

強混合河川感潮部における物質輸送と水質変換に関する研究

二渡, 了

<https://doi.org/10.11501/3071401>

出版情報 : 九州大学, 1993, 博士 (工学), 論文博士
バージョン :
権利関係 :

強混合河川感潮部における物質輸送と
水質変換に関する研究

二 渡 了

①

強混合河川感潮部における物質輸送と
水質変換に関する研究

二 渡 了

目 次

第1章 序 論	1
1.1 河川感潮部とは	1
1.2 河川感潮部に関する従来の研究と本研究の目的	2
参考文献	5
第2章 河川感潮部の水理・水質に関する分類と特徴	6
2.1 緒言	6
2.2 水理学的分類と特徴	6
2.2.1 河川感潮部での流れ	6
2.2.2 混合形態による分類	7
2.2.3 水の交換率による分類	10
2.3 水質学的分類と特徴	11
2.3.1 河川感潮部での水質	11
2.3.2 塩分による分類	12
2.3.3 懸濁物質の特性による分類	13
1) 懸濁物質の定義	13
2) 懸濁物質の性質	14
3) 懸濁物質による感潮部の分類	17
2.4 現象変化の時定数と空間スケール	18
2.4.1 河川感潮部における現象変化	18
2.4.2 現象変化の時定数	19
2.4.3 現象変化の空間スケール	21
2.4.4 現象変化の速度	21
参考文献	22
第3章 河川感潮部における水質変動特性	25
3.1 緒言	25
3.2 現地調査	25
3.2.1 対象河川	25
3.2.2 調査方法	27
3.3 水質の時間的变化	28
3.3.1 はじめに	28
3.3.2 一潮汐間の変動特性	28
3.3.3 長期的な変動特性	39

3. 4	水質の空間的变化	46
3. 4. 1	はじめに	46
3. 4. 2	横断面内での分布特性	46
3. 4. 3	縦断面内での分布特性	49
3. 5	水質変動の相関	53
3. 5. 1	はじめに	53
3. 5. 2	塩化物イオン濃度との相関	53
3. 5. 3	SS濃度との相関	54
3. 5. 4	累加水量と水質の相関	59
3. 6	結語	64
	参考文献	65

第4章	懸濁物質輸送の特性とモデル化	67
4. 1	緒言	67
4. 2	懸濁物質の輸送特性	68
4. 2. 1	はじめに	68
	1) 底泥の巻き上げ過程	69
	2) 懸濁物質の沈降過程	73
4. 2. 2	底泥の巻き上げ過程に関する実験	75
4. 2. 3	懸濁物質の沈降過程に関する実験	81
4. 2. 4	浮泥・底泥の形成過程と流動特性	86
	1) 浮泥の底泥化	86
	2) 浮泥・底泥の流動特性	87
	3) 浮泥流による物質輸送	88
4. 3	河川感潮部における物質輸送機構	91
4. 3. 1	はじめに	91
4. 3. 2	感潮部における物質輸送	91
4. 3. 3	一潮汐間における物質輸送	94
	1) 物質輸送の特性	95
	2) 成層形態と物質輸送の関係	100
	3) 分散係数	103
4. 4	懸濁物質輸送現象のモデル化とシミュレーション	104
4. 4. 1	はじめに	104
4. 4. 2	水理モデル	104
	1) 対象河川のモデル化	104
	2) 基礎式と計算方法	105
	3) 計算結果	106

4. 4. 3	物質輸送モデル	108
	1) 基礎式と計算方法	108
	2) 計算結果	113
	3) 懸濁物質輸送に関する検討	115
4. 4. 4	長期的な物質輸送機構	120
	1) 一潮時平均流速及び流量の変化	120
	2) 塩化物イオン及びSSの輸送特性	122
	3) 分散係数	126
4. 5	結語	129
	参考文献	129

第5章 水質変換過程とそのモデル化

5. 1	緒言	133
5. 2	河川感潮部における窒素変換過程	134
5. 2. 1	はじめに	134
5. 2. 2	現地観測結果	134
	1) 一潮汐間における変動特性	134
	2) 半月周期における変動特性	135
	3) 河川感潮部における窒素の挙動	136
5. 2. 3	硝化反応の特性	136
	1) 塩化物イオン濃度の影響	136
	2) 硝化菌菌体濃度の推定	140
	3) 反応係数の推定	142
5. 2. 4	脱窒反応の特性	143
	1) 底泥中の濃度分布	143
	2) 底泥による脱窒機能	144
5. 3	窒素変換過程のシミュレーション	146
5. 3. 1	はじめに	146
5. 3. 2	窒素変換過程のシミュレーションモデル	146
	1) 窒素変換モデル	146
	2) 計算条件	147
	3) 計算結果	150
5. 3. 3	窒素変換過程の定量的評価	152
	1) 水塊中の濃度変化と流入負荷の影響	152
	2) 硝化・脱窒反応の影響	154
	3) 河川感潮部での窒素循環とその制御	156
5. 4	結語	156
	参考文献	157

第6章 河川感潮部における水質環境管理	158
6.1 水質環境管理の基本的考え方	158
6.2 強混合河川感潮部での水質環境管理	159
6.2.1 強混合河川感潮部の特性	159
1) 水質変動特性	159
2) 懸濁物質の輸送特性	160
3) 無機態窒素の変換特性	161
6.2.2 六角川感潮部における水環境管理	161
6.2.3 強混合河川感潮部における水質環境管理のあり方	162
参考文献	162
記号表	163
謝 辞	168

第1章 序 論

1. 1 河川感潮部とは

河川感潮部は、河川の最下流部に位置し、その下流側境界が海域と接するために潮汐の影響を受け、流れや水質が大きく変化する水域である。陸域から河川に排出された物質は、この感潮部を通過して海域に流出したり、あるいはそこに蓄積する。この感潮部は潮汐による潮の干満を繰り返すことから生物生産性が高く、魚介類の重要な産卵場・生息場となっている。また、感潮部には港湾が建設されたり、漁場やレクリエーションの場として利用されており、人間活動とも密接な関係がある。したがって、感潮部における物質の挙動を明らかにし、環境保全のための施策を実施していくことが求められている^{1),2),3)}。

感潮部では河川水と海水との混合が行われ、河川順流部に比べて河道横断面積が大きいため相対的に長い滞留時間をもつ。また、河川を流下してきたりあるいは海域より遡上してきた微細なシルト・粘土質からなる懸濁粒子は、塩分の影響によってその凝集が促進されて沈降しやすくなり、水中の有機物や栄養塩類、重金属等の環境に大きな影響を及ぼす物質を吸着しつつ底泥として堆積する。このように、感潮部は、河川でありながら潮汐や海水の影響を大きく受けるため、順流部とは大きく異なる水質変動・分布特性をもつ水域である。図1-1には、感潮部における物質輸送・変換の概略を示す。

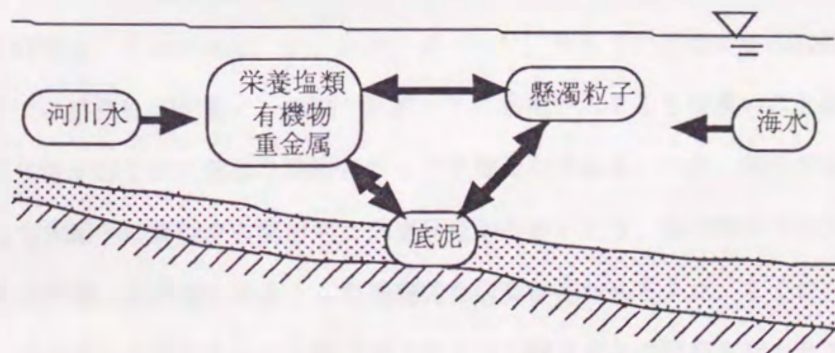


図1-1 感潮部における物質輸送・変換の概略

「河川感潮部」とは、河川の河口から潮汐の影響が及ぶ上限までの部分のことをいうが、他にも「感潮域」や「河口部」等の用語も使われる。感潮域は河川感潮部よりやや広い領域に対して使われる場合が多いが、これらを厳密に定義した例は少なく、潮汐の影響の見られる河川下流部や沿岸域、内湾等の水域に対して使われる。楠田⁴⁾は感潮域を「外海とつながった半閉鎖性水域をいい、しかも河口に位置し、汽水域のところをいう。その上流端は、潮汐の影響により水位が周期的に変動する限界までをとる」のように定義している。また、英語では、Estuary (エスチャリー) や Tidal River (感潮河川) の用語が使われる。Pritchard⁵⁾は、

「エスチャリーとは、外海との自由な境界を持ち、そこでの海水が陸域から排出される淡水によってかなり希釈されているような半閉鎖的な沿岸水域(塊)のことである」と定義している。

河川における潮汐現象は、海域の静水面の延長が河床と交わる「静水面交点」より下流に限られ⁶⁾、感潮部の上限として、一般に水位変動が消失する場所を指すことが多いが、海水そのものの遡上限界と考えられる塩分消失点、これより上流では流速の周期変動はあるが流れは常に下流に向いているような転流消失点をとることもある⁷⁾。河道内に設けられた堰が感潮域上限になっているところも多い。河口からこの上限までを感潮区域(tidal reach)といい、これは大潮・小潮といった潮相や河川流量によって変化する。一方、河川と海域との境界は1級河川では「河川法」によって定められており、その他の河川では、兩岸の河川護岸・堤防あるいは突堤・防波堤の先端を結んだ線を境界としたりしているが、これらは行政上の管理領域の区分のために設けられているといった方がよい。

以上の感潮域に関する取扱いを考慮して、本研究では、河川感潮部を次のように定義する。

「河川感潮部とは、河川のうち河口から潮汐作用による周期的な水位変動が消失する場所までの部分のことである」

1. 2 河川感潮部に関する従来の研究と本研究の目的

河川感潮部や感潮域に関する研究は、種々の方面から行われてきた。感潮域における懸濁物質・底泥の挙動や水質に関する研究は、米国や英国、オランダ、西ドイツ、そして中国等で盛んに行われている。これは、これらの国々では感潮区域が長く、港湾や航路として利用されることが多いことから、そこでの底泥の堆積や水質の悪化等が社会的に重要な問題となってきたためである。一方、国内でも河川工学、海岸工学、衛生工学そして水産学の立場から実用的な調査研究が行われたり、海洋物理学や地球化学のような自然科学の分野でも感潮域・沿岸域を対象とした基礎的な研究が行われてきた。とくに、近年では河口・沿岸域の利用度が一層高まってきたために冒頭で述べたような観点からの研究も行われてきている。物理環境に関する研究には、塩水くさびや密度流に関する水理学的なものや懸濁物質の挙動に関するもの、物質輸送や海水交換に関するもの等がある。また、化学環境に関する研究は、重金属や栄養塩類、有機化合物の挙動に関するものや物理環境と関連させて汚濁機構について検討したものがある。生物・生態学的環境に関する研究も行われている。

ここで、河川感潮部における工学的な問題を整理すると次のようになる。まず第1に、水質モニタリングの問題がある。感潮部では潮汐作用により周期的に流れが変化するために、感潮部のある地点で観測される水質も周期的に変動する。さらに、潮汐は種々の周期成分が重なり合った現象であり、それによる流

れの変化が時間的・空間的に異なる。したがって、感潮部における水質変動特性を明らかにし、どのような基準で水質観測を行うかを確立する必要がある。第2には、懸濁物質の輸送と底泥堆積の問題がある。感潮部では、前にも述べたように底泥が堆積しやすい状況にあり、底泥の堆積に伴って水深が減少し、船舶航行への支障が生じたり流水断面積が減少するために洪水流量の確保が困難となったり、樋門・樋管や橋脚等の河川構造物への障害が生じる。感潮部における懸濁物質の輸送機構を明らかにし、底泥の堆積位置、速度と量を精度よく予測できるようにすることが、河川管理上求められている。そして、第3の問題として水質汚濁が挙げられる。感潮部に堆積した底泥は有機物や還元性無機物を含み、有機物が微生物により分解されたり、還元性無機物が化学的に酸化されるとき溶存酸素を消費する。このため、微生物による反応速度がとくに大きくなる夏期に溶存酸素が低下し、貧酸素水塊が形成され、底生生物や魚貝類の生存に悪影響を及ぼす。したがって、感潮部における微生物反応も含めた水質変換過程を定性的・定量的に把握し、水質保全あるいは水質改善のための方策を提案する必要がある。

従来の研究では、感潮部における諸現象の発生機構や支配因子を解明したり、水質予測モデルの開発が行われてきたが、感潮部における現象の支配因子そのものが不確定な要素による影響を受けているため、現象の把握や解明が不十分であり、将来の水質改善や水環境保全に対する効果的な対策を具体的に実行していくまでには至っていない。

本研究は、強混合河川感潮部における時間的・空間的な水質変動特性を把握し、物質輸送機構の解明と水質変換過程のモデル化を行い、感潮域での水質環境管理のあり方を提案しようとするものである。ここで、強混合河川とは、感潮部を塩分の浸入状況とその混合形態によって分類したときに、河道方向にのみ塩分濃度勾配が存在し、横断面内での濃度分布がほとんどない感潮河川のことをいい、一般に潮汐の影響を強く受ける。水理的には、潮汐の影響が大きく、塩水くさびのような特徴のある現象がみられないため研究の対象となることが少なかった。しかし、弱混合(塩水くさび)型の感潮部に比べ、強混合型の場合には流れの規模が大きく、潮汐作用による河道方向への物質輸送が卓越する。また、海水の影響を受けるため、そこでの水質変換過程も河川順流部や湖沼のものと異なり、流れの変化が大きいことから海域とは異なる変動特性を示すものと考えられる。

本研究では、実際の強混合河川感潮部を対象にした現地調査を実施し、その結果に基づいた水質変動特性の検討、室内実験やシミュレーションモデルによる物質輸送機構や水質変換過程の検討を行い、最終的に感潮部を対象とした水質環境管理のあり方を提案する。各章の内容は次の通りである。

まず、第2章では河川感潮部を水理的及び水質学的に分類し、その特徴について整理する。感潮部の水塊分布は、基本的にはそこでの流れの状況に依存するものであり、流況を把握することが重要である。水理的には混合形態及び水の交換率によって分類し、水質学的には塩分及び懸濁物質・底泥の特性によ

り分類する。また、感潮部での現象変化の時定数と空間スケールに関して、現象解析や水質予測モデルとの関係を考慮した整理を行う。

続いて、第3章では実際の強混合河川感潮部を対象に実施した現地調査の結果に基づいて、感潮部における水質の時間的・空間的変動特性を検討する。感潮部では様々な時間的・空間的スケールの現象が生じているため、実際に測定される水質も時間的・空間的に大きく変化する。強混合河川感潮部における水質の時間変化は、潮汐作用の周期性との関連が大きいいため、一潮汐間及び大潮から次の大潮までの15日間程度の水質変化について検討する。さらに、水質項目間の濃度変動の相関について検討し、現象の関連性を明らかにする。その結果、溶存態の物質は、感潮部上流端からの累加水量を基準にして整理することにより、感潮部において生じている硝化反応等の現象をうまく説明できることを示す。また、懸濁物質濃度が高い場合には、その影響が水質にも現れることを示す。

第4章では感潮部における懸濁物質輸送の特性と機構について検討する。感潮部での懸濁物質の挙動を、底泥の巻き上げ、懸濁物質の沈降、浮泥・底泥形成の各過程に分け、これらの現象を理論的・実験的に検討し、巻き上げ速度や沈降速度、底泥化速度を定量的に示すことを試みる。また、感潮部では懸濁物質の高濃度塊 (Turbidity Maximum) が形成され、河道方向への物質輸送が起これり、局所的な洗掘や堆積が生じている。このような物質輸送機構及び移流分散機構に関する現地調査を行い、その結果に基づいて懸濁物質・底泥の巻き上げや堆積が物質輸送に及ぼす影響について検討する。その結果、水位変動の大きい強混合河川では、断面積変化による物質輸送量が大きくなることを示す。以上の検討によって明らかにされた物質輸送の各過程の特性に基づいて懸濁物質輸送のモデル化を行い、懸濁物質濃度変動のシミュレーションを行う。物質輸送の計算では、距離基準の表現では数値拡散による輸送が相対的に大きくなるが、基礎式を累加水量を基準にした表現に改めて計算することにより長期的な濃度変動をうまく再現できることを示す。

第5章では感潮部での水質変換過程に関して、無機態窒素の形態変化を検討する。感潮部での硝化・脱窒過程について、現地観測結果を基にした検討及び室内実験による検討を行う。SS濃度が高い場合にはSSによる硝化も生じ、塩分や水温による影響があることを示す。また、これらの検討結果を基に無機態窒素の変換過程のシミュレーションモデルを作成し、半月周期にわたる各無機態窒素の濃度変動を再現する。さらに、その数値計算結果に基づき、感潮部での窒素変換過程を定量的に評価する。

最後に、第6章で以上で得られた結果を強混合河川感潮部の特性としてとりまとめるとともに、感潮部に関する水域の水質環境管理のあり方について工学的見地から考察する。水域の水質環境管理は、流域での利水状況と汚濁負荷との関係から一般に論じられるので、感潮域を対象とした水質汚濁防止対策の効率的な手法について考察し、本研究の結論とする。

参考文献

- 1) 栗原康編；河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー，東海大学出版会，1988.
- 2) 栗原康；河口域および沿岸域における汚染物質の挙動に関する研究，人間生存と自然環境4 (佐々学，他編)，東京大学出版会，pp.132～156，1977.
- 3) 杉本隆成；河口域生態系における物理環境—研究の現状と問題点—，水産海洋研究会報，38，pp.103～108，1981.
- 4) 楠田哲也；水環境工学 (佐藤敦久編)，技報堂出版，p.201，1987.
- 5) Pritchard, D. W.; What is an estuary: Physical viewpoint, Estuaries (G.H. Lauff ed.), American Association for the Advancement of Science, pp.3～5, 1967.
- 6) 宇野木早苗；河川潮汐の研究 (第1報)，土木学会第15回海岸工学講演会講演集，pp.226～235，1968.
- 7) 宇野木早苗；内湾の環境科学 (西條八束編) 上巻，培風館，p.84，1984.

第2章 河川感潮部の水理・水質に関する分類と特徴

2. 1 緒言

河川感潮部に関する研究を行うにあたって、まず河川感潮部を定性的・定量的に分類する必要がある。感潮部の分類は、塩分分布と水塊の混合形態とが相互に影響を及ぼしあっていることから、従来より塩分分布によって行われてきた。しかし、感潮部では流れが様々な要因により生じており、流れを含めた外的な要因によって形成された水塊の分布が、新たな流れを起こす原因ともなる。すなわち、感潮部は極めて非定常な場であり、そこでの現象も種々の時間・空間スケールで生じる。

本章では、従来より行われている感潮部に関する分類法について整理する。

2. 2 水理学的分類と特徴

2. 2. 1 河川感潮部での流れ

河川感潮部での流れには、感潮部上流端からの河川固有流や潮汐運動に基づく水位変動に伴って生じる潮汐流の他にも、河川水と海水との塩分差に起因する河口密度流、懸濁物質濃度差による密度流、水温差による熱対流、風による吹送流や波浪流、地形性の渦流等がある。これらの流れの規模は、時間的にまた空間的に大きく変化する。さらに、潮汐現象は天体運動に基づくものであり、多くの周期成分の和として表され、これによる潮汐流も周期的な変動を示す。また、河川流も気象変化や流域からの人為的な流入量の変動によって大きく変化する。

感潮部のある地点での流速を一潮汐間で平均すると零とならない。このような振動的な潮汐運動に伴う平均流は潮汐残差流といわれ、潮汐運動の非対称性のために生じる。また、各点での潮汐流が完全に周期的で平均流が零であっても、潮汐流の振幅や位相が場所的に異なるため、水粒子が一潮汐後に元の位置まで戻ることができず一方向の流れを作ることがあり、この種の流れがストークスドリフトといわれる。一潮汐間で平均した鉛直方向の流速分布では、上層部で河口に向かう平均流、下層部では上流に向かう逆方向の平均流が存在することがある。これは重力循環あるいは鉛直循環、内部循環といわれ、河道方向への物質輸送に重要な役割を果す。さらに、河幅が広く横断方向の水深が一樣でなかったり、河道の湾曲がある場合には、一潮汐平均の流速分布が横断方向にも形成され、水平循環が生じることもある。

河川感潮部での流れをまとめると表2-1のようになるが、このような流れにより水塊の混合や河道方向への物質輸送、堆積底泥の再浮上といった現象が引き起こされる。さらに、これらの現象による物理的な環境条件の変化が、新たな流れを誘引する原因となる。したがって、河川感潮部を水理学的に分類する際には、流れの状況を把握し、その支配要因を明らかにすることが重要である。流れによって輸送される

物質質量、運動量、そしてエネルギーが対象とする場で平衡状態にあり、現象変化が定常となった状態で分類することが理想的であると考えられるが、現実には非定常な状態で分類を行わなければならない。そのためには、瞬時的あるいはある一定時間内の平均的な状態での分類ということになる。このような非定常性も感潮部での物理環境の重要な支配要因である。

表2-1 河川感潮部での流れ

瞬時的な流れ	一潮汐間の平均的な流れ
河川固有流	潮汐残差流(ストークスドリフト)
潮汐流(上げ潮流, 下げ潮流)	重力循環流(鉛直・内部循環流)
河口密度流	水平循環流
熱対流	
吹送流, 波浪流	
地形性渦流	

2. 2. 2 混合形態による分類

河川感潮部における水理学的な混合状態は、一般に塩分侵入の状況によって図2-1に示すように、弱混合、緩混合、強混合に区分される¹⁾。弱混合型では、入退潮による混合が弱く、河川水と海水とが2層をなして塩水くさびを形成する。したがって、上層では河口に向かう河川水の流れ、底層では上流に向かう海水の流れが生じ、一潮汐間の平均をとると上下層で流向が異なり、いわゆる重力循環が形成されている。強混合型では、入退潮による拡散・混合が強く、横断面内の塩分分布はほぼ一様で、塩分は流れ方向のみの関数となる。緩混合型はこれらの中間であり、縦断面方向(流れ方向)・横断面方向ともに濃度勾配が存在する。この場合の流れでは潮流の影響が卓越するため、重力循環は弱められている。このような混合形態は時間的・空間的に一定ではなく、地形、河床勾配、潮位変動量、河川流量等の様々な物理的要因の影響を受けて変化する。海水の塩分が低くかつ水温が高いとき、流入する河川水の水温が低く懸濁物質を多く含む場合には、河川水の方が密度が大きくなり、海水の下に潜り込む淡水くさびが観察されることもある²⁾。とくに、強混合状態の場合には、断面内の塩分差が小さいので、停潮時前後でこのような淡水くさびが生じ易くなる。

河川感潮部における混合形態を定量的に区分することは重要である。須賀³⁾は、水表面の塩素イオン濃度が底面付近の濃度の0.1以下の場合を弱混合、0.1~0.5の場合を緩混合、0.5以上の場合を強混合としている。この定義に従い、全国90ヶ所の1級河川について、感潮区域長と大潮時潮位変動量をパラメータに整理したのが図2-2である。潮位変動量が1m以下の河川は、日本海側に河口を有する河川であり、感潮区域長の短い場合にはかなり明瞭な塩水くさびが出現する。潮位変動量が1~2.5mの河川は、ほとんどが太平洋側に流出する河川であり、基本的には緩混合の状態にある。潮位変動量が3m以上になる河

川は、有明海と瀬戸内海の一部に河口をもつ河川であり、混合の程度は大きい。なお、潮位変動量によって感潮部が分類されることもある。Dyer⁴⁾は、潮位変動量が2mより小さいものを小潮位 (microtidal)、2~4mのものを中潮位 (mesotidal)、そして4mより大きいものを大潮位 (macrotidal)の感潮部として分類している。これらの分類は、概ね弱混合、緩混合、強混合に対応している。

また、Hansen-Rattray⁵⁾は、図2-3に示す成層循環図 (stratification-circulation diagram) を採用している。この図で、横軸は河川固有流による流速に対する正味の表面流速の比であり、縦軸は塩分の断面平均値に対する表層と底層との濃度差の比である。 v は上流方向への全塩分輸送量に対する移流分散による輸送量の分率 (diffusive fraction) であり、 $v=1$ のときは上流方向への塩分フラックスは全て移流分散によるものであり、 $v \rightarrow 0$ となるに従い2層流れにおける重力循環流によって上流方向へ塩分が輸送されるようになる。この図で、 $v > 0.99$ となる領域をTYPE 1、同じく $0.01 < v < 0.99$ をTYPE 2、そして $v < 0.01$ をTYPE 3に分けている。TYPE 1は、残差流の反転がなく、重力循環による塩分の上流方向への輸送がないものである。TYPE 2は水深方向に流れの反転が生じており、上流方向への塩分の輸送は重力循環とそのほかの輸送機構によるものであり、TYPE 3はその99%が重力循環によるものである。さらに、断面積当りの流量から求められる断面平均流速 U_r 、潮汐流の自乗平均流速 U_t 、密度差に起因する流速 $U_d = (g h \Delta \rho / \rho_s)^{1/2}$ (ここで、 h ; 水深、 ρ_s ; 海水の密度、 $\Delta \rho$; 河川水と海水の密度差) を用い、次の2つのパラメータを定義している。

$$F_m = U_r / U_d \quad (2.1)$$

$$P = U_r / U_t \quad (2.2)$$

実際の感潮域の資料から、それぞれ u_s / U_r (u_s は表層の流速) が F_m に依存し、 $\delta S / S$ (塩分の断面平均値 S に対する表層と底層の濃度差 δS の比) が F_m と P に関係することを明らかにしている。また、Fischer⁶⁾ は、エスチャリー・リチャードソン数 ($Ri_E = \Delta \rho g Q_r / \rho_b U_t^3$; ただし、 Q_r は淡水流量、 ρ_b は底層の密度) を用いて整理し、これらパラメータの関係より、 $Ri_E = P^3 / F_m^2$ であることから、 $\delta S / S$ が Ri_E に依存することを示している。これらは、浮力効果を定量的に表し、成層化の程度や重力循環の強さによって感潮部を分類しようとしたものである。

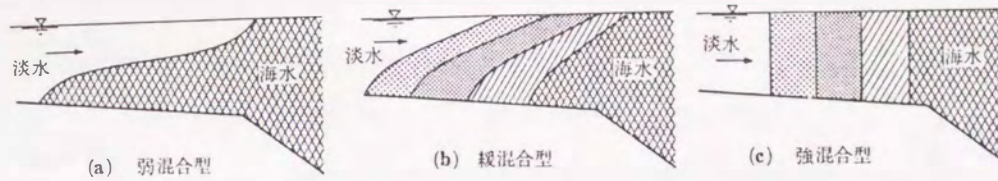


図 2-1 河川感潮部の混合形態

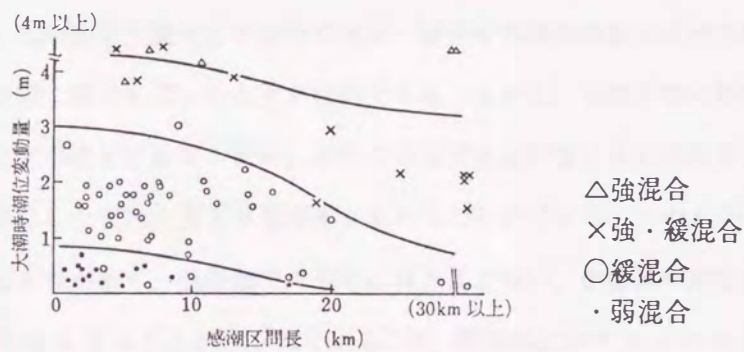


図 2-2 河川感潮部の混合形態の区分 (須賀³⁾による)

