

強混合河川六角川感潮部における 懸濁物質濃度の変動特性

二渡 了*・楠田哲也**・大石京子***

本研究では、強混合河川である六角川感潮部を対象に一潮汐間及び2週間にわたる現地調査を実施し、懸濁物質濃度の時間的・空間的な変動・分布特性について検討した。懸濁物質は、横断面及び縦断面内において層状の濃度分布をしていること、SS高濃度塊が形成され、懸濁物質の沈降・巻き上げを伴いながら河道方向へ移動すること、SS濃度は大潮時に高く、小潮時には低くなることを明らかにした。また、感潮部上流端からの累加水量を用いて水質を整理することにより、水塊内での水質分布を表現できた。

Keywords: well-mixed estuary, field observation, water quality, chlorides, suspended solids, turbidity maxima, the Rokkaku River.

1. 序 論

河川感潮部は、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。また、感潮部では河川水と海水との混合が行われる上に、河川順流部に比べて相対的に長い平均滞留時間をもつ。このような感潮部における水質についての研究は種々行われているものの、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。

感潮部は河川水と海水との混合形態によって水理学的に弱混合型・緩混合型そして強混合型の3つに分類されるが、従来の研究結果に基づいて各々の混合形態での水質変動・分布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重要な役割を果たす。七北田川における調査例¹⁾によると、平水流量時には流入河川水が塩分躍層上部をそのまま流れ、下層に浸入した海水が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。また、吉野川の例²⁾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濃度SS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、潮汐周期による時間的な水質変動はあまり見られず、河川水と海水との混合による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³⁾の旭川感潮部における調査例では、密度成層とSS濃度分布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って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、表層に排水やプランクトンの影響が強く現れて複雑な分布形となる。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⁴⁾。塩分は、河道断面内での鉛直方向の変化がほとんどなく、潮汐に応じて河道内を移動している。一方、SS濃度分布は、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。

このように弱・緩混合型の感潮部では潮汐作用による水質変動への影響は、河川流量の変化による影響に比べて小さい。一方、強混合型の感潮部は、感潮部内の水量に対して流入河川水量が少ないことが原因で河道方向にのみ塩分の濃度勾配が存在しており、潮汐作用による時間的な濃度変動が卓越している。この時間的な変動特性は、空間的にも異なる。また、強混合型の感潮部では、潮汐変動に伴い流れが周期的に変化し、流速が大きいところでは堆積底泥が巻き上げられるのでSS濃度が高くなる。このような浮遊物質は沈降性を有するために、塩分は強混合状態にあっても、SS濃度には鉛直方向の分布が生じる。

本研究では、強混合河川感潮部において一潮汐間及び大潮から次の大潮までの半月周期における現地調査を実施し、懸濁物質の時間的・空間的な濃度変動・分布特性を明らかにし、混合特性との関係について検討する。

* 正会員 工修 九州大学助手 工学部附属環境システム工学研究センター (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

** 正会員 工博 九州大学教授 工学部水工土木学科

*** 正会員 農修 九州大学助手 工学部水工土木学科

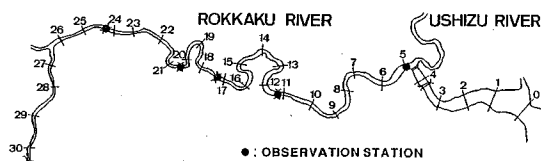


Fig. 1 Map of the Rokkakku River. Figures show the distance (km) from the river mouth.

Table 1 Conditions of the field observations.

No.	Date	Tide	Age of the moon (d)	Tidal range (m)	Water temp. (°C)	Preceding dry days (d)
1	Nov.20,1983	spring	15.2	4.11	12	24
2	Dec.27-28,1983	neap	23.1	2.61	5	5
3	Mar.17,1984	spring	14.4	4.91	8	1
4	May 26-27,1984	-	25.5	2.75	22	10
5	July 28,1984	spring	29.0	4.97	30	16

2. 現地調査

(1) 対象河川

本研究で対象としたのは、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發し、途中いくつかの小河川を合流しながら流下し、河口より5km程上流で支川牛津川が合流しており、流域面積341km²(六角川173km², 牛津川168km²)、流路延長が六角川47km, 牛津川29kmの1級河川である。河口での潮差は、大潮時に5m以上にも達し、感潮区間は六角川で河口より29km上流まで、牛津川では合流部より14km上流までであり、全流路延長に対する感潮区間の占める割合が他の河川に比べ大きくなっている。六角川本川感潮部の概要をFig. 1に示す。なお、本河川における非感潮部での流量(河川固有流量)は小さく、支川牛津川の非感潮部(妙見橋地点)での最近5カ年(1984~88年)の平均では平水流量1.63m³/s, 低水流量1.03m³/sである。したがって、感潮部の容積と河川固有流量との比である平均滞留時間は、本感潮部の容積を概ね5×10⁶m³とすると、河川流量を2m³/sとしても29日となり、かなり大きい。

