

鹿島灘北部海域の一次生産に及ぼす那珂川の影響

中山 哲厳* ・ 齊藤 肇** ・ 新井雅之***
足立久美子**** ・ 奥西 武***** ・ 八木 宏*****

鹿島灘北部に位置する那珂川沿岸域の流動・水質に及ぼす那珂川の影響を明らかにすることを目的に、2002～2004年の春、夏、秋の三期に計7回、調査船を用いて現地観測を行った。得られた栄養塩、懸濁態、底質データの総合的な分析を行った。那珂川の流量及び水質データを用いて、流量、濁度、窒素及びリンの関係を把握した。流動・一次生産モデルにより、観測時期の鹿島灘北部海域における水質、動物・植物プランクトンを求めた。計算結果は、観測結果を概ね再現していることがわかった。ブルーム期（5月）、貧栄養期（8月）について、那珂川河川水の影響を計算により検討した。その結果、那珂川河口南側の沿岸に沿った帯状の領域で、河川水の影響が顕著であることがわかった。特に貧栄養期において、那珂川河川水が沿岸の基礎生産を支えていると考えられた。

1. はじめに

鹿島灘沿岸は外洋に面しており、開放性沿岸域の代表的な海域である。当海域は、ハマグリ、ホッキ貝等二枚貝をはじめシラス、サバ、イワシなど浮き魚の漁場となっている。このような生産は、陸水、外洋からの栄養塩供給による豊富な一次生産によって支えられている。資源管理や漁場造成などを適切に行うためには、海域の生産環境を把握することが重要である。中山ら（2004）は、那珂川沿岸河口域において、現地調査及び数値計算により、一次生産の特性を検討し、河川が一次生産に及ぼす影響は、沿岸に沿った領域で顕著であることを指摘している。しかしながら、一次生産モデルにおいてリンの収支が考慮されていないこと、河川から流出する懸濁物の挙動等が明らかにされていないなど、多くの課題があった。本研究は、同海域における3年間の現地調査データ等を用いて、那珂川河川水及び同海域の水質を総合的に分析するとともに、改良した流動・一次生産モデルにより、一次生産等の時空間変化を求め、一次生産に及ぼす那珂川河川水の影響を検討したものである。

2. 現地観測

那珂川沿岸河口域における環境動態を把握するために、以下のような調査を行った。なお、現地観測は、水産総合研究センター水産工学研究所所属の「たか丸」60 tで

行った。現地観測は、2002年の予備調査を含め、2003、2004年に春（5月初旬）、夏（8月初旬）、秋（10月、11月）計7回行った。冬は、シケのために実施出来なかった。同海域は、通常3月頃からブルーミングがしばしば発生し始め、5月頃まで継続し、夏期及び秋期是那珂川、利根川等の河川出水がない限り、貧栄養の状態となる。観測項目は、以下の通りである。調査点は、図-1に示すように那珂川河口から南側に設定した。北側も予備調査で実施したが、採泥及び音響探査により、砂礫が多く、ほとんど採泥出来ないこと及び那珂川河川水は南下する傾向が多いことがわかったので、2003、2004年では調査点に含めなかった。

