

塩水遡上が筑後川感潮河道の 分派・合流に与える影響

金子 祐¹・Neriezza OLAP²・横山 勝英³

¹正会員 東京都立大学大学院 都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1丁目 1)
八千代エンジニアリング株式会社 事業開発本部第一開発室
(〒111-8648 東京都台東区浅草橋 5丁目 20-8 CS タワー)
E-mail: yu-kaneko@yachiyo-eng.co.jp (Corresponding Author)

²Student Member of JSCE, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Tokyo Metropolitan University
(1-chome 1, Minami-Osawa, Hachioji, Tokyo JAPAN 192-0397)
E-mail: olap-neriezza-aldueza@ed.tmu.ac.jp

³正会員 東京都立大学院教授 都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1丁目 1)
E-mail: k-yoko@tmu.ac.jp

感潮域の網状河川では分派や合流といった水の輸送の状況は未解明な部分が多い。そのため、感潮域に X 字型の分派・合流部を有する筑後川において、分派・合流部の塩水遡上の特徴を把握し、通過流量に与える影響を解明することを目的として、分派・合流部の 3 測線で流速および塩分の横断観測を実施し、観測結果から以下の結論を得た。(1) 大潮時には強混合で塩水遡上しており、上げ潮、下げ潮ともに分派・合流部の通過流量比は概ね断面積比に一致することが分かった。(2) 下げ潮開始時において筑後川および早津江川に分派地点で流速と塩分に鉛直分布が確認され、遡上した塩分の河道内への滞留状況が、分派への抑制の状態を表していることが確認された。(3) この要因を簡略的に河川延長の相違の観点で考察し、概ね状況を説明できることが分かった。

Key Words: *salinewater intrusion, estuary, water distribution, confluence point, mixing pattern*

1. 序論

デルタ地帯に広がる低平地では、本川と派川が分派・合流し、複雑に接続した網状河川が形成されている。このような複雑な地形では、水の輸送も地形や潮汐、上流からの流量など様々な要素が複合しているため、管理が難しい。そのため、塩水管理を実施していく上では、高度な塩水遡上予測により把握するなどが想定されるが、上記のような複雑な河川での精緻な河川測量や流量、水質などの観測データが十分に整備されていることは珍しい。このため、複雑な河川においても分派・合流による大局的な特徴を捉え、管理していくことが望まれる。

松村ら¹⁾は筑後川に分派・合流部において、高度な3次元流動シミュレーションを用いて分派・合流部の流動と塩分分布を検討している。また Ducら²⁾はメコン川および太田川において数値シミュレーションを用いて網状河川での淡水流量の推定を行っている。しかし、いずれも分派量と下流河道の形状との相互作用については言及さ

れておらず未解明な部分が多い。現地観測による分派の研究として、駒井ら³⁾、中下ら⁴⁾が太田川において塩分と水位の連続観測データを用いて塩水プロファイルから淡水の分派量を推定している。また、金子ら⁵⁾は、荒川、隅田川において平常時の大潮の分派特性として、塩水遡上や分派量が流量と地形要因の相互に関連することを示唆した。このような感潮域での分派・合流部における水の輸送を対象とした研究は国内外において数が少なく、汎用的な適用性を議論するにはさらに複数のフィールドでのケーススタディが必要である。そのため、本研究では感潮域に分派・合流部を有する筑後川において、分派・合流部での本支川の塩水遡上の特徴を把握し、通過流量に与える影響を解明することを目的とした。