流域の人口密度は低く、主な汚濁源にはし尿処理場、ブ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。

(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時間程度及び半月周期としての2週間程度の連続した2種類の調査を行った。

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5地点(河口から5.0km, 11.2km, 17.2km, 20.6km, 24.2km上流)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³⁾と採水を行った。水

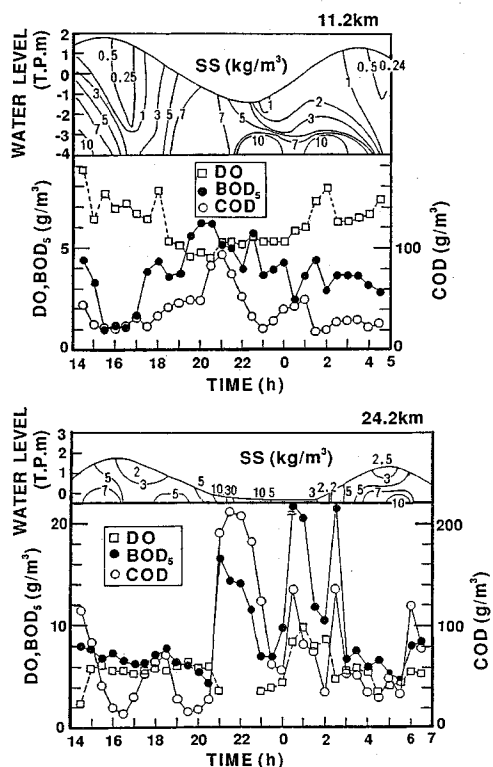


Fig. 2 Temporal changes of water qualities for a semi-diurnal cycle on Dec. 27-28, 1983.

質分析項目は、塩化物イオン、SS、BOD₅、DO、COD等(ただし、BOD₅、DOは表層のみ)であり、水質分析方法は、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。また、1調査地点において横断方向に5調査点を配した調査も同様の方法で行った。

2週間にわたる現地調査では、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及びSS各濃度を測定した。

3. 水質の時間的变化

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では、河口・沿岸域に泥干潟が広がり、潮の干満にともなって浮遊物質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半月周期における水質の時間変動特性について検討する。

(1) 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。調査は計5回行ったが、各調査日の概要をTable 1に示す(以下では、順に第1回調査のように呼ぶ

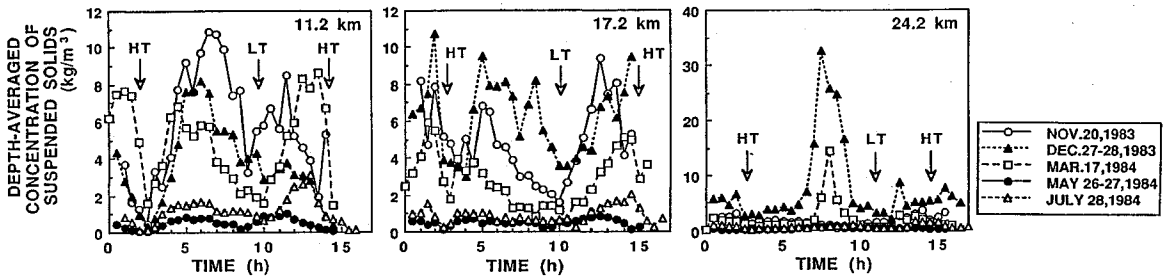


Fig. 3 Temporal changes of depth-averaged concentration of suspended solids.

ことにする)。なお、表中の潮差は六角川河口でのものには等しい三池港での潮差(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。

Fig. 2 に第 2 回調査時の 11.2km 及び 24.2km 地点における SS 濃度鉛直分布及び表層の DO 濃度, BOD₅, COD 各々の経時変化を示す。11.2km 地点での SS 濃度では、鉛直方向の濃度差が下げ潮時には小さく、上げ潮時には大きくなっている。とくに、転流時から上げ潮時には下層部で 10kg/m³ を越えるほどになっており、底泥の巻き上げによる濃度上昇と考えられる。また、満潮時には上層での濃度が低くなっているが、これは浮遊物質が沈降したためである。一方、24.2km 地点のものでは下げ潮時の固有流が出現するときに 30kg/m³ となりかなり高くなっている。これは、満潮のときに冠水して流動しやすくなった堆積底泥が、水位の低下とともに水の動きに遅れて浮泥流(10~100kg/m³ 程度の高濃度の懸濁液の密度流的な流動⁶⁾)として流下してきたものと考えられる。

