

筑後川河口部における 塩水侵入の変動特性

THE CHANGE OF SALINITY INTRUSION IN THE CHIKUGO ESTUARY

安達貴浩¹・小松利光²・三島勇一³・黒目 剛⁴

Toshimitsu KOMATSU, Takahiro ADACHI, Yuichi MISHIMA and Tsuyoshi KUROME

¹学生員 工修 九州大学大学院 工学研究科博士後期課程水工土木学専攻
(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²フェロー 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科 (同上)

³正会員 水資源開発公団 筑後大堰管理事務所 元所長 (〒830 福岡県久留米市日吉町16-30)

⁴正会員 (株) アイ・エヌ・エー 第2河川事業部 (〒112 東京都文京区関口1-44-10)

In this study, the salinity at the bottom-layer in the Chikugo estuary was measured by the automatic measuring instruments fixed at 7km and 15km upstream from the mouth in order to make clear the change of the salinity intrusion.

As a result, the following findings were obtained.

1) The salinity intrusion at the spring tide in the Chikugo estuary is of well-mixed type, while the mixing at the neap tide is generally moderately-mixed type and the salinity intrusion length in this mixing-type is shorter than that in a well-mixed type.

2) When both the diurnal inequality of tide and the decrease of the tidal range become remarkable, the fully-stratified type can be realized and then the salinity intrusion length becomes longest near the neap tide.

Key Words: Salinity intrusion, Well-mixed type, Moderately-mixed type, Diurnal inequality of tide, Saline wedge, Tidal range

1. 緒言

九州地方で最大の河川である筑後川の河口部において、水資源需要の増大等による流量の減少に起因した塩水侵入の増大が今後、深刻な問題となることが懸念されている。この問題の解決のためには、筑後川の塩水侵入特性を明らかにする必要があるが、感潮河川河口部の塩水侵入は、各河川毎にその特性が大きく異なり、更に、潮汐、河川流量、気象条件等の変化により微妙にその状況を変化させるため、対象とする河川独特の塩水侵入状況及びそのメカニズムを正確に把握することは容易ではない。

本研究では、河口よりそれぞれ7km、15km上流に位置する諸富橋、六五郎橋の2地点に設置された塩分濃度自動測定装置によって得られたデータを詳細に解析することにより、日本を代表する強混合河川である筑後川の塩水侵入の長時間スケールの変動特性について調べた。

2. 現地観測概要

有明海はその閉鎖的な湾形状によって生じるセイシュのため、日本の沿岸域で最大の潮差を示す水域となっている。このため、筑後川河口部の潮差も大潮付近で5m前後に達し、この結果、塩水侵入域全域に渡って水深方向に塩・淡水がほぼ一様化した強混合型の塩水侵入状況が数潮汐間形成されている。また、一潮汐間の塩分濃度分布は入退潮にしたがって変化しており、古本ら¹⁾の結果に見られるように、