2. 研究方法

(1) 研究対象地の概要

対象地の平面図および分派・合流部の河床地形図を図

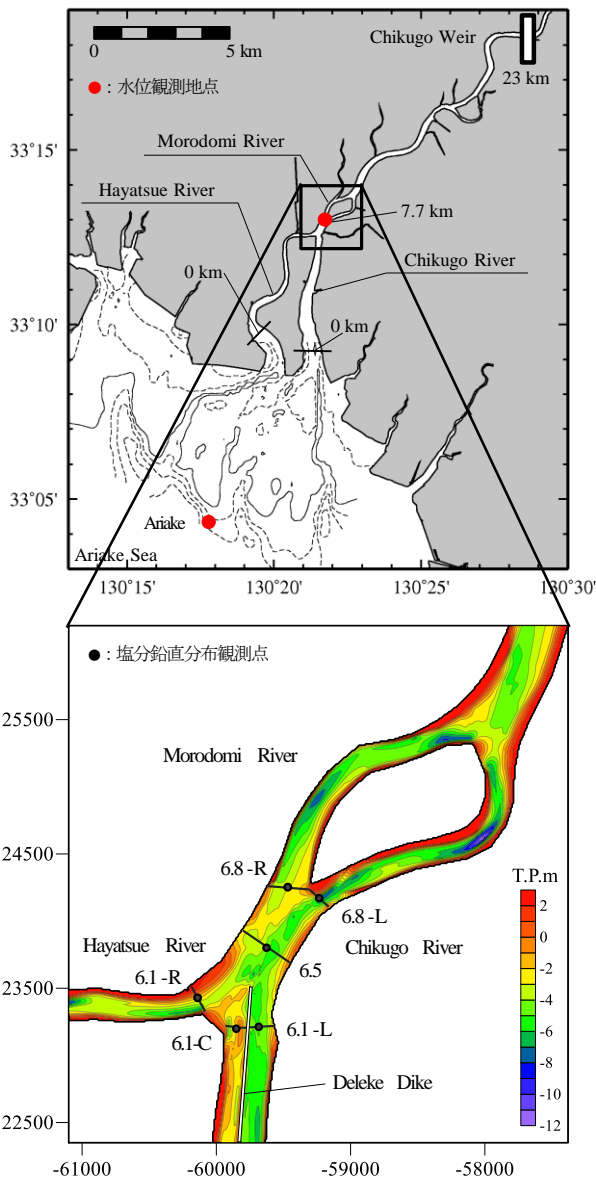


図-1 観測領域（上：全域，下：分派・合流部河床地形）

-1に、筑後川および早津江川、諸富川の川幅と低水路平均河床高、最新河床高の縦断図を図-2、図-3に示す。距離は、河川距離表に基づき表示しており、筑後川、早津江川の河口はそれぞれ、-1.4 km、-2.6 kmとなる。これらは、国土交通省筑後川河川事務所から提供いただいた平成20年度実施の定期横断測量を用いて作成した。筑後川の流域面積は2,860km²、幹川流路延長173kmである。河口の潮汐の干満差は最大で約5mである。23kmに筑後大堰が設置されており、感潮区間は大堰までとなっている。9km地点で本川と諸富川に分流し、6.8km地点で再度合流する。さらに、6km地点で筑後川と早津江川に分派する。また、筑後川6.2kmより下流には断面内に高さ約TP.0mのデレーケ堤と言われる導流堤が設置されており、この影響で左岸側が深く、右岸側が浅い地形となっている。本研究では大局的な位置関係を把握しや