DO 濃度の一潮汐間での変化はいずれの地点においても小さいが、SS 高濃度のときに低くなる傾向がある。DO 濃度の変化の原因には、一般に大気中の酸素の溶解、光合成による発生、微生物や底泥による消費等があるが、感潮部ではさらにこれらの影響を受けた水塊が移動するために変化が複雑となっている。

BOD₅, COD では、いずれの地点でもそれらの変化は大きく、SS 濃度が高くなったときにそれらの濃度が高くなる傾向が見られる。また、24.2km 地点のものでは河川固有流出現時にそれらの濃度が極端に高くなっており、感潮部上流域からの流入水に有機物がかなり含まれていると考えられる。

次に、一潮汐間の濃度変動の季節的な変化について検討する。Fig. 3 は 5 回の調査について断面平均の SS 濃度の経時変化を各地点毎に示したものである。まず、地点毎に濃度変動の特性をみる。11.2km 地点のものでは満潮及び干潮の停潮時の直後に浮遊物質の沈降のために濃度が低くなり、満潮後次第に流速が大きくなるに従って

底泥が巻き上げられ SS 濃度が上昇している。また、干潮時に比べ満潮時の濃度が低くなっているが、これは満潮時の停潮時間が干潮時に比べ長いために、浮遊物質の沈降量が大きくなることによるものである。さらに、満潮時には海水の浸入のために塩分濃度が高くなっており、懸濁粒子のフロック形成が促進され、沈降速度が相対的に大きくなることも考えられる。17.2km 地点では下げ潮後半にまだ流速が大きいかもかわらず SS 濃度は減少する傾向を示している。これは、その付近で巻き上げられる底泥がなくなり、巻き上げが終了したためと考えられる。一方、上流域の 24.2km 地点では、停潮時間が下流域に比べてそれほど長くないため、浮遊物質の沈降はあまり起こらず、SS 濃度の低下は他地点に比べて小さい。また、第 2 回及び第 3 回調査の下げ潮後半の固有流出現時には、Fig. 2 で見たように SS 濃度の高い浮泥流の流下によって SS 濃度が極端に高くなっている。なお、他の調査日において高濃度の浮泥流が見られないのは、巻き上げられる底泥が存在しないためである。このように、断面平均 SS 濃度の時間変動の様子は、感潮部での調査地点の位置によって異なる。この原因には、流れとの相互作用によって沈降したり巻き上げられたりする懸濁物質の量が空間的に異なることのほか、巻き上げられた底泥が移流により河道方向へ輸送されることも考えられる。

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ってくる。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、17.2km, 24.2km 両地点では第 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なっている。これは、季節的な原因による SS 濃度変化の方が、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ために、第 1 回と第 5 回の調査における 11.2km 地点の最大・最小濃度を用いて比較する。第 1 回調査日の最大濃度は 10.86kg/m³、最小濃度は 0.449kg/m³、同じく第 5 回調査日ではそれぞれ 1.647kg/m³ 及び 0.097kg/m³ であり、いずれも最大濃度は下げ潮時に、最小濃度は満潮の停潮時に生じている。ここで、

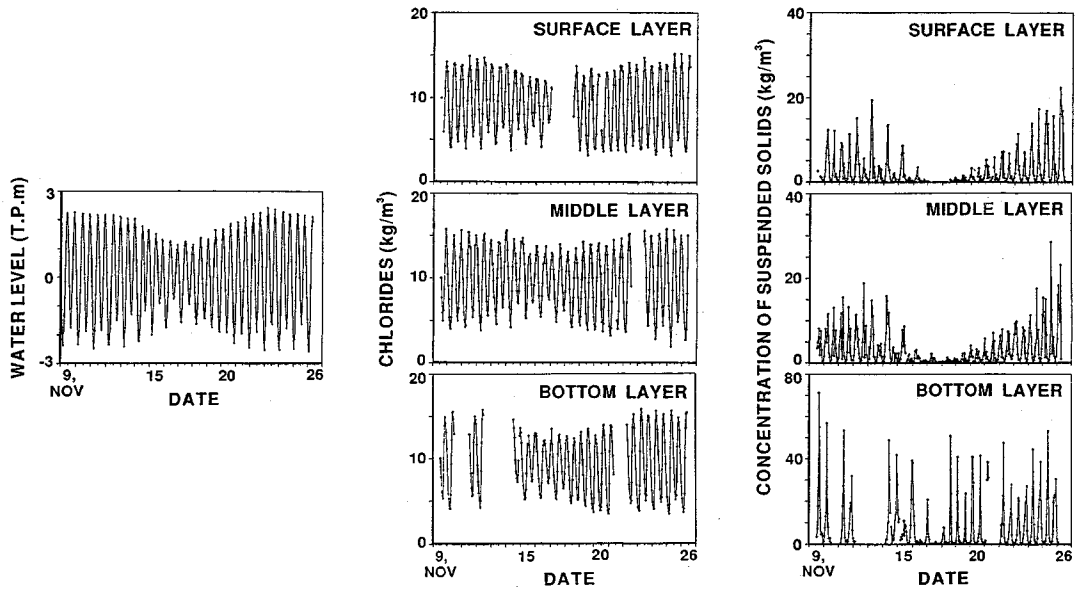


Fig.4 Results of the observation on Nov. 9 to 26, 1988, temporal changes of water level, chlorides and suspended solids concentration for a fortnightly cycle at the point of 5 km upstream from the river mouth.

