

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

中山 哲 嚴* ・ 佐 伯 信 哉** ・ 足 立 久 美 子***
齊 藤 肇**** ・ 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、2003 年の春、夏、秋の三期に、調査船を用いて流速、水質(水温、塩分、クロロフィル、栄養塩類、懸濁態)、底質を計測した。その結果、溶存態窒素は塩分との明確な逆相関が見られ、河川からの栄養塩供給濃度を概略推定できた。春(五月)の結果から、春のブルーミングが確認され、クロロフィルが高い領域では、逆に栄養塩が低いことがわかった。五月の観測結果、流量、気象データを用いて流動・一次生産の挙動を数値計算により検討した結果、観測結果を定性的に説明することができた。那珂川河川水

の栄養塩が沿岸域の一次生産に寄与していることがわかった。

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。鹿島灘は、南側に黒潮系、北側には親潮統流系が存在し、極めて複雑な流動構造を呈している。奥西ら(2000)は、鹿島灘の基本的な一次生産構造について、ボックスモデルにより検討しており、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 及び $\text{SiO}_2\text{-Si}$ は主として陸水から供給されていること、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は有機物分解由来または沖合底層からの供給であると推察している。大森ら(2001)は、2000 年 6 月～10 月に、鹿島灘における栄養塩、クロロフィル量を広域的(水深 200 m 以浅)に計測し、浅海域では相対的に窒素が多く、9、10 月には河川影響により濃度が高くなること、外海域では底層で栄養塩レベルが高いこと、陸棚域では初夏に外海、秋期に浅海域の影響を受けること、汀線域では河口から離れるとアンモニア比が高くなり、再生産の重要な場が形成されることなどを報告している。八木ら(2002)は、鹿島灘の広域的な流動特性を観測結果に基づいて検討しており、特に黒潮流路が北上傾向を強めると、鹿島灘沿岸域には親潮系水の侵入現象が生じ、黒潮が急激に陸岸に近づくと、強い南下流が生じること、黒潮前線に形成される渦が沿岸の海水交換に寄与していることなどを報告している。これまでの研究から、鹿島灘の北部沿岸域は、陸水に関しては那珂川の影響が大きいとされている。本研究は、那珂川周辺の沿岸河口域(25 m 以浅)に着目し、水質・底質分布に

関する現地調査を実施し、その結果に基づき、沿岸河口域における一次生産の挙動を数値計算により検討したものである。

2. 現地観測について

那珂川沿岸河口域における環境動態を把握するため、以下のような調査を行った。なお、2002 年の予備的な調査から、那珂川より北側の海底は礫が多く、細粒分は那珂川南側に分布することがわかっていたので、図-1 に示すように那珂川河口から南側に調査点(水深約 10～25 m)を設定した。

那珂川沿岸河口域 15 地点(図中白丸)で、採泥、採水を行い、以下について分析した(2003 年、5 月、8 月、10 月)。各側線中間点は、STD による観測を行っている。

(1) 底 質

スミスマッキングタイヤ採泥器により、採泥した試料を以下の項目について分析した。

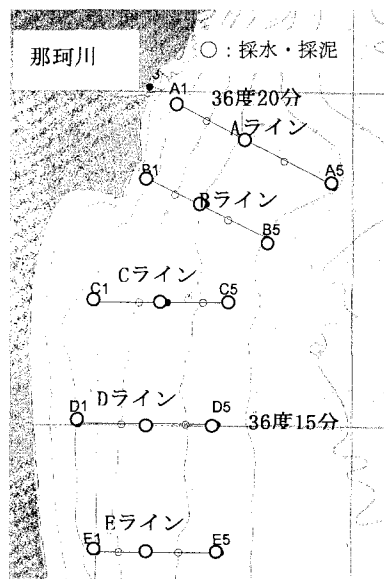


図-1 現地調査地点

- * 正会員 工修 (独法)水産総合研究センター水産工学研究所
- ** 正会員 工修 (株)荒谷建設コンサルタント四国支社技術部
- *** 正会員 工修 (独法)北海道開発土木研究所
- **** (独法)水産総合研究センター水産工学研究所
- ***** 正会員 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 理工学研究科