図-1 筑後川河口部の概要

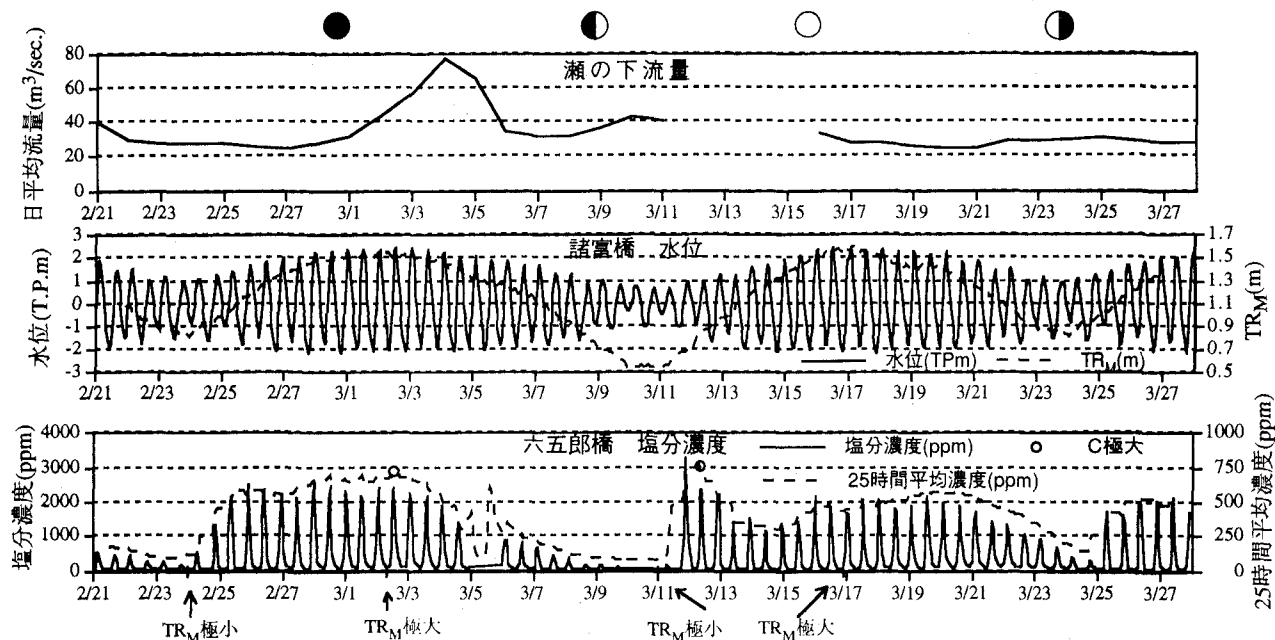


図-2 得られた生時系列データの一例

(ただし、 TR_M は河口潮汐変動の内で25時間以下の周期成分の変動の強さを表す)

各潮候毎の塩分濃度流下方向分布は貯留水量に対して時間的にほとんど変化しない。

このような塩水侵入特性を示す筑後川において、河口より15 km上流の六五郎橋、7 km上流の諸富橋の2地点に水位及び塩分濃度の自動観測装置が設置され、1993年以降連続的な定点観測が行われている(図-1)。両地点で観測装置は川幅のほぼ中心位置に設置され、六五郎橋ではT.P. -1.50 mの下層のみを、諸富橋では水表面から0.5mと3.5m及びT.P. -4.00mの上・中・下層3点の塩分濃度がそれぞれの地点の水位とともに計測されている。但し、上・中層の塩分濃度については潮汐の干満差が大きいため、干潮付近でデータの欠測が多く見られる。また、建設省筑後川工事事務所により河口水位及び河口より25km上流に位置する瀬の下地点の河川流量が毎正時観測されており、必要に応じてそれらのデータも用いて検討を行った。

3. 筑後川の塩水侵入の変動特性

(1) 最大塩分濃度の出現パターンの違い

まず、得られた観測結果の一例として、1995年2月21日から3月27日にかけて毎正時に得られた諸富橋の水位、瀬の下の河川流量及び六五郎橋の下層塩分濃度の経時変動を示す(図-2)。いずれも時間的に変化しているが、水位、塩分濃度は主に潮汐運動と連動して、ほぼ半日周期で変動している。2月21日から3月10日までの期間では、潮汐の干満差が比較的大きい時に塩分濃度の最大値が見られるのに対し、3月11日から3月27日までの期間では、逆に、潮汐の干満差が比較的小さい3月11日に塩分濃度が急増しこの期間の最大値をとっている。感潮域全体にわたる河口、諸富、六五郎3地点の潮位の変化には位相のずれがほとんどなく、河口の潮差は入退潮量

の程度を表す指標と見なすことができることから、上記の結果は、潮汐の干満差つまり入退潮量の変化に対する最大塩分濃度の出現パターンが対象期間によって異なっていることを示唆するものである。そこで、河口潮位変動の内で、25時間以下の周期成分の変動の強さを表す潮差の代表量 TR_M を25時間移動平均を用いて算出し、ある下弦(もしくは上弦)から次の上弦(もしくは下弦)の前日までの期間の中で、 TR_M が最小値及び最大値をとる日時を、ならびに、六五郎、諸富の両測定点において、下層塩分濃度が最大値をとる日時を調べた。1995年の全データに関して行った解析結果を表-1に示す。対象期間によって多少のバラツキはあるものの、朔望、上下弦より1日後に TR_M が最大値、最小値をとる場合が多く見られる。また、六五郎、諸富両測定点においては大潮付近で塩分濃度が最大値をとる場合が結果の大半であるが、下弦(もしくは上弦)付近で塩分濃度が最大値をとる場合も年に数回観測された。

