

諫早湾調整池と河口堰湛水域における 植物プランクトン発生パターンの共通性と相違

程木義邦¹・村上哲生²

Comparison of phytoplankton biomass above a rivermouth barrage and in a freshwater reservoir, upper Isahaya Bay.

Yoshikuni Hodoki¹, Tetuo Murakami²

Abstract: We compared seasonal and spatial variations in phytoplankton biomass between a location upstream of a rivermouth barrage in the Tone River and a freshwater reservoir in Isahaya Bay in order to examine phytoplankton growth in areas affected by dam emplacement. Simple linear regression analyses were conducted between water renewal rates and phytoplankton biomass (chlorophyll *a* concentration). Significant negative correlations were found just upstream of a rivermouth barrage in the Tone River and in the riverine zone of a freshwater reservoir in Isahaya Bay from spring to summer. However, no significant correlation existed between water renewal rate and phytoplankton biomass in the reservoir itself, which suggests that other environmental factors affect phytoplankton biomass at this location. Growth of the phytoplankton community increases the organic matter load to coastal areas, and an estimated 24% of the organic carbon load into Isahaya Bay was derived from autochthonous production in the Isahaya Bay reservoir.

Key words: dam, phytoplankton, reclamation work, rivermouth barrage, water renewal rate

はじめに

河口域に造られた横断的な構築物は、河川の流れや潮汐を阻害することにより、浮遊藻類の種類組成や現存量の変化をもたらす。連鎖的に河口域の物質循環全体に影響を及ぼすことが、長良川をはじめとした幾つかの河川で指摘されている(日本自然保護協会保護委員会河口堰問題小委員会, 2000; 村上, 2002; 玉井, 2002)。また、人為的な内湾の淡水化に伴う浮遊藻類の発生による水質障害も、我国では1960年代より多くの観測事例がある。前者が対象とする構築物は、河口堰、水門、閘門など河川区域内のものであり、後者はより海側に造られる構築物、

例えば防潮水門、潮受堤防などが扱われている。これらの構築物も、河口域の浮遊藻類に対しては滞留時間の長期化や塩分の変化などにより、直接的または間接的に、現存量や種類組成を変化させる可能性がある。

宇野木(2002)は、干拓地の潮受堤防について、その地理的条件や運用方法が河口堰と共通することに着目し、堤内に新たに造られる調整池と河口堰湛水域の環境の類似性を物理化学的観点から示唆している。本研究では、宇野木(2002)の指摘する共通性が浮遊藻類の発生状況においても見られることを明らかにするとともに、両者で異なる河川流入量/貯水容量比などが種類組成や現存量の時間的、空間的変

¹ 鳥根大学汽水域研究センター(日本学術振興会特別研究員) 〒690-8504 松江市西川津町 1060 Research Center for Coastal Lagoon Environments, Shimane University, JSPS Research Fellow

