

シルト・粘土の質量に基づく土砂収支法の提案と 河口潮間帯干潟への適用

Sediment Budget based on the mass of silt and clay on Intertidal Flat Adjacent to River Mouth

山田文彦¹・白川雄一郎²・穴井広和³・草合良友⁴・坂西由弘⁵・山本浩一⁶・小林信久⁷

Fumihiko YAMADA, Yuichiro SHIRAKAWA, Hirokazu ANAI, Ryosuke KUSAAI
Yoshihiro SAKANISHI, Koichi YAMAMOTO and Nobuhisa KOBAYASHI

To estimate monthly sediment budget based on a mass of silt and clay on an intertidal flat adjacent to Shirakawa River mouth, monthly bed level and net sediment flux monitoring were conducted from October 2006 to October 2007. The bed levels were measured using electric distance meter during low tides. Water level, flow current, and sediment concentration were measured continuously on the flat. The intertidal flat was accreted with normal discharge conditions mainly due to a net import along the coastal line directed to river mouth. However, the flat was eroded with large discharge conditions (1,500 m³/s) occurred during low tides. A net offshore sediment transport in the large discharge was four times larger than that in the normal discharge.

1. はじめに

潮間帯干潟上での土砂動態（底質輸送・地形変化・土砂収支）は、そこに生息する二枚貝類の生存に影響を及ぼす重要因子と考えられている（Tamakiら, 2008）。この土砂動態のメカニズムを解明し、干潟生産力の向上を行うことは、漁業資源としてだけでなく、沿岸域の環境保全・再生を実現する上で重要である（水産庁, 2008）。また現在、地球温暖化の影響により、沿岸域においては海面上昇や高潮・高波による災害リスクの増大等も懸念されている。特に、内湾に位置する干潟は種々の外力変動の影響を受けて容易に変形・消失すると考えられており、潮間帯干潟上での土砂動態のメカニズムを把握することは沿岸防災計画においても極めて重要な研究課題のひとつと位置づけられる。

河道～潮間帯～潮下帯を含めた広域土砂動態に関して、Kinekeら（1996）がAmazon川河口域で、Harrisら（2005）はEel川河口域での現地観測や数値解析より、出水時に河川から流入した土砂は、一旦、潮下帯付近に堆積し、その後、種々の外力の影響を受け岸沖・沿岸方向に移流・拡散することを明らかにしている。また、宇野ら（2002）、末次ら（2002）、栗山・橋本（2004）、末次ら（2005）も熊本県白川河口付近の広域観測結果より、出水時に白川から流入した土砂は、河道・滞筋・潮下帯に一

旦堆積することや干潟の地形変化は河川からの流出土砂量によって大きく異なること示している。しかし、従来の白川河口干潟での土砂収支では、供給量の2倍に相当する量の土砂堆積（シルト・粘土）が算出されることや沖側へ年間35万m³の土砂流出が推定されるなど、定量的な精度に関してはさらなる検証が必要と考えられる。

栗山・橋本（2004）は1976年～2003年の間に合計8回行われた深浅測量結果を用いて白川河口域での広域かつ長期間の土砂収支を検討するために、以下の3つの方法を用いている。a) 海底地盤高の測量は音響測深結果を使用、b) 沿岸方向の土砂移動量の算定は、波浪による海浜流が卓越する場でキャリブレーションされた沿岸漂砂量公式を適用、c) 土砂収支に関してはシルト・粘土・砂などを区別せず土砂体積量で算定。しかし、例えばa) に関しては次の2点が算定精度低下の要因として考えられる。1) 音響測深による地盤高測量の精度は観測船の動揺などを考慮すると最大で±10cm程度であり、干潟域全体の土砂体積量では数万～数十万m³程度の誤差を有する。2) さらに、底質表面を通常の堆積したシルト・粘土の密度の十分の一程度の密度である「浮泥」が覆うと、見かけの体積が前者の10倍程度となり、土砂収支の精度を低下させる（末次ら, 2005）。b) に関しては、潮汐が卓越する場に対して波浪諸元で規定される沿岸漂砂量公式を適用することの妥当性に関しては検討の余地が残る。宇野ら（2002）、末次ら（2005）は流速・濁度計測と底質サンプリングなどを併用した浮遊輸送フラックスによる粒径別土砂移動量の算定方法を提案し、白川河口域での土砂収支に適用している。しかし、浮遊フラックス計測は河道内と河口のみであり、潮間帯上での浮遊フラックス計測は行っていない。そのため、潮間帯の土砂収支の精度

