

参考資料4 汽水域における物理現象のとりまとめ

参考資料4 汽水域における物理現象のとりまとめ.....	4-1
1. とりまとめ方針	4-2
2. 一般的な知見の整理.....	4-3
3. 三河湾における知見の整理.....	4-27
4. まとめ.....	4-38

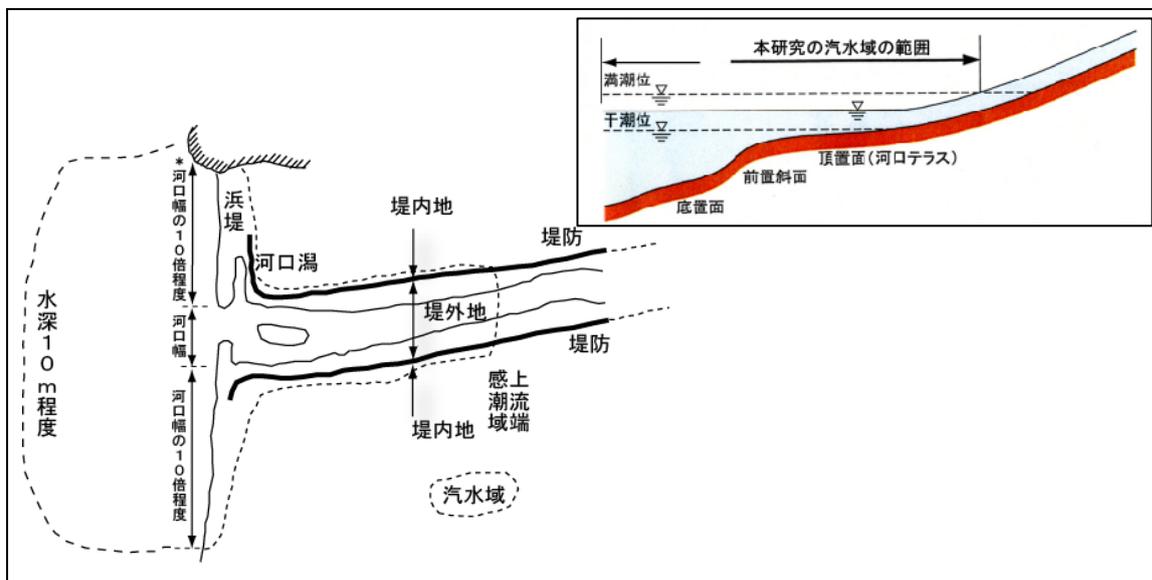
1. とりまとめ方針

河川と海の接点である汽水域は、性質の異なる水が混じり合うために密度流や物理化学的現象が複雑な上に、栄養塩が豊富であるために生物の一次生産が活発であり、栄養塩類の動態が複雑であることから、議論を避けてきた経緯がある。

一方では、河川水が汽水域を通過することによって栄養塩等が量的・質的に変化し、それが沿岸海域に供給されているものと考えられる。

そのため、ここではこれまでブラックボックスとして扱っていた汽水域を対象に、流域から沿岸海域への栄養塩類等の物質供給の観点から、流動・水質・細粒土砂に係わる現象に着目し、既往資料をもとに汽水域の一般的な知見を整理するとともに、三河湾の汽水域（矢作川、豊川）に関する知見について整理し、汽水域における栄養塩類等の物質供給の機構を検討した。

なお、ここで扱う『汽水域』は、「汽水域の河川環境の捉え方に関する手引書、平成16年5月、汽水域の河川環境の捉え方に関する検討会」に従い、汽水域を「縦断的には平常時の河川水位が満潮位と同程度の水位となる地点から河口の前置斜面まで、横断的には堤外地及び河口幅の数倍程度の沿岸」と定義する（図4.1参照）。



出典：「汽水域の河川環境の捉え方に関する手引書」（平成16年5月、汽水域の河川環境の捉え方に関する検討会）

図 4.1 河川汽水域の範囲のイメージ図

2. 一般的な知見の整理

既往資料をもとに、汽水域で生じている一般的な物理化学現象（流動、水質、細粒土砂の動態等）を整理し、流域から沿岸海域への栄養塩類等の物質供給の観点から重要なプロセスを抽出するとともに、汽水域における栄養塩類等の物質供給の機構図を作成した。

(a) 汽水域で生じている一般的な物理化学現象の整理

汽水域で生じている一般的な物理化学現象について、以下の観点から整理した。

- ① 河川汽水域における流れと塩分分布
- ② 河川汽水域および沿岸域における土砂の動態
 - ・ 汽水域および沿岸域における懸濁物質の沈降と再懸濁
 - ・ 河川汽水域における土砂の動態
 - ・ 沿岸域地形（干潟）の形成
- ③ その他汽水域に特徴的な生物・化学的現象
 - ・ 貧酸素水塊の発生
 - ・ 河川汽水域における生物生産
 - ・ 河川汽水域における浮遊藻類の発生
- ④ 汽水域における栄養塩類等の動態
 - ・ 河川からの栄養塩供給が汽水・沿岸域に与える影響
 - ・ 河川汽水域—沿岸域における栄養塩の存在形態と変化
 - ・ 底泥からの栄養塩の溶出
 - ・ 生物的窒素循環
 - ・ 汽水域、沿岸域における珪素の挙動

(1) 河川汽水域における流れと塩分分布

河川の汽水域では、海水の密度が河川水の密度より大きいため、潮汐により河川水（淡水）の下に海水（塩水）が潜り込み、表層の淡水は下流へ向かい底面付近の塩水は上流へ向かう、塩水遡上現象がみられる。この塩水遡上の状態は、潮汐や河川流量等によって時空間的に大きく変化し、塩分の鉛直分布・鉛直混合の違いから、弱混合型、緩混合型～強混合型に大別される(河川を軸とした底質移動による良好な生態系の保全施策に関する検討調査報告書)。(図4.2参照)

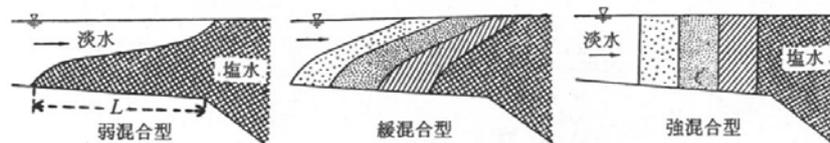


図 4.2 河川汽水域における塩分分布型

弱混合型は、淡水と海水の混合が弱く、密度の大きい塩水の上を密度の小さい淡水が滑るように流下し、二つの水層の間に塩分勾配の大きい界面が明瞭に現れるので、この界面近くの層は塩分躍層と称せられている。また、このような塩分分布では、塩水が川底沿いに楔状に遡上しているので、“塩水楔型”と称せられていることが多い。強混合型は、鉛直方向に十分に混合されて塩分は一様になり、等塩分線は鉛直になって塩分勾配は水平方向にのみ存在する。上記2型に対して、緩混合型は両者の中間的な混合状態で、等塩分線は斜めに傾き、塩分勾配は水平、鉛直の両方向に存在する(西條ら,1996)。

また、このうち弱、緩混合型で形成される塩水楔の中の流れは、上層の淡水の流れに対して非常に弱い。詳しく見ると、下流近くでは図4.3に示すような鉛直循環流が存在する。これは、楔内塩水の上層が下流向きに引きずり込まれたり、下層の塩水が界面を通過して上層の淡水に取り込まれたりするために、これを補うように河口から塩水が下層を通じて遡上する流れが起きるためである。このような、二つの接触する流体のうち的一方が他方へ取り込まれる現象を“連行現象”と称するが、この現象のために、楔の上の層の塩分濃度も下流にゆくにつれ、少しずつ増大してくる。また、強混合状態においては、鉛直方向に密度勾配がほとんどないために、鉛直循環流はほとんど生じない。

弱混合型は、混合作用をもたらす潮汐流が弱く、また上層の淡水の厚みがある程度厚い河川流量の大きな河川に出現しやすく、日本海に流出する河川は、潮位変動が小さいので弱混合となりやすい(栗原ら,1988)。また、夏季も淡水の水温が高くなり、弱混合になりやすい。それに対し、強混合型は潮汐流の強い河川に出現しやすく、有明海や瀬戸内海など、潮汐差が大きい地域に多いほか、淡水の水温が低下し、海水との密度差が小さくなる冬季にも強混合型が形成されやすい。

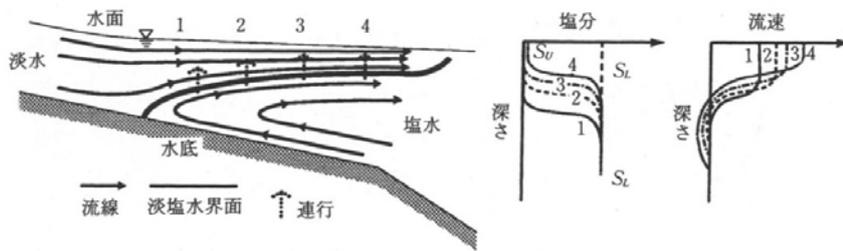


図 4.3 弱混合型水域での塩分分布と流速分布

(2) 河川汽水域および沿岸域における土砂の動態

(i) 汽水域および沿岸域における懸濁物質の沈降と再懸濁

鎌谷ら(1990)によれば、河川から運び込まれる多くの懸濁物質は、河口域から沿岸域にかけて沈積し(~92%)、大陸棚以遠まで運ばれる量はごく少ない(~8%)。河川中を流下してくる浮遊性の懸濁物質は極めて小さく(数 μm)、有機物、粘土鉱物複合体、腐植物質はそれぞれ荷電を持ち粒子間に斥力が働くため、コロイドで存在し、沈降速度は無視しえるほど小さく、常に浮遊状態にある。しかし、汽水域でこの懸濁粒子が海水中の大量の陽イオン(Na^+ 、 Mg^+)と接触すると、凝集作用により粒径が急激に大きくなり、沈降速度を増して堆積する。

水底に堆積した粒子は、底に接する水によるせん断応力が堆積粒子間のせん断強度を超えた場合に移動(巻き上げ、再懸濁等)を始める。汽水における堆積粒子間のせん断強度は、圧密の状態、間隙水のイオンによるコロイドの作用等、多くの因子によって影響を受け、海水や淡水とは異なる条件が作用する。

特に、前述のとおりフロックを作って堆積した粒子に関しては、圧密を受ける前の段階では、水底の流速勾配の大きい条件下で、フロックが大きなせん断応力を受けると、フロックが破壊されて再び懸濁し、さらに塩水に触れると再び沈降するという機構を有している。(図 4.4参照)

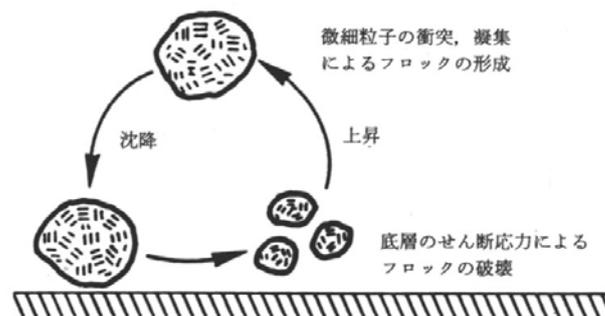


図 4.4 水底近くでのフロックの破壊と形成

(ii) 河川汽水域における土砂の動態

感潮河川における懸濁粒子の分布に関する顕著な特徴の一つは、Turbidity Maximum（濁度最大域、高濁度域）と称される領域が塩水遡上の上限近くに出現することである。この高濁度域は塩水の遡上が成層化した状態で起こり、鉛直循環流の生じる弱、または緩混合型の塩分分布の感潮河川に一般的に出現する。

高濁度域の形成は、特に平水時の微細懸濁粒子の挙動によるもので、要因は大きく二つある。一つは前述の微細懸濁物質の凝集による沈降速度の増大であり、塩水楔上端への土砂の堆積を生じさせる。二つ目は、河川における下げ潮時の輸送量に対する、上げ潮時の上流方向への輸送量の卓越であり、塩水楔の先端よりも下流の地点に一度堆積した微細懸濁粒子を上流へ運搬する。これは、河川汽水域では、上げ潮時の水位上昇が下げ潮時の降下よりも速く、上げ潮時の平均流速が下げ潮時よりも大きく、非対称性を呈する機会が多いことと、弱、緩混合型で形成される鉛直循環流が、上げ潮時と下げ潮時の非対称性を助長することが影響している。（図 4.5参照）

それに対して、出水時に上流から運ばれてくる粗い粒子は凝集作用を受けにくく、そのまま河口に出ることが多い。その結果、河川汽水域での底質の分布は、塩水遡上の上限あたりに細かい泥がたまり、河口に行くに従ってしだいに粒径が大きくなり、最下流に洗い砂が堆積しているのが一般的である。しかし大きな出水があると、平水時の堆積物が一挙に押し流され、その後出水末期に細かい鉍物性粒子が堆積し、出水前と全く変わっていることが多い(西條ら,1996)。

また、鉛直循環流に乗って滑動、跳躍を始めた粒子のうち、全てが塩水楔の上端付近に沈降するわけではなく、一部はそのまま鉛直循環流に乗るか、連行現象によって躍層よりも上層に取り込まれ、再び海域方向へ移動するものもある。これは量的には大きくないが、微細懸濁物質に溶存態の栄養塩類等が吸着することを考えると、今後検討の必要性が生じる可能性がある。

