

紀ノ川下流の淡水域・汽水域における冬季から夏季の 栄養塩・植物プランクトンの現地調査

OBSERVATIONAL STUDY ON NUTRIENT AND PHYTOPLANKTON IN RIVER AND
SEA WATERS IN KINOKAWA RIVER ESTUARY FROM WINTER TO SUMMER

石塚正秀¹・寺本健士²・紺野雅代²・井伊博行³・平田健正⁴

Masahide ISHIZUKA, Takeshi TERAMOTO, Masayo KONNO, Hiroyuki II and Tatemasa HIRATA

- ¹正会員 博(工) 和歌山大学助手 システム工学部環境システム学科 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)
²学生会員 和歌山大学大学院 システム工学研究科システム工学専攻 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)
³正会員 博(理) 和歌山大学教授 システム工学部環境システム学科 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)
⁴正会員 工博 和歌山大学教授 システム工学部環境システム学科 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)

Elucidation of the supply of substances from land to the sea is important to understand material (biomass) balances and the ecosystems in estuaries and the world's oceans. Especially in reservoirs and estuaries, masses of nutrients and organic matter change as a result of photosynthesis and flooding. This study recorded data for composition of nutrients and phytoplankton in a freshwater region and an estuary of the Kinokawa River to show their changes. Results show that the value of chlorophyll-a increased greatly in July before the Kinokawa floodgate was opened. At that time, it is presumed that dissolved organic nitrogen (DON) was taken in by organisms to form particle organic nitrogen (PON). Regarding the relation between chlorophyll-a and volatile suspended solids (VSS) during flooding, suspended solids (SS) contain much organic matter that originated from riverbed phytoplankton. Moreover, regarding the number and type of phytoplankton, we obtained results showing that diatoms were dominant in spring and summer. However, blue algae or green algae increased in summer. On 29 July, we found that dissolved silicate decreased concomitant with the increase of diatoms.

Key Words : phytoplankton, nutrient, organic matter, estuary, river gate, kinokawa river

1. はじめに

生活環境・産業構造の変化により、陸域から河川に排出される負荷は増大し、様々な水環境の変化を引き起こしている。これまで、水質問題は限られた範囲(点源、面源)からの影響について考えられてきた。しかし、近年、山から川、さらに海へと、物質を運ぶ水系・流域全体をみた、より広い視点から水環境問題を捉える必要性が強調されている。同時に、陸域から海域への物質収支は、地球規模の生態系保全や生物多様性問題を考える上で重要な課題である¹⁾。

これまで、水質を評価する指標として、T-NやT-P、COD、BODなどが使用されてきた。これらの指標は、汚染された水域における水質悪化の状態を知る上で非常に有効である。しかし、陸域に存在する停滞水域における物質貯留による水質変化や人為的影響の少ない山地流域に

おけるダム貯水池での水質悪化の事実は、水質変化がただ単に栄養塩供給の多い流域に限った問題ではないことを示している。また、シリカ欠損²⁾にいられているような、陸域の水質変化が海域の生態系バランスの変化に与える影響を考えるためには、粒子性物質の構成や栄養塩の形態を知ることが重要である。そのためには、まず、観測結果を示す必要があり、とくに、淡水域から汽水域への形態変化が重要である。

そこで、本研究では、紀ノ川を対象として、川と海を連結する河口部の淡水域と汽水域において、植物プランクトンを含む粒子性物質・栄養塩の調査・分析を行い、粒子性・溶解性物質の構成の変化を調べた。また、一時的な停滞水域がそれらの変化に与える影響を調べた。