1 正会員	博(工)	熊本大学教授大学院自然科学研究科
2 学生会員		熊本大学 大学院自然科学研究科
3 正会員	修(工)	いであ(株)九州支店
4 正会員		五洋建設(株)大阪支店
5 正会員	修(工)	鹿島建設(株)土木設計本部
6 正会員	博(工)	山口大学准教授大学院理工学研究科
7 非会員	Ph.D	デラウェア大学教授応用海岸研究センター

は地形測量に依存するが、音響測深を使用しており、その精度は前述のとおりである。次にc)に関しては、通常の砂浜に比較して干潟域ではシルト・粘土成分が増加するため、土砂体積量は粒度組成（粒形分布）、含水比等の影響を受けやすい。そのため、干潟域での土砂収支の検討においては、土砂体積ではなく粒径別の土砂質量を用いる方が理解しやすいと考えられる。

そこで本研究では、トータルステーションを用いた直接地盤高測量と潮間帯干潟上での底質の浮遊輸送フラックス計測を併用し、シルト・粘土の質量に基づいた土砂収支法を提案する。また、本提案手法を熊本県白川河口域の潮間帯干潟上での土砂収支に適用し、河川出水量と土砂動態の関係などについて検討した。

2. 現地観測

観測は図-1に示す熊本県白川河口域の潮間帯干潟上で実施した。対象領域には6本の観測ラインを設置しており、左岸Lラインと右岸R3ラインは2000年12月から、右岸R3以外の4ラインは2004年5月から毎月干潟地盤高の現地観測を実施し、現在も継続中である。砂浜に比較して干潟の地形変化量は小さいこと、および計測時間が干潮時に限られるため、トータルステーション（SOKIA SET3A）を用いて地盤高の計測を行った。測定間隔はL、R3が50m間隔、その他の測線は80m間隔であり、測線の延長は場所によって異なるが、それぞれ大潮干潮時の汀線付近（2.5～1.5km）までとした。

底質の浮遊輸送フラックス計測のため、水位・流速・濁度・塩分の計測機器をR2ライン上の堤防から沖に約400mのA点、約1,040mのB点および約1,520mのC点の3ヶ所に設置した。計測手法の詳細はYamadaら（2009）に詳しい。B点での計測は2004年7月から開始し、観測期間中の参照点として常時連続計測を継続しており、これまでに約1,900潮汐分の時系列を取得した。A点は、2005年10月～2006年9月まで、C点は2006年10月～2007年3月までの期間でデータを取得した。B点以外の2点は同時期の計測ではないため、山田ら（2007）が提案した潮汐位相平均手法を用いてA・C点の計測期間毎に

B点の平均的な浮遊輸送フラックスを算出し、比較した。その結果、1年ほど連続計測を行って得られる平均的な流動・浮遊場にはほとんど差が見られなかった。

岸沖方向の干潟地形の時系列変化を鉛直変位パラメータとして図-2に示す。このパラメータは平均断面との偏差を岸沖方向に積分したものであり、堆積の場合（+）、侵食の場合（-）の値となる（Yamadaら, 2009）。2005年9月頃に干潟が急激に侵食（50cm程度）されているが、その期間に異常な外力変動は存在しないため、人的要因を含めて調査したところ、2005年7,8月に白川河口で86,000m³（延長2.4km、幅40m）の滞浚漂が実施されていた（図-1）。この量は白川河口テラスに堆積する年間（2003年度）の土砂量にほぼ等しい（末次ら, 2005）。また、2008年7月にも同じ場所で約6,000m³の滞浚漂が実施されていたので、人的インパクトの影響を極力押さえ自然外力下での土砂動態を把握するために、今回は2006年10月～2007年10月の期間で検討を行った。