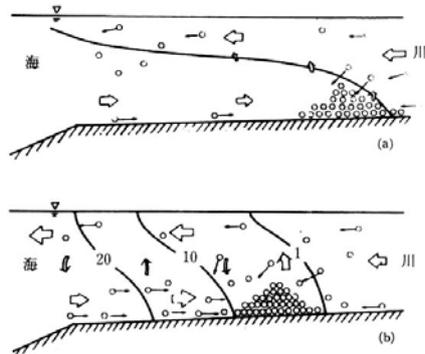
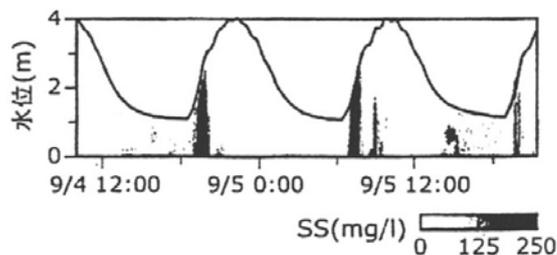


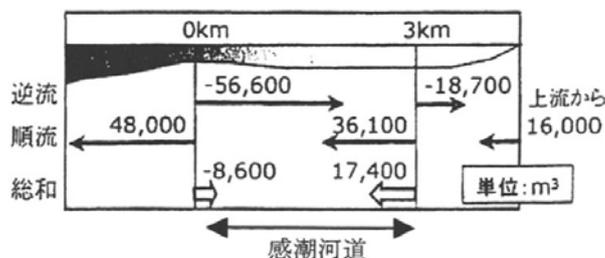
図 4.5 Turbidity Maximum 出現の機構

横山ら(2003)は、熊本県白川河口干潟において現地調査を行い、干潮河道における浮遊砂の土砂収支を検討している。(図 4.6参照)

その結果、上げ潮による濁水の逆流が卓越しているために、トータルでは河道内に 2.6 万 m³ のシルト・粘土が堆積していた。これは 1 年確率の小規模洪水による土砂量に相当しており、平水時のわずかな浮遊砂の移動も年間を通じて見ると無視し得ない移動量であるとしている。



感潮河道での濁水流動(河口から3km)



感潮河道における浮遊砂の年間通過量(洪水期を除く)

図 4.6 感潮河道における濁水流動と浮遊砂の年間通過量

(iii) 沿岸域地形（干潟）の形成

沿岸域の地形、特に干潟などの浅場は河川が供給し、沿岸域で沈積する土砂によって形成される。洪水時、河口から吐き出された土砂は河口前面に堆積する。この吐き出された土砂のうち、主モードのものは流速の遅くなる滞筋部下流に堆積し、1モード小さい細砂はその周辺、もしくは滞筋先端に堆積する。シルト・粘土の大部分はさらに沖まで運ばれてしまうが、一部は滞筋周辺に堆積する。堆積した中・細い砂は波により再移動し平坦化し、砂干潟が形成される。この際、内湾では波高が潮位差よりも低いため、波のエネルギーは集中せず、広範囲に伝わる。砂土砂は洪水による土砂の分級堆積、波による土砂の分級堆積、潮位変動による波の集中の会費と潮汐流による土砂の移動堆積との微妙なバランスの上に存在している。

このうえで、さらに潮位変動に比べ波高が小さくなると、潮汐流によって細粒物質が陸側へ輸送され、シルト・粘土の湾奥への移動集中が起こり、泥干潟が形成される(河川汽水域の水環境と生物環境に関する研究)。

このため供給される土砂の質や量が変化すると、汀線後退、砂浜勾配の変化、粒径の変化など海岸地形の変化が起こる(辻本ら(2003))。熊本県の白川河口域では3~4年確率の洪水の発生により、砂に替わってシルト粘土の堆積が多く見られ、また滞筋や周辺高地で地形が前進するなど、地形や底質の変化が見られた。(図 4.7)

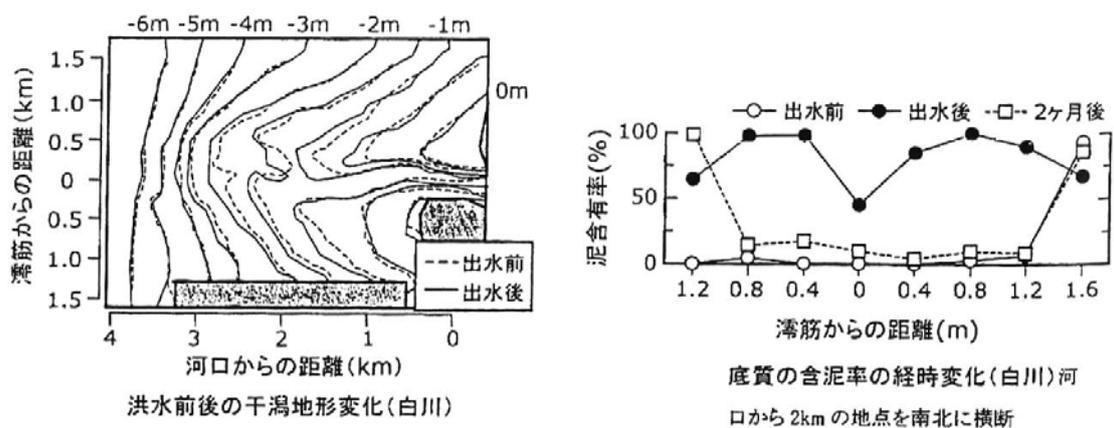


図 4.7 洪水による土砂供給で変化した干潟の地形・地質

(3) その他汽水域に特徴的な生物・化学的現象

(i) 貧酸素水塊の発生

河川汽水域では、コロイド状で存在していた懸濁態有機物が、フロックを形成して河床に堆積する。この堆積量が多いと、これを微生物や底生動物が消費することによって酸素が消費され、貧酸素水塊が生じる。特に河口潮位の変動が小さい弱、緩混合型の河川では塩水楔が発達し、上・下層の酸素等の物質交換が著しく減少する。このとき、栄養塩濃度の高い河川水流入の多い河川では、有機物やアンモニア・亜硝酸性窒素などが微生物により酸化されるため、下層で急激に酸素が消費され、このため貧酸素水塊が形成される。溶存酸素が無くなると、海水中に多量に含まれている硫酸イオンが硫酸還元菌により還元されて硫化水素が発生する。このような状況下では底生動物が死滅するなどの影響を受ける。

また、下層に貧酸素水塊が形成された状態で表層水が強風などで一方の岸に押しやられると、それを補うように下層の貧酸素水塊表層に湧昇する。この中の硫化水素が空気に接すると硫黄コロイドができ、光を散乱させて青みがかかった色を呈するため、青潮と呼ばれる現象が生じる。

湖沼、内湾などにおける、底質による DO 消費については、多くの研究例があるが、そのうち物理的な影響に関する検討は底泥の巻き上げに関するものがほとんどであった。しかし、巻き上げがない条件下でも、界面直上の流れが DO 消費を一桁以上増加させるとの報告がある。これを中村(1993)は、界面直上に濃度境界層が形成され、そこでの拡散輸送が DO 消費を支配すると考え、理論的に説明している。また、山室らは疑似実験により、堆積物直上の流速が DO 消費速度（ならびにリン溶出速度）を考える上で無視できないことを示した(西條ら(1996))。

(ii) 河川汽水域における生物生産

河川汽水域では、一次生産が他の水域より高い(Nixon,S.W.(1988))。(

図 4.8参照) これは、一次生産に必要な窒素やリンといった栄養塩等が集積する場であることが主な要因である。また、水中にある懸濁物質を摂食する生物(懸濁物食者)にとっては、汽水域内で生産された一次生産物だけではなく、河川や海から供給される有機懸濁物質も餌として利用でき、これら懸濁物食者が摂取した有機物の一部は分解、排泄されることで、有機物も栄養塩に回帰し、再び一次生産者に利用される。このように汽水域では物理的な結合によって、一次生産者および二次生産者の高い生産能力が維持される。また、その他にも、河口は一般的に浅く、鉛直混合が活発であるため、堆積物から溶出する栄養塩が植物プランクトンの存在する表層部に運搬されやすいことも、一次生産を高める要因となっている。

このような汽水域の一次生産は、同じ汽水域を利用するより高次の捕食者の餌を供給する役割として重要である。アメリカ合衆国やオーストラリア南東部では、魚介類の水揚げ量のうち半分以上が、海と淡水域を回遊する魚類や、成長段階で汽水域を利用する魚類であるとされ(河川感潮域 p115)、汽水域は水産学上、重要な位置づけにある。

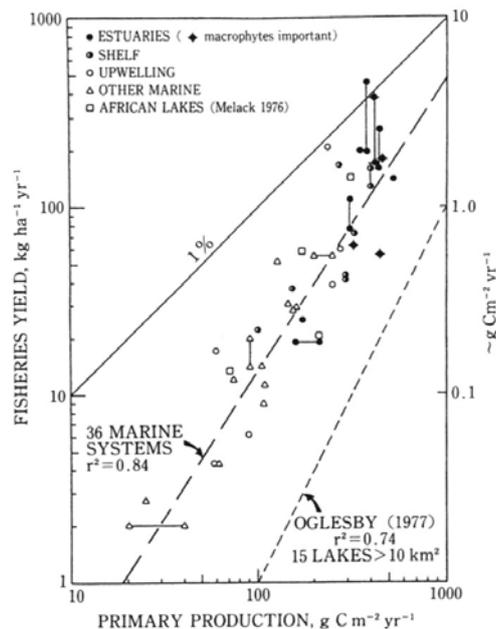


図 4.8 淡水～海水の様々な水域における単位面積あたりの年間漁獲量と一次生産量との関係

(iii) 河川汽水域における浮遊藻類の発生

通常、浮遊藻類は、準備期、対数増殖期という過程をもって増殖するため、増殖にはある一定の日数が必要である。特に河川棲の浮遊藻類の場合、汽水域まで流下するとその塩分濃度から、生息が不可能となるため、発生から汽水域に到達するまでの滞留時間が重要となるが、我が国の河川は流下距離が短く、河床勾配が大きいいため、一般的に河川棲の浮遊藻類は増殖しづらい環境にあると言われる。

しかし、河川汽水域では、夏季等、流量が低下した場合、滞留時間が長くなり、河川棲の浮遊藻類が発生することがあり、長良川をはじめ、雄物川や最上川などで、河川棲と見なすことのできる浮遊藻類が確認されている。

さらに、河口堰が建設された場合、これが流れを遮り、堰上流には湛水域が生じ、滞留時間を長くする働きをし、芦田川（広島県）や遠賀川（福岡県）等の一部の堰では、浮遊藻類が多く発生する。元来、河川の河口近くの水域は前述のとおり、栄養塩類が集積する場であることから、一次生産のポテンシャルは高い場であるうえに、河口堰による湛水域では湖沼棲ではなく河川棲と判断される浮遊藻類が発生するため、完全な止水域が形成されなくても特異的に藻類が増殖する。さらに、この浮遊藻類は、死滅、堆積した後、溶存酸素の消費や栄養塩などの回帰といった問題を引き起こし、河川でありながら富栄養化の様子を示すことがある。

(4) 汽水域における栄養塩類等の動態

(i) 河川からの栄養塩供給が汽水・沿岸域に与える影響

河川では上流から、岩石の化学的風化である SiO_2^- 、 Na^+ 、 K^+ などや土壌からの NO_3^- 、 PO_4^{3-} が、大気から HCO_3^- など、さらに樹木や草本類の幹・枝・葉の分解物質であるフミン質（腐植物質）と土砂が流れ込み、そこに都市排水のような人間活動に由来する難分解性化学物質、有機物、病原性微生物などが排出される。そのため一般に、河川の栄養塩類の濃度は海域の濃度と比べ高く、河川は栄養塩類の供給源として重要となっている。

斉藤(1984)はノリ漁場の定点観測より、流入する河川流量が約 $7\text{m}^3/\text{sec}$ 以下では良質なノリの全無機窒素濃度の要求量 $7\sim 8\mu\text{g}/\text{L}$ に不足する場合が過半数を占めること、また、ノリ漁場の定点と沖合表層との全無機窒素濃度の差から、河川流量が減少するにつれて河川からの窒素の供給が減少し、ほぼ $4\text{m}^3/\text{sec}$ 以下で河川水による窒素の供給が定点まで届かなくなることといった河川流量と窒素の定量的な関係を示した。(図 4.9 参照)

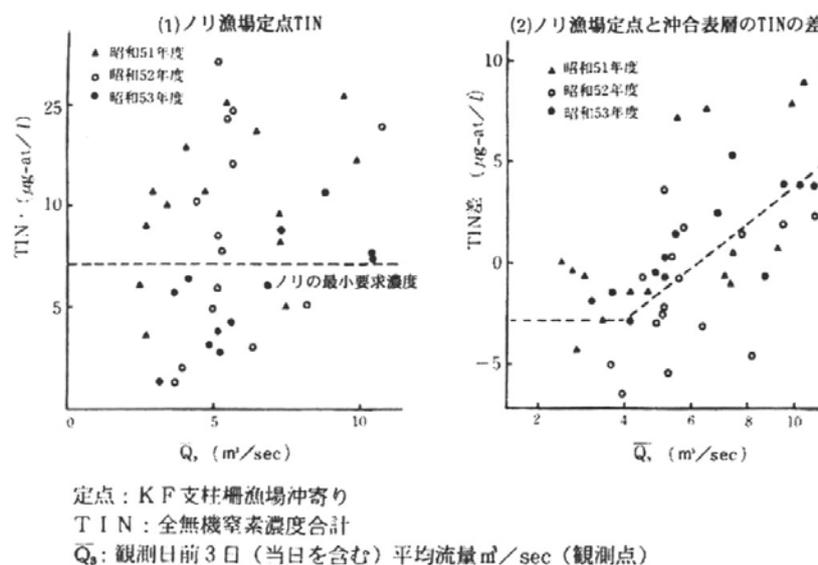


図 4.9 河川が流入する海域におけるノリ漁場定点の窒素濃度

宮城県沖を対象にしたシミュレーションモデルでは、陸水による負荷（窒素、リン、有機物）と河川水に溶存する酸素の海域への供給が無くなると、岸沖30kmまでの範囲で植物プランクトンの現存量が夏季に6%、冬季に1%減少し、それに伴って動物プランクトンも夏季に約15%、冬季に約0.5%減少するとの結果が得られている(海と渚環境美化推進機構(1998))。(表4.1参照)