各々の調査日の一潮汐間の濃度変動の幅を最大・最小濃度の比でみると、それは第1回調査では24.2、第5回調査では17.0となる。一方、一潮汐間の最大及び最小濃度の第1回調査と第5回調査との比は、最大濃度で6.6、最小濃度で4.6となる。これより、一潮汐間の濃度変動の幅が、季節的な濃度変動の幅より大きいことが分かる。しかしながら、濃度の絶対値でみると、冬季のものが夏季のものに比べ全体的にかなり高くなっている。これは、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、河道内に存在する懸濁物質量が季節的に変化するためと思われる。この一因として、下流沿岸域でのノリ養殖に伴う船舶航行の頻度が10月から3月の間増加するために、下流河口付近の河道水際部の底泥が波浪により局所的に0.7～1m洗掘されており、この底泥(懸濁物質)が潮汐作用による物質輸送によって上流側へ輸送されることが考えられる。

(2) 半月周期における変動特性

続いて、半月周期における水質変化について検討する。ここでは、河口より5.0km上流地点において鉛直方向に水面より0.5m(表層)、河床より1.5m(中層)及び0.5m(底層)の3点で1時間間隔で同時に採水するもの(1988年11月9日～26日実施)と、河口より11.2km, 17.2 km, 24.2 km上流の3地点において河床から0.2～0.5mの高さに1点の採水口を設置して採水するもの(同年11月27日～12月16日実施)の2通りの調査を行った。なお、いずれの調査期間中にも降雨はほとんどなく、感潮域上流からの河川固有流量は安定していた。また、水位は建設省資料によるものである。

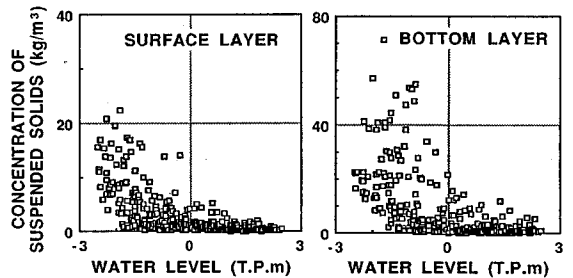


Fig.5 Relationship between water level and suspended solids concentration.

まず、河口より5.0km地点での調査結果をFig.4に示す。9日及び24日が大潮、17日が小潮であったが、水位は周期的に変化し、日潮不等の影響が干潮時水位に顕著に現われている。塩化物イオン濃度では、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。また、日潮不等の影響は、水位変化と同様に塩化物イオン濃度の極小値の方によく現れている。SS濃度は一潮汐間で大きく変動しながら、表層及び中層のSS濃度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潮相により大きく変化することはないが、表層や中層のSS濃度の極大値は大潮時には小潮時の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くなっているが、これは、底層の採水口を河床近くに設置しており、河床付近が小潮時でも高濃度になっていることを示している。また、底層では各一潮汐間の濃度極大値が中層・

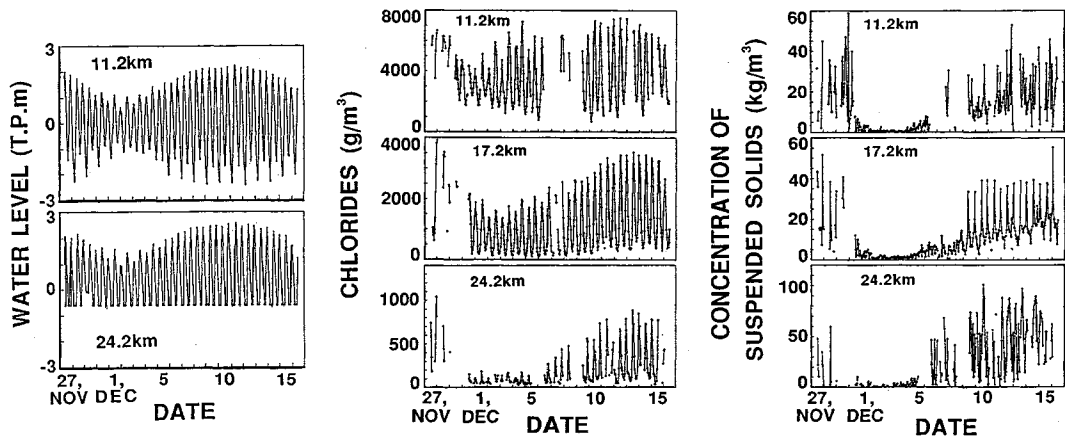


Fig. 6 Temporal changes of water level, chlorides and suspended solids concentration for a fortnightly cycle at 3 points from Nov. 27 to Dec. 19, 1988.

