

栄養塩類の管理に係る順応的な取組の検討

1. 背景・目的	1
2. 下水処理場における季節別運転管理の効果等	1
2.1 運転管理の実施による窒素排出量の増加	1
2.2 海域(ノリ養殖場)への栄養塩類供給の状況	3
2.3 ノリへの栄養塩類吸収	5
2.4 放流先周辺海域の水環境への影響	8
2.5 下水処理場における季節別運転管理の効果等の整理状況	12
3. 海底耕耘の効果等	13
3.1 海底耕耘による海底からの栄養塩類供給量の増加	13
3.2 ノリ養殖場への栄養塩類供給の状況	15
3.3 海底耕耘の効果等の整理状況	17

1. 背景・目的

平成 27 年 2 月に変更された瀬戸内海環境保全基本計画において、「生物多様性・生物生産性の確保の重要性にかんがみ、地域における海域利用の実情を踏まえ、湾・灘ごと、季節ごとの状況に応じたきめ細やかな水質管理について、その影響や実行可能性を十分検討しつつ、順応的な取組を推進するものとする」旨が盛り込まれたところであり、地域の状況に応じて下水処理場における季節別運転管理を行う等の順応的取組が、一部の地域で試行的に実施されている。このような状況を踏まえ、下水処理場における季節別運転管理、海底耕耘について、栄養塩類供給に係る取組状況及び効果等について知見の収集を行った。

2. 下水処理場における季節別運転管理の効果等

2.1 運転管理の実施による窒素排出量の増加

事例

冬季に窒素排出量増加運転を試行している加古川下流浄化センターおよび明石市二見浄化センターにおける至近 5 年の放流水の窒素濃度と DIN の排出量を整理した。また、加古川下流浄化センターについては運転試行前の 5 年の平均値と比較した。各浄化センターにおける窒素排出量増加運転（試行）の概要を表 1 に示す。

表 1 窒素排出量増加運転の概要

	加古川下流浄化センター	明石市二見浄化センター
放流先	泊川	播磨灘海域
増加運転開始年度	平成 20 年度	平成 20 年度
増加運転方法	脱窒抑制運転	硝化抑制運転
増加運転期間	・ 移行期間：12 月中旬～12 月下旬 ・ 増加運転期間：1 月上旬～2 月下旬 ・ 回復期間：3 月上旬～3 月下旬	・ 移行期間：9 月中旬～10 月上旬 ・ 増加運転期間：10 月中旬～4 月下旬 ・ 回復期間：5 月上旬～5 月下旬

出典) 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, 国土交通省水管理・国土保全局下水道部, 平成 26 年 3 月より作成

①加古川下流浄化センターの窒素排出量

窒素増加運転試行前 (H15～H19) と運転試行後 (H23～H27) の放流水中の窒素濃度および、DIN の 1 日あたりの排出量の月別変化 (5 年平均値) をそれぞれ図 1、図 2 に示す。ノリ生産のピーク時 (1 月) の DIN 濃度は運転試行前は約 6.4mg/L、運転試行後は約 7.6mg/L となっており、運転試行後の窒素濃度は 1.2mg/L 程度増加している。また、DIN の排出量は運転試行前が約 0.5tN/day、運転試行後が約 0.8tN/day となっており、0.3tN/day 増加している。

(a) 運転試行前 (H15～H19)

(b) 運転試行後 (H23～H27)

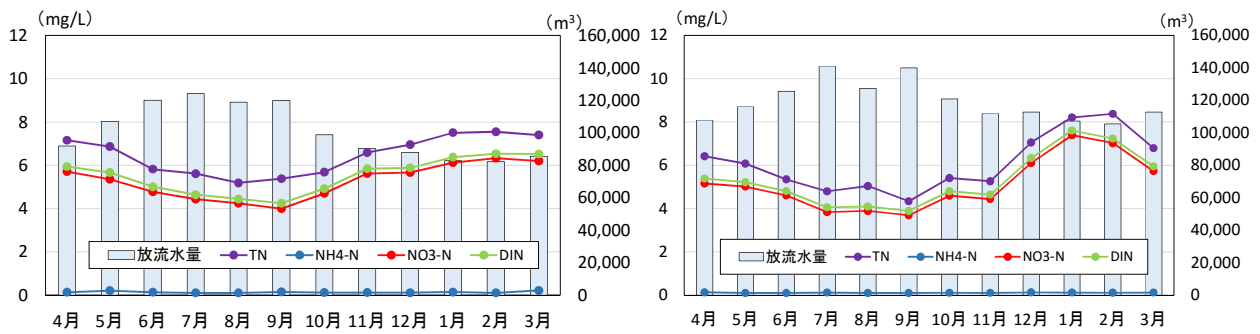


図 1 加古川下流浄化センターにおける(a)運転試行前と(b)運転試行後の放流水中の窒素濃度の月別変化

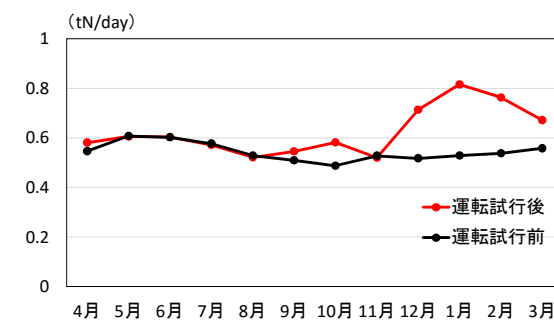


図 2 運転試行前後の1日あたりのDIN排出量の月別変化

②明石市二見浄化センターの窒素排出量

放流水中の窒素濃度およびDINの1日あたりの排出量の月別変化 (H24～28の平均値) をそれぞれ図3、図4に示す。移行期間前8月のDIN濃度は13.6mg/L、ノリ漁期の1月は約20.9mg/Lとなっており、排出濃度は7.3mg/L程度増加している。また、DINの排出量は8月が約0.5tN/day、1月が約0.7tN/dayとなっており、約0.2tN/day増加している。

