

那珂川河口海域における物質分布構造の季節変化

八 木 宏*・大森義暢**・足立久美子***
二 平 章****・高橋正和*****

河口海域におけるクロロフィル a 量及び栄養塩を中心とした物質分布の季節変化特性を把握するために、茨城県那珂川河口海域において現地調査を実施した。その結果、(1)春季の河川水の影響は河口近傍に限られ、河口海域全体としては海域の持つ栄養塩の影響が大きく、春季ブルーミングで増殖した植物プランクトンを中心とした物質循環の構造が形成される、(2)秋季の物質分布は河川水の拡がりに強く支配され、窒素、珪素は河川水と海水との希釈過程が中心であるが、リンは河口海域下層からの供給が重要な役割を果たす。一方、懸濁物質は、海域で生産された植物プランクトン以外に河川から供給された有機物の影響が大きいことなどを示した。

1. はじめに

近年、水域の土砂管理や水環境管理を流域スケール(陸域—河川—海域)で考えることの重要性が認識されるようになり、土砂輸送や物質輸送の面から河川と沿岸海域との関わりを解明する試みが行われている(例えば、山下ら, 2000, 2001)。しかしながら、これまでの取り組みは、河川からの物質フラックスと海域における物質分布をマクロにとらえようとするものが多く、今後さらにその関係を明らかにするためには、陸域と海域を結ぶ河口海域の物質輸送及び物質循環の内部構造を解明することが広域水環境管理において重要になると考えられる。そこで本研究では、その第一段階として、河口海域における溶存態(栄養塩など)及び懸濁態物質(植物プランクトン等)の空間構造を把握し、それが季節によってどのように変化するかを現地観測によって実態把握することを試みた。

2. 現地観測概要

本研究では、河口海域における物質分布構造の季節変化を把握するために、茨城県の那珂川河口海域を対象とした現地観測を実施した。観測では、図-1に示すように、河川水の影響が大きい河口海域及び河口部に観測点を配置し、各測点において塩分・水温・蛍光光度・濁度の鉛直分布計測(アレック電子(株), ALC208-DK)、採水によるクロロフィル a 量及び栄養塩類(NO_3 , NO_2 , NH_4 , PO_4 , TP, TN, POC, PON)の計測を行った。観測は、河口海域の物質分布構造の季節変化を見るために、春季(5/16)と秋季(9/17, 9/27)に、茨城県水産試験場調査船「ときわ」等によって実施した。図-2に那珂川の流量(野口)、及び塩分・クロロフィル a 量(勝田橋)を示す。これからわかるように、5/16は春季の濁水期に、

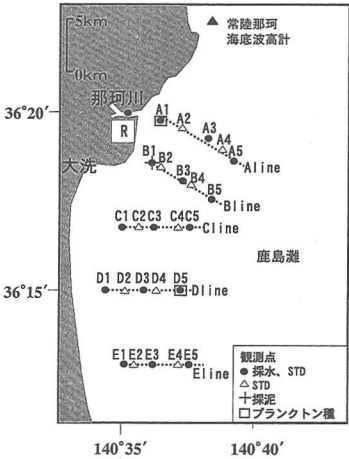


図-1 観測海域と調査点位置

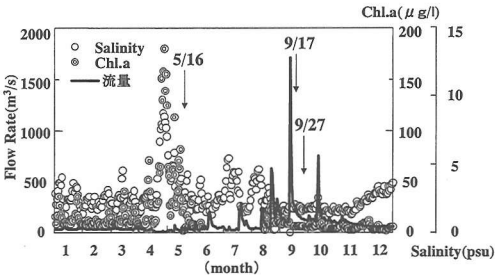
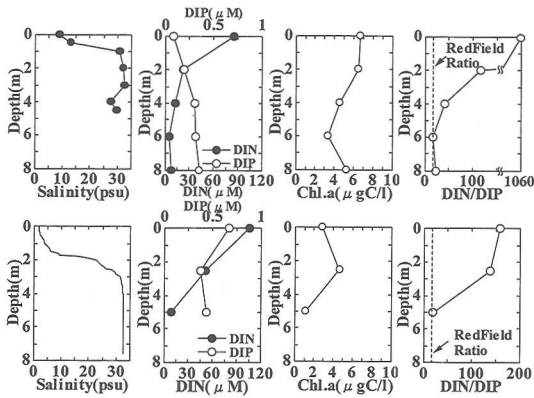