強熱減量, 粒度組成, 含水比, 全炭素, 有機炭素, 全窒素, 全リン, クロロフィル a

(2) 水 質

表層はバケツにより, それ以外はニスキン採水器を用いて採水し, 以下の項目について分析した (各点 4 層). 栄養塩: $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{SiO}_2\text{-Si}$, クロロフィル (Chl-a), 懸濁態窒素・炭素

3. 数値計算について

観測結果, 気象, 流量データ等を基に流動・一次生産に関する数値計算を行い, 那珂川沿岸河口域における流動・一次生産の応答を検討した. 数値計算は, 流動については POM (プリンストン・オーシャンモデル), 植物・動物プランクトンについては KKYS モデル (河宮・岸・山中・杉野ノ原によるモデル, 1995) を用いた. 流動の駆動力は, 風のみとしている. 海面と大気熱交換はバルク式を用いた.

植物プランクトン及び動物プランクトン, 栄養塩等のコンパートメントのフローを図-2 に示す.

栄養塩, 植物・動物プランクトン, 懸濁態有機物は, 窒素ベースで表し, 栄養塩の移流拡散については, POM により計算した. 植物プランクトン・動物プランクトンによる栄養塩吸収, 代謝, 死亡等に関しては以下に示す式により, 計算した.

植物・動物プランクトン (Chl, ZO), 栄養塩 (NO_3 , NH_4), 懸濁態有機物 (PON), 溶解態有機物 (DON) 等の濃度は, 移流拡散に生物過程の式を加えた以下の式により, 計算される. なお, 本計算では, リン, 珪酸を考慮していない.

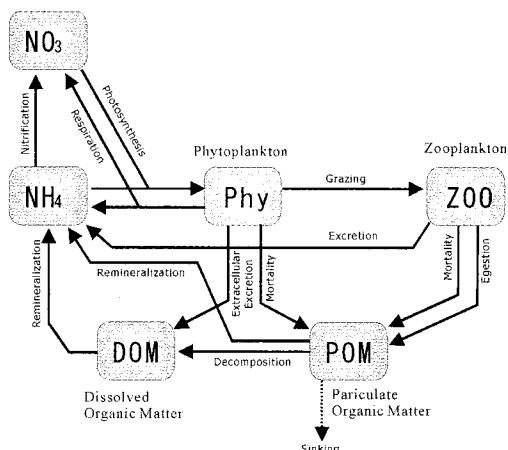


図-2 KKYS モデルのダイアグラム

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + g(C) + Q \quad \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

C: 植物・動物プランクトン, 栄養塩, 懸濁態有機物, 溶解態有機物等の濃度, $g(c)$: 生物過程を表す関数, Q: C の系外からの供給.

各項目に関する生物過程の定式化を (2)~(7) に示す (各式は移流拡散項を含むが, 紙面の都合上省略した).

$$\begin{aligned} \frac{d(\text{Chl})}{dt} &= \text{光合成} - \text{細胞外分泌} - \text{死亡} \\ &- \text{捕食} - \text{沈降} \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\frac{d(\text{ZO})}{dt} = \text{摂食} - \text{排泄} - \text{排糞} - \text{死亡} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{d(\text{NO}_3)}{dt} &= -(\text{光合成} - \text{Chl 呼吸}) \\ &\times R_{\text{NO}_3} + \text{硝化} \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d(\text{NH}_4)}{dt} &= -(\text{光合成} - \text{Chl 呼吸}) \\ &\times (1 - R_{\text{NO}_3}) + \text{PON 分解} \\ &+ \text{DON 分解} - \text{硝化} + \text{排泄} \quad \dots\dots (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d(\text{PON})}{dt} &= \text{Chl 死亡} + \text{ZO 死亡} \\ &+ \text{排糞} - \text{沈降} \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d(\text{DON})}{dt} &= \text{細胞外分泌} + \text{PON 分解} \\ &- \text{DON 分解} \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

(5) 式の R_{NO_3} は NO_3 , NH_4 のうち植物プランクトンによって吸収される NO_3 の割合であり, 次式で表される.