(2) 塩分濃度の多点同時観測結果の考察

前節で得られた知見に対して、筑後川工事事務所によって1994年に合計8回実施された、流下方向に詳細な塩分濃度の同時観測結果を用いて更に検討を行った。河川流量等の水理条件が比較的近いと考えられる大潮時と小潮時の満潮時における底層塩分濃度の流下方向分布を2つに分けてそれぞれ比較を行った。それらの結果を図-3(a),(b)に、また、各観測時の水理条件を表-2に示す(ただし、表中の C_s/C_b はそれぞれの観測点の表層と底層の塩分濃度の比の一潮汐平均値を更に空間的に平均した値である)。図-3の(a),(b)いずれも共通して、河口の近傍では干満差が小さい小潮時の方が塩分濃度は高くなっているが、塩水侵入の先端に近い上流側では干満差が大きい大潮時の方が塩分濃度が高い値を示し、結果的

表-1 潮差に対する塩分濃度の最大値出現時の違い
(表中の括弧は小潮付近で最大の塩分濃度が出現したことを意味する)

対象期間	朔(望)の日	干満差の代表量TR _m が最小値をとる日時	干満差の代表量TR _m が最大値をとる日時	諸富下層塩分濃度 が最大値をとる日時	六五郎下層塩分濃度 が最大値をとる日時
2/7-2/21	2/15	-	-	<2/10 6>	<2/10 19>
2/22-3/8	3/1	-	3/2 10	3/1 22	2/28 10
3/9-3/23	3/17	3/11 10	3/18 11	3/16 10	<3/12 6>
3/24-4/7	3/31	3/25 9	3/31 9	3/30 10	<3/27 20>
4/8-4/21	4/15	4/9 9	4/16 17	<4/9 15>	<4/10 18>
4/22-5/7	4/30	4/24 10	4/30 4	4/29 9	4/29 18
5/8-5/20	5/15	5/8 15	5/16 5	5/13 21	5/13 21
5/21-6/5	5/29	5/23 16	5/30 4	<5/24 18>	5/31 23
6/6-6/19	6/13	6/7 10	6/14 11	6/14 23	6/14 23
6/20-7/5	6/28	6/21 19	6/27 21	6/25 8	6/30 11
7/6-7/18	7/12	7/7 16	7/14 5	7/16 0	-
7/19-8/3	7/28	7/21 21	7/28 9	8/2 1	7/31 24
8/4-8/17	8/11	8/5 21	8/11 21	-	-
8/18-9/1	8/26	8/19 22	8/28 5	8/26 22	8/26 22
9/2-9/16	9/9	9/3 22	9/9 22	-	9/10 10
9/17-9/30	9/25	9/18 3	9/25 10	<9/19 6>	<9/19 7>
10/1-10/16	10/9	10/2 22	10/9 4	<10/3 17>	10/10 11
10/17-10/30	10/24	10/18 21	10/26 17	<10/18 17>	<10/19 7>
10/31-11/14	11/7	10/31 22	11/7 22	11/7 10	11/7 10
11/15-11/28	11/23	11/16 21	11/24 22	11/24 11	11/25 12
11/29-12/14	12/7	12/1 4	-	12/7 10	12/7 10
12/15-12/28	12/22	12/16 2	12/23 7	12/23 11	12/24 12

表-2 多点同時観測を行ったときの水利条件

観測期間	潮候	日平均潮差(m)	一潮汐平均潮位 (T.P.m)	観測最終日の 瀬の下 日平均流量(m³/s)	観測最終日前日の 瀬の下 日平均流量(m³/s)	C _s /C _b
2/10 22:00~2/11 8:00	大潮	4.56	-0.43	44.87	46.26	0.85
2/20 3:00~2/20 13:00	小潮	0.95	0.28	71.09	64.52	0.12
5/26 23:00~5/27 9:00	大潮	4.27	0.4	60.5	73.3	0.82
6/3 17:00~6/4 3:00	小潮	2.07	0.1	36.21	38.82	0.67
7/11 23:00~7/12 9:00	大潮	4.06	0.24	32.41	33.11	0.87

○ 2/10-2/11(大潮) △ 6/3-6/4(小潮) □ 7/11-7/12(大潮)