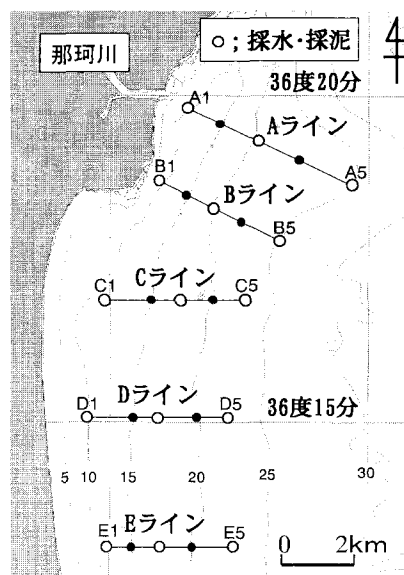


図-1 現地観測地点

(1) 計測器による観測

すべての点で、多項目水質計（アレック社製、ACL208）で水温、塩分、蛍光値、濁度の鉛直プロファ

* 正会員	工修	(独法)水産総合研究センター水産工学研究所水理研究室長
**		(独法)水産総合研究センター水産工学研究所環境分析研究室
*** 正会員	工修	(独法)水産総合研究センター水産工学研究所水理研究室
**** 正会員	工修	(独法)北海道開発土木研究所 環境水工部水産土木研究室長
***** 正会員	工博	北海道大学大学院 工学研究科環境資源工学専攻 水圏工学講座研究員
***** 正会員	工博	東京工業大学助教授 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻

イルを計測した。併せて ADCP による流速観測を行っている。

(2) 水 質

図-1 中の大きな白丸点で、表層を含む 4 層で、採水を行い(表層バケツ、それ以外はニスキン採水器)、無機栄養塩 ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{SiO}_2\text{-Si}$) 及び chl-a, pheo を計測した。採水試料の懸濁物については、窒素, リン, 有機炭素を計測した。

chl-a 及び pheo に関しては、採水の分析結果を用いて、多項目水質計の蛍光値のプロファイルを、chl-a 及び pheo に換算した。

(3) 底 質

採水点で、底質をスミスマッキンタイヤ採泥器により、採取した。分析項目は、強熱減量、粒度組成、含水比、全炭素、有機炭素、全窒素、全リン、chl-a である。

(4) 那珂川河川流量及び水質

現地観測ではないが、那珂川の流量及び水質(全窒素、全リン、COD、chl-a)を国交省常陸工事事務所から入手し、流量と水質の関係を分析した。

3. 数値計算について

流動・一次生産モデルは、中山ら (2004) で用いられたモデルを改良した。流動は POM (プリンストン・オーシャンモデル) を用いており、一次生産及び動物プランクトン等による諸過程は、KKYS モデル (河宮・岸・山中・杉野ノ原, 1995) をベースとしている。外力は風のみとしている。主な改良点は、①リンのコンパートメントを加えたこと、②河川から流出する懸濁態の移流・拡散・沈降を加えた点である。海洋における水温、塩分、栄養塩の初期条件、境界条件は、現地観測結果及び茨城県水産試験場無線局発行の漁海況・人工衛星速報、同水試海洋漁業部発行三陸・常磐・房総 5 県共同 100 m 深水温速報を参考に推定した値を用いた。気象データについては、全天日射量、雲量は銚子气象台、風速・風向、気圧、気温は水戸气象台のものを用い、1 時間毎に与えた。河川流量は、2. (4) のデータを用いた。また、河川からの栄養塩、濁質は、後に述べるが、沿岸の水質の分析及び河川流量・水質の分析結果により、設定した。

モデルのパラメーター、諸元等を表-1 に示す。

計算ケースは、海域に栄養塩が豊富なブルーミング期間となる 5 月、海域にほとんど栄養塩がない期間となる 8 月の観測期間を含む 2 ケースを選択した。計算日数は 20 日とした。

