

河川水の間断放流による 強混合型塩水侵入の人工的制御

ARTIFICIAL CONTROL OF THE PATTERN OF RIVER DISCHARGE TO REDUCE THE SALINITY INTRUSION IN A WELL-MIXED TYPE ESTUARY

小松利光¹・安達貴浩²・朝田 将³・室永武司³

Toshimitsu KOMATSU, Takahiro ADACHI, Sho ASADA and Takeshi MURONAGA

¹フェロー 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科(水工)(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²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 日本学術振興会特別研究員(同上)

³学生員 九州大学大学院工学研究科修士課程水工土木学専攻(同上)

We proposed a method to reduce the salinity intrusion of well-mixed type by controlling artificially the pattern of river discharge with tidal phase in a tidal estuary. In order to examine the effect of this method, some experimental simulations were made under various conditions of river discharge.

In this study, the effect of the pattern of river discharge, the most effective timing of discharge when the water was stored, and the relation between the reduction of salinity intrusion and the ratio of the volume of fresh water flowing in during a tidal period to the tidal prism were examined. As a result, it was made clear that discharging the river water intensively during the flood tide could reduce the salinity intrusion effectively when the river discharge was relatively large.

Key Words : *salinity intrusion, well-mixed type, tide, river discharge, tidal prism*

1. はじめに

九州北部地方を流れる筑後川は、世界的な希少種“エツ”の産卵地として知られており、その独特の汽水域はエツに代表される数多くの生物にとってかけがえのない水空間を提供している。また、筑後川の豊富な水資源は筑後川周辺部だけでなく九州北部地域の住民生活や産業活動を支えるものであり、近年の多様化する水資源の需要に伴い河口から23km地点に水資源開発施設である筑後大堰が設けられ、更に、1996年以降筑後大堰上流の河川淡水を直接クリークに導水して堰下流部に灌漑用水を提供する合口取水が行われている。

このような取水の効率化により、今後、更なる水需要の増加が予測されているが、この結果、堰下流部において流量が減少することにより上流側への塩水侵入が増大し、その生息環境が塩分濃度に大きく支配されるエツ等の生態に何らかの影響が出てくることが懸念されている。また、近い将来地球温暖化に伴う海面上昇が河口部において塩水侵入を増大させることは必至

であり、筑後川のみならず多くの河川において塩水侵入を如何に阻止するかが最重要課題となることが予想される。

このような社会背景の下、河口部の塩水侵入を効果的に軽減する方法の開発が求められているが、これまで弱混合型の塩水侵入に対してはいくつか提案されているのに対し、強混合型に対するものはほとんど見られない。小松ら¹⁾は、マウンドの設置が強混合型の塩水侵入を軽減するのに有効であることを実験的に明らかにしているが、新たにマウンドを設置すると河川通水能力が低下するため、実用上問題があると考えられる。このため、著者らは、河川淡水流量が塩水侵入へ大きな影響力をもつことに着目し、河口堰等を利用して海域部の潮汐変動に応じ河川水流量を人工的に制御することで強混合形態における最大の塩水侵入を軽減する方法(以下、“間断放流”と呼ぶ)を新たに提案している。本研究では、強混合形態を実現できる実験装置を用い、潮汐周期よりも短いタイムスケールの河川流量変動が強混合型塩水侵入に及ぼす影響について調

