

超音波流速計を用いた感潮河川・堀川における懸濁物質の動態に関する研究

指導教員 富永 晃宏 教授

19418576 郭 緯

1.はじめに

水質問題を抱えている名古屋市を流れる感潮都市河川・堀川では様々な研究活動が行われてきた。潮汐による流動特性についてはかなり明らかになってきたが、ヘドロとなる懸濁粒子(SS)の分布特性について未解明の点が多く、潮汐変動による塩水先端部分の移動に伴うSSの増加や移流プロセスを明らかにする必要がある。これまで、SS濃度の測定方法としては、採水したものを実験室で分析するのが一般的であったが、感潮域におけるSSの空間分布は不均一性が強く時間的な変動も大きいので、採水などによる間欠的な測定から水中に存在するSSの動態を把握することは困難である。そのため、本研究はSSの分布を連続的に捉えることを目的として、超音波ドップラー流速計を用いて、堀川におけるSS濃度分布特性について検討し、また数値計算によるシミュレーションを行い、SS輸送量についても検討したものである。

2. 現地観測

(1) 定点観測による懸濁物質(SS)の推定式の算出

2008年10月29日と12月10日に名古屋市堀川河口から7.59kmの松重開門付近において、Sontek製超音波ドップラー流速計(River cat)を固定設置し、3分間で反射強度を測定すると共に水面から1mと2m水深の位置で1時間と10分間おきに採水を行った。それぞれの潮位差は146cmと111cmである。

超音波ドップラー流速計で流速と共に測定される反射強度は水中のSS濃度と相関がある。これを利用し、水中SS濃度を推定する試みを行った。

水中における音波の伝搬損失は次式で表される¹⁾。

$$T = k \log r + 2\alpha r \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 T : 伝搬損失(count), r : センサーからの距離(m), k : 拡散損失係数, α : 吸収係数である。

反射強度からSS濃度変換式は次式で表される。

$$40 \log C = I - B + T \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 C : SS濃度(mg/l), I : 反射強度(count), B : 基準音圧(count)である。音響強度は「count」という単位で表され、1count=0.43dBである。従って、SS濃度の推定式は次式のようになる。