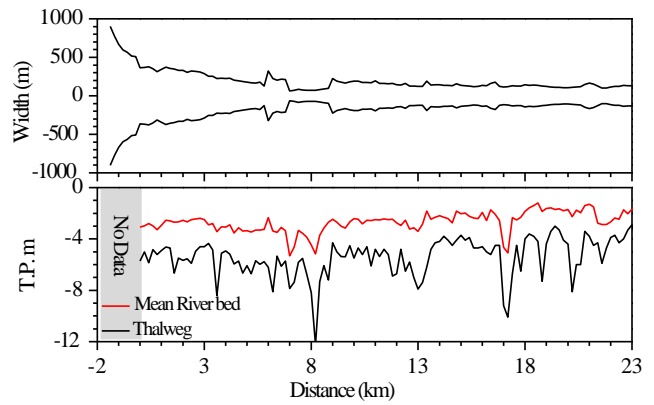


図-2 筑後川の川幅、河床高

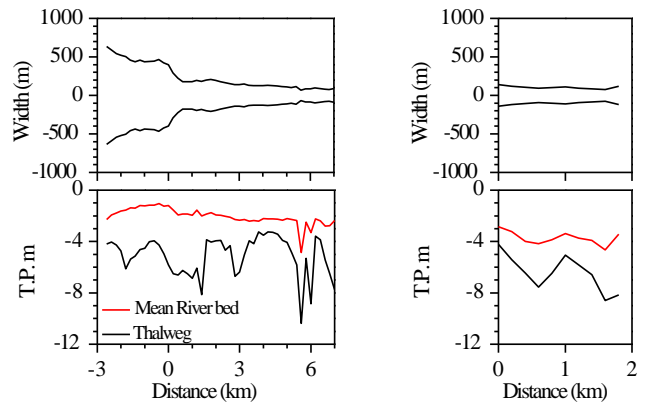


図-3 早津江川、諸富川の川幅、河床高

表-1 下流本支川の河道特性の比較

河川	河川延長	川幅	河床勾配	蛇行曲率
下流本川	7.2 km (-1.4~5.8 km)	1,800~330 m	-1/8,000	3,000~2,500
下流支川	9.6 km (-2.6~7.0 km)	1,300~150 m	-1/6,000	1,200~650

表-2 上流本支川の河道特性の比較

河川	河川延長	川幅	河床勾配	蛇行曲率
上流本川	2.0 km (7.0~9.0 km)	150 m	1/10,000	300
上流支川	1.8 km (0.0~1.8 km)	210 m	-1/2,500	900

すいように、筑後川(7~9 km)と諸富川を上流本川、上流支川とし、筑後川(-1.4~6 km)と早津江川を下流本川、下流支川として説明する。表-1、表-2に下流本支川および上流本支川の河道特性の比較を示す。下流本川は河口まで7.4 km、下流支川は河口まで9.6 kmであり、下流支川の方が2.2 km長い。この理由として、下流本川は直線的な形状であるのに比べ、下流支川は大きく蛇行しているためである。合流部までの各河川の曲率半径は、下流本川で2,500m~3,000m、下流支川で650m~1,200mであり、下流支川の蛇行部の曲率半径が1/3程度である。

下流本川の低水路幅は、河口-1.4kmで1,800m、6kmで330 mであり、下流支川では、河口-2.6 kmで1,300 m、7 kmで150 mと徐々に狭まっている。分派直後の川幅は、支川が本川の1/2程度である。河床勾配はほとんどフラ

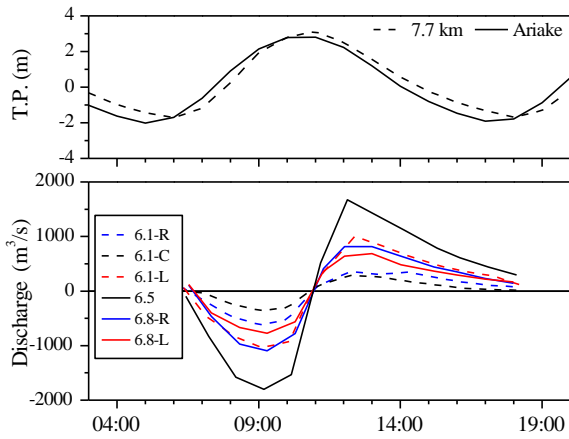


図4 水位および分派地点の流量観測結果

ットな地形である。上流本川と上流支川の延長は、本川で2km、支川で1.8kmであり本川がやや長い。低水路幅は上流本川が150mに対し、上流支川が210mであり川幅が14倍程度広い。上流本川は、分派直後に曲率半径300m比較的きつい蛇行部がある。河床勾配は、どちらもほとんどフラットな勾配である。

(2) 現地観測方法

分派・合流部において3測線で流速の横断観測および塩分計測を実施した(図-1下図)。測線は下流支川と下流本川の分派部である6.1km(6.1-L, 6.1-C, 6.1-R)、合流部である6.5km、上流支川と上流本川の分派部である6.8km(6.8-L, 6.8-R)である。調査期間は、2014年9月11日であり、当日の潮汐は大潮である。各測線の流速横断分布を1時間間隔で計測し、一潮汐に渡って合計13回計測を行った(図-4)。