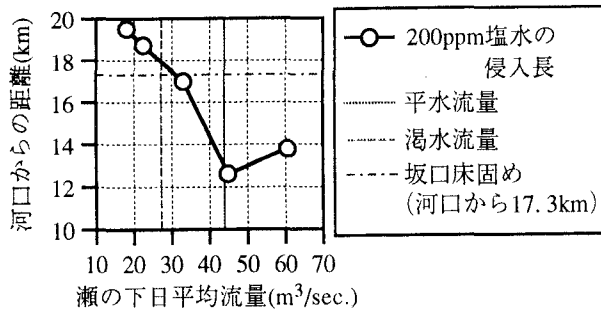


図-1 筑後川における河川流量と塩水侵入長の関係

べ、間断放流の効果についての検討を行った。

2. 強混合型河川の塩水侵入特性と間断放流

(1) 強混合型河川の一般的特性

本研究では、筑後川に限らずその他多くの強混合型河川に対して間断放流の効果を検討することを目的としているため、まず、強混合型河川に共通の塩水侵入特性を明らかにする。一般に、感潮河川河口部の塩水侵入は各河川特有の水理条件の下に実現されているため、同一の混合形態を示す塩水侵入でも河川毎にその特性が著しく異なっている場合も少なくない。しかしながら、潮汐の非常に大きな強混合型河川では、密度差に起因した流れや風などの影響は比較的小さく、河道形状の特性や履歴の効果に極端な違いがなければ、代表的な河川の塩水侵入を調べることで、一般的な特性を明らかにできるものと考えられる。

そこで、日本の代表的な強混合型河川であり観測データも豊富な筑後川の塩水侵入特性を用い、強混合型河川特有の塩水侵入の概要を紹介することにする。

(2) 筑後川の塩水侵入特性

筑後川において、河口から約17.5km地点に位置する坂口床固めの上流域は、床固めの塩水遡上阻止効果もあって通常は塩水がほとんど入り込まない淡水域となっており、エツの産卵域として格好の場を提供している。大潮時の瀬の下地点日平均流量と満潮時における200ppmの塩水の到達地点との関係を調べてみると、河川流量の減少に伴い、上流側への塩水侵入は増大しており、1年に10日の確率で出現する渴水時と大潮時とが重なると、現在でも200ppm以上の塩水が床固めを越えて侵入していることが分かる(図-1;ただし、図中の平水及び渴水流量は平成7年の値を用いている)。

ところで、筑後川河口部に面した有明海はその閉鎖的な形状により生じるセイシュのため、潮汐変動が比較的大きく、河口部の混合形態は干満差が4~5mの大潮時には強混合形態を、1.5~2.5mの小潮時には緩混合形態(時折り弱混合形態)を示している。塩水侵入状況も混合形態の遷移とともに大きく変化しており、通

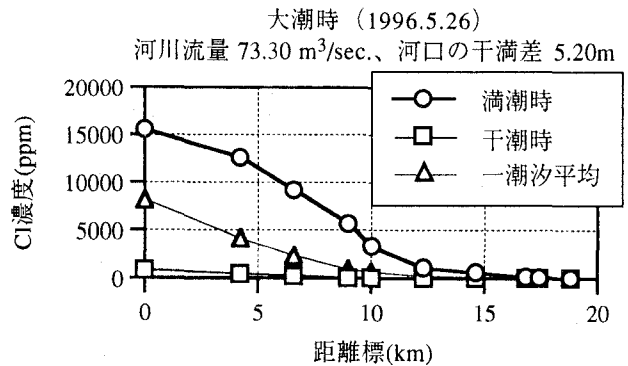


図-2 筑後川における大潮時の塩水侵入状況

常、緩混合形態を示す小潮時の塩水侵入長はそれほど長くなく、強混合形態を示す大潮の満潮付近で塩水侵入長は最大となっている。また、大潮時には潮位の変動に伴う海域からの塩水の入退が大きく、大潮の干潮時には河道内に塩水はほとんど侵入していない(図-2)。

以上のような筑後川の塩水侵入状況は、比較的数量多くの強混合型河川に共通の性質を示していると考えられる。このため、塩水侵入長がそれ程長くない干潮時や小潮時に、河川淡水を河口堰やダム群に貯水しておき、大潮時の大量の塩水侵入に対抗させて河川水を集約して放流するという手法を適用することにより、大潮の満潮付近に出現する最大の塩水侵入長を軽減できることが期待できる。なお、強混合型河川では潮汐やそれに伴い生じる流れがそもそも非常に大きいことから、間断放流による流況の変化が環境へ与えるインパクトはほとんどないものと考えられる。

3. 放流のタイミングの効果を調べる実験

(1) 室内実験装置

小松ら²⁾は、これまでに往復流のせん断乱流のみで強混合形態を実現できる室内実験装置を開発している。今回間断操作の実験を行うに当たり、この実験装置の淡水供給部の放水口に流量測定器を設置し、放流流量のモニタリングを可能にした。更に、流量制御プログラムに従い流量の設定値に応じ放水口の弁開度を自動制御することで、潮汐変動に連動した任意の流量変動パターンを実現することが可能となった。