$$40 \log C = I - B + k \log r + 2\alpha r \quad \dots\dots(3)$$

各係数のうち、 α は計測器(River cat)の仕様によると、周波数は3000KHZの場合は塩分濃度が0から3.5%

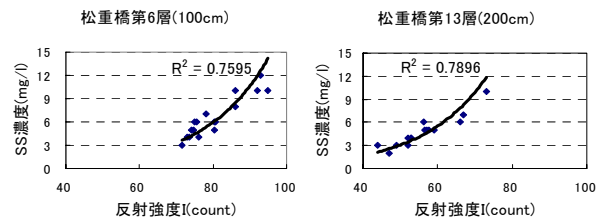


図-1 反射強度とSS濃度の相関

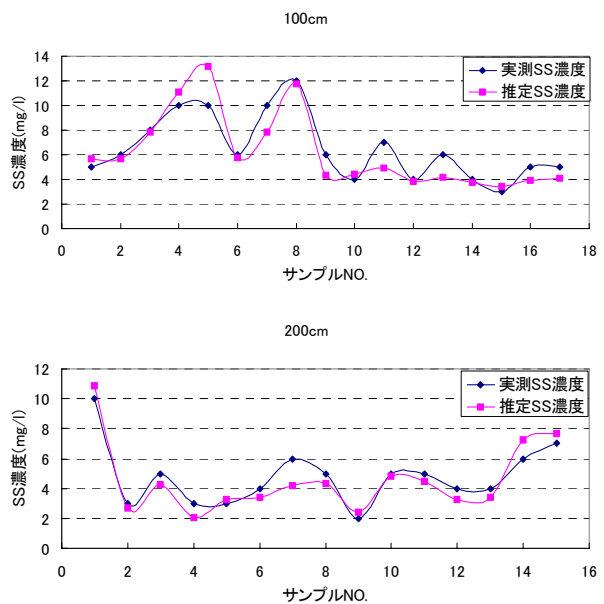


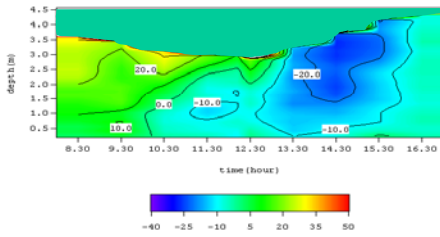
図-2 実測SSと推定SSの比較

間で2.4~2.5に変動するものである。本研究では α として2.4を用いた。

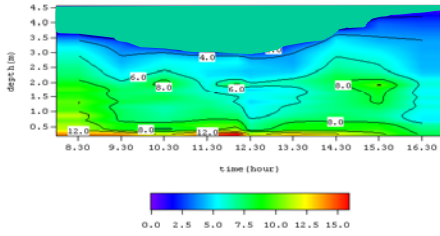
残りの係数 B と k は、現段階で定式化出来ていないため、現場で採水を行い、実験室に持ち帰りSS濃度の分析を行うことにより算出した。図-1に反射強度と実測されたSS濃度の関係を示す。水面から1mの実測SS濃度値を用いて B を算出した後、2mの値から k を決定した。推定式の精度をあげるために、標準偏差法を用いて、 B と k の再計算を行った。その結果、次式が得られた。

$$40 \log C = I - 55 + 46 \log r + 4.8r \quad \dots\dots(4)$$

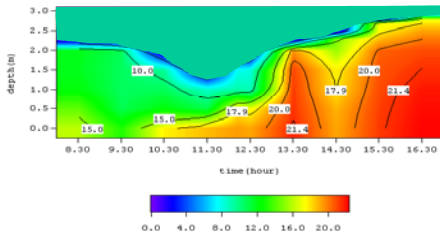
得られたSS濃度推定式を用いて、反射強度からSS濃度の分布を計算すると、図-2のようになった。計算結果と実測値をよく再現できていることを確認した。また、2008年11月14日の五条橋の観測データを用いて、式(4)によって計算した結果とSS実測値の平均誤差が0.6(mg/l)となった。以上の結果から超音波ドップラー流速計によりSS濃度推定できることが示された。