潮汐に伴う底質の浮遊輸送フラックス（kg/m/s）について、観測した水位・流速・濁度の時系列データより検討した。ここでは流速・濁度に関しては、水深方向に一樣な分布を仮定し、潮汐（水没時間）毎に上げ潮・下げ潮期間で浮遊輸送フラックスを積分することで、単位幅あたりの浮遊輸送量（kg/m）として、その時間変動を求めた。図-3はA・B・C点における1ヶ月ごとに累計した浮遊輸送量の南北（沿岸）成分を示す。（+）値は北向・（-）値は南向の移動を表す。中潮間帯下部に位置するB点では上げ潮・下げ潮時の浮遊移動の卓越方向に相違が見られるものの、netの移動量としては3点ともに南向（白川河口側）が卓越している。また、その移動量は最大で 2.0×10^4 （kg/m）程度と算定され、流速・濁度の水深一樣分布の仮定などを考慮すると、場所による移動量の相違はあまり大きくないと判断される。

次に1潮汐間の平均的な底質の浮遊輸送パターンを検討するために、潮汐位相平均手法で求めた3地点の浮遊輸送フラックスの時空間分布をベクトル表示したものを図-4に示す。上げ潮・下げ潮時は地形の等高線に直交する底質輸送が生じ、満潮時にも白川側への有意な底質輸

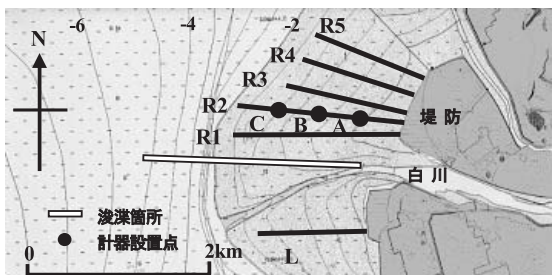


図-1 現地観測場所（白川河口域）

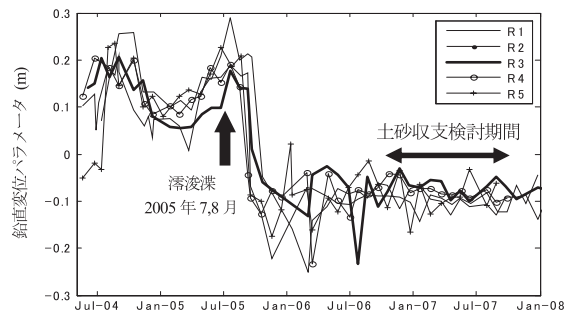


図-2 干潟岸沖断面の鉛直変位パラメータの時系列

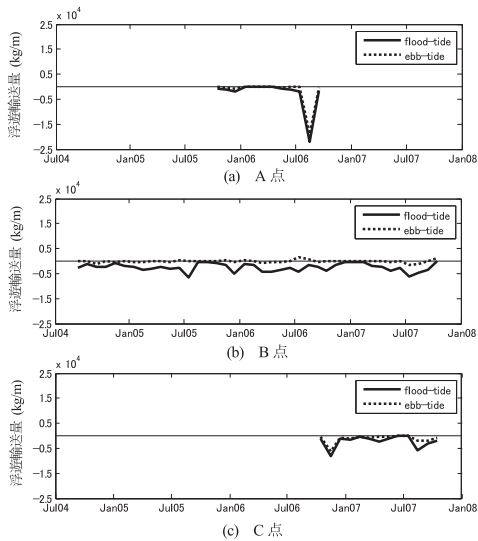


図-3 月累計した浮遊輸送量(南北成分)の時系列

送が存在し、1潮汐間では白川向きの輸送が卓越することがわかった。これは、浮遊輸送に対して上げ潮・下げ潮時は局地的な地形勾配に応じた潮汐運動が支配的であるが、満潮時には白川の河川流出や水位勾配の影響を受けるためと考えられる。なお、図-3と比較してC点の浮遊輸送フラックスが大きくなっているのは、潮汐位相平均を計算する際に日潮不等の影響で水没時間が10時間を越えるデータを省いたためである。A・B点では水没時間全体の約10%以下であるのに対して、C点では水没時間全体の約56%がこれに相当する。C点で省かれたデータの平均水没時間は29.6時間であった。

