

水産資源の保全に向けた高度な栄養塩管理手法

(一財)九州環境管理協会環境部環境技術課 横山 佳裕

要 旨

本報告では、有明海においてノリの色落ち対策として実施している下水処理場の下水処理緩和運転によるノリ養殖への影響を把握するため、物質輸送モデルを用いて、下水処理緩和運転の有無によるノリ漁場への栄養塩濃度の寄与を試算した。その結果、冬季のノリ養殖期における下水処理緩和運転による栄養塩供給量の増加は、各処理場地先海域のノリ漁場における栄養塩濃度を明らかに上昇させることを示した。特に、降水量が少なく、河川からの栄養塩供給量が少ない年には、下水処理緩和運転による栄養塩濃度への寄与率は1~2割増加するものと予測された。

1. はじめに

閉鎖性水域では、栄養塩類の過剰な供給による水質の富栄養化や貧酸素化等が問題となり、水域保全対策として窒素やリンの水質規制が行われてきた。具体的には、海域の窒素とリンに係わる水質環境基準の設定や類型指定、窒素とリンの発生負荷量の総量規制等があげられる。これらの水質規制に基づく負荷削減対策の結果、指定水域におけるCODや窒素、リン濃度及び赤潮等の発生件数は減少傾向にある¹⁾。

しかし、水質が改善する一方、窒素やリンは生物生産に関与する物質であるため、これらの負荷量の減少に伴う海域の生物生産力の低下が懸念されている¹⁾。例えば、東京湾や瀬戸内海及び有明海では、漁獲量が以前に比べて減少している。特に、水域の豊富な栄養塩類に依存するノリ生産への影響が著しく¹⁾、全国一のノリ生産量を誇る有明海では2000年度のノリ不作は社会問題となった。その要因の一つは、冬季の窒素不足が挙げられている²⁾。

この窒素不足によるノリの色落ち対策として、海域に直接肥料を散布する施肥や酸処理剤の使用、ダムからの緊急放流等による栄養塩類の供給のほか、時期や利用目的に応じて下水処理水の栄養塩濃度(無機態窒素濃度)を変える下水処理緩和運転による栄養塩供給対策が実施されているが³⁾、その効果の程度は検討されていない。

そこで、本研究では、Euler-Lagrange法によるシミュレーションモデル⁴⁾を用いて、河川や下水処理場等から供給される栄養塩類の寄与を求め、下水処理緩和運転によるノリ漁場における栄養塩濃度への影響について解析した。

2. シミュレーションモデルの概要

シミュレーションモデルは、海水の流れを表現する流動モデルと栄養塩類の分布を追跡する物質輸送モデルで構成される。

計算範囲は有明海と橘湾を含む範囲(図1)⁵⁾とした。水平方向の格子分割は2,000m×2,000mとし、鉛直方向の層分割は14層とした。

流動モデルは運動方程式と連続方程式、熱収支式、塩分収支式、海水密度と水温・塩分を関連づける状態方程式⁶⁾による鉛直多層レベルモデルを用いた。物質輸送モデルはYanagi et al.⁴⁾のEuler-Lagrange手法のモデルをもとに、体積・質量がない仮想粒子(マーカー)を栄養塩類に見立てたものである。

計算対象年度は2000~2002年度とし、11月から翌年2月までのノリ漁期を対象時期とした。計算の時間ステップ(Δt)はCourant-Friedrichs-Lewy条件より20sとした。