表層のものに比べ常に高くなっている。ここで、河口より 5.0km 地点での水位と表層及び底層のSS濃度の関係を求めると、Fig. 5 のようになる。これを見ると、表層・底層ともにSS濃度が高くなるのは水位が低いとき、すなわち干潮及びその前後であることが分かる。したがって、底層の高濃度は停潮時の浮遊物質の沈降によるものだけではないといえる。一般に、感潮部ではSS高濃度塊いわゆる Turbidity Maximum が形成され、潮汐とともに河道方向へ移動するが、ここではその下流側の部分が干潮時及びその前後に調査地点に達したものと考えられる。

次に、河道方向3地点で行った調査結果について検討する。水位及び塩化物イオン濃度、SS濃度の経時変化を Fig. 6 に示す。調査期間中、12月1日及び16日が小潮、9日が大潮である。水位の変化をみると、満潮位が最大となるのは大潮の日(潮汐表記載)より数日遅れている。これは、海水の慣性力や地形による影響と思われる。塩化物イオン濃度では、いずれの地点においても一潮汐間の濃度の変動幅が大潮時に大きく、小潮時には小さくなっている。17.2km, 24.2km 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くなっている。これは、両地点が感潮部上限に近く河床高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。感潮部中流域の11.2km 地点では極大・極小値とも変化しており、潮相によって海水の浸入する程度が変化していることが分かる。なお、塩化物イオンの一潮汐間の濃度極大値が最小・最大となるのが、満潮位の最小・最大となる日より遅れている。その遅れも上流側ほど大きくなっており、24.2km 地点では、塩化物イオンの一潮汐間の濃度極大値は小潮の4日後まで低いままである。これらのことは、海水の混合に時間的な遅れがあることを示している。とくに、小潮時には一潮汐間の水位の変化が小さいために、海水の混合の程度も小さく、遅れが大きくな

るものと思われる。一方、SS濃度は、一潮汐間での変動を繰り返しながら、全体的には小潮時に低く、大潮時に高くなる傾向を示している。これは、流れが小潮→大潮で変化し、底泥の巻き上げ量が小潮時には小さく、大潮時に大きくなるためと考えられる。とくに、小潮時の一潮汐間の極大濃度は、大潮時の極小値よりも低くなっており、流れの連続的な変化がSS濃度の変化に大きな影響を及ぼしていることが分かる。さらに、SS濃度が最も低くなるのは小潮の2日後であり、また、最大値が現われるのは大潮の3~4日後である。これより、懸濁物質濃度の半月周期における変化が流れの変化に対して遅れることが分かる。これは、底泥の巻き上げの限界掃流力を越える流れが大潮を過ぎた後も続くためである。なお、24.2km 地点では大潮時にSS濃度がかなり高くなっているが、これは下げ潮時の河川固有流出現時に調査地点上流から懸濁物質が浮泥流として流下してきたことによるものである。

以上のように、河川感潮部における水質は、一潮汐間での周期的な濃度変動を繰り返しながら、潮相の変化に応じて全体的に小潮時に低く、大潮時に高くなる傾向を示している。

4. 水質の空間的变化

河川感潮部では、塩化物イオンのような溶存態の物質は水塊と類似の挙動を示すが、流れの変化に応じて沈降や巻き上げが生じる懸濁物質では、空間的な濃度分布の時間変化が一層複雑になる。したがって、流れに対してSS濃度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濃度分布の時間的な変動特性について検討する。

