

感潮都市河川・堀川における濁質流動に関する研究

指導教員 富永 晃宏 教授

学籍番号 18418527 佐々木 高士

1. はじめに

名古屋市を流れる感潮都市河川・堀川は水質を改善するために様々な活動が行われている。しかし、自己水源を持たず、未処理の排水が流入するなど様々な要因により有効な水質改善策は施されていない。浄化のためには、堀川の汚濁源を突き止めその分布や挙動を正確に把握する必要がある。本研究は、堀川の水質汚濁要因の一つである水中の浮遊物質（SS）に着目し、現地観測と数値計算シミュレーションを用いて、SSの挙動を明らかにすることを目的とするものである。

2. 堀川における濁質計測

現地観測は、**図-1**に示す地点において i) 濁質の鉛直分布時間変化の計測、ii) 多項目水質計を用いた底層濁度の長期定点観測の2種類を実施した。以下では、観測結果から、堀川において最もよくみられた濁質流動の特徴を表しているものを挙げる。

まず、i) について述べる。SS濃度は採水した水をJIS K 0101の工業用水試験方法に基づいて計測し、可能であれば多項目水質計（東亜DKK製）を用いて塩分と濁度を、流速計（Sontek製River CATおよび電磁流速計）を用いて流速を測定した。観測回数6回のうち最も特徴が見られた**表-1**に示す条件での結果を以下に示す。**図-2**は、2007年7月18日の景雲橋・納屋橋・新州崎橋におけるSS濃度の鉛直分布時間変化である。いずれの観測場所においても上潮のはじめに底層でSS濃度が上昇していることが見て取れる。

次に、ii) について述べる。水質計を川底から約30cmの位置に設置し、一定期間底層濁度を計測した。観測回数10回のうち最も特徴が見られた**表-2**に示す条件での結果を以下に示す。**図-3**は2007年11月23日～29日の中橋における水位と濁度、塩分と濁度の関係である。濁度は上潮時に塩分が上がりはじめると急上昇し、水位差が大きくなるほど数値が高くなっている。一方で、満潮から干潮の間では大きな変化は見られない。この特徴から、濁度は底層において、塩水楔の先端部が通過する際の乱れにより上昇すると考えられる。また、**図-4**は2007年3月31日～4月5日の中橋における水位と濁度、降水量と濁度の関係である。計測条件を**表-2**に示す。降雨後に濁度が急上昇しているが、その後は平常時と同様の傾向を示している。これは、合流式下水道雨天時越流水（CSO）に含まれる濁質の影響と考えられる。

i), ii)の観測結果から、堀川における濁質濃度は、平常時には上潮時の底層の乱れおよびせん断力の増加によりヘドロが巻き上がるため上昇し、潮位差が大き

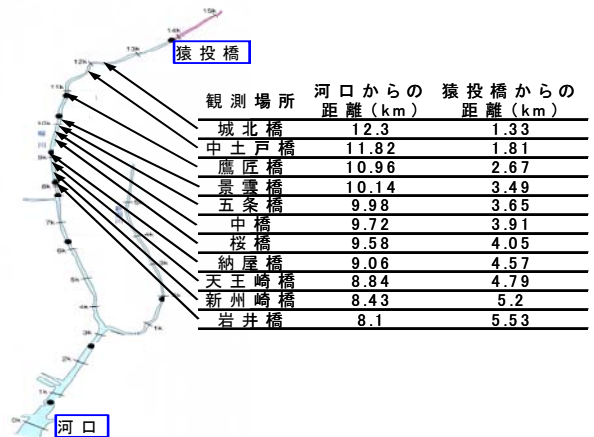


図-1 観測場所

表-1 SS濃度計測条件

日時	潮位差	採取場所	観測日および直前の降雨	濁質項目	採取時の船の通過
7月18日 9:00～19:00	1.91m	景雲橋 納屋橋 新州崎橋	7月17日 最大 9.5mm/h	SS濃度	新州崎橋 19:00

表-2 濁度定点観測計測条件

日時	採取ポイント	2mm/h以上の降雨	濁質項目
2007年3月31日 ～4月5日	新洲崎橋 中橋	3月30日:最大5.0mm/h 3月31日:最大13mm/h	濁度
2007年11月23日 ～11月29日	中橋	2mmを越える降雨なし	濁度