図-2 那珂川流量・塩分・クロロフィル a 量の経時変化

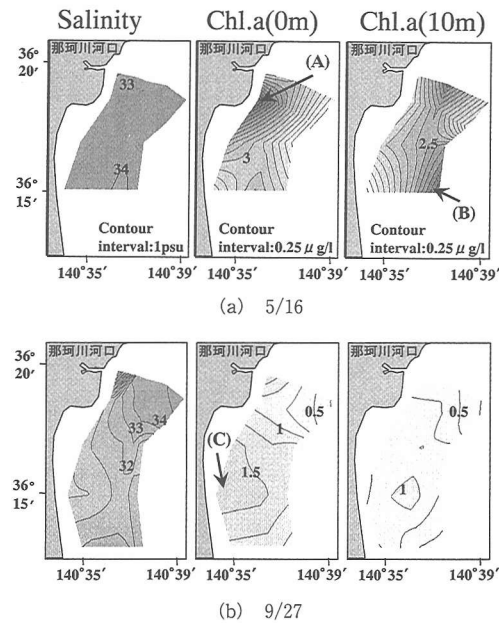
9月は秋季出水期に対応しており、9/17が台風15号による出水(9/10)の7日後、9/27は17日後にそれぞれ対応する。

採水試料に対するクロロフィル a 量の分析は、試水を Whatman GF/F フィルター(孔径0.7 μm)によるろ過のち DMF で色素を抽出し蛍光法により測定した。栄養塩類は、溶存態(NH_4 , NO_2 , NO_3 , PO_4)については試水を孔径0.45 μm のメンブレンフィルターでろ過したものを、TN, TP は試水原水にペルオキソ二硫酸カリウ

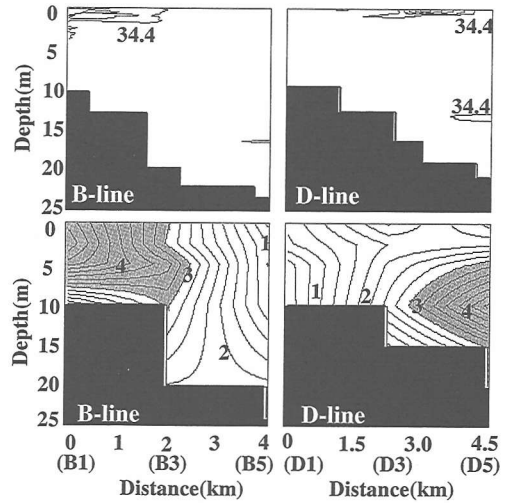
* 正 会 員 博(工) 東京工業大学大学院助教授 理工学研究科
** 学生会員 東京工業大学大学院理工学研究科修士課程
*** 水 修 (独法)水産総合研究センター水産工学研究所
**** 水 博 茨城県水産試験場沿岸資源部長
***** 水 修 茨城県水産試験場沿岸資源部



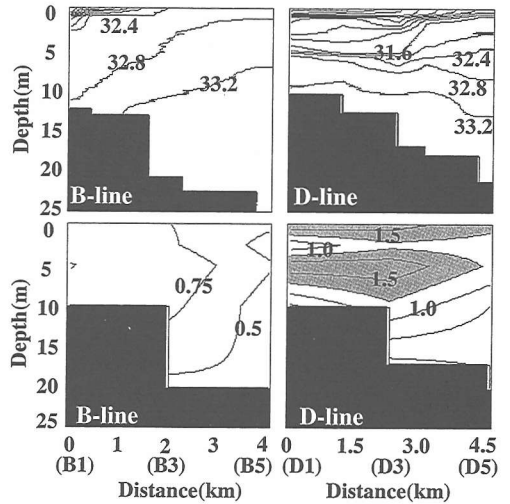
図—3 河口部観測点(R)における塩分, 栄養塩, クロロフィル a, NP 比の鉛直分布 (上段: 5/16 下段: 9/27)



図—4 河口海域における塩分(表層)とクロロフィル a 量(表層と水面下 10 m)の平面分布



(a) 5/16 (上段: 塩分 (psu), 下段: chl.a ($\mu\text{g/l}$))