4. 現地観測結果

(1) 水 質

図-2 に 2004 年 5 月の観測結果の例を示す。ブルーミ

表-1 モデルのパラメーター、諸元等

分類	項 目	値 等
沈 降 過 程	プランクトン沈降速度	0.2 m/day
	デトリタスの沈降速度	0.5 m/day
	河川からの SS の沈降速度	0.8 m/day
植 物 プ ラ ン ク ト ン	最適光強度 I_{opt}	0.07 cal/cm ² /min
	NO_3 , NH_4 半飽和定数 K_n	3.0 $\mu\text{mol/l}$
	NH_3 選択係数 Ψ	1.5 l/ μmol
	PO_4 半飽和定数 K_p	0.15 $\mu\text{mol/l}$
	最大光合成速度 V_{max}	2.0/day
	光合成温度係数 k	0.063/°C
	呼吸速度 R_0	0.03/day
	呼吸の温度依存係数 K_r	0.0519/°C
	細胞外分泌速度 γ	0.135
	植物プランクトン枯死速度 Mp_0	0.0281/ $\mu\text{mol-N/day}$
動 物 プ ラ ン ク ト ン	植物プランクトン枯死の温度係数 K_{Mp}	0.069/°C
	捕食速度 GR_{max}	0.3/day
	捕食の温度係数 k_g	0.0693/°C
	捕食閾値 chl*	0.043 $\mu\text{mol-N/l}$
	動物プランクトン同化効率 α	0.7
	動物プランクトン成長効率 β	0.3
	動物プランクトン死亡速度 Mz_0	0.0585/day
	動物プランクトン死亡の温度係数 K_{Mz}	0.0693/°C
	PON から NH_4 分解速度 V_{pio}	0.03/day
	PON から NH_4 温度係数 V_{pit}	0.0693/°C
分 解 過 程	PON から有機溶存窒素溶解速度 V_{pdo}	0.003/day
	PON から有機溶存窒素温度係数 V_{pdt}	0.0693/°C
	有機溶存窒素から NH_4 速度 V_{dio}	0.03/day
	有機溶存窒素から NH_4 温度係数 V_{dit}	0.0693/°C
	硝化速度 k_{NO}	0.03/day
	硝化温度係数 k_{NT}	0.0693/°C
	POP から溶存態有機リン溶解解速度	0.03/day
	POP から溶存態有機リン温度係数	0.0693/°C
	溶存態有機リンから PO_4 分解速度	0.03/day
	溶存態有機リンから PO_4 温度係数	0.0693/°C
光の減 衰過程	光の消散係数	0.035/m
	植物プランクトンによる消散係数	0.0281/ $\mu\text{mol-N/m}$
流 動 計 算	計算メッシュサイズ DX, DY	500m
	鉛直分割数	9 層
	大気との熱交換	バルク式
	水温・塩分初期及び境界条件	現地観測等のデータを入力、 沖側の水温・塩分プロファイル を全領域に適用
	境界処理	間境界処理
	河川の栄養塩濃度	NO_3 :100, NH_4 :10, PO_4 :3 $\mu\text{mol/l}$
	海域の栄養塩、植物プランクトンの設定	現地観測による沖合での栄 養塩分布から推定し、全海 域に同じ値を設定

ングは発生していなかったが (2003 年は発生していた)、chl-a 濃度は高く、5 $\mu\text{g/L}$ を越える値となっている。栄養塩は、chl-a 濃度の高い領域では小さく、chl-a 濃度の低い領域では、高い。また、chl-a 濃度は、必ずしも表層で高くなく、中層で高い傾向にあることがわかる。当海域では、このような分布となることが多い。図には示さないが、8 月、10 月は、河川近傍で栄養塩、chl-a 濃度が、高めである以外、低レベルである。