表 4.1 宮城県沖を対象にしたシミュレーション結果

季節	項目	植物プランクトン (ton C)			動物プランクトン (ton C)		
		水深	現況再現	負荷ゼロ	陸水寄与率 (%)	現況再現	負荷ゼロ
夏季	0-5m	183.35	130.86	28.63	75.27	49.64	34.05
	0-20m	895.43	810.15	9.52	342.60	285.52	16.66
	0-50m	1118.45	1043.00	6.75	367.07	309.69	15.63
	全水深	1141.70	1066.67	6.57	393.00	335.62	14.60
冬季	0-5m	1211.40	1185.29	2.16	15.12	14.88	1.59
	0-20m	2113.78	2080.99	1.55	32.04	31.66	1.19
	0-50m	2313.73	2280.39	1.44	42.43	42.02	0.97
	全水深	2852.15	2818.54	1.18	89.48	89.05	0.48

注1) 有光層は現地調査によれば、夏季は約50m、冬季は約30mである。
 注2) 対象海域の面積は岸沖30km、南北45kmの1300km²である。
 注3) 陸水寄与率は(現況再現-負荷ゼロ) / 現況再現×100より求めた。
 注4) 流入負荷としては窒素、リン、有機物、溶存酸素を計算対象とした。

芳村らは、噴火湾において流入する河川の栄養塩濃度を調査し、供給される栄養塩が湾内生産にどの程度寄与しているのかを検討している。噴火湾では、雪解け時の4月に負荷量が特異的に高く、明瞭な季節変化を示していた。また、河川からの栄養塩負荷量が噴火湾の基礎生産に与える影響について検討した結果では、総生産に占める割合は小さいものの、夏季だけで見ると新生産に対し、河川からの負荷がその1割程度寄与していると考察している(芳村ら(2003))。(表4.2参照)

表 4.2 噴火湾に流入する栄養塩負荷量の変化

	単位 kmol/day				
	TN	TP	DIN	PO ₄	SiO ₂
1998年5月1日	200	3.6	150	1.9	2600
1998年5月19日	250	6.6	160	2.9	2600
1998年6月12日	92	2.4	55	0.61	1200
1998年6月14日	130	3.2	110	1.3	1500
1999年3月18日	170	2.7	140	1.1	1300
1999年4月15日	1000	24.3	860	9.1	5900
1999年4月27日	410	9.1	350	3.5	3300

このように、沿岸の生物生産は陸からの栄養塩供給の影響を強く受けるというのが一般的な認識であるが、外洋からの栄養塩供給も決して小さなものではない。武岡ら(2002)は、閉鎖的で外洋からの影響が小さいと思われる瀬戸内海において、河川紀元と外洋起源の窒素およびリンの量を算出し、窒素では9割弱、リンでは7割強が外洋起源という結果を得た。(表 4.3参照)

表 4.3 瀬戸内海の河川起源と外洋起源の N,P 量

	柳(1977)	広大のデータ 橋本他(1996)から計算
瀬戸内海のNのstock	17.8	14.7
外洋起源のN	6.2	13.0
河川起源のN	11.6	1.7
瀬戸内海のPのstock	2.04	1.49
外洋起源のP	1.14	1.10
河川起源のP	0.88	0.39

宮城県七北田川河口域の平水時と出水時の水質の縦断分布図を示す。河川水は海水よりも PO_4^{3-} 、 NO_4^- 、 NH_4^+ などの無機栄養塩が高い。 NO_4^- は上流よりも河口に至る全ての点において激減し、しかも上層、下層ともに上流から河口出口にかけて同じ値を維持している。このことは NO_4^- が河口域で生成または消費されることなく、河川水に乗って海へ吐き出されることを意味している。 PO_4^{3-} 、 NH_4^+ は上層の河川水では全域にわたってその濃度は変化せず、海水の上を河川水に乗って運ばれる。

(ii) 河川汽水域—沿岸域における栄養塩の存在形態と変化

河川汽水域および河口沿岸域は水質の変化に関するホットスポットと呼ばれ、窒素およびリンは、化学的、生物化学的な変化によりその形態を変化させる。河川汽水域では海水と淡水が混じることにより懸濁物が河口部に沈降し、河口部に沈降した懸濁物は潮汐作用により沈降・堆積を繰り返す浮泥となる。この時、リンをはじめとする栄養塩類や、電解質溶液中でフロックを作ることが知られる腐植物質、河川水中で一部金属とキレート化合物を作る溶存有機物等も、フロックの生成時に粒子に取り込まれたり、吸着したりして同じ挙動をとる(N.P.RevsVech,B.B.Jo φ rgensen(1980))ことがある。

橘らの試験地河川の水質調査によると、土砂の流出しやすい小川はSS濃度もPP濃度もともに高く、SSにリンが吸着したことに起因するとしている。また、栄養塩類の季節変動では、小川、試験地河川ともに融雪期の栄養塩濃度が高く、これは冬季間森林土壌内で蓄積された栄養塩が融雪水に洗い出されるためと考察している(橘(1993))。(図 4.10参照)

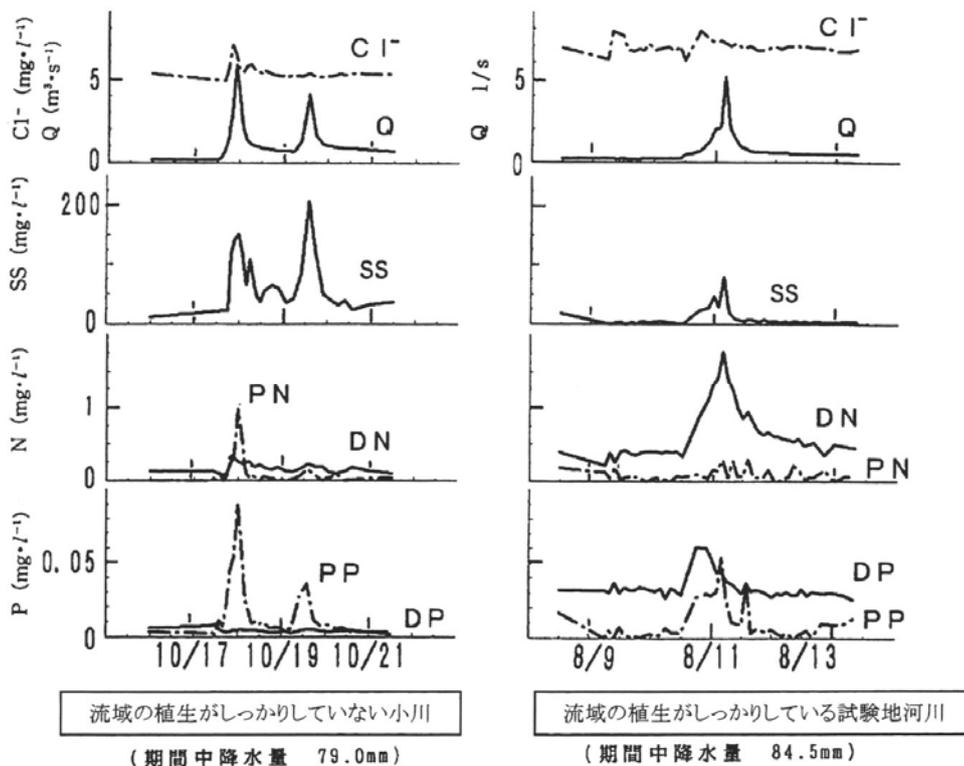


図 4.10 小川と試験地河川における出水時の水質変化

山下らは、窒素及びリンが、どのような形態で海域へ供給されるかを北海道の鵒川の融雪期調査から検討している。その結果、出水時にはSSの濃度増加に合わせる形で粒子性総窒素と粒子性総リンの濃度が増加し、栄養塩は主にSSに吸着した形で輸送されていると考察している。また、鵒川では、溶存性窒素は出水時、平水時とに関わらず濃度はほぼ一定であり、溶解性リンは出水時の全リン濃度に対してかなり低い濃度であることを述べている(山崎ら(2002)b, 山下ら(2001))。(図 4.11参照)

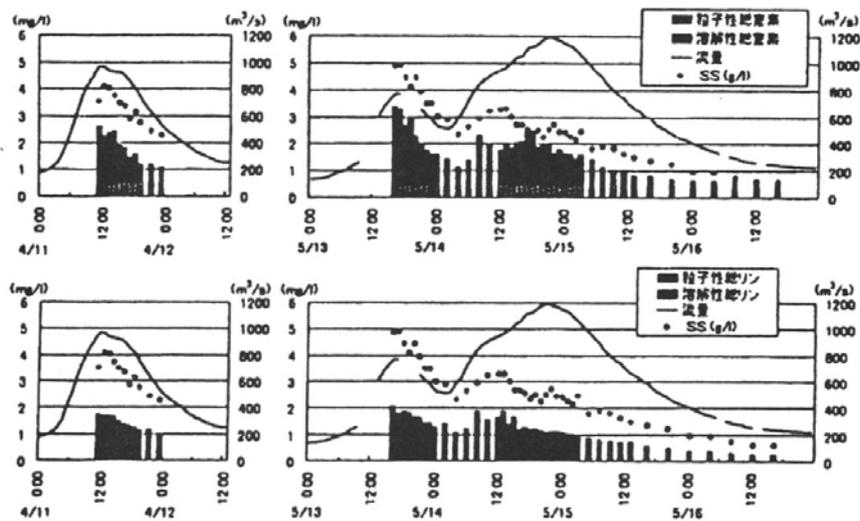
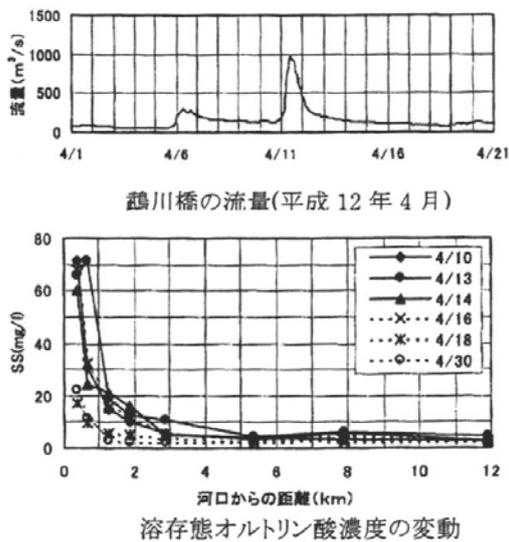


図 4.11 鵒川河口における出水時の窒素、リン、SS 濃度の経時変化

山下ら(2002)は、北海道の石狩川で融雪出水期に現地調査を行った結果、窒素は多くが溶解性、リンは大部分が粒子性であることを示した。

また、新目ら(1999)は、北海道の鵲川において出水時に調査を行った結果、栄養塩類である窒素・リンの輸送には出水時は懸濁態窒素・懸濁態リンが大きく関与しているとしている。

山崎ら(1999)は、鵲川における調査から、出水時のSS中に含まれる循環可能な形態であるFe-P（無機態リンと鉄が結合したリン酸塩）、Ads-P（好気状態での海域における無機態の懸濁態リンの溶出可能量）、Org-P（有機態リン）はリン含有量全体の60%以上を占めること、リンの含有量は粒径が小さくなるに従い大きくなる傾向があり、その原因は吸着性のリン含有量の増加にあることを示した。（図 4.12参照）



平成 12 年 4 月 11 日の融雪洪水の鵲川橋のデータ

項目	単位	数量
総流出水量	m ³	0.94 × 10 ⁹
総流出SS量	t	1.53 × 10 ⁶
P-PO ₄ -P	平均含有量	mg/g
	総流出量	t
P-Org-P	平均含有量	mg/g
	総流出量	t
D-PO ₄ -P	平均濃度	mg/l
	総流出量	t
D-Org-P	平均濃度	mg/l
	総流出量	t

鵲川の SS の懸濁態リンの形態別含有量

採取時期	総リン含有量 (mg/g)	有機態含有量 (mg/g)	無機態含有量 (mg/g)	無機態リンの内訳			
				Ca-P (mg/g)	Al-P (mg/g)	Fe-P (mg/g)	Ads-P (mg/g)
平成 12 年融雪出水	0.43	0.17	0.26				
平成 13 年夏期出水	0.56	0.17	0.39	0.150	0.038	0.160	0.036
		30%	70%	40%	10%	41%	9%

註) Ca-P Al-P Fe-P Ads-P の比率の百分率は無機態含有量

図 4.12 鵲川における河川の SS に含まれるリンの形態別含有量

さらに山崎ら(2003)b は、鵜川において河川からの栄養塩の大部分がSSに吸着した形で流出され、沿岸域で沈降、拡散、再移動を繰り返し、河口から10km以上の広い沿岸域の底質環境に大きな影響を与えていると指摘した。

また、山崎ら(2003)b は、鵜川において行った河川から供給された物質の河口沿岸域環境への影響に関する研究において、塩分濃度が高い方がクロロフィルaが高い理由を、栄養塩が供給された出水後に藻類が増殖したことが一つの要因であると考察した。

また、田中ら(2003)は全国の主要な河川での調査から、いずれの河川においても平均的には有機態リンの割合は50%以下で、無機態リンのうち沿岸域で溶出・循環するCDB-P（海域で循環可能な溶出リン）の割合は大河川で高く、全リンの50%以上を占めているとした。（図 4.13参照）

