

荒川河口域における Chl-a の鉛直分布

岡田 知也*・中山 恵介*

2002 年の 7 月から 9 月にかけて、荒川河口域において、河川域から沿岸域に拡がる Chl-a および栄養塩の鉛直分布の流軸方向変動に対して調査を実施した。河口域における Chl-a 鉛直分布は表層よりも中層に高濃度域が発達する特徴をもつ。この傾向は河口域の混合形態が弱混合に近い場合の方が顕著である。このことは、数値モデルによる解析によって、混合形態が生産力に与える影響よりも、混合形態に伴う、河口域での滞留時間が影響を及ぼしていると推測された。

1. はじめに

宇野木 (1996) は「海から川を考える」と言う視点で、川と海を一体とした発想と管理が海洋環境に対して極めて重要であると指摘している。また、内湾の鉛直循環流は河川流量に強く依存し、夏季東京湾では、鉛直循環流 Q と河川流量 R の比は $Q/R=5.6$ 、鉛直循環流の値は $2200 \text{ m}^3/\text{s}$ にも達する (宇野木, 1998) ことや、淡水からの栄養塩負荷の内河川負荷の占める割合は $N:60.0\%$, $P:58.1\%$ である (村松, 2000) こと考えれば、河川と内湾を一体的・連続的に考える視点が重要であることは言うまでも無い。

河川と内湾の結合部分となる河口域では、一般的に、河口フロントが形成されフロント前面部では植物プランクトンの生産力が高いことは良く知られている (例えば、柳, 1990)。また Fisher ら (1988) によれば、河川域から沿岸域まで、turbidity maximum, Chl-a maximum, zooplankton maximum と遷移していることがマクロ的に示されている。しかしながら、フロント後続部から河川部 (淡水域) に至るまでの栄養塩濃度や植物プランクトン量の鉛直分布に関する観測事例はあまりない。海外において河口部付近の観測事例は多く見られるが、その殆どが水平的な変遷 (例えば、Schuchardt and Schirmer, 1991; Turner ら, 1990)、もしくは季節的流量変化に伴う Chl-a 濃度の変化 (例えば、Sin ら, 1999; Muylaert and Raine, 1990; Legovic ら, 1994) が主体である。と言うのも海外の河川は日本の河川と比べて高濁度・高流量であり、河川水が海域に流れ込むと沿岸域有光層の光は遮蔽されてしまう。そのため、鉛直方向の変化よりも、河川プリズムの水平空間的拡散変化に伴う平面的な視点にたったものが多いと考えられる。

一方、河川工学の視点からは、河口部は感潮域と分類され、混合形態および塩水遡上について多く研究されている (例えば、玉井, 1980; 西条・奥田, 1996)。しかしながら、その殆どは河川部主体の検討がなされ、沿岸域

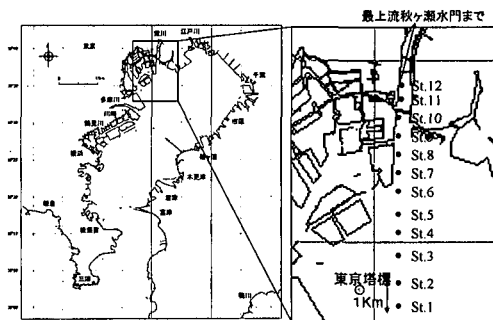


図-1 荒川河口域における観測地点

における栄養塩動態や植物プランクトンの成長に関して、混合形態が与える物理的影響はどのようなものかについての知見は著者の知る限り殆ど無い。

そこで、本研究では、水質の観点から河川域と沿岸域の結合部における知見を得ることを目的とし、荒川河口域において、主に表層 $0 \text{ m} \sim 2 \text{ m}$ に焦点をあてた河川流下方向に対する縦断面観測を実施し、河川域-海域の水質の連続性、特に植物プランクトンおよび栄養塩について着目し調べたので報告する。なお、河川から流入する濁質の海域における沈降に関しては、同じく荒川河口域で実施された鷺見・鋤崎 (2001) の研究がある。

2. 東京湾観測

2.1 観測地点および観測方法

a) 河口域縦断観測

荒川河口域および下流域において、2002 年 7 月から 9 月にかけて 6 回の調査を実施した。荒川は下水処理 (葛西処理場、砂町処理場、新河岸処理場) が流域に点在し栄養塩負荷が比較的大きいこと、海域に流入してからの流れ方が他の河川 (多摩川、江戸川) に比べ単純であることから選定した。調査範囲は、東京塔標付近 (st.1) から塩分がほぼ 0 となる河川上流部まで (上流の最上部は秋ヶ瀬水門; 河口から 35 km) である (図-1)。

