</sub>-N and DIN concentrations. The vertical bars illustrate the standard deviation.



**Fig. 8** Vertical distribution of salinity from StB to StE and from StF to StI on Feb. 15, 2012.



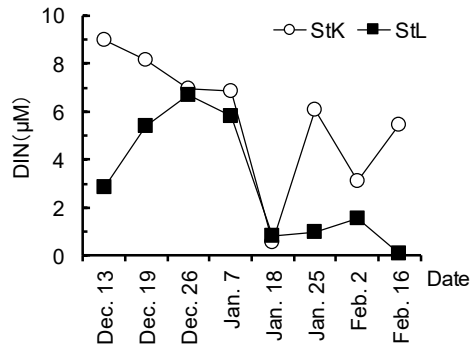
**Fig. 9** Relationship between NO<sub>3</sub>-N and DIN concentrations in the surface water at StC–StJ in 2010–2012.



**Fig. 10** Relationship between NO<sub>3</sub>-N concentrations and salinity in the surface water at StC, D, E and StF, G, H in 2010–2012.

**Table 2.** Comparison of chlorophyll meter (SPAD) values of fresh nori from StK and StL by Welch's *t*-test ( $n = 5$ ). The SPAD values were measured for two-ply (two sheets overlaid) of the thalli.

Date		Dec. 13, 2016	Dec. 19	Dec. 26	Jan. 7, 2017	Jan. 18	Jan. 25	Feb. 2	Feb. 16
SPAD value	StK	12.0 ± 0.9	11.9 ± 0.6	12.5 ± 0.9	9.2 ± 0.7	8.9 ± 0.4	7.6 ± 0.8	9.5 ± 1.0	7.1 ± 1.1
	StL	9.9 ± 1.1	8.2 ± 1.4	10.3 ± 1.0	8.9 ± 0.9	5.4 ± 0.6	5.0 ± 1.3	4.3 ± 0.6	1.9 ± 0.7
<i>P</i>		< 0.05	< 0.01	< 0.01	0.562	< 0.001	< 0.01	< 0.001	< 0.001



**Fig. 11** DIN concentrations in surface water at StK and StL in 2016–2017.

## 考 察

加古川河口および別府西港区からノリ漁場区第 13 号へ至るライン上の定点における表層の塩分、 $\text{NO}_3\text{-N}$  および DIN 濃度は、河口および港湾からノリ漁場に向けて、それぞれ正および負の濃度勾配が認められた (Fig. 7). また、それらのライン上の塩分鉛直分布は、鉛直混合期でも表層に低塩分水の存在が確認されたことから、陸水による影響が強く現れたものと考えられた。加古川河口の StF の平均  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度は池尻橋の約 1/12 であったことから、特に河川流量が少ない場合には、河口域での河川水と海水の混合による希釈、および河口周辺域の植物プランクトンによる消費等によって、河口における DIN 濃度は河川の下流域よりも低くなる場合があると推測された。一方、別府西港区地先の StC でも海水との希釈混合等で、港湾内の StB に比べて濃度は低くなるものの、 $\text{NO}_3\text{-N}$  および DIN 濃度は、StF の約 3 および 9 倍であった。また、StF から StH、および StC から StE の定点における  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度と塩分には、それぞれ有意な負の相関が認められたが、それら 2 群の回帰直線の傾きは大きく異なった (Fig. 10)。この結果は、前述のように、加古川河川水と別府西港区の水が海域に流出する段階の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度に差があったためと考えられた。ノリ漁場区第 13 号に隣接する StI

は、加古川河川水に加え、別府西港区流出水の影響も強いと考えられ、StH や StJ に比べ、 $\text{NO}_3\text{-N}$  および DIN の濃度が高い傾向にあったと考えられた。また、加古川河口周辺海域における  $\text{NO}_3\text{-N}$  と DIN 濃度には有意な正の相関が認められた (Fig. 9)。さらに、加古川河口域では、加古川河川水や別府西港区からの流出水によって、河口東部沿岸表層に高 DIN 濃度域が形成されることが報告されており (原田・宮原, 2017b)、同海域の DIN 動態に関する数値計算 (阿保ら, 2012) では、加古川河川水および別府西港区から流出した DIN は河口東側近傍のノリ漁場への影響が大きいとされている。これらのことから、加古川河川水や別府西港区からの流出水は、ノリ漁場区第 13 号の表層水に影響を与える陸域からの主な  $\text{NO}_3\text{-N}$  ならびに DIN 供給源と考えられた。これらノリ漁場への DIN 供給源に関する解析結果から、ノリ漁場区第 13 号の DIN 濃度変化には、別府西港区を起源とする  $\text{NH}_4\text{-N}$  の影響を考慮する必要はあるものの、加古川河川水や別府西港区から供給される DIN が当漁場に与える影響を、硝酸塩センサーを用いて観測するのは妥当な方法であったと判断される。