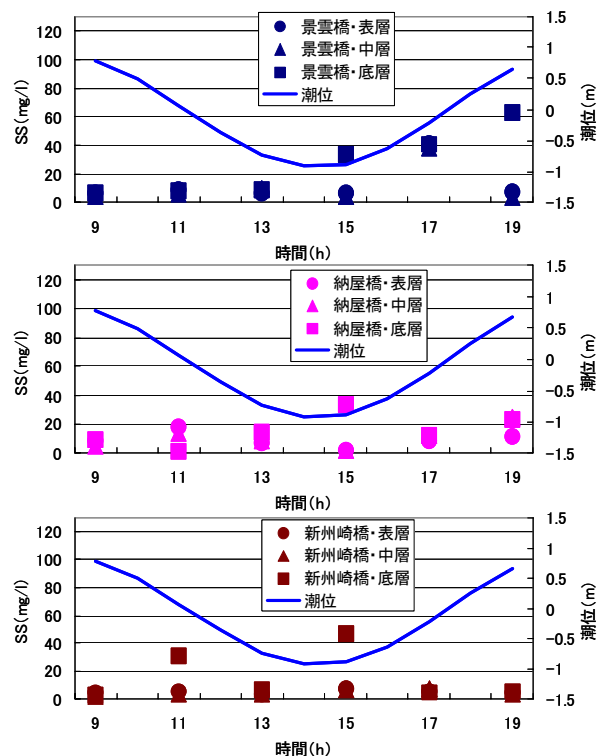


図-2 観測結果 (上: 景雲, 中: 納屋, 下: 新州崎橋)

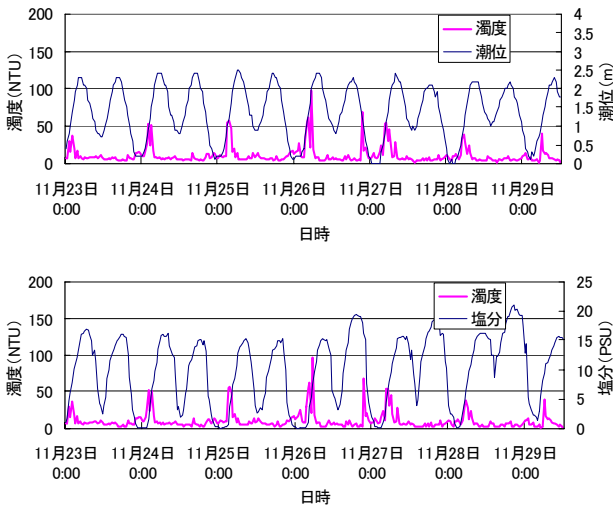


図-3 濁度との関係 2007. 11. 23~29 (上:水位, 下:塩分)

いほど数値が高くなる。また、まとまった降雨の時にはCSOの影響で濁質濃度が急上昇すると考えられる。

3. 濁質を付加した鉛直二次元数値シミュレーション

3.1 基礎方程式

鉛直二次元モデルを用いた堀川の濁質流動を再現するために、水路幅平均の基礎方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial(bu)}{\partial t} + \frac{\partial(buu)}{\partial x} + \frac{\partial(buw)}{\partial z} = -gb \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gb(H-z)}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial(b\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(b\tau_{xz})}{\partial z} \quad (1)$$

$$\frac{\partial(bw)}{\partial t} + \frac{\partial(buw)}{\partial x} + \frac{\partial(bww)}{\partial z} = -gb \frac{\partial H}{\partial z} - \frac{gb(H-z)}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial(b\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(b\tau_{zz})}{\partial z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(bcl)}{\partial t} + \frac{\partial(bucl)}{\partial x} + \frac{\partial(bwcl)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial(bcl)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial(bcl)}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial(bss)}{\partial t} + \frac{\partial(buss)}{\partial x} + \frac{\partial(bwss)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial(bss)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial(bss)}{\partial z} \right) + EA + GA \quad (4)$$

$$\frac{\partial(bu)}{\partial x} + \frac{\partial(bw)}{\partial z} = 0 \quad (5) \quad H = \frac{P}{\rho g} + z \quad (6)$$

$$\rho = \rho_T + 0.0074 S (\%) \quad (7)$$

$$S (\%) = 0.03 + 1.805 cl (g/l) \quad (8)$$

$$R_i = -\frac{g(\partial \rho / \partial z)}{\rho_0 (\partial u / \partial z)^2} \quad (9)$$

$$v_{tz} = v_{t0} \cdot \exp(-1.5R_i), D_z = D_{z0} \cdot \exp(-3.0R_i) \quad (10)$$

