

# 伊勢湾・三河湾における降雨後の物質輸送について

## Material Transport in Ise-Mikawa Bay after Rainfall

喜岡 渉<sup>1</sup>・堀 孝博<sup>2</sup>・堀部扶実<sup>3</sup>・北野利一<sup>4</sup>

Wataru KIOKA, Takahiro HORI, Fumi HORIBE and Toshikazu KITANO

The characteristics of material transport in a semi-enclosed bay may vary by the influence of the rainfall. Spatial variations of both suspended substances and chlorophyll-*a* in the surface layer were investigated using the MODIS sensor images and filed data. The data obtained for the event of Oct. 2006 rainfall indicates that the high concentration areas of both *SS* and *Chl-a* appear around the river estuary in the Ise-Mikawa Bay and spread basically in the directions of river plumes. The numerical simulation based on the combined MM5 and POM, SWAN, and 3-compartment model reproduces fairly well the surface distributions of both *SS* and *Chl-a*, and reveals that both the desorption of phosphorus from suspended substances and the release of phosphorus from the bottom sediments contribute to the increase of *Chl-a*.

### 1. はじめに

伊勢湾・三河湾の流域面積は16,191km<sup>2</sup>に達し、東京湾や大阪湾の流域面積に比べて2倍から3倍も大きい。流入する主要河川(1級河川)は木曾川をはじめ10河川あり、河川からの淡水供給量3.0km<sup>3</sup>/month、湾口からの淡水流出量3.1km<sup>3</sup>/monthも東京湾や大阪湾に比べて非常に大きい(国土交通省中部整備局)。このことは、伊勢湾・三河湾では大きな淡水供給量によって湾内に強い鉛直循環流が発達し、流入した淡水は表層を湾外に向かって速やかに輸送されていることを示している(柳, 1997)。両湾内の循環流や栄養塩輸送量は、短期的に見ると河川流量の変動の影響を受けやすく、山尾ら(2002)は河川出水時の伊勢湾における循環流量と栄養塩輸送量の短期変動を現地観測により調べている。

豊富な栄養塩の供給を受け、伊勢湾・三河湾においても過去数年を通じて、植物プランクトンの内部生産を示すクロロフィル $a$ 総量は降雨後数日から数十日間に間欠的に増加する傾向が認められ、三河湾における赤潮形成は10~20日前の降雨の影響を強く受けると報告されている(山本・岡井, 1996)。すなわち、伊勢湾・三河湾における栄養塩を含む水質の評価や予測のためには、降雨後数日間という季節変動と比べて短い時間スケールでの栄養塩等の物質輸送と物質循環を把握しておく必要がある。そこで本研究では、衛星海色センサMODISデータを利用して、伊勢湾・三河湾における降雨イベント後の懸濁

物質とクロロフィル $a$ の物質濃度の変動特性を明らかにし、あわせて数値計算モデルによる物質輸送の再現性について検討を加える。

### 2. 濃度推定モデル

対象とした伊勢湾・三河湾の概略と両湾の海底地質を図-1に示す。両湾の表層の懸濁物質(SS)とクロロフィル $a$ (*Chl-a*)の濃度分布は、人工衛星Terra/Aquaに搭載のMODIS海色センサの特定バンド輝度値および特定バンドを組み合わせた輝度比を用いて算出した。作野・山口(2004)にならって、水中懸濁物質等の吸収・散乱係数をADEOS-2/GLI海色大気補正アルゴリズムを用いて求め、水中光学モデルからSSと*Chl-a*の分光反射特性を計算により推定して、海色センサの有効バンド帯を現地観測データとの相関をとる前に決めておいた。*Chl-a*については、作野・山口(2004)と同様に、無機懸濁物質の散乱の影響を受けにくく、*Chl-a*の吸収・散乱特性を強調して抽出可能なバンド14(678nm)とバンド13(667nm)の輝度比を