2. 調査の概要

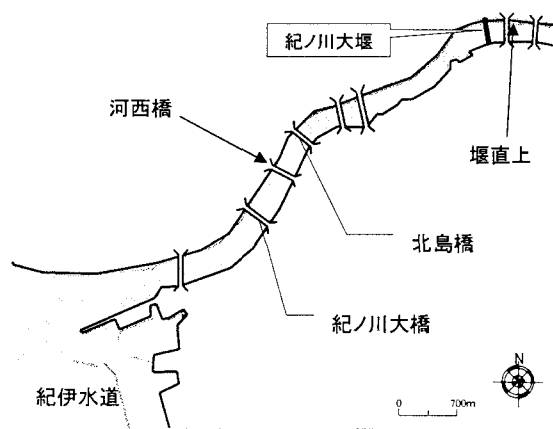


図-1 紀ノ川河口域の地図

(1) 現地調査対象地点

2004年1月23日から9月9日の期間に、1ヶ月に2回の割合で紀ノ川河口域において水質調査を実施した。観測は、淡水域では紀ノ川大堰上流（堰から約500 m）、汽水域では大堰から流下方向に約4 kmに位置する河西橋の2地点で実施した（図-1 参照）。紀ノ川はわが国最多雨地域の大台ヶ原を水源としており、流域面積1,750 km²、幹線流路延長136 kmの一級河川である。

(2) 紀ノ川大堰の稼働状況

2003年6月から、紀ノ川大堰（総貯水容量5,100,000 m³）の水位運用が開始されている。紀ノ川大堰は貯水ゲートが全部で7門あり、その内、中央5門は制水ゲート、両端の2門は流量調節ゲートである。また、堰の両岸には魚道が設けてあり、平水時は1 m³/sづつの水が放出されている。魚道からの流出限界量は40 m³/sで、それ以上の水量になると、流量調節ゲートを下げオーバーフローさせる。650 m³/s以上になると、状況に見合った数の制水ゲート・流量調節ゲートを上げてアンダーフローさせる。調査実施期間中の紀ノ川大堰のゲート稼働状況を表-1 に示す。

3. 水質分析の概要

(1) 水質の調査方法

現地では、携帯用水質測定器(D-23・24、堀場製作所製)を用いて、pH、電気伝導度(EC)、水温を、また、多成分水質計(AAQ1183、アレック電子社製)を用いて、pH、電気伝導度(EC)、塩分濃度(salinity)、濁度(TB)、クロロフィルa(Chl. a)、水温、溶存酸素量(DO)の鉛直分布を測定した。AAQ1183は一定時間間隔で測定値を連続記録することができ、調査地点の水深が2~5 mと浅いことから、測定時間間隔は0.25秒とした。採水は、上層(水深0~0.5 m)と中層(水深2 m)の2層においてバンドーン採水器を用いて行った。汽水域では橋上から(左岸か

表-1 紀ノ川大堰の稼働状況

稼働時間		オーバーフロー	アンダーフロー
5/21	10:07 ~ 5/21 14:35	2	1
6/21	22:10 ~ 6/22 5:02	2	2
7/31	14:40 ~ 8/1 14:00	2	5
8/5	7:40 ~ 8/6 8:12	0	7

ら約100 m) 長いロープを使って水質測定・採水を行った。また、堰上流地点での採水は右岸側で行った。採水したサンプルはクーラーボックスに入れ、速やかに実験室に持ち帰り、水質分析を行った。サンプル量は、SSとChl. a用に5 Lを1本、栄養塩用に250 mlを1本、植物プランクトン観測用に500 mlを1本採取した。また、1月26日と8月26日にはボートを出して、エクマンバージ式採泥器を用いて底泥を採取した。

(2) 水質の分析方法

実験室では、硝酸態窒素(NO₃⁻-N)、亜硝酸態窒素(NO₂⁻-N)、アンモニア態窒素(NH₄⁺-N)、全窒素(T-N)、リン酸態リン(PO₄³⁻-P)、全リン(T-P)、溶存態ケイ素(DSi)、懸濁物質(SS)、SSの強熱減量(VSS)、クロロフィルa(Chl. a)、フェオフィチンa(Pheo. a)の分析を行った。

NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P、DSiは、比色法により、吸光度計(DR/2500、HACH社製)を用いて分析を行った。また、T-N、T-Pはサンプルに処理を施し(ペルオキソ二硫酸カリウム分解法)、有機態を無機態(それぞれNO₃⁻-N、PO₄³⁻-P)に分解するため、約120 °C、0.11 MPaで30分間オートクレーブに入れた後に測定を行った。また、孔径0.45 μmのメンブレンフィルターを用いて濾過した後のサンプルのT-N、T-Pについても計測を行った。つまり、フィルターをかけていないT-N、T-Pから、フィルターをかけたT-N、T-Pを差し引くことで、粒子性有機態窒素(PON)および粒子性有機態リン(POP)をそれぞれ求めた。また、フィルターをかけたT-N、T-Pから溶解性無機成分(Nについては、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、NH₄⁺-N、Pについては、PO₄³⁻-P)を差し引くことで、溶解性有機態窒素(DON)および溶解性有機態リン(DOP)を求めた。

SSは、あらかじめ105 °Cで30分間乾燥させた後に質量を測定しておいたガラス繊維濾紙(GF/B、Whatman社製、孔径1 μm)を用いてサンプルを1~2.5 L程度濾過させた後、濾紙を105 °Cで2時間乾燥させ、デシケーター内で冷却後、濾紙上の残留物の質量を0.1 mgのオーダーまで電子天秤(CP224S、ザルトリウス社製)を用いて測定した。VSSはSS測定後の濾紙を高温炉を用いて600°Cで2時間強熱した後、デシケーター内で冷却し、残留物の減量を測定した。

Chl. a、Pheo. aはガラス繊維濾紙(GF/B、Whatman社製、孔径1 μm)でサンプルを1~2.5 L程度濾過させた後、N,N-ジメチルホルムアミド(DMF)で色素を抽出させ、その抽出液の吸光度をDR/2500を用いて測定した。吸光度

の測定波長およびChl. a, Pheo. aの算出式はLorenzenの方法を用いた³⁾。なお、Chl. aの測定について、吸光法は蛍光法と比べて分析精度が低下することから、本調査では、大量(1~2.5 L)のサンプル水を用いて濾過を行い、できるだけ誤差を少なくした。また、現地観測用装置(AAQ1183)の蛍光強度法によるN値と吸光法による分析結果の補正式を作成し(R=0.88)、蛍光強度法によるN値を補正式に代入してChl. aの値を算出した。なお、Pheo. aは吸光法による分析値を用いた。

(3) 底泥の分析方法

底泥サンプルは、強熱減量(IL)、Chl. a, Pheo. aについて分析を行った。ILはあらかじめ600℃で30分間強熱し、冷却させておいた蒸発皿にサンプルを適量移し、SSを測定した時と同様の温度・時間で乾燥重量および強熱減量を求めた。ILの表示方法として、(600℃の乾燥減量)/(105℃の乾燥重量)×100で表し、単位は%とした。

Chl. a, Pheo. aはサンプル中の色素をDMFで抽出し、吸光度を測定した。底泥中のChl. a濃度とPheo. a濃度は抽出に要したサンプルの質量および、あらかじめ測定しておいた含水比から、105℃のサンプル乾燥重量1g中の含有量を求めた。

(4) プランクトンの計数・種同定方法

プランクトン観察用に採水した水は、即座にピクロホルマリンを試料の5%量(25 ml)入れて固定した⁴⁾。ピクロホルマリンとは、ホルマリンにピクリン酸を溶解させた飽和溶液のことである。通常、生物の固定にはホルマリンを用いるが、今回観察するプランクトンの中には、外殻を持たない渦鞭毛藻類等も含まれるため、細胞を破壊する恐れのあるホルマリンは使用せず、ピクロホルマリンを用いた。固定した試料は実験室に持ち帰り、静置沈殿法により濃縮を行った⁴⁾。この方法は、試料を24時間静置させて試料内のプランクトンを沈殿させ、上澄み液をサイホンなどを用いて抜き取る作業を繰り返す。ここでは、サンプル残留量を約100 ml、約40 mlに減らし、最終的に10 mlとなるように順に濃縮を行った。