調査項目は多項目水質計 (アレック電子, ACL 1183-P-DK) を用いた塩分・水温・濁度・DO 濃度、および採水

* 正会員 博(工) 国土交通省国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部海洋環境研究室 主任研究官

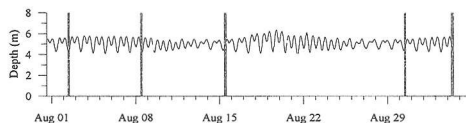


図-2 st.7における水位変動。ハッチの期間が観測期間。

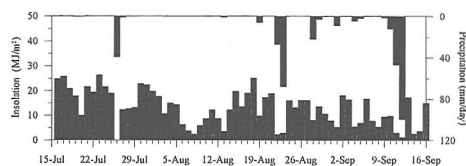


図-3 観測期間中の全天日射量と降水量

による溶存態の窒素、全窒素、リン酸態リン、全リン、植物プランクトン量、懸濁態有機物である。多項目水質計による測定は、測線上を1 km間隔毎に表層から底面まで実施された。採水は、多項目水質計によって得られた塩分およびChl-aの鉛直分布を参考にして、測線方向に6地点、鉛直方向には3層で行われた。採水には、各層を50 cm層厚として、長さ50 cmのバンドン採水器を使用した。したがって、例えば、採水層0.75 mの値は、水深50.0 cm～100.0 cmまでの平均的な値を意味している。

b) 定点観測

定点観測は、図-1のst.7と東京塔標の2地点において実施された。st.7における定点観測は河口域縦断調査と期間を合わせて2002年8月1日から9月3日まで、一方、東京塔標における定点観測は1999年6月から8月にかけて実施された。st.7では水位変動（アレック電子、MDS-TD）を東京塔標では表層1.5 mにおけるChl-a（三洋測器、MCL-I）が測定された。

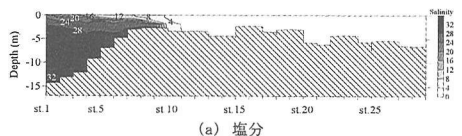
2.2 観測期間中の概況

図-2にst.7において測定された水位変動を示す。図中のハッチ部は河口域縦断観測が実施された日時を示す。8月4日、19日に大潮となり、8月12日、26日に小潮となっている。日潮不等は比較的大きく、大潮差：180 cm（小さい方、100 cm）、小潮差：80 cm（小さい方、40 cm）である。図-3は観測期間中の全天日射量と降水量を示したものである。7月には比較的高い全天日射量を維持し降水量はほとんど無い状態であった。8月になると全天日射量は減少し、8月15日前後で一旦上昇するものの、その後台風等の影響で低めになった。降水量は8月20日以降に増加した。