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

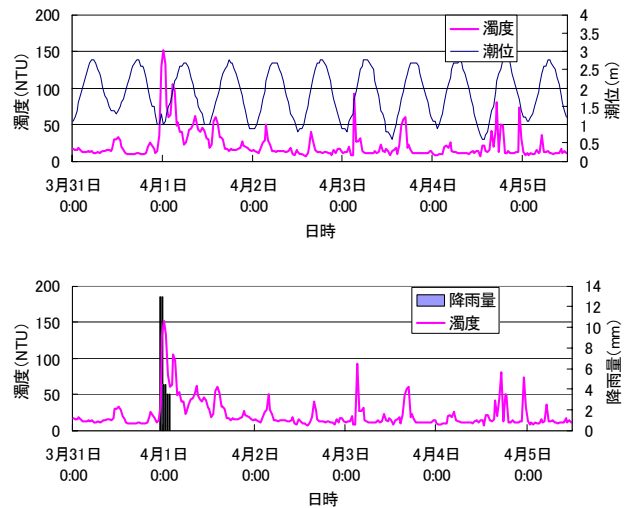


図-4 濁度との関係 2007. 3. 31~4.5 (上:水位, 下:降雨)

p : 圧力 D_x, D_z : 渦拡散係数

ss : 濁質濃度 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

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(2)の物質収支則と式(5)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(9)の局所リチャードソン数を用いて式(10)のように変化させた。巻き上げフラックスおよび沈降フラックスは以下のように与えた。

$$E = 0.003 \left(\frac{\tau^2}{\tau_e^2} - 1 \right)^{1.7}, G = 0 \quad (\tau \geq \tau_e)$$

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

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

w_o 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 $w_o = 2.56 \times 10^{-4} (m/s)$ を、へドロを下水汚泥($\tau_e = 0.03 \sim 0.08 (N/m)$)と同様の挙動を示すと仮定し $\tau_e = 0.06 (N/m)$ を、浮遊物の沈降条件を流速が約10cm/s以下であると仮定し $\tau_d = 0.005 (N/m)$ を用いた。

3.2 縦断分布に関する検証

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として計算の対象となる区間を選定している。また、計算結果は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、現地観測結果と照らし合わせていく。

まず、各成分の縦断分布について述べる。図-5に塩分濃度縦断分布の現地観測結果および計算結果を示す。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の間に存在しており、再現性は妥当であるといえる。