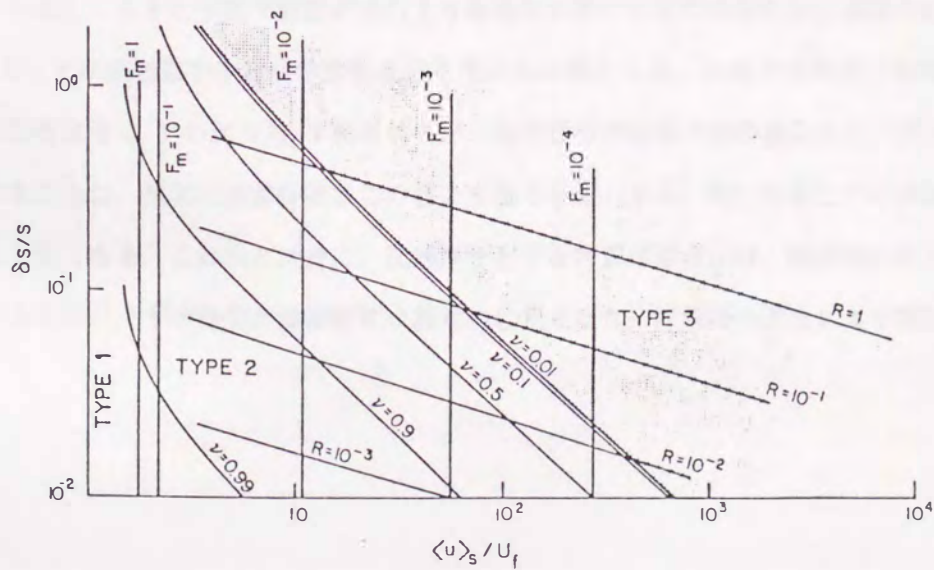


図 2-3 Hansen & Rattray の成層循環図⁵⁾

注) 図中の R は R_{iE} のことである

2. 2. 3 水の交換率による分類

一潮汐間の河口を通しての水の交換の程度により感潮部を分類することもできる。一般には、内湾を対象に湾口を通しての海水交換率⁷⁾として説明されるが、同様に感潮部に対しても次のように水の交換率を考える。

$$\alpha = q_{EX} / Q_F \quad (2. 3)$$

ここで、 q_{EX} は1潮汐間に交換した水量であり、 Q_F は上げ潮期間中に河口から流入してきた水量である。実際には、水そのものの交換水量を得ることは非常に難しいため、ある物質を指標としてその濃度を用いることにより、河口を通しての物質交換として表現できる。塩分が水塊の移動とほぼ同様の挙動をすることから、水塊移動の指標物質に塩分を用いることが便利である。しかし、日潮不等の影響があるときには一潮汐間での通過水量の収支が零とならないため、河口での通過水量が零になる期間を1周期とし、その間の塩分輸送量の収支を基にした交換水量より交換率を求めることができる。このようにして交換率を求めた例には、内湾におけるものが多く、感潮部でのものはほとんどない。伊勢湾や東京湾のような内湾に対する海水交換率が5~15%となることが示されている⁷⁾が、感潮部に対する α の値も同程度になるものと思われる。

感潮部に存在している水塊や物質の滞留時間も感潮部の特性によって変わる。ここでの滞留時間とは、感潮部の上流より流入してきた水塊や物質が河口より海域に出ていくまでの平均的な通過時間として定義され⁸⁾、物質にとっては感潮部で生物化学的な反応を受ける時間となる。水塊の平均滞留時間は、感潮部の容積 V と河川固有流量 Q_r との比 V/Q_r で表されるが、塩分分布が弱混合型の場合には、河川水が塩分躍層の上を流下するために、現実の滞留時間はこの値より短くなる。また、河口を通しての水塊の交換が生じている場合にも短くなる。これらとは逆に、沈降性を有する物質の場合には、感潮部内のくぼみ等に底泥として堆積するために、その物質の滞留時間は相対的に長くなり、降雨時の流出により掃流されるまで貯留される。

2. 3 水質学的分類と特徴

2. 3. 1 河川感潮部での水質

感潮部での水質は、基本的には河川における水質として考えられる。しかし、感潮部の水は河川水と海水とが混合したものであるため、海域での水質に関する取り扱い方法も考慮して、採水や水質分析等が行われなければならない。さらに、感潮部での水質を単に河川水と海水とが混合したものとして考えるだけでは不十分な場合がある。例えば、河川に準じてBOD₅を測定する際に、試料水の希釈を行うときには、希釈水の塩分を考慮していないために、試料水の有機物量だけでなく塩分も希釈されている。このようにして求められたBOD₅は、希釈されなかった場合の酸素消費量とは異なる。したがって、酸素供給を行いながら消費量を測定していくことによりBOD₅を求める方法等を採用することも必要となる。

感潮部の水質学的な分類方法は、塩分によるものが一般的である。塩分は水塊の混合形態を分類する際の指標としても利用されるが、塩分による他の水質に及ぼす影響もみられる。また、感潮部の水中や河床に存在する懸濁粒子は、粘土鉱物のような無機物やプランクトン、生物遺骸のような有機物からなり、この懸濁物質・底泥の特性により分類することも考えられる。この他、森下ら⁹⁾は、生物からみた河口域の分類を、底生動物相、汽水区間の長さ、そして1次生産量を指標に用いて行っている。

そこでまず、河川水と海水との混合形態による水理学的な感潮部の分類にしたがって、それらの水質の特徴をまとめると次のようになる。

弱混合型では、塩水くさびの挙動が感潮部での水質変動・分布に重要な役割を果たしている。七北田川における調査例¹⁰⁾をみると次のようにまとめられる。平水流量時には、流入河川水は塩分躍層上部をそのまま流れ、下層には海水が浸入し、長時間滞留するために溶存酸素が低くなる。SS濃度分布では、流れが緩やかで底泥の巻き上げが生じないため、全体的に濃度が低いが、塩水くさびの先端付近で高くなる傾向がみられる。また、吉野川の例¹¹⁾では、塩水くさび先端部のSS濃度は低く、塩分躍層の上部と河口最深部に高SS濃度が現れている。前者は河川由来のSSであり、後者は海洋性プランクトン由来のいわゆる海洋性SSである。このように、弱混合の状態では、潮汐作用による影響が小さいため潮汐周期による時間的な水質変動はあまり見られず、空間的な分布に特徴がある。

緩混合型では、河川流量の変化によって密度成層の度合が変化するため、河川流量が多い場合には弱混合型、河川流量が少ないときには強混合型の特徴を示す。河原ら¹²⁾の旭川感潮部における調査例では、SS濃度分布と密度成層の関係について次のような結果が得られている。河川流量が多く、強く密度成層している場合には、巻き上げられた底泥の鉛直輸送が密度成層によって抑制されるとともに、表層では比較的清浄な河川水によりプランクトンや排水の濃度が希釈される。一方、河川流量が少なく、強混合型に近くなると鉛直輸送が容易になり、表層には排水やプランクトンの影響が強くなり複雑な分布型となる。

強混合型の感潮部での調査例には、筑後川でのものがある¹³⁾。塩分は、河道断面内での鉛直方向の変化がなく、潮相に応じて河道内を移動している。一方、SS濃度分布では、表層付近では塩分分布と似た形をしているが、底層では水平に層状の分布をしており、流れによる底泥の巻き上げが生じている。

2. 3. 2 塩分による分類

感潮部での水質は、水中の物質の状態や種類によって、分布特性や変動特性が異なる。まず、塩分によって淡水と塩水に分けられ、塩化物イオン濃度が 500 mg/l 以下のものを淡水、500 mg/l 以上のものを塩水としている¹⁴⁾。河川水の塩化物イオン濃度は一般に 1~20 mg/l であり、海水のものは約 19 g/l で、両方の水が混ざったものは汽水と呼ばれている。

ところで、水中の塩分量の表示方法には、海洋学の分野で用いられる塩分 (salinity)、塩素量 (chlorinity) があり、水質工学では塩化物イオン (chlorides) が用いられ、同じ意味で塩素イオンという表現も使われている。塩分とは「海水 1 kg 中に含まれる固形物 (イオン及び分子化合物) の全量を g 数で表したもの。ただし、すべての炭酸塩は酸化物に替え、臭素・ヨウ素を塩素で置換し、有機物は完全に酸化する」と定義され、塩素量は「海水 1 kg 中に含まれる塩素・臭素・ヨウ素の全量を g 数で表したもの。ただし、臭素とヨウ素は塩素に置換されているものとする」と定義されている¹⁵⁾。なお、塩分及び塩素量の単位には % が使われる。塩化物イオンは、塩素量と同じモル法で測定され、一般に臭化物イオン、ヨウ化物イオンも定量され、濃度として mg/l の単位で表される。これらの水中の塩分量を示す指標では、塩分を S (%), 塩素量を C (%), 塩化物イオン濃度を C_{Cl} (mg/l) とすると、次式のような関係が成り立つ。

$$S = 1.80655 \times C = 1.80655 \times C_{Cl} / \rho_w \quad (2. 4)$$

ここで、 ρ_w は試料水の密度 (kg/m^3) である。また、電気伝導度 (電導度)¹⁶⁾ は水中の溶存イオン量を大まかにではあるが瞬間的に知ることのできる指標であり、この電導度と溶解物質濃度との間に関係が認められることから、海水と河川水との混合状況を示す際に簡便に用いられることもある。

なお、本論文中で水中の塩分を定量的に示す場合には、水質工学的な立場から塩化物イオン濃度 (mg/l) で表現するものとする。

感潮部における塩分は、水中や底泥中での懸濁粒子の凝集や吸着、溶出のような物理・化学的な諸作用に影響を及ぼしている。懸濁粒子の凝集には、塩化物イオンの他にカルシウムやマグネシウム等の陽イオンも影響するが、海水中でのそれらの濃度は河川水のものに比べはるかに高くなっている。塩分は、感潮部のプランクトンや底生動物にも影響を与えている。塩分の増加にともなって出現するプランクトンの組成が変化し、河口域の生物は淡水性、低塩性、中塩性、高塩性、真高塩性 (海水性)、超高塩性に分類され

ている¹⁷⁾。

2. 3. 3 懸濁物質の特性による分類

1) 懸濁物質の定義

河川感潮部における懸濁物質は、懸濁粒子自体による濁りあるいは水中の有機物や栄養塩類、重金属等の輸送媒体として重要な役割を果たす。懸濁物質 (suspended matter, suspended solids) は、基本的には水中に浮遊する物質として定義され、浮遊物質といわれることもある。このような懸濁物質は、無機物及び生物の遺骸や微生物、プランクトン等のような有機物からなる。

水中の懸濁物質は、懸濁粒子 (suspended particle) が個々に分散した状態とそれらが凝集しフロックを形成している場合とがあり、懸濁物質と水との混合物は懸濁液 (suspension) といわれる。さらに、懸濁物質が水底に沈積したものは、底泥 (sediment, bed muds)¹⁸⁾ といわれ、懸濁液に比べてSS濃度・密度が高くなっている。したがって、底泥を構成する固体物質は、本質的には懸濁物質と同一である。このような懸濁液・底泥の定義は、研究者によりそれぞれ行われており、SS濃度・密度によるばかりでなく流動特性や流送特性によっても区別される。Paker¹⁹⁾ は、SS濃度 2 g/l 以下のものを流動的で分散した懸濁液 (moving dispersed suspension), 3~300 g/l のものを高濃度懸濁液 (high concentration suspension), それ以上を底泥 (consolidating bed) とし、それぞれニュートン流体、擬塑性流体、ビンガム流体としての流動特性を示すものとしている。また、Mehta²⁰⁾ やKirby²¹⁾ は、SS濃度 150 g/l までのものを横方向の移動がある流動的な懸濁液 (mobile suspensions) で、250 g/l までのものを横方向の移動がない非流動的な懸濁液 (stationary suspensions), それ以上を堆積底泥 (settled mud) としている。Odd²²⁾ は、浮泥 (fluid muds) のSS濃度として 60~120 g/l を示し、それ以上のは軟弱泥 (weak soil) としている。その他、浮泥のSS濃度の下限値には、干渉沈降が生じ初めるような濃度として 10 g/l を、上限値には現地堆積底泥の密度より 280 g/l が示されている。

本論文では、水と懸濁物質の混合物について、懸濁物質が水中にあり浮遊状態にあるものを「懸濁液」、懸濁物質が水底に沈積したものを「底泥」と呼ぶことにし、さらに、これらの中に位置するものとして「浮泥」を用いる (ただし、河川工学で用いられている wash load とは異なる)。懸濁液と浮泥が異なる点は、前者では水中にある懸濁物質が、衝突としての粒子間の接触はあるが、分散した状態にあること、後者の場合には、粒子間接触により下方の懸濁物質が上方の懸濁物質の重量を支持している点である。また、浮泥と底泥の区別は、それらの濃度や密度、含水比といった懸濁物質混合の稠密さを示す指標によって行い、流動時の応力に対する強度やコシテンシーが異なる。浮泥が流動性を有し、応力により容易に変形・流動するのに対して、底泥は流体のように変形しないものとする。これらの状態を模式的に示すと図 2

- 4 のようになる。

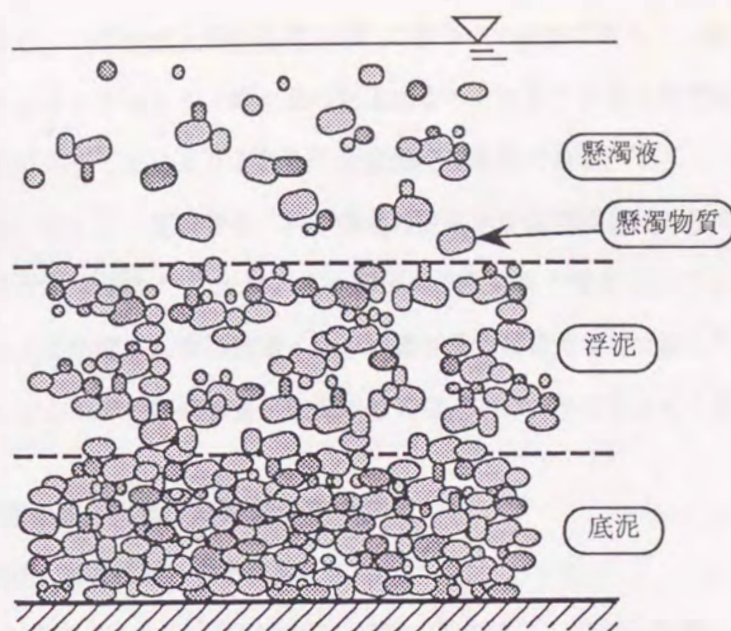


図 2-4 水中における懸濁物質の状態

2) 懸濁物質の性質

感潮部における懸濁物質を取り扱うときには、粒子個体としての性質が問題になるときもあれば、粒子集合体としての性質が重要になる場合もある。したがって、懸濁物質の性質は、

- ①粒子個体としての性状に関するもの、
- ②粒子の表面化学的な性状に関するもの、
- ③集合体としての性状に関するもの、

に大別できる。

懸濁物質の性質と特徴について、以下に簡単にまとめる^{23),24),25)}。

①に関する性質には、粒径、粒子形状、密度、組成鉱物等がある。粒径は、土質工学と河川工学では分類する名称及びその粒径範囲が異なる。粒子の直径を示すときには、粒子が一般に不規則な形状をしているため、ふるい直径、等価直径、名目直径が粒径に応じて使用される。この不規則な粒子形状を表現するために形状係数(S.F.)が用いられる。形状係数は、粒子の沈降速度に最も影響を与える要素となる。なお、粘性土の場合には、光学顕微鏡で確認できる構造単位(ファブリーク fabric)が個体粒子(クラスター cluster)と考えられ、さらに電子顕微鏡を用いて観察すると、この構造単位がドメインといわれる構造単

子の密度は、構成する鉱物の種類により異なるが、 $2,650 \text{ kg/m}^3$ が代表値として用いられる。

組成鉱物の種類は多く、化学組成及び結晶構造(系)に基づいて分類される。一般に海底における安定鉱物がイライト系及びクロライトであり、陸水成の粘土鉱物のそれがカオリン系であることから、懸濁物質の粘土鉱物の含有率を調べることでそれらの生成過程を推察できる。

②に関する性質には、陽イオン交換容量、粒子表面の吸着水や鉱物結晶間の層間水等の化学的性質、等がある。陽イオン交換容量(CEC)^{27), 28)}とは、粘土粒子の表面に負の電荷とつり合いを保つために吸着された間隙水中の塩の正に荷電した交換性陽イオンの量を単位質量当たりで表したもののことである。

③の懸濁粒子の集合体としての懸濁物質・底泥の性質は、次のようにまとめられる。

- (1) 混合特性 (粒度組成, 有機・無機成分等)
- (2) 容積特性 (密度, 充填状態, 含水比等)
- (3) 流動特性 (コンシステンシー, レオロジー特性, 懸濁液としての粘性等)
- (4) 沈降特性 (沈降形態, 沈降速度等)
- (5) 流送特性 (流送形態, 限界掃流力, 巻き上げ速度等)

まず、混合特性は懸濁物質・底泥を構成する粒子の粒度組成から分類される。日本統一土質分類法²⁹⁾では、粒度分布と塑性図より土の分類を行っている。粗粒分 ($75 \text{ mm} \sim 74 \mu\text{m}$) が 50 % より多いものを「粗粒土」、細粒分 ($74 \mu\text{m}$ 以下) が 50 % より多いものを「細粒土」とし、さらにそれらを礫分や砂分の比率、液性限界等を用いて細分される。また、砂、シルト、粘土の各成分の三角座標表示法による分類も用いられる。各地の懸濁物質の粒度組成の調査結果によると^{29), 30)}、懸濁物質はこれらの分類の中では細粒土すなわち「シルト」、「粘性土」、「有機質土」に属する。

懸濁物質中の有機成分には、未分解の粗大有機成分や粒子に吸着されている腐植、貝殻中の炭酸塩や塩化物、硫化物等がある。このような有機物は、土質工学的性質に影響を与えるが、含有される有機物の種類が問題になることもある。なお、水中に浮遊する懸濁物質には、藻類や大型のバクテリアも含まれており、それらの量を水質工学的に表すときには、クロロフィル量を直接測定することも行われる。

次に、容積特性としての密度は、粒子の充填状態に影響されるため、粒度分布や圧密の程度により変化する。懸濁物質の場合は、通常水中に存在しているので湿潤密度で測定され、 $1,100 \sim 1,400 \text{ kg/m}^3$ の範囲にある。この値は、水位変化による露出乾燥や流水中での沈降にもなって値が大きくなる傾向がある。

底泥の自然含水比は高く、通常 150~250 % 程度であり、底泥表層付近では 400 % 程度になっている。したがって、レッド(錘鉛)による測深ではレッドが沈下し、音波測深の場合には底泥表面(密度変化面)で音波が反射されるため、この両者による水深に差が生じ、その差を浮泥層と称することもある。また、現

場での底泥含水比を簡便に知るためのスランプ試験も提案されている³¹⁾。含水比により底泥の剪断抵抗が変化するため、底泥の巻き上げ形態も変化する。

土のコンシステンシーは、液性限界、塑性限界、塑性指数等により示されるが、粒度分布、粘土鉱物の種類や結晶構造、含有する電解物質等により変化する。高濃度の懸濁液の状態あるいは高含水比状態にある懸濁物質・底泥は、一般に非ニュートン流体として複雑な流動特性を示し、土砂や汚泥の管路輸送等に関連して検討されている^{32), 33), 34), 35)}。非ニュートン流体は、流体に作用する剪断応力と速度勾配(剪断速度、ずり速度)との関係を示した流動曲線の形状により分類され、塑性流体、擬塑性流体、ディラタント流体に分けられる³⁶⁾。塑性流体とは、ある剪断応力までは流動せず、降伏値を持つようなものであり、さらにビンガム体と非ビンガム体に分けられる。懸濁物質・底泥は、一般にビンガム流体として扱われ、粘度と降伏値が測定される。懸濁物質・底泥の流動特性に対する含水比(懸濁液濃度)、粘土鉱物の種類、粒度分布、吸着陽イオン、温度、測定方法(剪断応力制御、剪断速度制御)等の影響について検討され、活性化エネルギーや結合数を用いた流動機構のモデル化も行われている^{37), 38)}。

懸濁物質の沈降特性は、懸濁液の濃度や懸濁粒子の性質、懸濁媒の種類により変化する。懸濁粒子の単粒子としての沈降、いわゆる自由沈降では、粒径、形状、比重、水の動粘性係数、側壁の影響、水の乱れ等の要素が影響するが、これらの影響を考慮した沈降速度式が理論式及び実験公式として与えられている²⁴⁾。懸濁液のSS濃度が上昇すると、粒子間の相互作用が現れ、いわゆる干渉沈降となる。懸濁液濃度と沈降速度との関係は、濃度の変化に対して沈降速度が極大値をもつ形となる²²⁾。このとき、懸濁粒子は凝集してフロックを形成する。フロックの形成は、濃度の他に懸濁粒子の大きさ、形状、粒度分布、吸着陽イオンの種類、攪拌強度等の影響を受ける。

底泥の流送形態は、その含水比によって大きく異なる³⁹⁾。含水比が低い場合には、底泥表面に流れと垂直方向にひび割れが生じ、これが引き剥されるように塊状で巻き上げられる。含水比が高くなると、底泥表面に流れと同じ方向に縦筋が発生し、底泥表面から層状に巻き上げられてくる。さらに含水比が高くなり底泥が自重で流動するような状態になると、界面波の碎波によって底泥が上層に連行される。このような含水比と流送形態との関係は、底泥の種類によっても異なる。また、限界掃流力とは底泥を構成する懸濁粒子が移動を開始するときの掃流力のことであるが、底泥が粘着性を有するために、粒径から算定されるものより大きくなる傾向がある。

以上のように、懸濁物質・底泥に関する性質には様々なものがあり、これらの性質は、感潮部における懸濁物質の挙動を解析する際の現象を支配する基礎的なパラメータとしても考えられる。また、集合体としての懸濁物質の性質は、懸濁粒子としての性質の影響を強く受け、性質間の相互関係が複雑となっている。したがって、懸濁物質の特性により感潮部を分類しようとするときには、懸濁物質を量的及び質的に

評価することが重要である。

3) 懸濁物質による感潮部の分類

河川感潮部は、そこに存在する懸濁物質の濃度や量、性質により特徴づけられる。感潮部を懸濁物質の特性により分類するとすれば、次のような方法が考えられる。

- (1) 懸濁物質の濃度による分類
- (2) 懸濁物質の性質による分類
- (3) 底泥の堆積量による分類
- (4) 底泥の性質による分類

感潮部における懸濁物質の濃度や量は、流れや水塊の混合形態とも関係して時間的・空間的に変化するが、これまでの感潮部を対象にした調査結果^{10), 11), 12), 13)}を見ると、感潮部におけるSS濃度には次のような特徴がある。まず、弱混合型の感潮部では、SS濃度は通常時には20 mg/l以下であり、くぼみや塩水くさびの先端付近で高くなる傾向が見られる。一方、緩混合型や強混合型では流れに応じて底泥の巻き上げが生じるために100 mg/lを越えることもある。とくに、筑後川や六角川のような有明海に流入する強混合河川では、最強流時の底層付近では10,000 mg/lを越えている。しかし、このような高濃度は瞬間的でも局所的なものであり、底泥との境界も明確でないため、通常時のSS濃度は最大でも50,000 mg/l以下と考えられる。洪水時には、流域からの流入土砂が増加するために、弱混合型の感潮部でも1,000 mg/lを越える。また、弱混合型では濁水時にも希釈水量が減少するために、SS濃度の増加が見られる。

以上のSS高濃度は主に無機物によるものであるが、有機物とくに微生物や藻類によるSS濃度は次のように計算できる。海域において赤潮が発生したときのSS濃度は、個体数を 10^6 個/ml、1個体の乾燥質量を 10^{-8} mgとすると、約10 mg/lとなる⁴⁰⁾。このように、有機物によるSS濃度は無機物のものに比べかなり低いことが分かる。

次に、懸濁物質の性質により分類する場合を考えると、まず、懸濁物質中の無機成分と有機成分との比率により分類することができる。流域からの有機物を含んだ排水が多くなると、当然懸濁物質中の有機成分が増加するが、SS濃度25 mg/lのときに有機成分が最大含まれたとしてもその内の10 mg/l分であり、有機物含有率として表せば40%となる。SS濃度が25 mg/l以下でも有機物含有率が40%以上のときは、かなり汚濁されているものと考えられる。SS濃度100 mg/l以上となるのは、洪水時や強混合河川で底泥の巻き上げがみられるときであり、有機汚濁という点からは問題はないが、底泥の堆積や洗掘が問題になる。

底泥の堆積量の把握は、河床が底泥からなる場合には単独の調査だけでは困難であり、経時的な堆積量の調査を行い、堆積量の変化として表す必要がある。懸濁物質が大量に存在するような強混合型の感潮部における懸濁物質の収支は次のように考えられている⁴¹⁾。SS高濃度塊には、感潮部上流域や海域から日常的に供給される懸濁物質に比べるとはるかに多量の懸濁物質が含まれており、一時的な懸濁物質の沈降と巻き上げを繰り返している。このような場所での懸濁物質の堆積は、日常的な状態では地形的に堆積しやすいところに生じるが、懸濁物質の堆積にともなって流況が変化するため、次第にその堆積量は減少し、最終的には平衡状態に達する。したがって、新たに浚渫したところや河川構造物を建造したところでは、懸濁物質が堆積しやすい状態になっている。このようにして堆積した底泥も洪水時にはフラッシュされ、感潮部から海域へと流出する。なお、洪水直後には、感潮部内の水塊はほとんど河川水に占められているため、日常の潮位変動に復したときに大きな密度勾配による重力循環が生じ、海側からの懸濁物質の供給が大きくなることもある²²⁾。また、満田^{42),43)}は、有明海湾奥部における一潮汐間の渦面変化について検討しているが、ここで得られた洗掘・堆積速度にはかなりの誤差が含まれているものと思われる。堆積量の変化を把握するためには、年単位での洪水回数を考慮した調査及び解析が必要であると考えられる。なお、有明海の干潟は100年で1km延びるといわれている。

底泥の性質による分類は、前述の懸濁物質の集合体としての5つの特性を用いて行うことができる。このような底泥のもつ特性は、感潮部での流況や流入土砂の性質によって異なるとともに、上層水の移動速度に比べ底泥のものが遅いため、感潮部における水質の長期的な特性を反映する。しかし、底泥の性質は深さ方向にも変化するために、柱状試料として採泥し、層状に試料を分取して分析を行わなければならない。

また、底泥は微生物や底生動物の生息場所になっており、その生物化学的特性や実際に生息する微生物等の種類によっても分類することができる。この生物化学的特性は懸濁物質の集合体としての性質の一つとして考えられるが、これにはpH、溶存酸素、塩分、酸化還元電位(ORP, Eh)、硝酸イオンや硫酸イオン等の化学物質の濃度等があり、底泥中における微生物による脱窒や硫酸還元、メタン生成等の生物化学的な反応に関わる重要な指標となる⁴⁴⁾。pHや塩分、酸化還元電位、溶存酸素によって好気性微生物あるいは嫌気性微生物の種類や個体数、活性等が変化する。底生動物は底泥の含水比や粒度分布(砂底泥、泥底泥)、冠水時間等によって生物相が変化する。

2. 4 現象変化の時定数と空間スケール

2. 4. 1 河川感潮部における現象変化

河川感潮部における物理現象には、河川水と海水との混合による流れや水塊の移動のような流体運動に

関するもの、懸濁物質の挙動に関するもの等がある。感潮部での化学現象は、主に淡水と塩水の混合により生じる。また、生物現象には、微生物の増殖、死滅、生物化学的な物質変化、魚介類の成長等がある。

感潮部を系統的に分析すると、感潮部は、河川水、海水、懸濁物質、微生物等の様々な要素によって構成される。これらの構成要素は、相互に影響を受けつつ時間的・空間的にその量や質が変動し、この変動が現象として捉えられる。したがって、現象変化とは各要素の状態の変化として考えられ、①要素の時空間的な位置関係の変化、②要素の量的な変化、③要素の質的な変化に分けられる。①に当てはまるものには、流れや懸濁物質の輸送、生活排水の流入等がある。②では河川流量の変化や懸濁物質の堆積量の変化、溶存酸素量の変化、微生物の増殖・死滅、③では水温の変化、沈降した懸濁物質の底泥化、水質の生物化学的な変化等が考えられる。このような現象変化のモデル化や解析を行うためには、まず現象の時定数と空間スケールを明らかにしておかなければならない。

2. 4. 2 現象変化の時定数

現象の時間的な変動には多面性があり、現象のもつ特性によりその時間スケールの取り方が異なってくる。現象変化の時間スケールの取り方には次のようなものが考えられる。

- (1) 現象の発生から消滅までの時間
- (2) 現在の状態が変化するとき、次の状態に達するまでの時間
- (3) 現象が周期性を示すときのその1周期の時間

(1)のように表すことのできるものは、明確にその現象の開始時刻と終了時刻を定めることができるものであり、これには、流体運動に関するものとして風波、吹送流、津波、高潮等、水質に関するものでは吸着、溶出、酸化、還元、懸濁物質の沈降・巻き上げ、微生物の増殖等がある。