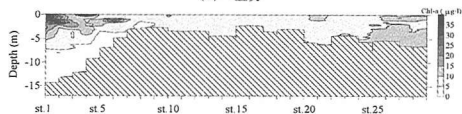
3. 観測結果

3.1 塩分およびChl-aの縦断面分布

観測結果の一例として、図-4、5に塩分およびChl-a

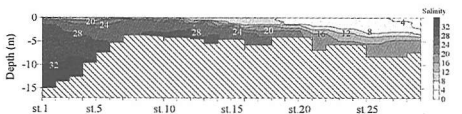


(a) 塩分

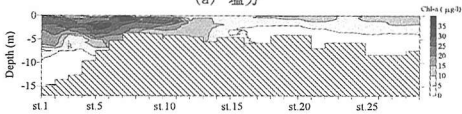


(b) Chl-a

図-4 塩分と水温の縦断面分布。2001年7月24日、中潮。観測は上流側から流下方向に行った。st.5付近の調査時の潮は上げ潮。



(a) 塩分



(b) Chl-a

図-5 塩分と水温の縦断面分布。2001年8月15日、若潮。観測は下流側から上流側へ行った。st.5付近の調査時の潮は上げ潮。

の7月24日と8月15日に実施した観測結果を示す。河川縦断面を船で移動しながら測定しているため、観測開始から終了までにおよそ6時間程度を要し、必ずしも干潮時もしくは満潮時のような潮汐状態の瞬間的断面とはなっていない。7月24日は大潮から2日後の中潮、8月15日は小潮から2日後の若潮であった。荒川における塩水遡上は大潮では強混合型、小潮では弱混合型、塩水遡上距離は大潮から小潮にかけて徐々に長くなり長潮（小潮の最終日）前後が最も長い（土肥ら，1999）。本観測では、塩分コンターから判断すると、7月24日は強混合に近く、8月15日は弱混合に近い混合形態を示している。因みに、両観測時の河川流量は共に寡雨のため少なくおよそ $10 \text{ m}^3/\text{s}$ であった（秋ヶ瀬水門放流量速報値）。

7月24日のChl-aの分布は塩淡水フロント付近に集積している。このChl-aの集積は既往の研究（例えば、柳，1990，Fisher et al., 1988）で指摘されているフロント部における植物プランクトンの集積の特徴を良く示している。

一方、8月15日のChl-aの分布は7月24日のそれとは異なり、フロント部および躍層下部に高濃度を示す領域が存在する。例えば、st.5地点付近では、表層のChl-aは $10 \mu\text{g}/\text{l}$ 程度であるにも関わらず、水深2-3 m付近では、 $30 \mu\text{g}/\text{l}$ 以上の値を示している。このことは、荒川河口域において、海面状況は一見すると赤潮ではないが、実は

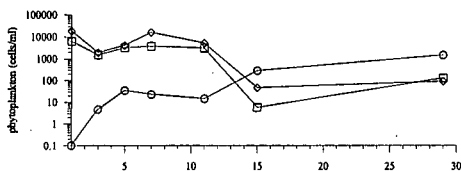


図-6 表層0-50 cmにおける植物プランクトン密度の流下方向変化(2001年8月15日)。○: 淡水性, □: 海洋性, ◇: 種名未同定

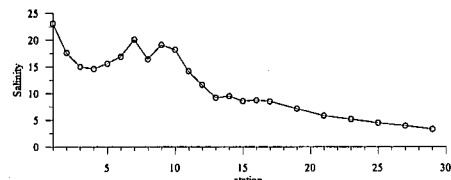


図-7 表層0-50 cmにおける塩分の鉛直方向平均値の流下方向変化(2001年8月15日)。

中層では赤潮が発生している可能性があることを示している。一般に、強光阻害によって表層よりも下層においてChl-aピークが見られることがあるが、光量子の鉛直分布を見る限りにおいて、光量による制限要因が働いているとは断定できず、むしろ他の要因が作用していると思われる。

3.2 プランクトン構成

塩淡水境界部における植物プランクトンの構成について

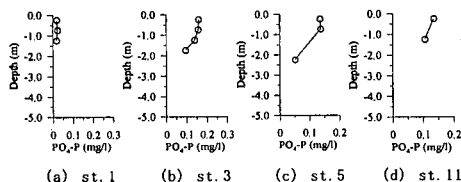


図-9 $PO_4\text{-P}$ の表層部における鉛直分布

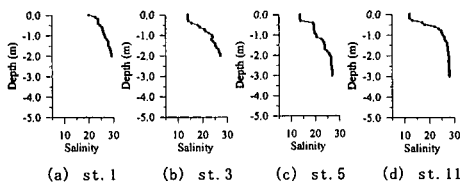


図-10 塩分の表層部における鉛直分布

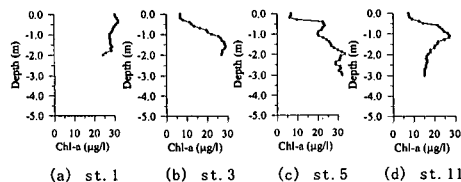


図-11 Chl-aの表層部における鉛直分布

表-1 表層0-50 cmにおける優占7種の植物プランクトン密度の流下方向変化(2001年8月15日)。(単位: cells/ml)

	St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	St.6	St.7
<i>Prorocentrum minimum</i>	219.6	41.1	163.2	138.9	53.1		
<i>Prorocentrum triestinum</i>	337.5	30.4	55.0	32.7	8.6		
<i>Skeletonema costatum</i>	3708.0	966.0	2382.0	2598.0	2850.0	5.6	102.6
<i>Leptocylindrus danicus</i>	456.2	54.6	45.6	66.4	8.6		
<i>Talassiosira spp.</i>	588.3	7.5	25.2	204.4	33.6		
<i>Chaetoceros spp.</i>	648.0	384.4	476.0	474.7	93.3		18.0
<i>Nitzschia spp.</i>	17760.0	1716.0	3498.0	15396.0	4860.0	11.0	