3. シルト・粘土の質量に基づく土砂収支法

本研究では、直接地盤高測量と潮間帯干潟上での底質の浮遊輸送フラックスの連続計測を併用し、シルト・粘土の質量に基づいた土砂収支法を検討する。そのため、解析領域を図-5のように、浮遊輸送フラックスを計測するR2測線を境として南北に2分割し、それぞれの境界上で流入・流出するシルト・粘土の質量を定義した。

2つの領域での土砂収支は式(1)、(2)に基づき評価する。

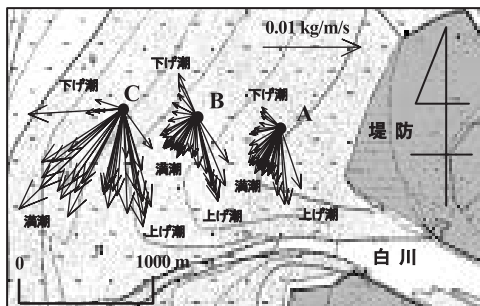


図-4 底質の浮遊輸送フラックスの時空間分布

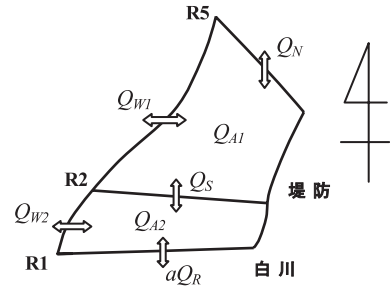


図-5 河口潮間帯干潟上での土砂収支の概念図

$$\text{北側領域: } Q_{A1} = Q_N + Q_{W1} + Q_S \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{南側領域: } Q_{A2} = Q_S + Q_{W2} + a \cdot Q_R \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 Q_{A1} 、 Q_{A2} はそれぞれR5・R2測線およびR2・R1測線で囲まれた領域内のシルト・粘土の質量変化量(kg)である。また、 Q_N は北側境界(R5測線)より流入・流出するシルト・粘土の質量(kg)、 Q_{W1} 、 Q_{W2} は西側(沖)境界より流入・流出するシルト・粘土の質量(kg)、 Q_S はR2測線より流入・流出するシルト・粘土の質量(kg)、 Q_R は河川から流入するシルト・粘土の質量(kg)、 a はその潮間帯干潟の地形変化寄与率である。なお、東側(岸)境界では、堤防が全域に建設されており、シルト・粘土の流入・流出を考慮する必要はない。本検討では、 Q_{A1} 、 Q_{A2} は直接地盤高測量結果より、また、 Q_{W1} 、 Q_S は浮遊輸送フラックス計測結果より算定し、既知量として取り扱うので、未知量は、 Q_N 、 Q_{W2} および a の3つとなる。

(1) 解析領域内の土砂体積変化量の算出

R1～R5測線上の地盤高測点の位置座標から、近接4点間の重心を求め、境界以外では測点を包含するように矩形小領域に分割する(図-6)。小領域内で地盤高は一定とし、2006年10月(基準月)からの各小領域の土砂体積変化量を求め、それを月ごとに南北2つの領域毎に総和する事で土砂体積量の時系列を算出する。なお、解析領域の大きさは、年間を通じて大潮干潮時に干出する地点のみが対象であり、 $l_N=748\text{m}$ 、 $l_{W1}=1,380\text{m}$ 、 $l_{W2}=306\text{m}$ 、 $l_S=1,440\text{m}$ 、 $l_{E1}=617\text{m}$ 、 $l_{E2}=145\text{m}$ 、また、2分割した領域の面積は、北側からそれぞれ 0.76 km^2 、 0.28 km^2 である。

(2) シルト・粘土の質量変化量(Q_{A1} 、 Q_{A2})の算定

底質の体積は、空隙と砂およびシルト・粘土の線形形で表現できると考え、シルト・粘土のかき密度を宇野ら(2002)、中川ら(2004)の白川河口での観測結果を参考に 1.3 g/cm^3 、存在比を30%として、南北2つの領域毎にシルト・粘土の月累計の質量変化量 Q_{A1} 、 Q_{A2} (kg)を求める。

