

筑後川感潮域における水理特性と物質輸送

HYDRAULIC CHARACTERISTICS AND SEDIMENT TRANSPORT IN THE ESTUARY OF CHIKUGO RIVER

平川隆一¹・速水祐一²・山本浩一³・横山勝英⁴

大串浩一郎⁵・濱田孝治⁶

Ryuichi HIRAKAWA, Yuichi HAYAMI, Koichi YAMAMOTO, Katsuhide YOKOYAMA,
Koichiro OHGUSHI and Takaharu HAMADA

¹正会員 博(工) 佐賀大学助教 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町 1 番地)

²非会員 博(農) 佐賀大学准教授 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町 1 番地)

³正会員 博(工) 山口大学准教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

⁴正会員 博(工) 首都大学東京准教授 都市環境学部都市環境学科 (〒192-0397 八王子市南大沢1-1)

⁵正会員 博(工) 佐賀大学准教授 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀市本庄町 1 番地)

⁶正会員 博(工) 佐賀大学講師 有明海総合研究プロジェクト (〒840-8502 佐賀市本庄町 1 番地)

The budget of suspended sediment (SS) in the Chikugo River estuary between the Chikugo-Oozeki Weir and the river mouth was estimated based on a detailed field survey in August, 2006. The shuttling survey along lateral transects at the mouth of the Chikugo River and the Hayatsue River with ship-borne ADCPs was conducted over 26 hours to estimate the net SS transport during a tidal cycle. The input of SS into the estuary from upstream and tributaries was also measured in the same period. The net downward SS transport through both river mouth during 2 tidal cycles (25 hours) was 3,850t/day. It was about 8.5 times larger than the total SS input into the estuary during the same period. The net SS fluxes at the mouth of the Chikugo river and Hayatsue River were 4,430t/day and -580t/day respectively. It indicates that sediments were transported into the estuary from the coastal sea in the Hayatsue River. The SS transport by the mean flow directed downward but the transport due to tide and tidal current was upstream. The mean water discharge in the Hayatsue River was about 5 times smaller than the Chikugo River. Thus the net upstream SS transport in the Hayatsue River would be caused by the dominance of the tidal transport. Note that, since the SS transport by the shear flow was not considered in this study, the downstream SS transport would be overestimated.

Key Words : Ariake Sea, Estuary, Suspended Sediment, Net Transport

1. はじめに

有明海湾奥部に流入する河川はいずれも長大な感潮域を持つ。こうした感潮河川では、有明海の大きな潮位差とあいまって、一潮汐間に海域から感潮河道に流入し、再び海に流出する水のボリューム（タイダルプリズム）が河川流量に比べて大きい。河川から海に流入する物質負荷量は、感潮域よりも上流で測定された流量と物質濃度から求めるか、あるいは原単位法で見積もられることが多い。しかし、感潮河道内で化学・生物変化を受ける^{1), 2), 3)}とすると感潮域上端と河口では流出量が大きく異なる可能性がある。海域に対する河川からの負荷量を評

価する場合には、このような感潮域における変化を適切に評価する必要がある。感潮河道内における正味の物質輸送量を求めるためには、潮汐の影響を考慮する必要がある。そこで本研究では、有明海奥部に流入する最大河川である筑後川を対象に、25時間連続した現地観測をおこなうことにより、潮汐の影響を除いた正味のSSフラックスを求めることを試みた。さらに、その結果を感潮域に流入するSSフラックスと比較することで、感潮域内のSS収支を求めた。物質によっては、上げ潮によって感潮河道内に輸送され、感潮域で異化あるいは堆積する。このことにより、ネットで見ると河川から海に流出するのではなく、海から河川に輸送される場合もあり得る⁴⁾（これを感潮域による海水の濾過効果と呼ぶことにす

