

鹿島灘・九十九里浜沿岸での一次生産に及ぼす 利根川・那珂川の影響について

新井雅之¹・中山哲厳²・足立久美子³
齊藤 肇⁴・奥西 武⁵・八木 宏⁶

鹿島灘・九十九里浜沿岸域の流動・水質に及ぼす利根川・那珂川の影響を明らかにすることを目的に 2005 年の春 (5 月), 夏 (8 月), 秋 (11 月) の計 3 回, 調査船により現地観測を行った。現地観測により得られた水質・底質データを総合的に分析をした。利根川の河川水を定期的に採水し, 水質・流量について分析をした。流動・一次生産モデルにより現地観測時期の同海域における水質・一次生産について計算を行った。計算結果は観測結果を概ね再現しており, 同海域における河川水の影響を検討した。その結果, 鹿島灘から九十九里沿岸の一次生産には河川水が大きく影響しており, 特に那珂川に比べて利根川の河川水が, 同海域の一次生産に大きく貢献していることがわかった。

1. はじめに

鹿島灘から九十九里浜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。当海域は南側に黒潮系, 北側には親潮続流系が存在し, ハマグリ, ホッキ貝等の二枚貝をはじめとしてシラス, サバ, イワシなどの浮き魚の良好な漁場となっている。このような漁場は陸水及び外洋からの栄養塩供給による豊富な一次生産により形成されている。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, 2005) は, 鹿島灘北部の那珂川沿岸河口域において, 現地観測及び数値計算により一次生産の特性を検討し, 那珂川からの栄養塩供給が沿岸域の一次生産に重要であることを指摘している。本研究は, 鹿島灘から九十九里浜沿岸での一次生産に河川水が及ぼす影響を明らかにすることを目的としている。そのため利根川沿岸河口域において現地観測を行い, 海域の水質特性を把握した。流入河川である利根川河川水を定期的に採水・分析すると共に, 出水時には硝酸塩濃度の連続観測を行い, 河川の水質特性を把握した。これらの分析結果及び各種データベースを用いて, 鹿島灘から九十九里浜沿岸全域について数値計算を行い, 利根川・那珂川の河川水が同海域の一次生産に及ぼす影響を検討した。

2. 現地観測

利根川沿岸河口域の環境動態を把握するために, 以下の調査を行った。海域の現地観測は, 水産総合研究センター水産工学研究所所属の漁業調査船たか丸 (60 t) で行った。観測は 2005 年春季 (5 月上旬), 夏季 (8 月上旬), 秋季 (11 月上旬) の計 3 回行った。同海域は, 通常 3 月から 5 月頃までブルーミングが発生し, 夏季及び秋季は, 河川等による栄養塩供給が無い限りは貧栄養状態となることが多い。

現地観測地点を図-1 に示す。利根川沿岸河口域の水深 10~100 m において放射状に 6 測線 (A~F) を設定した。観測項目は以下の通りである。

(1) 計測器による観測

図-1 のすべての観測点で, 多項目水質計 (アレック社製, ACL208) により水温, 塩分, 濁度, 蛍光値 (蛍光値は採水結果を用いて校正し pheo, chl a 量に換算す

1 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
2 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
3 正会員	水産修	(独法)水産総合研究センター水産工学研究所開発システム研究室
4	農博	(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
5 正会員	博(水産)	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
6 正会員	工博	東京工業大学助教理工学研究科

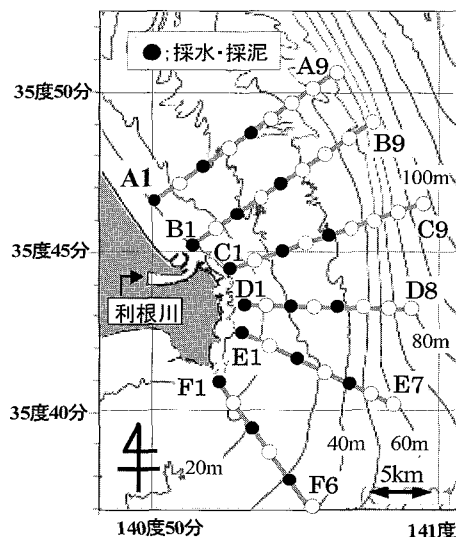


図-1 現地観測地点

る)及び、硝酸塩センサー (SATLANTIC 社製, ISUS-X) により硝酸塩濃度の鉛直プロファイル計測した。併せて ADCP による流速観測を行った。

(2) 水 質

図-1の黒丸地点で、表層を含む4~5層で採水を行い(表層;バケツ,それ以外;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, phaeo, SSを計測した。懸濁態については、窒素,リン,有機炭素を計測した。また、後述の数値計算領域に含まれるものの、観測を行っていない沖側の水深100m以深の水質データについては、日本海洋データセンター(以下JODC)のデータの分析を行い、特性を把握した。