(3) 浮遊輸送フラックス計測に基づく(Q_{W1} 、 Q_S)の算定

沖側境界およびR2測線を通過して流入・流出するシルト・粘土の質量(Q_{W1} 、 Q_S)は、B、C点で1潮汐毎に積分

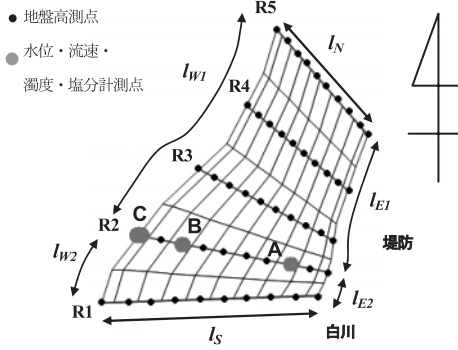


図-6 土砂体積の変化量算定の解析領域分割図

した浮遊輸送フラックス (kg/m) に対して、シルト・粘土は境界から一様に流入すると仮定し、その境界線の延長を掛け合わせることで、質量に換算し、月ごとに累計する。

(4) 白川から流入するシルト・粘土の質量 (Q_R) の算定

栗山・橋本 (2004) と同様に白川の河川流量に比例した経験式 (3) を使用し、まず、流入するシルト・粘土の体積量を算定した。

$$Q_{silt} = 3.482 \times 10^{-7} Q_{river}^{2.165} \dots\dots\dots (3)$$

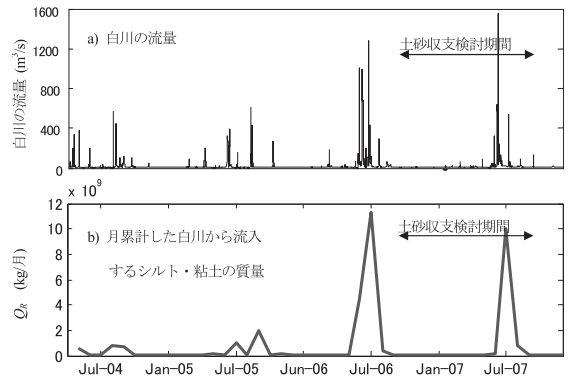
ここで、 Q_{silt} は白川から流入するシルト・粘土の体積量 (m^3/s)、 Q_{river} は白川の流量 (m^3/s) である。 Q_{silt} にシルト・粘土のかさ密度 $1.3g/cm^3$ を乗じ、質量に換算し、月ごとに累計する事で Q_R (kg) を算定する。図-7は2004年4月～2008年1月の白川の河川流量と Q_R の時系列を示す。白川の計画流量は $2,000m^3/s$ であるが、今回の検討期間中の河川出水は最大で $1,500m^3/s$ 程度であり、最近4年間では最大である。ただし、流入したシルト・粘土の質量で考えると2006年度の影響の方が大きい傾向を示す。

(5) 未知量 (Q_N , Q_{W2} および a) の推定

(1) 式中の Q_N に関しては、それ以外の項はすべて既知量となるため、各項間の差分より求める。また、(2) 式中の Q_{W2} および a については、栗山・橋本 (2004) と同様に最小自乗法を適用し、両変数を決定する。

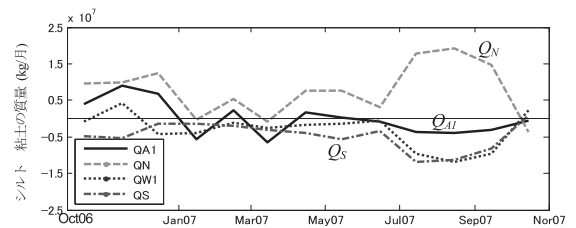
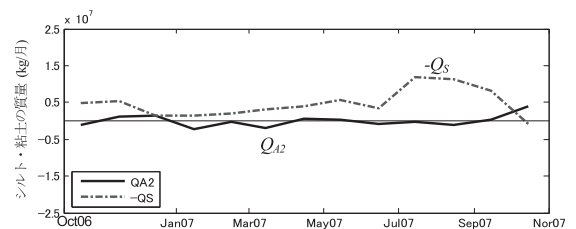
4. 解析結果