$$\begin{aligned} R_{\text{NO}_3} &= \frac{\frac{\text{NO}_3}{\text{NO}_3 + K_N} \exp(-\psi \text{NH}_4)}{\frac{\text{NO}_3}{\text{NO}_3 + K_N} \exp(-\psi \text{NH}_4) + \frac{\text{NH}_4}{\text{NH}_4 + K_N}} \\ &\quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

K_N : 半飽和定数 (3.0), ψ : アンモニア選択係数 (1.5)

(2)~(7) に示される諸過程 (細胞外分泌, 光合成など) は以下の式で表される.

$$\begin{aligned} \text{細胞外分泌} &= \gamma \times \text{光合成} \quad \gamma: \text{分泌速度 (0.135)} \\ &\quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{光合成} &= V_{\text{max}} \left\{ \frac{\frac{\text{NO}_3}{\text{NO}_3 + K_N} \exp(-\psi \text{NH}_4)}{1 + \frac{\text{NH}_4}{\text{NH}_4 + K_N}} \right\} \\ &\times \exp(kT) \frac{I}{I_{\text{opt}}} \exp\left(1 - \frac{I}{I_{\text{opt}}}\right) \text{Chl} \quad \dots\dots (10) \end{aligned}$$

$V_{\max}$: 最大光合成速度 (2.0 l/day)

I_{opt} : 最適光量 (0.16 ly/min=cal/cm²/min)

$$I = I_0 \exp(-Ah) \quad \dots\dots\dots (11)$$

I_0 : 海面照度, h : 水深

$$A = \alpha_1 + \alpha_2 Chl \quad \dots\dots\dots (12)$$

α_1, α_2 : 0.035 l/m, 0.0281 l/ μ mol Nm

$$\text{呼吸} = R_0 \exp(k_R T) Chl \quad \dots\dots\dots (13)$$

R_0 : 呼吸速度 (0.03 l/day), k_R : 温度係数 (0.0519 l/ $^{\circ}$ C)

$$Chl \text{ 死亡} = M_{P0} \exp(k_{MP} T) Chl^2 \quad \dots\dots\dots (14)$$

M_{P0} : 死亡速度 (0.0281 l/ μ mol Nm), k_{MP} : 温度係数 (0.069 l/ $^{\circ}$ C)

$$\text{捕食 } GR = \max \left\{ 0, \frac{GR_{\max} \exp(k_g T) \times \{1 - \exp(\lambda(Chl^* - Chl))\} Z_{\text{oo}}}{\dots\dots\dots} \right\} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$GR_{\max}$: 捕食速度 (0.3 l/day), k_g : 温度係数 (0.0693 l/ $^{\circ}$ C), λ : 1.4 l/ μ mol N, Chl^* : 捕食の閾値 (0.043 μ mol N/l)

$$ZO \text{ 排泄} = (\alpha - \beta) GR(T, Chl, Z_{\text{oo}}) \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$ZO \text{ 排糞} = (1 - \alpha) GR(T, Chl, Z_{\text{oo}}) \quad \dots\dots\dots (17)$$

α : 動物プランクトン同化効率 (0.7), β : 動物プランクトン成長効率 (0.3)

$$PON \text{ 分解アンモニア} = V_{P10} \exp(V_{P1T} T) PON \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$PON \text{ 分解 } DON = V_{PD0} \exp(V_{PDT} T) PON \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$DON \text{ 分解アンモニア} = V_{D10} \exp(V_{D1T} T) DON \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$\text{硝化} = k_{N0} \exp(k_{NT} T) NH_4 \quad \dots\dots\dots (21)$$

$V_{P10} = V_{PD0} = V_{D10} = k_{N0} = 0.03$ l/day

$V_{P1T} = V_{PDT} = V_{D1T} = k_{NT} = 0.0693$ l/ $^{\circ}$ C

植物プランクトン及び PON の沈降速度は, 0.5 m/day とした。那珂川の流量, 水温等に関しては, 国交省常陸工事事務所から 2003 年の時間流量データを提供して頂いた。気象データは, 全天日射量は銚子, 風速・風向, 気圧, 気温は水戸気象台のものを用い, 1 時間毎に与えた。