(b) 9/27 (上段: 塩分 (psu), 下段: chl.a ($\mu\text{g/l}$))

図—5 河口海域における塩分と chl.a (5/16 は $3 \mu\text{g/l}$, 9/27 は $1.25 \mu\text{g/l}$ 以上にハッチ)の岸沖断面分析

ムを添加してオートクレーブで加圧分解したものを BRAN+LUEBBE 社製の TRAACS800 で測定した。POC, PON は試水 500 ml を Whatman GF/F フィルターでろ過し, 残渣を CE Instruments 社製の元素分析装置 (NA-2500) により測定した。

3. 観測結果と考察

3.1 河口部の水質特性の季節変化

図—3 は, 河口部観測点 R (図—1 参照) における塩分, DIN, PO_4 , NP 比, クロロフィル a 量の鉛直分布を示したものである。これから, ①秋季(9/27)には DIN, PO_4 ともに表層で高い濃度を示すのに対して, 春季 (5/16)

は DIN は表層で PO_4 は下層で濃度が高い傾向がある, ② NP 比は全体的に Redfield 比よりも大きくリン制限の傾向が顕著である, ③クロロフィル a 量は, 秋季 (9/27) より春季 (5/16) の方が濃度レベルが高い, などが春季と秋季の河口部における基本的水質特性の違いとして挙げられる。このうち, 春季の PO_4 濃度が上層で低く下層で高くなる原因としては, 春季にはブルーミングによって河川内の植物プランクトン量が増加し (図—2 参照), 河川水中に相対的に少ない PO_4 が表層で枯渇するのに対し, 河口部下層には高塩分で相対的に PO_4 濃度が高い海水から侵入することが原因であると考えられ, 春季には海側から河川内への栄養塩供給があることが示唆され

る。

3.2 河口海域における塩分・クロロフィル a 量の空間構造

春季観測時 (5/16), 秋季観測時 (9/27) の塩分・クロロフィル a 量の空間構造として, 図-4 に塩分 (表層), クロロフィル a 量 (表層と水面下 10 m) の平面分布, 図-5 に岸沖断面分布 (B, D-Line) を示す。まず塩分分布については, 春季 (5/16) は河川流量が少ないために, 河川水の影響と思われる低塩分領域は河口部近傍に限られており, 全体的に高塩分水で覆われている。一方, 秋季 (9/27) には, 河口近傍からその南側海域にわたって低塩分水が広範囲に拡がっており, 表層低塩分層の厚さも河口部から離れるにしたがって増加している。このように低塩分水が, ①周辺海域において出水直後から観測日まで南向き流れが卓越していたこと (ひたちなか港沖の海底波高計流速データより確認, 位置は図-1 参照), ②一般に河口海域における河川水の広がりには北半球ではコリオリ力の作用によって河口から右手側に向かうこと (例えば, Hill, 1998) などが原因として考えられる。

クロロフィル a 量は, 春季 (5/16) には河口近傍 (領域 A) と河口から離れた沖側中層 (領域 B) で高い値を示す 2 重構造となっている。これに対して, 秋季 (9/27) は, 濃度レベルは春季より低く, 河川水の広がりに対応して南側海域に向けて分布しており, 河口近傍よりもむしろ河口から離れた領域 (領域 C) で濃度レベルが増加している。クロロフィル a 量の空間構造については, 栄養塩との関係が深いために後述する栄養塩の分布と併せて議論する。

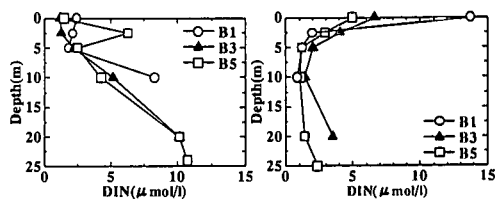
3.3 河口海域における溶存態栄養塩の空間構造

(1) 鉛直分布

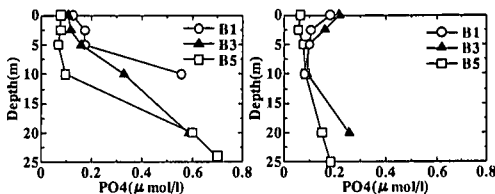
河口海域における栄養塩の空間構造を示すために, 観測線 B-Line 上の B1, B3, B5 における DIN と PO_4 の鉛直分布を図-6 に示す。これを見ると, 春季 (5/16) には上層よりも下層で DIN, PO_4 いずれも濃度レベルが高い。これに対して, 秋季には DIN は表層で高い値を示し, PO_4 は, 表層と底層において相対的に高い濃度の領域が存在することがわかる。