この10 mlに濃縮した試料をよく攪拌し、プランクトン濃度を均一にしてからスポイトにとり、計算盤(改良ノイバウエル型)の上に乗せ、位相差顕微鏡(BCLIPSE E200 ニコン株式会社製)により植物プランクトンの計数・同定を行った。位相差顕微鏡は実体顕微鏡と違い、物体が光の波長に与える位相のずれを明暗の差として捕らえ、くっきりとした輪郭を観察できる顕微鏡であり、植物プランクトンの観察には適している。また、計算盤の目盛上に載る試料の容量は0.9 mm³と定まっているため、目盛上の植物プランクトン数を計測することにより、濃縮前の試料内に含まれていた植物プランクトン数を算定した。同定方法は、顕微鏡で観察された形から(10×40倍)、珪藻、渦鞭毛藻、藍藻、緑藻とそれら以外の

(その他)の5種類に分別した⁵⁾。

4. 水質調査の結果

(1) 観測結果の概況

図-2, 3は、大堰上流および河西橋におけるTB, EC, Chl. a, DO, 水温, pHの時間変化を示す。上層・下層のデータとは、鉛直分布を2層に分けて平均した値を示す。

堰上流のTBの時間変化をみると、5月14日と8月10日にTBが大きく増加しており、これは出水の影響による。5月14日の調査は出水直後と時間帯が重なったため、河西橋においてもTBが高い値を示しており、塩分濃度も上下層ともに低い。

つぎに、Chl. aの変化をみると、堰上流では、Chl. aの増大が2回観測され、1回目は5月14日、2回目は7月29日である。7月29日のChl. aの増大については、DOおよびpHも同様に増加しており、光合成の影響が強く表れている。しかし、7月31日に堰が開放されているため(表-1参照)、停滞していた水塊は海へと流出し、8月10日の調査では、Chl. aは大きく低下している様子が観測された。つまり、停滞水域の形成は植物プランクトン個体数の変化に大きく影響を与えている。

河西橋については、堰を閉じた場合にも兩岸の魚道から河川水が流出するため、基本的に堰上流と同じ変化を示しているが、堰上流と比べて停滞性が低く、海域からの流れや波の影響を受けるため、複雑に変化している。例えば、7月2日の調査では(大潮、友ヶ島水道南流最大2時間後)、TBとChl. aが高い値を示しているが河川からの出水はない。また、いずれの調査でも、上層と下層の塩分濃度の違いは小さく、強い成層はみられない。また、堰上流および河西橋において貧酸素水塊の形成は観測されなかった。

(2) クロロフィルaとフェオフィチンaの変化

図-4は堰上流と河西橋におけるChl. aとPheo. aの時間変化を示す。この図から、5月と7月のChl. aの増加に対応して、Pheo. aも増加する結果が得られた。また、これらの変化は、堰上流および河西橋においてほぼ同様であり、水温変化にともなう植物プランクトンの増殖・枯死など生物活動が活発化していることがわかる。ただし、5月14日の結果については、出水時のデータであり、河床からの植物由来の有機物の巻き上げの影響も含まれている可能性がある。また、先に述べたように、河西橋では7月2日にPheo. aが大きな値を示している。

(3) SSとVSSの変化

図-5より、堰上流では5月14日の出水にともないSSが増加し、また、Chl. aが増加する7月にもSSが増加している。出水後の8月10日のSSの増加は比較的小さい。

