

播磨灘北東部のノリ漁場における明石海峡を通じて 大阪湾から供給される栄養塩の連続観測

原田和弘¹⁾・宮原一隆¹⁾・阿保勝之²⁾

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, 兵庫県明石市 674-0093

²⁾国立研究開発法人水産研究・教育機構水産技術研究所廿日市庁舎, 広島県廿日市市 739-0452

播磨灘北東部のノリ漁場における明石海峡を通じた大阪湾からの栄養塩供給について、硝酸塩自動観測機器(硝酸塩アナライザー)を用いて連続的に観測した。播磨灘北東部のノリ漁場表層の硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)濃度は、上げ潮時(西流)に上昇、下げ潮時(東流)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、当該漁場の水温や塩分も潮汐流と同調した変動が認められた。さらに、数値シミュレーション結果でも、上げ潮時に明石海峡の強混合水が播磨灘に流入し、明石市二見沖、鹿ノ瀬、および淡路島西岸海域の養殖ノリ漁場に到達すると判断された。現場観測結果および数値シミュレーションから、播磨灘北東部のノリ漁場では、上げ潮時を中心に明石海峡を通じた大阪湾からの栄養塩供給を受けていると判断された。

キーワード: 明石海峡, 硝酸塩アナライザー, 連続観測, ノリ漁場, 播磨灘, 大阪湾

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

緒 言

兵庫県の瀬戸内海海域は全国有数の養殖ノリ生産海域であり、2024年度漁期の生産量は19.0億枚、生産金額は434億円(<https://web.pref.hyogo.lg.jp/nk16/press/20250509.html>)でいずれも過去最高を記録し、全国第1位となっている。一方、同海域では1990年代後半から、貧栄養化等に伴うノリの不作が頻繁に生じており(鷲尾ら, 2005, 反田, 2015)、現在も大きな問題となっている。

海域の栄養塩環境の変化に対応するため、兵庫県では2008年に県下水道課、水質課、水産課、水産技術センターおよび関係市町の下水道部局等で構成する「豊かな海づくりに係る検討会」を発足させ、栄養塩管理に関わる行政機関の分野横断的な協議の場を設置した。その後、播磨灘流域別下水道整備総合計画(兵庫県, 2018a, 2018b)や2021年の瀬戸内海環境保全特別措置法の改正等を経て、本県は瀬戸内海で初めて兵庫県栄養塩類管理計画を策定した(兵庫県, 2022)。同計画の対象海域では、全窒素および全りんを対象に、望ましい栄養塩類濃度を定め、5箇所の民間事業所と28箇所の下水処理施設で栄養塩類増加措置を実施している。さらに、2025年12月に改定した大阪湾流域別下水道整備

総合計画(兵庫県, 2025)では、大阪湾西部の下水処理施設4箇所において栄養塩管理運転の本運用を進める計画となっている。このように、近年は従来の規制中心の水環境行政から、きめ細かい海域環境管理への転換が進められており、海域の栄養塩管理施策を推進するうえで、その影響を直接受ける養殖ノリ漁場において栄養塩動態を把握することはますます重要となっている。

県内の主要なノリ漁場の一つである播磨灘北東部は、潮汐に伴い隣接する大阪湾からの流入水による影響を受けていると推察され、大阪湾は同海域への重要な栄養塩供給源としての役割を果たしている可能性が高い(古川・相馬, 2023)。一方、明石海峡周辺の播磨灘北東部のノリ漁場において、潮汐流に伴い大阪湾から流入する水塊の水質動向を連続的に観測した事例はこれまでない。兵庫県の瀬戸内海海域は複数の湾、灘を有しており、海域の栄養塩管理に関する行政施策を検討する場合、隣接海域を含めた影響を考慮することが重要である。本研究は、硝酸塩アナライザーによる連続観測および数値シミュレーションによって、明石海峡を通じた大阪湾からの栄養塩供給が、隣接する播磨灘北東部のノリ漁場に及ぼす影響を明らかにした。

材料および方法

1 連続観測

兵庫県の播磨灘北東部に位置するノリ漁場区第12号(明石市二見沖, Stn. A (34°40.78'N, 134°52.25'E), 以後第12号とする)および第17号(鹿ノ瀬, Stn. B (34°37.33'N, 134°48.8'E), 以後第17号とする)の各定点(Fig. 1)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, 第12号では2014年2月7-24日, 第17号では2016年2月3-19日の間, 表層の水質を連続的に測定し, 内部メモリーに記録した. 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30分もしくは1時間, 流向流速および水温と塩分は10分毎に測定した. 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. 本報における硝酸塩センサー観測値は, 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 : 硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)濃度実測値, x : 硝酸塩センサー観測値, 原田・宮原, 2017)を用いて, $\text{NO}_3\text{-N}$ 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. また, 連続観測値と比較するため, 明石海峡周辺の水質データとして, 国土交通省近畿地方整備局が観測, 公開している明石海峡航路東方灯浮標(<http://teiten.p.a.kkr.mlit.go.jp>, Stn. C), 兵庫県漁業協同組合連合会兵庫のり研究所(以後, 兵庫のり研究所とする, 調査定点 Stns. D, E, F, G, K, Fig. 1)並びに当センター(調査定点 Stns. H, I, J, Fig. 1)が実施した定期調査の観測値を使用した. また, 降水量の数値は気象庁観測定点の神戸, 明石, 西脇, 三木および大阪のデータ(<https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php>)を用いた.