(1) 横断面内での分布特性

まず、Fig. 7 に横断面内の流速と塩化物イオン濃度、

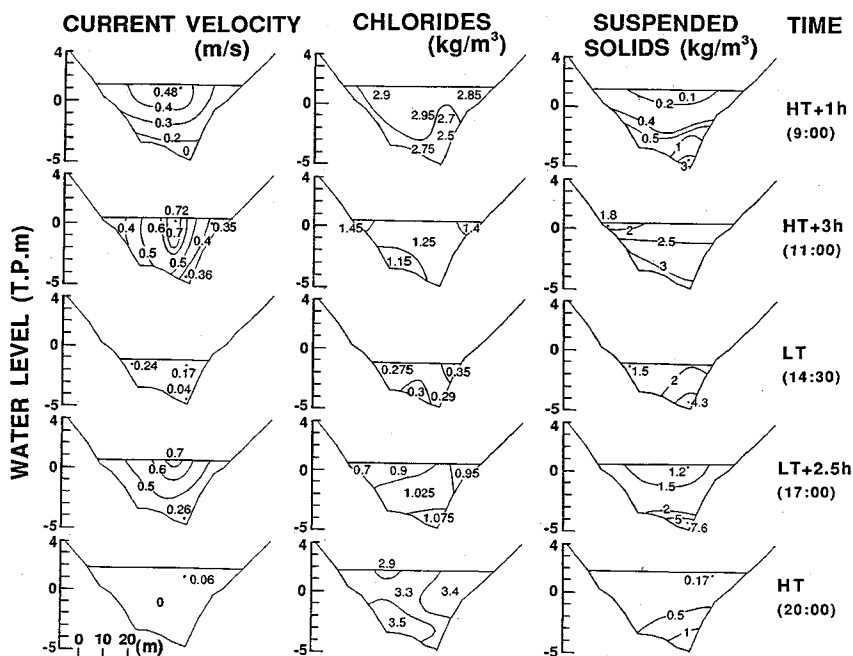


Fig. 7 Temporal change of cross-sectional distributions of current velocity, chlorides, and suspended solids concentration at the point of 11.2 km upstream from the river mouth on Dec. 24, 1985.

Table 2 Values of the estuary parameters.

Estuary	Rokkaku River		Mersey Estuary	Yoshii River
	July 18-19, 1985	Dec. 24, 1985		
Maximum depth (D ; m)	8.25	6.49	19.5	-
Averaged depth (D_0 ; m)	3.69	3.04	-	2.6
Tidal range (H ; m)	4.10	2.89	6	1.6
Width (B ; m)	61.3	53.4	1300	550
Averaged cross-sectional area (A_0 ; m ²)	226.2	162.6	19000	1610
Fresh-water discharge (Q_f ; m ³ /s)	4.17	2.06	80	40
Fresh-water discharge velocity (U_f ; m/s)	0.0184	0.0127	0.0042	0.025
R.m.s. tidal velocity (U ; m/s)	0.62	0.39	0.8	0.035
Vertical salinity variation ($\Delta S/S$)	0.359	0.106	0.042	-
Estuarine Richardson number (Ri_E)	0.00576	0.0217	0.03	-
Froude number (F)	0.0682	0.0398	0.0011	-

SS濃度の各分布の経時変化を示す。これは、河口より11.2 km 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12月24日調査実施)のうち、満干潮の停潮時及び下げ潮・上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、鉛直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水平方向の速度シアも大きくなる傾向がある。塩化物イオン濃度分布では、下げ潮や干潮時には上下層の濃度差は小さく、上層や両岸部の塩化物イオン濃度が高くなっているが、上げ潮及び満潮時には上層に比べて下層が高くなっている。これは、上げ潮と下げ潮で流速分布形が異なり、鉛直・水平混合の状態が変化するためと考えられる。また、SS濃度分布の時間的な変化は、浮遊物質の沈降や底泥の巻き上げのほか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。満潮1時間後では、まだ巻き上げがあまり生じていないため最深部のみSS濃度が高くなっているが、満潮後3時間経過し流速が大きくなると断面内全体で濃度が高くなっている。一方、上げ潮時には下げ潮時に比べ最深部での濃度が高くなっている。これは、流速分布や断面内での鉛直混合の程度が時間的に変化するためである。このように、SS濃度の場合には鉛直方向の濃度差が水平方向のものに比べて大きくなっている。これらのことより、横断面内の流速分布とSS濃度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。

ここで、河川感潮部における成層状態を検討するために、Fischer⁷⁾の解析法に従って本感潮部の特性値を求めるとTable 2 のようになる。ここには、1985年7月18~19日(大潮)に行った調査についての値も示す。なお、

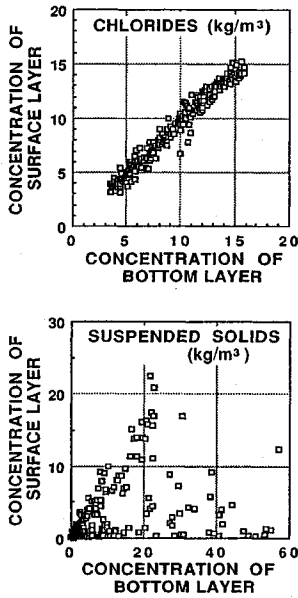


Fig. 8 Relationships between concentrations of surface layer and ones of bottom layer in chlorides and suspended solids.