各計算対象時期について、図1に示した主要な流入河川及び下水処理場からの栄養塩供給量は、計算容量・時

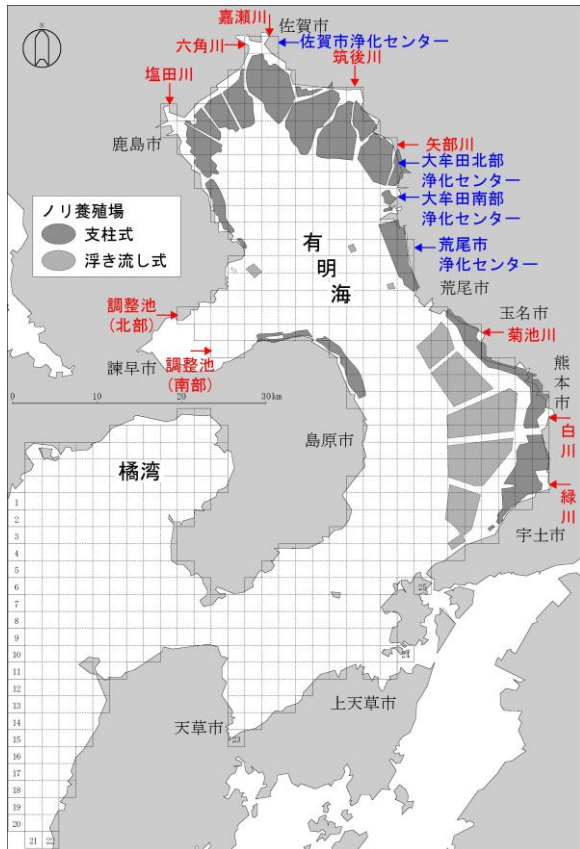


図1 計算格子及び主要な流入河川・下水処理場等

間を考慮して 10kg/日につき 1 個の栄養塩マーカーを供給させた。主要な流入河川からの栄養塩供給量は、中野ら⁷⁾が求めた I-N (無機態窒素) 負荷量を用いた。下水処理場については、既存資料⁸⁾における栄養塩濃度に下水放流量を乗じて求めた。当該海域では、ノリの色落ち対策としてノリ漁期において下水放流水中の窒素濃度を上げる下水処理緩和運転が実施されている⁷⁾。この効果を

検証するために、①ノリ期に下水処理緩和運転を実施した場合 (既存資料の窒素濃度×放流量より算出した負荷量)、②実施しなかった場合 (非ノリ漁期の 7 月～10 月の平均窒素濃度×放流量より算出した負荷量) の 2 ケースの栄養塩供給量を与えた。

この 2 ケースについて、各年度でシミュレーションを実施し、下水処理緩和運転による栄養塩供給量 (I-N) の増加に伴う海域への寄与を解析した。表 1 に各年度の 11 月～2 月における栄養塩マーカー供給量を示す。各年度の流入河川からの供給マーカー量の違いは、降水量の多少による I-N 負荷量の増減によるものである。また、下水処理場からのマーカー供給量は年度によらず同様とした。

3. 結果

計算結果の一例として、計算対象年度の 3 ケ年の平均マーカー供給量に近い 2001 年度の 11 月における各流入点から供給された栄養塩マーカーの経時変化を図 2 に示す。

筑後川や嘉瀬川等の湾奥部の流入河川から供給される栄養塩類は、反時計回りの流れにより、湾奥部西側海域 (佐賀県側) を経て、諫早湾湾口部付近を通過した後、島原半島沿いを湾口部へと流出している。

菊池川や白川等の有明海湾中央部東側の流入河川から供給される栄養塩類は、反時計回りの流れにより、一旦、

表 1 栄養塩 (I-N) マーカー供給量 (11 月～翌年 2 月)