(2) 断面平均塩分濃度の比較による検討

間断放流のタイミングの違いが塩水侵入に及ぼす効果を調べるために、河川上流部から一潮汐間に流入する淡水の総体積 V_f と間断放流の時間間隔を2種類に固定し、潮汐変動の位相に対し間断放流の時間帯のみを種々変化させる実験を2ケース・11Run行った。実験条件を表-1に示す(ただし、 t は潮汐の位相を表し、

表-1 間断放流のタイミングの効果を調べる実験の条件

ケース名	実験名	放流パターン	$V_f(\text{cm}^3)$	間断放流の時間帯	放流の中心時刻 $t_c(\text{sec.})$	間断放流時の流量($\text{cm}^3/\text{sec.}$)
Case-1	Run 1-1	通常供給	36000	-	-	150
	Run 1-2	上げ潮周り $T/2$	36000	$t=0 \sim T/2$	$T/4$	300
	Run 1-3	下げ潮周り $T/2$	36000	$t=T/2 \sim T$	$3T/4$	300
	Run 1-4	満潮周り $T/2$	36000	$t=T/4 \sim 3T/4$	$T/2$	300
	Run 1-5	干潮周り $T/2$	36000	$t=0 \sim T/4, 3T/4 \sim T$	0 (T)	300
Case-2	Run 2-1	通常供給	18000	-	-	75
	Run 2-2-3	上げ潮周り $T/4$	18000	$t=T/8 \sim 3T/8$	$T/4$	300
	Run 2-3	干潮以降 $T/4$	18000	$t=0 \sim T/4$	$T/8$	300
	Run 2-4	満潮前 $T/4$	18000	$t=T/4 \sim T/2$	$3T/8$	300
	Run 2-5	満潮以降 $T/4$	18000	$t=T/2 \sim 3T/4$	$5T/8$	300
	Run 2-6	干潮前 $T/4$	18000	$t=3T/4 \sim T$	$7T/8$	300

その他の実験条件

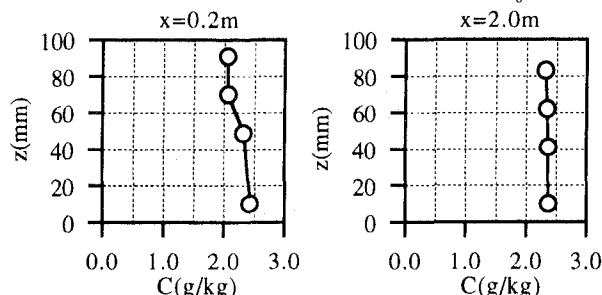
潮位振幅; $A=21\text{mm}$, 一潮汐平均河口水深; $H_0=85\text{mm}$, 塩水供給流量; $Q_s=80\text{cm}^3/\text{sec.}$ 海域の塩分濃度; $C_0=5\text{g/kg}$, 潮汐周期; $T=240\text{sec.}$, 堰設置位置; $X_B=12\text{m}$ 

図-3 塩分濃度の鉛直分布の一例(Run1-1)

$t=0, 240\text{sec.}$ は干潮時に相当する)。なお、後述するように、 V_f 以外の条件を固定した場合、河川流量が大きくなる程、間断放流の効果が顕著に現れてくる為、淡水供給装置が供給しうる流量の中で比較的大きな流量を与え実験を行った。潮汐条件を固定し、河川流量の大きさのみを変化させた場合、一般的には流量が大きくなるにつれ安定成層が形成されやすくなるが、表-1 に示す実験条件の内では最も河川流量が大きい場合でも塩分濃度 C は水深方向にはほぼ一様となっており、強混合形態を示していることが確認されている(図-3 ;ただし、 z は鉛直上向きを正とする座標で、河床において $z=0$ を定義する)。

放流パターンの一例として、図-4に Run1-4 (満潮周り) の場合の供給河川流量の変動パターンを、また、実験結果として図-5 に準定常状態が実現された後の満潮時における断面平均塩分濃度 $\langle C \rangle$ の流下方