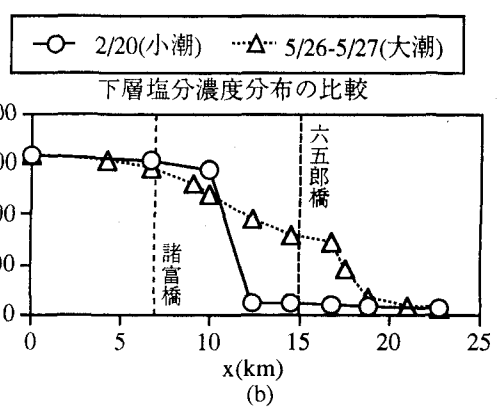
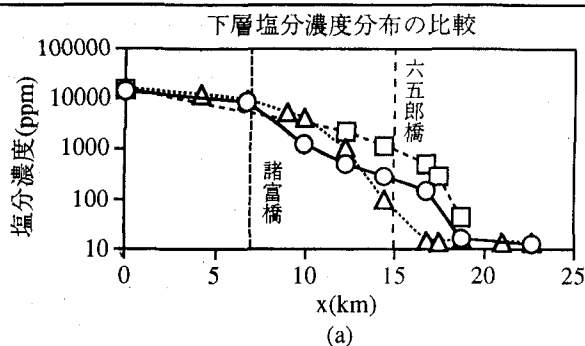


図-3 筑後川における大潮時と小潮時の塩水侵入状況の比較

に、大潮時の塩水侵入長の方が小潮時のものより長くなっている。また、図中のいずれの塩水侵入の場合も塩・淡水が鉛直方向に比較的強く混合され、更に、川幅方向の塩分濃度の変化も少なかったため、断面平均塩分濃度についても上記の下層塩分濃度の結果とほぼ一致した傾向が確認された。

このように大潮時と小潮時の塩分濃度の大小関係が河口近傍と塩水侵入の先端付近とで逆転しているため、河口部の塩分濃度が全て必ずしも塩水侵入長を代表する量というわけではない。しかし、図-3の結果を見る限り、少なくとも六五郎橋は塩水侵入の先端付近に近い上流の地点に位置しているので、六

五郎橋の塩分濃度を塩水侵入長の尺度として取り扱うことは可能と考えられる。

以上の考察を踏まえると、表-1の結果は、筑後川では大潮時付近で塩水侵入長が極大となることが多いが、時として何らかの理由で、小潮時付近で塩水侵入長が極大値をとる場合もあるということの意味している。

4. 最大塩水侵入長の出現を決定する要因

(1)小潮時付近の塩分濃度の決定要因

小松ら²⁾は、潮汐の干満差のみを変化させて室内

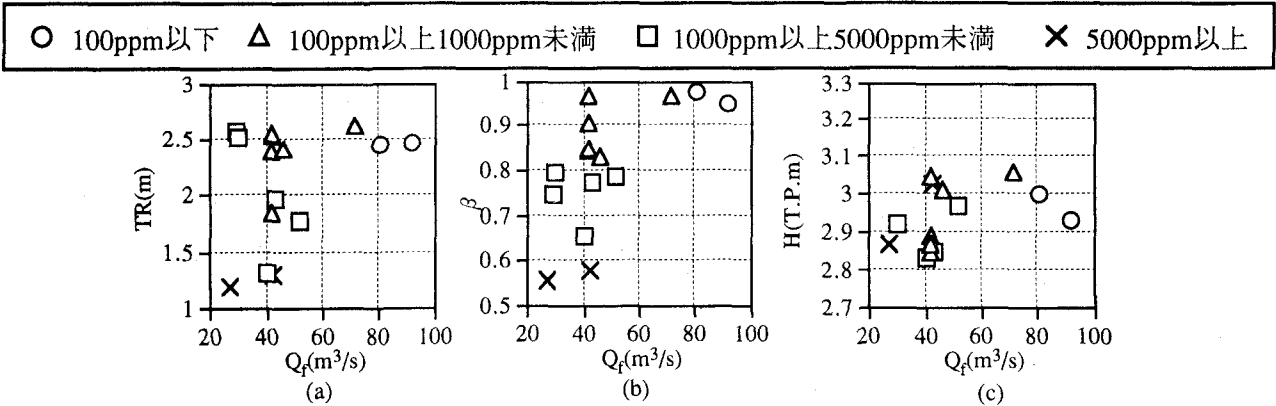


図-4 小潮時の六五郎橋下層塩分濃度の決定要因

実験を行い、それぞれの準定常状態の塩水侵入長を比較した。その結果、弱混合から緩混合にかけては干満差が小さくなる程、塩水侵入長は増加するが、逆に緩混合から強混合にかけては、干満差が大きい程、塩水侵入長は長くなるという知見が得られている。