(3) 底 質

採水点において、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,炭素同位体である。

(4) 河川の水質

流入河川の水質特性を把握するために、利根川河口堰(河口より18km地点)において、毎週定期的に採水を行い、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, phaeo, SSを計測した。さらに、2005年8月末の台風11号による出水時には4~6時間毎に採水して分析をするともに硝酸塩センサーによる連続観測を行った。また、現地観測ではないが、利根川及び那珂川の流量及び水質(全窒素,全リン,水温,濁度)を国土交通省利根川下流河川事務所及び常陸河川国道事務所より提供していただき、流量と水質の関係を分析した。

3. 現地観測結果

(1) 海域の水質

現地観測により得られた栄養塩濃度の相関関係を図-2に示す。無機溶存態窒素(DIN)と $\text{PO}_4\text{-P}$ の関係(図中(a))を見ると、レッドフィールド比(モル比がC:N:P:Si=106:16:1:10)に近いことがわかる。こ

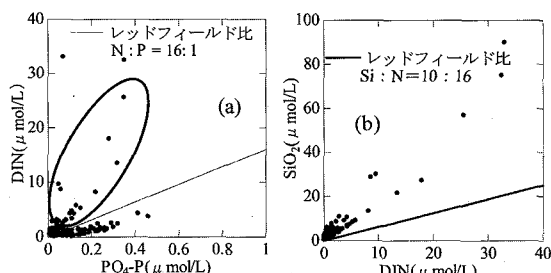


図-2 栄養塩濃度の相関図(現地観測値より)

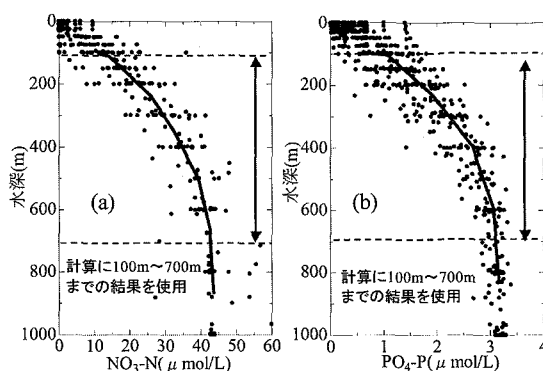


図-3 水深と栄養塩濃度の関係(JODC データより)

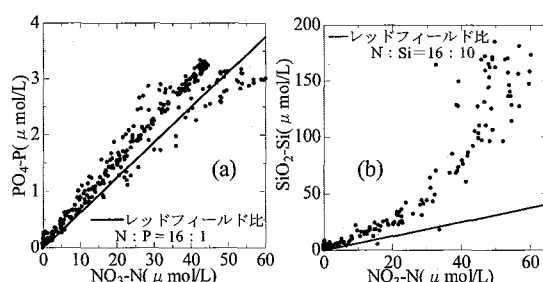


図-4 栄養塩濃度の相関図(JODC データより)

こで、レッドフィールド比から外れたグループ(黒線で囲んだグループ)は、河口近傍の河川影響が強いと思われる地点のデータである。ケイ酸塩($\text{SiO}_2\text{-Si}$)とDINの関係(図中(b))を見ると、相関があるもののレッドフィールド比に比べてケイ酸塩が豊富にあることがわかる。

JODC データより得られた、硝酸塩($\text{NO}_3\text{-N}$)及びリン酸塩($\text{PO}_4\text{-P}$)と水深の関係を図-3に示す。硝酸塩は、水深が深くなるに伴い濃度が高くなり、水深約800m以深は40~50 $\mu\text{mol/L}$ 程度となる。リン酸塩も同様の傾向にあり、水深約800m以深は3~3.5 $\mu\text{mol/L}$ 程度となっている。次に栄養塩濃度の相関を図-4に示す。当海域では硝酸塩以外の無機溶存態窒素のデータは数が少なく、微量であるため、硝酸塩について比較を行った。硝酸塩とリン酸塩には相関があり、レッドフィールド比と比較すると、硝酸塩に比べてリン酸塩がやや多い。また、現地観測結果と同様に、硝酸塩とケイ酸塩の関係はレッドフィールド比に比べてケイ酸塩が豊富にあり、硝酸塩濃度が高い(=水深の深い)ほど顕著である。