次に、図-6に計算結果による上潮時と下潮時の主流

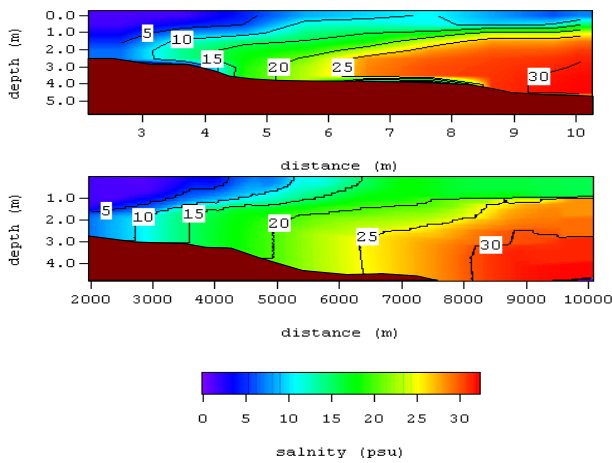


図-5 塩分濃度縦断分布（上：現地観測，下：計算結果）

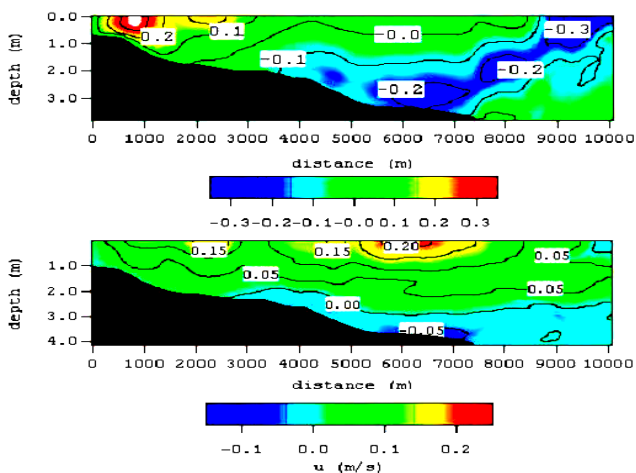


図-6 主流速縦断分布（上：上潮，下：下潮）

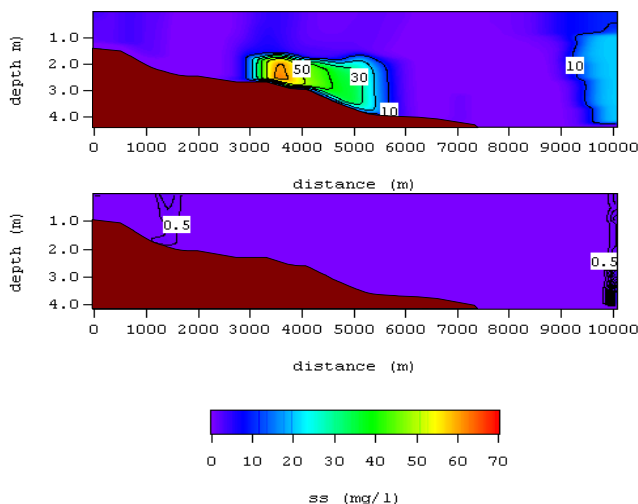


図-7 濁質濃度縦断分布（上：上潮，下：下潮）

速 u の縦断分布を示す。上潮時に注目すると、表層は停滞に近いが底層では大きな逆流を示している事が分かる。下潮時に注目すると、表層は順流を示しているが底層では逆流が起こっている事が分かる。通常開水路において主流速は対数速分布を示すが、このような流速分布となるのは、密度差による前後の圧力差や渦動粘性係数の変化に影響を受けるためと考えられる。

