

黒潮・親潮続流の影響が強い開放性沿岸域での 一次生産に及ぼす河川水の影響

Effect of River Water on Primary Production in the Coastal Region where Ocean Current Influences

新井雅之¹・中山哲厳²・足立久美子³・齊藤 肇⁴・奥西 武⁵

Masayuki ARAI, Akiyoshi NAKAYAMA, Kumiko ADACHI
Hajime SAITO and Takeshi OKUNISHI

The purpose of this study was to understand the effect of river water in the coastal region. Therefore, the field observation was performed to understand water quality structures in the coastal region. And we simulated the present condition using the JCOPE-data, because in the coastal region of Kashima-nada and Kujukuri-hama are affected by the Kuroshio and Oyashio. As result of the simulation, the Kuroshio influences not only coastal current but also the distribution of sediment and primary production in the coastal region. Analysis of JODC-data revealed a negative correlation between the water temperature and nitrate or phosphate, which using the boundary conditions in the simulation.

1. はじめに

鹿島灘・九十九里浜沿岸は外洋に面しており、南側に黒潮系、北側に親潮続流系が流れる開放性沿岸域である。当海域は、陸水・外洋からの栄養塩供給による豊富な一次生産により優良な漁場が形成されている。昨年までの成果として、新井ら(2006)は現地調査及び数値計算により、当海域の一次生産に及ぼす河川水の影響を検討した。その結果、利根川からの栄養塩供給が当海域の一次生産に大きな影響を与えていることを明らかにした。しかしながら、数値計算に黒潮・親潮続流の影響が考慮されていないため、例えば九十九里浜側のクロロフィル a(以下 Chla)の分布を表現できていないという課題があった。本研究は、海流(黒潮・親潮続流)の影響が顕著である鹿島灘・九十九里沿岸域において、宮澤・山形(2003)による JCOPE モデルの計算結果(以下、JCOPE データ)を数値計算に取り込むことにより、海流の影響を考慮した上で、河川水が海域の一次生産に及ぼす影響について検討したものである。また、顕著な海流がない開放性沿岸域である新潟沿岸域において同様の数値計算を行った。両海域の計算結果を比較することで、海流の有無により、河川水が海域の一次生産に及ぼす影響について検討を行った。今回対象とした海域と、JCOPE データによる表層

流速の一例(2005 年 1 月 1 日)を図-1 に示す。

2. 現地観測

鹿島灘・九十九里浜沿岸域の環境動態を把握するために、同海域に大きな影響を与える利根川の河川水を採水し分析するとともに、利根川沿岸河口域において、現地観測を行った。

(1) 河川の水質

利根川河川水の水質特性を把握するために、利根川河口堰(河口より 18 km 地点)において、2005 年 6 月から 2006 年 12 月まで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 Chla, Pheoa, SS を計測した。さらに、2005 年 8 月と 2006 年 10 月の河川出水時には、河口より約 3 km 上流地点の棧

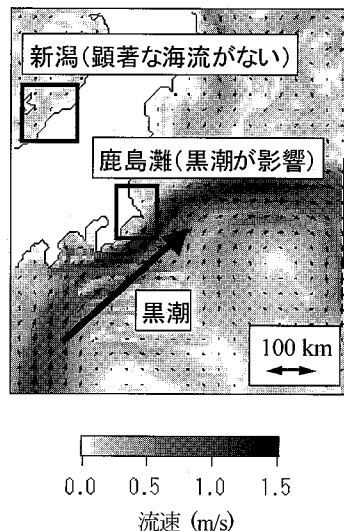


図-1 計算対象領域と JCOPE データによる流速図

- | | | |
|-------|-------|---------------------------------|
| 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 |

橋において、4～6時間毎に河川水を採水して、前述の水質項目について計測するとともに、硝酸塩センサー (SATRANTIC 社製, 1SUS-X) による連続観測 (48 時間) を行った。また、現地観測ではないが、利根川及び那珂川、新潟沿岸域については、信濃川・阿賀野川・荒川のデータを入手し、流量及び水質の関係を分析した。