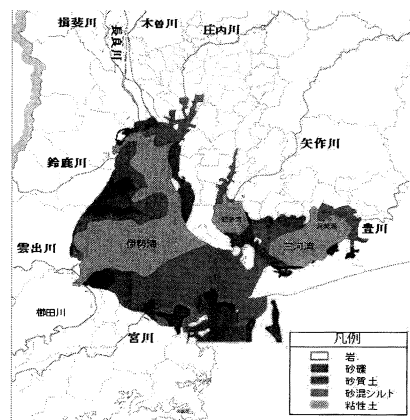


図-1 伊勢湾・三河湾と海底地質(国土交通省中部整備局: 伊勢湾環境データベースより)

- |        |      |                           |
|--------|------|---------------------------|
| 1 フェロー | Ph.D | 名古屋工業大学教授 大学院工学研究科社会工学専攻  |
| 2 学生会員 |      | 名古屋工業大学大学院工学研究科社会工学専攻     |
| 3 学生会員 |      | 名古屋工業大学大学院工学研究科社会工学専攻     |
| 4 正会員  | 博(工) | 名古屋工業大学准教授 大学院工学研究科社会工学専攻 |

採用した。SSについては、水中光学モデルから求めた計算結果から、*Chl-a*の影響を避けることができ反射率がほぼ1次関数で増減しているバンド12(551nm)の輝度値を採用した。

各バンドの最小放射輝度値を大気散乱光と見なして差し引く簡便な暗画素法に加えて、衛星と観測点間の光路長にわたるレイリー散乱の大気補正を行った水面直上の輝度値 $L^*$ と現地観測データの相関から換算式を求めた。MODISデータは、東京大学生産技術研究所WebModisおよびJAXA/EORCより取得した。現地データの*Chl-a*については衛星飛来時刻の1時間以内、SSについては3時間以内の観測値のみを用い、2005～2006年のデータにより推定アルゴリズムを求め、2007年のデータを用いて検証を行った。*Chl-a*およびSSの濃度推定式は、各バンドの大気補正後の輝度値 $L^*$ (Band番号)を用いて、それぞれ次式で表す。

$$Chl-a[mg/m^3] = -1.58 + 2.35L^*(Band14)/L^*(Band13) \quad (1)$$

$$SS[mg/l] = 0.817 + 0.354L^*(Band12) \quad (2)$$

ただし、伊勢湾・三河湾における表層*Chl-a*の観測値(三

重県科学技術振興センター、愛知県水産試験場)に対する相関係数 $r$ は $r=0.87$ であり、伊勢湾の表層SSの観測値(中部国際空港株式会社)に対しては $r=0.85$ となっている。なお、SSのデータは伊勢湾のみのもので、換算式(2)の三河湾SSに関する適用性は厳密には明らかでない。

### 3. 降雨後のSSと*Chl-a*の拡がり

過去3年間の夏・秋期(2005年6月～2007年11月)に伊勢湾・三河湾流域で10mm/hr以上の降雨を記録した日前後の数日間をMODISデータにより調べた。雲やノイズの影響で欠損値となった海域内の画素はその面積が十分に小さい時に限り、周辺データを用いてスプライン補間を行った。その結果、8降雨イベントについて降雨前後数日間のデータ解析が可能であった。

2006年10月22日降雨後における表層SSと*Chl-a*の濃度変化をそれぞれ図-2、図-3に示す。10月22日夜から24日にかけて断続的に降雨があり、豊川水系の豊川・布里・田口観測所では22日22:00～23:00に9～13mm/hr、木曾川水系の杉原・八幡・丸山観測所では23日19:00～24日1:00に10～18mm/hr、鈴鹿川水系の亀山・加佐登観測所