続いて、図-7 に計算結果による濁質濃度の縦断分布を上潮時、下潮時の順に示す。上潮時には、塩水楔の

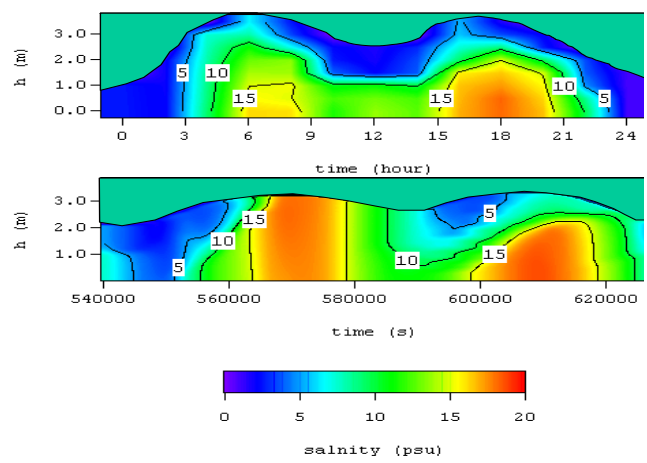


図-8 塩分濃度鉛直分布（上：現地観測，下：計算結果）

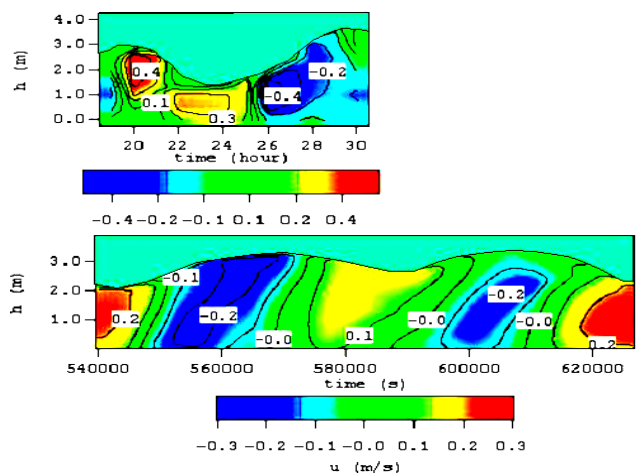


図-9 主流速鉛直分布（上：現地観測，下：計算結果）

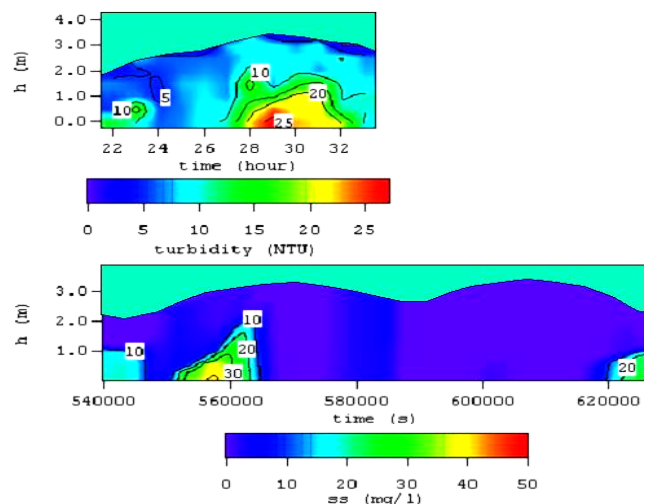


図-10 濁質濃度鉛直分布（上：現地観測，下：計算結果）

先端部が存在する 3000m~6000m において濁質濃度が増加しているが、下潮時には大きな変化がない。これは、観測結果にも見られた傾向である。

3.3 各成分の鉛直分布に関する検証

まず、図-8 に納屋橋地点における塩分濃度鉛直分布時間変化を現地観測（2003年12月23日）、計算結果の順に示す。これらの図より、満潮時の底層ほど高く、干潮時に低いという傾向が同様で、塩分濃度の分布に対する再現性は妥当であるといえる。

次に、**図-9**に同じ納屋橋地点における主流速 u の鉛直分布時間変化を現地観測(2007年10月26日~27日), 計算結果の順に示す。これらを比較すると, 上潮時には全層にわたり逆流が発生し, 下げ潮時には表層付近が順流速の最大値を示すという傾向が同様である。

続いて、**図-10**に同じ納屋橋地点における濁質濃度縦断分布時間変化を, 現地観測(濁度:2007年10月23日~24日), 計算結果の順に示す。計算結果には観測結果と同様に, 上潮時に濁質濃度が急上昇するが, 下潮時にはあまり変化が見られないという傾向が現れており, 概ね再現ができていているといえる。

4. 濁質輸送量に関する検証

堀川において発生した濁質が縦断方向にどの程度輸送されるかを見るために, 流量に濁質濃度を掛け合せた濁質フラックスに着目をした。各コントロールボリュームごとに順流方向を正, 遡上方向を負として濁質フラックスを算出し, それらを一断面において積分することで求めた。取り出した時間は, 先述の24時間分である。**図-11**に平常時の濁質フラックスの時間変化を3000m, 8000mの順に示す。3000mにおける濁質フラックスは, 潮位差が大きい上潮時に負の濁質フラックスが多いが, 下潮時の正のフラックスは少ない。この関係から, 上潮時に塩水楔の先端部が遡上するため巻き上がりが起こるが, 上流側に輸送されるだけで満潮になると大半が沈降し, 下げ潮時に下流側へ輸送されずにヘドロが堆積すると考えられる。8000mにおける濁質フラックスは少ないため, 濁質は輸送されることなく堆積すると考えられる。

次に, 降雨時におけるCSOの影響で濁質フラックスがどのような変化を受けるかについて検証する。**図-12**に10mm/hの降雨時における濁質フラックスの時間変化を3000m, 8000mの順に示す。流入量は名城下水処理場の処理区域面積から合理式により算出し, 各雨水吐(10個)に均一に与えた。流入水の濁質濃度は同処理場に流れ込む下水の濃度より算出した。**図-12**から, 3000mにおいては平常時よりも正負どちらの濁質フラックスも増加しているが, 8000mでは大きく変化していない。**図-13**は3000mにおける平常時と降雨時の底層せん断力の時間変化である。**図-13**から降雨による流量増加があってもせん断力には大きな変化が見られないため, 濁質フラックスの増加は巻上げではなくCSOによる濁質増加と流量の増加が要因と考えられる。一方, 8000mでは濁質フラックスにほとんど変化がみられない。この結果から, CSOによる流量と濁質の増加がある場合, 濁質は上流部で行き来をするだけで, 下流へはあまり運ばれずに沈降・堆積すると考えられる。