(2) 海域の現地観測

海域の観測は、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。利根川河口沖に 6 測線 (水深 10～100 m, 測線距離 10～14 km) を設定し、2005 年及び 2006 年の春季 (5 月), 夏季 (8 月), 秋季 (10 月下旬, 11 月) の計 6 回行った。なお、冬季 (2 月) も観測を予定していたが、シケのため観測が行えなかった。同海域は、通常 2 月下旬から 5 月頃までブルーミングが発生し、夏季及び秋季は河川や湧昇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。

a) 水質

多項目水質計 (アレック電子社製, ACL208) による水温・塩分・濁度・蛍光値 (蛍光値は採水結果を用いて校正し Chla + Pheoa 量に換算) 及び、硝酸塩センサーによる硝酸塩濃度の鉛直プロファイル計測した。採水は表層を含む 4～5 層 (表層; バケツ, その他; ニスキン採水器) で行い、無機栄養塩及び懸濁態の物質 (窒素, リン, 有機炭素), Chla, Pheoa, SS を計測した。水深 100 m 以上の沖側については、日本海洋データセンターの海洋データ (以下 JODC データ) を分析し海域の特性を把握した。

b) 底質

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、粒度組成, 強熱減量, 含水比, 全炭素, 有機炭素, 全窒素, 全リン, Chla, 炭素安定同位体である。

3. 現地観測結果

(1) 河川の水質

河川事務所より入手した利根川河口堰の窒素濃度の時系列を図-2 に示す。窒素濃度は年周期で変動し、初夏から秋季は $150 \mu\text{mol/L}$ 前後であり、その後徐々に濃度が高くなり、冬季は $250 \mu\text{mol/L}$ 前後まで増加する。総窒素に占める溶存態窒素の割合は 80～95% でありその大部分が硝酸態窒素である。この年変動の理由の一つとしては、初夏から秋季にかけて水田には水が張られていることにより、施肥をしても河川に流出しにくいと想定され (松森, 2006)。リン濃度と Chla 濃度の時系列を図-3 に示す。リン濃度は、多少変動はしているものの、年周期の変化は見られない。しかし、春から夏にかけて河口堰のリン酸塩濃度が著しく減少していることが多い。これは、河口堰の Chla 濃度が布川 (河口堰より約 55 km 上流) に比べ増加している期間と一致していることから、河

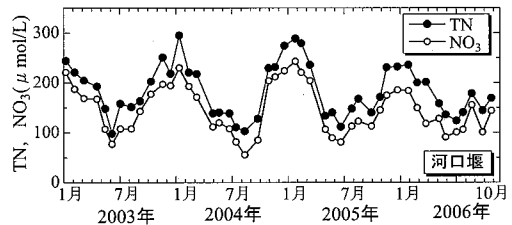


図-2 利根川の窒素濃度の時系列 (河口堰)

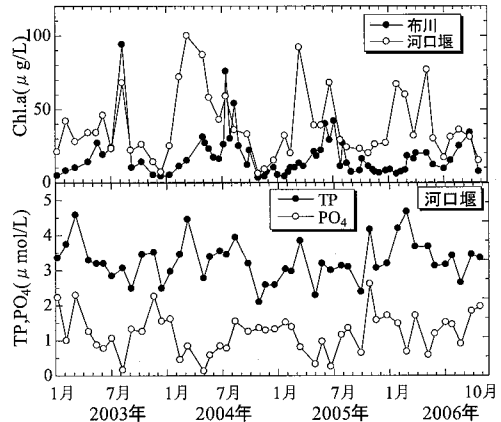


図-3 利根川のリン Chla 濃度の時系列 (河口堰)

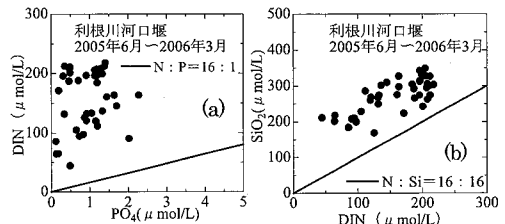


図-4 河川水の栄養塩の相関図

口堰で流れが停滞することにより Chla が増加し、リン酸塩が吸収されているためであると考えられる。

採水した河川水の栄養塩の相関を図-4 に示す。河川水に含まれる無機溶存態窒素 (DIN)・リン酸塩 ($\text{PO}_4\text{-P}$) 及びケイ酸塩 ($\text{SiO}_2\text{-Si}$) をみるとレッドフィールド比 (モル比が $\text{C}:\text{N}:\text{P}:\text{Si}=106:16:1:16$) に比べ無機溶存態窒素及びケイ酸塩が非常に豊富であることがわかる。