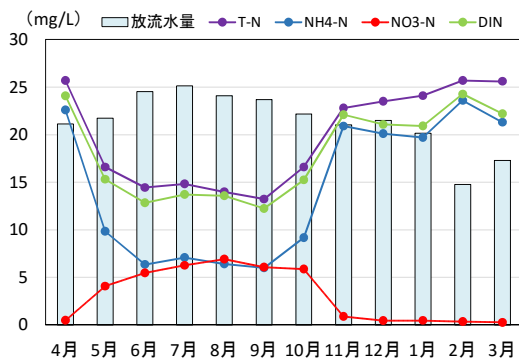


図 3 放流水中の窒素濃度の月別変化

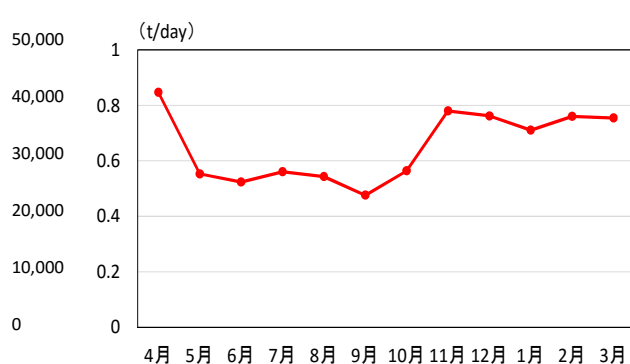


図 4 1日あたりのDIN排出量の月別変化

結果のまとめ

- ・ 運転管理の実施による、窒素排出量の増加が確認された。

2.2 海域（ノリ養殖場）への栄養塩類供給の状況

事例①（文献 No. 1）

〔方法〕 加古川下流浄化センターにおいて実施されている窒素排出量増加運転（脱窒抑制運転）の影響の範囲や時間的な変動について、シミュレーションモデルを用いた解析により確認した。

〔結果〕 窒素排出量増加運転により、通常運転時と比較して0.05mg/Lの全窒素増加分がノリ養殖区画に到達すること、放流先の泊川河口沖水路からノリ養殖区画海域へ輸送されるDINが8.1%増加（0.2t/day増加）することが予測された（図5参照）。ノリ養殖区画におけるDIN濃度は概ね0.1～0.3mg/Lの範囲で変動していた。（図6参照）。



図5 窒素排出量増加運転によるノリ養殖区画への窒素供給効果

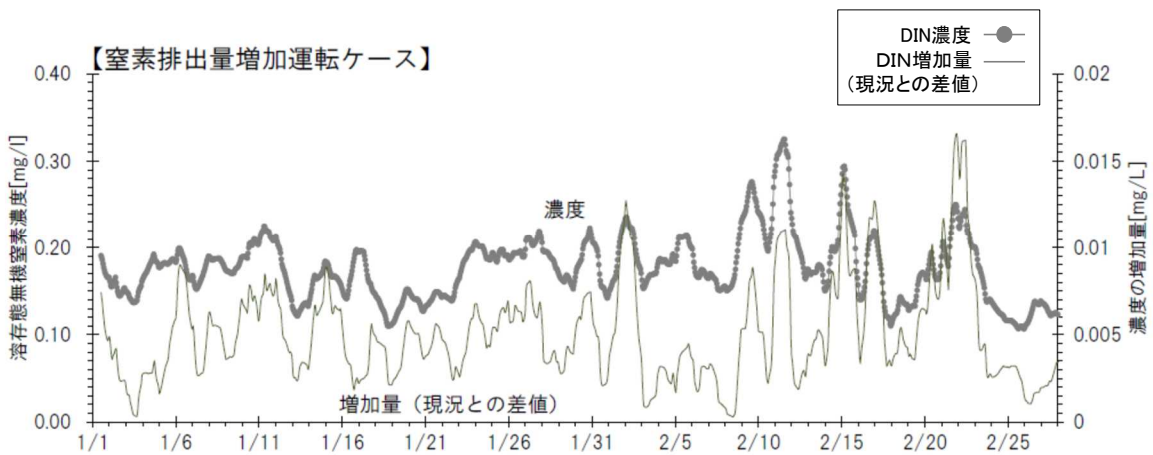


図6 シミュレーションによるノリ養殖区画（図5参照）における窒素排出量増加運転によるDIN濃度の経時変化

事例② (文献 No. 2)

[方法] 陸域からの栄養塩類供給（下水処理放流水及び産業排水等を含む）が、加古川河口域に位置するノリ養殖漁場に与える影響を確認するため、漁場近傍の観測地点において、冬季に硝酸塩濃度及び塩分を連続観測（毎時1回）した。なお、下水処理放流水は硝酸態窒素が主体であり、産業排水はアンモニア態窒素が主体である。

[結果] 加古川市沖のノリ漁場13号区（別府沖）における硝酸塩センサー等の観測機器を用いた連続観測では、下げ潮時に塩分の低下と DIN 濃度の上昇が明瞭に確認できた。（図 8 参照）



図 7 観測位置

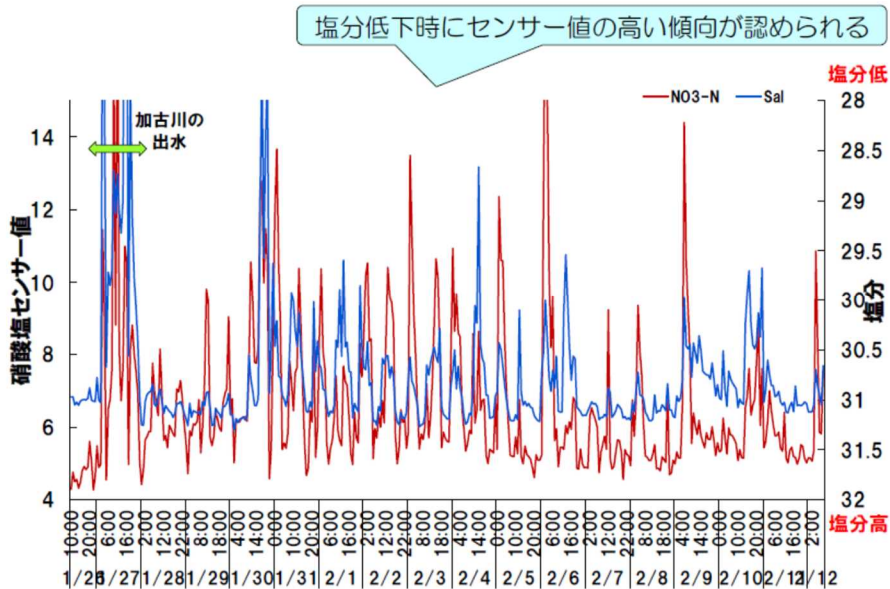


図 8 硝酸塩センサー値と塩分の変化

結果のまとめ

- ・加古川下流浄化センターからの栄養塩類は、ノリ養殖場へ到達していると考えられる。

2.3 ノリの栄養塩類吸収

運転管理の実施による生物生産性の向上に対する効果を確認するためには、栄養塩類の供給によるノリの色調回復・生長を確認する必要がある。確認に当たっては、1) 栄養塩類供給の時間スケール（間欠的）を踏まえたノリの吸収能、2) ノリ葉体に含まれる窒素起源について考慮する必要がある。このため、これらの観点から、既往文献の整理・考察を行った。