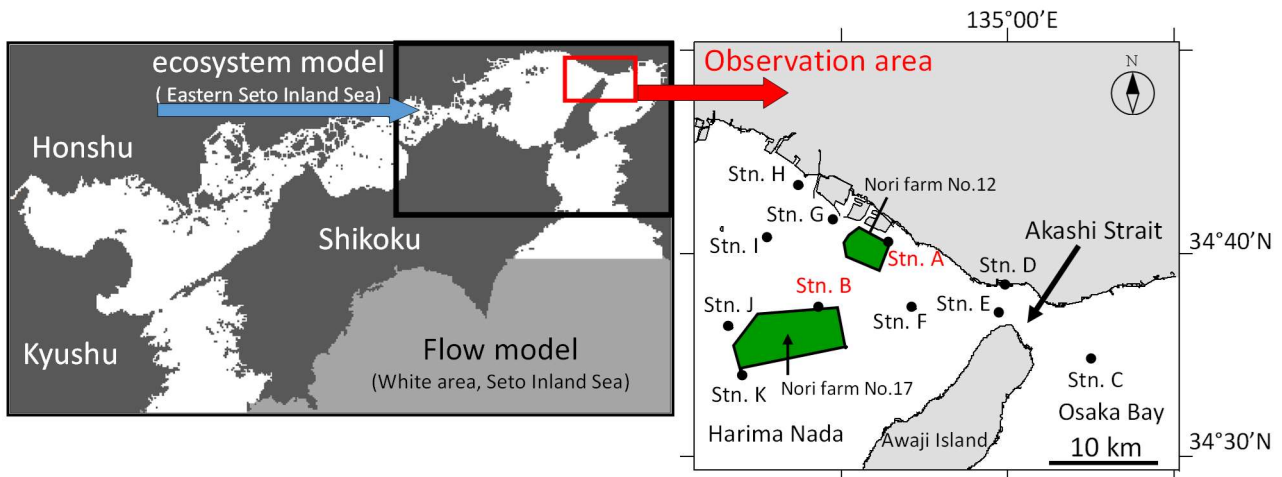


Fig. 1 Calculation domains for the flow model (entire Seto Inland Sea) and the primary ecosystem model (eastern Seto Inland Sea), and location of the observation area. Stn. C is the East Light Buoy of Akashi Kaikyo Traffic Route. There, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism conducts automatic observations of water temperature and salinity.

2 明石海峡を通じた大阪湾系水の影響に関する数値シミュレーション

大阪湾から播磨灘北部への栄養塩供給の影響を明らかにするため, 数値シミュレーションを実施した. 数値モデルは, Princeton Ocean Model (Mellor, 1998) をベースとした中山ら(2011)の三次元物理-低次生

態系結合モデルを使用した. まず, 瀬戸内海全域の流動を計算し, 計算結果(水温, 塩分, 水位)を境界値として, 瀬戸内海東部海域の水質を解析した(one-way nesting, Fig. 1). 瀬戸内海東部海域を対象としたモデルでは, 1km メッシュ(計算メッシュ数 174×125), 鉛直 10 層とした. 境界条件として, 水温,