負荷点	マーカー供給量						(季節別下水処理運転実施あり) - (下水処理運転実施なし)					
	2000年度		2001年度		2002年度		2000年度		2001年度		2002年度	
	あり	なし	あり	なし	あり	なし	個数	割合 (%)	個数	割合 (%)	個数	割合 (%)
六角川	7,446	7,446	6,909	6,909	2,412	2,412	0	0	0	0	0	0
嘉瀬川	923	923	1,561	1,561	1,713	1,713	0	0	0	0	0	0
筑後川	44,302	44,302	31,926	31,926	30,073	30,073	0	0	0	0	0	0
矢部川	8,102	8,102	3,882	3,882	2,291	2,291	0	0	0	0	0	0
菊池川	17,405	17,405	16,758	16,758	14,569	14,569	0	0	0	0	0	0
白川	13,157	13,157	9,667	9,667	3,685	3,685	0	0	0	0	0	0
緑川	24,775	24,775	20,958	20,958	26,377	26,377	0	0	0	0	0	0
塩田川	1,912	1,912	1,924	1,924	2,131	2,131	0	0	0	0	0	0
本明川	1,688	1,688	352	352	631	631	0	0	0	0	0	0
北部排水門	2,331	2,331	1,347	1,347	851	851	0	0	0	0	0	0
南部排水門	1,187	1,187	1,149	1,149	779	779	0	0	0	0	0	0
佐賀市浄化センター	5,796	3,960	5,796	3,960	5,796	3,960	1,836	46	1,836	46	1,836	46
大牟田市北部浄化センター	540	240	540	240	540	240	300	125	300	125	300	125
大牟田市南部浄化センター	1,292	600	1,292	600	1,292	600	692	115	692	115	692	115
荒尾市浄化センター	475	360	475	360	475	360	115	32	115	32	115	32
合計	131,331	128,388	104,536	101,593	93,615	90,672	2,943	2	2,943	3	2,943	3