流速の横断分布は曳航式超音波流速計(RDI社製 WorkHorse ADCP)を用いて計測した。この流速計を作業船に搭載し、水中にセンサーを20cm沈めて取り付け、0.25mの観測層厚で流速の鉛直分布を観測した。横断方向へは時速6kmで移動しながら1測線約5分(取得データ間隔は約3mとなる)、3測線を移動含め20~30分で観測した。

同時に各測線の中央部(図-1下図)において多項目水質計(JFEアドバンテック社製, AAQ-I183)による塩分の鉛直分布を計測した。また、水位データ(図-1上図)は水資源機構筑後川下流総合管理所および国土交通省筑後川河川事務所より提供いただいた。

(3) データ分析方法

得られた流速データを横断方向に前後2つずつ移動平均した。移動平均後の流速データに層厚と横断距離を乗じて流量を算定し、積分して各断面の流量を算定した。表層ブランク部(0.57m)には、第一層の値を適用して

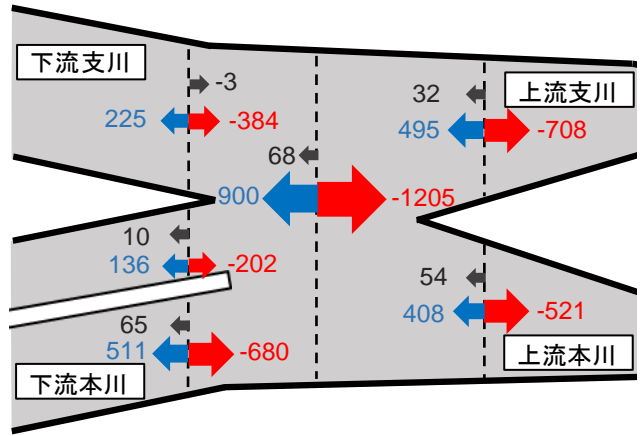


図5 分派・合流地点での通過流量配分(赤:上げ潮, 青:下げ潮, 黒:一潮汐)

いる。加えて、各断面の面積も求めた。なお、6.1-Lおよび6.1-Cは、下流本川として同一断面であるが、デレーク導流堤で低水の流れが分断されているため、通過流量については分けて検討している。

3. 分派・合流部における分派特性

(1) 分派流量の観測結果

図-4に観測日の水位と通過流量を示す。水位は、有明海および7.7kmでの観測結果を示している。流量は順流方向を(+)として示している。なお、ADCPの計測精度は ± 0.3 cm/sであり観測測線の最大断面面積が $2,300$ m^2 であったことから、流量は最大 ± 10 m^3/s 程度の誤差を含んでいる。また、当日は大潮のため強混合型の塩水遡上が観測されている。瀬ノ下(25.52km)の流量は $80\sim 87$ m^3/s であり、6.5kmの下げ潮時のピーク流量が約 $1,670$ m^3/s であることから、河川の流れとして潮汐流が支配的であったと言える。なお、上げ潮時の6.5kmのピーク流量は約 $1,800$ m^3/s であり下げ潮ピーク時より高い。この傾向は他の測線においても同様である。このことは、潮汐波形が非対称となっており上げ潮が5時間、下げ潮が7時間であるが、潮位差が同じであるため上げ潮の方が水面勾配が大きいためであると考えられる。

各測線の通過流量について比較する。前提として、観測日の2回潮の低潮位差は有明海で7cm、7.7km地点で5cmであり、どちらも干満差(約5m)の1%程度であるため、日潮不等は小さく一潮汐での通過流量の収支に偏りはないと考えられる。上げ潮時には、6.1-Lと6.8-Rの流量波形が近似しており、この傾向は下げ潮でも見られる。6.1-Lと6.8-Rは分派・合流部のX字型の始点と終点であるため、上げ潮時には6.1-Lで遡上した流量が6.8-Rに、下げ潮時には6.8-Rから流下した流量が6.1-Lを通過しやすいと考えられる。対をなす6.1-Rと6.8-Lでは、上げ