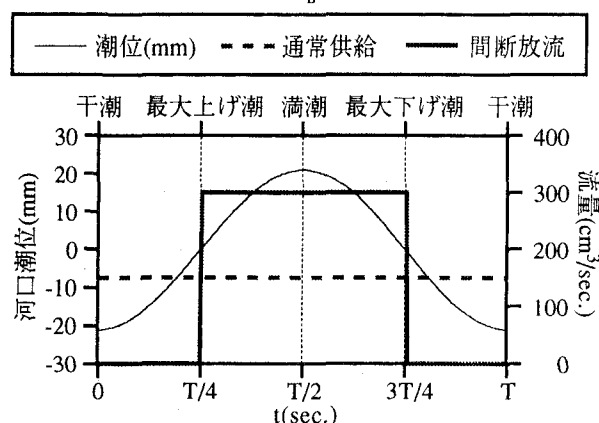


図-4 間断放流の流量変動パターンの一例 (Run 1-4)

向分布を示す(ただし、 x は河口からの距離、 X_B は堰設置位置、 C_0 は海域の塩分濃度を示す)。まず、図-5 (a) に示される $V_f=36000\text{cm}^3$ の場合 (Case-1)、上げ潮周り (Run1-2) と干潮周り (Run1-5) で間断放流を行うと、通常供給時 (Run1-1) に比べ塩水侵入域全体にわたって塩分濃度の低下が見られる。一方、下げ潮周りで放流した場合 (Run1-3) には全体的に塩分濃度の上昇が見られ、間断放流により逆に塩水侵入は促進されている。

また、海域の潮位振幅 A を固定したまま、 $V_f=18000\text{cm}^3$ とした Case-2 の結果 (図-5 (b)) でも、間断放流の時間帯に対する塩水侵入軽減の変化は Case-1 とほぼ同様の傾向を示し、やはり上げ潮期間の放流で塩水侵入

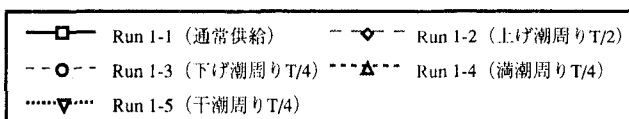
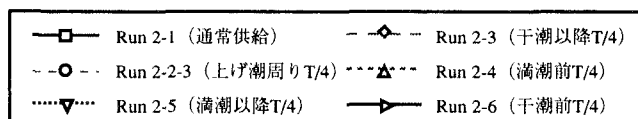
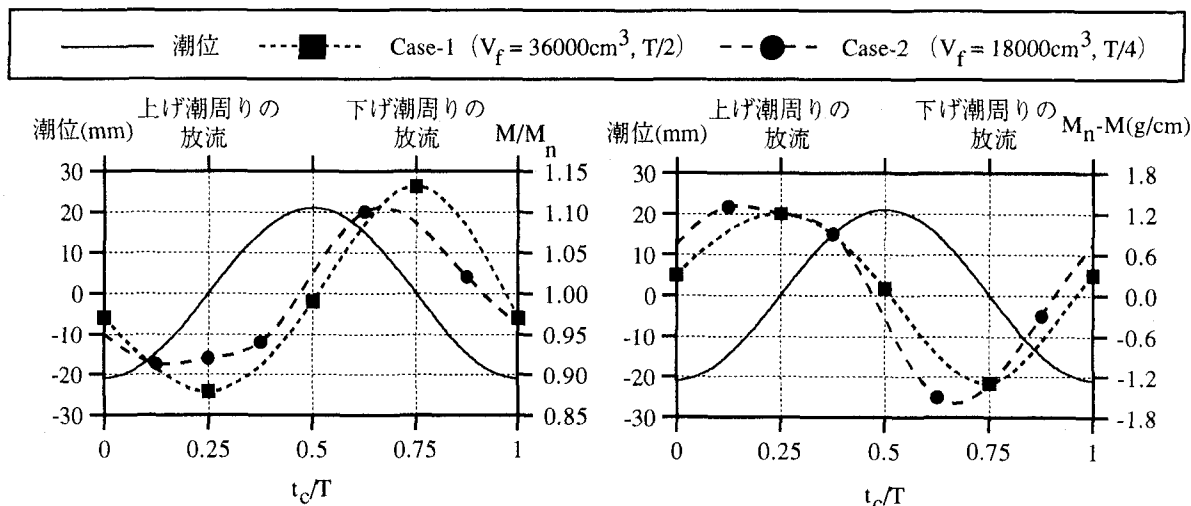
(a) $V_f=36000\text{cm}^3$ 、放流の時間幅 $T/2$ (b) $V_f=18000\text{cm}^3$ 、放流の時間幅 $T/4$