(2) 海域の水質

現地観測により得られた海域の栄養塩濃度の相関を図-5 に示す。無機溶存態窒素とリン酸塩の関係 (図中 (a)) 及びケイ酸塩と無機溶存態窒素の関係 (図中 (b)) には相関があり、レッドフィールド比に近いことがわかる。ここで、図中の黒線で囲われた (レッドフィールド比から大きく外れた) グループは、河川水の影響が強い地点のデータであり、図-4 に示した河川水の溶存態窒素とリン酸塩及びケイ酸塩の構成比に近いことがわかる。

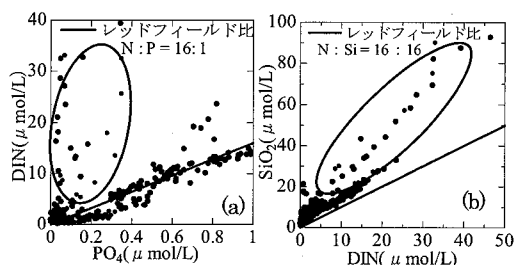


図-5 海域の栄養塩の相関図 (観測値)

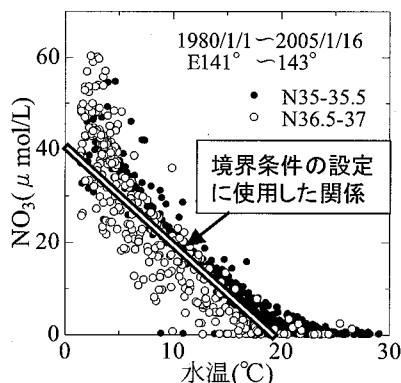


図-6 水温と硝酸塩濃度の関係 (JODC データより)

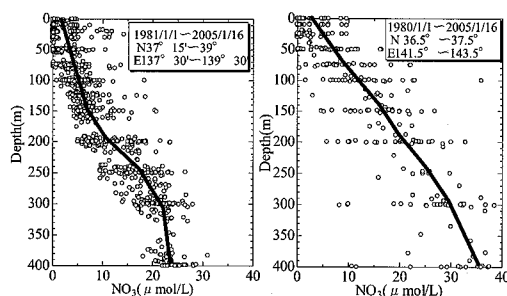


図-7 硝酸塩濃度の鉛直分布 (左: 新潟, 右: 鹿島灘)

JODC データより得られた、水温と硝酸塩濃度の関係を図-6 に示す。水温と硝酸塩濃度の間には逆相関の関係があり、水温が低くなる(水深が深くなる)につれ硝酸塩濃度が高くなる。また、水温とリン酸塩濃度についても同様の相関関係がある。この関係は、黒潮が支配的である南側の海域でより明瞭である。

次に、新潟海域と鹿島灘・九十九里浜海域の硝酸塩濃度の鉛直分布を図-7 に示す。新潟海域の硝酸塩濃度は、鹿島灘・九十九里浜に比べて全体的に低く、特に 250 m 以浅において顕著である。また、水深が深くなるにつれ濃度は増加するが、濃度が高い水深帯でも鹿島灘・九十九里浜の 7 割程度である。この関係はリン酸塩についても同様である。

4. 数値計算について

流動・一次生産の計算には、中山ら (2005) のモデルを使用した。流動は POM (プリンストン・オーシャン・モデル) を用いており、黒潮・親潮主流の影響を取り込むために、JCOPE データ (水平 1/12°, 鉛直 44 層) を用いた。境界は放射条件とし、境界における流れ・水温・塩分濃度は JCOPE データを線形補間したものを、計算領域の各境界メッシュ (流れは順圧成分のみ設定) に与えている。JCOPE データには栄養塩のデータがないため、境界から流入する栄養塩濃度については、図-6 に示した水温との関係を定式化して水温に依存させる形で用いている。ただし、表層近傍については、水温が低くても、植物プランクトンの吸収により栄養塩濃度が低い状態であることが多いことから、現地観測結果等に基づいた値を与えた。