² 名古屋女子大学家政学部 〒467-0003 名古屋市瑞穂区汐路町 3-40 Nagoya Women's University

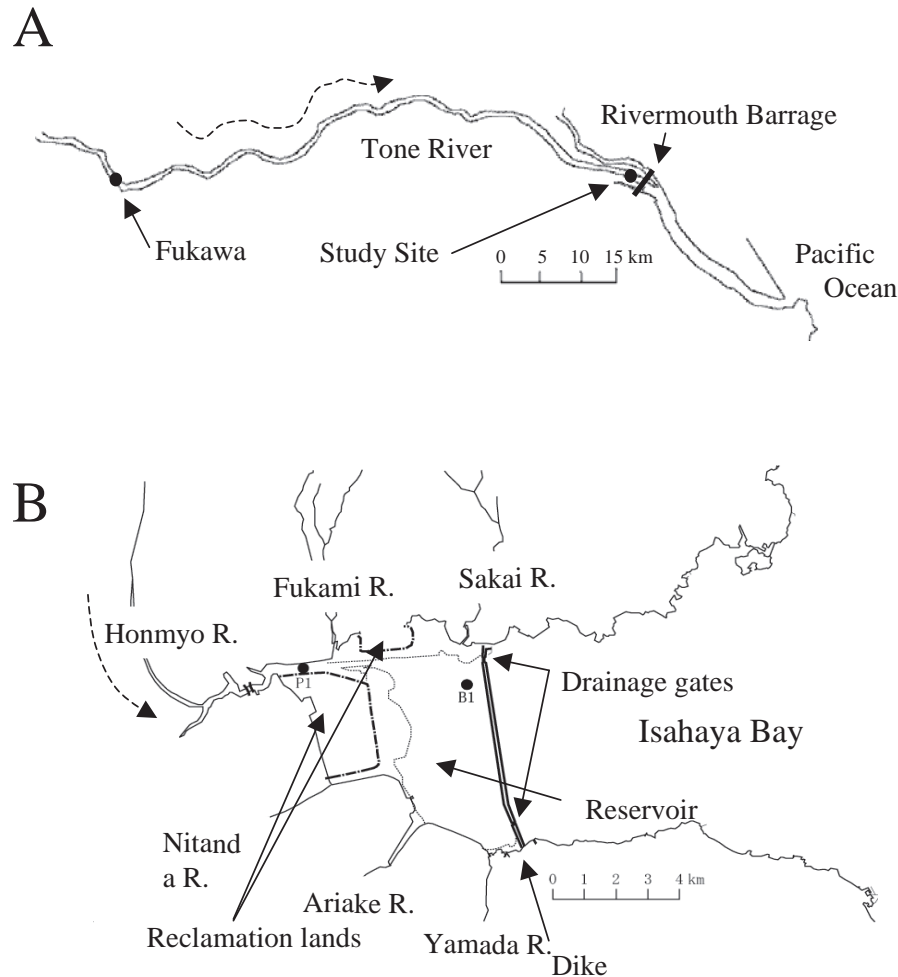


図1. 解析の対象とした利根川河口堰上流域 (A) と諫早湾干拓事業調整池の調査地点 (B).
Fig. 1. Location of the rivermouth barrage in the Tone River (A) and the freshwater reservoir in the Isahaya reclamation project area (B).

化に及ぼす効果についても言及する。

研究対象としては、国営諫早湾干拓事業によって造成された調整池および利根川河口堰湛水域における水質変動を扱う。これらの水域では、浮遊藻類発生による水質悪化が懸念されている(東, 2000; 村上, 2002)。また、諫早湾の調整池では、堤内で生産された有機物の流出負荷が諫早内湾の環境に及ぼす影響が指摘されている(佐々木ほか, 2003)。そのため、堤内での一次生産者の変動機構およびそれに伴う有機物負荷量の変動の解明は、調整池の水質変動の監視や、海域への影響を軽減するための潮受堤防運用に有益な情報を与えるものとなる。

方 法

1. 調査の対象事業

利根川河口堰

利根川河口堰は、利根川河口から 18.5 km 地点に

建設された可動堰である(図 1A)。解析には、月一回の頻度で堰直上(河口から 19 km)において行われている公用水域調査結果のうち、1989 年 1 月から 1995 年 12 月までのクロロフィル *a* (chlorophyll *a*; Chl.*a*) 濃度および同日の布川地点における流量データを情報公開により入手し用いた(水資源開発公団, 1989–1995)。

諫早湾調整池

国営諫早湾干拓事業では、長さ 7 km の潮受堤防で諫早湾奥部の 3,550 ha を締め切り、干拓地と調整池と呼ばれる貯水池が造成された(図 1B)。堤防外からの海水の流入は無く、河川から流入した淡水は、南北 2 箇所の排水門から干潮時に排水され、調整池内部の水位はほぼ一定に保たれている。