これまでの現地観測結果より、筑後川の塩水侵入は大潮時に強混合を、小潮時には緩混合形態を示すことが報告されている。従って、筑後川では大潮時において塩水侵入長は極大になることが上記の室内実験の知見や図-3の結果から推測されるが、表-1に示すように、現地観測の結果からは、小潮付近で塩水侵入長が極大になる場合もあることが明らかとなった。そこで、このような最大塩分濃度の出現パターンの違いの原因を明らかにするために、まず小潮時の塩分濃度の決定要因について調べた。

表-1に示すように、上下弦より3日遅れて小潮付近で最大の塩分濃度が出現する場合がいくつか見られたため、上弦(もしくは下弦)から3日後を小潮時付近の代表日とし、その日の内の六五郎塩分濃度の最大値を調べた。小潮同士の塩分濃度を比較する際、河川流量の大小が塩分濃度の大きさを決定する最も支配的なパラメータであると考えられることや、出水後に塩分濃度が回復するまでの時間等を考慮して、小潮代表日を含む代表日直前3日間の平均の瀬の下流量 Q_f を算出し、河川流量の代表量として用いることにした。塩水侵入を決定する他の主要な水理量としては、潮汐の干満差TR、1日平均水深H、日潮不等の程度を表すパラメータ $\beta^3)$ が考えられる(ただし、 $0 < \beta < 1$ で、 $\beta=0$ は1日1回潮を、 $\beta=1$ は1日2回潮を示す)。後述の図-6でも見られるように、小潮付近では干満差が最小になってから1~2日の間に、潮差とは無関係に塩分濃度は急増する傾向が見られるが、最大塩分濃度が出現した後は塩分濃度は潮差に対応した変化を示すことが確認されたため、塩分濃度の場合と同様に上弦(もしくは下弦)から3日後を小潮時の代表日とし、代表日の平均的なTR、H、 β を代表量として算出した。

上記の諸量を用いて、小潮時の塩分濃度の決定要因について調べた。代表日における六五郎下層の最大塩分濃度の大きさを4つの領域に区分し、各領域を異なる記号で表した。その分布状況を図-4(a)-(c)

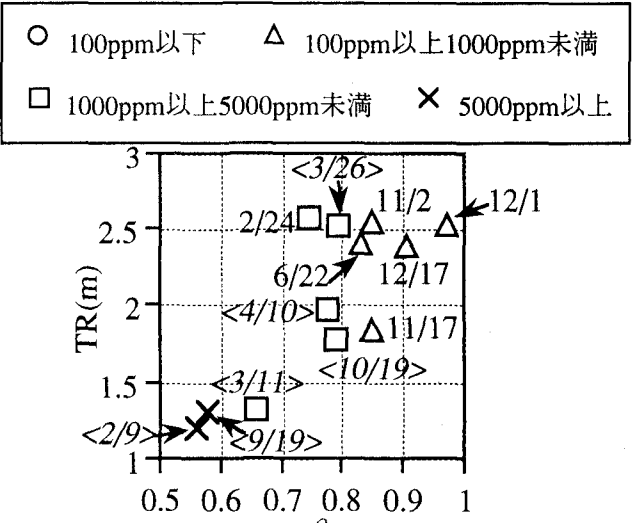


図-5 干満差、日潮不等と小潮時塩分濃度との関係

に示す。流量 Q_f を横軸に潮汐の干満差TRを縦軸にとった図-4(a)を見ると、4種類のプロットが流量 Q_f によって分類されており、小潮時付近の塩分濃度はやはり Q_f に強く依存していることが分かる。 Q_f が小さく安定している範囲では、TRが小さくなるほど高濃度の塩分濃度が出現する傾向がある。次に、横軸に Q_f を縦軸に β をとった図-4(b)を見ると、 β の値が小さいほど高濃度の塩分濃度が出現しているが、縦軸にHをとった図-4(c)では、Hと小潮付近の塩分濃度との間には明確な関係性は見られない。

以上の結果、小潮付近の六五郎橋の最大塩分濃度は Q_f のほかにTRと β にも強く依存していることが明らかとなった。そこで、河川流量の違いの影響を排除するために、流量が比較的小さく($Q_f < 60 \text{ m}^3/\text{s}$)安定している場合のみを対象にし、横軸に β 、縦軸にTRをとって、小潮時最大塩分濃度の大きさととの関係を調べてみた。各プロットに対応する小潮代表日の日付を付し、更に大潮時よりも小潮付近で最大の塩分濃度が出現した場合の日付を角括弧で囲んだ結果を図-5に示す。小潮付近で塩分濃度が最大値を示すのは、TRと β がいずれも比較的小さな値を示す場合である。このような潮汐条件の下では、大潮時よりも小潮付近で最大の塩分濃度が出現している。また、小潮時の塩分濃度はTRよりも β に対してより強く依存して変化しているようである。