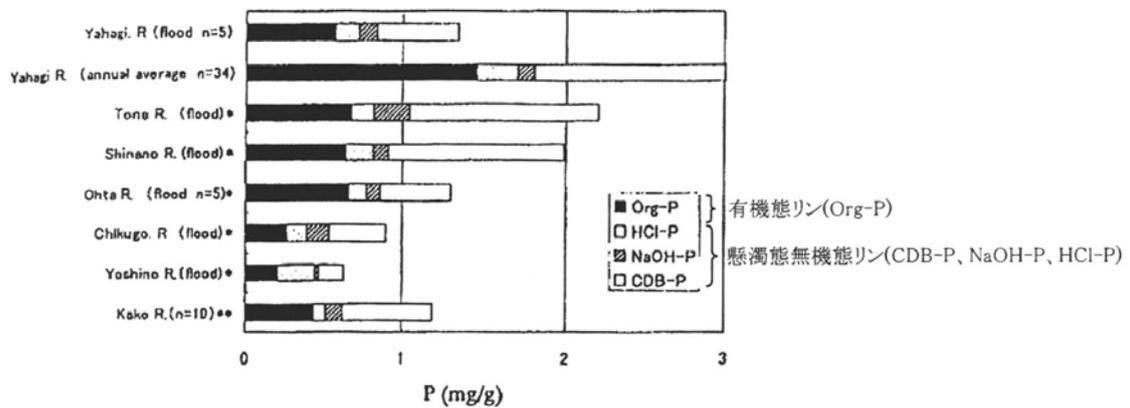


図 4.13 出水時の全国の主要な河川懸濁物の形態別リン組成

(iii) 底泥からの栄養塩の溶出

水深の浅い沿岸域では堆積物から栄養塩の溶出が水圏の富栄養化を進行させる要因であることが以前から指摘されてきた。底泥表面において高濃度に蓄積・濃縮された有機物は底生生物によって分解・無機化される。これにより生成された栄養塩は間隙水を通じて底層水に溶出し、鉛直拡散や攪乱混合によって有光層まで運ばれて再び植物プランクトンに利用される。

特にリンに関して、河口部に沈降した河川懸濁物は潮汐作用により沈降・堆積を繰り返す浮泥となり、好氣的な干潟や沿岸域では浮泥のリン酸吸着平衡作用により溶存リン酸濃度の調整・安定化に寄与し、沿岸域の高い生産性を支えている。一方、貧酸素水塊が発達する場では、沈降・堆積した懸濁物質に吸着したり、無機の化合物となっていたリン酸が、貧酸素な環境下で一挙にリンが溶出し、再び藻類等に吸収されることで、赤潮や貧酸素化を発生させやすくなる。

川津ら(1983)は、海域から汽水域にかけての塩分と溶存酸素の変化が栄養塩の溶出に与える影響についての室内試験から、総無機態窒素は好気条件よりも嫌気条件の方が溶出しやすく、Cl⁻濃度が高いほど溶出量が多いこと、リン酸態リンについてはCl⁻の影響は無いが、嫌気条件下では急激な溶出が起ることを示した。(図 4.14参照)

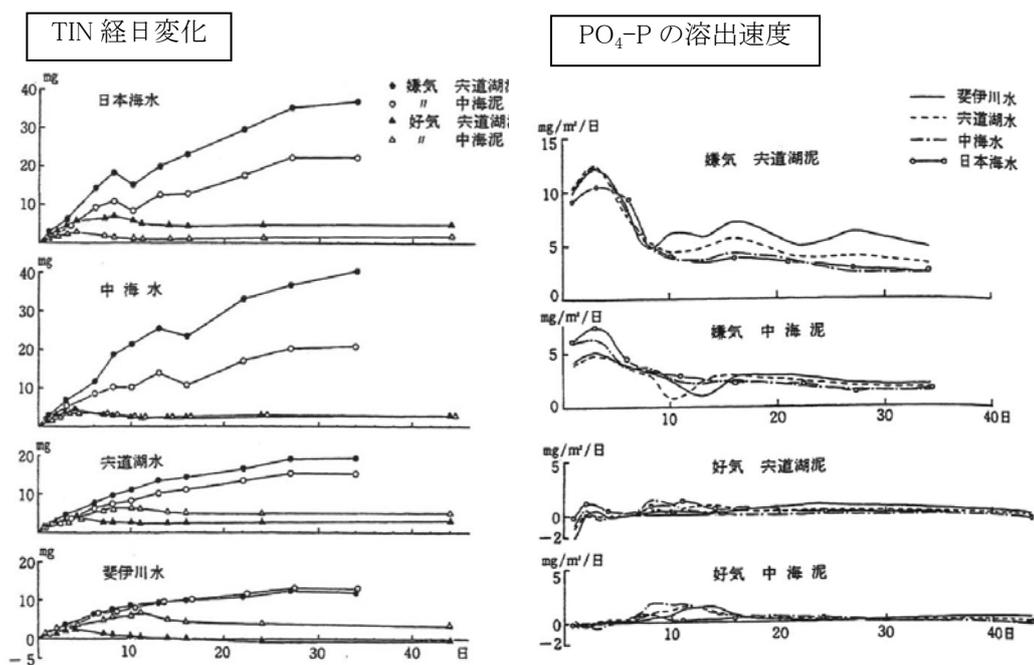


図 4.14 TIN の増減量経日変化および PO₄-P の溶出速度

田中ら(2003)は、出水時に土壌から流出するリンが沿岸環境に与える影響について安定同位体比から検討した結果、湾奥部では河口から遠ざかるにつれて河川起源土壌懸濁物の影響が減少し、沖合域にはほとんど陸上起源有機物の影響は認められないこと、また、表層泥のCDB-P濃度の高い河川起源懸濁物が河川汽水域から河口周辺で急速に凝集・沈降することを示している。(図 4.15参照)

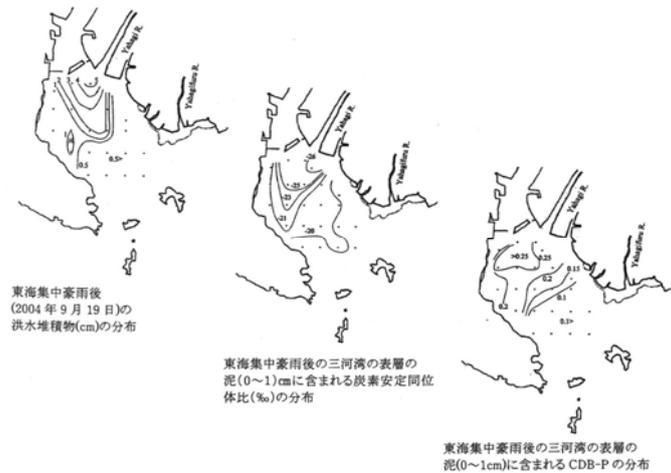


図 4.15 河川起源懸濁物の堆積厚分布 (左図)、炭素安定同位対比分布 (中図)、表層泥の CDB-P 濃度分布 (右図)

河口に河口堰が存在する場合、堆積物からの栄養塩、特にリンの供給が藻類の発生を増加させる可能性が指摘されている。旧吉野川河口堰及び今切川河口堰での堰湛水における観測によれば、夏季に表層水のリンの濃度が上流部と比較して増加する傾向にあった。また、その時期の藻類の現存量が、上流部から供給されるリン濃度から予測される量を大きく超えており、底泥の巻き上げか、底泥からの溶出により表層水にリンが供給されているものと考えられる。(図 4.16参照)

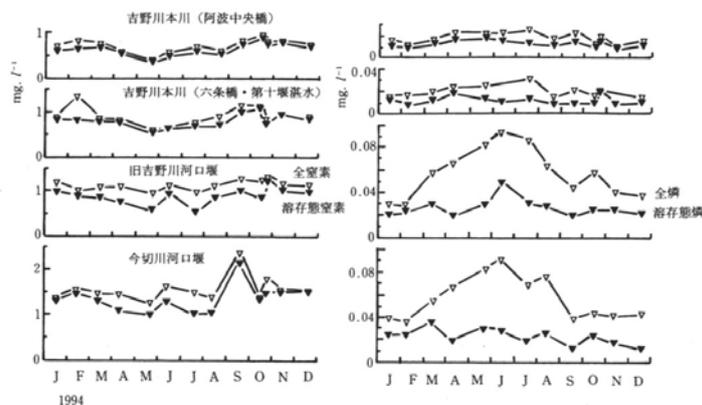


図 4.16 吉野川水系の栄養塩濃度の変動

(iv) 生物的窒素循環

底泥の表層部にデトリタスとして堆積しているPONは微生物、底生生物によりDONに変換され、さらにアンモニア態窒素にまで無機化される。アンモニア態窒素の一部は酸化的な条件下でアンモニア酸化細菌により亜硝酸態窒素に酸化され、さらにその一部は亜硝酸酸化細菌により硝酸態窒素に酸化される。また、嫌氣的な条件下では亜硝酸態窒素の一部は脱窒細菌により亜酸化窒素や窒素まで還元される(佐山ら)。有機物が生物によって酸化分解されると、 PO_4^{3-} と NH_4^+ が増加し、溶存酸素が減少する。(図 4.17参照)

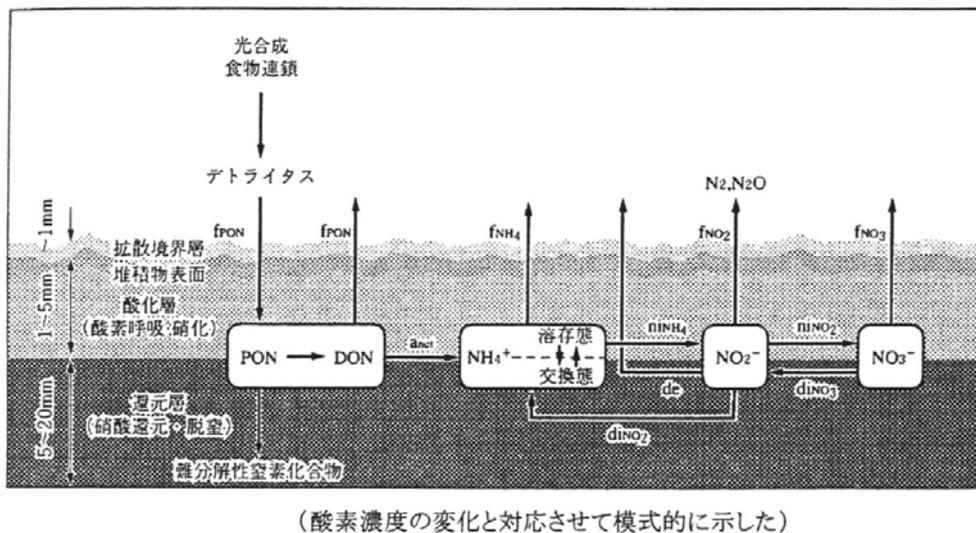


図 4.17 底泥表層における窒素循環過程

主要な脱窒菌細菌は嫌氣的環境を、アンモニア酸化細菌および亜硝酸酸化細菌は好氣的環境を好む。従って、有機物に富む堆積物において、硝化と脱窒が同時に行われ、高い脱窒速度が維持されるためには、少なくとも底層水が貧酸素化しない程度の酸化的な環境であることが必要となる。このとき、干潟の底泥は酸素の供給が制限されているために、上層の酸化層と下層に還元層に分化していることが多く、特に干潟では表層付近が好氣的となり、より深い堆積物中は嫌氣的になるため、高い脱窒値が得られるとされている。

一般に河川や地下水から供給される栄養塩としての窒素は硝酸態であることから、栄養塩負荷が増えるほど脱窒速度も大きくなると考えられ、河川汽水域の一種であるエスチュアリーや内湾のデータでは、流入負荷量の絶対値に関わらず、負荷量のほぼ50%が脱窒によって除去されている。

しかしながら、東京湾における窒素の収支で見ると、流入した窒素の4%が堆積物中に未分解のまま埋没し、残りは直接あるいは堆積物の無機化を經由しての湾外への流出で、脱窒は総流出量のわずか2%しか占めていない。

河川水と海水が混合する場における化学物質や粒子の挙動を解析する手段として、保存性成分である塩分を横軸に、対象物質を縦軸にとってその関係を表す混合曲線が用いられる。この混合曲線では、直線関係が成立する場合、対象物質は混合によってのみ濃度変化し、他の要因で減少する成分は下に凸、増加する成分は上に凸の曲線を描く。これを $\text{NH}_4^+\text{-N}$ と NO_2^-N 、 NO_3^-N で行うと、塩分が0~2g/lで $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の急激な減少、 NO_2^-N 、 NO_3^-N の増加が認められ、この区間で活発に硝化が起こっていることを意味している。通常河川では、アンモニアが高濃度で存在しないこと、硝化細菌が流水系では存在しづらく、河床底泥表面に存在する硝化細菌との接触が起こりにくいため、硝化は起こりづらいとされるが、感潮河川では懸濁物質が高濃度に存在し、その表面に硝化細菌が多数付着していることが原因と考えられる(楠田哲也(1990))。(図 4.18参照)