解析には農林水産省が行っている調整池水質モニタリング調査の結果のうち、1997 年 4 月から 2004 年 4 月までのデータを用いた(農林水産省九州農政局, 2005)。本モニタリングは、潮受け堤防締め切

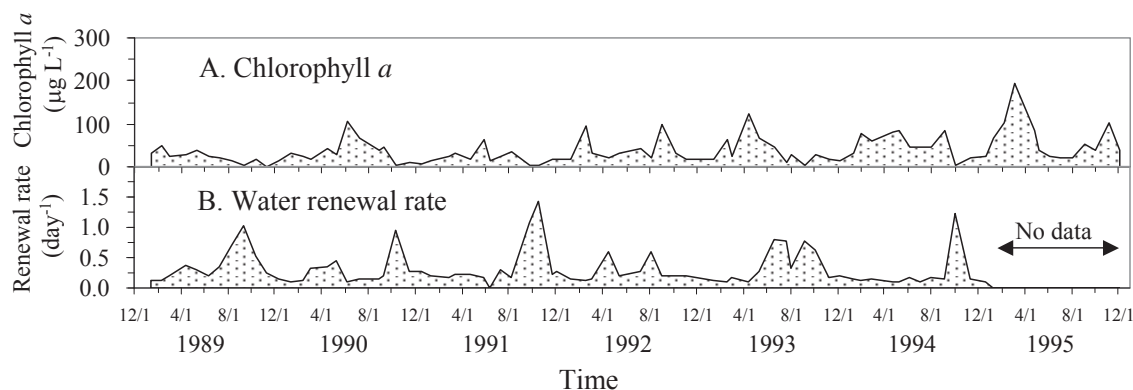


図 2. 利根川河口堰上流におけるクロロフィル *a* 濃度 (A) と水の回転率 (B) の季節変化。

Fig. 2. Seasonal variation in chlorophyll *a* concentration (A) and water renewal rate (B) just upstream of the Tone River barrage.

りの1ヶ月前の1997年3月より、週一回の頻度で行われており、13項目の水質測定が行われている。本研究では、B1地点およびP1地点(図1B)におけるChl.*a*濃度、COD、塩化物イオン濃度、懸濁物質(suspended solids; SS)のデータを用いた。

2. 解析方法

植物プランクトンの現存量と湛水域の回転率の関係を調べるため、利根川河口堰および諫早湾調整池の日毎の回転率を以下の式で求めた。

$$\text{回転率 (day}^{-1}\text{)} = \text{流量} / \text{貯水容量} \cdots \cdots (1)$$

利根川河口堰については、堰(18.5 km)から50 km地点までを湛水域とみなし、この間の河床断面積(水資源開発公団利根川河口堰事務所, 1971)を積算して求めた6000万 m^3 を貯水容量として用いた。また、諫早湾調整池については、実績排水量と貯水容量(2,900万 m^3)より回転率を求め、各調査期間(約1週間)における平均値として解析に用いた。なお、2001年7月31日以降、堤防中央に設置されたポンプより、一日あたり100,000 m^3 の強制排水が連続的に行われているため、これ以降の排水量にはポンプによる排水量100,000 $\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$ を加え回転率の計算を行った。

植物プランクトン現存量と調整池の回転率の関係を評価するために、回転率を独立変数、Chl.*a*濃度を従属変数とした回帰分析を行い、回帰直線の決定係数と傾きの有意性(H_0 : 傾き = 0)を求めた。なお、植物プランクトンの増殖速度は水温の影響を強く受けるため、植物プランクトンの現存量と回転率の関係は季節によって異なることが予想される。そこで観測結果を1–2月、3–4月、5–6月、7–8月、9–10月、11–12月に分け、それぞれの期間で解析を行った。