得られた全栄養塩データの相関関係を図-3 に示す。 $\text{NO}_3\text{-N}$ と塩分の関係 (図中 (a)) から、濃度の高いグル

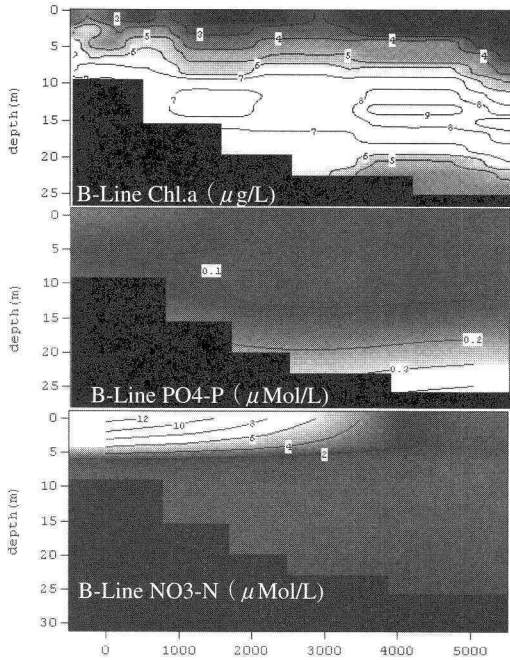


図-2 2004年5月の観測結果

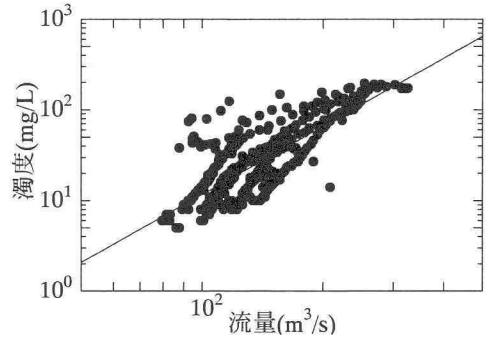


図-4 濁度と流量の関係

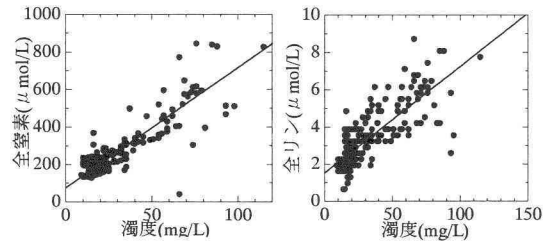


図-5 濁度と全窒素、全リンの関係

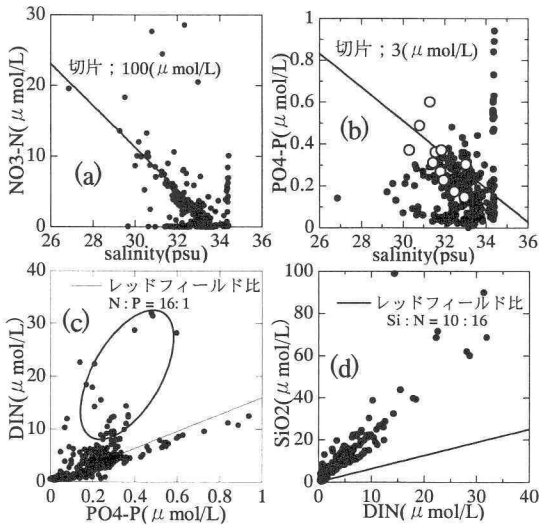


図-3 全栄養塩データの相関図

ープは塩分との相関が高いことが、既に中山ら (2004) で示されている。この関係を外挿すると、那珂川河川水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は約 $100 \mu\text{mol/L}$ となる。 $\text{PO}_4\text{-P}$ (図中 (b)) に関しては、全体では、明確な相関性は見られないが、図-2 のような分布図を基に、河川近傍表層で明らかに那珂川河川水の影響の強いグループを抽出すると、塩分との相関が現れてくる。同様に外挿すると、那珂川河川水の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は約 $3 \mu\text{mol/L}$ と推定された。推定された那珂川河川水に含まれる $\text{PO}_4\text{-P}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃

度を比較すると、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が過剰であることがわかる。

無機溶存態窒素 (DIN) と $\text{PO}_4\text{-P}$ の関係 (図中 (c)) をみると、ほぼレッドフィールド比 (モル比が $\text{C:N:P:Si}=106:16:1:10$) に近いことがわかる。レッドフィールド比から、はずれているグループ (黒線で囲んだグループ) は、先に述べたように河川水の影響の強いケースに相当する。また、同グループは、河川水に含まれる窒素がリンと比較して過剰であることがわかる。

$\text{SiO}_2\text{-Si}$ と DIN の関係 (図中 (d)) を見ると、極めて相関が高いが、レッドフィールド比とは異なっている。図から、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ は、この海域では他の栄養塩に比較して、常に豊富であることを示している。