図-5 放流のタイミングの違いによる塩水侵入状況の比較



(a) 間断放流時と通常供給時の塩分侵入量の比

(b) 塩分の低減量

図-6 放流のタイミングに対する塩水侵入軽減の効果曲線
(但し、図中の破線は実験値をスプライン内挿したものである。)

が軽減されていることが分かった。

以上の結果より、潮汐変動に比べて河川流量の影響が小さい強混合型河川においても、 V_f がある程度大きくなれば、一周期間の河川流量は同じでも上げ潮時に集約して河川水を供給することにより塩水侵入軽減効果が得られることが明らかとなった。

(3) 間断放流の時間帯の違いによる効果の検討

各地点の塩分濃度を空間的に積分することにより、満潮時に河道内に侵入している単位幅当たりの総塩分量 M を各放流パターン毎に算出し、更に、この M の値を用いて、間断放流の最適なタイミングについてより詳細な検討を行った。Case-1, Case-2 それぞれについて、間断放流を行う時間帯の中心時刻 t_c と間断放流時と通常時の塩分侵入量の比 M/M_n 及び間断放流によって低減された塩分量 $M_n - M$ との関係性を調べた(ただし、 $t_c=0, 240\text{sec}$ は干潮周りに放流を行ったことに相当し、添字 n は通常供給時に得られた値を意味する)。図-6 からは、Case-1, 2 いずれについても、最大上げ潮付近の放流で塩水侵入は最も軽減され、逆に、最大下げ潮付近の放流で最も塩分侵入は増大しており、効果曲線は放流時間に対してほぼ正弦的な変化を示していることが分かる。また、後述するように V_f が大きくなるにつれ M/M_n は小さくなるが、図-6(a)の結果もそれに対応した振幅の大きさを示している。しかしながら、 V_f の大きな Case-1 で塩分の低減量 $M_n - M$ の変動も大きくなるというわけではなく、2つのケースの最大の $M_n - M$ の値にはほとんど差が見られない。流量が大きくなるにつれて M_n 自体も変化するため、上記のような結果が得られるが、このことより M/M_n の減少は塩分低減量 $M_n - M$ の増加を必ずしも意味するわけではないと言える。

次に、各効果曲線の変化の様子を検討してみると、

Case-1についてはきれいな正弦変化を示しているのに対し、Case-2は正弦関数が若干歪んだ形になっており、最大の軽減効果は最大上げ潮時よりやや手前の時間帯の放流 (Run 2-3) により出現している。

上げ潮の前半 (Run 2-3) と後半 (Run 2-4) の間断放流では、塩分濃度の鉛直分布の経時変化に若干の違いが見られること (図示省略)、1次元拡散方程式中の移流項の効果を担う入潮量は上げ潮期間中の間断放流であれば同じであること等を考慮すると、Run 2-3 と Run 2-4 とでは、見掛けの拡散の効果に若干の違いがあると考えられる。このような拡散の効果の違いは Case-1 についてもいえるが、放流時間が半周期と長くなることにより、塩水侵入軽減効果を最も支配する入潮量も放流時間帯の変化に応じて変化するようになるので、拡散の効果の違いは顕著には現れず、入潮量の変化に応じた位相のずれのない正弦的な効果曲線が得られることになる。

以上の考察より、半周期よりも短い時間間隔で間断放流を行う場合、最適な放流時間は、放流による拡散項の変化を正確に評価することにより決定されることが考えられる。しかしながら、強混合型河川では移流 (つまり入潮量) の効果に比べて、拡散の効果が塩水侵入に及ぼす寄与は十分小さく、従ってその違いによって生じる効果の変化もそれ程大きくはないと考えられるので、上げ潮周りで間断放流を行ってさえいれば、時間帯を変化させた場合の最大もしくはそれに近い塩水侵入軽減効果を得ることができると考えられる。