(2) 混合特性

図-7 は, 春季 (5/16), 秋季 (9/17, 9/27) のすべての観測値に対して, 塩分と各栄養塩濃度との関係を調べたものである。河川水影響が河口近傍に限られている春季 (5/16) は, 一見塩分との相関がないように見えるが, 詳細に検討すると高塩分-高栄養塩の傾向があり, これは海水が栄養塩を豊富に含んでいることを示している。これに対して, 秋季は低塩分-高栄養塩の傾向が全般的に見られるが, 詳細に検討すると DIN, SiO_2 は低塩分-高栄養塩の関係が明瞭であるのに対し, PO_4 は低塩分

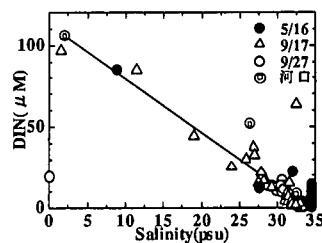


(a) DIN (左: 5/16 右: 9/27)

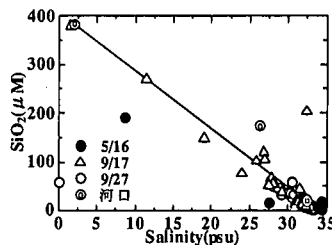


(b) PO_4 (左: 5/16 右: 9/27)

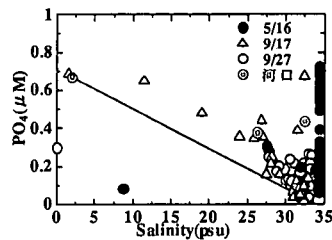
図-6 DIN と PO_4 の鉛直分布 (B-line)



(a) DIN



(b) SiO_2



(c) PO_4

図-7 溶存態栄養塩と塩分の相関関係

一高栄養塩と高塩分-高栄養塩の 2 つの傾向が存在している。図中には, 観測点 R における河口部表層 (0 m) の値を用いて, これと沖合の下層水の栄養塩濃度を 0 とした値を結ぶことによって推定される河川水と海水の混合希釈直線を表示している。これを見ると, DIN, SiO_2 は混

合希釈直線と良い一致を示しており、このことは河川から海域に放出された DIN, SiO_2 が比較的単純な混合希釈過程を中心として濃度変化し海域に拡がっていることを示しており、植物プランクトンなどへの吸収を通して海域の物質循環に取り込まれる量が相対的に小さいことを示唆している。一方、 PO_4 は全体的に混合希釈直線よりも上に位置しており、河川水が河口海域を拡がる過程で PO_4 が付加されていることを示している。図-6 の鉛直分布からもわかるように、秋季の河口海域下層では PO_4 濃度が相対的に高い傾向があり、このような下層水が鉛直混合やエスチュアリー循環による連行によって表層に輸送されていることが、図-7 の混合希釈直線からのずれの原因として考えられる。

(3) 栄養塩比

図-8 は、春季 (5/16), 秋季 (9/17/, 9/27) のすべての観測値に対して各栄養塩間の相関関係を調べたものである。まず DIN と SiO_2 については、春季には概ね Redfield 比付近に値が分布するのに対し、秋季は両者の相関がきわめて高く Redfield 比よりも小さい NS 比に値が分布する。図中には、河口部観測点 R の表層 (0 m) における値も表示しているが、河口海域の NS 比は河口部表層の NS 比とほぼ一致している。このことは、先に指摘したように DIN と SiO_2 は比較的単純な海水との希釈過程が中心であるため河川水の NS 比を保ったまま海域に拡がっていると推測される。一方、DIN と PO_4 の関係については、春季には Redfield 比付近に値が分布しているのに対して、秋季は Redfield 比付近と Redfield 比よりも大きい NP 比の領域の 2 領域に値が分布する傾向がある。また、NP 比が大きい観測値についても河口部観測点 R 表層の NP 比よりも小さく、これは海域において全体的にリン濃度が高いことを示唆している。