(2) 河川流量、水質

濁度と流量の関係を図-4 に示す。流量と濁度は、ヒステリシスカーブとなる。さらに出水の時期によっても、変化している。流域の土地利用や先行降雨の相違など種々の要因が考えられる。問題はあるが、ここでは、河川由来の濁質が海域でおおよその移流・拡散・沈降過程を検討することを目的としているので、従来の手法である LQ 式を求めて、モデルに適用した。

図-5 に濁度と全窒素、全リンの相関を示す。この図から、濁質との相関が高く、懸濁態に多くの窒素、リンが含まれていることがわかる。図を見ると、窒素、全リン濃度に有意な切片があり、これが溶存態濃度を示していると考えられる。その切片の値は、先に海域から推定した那珂川河川水に含まれる $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ とほぼ同等

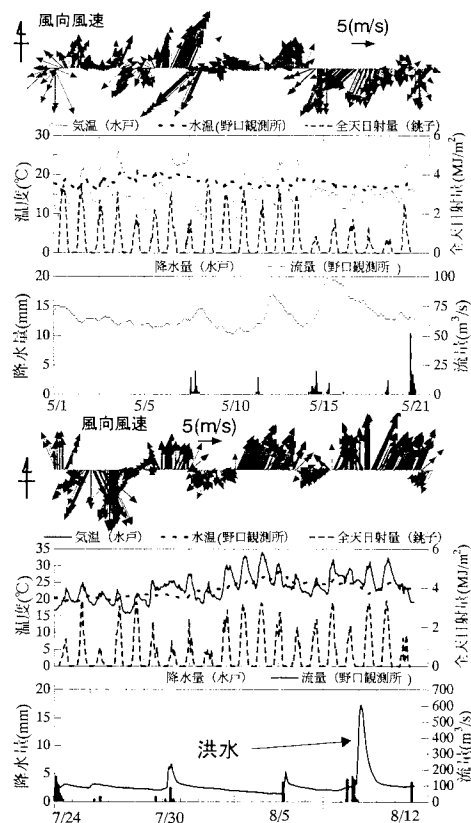


図-6 5月(上), 8月(下)の気象及び流量の時系列

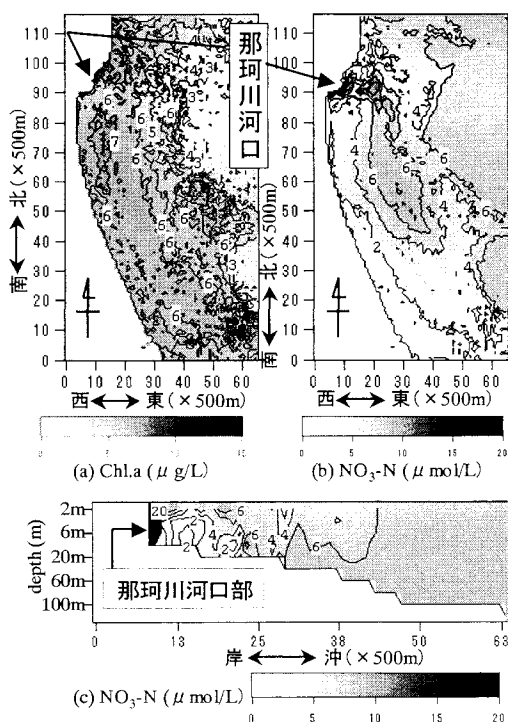


図-7 5月11日の計算結果

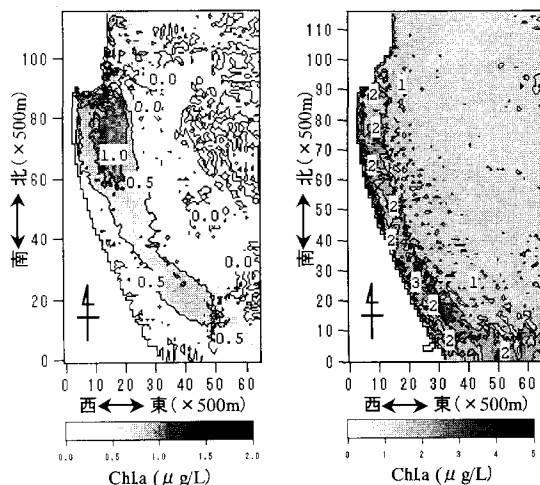


図-8 5月の河川影響範囲

図-9 8月3日の計算結果

であることがわかる。また、全窒素と全リンの相関図から、やはり窒素がリンに比べて過剰であることがわかる。

5. 数値計算結果