4. 間断放流を行う時間幅及び入退潮量と淡水流入体積の比の影響

(1) 間断放流の時間幅の影響

間断放流の時間幅の違い（もしくは流量変動の振幅）の影響を調べるために、 $V_f=18000\text{cm}^3$ に対し、間断放流の時間帯の中心時刻を最大上げ潮時に固定し、時間帯を1/2周期、1/4周期と2通りに変化させて実験を行った（表-2）。

図-7に満潮時における断面平均塩分濃度 $\langle C \rangle$ の流下方向分布を示す。間断放流の時間幅が1/4周期から半周期に変化しても、塩水侵入状況にはほとんど差が見られず、間断放流を行う時間幅（もしくは河川流量の供給パターン）が多少変化しても、間断放流を行う時間帯と一潮汐間に流入する淡水の体積 V_f とが一致さえしていれば、塩水侵入軽減効果はほとんど変化しないことが分かる。

緩・強混合型の河川では、満潮時の塩水侵入の程度は主に上げ潮時の入潮量の大きさによって決定されている。潮汐の干満差を固定した場合には、tidal prismはほぼ一定となるため、間断放流により上げ潮期間中に流入する河川水の体積を大きくし、tidal prismに対する入潮量の寄与を低減させれば、満潮時の塩水侵入を軽減することが可能となる。したがって、間断放流を行う時間帯が上げ潮期間中に含まれてさえいれば、上げ潮期間中に流入する淡水の体積は V_f となって同じであるため、結局、上述の結果のように V_f の大きさのみによって塩水侵入軽減効果は決定されることになる。

（2）入退潮量と淡水流入体積の比と塩水侵入軽減効果の関係

前節の結果より、間断放流を行う時間帯が上げ潮期間中にあり、また潮汐の干満差が一定の場合、 V_f は塩水侵入軽減効果を決定する最も支配的なパラメーターであることが明らかとなった。そこで、間断放流の時間間隔を半周期に、また間断放流を行う時間帯の中心時刻を最大上げ潮時に固定し、 V_f のみを変化させる実験を行い、 V_f と塩水侵入軽減効果との関係を調べた。前節の考察により、間断放流の効果は入潮量と上げ潮期間中に流入する淡水の体積との相対的な関係によって決定されると考えられるので、 V_f とtidal prism P_t との比 V_f/P_t に対する塩水侵入軽減効果 M/M_n の変化を調べた。通常時の断面平均塩分濃度が $\langle C \rangle_n=0.2, 2.0 \text{ g/kg}$ となる2地点での塩分濃度の低減率 $\langle C \rangle/\langle C \rangle_n$ の変化も併せて図-8に示す。 M/M_n に関しては、 V_f/P_t が小さい場合には、塩水侵入軽減効果はほとんど見られないが、 V_f/P_t の値がある程度大きくなると、徐々に塩水侵入軽減効果が現れてくる。間断放流を行う時間幅と干満差を固定した場合、 V_f の増加に対して入潮量はほぼ線形的に減少するものと考えられるが、 M/M_n もこの傾向に準じて線形的に単調減少している。また、濃度の低減率

表-2 間断放流を行う時間幅の効果を調べる実験の条
（その他の実験条件は表-1と同じ）

ケース名	放流パターン	$V_f(\text{cm}^3)$	間断放流の時間帯	放流の中心時刻 $t_c(\text{sec.})$	間断放流時の流量 $(\text{cm}^3/\text{sec.})$
Run 2-1	通常供給	18000	-	-	75
Run 2-2-1	上げ潮周りT/2	18000	$t=0 \sim T/2$	T/4	150
Run 2-2-2	上げ潮周りT/4	18000	$t=T/8 \sim 3T/8$	T/4	300