同じく(2)のものは、現象変化が連続して生じる、言い換えれば現象の開始・終了時刻を定められないために、構成要素の量的あるいは質的な状態を段階的に表し、その一定の段階間を変化する時間を現象の時間スケールとして考えるものである。潮汐による水位変動、微生物量の変化等が考えられる。また、連続して変化する状態を量的・質的に表し、それらの一定時間内の平均値をその状態の代表値として用い、その代表値が変化する時間を現象の時間スケールとすることもできる。これには日あるいは月、年平均の水温や河川流量の変化等がある。

(3)の場合では、感潮部における現象の中で最も特徴的な潮汐現象がある。潮汐現象は多くの周期成分が合成したものであり、その主な時間スケールには半日周期の満・干潮や1日周期の日潮不等、15日程度を1周期とする大潮・小潮があり、さらに季節的にも潮差が変化する。

これらの時間スケールは、一つの現象変化が生じる時間として見たものであるが、これとは別に、一つの現象の発生から次に同じ現象が発生するまでの時間をその現象の時間スケールとすることもできる。魚の産卵では、産卵そのものの時間は短いけれども、それは1年間隔で行われる。また、台風や津波、高潮、赤潮等の発生している時間は各々決められるが、それらの発生は突発的である。このように、現象の時間スケールの表現は多面的であり、ある現象の時間スケールが示されたときには、その時間スケールが現象変化そのものの継続時間なのか、それとも現象変化の発生間隔を表すものなのかを注意して区別する必要がある。

このような現象変化は、同一の現象でも条件の違いによって量的・質的な状態の変化量が異なり、現象変化の時間スケールもある範囲をもったものとなる。その時間スケールに対して変化量の最も大きいものあるいは発生頻度の最も高いものをその現象の代表的な時定数として考えることができる。このような考え方により、感潮部での現象の時間スケールを整理すると表2-2のようになる。この表に示されるように、感潮部では種々の時間スケールをもった現象が生じている。

表2-2 感潮部における現象の時間スケール

時間スケール	気象	流体運動	水質変動	生物現象	人為現象
秒		風波	吸着, 溶出 酸化, 還元		
分		静振	懸濁物質の 沈降, 巻き 上げ 酸素の溶解	バクテリア の増殖	船舶の航行
時	気温, 水温 の変化	潮流 津波, 高潮	DO消費	光合成 プランクト ンの移動	生活排水の 流入 有害物質の 流入
日	降水量の変 化 台風	吹送流 河川流量変 化		プランクト ンの増殖	船舶航行の 頻度
週		大潮, 小潮		魚群の集散 赤潮	
月	平均温度の 変化	大大潮, 小 小潮	洗掘, 堆積		取水量の変 化
季	温度躍層の 変化			魚群の回遊	
年	長期変動			魚類の産卵	水利用形態 の変化

2. 4. 3 現象変化の空間スケール

感潮部で生じている諸現象の空間スケールを定めるときにまず問題になることは、現象の3次元性である。すなわち、一つの現象を空間的に記述する際には一般に3次的に表現され、各々の方向に異なる空間的な大きさをもっている。例えば、感潮部での潮汐現象にしても、鉛直方向には水位の変化として現れ、水平方向にはその水位変化が現れる範囲として見ることができる。また、懸濁粒子の大きさは大きくてもmmオーダーであるけれども、その空間的な広がりや移動距離は感潮部の大きさにもよるが10kmオーダーであり、粒子自体の大きさに比べるとはるかに大きくなっている。したがって、現象変化の空間スケールを整理するときには、現象そのものの大きさとその現象が及ぶ範囲とを区別する必要がある。

感潮部での現象の空間スケールは、感潮部を構成する要素の大きさにより制限される。感潮部を構成する要素の代表的な空間スケールを表2-3に示す。ここには、構成要素の大きさと要素の空間的な広がり示しているが、最大でも感潮部そのものの大きさを越えることはない。

現象を解析する際には、一般にその3方向のうち解析の目的に対して主要でないものについて近似を行い、次数を少なくし、現象が簡略化して表現される。このようにすることにより、複雑な現象も比較的単純に表現でき、解析することが可能となる。

表2-3 感潮部の構成要素の空間スケール

空間スケール	河道形状	流体関係	懸濁物質	生物
μm	渦の大きさ		懸濁粒子の大きさ	バクテリア プランクトン
mm		底面境界層の厚さ		後生動物
cm		潮汐(水位) 波高, 内部波高 高潮	底泥堆積厚さ	魚介類 水生植物
m	水深 河幅	潮汐, 津波 塩水くさびの厚さ		プランクトンの 上下動
km	感潮区間	塩水くさびの広がり	高濃度塊の広がり	魚群の回遊

2. 4. 4 現象変化の速度

ある現象の代表的な時間及び空間スケールが定まると、両者の関係から現象変化の速度を決められる。すなわち、現象変化の時間スケール及び空間スケールを各々軸にとり図式化することにより、現象の速度

が表現できる。ただし、現象変化の時間・空間スケールは各々ある範囲をもつので、組み合わせ方によって速度の範囲はさらに広がることになる。実際のモデルの中での速度式の表現は、このような点を考慮して、個々の現象変化を明確に定義した上で表されている。なお、このような速度と物質の量や濃度といった物理量との積の形で輸送速度として表現されることもある。

感潮部における現象変化には、動的な平衡状態にあるものも少なくなく、相対的に短い時間スケールで見たときの速度よりも長い時間スケールでのものが小さくなることもある。例えば、懸濁物質の挙動では、短い時間スケールでは懸濁粒子の沈降量は局所的にかなり大きくなることもあるが、それがすべて長期的な堆積量となることはなく、流速の上昇にともなって巻き上げられたり洪水時に流出したりするために長期的な堆積速度はそれほど大きくない。このような速度を実際の感潮部における調査により求めるときには、かなりの注意と長期的な調査が必要となる。

参考文献

- 1) 土木学会編；水理公式集(昭和60年版)，土木学会，p.581，1980.
- 2) 森下郁子，他；河口の生態学，山海堂，p.12，1982.
- 3) 須賀堯三；河川感潮部における塩水くさびの水理に関する基礎的研究，土木研究所資料，1537号，pp.168～169，1979.
- 4) Dyer, K. R. ; Coastal and estuarine sediment dynamics, p.236, John Wiley & Sons, 1986.
- 5) Hansen, D. V., Rattray, Jr.M. ; New dimensions in estuary classification, Limnology and Oceanography, Vol.11, No.3, pp.319～326, 1966.
- 6) Fischer, H. B. ; Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries, J. Fluid Mech., Vol.53, Part 4, pp.671～687, 1972.
- 7) 宇野木早苗；内湾の環境科学(西條八束編)上巻，培風館，pp.146～155，1984.
- 8) 楠田哲也；自然の浄化機構(宗宮功編)，技報堂出版，p.155，1990.
- 9) 前出 2) に同じ，pp.32～39.
- 10) 菊地永祐，杉本隆成，栗原康，花輪公雄；仙台市七北田川河口域の水質分布と河川流量，水産海洋研究会報，第40号，pp.47～53，1982.
- 11) 本田克久，浜田典明，立川涼；吉野川河口域の河川水—環境境界域における重金属類の動態，沿岸海洋研究ノート，第23巻，第1号，pp.26～33，1985.
- 12) 河原長美，名合宏之；旭川感潮部の水質分布におよぼす淡水流量の影響，水質汚濁研究，第6巻，第4号，pp.251～255，1983.

- 13) 満田雅男；筑後川河口の淡水混合と浮泥の濃度分布について，土木学会第16回海岸工学講演会講演集，pp.213～219，1969.
- 14) 半谷高久，小倉紀雄；水質調査法(改訂2版)，丸善，pp.14～15，1985.
- 15) 気象庁編；海洋観測指針，日本海洋学会，pp.155～157，1970.
- 16) 前出14)に同じ，pp.198～207.
- 17) 菊地永祐，栗原康；河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー(栗原康編)，東海大学出版会，p.155，1988.
- 18) 茂庭竹生；底質とは，水環境学会誌，Vol.16，No.2，pp.2～5，1993.
- 19) Parker, W. R.；On the observation of cohesive sediment behavior for engineering purposes, Estuarine cohesive sediment dynamics, Lecture Note on Coastal and Estuarine Studies (A. J. Mehta ed.), Springer-Verlag, pp.270～289, 1986.
- 20) Mehta, A. J., Parchure, T. M., Dixit, J. G., Ariathurai, R.；Resuspension potential of deposited cohesive sediment beds, Estuarine comparisons (V. S. Kennedy ed.), Academic Press, pp.591～609, 1982.
- 21) Kirby, R.；High concentration suspension (fluid mud) layers in estuaries, Physical processes in estuaries (J. Dronkers, W. van Leussen eds.), Springer-Verlag, pp.463～487, 1988.
- 22) Odd, N. V. M.；Mathematical modelling of mud transport in estuaries, Physical processes in estuaries (J. Dronkers, W. van Leussen eds.), Springer-Verlag, pp.503～531, 1988.
- 23) 土質工学会編；土質試験法(第2回改訂版)，土質工学会，1979.
- 24) 河村三郎；土砂水理学1，森北出版，pp.1～43，1982.
- 25) 松尾新一郎，嘉門雅史；物理化学的見地からのいわゆるヘドロの工学的性質について，土木学会論文報告集，第209号，pp.103～113，1973.
- 26) R.N.ヤング，B.P.ワーケンチン(山内豊聡，他訳)；新編土質工学の基礎，鹿島出版会，pp.1～25，1978.
- 27) 須藤俊男；粘土鉱物学，岩波書店，pp.229～235，1974.
- 28) 岩田進午；土のはなし，大月書店，pp.101～122，1985.
- 29) 大坪国順；底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究，国立公害研究所研究報告，第42号，p.23，1983.
- 30) 海田輝之；底泥の巻き上げと懸濁物質の沈降に関する研究，九州大学学位論文，p.3，1989.
- 31) 海田輝之，楠田哲也，二渡了，栗谷陽一；柔らかい底泥の巻き上げ過程に関する研究，土木学会論文集，第393号/II-9，pp.33～42，1988.

- 32) 大垣真一郎, 松尾友矩; 高濃度懸濁液の流動特性について, 土木学会論文報告集, 第210号, pp.21 ~32, 1973.
- 33) 佐藤敦久, 陳鴻霞; 上水汚泥の流動特性に関する研究 (I), 水道協会雑誌, 第51巻, 第10号, pp.33 ~39, 1982.
- 34) 佐藤敦久, 陳鴻霞; 上水汚泥の流動特性に関する研究 (II), 水道協会雑誌, 第52巻, 第5号, pp.30 ~41, 1983.
- 35) 前出 29) に同じ, pp.79~103.
- 36) 平井英二; 化学技術者のためのレオロジー, 科学技術社, pp.1~19, 1978.
- 37) 伊藤富雄, 松井保; 粘土の流動機構に関する研究, 土木学会論文報告集, 第236号, pp.109~123, 1975.
- 38) 松井保, 伊藤富雄; 粘土・水系の統一的な流動機構に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第242号, pp.41~51, 1975.
- 39) 前出 29) に同じ, pp.68~75.
- 40) 須藤隆一編; 環境浄化のための微生物学, 講談社サイエンティフィク, pp.54~60, 1983.
- 41) Dyer, K. R.; Fine sediment particle transport in estuaries, Physical processes in estuaries (J. Drokens, W. van Leussen eds.), Springer-Verlag, pp.295~310, 1988.
- 42) 満田雅男; 有明海浮泥の渦面変化への影響について, 土木学会第14回海岸工学講演会講演集, pp.286~289, 1967.
- 43) 満田雅男; 海中浮泥の分布と渦面への影響について, 土木学会第15回海岸工学講演会講演集, pp.175~179, 1968.
- 44) 左山幹雄, 栗原康; 河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー (栗原康編), 東海大学出版会, pp.32~42, 1988.

第3章 河川感潮部における水質変動特性

3. 1 緒言

河川感潮部では潮汐作用を初めとする様々な物理的要因によって流れや水塊分布が時間的・空間的に変化するために、そこでの水質も大きく変動している。また、感潮部に流入してきた物質は、そこに比較的長い時間滞留し、かつ上下流方向に繰り返し往復運動する間に生物化学的な諸作用を受けて物質変換を起こしている。このような感潮部での水質測定・観測は、流れの状況や水塊の混合形態を予め明らかにし、時間的・空間的な水質変動の概略を把握した上で実施されなければならない。

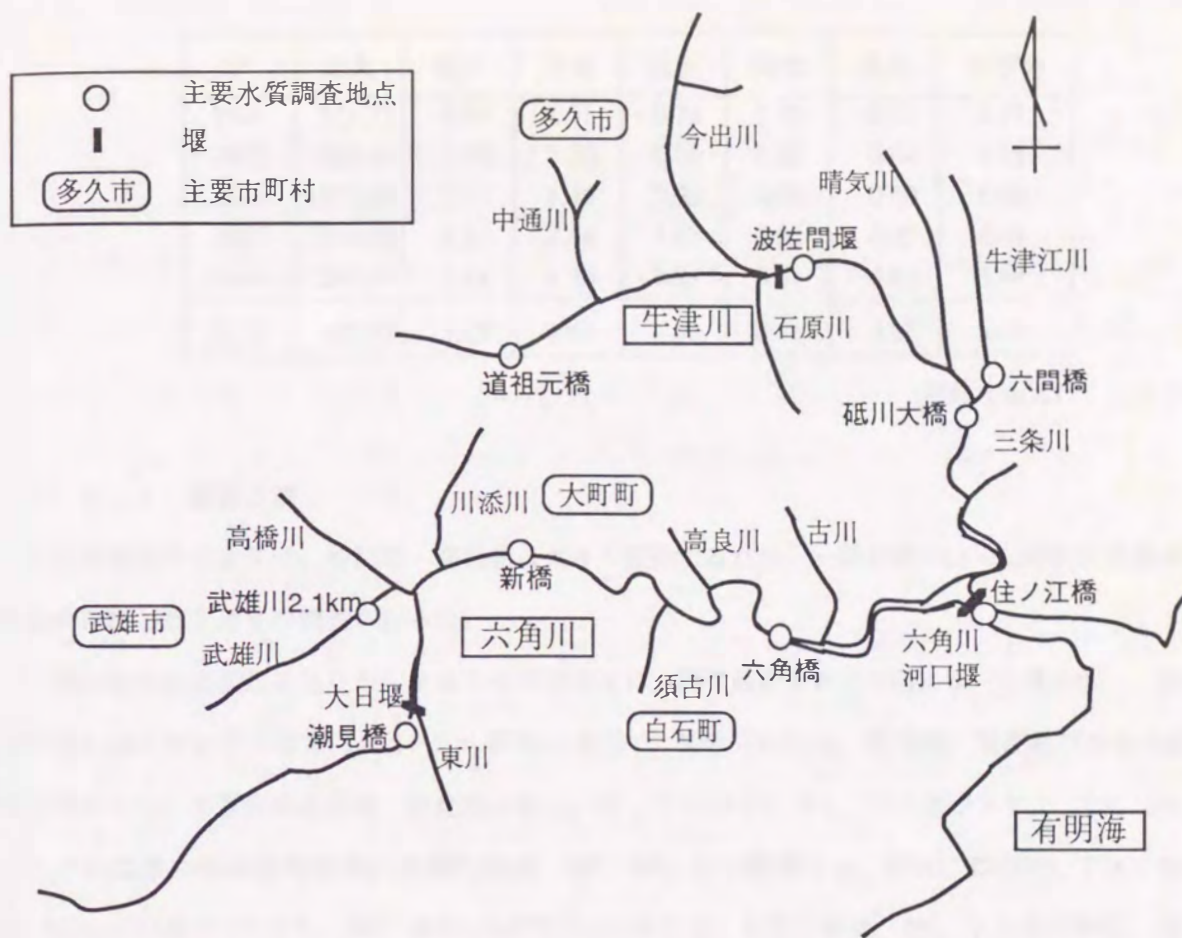
河川感潮部における潮汐現象に関する研究は、宇野木らによって行われている^{1), 2), 3)}が、それによると、満潮位は河口から感潮上限までほとんど変わらずにはほぼ同時に起こり、干潮の時刻は上流ほど遅れること等が明らかになっている。しかし、従来より河川感潮部で行われてきた水質測定は、採水地点や時刻の選定等を充分検討せずに実施されている。水質環境基準に関連する水質調査方法では、感潮部での採水方法として「潮時を考慮し、水質の最も悪くなる時刻を含むよう採水時刻を決定する」(環境庁水質保全局、環水管第30号、昭和46年)と記されているにすぎない。とくに、強混合河川感潮部では潮汐作用による時間単位での水質変動が大きいために、実際の日単位あるいは月単位の水質変化よりも測定値のばらつきが大きく、経年的な水質変化の把握等が困難になっている⁴⁾。

河川感潮部における水質変動特性や測定水質間の相関関係を明らかにすることは、感潮部での水質変動現象を把握し、物質輸送機構や水質変換過程を解明するための基礎となり、また、感潮部での水質調査方法の確立のための貴重な資料ともなる。本章では、有明海に流入する強混合河川感潮部を対象に、現地調査を実施し、感潮部における水質の時間的変化、空間的変化、ならびに各水質項目間の変動特性の相関について検討する。

3. 2 現地調査

3. 2. 1 対象河川

現地調査を行ったのは、佐賀県白石平野を流れ、有明海湾奥部に注いでいる六角川である。六角川は、佐賀・長崎県境に近い神六山に端を発し、河口より5 km程上流で支川牛津川が合流しており、流域面積341 km² (六角川 173 km², 牛津川 168 km²)、流路延長が六角川 47 km、牛津川 29 kmの1級河川である。流域の概要を図3-1に示す。感潮区域は、六角川で河口より29 km上流の大日堰まで、牛津川では合流部より14 km上流の羽佐間堰までであり、全流路延長に対する感潮区域の占める割合が他の河川に比べ大きくなっている。潮差は、大潮時に河口で5 m以上にも達する。



流域の人口密度は低く、主な汚濁源にはし尿処理場、プロイラー処理工場及び上流部の市街地がある。流域の70%以上が、山林、水田等の緑被地である。非降雨時におけるこれらの流域からの汚濁物質の流入は比較的少ないが、河川固有流量が小さいこともあって流入物質の感潮部での滞留時間は長く、本感潮部で観測される水質の時間変動では潮汐による影響が卓越している。

牛津川妙見橋地点(非感潮部)における河川流況³⁾を表3-1に示す。平水流量は、1~2.5 m³/sであり、感潮区域内の水量に対して通常時の流量がかなり小さい。また、水質環境基準による類型指定では、本川六角川で大日堰より上流がA、大日堰より河口堰までがD、河口堰より下流がEとなっており、それぞれ環境基準点が潮見橋、六角橋及び住之江橋となっている。一方、牛津川では中通川合流点より上流がA、同点より羽佐間堰までがC、それより下流六角川合流点までがDであり、道祖元橋、羽佐間堰、砥川大橋が環境基準点である。利水状況では、上流の非感潮部で上水道水源や農業用水として取水されているが、下流感潮部では河川水が塩分を含むためほとんど利用されていない。

表3-1 河川流況表⁵⁾

年	最大	豊水	平水	低水	渇水	最小	年平均
1984	221.37	1.80	1.01	0.78	0.13	0.03	3.17
1985	586.46	3.74	1.86	0.96	0.20	0.04	6.58
1986	523.00	3.01	1.46	0.94	0.28	0.00	5.90
1987	336.93	4.34	2.54	1.67	0.92	0.55	6.08
1988	386.57	2.71	1.26	0.81	0.51	0.03	3.99
平均	410.87	3.12	1.63	1.03	0.41	0.13	5.13

(単位；m³/s)

3.2.2 調査方法

河川感潮部での水質は、時間的・空間的に大きく変動するため、一潮汐間の14～16時間程度及び2週間程度の連続した2通りの調査を行った。

一潮汐間の水質変動を明らかにするための調査では、調査地点を河道方向に4～5地点配し、各調査地点で流心部において水深方向に1～2m間隔の数点で、30分毎に流速、電導度、濁度及び水温の測定⁹⁾と採水を行った。水質分析項目は、塩化物イオン、SS、クロロフィルa、フェオフィチン、TN、DN、アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素、TP、DP、リン酸態リン、COD、D-COD、TOC、DOC、DO、BOD₅の18項目(ただし、DO、BOD₅は表層のみ)であり、水質分析は、JIS、下水道試験法、湖沼環境調査指針及び海洋観測指針によった。主な分析方法は次表3-2の通りである。

なお、溶存態としての水質値(塩化物イオン、DN、各態窒素、DP、リン酸態リン、D-COD、DOC)は、SS濃度測定時のろ液を用いた分析により得ている。

表3-2 水質分析方法

項目	分析方法
塩化物イオン	硝酸銀滴定法
SS	孔径0.45μmのメンブレンフィルターを使用
各態窒素、TP、DP、リン酸態リン	自動分析装置使用
TN、DN、TOC、DOC	全窒素-全炭素測定装置使用
COD	過マンガン酸カリウム酸性法

また、15日間連続した現地調査では、自動採水器を用いて1時間間隔で採水し、その採水試料より塩化物イオン、SS、アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素の各濃度を測定した。

3. 3 水質の時間的变化

3. 3. 1 はじめに

河川感潮部での時間的な水質変動は、潮汐作用による流況の周期的な変化に応じて生じている。また、その変動特性も感潮部内の位置によって異なることが考えられる。

本研究で対象とした六角川感潮部は、塩分分布に関して強混合状態にあり、潮汐作用による水質の変化が卓越する。また、河口・沿岸域には泥干潟が広がり、潮の干満にともなって懸濁粒子の沈降と底泥の巻き上げが周期的に生じ、他の河川感潮部に比べSS濃度がかなり高くなっている。ここでは、現地調査結果に基づいて一潮汐間及び2週間程度の長期的な水質の時間変動特性について検討する。

3. 3. 2 一潮汐間の変動特性

満潮から次の満潮までの一潮汐間の水質変化について検討する。各調査日の概要を表3-3に示す。なお、表中の潮差は三池港のもの(福岡県潮汐表記載)であり、水温は観測結果の平均値、先行無降雨日数は建設省資料によるものである。調査地点は、河口堰(河口から5.0 km 上流)、六角橋(11.2 km)、馬田橋(17.2 km)、大町橋(20.6 km)、新橋(24.2 km)の5地点とした(図3-2)。

表3-3 現地調査概要

	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回
調査日	1983.11.20	1983.12.27~28	1984.3.17	1984.5.26~27	1984.7.28
潮相	大潮	小潮	大潮	中潮	大潮
月齢(日)	15.2	23.1	14.4	25.5	29.0
潮差(cm)	411	261	491	275	497
水温(℃)	12	5	8	22	30
先行無降雨日数(日)	24	5	1	10	16

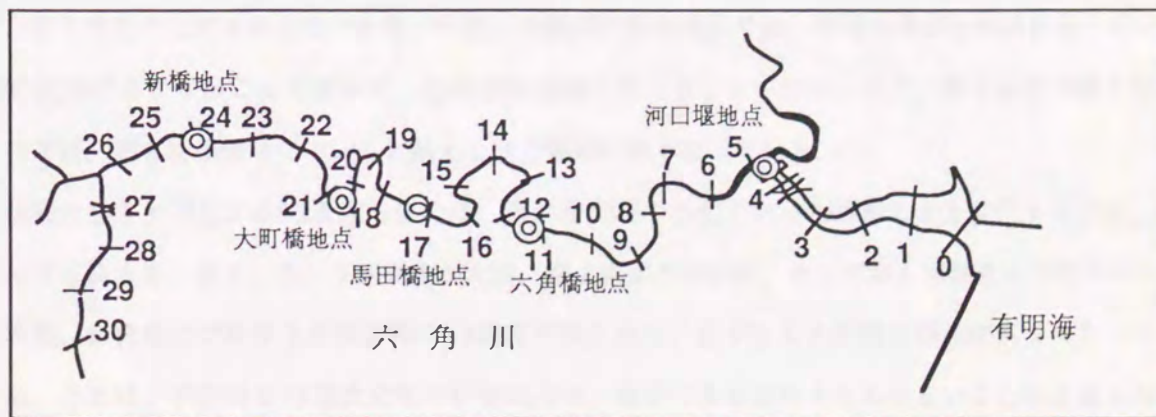


図3-2 調査地点(図中◎印、図中の数字は河口からの距離)

各調査日におけるSS, DO, BOD₅, CODの各地点での経時変化を図3-3~7に示す。

まず、SS濃度について見る。中・下流域のものは上げ潮及び下げ潮の最大流速が生じているときにかなり高く、下層部では20 g/lを越えるほどになっており、底泥の巻き上げが大きく関係していることが分かる。一方、上流域のものは下げ潮後半の固有流が出現したときに高くなっている。これは、感潮部上流からの懸濁物質の流入によるものと思われる。

DO濃度の一潮汐間での変化は小さいが、SS高濃度のときに低くなる傾向がある。これは、水中に浮遊する有機物の分解によってDOが消費されるためと考えられる。夏季の第5回調査時のものでは、いずれの地点でもかなりDO濃度が低く、5 mg/lを下回るほどになっている。これは、高い水温により生物活性が高くなり、DO消費速度が大きくなったためと思われる。

BOD₅, CODの変化は、いずれの地点でも大きく、SS濃度が高くなったときにこれらの濃度が高くなる傾向が見られる。また、上流域では河川固有流出現時にそれらの濃度が極端に高く、BOD₅で20 mg/lを、CODで50 mg/lを越えるほどになっている。ここで、生物酸化の程度を示すCOD/BOD₅を概算すると、冬季の下流域ではSS濃度の高いときに20、SS濃度の低いときに30、上流域では5、夏季の下流域で5、上流域では2を下回るようになる。いずれも下流域のものが大きく、流入してきた河川水や汚濁物質が感潮部を流下する間に生物化学的な酸化を受けていることが分かる。しかし、季節的には夏季のものが小さく、生物酸化があまり進行していないことが分かる。これは、SS濃度が低いために懸濁粒子に付着する微生物による生物酸化が少ないこととDO濃度が低いことによるものと考えられる。

次に、図3-8は断面平均のSS濃度の経時変化を各地点毎に示したものである。満潮及び干潮の停潮時には濃度が低く、満潮後次第に流速が速くなると底泥が巻き上げられSS濃度が上昇してくるが、下げ潮後半ではまだ流速が大きいにもかかわらずSS濃度は減少する傾向を示す。これは、それぞれのところでの巻き上げ可能な底泥がなくなり、巻き上げが終了したためと考えられる。また、下流域のものでは、干潮時に比べ満潮時の濃度が低いが、これは満潮時の停潮時間が干潮時に比べ長いために、SSの沈降水量が大きくなることによるものである。一方、上流域の新橋地点では、停潮時間がそれほど長くないため、SSの沈降はあまり起こっておらず、SS濃度は極端に低くなっていない。また、第2回及び第3回調査のものでは、固有流出現時に10 g/lを越えるほど極端に高くなっている。

沈降や巻き上げによるSS濃度の変化は、流れが大潮や小潮といった潮相により変化するため、潮相によっても異なる。第1, 3, 5回調査が大潮、第2回調査が小潮、そして第4回調査が中潮であったが、大町橋、新橋地点では第2回調査時のSS濃度が最も高く、必ずしも大潮時の濃度が高くはなっていなかった。これは、季節的なSS濃度変化の影響の方が、潮相による変化よりも大きいことによるものと考えられる。これらのSS濃度の季節的な違いをみると、冬季のものが全体的にかなり高いことが分かる。こ