潮、下げ潮ともに 6.8-L>6.1-R となり、前述のような関係は見られなかった。

(2) 分派の特徴

a) 分派・合流部の分派比率

図-5に上げ潮、下げ潮、一潮汐の平均通過流量を、表-3、表-4に6.8km、6.1kmの通過流量比と断面積比（流水断面の面積比）を示す。両比率は、上げ潮、下げ潮時の毎時の平均値を示している。上げ潮に着目すると、下流本川6.1-Lで680m³/s、6.1-Cで202m³/sが通過し、下流支川(6.1-R)から384m³/s通過している。6.1km測線ではL:C:R=0.57:0.14:0.29となり、断面積比(0.53:0.16:0.31)と概ね一致している。6.5-Cでは、1,205m³/s通過し、その後、上流本川(6.8-L)に521m³/s、上流支川(6.8-R)に708m³/sが分派している。6.8km測線の上げ潮での流量比は、L:R=0.43:0.57となり、断面積比(0.43:0.57)と一致している。

同様にみると、下げ潮では6.8km測線の流量比は、L:R=0.47:0.53であり、断面積比と一致している。6.1km測線の流量比は、L:C:R=0.58:0.13:0.30となり、上げ潮時同様に断面積比と概ね一致している。

これらから、上げ潮と下げ潮のいずれも、通過流量比は断面積比に概ね一致することが分かった。6.1kmにはデレーケ導流堤が突き出しており、下げ潮時に下流支川への分派を抑制する可能性が考えられたが、各潮汐の収支の中では大きく影響していない。なお、下流支川の流量収支はほぼ0m³/sとなっているため、大潮時には上流からの淡水は下流本川へ流下している。次項では6.8kmおよび6.1kmの分派・合流の時系列状況を考察する。

b) 6.8km測線での分派・合流

図-6に6.8-R、6.8-Lの断面平均流速、流量比/断面比および塩分の水深平均値を示す。流量比/断面比は通過流量比と断面積比の割合であり、この値が1であれば通過流量は断面積比で通過していると言える。上げ潮時では、流量比/断面比は両断面ともに1程度であり、この理由として、両断面の流速が等しいためだと考えられる。なお、塩分は、6.8-Lに比べ6.8-Rは1~2程度低いこと、遡上やや遅れていると推定されるが、流速には影響していない。満潮時には塩分は同等の値となっている。

下げ潮時では、開始時に流量比/断面比は、6.8-Rで0.9に低下している。これは6.8-Rの流速が6.8-Lより0.15m/s程度低くなっていることが影響していると考えられる。6.8-R合流部は6.8-Lに比べて河床が高いため下げ潮初期で流下がやや阻害されている可能性がある。下げ潮後半では、流量比/断面比は概ね1となり流速も一致する。6.8km測線では、一潮汐の平均値で見ると流量比/断面比は概ね1となり、分派・合流は断面積比で流下していると言える。

表-3 6.8km地点の通過流量比および断面積比

潮汐		6.1-R	6.1-C	6.1-L
上げ潮	流量比	0.29	0.14	0.57
	断面積比	0.31	0.16	0.53
下げ潮	流量比	0.30	0.13	0.58
	断面積比	0.27	0.13	0.60

表-4 6.1km地点の通過流量比および断面積比

潮汐		6.8-R	6.8-L
上げ潮	流量比	0.57	0.43
	断面積比	0.57	0.43
下げ潮	流量比	0.53	0.47
	断面積比	0.54	0.46

c) 6.1km地点での分派・合流

図-7に6.1-L、6.1-C、6.1-Rの断面平均流速、流量比/断面比、塩分の水深平均値を示す。上げ潮時では、流量比/断面比は6.1-Lで約1.1、6.1-Rで約0.9、6.1-Cで約0.85となり6.1-Lが大きい。この理由として、6.1-Lの流速が他断面より大きいためだと考えられる。塩分は、6.1-L>6.1-C>6.1-Rとなり、6.1-Lは他断面より塩分が高いことから塩水が遡上しやすいと考えられる。これらから、流量比/断面比の傾向は、下流本川と下流支川の流速差が起因していると考えられ、その要因として両河川の塩水遡上の状態が影響していると考えられる。