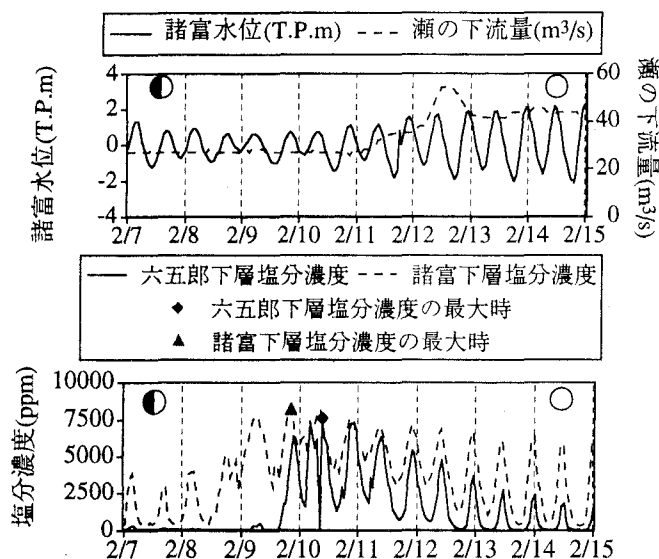


図-6 筑後川で観測された弱混合形態での塩水侵入

干満差が小さく日潮不等が大きい場合には、潮汐運動による混合能力が非常に小さくなる。図-5 から、 TR と β の両方が大きくなると、塩分濃度はほぼ単調に減少するだけなので、筑後川の小潮時の塩水侵入状況は時として、小松ら²⁾の室内実験結果において干満差(もしくは混合能力)の低下につれ塩水侵入長が増加する緩混合から弱混合にかけての領域に相当している可能性が考えられる。

そこで、小潮時付近で TR と β の両方が最小値を示す2月7日から2月15日までの期間について諸富水位、瀬の下流量、六五郎橋・諸富橋の下層の塩分濃度の時間変化を調べてみた(図-6)。下弦より2日後の2月9日あたりより、日潮不等の影響を受けながら、六五郎橋・諸富橋いずれの塩分濃度も急増し、この期間の最大値を取る2/10～2/11には両地点の下層塩分濃度はほぼ同程度の値を示すようになる。8kmも離れた諸富橋から六五郎橋までの区間の下層を、塩水が淡水とほとんど混合することなく侵入しているということであり、この時の塩水侵入は弱混合形態であったと考えられる。また、図-6の結果に代表されるような小潮付近で塩水侵入長が最大となる場合には、小潮代表日の最大塩分濃度だけでなく、一潮汐平均の下層塩分濃度及び干満による下層塩分濃度の変化も大潮時のものより大きくなっていることから、小潮時には一潮汐平均的な内部循環流が強化されているだけでなく、潮汐運動に伴う下層の流速変動の振幅も比較的大きなものであったと推測される。

(2) 大潮時付近の塩分濃度の決定要因

前節で、小潮時の塩分濃度の決定要因が明らかとなったが、最大塩分濃度の出現パターンは小潮時の塩分濃度だけでなく、小潮時と大潮時の塩分濃度値の相対的な関係によって決定されることを考慮して、大潮時に対しても(1)節と同様の解析を適用した。大潮付近では、朔望当日もしくはそれより1日遅れて最大の塩分濃度が出現する場合が多く見られ