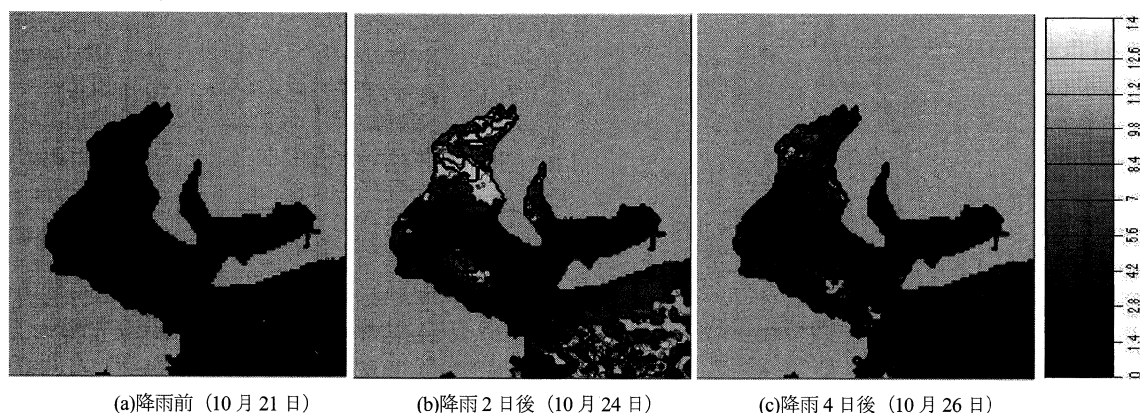


図-2 表層SS[mg/l]の濃度分布

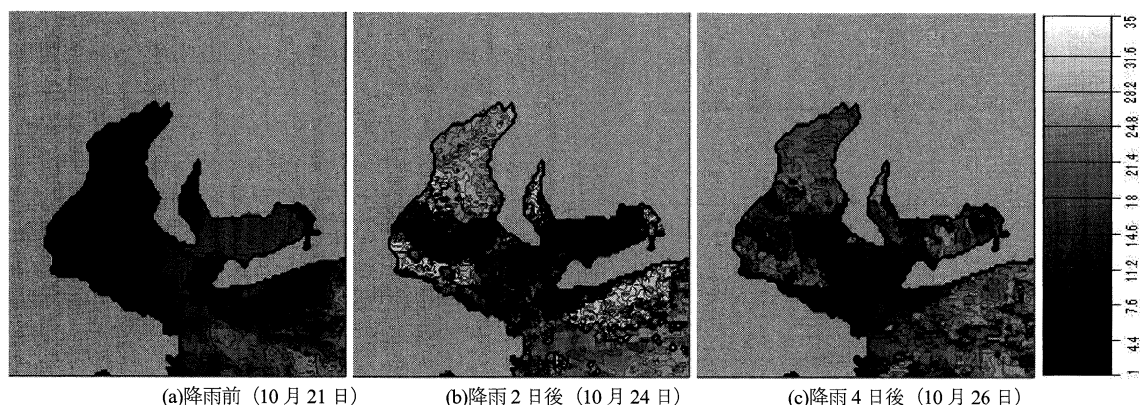


図-3 表層*Chl-a*[mg/m³]の濃度分布

では23日19:00に10~19mm/hrの降雨がそれぞれ記録されている。図-2に示すように、降雨後2日後には伊勢湾西側の出雲川~宮川沖、および三河湾西奥部の矢作川沖にSSの高濃度領域が現れており、これらの高濃度領域は降雨後3~4日間はスポット的に残っている。高濃度領域の中心は、ほぼ河川プリズムにより輸送されており、5日後には沈降により低濃度化している。SS濃度は降雨分布の影響をより強く受け、局所的な濃度変化が大きい。

図-3に示すように、Chl-a濃度も降雨2日後には増加する傾向が見られ、その後、数日間にわたって伊勢湾のほぼ北半分に達する湾奥部の広い海域、伊勢湾西側の出雲川~宮川沖、三河湾奥、および三河湾東(知多湾)に比較的高濃度の領域が形成されている。

降雨後5日間の各河川の流量、河口付近におけるSSおよび全リン(TP)の1時間毎の推定値を図-4に示す。SSとTP濃度の濃度は、河川の河口付近での過去5年分の計測値(国土交通省水文学データデータベース)と流量Qの関係からL-Q法により算定し、負荷輸送量LをQで除して濃度を求めた。SS負荷については、ほとんどの河川で出水時に流量Qに対してのヒステリシス、すなわち増水期にSSが大きく、減水期に少ないという傾向が見られたが、出

水時のデータ数が十分でないことから、ここではヒステリシスは無視してL-Q近似式を求めた。また、用いた計測データは各河川の流心で取得されたもので、鉛直方向および横断方向の濃度変化を考慮した更正係数については明らかでない。このため、ここで求めたL-Q式には数パーセントから数十パーセントの誤差が見込まれる(二瓶ら, 2005)。