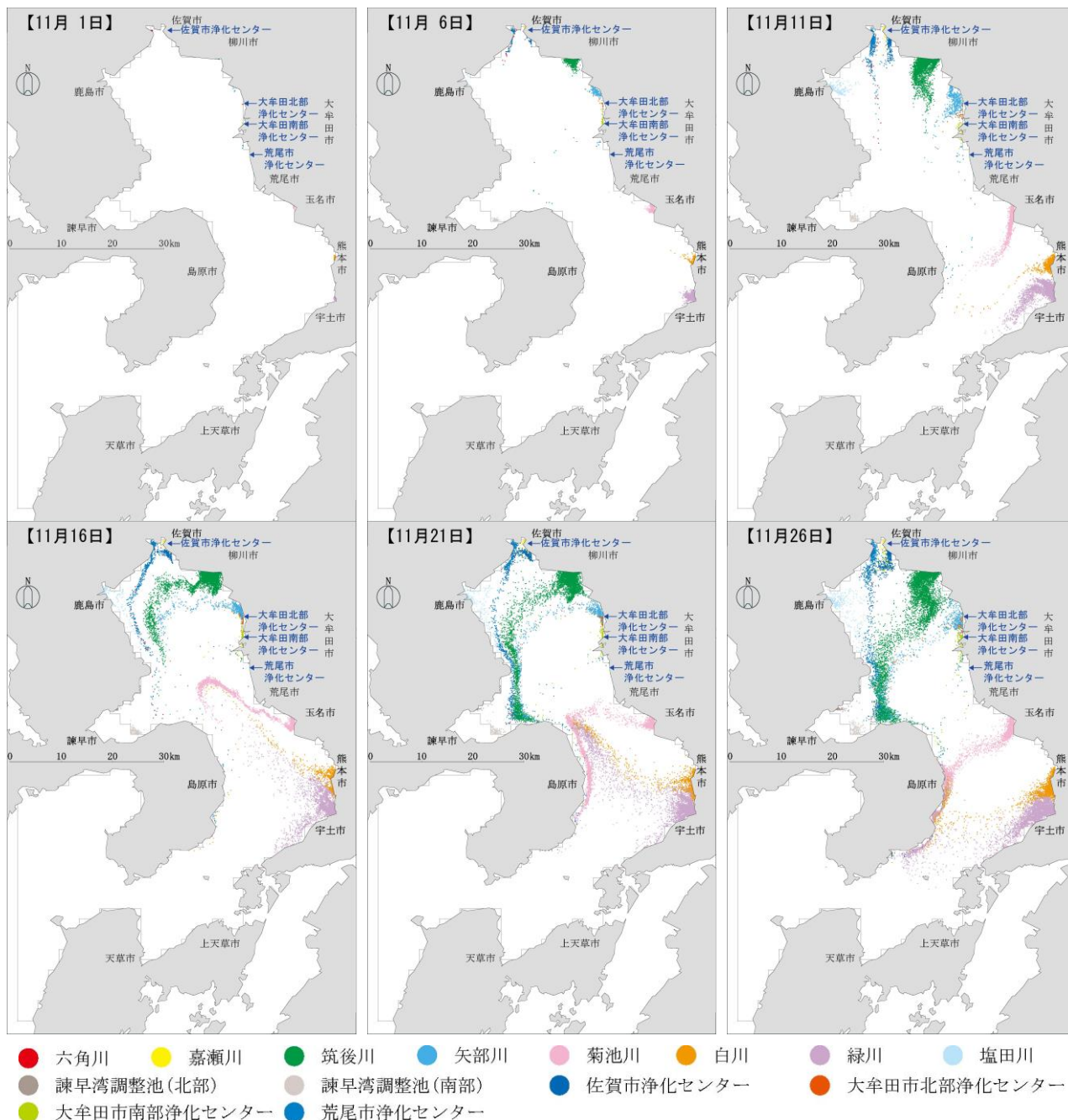


図2 栄養塩マーカの経時変化 (2001年11月)

有明海湾中央から湾奥部付近まで北上したのち、諫早湾湾口部南側を経て、島原半島沿いを湾口部へ流出するマーカと、流入河川から北上せずに湾口部へ流出するマーカがあった。

湾奥部の流入河川等から供給されるマーカと湾中央部東側から供給されるマーカの多くが、反時計回りに沿って移動した後、島原半島沿いに湾口部へ流出している。この栄養塩マーカの流出挙動はいずれの年度においても、同様の傾向であった。

4. 考察

4.1 栄養塩濃度の分布と各河川等からの栄養塩供給の寄与

図2に示したような栄養塩マーカの分布をもとに、計算ステップ (Δt) 毎に求めた各計算格子 (メッシュ) 内のマーカ存在数をノリ養殖期間 (11月～翌年2月) で平均したメッシュ別マーカ存在数の期間平均値を算出した。図2に示した年度と同じ2001年度における下水処理緩和運転を実施した場合と実施しなかった場合そ