海域の水温・塩分, 栄養塩の初期分布は, 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。河川の栄養塩については, 後に述べるが, 栄養塩と塩分の関係から外挿した値を用いた。海域における初期の植物・動物プ

ランクトン濃度は, 窒素ベースでそれぞれ 1.0, 0.1 μ mol/l とした。従って, 計算当初は海域の植物・動物プランクトンは低濃度である。計算ケースは, ブルーミングが観測された 5 月 1 ~ 5 月 20 日を対象にした。現地調査は 5 月 11, 12 日に行っている。計算メッシュは, 500 m 格子, 鉛直 10 層とした。

4. 現地観測結果

(1) 底質分析結果

図には示していないが, 粒度については那珂川河口沖合で, 砂利のために採泥できない場合があり, 底質の変動があるものの, それ以外の領域ではほとんど大きな変化は無く, 細砂が分布していた。図-3 に強熱減量, 全窒素の平面分布の例を示す。この図から, 強熱減量は那珂川河口南側に極大値が存在し, その位置が季節によって, 変動していることがわかる。これに対して, 全窒素は季節によって全く異なる分布を示す。図に示していない全リン, 有機炭素, 全炭素, クロロフィル a (以下 Chl-a とする) も季節によって, 大きく変動している。これらの分布から, 共通にいえることは, 那珂川河口近傍では大きな値とならず, 河口近傍から離れた位置に極大値が存在する傾向があることである。これは, 河口周辺では波浪や流れが激しく, 底質の攪乱も大きいことによるものと考えられる。

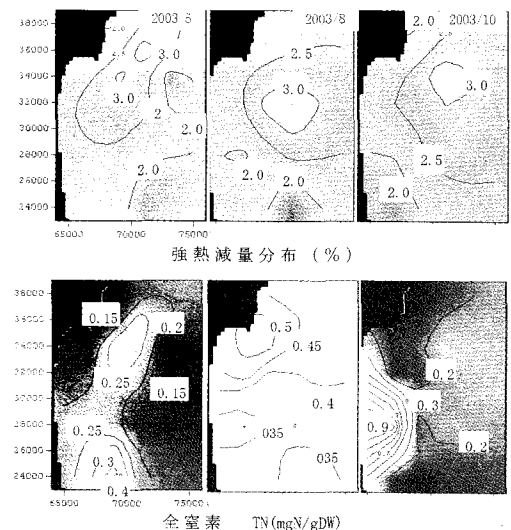


図-3 強熱減量, 全窒素の分布

(2) 水 質

図-4 に 5 月における水温, 塩分の分布を示す。塩分, 水温の分布に関しては, 季節を問わず, 那珂川周辺 (特に南側) で河川水による, 低塩分水が存在している。図