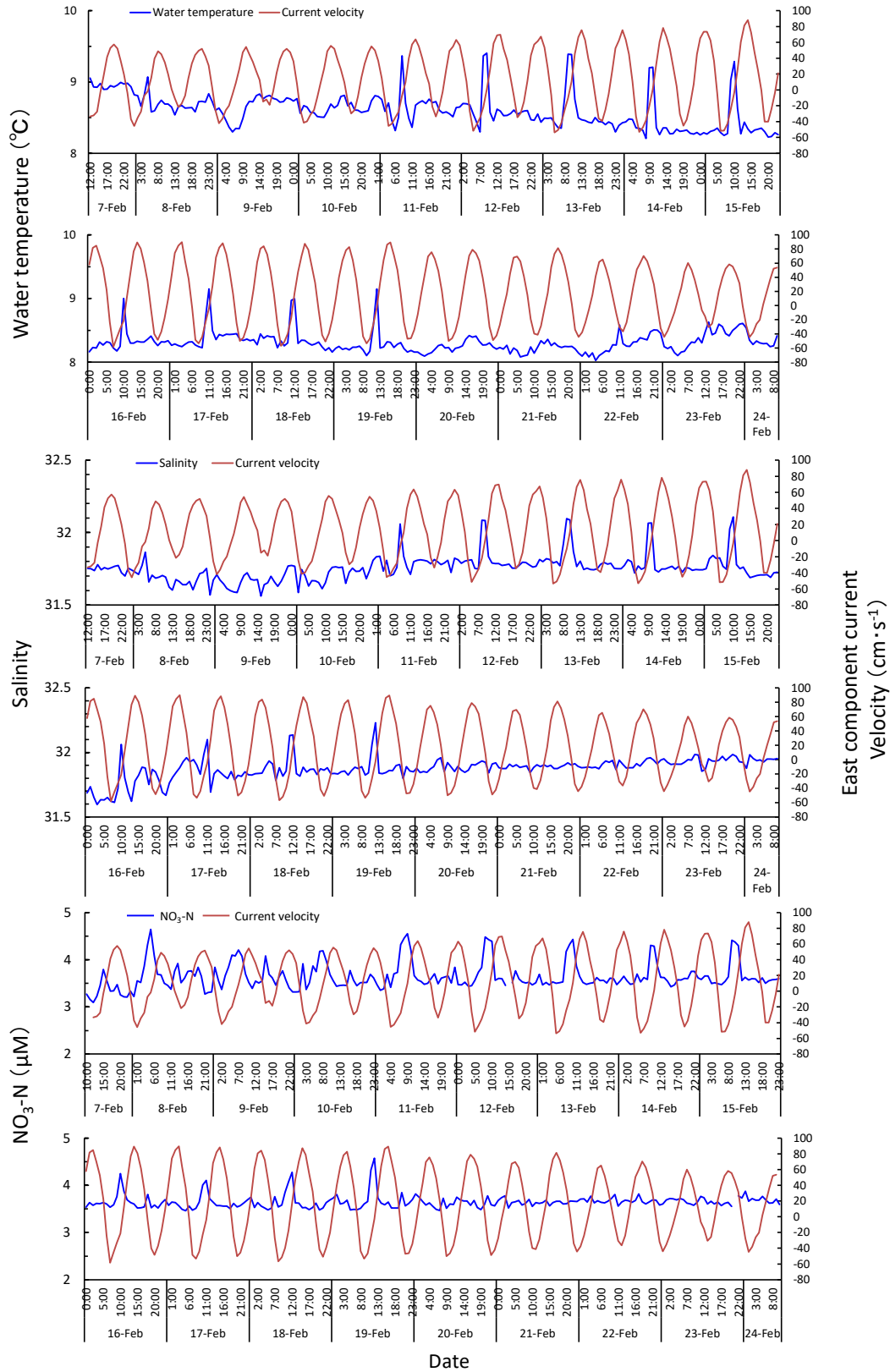


Fig. 3 Relations between water temperature, salinity and $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations measured using the $\text{NO}_3\text{-N}$ sensor and east component current velocity at Stn. A during February 7–24, 2014.

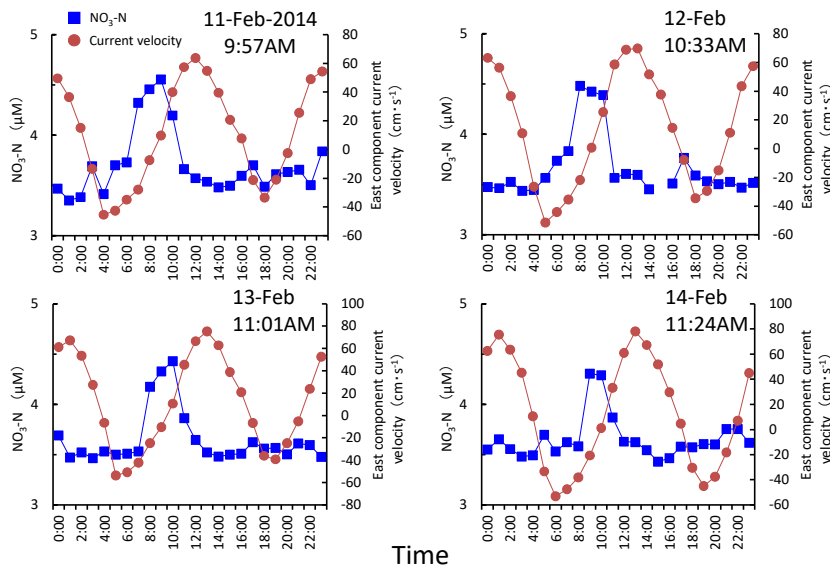


Fig. 4 Relation between $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations measured using the $\text{NO}_3\text{-N}$ sensor and current (extracted from Fig. 3). Times shown in the figure denote turning of the tide at Akashi Strait.

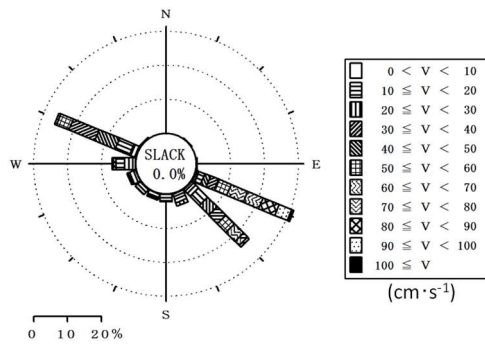


Fig. 5 Flow direction and velocity frequency distribution at Stn. A.