(2) 河川流量, 水質

a) 濁度

利根川の流量と濁度の関係を図-5に示す。流量が約200 m^3/s を越えると濁度との相関が見られる。ここでは河川由来の懸濁物の大まかな移流・拡散・沈降過程を検討することを目的としている。そのため、後述の数値

計算では、河川の濁度データの無い期間においては、L-Q 式により濁度を求めた。図には示していないが、濁度と SS 濃度の関係は、濁度 $\propto$ SS 濃度であったため、濁度を SS 濃度としてモデルに適用した。

b) 栄養塩

利根川の硝酸塩濃度の時系列を図-6 に示す。利根川の水質特性は、硝酸塩濃度は流量による変化は小さいが季節的な変化が大きい。初夏から秋季の硝酸塩濃度は $100 \mu\text{mol/L}$ 前後であり、その後、徐々に濃度が高くなり冬季は $200 \mu\text{mol/L}$ 前後まで増加する。この原因は詳細に検討していないが、①夏季には冬季に比べて河川水の chl a 濃度が高いことから（夏季 $80 \mu\text{g/L}$ 、冬季 $10 \mu\text{g/L}$ 程度）、河川内での一次生産により、栄養塩が消費されること、②夏季には、水田に水が張られるため、硝酸塩が河川に流出しにくくなることなどが考えられる。

出水時に利根川で行った硝酸塩センサーによる連続観測結果の 1 例を図-7 に示す。8 月 26 日は、台風 11 号の通過直後で河川流量は増加傾向にあった。流量の増加

に伴い硝酸塩濃度は $5 \mu\text{mol/L}$ 程度増加したが、それ以上増加することはなかった。8 月 28 日までの 3 日間観測を行ったが濃度は $80 \sim 95 \mu\text{mol/L}$ の範囲内にあり、変動は小さかった。

4. 数値計算について

計算に用いた流動・一次生産モデルは、中山ら (2005) で用いられたモデルを使用した。流動は POM (プリンストン・オーシャン・モデル) を用いている。一次生産及び動物プランクトン等による諸過程は、Kawamiya ら (1995) の KKYS モデルをベースにして、窒素以外に植物プランクトンによるリンの吸収、排出、分解過程を考慮している。外力は風力のみとしている。計算領域は、鹿島灘から九十九里浜沿岸全域（南北 115 km 、東西 65 km 、 500 m メッシュ）とし、計算に用いた河川は計算領域内の 1 級河川である利根川と那珂川の 2 河川とした。利根川の流量、栄養塩濃度、濁度等は 3. (2) の分析結果（図-5～7 を参照）を用いており、硝酸塩濃度を $100 \mu\text{mol/L}$ 、リン酸塩濃度を $3 \mu\text{mol/L}$ を用いている。なお、那珂川については、中山ら (2005) で用いた関係を使用している。初期条件及び境界条件は、3. (1) の分析結果を基に水深別に設定しており、水深 100 m 以浅については現地観測データの分析結果から決定し、水深 100 m 以深については、JODC データの分析結果から決定した。気象データ（全日射量、雲量、風向、風速、気圧、気温）は計算領域のほぼ中央に位置している銚子気象台のデータを用いた。その他のモデルのパラメーター、境界条件、諸元等は、中山ら (2005) で用いたものを使用している。計算は、ブルーミング期となる春季と、海域にほとんど栄養塩がない夏季の 2 ケースについて行い、計算期間は 5 月、8 月の観測日を含む各 40 日間（春季；4 月 10 日～5 月 19 日、夏季；7 月 1 日～8 月 9 日）とした。

2005 年の春季、夏季の気象及び河川流量の時系列を図-8 に示す。計算期間中の流量を比べると、利根川是那珂川の約 3 倍である。春季は大きな出水はなく、河川流量は、利根川； $100 \sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$ 、那珂川； $40 \sim 70 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度であった。春季の風向は数日毎に変化しており、風速 5 m/s 以上が全体の半分以上を占める。現地観測を行った 5 月 12 日は風速 10 m/s 近い北風が吹いていた。夏季は全体として南風が多く、春季に比べて風速も小さい。河川流量は春季の平常時に比べて 2 倍近くあり、利根川は 8 月末の台風 11 号など最大で $2,000 \text{ m}^3/\text{s}$ を超える大規模な出水が 2 度あった、那珂川においても 7 月末に最大で $800 \text{ m}^3/\text{s}$ の出水があった。