下げ潮時においては、初期に流量比/断面比は6.1-Lで1.25、6.1-Rで0.67であり差が大きい。流速は同時刻に6.1-Lでピーク流速が観測されているが、6.1-Rは6.1-Lより著しく低い。一方で、6.1-Rの塩分は他の断面よりやや高く、遡上した塩水の流下が抑制されている可能性がある。これは6.1-Rの塩分が徐々に低下するに従い、流速が上昇し流量比/断面比が1に近づいていくことから言える。この要因について、断面内の流速、塩分分布に基づき詳細に考察する。

4. 分派における下流河川の影響

(1) 6.1km地点での流速および塩分

図-8に6.1kmの上げ潮、下げ潮ピーク時の流速分布を示す。上げ潮時ピーク時には強混合形態による遡上の特徴である全層一様の流速分布となっており、6.1-Lで約0.9m/s、6.1-Rで0.8m/sとなっている。一方で、下げ潮ピーク時には、上層、下層の流速差が大きいことが分かる。6.1-L上層では、1.0m/sを超える流速が観測されており、下層では、0.6m/s程度、6.1-R上層で0.6m/s、下層で0.3

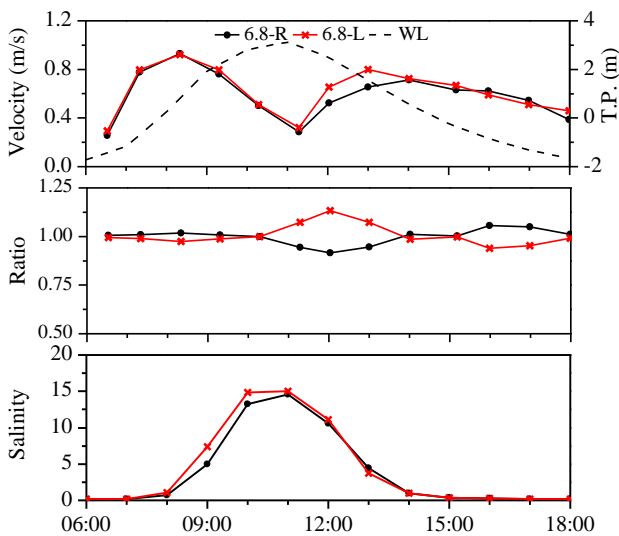


図-6 鉛直平均流速（絶対値），流量比／断面積比，鉛直平均塩分（6.8-R, 6.8-L）

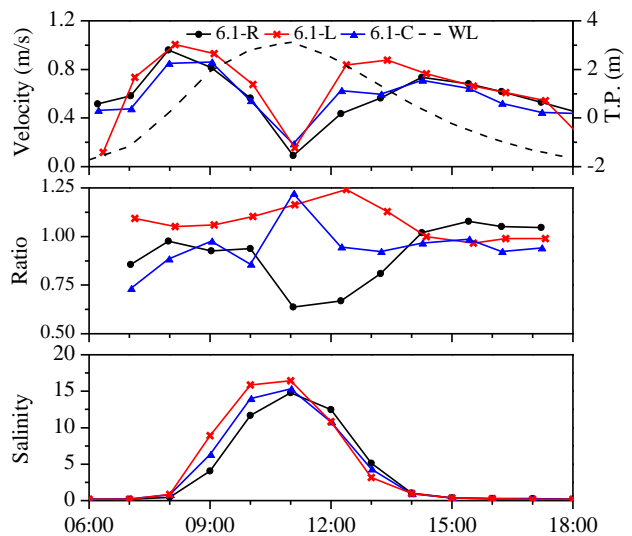


図-7 鉛直平均流速（絶対値），流量比／断面積比，鉛直平均塩分の時系列（6.1-L, 6.1-C, 6.1-R）

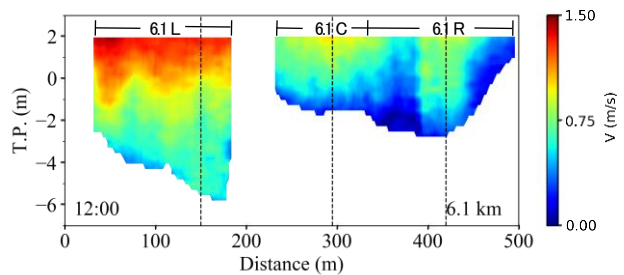
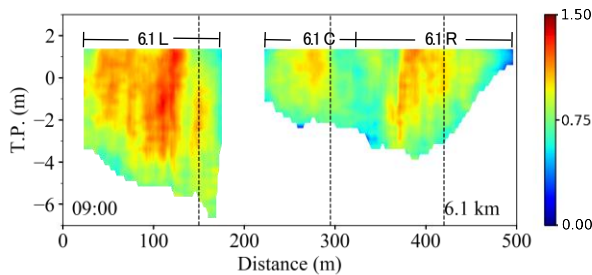