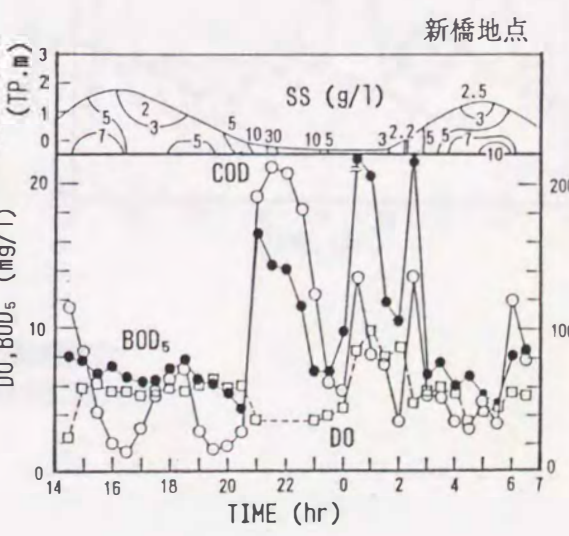
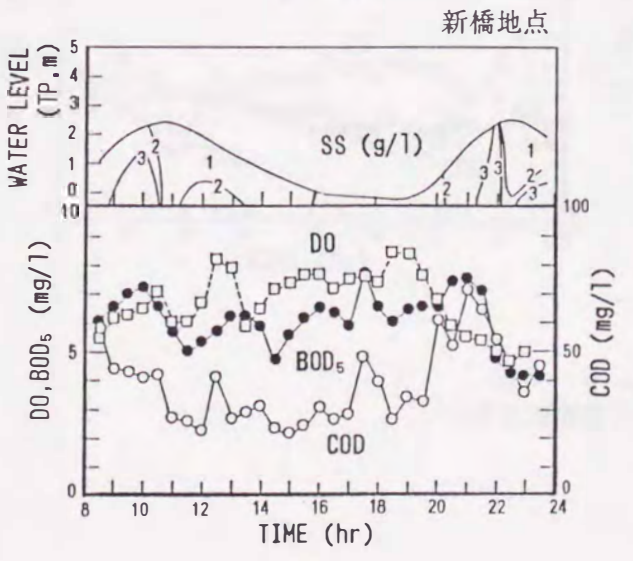
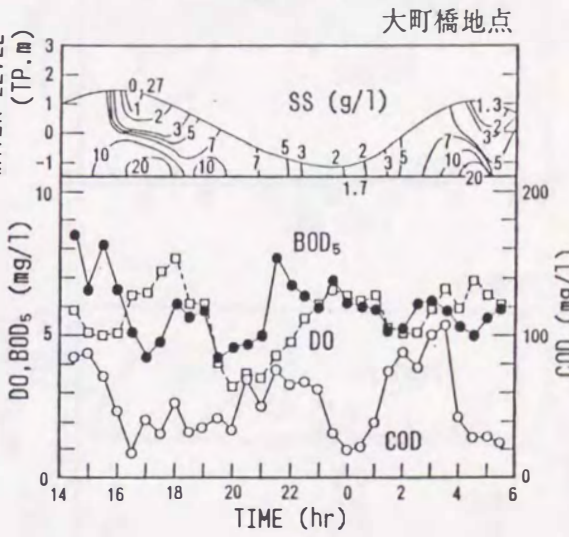
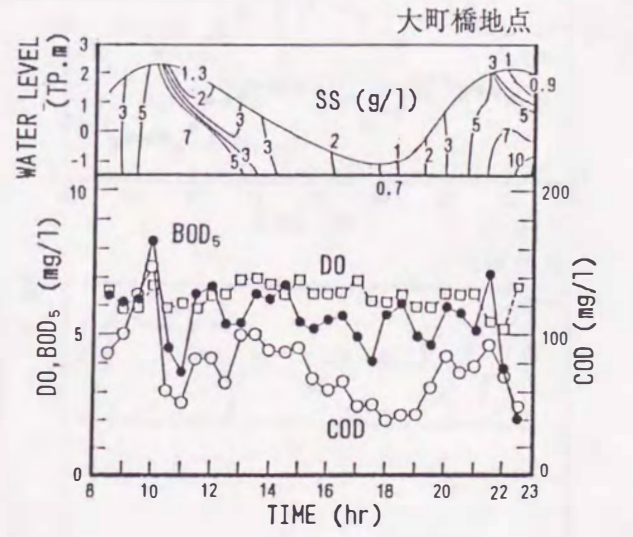
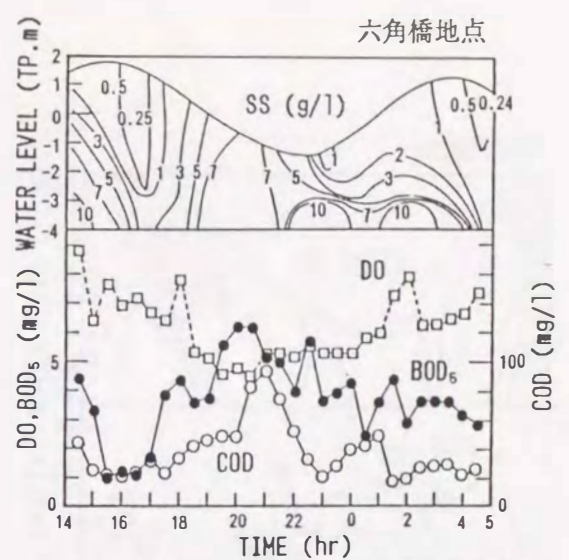
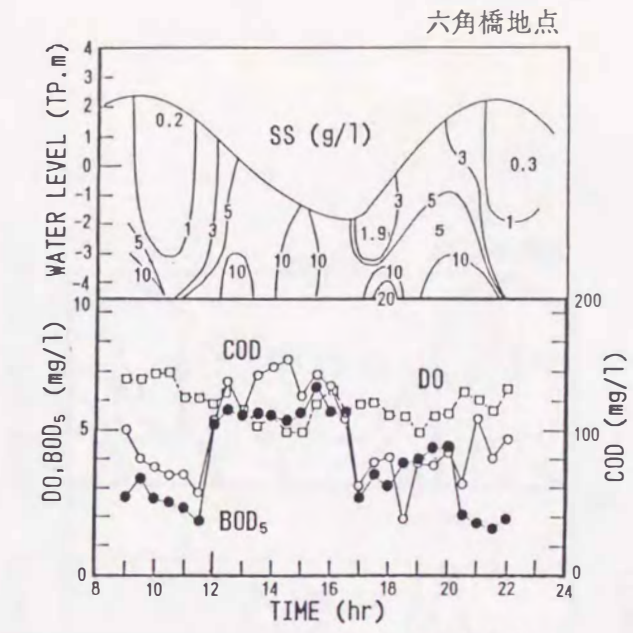


図3-3 水質経時変化
(第1回調査; 1983年11月20日)

図3-4 水質経時変化
(第2回調査; 1983年12月27~28日)

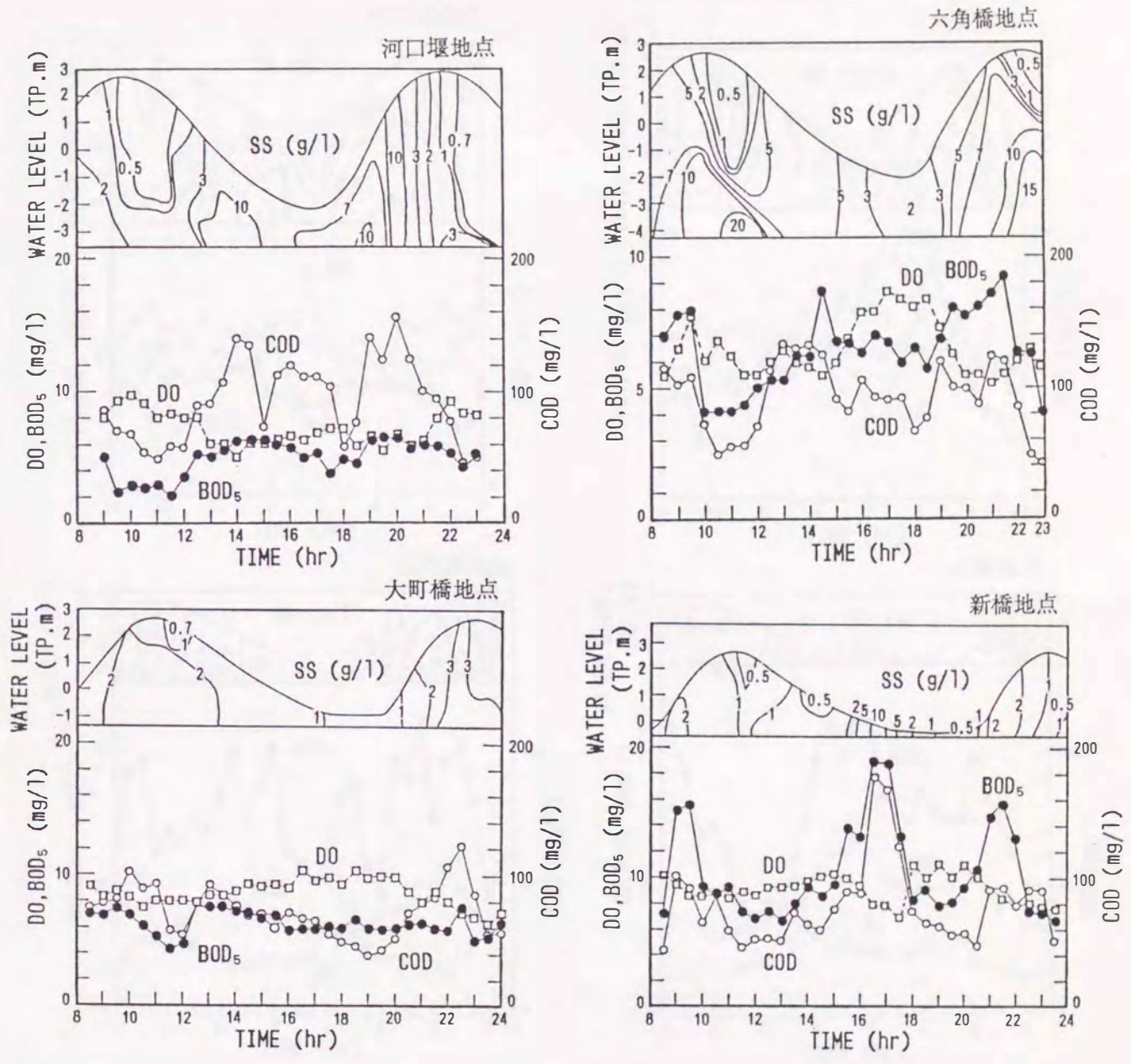


図3-5 水質経時変化
(第3回調査; 1984年3月17日)

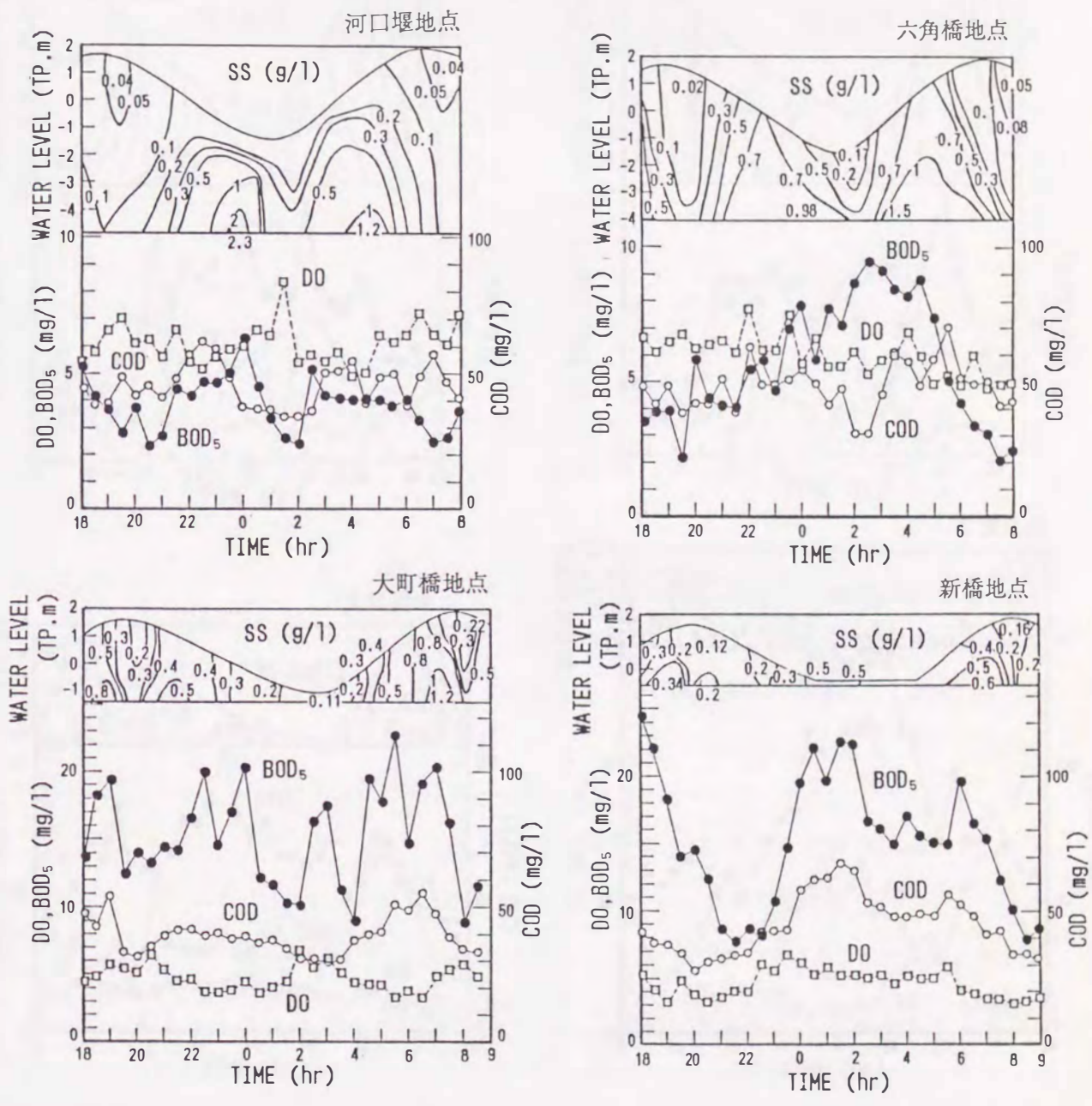


図 3 - 6 水質経時変化
(第 4 回調査; 1984年5月26~27日)

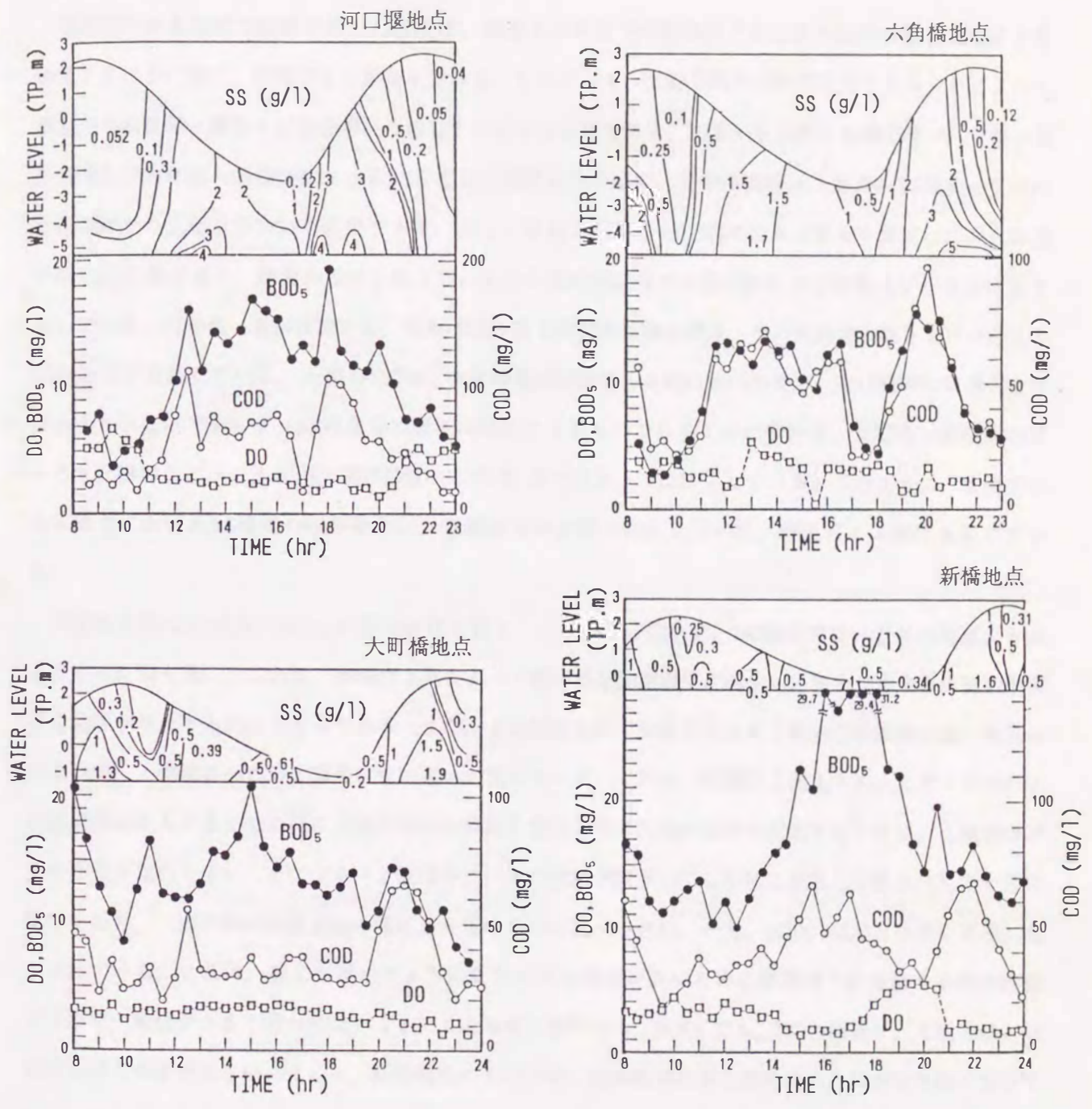


図 3-7 水質経時変化
(第 5 回調査; 1984年7月28日)

れは、流速や流量の季節的な変化がそれほど大きくなるとは考えられず、河道内水塊中に存在するSS量が季節的に変化するためと思われる。

感潮部のある地点で観測されたSS濃度は、調査地点付近での懸濁粒子の沈降や底泥の巻き上げにより変化するほかに他に、移流による影響も受ける。したがって、2地点間での物質収支を取ることによって算定される沈降・巻き上げ量を用いて検討することも必要である。図3-9に第1回調査時の六角橋～馬田橋間及び大町橋～新橋間におけるSS存在量の経時変化を示す。図中の実線は2地点のSS濃度より求めた各時刻での2地点間のSS存在量であり、同じく破線は両地点でのSSの流入出量より算定した次の時刻でのSS存在量であり、両者の差が2地点間における各時刻間隔での懸濁物質の沈降量及び巻き上げ量を示している。六角橋～馬田橋間では、満潮(9:30)後2時間程沈降が続き、その後底泥の巻き上げが起こりSS存在量が増加している。干潮時(17:00)の沈降量は満潮時のものに比べ小さい。上げ潮時には巻き上げはあまり起こっておらず、SS存在量の増加は移流によるものであることが分かる。大町橋～新橋間のもでも同様のことがいえるが、下げ潮途中の13:30頃で巻き上げは終了している。このように、感潮部のある地点におけるSS濃度の時間変化は、懸濁物質の沈降や巻き上げの他、移流による変化も生じている。

調査地点毎のDO濃度とBOD₅の経時変化を図3-10, 11に示す。DO濃度ではいずれの地点でも夏季のものが最も低い。これは、水温の上昇によって飽和溶存酸素濃度が減少し、さらに水中微生物の酸素消費活性が増大するためと考えられる。また、下流域のものでは夏季のものを除いて季節的な違いは見られないが、上流域のものほど調査日毎の違いが現れている。これは、感潮部上流より流入してくる河川水が感潮部に流入するまでの間に生物化学的な作用を受け、その汚濁の程度が変動するために、上流域ほどその影響が現れやすいことによる。下流域では、その水塊が流下してくる間に生物化学的な作用を十分に受けており、一潮汐間の濃度変動の幅も上流域のものに比べ小さい。一方、BOD₅はDOとは逆に夏季に高くなっている。これは、前にも述べたように夏季にはSS濃度が低いために懸濁粒子に付着する微生物量が少なく、酸化があまり行われないうことによるものと思われる。BOD₅でも、DOと同様に、上流域ほど観測値のばらつきが大きい。とくに、新橋地点のものでは、固有流が出現し始めたときかなり高くなっている。これらのことは、生物酸化が上流域でも行われることを示しており、COD/BOD₅の値が上流域のものほど小さいこととも一致する。

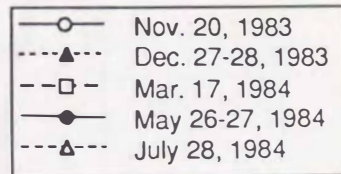
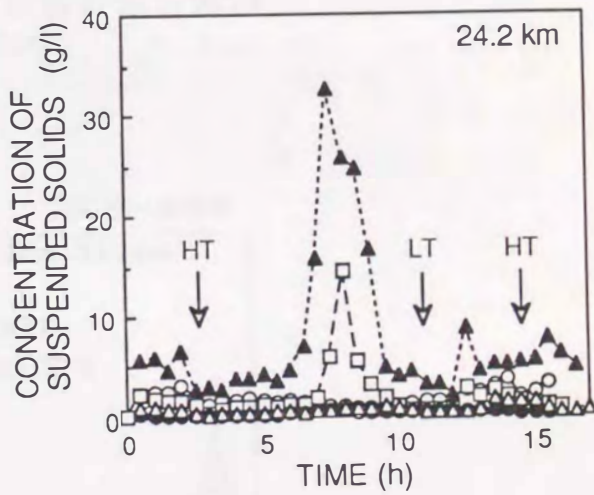
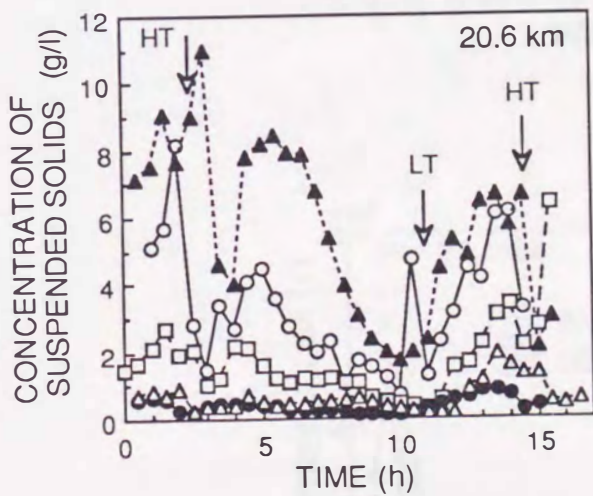
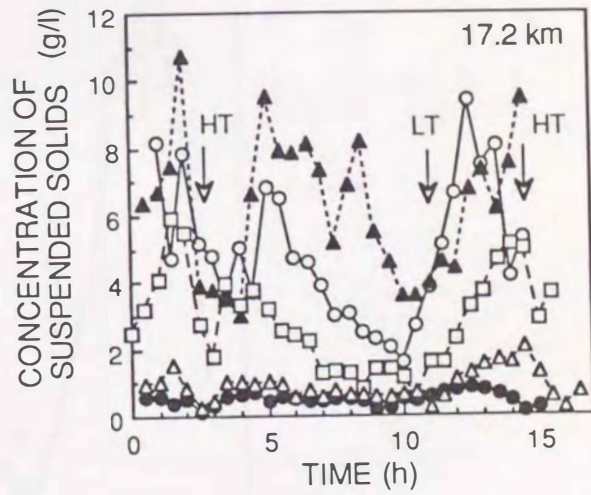
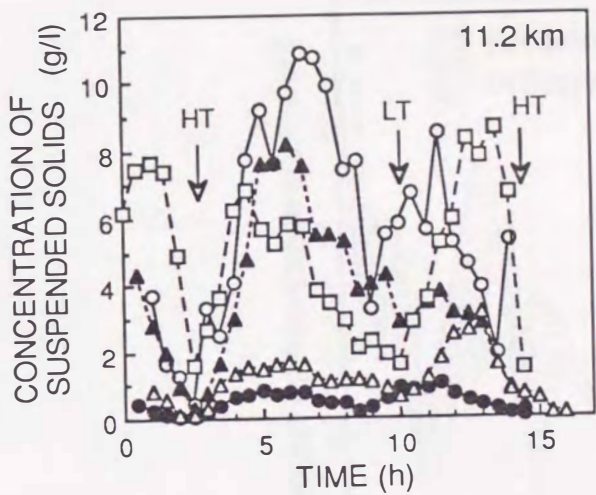


图 3 - 8 断面平均 S S 濃度経時変化

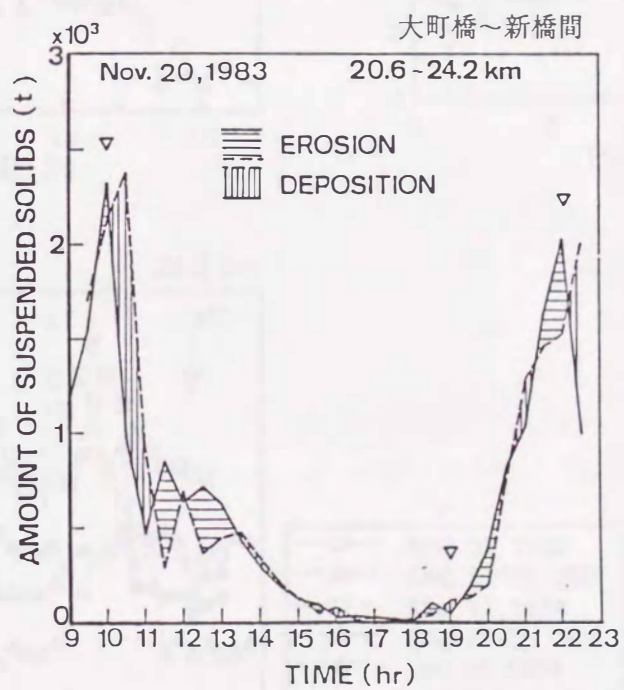
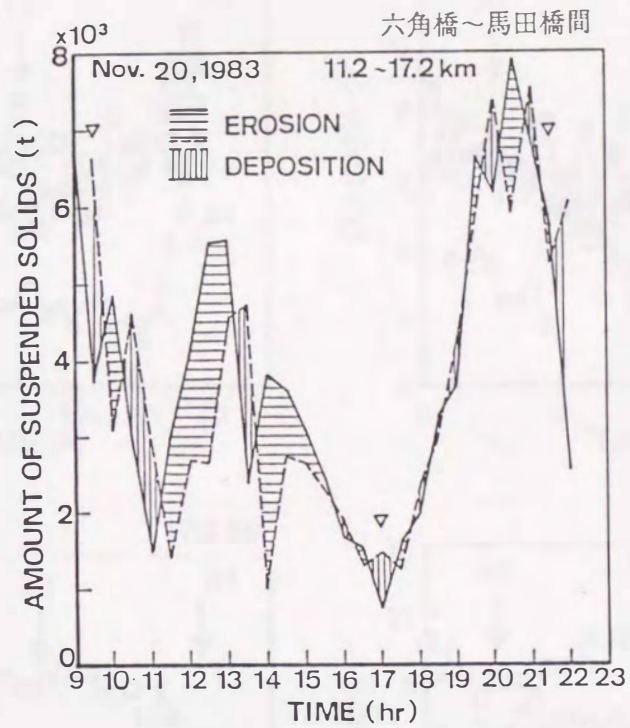
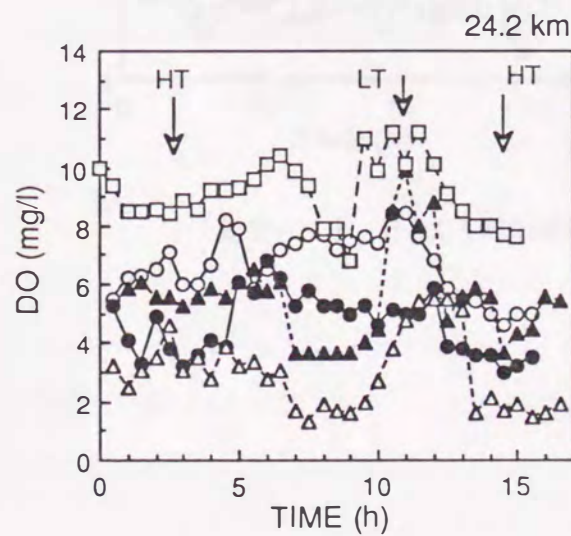
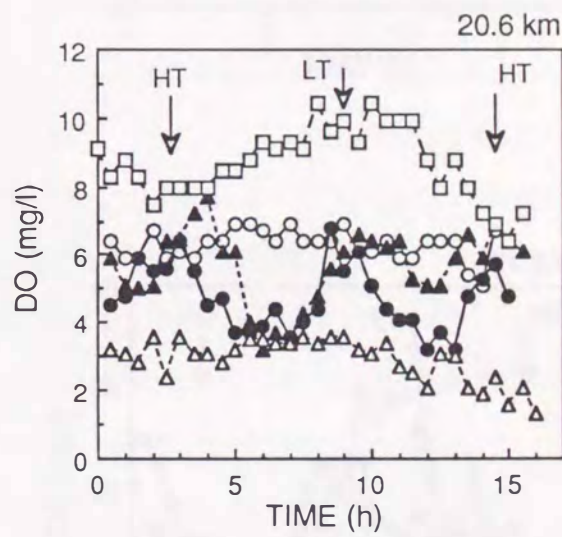
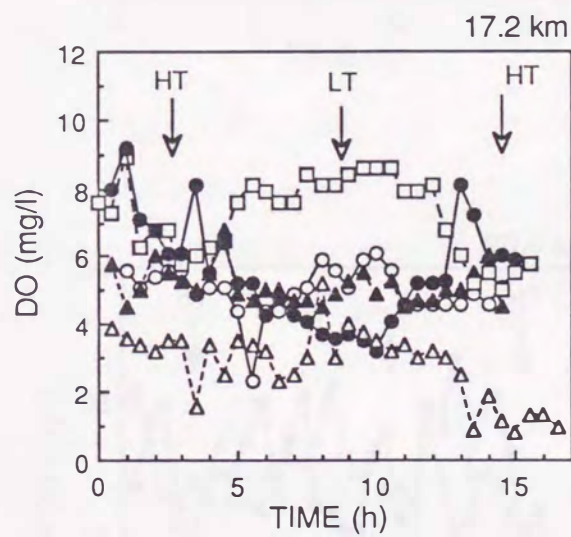
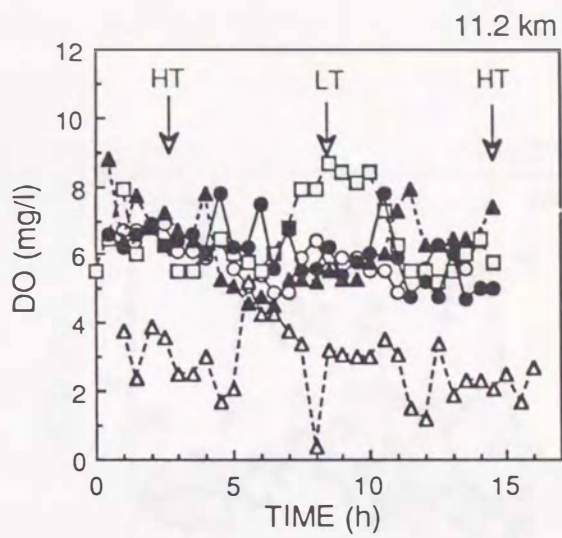
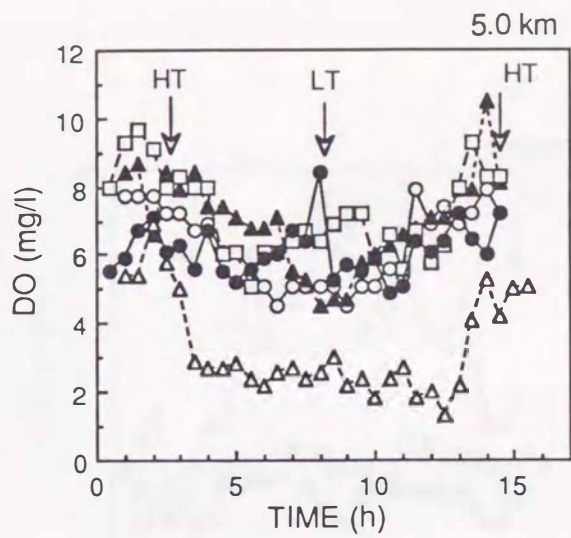