る)。感潮域が長大な有明海湾奥部の河川では、このような効果はかなり大きい可能性がある。内湾の物質循環モデルを構築する場合、河川から海に供給される物質フラックスを境界条件の一つとして与える。それは河口で与えられる場合が多い^{5)~9)}。しかし、上記のことを鑑みると、感潮域が大きい河川の場合、それでは適切な境界条件を与えることになっていないかもしれない。その場合、新たに河口部の適切な取り扱い方を提案する必要がある。

本研究では、最初の試みとして、筑後川感潮河道における海水の濾過効果を現地調査とデータ解析によって、定量的に評価することを試みた。

2. 調査概要

有明海に流入する一級河川は、本明川、六角川、嘉瀬川、筑後川、矢部川、菊池川、白川、緑川があるが、本研究で対象とした河川は、筑後川である。筑後川は、その源を九重山塊および阿蘇外輪山に発し、高峻な山岳地帯を流下して日田市に至り、途中、玖珠川などの数々の支川と合流しながら、山間盆地や肥沃な筑後・佐賀両平野を貫流して、さらに、早津江川を分派して有明海に注いでいる。その流域は、熊本、大分、福岡、佐賀の4県にまたがっており、流域面積2,860km²（山地約70%、平地約30%）、幹川流路延長143kmの九州最大の河川である。現在、筑後川には河口から23kmに筑後大堰が設置されており、感潮域の上端となっている。

筑後川感潮域における1潮汐間の物質収支を求めるために、2006年8月28日から29日にかけて、26時間にわたって筑後川と早津江川の河口0k地点に於いて、流速と水質の横断反復観測を行った（河口調査、図-1）。同時に、感潮域上端および主要な支川の水質調査もおこなった（河川調査）。この期間は中潮であり、観測期間中は晴天で、風は弱く静穏であった。ただし、観測の10日前には台風第10号が九州に上陸したことによる降雨があり、前日の天候は雨であった。ただし観測期間にはそれらの降雨影響は小さく、観測期間中の瀬ノ下地点（豆津橋）の流量は平均127 m³/sであって、これは瀬ノ下地点の2003年における年平均流量程度に相当する。

河口調査では、河道に直交する測線上を繰り返し往復し、往路では流速を測定し、復路では水質測定および採水をおこなった。流速測定は測線上を約1ktでゆっくりと航行しながらおこない、船の舷側に取り付けたADCP（RD Instruments製、Workhorse 1200kHz）によって鉛直0.5m毎の流速を得た。水質測定は、同じ測線上に設けた5点の測点において、多項目水質計（アレック電子製、AAQ1183）を用い、水面から河床までの水温・塩分・濁度・クロロフィルa蛍光・DOの測定をおこなった。測定箇所は河道両岸と河道最深部、およびそれらの中間点