1) 間欠的栄養塩供給による色落ちノリの色調回復（室内実験）

ノリの色調回復・生長の効果を確認するためには、栄養塩類供給の時間スケール（間欠的）を踏まえたノリの吸収能を確認する必要がある。このため、室内培養実験の結果を次のとおり整理した。

事例（文献No.3）

〔方法〕 栄養塩類が補給される状況下で色落ちしたノリの色調の変化を見るため、養殖場から採取した色落ちしたノリ葉体を、栄養塩類が枯渇した基本培養液 $0.5\mu\text{M}$ (0.007mg/L) に一定時間浸漬したのち、 NaNO_3 添加培養液 $7.0\mu\text{M}$ (0.098mg/L) に浸漬時間（浸漬なし～120分の間で4段階）を変え、ノリの変化状況（ L^* 値、SPAD値）を観察した。

〔結果〕 「浸漬なし」では色調回復には至らず、浸漬時間が短い試験では色調回復はゆるやかであり、合計浸漬時間が60分を超えると十分に色調が回復した。また浸漬回数1回より2回の方が、色調回復が良い傾向が見られた。

結果のまとめ

- ・ 間欠的な栄養塩供給でノリ葉体の色調は回復することが、室内実験において観察された。

2) ノリが吸収する栄養塩類の由来

事例（文献No.4）

〔方法〕 備讃瀬戸に流れ込む吉井川の河口から沖にかけて設置されているノリ養殖漁場7箇所から採取したノリ葉体の窒素安定同位体比（ $\delta^{15}\text{N}$ ）を求め、同時に各箇所から得た連続水温・塩分記録とDIN濃度（採水分析値と連続塩分記録から算出）から、DIN河川由来の窒素の影響を調べた。

〔結果〕 ノリの $\delta^{15}\text{N}$ （平均）は河口に最も近い測点1で $7.7\pm 0.5\text{‰}$ 、最も河川から離れた測点Kで $11.1\pm 0.1\text{‰}$ となり、河口に近い測点ほど低く、河川水中の $\delta^{15}\text{N}$ に近い値を示した。この結果から、河川水由来の窒素の寄与割合は測点1～6で60%以上、測点13でも35%あった。また、移植試験を行ったところ、移植したノリ先端部の $\delta^{15}\text{N}$ の変化についてみると、移植後すぐに $\delta^{15}\text{N}$ が低下し、7日以内にはもとあったノリとほぼ同程度となった。同試験において、ノリ色調回復を確認したところ、色落ちしたノリの色調は14日後までにはもとあったノリと同程度まで色調が回復したことから、 $\delta^{15}\text{N}$ は河川からの栄養塩類供給の影響を色調よりも迅速に反映していたと考えられる。

【参考】

河川水の影響の最も少ない測点Kの塩分、DIN濃度から求めた予測値は実測値ともほぼ一致した。河口から離れている測点4（潮流緩流域）や12（河川水到達域）のノリの $\delta^{15}\text{N}$ では平均塩分から求めた値より低く、ノリが間欠的に届く河川水から窒素を取り込んでいることを示唆した。

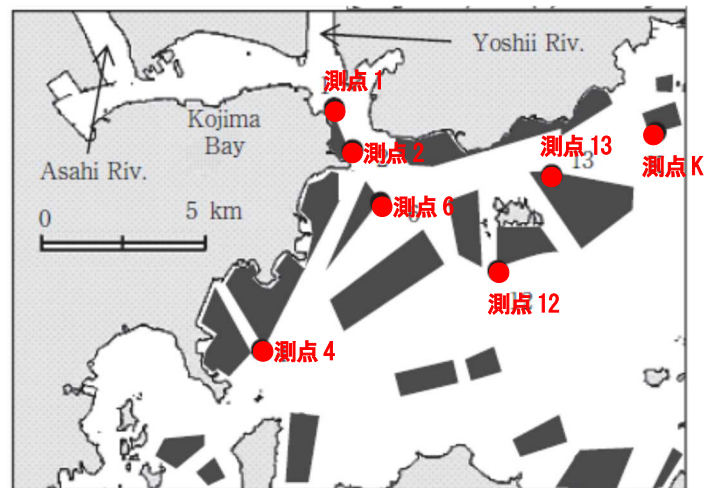


図 9 窒素安定同位体比調査測点

表 2 河口から沖に向かう各測点の塩分、DIN、 $\delta^{15}\text{N}$

Table 5-1 Salinity, DIN and nori- $\delta^{15}\text{N}$ measured at each station from January 18 to February 7 in 2008.
DIN = $-1.79 \times \text{salinity} + 60.1$

St.	Salinity			DIN (μM)	$\delta^{15}\text{N}$ of nori
	mean \pm SD	minimum	maximum	mean	mean \pm SD
1	26.7 \pm 4.4	6.7	32.9	12.3	7.7 \pm 0.5
2	28.4 \pm 3.4	18.9	32.1	9.3	7.6 \pm 0.2
4	32.5 \pm 1.0	27.6	33.3	1.9	8.7 \pm 0.3
6	31.1 \pm 2.4	20.3	33.1	4.4	8.4 \pm 0.2
12	32.6 \pm 0.6	28.7	33.2	1.7	9.4 \pm 0.6
13	32.5 \pm 0.9	27.3	33.2	1.9	9.8 \pm 0.3
K	32.8 \pm 0.2	32.3	33.3	1.4	11.1 \pm 0.1