図 3 - 9 SS存在量経時変化



- Nov. 20, 1983
- △ Dec. 27-28, 1983
- Mar. 17, 1984
- May 26-27, 1984
- ▲ July 28, 1984

図3-10 DO濃度経時変化

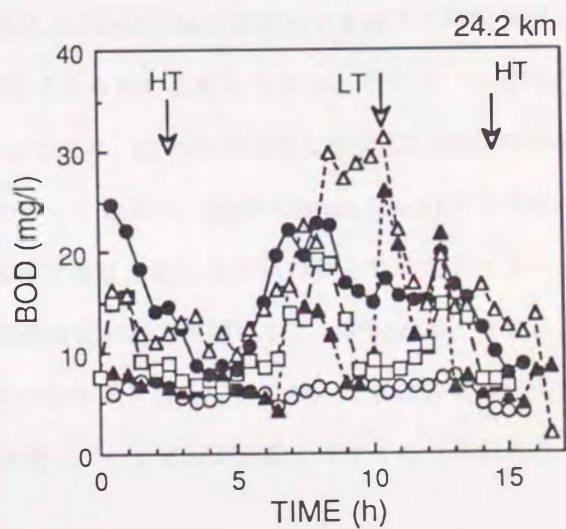
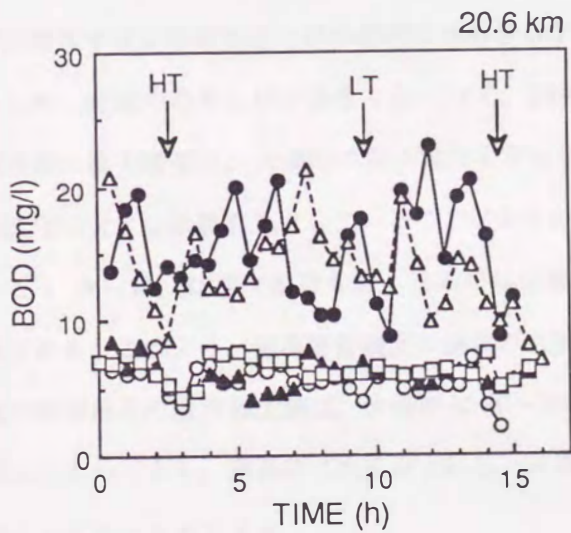
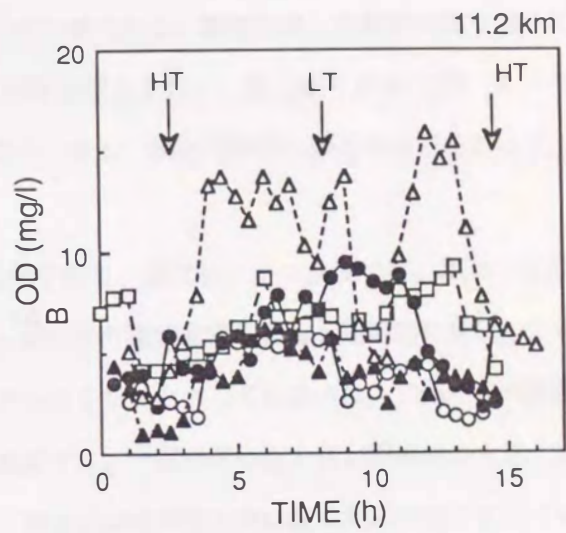
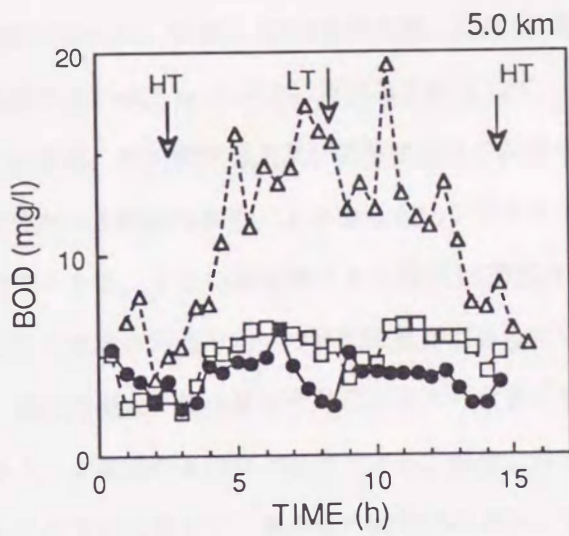


図3-11 BOD₅ 経時変化 (図中の記号は図3-10と同じ)

3. 3. 3 長期的な変動特性

続いて、2週間程度の長期的な水質変化について検討する。調査は、1988年11月27日～12月16日の20日間にわたって実施し、新橋(河口から24.2 km 上流)、馬田橋(17.2 km)、六角橋(11.2 km)の3地点において同時に行った。なお、12月9日が大潮、12月1日及び16日が小潮である。調査では、自動採水器を用いて河床から0.2～0.5 mの高さに採水口を固定して、1時間間隔で採水を行い、塩化物イオン、SS、アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素及び硝酸性窒素の各濃度を求めた。なお、調査期間中に降雨はほとんどなく、潮汐作用の長期的な変動による濃度変化が得られている。

図3-12, 13に塩化物イオン及びSS濃度の経時変化を示す。塩化物イオン濃度では、潮相の変化に応じて水塊の河道方向への移動距離が変わるため、各一潮汐間の濃度変動の振幅が周期的に変化している。濃度の極大・極小値がそれぞれ交互に大きくなったり小さくなったりしているのは、日潮不等の影響であり、下流域のものほど顕著である。新橋、馬田橋両地点では、一潮汐間の極大値が周期的に大きく変化しているのに対して、極小値の変化は小さい。これは、両地点が感潮部上限に近く河床が高くなっているため、下げ潮後半から干潮時にかけて河川固有流が出現することによる。一方、SS濃度の変化は、大潮前後で全体的に高く、小潮時にはかなり低い。これは、潮相の変化に応じて流れが変化し、底泥の巻き上げに参与する底面剪断応力が小潮時には小さくなり、巻き上げの限界底面剪断応力を越える時間が短くなるために底泥の巻き上げがあまり起こらず、SS濃度が低くなるものと考えられる。とくに、小潮時の一潮汐間の最大濃度は、大潮時の最小濃度よりも低くなっており、流れの連続的な変化がSS濃度の長期的な変化に大きな影響を及ぼしていることが分かる。このような結果は、英国のSevern Estuaryでも得られている⁷⁾。さらに、SS濃度が最も低くなるのは小潮の2日後であり、最大値が現われるのは大潮の3～4日後である。これより、懸濁物質濃度の極値の出現が流れの変化に対して遅れることが分かる。なお、上流域の新橋地点の濃度極大値は、大潮時に80～100 g/lとかなり高くなっているが、これは固有流出現時に現れたものであり、満潮時に水位が上昇し、河道内に堆積していた底泥が流動しやすくなり浮泥流として流入してきたものである。

次に、図3-14に各態窒素濃度の経時変化を示す。小潮後にアンモニア性窒素濃度が全体的に高くなる時期が下流域ほど遅れており、上流部から流入してきたアンモニアが硝化作用を受けつつ、順次下流側へ移動していることが分かる。硝酸性窒素では、各地点での長期的な変動傾向は小さいが、上流域のものが他の地点のものに比べ低くなっており、全体的には下流域ほど高くなっている。なお、これら3態の窒素濃度の和は長期的に変化しており、流入負荷の変動が生じている。

次に、河口堰地点において鉛直方向に河床より0.5 m、1.5 m及び水面より0.5 mの3点で1時間間隔で同時に採水し、塩化物イオン及びSSの各濃度を測定した(1988年11月9～26日調査実施)。その結果を図

3-15に示す。なお、水位は建設省資料によるものである。塩化物イオン濃度は、3点ともほぼ同様な変化を示しており、上下層の濃度差はほとんどなく塩分に関して強混合状態にあることが分かる。SS濃度は、表層及び中層において一潮汐間で大きく変動し、しかもその変動幅が潮相により変化している。一潮汐間の濃度極小値はほとんど潮相に依存しないが、極大値は大潮時に小潮時の10倍近くになっている。底層のものでは、濃度極大値が小潮時にも高いが、これは、採水口をかなり河床近くに設置しており、河床付近は小潮時でも高濃度になっているものと考えられる。なお、底層では各一潮汐間の濃度極大値が中層・表層のものに比べ常に高い。

ここで、水位と塩化物イオン・SS濃度との関係を図3-16に示す。塩化物イオン濃度では、採水位置による違いはなく、常にほぼ同一の関係となっている。一方、SS濃度では、各層のものとも水位が低いときすなわち干潮時に濃度が高く、満潮時に濃度が低くなる傾向が見られる。これは、潮汐によってSS高濃度塊が河道方向に移動し、この高濃度塊の中心がこの地点より上流にあるために、干潮時の前後に通過するからである。

このような長期的な水質の測定値は、次のような形で表されることがある⁸⁾。

$$\{\text{測定値}\} = \{\text{長期傾向}\} + \{\text{周期性}\} + \{\text{ランダム性}\}$$

この中の周期性に対して、調和分解により検討することもできるが、ここでは簡単に測定値のスペクトル解析を行い、その支配要因を検討する^{9),10)}。図3-17は、図3-15に示した測定値の中層の値を用いて、水位及び塩化物イオン、SS各濃度の自己相関係数とパワースペクトル^{11),12)}を求めたものである(データ数;404個)。水位及び塩化物イオン濃度の自己相関係数では、12.69時間(203時間/16周期)毎に正のピークを示す。また、そのピーク値は10周期後に最小となった後再び増加し、水位や塩化物イオン濃度の長期変動傾向と対応する。SS濃度のものでは、これらと同様の周期性は認められるものの、10周期以後は自己相関係数が負値となり、潮汐運動以外の変動要因が存在していることが分かる。水位のパワースペクトルでは、周期4時間以上にいくつかの明瞭なピークが現れている。潮汐の主要分潮の周期と比較すると、周期12.00時間の S_2 分潮、周期12.42時間の M_2 分潮、周期23.93時間の K_1 分潮、そして周期25.82時間の O_1 分潮といった主要4分潮による周期性が卓越していることが分かる。さらに、周期6.21時間の M_4 分潮のところでも大きい。Boon & Byrne¹³⁾やUncles¹⁴⁾、Zarillo¹⁵⁾は、これらの長期的な水位変動において卓越する各分潮のうち、 M_2 分潮と M_4 分潮との相互作用が感潮部における潮汐作用の非対称性を支配しているとしている。今回の調査地点は、河口から5km上流のところであったが、 M_2 分潮及び M_4 分潮の周期性が卓越しており、水位変動に非対称性が現れていると考えられる。一方、塩化物イオン濃度やSS濃度のものではこれらの周期成分の他にも小さいが多くの極大値がみられ、とくに、SS濃度では M_2 分潮及び K_1 分潮によるもの以外のスペクトルはほとんど同程度になっている。

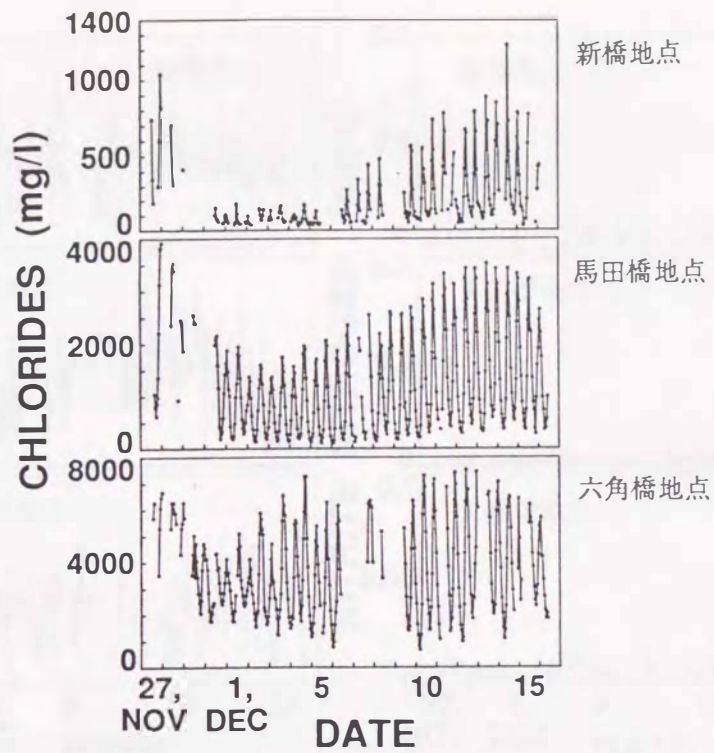


図 3 - 1 2 塩化物イオン濃度経時変化 (1988年11月27日~12月16日)

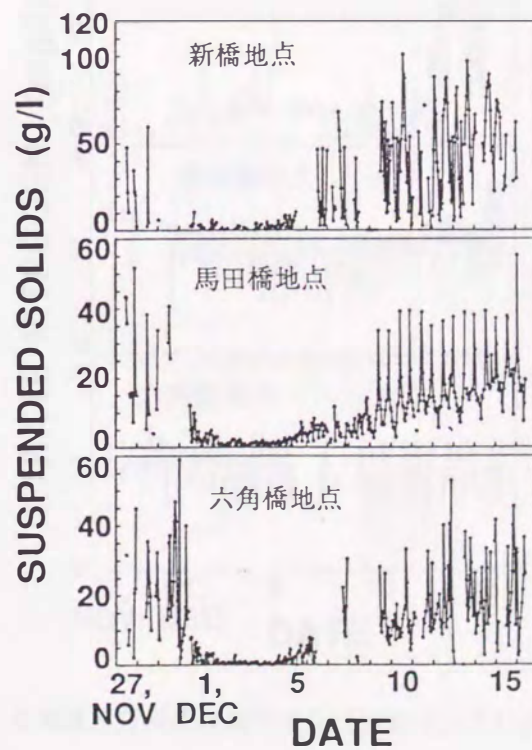


図 3 - 1 3 S S 濃度経時変化 (1988年11月27日~12月16日)

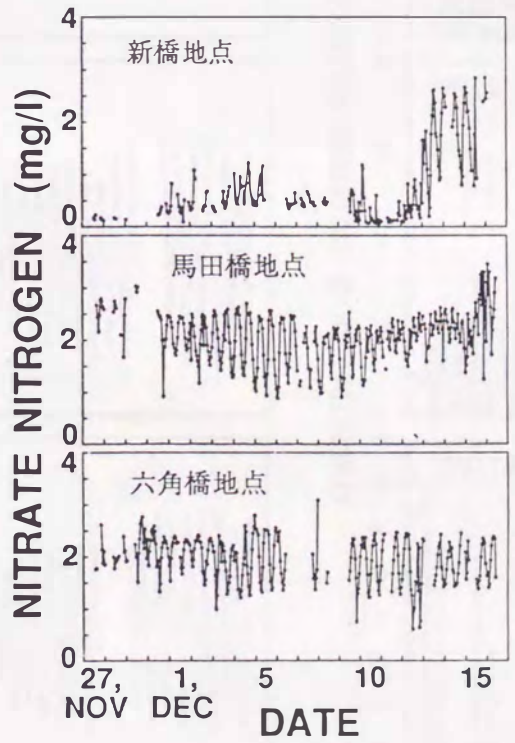
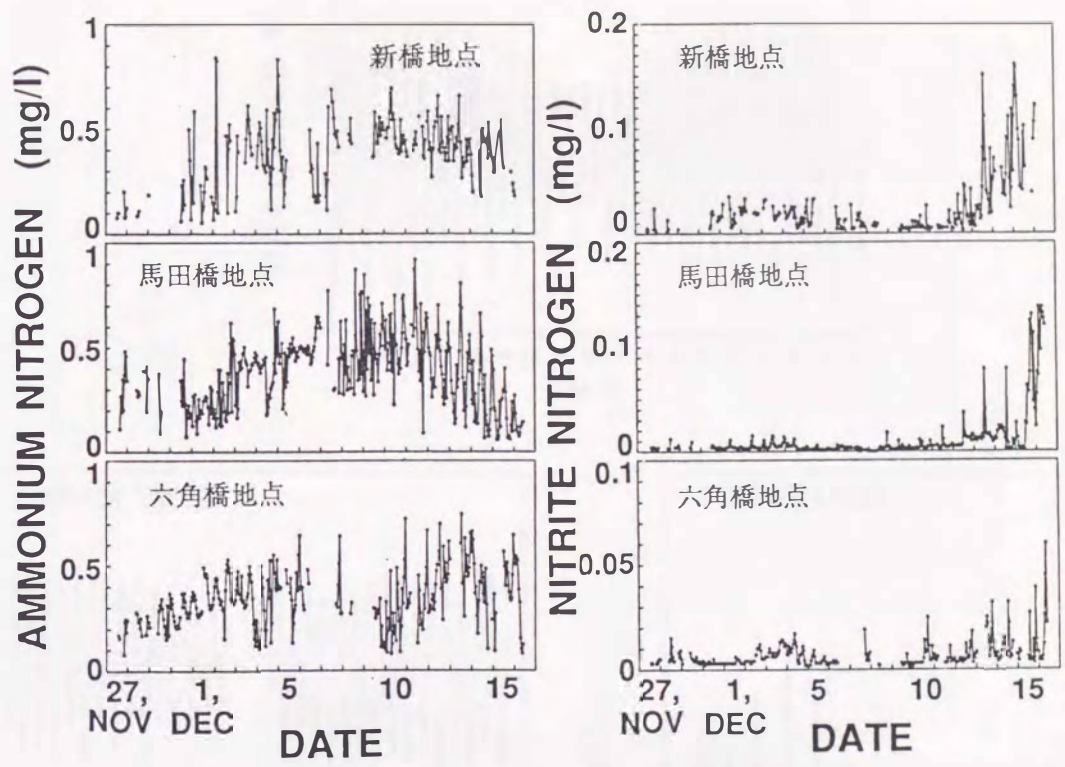


図3-14 各無機態窒素濃度経時変化 (1988年11月27日~12月16日)

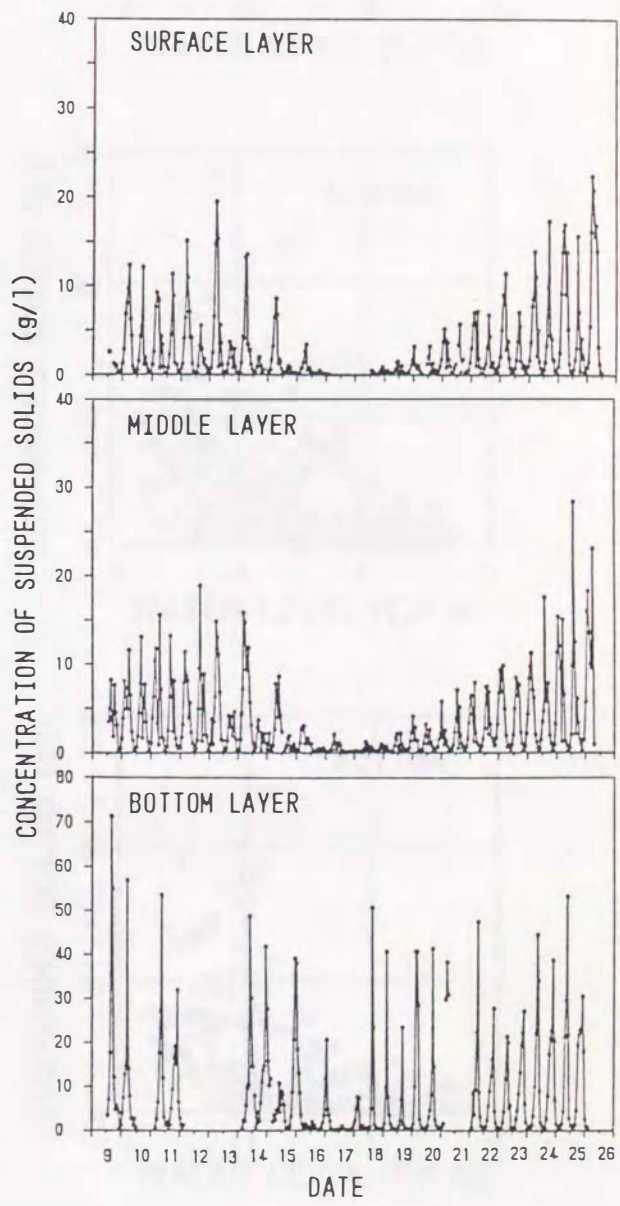
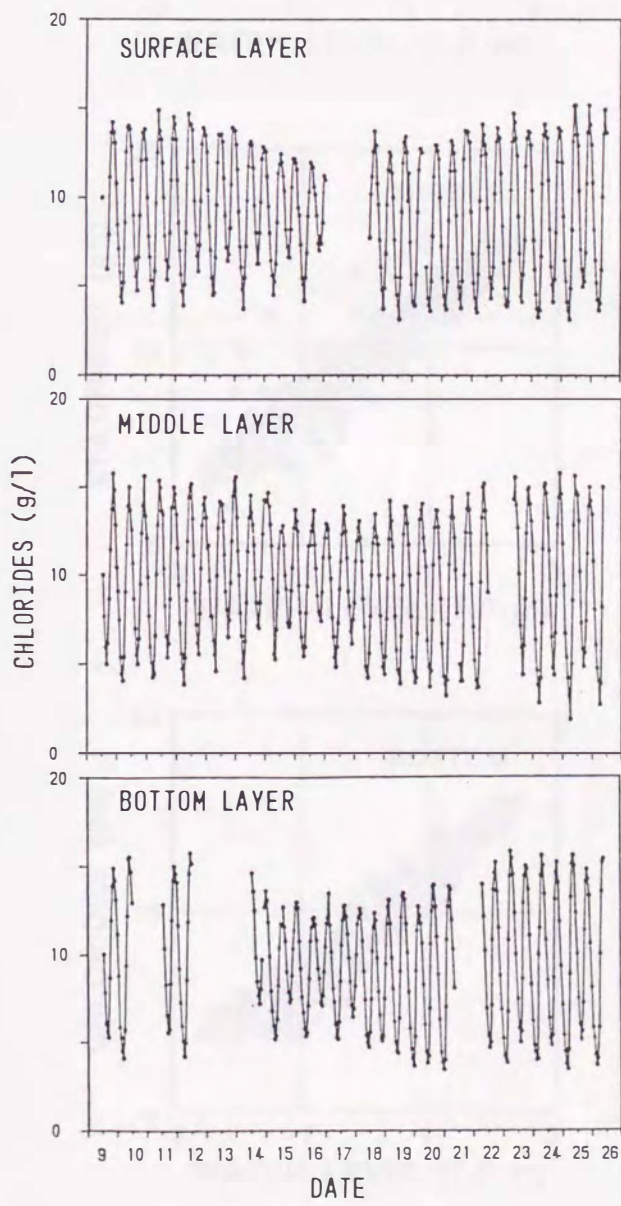
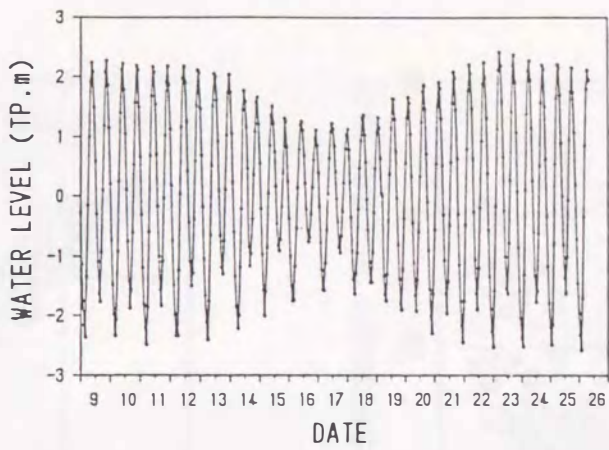


図3-15 水位及び塩化物イオン・SS濃度経時変化 (1988年11月9~26日; 河口堰地点)