増水期にはTPに占める懸濁態リン(PP)の割合が大きくなり、溶存態全リン(DP)とは異なる物質輸送形態で海域へ流入する(田中ら, 2003)。この粒子性リンPPは、流量Qに対してSSとほぼ同様な濃度変化を示すことが報告されており、L-Q式に替えてSSまたは濁度から直接PPを推定する方法も提案されている(山本ら, 2003)。しかしながら、PPの濃度は、懸濁物質の粒径や周辺の溶存態リンの濃度に依存し(西田・中谷, 2007)、SSに対するリンの吸着量は観測地点によって大きく異なることが予想される。矢作川米津橋付近で2004年に測定されたSSとPP値の間には明確な相関は見られない。ここでは、矢作川米津橋付近で観測された小規模出水時の比PP/TP=0.78を流域の農用地面積率が10%以上の豊川、庄内川、鈴鹿川、出雲川および櫛田川に、木曽川下流長良川大橋付近での観測値PP/TP=0.55を流域の農用地面積率が10%より小さい木曽川水系および宮川に、それぞれ一律に適用してTPからPP時系列データを求めた。このPPのうち海域での物質循環に使われる溶脱しやすい吸着リンの割合は両観測地点で40%程度とされている(田中ら, 2003; 井上ら, 2004)。

#### 4. 数値シミュレーションによる再現計算

気象場の計算にメソ気象モデルMM5、海洋場の移流・拡散・温熱輸送の計算にσ座標系流動モデルPOM、波動場の計算には波浪推算モデルSWANを用いた。MM5とPOMは結合させて両モデル間で海面変数の交換を行ったが、観測期間中の湾内の波高は小さく、計算の簡略化を図るためにSWANについては結合させず各地点の波浪を計算した。MM5による気象場の計算には、鉛直層(地表~100hPa面)を22分割し、水平格子は本州・四国を覆う大領域(解像度15km×15km)と伊勢湾・三河湾を覆う中領域(解像度5km×5km)を設け、これらのネスティング計算を行った。POMの計算には、気象場計算に用いた中領域の海域をσ座標系12層に分割し、水平格子650mを用いた。両湾の湾奥には、さらに水平格子160mの小領域を設けて、中領域とのネスティング計算を行った。湾奥で小領域の流動計算を行うことにより、河口付近の計算境界において主要河川からの流量と流速値の両方を現地データに合うように設定することが可能になる。ただし、河口部に小領域を設けない鈴鹿川、出雲川、櫛田川および宮川については流量のみを合わせた。図-5は、

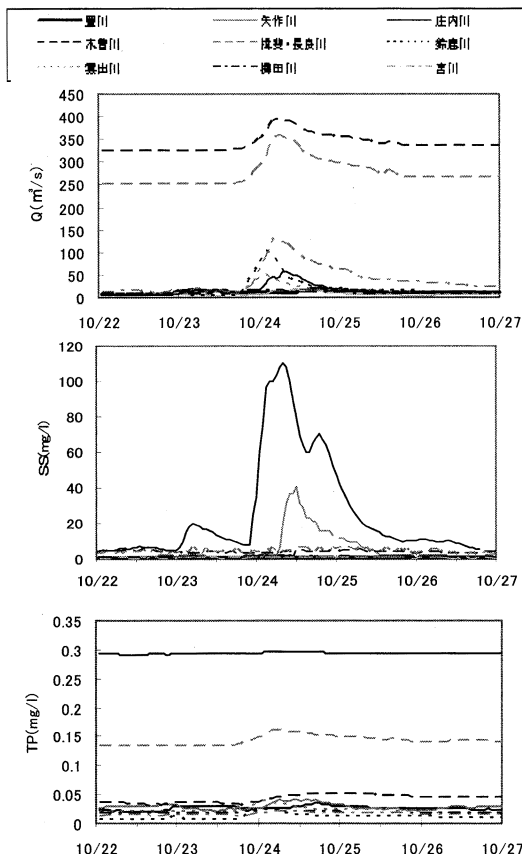


図-4 主要河川の流量Q, SSおよび全リンTPの時系列データ

夏期平均条件を与えて三河湾の恒流を計算した結果を示したもので、小領域を設けない計算結果と比べて、2領域を用いた計算結果の方がより良く現地恒流パターン(宇野木, 1983)を再現するものになっている。