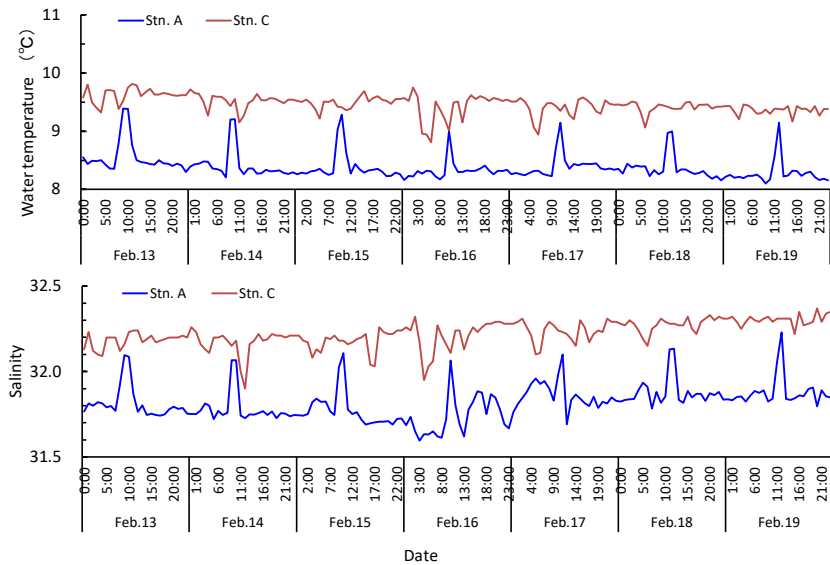


Fig. 6 Water temperature and salinity at Stn. A and Stn. C during February 13–19, 2014.

Table 1 Water temperature and salinity around Stn. A during the continuous observation period of February 7–24, 2014

Station	Date	Water temperature (°C)	Salinity	NO ₃ -N (μM)
Stn.D	Feb.13	9.7	32.11	3.2
Stn.E		9.8	32.16	2.5
Stn.F		9.6	32.09	2.5
Stn.G		8.5	31.77	0.7
Stn.H		8.6	31.77	0.2
Stn.I		8.5	31.91	0.1
Stn.D	Feb.24	9.1	32.17	3.0
Stn.E		9.2	32.26	3.0
Stn.F		9.0	32.21	2.6
Stn.G		8.6	31.98	0.3
Stn.H		8.7	31.87	0.1
Stn.I		8.7	32.05	0.1

2) 第 17 号(鹿ノ瀬, Stn. B)

Stn. B における硝酸塩センサー値は、西流流速(観測定点では上げ潮)が最大値を示した直後にピークを示す場合が多く認められた。(Fig. 7). 水温は硝酸塩センサー値と同調した変動傾向を示した(Fig. 8). また、塩分も硝酸塩センサー値と同調した変動傾向(塩分上昇時に硝酸塩センサー値上昇)を示したが、2016年2月13–14日のまとまった降雨以降は、両者の変動傾向が変化し、塩分低下時に硝酸塩センサー値が上昇した(Fig. 8).

連続観測期間中の Stn. C における水温、塩分は、2月3–5日および2月14日以降の塩分は変動が大きいものの、何れの値も概ね Stn. B より高い傾向にあった(Fig. 9). また、連続観測期間に兵庫のり研究所および当センターが実施した定期調査の水温、塩分および NO₃-N 濃度は、Stn. B より東側の定点(Stns. D, E, F)の値が西側の定点(Stns. I, J, K)よりも高かった(Table 2). なお、Stn. B における流向は、西(19.3%)から西北西(15.3%)と東南東方向(38.4%)の往復流が卓越していた(Fig. 10).

Stn. B の連続観測直前(2016年1月28–30日)および観測期間中の降水量は、神戸 40.5mm, 明石 32mm, 西脇 48.5mm, 三木 33mm, 大阪 57.5mm, および神戸 82mm, 明石 55.5mm, 西脇 66mm, 三木 59mm, 大阪 53mm であった.

2 明石海峡を通じた大阪湾系水の影響に関する数

値シミュレーション

Stns. A, B における 2013 年 2 月の表層の塩分および溶存無機態窒素(DIN)濃度の時系列変化の計算結果を Fig. 11 に示した. 塩分は全ての定点で半日周期の変動が卓越しており、潮汐流の影響が大きかった. DIN 濃度も塩分と同期した半日周期の変動が見られ、塩分上昇時に DIN 濃度が上昇した.

表層における塩分および DIN 濃度の水平分布の経時変化を Fig. 12 に示した. 大阪湾西部の高塩分・高 DIN 濃度の海水は、上げ潮時に明石海峡を通じて播磨灘北東部へ流入する計算結果であった.