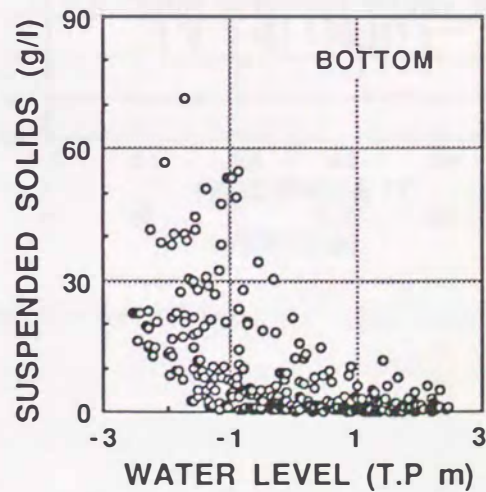
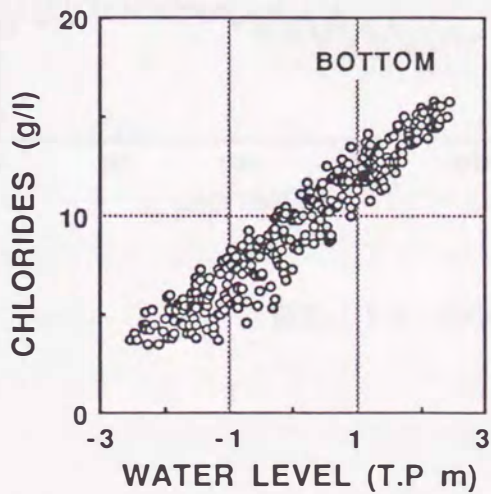
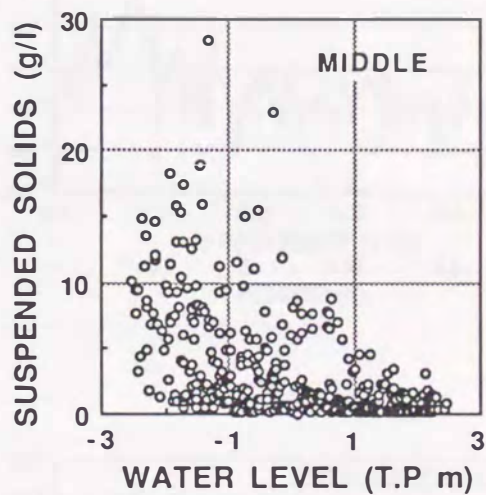
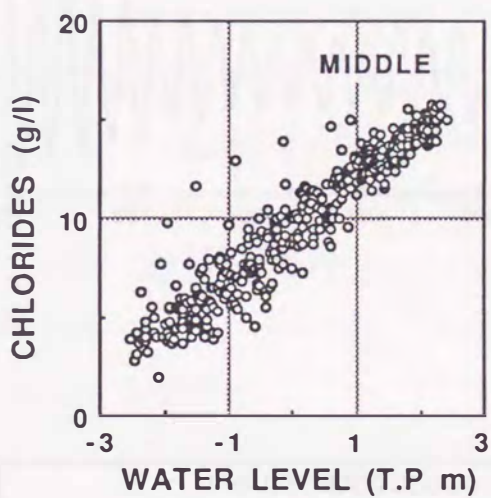
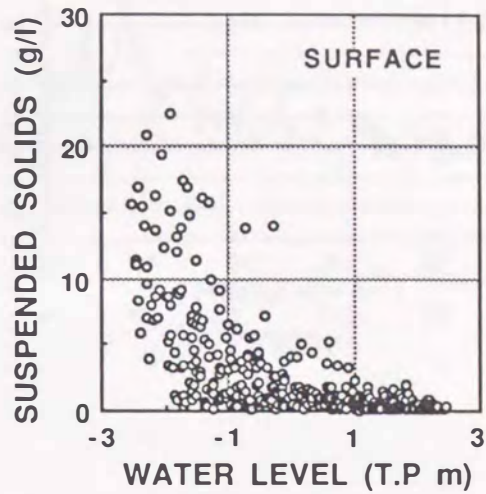
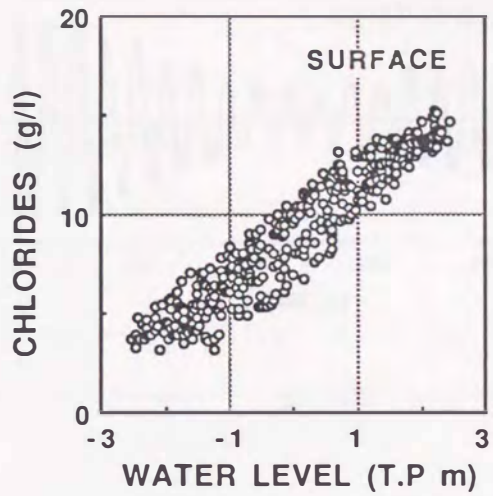


図3-16 水位と塩化物イオン・SS濃度の関係

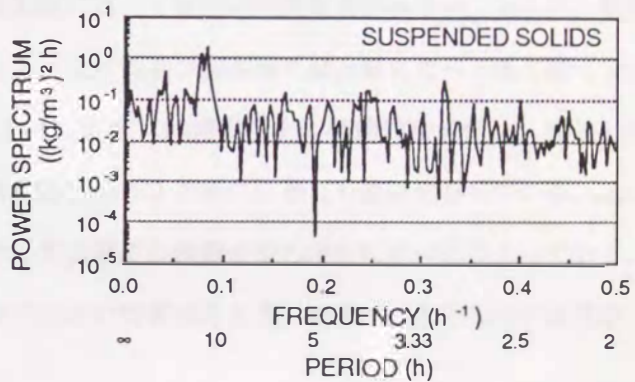
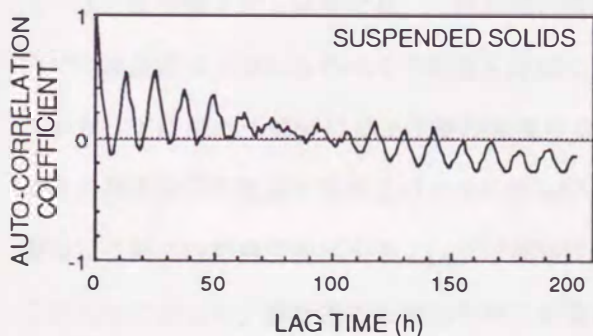
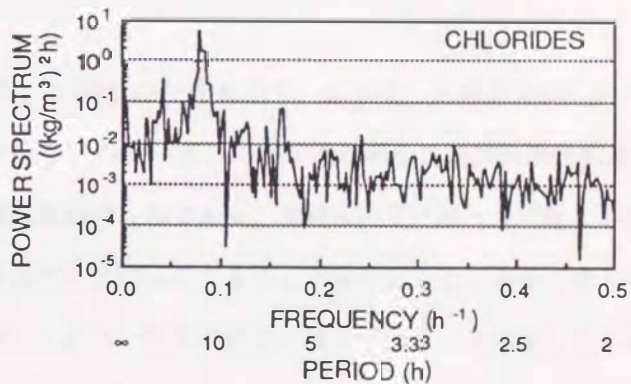
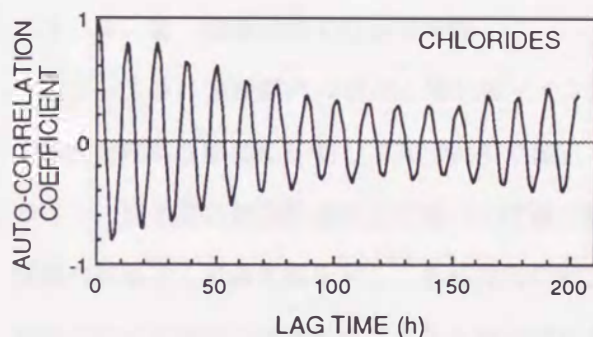
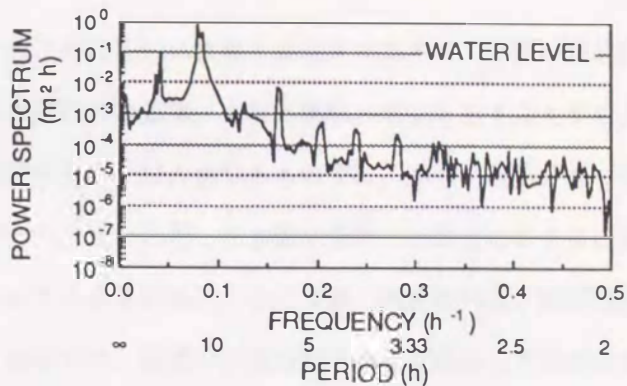
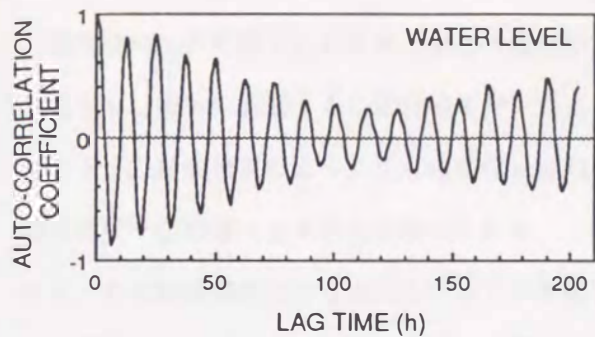


図 3-17 自己相関係数とパワースペクトル

3. 4 水質の空間的变化

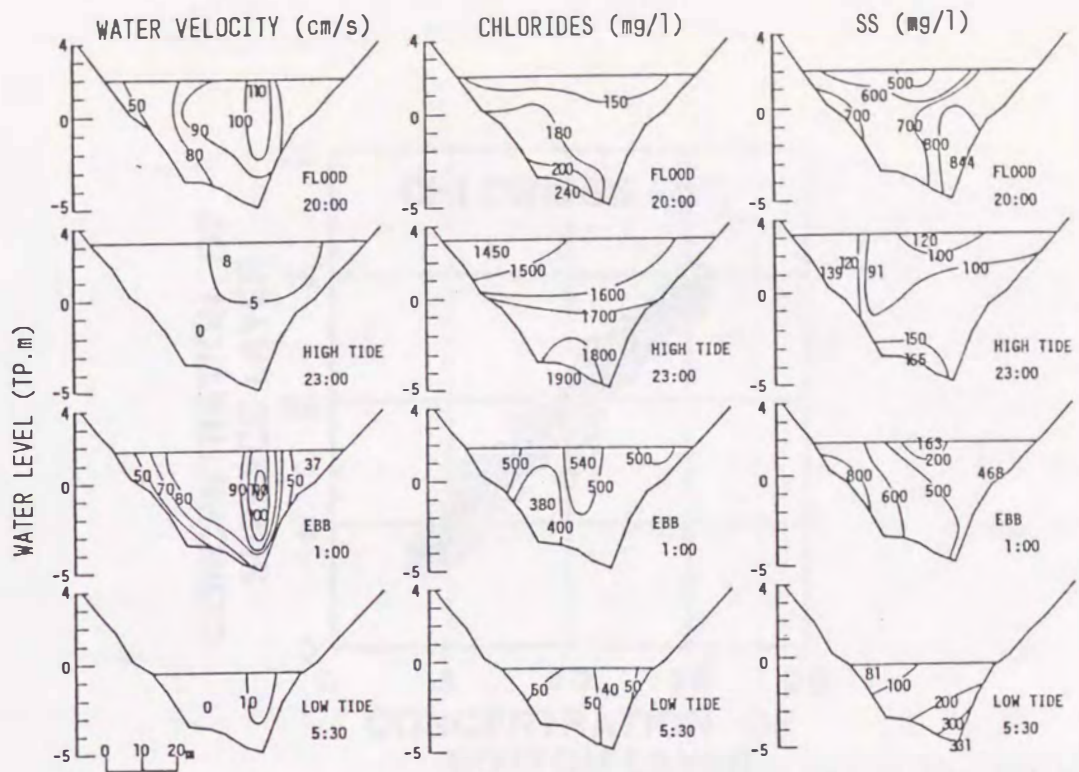
3. 4. 1 はじめに

強混合河川感潮部では河川水と海水の混合形態や流況が時間的に大きく変化するために、水質の空間的な分布も時間的に変動する。塩化物イオンのように保存性の物質は、水塊と類似の挙動を示すことが考えられるが、懸濁物質のように流れの変化に応じて沈降や巻き上げが生じるものでは、水質の空間分布の時間変化は一層複雑になることが考えられる。したがって、流れに対して水質の空間分布がどのように決定され、それが時間的にどう変化していくかを明らかにする必要がある。ここでは、横断面内及び縦断面内の水質分布の時間的な変動特性について検討する。後者では、前述の河道方向5地点で実施した調査結果を基に、水質の縦断面分布図を作成して検討する。

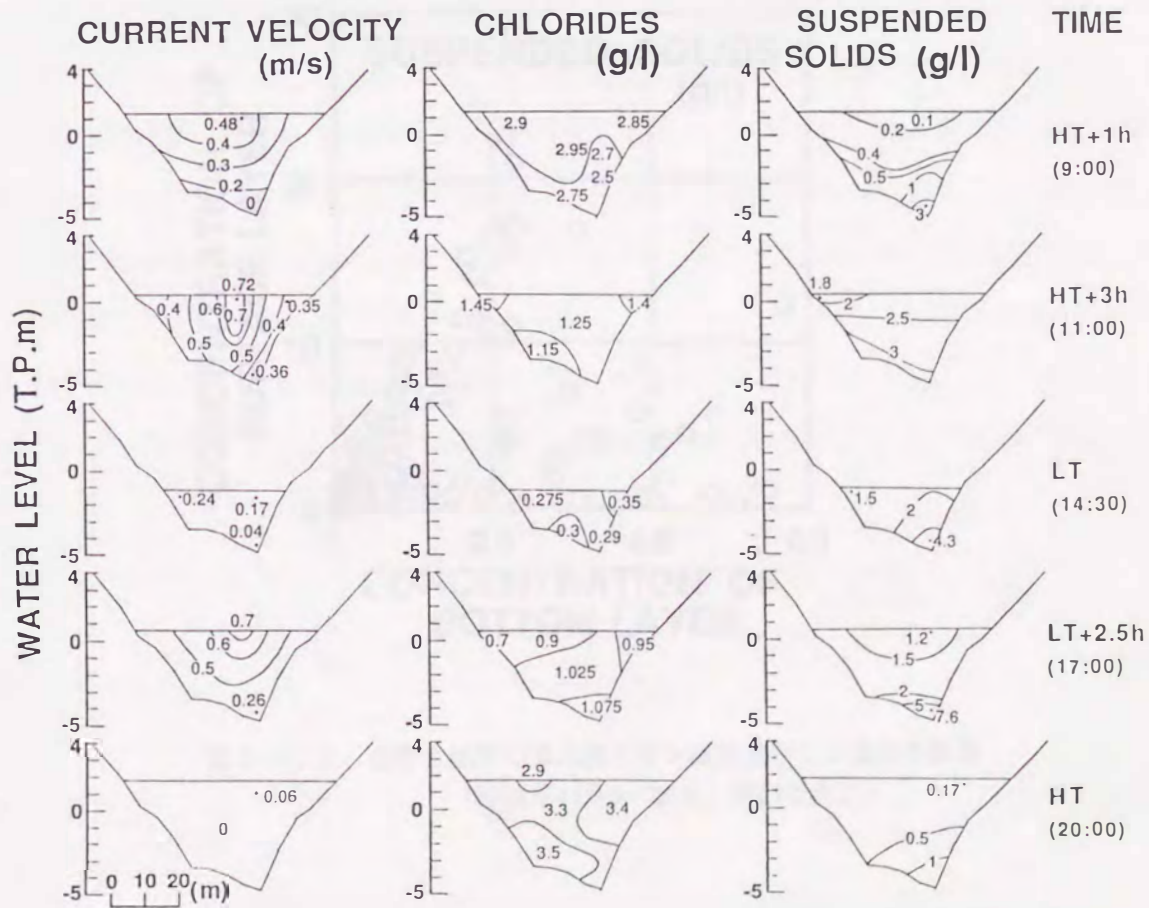
3. 4. 2 横断面内での分布特性

図3-18に横断面内の流速と塩化物イオン濃度、SS濃度の分布を示す。これは、六角橋地点において横断方向に5断面に分割して30分間隔で測定した結果(1985年7月18~19日及び同年12月24日調査実施)のうち、満干潮の停潮時及び上げ潮・下げ潮の最強流速時のものである。流速は、下げ潮・上げ潮とも最深部の表層近くで最大値を示し、水平方向の大きな速度シアが存在することが分かる。下げ潮時には上げ潮時に比べ右岸側の流速が小さくなる傾向があるが、これは、河道の湾曲の様子が図3-2に示したように調査地点の上下流で異なるからである。また、断面内での鉛直方向の流速分布は、上げ潮時には鉛直方向にはほぼ一様に近い分布形をしており、下げ潮時には流速が水面で大きく、河床付近で小さい分布形をしている。塩化物イオン濃度では、一潮汐間の濃度変動幅に比べて断面内の濃度差が小さい。さらに、断面内での濃度差は小さいもののその特徴を詳細に見ると、上げ潮及び満潮時には上層に比べ下層で高くなっており、下げ潮や干潮時には上下層の濃度差は小さい。また、SS濃度分布の時間的な変化は、前述したように懸濁粒子の沈降や巻き上げの他に移流による影響も加わるために、かなり複雑になっている。上げ潮時には断面内の濃度差は小さく、下げ潮時には流心部表層での濃度が他の部分に比べ低くなっている。これらのことより、横断面内の流速分布と水質分布ではその性質が異なり、前者では水平方向の偏差が、後者では鉛直方向の偏差が大きくなっている。

次に、図3-19は、河口堰地点における長期観測時の表層と底層の塩化物イオン濃度及びSS濃度の関係を示したものである。塩化物イオン濃度では表層と底層の濃度差はほとんどなく、常に強混合状態になっていることが分かる。一方、SS濃度では概して表層と底層のものがほぼ同程度のときと底層のものが高いときとに分けられる。前者は大潮時であり、後者は小潮時である。このように、SS濃度の場合には、潮相によって断面内での濃度分布が変化する。すなわち、大潮時には相対的に大きな潮差のために流



1985年7月18~19日；六角橋地点



1985年12月24日；六角橋地点

図3-18 流速，塩化物イオン濃度，SS濃度の横断面内分布

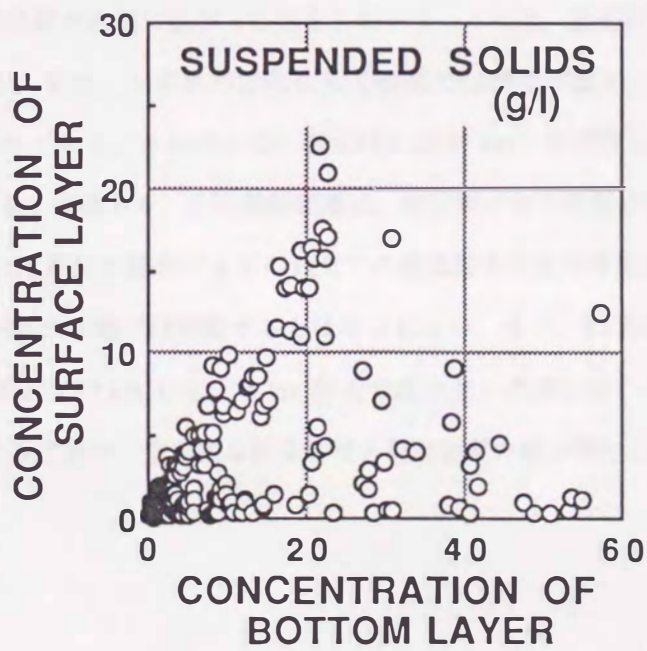
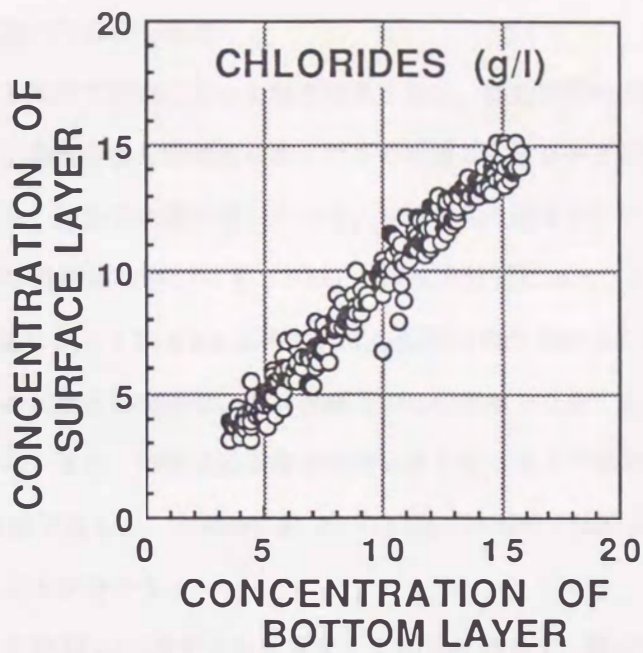


図3-19 表層と底層の塩化物イオン濃度及びSS濃度の関係
(1988年11月9~26日；河口堰地点)

速が大きくなり、懸濁物質の鉛直混合の程度が小潮時に比べて大きくなるものと考えられる。

3. 4. 3 縦断面内での分布特性

次に、縦断方向に5地点で同時に行った調査結果を基に、縦断面内の水質分布について考察する。

まず、塩化物イオン濃度分布を経時的に表したものを図3-20~22に示す。いずれの場合にも等濃度線がほぼ鉛直に立ち、強混合状態を示している。河道方向の濃度分布について図3-20の9時のもので見ると、10 g/lの等濃度線は河口より7.5 km上流地点付近にあり、1 g/lの等濃度線は同じく19.5 km、0.1 g/lの等濃度線は同じく24.0 kmにある。この傾向は他の調査日においても同様であり、塩化物イオン濃度と河口からの距離との関係は、両対数紙上でほぼ直線となる。したがって、両者の関係は指数関数で表すことができる。また、等濃度線が潮汐作用にともなって上下流方向に移動している。その移動距離は、1 g/lの等濃度線で見ると、大潮時に約10~13 km、小潮時には約8 kmとなり、潮相により水塊の移動距離が変化することが分かる。

図3-23~25に同様にSS濃度分布を示す。これらの図では、塩分に関して強混合状態にあったにもかかわらず、等濃度線が水平に広がった形をしている。これは、懸濁粒子の沈降や底泥の巻き上げが生じているためである。また、いずれの場合にも下層部でSS濃度が高く、いわゆるSS高濃度塊 (Turbidity Maximum) が形成されている。その中心は、満潮時には17 km、干潮時には5 km付近にあり、一潮汐間に河道方向に10数 km移動する。この移動距離は、塩化物イオン濃度分布より得られる水塊の移動距離とほぼ一致するが、SS濃度の場合にはその地点での懸濁粒子の沈降や底泥の巻き上げが起こるために、必ずしも懸濁粒子がその距離だけ移動するとは考えにくい。また、SS高濃度塊中の最高濃度が出現するのは、いずれも満潮時の17 km付近と5 km付近で流れが上げ潮に転じた直後である。これより、SS濃度の最大値が出現する位置が、空間的な河道特性と懸濁物質の輸送特性により定まるものと考えられる。

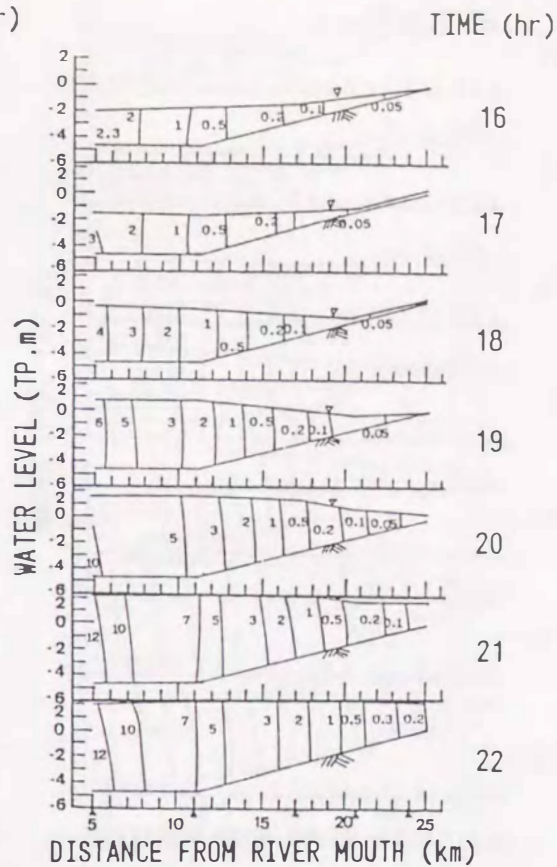
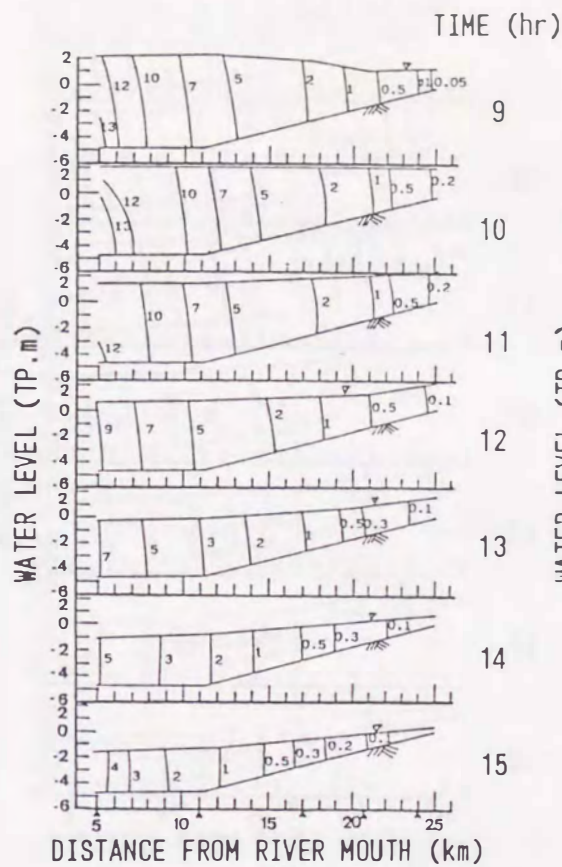


図3-20 塩化物イオン濃度分布 (第1回調査; 1983年11月20日) 単位: g/l

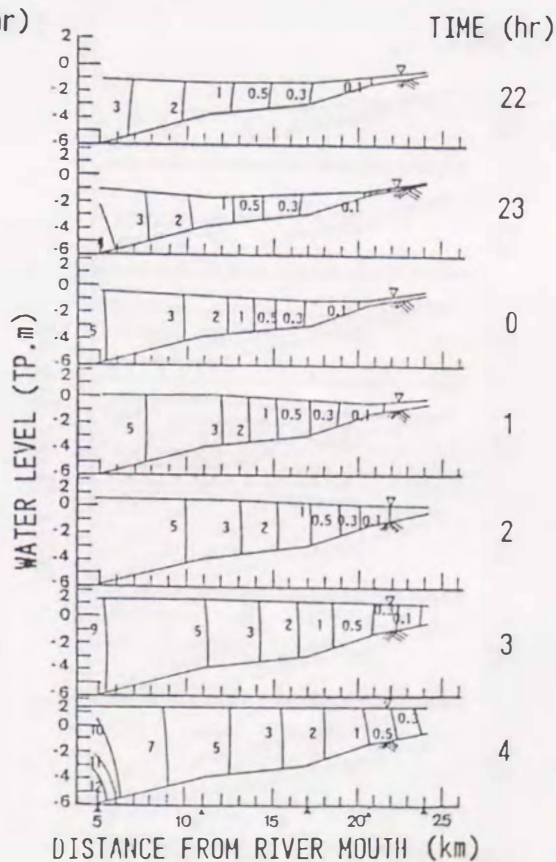
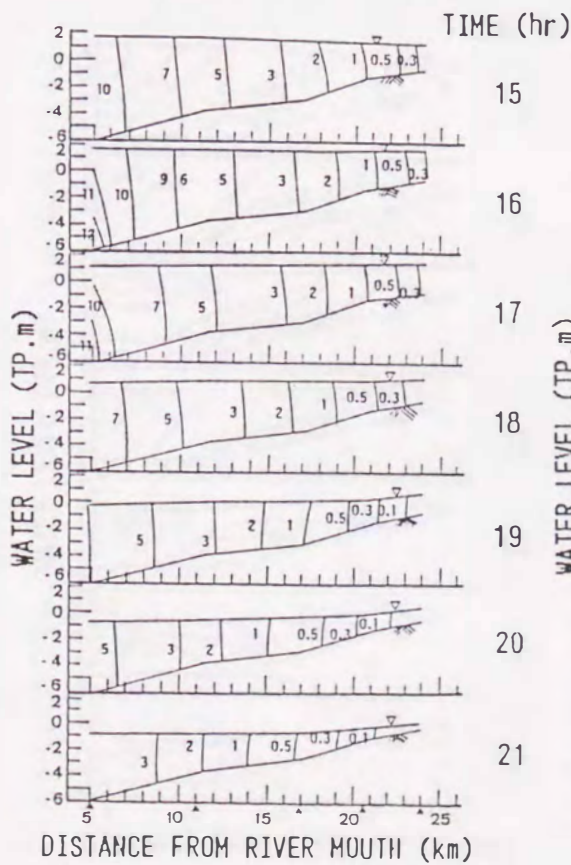