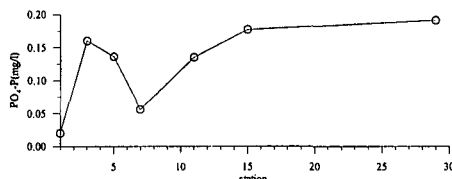


図-8 表層0-50 cmにおける $PO_4\text{-P}$ の流下方向変化(2001年8月15日)。

て、植物プランクトンを海洋性、淡水性に分類し、その変動を図-6に示す。図中には一例として8月15日に実施された観測の表層-25 cm層のプランクトン密度を示している。表-1には、海域部における優占7種の植物プランクトン密度の流下方向変化を示す。また、対応する層の塩分の変化を図-7に示す。8月15日の観測において、海洋性の卓越種は *Skeletonema costatum* であり、主な種名未同定は *Nitzschia spp.* である。淡水性の植物プランクトンは、淡水域(st.15-st.29)において102-103 cells/ml程度あるが、st.11-st.14の範囲で塩分が10から15に急増すると10 cells/ml程度に減少する。対して、海洋性の植物プランクトンはst.11-st.14の範囲から急激に増加し始める。このように塩淡水境界付近の植物プランクトン、塩淡水混合域スケールの非常に狭い範囲(st.11-st.14)で遷移しているようである。また、図-5で見られた高Chl-aは *Skeletonema costatum* を主とした海洋性の珪藻の存在量を反映していると考えられる。

3.3 栄養塩の分布

図-8に8月15日に実施された観測の $PO_4\text{-P}$ の流下方向の変動を示す。st.15-st.29の淡水域で $PO_4\text{-P}$ は0.15 mg/l以上の非常に高い濃度を示している。塩分が次第に高くなるst.7-st.15で減少するが、st.3-st.6で増加傾向を示す。これは、河川中の高濃度栄養塩は海域に近づくに伴い希釈され減少傾向を示すが、st.3-st.6付近で東京港側からの高濃度水・低塩分水の流入により増加したと考えられる。また図-9, 10, 11に栄養塩の鉛直分布、塩分およびChl-aの鉛直分布を示す。 $PO_4\text{-P}$ は塩分躍層上の表層0-1 m層で比較的高い値を示し、躍層下では減少する。一方、Chl-aは躍層下において大きな値を示して

いる。塩分躍層が不明瞭になる st.1 では、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は表層でも小さく、Chl-a は鉛直方向一様に大きな値を示している。

4. 河口域の Chl-a 濃度に対する潮位振幅の影響

4.1 Chl-a と潮位振幅の関係

図-4, 5 で示したように、荒川河口域における Chl-a の分布は、大潮と小潮によって異なる分布を示している。しかしながら、Chl-a の変化として日射量を無視することはできない。また河川流量や水温も変化要因と考えられる。そこで、夏期の長期間連続的に観測された東京塔標の水深 1.5 m 層においてメモリー式 Chl-a 計によって連続観測 (30 分間隔) された Chl-a の 1 日平均値と 1 日の最大水位差、全日射量、荒川河川流量および水温の関係を示したものを図-12 (a)~(d) に示す。潮汐差が大きい場合には Chl-a は小さいことが判る。河川流量に対しては、少ない場合も多すぎる場合も適しておらず、最適な流量があるようである。全日射量に対しては明瞭な関係は見られない。水温に関しては 2 つの系統が見られる。しかしながら、Chl-a に寄与が比較的大きい全日射量と Chl-a の関係が不明瞭であるのは妙であるので、全日射量と 1 日最大水位差の複合的影響を検討した (図-13)。これから、1 日最大水位差が小さく全日射量が大きい時に、高濃度の Chl-a が発生し、全日射量が大きくても 1 日最大水位差が大きい時には高濃度の Chl-a は発生しにくいこと判る。