また、諫早湾調整池については、調整池から海域

へ排出される有機物負荷量のうち、内部生産によって生じている割合を評価するため、Chl.*a*濃度およびSSを独立変数とし重回帰分析を行った。

結果と考察

1. 植物プランクトン現存量の経時変化

利根川河口堰湛水域ではChl.*a*濃度が50 $\mu\text{g L}^{-1}$ を上回る値が頻繁に観測されるが、全体を通してその出現時期に一定した傾向は認められない(図2A)。回転率の経時変化と合わせてみると、1992年以外の全ての年で夏季(6–10月)に流量増加に伴い1 day^{-1} を上回る回転率の上昇がみられるが、このような時期にはChl.*a*濃度は低い値を示す(図2A, B)。また、夏季においても、回転率が0.25 day^{-1} 以下となった1990、1992および1994年には、Chl.*a*濃度が100 $\mu\text{g L}^{-1}$ 程度にまで達している。一方、冬季(11–4月)は、回転率が0.25 day^{-1} 以下で推移しているが、Chl.*a*濃度の変動との関係は不明瞭である。

次に、諫早湾調整のP1地点では、50 $\mu\text{g L}^{-1}$ を超えるChl.*a*濃度が4月から11月の間に多く見られる(図3A)。また、この期間においてもChl.*a*濃度のピークの出現期間は長くとも1–2ヶ月程度であり、短い間隔で増減を繰り返す傾向が見られる。

B1地点では、P1と比べるとChl.*a*濃度の変動の傾向が不明瞭であるが、2002年以外の全ての年において、12月から翌年4月までに50 $\mu\text{g L}^{-1}$ を超えるような高いChl.*a*濃度が観測される(図3B)。また、年度によっては夏季にも50 $\mu\text{g L}^{-1}$ 以上の値が観測されること、P1地点と比べ、ブルーム形成時のChl.*a*濃度の変動は小さく、比較的安定した現存量で長期間維持される傾向が見られる。また、P1およびB1地点におけるChl.*a*濃度の変動の連動性は確認できない。