StA の連続観測で捉えられた硝酸塩センサー値の上昇と、塩分低下および流向流速との同調した変化は、 $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度の高い加古川河川水や別府西港区からの流出水が潮汐流に伴い、間欠的に当漁場に到達していることを示した結果と考えられた。また、硝酸塩センサー値の上昇した状態が約 6 時間継続したことも、概ね潮汐の動きと一致する。2015 年 1 月 27 日に観測された高い硝酸塩センサー値と低塩分は、増水した加古川河川水の影響を一時的に強く受けたものと推測された。阿保ら (2012) も、上げ潮時に加古川河川水は岸沿いを北西方向に進み、ノリ漁場区第 13 号への影響は小さいが、下げ潮、さらに河川増水時には河川水の影響が当漁場により強く及ぶことを報告し、本連続観測結果と一致する。

河川水によるノリ漁場への間欠的な栄養塩供給は、岡山県児島湾沖でも硝酸塩センサーを用いて確認されている(山下ら, 2016)。ノリ漁場区第13号における連続観測結果でも、潮汐流や河川流量の変化に伴う $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度変化を詳細に把握することができた。従来、海域のDIN濃度は定期観測でスポット的に捉えるしかなく、栄養塩動態の解明は数値シミュレーションによって行われてきた。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の連続観測は、当漁場におけるDIN動態を解明するための重要な知見になり得ると考えられた。

2017年度のノリ色調調査時に計測したノリ漁場区第13号のDIN濃度は、2017年1月7日の調査までは、StKおよびStLとも播磨灘北東部でノリに色落ちが発生し易くなるとされる $3\ \mu\text{M}$ (永田ら, 2001)を上回っていたが、StLのDIN濃度は1月18日以降急激に低下し、 $3\ \mu\text{M}$ を下回るようになった(Fig. 11)。当時、播磨灘北部沿岸では珪藻の*Eucampia zodiacus*が大量発生して栄養塩を消費しており、その影響を受けてDIN濃度が急激に低下したと考えられた。一方、StKのDIN濃度は一時的な低下は認められたものの、調査期間を通じてStLに比べて高い濃度を維持していた。また、当海域における表層DIN濃度の水平分布は、加古川河口東部の沿岸部に高濃度帯が形成される事例の多いことが知られている(原田・宮原, 2017b)。本研究における一連の観測およびその解析から、StKは当海域における陸域からの主なDIN供給源と考えられる加古川河口および別府西港区に近く、主に下げ潮時に河川水および港湾水から間欠的にDINが供給されることによって、漁場周辺海域のDIN濃度が低下した場合にも、濃度が保持されていると考えられた。

StLにおけるノリのSPAD値は、2017年1月18日以降のDINの急減に同調して低下した(Table 2)。一方、StKのSPAD値は調査期間を通じてStLよりも高い傾向にあった。2017年1月7日は、12月下旬頃から測定日までの間、StKとStLにおけるDIN濃度はいずれも比較的高く、両定点で濃度差がなかったため、SPAD値に有意差がなかったと推察された(Fig. 11)。StKとStLのSPAD値の差は、漁場周辺海域のDIN濃度が $3\ \mu\text{M}$ 以下に低下した場合でも、前述のようにノリ漁場区第13号のより沿岸側には、周辺海域

に比べてDIN濃度の高い加古川河川水や別府西港区からの流出水が、潮汐流に伴って間欠的に供給されており、StKにおけるノリの良好な色調維持に繋がっていることを示した結果と考えられた。また、別府西港区からの流出水は、硝酸塩センサーで計測できない $\text{NH}_4\text{-N}$ の濃度も高く(Table 1-1)、StKのノリの色調維持に寄与していると考えられる。

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(高木ら, 2012b)。原田・宮原(2018)は、潮汐流に伴い、高濃度のDINを含む水塊の影響を一定時間受けるようなノリ漁場では、比較的安定したノリ生産が可能であると報告している。また、測定方法が異なるため数値は同列に比較できないが、ノリ葉状体のSPAD値が高いほど、ノリの等級は高く、品質が良いとされている(藤原, 2007)。今回のノリ色調調査は、連続観測と調査年度が異なるものの、間欠的に陸域からのDIN供給を受ける漁場では、ノリの色調が維持される(SPAD値が高い)ことが明らかとなり、より質の良いノリが安定して生産できることが示唆された。

栄養塩自動観測機器の使用に際しては、CDOMや付着生物等への対応が必要なものの、岡山県(高木ら, 2013)、徳島県(池脇, 2015a, b)および兵庫県(原田・宮原, 2017a)の沿岸域における観測や、栄養塩濃度の変化が品質に直結するノリやワカメ*Undaria pinnatifida*漁場において、テレメトリーによる連続観測結果の情報提供(高木ら, 2015; 山下ら, 2016; 澁谷・日下, 2016)など、現場での活用事例が報告されている。本機は沿岸域における栄養塩動態の観測に有用と考えられ、水産研究機関では、従来の定期観測に加え、栄養塩自動観測機器を活用した連続観測等によって、詳細な漁場の栄養塩動態や漁場形成機構等に関する情報を収集し、より細やかな漁場環境変化の情報発信、ならびに動態等の解明につながる事が期待される。あわせて水産業の維持、振興のための漁場環境管理方策を提案する知見を今後も集積する必要があるだろう。