(1) 鹿島灘・九十九里浜の計算について

計算領域は、鹿島灘から九十九里浜沿岸全域 (図-1 参照、南北 115 km, 東西 65 km, 500 m メッシュ、鉛直 9 層) とし、計算対象の河川は、利根川と那珂川の 2 河川とした。計算に用いた河川データ・気象データ及びその他モデルパラメータ等は、新井ら (2006) で用いた値を使用した。計算は 2005 年 1 月 1 日からの 1 年間について行った。

(2) 新潟海域の計算について

計算領域は、新潟沖から佐渡島を含む海域 (図-1 参照、南北 132.5 km, 東西 92.5 km, 500 m メッシュ、鉛直 9 層) とし、計算対象の河川は、荒川・阿賀野川・信濃川・関屋分水路・大河津分水路の 5 河川とした。海域の初期条件及び境界条件については JODC データの分析結果及び新潟県水産海洋研究所の観測データを基に設定した。河川データは各河川管理事務所から入手したデータを分析した結果を用いた。気象データは、必要項目の揃っている相川 (佐渡島) のデータを用いた。その他モデルのパラメータ等は鹿島灘・九十九里浜沿岸の計算と同じものを用いた。計算は、全河川データが揃った期間の中から、ブルーミング期となる春季 (2004 年 4 月 1 日～5 月 20 日) と、海域が貧栄養状態となる夏季 (2004 年 7 月 1 日～8 月 19 日) の各 50 日間について行った。

5. 計算結果

図-8 に鹿島灘・九十九里浜沿岸における Chla の計算結果の一例 (3 月 7 日) と、同日における衛星画像 (MODIS) を示す (Chla 濃度は対数表示)。外洋の流れを計算に取り込むことにより、Chla が黒潮の流れに乗って沖側へ運ばれる様子とともに、外洋の流れを計算に取り込む前には表現できていなかった、九十九里浜沿岸

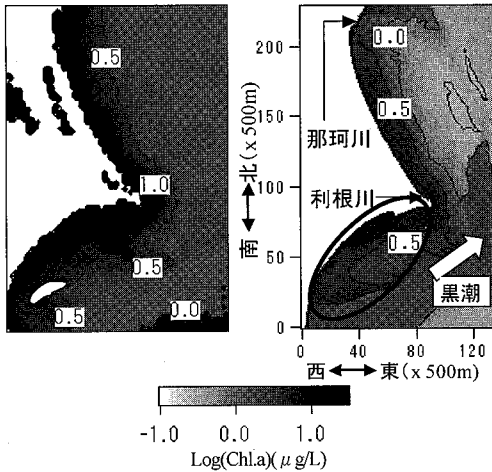


図-8 Chl a 濃度 (対数表示 左; MODIS, 右; 計算結果)

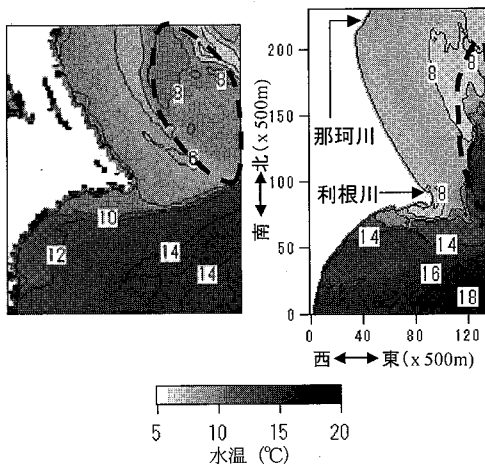


図-9 水温分布 (左; MODIS, 右; 計算結果)

における Chl a の増加 (図中の黒線で囲まれた部分) を概ね再現できた。これは、黒潮の流れによって南側沿岸部で鉛直混合が起きることにより、深部から栄養塩が供給されたためであると考えられる。次に水温の計算結果の一例 (3 月 7 日) と、同日における衛星画像 (MODIS) を図-9 に示す。水温に多少の差があるものの、黒潮の暖水の一部が、犬吠埼の沖から北に向かって伸びている様子 (図中の黒線で囲まれた部分) が概ね表現できている。また、計算結果における水温分布の変動パターンは、茨城県水産試験場発行の漁海況速報や衛星画像の温度分布を見る限りでは概ね再現できた。しかしながら、九十九里浜側の水温が衛星画像に比べ高い傾向にあり、南側境界部での水温及び流速の設定方法に課題が残った。