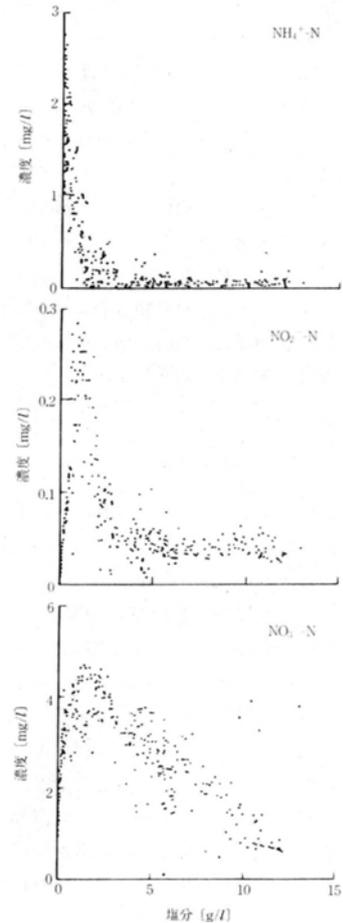


図 4.18 六角川感潮河川における各態窒素

(v) 汽水域、沿岸域における珪素の挙動

珪酸は一般的に森林から多く流出すると言われている。珪素は土壌や岩石中に豊富に存在しており、雨水や河川水が土壌や岩石に接触する自然の風化作用により溶け出し、最終的に海洋中に運ばれる。

海域での一次生産において珪藻類が重要な役割を担っており、珪藻類の増殖は水中の珪酸濃度に比例すると言われている。珪素を含む栄養塩が十分あるときには珪藻類の増殖率は他の植物プランクトンより大きいですが、珪素が不足して窒素やリンが多い場合には、渦鞭毛藻など、魚介類に利用されづらい植物プランクトンが多く発生することがある。瀬戸内海を中心とした海洋モニタリングの結果では、溶存態無機窒素、溶存態無機リン、溶存態珪素の絶対濃度は東側で高く、西側で低かったものの、溶存態珪素/溶存態無機窒素の相対比では西側が高く、東側で低くなっており、琵琶湖などある程度の規模を持つ停滞水域が珪素のシンクとなっていることが示唆された(原島ら(2003))。

珪酸は海域ばかりで消費されるのではなく、湖沼の珪藻類にも消費される。珪酸の減少が近年広島湾で珪藻類による赤潮の出現頻度減少と関係があるのではないかとする報告もあり、河川での珪酸の挙動に着目する必要があると考えられる(山本ら(2003))。

河口では、植物プランクトンによる摂取や凝集による沈降、あるいは鉛直混合などによって栄養塩類の濃度が変化する。四万十川河口域での調査から、特に珪酸は塩分が高くなるにつれて珪酸の濃度が減少し、有意な相関を持つことが示されている(和(2004))。

上記 (<生物的窒素循環>) で触れた混合曲線を珪素と $\text{PO}_4^{+}\text{-P}$ で描いたところ、両者は同様の挙動を示し、夏季には活発な生産によって汽水域がシンクとなる下に凸の傾向を示した。生産が活発な時期に、制限的な栄養塩はこのような挙動を示すと考えられる(W.M.Kemp(1989))。

(b) 重要なプロセスと物質供給の機構図

汽水域における一般的な知見の整理結果(物質供給の機構図を含む)を表 4.4に示す。また、一般的な知見の整理結果から得られた汽水域における重要なプロセスをまとめて以下に示す。

<流 動>

■塩水遡上(密度流)

汽水域は淡水と海水が混合する特殊な場所で、平常時には塩水遡上現象に伴って場の特性(水位、流速、塩分等)は時空間的に大きく変動する。

■鉛直循環流(エスチュアリー循環)

海水は淡水の流れに連行され下流へ移動し、これを補う形でくさびの中を先端に向かう鉛直循環流(エスチュアリー循環)が発生する。

<細粒土砂>

■凝集・沈降・再懸濁

平常時に河川中を流下する浮游性の懸濁物質の粒径は小さく沈降しにくい、海水と接触するとフロックを形成して粒径が急激に大きくなり沈降速度を増して堆積する(凝集沈降)。このフロックが水底の流れに伴い大きなせん断応力を受けると、フロックが破壊されて再懸濁して高濁度水塊を形成し、塩水に触れると再び沈降するという機構である。

■出水時における堆積物のフラッシュ

出水時には大量の懸濁物質とともに懸濁態リンが河川から河口域～沿岸域に供給されると同時に、河口部に堆積していた土砂もフラッシュされて沿岸域に移動する。塩水くさび等の影響により貧酸素化しやすい水域では、底質からの無機態リンの溶出が促進されて栄養塩のバランスが崩れ、赤潮や貧酸素水塊、青潮が発生することにより、移動性の低い底生生物などをはじめとした、河口域・沿岸域の生態系へ影響を及ぼすことがある。

<水 質>

■海水との混合による栄養塩濃度の希釈

河川水は海水に比べて溶存態栄養塩が多く、海水との混合により濃度が希釈される。

■フロック形成による栄養塩のトラップ

平水時には上流から流下する栄養塩を含む懸濁物質は海水に触れるとフロックを形成して凝集沈降して河口付近に堆積する。また、特殊な物理化学的環境の下に面的に多様なハビタットが形成され汽水域固有の生物が生息・生育している。

■植物プランクトンによる栄養塩の取込み

河川から供給される溶存態栄養塩は夏季には植物プランクトンの光合成に利用されてそのデトリタスが底質に堆積するため、栄養塩の形態が溶存態から懸濁態へ変化する。

■二枚貝等によるろ過

干潟は二枚貝等によるろ過により、脱窒機能及び溶存態リンの調整機能を有していることから、栄養塩の適切なバランスを維持するためにも重要な役割を担っているものと考えられる。

表 4.4 汽水域における一般的な知見の整理結果と物質供給の機構図

段階	汽水域の物質供給の機構図	区分	着目すべきプロセス	一般的な知見
① 平水時		流動	<ul style="list-style-type: none"> ■塩水遡上現象 ■鉛直循環流 ■混合抑制 	<ul style="list-style-type: none"> 潮汐に伴い河川水(淡水)の下に密度の大きい海水(塩水)が潜り込み、表層の淡水は下流へ向かい底面付近の塩水は上流へ向かう塩水遡上現象がみられる。 淡水と海水の混合形態は潮汐流や河道地形等により弱混合型、緩混合型、強混合型に分類される。 弱混合型の場合、性質の異なる二層流体の相互運動となる。緩混合型の場合、海水は淡水の流れに連行され下流へ移動し、これを補う形でくさびの中を先端に向かう鉛直循環流(エスチャリー循環流)が発生する。強混合型の場合、鉛直方向の密度勾配が強く、鉛直循環流は生じない。 弱混合～緩混合の場合、塩水くさびが発達すると上層と下層の混合が抑制され物質交換が著しく減少する。
		細粒土砂	<ul style="list-style-type: none"> ■フロック形成 ■凝集沈降 ■再懸濁 	<ul style="list-style-type: none"> 平常時に河川中を流下する浮游性の懸濁物質は粒径は小さく沈降しにくい、海水と接触するとフロックを形成して粒径が急激に大きくなり沈降速度を増して堆積する(凝集沈降)。 このフロックが水底の流れに伴い大きなせん断応力を受けると、フロックが破壊されて再懸濁して高濁度水塊を形成し、塩水に触れると再び沈降するという機構となっている。 鉛直循環流や上げ潮により沿岸域から河口域へ懸濁物質が輸送される。
		水質	<ul style="list-style-type: none"> ■栄養塩の供給 ■栄養塩の形態変化 	<ul style="list-style-type: none"> 降雨、岩石の風化、土壌からの溶脱、粘土鉱物土壌粒子、都市部の人間活動により主に溶存態の栄養塩、有機物、微量元素が供給され河川中を流下する。 河川水は海水に比べて DIN、DIP が多い。NO₃-N は河口域で生成又は消費されることなく海へ流出する。 河口では植物プランクトン摂取による生物利用、凝集沈降や溶出による物理化学的反応、鉛直混合や鉛直循環流など流動によって、栄養塩類の濃度に変化する。
② 出水時		流動	<ul style="list-style-type: none"> ■出水に伴う塩水のフラッシュ 	<ul style="list-style-type: none"> 河川の流れの影響が卓越し、河口域内に滞留した塩水は河川水により海へ押し出される。(フラッシュ)
		細粒土砂	<ul style="list-style-type: none"> ■出水時の堆積物のフラッシュ ■出水時の土砂の拡散 	<ul style="list-style-type: none"> 平水時の河床表層の細粒堆積物が河口域～沿岸域に押し出され(フラッシュ)、出水後の流量低減期には流速の低下に伴い河口前面に土砂が堆積し河口テラスが形成される。 粗い粒子は凝集作用を受けにくくそのまま河口に出ることが多い。 河川から沖合に供給される物質の拡散特性は沖合ほど粒径が小さい。
		水質	<ul style="list-style-type: none"> ■出水時の栄養塩の供給 	<ul style="list-style-type: none"> 出水時の懸濁物質の主体は陸上起源の土壌物質であるため、出水時には土砂とともに栄養塩類(特に POP が多い)、有機物、微量元素が粘土鉱物土壌粒子に付着して供給される。 出水時の懸濁物質には POP の他に海域で循環可能な PIP を多く含有しており、粒径が小さくなるに従って吸着性リンが増加するのに伴い、その含有量は多くなる。 底質からの溶出は、DIN は好気条件よりも嫌気条件の方が溶出しやすく塩分が高いほど溶出量が多い。DIP は好気条件ではほとんど溶出しませんが、嫌気条件下で急激な溶出が起きる。DSiO₂ はほとんど溶出しません。
③ 出水後～平水時		流動	—	<ul style="list-style-type: none"> 出水後に再び塩水が遡上する。
		細粒土砂	<ul style="list-style-type: none"> ■出水時に供給された土砂の動態 ■干潟の形成 	<ul style="list-style-type: none"> 出水時に河川から供給された懸濁物質は、沿岸域で沈降、拡散、再移動を繰り返し、河口部～沿岸域にかけて広い範囲の底質環境に影響を与える。 波浪の強い時には河口前面から土砂が運ばれ河口砂州が形成される。内湾では波浪や潮汐流によって細かい砂や泥が移動・堆積し、干潟が形成される。 シルト・粘土分は潮汐や波浪により河川又は沖まで運ばれるが、中・細かい砂は再移動、平坦化して砂干潟が形成される。潮汐変動に比べて波高が小さくなると、潮汐流により細粒物質が陸側へ輸送されてシルト・粘土の湾奥への集中移動が起こり、泥干潟が形成される。
		水質・生物	<ul style="list-style-type: none"> ■干潟の調節機能 ■栄養塩の動態(植物プラの増殖・底質からの溶出) ■栄養塩のバランス ■赤潮の発生 ■貧酸素化 ■青潮の発生 	<ul style="list-style-type: none"> 干潟は底層水が貧酸素化しない程度の酸化的な環境であれば、表層付近が好氣的、深い堆積物中が嫌氣的となるため高い脱窒効果が得られる。好氣的な干潟や沿岸域では浮泥のリン酸吸着平衡作用により溶存リン酸濃度の調整・安定化に寄与し、沿岸域の高い生産性を支えている。 干潟・沿岸域のない内湾では、嫌氣的な海域に沈降・堆積し、貧酸素な環境下で底泥から一挙にリンが溶出し、栄養塩のバランスが崩れて富栄養化する。 沿岸域では出水後に供給される栄養塩により植物プランクトンが増し、多くの植物プランクトンは窒素源として NO₃-N よりも NH₄-N を優先的に利用する。 珪素が十分ある時には他の植物プランクトンに比べ珪藻類の増殖率が高く、珪素が不足し窒素やリンが多い場合には渦鞭毛藻など、魚介類に利用されにくい植物プランクトンが多く発生し、これらは栄養塩(N,P,Si)のバランスにより異なる。 貧酸素化に伴い栄養塩のバランスが崩れると、混合抑制度合いや栄養塩の供給状況、気温等の条件により、貧酸素化→底泥から過剰にリンが溶出→植物プランクトンの増殖→枯死・堆積→分解に伴う酸素消費といった循環が成立して赤潮や貧酸素化が発生する。貧酸素水塊の形成に伴い硫化水素が発生して、移動性の低い底生生物の生息環境へ悪影響を与える。 深層の貧酸素水塊が表層に湧昇して青潮が発生すると、岸付近に生息する魚介類の生息環境へ悪影響を与える。

3. 三河湾における知見の整理

一般的な知見の整理結果から得られた汽水域における重要なプロセスを踏まえ、既往資料から三河湾の汽水域（矢作川、豊川）における知見を以下の観点から整理した。

① 汽水域の現象特性（流動、土砂、水質、生物、赤潮、苦潮、貧酸素水塊）

※赤潮、苦潮、貧酸素水塊は、三河湾での知見を整理

② 汽水域における栄養塩類等の動態

(a) 汽水域の現象特性

既往資料より三河湾の汽水域（矢作川、豊川）の現象特性を整理して表 4.5に示す。

表 4.5(1) 三河湾における汽水域の現象特性

分類	項目	河川	内容	出典等
汽水域の現象特性	流動	豊川、 矢作川	秋季には三河湾湾奥部で豊川から流入する淡水が海水となかなか混ぜずに三河湾北岸に沿って表層を西進している。冬季には河川からの淡水流入量も減少し、湾内での海水の上下混合も活発になるところから、河川流入の痕跡も消え、全層にわたってほぼ均質な水質構造になっている。	三河湾における底泥からの栄養塩類溶出フラックス,大沼淳一(愛知県環境調査セ),愛知県環境調査センター所報,No.29,Page67-94 (2001)
		矢作川	矢作川からもたらされた淡水は、湾奥部から南へ流下しているが、湾の西岸に特に強く押し付けられている。	海面増養殖技術試験 (5) 二枚貝栄養物質循環機能評価調査,黒田伸郎,落合真哉,岩崎員郎(愛知県水試),愛知県水産試験場業務報告,Vol.2000 Page.18-20 (2001.03)
	土砂	矢作川	矢作川からは夏季から秋季にかけて梅雨や台風等による出水によって大量の土砂が負荷されている。一方冬季には、こうした出水がなく高濃度の有機性懸濁物質が常時吹かされ、溶存性の有機物の一部も海水と混合した跡不溶化し、無機栄養塩類に起因して増殖したプランクトン起源の有機性懸濁物質とともに、いずれも底泥へと沈降堆積する。	三河湾における底泥からの栄養塩類溶出フラックス,大沼淳一(愛知県環境調査セ),愛知県環境調査センター所報,No.29,Page67-94 (2001)
		豊川	豊川からは有機性懸濁物質の流入が少ないものの、洪水時は土砂の流入が多い。	同上
		矢作川	陸上からもたらされた懸濁物質は河口部で大半が沈降した。	海面増養殖技術試験 (5) 二枚貝栄養物質循環機能評価調査,黒田伸郎,落合真哉,岩崎員郎(愛知県水試),愛知県水産試験場業務報告,Vol.2000 Page.18-20 (2001.03)
		豊川	懸濁物質は下流の順流末端付近まで低い値を保ったまま流下している。	河川を軸とした土砂及び栄養塩類の動態に関する研究,阿部徹,はい義光,並木嘉男(河川環境管理財団河川環境総合研),河川環境総合研究所報告,No.11 Page.9-20 (2005.12)
		豊川	懸濁物質は河口部に近い場所では有機物、無機物とも河口部より高い濃度になった。海域でのこの濃度増加は波浪や潮汐などにより底泥が巻き上げられたことによる。	同上