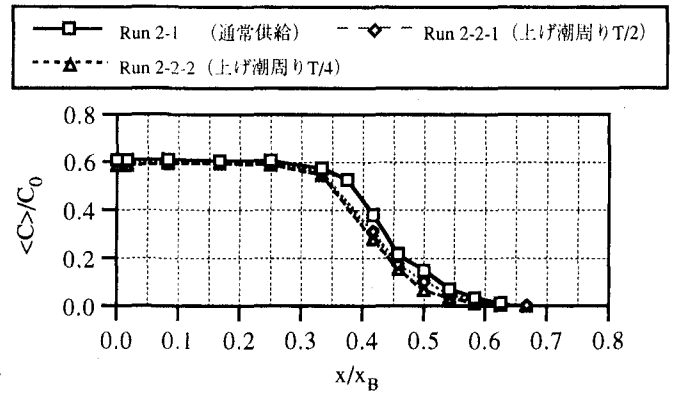


図-7 放流の時間幅の違いによる塩水侵入状況の比較

表-3 入潮量と淡水流入体積との比の効果を調べる実験の条件

ケース名	放流パターン	$V_f(\text{cm}^3)$	V_f/P_t	間断放流の時間帯	間断放流時の流量 $(\text{cm}^3/\text{sec.})$
Run 1-1	通常供給	36000	0.29	-	150
Run 1-2	最大上げ潮周りT/2	36000	0.29	$t=0 \sim T/2$	300
Run 2-1	通常供給	18000	0.14	-	75
Run 2-2-1	最大上げ潮周りT/2	18000	0.14	$t=0 \sim T/2$	150
Run 3-1	通常供給	31200	0.25	-	130
Run 3-2	最大上げ潮周りT/2	31200	0.25	$t=0 \sim T/2$	260
Run 4-1	通常供給	24000	0.19	-	100
Run 4-2	最大上げ潮周りT/2	24000	0.19	$t=0 \sim T/2$	200
Run 5-1	通常供給	16800	0.13	-	70
Run 5-2	最大上げ潮周りT/2	16800	0.13	$t=0 \sim T/2$	140
Run 6-1	通常供給	14400	0.11	-	60
Run 6-2	最大上げ潮周りT/2	14400	0.11	$t=0 \sim T/2$	120
Run 7-1	通常供給	7200	0.06	-	30
Run 7-2	最大上げ潮周りT/2	7200	0.06	$t=0 \sim T/2$	60

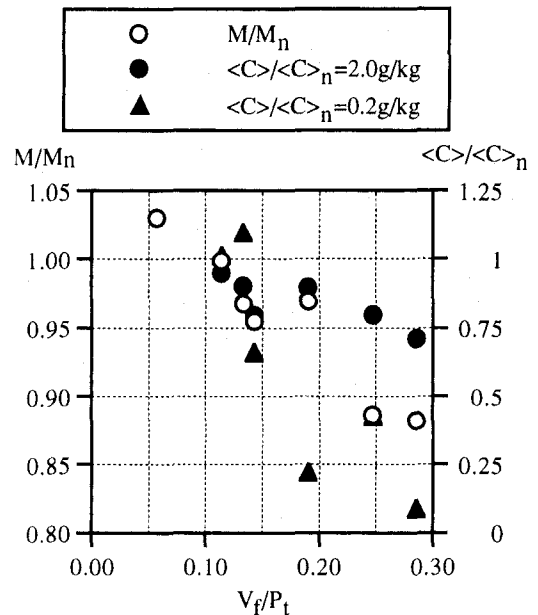


図-8 塩水侵入に対する V_f/P_t の影響

$\langle C \rangle/\langle C \rangle_n$ は低濃度の塩水（上流側で塩水侵入の先端付近）に対して大きくなっており、例えば筑後川のように