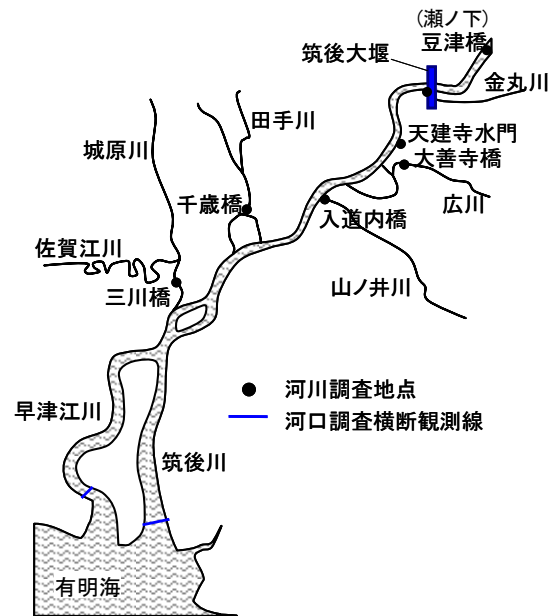


図-1 調査地点の概略。

である。ただし、水位が下がった場合には浅い測点では欠測となっている。また水質観測と同じ測点で、ペリポンプによる層別採水を行った。採水層は表層、中層（半水深）、底面+0.5mの3点である。採水試料はクーラーに保冷して実験室に持ち帰り、Whatman GF/Fフィルターを用いて濾過した。フィルターは、あらかじめ105℃で恒量になるまで乾燥させた後、秤量したものをを用いた。濾過したフィルターは105℃で恒量になるまで乾燥させた後に秤量し、濾過前の重量との差と濾水量からSS濃度を求めた。河川調査では、筑後川瀬ノ下地点に自記濁度計（アレックCompact-CLW）を設置して10分おきの計測を行ったほか、河川感潮域に流入する支川については多項目水質計（アレック電子製、Compact STD、YSIナノテック社、YSI 600QS）によって水温・濁度・塩分・クロロフィルa蛍光を測定すると同時に、採水を行った。流量は電磁流速計（KENEK社製）を用いて測定した。調査地点は筑後大堰（河口から約23km）よりも上流の豆津橋（同約25km）、筑後大堰付近に合流する金丸川下流端、大堰と河口の間に位置する天建寺水門（同約19km）、大善寺橋（同約18km、広川）、入道内橋（同約15km、山ノ井川）、千歳橋（同約12km、田手川）および三川橋（同約9km、城原川、佐賀江川）の7地点である（図-1）。支川については海水遡上の影響がない時間を選んで調査を行った。

3. 結果

(1) 河口調査

河口調査で得られたSS濃度と、同時に測定された濁度から、濁度とSS濃度の関係を求めた。その結果を図-2、

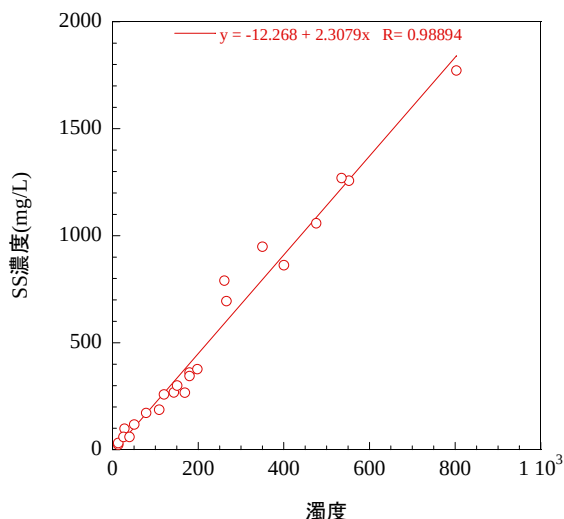


図-2 筑後川河口における濁度とSSの関係。

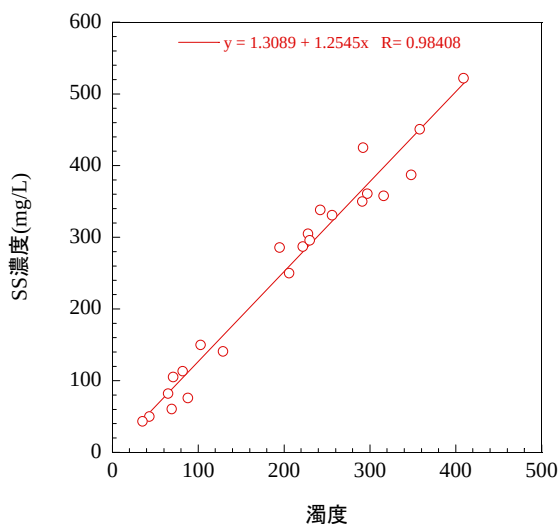


図-3 早津江川河口における濁度とSSの関係。

3に示す。筑後，早津江両感潮域河口とも相関係数は0.98以上あり，良好な相関関係が得られている。これらの図から，直線回帰によって濁度からSS濃度への換算式を導いた。なお，回帰式の係数が両河川で大きく異なるのは，図-2の濁度計はホルマジン検定であるが，図-3ではカオリン検定器を使用したためである。本論文ではこれ以降，河口調査の結果について，濁度からSS濃度に換算する際にはこの関係を用いた。