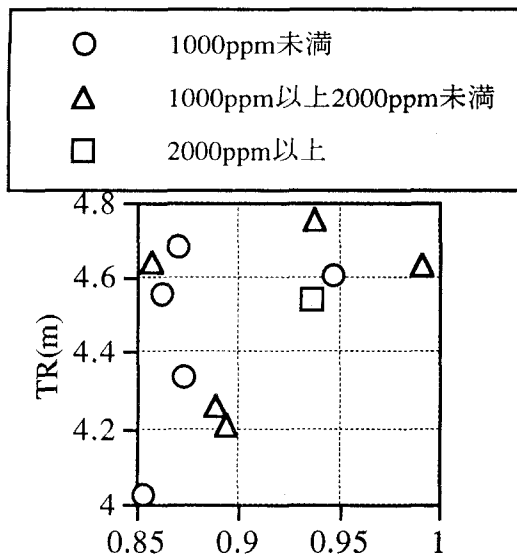


図-7 干満差、日潮不等と大潮時塩分濃度との関係

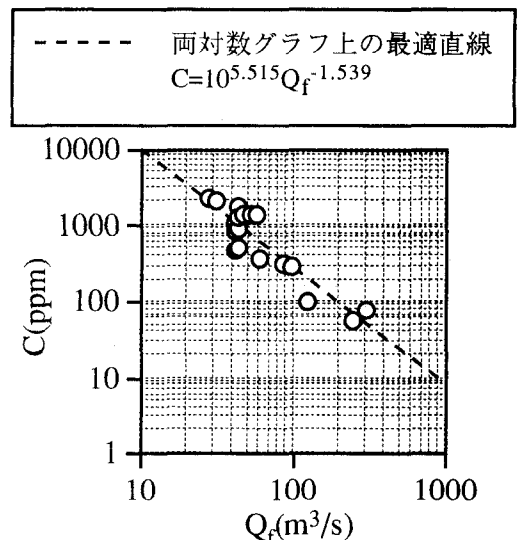


図-8 河川流量と大潮時の塩分濃度との関係

たため、朔望当日を大潮付近の代表日とした。一例として、 $Q_f < 60 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合を対象とし、 TR - β 空間上での大潮時の塩分濃度の大きさを図-7に示す。大潮時毎の TR や β の違いは小潮時に比べて小さくなっている。このため、大潮時毎の塩分濃度の値の違いも小潮時程は大きくない。更に、大潮時毎の塩分濃度が TR や β に対して小潮時の場合ほど強い依存性を示さないことが分かった。これは同じ大潮時であれば TR や β にそれほど違いがなく、その変化の効果が、河川流量や他の条件の変化によって生じる塩分濃度の変化に埋没してしまったことによるものと考えられる。次に、図-8に Q_f と大潮代表日における六五郎下層の最大塩分濃度 C との関係を示す。 Q_f の増加に伴い C は単調に減少していることから、大潮時の塩分濃度の大きさは河川流量の大きさによってほぼ一意的に決定されていると考えられる。