図-6に2003年5月、8月の気象及び那珂川流量の時系列を示す。5月の風向は、前半2日程度で変化しており、風速は5 m/s以上が比較的多く、後半には北風が連風している。那珂川河川流量は、50~100 m³/s程度で少ない。全日射量は、全体として高いが、後半では、低い値となっている。8月は、1週間程度で風向が変化している。全日射量も概ね高い。那珂川流量は、5月より多く、特に8月10日には最大で600 m³/sの出水があった。

図-7に現地観測を行った日時(5月11日昼)の表層の計算結果を示す。chl-aの分布(a)から、沿岸の浅いところで、濃度が高いことがわかる。また、NO₃-Nの分布(b)から、逆に沿岸が低く、沖合が高いことがわかる。河口付近のchl-aの断面分布(c)では、浅い領域の中層から底層にかけて濃度が高い領域が見られる。図に示していないが、現地観測による分布と比較すると、濃度は計算値の方が低めではあるが、同様の分布となっている。このことから、本計算は概ね同海域の一次生産の挙動を再現しているものと考えられる。

5月は、海域の栄養塩濃度が高く、沖合からの栄養塩供給が多いため、河川影響ははっきりと現れない。そこで、河川水の栄養塩をゼロにした場合の計算を行い、先に述べた計算結果との差をとり、河川影響を検討した。

図-8に結果(表層)を示す。この図から、那珂川河口南側沖合10 km以内の帯状の領域が1 μg/L程高くなっていることがわかる。図には示していないが、鉛直方向には、水深が増加する程、両者の差が小さくなる。こ