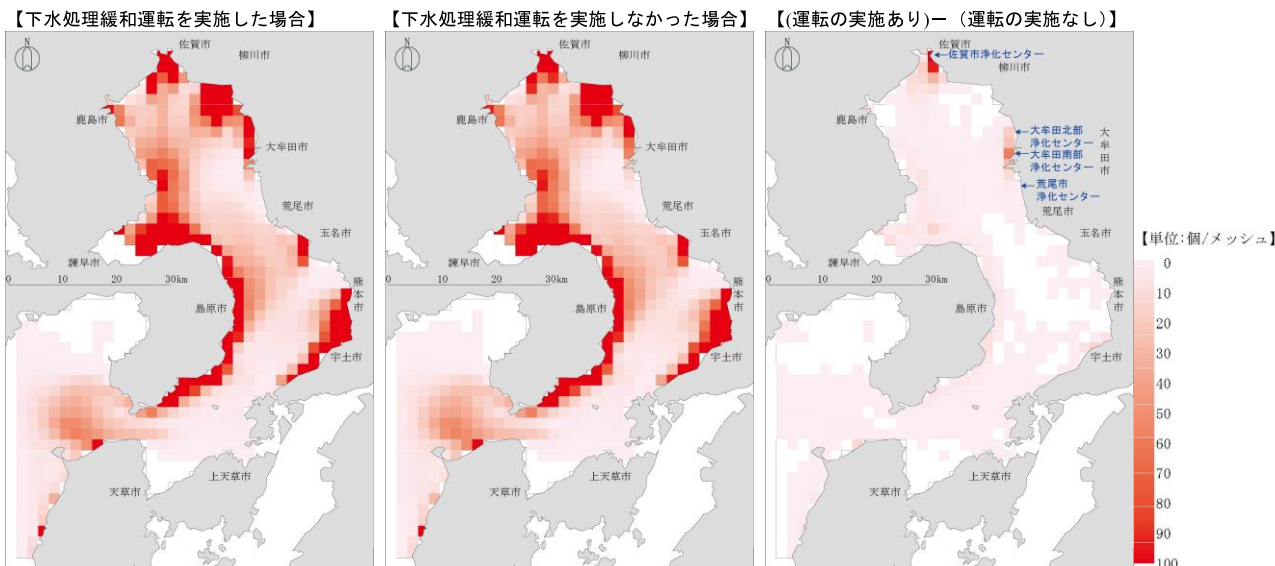


図3 マーカー存在数と下水処理緩和運転による増数の分布（2011年度ノリ漁期の期間平均値）

れぞれについて、メッシュ別マーカー存在数の期間平均値の分布、及び下水処理緩和運転を実施による期間平均値の増数の分布を図3に示す。

各流入点から供給されたメッシュ別マーカー存在数は、湾奥部の筑後川・矢部川・嘉瀬川等の河口域、湾中央部の菊池川・白川・緑川の流入点付近で高い値がみられる。これらの海域では図1に示したように、支柱式を中心にノリ養殖が営まれている海域である。そのほか、島原半島沿いに高い値がみられた。これは図2に示したよ

うに、湾奥部から流入する栄養塩類と湾中央部東側から流入する栄養塩類が島原半島北側付近で合流し、半島沿いを湾口部へ流出するためである。

また、下水処理緩和運転を実施した場合と実施しなかった場合の差をみると（図3右）、海域全体のマーカー存在数に両者の大きな違いはみられないが、ノリ養殖が営まれている海域の佐賀市や大牟田市の地先海域で下水処理緩和運転に伴いマーカー存在数が増加した。