河川水が、海域の一次生産に寄与している範囲を調べるため、河川から供給される栄養塩濃度を「ゼロ」とした場合の計算を行い、通常の計算結果との差をとること

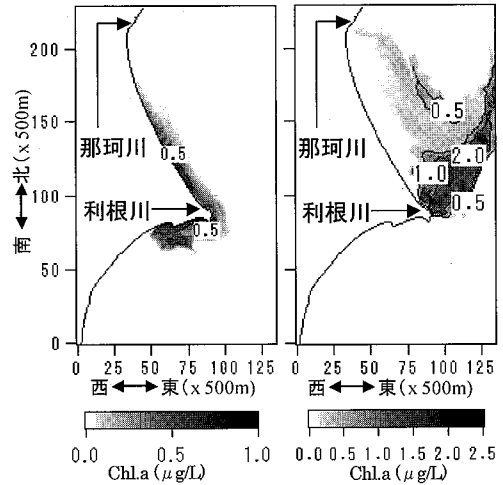


図-10 河川水の寄与範囲 (鹿島灘・九十九里浜) (左; 春季 (3 月 9 日), 右; 夏季 (7 月 31 日))

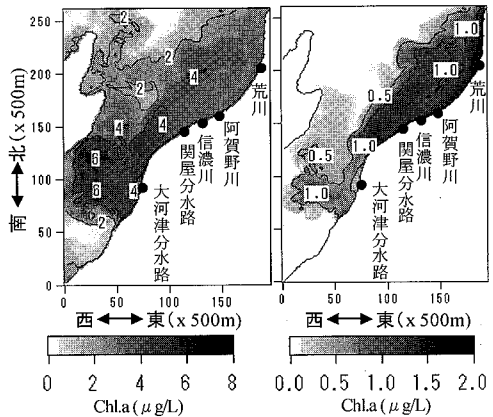


図-11 Chl a の分布と河川水の寄与範囲 (新潟) (左; Chl a 分布, 右; 河川の影響範囲)

により、河川水が一次生産に寄与する範囲について検討した。鹿島灘・九十九里浜沿岸の海域において、春季と夏季における河川水の寄与範囲の一例を図-10 に示す。春季は海域に栄養塩が豊富にあるため、沿岸部の Chl a 濃度が高く、最大で $8 \mu\text{g/L}$ 程度である。しかし、河川の流量が少ないため、河川水が一次生産へ寄与している範囲は、河口周辺の岸から $5 \sim 10 \text{ km}$ 程度の範囲に限定されており、Chl a の $0.8 \mu\text{g/L}$ 程度の増加に寄与しているのみである。一方、夏季 (7 月 31 日) は出水後であり、南寄りの風が連風していた。そのため、鹿島灘側の海域において、河川水が Chl a の $2 \mu\text{g/L}$ 程度の増加に寄与しており、海域が春季に比べて貧栄養であるため、河川水の寄与率が春季に比べて高い。

次に、新潟海域の春季 (4 月 30 日) における Chl a 分布と同日における河川水の寄与範囲の一例を図-11 に示す。新潟海域には顕著な海流がないため、河川水は拡散

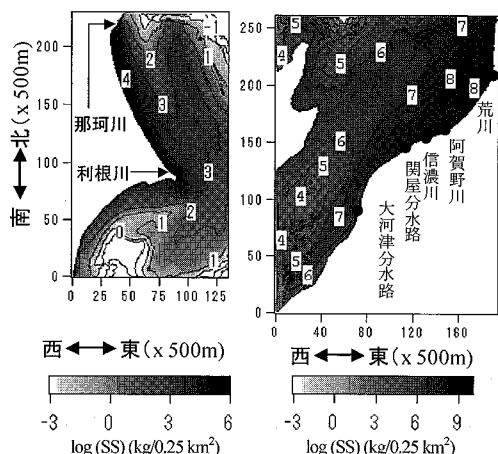


図-12 河川からの懸濁物の沈降水量 (夏季)
(左; 鹿島灘(90日間), 右; 新潟(50日間))

しつづも計算領域内に留まることにより, 周辺海域のChlaの増加に寄与していると考えられる。河川水がChlaの増加に寄与している範囲は鹿島灘に比べて広く, 佐渡島周辺にまで及ぶ。