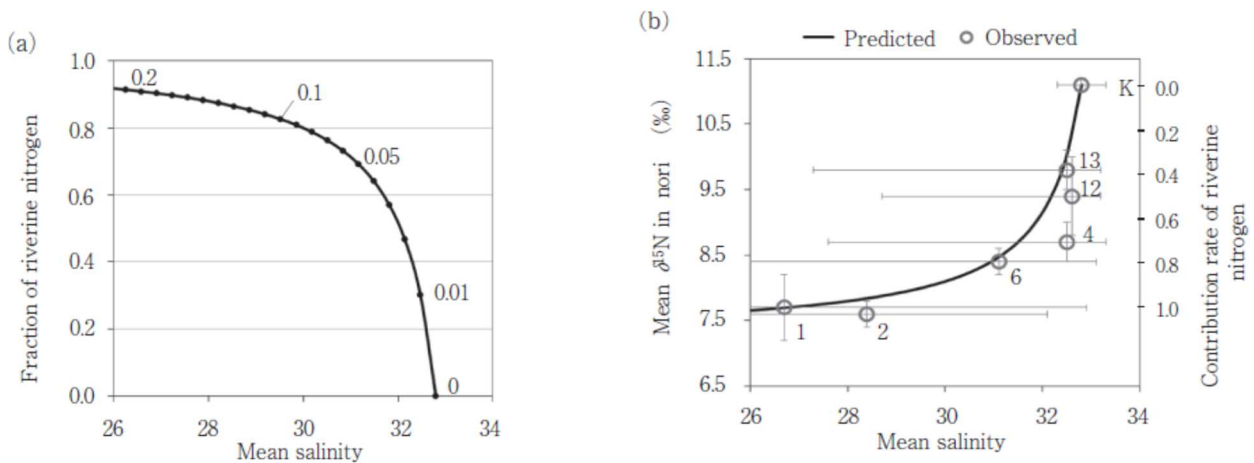


Fig. 5-5 (a) Relationships between mean salinity and fractionation of the riverine nitrogen, (b) salinity and $\delta^{15}\text{N}$ (‰) of nori.

図 10 (a) 塩分と河川起源の窒素寄与割合 (b) 塩分と $\delta^{15}\text{N}$ の予測 (実線) と実測 (○)

表 3 各測点の河川由来窒素の寄与割合(左: 塩分から、右: $\delta^{15}\text{N}$ から)

Table 5-2 Contribution rates of riverine nitrogen predicted from the mean salinity and measured from nori $\delta^{15}\text{N}$ values.

St.	Predicted from mean salinity (N_i)	Measured from nori $\delta^{15}\text{N}$
1	0.91	0.91
2	0.87	0.93
4	0.29	0.64
6	0.70	0.72
12	0.21	0.45
13	0.29	0.35
K	0.00	0.00

結果のまとめ

- ・ノリが吸収する栄養塩類の由来について、 $\delta^{15}\text{N}$ を調査することで、河川からの栄養塩類の供給に占める割合が高いこと、間欠的に届く河川由来の栄養塩類を取り込んでいること、栄養塩類の取り込みは色調の変化が起こるよりも迅速に行われることが確認された。

2.4 放流先周辺海域の水環境への影響

事例

窒素増加運転試行による放流水中における窒素以外の項目の濃度変化と周辺海域の水質を確認した。

加古川下流浄化センターの窒素増加運転試行前と運転試行後の放流水中のBOD、COD、SS、TP（参考にTNも示す）について月別変化（5カ年平均値）を比較すると、年間を通じて運転試行後の方がCOD、TPはやや低く、BODはやや高い傾向がみられた。SSは同程度であった。一方、周辺海域の水質については、年間を通じて底層D0以外の項目で運転試行前と同程度かやや低く、地点60の夏季の底層D0は運転試行前よりやや上昇しており、5mg/L以上で推移していた。また、COD以外の項目は年間を通じて環境基準を満たしていた。（図12参照）

明石市二見浄化センターの窒素増加運転試行前と運転試行後の放流水中のBOD、COD、SS、TP（参考にTNも示す）について月別変化（5カ年平均値）を比較すると、COD、TPは年間を通じて同程度でBODは運転試行後の方が10月～3月にかけてやや低い傾向がみられた。一方、周辺海域の水質については、どの項目も運転試行前と同程度かやや低く、年間を通じて環境基準を満たしていた。また、底層D0は5mg/L以上で推移していた。（図13参照）