(3) 河川流量の変動の影響について

前節で示したように、大潮時に関しては塩分濃度を大きく変化させる程には潮汐条件に違いがないた

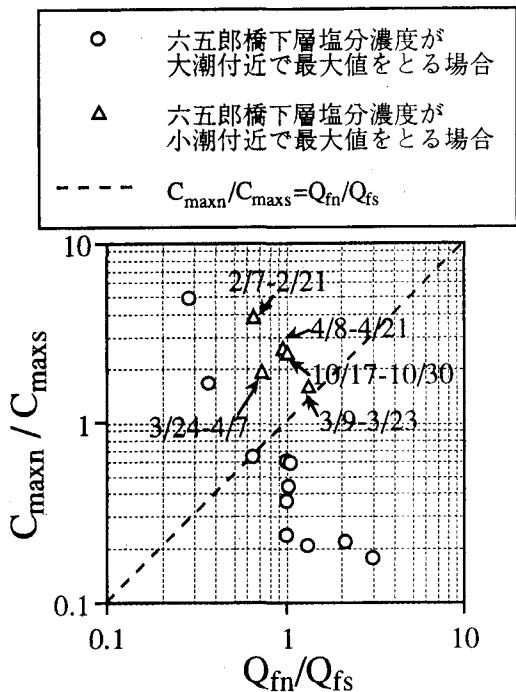


図-9 河川流量の変動の影響

め、河川流量が安定している場合には、最大の塩分濃度出現パターンは、小潮時の河口の潮汐条件によって主に決定されていると言えよう。しかしながら、大潮、小潮いずれの塩分濃度も河川流量によって大きく変化するため、最大の塩分濃度出現パターンは流量変動にも依存している可能性が考えられる。そこで、同一の対象期間の小潮、大潮に関して、それぞれの代表日の直前3日間の瀬の下平均流量の比 Q_{fn}/Q_{fs} をとり、小潮、大潮代表日の日最大塩分濃度の比 C_{maxn}/C_{maxs} との関係を調べた(図-9)。(ただし、 Q_{fn} :上・下弦当日から3日間の平均流量、 Q_{fs} :朔・望2日前から3日間の平均流量、 C_{maxn} :上・下弦より2日後の日最大塩分濃度、 C_{maxs} :朔・望の日最大塩分濃度) Q_{fn}/Q_{fs} の増加に対して C_{maxn}/C_{maxs} は減少していく傾向が見られ、大潮時と小潮時の塩分濃度の相対的な関係に河川流量の変動パターンが影響していることが分かる。ところが、3月9日から3月23日までの期間では $Q_{fn} > Q_{fs}$ となっており、大潮時に塩水侵入長が長くなりやすい条件下であったにもかかわらず、小潮時の塩水侵入長が最大となっている。反対に、 $Q_{fn} < Q_{fs}$ の条件下でも大潮時に最大塩水侵入長が出現する場合もあることが分かった。上述の結果から、大潮から小潮にかけて、流量変動があっても、ある程度小さな変動であれば、最大塩水侵入長の出現パターンにはそれ程影響を及ぼさないものと考えられる。

以上の結果をまとめると、筑後川の最大塩水侵入長の出現パターンは、流量が比較的安定していれば、小潮時の河口の潮汐条件、特に、日潮不等の程度 β に強く依存している。図-10に示すように、小潮時の β の値は月の赤緯とともに規則的に変化しているが、年に数回、 β が0.8よりも小さな値を示す場合にのみ、小潮時の塩水侵入長が大潮時のものよ

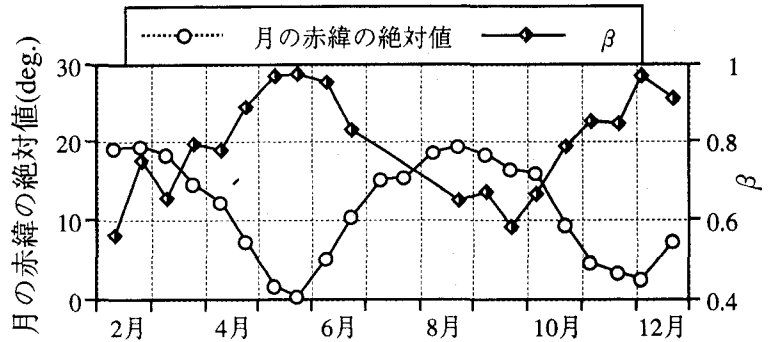


図-10 小潮時代表日の月の赤緯と β の経時変化

りも長くなっている。特に、 β が比較的小さくなる2月や9月に、弱混合形態を示す可能性が高いが、筑後川では9月は河川流量が比較的大きいため、2月の小潮時のみに、弱混合形態の塩水侵入に起因した非常に高い下層塩分濃度が検出されやすくなっている。

5. 結論

本研究では、日本の代表的な強混合河川である筑後川の塩水侵入について現地観測を行い、その変動特性を調べた。その結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 従来の現地観測の結果より、筑後川は大潮時に強混合形態を、小潮時に緩混合形態を示すことが報告されていたが、比較的大きな潮差をもつ筑後川でも、河川流量が比較的小さく日潮不等の程度が大きい2月の小潮時に弱混合形態の塩水侵入が実現されているという新たな知見が得られた。
- 2) 筑後川では通常は潮汐の干満差が大きいほど、満潮時の塩水侵入長は長くなるが、比較的流量が安定し、更に、小潮時の干満差が比較的小さく日潮不等の程度が大きくなると、結論 1) で示したように塩・淡成層が安定して楔状に侵入するため、小潮時において最大の塩水侵入長が出現する。
- 3) 大潮時から小潮時にかけての塩水侵入長の相対的な関係は河川流量の変動によっても変化するが、ある程度小さな流量変動であれば(図-9の $Q_{fn}/Q_{fs} = 0.5 \sim 2.0$ 程度)、その影響は小さいと見なすことができる。

参考文献

- 1) 古本勝弘・武政剛弘・薦田廣章・重松英児：強混合型感潮河川における塩分侵入に関する調査と一次元解法、海岸工学論文集第43巻、pp321-325. 1996
- 2) 小松利光・孫双科・安達貴浩・川上義幸・米須清彦：感潮河川における塩水遡上の人工的制御法についての研究、水工学論文集第40巻、pp517-524. 1996
- 3) 小松利光・上杉達雄・孫双科・安達貴浩・松岡弘文・大和則夫・朝位孝二：川内川河口部における塩水遡上について、水工学論文集第40巻、pp493-498. 1996

(1997.9.30受付)