5. おわりに

現地観測と計算結果からは, 堀川における濁質の発生が平常時には上潮に伴う底泥の巻上げ, 降雨時には,

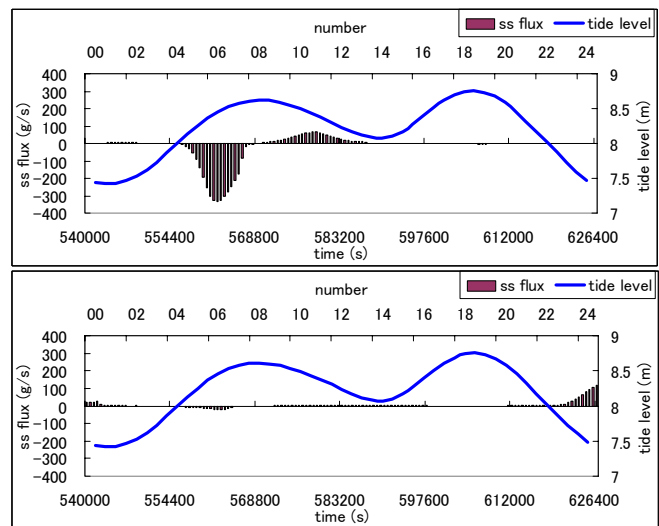


図-11 平常時の濁質フラックス (上: 3000m, 下: 8000m)

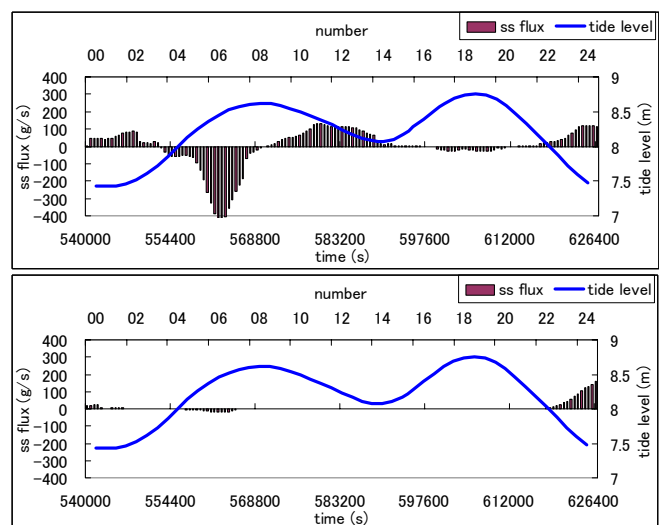


図-12 降雨時の濁質フラックス (上: 3000m, 下: 8000m)

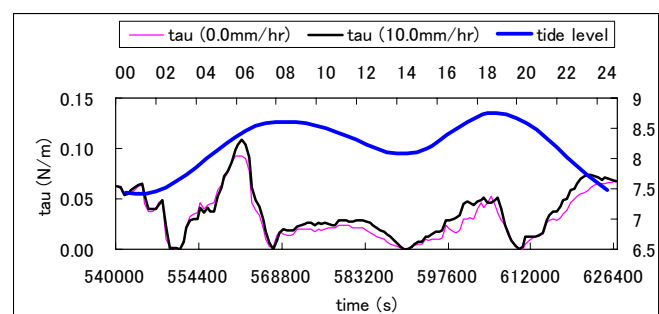


図-13 平常時と降雨時の底層せん断力の違い (3000m)

CSOに影響すると考えられる。また, 濁質フラックスの変化からは, 降雨の有無に関わらず, 塩水楔の先端が行き来する個所では, 濁質の輸送量が多いが下流側へ運ばれることなく堆積する。下流部では濁質の輸送量は少なく, 常にヘドロが堆積しやすくなっていると考えられる。今後は, 浮遊物の組成や現地での底層乱れなどを調査し, 巻上げ・沈降条件を詳細に求めること, 長期間の濁質流動を再現し, ヘドロが溜まりにくい改善策を検証・提案していくことが課題である。