図-9(a) は、NP 比の鉛直方向変化をすべての観測点について示したものであるが、これを見ると表層で NP 比が大きく、下層で NP 比が Redfield 比程度に低下している。このことは、表層には河川水の影響を強く受けた NP 比が大きい水塊が拡がっておりリン制限の傾向が強く、したがって相対的にリンが多い下層水の存在が河口海域の一次生産に重要な役割を果たしている可能性を示している。図-10 は、 NO_2 と DIN の関係をすべての観測値について示したものである。これを見ると、秋季には相対的に NO_2 濃度が大きい領域 (図中点線部) が存在しており、 NO_2/DIN の鉛直分布 (図-9(b)) から、これらは主に下層に分布していることがわかる。 NO_2 は、分解された有機物が硝化される過程で生成される中間物質であることから、秋季の河口海域下層では有機物の分解が比較的生活している可能性を示している。

(4) 溶存態栄養塩とクロロフィル a 量の関係

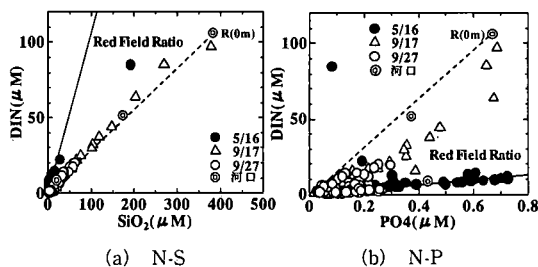


図-8 溶存態栄養塩間の相関関係

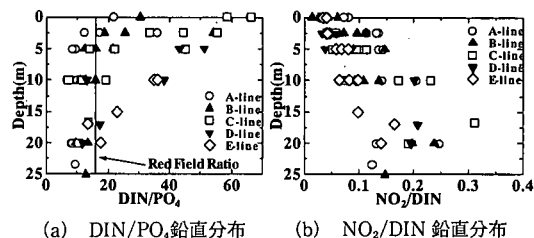


図-9 栄養塩比の鉛直分布

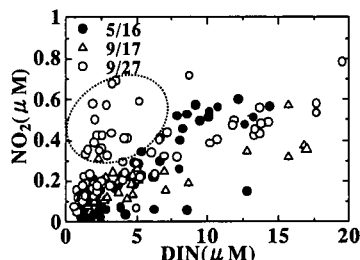


図-10 DIN と NO_2 の相関関係

以上の結果から、那珂川河口海域の栄養塩構造とクロロフィル a 量の関係は以下のように考えられる。春季には河川流量が少ないために河川水影響は河口近傍に限られ、河口海域の栄養塩構造は中、下層に分布する海洋起源の栄養塩の影響を強く受ける。春季に、海洋起源の栄養塩が沿岸海域中、下層に分布することは、同時期に行った著者らの観測によっても確認されている (八木ら, 2002)。クロロフィル a 量は、このような栄養塩構造を反映して、河川水影響がある河口近傍表層と外洋からの影響が顕著な沖側海域中層で高い値を示す 2 重構造となる。これに対し、秋季は河川水影響が顕著であり、クロロフィル a 量は、河口部を中心として低塩分水の拡がりに対応する形で表層低塩分層で相対的に大きな値を示す。濃度レベルは、河口近傍より少し離れた領域で高くなり、河川から供給された栄養塩を基にして徐々に植物プランクトンが増殖する過程が示唆される。