考 察

Stn. A における潮流は、西北西と東南東方向の往復流が卓越しており、西流時に硝酸塩センサー値、水温および塩分の急激な上昇が認められることから、その現象は同定点より東方海域の水塊の影響に起因する可能性が高いと考えられた. 連続観測期間中、Stn. C の水温、塩分、および兵庫のり研究所や当センターが実施した定期調査のうち、Stn. A よりも東側の定点(Stns. D, E, F)における水温、塩分、NO₃-N 濃度は、Stn. A の観測値より高かった. 一方、Stn. A より西側の定点(Stns. G, H, I)におけるそれらの値は何れも Stn. A よりも低かった. このことから、硝酸塩センサー値、水温および塩分の急激な上昇は、大阪湾から流入した水塊に起因することが強く示唆された.

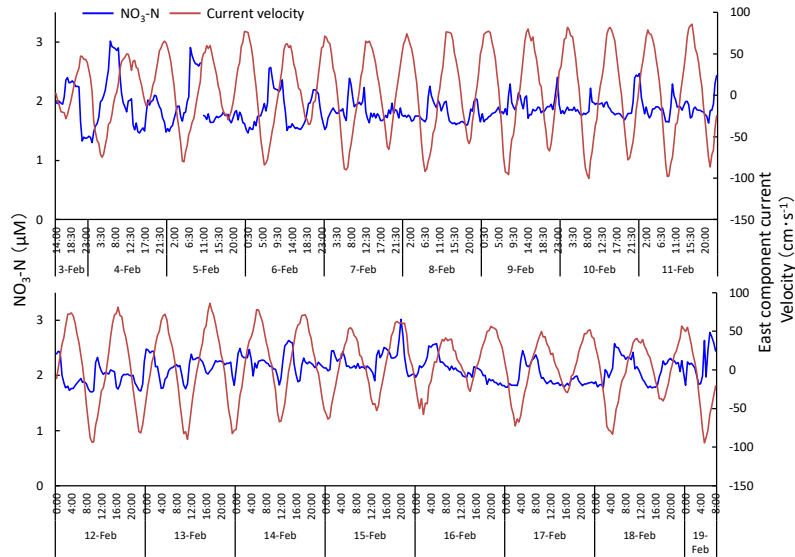


Fig. 7 Relation between $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations measured using the $\text{NO}_3\text{-N}$ sensor and current at Stn. B during February 3–19, 2016.

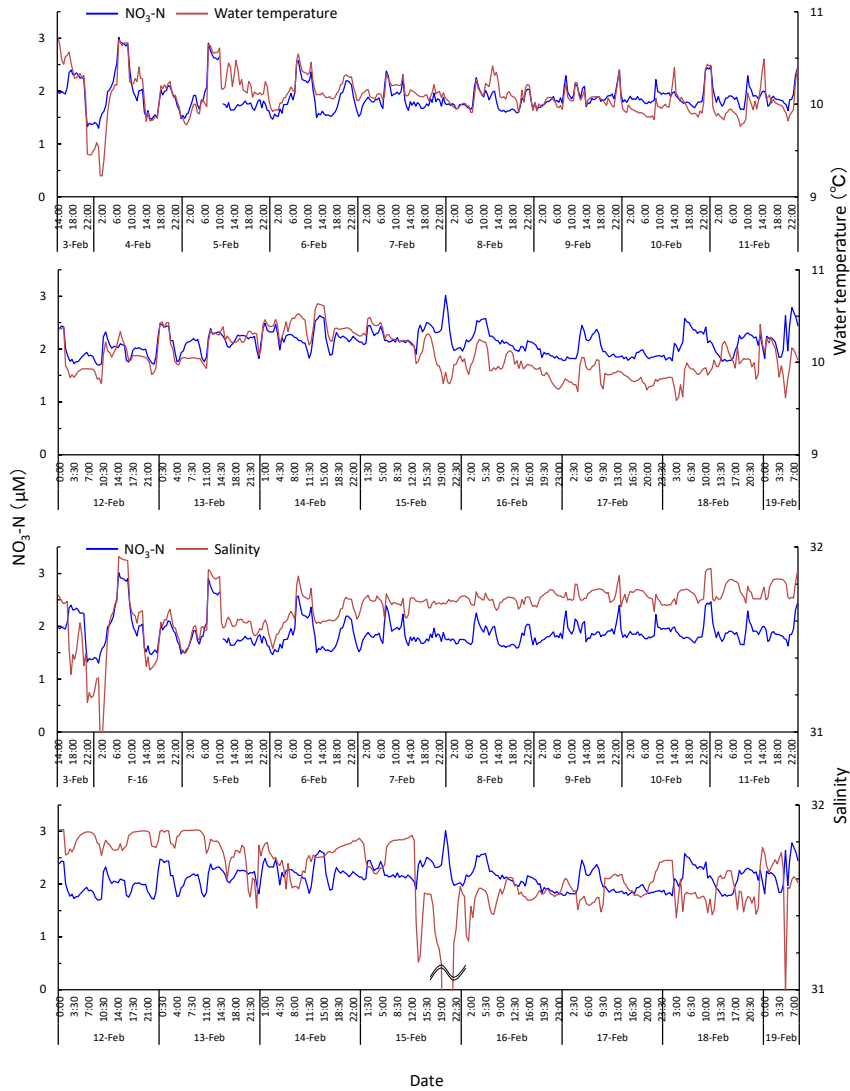


Fig. 8 Relations between $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations measured using the $\text{NO}_3\text{-N}$ sensor and water temperatures and salinity at Stn. B during February 3–19, 2016.