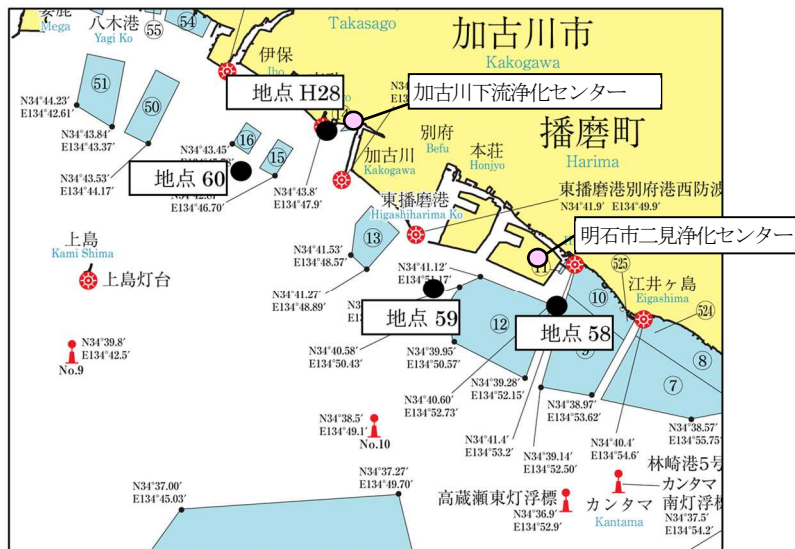


図11 浄化センター位置及び水質測定地点（■：ノリ・ワカメなど養殖場）
（出典：兵庫県漁業協同組合連合会）

図 12 加古川下流センター 窒素増加運転試行前と運転試行後の放流水および周辺海域の水質の月別変化

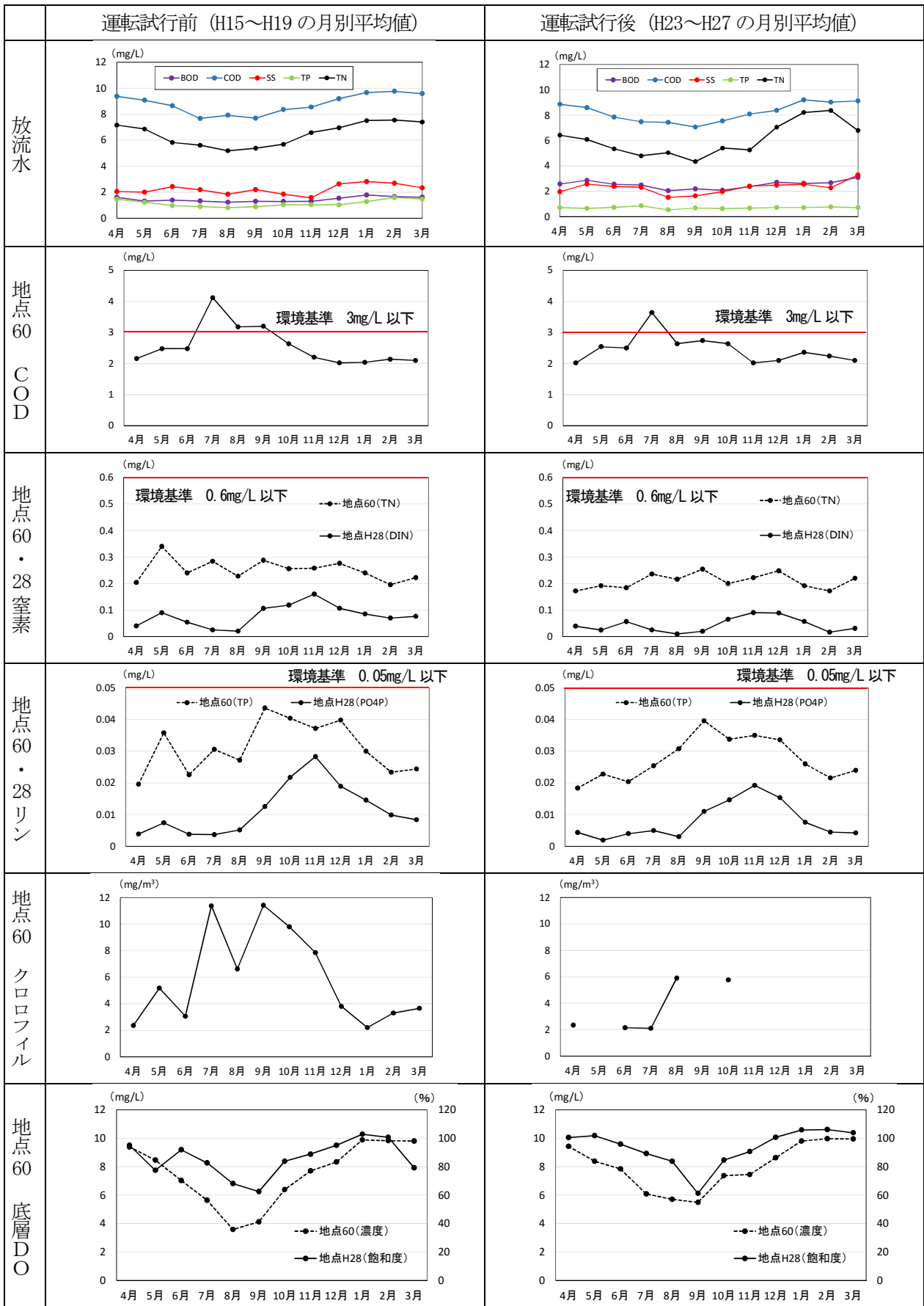
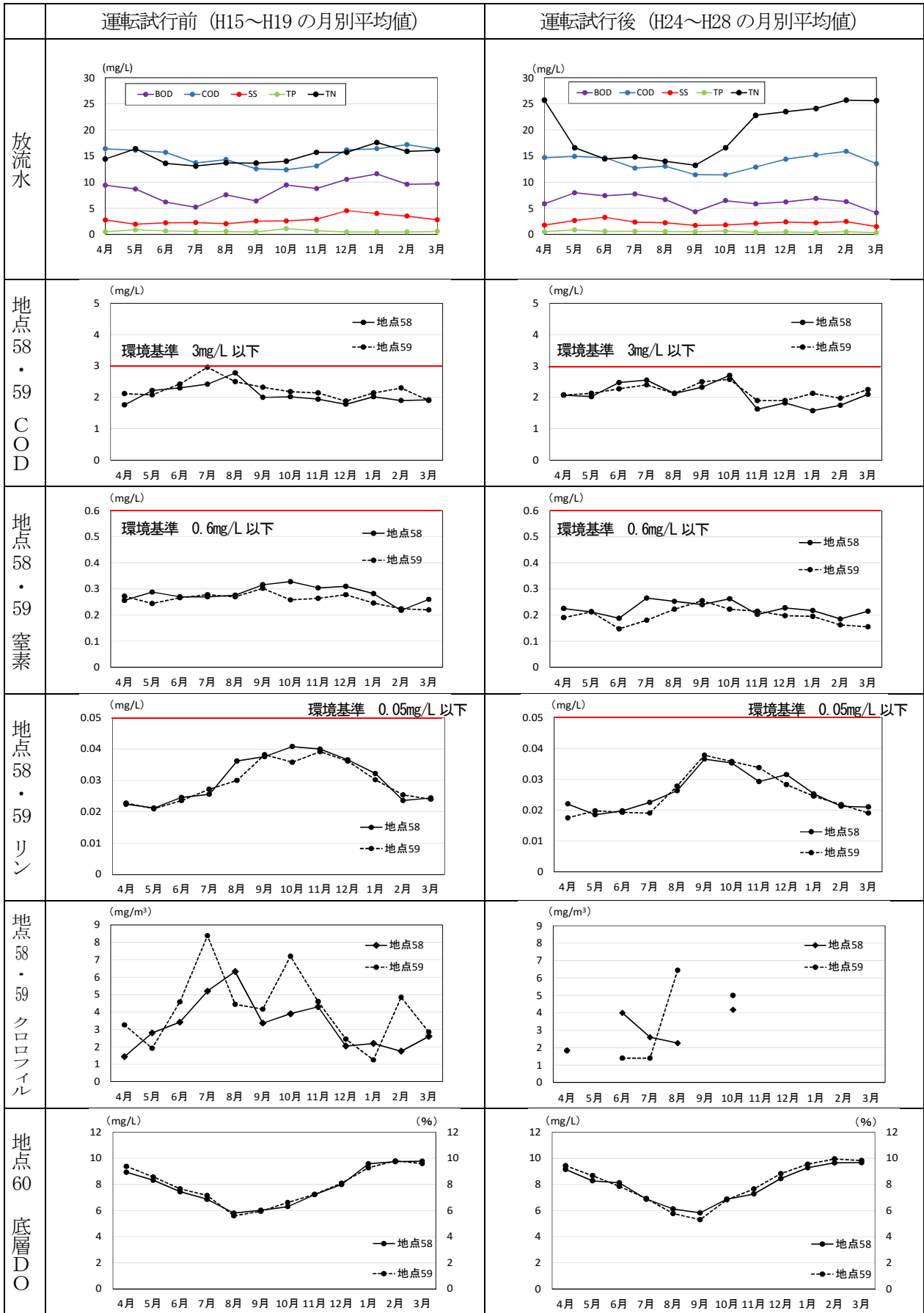