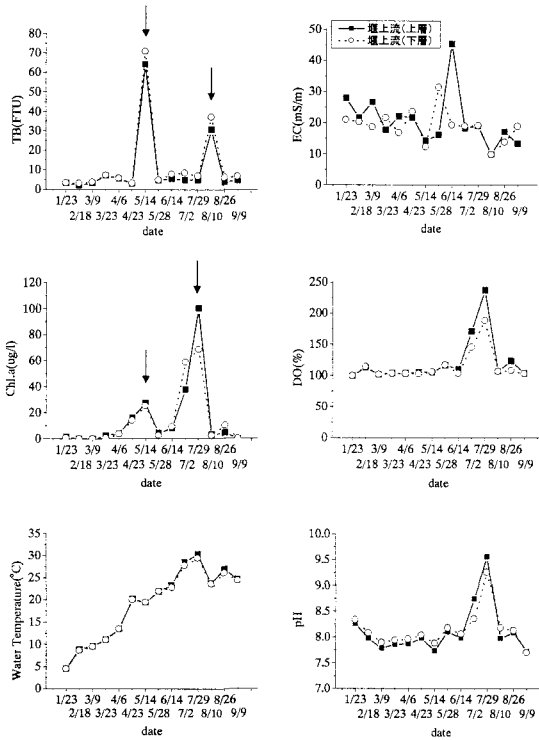


図-2 紀ノ川大堰上流における水質基礎項目の時間変化

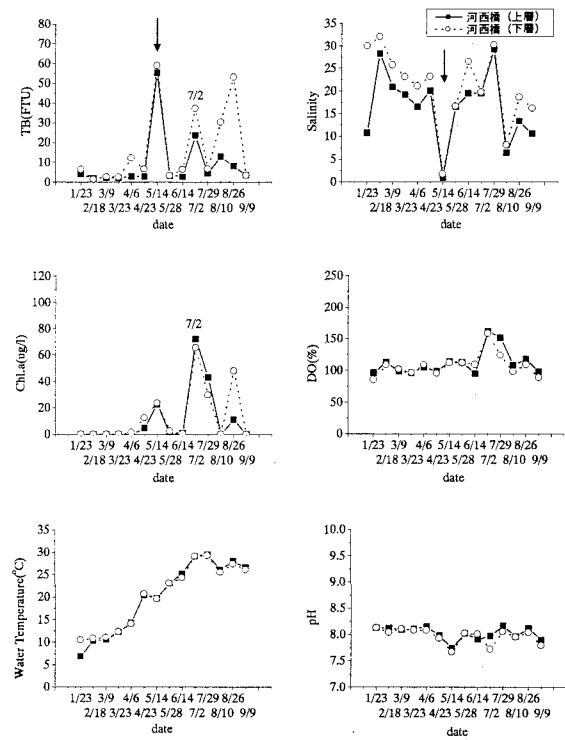


図-3 河西橋における水質基礎項目の時間変化

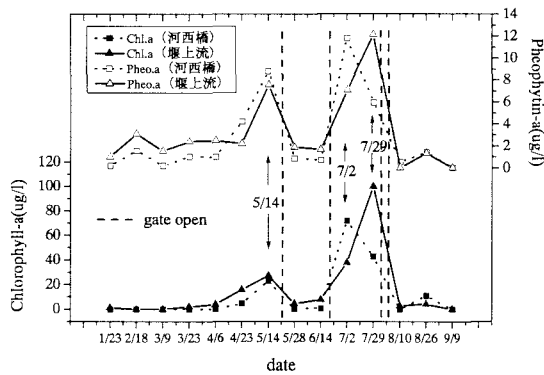


図-4 紀ノ川大堰上流と河西橋における水中上層のクロロフィルaとフェオフィチンaの時間変化

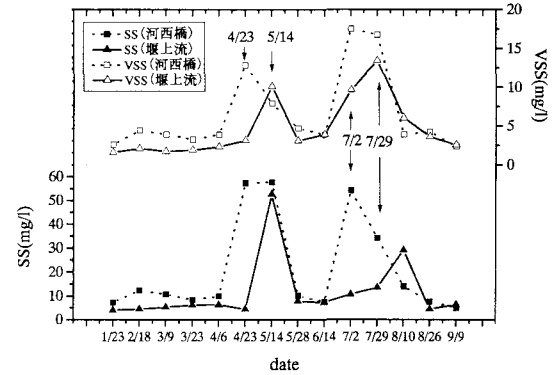


図-5 紀ノ川大堰上流と河西橋における水中上層のSSとVSSの時間変化

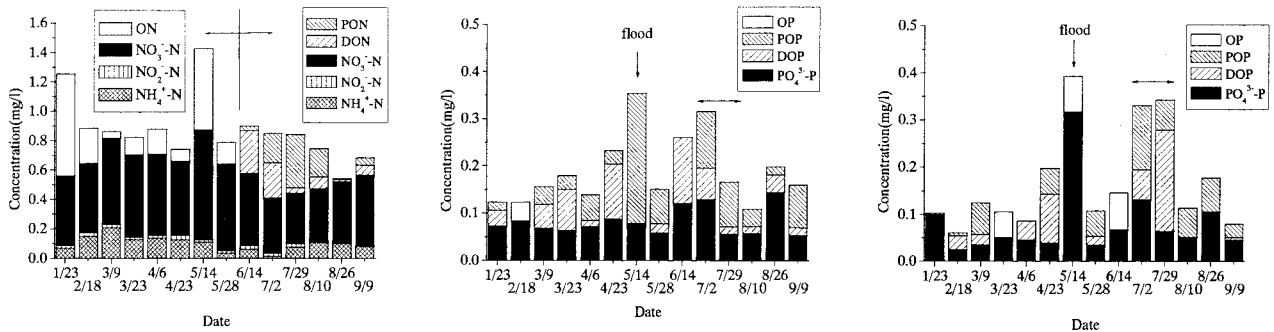
これらの変化はTBの変化と一致している(図-2 参照)。一方、VSSをみると、5月14日の出水時に、SSの増加とともにVSSも増加しており、この結果は、鉱物性粒子の増加に加えて、河床に堆積した有機物などの流出を示している。さらに、Chl. aの変化とVSSは同様に変化していることから、VSS中に植物由来の有機物が多く含まれることが分かる。また、7月については、SSの変化の割合に対してVSSは大きく増加しており、これは植物プランクトンの増加を示している。

一方、河西橋におけるSSとVSSは、非常に複雑な変化を呈している。出水のない4月23日および7月2日にSSおよびVSSが高い値を示している。それぞれ、中潮、大潮にあたるが、塩分濃度をみるといずれも $\sigma_t = 23.2$ 、19.8であり、海水の大きな流入はない。河西橋における

7月2日のSSとVSSの増加は他のTB、Chl. a、Pheo. aなどの水質項目と同様の変化であるが、4月23日のSSとVSSの増加については明らかでない。また、堰上流と比較すると、河西橋ではSSが大きいことから、塩水混合によるフラックを形成していると考えられる。また、堰上流と河西橋ともに平水時にVSS/SS値が小さいことから、SS中に鉱物性の無機態成分が多いことが分かる。