図3-21 塩化物イオン濃度分布 (第2回調査; 1983年12月27~28日) 単位: g/l

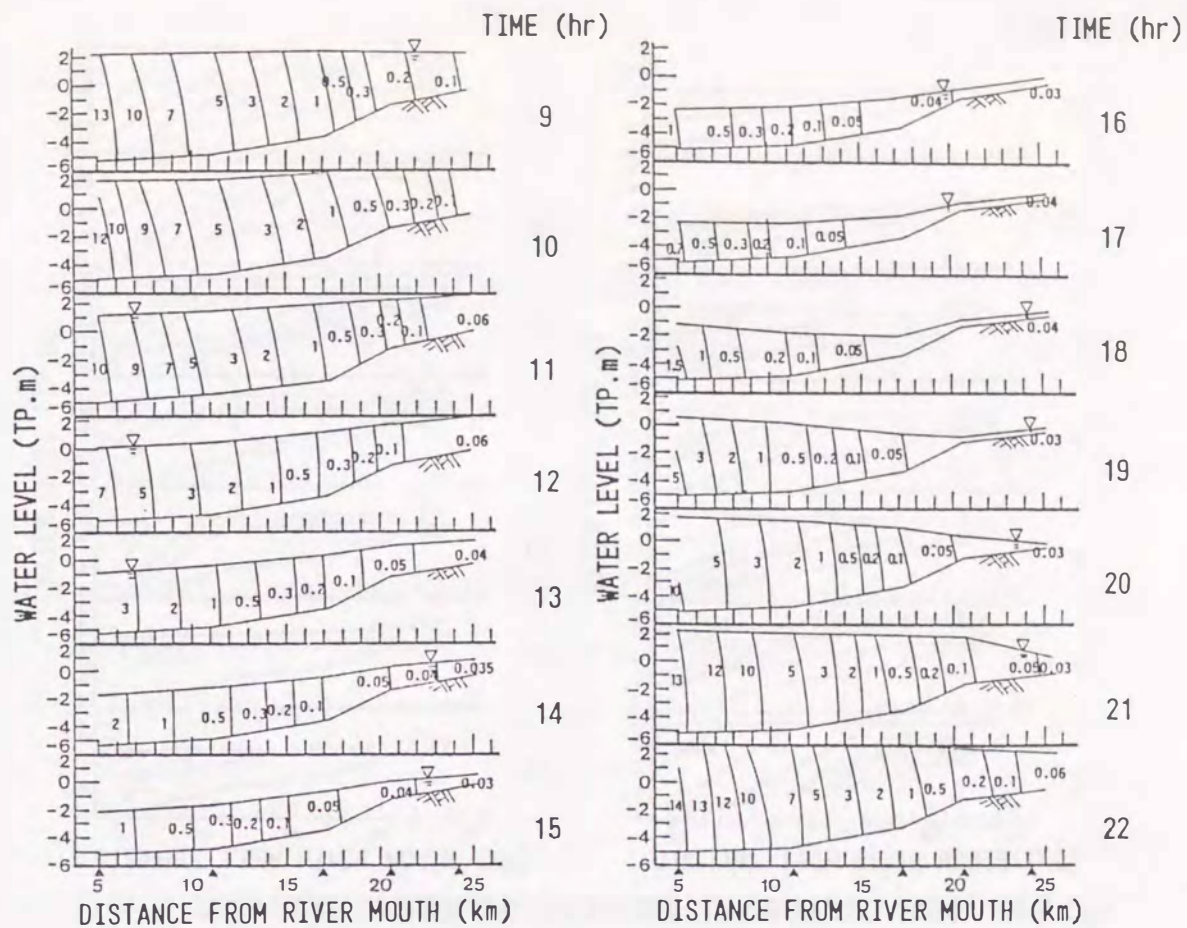


図3-22 塩化物イオン濃度分布 (第5回調査; 1984年7月28日) 単位: g/l

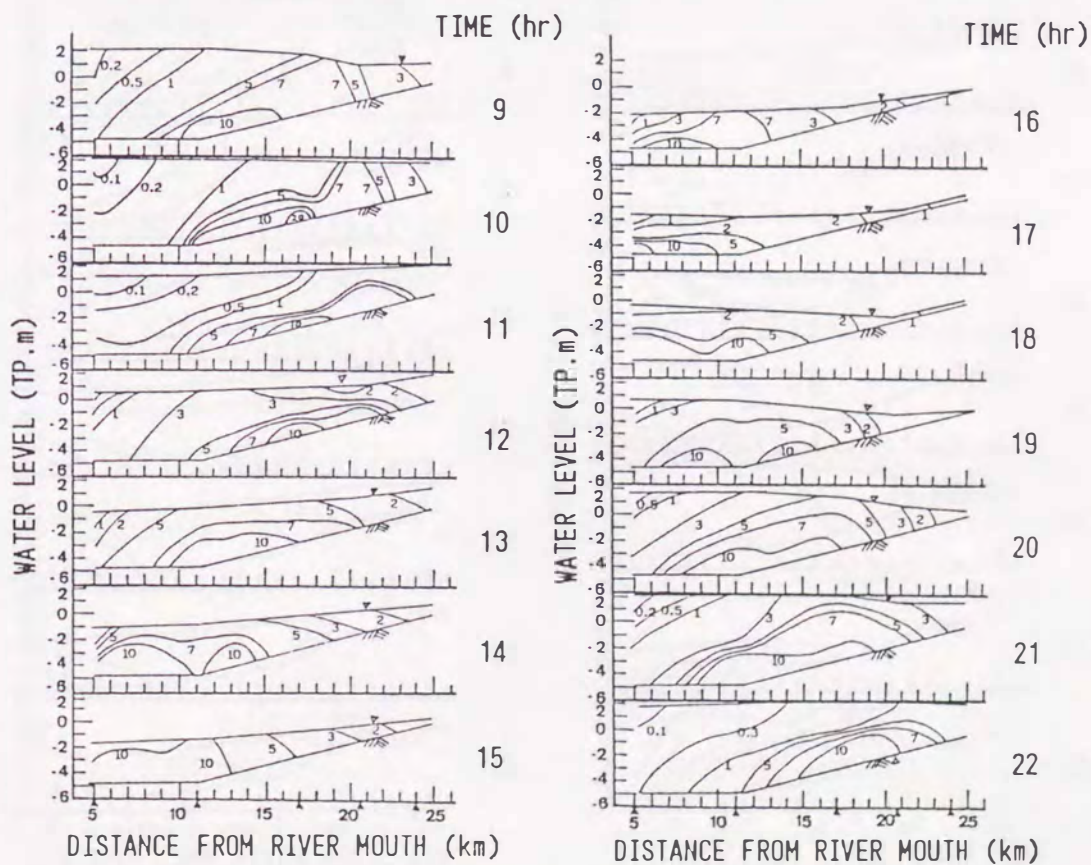


図3-23 SS濃度分布 (第1回調査; 1983年11月20日) 単位: g/l

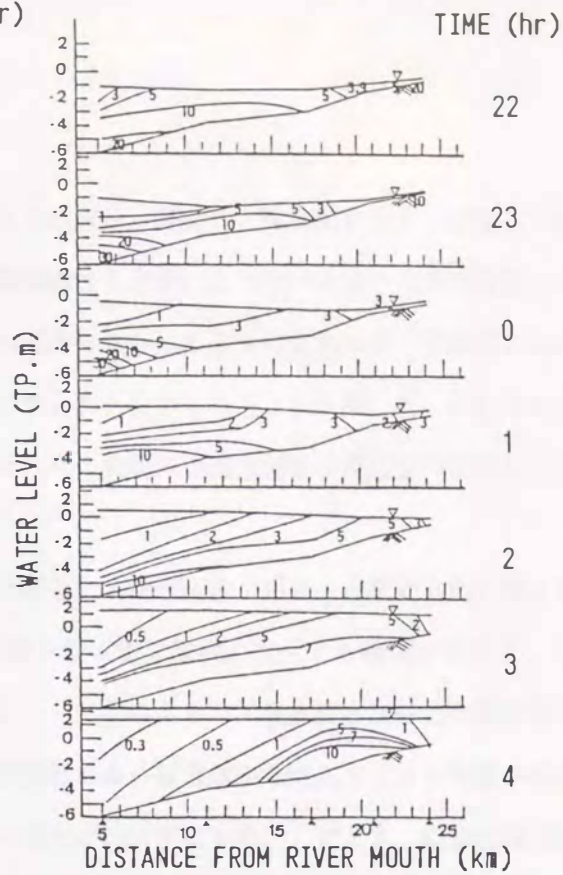
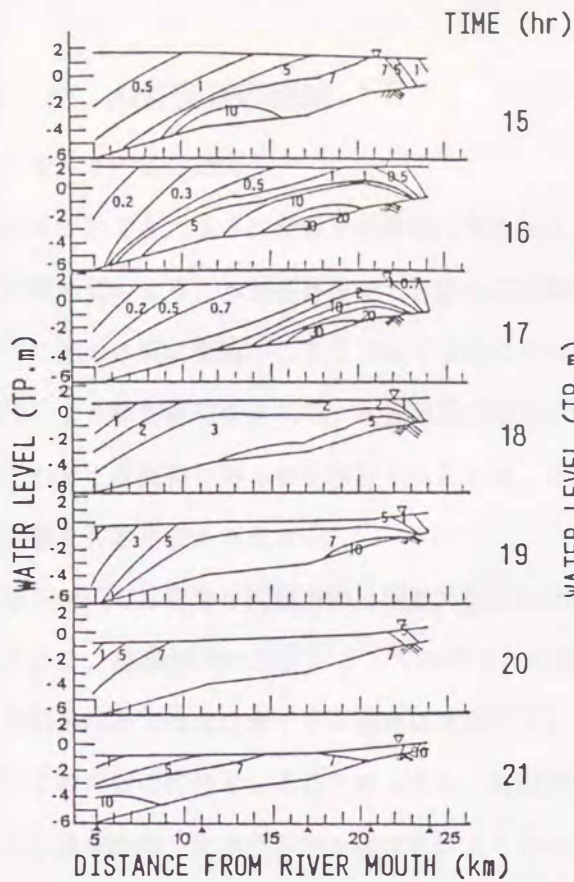


図3-24 SS濃度分布(第2回調査; 1983年12月27~28日) 単位: g/l

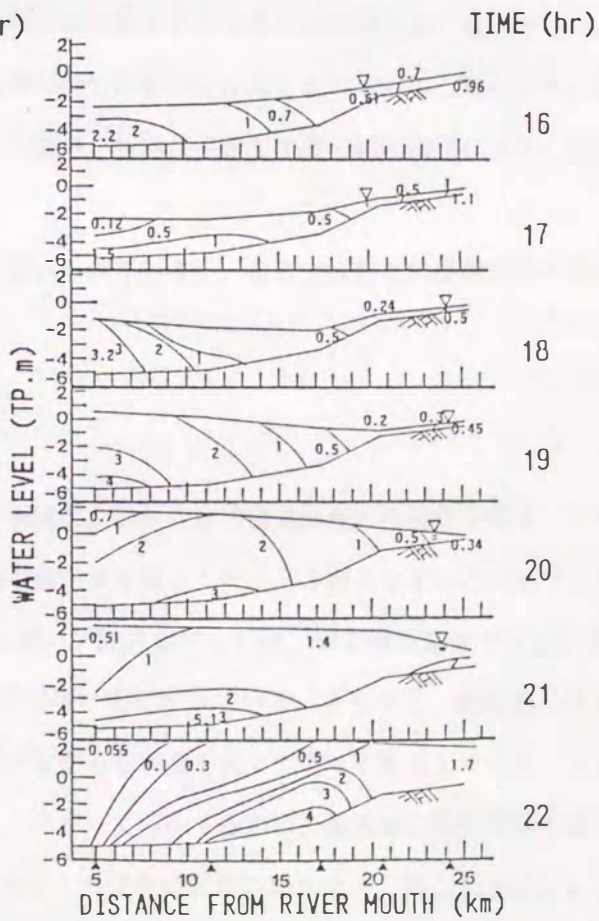
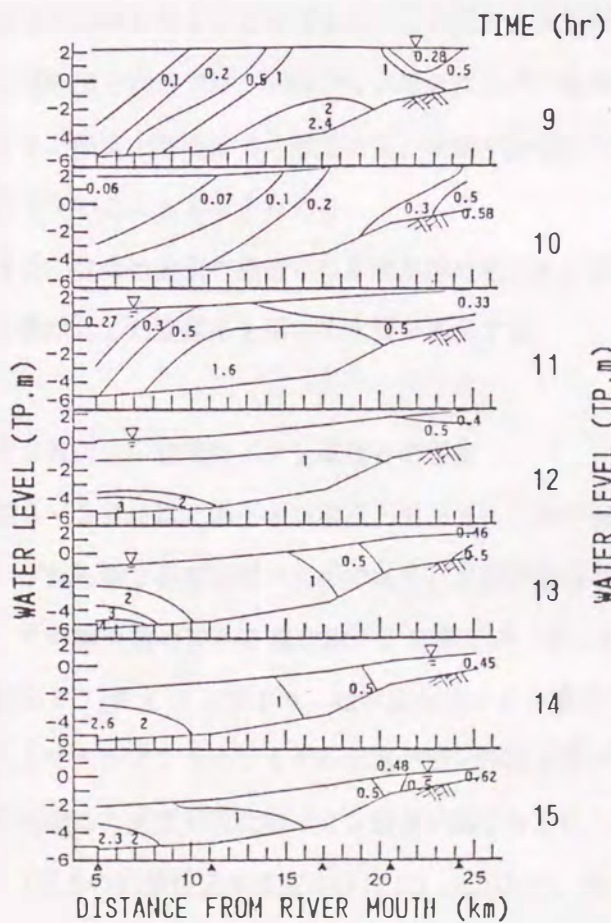


図3-25 SS濃度分布(第5回調査; 1984年7月28日) 単位: g/l

3. 5 水質変動の相関

3. 5. 1 はじめに

これまで見てきたように強混合河川感潮部における水質は、時間的・空間的に大きく変動しており、塩分や懸濁物質のように水質項目各々で特徴のある変動特性を示す。これらの水質の相互の関係には、塩分のように他の水質に影響されることなく独自にその濃度分布が決まるものもあれば、感潮部における自浄作用等により物質形態が変化し、水質相互に関係の見られるものもある。したがって、これらの水質が相互にどのような関係にあるかを検討することは、それらの機構的な因果関係や環境条件の違いによる水質への影響を知る手がかりとなる。

強混合河川では塩分は河道方向に指数関数的に分布し、水塊が潮汐に応じて上下流方向に繰り返し移動するために、感潮部内の位置によって観測される塩化物イオン濃度の変化する範囲が異なる。したがって、強混合河川では塩化物イオン濃度は水塊のトレーサーと考えられ、各水質と塩分との関係から感潮部内でのその水質の特性を知ることができる。河川順流部あるいは海域から流入してきた物質が感潮部内において拡散や沈降、生物化学的な諸反応によりその濃度が減少するものとしたとき、横軸に塩化物イオン濃度を、縦軸にある水質濃度をとって表現することにより、いわゆる mixing diagram として整理され、汚濁物質の起源を知ることができる。この図で、水質の分布が右下がりであれば陸域起源、右上がりであれば海域起源と判断でき、相関がない場合にはその場での発生あるいは流入と考えられる。もっとも、塩化物イオン濃度が感潮部での懸濁物質の挙動や微生物の種類、生物化学的な反応の制約条件になり、現象を支配していることも考えられる。

また、従来の水質の整理には距離基準の座標系が用いられているが、ここでは新たに感潮部内の累加水量を基準にした座標系を用いて水質を表示する。

3. 5. 2 塩化物イオン濃度との相関

図3-26に塩化物イオン濃度とアンモニア及び亜硝酸、硝酸の各態窒素濃度との関係を示す。これらはいずれも第2回調査時のものであり、4調査地点の測定値を用いている。3者とも上に凸の形をしており、その極大値の現れる塩化物イオン濃度は、アンモニア性窒素で0.1 g/l、亜硝酸性窒素で1 g/l、硝酸性窒素で2 g/lとなっており、順次塩化物イオン濃度の高い方にずれている。すなわち、感潮部上流から流入してきたアンモニアを含む水塊が硝化作用を受けながら感潮部を流下することを示している。なお、硝酸性窒素の濃度が塩化物イオン濃度が高くなるにしたがって減少するのは、海水の硝酸性窒素の濃度が低く(海水の硝酸性窒素濃度はほぼ0.5 mg/l以下)、海水との混合希釈が行われたり、河口部底泥による脱窒のために上層水中の硝酸性窒素が底泥へ輸送されたりするからである。また、これら3態の無機態窒素

の濃度の和で表される全無機態窒素濃度は、塩化物イオン濃度の増加にともない低下する傾向があり、海水との混合や堆積底泥による脱窒が生じるためと考えられる。

他の調査日のものでもこのような傾向が見られるが、感潮部に流入するアンモニア性窒素の濃度が最も高いのはこの第2回調査時のものであった。これは、冬季には水温が低いために硝化菌の活性が低下し、感潮部に流入するまでの間にあまり硝化されていないものと考えられる。一方、夏季には流入するまでの間に硝化されるために、ほとんど硝酸イオンとして流入してくる。

次に、3.3.3で述べた3地点における長期観測時の大潮及び小潮期間中の塩化物イオン濃度と各態窒素との関係を図3-27に示す。アンモニア性窒素の11.2 km地点のものでは、大潮時・小潮時とも塩化物イオン濃度が高くなるにしたがって、アンモニア性窒素濃度が高くなっている。これより、この地点より下流側でアンモニア性窒素が流入しているものと考えられる。亜硝酸性窒素では、上流24.2 km地点の塩化物イオン濃度が低いところでその濃度が高い。硝酸性窒素では塩化物イオン濃度1.5 g/l付近に極大値をもつ上に凸の形をしている。

このように、塩化物イオン濃度と各無機態窒素濃度との関係は、硝酸性窒素では一潮汐間と半月周期間ではほぼ同様であるのに対して、アンモニア性窒素及び亜硝酸性窒素では半月周期間でのばらつきが大きい。すなわち、硝化反応の最終的な物質である硝酸性窒素では、水塊中での濃度分布が定常的に定まっているが、アンモニア性窒素・亜硝酸性窒素では、流入負荷の変動や反応特性の変動による影響を受けるために、時間的・空間的な濃度変動が大きく、水塊中での濃度分布が変化するものと考えられる。

3.5.3 SS濃度との相関

まず、SS濃度とBOD₅との関係について検討する。第2回調査時(12月)と第5回調査時(7月)の両者の関係を図3-28、29に示す。いずれの場合も、SS濃度が高くなるに従いBOD₅も高くなる傾向と、上流側地点(20.6 km, 24.2 km地点)のものでSS濃度が低いときにBOD₅が高くなる傾向がある。BOD₅がこのような高くなるのは、河川固有流出現時であるが、夏季には一度流下し再び上げ潮で水塊が遡上してきたときにはその濃度は低くなっている。なお、第2回調査時と第5回調査時では、SS濃度は全体的に前者の方が1桁高いのに対して、BOD₅は同程度であることから、冬季のSSには無機物のものが多く含まれるものと考えられる。

次に、SS濃度とクロロフィルa濃度との相関を第2回及び第5回調査時のものについて図3-30に示す。冬季にはSS濃度が高いにもかかわらずクロロフィルaの濃度は低く、水温が低いために植物プランクトンの発生量が少なく、海域からの供給によるものだけになるものと考えられる。夏季には逆に全体的なSS濃度が低いにもかかわらずクロロフィルa濃度が高く、植物プランクトンの発生が活発になって

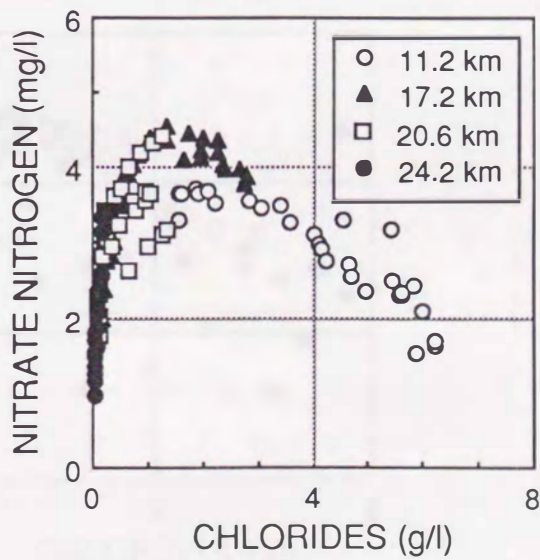
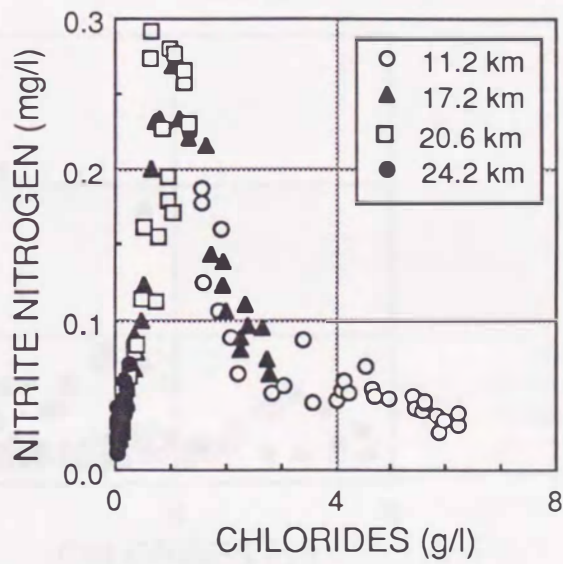
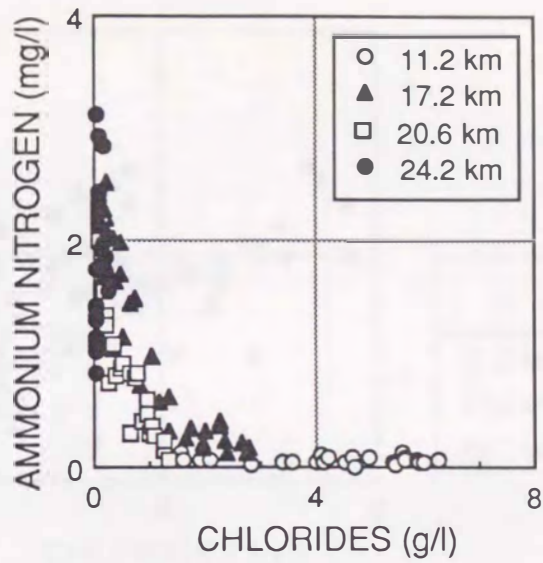


図3-26 塩化物イオン濃度と各無機態窒素濃度の関係
 (第2回調査; 1983年12月27~28日)

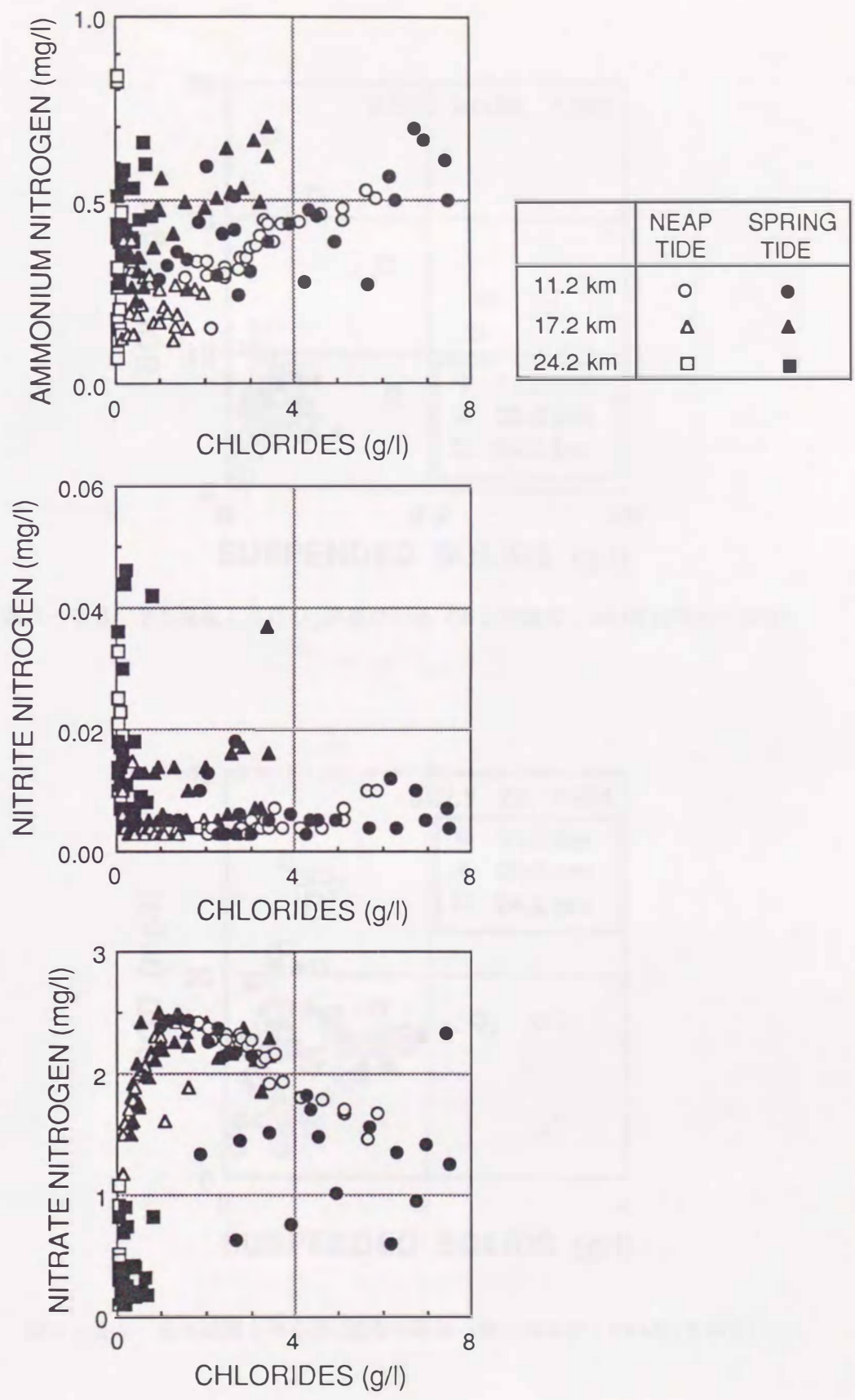


図 3 - 2 7 塩化物イオン濃度と各無機態窒素濃度の関係 (1988年11月27日~12月16日)

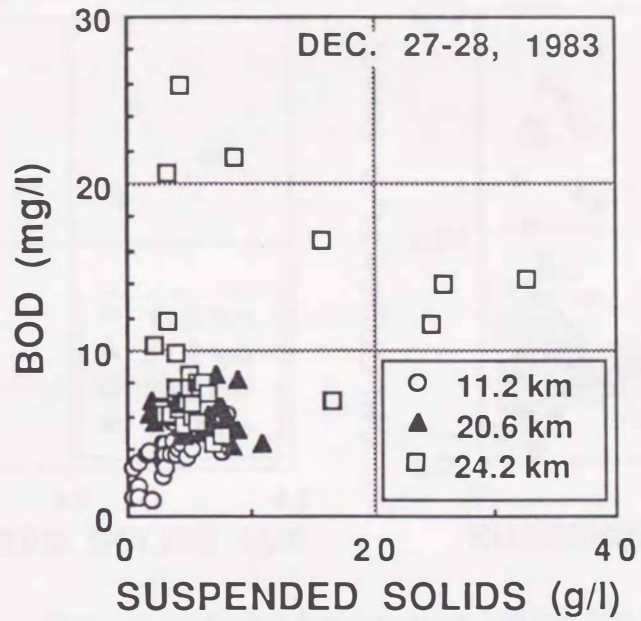


図3-28 SS濃度とBOD₅濃度の関係 (第2回調査; 1983年12月27~28日)