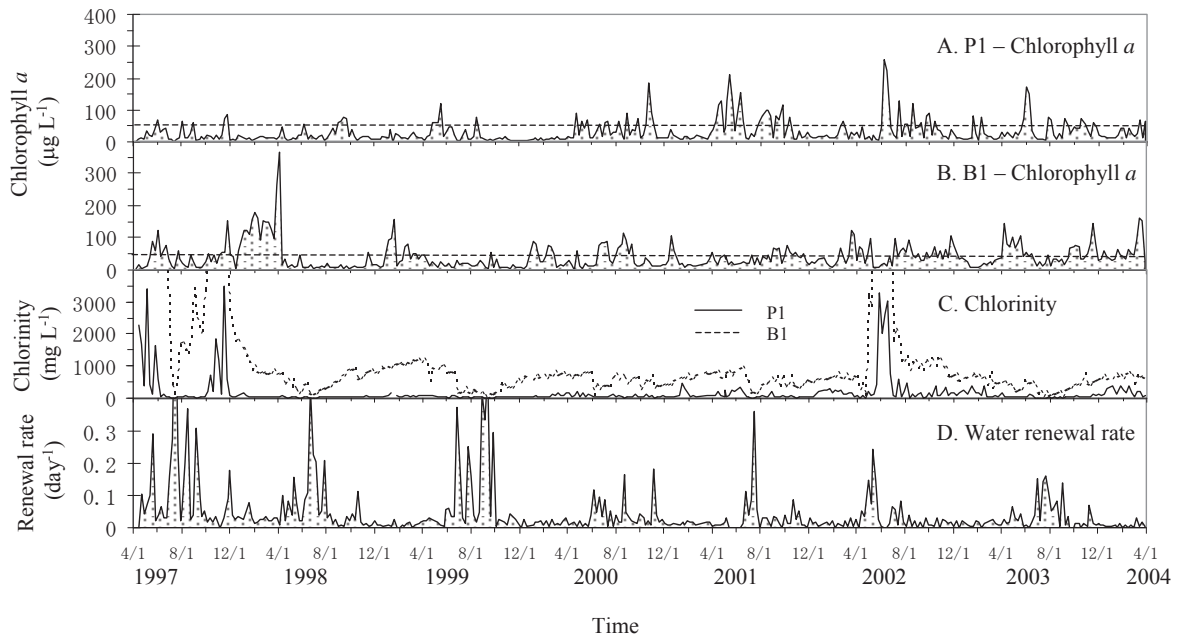


図3. 諫早湾調整池のP1 およびB1 地点におけるクロロフィル *a* 濃度 (A, B), 塩分 (B) および水の回転率 (C) の季節変化。

Fig. 3. Seasonal variation in chlorophyll *a* concentration (A, B), chlorinity (C) and water renewal rate (D) at stations P1 and B1, Isahaya Bay reservoir.

塩化物イオン濃度については、両地点共に、1997年4月の締め切り直後と2002年4月から5月に行われた海水導入調査の期間は高い濃度にある(図3C)。それ以外の時期では、P1 地点では 100 mg L^{-1} 以下の低い濃度で推移している。一方、B1 地点では、夏季(6–10月)には塩化物イオン濃度が 300 mg L^{-1} まで低下し、11月から翌年4月にかけて $1,000 \text{ mg L}^{-1}$ まで上昇する季節変化が見られる。しかし、P1 およびB1 地点共に、塩化物イオン濃度とChl.*a* 濃度の間に明瞭な関係は見られない。

回転率は、調整池への流入量の季節変動を反映しているため、6–10月の間に高い値が頻繁に見られるが、12–4月の冬季には 0.05 day^{-1} 以下の低い値で推移している(図3D)。B1 地点については、回転率とChl.*a* 濃度の間に明瞭な関係は見られないが、P1 については、高いChl.*a* 濃度が頻繁に観測される夏季において、回転率が低い時期にChl.*a* 濃度のピークが見られる。

2. 植物プランクトン現存量と回転率の関係

利根川河口堰については、サンプル数が各時期で $n=10-12$ と少ない。したがって全ての時期で統計検定上十分な検出力が確保出来ているとは考えにくい。3–4月、7–8月および9–10月の期間でChl.*a* 濃度と回転率に有意な負の相関が見られた(図4)。

諫早湾調整池のP1 地点については、冬季(11–2

月)を除いた全ての時期において、回転率とChl.*a* 濃度の間に有意な負の相関が見られた(図5)。また、決定係数(r^2)は、夏期に高くなる傾向が見られた。一方、B1 地点については9–10月に有意ながらも弱い相関がみられたが($r^2=0.103$)、全体として滞留時間とChl.*a* 濃度の間に明瞭な関係が見られなかった(図6)。

3. 諫早湾調整池の内部生産に由来するCODの寄与率

調整池におけるCODの由来としては、植物プランクトンとともに、底泥の巻き上げや河川からの流入が考えられる。そこで、Chl.*a* 濃度およびSSを従属変数、切片を河川からの流入濃度とし、重回帰分析を行ったところ、以下の式が得られた。

$$\text{P1 地点: COD (mg L}^{-1}\text{)} = 0.039\text{SS} + 0.028\text{Chl.}a + 3.53$$

$$(\text{r}^2 = 0.870) \dots\dots (2)$$

$$\text{B1 地点: COD (mg L}^{-1}\text{)} = 0.022\text{SS} + 0.032\text{Chl.}a + 4.16$$

$$(\text{r}^2 = 0.782) \dots\dots (3)$$

どちらの調査地点についても高い決定係数が得られ、Chl.*a* 濃度とSSによってCODの変動をある程度説明できた。そこで、実際に調整池からの排水における植物プランクトン発生に伴うCODの寄与率を、排水の水質に最も近いと考えられるB1 地点の重回帰分析の結果から求めた(図7A)。植物プランクトン由来のCODの寄与率は、図2に示したChl.*a* 濃度と変動と概ね一致しており、平均で17%、最大