筑後川河口においては，1回の往復観測に5～10分を費やし，26時間の間に31回往復した。早津江川河口に於いては，1回の往復観測に3～6分を費やし，26時間の間に76回往復した。図-4に，往復観測によって得られた筑後と早津江両河口における断面平均流速の26時間の変動を示す。流下方向を正としている。両河口ともほぼ同位相であり，満潮時付近で断面平均流速はゼロとなっている。干潮時には河川自流量があるから，流量・流速は下流方向になる。干潮一時間後に憩流となる。断面平均流速の

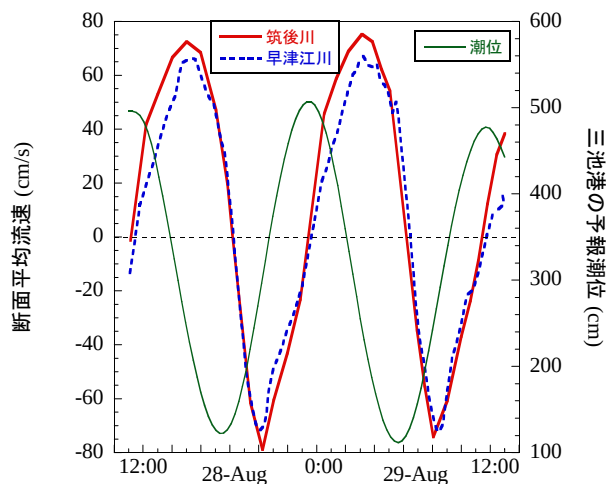


図-4 筑後，早津江川河口における26時間の断面平均流速。

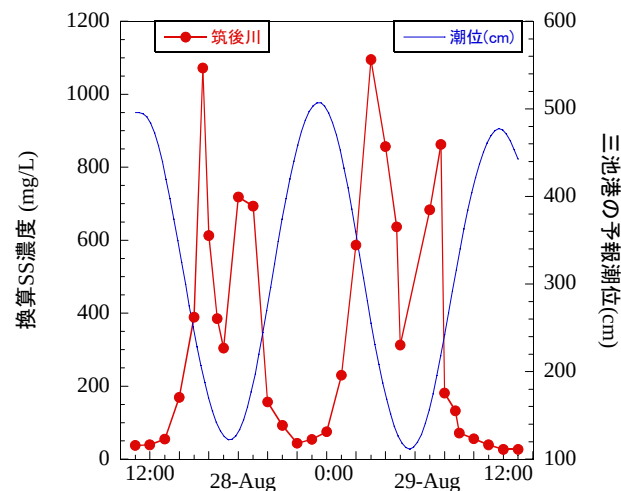


図-5 筑後川河口における26時間の換算SS濃度変動。

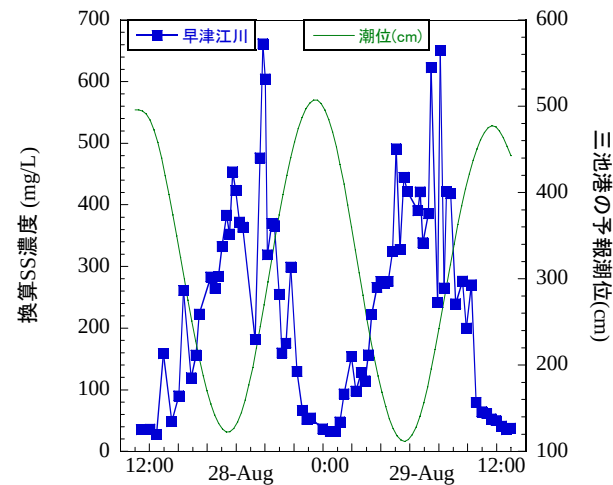


図-6 早津江川河口における26時間の換算SS濃度変動。

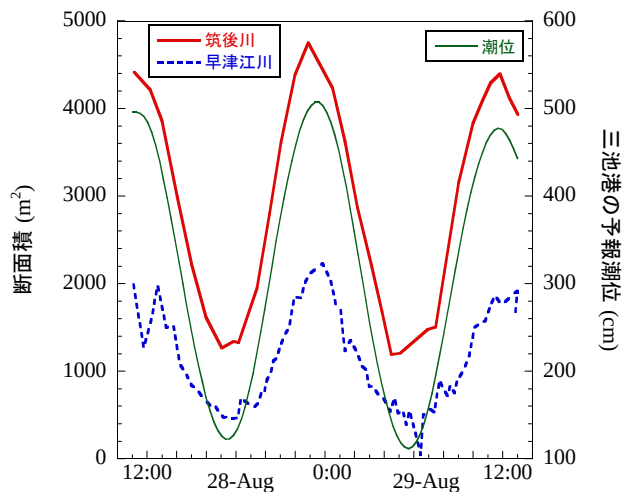