図 13 明石市二見浄化センター 窒素増加運転試行前と運転試行後の放流水および周辺海域の水質の月別変化



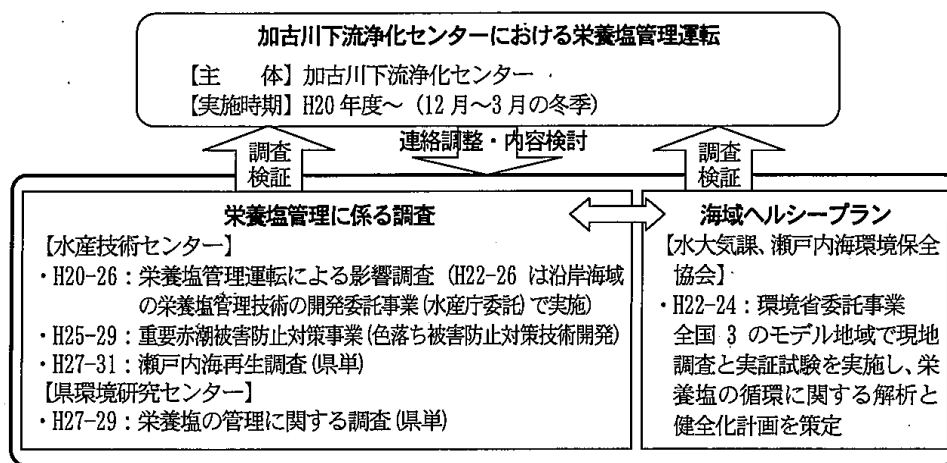
【参考】 栄養塩類運転管理の調査実施状況

加古川下流浄化センターの放流先の海域では、継続的なモニタリング（常時監視や浅海定線調査等）の他に、図 14 のような調査が実施されている。

これらの現場における連続観測^{※1}や生態系モデルと潮流モデルを合わせたシミュレーション^{※2}等により下水処理場の窒素排出量増加運転によるノリ漁場への栄養塩類供給状況が報告されている。

※1：原田和弘ほか(2015)：播磨灘のノリ養殖漁場における連続観測機器を用いたモニタリング（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関する研究会，発表要旨及びスライド）

※2：阿保勝之ほか（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（海岸工学）Vol. 68, No. 2, I_1116-I1120）



出典) 平成 29 年度 第 1 回 豊かな海づくりに係る検討会（兵庫県ほか）

図 14 加古川下流浄化センター放流先の周辺海域における調査実施状況

結果のまとめ

- ・ 従来の継続的なモニタリングが実施されており、水質については負の影響は報告されていない。

2.5 下水処理場における季節別運転管理の効果等の整理状況

	結果のまとめ
・ 運転管理の実施による窒素排出量の増加	運転管理の実施による、 <u>窒素排出量の増加が確認された。</u>
・ 海域（ノリ養殖場）への栄養塩類供給の状況	加古川下流浄化センターからの <u>栄養塩類は、ノリ養殖場へ到達していると考えられる。</u>
・ ノリの栄養塩類吸収 1) 間欠的な栄養塩類供給による色落ちノリの色調回復（室内実験）	<u>間欠的な栄養塩供給でノリ葉体の色調は回復することが、室内実験において観察された。</u>
2) ノリが吸収する栄養塩類の由来	ノリが吸収する栄養塩類の由来について、 $\delta^{15}\text{N}$ を調査することで、 <u>河川からの栄養塩類の供給に占める割合が高いこと、間欠的に届く河川由来の栄養塩類を取り込んでいること、栄養塩類の取り込みは色調の変化が起こるよりも迅速に行われることが確認された。</u>
・ 放流先周辺海域の水環境への影響	従来の継続的なモニタリングが実施されており、水質については負の影響は報告されていない

3. 海底耕耘の効果等

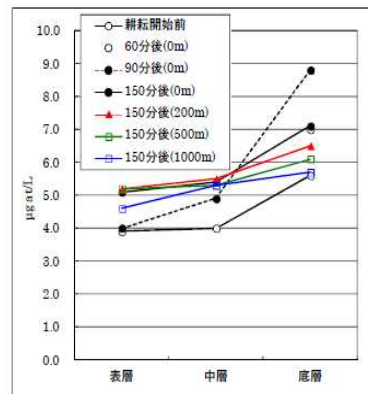
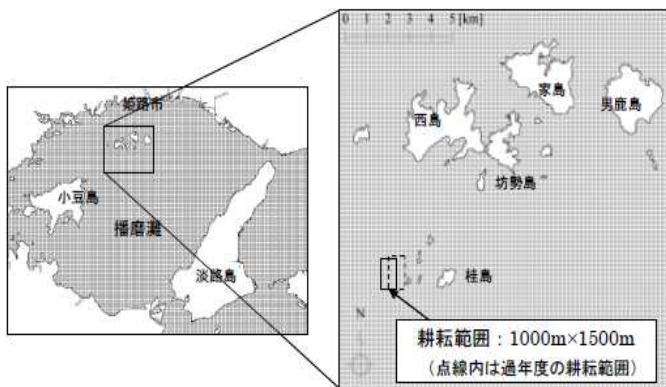
3.1 海底耕耘による海底からの栄養塩類供給量の増加

事例①（文献 No. 5）

[方法]

- ・実施背景：海底耕耘の効果（海底の栄養塩類の還元、底質改善、休眠細胞の再懸濁によるプランクトン食性魚の餌の増加）を定量的に評価することを目的とした。
- ・実施時期：平成 22 年 9 月 27 日（6：00～14：00 の西流～転流）
- ・実施場所：姫路市家島町坊勢島の南、桂島西側
- ・水深：約 35m
- ・底質：強熱減量、全硫化物は低く、全窒素が高めで海底耕耘に適した海域
- ・実施方法：水深約 35m のノリ漁場に隣接する 1,000m×1,500m の範囲において、専用の桁を装着した漁船 11 隻が参加し、8 時間往復して海底耕耘を行った。耕耘範囲直近に調査船を係留し、海底耕耘前、海底耕耘後 60 分、90 分、150 分の栄養塩類の鉛直分布を連続して計測した。

[結果] 栄養塩類のうち DIN については耕耘開始後 60 分で、底層にて顕著に上昇しており、90 分経過時点では $3\mu\text{g at/L}$ 以上上昇し、150 分後には表層でも $1\mu\text{g at/L}$ 近い上昇が確認された。（図 16 参照）



事例②（文献 No. 6）

[方法]