SS移流拡散モデルをPOMに組み込み、海水の流動・温熱計算と同時にSS濃度を計算した。 $\sigma$ 面上の法線方向の速度 $\omega$ をSSの沈降速度 $w_s$ との差( $\omega - w_s$ )で置き換えれば、モデル式はPOMにおける塩分移流拡散式と同じものである。底質の中央粒径から沈降速度 $w_s$ を求め、潮流および波浪による底面せん断応力 $\tau_b$ との関係式から再浮上フラックス $q_e$ 、沈降フラックス $q_d$ を算出し、海底面におけるSSの境界条件を次式で与えた。

$$\frac{K_H}{D} \left( \frac{\partial SS}{\partial \sigma} \right) = q_e - q_d \quad (3)$$

ここに、 $K_H$ は鉛直渦拡散係数[m<sup>2</sup>/s]、 $D$ は全水深(水位と水深の和)[m]、 $SS$ はSS濃度[mg/l]である。各フラックスは、中辻ら(2006)と同様に、 $\tau_b$ と巻き上げと堆積の限界底面せん断力 $\tau_c$ の関係より次式から求めた。

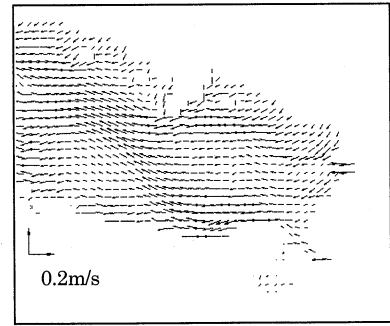
$$q_e = \begin{cases} M(\tau_b - \tau_{ce}), & (\tau_b \geq \tau_{ce}) \\ 0, & (\tau_b < \tau_{ce}) \end{cases} \quad (4)$$

$$q_d = \begin{cases} 0, & (\tau_b > \tau_{cd}) \\ w_s \cdot SS, & (\tau_b \leq \tau_{cd}) \end{cases} \quad (5)$$

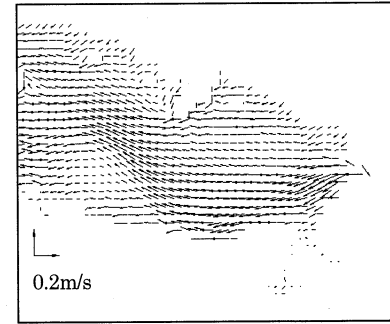
ここに、 $M$ 、 $\tau_{ce}$ および $\tau_{cd}$ は、それぞれ侵食速度定[s/m]、SS再浮上の限界底面せん断力 [N/m<sup>2</sup>]、SS堆積の限界底面せん断力[N/m<sup>2</sup>]を表し、数値計算では琵琶湖の観測例を参考に $M=2.0 \times 10^{-3}$ (s/m)、 $\tau_{ce}=0.05$ (N/m<sup>2</sup>)、 $\tau_{cd}=0.025$ (N/m<sup>2</sup>)とした。

潮流と波浪の作用による $\tau_b$ は、底層の水平潮流速とSWANによる有義波高・周期・波向きの計算結果を用いて、中辻ら(2006)と同様な計算手順で算定した。沈降速度 $w_s$ は、伊勢湾奥と三河湾奥における底質粒径から中央粒径を $d=0.005$ mmとし、山崎ら(2003)の凝集・沈降試験の結果を参考に $w_s=0.08$ mm/sとした。なお、図-1に示す砂礫・砂質土の領域においては式(5)の沈降フラックスが $q_d > 0$ となる地点においてのみSS再浮上の計算を行った。