表 4.5(2) 三河湾における汽水域の現象特性

分類	項目	河川	内容	出典等
汽水域の現象特性	水質	矢作川	矢作川から流入する溶存態栄養塩は速やかに知多湾の物質循環系に取り込まれ、底泥への蓄積、溶出を繰り返している。	海面増養殖技術試験 (5) 二枚貝栄養物質循環機能評価調査, 黒田伸郎, 落合真哉, 岩崎員郎(愛知県水試), 愛知県水産試験場業務報告, Vol.2000 Page.18-20 (2001.03)
	生物	矢作川	矢作川河口部では、10,000 個体/m ³ 以上の高密度のアサリ D 型幼生がみられたことから、アサリの産卵場所になっている。	海面増養殖技術試験 (5) 二枚貝栄養物質循環機能評価調査, 黒田伸郎, 落合真哉, 岩崎員郎(愛知県水試), 愛知県水産試験場業務報告, Vol.2000 Page.18-20 (2001.03)
		豊川	上流部に生息する底生成物は、河川外から流入する生物に寄生したりデトリタスを捕食したりするのが大半を占める。流下に従って河川内で生産される藻類などを捕食する濾過食者や剥ぎ取り食者が増え、河川において多様な生物環境が形成されている。	河川を軸とした土砂及び栄養塩類の動態に関する研究, 阿部徹, はい義光, 並木嘉男(河川環境管理財団河川環境総合研), 河川環境総合研究所報告, No.11 Page.9-20 (2005.12)
		豊川	アサリの稚貝は河口付傍の中砂～粗砂に分類される砂分が多く、有機体が少ない場所に多く生息する傾向がある。また、河口に近い場所でも底質に粘土・シルド分を多く含み、水深が浅い場所では生息を確認することができなかった。	同上
		矢作川	矢作川河口部では上流からの藻類の影響がかなり認められ、止水化することにより、常に藻類、プランクトンの大発生が可能である。	矢作川の水質特性, 宮地成子, 八木明彦(名古屋女大), 名古屋女子大学紀要 家政・自然編, No.38, Page129-136 (1992.03)
		矢作川	矢作川からの栄養塩負荷はアサリ幼生の餌料となる小型植物プランクトンの生産性を規定する重要な要因で、平水時の知多湾は幼生の飼料が十分でないことが明らかになった。また、幼生は自ら鉛直移動行動により産卵後湾内に分散し、着底期には沿岸域、特に、河口域また、幼生は自ら鉛直移動行動により産卵後湾内に分散し、着底期には沿岸域、特に、河口域に回帰する機構を持つことも明らかとなった。しかし、河口域に着底した稚貝のその後の成長・生残過程に与える、河川負荷過程の影響を解明するには至らなかった。	内湾における森林・農地由来の環境影響物質の循環の解明, 黒田伸郎(愛知県水試漁業生産研), 森林・農地・水域を通ずる自然循環機能の高度な利用技術の開発 中間成績報告書(前期:平成12-14 年度) 環境研究 平成 15 年, Page.143-146 (2003)
		矢作川	矢作川河口干潟上に大量に発生するアサリ稚貝の成長を支える餌料の供給源としては、その場で生産される水柱中の浮遊性藻類、底泥中の付着性藻類、上流部及び下流部から輸送されてくる植物性有機物が考えられるが、一連の観測結果からは、大潮時に沖合から輸送される浮遊性藻類に由来する有機物が、アサリ稚貝の成長を支える極めて重要な供給源であることが強く示唆された。	(5)二枚貝栄養物質循環機能評価調査, 愛知県水産試験場業務報告, 黒田伸郎, 荒川純平 原田誠(愛知県水試), Vol.2003 Page.13-14 (2004.03)

表 4.5(3) 三河湾における汽水域の現象特性

分類	項目	河川	内容	出典等
汽水域の現象特性	生物	三河湾	<p>魚類等の移動性の大きい生物ほど分布域を回復しているが、移動性の小さいものや定着性の貝類では回復が見られず、特に渥美湾奥部では貝類は夏季に全滅していることが明らかであり、貧酸素水塊により定着性の再生産過程が強く障害を受けていることは明白である。</p>	<p>内湾および干潟における物質循環と生物生産【3】貧酸素水塊の形成機構,佐々木克之(中央水産研),海洋と生物,Vol.15, No.3, Page170-177 (1993.06)</p>
			<p>三河湾では、水柱中のクロロフィル a やその分解派生物の濃度や存在形態は短期間に著しく時空間的変動を繰り返しており、このような変動をもたらす生物・化学的諸過程としては、①植物プランクトンの増殖、②植物プランクトンの枯死に伴う自己消化、③それに付随する微生物分解、④微小、大型動物プランクトンの捕食と排泄、⑤光分解、などがあり、これに物理的過程である水平移流や鉛直混合が関与すると考えられる。このうち生物過程は、大型動物プランクトンが珪藻などの細胞サイズの大きい植物プランクトンを捕食した結果として排泄される糞粒は急速に海底へ沈降し水中から除去される沈降過程と、ナノ植物プランクトンを捕食する微小動物プランクトンの排泄する糞粒は沈降しにくい為有光層内に長く滞留し、他の微生物分解と共に栄養塩再生に寄与する過程の2つに大別される。</p>	<p>三河湾の夏季におけるクロロフィル収支の推定,水処理技術,田中庸央 大沼淳一(愛知県公害調査セ),Vol.33 No.2 Page73-80(1992.02)</p>
			<p>植物プランクトンにより取り込まれたリンは、小潮でアサリなどに多量に取り込まれて、底質から溶出するとき小さかったことが考えられる。また、流入した負荷(窒素：2.35、リン：0.55 トン/日)の約半分(窒素で 47%、リンで 49%)が沖合いに流入して、残りが干潟上から消失したか干潟上に蓄積したという結果になった。</p>	<p>内湾および干潟における物質循環と生物生産【10】三河湾一色干潟の窒素とリンの収支,海洋と生物,佐々木克之(中央水産研),Vol.16 No.4 Page294-300 (1994.08)</p>
			<p>底生生物群集の構造は DO 濃度の変動により大きく変化した。バクテリアは一時的な貧酸素化により、一旦増加したが、貧酸素化の進行により、最終的には大きく減少し、結果として未分解の底泥デトリタスが増加した。底生性微小藻類は日射量によって変動したが、やはり貧酸素化の深刻化により現存量が低下した。メイオベントスは一時的な貧酸素化に敏感に反応しつつ増減したが、貧酸素化の深刻化に伴い現存量が減少した。マクロベントスは初期の一時的な貧酸素化には影響されなかったものの、貧酸素化が深刻化する過程で下層堆積物食者を除いて現存量が激減した。</p>	<p>底層の貧酸素化が内湾浅海底生生物群集の変化に及ぼす影響,海の研究,鈴木輝明 青山裕晃 甲斐正信(愛知県水試) 今尾和正(日本海洋生物研),Vol.7 No.4 Page223-236(1998.08)</p>

表 4.5(4) 三河湾における汽水域の現象特性

分類	項目	河川	内容	出典等
汽水域の現象特性	赤潮	三河湾	<p>三河湾における近年の赤潮は、延べ日数の増加が顕著であり、一件一件が長期化していることが特徴的であった。また、赤潮が多発した季節においては降雨量が多いという共通点から河川からの栄養塩類の負荷が赤潮発生を引き起こすと考えた。1988年と1990年についてはこれに加えて強光阻害の解除、強風に伴う表層性プランクトンの集積が延日数の増加につながったと推定した。</p>	<p>三河湾における赤潮多発年の気象の特徴,水産海洋研究,山本民次 岡井満 竹下邦明 橋本俊也(広島大生物生産),Vol.61 No.2 Page114-122 (1997.05)</p>
			<p>三河湾の内湾・沿岸域では冬季の鉛直混合に加えて梅雨期における陸域からの栄養塩類の供給によって、赤潮発生ピークは初夏(6月)にみられる。とくに、水深の浅い三河湾では海底まで有光層であるため、成層しなくても赤潮が発生すると考えられる。秋になると降雨量の増加と海表面の冷却による下層からの栄養塩類の供給により、初夏に次ぐ第2の赤潮発生ピークが見られる。また、渥美湾で赤潮の発生が多い原因として、渥美湾に流入する豊川水系の集水域には畜産業、繊維工業、旅館業が多く、COD、窒素、リンの排出が多いこと、知多湾上層で生産された有機物は湾口で沈降・分解し渥美湾に移流することが原因であると言われている。</p>	<p>三河湾と志摩度会海域における赤潮発生の特徴 湾の形状と環境特性による検討,生物生産学研究,山本民次 大中澄美子(三重県水技セ),Vol.38 No.1 Page47-57(1999.07.12)</p>
	苦潮	三河湾	<p>苦潮発生直前の観測点には水深約 6m に躍層が形成され、底層には貧酸素水塊が停滞していることが明らかとなった。苦潮発生に伴って躍層の位置は上昇し、上昇距離は 5~6m と推定した。貧酸素水塊中には生物に有害な濃度の硫化水素が存在していた。苦潮発生時に存在する硫黄粒子は発生前の躍層付近に局在する硫黄粒子の表層への上昇と湧昇した硫化水素の自動酸化に起因することが示唆された。</p> <p>苦潮は 5 月下旬~11 月上旬に発生し、年平均発生件数は 7.4 件であった。海域別では渥美湾奥部海域での発生日数が多かった。苦潮が頻発する時期は貧酸素水塊が発生する 7 月下旬~9 月上旬であるが、発生の特徴は期間の前期と後期において異なった。しかしながら、苦潮が頻発するこの時期は、貧酸素水塊の発達する時期と一致していた。</p>	<p>三河湾における苦潮発生時の海洋構造と硫化水素及び硫黄粒子の鉛直分布,愛知県水産試験場研究報告,鶴崎直文(愛知県水試) 甲斐正信(愛知県栽培漁業協),No.8 Page7-13(2001.03)</p> <p>三河湾における 1989 年から 2000 年にかけての苦潮発生状況,愛知県水産試験場研究報告,鶴崎直文(愛知県水試),No.9 Page11-18(2002.03)</p>
貧酸素	三河湾	<p>貧酸素水塊は湾奥で発生しやすく、特に渥美湾奥で発達することが多かった。全体的には、8月に最も発達する傾向がうかがわれた。</p>	<p>三河湾における貧酸素水塊の経年変化について,愛知県水産試験場研究報告,原保 向井良吉 黒田伸郎(愛知県水試),No.2 Page47-49(1995.03)</p>	

(b) 汽水域における栄養塩類等の動態

既往資料より三河湾の汽水域(矢作川、豊川)における栄養塩類等の動態を整理して表4.6に示す。

表 4.6(1) 三河湾の汽水域における栄養塩類等の動態に関する既往知見

分類	河川	内容	出典等
汽水域における栄養塩類等の動態	矢作川	高濃度の DON が知多湾表層水中から採取された観測日の前一ヶ月間は、矢作川の水位が大きく増加していた。これは、河川から大規模に供給された DIN が植物プランクトンに取り込まれ、DON として水中に回帰したあとと細菌による分解を受けずに水中に蓄積していることを示している。また、高濃度の DON が観測された観測日の DON 濃度の空間分布は不均一であり、水深の浅い湾の岸側でパッチ状に高濃度域が見られる傾向があった。このことから、湾の岸側には、湾内の主要な流れが取り残され、滞留した水塊が存在し、そこで DON の蓄積が起こったと推測される。リンについては水中に蓄積せず、堆積物中に移行していると考えられる。	知多湾表層水中における高濃度の溶存有機態窒素について、日本海洋学会大会講演要旨集、三戸勇吾(愛媛大大学院連合農学研究科) 山田佳裕 多田邦尚(香川大 農) 山本敏哉(豊田市矢作川研),Vol.2005 秋季 Page169 (2005.09.05)
		矢作川下流米津橋におけるモニタリング調査によると、DSi/DIN 比は冬季から初夏に低く、夏季から秋季に高くなる傾向が見られた。観測期間中の平均は 2.36 と低く、シリカ欠損が進んでいる可能性が示唆された。また、1月から5月は DSi/DIN 比が 1.0 を下回る点が多く見られることから、季節によっては DSi の枯渇が生じていることがわかる。さらに 2000 年 9 月の東海豪雨の出水時の流入負荷 DSi/DIN 比が 1.0 前後と特に低くなっている時期に対応していることから、沿岸域での生産が矢作川からの流入負荷の変動によって質的にも影響を受けることを示唆している。	河川負荷 DSi/DIN 比の変動と海域の応答、日本海洋学会大会講演要旨集、児玉真史(水研セ 中央水研) 田中勝久(水研セ 西水研) 黒田伸郎(愛知水試 本場) 柳沢豊重 荒川純平(愛知水試 漁生研) 沢田知希(愛知県水産業振興基金) 都築基 山本有司(愛知水試 内水面),Vol.2004 秋季 Page.198 (2004.09.23)
		矢作川では、笹戸ダム上流に位置する明智川流入後の調査点で栄養塩濃度が上昇した後、ダム下流の調査地点で濃度が低下する傾向が見られた。また、明治用水ダム上・下流における調査では、ダム直下の調査地点で、6~8 月にアンモニア態・亜硝酸態窒素、6~9 月に硝酸態窒素、リン酸態リンがダム上流の調査点と比較して非常に高い濃度を示した。さらに、矢作川下流域に合流する支流に栄養塩負荷の大きなものが多く、矢作川・三河湾への栄養塩負荷やその季節変動に影響を与えていると考えられる。付着藻類現存量は、6、7月より8、9月の方が強熱減量が多い傾向が見られた。クロロフィル a 量は6~9月に比べ12月が高い値を示した。	河川環境影響物質循環調査、愛知県水産試験場業務報告、沢田知希 都築基(愛知県水試),Vol.2002 Page.27-28 (2003.03)