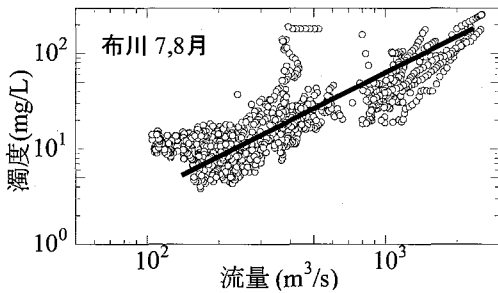


図-5 流量と濁度の関係（利根川，布川観測所）

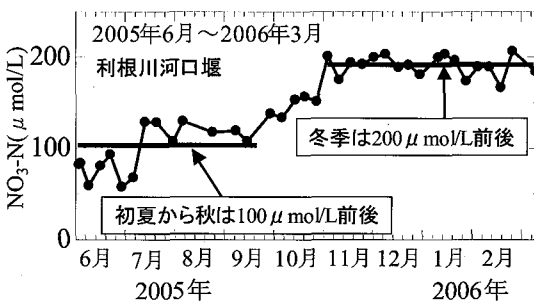


図-6 利根川の硝酸塩濃度の時系列（毎週採水）

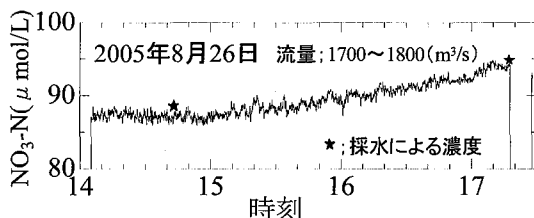


図-7 硝酸塩センサーによる連続観測の時系列

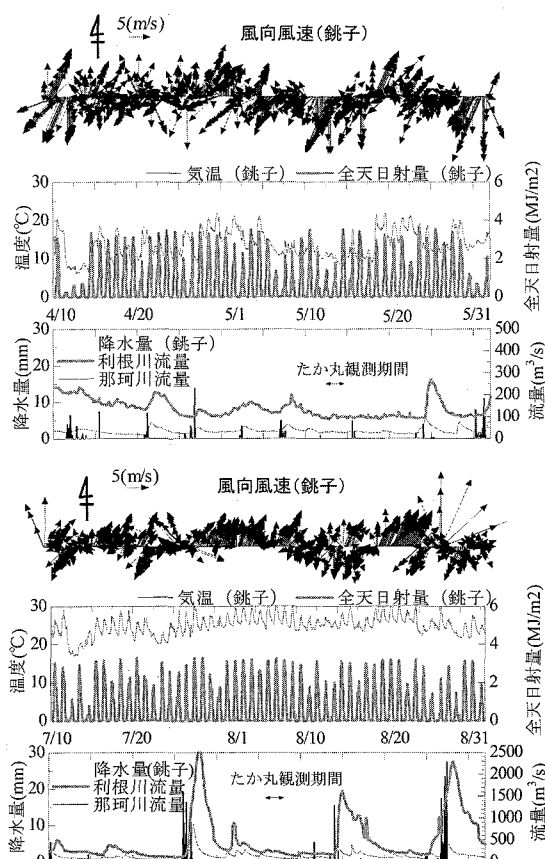


図-8 気象及び流量の時系列 (上: 春季, 下: 夏季)

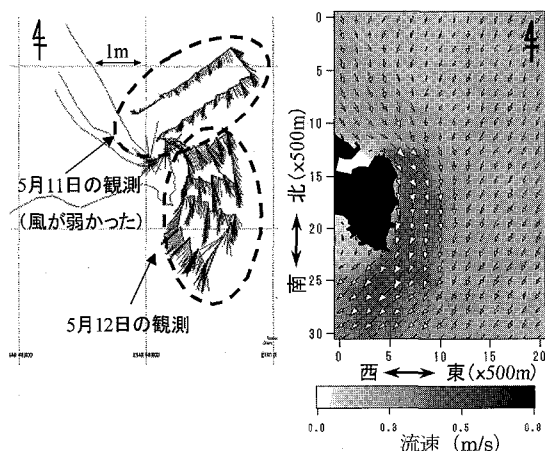


図-9 流速図 (左: 観測値, 右: 計算値)