続いて、メッシュ別栄養塩マーカー存在数の総数に対し

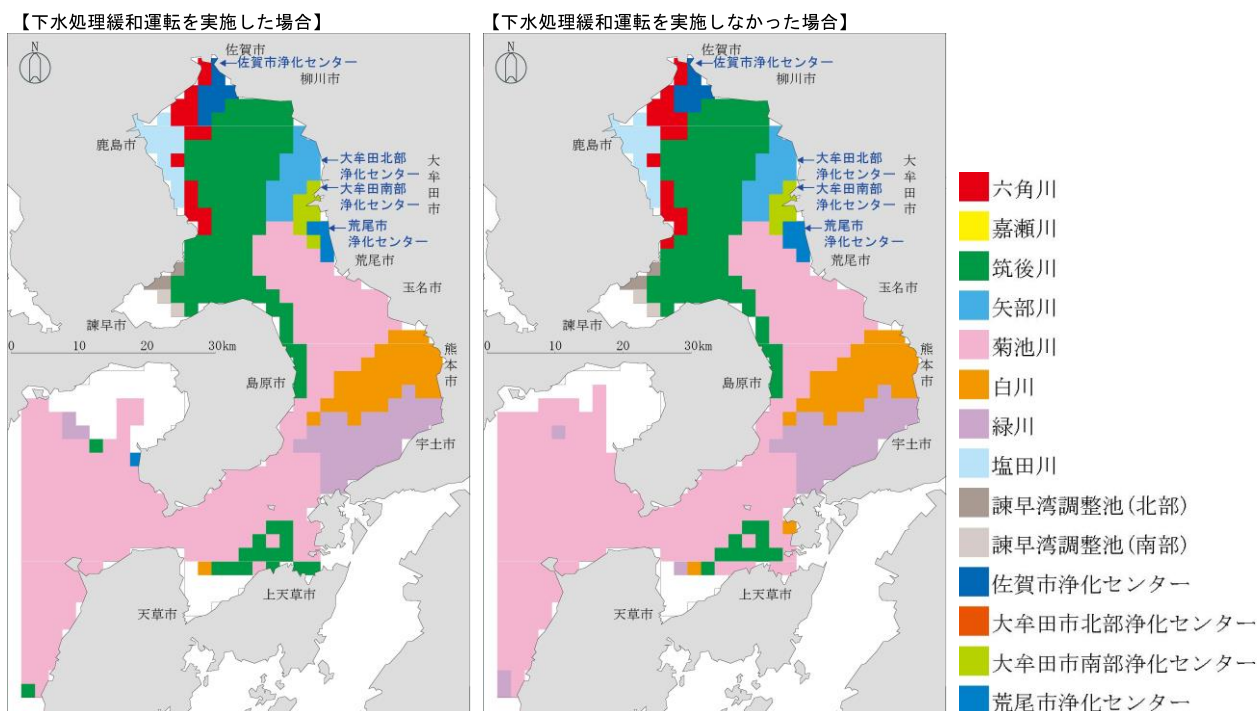


図4 最大寄与となる栄養塩供給源の分布（2011年度ノリ漁期）

て寄与が最も大きい栄養塩供給源の分布を図化した。図2及び図3に示した年度と同じく2001年度における下水処理緩和運転を実施した場合と実施しなかった場合の最大寄与の負荷源の分布を図4に示す。

湾奥部から湾中央にかけての広い範囲で、筑後川の寄与が最も大きく、湾中央部から湾口部にかけては菊池川や白川、緑川の寄与が大きくなっている。一方、ノリ漁場が位置する海岸近くの範囲では、下水処理場の寄与が最も大きくなっている。

下水処理緩和運転を実施した場合と実施しなかった場合の分布を比べると、佐賀市浄化センターからの栄養塩類が供給される佐賀市地先や、大牟田市北部・南部浄化センター地先の海域において、下水処理緩和運転を実施した場合に、これら下水処理場の寄与範囲が最も広がっている。

有明海のように流入河川が多く存在し、河川からの栄養塩供給量が多い海域においても、下水処理場において下水処理緩和運転を実施すると、下水処理場の流入点がある佐賀市・大牟田市地先海域では栄養塩濃度の上昇が認められ、下水処理場からの栄養塩類の寄与が明らかに増大している。このように、下水処理緩和運転の実施は、ノリ漁場における栄養塩濃度増加に少なからず寄与していることがわかる。