図-7 筑後、早津江河口における26時間の断面
積の変動。

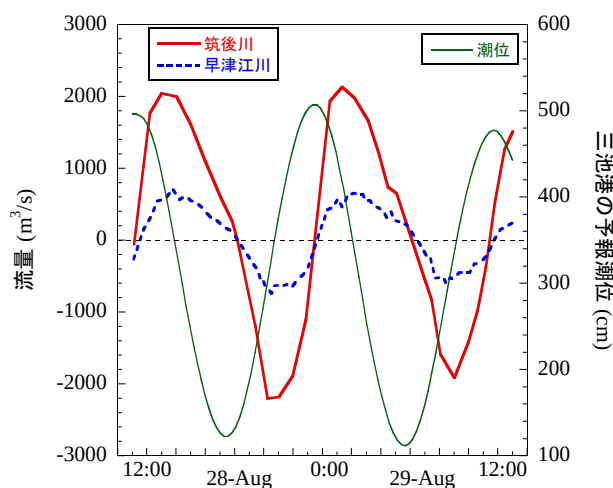


図-8 筑後、早津江河口における26時間の流量
変動。

時間微分の絶対値は両河口で下げ潮時にはほぼ等しいが、上げ潮時は筑後川河口の方が早津江川河口よりも大きい。最大流速は筑後川の方が早津江川よりも20cm/s程度速いことが分かる。

図-5および6は、図-2および3に示した回帰式を用いて、筑後と早津江両河口における26時間の濁度変化から得られる換算SS濃度変動を示したものである。いずれも断面内の平均値を示している。図-5の筑後川では下げ潮時と上げ潮時共に極大値が現れるが、下げ潮最強流時に於いて特に濃度が高く、最大で約1,100mg/lに達していることが分かる。換算SS濃度は満潮時に極小となったが、最低でも約50mg/lの濃度があった。図-6の早津江川では満潮から干潮にかけて、約20mg/lから500mg/l程度へと濃度は上昇して干潮時に極大値をとっている。そのあと少し濃度は下がるが、上げ潮時に急激に濃度は高くなり、再び極大を示している。干潮3時間後に濃度は急激に低下し