- ・実施背景：ノリ等の藻類養殖に必要な栄養塩類を供給し、栄養塩類環境を改善するための効果的な海底耕耘手法を開発することを目的とした。
- ・実施時期：2016 年 8 月 23 日、12 月 21 日、2017 年 1 月 17 日
- ・実施場所：児島湾口部
- ・水深：約 2～4m 前後
- ・実施方法：小型底引き網漁船と一般的に使用されている底引き網漁具を用い、耕耘試験を行った。試験海域には長さ 400m のラインを 6 カ所 (St. 1～6) 設定し、船外機船で耕耘による濁りを追跡しながら耕耘の直前、直後、3、5 分後に表層、海底上 1m (底層) の海水を採取し、栄養塩類濃度を調べた。なお、1 月の試験では漁具による耕耘後、約 5cm の深さの泥が露出した状態で、ダ

イバーが海底表面を攪拌して通常より深く耕耘した場合を模擬的に再現して栄養塩類濃度の変化を調べた。

[結果] 8月に実施した試験では耕耘直後に一部の調査ラインでDIN濃度の明確な上昇が確認されたが、12月の試験ではすべての調査ラインで明確なDIN濃度の上昇は確認されなかった。(図17参照) 原因としては海底表面の付着藻類による消費や、鉛直混合期における拡散等により、海底表面付近の間隙水中の栄養塩類濃度が低かったことが考えられた。

また、1月の試験において耕耘前の泥と耕耘跡の泥の表面を攪拌した結果を比較すると、耕耘前の状態で表面を攪拌しても濃度に変化はなかったが、耕耘跡の表面を攪拌した場合は濃度は上昇した。(図18参照) このことから、冬季においては底泥中の栄養塩は海底表面から5cm以深に多く存在すると考えられ、ノリ漁期に海水中に栄養塩類を供給するためには海底をより深く耕耘する必要があると考えられた。

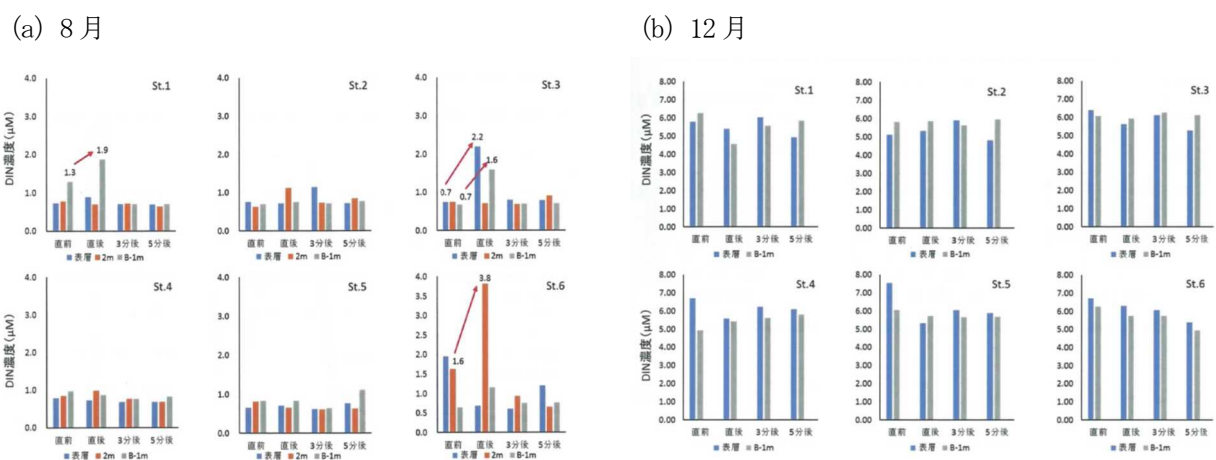


図17 (a) 2016年8月と(b)12月に実施した海底耕耘の直前、直後、3分後、5分後の表層及び底層のDIN濃度の変化(児島湾口部)

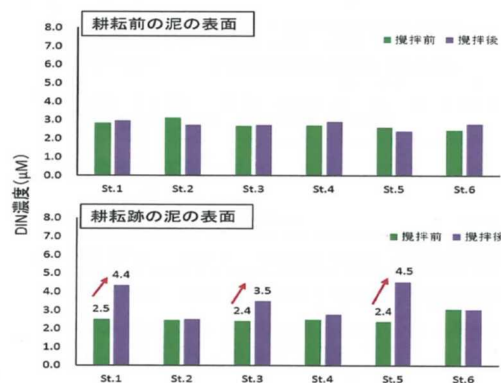


図18 ダイバーによる海底攪拌前後でのDIN濃度の変化(2017年1月、児島湾口部)

結果のまとめ

- 海底耕耘実施後に、海水の表層及び底層におけるDIN濃度の上昇が確認された事例もあるが、一方で明確な濃度変化が見られなかった事例もあり、海域や方法等の違いにより効果は異なることが考えられる。

3.2 ノリ養殖場への栄養塩類供給の状況

事例①（文献 No. 6）

[方法]

- ・実施背景：備讃瀬戸のノリ漁場への栄養塩類供給を行うために適した海底耕耘場所を明らかにすることを目的とした。
- ・実施時期：1月
- ・実施場所：児島湾口部
- ・水深：①約3m、②8m、③15m
- ・実施方法： 実証試験実施場所およびその沖合を2時間かけて海底耕耘した場合の栄養塩類の拡散状況をシミュレーションした。なお、海底耕耘における栄養塩類供給量については、深さ15cmまでの泥中の間隙水がすべて海底直上に放出されると仮定した。

[結果] 水深3mの実証試験実施場所（①）で海底耕耘を行った場合には、3時間後には底層に供給された栄養塩類が表層にまで到達した。表面に達した高濃度水は拡散しながら東へ移動し、耕耘場所付近のノリ養殖場では9時間後までDIN濃度 $8\mu\text{M}$ 以上の海水が存在した。一方、沖合の水深8m地点（②）で海底耕耘を行った場合には9時間後に鉛直混合により表層まで栄養塩類の影響がみられたが、DIN濃度は $2\mu\text{M}$ 程度であった。（図20参照）なお、計算に用いた栄養塩類供給量は最大限に見積もった値であり、実際のDIN濃度はもっと低いと予想される。