(A) 流速時間変化 (cm/s) 松重橋

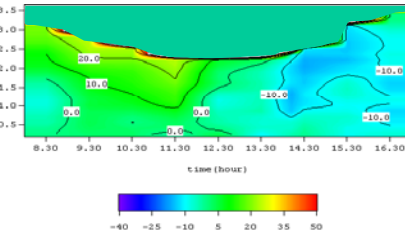


(B) SS 時間変化 (mg/l) 松重橋

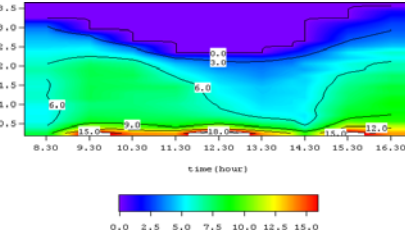


(C) 塩分時間変化 (psu) 松重橋

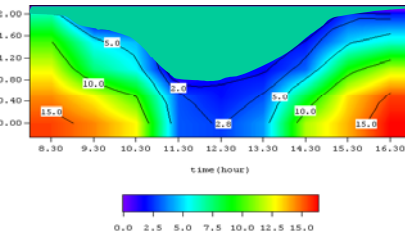
図-3 2008年11月13日観測結果



(A) 流速時間変化 (cm/s) 五条橋

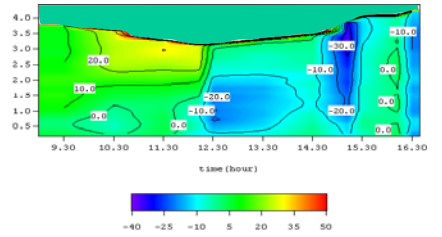


(B) SS 時間変化 (mg/l) 五条橋

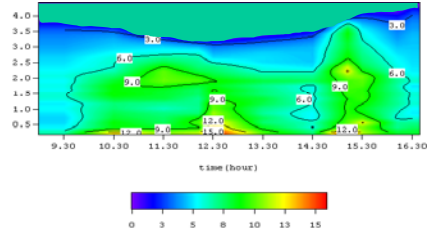


(C) 塩分時間変化 (psu) 五条橋

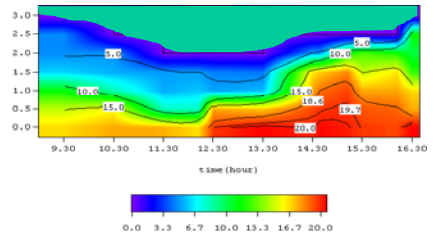
図-4 2008年11月14日観測結果



(A) 流速時間変化 (cm/s) 松重橋



(B) SS 時間変化 (mg/l) 松重橋



(C) 塩分時間変化 (psu) 松重橋

図-5 2008年11月28日観測結果

表-1 観測条件

観測地点	観測日時	潮位差(cm)	時間間隔	計測項目	観測前日当日降雨
松重橋	2008/11/13 8.30~16.30	164	1時間おき	流速・反射強度 ・塩分など	なし
五条橋	2008/11/14 8.30~16.30	160	1時間おき	流速・反射強度 ・塩分など	なし
松重橋	2008/11/28 9.30~16.30	125	1時間おき	流速・反射強度 ・塩分など	あり, 前日最大5.5mm/h

(2) River Cat による鉛直分布の計測

計測法は、River Cat をロープでゆっくり引っ張り、ほぼ直角で川の横断方向に移動させながら計測すると共に、多項目水質計 WQC-24 (東亜 DKK 製) で塩分など水質項目を計測する。観測条件は表-1 に示す。2008年11月28日の観測では前日に最大5.5mm/hの降雨があった

観測結果は図-3, 4, 5 それぞれの(A)流速, (B)SS, (C)塩分の順に示す。観測結果から見ると、堀川におけるSS濃度の分布は常に底層が中・上層より高い傾向がみられる。下げ潮時より上げ潮時のほうがSS濃度変化は激しいことがわかった。また、上げ潮から満潮にかけてのある時点における流速が急増加するとともにSS濃度が上昇することからSS濃度の変化は流速との相関があると考えられる。下げ潮の終わりから上げ潮の始まりの間では、低層よりSS濃度が上昇するのが見られる。その時点、塩分濃度も上昇し始めることから、塩水楔の先端部が通過することによって、乱れが大きくなり、ヘドロの巻き上がりが起こるのが原因と考えられる。降雨の影響については、最大5.5mm/h

の降雨は塩水濃度を抑えただけではなく、全体的にSS濃度の増加に影響を与えたことがわかる。特に塩水楔の通過と遡上流の速い流れはSS変化への影響が平常時より明らかである。これは大量のSSを含んだ越流水が満潮などの流れの遅い時間帯にいったん沈降し影響されやすい堆積層となったことが原因と考えられる。

3. 数値計算によるSS動態のシミュレーション

(1) 基礎方程式と入力条件

鉛直二次元モデルを用いて堀川の懸濁物質流動の再現を試みた。水路幅平均の基礎方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial(bu)}{\partial t} + \frac{\partial(buu)}{\partial x} + \frac{\partial(buw)}{\partial z} = -gb \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gb(H-z)}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial(b\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(b\tau_{xz})}{\partial z} \quad (5)$$

$$\frac{\partial(bw)}{\partial t} + \frac{\partial(buw)}{\partial x} + \frac{\partial(bww)}{\partial z} = -gb \frac{\partial H}{\partial z} - \frac{gb(H-z)}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial(b\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(b\tau_{zz})}{\partial z} \quad (6)$$

$$\frac{\partial(bcl)}{\partial t} + \frac{\partial(bucl)}{\partial x} + \frac{\partial(bwcl)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial(bcl)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial(bcl)}{\partial z} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial(bss)}{\partial t} + \frac{\partial(buss)}{\partial x} + \frac{\partial(bwss)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial(bss)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial(bss)}{\partial z} \right) + EA + GA \quad (8)$$

$$\frac{\partial(bu)}{\partial x} + \frac{\partial(bw)}{\partial z} = 0 \quad (9) \quad H = \frac{P}{\rho g} + z \quad (10)$$

$$\rho = \rho_T + 0.0074 S(\%) \quad (11)$$

$$S(\%) = 0.03 + 1.805 cl(g/l) \quad (12)$$

$$R_i = -\frac{g(\partial\rho/\partial z)}{\rho_0(\partial u/\partial z)^2} \quad (13)$$

$$v_{tz} = v_{t0} \cdot \exp(-1.5R_i), D_z = D_{z0} \cdot \exp(-3.0R_i) \quad (14)$$