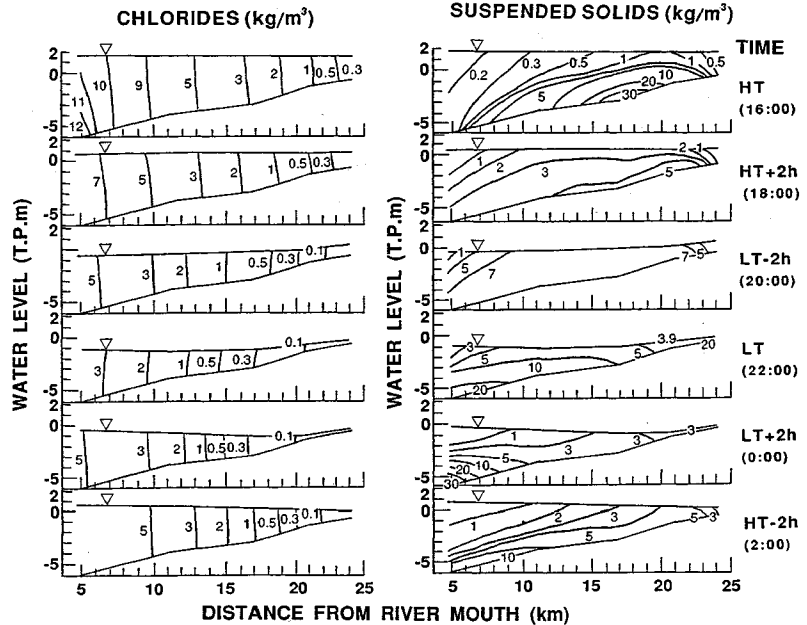


Fig. 9 Temporal change of longitudinal distributions of chlorides and suspended solids concentration on Dec. 27-28, 1983.

これらの調査日は1日2回の満潮位が等しい日である。また、Fischerによる Mersey Estuary での値、上嶋ら⁸⁾による弱混合河川である吉井川における値も示す。これらより、六角川感潮部では、水深に対して潮差が大きいこと、河川固有流量が小さいこと等が分かる。

次に、半月周期での鉛直方向の濃度分布を検討することとし、簡単ではあるが、Fig. 4 に示した調査結果の表層と底層の塩化物イオン及びSS濃度の関係を Fig. 8 に示す。塩化物イオン濃度では表層と底層で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、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、大潮時には大きな潮差のために流速が大きくなり、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。

(2) 縦断面内での分布特性

縦断方向に5地点で同時に行った調査結果(1983年12月27~28日)をもとに、縦断面内の濃度分布について考察する。塩化物イオン濃度及びSS濃度の縦断分布を経時的に表したものを Fig. 9 に示す。塩化物イオン濃度では、いずれの時間にも等濃度線が鉛直に立ち、強混合状態を示している。河道方向の濃度分布は指数関数型になっており、等濃度線が潮汐作用にとまって上下流方向に移

動している。その移動距離は、 1kg/m^3 の等濃度線で見ると、約8kmとなっている。他の大潮時の調査結果では約10~13km移動しており、潮相により水塊の移動距離が変化している。

SS濃度分布では、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になっている。これは、浮遊物質の沈降や底泥の巻き上げが生じているためである。また、満潮時には17km付近の下層部で最も濃度が高く、その上下流で低くなっている。その後、下げ潮になるとその高濃度の部分が次第に下流へ移動し、干潮時には5km地点の下層部が最も高くなっている。さらに、上げ潮になると高濃度の部分は徐々に上流方向へ移動してきている。このような一潮汐間におけるSS濃度の縦断面内での挙動は、SS高濃度塊の形成として説明される。本感潮部でのSS高濃度塊の移動距離は、その中心の位置から見ると10数kmになり、塩化物イオン濃度分布より得られる水塊の移動距離より大きくなるが、SS濃度の場合には浮遊物質の沈降や底泥の巻き上げが起こるために、必ずしも懸濁物質がその距離だけ移動しているとは考えにくい。他の調査日の結果においても、SS高濃度塊中の最大濃度が出現するのは、いずれも満潮時の17km付近と流れが上げ潮に反転した直後の5km付近である。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っているものと考えられる。

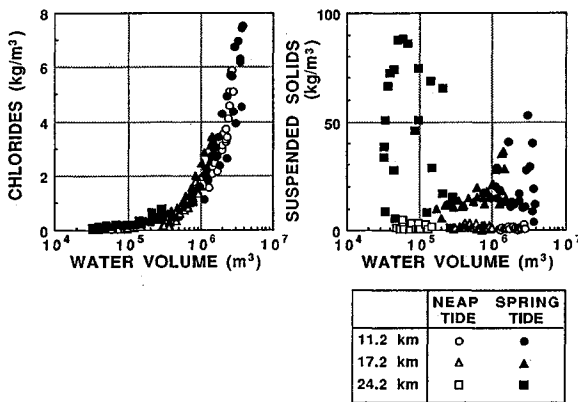


Fig. 10 Relationships between water volume and chlorides, and suspended solids concentration at a neap tide and a spring one; data from the observation for a fortnightly cycle.