さらに、沖合の水深15m地点（③）で海底耕耘を行った場合には、表層で海底耕耘による栄養塩類の供給は全く見られなかった。（図20参照）

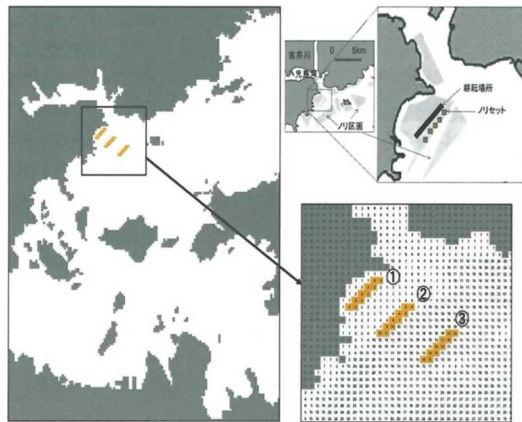


図 19 モデルの計算領域（備讃瀬戸） 図中の①～③は海底耕耘の想定場所（1月、児島湾口部）

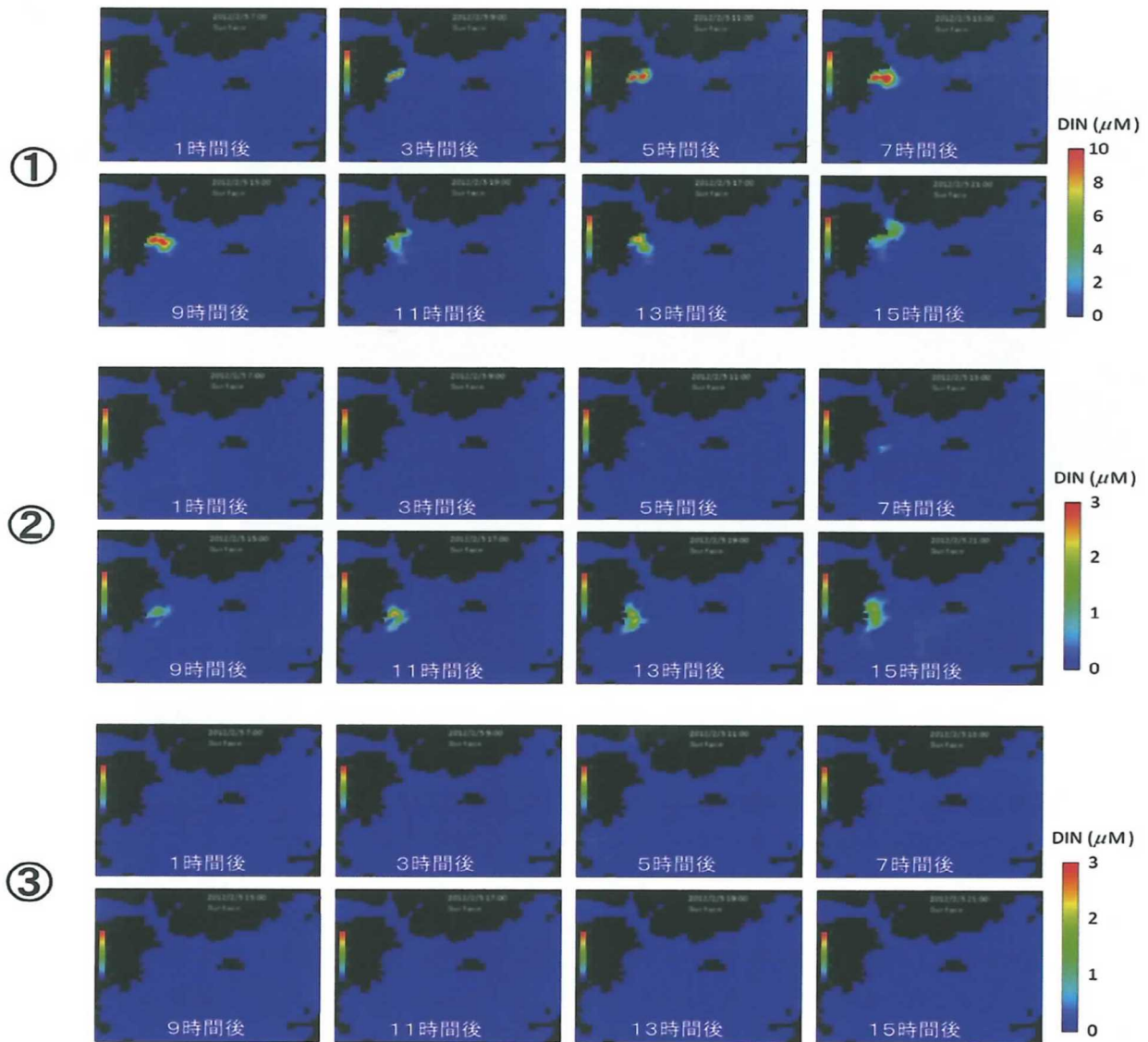


図 20 備讃瀬戸ノリ養殖場における海底耕耘の効果評価
(表層 DIN 濃度のシミュレーション結果 (児島湾口部))

結果のまとめ

- ・シミュレーションの結果から、海底耕耘の実施3時間後に栄養塩が表層にまで到達すること、拡散した高濃度水が9時間後まで存在したこと等が確認され、表層の養殖ノリへの栄養塩類供給が可能であることが示唆された。

3.3 海底耕耘の効果等の整理状況

	結果まとめ
・海底耕耘による海底からの栄養塩類供給量の増加	海底耕耘実施後に、 <u>海水の表層及び底層における DIN 濃度の上昇が確認された事例もあるが、一方で明確な濃度変化が見られなかった事例もあり、海域や方法等の違いにより効果は異なることが考えられる。</u>
・ノリ養殖場への栄養塩類供給の状況	シミュレーションの結果から、海底耕耘の実施3時間後に栄養塩が表層にまで到達すること、拡散した高濃度水が9時間後まで存在したこと等が確認され、 <u>表層の養殖ノリへの栄養塩類供給が可能であることが示唆された。</u>

文献一覧

- No. 1 : 環境省閉鎖性海域対策室 (2012) : 播磨灘北東部地域ヘルシープラン
- No. 2 : 原田和弘ほか(2015) : 播磨灘のノリ養殖漁場における連続観測機器を用いたモニタリング (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関する研究会, 発表要旨及びスライド)
- No. 3 : 藤原宗弘(2011) : ノリの栄養塩採り込みーノリは間欠的な栄養塩供給を利用できるかー (日水誌 77(1), 133)
- No. 4 : 高木秀蔵 (2014) : 河川からの沿岸海域への栄養塩供給とノリの栄養塩供給とノリの栄養塩利用に関する研究 (岡山水研報告 29, 1~50)
- No. 5 : 中西敬ほか (2012) : 貧栄養状態での栄養塩供給手法としての海底耕耘の効果に関する調査研究 (土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 68, No. 2, I_1115- I_1120, 2012)
- No. 6 : 水産庁委託事業 (2016) : 平成 28 年度漁場環境・生物多様性保全総合対策事業のうち赤潮・貧酸素水塊対策推進事業, 漁場生産力向上のための漁場改善実証試験成果報告書.