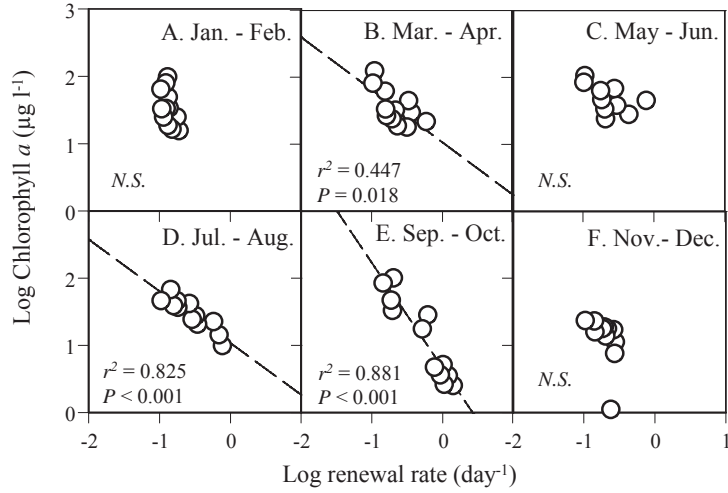


図4. 利根川河口堰上流域における水の回転率とクロロフィル *a* 濃度の関係。
Fig. 4. Seasonal relationship between water renewal rate and chlorophyll *a* concentration above the Tone River barrage.

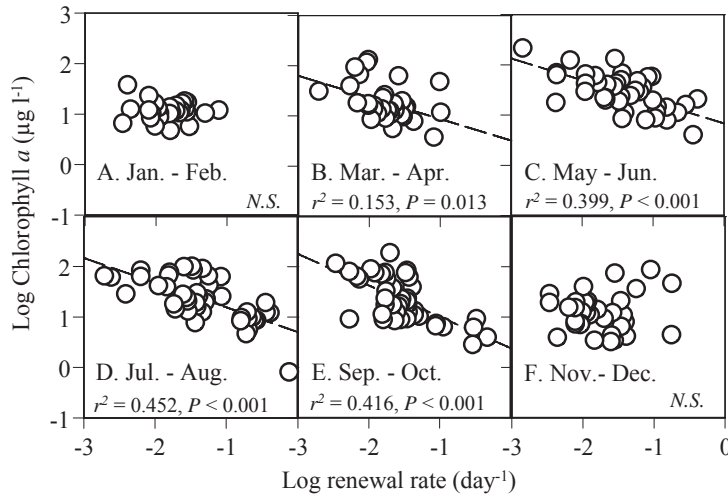


図5. 諫早湾調整池 P1 地点における水の回転率とクロロフィル *a* 濃度の関係。
Fig. 5. Seasonal relationship between water renewal rate and chlorophyll *a* concentration at station P1, Isahaya Bay.

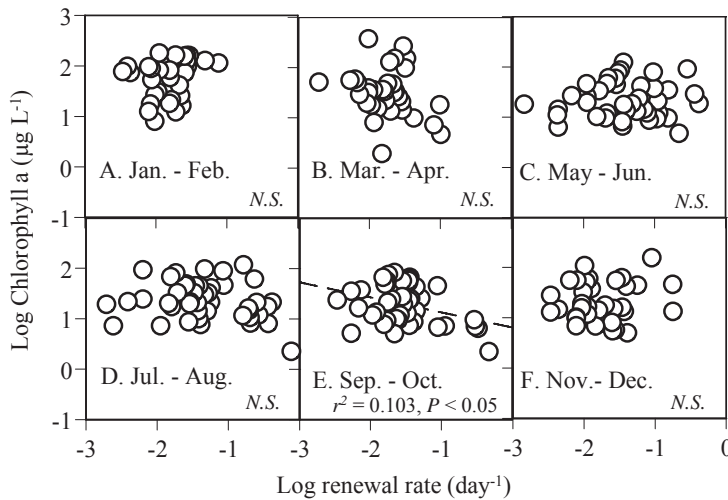


図6. 諫早湾調整池 B1 地点における水の回転率とクロロフィル *a* 濃度の関係。
Fig. 6. Seasonal relationship between water renewal rate and chlorophyll *a* concentration at station B1, Isahaya Bay.