図-8は北側領域での月ごとの土砂収支の算定結果を示す。同図は各領域でのシルト・粘土の質量変動量および各境界を通して流入 (+), 流出 (-) するシルト・粘土の質量を時系列で表している。北側領域の地盤高は、2006年12月より減少傾向にあるものの、区間全体では、北側境界より流入分 (Q_N) が卓越し、堆積状態を維持している。一方、南側領域の地盤高はほぼ平衡状態にある (図-

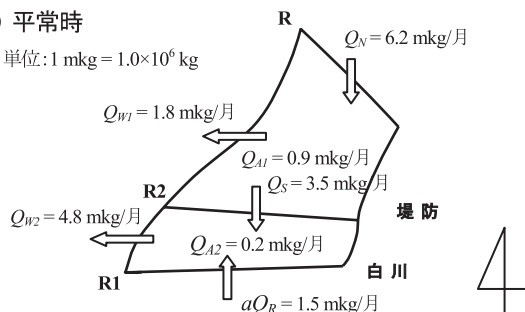

 図-7 白川の流量と Q_R の時系列

9)。北側領域において、河川出水や平均潮位上昇が顕著な7-9月に北から河口に向かう土砂移動 (Q_N) が卓越する傾向が見られるが、詳細なメカニズムは現状では不明である。

次に、河川出水時と平常時での平均的な土砂収支パターンを検討するために、図-8, 9の時系列を2つの時期に分け、それぞれの期間で平均し比較を行った。図-10 (a) に示すように、平常時には北側境界において北から河口側に向かう流入量 Q_N が卓越し、北側領域の潮間帯干潟は堆積傾向を示す。南側領域では、河川から流入するシルト・粘土の約14% ($a=0.14$) が干潟地形変化に寄与し、堆積傾向を示すが、北側領域 (Q_{W1}) よりも沖側への流出量 (Q_{W2}) は3倍程度大きい。一方、出水時 (図-10 (b)) は、北側領域において Q_N , Q_S はともに北から河口側へ向かって2～3倍程度増加するが、沖側へ流出する Q_{W1} が4倍増加するため、潮間帯干潟全域で侵食傾向を示す。なお、出水時は Q_{W1} , Q_{W2} はほぼ等しい。以上より、出水時に河川から流入したシルト・粘土は一旦潮下帯などに堆積し、平常時に潮汐の影響で北側から潮間帯干潟に流入


 図-8 Q_{A1} , Q_N , Q_{W1} , Q_S の時系列 (北側領域)

 図-9 Q_{A2} , $-Q_S$ の時系列 (南側領域)

(a) 平常時

単位: $1 \text{ mkg} = 1.0 \times 10^6 \text{ kg}$ 

(b) 出水時

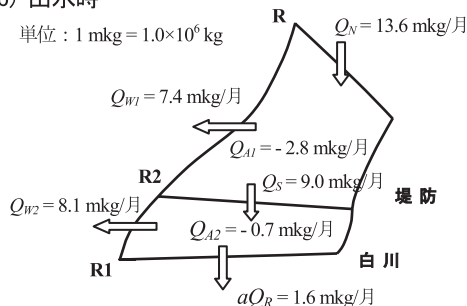
単位: $1 \text{ mkg} = 1.0 \times 10^6 \text{ kg}$ 