図-8 上げ潮，下げ潮ピーク時の流速分布（絶対値） [左：上げ潮(9:00)，右：下げ潮(12:00)]

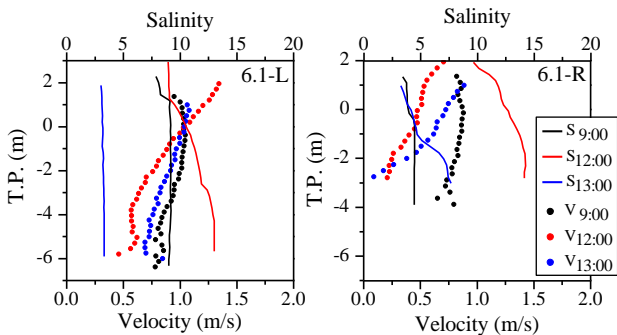


図-9 流速（絶対値）と塩分の鉛直分布（左：6.1-L，右：6.1-R）

m/s となり，上層と下層で約 2 倍の流速差が観測された。

図-9 に 6.1-R, 6.1-L の流速と塩分の鉛直分布を示す。上げ潮ピーク時 (9:00) では両断面で鉛直一様の塩分が観測されている。その際の流速鉛直分布も L および R とともに鉛直一様である。

一方で，下げ潮ピーク時 (12:00) では，塩分は表層で低く，下層で高い。13:00 には，L で塩分，流速ともに一様の分布に戻っているが，R では底層に塩分が残っている。表層と底層の流速差もあることから低塩分水が表層を高速で流下し，高塩分水が底層によどんでいる状況を示している。このことから，下流支川 (6.1-R) では底層の高塩分層が下流本川 (6.1-L) に比べ長く維持され

ていることが分かり，潮汐の伝播が下流本川に比べて遅れていると考えられる。

(2) 下流河川の影響について

下流支川において，下げ潮時に潮汐の伝播が遅れる要因を，河道特性から考察する。このため，遡上した塩水が下げ潮において分派地点から河口に到達するまでの時間を下流本川と下流支川で算定した。算定に用いる流速は，図-7 に示す 6.1-L, 6.1-R の流速値を下流河川にも適用した。

その結果，下流本川で下げ潮開始から約 2.5 時間後の 13 時，下流支川で約 4.5 時間後の 15 時となった。下流本川は比較的直線形状であるが，下流支川は蛇行形状であり，分派地点から河口までの距離も下流本川で 7.2 km，下流支川で 9.6 km と下流支川の方が 2.4 km 長い。このため，分派地点の上流端水位と河口部の下流端水位の境界条件は本支川ともに同一であっても，蛇行により河川延長が長くなることで水面勾配に差が生じ流速差が生まれる。さらに水塊の移動距離が延長差分長くなる。これらが複合した結果が，下流本川と下流支川の到達時間の差となり，下流支川では本川に比べ塩水の流下が抑制されることで分派流量比に影響していると推察される。これは，高塩分水が河口に到達する 15 時付近で下流支川

(6.1-R) の流量比／断面比が 1 となることも整合している。

金子ら⁵⁾は荒川、隅田川において塩水遡上抑制の観点を単位幅流量による要因と蛇行部の曲率や河床形状の高波数変動などの地形的要因として考察している。感潮域での分派流量にもこれらが複合した形で影響していると考えられるが、本研究の条件下では、流下の抑制要因を簡略的に河川延長の相違の観点で考察し、概ね状況を説明できることが分かった。この結果は、Veerapaga ら⁷⁾が三次元流体シミュレータによる感潮域の概念モデルを用いて延長の異なる本支川の塩水遡上を検討した結果ともよく一致している。