(4) 窒素とリンの変化

図-6 より、T-Nは5月14日の出水時を除いて、ほぼ一定の値(0.8 mg/l)を示していることが分かる。窒素の存在形態としては、溶解性無機態窒素が多く、その中でも硝酸態窒素の占める割合が多い。特徴的な変化としては、5月14日の出水時におけるT-Nの増加は有機態窒素



(a) 窒素, 堰上流 (b) リン, 堰上流 (c) リン, 河西橋
 図-6 大堰上流および河西橋の上層における形態別窒素成分・リン成分の時間変化 (全量はT-N, T-P)

(ON)の増加によることが分かる。SSとVSSの関係で述べたように、河床に堆積した粒子性有機物の巻き上げによることが考えられる。また、Chl. aが増加した7月2日から29日における溶解性有機態窒素 (DON) と粒子性有機態窒素 (PON) の変化をみると、DONが減少し、PONが増加している様子が分かる。つまり、易分解性有機物のDONが植物プランクトンなどの生体内に取り込まれて形態変化した結果とみることが出来る⁶⁾。

一方、堰上流のリン濃度の変化をみると、5月14日の出水時にT-Nと同様にT-Pが増加している。この時のT-Pの成分構成をみると、POPが増加し、 PO_4^{3--P} は平水時と変化がないことから、T-N, SS, VSS, Chl. a, Pheo. aなどの増加と同様に、河床に堆積した粒子性有機物 (とくに植物性由来を含む) の巻き上げが考えられる。また、Chl. aが増加した7月の変化をみると、DOPが減少しているが、T-Pも大きく減少しており、変化量の収支はこの結果からでは合わない。また、河西橋における5月14日の出水時の結果をみると、堰上流では粒子性有機態リンがT-Pの多くを占めるのに対して、河西橋では溶解性無機態リン (PO_4^{3--P}) の割合が高いことから、塩分の影響により土壌粒子に吸着した無機態リンの脱着が考えられる⁷⁾。ここで、無機態リンのうち、鉄やアルミニウム、カルシウムなどと結合した金属塩はフィルター濾過により除去されたと考えた。