降雨後のChl-*a*総量の増加は、その他の気象要因、海象要因の大きな変動は生じていないことから、河川からの流入負荷の増加に伴う表層の内部生産の変化による。年間平均の流入負荷の栄養塩構成比から伊勢湾・三河湾における植物プランクトン成長の制限因子は窒素とされているが、降雨後は全ての河川において全窒素TNと全リンTPの栄養塩構成比TN/TPの急激な低下が見られ、特に海域で循環可能な溶出性リン(CDB-P)の豊富な供給が内部生産の増加をもたらしたと考えられる。ここでは、流動モデルPOMにより移流、拡散、温熱輸送をそれぞれ



(a) 小領域とネスティング

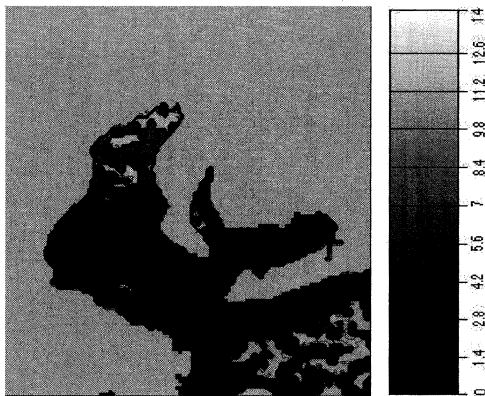
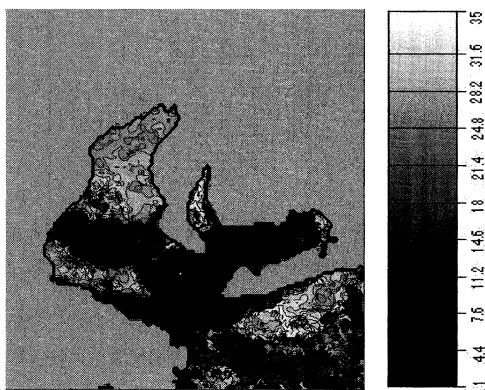


(b) 小領域なし

図-5 三河湾奥部における夏期の表層恒流の再現計算

れ評価し、状態変数に植物プランクトン、栄養塩リン、デトリタスの3つを選択した低次生態系モデルを用いて、植物プランクトンの濃度分布からChl-*a*濃度分布の再現を試みた。素過程として、植物プランクトンの光合成、無機化、枯死、リンの底泥からの溶出、デトリタスの分解、沈降を考慮した。再現期間の植物プランクトン種は不明のため、種によらない生物パラメーターを用いた。底泥からのリンの溶出については、堀江ら(1996)の観測データを基に三河湾各点での溶出速度を与え、伊勢湾については2006年10月の底層DO分布(三重県化科学技術振興センター)から2mg/lで10mg/m<sup>2</sup>/day、6mg/lで2mg/m<sup>2</sup>/dayとなるような1次関数を仮定して与えた。その他のモデルパラメーターは東京湾の数値(例えば岡田ら, 2001)を参考に与えた。

流入リンについては粒子性のPPの寄与分も大きい。ここでは、流入TPのうちDPは塩分移流拡散モデルにより濃度分布を求め、PPについてはSS移流拡散モデルによりSS濃度として計算した上で、各地点におけるDP濃度との関係から吸着・脱離量を求めた。リンの吸着・脱離量は、西田・中谷(2007)が河床堆積土試料の分析によって得た吸着特性ダイアグラムを利用して、周辺水の塩分とDP濃度より推定した。ただし、塩分が30psuを超える試料データはないため、30psu以上の塩分濃度の変化は

図-6 表層SS[ $\text{mg/l}$ ]の再現計算図-7 表層Chl-a[ $\text{mg/m}^3$ ]の再現計算

無視している。河口沖の海域では、周囲水のDP濃度が低下するため、ほとんどの地点では脱離が生じる。脱離リンはDPと同様に塩分移流拡散式で評価し、栄養塩リンとして素過程に取り入れた。