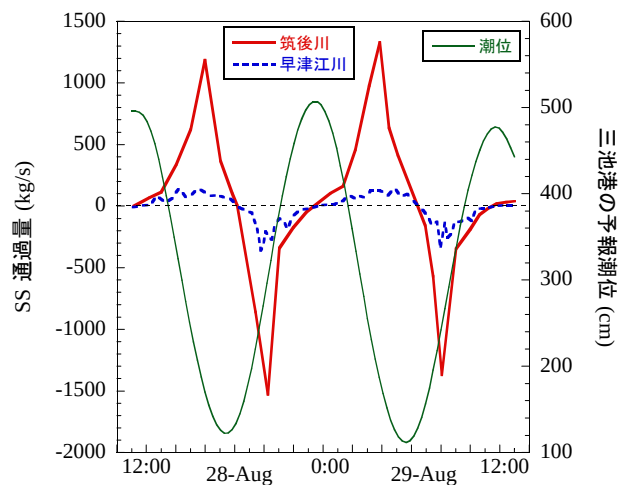


図-9 筑後、早津江河口断面でのSS通過量
の変動。

表-1 各調査地点平均流量、SS濃度・流入量

調査地点	日平均流量 (m^3/s)	SS濃度 (mg/L)	SS流入量 (t/day)
豆津橋	126.1	18.8	204.9
金丸川	5.3	94.1	43.2
天建寺水門	4.4	25.3	9.6
大善寺橋	3.0	14.2	3.7
入道内橋	5.5	24.4	11.6
千歳橋	3.7	61.4	19.6
三川橋	2.7	71.2	16.3

た。2つのSS濃度の極大値のうち上げ潮の方が高くなっており、この点は筑後川とは対照的であった。

図-7は、筑後と早津江の両河口における、ADCPの観測結果から得られた断面積の26時間の変動を示したものである。断面積は水位と同位相で変動しており、その範囲は筑後川で約1,200～4,800 m^2 、早津江川では約100～2,200 m^2 であった。

断面平均流速に断面積をかけることにより、各時刻における流量の変動を求めた。その結果を図-8に示す。感潮域から有明海へと流れ出る方向を正としている。潮位変化と比べると、断面平均流速と同様に約1/4波長遅れて流量は変化している。また、流量の絶対値の最大と最小値前後で流量変化は非対称になっており、時間変化の絶対値は上げ潮時の方が急激であることがわかる。変動の範囲は筑後川で±約2,200 m^3/s 、早津江川では±約600 m^3/s であった。

断面平均換算SS濃度と流量をかけることにより、各時刻における河口断面を通過するSS通過量を求めた。その結果を図-9に示す。感潮域から有明海へと流れ出る方向を正としている。筑後川では、SS通過量は満潮時にはほぼゼロになり、単調に増加して干潮の約1.5時間前に極大となった。その後、SS通過量は減少に転じ、干潮過ぎ

には感潮域に流入するようになった。上げ潮の途中でSS通過量は極小となり、再び増加に転じた。このような変化は基本的には早津江川でも同様であった。観測期間に於いて、筑後川河口から流出するSSフラックスは流下方向を正として1,300kg/s～1,500kg/sの範囲にあった。また、早津江川河口については100kg/s～300kg/sであった。

(2) 河川調査

本川、感潮域へ直接流入する支川の流量、SS濃度、日平均SS負荷量を表-1に示す。筑後本川の日平均流量は、堰上流の豆津橋の計測結果から126.1m³/sであった。これに支川からの流量を加えると、本調査時に感潮域へと流入した日平均流量は約150m³/sであったことが分かる。筑後川本川から流入するSS負荷量は豆津橋に設置した濁度計の測定値から換算したSS濃度と流量の積を観測時間の間平均して算出した。平水時のため、筑後川本川のSS濃度は14mg/L～60mg/Lと低かった。支川の方がSS濃度は高い場合があった。支川について詳しく見てみると、左岸の福岡県側から流入している支川（天建寺排水、広川、山ノ井川）のSS濃度は約14～25mg/Lであるのに対して、それよりも下流に位置する、右岸側の佐賀県側から流入している支川（田手川、城原川・佐賀江川）のSS濃度は約60～70mg/Lである。今回の計測箇所では、感潮域に流入するSS濃度は右岸側のほうが左岸側よりも高くなっていた。