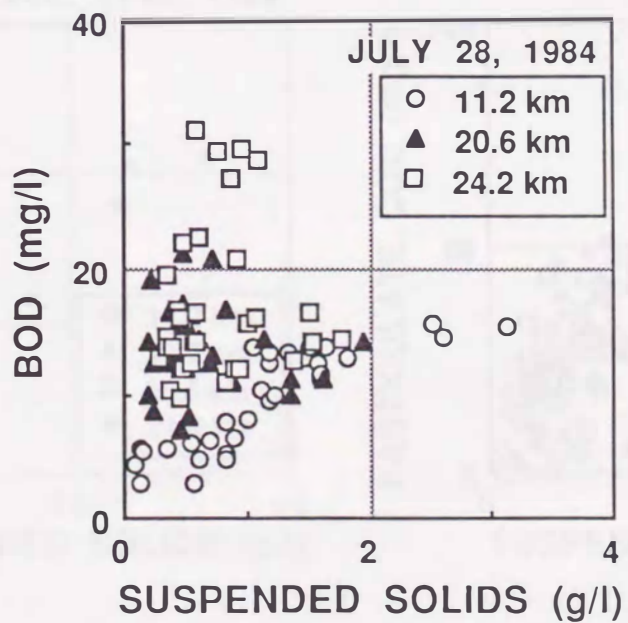


図3-29 SS濃度とBOD₅濃度の関係 (第5回調査; 1984年7月28日)

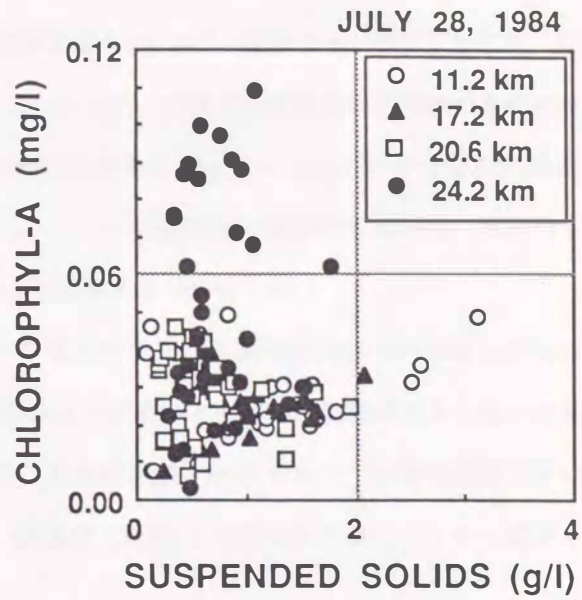
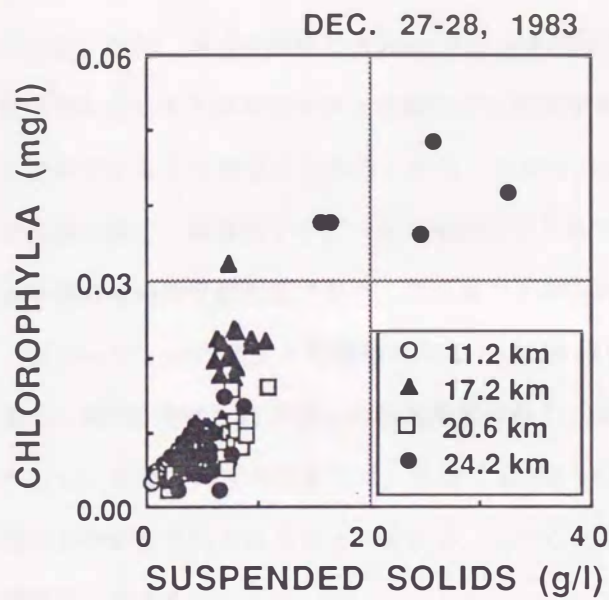


図3-30 SS濃度とクロロフィルa濃度の関係

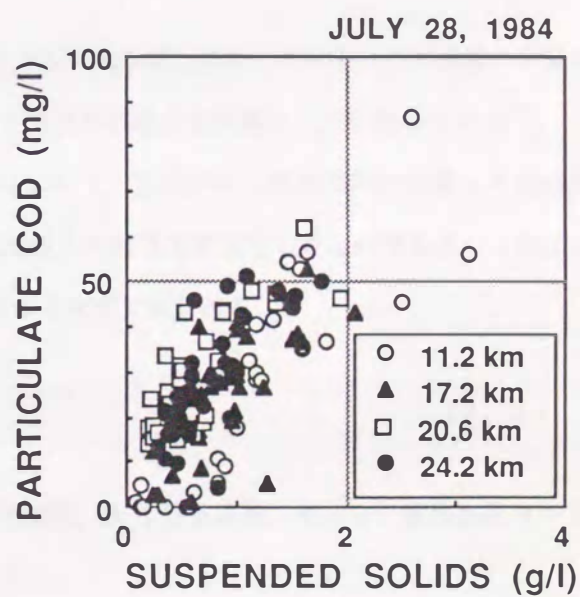
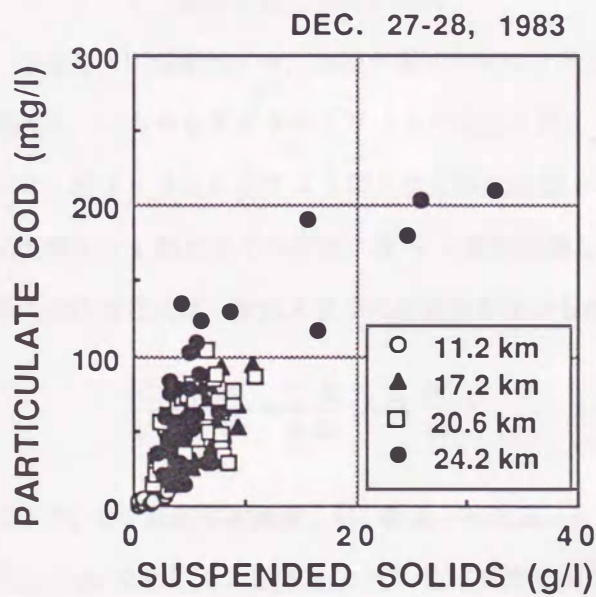


図3-31 SS濃度とPCOD濃度の関係

いることが考えられる。とくに、第5回調査時の24.2 km地点のものでは、SS濃度が0.5~1 g/lのときにクロロフィルa濃度が高くなっている。これは、河川固有流出現時の感潮部上流域からの流下によるものである。なお、両者の濃度比(Chl-a/SS)を求めると冬季では 1.8×10^{-6} 、夏季で 1.8×10^{-5} となり、懸濁粒子中に占めるクロロフィルaの割合が1桁異なる。したがって、冬季の懸濁粒子には無機のものが多く含まれていることが考えられる。なお、クロロフィルの分解産物であるフェオフィチンは常にSS濃度との相関が高く、懸濁粒子中に一定の割合で含まれている。これらの濃度比の季節的な違いは、夏季のものが冬季のもの2倍程度であり、クロロフィルaの場合程大きくない。

図3-31はSS濃度と懸濁態のCOD(PCOD)濃度との関係を第2, 5回調査時について示したものである。PCOD濃度もSS濃度との相関が常に高く、上げ潮時と下げ潮時とで両者の関係に大きな違いは見られない。また、両者の濃度比は、冬季で0.008~0.023、夏季で0.03~0.06であり、冬季の懸濁粒子に無機のものが含まれていることが分かる。このことは、SS濃度と BOD_5 との関係やクロロフィルa濃度との関係と一致する。

この他、リンではDPの濃度がかなり低く、大半が懸濁態で存在している。その濃度が高いときには、SS濃度の高低によらず両者の相関が高くなる傾向がある。

3.5.4 累加水量と水質の相関

強混合河川感潮部では、水塊が潮汐作用により上下流方向に繰り返し移動している。この水塊の挙動の解析は、いわゆるタイダルプリズムの概念を用いて、1次元の移流分散問題として行われている¹⁶⁾。これは、図3-32に示すように1次元移流分散方程式において、変数である流れ方向の位置xを感潮部上流端からx地点までの累加水量Vに変数変換し、塩分浸入の計算を簡便化したものである。1次元の移流分散方程式は、横流入及び内部変換がないものとするとき次式で表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (A D_L \frac{\partial C}{\partial x}) \quad (3.1)$$

ここで、C; 断面平均濃度、U; 断面平均流速、A; 流水面積、 D_L ; 分散係数、である。累加水量 $V = \int_x A(x,t) dx$ を用いて、変数をxからVに変換すると、

$$\frac{\partial C}{\partial t} + Q_r \frac{\partial C}{\partial V} = \frac{\partial}{\partial V} (A^2 D_L \frac{\partial C}{\partial V}) \quad (3.2)$$

となる¹⁷⁾。ここで、 Q_r は河川固有流量である。さらに、Vが一定のところの塩化物イオン濃度が変化しない($\partial C / \partial t = 0$)ものとし式(3.2)を積分すると、

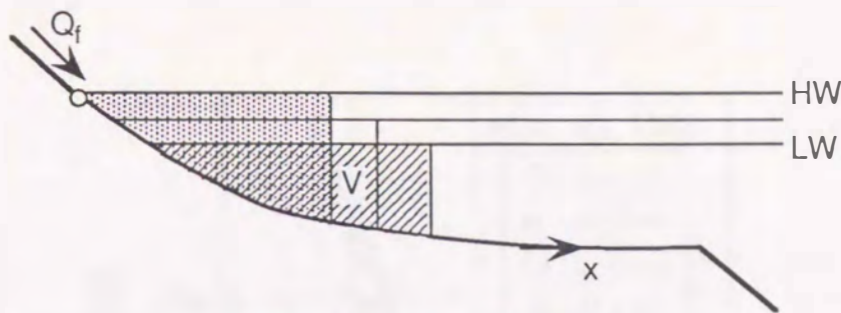


図3-32 累加水量の概念図

$$\frac{dC}{C} = \frac{Q_f}{A^2 D_L} dV \quad (3.3)$$

となる。簡単のために $A = \alpha V^{2/3}$ とおき、上式に代入して積分すると、

$$\ln C = -\frac{3Q_f}{\alpha D_L} V^{-1/3} + C_1 \quad (C_1 \text{ は積分定数}) \quad (3.4)$$

となる。この $V^{-1/3}$ と塩化物イオン濃度との関係を第1回調査時のものについて図3-33に示す。なお、累加水量は後述の数値計算時の水理量計算結果のものを用いている。これらの関係は片対数紙上では直線となる。なお、塩化物イオン濃度が500 mg/l以下では、データのプロットがこの直線よりはずれている。これは、これらのデータの観測地点が累加水量を算定する際の原点である感潮部上流端に近く、累加水量の誤差が大きくなったこと、感潮部上流域より流入してくる河川水では、生活排水の影響によって塩化物イオン濃度が高くなったことによる。他の調査日のものでも同様の関係が得られており、これより水塊中での塩化物イオン濃度の分布が準定常的に定まっていることが分かる。図3-34は第2回調査時の累加水量と各態窒素との関係を示したものであるが、前述の塩化物イオン濃度と各態窒素の関係と同様の傾向が見られる。

さらに、図3-35、36には長期観測時の累加水量と塩化物イオン濃度及びSS濃度の関係を示す。ここでも、累加水量と塩化物イオン濃度との間に明瞭な関係が見られ、これより水塊中の塩化物イオン濃度の分布が時間によらずほぼ一定であることが分かる。一方、SS濃度ではばらつきが大きく、SS濃度が時間的に大きく変動している。同様に、長期観測時の累加水量と各態窒素との関係を図3-37に示す。これらの図でも、前述の塩化物イオン濃度と各態窒素のものとはほぼ同様な関係が示される。

このように累加水量を用いて水質を整理することの利点は、次のように考えられる。強混合河川感潮部のように水塊の河道方向への移動距離が大きい場合には、ある地点で観測される水質が、本来の水質変化ではなく、水塊の移動によって時間的に大きく変動する。したがって、距離を基準に表現すると現象の本質を把握できないことがある。このようなとき、感潮部上流端からの累加水量を用いて表現すると、流れいわゆる移流による水質変化の影響を見かけ上なくすことができ、水塊内での水質の分布を潮汐作用によ

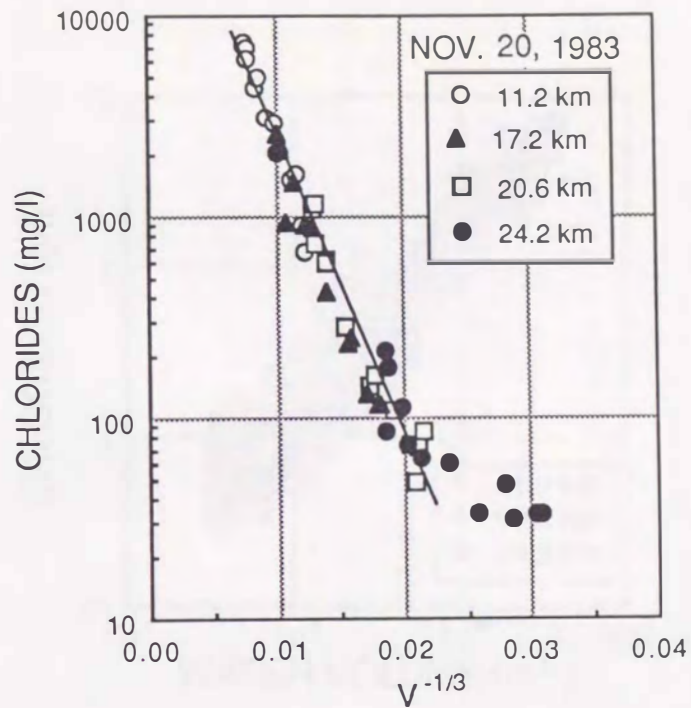


図3-33 $V^{-1/3}$ と塩化物イオン濃度の関係

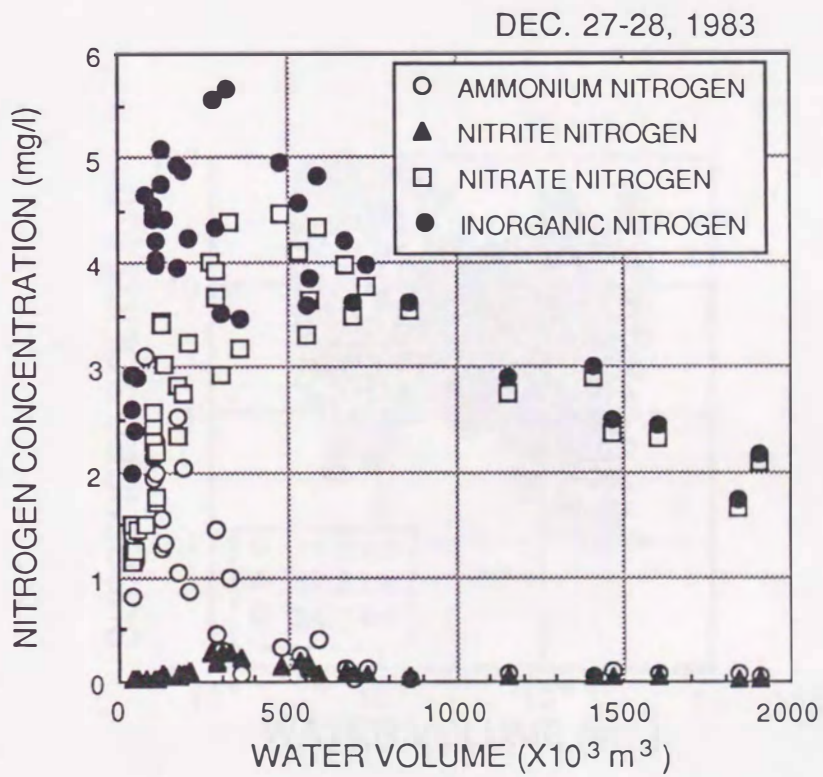


図3-34 累加水量と各無機態窒素濃度との関係

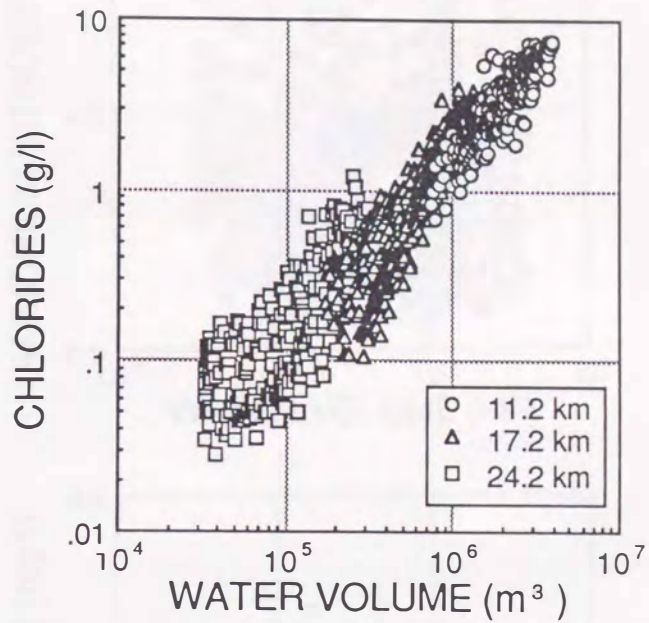


図3-35 累加水量と塩化物イオン濃度との関係
(1988年11月27日~12月16日)

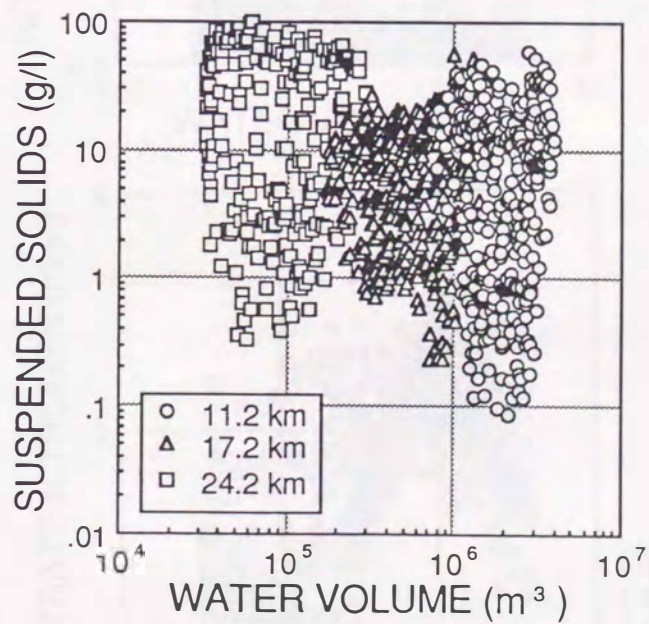


図3-36 累加水量とSS濃度との関係
(1988年11月27日~12月16日)

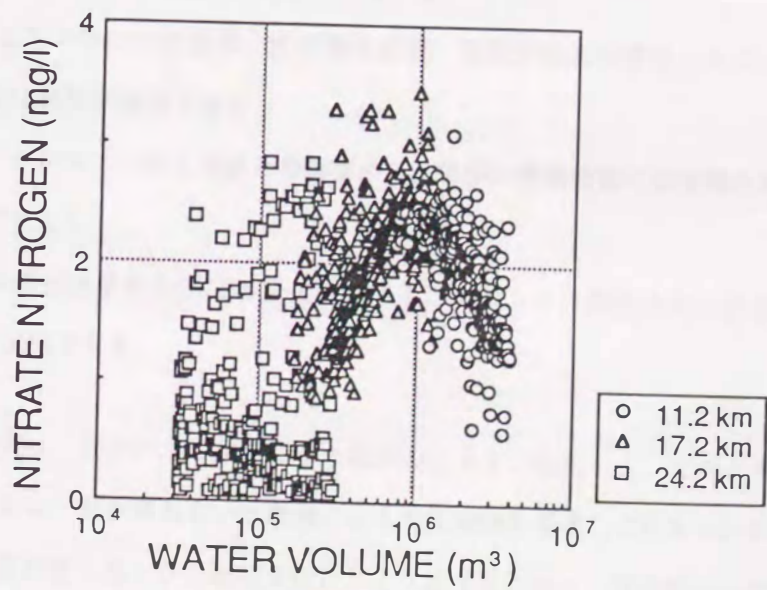
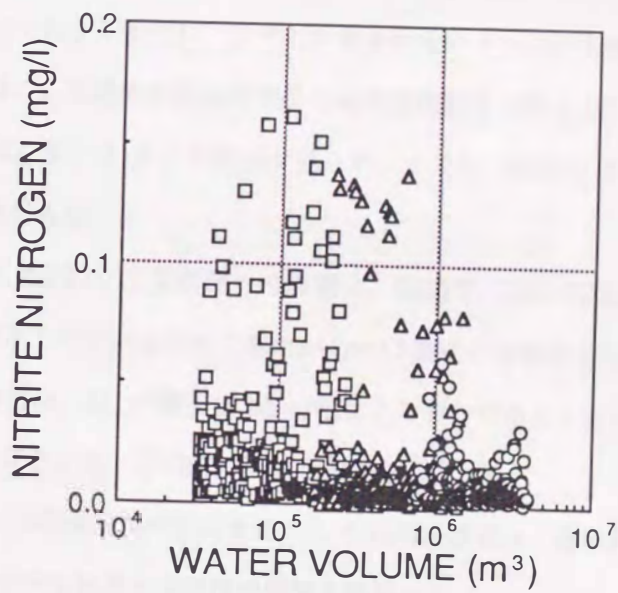
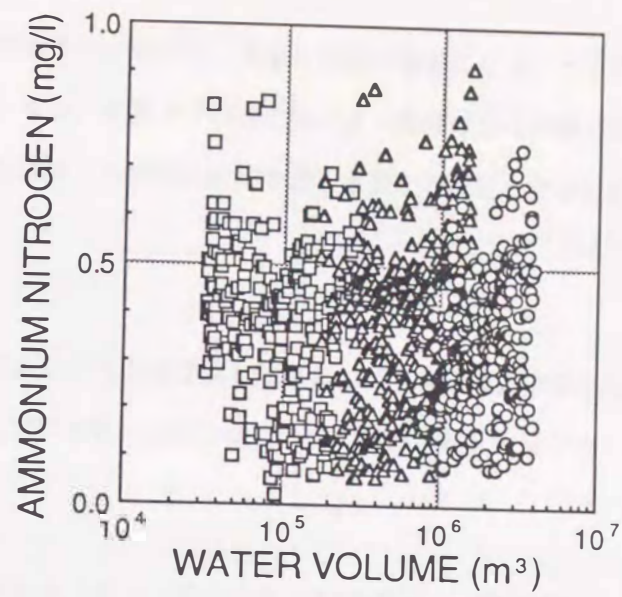


図3-37 累加水量と各無機態窒素濃度との関係 (1988年11月27日~12月16日)

る時間変動のない状態で示すことができ、現象の把握が容易になる。とくに、長期的な水質変換現象の機構解明には便利である。なお、水塊中での塩化物イオン濃度の分布が準定常的に決まっているときには、塩化物イオン濃度とある水質との関係は累加水量と水質との関係と同等となる。

3. 6 結語

本章では強混合河川である六角川感潮部を対象にして、現地調査結果を基に感潮部における水質の時間的・空間的変動特性ならびに水質相互の関係について検討した。本章で得られた結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 強混合河川感潮部のある地点で観測されるSS濃度は、一潮汐間に懸濁物質の沈降や巻き上げそして移流の影響を受けて大きく変化し、必ずしも流速最大のときに最高濃度を示すとは限らない。この一潮汐間の潮汐作用による濃度変動幅が季節的な濃度変動を上回ることがある。
- (2) SS濃度変動とBOD₅及びCODとの相関が見られ、とくに上流域では河川固有流出現時にそれらの濃度が高くなる傾向がある。
- (3) 潮相の変化による長期的な水質変化への影響は、SS濃度において顕著である。小潮時には流速が遅くなり、底泥の巻き上げがあまり起こらないためSS濃度が大潮時に比べかなり低くなる。
- (4) 潮汐作用の非対称性は、M₂分潮及びM₄分潮によるものである。ただし、塩化物イオン及びSS濃度の長期的な変化にはその他の周期成分による影響も見られる。
- (5) 六角川感潮部ではSS高濃度塊が形成され、このSS高濃度塊は、懸濁粒子の沈降と底泥の巻き上げを周期的に繰り返しながら水塊と同程度の距離を移動する。
- (6) 塩化物イオン濃度とアンモニア性窒素、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素各濃度との関係を用いることにより、感潮部での硝化過程を説明できる。
- (7) SS濃度とBOD₅及びクロロフィルa濃度との関係から、冬季の懸濁物質には無機のものが多く含まれることを示すことができる。
- (8) 感潮部上流端からの累加水量を基準に水質を整理することにより、強混合河川感潮部での水質変換現象を分かりやすく説明できる。

強混合河川感潮部での水質は、潮汐作用の影響により時間的に大きく変化する。このような水域における水質調査は、潮汐作用による一潮汐間あるいは潮相による水質変動を考慮して行わなければならない。月1回程度の調査では「水質の最も悪くなる時刻を含む」ようにするために、調査地点の感潮部内の位置にもよるが、大潮の下げ潮時が望ましいと思われる。

強混合河川感潮部では時間的な水質変動ばかりでなく、河道方向への水質分布にも特徴が見られる。したがって、ここでの水質変動現象を解析する際には、1次元的な取り扱いで十分表現することができると考えられる。また、本感潮部のようにSS濃度が高い場合には、SS高濃度塊が形成され、沈降と巻き上げを周期的に繰り返しながら河道方向へ懸濁物質が輸送される。このSS濃度と他の水質との関係が見られることから、懸濁物質の挙動をさらに詳細に検討する必要がある。

参考文献

- 1) 宇野木早苗；河川潮汐の研究(第1報)，土木学会第15回海岸工学講演会講演集，pp.226～235，1968.
- 2) 宇野木早苗；河川潮汐の研究(第2報)，土木学会第16回海岸工学講演会講演集，pp.377～384，1969.
- 3) 宇野木早苗，上嶋英機，山下皓一；河川潮汐の研究(第3報)，土木学会第20回海岸工学講演会論文集，pp.371～376，1973.
- 4) 楠田哲也，二渡了，粟谷陽一，古賀憲一，古本勝弘；河川感潮部の水質情報の標準化，土木学会第12回環境問題シンポジウム講演論文集，pp.18～23，1984.
- 5) 日本河川協会編；1988日本河川水質年鑑，山海堂，pp.908～914，1989.
- 6) 楠田哲也，古賀憲一，二渡了，粟谷陽一，古本勝弘，海田輝之，井前勝人，荒木宏之；水質観測用計測機器の試作，水質汚濁研究，第9巻，第4号，pp.239～243，1986.
- 7) Odd, N. V. M.；Mathematical modelling of mud transport in estuaries, Physical processes in estuaries (J. Dronkers, W. van Leussen eds.), Springer-Verlag, pp.503～531, 1988.
- 8) 椿東一郎；水理学Ⅱ，森北出版，p.134，1974.
- 9) 河原長美，名合宏之；旭川感潮部における表面水質の統計的性質，水質汚濁研究，第7巻，第4号，pp.232～238，1984.
- 10) 細井由彦，村上仁士；感潮河川の水質に及ぼす潮位振動の影響について，水質汚濁研究，第6巻，第1号，pp.23～30，1983.
- 11) 土木学会編；水理公式集(昭和60年版)，土木学会，pp.109～124，1980.
- 12) 土木学会土木情報システム委員会教育問題小委員会編；土木情報処理の基礎—FORTRAN77に即して—，土木学会，pp.252～257，1988.
- 13) Boon, J. D., Byrne, R. J.；On basin hypsometry and the morphodynamic response of coastal inlet systems, Marine Geology, 40, pp.27～48, 1981.
- 14) Uncles, R. J.；A note on tidal asymmetry in the Severn Estuary, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 13, pp.419～432, 1981.

- 15) Zarillo, G. A. ; Tidal dynamics and substrate response in a salt-marsh estuary, *Marine Geology*, 67, pp.13 ~35, 1985.
- 16) 古本勝弘 ; エスチャリーにおける密度流現象に関する研究, 九州大学学位論文, pp.54~71, 1988.
- 17) 椿東一郎 ; 基礎土木工学全書 7, 水理学II, 森北出版, p.213, 1974.