4. 2 下水処理緩和運転によるノリ漁場への栄養塩への寄与

ノリ漁場における下水処理緩和運転による栄養塩類の

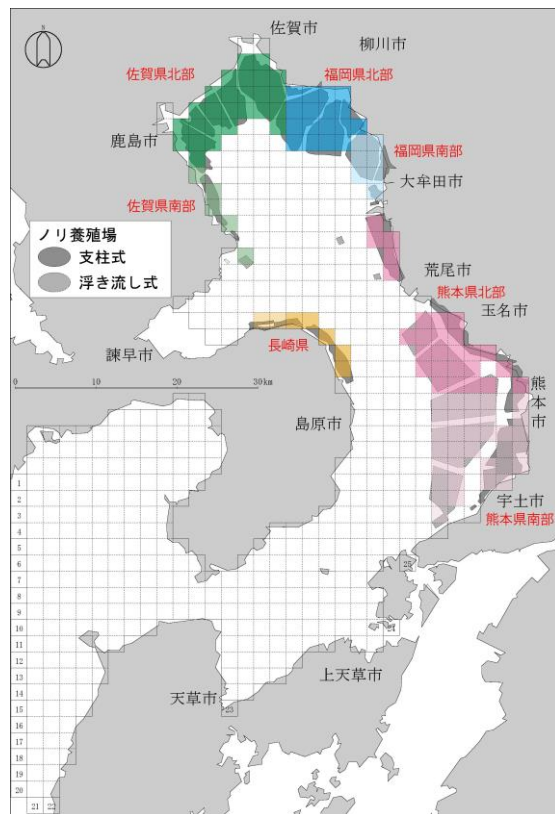


図5 各海域のノリ漁場の位置

寄与をみるために、図5に示すノリ漁場別に栄養塩マーカー数を集計し、下水処理緩和運転の有無によるマーカー数存在の違いを3カ年について整理した。その結果を表2に示す。なお、表中のマーカー存在数の増分は、図3と同様に、ノリ漁期（11月から翌年2月）の期間平均値である。

表2 ノリ漁場別マーカー存在数（ノリ養殖期の期間平均値）の増加割合

負荷点	各ノリ漁場の平均マーカー数の増分（個/メッシュ） [下水処理運転の実施あり] - [下水処理運転の実施なし]								下水処理運転に伴う平均マーカー数の増加割合（%）						
	福岡県 北部	福岡県 南部	佐賀県 北部	佐賀県 南部	熊本県 北部	熊本県 南部	長崎県	福岡県 北部	福岡県 南部	佐賀県 北部	佐賀県 南部	熊本県 北部	熊本県 南部	長崎県	
	2000	2001	2002	2000	2001	2002	2000	2001	2002	2000	2001	2002	2000	2001	2002
全負荷点	1.5	20.9	9.5	2.1	0.0	0.2	5.1	-	-	-	-	-	-	-	-
佐賀市浄化センター	0.0	0.0	9.3	2.7	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	14.6	5.0	0.0	0.0	0.0	1.0
大牟田市北部浄化センター	0.1	6.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
大牟田市南部浄化センター	0.1	14.8	0.0	0.0	0.4	0.0	1.9	0.0	8.2	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.8
荒尾市浄化センター	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1
2000 全負荷点	-0.5	21.0	8.3	2.1	0.5	0.7	6.1	-	-	-	-	-	-	-	-
2000 佐賀市浄化センター	0.0	0.0	8.4	2.1	0.0	0.0	4.4	0.0	0.0	16.4	4.9	0.0	0.0	0.0	1.6
2000 大牟田市北部浄化センター	0.1	6.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6
2000 大牟田市南部浄化センター	0.0	14.3	0.0	0.0	0.4	0.0	1.7	0.0	14.4	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.6
2000 荒尾市浄化センター	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1
2001 全負荷点	0.5	21.4	9.6	1.6	0.5	0.5	8.9	-	-	-	-	-	-	-	-
2001 佐賀市浄化センター	0.0	0.0	9.7	1.5	0.0	0.0	4.4	0.0	0.0	21.6	5.9	0.0	0.0	0.0	2.0
2001 大牟田市北部浄化センター	0.1	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	8.4	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.6
2001 大牟田市南部浄化センター	0.1	17.1	0.0	0.0	0.4	0.0	1.9	0.0	24.5	0.0	0.1	0.5	0.0	0.0	0.9
2001 荒尾市浄化センター	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1

表3 下水処理緩和運転の実施に伴うノリ生産量増加への寄与の試算

県	年度	平均マーカー数 [下水処理運転 実施なし] (個)	ノリ生産量 [実績値] (枚)	マーカー1 個あたりの ノリ生産量 (枚/個)	平均マーカー数 [下水処理運転 実施あり] (個)	下水処理運転時 のノリ生産量 [試算値] (枚)	増加率 (%)
福岡	2000	480.7	578	1.2	503.1	604	4.5
	2001	335.6	1547	4.6	356.0	1638	5.9
	2002	307.5	1188	3.9	329.4	1285	8.2
佐賀	2000	117.2	989	8.4	128.8	1082	9.4
	2001	93.9	1804	19.2	104.3	2002	11.0
	2002	69.8	1426	20.4	81.0	1653	15.9
熊本	2000	249.1	752	3.0	249.2	748	-0.5
	2001	228.7	1037	4.5	229.9	1034	-0.3
	2002	208.7	1208	5.8	209.8	1217	0.7