ここに、 u : 主流速 (正が順流), v_{tx}, v_{tz} : 渦動粘性係数, w : 鉛直流速 (正が上昇流), cl : 塩化物イオン濃度, P : 圧力, D_x, D_z : 渦拡散係数, ss : 懸濁物質濃度, b : 水路幅, A : 底面積, E : 巻き上げフラックス, G : 沈降フラックスである. 計算には, σ 座標系を用いた. 下流端に名古屋港の潮位データを与えることで水位変化をさせ, 水面の圧力に対応した水位を定めた後, 水位を等間隔に分け, z 座標の更新を行っている. また, 塩水遡上を再現するために, 式(7)の物質収支則と式(12)の密度に関する状態方程式を用いた. なお v_{tx}, v_{tz} は成分による鉛直混合抑制効果を表現するために式(13)の局所リチャードソン数を用いて式(14)のように変化させた. 更に, SS 濃度の分布を再現するために, 式(8)の SS 収支則を用いた. ここで, EA は巻き上げフラックスであり, GA は沈降フラックスである. E および G は以下のように与えた.

$$E = 0.001 \left(\frac{\tau^2}{\tau_e^2} - 1 \right)^{1.7}, G = 0 \quad (\tau \geq \tau_e)$$

$$E = 0, G = 0 \quad (\tau_d < \tau < \tau_e)$$

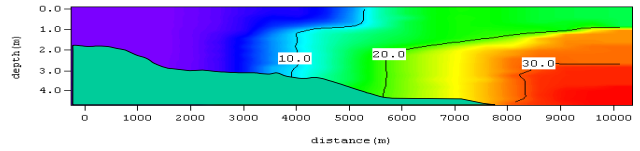
$$E = 0, G = -w_0 C \quad (\tau < \tau_d)$$

w_0 は沈降速度, τ はせん断力, τ_e は巻き上げの限界せん断力, τ_d は沈降の限界せん断力である. 堀川の浮遊物の沈降試験より $w_0 = 2.56 \times 10^{-4} (m/s)$ を, ヘドロを下水汚泥 ($\tau_e = 0.03 \sim 0.08 (N/m)$) と同様の挙動を示すと仮定し $\tau_e = 0.07 (N/m)$ を, 浮遊物の沈降条件を流速が約 $10 cm/s$ 以下であると仮定し $\tau_d = 0.005 (N/m)$ を用いた.

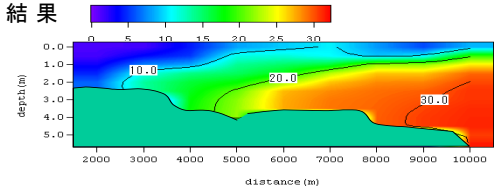
(2) 再現性に関する検証

本数値計算では河口から 13.5km 猿投橋地点を 0m, 河口から 3.5km 新堀川合流地点を 10000m として計算対象となる区間を選定している. また, 最も堀川の流動形態の特徴と似ていた 24 時間分に着目し, 計算結果と現地観測結果を比較し, 再現性を検討する.

まず, 塩分の縦断分布について述べる. 図-6 に塩分濃度縦断分布の計算結果及び観測結果を示す. これらを比較すると, 塩分の分布や混合形態が同じ傾向を示している. また塩水楔の先端部が 3000m~6000m の間に往復しており, 再現性が高いといえる. 図-7 に納屋橋地点における主流速の鉛直分布時間変化と現地観測結果を示す. これらを比較すると, 上げ潮に全層にわたり逆流が発生し, 下げ潮時には表層付近の流速が最大になる傾向が同様のため, 流速の再現性は妥当といえる. 図-8, 9 にそれぞれ五条橋及び松重橋における SS 濃



(a) 計算結果



(b) 観測結果

図-6 塩分濃度縦断分布

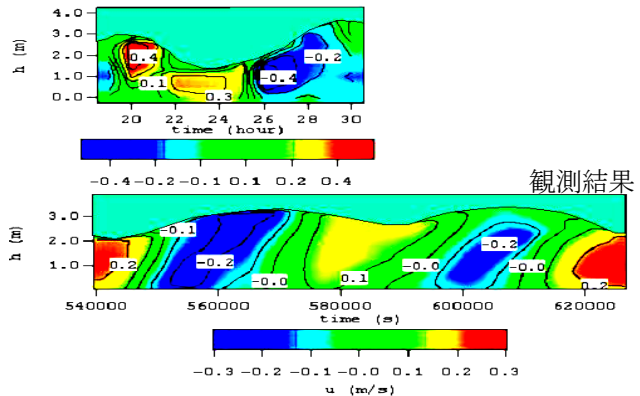
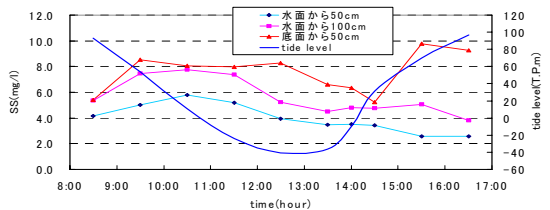
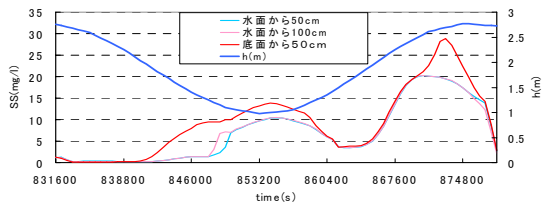