表-1より、本調査日程における感潮河道内に流入する日平均SS負荷量を算定したところ309t/dayとなった。

(3) 収支計算

筑後、早津江両河口断面における半日周期の2周期の長さで平均した正味のSS輸送量を図-9から求めた。平均期間は、観測開始から約25時間とした。これは両河口断面を通過する流量を観測開始から積分して、上流側の感潮域に流入する流量とほぼ等しくなる期間である。その結果、筑後、早津江両河口合わせて約3,850t/dayのSSが河口断面を通して感潮河道から有明海へ流出していることが見積もられた。このうち、筑後河口からの流出量が4,430t/day、早津江河口からの流出量が-580t/dayであった。それに対して、感潮河道内に流入するSS負荷量は309t/dayであったので、差し引き3,541t/dayのSSが感潮河道の浸食によって海域に流出していたことになる。これは負荷量の約8.5倍に相当する。なお、この期間における筑後河口における平均流量は143m³/s、平均SS濃度は380mg/Lであった。また、早津江河口における平均流量は29m³/s、平均SS濃度は250mg/Lであった、したがって、日平均成分によるSSフラックスは、筑後河口で4,690t/day、早津江河口で630t/day、合計5,320t/dayとなる。これは全のフラックスの約1.4倍（筑後河口では約1.1倍、早津江河口では約-1.1倍）である。ネットのSSフラックスから日平均成分によるフラックスを引いたものを潮汐

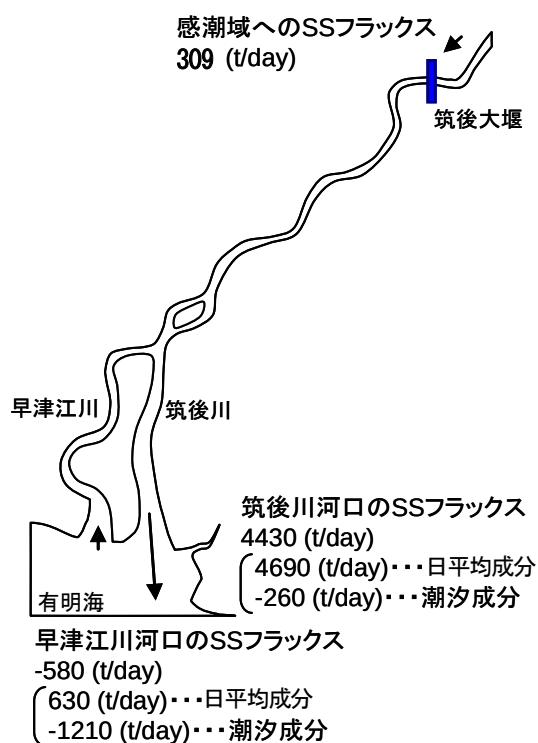


図-10感潮河道のSS収支。

潮流によるSSフラックスとすると、筑後河口で-260t/day、早津江河口で-1,210t/day、合計-1,470t/dayとなる。これは潮汐潮流によってSSが両感潮河道に流入することを示しており、その量は早津江河口では筑後河口の約4.7倍であった。以上の結果を図に示すと図-10のようになる。筑後川感潮域では、上流と支流以外に早津江川からもSSが流入しており、流出するのは筑後川河口だけであることが分かる。

4. 考察

本研究の結果から、潮汐周期について平均したネットのSSフラックスは、筑後川河口からは流出となったものの、早津江川河口からは流入となっていることがわかった。SSフラックスの内訳を調べると、日平均成分によって流出している一方で、潮汐潮流によって流入となっていた。早津江川は筑後川に比べると河川流量（平均流量）が少なく、約1/5である。そのために、日平均成分によるSS輸送量が小さく、潮汐潮流による輸送が卓越するため、海域から感潮域にSSが流入しているものと考えられた。

筑後、早津江の両河口域では、上げ潮、下げ潮の最強時にSS濃度が極大になることが図-5、6から分かった。これは潮流によって底質の再懸濁が生じ、その結果水中のSS濃度が上昇したことを示唆している。感潮域への流入水に比べると、河口の水ははるかに高いSS濃度を示すが、これは潮流による底質の再懸濁の影響が大きいと考