降雨前の10月21日の気象条件と境界条件を与えて、流動および状態変数の変動が定常に達する15日間の助走計算を行った後、表層のSSとChl-aの観測値を初期値として与え、3日間の表層SSとChl-aの変動の再現計算を行った。図-2の降雨2日後に対応するSSの計算結果を図-6に、降雨2日後の同時刻のChl-a濃度分布を図-7に示す。計算結果はSSとChl-aの拡がりをよく再現しているが、濃度分布のピーク値付近では計算値が小さくなっている。湾外の濃度分布は初期値の影響による。再現波浪は高々 $H_{1/10}=0.8\text{m}$ であり、底質の巻き上げは底層付近のSSにのみ寄与している。底質からの溶出リンは、エスチュアリー循環流により両湾とも湾中央に沿ってChl-aの増加に寄与しており、それぞれの湾の表層平均濃度で見ると、伊勢湾で7%程度、三河湾では13%程度、Chl-a濃度を押し上げている。

## 5. おわりに

伊勢湾・三河湾の表層のSSとChl-aは降雨後に高濃度化する傾向が見られ、高濃度領域の拡がりパターンは河川プリズムを含む恒流パターンによく対応している。数値計算の結果においては、底質の巻き上げによる表層SS濃度の増加は無視できるほど小さいものの、底質からの溶出リンは表層Chl-aの増加に寄与している。

謝辞：クロロフィルaおよびSSの現地観測データは、それぞれ愛知県水産試験場、中部国際空港株式会社よりご提供頂いた。また数値計算の主要部分は、当時大学院学生の林 章郎氏(名古屋港管理組合)、前田晃佑氏(安城市役所)によった。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 井上隆信・中野亮平・松井佳彦・松下 拓・山田俊郎(2004)：河川水中懸濁物質と流域土壌の連続抽出法による分画とその特性，衛生工学シンポジウム論文集，第12巻，pp.61-64。
- 宇野木早苗(1983)：三河湾の恒流とその成因，第30回海講論文，pp.510-514。
- 岡田知也・中山恵介・野村宗弘・古川恵太(2001)：夏期の東京湾湾奥における表層のプランクトンに対する底層栄養塩の影響，海工論文集，第48巻，pp.1086-1090。
- 栗木秀治・中村由行(2003)：木曾川河口域における植物プランクトンの冬期変動予測モデル，海工論文集，第50巻，pp.1026-1030。
- 作野祐司・山口大輔(2004)：海色センサMODISを用いた広島湾の赤潮分布推定，海工論文集，51巻，pp.956-960。
- 田中勝久・豊川雅哉・澤田知希・柳澤豊重・黒田伸郎(2003)：土壌流出によるリン負荷の沿岸環境への影響，沿岸海洋研究，第40巻，pp.131-139。
- 中辻啓二・志水克成・山中亮一(2006)：中国・黄河から渤海に流入する高濁度水塊の挙動特性に及ぼす潮流及び風応力の影響，海工論文集，第53巻，pp.376-380。
- 西田修三・中谷裕介(2007)：淀川河口域における河川懸濁物質のリン吸着特性，海工論文集，第54巻，pp.1101-1105。
- 二瓶泰雄・本水 啓・植田雅康・中岡 亮・望月 健(2005)：陸域環境負荷評価のための調査方法及び解析法に関する検討—江戸川を例にして—，海工論文集，第52巻，pp.1106-1110。
- 堀江 毅・井上聡史・村上和男・細川恭史(1996)：三河湾での覆砂による底質浄化の環境に及ぼす効果の現地実験，土木学会論文集，No.533/II-34，pp.225-235。
- 柳 哲雄(1997)：東京湾・伊勢湾・大阪湾の淡水・塩分・窒素・リン収支，沿岸海洋研究，第35巻，pp.93-97。
- 山尾 理・笠井亮秀・藤原建紀・杉山陽一・原田一利(2002)：河川流量の変動にともなう伊勢湾のエスチュアリー循環流量・栄養塩輸送量の変化，海工論文集，第49巻，pp.961-965。
- 山崎真一・森田真郷・山下俊彦(2003)：河川水中の懸濁粒子の海水混合による凝集・沈降特性，海工論文集，第50巻，pp.961-965。
- 山本浩一・二村貴幸・坂野 章・日下部隆昭・末次忠司・横山勝英(2003)：濁度計による懸濁態栄養負荷推定に関する研究，河川技術論文集，第9巻，pp.515-520。
- 山本民次・岡井 満(1996)：三河湾における赤潮形成と気象要因に関する統計的解析，水産海洋研究，第60巻，第4号，pp.348-355。