有明海に対する栄養塩供給量は、筑後川や菊池川、緑川等の河川からの量が下水処理場の2~9倍と大きい(表1)。しかし、表2に示すように、2001年度や2002年度のような降水量が少なく、河川からの栄養塩供給量が少なくなる年では、佐賀県北部や福岡県南部のノリ漁場における栄養塩濃度は、下水処理緩和運転により1~2割増加すると予測された。

また、ノリ生産への寄与を相対的に理解するため、下水処理緩和運転を実施しなかった場合のノリ漁場のマーカー数とノリ生産量(実績値)より、マーカー1個あたりのノリ生産量を求め、これに下水処理緩和運転を実施した場合のマーカー数を乗じて下水処理緩和運転時のノリ生産量を試算した。その結果を表3に示す。熊本県では生産量の増加はみられていないが、福岡県で6%程度、佐賀県では12%程度の生産量の増加が試算された。ノリ生産量と栄養塩濃度とは単純な正の関係にはならないが、この下水処理緩和運転はノリ生産へ少なからず寄与しているものと考えられる。

下水処理緩和運転は、流入河川から供給される栄養塩類と比べて降水量の多少に左右されにくく、人為的な操作により栄養塩濃度のコントロールが可能である。利用目的や海域の季節特性に応じて栄養塩を管理する「高度な栄養塩管理」手法は、水質を保全し、ノリの色落ち対策の実効性を上げるため、有効な方法の一つであると考えられる。

5. まとめ

有明海のように流入河川が多く存在し、河川からの栄養塩供給量が多い海域においても、冬季のノリ養殖期における下水処理場からの下水処理緩和運転に伴う栄養塩供給量の増加は、各処理場の地先海域のノリ漁場における栄養

塩濃度を明らかに上昇させることを示した。その効果は、降水量が少なく、河川からの栄養塩供給量が少ない年には、栄養塩濃度への寄与率が1~2割増加するものと予測された。また、この下水処理緩和運転に伴い、ノリ生産量へ少なからず効果を与えているものと考えられた。

謝辞：本研究にあたっては、有明海研究会(当協会内自主研究会)のメンバーの方々に貴重なご意見をいただいた。ここに記し、心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中西弘：閉鎖性内湾の貧栄養化問題について—高度な栄養塩管理、環境と生物生産力との調和—、水環境学会誌, 34(A), 33 (2011) .
- 2) 中嶋雅孝ほか：有明海における冬季のノリ及び赤潮プランクトンの増殖特性、水環境学会誌, 28, 339-345 (2005) .
- 3) 阿呆勝之ほか：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, I_1116-I_1120 (2012) .
- 4) T. Yanagi, et al.: Numerical simulation of drift cards dispersion, *La mer.*, 21, 218-224 (1983).
- 5) 横山佳裕ほか：有明海における河川由来懸濁粒子の堆積挙動の推定方法、水環境学会誌, 31, 163-167 (2008) .
- 6) 気象庁：海洋観測指針(第1部), 167-169, (財)気象業務支援センター (1999).
- 7) 中野裕香子ほか：簡易手法による有明海に流入するCOD, 窒素, リンの経年負荷量の推定, 水環境学会誌, 29, 349-354 (2006) .
- 8) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部：下水放流水に含まれる栄養塩類の能動的管理のための運転方法に係る手順書(案), 113p, 国土交通省ホムエ°ジ (2015).