5. 数値計算結果

現地観測を行った5月11, 12日のADCPによる表層の流速分布を図-9(左図)に示す。12日は終日強い北風が吹いており、それに伴い犬吠崎沖周辺において強い南向きの流れが観測された。同日における計算結果の1例を

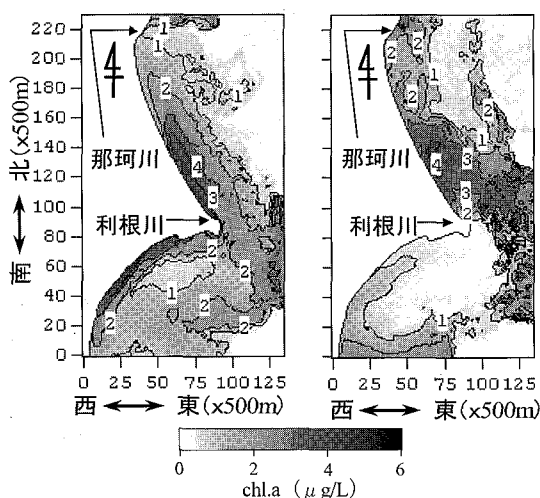


図-10 chl-a 濃度の計算結果(表層, 左: 春季, 右: 夏季)

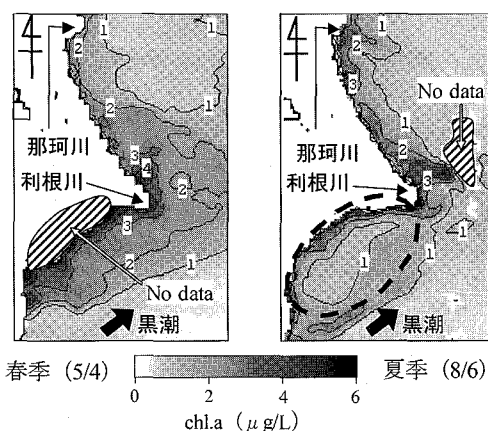


図-11 衛星データによるchl-a濃度 (MODIS より)

図-9(右図)に示す。観測結果に比べて、沿岸域の狭い範囲であるが、強い南向きの流れが概ね再現された。現地観測を行った日時(春季: 5月12日昼頃, 夏季: 8月6日昼頃)のchl-a濃度の計算結果を図-10に示す。5月(左図)は風向が数日毎に変化しているため河川水は、南北どちらかに偏ることなく沿岸方向に広がる。そのため表層のchl-aの分布は鹿島灘から九十九里浜の沿岸部全域で濃度が高くなっており、特に岸から幅5km~10kmの範囲でchl-a濃度は4μg/Lを越えた高い値となっていた。8月(右図)は、主に鹿島灘側でchl-a濃度が高くなっていることがわかる。これは、南風が連続して吹いていたことにより、利根川河川水が主として河口から北側に運ばれたためであると考えられる。衛星データによる観測日に最も近い日のchl-a濃度の分布を図-11に示す。計算結果(図-10)のchl-a濃度の分布図と比較すると、春季・夏季ともにchl-aの分布形を概ね表現できているが、九十九里浜側(図-11の夏季の破線で囲んだ部

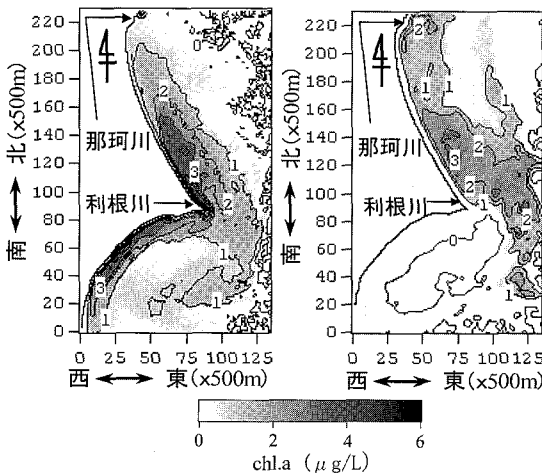


図-12 河川の影響範囲 (左: 春季, 右: 夏季)