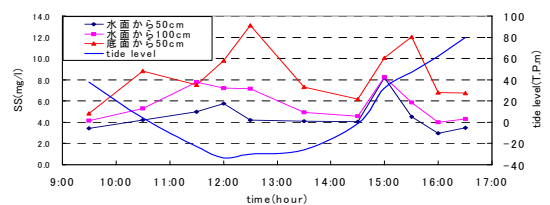
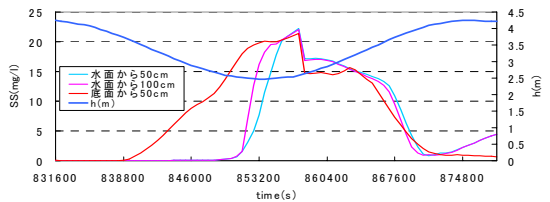
図-7 主流速縦断分布

計算結果



(上, 計算結果, 下, 観測結果)

図-8 五条橋における SS 濃度時間変化



(上, 計算結果, 下, 観測結果)

図-9 松重橋における SS 濃度時間変化

度変化の計算結果と観測結果を示す。両橋における SS の計算結果を見ると、低層の SS 濃度が高いこと干潮につれ SS 濃度が低層より急上昇することと上げ潮のある時点で SS 濃度が上昇することわかる。計算値は観測値と多少の差があるが、SS 濃度の上昇する傾向は二つの山型の波形である点で両者が似ている。そのため、SS 濃度分布の再現性が妥当であると考えられる。

(3) SS 輸送量に関する検討

数値計算の結果を用いて、堀川において発生した SS が縦断方向にどの程度輸送されるかと堀川において一番 SS が溜まりやすい区間について検討を行った。SS フラックスの計算法は、流量に SS 濃度を掛け合わせ、コントロールボリューム毎に順流方向を正、遡上流方向を負として算出し、それらを一断面において積分することで求めるものである。取り上げた時間は、先述の 24 時間分である。図-10 は潮位と上流の巾下橋から下流の白鳥橋までの SS フラックス比較図である。比較図をみると、巾下橋、五条橋は下げ潮時より上げ潮時の SS フラックスが多いが、納屋橋、天王橋、岩井橋、松重橋、住吉橋はほぼ同程度であることがわかる。下げ潮においては天王橋の SS フラックスが一番多いことがわかる。また、上げ潮においては上流である巾下橋の SS フラックスが一番多いことがわかる。橋と橋の間では SS フラックスの差を下げ潮と上げ潮において、それぞれ算出した。表-2 は上流の SS フラックスから下流の値を引いた結果である。①は計算した満潮から干潮までの下げ潮の時間帯である。②は干潮から満潮までの上げ潮の時間帯である。そして、下げ潮時に SS フラックス差が正となった場合は SS が溜まりやすいと判断し、逆に負となった場合は溜まりにくいと判断する。上げ潮の場合は同様である。結果から下げ潮時に天王橋から住吉橋の間は SS が溜まりやすい傾向出てくるが、天王橋から岩井橋の間はかなり高い値が得られた。上げ潮時に下げ潮と違って、塩水楔先端部が通過するによる SS の巻上げ・上流への輸送などが発生するため、上流の五条橋から松重橋の間は溜まりにくい傾向が見られた。その中、五条橋と納屋橋の間及び天王橋と岩井橋の間は高い値が得られた。そして、①と②の SS フラックスを全体から見ると、松重橋より下流の区間は SS が溜まりやすいところであると考えられる。