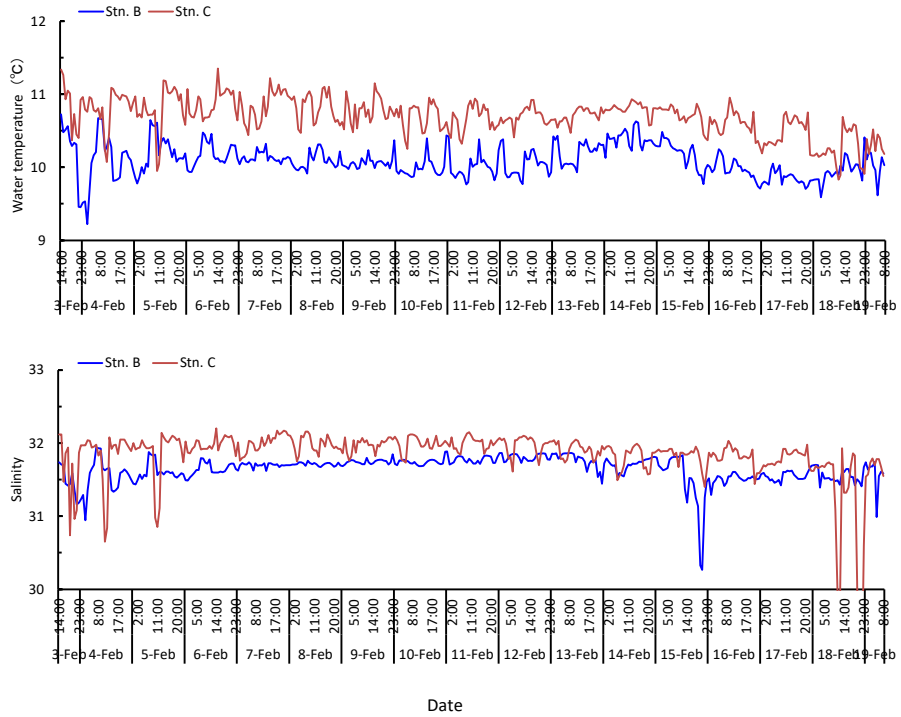


Fig. 9 Water temperature and salinity at Stn. B and Stn. C during February 3–19, 2016.

Table 2 Water temperature and salinity around Stn. B during the continuous observation period of February 3–19, 2016

Station	Date	Water temperature (°C)	Salinity	NO ₃ -N (μM)
Stn.D		10.2	31.71	1.0
Stn.E		11.0	32.06	1.0
Stn.F	Feb.9	10.3	31.72	0.8
Stn.I		9.4	31.40	0.2
Stn.J		9.4	31.44	0.5
Stn.K		9.7	31.46	0.1
Stn.D		9.7	31.69	1.2
Stn.E		10.0	31.84	0.9
Stn.F	Feb.22	9.6	31.65	0.8
Stn.I		8.9	31.45	0.1
Stn.J		9.2	31.58	0.1
Stn.K		8.9	31.48	0.3

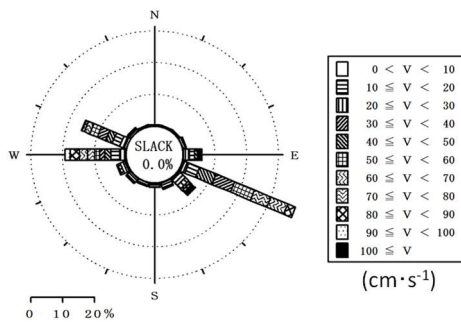


Fig. 10 Flow direction and velocity frequency distribution at Stn. B.

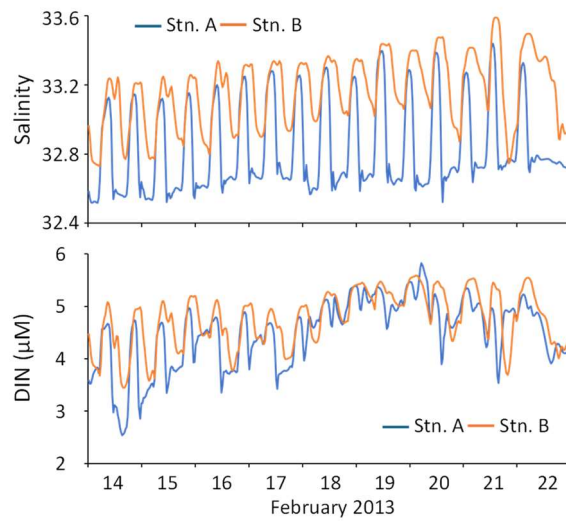


Fig. 11 Time series changes in surface salinity and DIN concentration at Stn. A and Stn. B (calculated values).