## 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。調査にあたり、多大なご協力を賜った東播磨漁業協同組合の皆様に厚く感謝の意を表す。また、加古川の流量に関する資料をご提供頂いた国土交通省近畿地方整備局姫路河川国道事務所の皆様、ならびに調査にご協力頂いた当センターの小柴貢二主査に深謝する。

## 引用文献

- 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.
- 阿保勝之・樽谷賢治・原田和弘・宮原一隆・中山哲・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.
- 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(2007):葉緑素計(SPAD-502)を使用したノリ葉体色調の迅速診断. 平成19年度水産研究成果情報, 117–118.
- 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・宮原一隆(2017a):瀬戸内海東部沿岸域における硝酸塩センサー測定値と比色分析による硝酸態窒素濃度測定値の比較. 兵庫県立農林水産技術総合センター研究報告 **1**, 22–25.
- 原田和弘・宮原一隆(2017b):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・阿保勝之・川崎周作・竹迫史裕・宮原一隆(2018):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. 水産海洋研究 **82**, 26–35.
- 池脇義弘(2015a):硝酸塩センサーの導入について. 徳島水研だより, **93**.
- 池脇義弘(2015b):硝酸塩センサーによって観測された小鳴門海峡の硝酸塩濃度の変動と潮汐の関係. 徳島水研だより, **96**.
- 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.
- 国土交通省水管理・国土保全局下水道部(2014):栄養塩類の循環バランスに配慮した運転管理ナレッジに関する事例集, 8–11.
- 牧野賢治(2014):ワカメの色落ちを計測する. 徳島水研だより, **91**.
- 眞鍋武彦・反田 實(1986):海水中に含まれる微量の反応性珪酸, 反応性磷酸, 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.
- 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.
- 永田誠一・名角辰郎・中谷明泰・鷲尾圭司・眞鍋武彦(2001):近年の播磨灘主要ノリ漁場の環境調査結果. 兵庫県立水産試験場研究報告 **36**, 59–73.
- 澁谷和明・日下啓作(2016):気仙沼湾における連続観測システムの精度及び活用法について. 宮城県水産研究報告 **16**, 11–17.
- 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・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・阿保勝之・柏 俊行(2013):硝

- 酸塩センサーを用いたノリ漁場栄養塩モニタリング. 水産技術 **5**, 159–163.
- 高木秀蔵・清水泰子・阿保勝之・柏 俊行(2015): 硝酸塩センサーを用いたノリ漁場栄養塩テレメトリーシステムの開発. 水産技術 **7**, 97–103.
- 高木秀蔵(2016): 総論: 連続観測機器を用いた海洋環境モニタリングと有効活用について. 月刊海洋 **547**, 229–235.
- 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.
- 反田 實(2015): 瀬戸内海東部の貧栄養化と漁業生産. 「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), 地人書館, 東京, 91–128.
- 樽谷賢治(2009): 日本におけるノリ養殖と栄養塩環境の現状. 海洋と生物 **181**, 141–145.
- 鷺尾圭司・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? *Marine Pollution Bulletin*. **47**, 37–42.
- 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), 地人書館, 東京, 55–87.
- 山下泰司・高木秀蔵・渡辺 新(2016): 備讃瀬戸のノリ漁場における栄養塩のテレメトリー技術の開発. 月刊海洋 **547**, 236–241.

## Effect of DIN Discharge on Color Tone of Cultivated Nori, as Demonstrated by Continuous Automatic NO<sub>3</sub>-N Sensor Measurements

Kazuhiro HARADA<sup>1)</sup>, Kazutaka MIYAHARA<sup>1)</sup> and Shusaku KAWASAKI<sup>2)</sup>

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

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

Corresponding: Kazuhiro HARADA

TEL: +81-78-941-8601, FAX: +81-78-941-8604, E-mail: kazuhiro\_harada@pref.hyogo.lg.jp

In this study we examined the effects of dissolved inorganic nitrogen (DIN) discharged from land areas to coastal nori farms in the eastern part of the Kako River estuary. NO<sub>3</sub>-N concentration measurements were performed using an automatic NO<sub>3</sub>-N sensor, and a significant positive correlation between NO<sub>3</sub>-N and DIN concentrations in the surface water was identified. The NO<sub>3</sub>-N concentrations in the surface water of coastal nori farms was related to tidal flows, which were higher during the ebb tide, and lower during the flood tide. The salinity in the surface water also changed in phase with the tidal flows. The color tone of fresh nori produced in the coastal nori farming area was darker than those produced in the offshore area, probably due to the influence of DIN discharged intermittently from the rivers and port. These results show that intermittent DIN discharge influences the color tone of fresh nori in the coastal farms of the eastern Kako River estuary.

**Key Words** : automatic nitrate sensor, color tone of nori, continuous observation, *Neopyropia*, nitrate