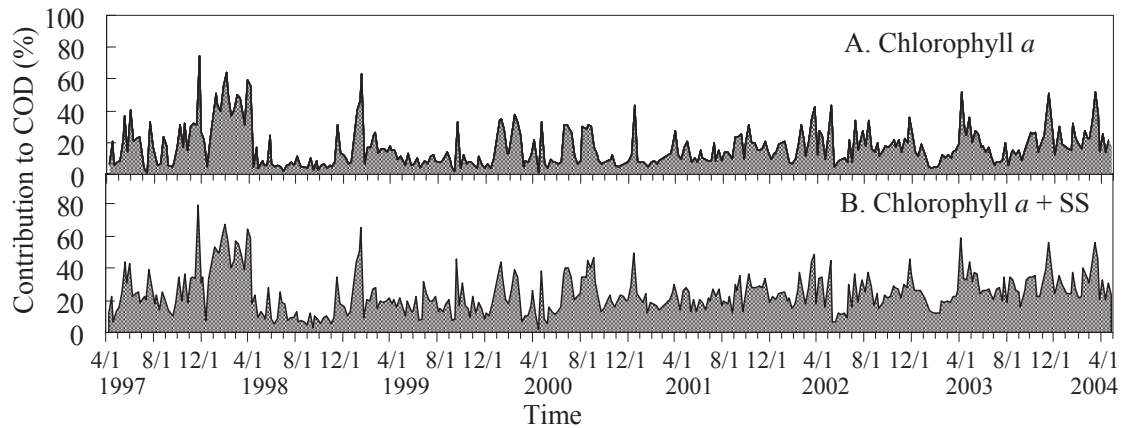


図7. 諫早湾への有機物負荷量のうち、調整池における藻類の発生 (A) と藻類の発生と底泥の巻き上げの寄与率 (B).

Fig. 7. Relative contributions of phytoplankton growth (A) and phytoplankton growth + suspended sediment (B) to the organic matter load of the Isahaya Bay reservoir.

で75%が植物プランクトン由来のCODと見積もられた。一方、潮受堤防締め切り後に底泥のCODが 13 mg g^{-1} から 19 mg g^{-1} まで増加したことが明らかになっている(佐々木ほか, 2003)。すなわち、潮受け堤防締め切り前後を比較した場合、同量の底泥が巻き上げられたとしても、CODに対する寄与率は締め切り後に32%ほど増加していることになるので、これは新たな有機汚濁として見積もる必要がある。そこで、B1地点におけるChl.a濃度とSSの寄与率の経時変化を求めたところ(図7B)、平均で24%、最大で79%と見積もられた。

河口堰を建設した場合、堰上流の淡水域では河川棲植物プランクトンの増殖規模や頻度が増加し、これが起点となり様々な問題が生じる。例えば長良川河口堰では、河口堰運用以前は、もともと干潮域であった建設現場付近(河口から約6 km上流地点)において夏季の渇水期のみ河川棲植物プランクトンの発生が認められていた。しかし1995年の試験湛水運用後、淡水化された河口堰直上流における植物プランクトンの発生規模および頻度が増加し、夏季の低流量時には上流18 km地点でもChl.a濃度が $20 \mu\text{g L}^{-1}$ を超える値が観測されている(村上, 2002)。このような河川棲植物プランクトンの増加は、堰上下流の底質の細粒化や有機物含量の増加をもたらし、堰上流域では湛水化に伴う水温成層強化、堰下流域では小潮時の塩分成層の発達と併せ、底層の貧酸素化を引き起こした(村上ほか, 2001; 村上・服部, 2001)。