4. おわりに

超音波流速計を用いて、堀川における SS 濃度の推定を試みた。堀川における SS 濃度分布の特性を現地観測および数値シミュレーションを用いて、検討を行った。潮汐流動による塩水の往復することと流速の急増加は平常時に SS 分布に大きい影響を与えることがわかった。また、数値計算よると松重橋より下流の区間は SS が溜まりやすい場所であると考えられる。今

表-2 SS フラックス差

橋名	①満潮～干潮 831600(s)～853200(s)	下げ潮時 SSが溜まる傾向	②干潮～満潮 853200(s)～878400(s)	上げ潮時 SSが溜まる傾向
巾下橋～五条橋	-648.2	溜まりにくい	620.1	溜まりやすい
五条橋～納屋橋	-1916.3	溜まりにくい	-942.0	溜まりにくい
納屋橋～天王橋	-347.9	溜まりにくい	-398.3	溜まりにくい
天王橋～岩井橋	820.7	溜まりやすい	-869.2	溜まりにくい
岩井橋～松重橋	262.0	溜まりやすい	-585.0	溜まりにくい
松重橋～住吉橋	422.4	溜まりやすい	217.0	溜まりやすい

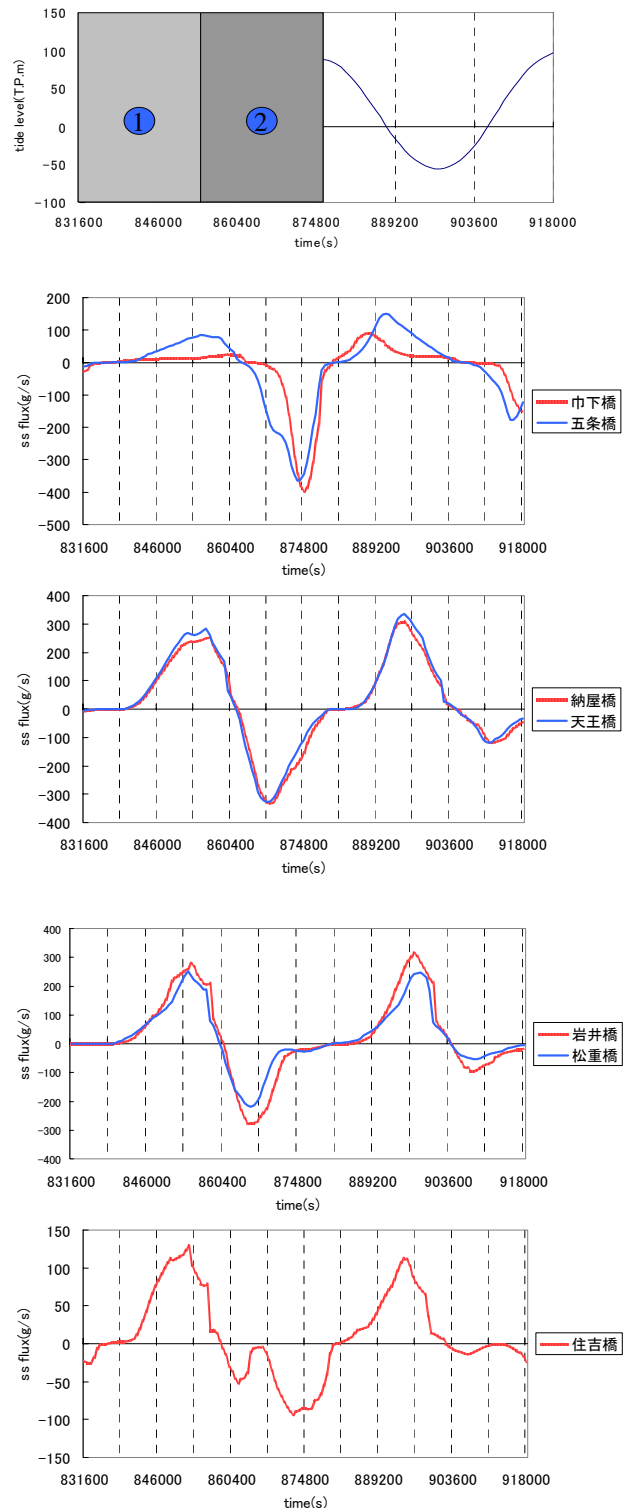


図-10 計算潮位と各橋 SS フラックス比較図

後、現地調査を続け、SS の組成と粒径の判明が必要である。

参考文献：1) 横山勝英・藤田光一：多摩川感潮域の土砂動態に関する研究, 水工学論文集, 第 45 巻, 2001