(5) 堰上流と汽水域における底質の変化

2004年1月23日および8月26日に採取した底泥中のChl. a, Pheo. a, ILの濃度を図-7に示す。1月、8月ともに堰上流の底質中には河西橋と比較して、有機物が多く堆積していることがわかる。また、堰上流では植物プランクトンが多く堆積しており、このことから、停滞水域の形成により、光合成の活発化や粒子性物質の沈降が促進されていることがわかる。また、1月23日と8月26日を比較すると、1月の値が高いことから7月31日と8月5日のゲート開放 (アンダーフロー) により、底泥が除去されたと考えられる。

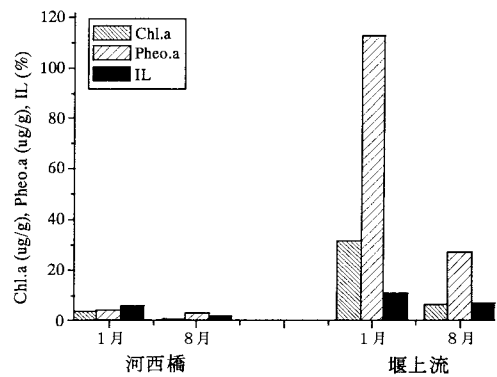


図-7 堰上流と河西橋における底質中の強熱減量、植物プランクトンの比較

5. 植物プランクトン調査の結果

(1) 植物プランクトンの時間変化

堰上流における植物プランクトン個体数の時間変化をみると (図-8 参照)、4~5月にかけてわずかに増加している。この時期の植物プランクトン種構成は珪藻プランクトン (*Navicula sp.*, *Cyclotella sp.*) がそのほとんどを占めている。また、7月2日から29日にかけて、植物プランクトン個体数が急激に増加している。ただし、種構成は、大きく変化しており、藍藻類 (*Merismopedia elegans*) が最も多く、8割を占めている。また、珪藻類以外に緑藻類 (*Cosmarium sp.*) も増加している。これらの種構成の変化は、一般的に水温の依存性による。

この結果の中で、最も注目すべき点は、観測期間中に大堰のゲート開放が行われたため (表-1 参照)、停滞していた水塊が流出し、Chl. aの減少と同様に植物プランクトン個体数が激減していることである。つまり、紀ノ川において河川と海域との物質輸送や栄養塩の形態変化を考える場合には、単純に河川から海域への変化ではなく、停滞水域の形成による一時的な栄養塩・有機態構成の変化を考えることが重要である結果が示された。また、河西橋では、大堰とほぼ同様の变化傾向を示してい

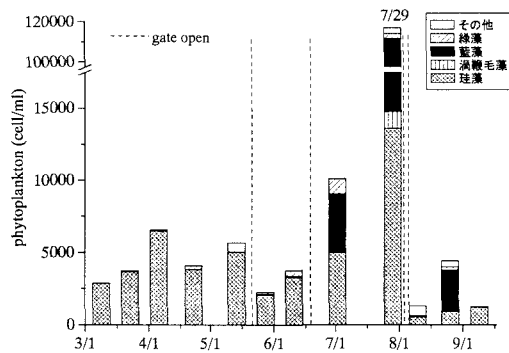


図-8 紀ノ川大堰上流の上層における各種別毎の植物プランクトン個体数の時間変化

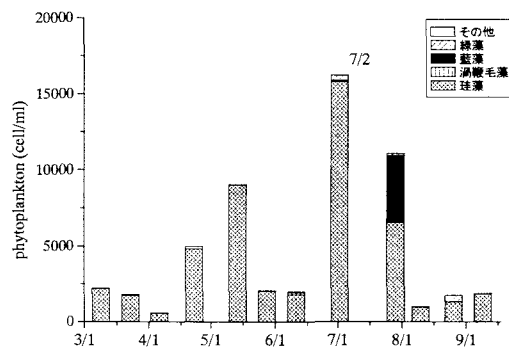


図-9 河西橋の上層における各種別毎の植物プランクトン個体数の時間変化

るが(図-9 参照), 7月2日の植物プランクトン増加に対しては珪藻プランクトンの占める割合が高いことが分かる。また, 河西橋の上層においては堰上流と同じ種類の植物プランクトンが観察されたが, 下層においては, 一部に海洋性の植物プランクトンが観察された。