に、ある程度上流の塩水侵入のみが問題となるような場合には、特に間断放流はその有効性を発揮できるものと考えられる。

5. 間断放流開始からの非定常変化

これまでの、準定常状態の塩水侵入に対する間断放流の効果について検討を行ってきたが、現地において実際に本手法を適用する際には、塩水侵入を軽減する必要のある時期のみ効果が現れるように短期間の間断放流を行うことがより好ましい。そこで、間断放流の効果が比較的大きな $V_f/P_f=0.25$ の条件に対して、通常供給時の準定常状態から、 V_f を固定させたまま最大上げ潮周りで時間幅半周期の間断放流に切り替え、間断放流開始から準定常状態になるまでの塩水侵入状況の時間的な変化について調べた。塩水侵入を全体的に網羅できるように $x=0.2, 2.0, 4.0, 5.0, 6.0\text{m}$ と流下方向に配置した導電率計によって河床から15mmの高さにおける塩分濃度の経時変化の測定を行った。本実験条件の下では通常、間断いづれの放流に対しても準定常状態において水深方向にはほぼ一様な塩分濃度分布を示す強混合形態の塩水侵入が実現されていることが確認されたため、河床付近で測定された塩分濃度は断面平均塩分濃度とほぼ等しい値を示していると言える。図-9に間断放流開始時からの満潮時における塩分濃度の変化を示す(ただし、 τ は間断放流開始時からの経過時間、 C_f は間断放流を行った場合の準定常状態の濃度、 C_τ は時間 τ における塩分濃度、 L_s は通常供給時の塩水侵入長を意味する)。いづれの測点においても間断放流開始直後から塩分濃度は急激に減少し、特に、 $x=5.0\text{m}$ ($x/L_s=0.65$)、 6.0m ($x/L_s=0.78$) といった塩水侵入の先端付近では最終的に到達する準定常状態よりも大きな濃度の低減が見られる。この時、下流側では、準定常状態よりも効果が小さいことを考えると、間断放流の効果は上流から下流へと徐々に伝わるため、下流側まで効果の十分伝わっていない間断放流開始直後には上記のように、塩水侵入の先端付近に偏って大きな効果が現れたものと考えられる。間断放流開始直後より、入潮量は比較的速度やかに減少すると考えられるので、バロクリニックな流動の影響がほとんどない強混合型塩水侵入の範囲では、多少水理条件が変化しても、上記の結果と同様に間断放流の効果は、比較的速度やかに現れるものと推測される。

6. 結論

本研究の結果、以下のような知見が得られた。

1) 潮汐変動に比べ、河川流量の影響が小さい強混合型河

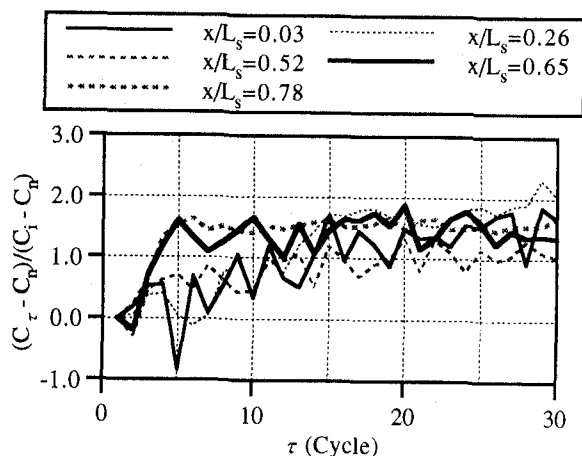


図-9 間断放流開始時からの非定常変化
(Run 3-2: $V_f=31200\text{cm}^3$, 上げ潮周りで半周期間断放流)

川においても、 V_f がある程度大きくなれば、上げ潮時に集約して淡水を供給することにより塩水侵入軽減効果が得られる。

2) 間断放流を行う時間帯を上げ潮時に固定した場合、間断放流の効果は一潮汐間に流入する淡水の体積と tidal prism との比によって決定され、河川流量の供給パターンには依存しない。これは強混合型河川の満潮時の侵入塩分濃度分布は河道部に流入して占める塩水の volume と河川水の volume によって基本的に決定されるからである。

3) 間断放流の効果は、放流開始時から数周期のうちに速やかに現れることが分かった。現地での適用を考える場合、塩水の侵入が最も大きくなる数周期間にのみ効果が現れるような短期間の適用も十分に可能であると考えられる。

謝辞：本研究を行うに当たって貴重なアイデアと資料を提供して下さった(社)九州建設弘済会 今村瑞穂理事長、また水資源開発公団 筑後大堰管理事務所ならびに(株)東京建設コンサルタント九州支店の方々、そして本実験およびデータ解析に御協力願った九州大学工学部建設都市工学科 藤田和夫・柴田敏彦両技官、(株)アイ・エヌ・エー 黒目剛氏及び学部4年生 田吹泰孝君に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 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, 1995.
- 2) 小松利光・安達貴浩・孫双科・柴田敏彦: 強混合型感潮河川における見掛けの拡散フラックスの評価法、水工学論文集第40巻, pp512 ~ 523, 1995.

(1997.9.30受付)