新潟海域に流入する河川水の栄養塩濃度は, 利根川に比べて低いが(硝酸塩 $20 \sim 40 \mu\text{mol/L}$ 程度), 春季は融雪出水により流量が多いため, Chlaの $1.5 \mu\text{g/L}$ 程度の増加に寄与している。さらに, 図には示していないが夏季は大規模な出水があったため, $2.5 \sim 4 \mu\text{g/L}$ 程度の増加に寄与している。両期間ともに鹿島灘・九十九里浜沿岸よりも河川水によるChlaの増加量が多く, もともと海域が貧栄養であるため(図-7参照), 河川水のChlaの増加への寄与率も高い。

流量の多い夏季に河川から供給された懸濁物の沈降水量の分布を図-12に示す(鹿島灘・九十九里浜沿岸; 7~9月の約90日間, 新潟; 50日間)。図-10などで示した河川水の寄与範囲は, 時々刻々と変化する寄与範囲の, ある瞬間を捉えたものである。一方, 懸濁物の沈降分布は計算期間を通した結果であるから, 計算期間中に河川の影響が及んだ範囲の履歴を表していると考えられる。そこで, 両海域の沈降水量の分布を比較すると, 鹿島灘・九十九里浜沿岸では, 黒潮の影響を強く受け, 九十九里浜側の海域には懸濁物が沈降しにくい。そのため, 河口周辺や鹿島灘の岸に沿った箇所に多く沈降する。もしくは, 黒潮によって遠方に輸送されてしまう。一方, 新潟海域のように, 海流が顕著でない海域では, 河川水が遠方に移流されることなく広がるため, 懸濁物は海域に広く分布している。以上より, 顕著な海流の有無により, 河川水が海域に及ぼす影響に大きな違いがあることがわかった。同様の結論として図には示していないが, 炭素安定同位体の分析結果を見ると, 鹿島灘・九十九里浜沿岸で

は陸起源の物質が, 河口南側周辺の狭い範囲に留まっている。一方, 木暮(2006)が新潟海域で行った底泥の同位体分析の結果によると, 新潟海域では陸起源の物質が沖合20km以上にまで広く分布していることを述べている。

6. まとめ

本研究で得られた主たる結果は, 以下の通りである。

- (1) 海域の水温と栄養塩の間には高い相関がある。計算にこの関係を定式化して, 計算領域の境界値として用いた。
- (2) JCOPE データを用いて, 黒潮・親潮統流の流れを考慮した流動・一次生産モデルにより数値計算を行った。その結果, 黒潮の暖水が犬吠埼の沖から北に向かって伸びている様子や, 九十九里浜側のChlaの増加を概ね再現できた。
- (3) 河川からの懸濁物は海流が強い海域には, 沿岸に沿った領域に分布する傾向にある。一方, 海流が顕著でない海域では全体に広く分布し, 河川水が海域に及ぼす影響に大きな違いがあることがわかった。

最後に, 本調査のために多大な協力を頂いた, 波崎漁業協同組合, 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, 羽越河川国道事務所, 信濃川河川事務所, 信濃川下流河川事務所, 阿賀野川河川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

- 新井雅之・中山哲蔵・足立久美子・斉藤 肇・奥西 武・八木 宏(2006): 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, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1101-1105.
- 木暮陽一(2006): 外海性浅海砂浜生態系における栄養有機物の動態の解明, 農林水産省委託プロジェクト研究「自然共生」, 流域圏における水循環・農林水産業生態系の自然共生型管理技術の開発, H18年度推進会議資料, pp. 98-103.
- 中山哲蔵・斉藤 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.
- 松森堅治(2006): 流域環境計画を支援する環境保全的な土地利用システムの構築手法の開発, 農林水産省委託プロジェクト研究「自然共生」, 流域圏における水循環・農林水産業生態系の自然共生型管理技術の開発, H18年度推進会議資料, pp. 44-53.
- 宮澤泰正・山形俊男(2003): JCOPE 海洋変動予測システム, 月刊海洋, pp. 43-50.
- Kawamiya M, M. Kishi, Y. Yamanaka and N. Sugihara(1995): An Ecological-Physical Coupled Model Applied to Station Papa, Journal of Oceanography Vol. 51, pp. 635-664.