(2) 堰上流におけるDSi濃度と珪藻プランクトンとの関係

図-10 は堰上流におけるDSi濃度と珪藻プランクトンとの関係を示す。河口から約20 km上流の船戸地点における1年4ヶ月間(N=39)のDSi濃度の平均値(4.52 mg/l)⁸⁾と比較すると, 7月29日のDSi濃度は大きく減少している。紀ノ川におけるDSi濃度の平均値および出水がない状況を考えると, 珪藻プランクトン個体数が大きく増加した7月29日にDSi濃度が減少している結果は, DSiが珪藻プランクトンへ取り込まれたと考えることができる。一方, 4~5月にかけての珪藻プランクトンの増加時には, DSi濃度の特徴的な変化はみられなかった。

6. おわりに

本研究は, 冬季から夏季における紀ノ川河口の淡水域・汽水域における植物プランクトンを含む粒子性物質・栄養塩の変化特性を示した。その結果, 一時的な停

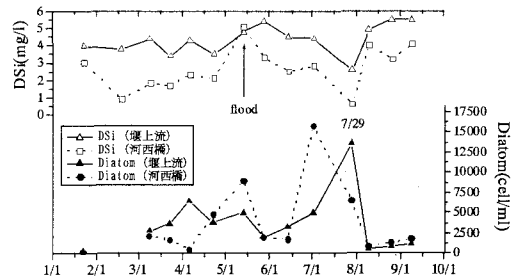


図-10 堰上流および河西橋の上層における珪藻プランクトン個体数と溶存ケイ素の時間変化

滞水域の形成により, 水中の物質は様々な形態に変化する結果を得た。このように, 有機物・植物プランクトン・窒素・リンの構成内容をより詳細に観測することで, 物質の収支や形態の変化をより詳しく理解することができる。さらには, 有機物の質の評価(難分解性有機物と易分解性有機物)などを調べることで, 生態系質への影響を考えることが可能となる。

謝辞: 紀ノ川大堰および河口域における現地調査には, 国土交通省和歌山河川国道事務所 和佐喜平様, 永野芳雄様, 吉安勇介様の協力をいただいた。また, 水質の分析には, 科学研究費補助金(若手(B), 15760380, 代表: 石塚正秀), および和歌山大学大学特別経費(代表: 石塚正秀)の援助を得たことを示す。

参考文献

- 1) IPCC. Climate Change and Biodiversity, edited by H., Gitay, A., Suárez, R. T., Watson, and D. J. Dokken, IPCC, Geneva, Switzerland, 85p., 2002.
- 2) Ittekkot, V.: Hydrological Alterations and Marine Biogeochemistry: A Silicate Issue?, BioScience, 50 (9), pp.776-782, 2000.
- 3) (社)日本水道協会: 上水試験方法, pp.565-566, 2001.
- 4) 気象庁 編: 海洋観測指針(第1部), pp.109-111, (財)気象業務支援センター, 1999.
- 5) 福代康夫: 地球環境調査計測事典, 第3巻 沿岸域編, 竹内均 監修, (株)フジ・テクノシステム, pp.463-464, 2003.
- 6) 鈴木昌弘: 河口域における懸濁粒子成分(SPM)の特性と沿岸海域に及ぼす影響, 2004年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, p.194, 2004.
- 7) 山崎真一・山下俊彦・渡邊康玄: 海域に供給される河川のSSに含まれるリンの形態別含有量に関する調査, 水工学論文集, 第47巻, pp.1273-1278, 2003.
- 8) 石塚正秀・紺野雅代・井伊博行・平田健正: 溶存ケイ素に着目した紀ノ川流域における水質特性, 水工学論文集, 第48巻, pp.1483-1488, 2004.

(2004.9.30 受付)