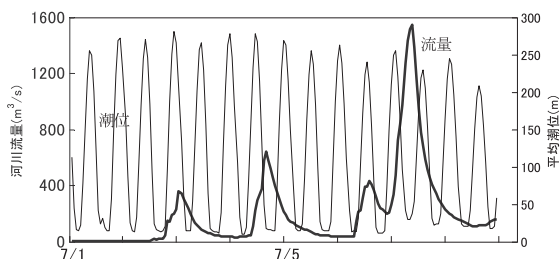
図-10 白川河口潮間帯干潟での土砂収支結果

する循環パターンの存在が示唆された。

また、出水時には南側領域からシルト・粘土が河口側へ流出するが、その理由について考察する。図-11は今回の対象期間中に生じた河川出水と潮位の時系列を示す。2007年7月7日の出水のピーク流量は約 $1,500 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、発生時刻は下げ潮～干潮時刻と重なっている。そのため、河口付近のシルト・粘土は下げ潮時の潮流（沖向き）と河川出水に伴う沖向きの流速の影響を受けた結果と考えられる。よって、上げ潮～満潮時刻に河川出水が重なる場合の土砂動態についても今後計測によって把握し、土砂収支の精度向上を行う必要がある。

5. 結論

河口潮間帯干潟において、直接地盤高測量と底質の浮遊輸送フラックスの連続計測を行い、シルト・粘土の質

図-11 潮位と河川出水の時系列
(2007年7月1日～10日)

量に基づいた土砂収支の検討を行った。平常時には北側領域において北から河口側に向かう流入量 Q_N が卓越し、北側領域の潮間帯干潟は堆積傾向を示す。また、南側領域では、河川から流入するシルト・粘土の約14%が南側領域の干潟地形変化に寄与し、同じく堆積傾向を示す。一方、出水時は、北～河口側に向かう量よりも多くのシルト・粘土量が沖側に流出し、潮間帯干潟は全域で侵食傾向を示す。今後は、土砂収支の精度向上のために、河川出水と潮位の位相（タイミング）について検討する予定である。また、平均的に北側から河口側に向かう土砂移動のメカニズムについても、数値解析などを用いて検討する必要がある。

謝辞：本研究は文部科学省科学研究費による研究の一部であることを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 宇野誠高, 横山勝英, 森下和志, 高島創太郎, 大角武志 (2002): 熊本県白川河口域における土砂動態, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 561-565.
- 栗山善昭, 橋本孝治 (2004): 熊本県白川河口干潟における土砂収支, 港湾空港技術研究所資料, No. 1074, 16 p.
- 水産庁 (2008): 干潟生産力改善のためのガイドライン, 206p.
- 末次忠司・藤田光一・諏訪義雄・横山勝英 (2002): 沖積河川の河口域における土砂動態と地形・底質変化に関する研究, 国土総合技術研究所資料, No. 32, 169 p.
- 末次忠司, 日下部隆昭, 横山勝英, 山本浩一 (2005): 陸域・河口域における土砂・栄養塩の動態に関する研究, 国土総合技術研究所資料, No. 236, 111 p.
- 中川康之, 渡邊和重, 谷川晴一, 黒田祐一 (2004): 海底面近傍における底泥密度の鉛直分布特性の把握, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 986-990.
- 山田文彦, 坂西由弘, 山口龍太, 蒲原さやか, 穴井広和, 小林信久, 玉置昭夫, 多田彰秀 (2007): 潮汐位相平均を用いた潮間帯上の底質輸送フラックスの時空間変動特性, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 626-630.
- Harris, K. C., Traykovski, P., and Geyer, W. R. (2005): Flood dispersal and deposition by near-bed gravitational sediment flows and oceanographic transport: A numerical modeling study of the Eel River shelf, north California, Journal of Geophysical Research, 110, C09025, doi:10.1029/2004JC002727
- Kineke, G. C., Sternberg, R. W., Trowbridge, J. H., and Geyer, W. R. (1996): Fluid-mud processes on the Amazon continental shelf, Continental Shelf research, 16, pp. 667-696.
- Tamaki, A., Nakaoka, A., Maekawa H., and Yamada, F. (2008): Spatial partitioning between species of the phytoplankton-feeding guild on an estuarine intertidal sandflat and its implication on habitat carrying capacity, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 78, pp. 727-738.
- Yamada F., Kobayashi, N., Sakanishi, Y. and Tamaki, A. (2009): Phase averaged suspended sediment fluxes on intertidal mudflat adjacent to river mouth, Journal of Coastal Research, 25, pp.350-358.