表 4.6(2) 三河湾の汽水域における栄養塩類等の動態に関する既往知見

分類	河川	内容	出典等
汽水域における栄養塩類等の動態	矢作川	<p>矢作川から流入する溶存態栄養塩は速やかに知多湾の物質循環系に取り込まれ、底泥への蓄積、溶出を繰り返している。</p>	<p>海面増養殖技術試験 (5) 二枚貝栄養物質循環機能評価調査, 黒田伸郎, 落合真哉, 岩崎員郎(愛知県水試), 愛知県水産試験場業務報告, Vol.2000 Page.18-20 (2001.03)</p>
		<p>矢作川集水域では、BOD、全リンは過去 20 年で減少し、2002 年の年平均値を 1984 年の平均値と比べると BOD は 54%、全リンは 68% に減少した。これに対して全窒素は横這いからやや増加しており、2002 年平均値は 1984 年平均値の 101% であった。形態別には、PO4-P は全リンと同様に減少しており、1985~1988 年頃と 1994~1997 年頃に値が高く、1989~1993 年と 1998 年から 2002 年に値が低いという変動が見られた。NO3-N はほぼ一方的に増加しており、2002 年平均値は 1984 年平均値の 132% であった。また、矢作川流域の下水道処理施設として 4 つの浄化センターがあり、それぞれ 1989 年、1991 年、1992 年、1996 年に供用開始した。下水道普及率は 1993 年が 23.6%、2002 年には 51.4% である。BOD と PO4-P が 1989 年頃から低下したのは、浄化センター供用開始と対応している。しかし、PO4-P が 1994 年~1997 年に高い値を示したことは何に起因するのか不明である。さらに NO3-N が増加していることは、下水処理場における窒素除去率(45%前後)の低さにも一因があるかもしれない。</p>	<p>矢作川集水域の環境変化と水質変化について, 日本陸水学会甲信越支部会報, 村上眞裕美(水研セ 中央水研), No.30 Page.52-53 (2004.11)</p>
		<p>矢作川の窒素やリンの短期間の変化では、有機態の窒素とリンがかなり多く含まれていることが判明している。また日周変化では、日の出の時刻から午前中にかけて、DON が多量に形成されることが新たに認められた。一方で DOP は深夜に増加する傾向が見られた。溶存酸素は、汚濁された支流の影響を受け、深夜に減少することが明らかになった。このように矢作川において、窒素やリンの変化は無機態と有機態のいずれにおいても時間的に大きく変動していることが観測され、ただ単に無機態の N や無機態の P から河川の富栄養化を把握するには不十分であった。</p>	<p>矢作川の水質特性, 名古屋女子大学紀要 家政・自然編, 宮地成子 八木明彦(名古屋女大), No.38 Page129-136 (1992.03)</p>

表 4.6(3) 三河湾の汽水域における栄養塩類等の動態に関する既往知見

分類	河川	内容	出典等
汽水域における栄養塩類等の動態	矢作川	<p>矢作川の内的自然増加率と最大日間増殖量は瀬と淵は共に夏期が最も高く、秋期にかけて減少し、冬期は瀬は秋期より高かったが、淵は秋期よりも減少した。このことから瀬戸淵はどちらも夏期が最も生産力が高いことが示唆された。しかし、夏期の上流から中下流部の付着藻類の現存量は逆に秋期よりも少ない値を示しており、付着藻類の多くがアユによって摂餌されていることが判った。さらに、単位面積あたりの最大日間増殖量から求めた矢作川全体の付着藻類の最大クロロフィル a 増殖量と付着生物膜の最大窒素取込み量は、夏期 4.4kgChl.a/day、73.0kgN/day、秋期 2.44kgChl.a/day、49.2kgN/day、冬期 2.64kgChl.a/day、24.9kgN/day と推定された。これらの値は、矢作川から知多湾への日平均クロロフィル a 負荷量の 10.1%(夏期)、5.6%(秋期)、5.9%(冬期)、日平均窒素負荷量の 1.2%(夏期)、0.8%(秋期)、0.4%(冬期)に相当した。</p>	<p>内水面増養殖技術試験(4)河川環境影響物質循環調査,愛知県水産試験場業務報告,山本有司 都築基(愛知県水試),Vol.2004 Page.35-36 (2005.03)</p>
		<p>矢作川最下流でのリンの負荷は繫濁態の割合が高く、東海豪雨後 1 週間では全体の 90%以上、平年でも 60%を占めた。珪素はダムの流下で急激に濃度が低下する時期があったが、窒素ではそのような事例はなかった。</p>	<p>22.環境保全 矢作川流域における窒素・リン・ケイ素のモニタリング,日本土壤肥料学会講演要旨集,芝野和夫(国際農研 沖縄支所) 神田健一 中島泰弘(農環研),Vol.49 Page.166 (2003.08.20)</p>
		<p>春季の矢作川下流部の付着藻類(付着板法)の生長量は、全測定期間(0~15日間)で 73~301mgchl.a・m⁻²・day⁻¹であった。また、付着藻類の光合成活性は 2~250mgO₂・mgchl.a⁻¹・h⁻¹ で総生産量は 340~2100mgO₂・m⁻²・h⁻¹ となり、富栄養化は著しいと考えられる。</p>	<p>Primary production in the downstream of the Yahagigawa River.,名古屋女子大学紀要,YAGI A, SUGIYAMA A (Nagoya Women's Univ.),No.31 Page87-94 (1985.03)</p>

(c) 三河湾における知見の整理結果

一般的な知見の整理結果から得られた汽水域における重要なプロセスについて、三河湾の汽水域における知見の整理結果を表 4.7に示す。また、知見の整理結果から得られた三河湾の汽水域の特性をまとめて以下に示す。

■塩水遡上現象

矢作川及び豊川においても、塩水遡上現象が生じており、それに伴う密度成層や混合抑制なども認められている。三河湾東部の渥美湾奥部は、水が停滞しやすく、湾口から下層への DO 供給が弱く、底質の COD 含有量が多いため、下層が貧酸素化しやすい。

■平水時及び出水時に河川から供給される栄養塩特性

平水時には豊川及び矢作川から三河湾沿岸域へ有機性懸濁物質が供給されている。矢作川ではダムの影響により珪素が減少する時期があり、季節によっては珪素の欠乏が認められる。

出水時には豊川及び矢作川から、大量の土砂(無機態懸濁物質)が供給され、それに吸着する懸濁態無機態リンが沿岸域に流出し、これが沿岸域の底泥からの溶出に大きな影響を及ぼすと考えられる。矢作川下流ではリンの負荷量に占める懸濁態リンの割合は、出水後(東海豪雨後)1週間では90%以上、平年でも60%を占めた事例がある。

■干潟の調節機能

三河湾の一色干潟では、底生生物(アサリ)が大量に懸濁態有機態リンを取り込み、これが底泥からの溶出を抑制する。一色干潟では、流入した負荷(窒素:2.35、リン:0.55 トン/日)の約半分(窒素で47%、リンで49%)が沖合に流入し、残りが干潟上から消失したか干潟上に蓄積したというの収支計算事例がある。また、浅海域(干潟)の埋め立て時期と赤潮の発生頻度、貧酸素水塊の規模拡大の時期が一致していることから、干潟が栄養塩のバランスを調整する機能を有している可能性が考えられる。

■赤潮・貧酸素化・青潮の発生機構

三河湾東部の渥美湾奥部は、貧酸素化しやすい特徴を有しており、貧酸素化→底泥から過剰にリンが溶出→植物プランクトンの増殖→枯死・堆積→分解に伴う酸素消費の循環が認められる。赤潮、貧酸素水塊及び青潮が発生しやすく、貧酸素化による底生生物(貝類)への影響も確認されている。

表 4.7(1) 三河湾の汽水域における栄養塩類等の動態の整理結果

段階	区分	着目すべきプロセス	対象地域			矢作川・豊川・三河湾における知見
			豊川	矢作川	三河湾	
① 平水時	流動	<ul style="list-style-type: none"> ■塩水遡上現象 ■鉛直循環流 ■混合抑制 	—	—	●	<ul style="list-style-type: none"> 三河湾では豊川、矢作川では淡水流入があることから、すでに春季に塩分成層構造が認められている。秋季にはこの構造が破壊し、下層に溶存酸素が供給されて、豊川から流入する淡水が海水となかなか混合せずに三河湾北岸に沿って表層を西進していることが示されている。また、冬季には河川からの淡水流入量が減少し、全層に渡ってほぼ均質な水質構造になっている。〈現地調査(大沼(2001))〉 三河湾西部では矢作川及び衣浦港からの淡水は湾奥部から南へ流下し、湾の西岸に特に強く押しつけられていることが分かった。〈現地調査(黒田ら(2001))〉 三河湾東部(渥美湾)では夏季には海水が湾外水と入れ替わるのに20~40日かかる。〈資料収集整理(石田ら(1996))〉 三河湾東部(渥美湾)の下層では湾口側でDO濃度が高く、湾奥にいくにしたがい低くなっている。〈数値解析(ボックスモデル解析)(佐々木ら(1993))〉 アサリ幼生は自ら鉛直移動行動により産卵後湾内に分散し、着底期には沿岸域、特に、河口域に回帰する機構を持つ。〈現地調査(黒田ら(2003))〉
	細粒土砂	<ul style="list-style-type: none"> ■フロック形成 ■凝集沈降 ■再懸濁 	—	—	●	<ul style="list-style-type: none"> 三河湾では冬季には、高濃度の有機性懸濁物質が常時吹かされ、溶存性の有機物の一部も海水と混合したあと不溶化し、無機栄養塩類に起因して増殖したプランクトン起源の有機性懸濁物質とともに、いずれも底泥へと沈降堆積する。〈現地調査(大沼(2001))〉
	水質	■栄養塩の供給	●	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 豊川における窒素とリンの割合は、河川下流や海域ではリンの比率が高く、リンの溶出は出水時に土砂とともに海域へ流出し、海底に堆積した後に溶出する場合と、長期にわたって海底に堆積した底泥から溶出する可能性があることを示唆している。〈現地調査(阿部ら(2005))〉 豊川から三河湾東部海域に有機性懸濁物質が負荷されている。〈現地調査(大沼(2001))〉
			—	●	—	<ul style="list-style-type: none"> 矢作川では、ダムの下流で珪素の濃度が急激に低下する時期があったが、窒素ではみられなかった。〈現地調査(芝野ら(2003))〉 矢作川におけるDSiとDINの比(DSi/DIN)は、冬季から初夏に低く夏季から秋季に高くなる傾向がみられ、季節によってはDSiの枯渇も生じており、シリカ欠損が進んでいる可能性が示唆された。〈現地調査(児玉ら(2004))〉 矢作川から三河湾西部海域に有機性懸濁物質が負荷されている。〈現地調査(大沼(2001))〉
		■栄養塩の形態変化	—	—	●	<ul style="list-style-type: none"> 三河湾東部では、光合成が活発なのは湾奥であるが、光合成で生じた有機物が沈降して分解するのは湾口部である。〈数値解析(ボックスモデル解析)(佐々木ら(1993))〉 三河湾では大型動物プランクトンが珪藻などの細胞サイズの大きい植物プランクトンを捕食した結果として排泄される糞粒は急速に海底へ沈降し水中から除去され、ナノ植物プランクトンを捕食する微小動物プランクトンの排泄する糞粒は沈降しにくいいため、有光層内に長く滞留し、他の微生物分解と共に栄養塩再生に寄与する。〈現地調査(田中ら(1992))〉
② 出水時	流動・細粒土砂	<ul style="list-style-type: none"> ■出水に伴う塩水のフラッシュ ■出水時の堆積物のフラッシュ ■出水時の土砂拡散 	—	—	—	— (現時点では該当する知見なし)
	水質	■出水時の栄養塩の供給	—	●	—	<ul style="list-style-type: none"> 矢作川では、2000年9月の東海豪雨時に高濃度の懸濁物質が流出し、平水年負荷量推定値の約3.3年分の懸濁態リンが海域へ負荷された。〈現地調査(児玉ら(2004))〉 矢作川では、最下流でのリンの負荷は懸濁態の割合が高く、リンの負荷量に占める懸濁態リンの割合は東海豪雨後1週間では90%以上、平年でも60%を占めた。〈現地調査(芝野ら(2003))〉
			—	—	●	<ul style="list-style-type: none"> 三河湾東部海域では豊川から砂やシルト等の大量の無機性懸濁物質とともに無機栄養塩類が負荷され、沿岸域の溶出フラックスに大きな影響を与えている。〈現地調査(大沼(2001))〉
③ 出水時～平水時	細粒土砂	<ul style="list-style-type: none"> ■出水時に供給された土砂の動態 ■干潟の形成 	—	—	—	— (現時点では該当する知見なし)