本稿の解析結果では、利根川河口堰の湛水域および諫早湾調整池のP1地点における植物プランクトンの発生量もまた、湛水域の回転率と強く関係して

いること、そしてこの関係は季節により異なると考えられた。すなわち、植物プランクトンの増殖速度がある一定以上に保たれる水温下で、調整池の滞留時間が増加する時期に、植物プランクトンの増殖が生じていると解釈され、村上(2002)が長良川や他の河口堰で報告している傾向と一致する。

一方、諫早湾調整池のB1地点については、植物プランクトン現存量と回転率や他の環境要因との明瞭な関連性は見られなかった。B1地点における植物プランクトン現存量の変動の特徴として、12月から4月の冬季に現存量が高く、夏季における植物プランクトンの発生は回転率が $0.02 \sim 0.1 \text{ day}^{-1}$ (滞留時間: 10~50日)の時期に限られていることが挙げられる(図2)。河口堰湛水域や大陸の河川では、夏季の渇水期中流域から下流域にかけ、河川棲植物プランクトンの現存量が減少することが知られているが、その要因として、滞留時間の増加に伴う沈降量と捕食圧の増加が指摘されている(Admiraal et al., 1994; 村上, 2002)。つまり、滞留時間が十分に長いB1地点における植物プランクトン現存量の変動は、沈降・捕食などの除去過程に支配されている可能性がある。なお、利根川河口堰における植物プランクトン現存量と回転率の関係を見る限り、回転率が 0.1 day^{-1} までは両者の間に負の相関関係がみられている(図4)。一方、今回解析に用いた諫早湾調整池のデータでは、回転率の88%以上は 0.1 day^{-1} 以下であるため、滞留時間の増加に伴い植物プランクトンの減少要因が卓越し、回転率と藻類現存量の間に明瞭な関係が見られなかったと考えられる。

引用文献

- Admirall, W., Breebaart, G. M. J, Tubbing, B., Van Zanten, E. D., De Ruijter Van Steveninck and R. Bijkery (1994) Seasonal variation in composition and production of planktonic communities in the lowe River Rhine. *Freshwater Biology*, 32: 519–531.
- 東 幹夫 (2000) 諫早湾干拓事業の影響. 「有明海の生きものたち—干潟・河口域の生物多様性—」(佐藤正典編) pp.320–337. 海遊舎, 東京.
- 宇野木早苗 (2002) 河川事業が沿岸環境へ与える影響を物理面から考える. *海の研究*, 11: 637–650.
- 水資源開発公団 (1989–1996) 水資源開発施設管理年報. 水資源開発公団.
- 水資源開発公団利根川河口堰事務所 (1971) 利根川河口堰工事誌. 水資源開発公団.
- 村上哲生・服部典子 (2001) 長良川河口堰湛水域における一時的な水温成層の形成. *応用生態工学*, 4: 179–184.
- 村上哲生・服部典子・藤森俊雄・西條八東 (2001) 夏季の長良川河口堰下流部の貧酸素水塊の発達と解消. *応用生態工学*, 4: 73–80.
- 村上哲生 (2002) 長良川河口堰建設後の浮遊藻類発生とその環境影響. *応用生態工学*, 5: 41–51.
- 日本自然保護協会保護委員会河口堰問題小委員会 (2000) 河口堰の生態系への影響と河口域の保全. pp.137–164. 日本自然保護協会, 東京.
- 農林水産省九州農政局 (2005) 諫早湾干拓事業環境モニタリングデータ等の公表について. (http://www.maff-kyushu-nn.go.jp/syoukai/kankyuu_monitoring/monitarung_harituke.htm). 農林水産省, 東京.
- 佐々木克之・程木義邦・村上哲生 (2003) 諫早湾調整池からの COD・全窒素・全リンの排出量および失われた浄化量の推定. *海の研究*, 12: 573–591.
- 玉井信行 (2002) 長良川河口堰モニタリング調査を評価する. *応用生態工*, 5: 1–3.