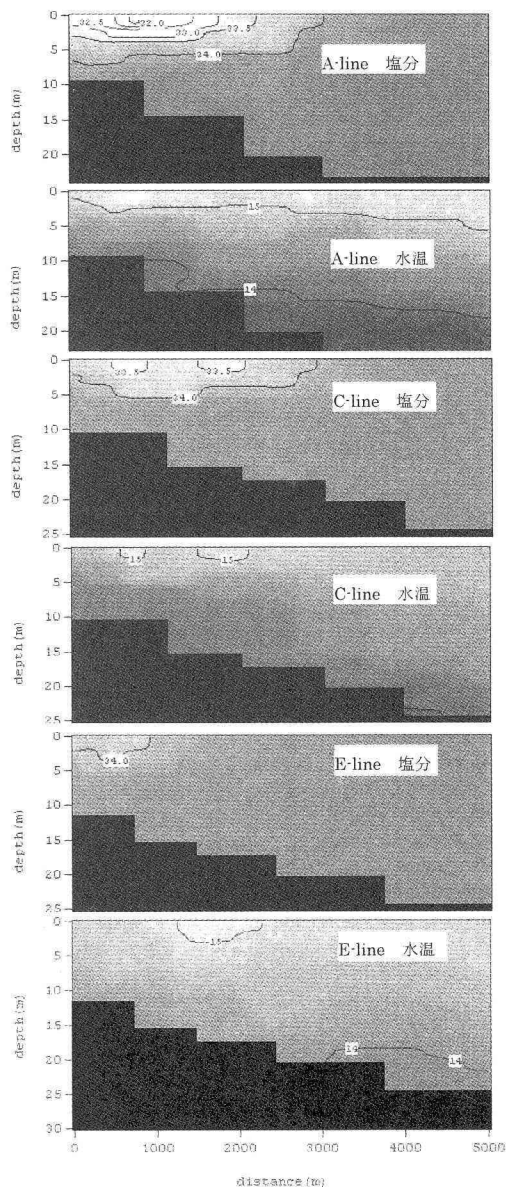


図-4 2003年5月の塩分・水温の分布

には示していないが、8月の塩分低下量は他の時期より、かなり大きかった。これは、那珂川の河川流量が大きかったためである。また、低塩分の領域は8月には一番沖合表層（水深25m）まで及んでいるが、他の季節は沖合まで及んでいない。

図-5に5月のChl-a, $\text{NO}_3\text{-N}$ の分布を示す。春期のブルーミングが起きていることがわかる。Chl-aが高いところでは、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が植物プランクトンに吸収されて低くなっている。Chl-aは、河口付近の亜表層（5~10m）に極大が見られる。8, 10月は、河口周辺を除き、栄養塩類、Chl-aの濃度は低レベルであった。図-6に塩分対

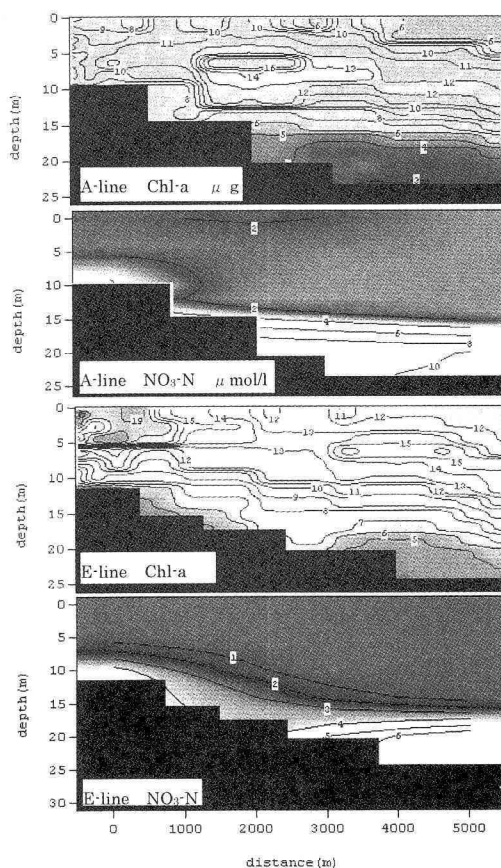
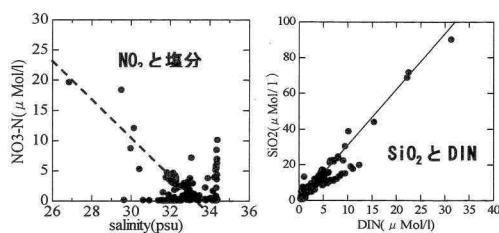
図-5 2003年5月のChl-a・ $\text{NO}_3\text{-N}$ 

図-6 栄養塩類の関係

する栄養塩の相関の例を示す。リンを除く栄養塩は、比較的高濃度の場合、塩分との逆相関関係が明確であり、那珂川の影響が明瞭に表れていた。 $\text{NO}_3\text{-N}$ と塩分の関係から、那珂川の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、約 $100\text{ }\mu\text{mol/l}$ 程度と推定された。また、DINと SiO_2 の相関は極めて高く、那珂川河川水から供給される栄養塩の比率は、沿岸で希釈されても大きく変化しないことがわかる。図には示さないが、栄養塩のうちリンは塩分との相関性が低かった。特に5月はリンが高い濃度を示す地点が多かった。リンと水深の相関は高く、底層又は外洋からの供給が主であることが示唆された。