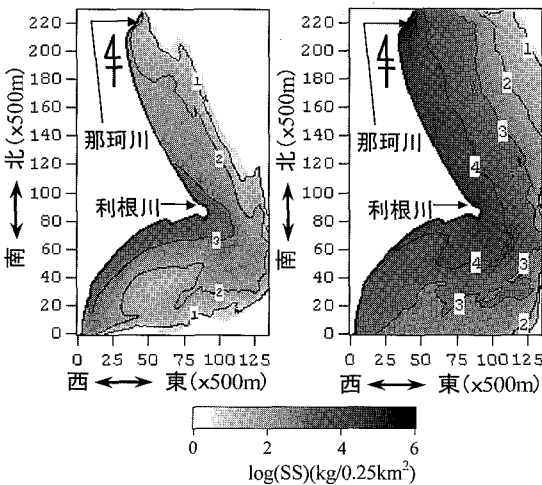


図-13 河川 SS の沈降量 (左: 春季, 右: 夏季)

分)の再現性に問題がある。特に沿岸部の chl.a 濃度の分布を表現できていない。これは、九十九里浜沖を北東に流れる黒潮の影響を計算に取り込んでおらず、黒潮に伴う九十九里浜沿岸の補償流や、黒潮による沖側(東側)への移流を表現できていないためであると考えられる。

次に河川水が、海域の一次生産に与えている影響を調べるために、河川から供給される栄養塩濃度を「ゼロ」とした場合について計算を行い、前述の計算結果との差をとり、河川の影響について検討を行った。河川の影響範囲(表層)を図-12に示す。春季は、数日毎に風向が変化しているため、河川の影響は鹿島灘から九十九里沿岸の全域に現れている。特に利根川河口部付近の岸から幅 5 km~10 km の範囲に強く現れており、chl.a 濃度を 3 $\mu\text{g/L}$ 程度増加させることに貢献している。しかし、那珂川周辺では、この時期河川の流量が少なかったため、河川の影響があるものの規模は小さい。夏季は7月末に

大規模な出水(図-8 参照)があったため、5月に比べて広範囲に河川の影響が現れている。利根川の影響は主に鹿島灘側に現れており、これは前述したように、南風が連風しており、利根川河川水が主として河口から北側に運ばれたからであると考えられる。また、那珂川においても出水があったため、河川の影響が鹿島灘側で現れており、鹿島灘沿岸全域において chl.a 濃度を 2~4 $\mu\text{g/L}$ 程度増加させることに貢献している。

図-13に春季、夏季の40日間で河川より供給された懸濁物の沈降量の分布を示す。沈降量は河川流量の多い夏季が春季に比べて1オーダー程度多く広範囲に分布しているが、両者とも分布形状は似ており、沿岸に沿った領域に沈降していることがわかる。

6. ま と め

以上、まとめると以下ようになる。

- (1)利根川から流出する硝酸塩濃度は、流量による変化は小さく、季節的な変化が大きい。初夏から秋季にかけては 100 $\mu\text{mol/L}$ 前後であり、その後増加し冬季には 200 $\mu\text{mol/L}$ 程度であった。また、河川から供給される栄養塩はレッドフィールド比と比較すると、リンに比べて窒素が多い。
- (2)数値計算により、鹿島灘から九十九里浜沿岸域の一次生産に及ぼす河川水の影響を概ね把握できた。当海域では那珂川に比べて、利根川の河川水が海域の一次生産に大きく貢献している。
- (3)計算結果と衛星データを比べると九十九里浜側の chl.a の再現性に問題がある。これは黒潮を計算に反映していないため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・銚子漁業協同組合と、河川データを提供していただいた利根川下流工事事務所・常陸河川国道事務所の皆様に感謝します。なお、本研究は主として、農林水産省技術会議プロジェクト研究「流域圏における水物質循環、生態系のモニタリング及び機能の解明・評価」により行われたものである。また、衛星画像のデータは「宇宙航空研究開発機構(JAXA/東海大学(TSIC/TRIC))」から提供されたものである。

参 考 文 献

- 中山哲蔵・齊藤肇・新井雅之・足立久美子・奥西武・八木宏(2005): 鹿島灘北部海域の一次生産に及ぼす那珂川の影響, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 1051-1055.
- 中山哲蔵・佐伯信哉・足立久美子・齊藤肇・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.
- Kawamiya M, M. Kishi, Y. Yamanaka and N. Suginoara (1995): An Ecological-Physical Coupled Model Applied to Station Papa, Journal of Oceanography Vol.51, pp. 635-664.