えられる。筑後川，早津江川河口の断面平均流速は，それぞれ75～80cm/s，70～70cm/sの範囲で変動していたが，それに対して潮汐の影響を除去した平均流速は5cm/s，3cm/sに過ぎない。このような場では，平均流が多少変動しても，再懸濁量にはあまり影響しない。しかし，平均流の変化はSS輸送量には大きく影響する。すなわち，SS濃度に変化がないとしても，平均流速が2倍になれば，移流によって海域に流出するSS量は2倍になるからである。本観測時期における平均流量は瀬ノ下において127m³/sであった。これは平水流量の約2.4倍である。河口におけるSS濃度に変化がないと仮定し，感潮域に流入する全流量の変化が瀬ノ下における流量の変化に比例するとするならば，もし流量が平水流量であれば，移流によって海域に流出するSS量は約2,220t/dayであったと考えられる。その場合のネットのSS輸送量は，潮汐潮流による輸送量が変わらないとすると，約750t/dayとなり，感潮域に流入するSS負荷量と同じオーダーになる。

なお，一般にエスチャリーにおける流れについては，潮流，断面平均した時間平均流を除くと，密度流によって上層で流出，下層で流入という鉛直循環構造が存在する⁹⁾。一方で，SS濃度については河床に近づくほど高濃度，表面近くほど低濃度になる傾向がある。したがって，このような鉛直循環流によるSS輸送は上流向きになると考えられる。今回の見積もりは，流速・物質濃度を断面で平均して計算した結果であり，断面内の速度シアによる輸送は考慮されていない。そのために，こうした鉛直循環流によるSS輸送は評価されていない。こうしたことから，今回のSS収支計算では，上流向きのSS輸送量が過小評価されており，海域へのSS流出量が過大に見積もられている可能性がある。また季節変動も捉え切れていない。これらについては，今後さらに検討を加える予定である。

5. 結論

本研究では，筑後川感潮域における潮汐周期を通したネットの物質収支を求めるために現地観測を行った。その結果，潮汐周期について平均すると3,850t/dayのSSが筑後と早津江両河口を通過して有明海に流出していた。これは同期間における感潮域への流入SS負荷量の約10倍

であった。このうち，筑後川河口からは4,430t/dayが流出していたが，早津江川河口からは580t/dayの流入となっていた。これは，早津江川の平均流量が少なく，潮汐潮流による輸送が卓越するためと考えられた。なお，今回の見積もりでは速度シアの効果を考慮していないため，下流への流出量が過大評価されている可能性がある。

謝辞：本研究を遂行するにあたり，現地観測の実施にご協力いただいた佐賀大学有明海総合研究プロジェクトの吉野健児博士，加(槻木)玲美博士（現 東北大学大学院），佐賀大学理工学部都市工学科の野口剛志氏および学生諸氏に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 宗宮 功 編著：自然の浄化機構，技報堂出版，1990.
- 2) 楠田哲也 編著：自然の浄化機構の強化と制御，技報堂出版，1994.
- 3) 西条八束，奥田節夫 編：河川感潮域 ―その自然と変貌―，名古屋大学出版会，1996.
- 4) 宇野誠高，横山勝英，森下和志，高島創太郎，大角武志：熊本県白川河口域における土砂動態，海岸工学論文集，52，pp.561-565，2002.
- 5) 川西澄，森泰二，牛嶋健詞：広島湾北部海域における土砂輸送解析，水工学論文集，第49巻，pp.1369-1374，2005.
- 6) 山中亮一，西田修三，中辻啓二：成層の発達した海峡の流動構造と内部波の発生機構，水工学論文集，第47巻，pp.1255-1260，2003.
- 7) 山根伸之，寺口貴康，中辻啓二，村岡浩爾：大阪湾における水質の季節変動に関する数値実験，水工学論文集，第42巻，pp.739-744，1998.
- 8) 滝川清，山田文彦，林満：有明海における流況特性と環境特性に関する研究，科研費報告書(有明海河口域の自然環境に及ぼす陸水流入の影響)，pp.3-18，1998.
- 9) 三輪浩，池野英利：閉鎖性海域の潮流解析における開境界条件としての潮位変動の設定法と播磨灘への適用，応用力学論文集，Vol.10，pp.873-879，2007.
- 10) Officer, C. B.: Physical oceanography of estuaries, John Wiley & sons, 1976.

(2008. 9. 30受付)