表 4.7(2) 三河湾の汽水域における栄養塩類等の動態の整理結果

段階	区分	着目すべきプロセス	対象地域			矢作川・豊川・三河湾における知見
			豊川	矢作川	三河湾	
③ 出水時 ～ 平水時	水 質・生 物	■干潟の調節機能	—	—	●	<ul style="list-style-type: none"> 三河湾一色干潟では、植物プランクトンにより取り込まれたリンが小潮時にアサリなどに多量に取り込まれたことにより、底質からの溶出量が小さくなった可能性がある。また、観測全期間の窒素、リンの収支は、流入した負荷(窒素：2.35、リン：0.55 トン/日)の約半分(窒素で47%、リンで49%)が沖合に流入して、残りが干潟上から消失したか干潟上に蓄積したという結果になった。＜数値解析(ボックスモデル解析)(田中ら(1992))＞ 三河湾東部における赤潮の急増及び貧酸素水塊の規模の拡大は、渥美湾奥の浅海域の埋立てと同時期に進行していることが明らかになった。＜資料収集整理(石田ら(1996))＞
		<ul style="list-style-type: none"> ■栄養塩の動態(植物プラの増殖、底質からの溶出) ■栄養塩のバランス 	—	●	—	<ul style="list-style-type: none"> 矢作川では、窒素については、河川から大規模に供給された無機態窒素(DIN)が植物プランクトンに取り込まれ、有機態窒素(DON)として水中に回帰した後、バクテリアによる分解を受けずに水中に蓄積していると考えられる。リンについては、水中に蓄積せずに堆積物中に移行していると考えられる。＜現地調査(三戸ら(2005))＞ 三河湾では、矢作川から知多湾へ流入する溶存態栄養塩は速やかに知多湾の物質循環系に取り込まれ、底泥への蓄積、溶出を繰り返していると考えられる。＜現地調査(黒田ら(2001))＞ 三河湾では矢作川からは夏季から秋季にかけて梅雨や台風等による出水によって大量の土砂が負荷されており、冬季には、高濃度の有機性懸濁物質が常時吹かされ、溶存性の有機物の一部も海水と混合したあと不溶化し、無機栄養塩類に起因して増殖したプランクトン起源の有機性懸濁物質とともに、いずれも底泥へと沈降堆積する。＜現地調査(大沼(2001))＞ 豊川が流入する三河湾東部海域及び矢作川が流入する三河湾西部海域では夏季から秋季にかけての降雨出水に伴う大量の無機性懸濁物質の負荷があり、これが溶出フラックスに大きな影響を与えていた。さらに、三河湾の底上水の水温と溶存酸素の通年変化を推定し、得られた溶出フラックスを用いて三河湾全域における栄養塩類の年間総溶出量を計算した結果、陸域から負荷される栄養塩類と比べて窒素で約3分の1、リンで約5分の1から6分の1が底泥から回帰することが明らかになった。＜現地調査・数値解析(大沼(2001))＞ 三河湾東部では平常時には、豊川から窒素が多く供給されるのに対して、海域ではリンの溶出が多いことが確認された。リンの溶出は出水時に土砂とともに海域に流出し、海底に堆積した後に溶出する場合と、長期に渡って海域に堆積した底泥から溶出する場合があることを示唆している。現地調査(阿部ら(2005))＞ 沿岸域での生産が河川からの流入負荷の変動により質的にも影響をうけることを示唆している。＜現地調査(児玉ら(2004))＞ 成層期の渥美湾は流入負荷に対して窒素の溜まる割合は約1/3、リンは1/2であり、きわめて富栄養化しやすい湾である。ボックスモデル解析(佐々木ら(1994))
水 質・生 物	■赤潮の発生	—	—	●	<ul style="list-style-type: none"> 三河湾における赤潮は、延べ日数の増加が顕著であり、一件一件が長期化していることが特徴的であった。赤潮が多発した季節において、降雨量が多いという共通点から、河川からの栄養塩類の負荷が赤潮発生を引き起こすと考えられる。＜料収集整理(山本ら(1997))＞ 三河湾における赤潮発生のピークは6月と10月に見られた。内湾・沿岸域では冬季の鉛直混合に加えて梅雨期における陸域からの栄養塩類の供給によって、赤潮が発生すると考えられる。とくに、水深の浅い三河湾では海底まで有光層であるため、成層しなくとも赤潮が発生すると考えられる。秋になると降雨量の増加と海表面の冷却による下層からの栄養塩類の供給により、初夏に次ぐ第2の赤潮発生ピークが見られる。＜資料収集整理(山本ら(1999))＞ 	
	■貧酸素化	—	—	●	<ul style="list-style-type: none"> 貧酸素水塊は湾奥で発生しやすく、8月に最も発達する傾向がみられ、特に三河湾東部(渥美湾奥)で発達することが多かった。＜資料収集整理(原ら(1995))＞ 三河湾では、底質のCOD含有量の多い海域が湾東部に形成され、貧酸素水塊の分布域もこの地域と一致していた。また、躍層5m付近の底層では貧酸素水塊が、上層には赤潮状態が同時に発生している結果が得られた。＜現地調査(赤石ら(2005))＞ 三河湾では潮汐による密度躍層の移動や風による沖合い貧酸素水塊の移動の影響を受けながら、水深に関係なく、新生堆積物の分解によるDO消費速度の増加により徐々に貧酸素化が進行することが観測された。＜数値解析(スペクトル解析)及び現地調査(鈴木ら(1998))＞ 三河湾東部(渥美湾口中川水道)では渥美湾上層由来だけでなく知多湾由来の有機物も沈降し、湾外水の渥美湾口からの流入が弱いので渥美湾下層へのDO供給が弱く、この部分で急激にDO濃度が減少することが下層の貧酸素化や赤潮の原因であると考えられる。＜数値解析(ボックスモデル解析)(佐々木(1993))＞ 三河湾に生息するバクテリアは一時的な貧酸素化により、一旦増加したが、貧酸素化の進行により、最終的には大きく減少し、結果として未分解の底泥デトリタスが増加した。底生性微小藻類は日射量によって変動したが、やはり貧酸素化の深刻化により現存量が低下した。メイオベントスは一時的な貧酸素化に敏感に反応しつつ増減したが、貧酸素化の深刻化に伴い現存量が減少した。マクロベントスは初期の一時的な貧酸素化には影響されなかったものの、貧酸素化が深刻化する過程で下層堆積物食者を除いて現存量が激減した。＜現地調査(鈴木ら(1998))＞ 三河湾東部(渥美湾奥部)では貝類は夏季に全滅しており、貧酸素水塊により定着性の再生産過程が強く障害を受けているものと考えられる。＜数値解析(ボックスモデル解析)(佐々木(1993))＞ 	
	■青潮の発生	—	—	●	<ul style="list-style-type: none"> 三河湾では青潮は5月下旬～11月上旬に発生し(年平均発生件数は7.4件)、特に三河湾東部(渥美湾奥部)での発生日数が多かった。青潮が頻発する7月下旬～9月上旬は、貧酸素水塊の発達する時期と一致していた。＜現地調査及び資料収集整理(鶴崎ら(2002))＞ 三河湾では青潮発生直前には水深約6mに躍層が形成され、底層には貧酸素水塊が停滞していることが明らかとなった。青潮発生に伴って躍層の位置は上昇し、貧酸素水塊中には生物に有害な濃度の硫化水素が存在していた。＜現地調査(鶴崎ら(2001))＞ 	

4. まとめ

(a) 三河湾における汽水域の機構の概説

三河湾では以下のような知見が得られている。

- ・ 河川から供給される懸濁物質は、海水と接触すると急速にフロックが形成され沈降・集積するため、その大部分が感潮河川内や河口周辺で沈降すると考えられる（田中ら(2003)）
- ・ 冬季には、高濃度の有機態懸濁物質が常時負荷され、溶存性の有機物の一部も海水と混合した後不溶化し、無機栄養塩類に起因して増殖したプランクトン起源の有機態懸濁物質とともに、いずれも底泥に沈降・堆積する(大沼ら(2001))
- ・ 出水に伴う大量の無機態懸濁物質(土砂に付着した無機態リンなど)の供給や、冬季の有機態懸濁物質の負荷が、海域における底質からの溶出フラックスに大きな影響を及ぼす。

三河湾における汽水域の機構図を図 4.19に示す。三河湾の汽水域では、平水時には栄養塩類が蓄積(シンク)する現象と供給(ソース)する現象の両方が存在し、この現象が海域の栄養塩類の循環に影響を及ぼしていると考えられる。一方、出水時には平水時に汽水域に堆積した栄養塩類が河川から供給される栄養塩類とともに一気に海域に掃き出され(フラッシュされ)、沿岸域に堆積する。

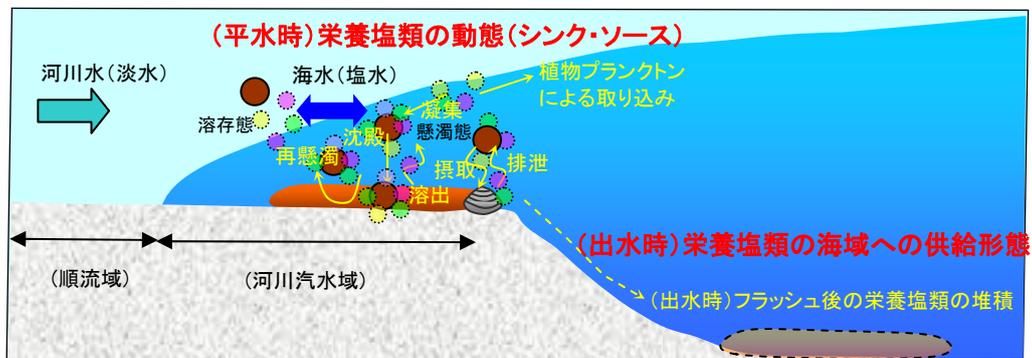


図 4.19 三河湾における汽水域の機構のイメージ図

以上より、平水時における栄養塩類の動態(シンク・ソース)と、出水時における栄養塩類の海域への供給形態に着目し、物質循環機構について知見の整理を行った。

(b) 平水時における栄養塩類の動態(シンク・ソース)

汽水域では大潮～小潮の潮汐変動や、一日間の潮汐変動により、時間的にも空間的にも流動(密度流)が変動するとともに、図 4.19に示すような複雑な物質循環が発生する。

ここでは、複雑な物質循環を、平水時における栄養塩類のシンクとソースの観点から、現象とメカニズムを整理した上で、平水時の物質収支がシンクなのかソースなのかという論点で知見を整理した。

汽水域において平水時は、フロック形成、生物の取り込みなど栄養塩類のシンクと、フロック破壊、底質からの溶出、生物による排泄など栄養塩類のソースとなる両方の現象が存在する。

表 4.8 三河湾の汽水域における平水時の栄養塩類の動態(シンク・ソース)

シンク/ ソース	現象	メカニズム	栄養塩の動態
栄養塩類の シンク	フロック形成	フロック形成により懸濁物質とともに栄養塩類が凝集・沈殿する。	溶存態→懸濁態
	植物プランクトンに等よる光合成	植物プランクトン等の光合成により、水中の栄養塩類が生物に取り込まれる。	溶存態→懸濁態 無機態→有機態
	二枚貝等による濾過	二枚貝等の濾過作用により、水中の懸濁物質とともに栄養塩類が生体に取り込まれる。	懸濁態→懸濁態 有機態→有機態
栄養塩類の ソース	フロック破壊・回帰	巻き上げ等によりフロックが破壊され栄養塩類が水中に回帰する。	懸濁態→溶存態
	生物による排泄	生物が体内で有機物を消費し不要な栄養塩類を排泄する。	懸濁態→溶存態 有機態→無機態
	分解(無機化)・溶出	底質中の有機物がバクテリア等により分解(無機化)され、間隙水中の栄養塩類が水中へ溶出する。	懸濁態→溶存態 有機態→無機態

汽水域における物質収支を定性的に把握する手法として、保存成分である塩分と対象物質の関係を表す混合曲線を用いた解析が提案されているが、生物作用(光合成・濾過・分解・排泄等)の影響を大きく受けるため、調査によってシンクの場合もソースの場合もあることが報告されている(河川環境管理財団,2006)。

一方、個々の現象をモデル解析等により積み上げることも考えられるが、現象が複雑なことから現実的でないと考えられる。

これらのことから、フロック形成により懸濁物質とともに栄養塩類が汽水域に蓄積されると考えられるものの、平水時における栄養塩類の複雑な動態を単純化して、汽水域が栄養塩類のシンクなのかソースなのかという答えを出すことは難しいと考えられる。

(c) 出水時における栄養塩類の海域への供給形態

出水時には、平水時に堆積した懸濁態栄養塩が、海域へ一気に掃き出され（フラッシュ）、河口～沿岸域に拡散・沈降し、海域底質へ供給される。

田中ら(2003)によれば、出水時に河川から供給される懸濁物質は、河口部を中心に沈降・堆積、湾奥部では河口から遠ざかるにつれて減少しており、沖合ではほとんどみられない。懸濁物質の堆積範囲は知多湾の面積の約 55%、海域の堆積量は河川流出量の約 50%であることから、河川起源の懸濁物質(海域で循環可能なリンを含む)は河川汽水域から河口周辺に凝集・沈降していると考えられる。

なお、この時は、流域・河川から流下してくる懸濁物質と一緒に栄養塩類も海域に流出するため、これらを区別することは困難であり、両者を区別して考察した知見はない。