5. 濃度変動の特性

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。強混合河川感潮部の場合には、塩化物イオン濃度が河道方向に指数関数的に分布しているため、横軸に塩化物イオン濃度を取り、縦軸にある水質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 mixing diagram 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と考えられる。また、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⁹⁾。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、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。

2週間の連続調査時の累加水量と塩化物イオン濃度及びSS濃度の関係を小潮及び大潮時について Fig. 10 に示す。ここで、累加水量は、本感潮部を対象とした数値計算結果¹⁰⁾をもとに、各時刻における感潮部上流端から各調査地点までの水量として算定している。累加水量と塩化物イオン濃度との関係は、潮相によらずほぼ一定であることが分かる。SS濃度では、小潮時にはいずれの地点でも数 kg/m³ であるのに対し、大潮時には底泥の巻き上げ量が大きくなるためにばらつきが大きくなっている。とくに、24.2km 地点では累加水量の小さいところで高くなっており、河川固有流出現時に上流よりSSが流下してきているためである。このように、SS濃度では浮遊物

質の沈降や底泥の巻き上げが生じるために、水塊中の濃度変動が生じる。

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し、水塊内での水質の分布を潮汐作用によ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、長期的な水質交換現象の機構解明には有効である。なお、感潮部河道内の水量に比べて流入水量が小さい場合のように、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その水質との関係と同等となる。

6. 結 論

本論文では強混合河川である六角川感潮部を対象として、一潮汐間及び半月周期における現地調査を実施し、水質の時間的・空間的な濃度変動・分布特性について検討した。本論文で得られた結果をまとめると以下のようになる。

(1) 強混合河川感潮部では、ある地点で観測されるSS濃度は、一潮汐間に浮遊物質の沈降や底泥の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) 一潮汐間におけるSS濃度変動とBOD₅及びCOD各濃度との関連が見られ、とくに感潮部上流域では河川固有流出現時に懸濁物質が浮泥流として流下し、それらの濃度が高くなる傾向がある。

(3) 潮相の変化による半月周期における濃度変動への影響は、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低くなるとともに、鉛直混合の程度も小さくなる。

(4) 本感潮部ではSS高濃度塊が形成され、浮遊物質の沈降と底泥の巻き上げを周期的に繰り返しながら河道方向に移動する。また、一潮汐間でのSS最大濃度が出現する位置は、大潮・小潮にかかわらず時間的・空間的に定まっている。

(5) 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濃度変動現象を分かりやすく説明できる。

強混合河川感潮部では、塩化物イオンの横断面内での濃度差は小さく、河道方向へ指数関数型の濃度分布をしているのに対して、SS濃度は、横・縦断面内において層状の濃度分布をしている。しかしながら、断面平均のSS濃度を用いても時間的・空間的に特徴のある濃度変動を見ることができる。したがって、強混合河川感潮部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できると考えられる。さらに、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、懸濁物質の挙動を詳細に検討する必要がある。

本研究を遂行するにあたり、種々便宜を図っていただきました建設省武雄工事事務所、ならびに現地調査に協力いただきました九州大学工学部水工土木学科下水工学研究室、佐賀大学理工学部建設工学科水資源管理工学研究室及び長崎大学工学部社会開発工学科水理研究室の方々に心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.

- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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，第16回海岸工学講演会講演集，pp.213~219，1969.
- 5) 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.
- 6) Odd, N.V.M. : Mathematical modelling of mud transport in estuaries, Physical Processes in Estuaries (J. Dronkers and W. van Leussen eds.), Springer-Verlag, pp.503~531, 1988.
- 7) Fischer, H.B. : Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries, J. Fluid Mech., Vol.53, Part 4, pp.671~687, 1972.
- 8) 上嶋英機・藤原建紀・早川典生：感潮河川における物質輸送の機構について(第1報)，第22回海岸工学講演会論文集，pp.239~247，1975.
- 9) 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.
- 10) 二渡了・楠田哲也：強混合河川感潮部における懸濁物質輸送のシミュレーション，土木学会論文集(投稿中).

(1991.7.26 受付)

CHARACTERISTICS OF SUSPENDED SOLIDS CONCENTRATION IN WELL-MIXED ESTUARY

Tohru FUTAWATARI, Tetsuya KUSUDA and Kyoko OHISHI

Field observations were carried out at several times for one semi-diurnal cycle and for one fortnightly cycle in the well-mixed estuary, the Rokkaku River, in order to investigate the mechanism of suspended sediment transport and water quality variation. In the estuary, a turbidity maximum is formed and moves toward up- and down-stream with erosion and deposition of sediment according to tidal action for the semi-diurnal cycle. For the fortnightly cycle, salt intrusion varies with tidal stage and variations of suspended solids concentration have such a tendency that the concentration becomes lower during neap tide and higher during spring tide. Water quality on dissolved matters is easily characterized with water volume accumulated from the head of the estuary.