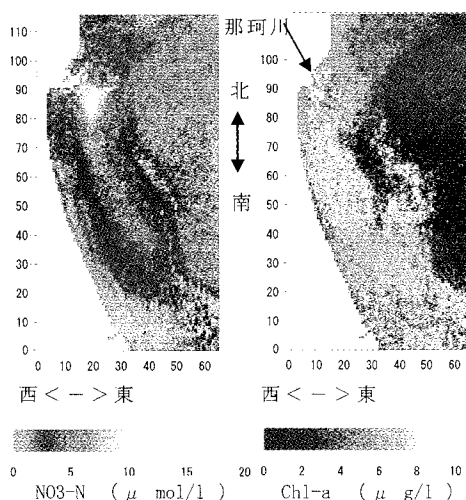


図-7 計算された5月12日の NO_3 -N, Chl-aの分布(水深6m)

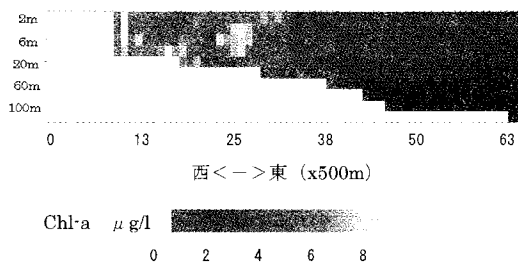


図-8 那珂川河口から沖合のChl-aの分布

5. 数値計算結果

図-7, 図-8に現地観測を行った5月12日9時頃の計算結果を示す。計算は5月1日から開始している。この図は水深6mの NO_3 -N, Chl-aの分布である。多くの領域で、亜表層から中層にかけて極大が存在したため、水深6mでの分布を示した(図-8参照)。亜表層極大となったのは、流れ等の要因もあるが、表層付近で強光阻害が生じたことによるものと考えられる。現地観測結果(図-4参照)でも亜表層にChl-aの高濃度領域が見られるが、河口域から離れた領域では、岸寄りの表層でChl-a最大となっており、計算結果と異なっている。これは、岸寄りの浅海域の水深を計算の便宜上深くしたこと及び実際には浅海域に濁りが大きく、強光阻害が起こりにく

いことなどによるものと考えられ、今後改善すべき課題と考える。また、那珂川南側に高いChl-aの領域(図-7右, 白い点群)が見られ、河川水によってこの領域の一次生産が高くなっており、これらが沿岸に沿って南に続いていくのがわかる。さらに NO_3 -Nは、那珂川南側に高い濃度の領域があること、Chl-aの高い領域では逆に低い濃度になる傾向があることなども現地観測結果と定性的に一致する。計算結果は、現状を精度良く表わしているとはいえないが、那珂川河川水が沖にすぐに拡散するのではなく、沿岸に沿って南下傾向にあり、沿岸域の一次生産に寄与している点などは、これまでの研究や調査結果を説明しているものと考えられる。

6. まとめ

以上、これまで述べてきたことをまとめると以下のようになる。

- (1) 那珂川沿岸域の底質は、粒径に関しては季節的な変化は少ないが、底質の炭素、窒素、クロロフィルなどは、季節によって大きく変動する。
- (2) 水深30m以浅の領域では、那珂川河川水の一次生産への貢献度は大きいことがわかった。数値計算によってもそのことが示された。
- (3) 数値計算は、窒素のみ対象としているが、同海域では夏季に、一次生産にリン制限が表れることが知られている。この点についても検討出来るよう改良する必要がある。

最後に、本調査のために多大な協力を頂いた波崎、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

- 奥西 武・足立久美子・日向野純也・中村義治 (2000): 鹿島灘沿岸における一次生産構造, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 1021-1025.
- 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.
- 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.
- Kawamiya M, Kishi M, Ymanaka Y and Suginoara N (1995): An ecological-physical coupled model applied to station Papa, Journal of Oceanography Vol. 51, pp. 635-664.