3.4 河口海域における懸濁態栄養塩の特徴

ここでは栄養塩比に着目して、河口海域における懸濁態物質の特徴を検討する。図-11 は、全窒素、全リンからそれぞれ溶存態濃度を差し引いて算出した、懸濁態窒

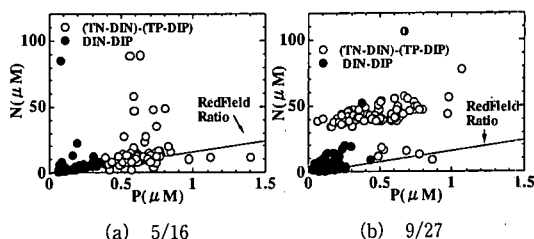


図-11 懸濁態栄養塩間の相関関係

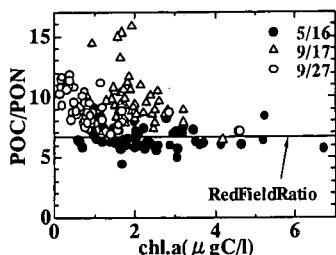


図-12 CN比とクロロフィルa量の相関関係

素 (TN-DIN) と懸濁態リン (TN-PO₄) の関係を調べたものである。図中には Redfield 比を実線で、また参考のために溶存態の DIN と PO₄ の関係を黒丸で表示している。これを見ると、春季には、懸濁態の窒素、リンについても概ね Redfield 比に近い傾向を示しているのに対して、秋季は Redfield 比よりも NP 比が大きい値を全体的に示している。さらに図-12 は、懸濁態炭素 (POC) と懸濁態窒素 (PON) の比 (CN 比) とクロロフィル a 量との関係を調べたものである。これを見ると、春季には概ね Redfield 比程度に値が分布しているのに対して秋季には、クロロフィル a 量が小さい時に CN 比が大きくなる傾向がある。

一般的に、植物プランクトンの体構成比は、Redfield 比に近い値になると言われている。したがって、懸濁態の窒素、リンが Redfield 比を示したのは、河口海域の懸濁物質の多くがその場で生産された植物プランクトン及びそれに関連したデトリタスであることを示している。さらに懸濁態とあわせて溶存態も Redfield 比程度になったことは、植物プランクトンを中心として、河口海域全体として再生産的な物質循環になっている可能性を示唆している。一方、陸域から供給される分解が進んだ有機物は CN 比が Redfield 比よりも大きくなることが指摘されており (例えば濱, 1999), 秋季には河川からプランクトン起源以外の有機物が流入し、河口海域に広く分布

していることを示している。

4. まとめ

那珂川河口海域における物質分布構造とその季節変化特性として明らかとなった事項は以下のとおりである。

(1) 春季には、河川影響は比較的河口近傍に限られ河口海域全体としては海域の有する栄養塩の影響が大きい。クロロフィル a 量は河口近傍表層と沖側中層で濃度が高くなる 2 重構造を示し、春季ブルーミングで増殖した植物プランクトンを中心とした再生産的な物質循環を有している可能性がある。

(2) 秋季の河口海域の物質分布は河川水の拡がりに強く支配されている。河口から流出した窒素、珪素は海水との希釈混合過程が中心であるのに対し、リンは河口海域下層からの供給が重要な役割を果たす。懸濁態物質については、クロロフィル a 量は河口から離れた海域で濃度レベルが上昇する。海域には、河川から供給されたと考えられる植物プランクトン以外の有機物が広く分布する。

謝辞：今回の調査観測に協力頂いた茨城県水産試験場調査船「ときわ」の関係者の方々、那珂川の観測データを提供頂いた国土交通省関東地方整備局常陸工事事務所に深く感謝の意を表します。また、本研究の現地調査、採水試料分析、観測結果の整理に協力してくれた元東京工業大学大学院生の永澤洋君に謝意を表します。本研究は文部省科学研究費基盤研究 (c) 『多重スケール沿岸海洋モデル構築に基づく外海栄養塩流入フラックス算定の試み』(代表者：八木 宏, 課題番号：13650563) の補助を受けて行われたものであることをここに付記する。

参考文献

- 濱 健夫 (1999): 感潮域における有機物の起源とその安定性—利根川下流部を対象として—, 河川整備基金事業『感潮河川の水環境特性に関する研究』報告書, 76 p.
- 八木 宏・足立久美子・二平 章・高橋正和 (2002): 黒潮流路変動に伴う沿岸域への栄養塩流入現象, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 1216-1220.
- 山下俊彦・菅沼 剛・橘 治国・斎藤大作・山崎真一 (2001): 融雪期の石狩川の物質輸送特性と流出物質の河口沿岸域での挙動, 海岸工学論文集, 第 48 巻, 1266-1270.
- 山下俊彦・宮下将典・山崎真一・渡邊康玄 (2000): 河川から供給された物質の河口沿岸域での挙動, 海岸工学論文集, 第 48 巻, 1266-1270.
- Hill, A. Edward (1998): Buoyancy effects in coastal and shelf seas, The SEA, Vol. 10, pp. 21-62.