5. 結論

本研究では感潮域に分派・合流部を有する筑後川において、分派・合流部での本支川の塩水遡上の特徴を把握し、通過流量に与える影響を解明することを目的として、分派・合流部の 3 測線で流速および塩分の横断観測を実施し、観測結果から以下の知見を得た。

筑後川では、上げ潮、下げ潮および一潮汐の大局的な収支の中では、分派および合流部の通過流量比は概ね断面面積比に一致することが分かった。一方で下げ潮開始時において筑後川および早津江川に分派地点で流速と塩分に鉛直分布が確認され、遡上した塩分の河道内への滞留状況が、分派への抑制の状態を表していることが確認された。金子ら⁵⁾は、塩水遡上抑制の観点で川幅や蛇行、河床地形など複数の地形要因の影響を考察している。本研究の結果、分派抑制を簡略的に河川延長の相違で考察し、概ね状況を説明できることから、分派抑制の観点でも地形要因が影響していることが分かった。

対象地では干満差が大きく、潮汐流が非常に卓越しているため、断面面積比での分派比の推定が可能であった。さらに下流本川と下流支川の河川規模が同等であったた

め、流下の抑制要因を河川延長で簡略的に説明が可能であったと考えられる。これらが他河川にも適用可能であるかを評価する上でも、条件の異なるフィールドでの研究や数値シミュレーションを用いた要因の特定を行う必要がある。

謝辞：本研究では、水資源機構筑後川下流総合管理所および国土交通省筑後川河川事務所にご協力頂いた。筑後川のデータ取得は河川基金の支援を受けて行われた。また、東京都立大学水工学研究室の学生諸氏には現地観測においてご協力頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 松村健史, 守村融, 新谷哲也, 横山勝英: 分岐合流を有する感潮河道における塩水遡上運動の三次元流動シミュレーション, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 73, No. 4, pp. I_1039-I_1044, 2017.
- 2) Nguyen, H. D. and Nguyen, A. D.: A simple approach to estimating freshwater discharge in branched estuarine systems, *Hydrological Processes*, pp. 2765-2778, 2018.
- 3) 駒井克昭, 日比野忠史, 水野雅光: 河川感潮域における淡水流入量の推定, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.976-980, 2007.
- 4) 中下慎也, 福井勝吾, 日比野忠史: 感潮河川における淡水分派比の推定, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 68, No. 4, pp. I_1597-I_1602, 2012.
- 5) 金子祐, Neriezza OLAP, 梅田雄太, 横山勝英: 荒川河口域・隅田川の塩水遡上が平常時の水分派に与える影響, 土木学会路運文集 B2, Vol. 75, I_205-I_210, 2019.
- 6) 横山勝英, 大村拓, 鈴木伴征, 高島創太郎: 筑後川河口域における塩水遡上特性と汽水環境について, 水工学論文集, 第 55 巻, pp. 93-97, 2011.
- 7) Veerapaga, N., Azhikodan, G., Shintani, T and Yokoyama, K.: Numerical Study on Effect of Topography, Shape, and Multi-branch on Saltwater Intrusion in a Conceptual Estuary, 土木学会論文集 B2, Vol. 75, I_19-I_24, 2019.

(Received June 30, 2020)
(Accepted August 28, 2020)

EFFECT OF SALTWATER INTRUSION ON WATER DISTRIBUTION AT THE CONFLUENCE OF CHIKUGO ESTUARY

Yu KANEKO, Neriezza OLAP and Katsuhide YOKOYAMA

To clarify the effect of saltwater intrusion on the freshwater distribution at the X-shaped confluence point of the Chikugo River estuary, cross-sectional flow velocity and salinity distribution were observed for one diurnal tidal cycle. This study made the following conclusions: (1) The estuary was well-mixed during spring tide and that the flow rate ratio and cross-sectional area ratio between the tributary and main channels are not significantly different; (2) Vertical distributions of velocity and salinity confirm saltwater retention at the confluence point of Chikugo and Hayatsue Rivers at the start of ebb tide; (3) These findings can be generally explained by the difference in river lengths considering this as the limiting morphometric parameter.