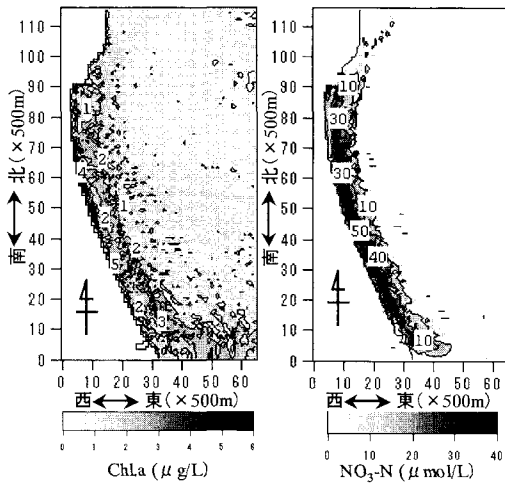


図-10 洪水2日後(8月12日)の計算結果

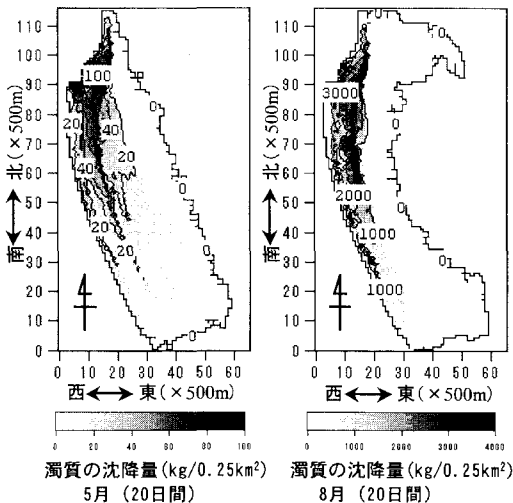


図-11 流出した濁質の沈降量の分布

の領域が、鹿島灘沿岸の一次生産に及ぼす那珂川河川水の影響範囲であると考えられる。

8月は、海域には栄養塩はほとんど無いので、上記の様な検討はする必要はないと考えた。図-9に計算結果を示す。沖合5km程度内に、chl-a濃度が $3\mu\text{g/L}$ 程度の領域が帯状に分布しており、5月に比較して、幅が狭くなっている。これは、夏期には成層状態が強化され、河川水が混合しにくくなり、沿岸に張り付いた状態で南下することによるものと考えられる。灘岡ら(1999)が観測結果から求めた那珂川出水時における鹿島灘沿岸の塩分分布の変化からも、同様の傾向を見ることが出来る。先に述べたように8月10日に最大で $600\text{m}^3/\text{s}$ の出水があったので、それより2日後の8月12日の計算結果を図-10に示す。岸寄りの沿岸で、chl-aが高くなっており、

栄養塩もまだ十分高い状態となっているので、これ以後さらにchl-aが高くなると考えられる。ちなみに鹿島灘南側に位置する波崎海洋研究施設(港湾空港技術研究所)で栄養塩を1日1度計測しているが、8月13日に非常に高い栄養塩を検出しており、その後徐々にchl-aが増加していることを確認している。夏期においては、沿岸の一次生産における那珂川河川水の依存度は、春期よりも大きくなる。

図-11には、5月、8月の20日間で、那珂川河川水によって流出した濁質の沈降量の分布を示す。沈降量は圧倒的に8月が多いが、その分布形は、ほぼ同じで那珂川南側の沿岸に沿った領域に沈降する。河川水は、前述したとおり、沿岸に張り付いた形で南下することを示している。

6. ま と め

以上、まとめると以下ようになる。

- (1) 観測データに基づき、流動・一次生産モデルを使用して、那珂川沿岸域の植物プランクトン及び濁質の動向をおおよそ把握した。
- (2) 河川から流出する、濁質、全窒素、全リンの関係を把握した。河川からは窒素の供給が多いのに比較して、リンが少ないものと考えられる。このことは、観測結果での溶存態の栄養塩の関係からも確認された。
- (3) 那珂川による海域の一次生産の影響範囲を概ね把握出来た。特に夏期、秋期においては、那珂川の栄養塩供給が沿岸域では重要であると考えられる。

最後に、本調査のために多大な協力を頂いた波崎、銚子、那珂湊、大洗漁業協同組合の皆様に感謝致します。

参 考 文 献

- 中山哲蔵・佐伯信哉・足立久美子・斉藤肇・奥西武・八木宏(2004): 那珂川沿岸河口域における水質・底質分布と一次生産構造, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 1086-1090.
- 足立久美子・中山哲蔵(2004): 鹿島灘南部沿岸域の栄養塩変動に及ぼす利根川河川水の影響, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 1141-1145.
- 八木宏・身崎成紀・灘岡和夫・中山哲蔵・足立久美子・二平章(2002): 黒潮流路変動と前線渦が鹿島灘の広域沿岸水挙動に与える影響について, 土木学会論文集, NO. 719/II-61, pp. 81-91.
- 大森義暢・八木宏・足立久美子・二平章(2001): 鹿島灘沿岸における栄養塩及びクロロフィルa量の時空間変動, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1271-1275.
- 灘岡和夫・二瓶泰雄・西伸英・中山哲蔵・足立久美子・藤井智文・佐藤健治・山下俊彦(1999): 鹿島灘における広域海水流動と河川水挙動に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 486-490.
- Kawamiya M, Kishi M, Ymanaka Y and Sugihara N (1995): An Ecological-Physical Coupled Model Applied to Station Papa, Journal of Oceanography Vol. 51, pp. 635-664.