4.2 数値的検討

潮差による Chl-a 濃度の制御機構を検討するため、荒川河口域を図-14 のようにモデル化し、断面 2 次元計算

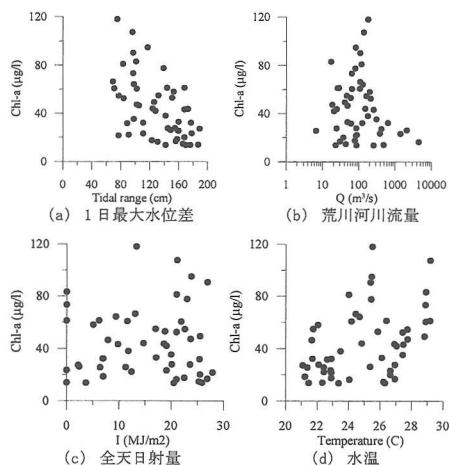


図-12 東京塔標 1.5 m 層における 1 日平均 Chl-a と最大水位差、荒川河川流量、全日射量および水温の関係 (1999 年 6 月から 9 月)

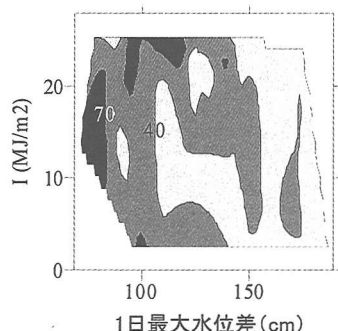


図-13 1 日最大水位差と全日射量に対する 1 日平均 Chl-a の分布 (東京塔標, 1999 年 6 月から 9 月)

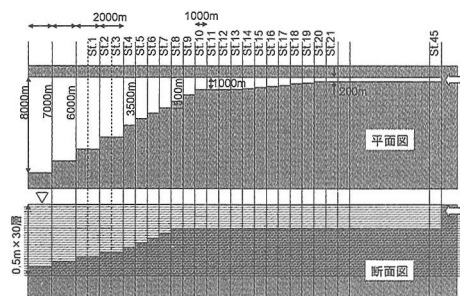
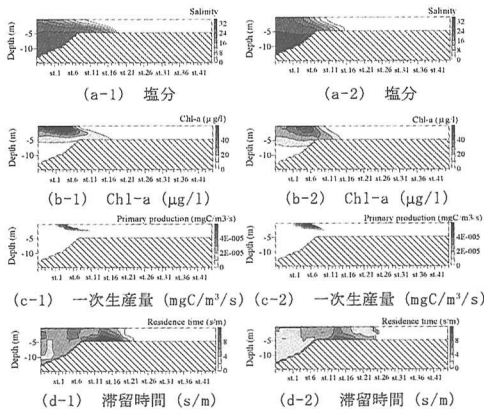


図-14 荒川河口部のモデル形状

を実施した。計算手法は順圧成分は長波の式から与え、傾圧成分のみ運動方程式を解いた。河川流量は下水処理施設からの流入を考慮し $25.36 \text{ m}^3/\text{s} \times 1.5$ (下水分補正) とし、上流端から与えることとした。また、栄養塩負荷量は河川上流端流入流量のみに $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度 0.2 mg/l を与えた。物質循環において、植物プランクトンからの栄養塩の回帰は考慮していないので、本計算での植物プランクトン生産は河川由来の栄養塩のみによって行われることとなる。植物プランクトンの成長速度は塩分 12 以下では 0 とした。計算は大潮時 (潮汐振幅 80 cm) および小潮時 (潮汐振幅 40 cm) の 2 ケースの定常計算を行った。潮汐変動と日射量変動の位相差による影響を除くため、日射量は一定値 (8 月 15 日全日射量 $19.9 \text{ MJ/m}^2/\text{日}$ 中長さ (≒12 時間)) とした。また、水温は一定値 27°C とした。

図-15 に小潮時および大潮時に対する干潮時の塩分、Chl-a、一次生産量および単位流下方向長さ当りの塩分の滞留時間のコンターを示す。本計算手法では塩分遡上距離は観測値と一致できなかったが、内湾側の表一中層部の塩分分布は比較的良く一致しているので、河口域沿岸部における表層植物プランクトンのモデル計算に本計算結果を適用することとした。

Chl-a の分布を見ると、大潮の場合にはフロント部に高濃度の Chl-a が集積している。一方、小潮の場合には、



図一五 干潮時の計算結果。(※-1:小潮時, ※-2:大潮時)

観測結果で示したように、躍層下部にまで高濃度域が分布し、また、沿岸部にも高濃度域が広く分布している。これは、滞留時間コンターに示されるように小潮時の方がフロント下流部における滞留時間が長いことから滞留時間の違いによるものと考えられる。