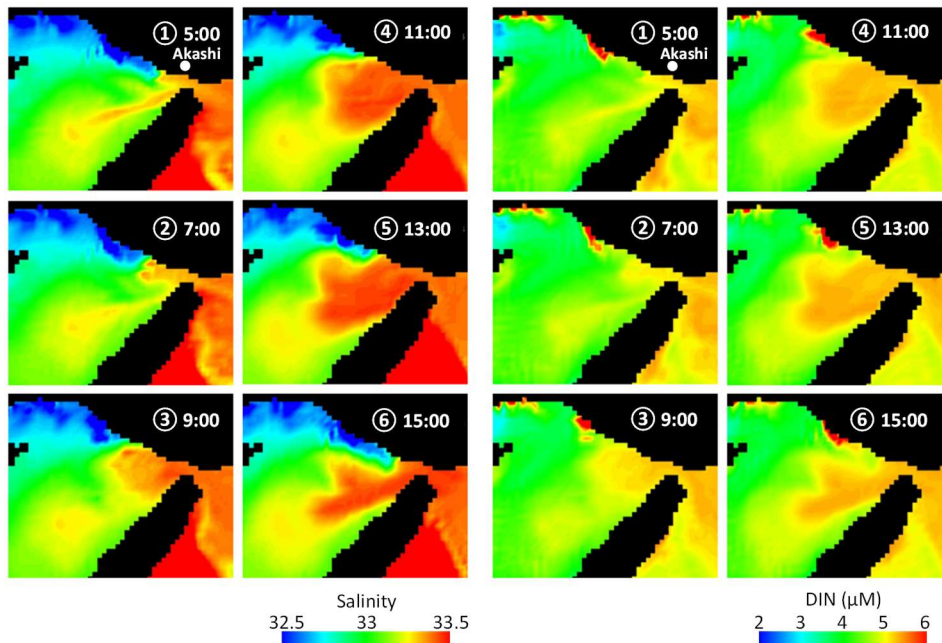


Fig. 12 Surface salinity and DIN concentration calculation results (February 15, 2013). Akashi high tide times – 0:40, 11:25; Akashi low tide times – 4:31, 18:34

Stn. B の観測においても、西流時に水温、塩分および硝酸塩センサー値のピークが出現し、連続観測期間中の Stn. C の水温、塩分、および兵庫のり研究所や当センターの定期調査の水温、塩分、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、Stn. B より東側の明石海峡周辺の定点 (Stns. C, D, E, F) で、西側定点 (Stns. I, J, K) の値より高い傾向を示し、大阪湾から流入した水塊の影響が、鹿ノ瀬漁場にも及んでいることが考えられた。なお、2016 年 2 月 15 日以降の塩分と硝酸塩センサー値はそれ以

前の変動傾向と異なり、塩分低下時に硝酸塩センサー値が上昇した。この要因は、2 月 13–14 日のまとまった降雨による出水の影響を受けたものと推察された。Stn. A および B における観測結果は、数値シミュレーション計算で得られた明石海峡から播磨灘北東部に流入する大阪湾由来の水塊の影響範囲とも一致していた。数値シミュレーションでも、潮汐流に伴い明石海峡を通じた大阪湾からの DIN 供給が、淡路島西岸も含め、播磨灘北東部のり漁場に波及する

ことが認められた。

播磨灘北東部の流況は比較的単調で東流と西流を繰り返す。海峡から延びる水路状地形の部分では、北東・南西方向の往復流だが、鹿ノ瀬より北側では鹿ノ瀬の地形の方向に約 45°斜交し、ほぼ東西方向の流れとされており(八島, 1992), 今回の Stn. A および B で観測した流況結果と概ね一致する。また、淡路島西岸の室津ノ瀬周辺では水路状地形の方向と同じ北東・南西流とされている(八島, 1992)。さらに明石海峡を通過し播磨灘に流出した水塊は、ほぼ同心円状に広がるとの報告がある(今本ら, 1992)。これらの知見、連続観測およびシミュレーション計算結果から、明石海峡を通じた大阪湾由来の水塊は、潮汐流に伴い間欠的に播磨灘北東部のノリ漁場に到達していると判断された。