一次生産量の分布を見ると、大潮時にはフロント部に集中しているが、小潮の時には躍層面に伸びている。一見、潮汐振幅が小さく鉛直混合抑制されて栄養塩を豊富に含んだ河川水が比較的薄く広く拡がる小潮の場合の方が、海域の広範囲の有光層に栄養塩の供給ができるため、植物プランクトンの増殖に有利に働くように見える。しかしながら、河口部における一潮汐当りの一次生産量を比較してみると、ほぼ同量の生産量であった。このことは、本計算条件の下では両ケース共に、河川からの栄養塩がフロント内で一次生産によって消費しつくされていること、および河川からの栄養塩フラックスが両ケースにおいて同量であることが要因と考えられる。

5. まとめ

夏期の東京湾湾奥の荒川河口域において水質の観点から見た河川と内湾の結合水域について調査した。その結果を以下にまとめる。

(1) 小潮時にはst.5付近では、表層のChl-aは10 mg/l程度であるにも関わらず、2-3 m層で30 mg/l以上の値を示すことがある

(2) 淡水性および海洋性の植物プランクトンは塩淡混合域と同スケールの狭い範囲(st.11-st.14)で遷移している。

(3) 荒川河口部の塩淡水フロントの前面部に位置する東京塔標のChl-aは潮位差が小さくかつ全天日射量が多い場合に高濃度になる傾向がある。

(4) 本研究で用いた数値モデルによると、大潮時には一次生産はフロント部に集中して、小潮時には躍層面に伸びた領域で行われる。しかしながら、1潮汐当りの生産量はほぼ同程度であった。

(5) 小潮時の方が高濃度のChl-aが生じるのは潮汐に伴う滞留時間が長いためと推測される。

参考文献

- 宇野木早苗 (1996): 海から川を考える, 海の研究, Vol. 5, No. 5・6, pp. 327-332.
- 宇野木早苗 (1998): 内湾の鉛直循環流量と河川流量の関係, 海の研究, Vol. 7, No. 5, pp. 283-292.
- 西条八東・奥田節夫 (1996): 河川感潮域, 名古屋大学出版会, 248 p.
- 玉井信行 (1980): 新体系土木工学 22 密度流の水理, 土木学会, 260 p.
- 土肥 学・志村光一・布村明彦・山田 正, 吉川秀夫 (1999): 荒川感潮域における水質の縦断分布とその時空間変動特性に関する現地観測, 河川技術に関する論文集, 第 5 巻.
- 村松 剛 (2000): 東京湾における栄養塩の収支に関する研究, 東京水産大学学位論文.
- 柳 哲雄 (1990): 潮目の科学, 恒星社厚生閣, 169 p.
- 鷺見栄一・鋤崎俊二 (2001): 沿岸海域の懸濁態粒子の粒径分布の現地観測とデトリタス分布, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 1101-1105.
- Fisher, T. R., Harding, L. W., Stanly, D. W. and Ward, L. G. (1988): Phytoplankton, Nutrients, and Turbidity in the Chesapeake, Delaware, and Hudson Estuaries, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 27, pp. 61-93.
- Legovic, T., Zutic, V., Grzetic, Z., Cauwet, G., Precali, R., Vilicic, D. (1994): Eutrophication in the Krka estuary, Marine Chemistry, 46, pp. 203-215.
- Muyllaert, K. and Raine R. (1990): Import, mortality and accumulation of coastal phytoplankton in a partially mixed estuary (Kinesal harbour, Ireland), Hydrobiologia, 412, pp. 53-65.
- Schuchardt, B. and Schirmer, M. (1991): Phytoplankton Maxima in the Tidal Freshwater Reaches of Two Coastal Plain Estuaries, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 32, pp. 187-206.
- Sin, Y., Wetzel, R. L., Anderson, I. C. (1999): Spatial and Temporal Characteristics of Nutrient and Phytoplankton Dynamics in the York River Estuary, Virginia: Analyses of Long-term Data, Estuaries, Vol. 22, No. 2 A, pp. 260-275.
- Turner, R. E., Rabalais, N. N., Nan, Z. Z. (1990): Phytoplankton biomass, production and growth limitations on the Huanghe (Yellow River) continental shelf, Continental Shelf Research, Vol. 10, No. 6, pp. 545-571.