藤原(2011)は、室内でノリの色調回復について実験した結果、間欠的な栄養塩供給により、ノリ葉体切片の色調回復が認められたと報告している。また、高濃度の DIN を含む河川系水が間欠的に届く漁場では、周辺海域の DIN 濃度が 1.0 μ M 程度であっても、ノリの色調は維持されている(高木ら, 2012)。これら既報から、間欠的でも高濃度の DIN が供給される場合、ノリの色落ち防止に効果があると考えられる。1990年代および2010年代の瀬戸内海表層における冬季の DIN 濃度は、両年代とも大阪湾東部、大阪湾西部、播磨灘の順に低く(朝日ら, 2019)、大阪湾は播磨灘に比べ概して DIN 濃度が高いと考えられる。明石海峡部および大阪湾西部の DIN 濃度は河川水ほど高濃度ではないものの、播磨灘側に比べ高濃度の DIN の間欠的な供給は、播磨灘北東部のノリ漁場にとってプラス因子と考えられる。さらに、生態系モデルを用いた解析でも、大阪湾の DIN 濃度は播磨灘の DIN 濃度に大きく影響していることが報告されている(古川・相馬, 2023)。

播磨灘北東部のうち特に東播磨沿岸海域では、下水処理施設や民間事業所、および加古川河川水等、陸域からノリ漁場への栄養塩供給による影響も大きいと考えられる(阿保ら, 2012; 原田・宮原, 2017b; 原田ら, 2018, 2022)。今回の数値シミュレーションでも同海域には、下げ潮時に加古川河川水等の影響が及ぶ計算結果であった。さらに近年は、兵庫県栄

養塩類管理計画に基づく栄養塩管理運転が実施されており、その影響は増強していると推測される。同海域のノリ漁場の栄養塩環境には、これら北部沿岸からの陸域負荷に加えて、明石海峡を通じた大阪湾からの栄養塩供給が寄与していると考えられた。

瀬戸内海の貧栄養化が問題となっている状況下において、県下瀬戸内海海域の今後の栄養塩管理を考えるうえで、播磨灘への明石海峡を通じた大阪湾に由来する海水の流入は、播磨灘北東部のノリ養殖や他の生物生産に繋がる重要な栄養塩供給源とみなすこともでき、隣接海域を含めた行政施策を検討する必要があると考えられる。

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。海洋観測データをご提供いただいた兵庫県漁業協同組合連合会兵庫のり研究所の皆様、に厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 阿保勝之・樽谷賢治・原田和弘・宮原一隆・中山哲
 厳・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.
- 朝日俊雅・阿保勝之・阿部和雄・多田邦尚(2019):
 瀬戸内海表層水における 1990 年代と 2010 年代
 の溶存無機態および有機態窒素濃度の比較.
 沿岸海洋研究 **56**, 123–131.
- 藤原宗弘(2011):ノリの栄養塩取り込みーノリは間欠
 的な栄養塩供給を利用できるかー. 日本水産学
 会誌 **77**, 113.
- 古川桃子アンナ・相馬明郎(2023):生態系モデルを
 用いた播磨灘における貧栄養化対策の評価ー
 河川, 大阪湾, 二枚貝に関わる施策の効果とそ
 のメカニズムー. 土木学会論文集 **79**(17), 23-
 17153.
- 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.
- 原田和弘・宮原一隆・川崎周作(2022):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. 兵庫県立農林水産技術総合センター研究報告 **5**, 1-11.
- 兵庫県(2018a):播磨灘流域別下水道整備総合計画 計画書, 23p.
- 兵庫県(2018b):播磨灘流域別下水道整備総合計画 補足説明資料, 51p.
- 兵庫県(2022):兵庫県栄養塩類管理計画, 25p.
- 兵庫県(2025):大阪湾流域別下水道整備総合計画, 13P.
- 今本博健・大年邦雄・鈴木 隆(1992):大阪湾の潮流と海水交換に関する研究. 京都大学防災研究所年報 **35 B-2**, 331-348.
- 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, 41p.
- 中山哲巖(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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 八島邦夫(1992):明石海峡周辺の砂堆地形と流況に関する諸問題. 水路部技報 **10**, 79-89.

Continuous Observations of Nutrients Supplied by Osaka Bay via the Akashi Strait to Nori Farms in Northeastern Harima Nada

Kazuhiro HARADA¹⁾, Kazutaka MIYAHARA¹⁾ and Katsuyuki ABO²⁾

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

²⁾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

Corresponding: Kazuhiro HARADA

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

Using an automatic nitrate sensor, continuous observations were conducted of nutrients supplied by Osaka Bay through Akashi Strait to nori farms in northeastern Harima Nada. The NO₃-N concentrations in surface waters of nori farms in northeastern Harima Nada showed fluctuation associated with tidal currents: they increased during the flood tide (westward flow) and decreased during the ebb tide (eastward flow). Nori farm water temperatures and salinity also showed fluctuations synchronized with tidal currents. Numerical simulation results demonstrated that strongly mixed water in Akashi Strait flows into Harima Nada during the flood tide, reaching nori farms off Futami in Akashi City, Shikanose, and the western coast of Awaji Island. These results demonstrated that nori farms of northeastern Harima Nada were influenced by nutrients supplied from Osaka Bay via Akashi Strait, primarily during the flood tide.

Key Words : Akashi Strait, automatic nitrate sensor, continuous observation, nori (*Pyropia*) farms, Harima Nada, Osaka Bay