土木学会論文集B2（海岸工学）
Vol. 66，No.1，2010，531-535

河口潮間帯干潟の土砂動態に及ぼす潮汐と河川出水の相対的重要度

Relative Importance of Tide and River Discharge on Sediment Transport on Intertidal Flat

山田文彦[1]・白川雄一朗[2]・舟越善隆[3]・田川一彦[4]・外村隆臣[5]
坂西由弘[6]・小林信久[7]・玉置昭夫[8]・多田彰秀[9]

Fumihiko YAMADA, Yuichiro SHIRAKAWA, Yoshitaka FUNAKOSHI
Kazuhiko TAGAWA, Takaomi HOKAMURA, Yoshihiro SAKANISHI
Nobuhisa KOBAYASHI, Akio TAMAKI and Akihide TADA

Relative importance of tidal motions and river discharges for the sediment transport was evaluated using field measurements and data analysis on an intertidal flat adjacent to the Shirakawa River mouth. Monthly-averaged sediment budgets during flood periods indicated the different pattern at the closest point to the river mouth. Sediment is transported to north during non-flood period while transported to south during flood period at this point. The basin-scale tidal motions are found to be important for the sediment transport during non-flood period. The phase relationships between the peak river discharge and tide level during the flood are most important for the sediment transport on the intertidal flat adjacent to the river mouth in the fetch-limited closed bay.

1. はじめに

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上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．

栗山・橋本（2004），Harrisら（2005），山田ら（2007）などの研究により，短期地形変動に及ぼす高波浪の影響や平均場に及ぼす潮汐の影響，また，中・長期的地形変動に対する河川出水の重要性などが指摘されている．しかし，これまで継続的な連続観測に基づいて，河口潮間帯干潟の土砂収支に及ぼす潮汐・河川出水の相対的な重要度の検討を行った例は少ない．山田ら（2009）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し，熊本県白川河口域の潮間帯干潟上での土砂収支に適用することで，河川出水量と土砂動態の関係などについて検討している．しかし，出水時の土砂動態に及ぼす河川出水のピークと潮位の位相差の影響などについては未解明である．

そこで本研究では地盤高と底質浮遊フラックスを連続的に調べるとともに，出水時の土砂動態に及ぼす河川出水のピークと潮位の位相差の影響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．また，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．地盤高測量および底質の浮遊輸送フラックス計測手法の詳細はYamadaら（2009）に詳しい．次節に示す山田ら（2009）の土砂収支の検討結果より，河川出水の影響は河口付近の境界線上に顕著に現れたため，R1

表-1　底質浮遊輸送フラックスの計測概要

観測点	観測期間	観測潮汐数	平均水没時間
A	2005年10月～2006年 8 月	141	6.3 h
B	2004年 7 月～2009年12月	2,142	8.1 h
C	2006年10月～2007年10月	280	9.2 h
D	2008年 5 月～2009年11月	851	7.6 h

1 正会員　博（工）　熊本大学教授 大学院自然科学研究科
2 正会員　修（工）　日本工営　本社
3 学生会員　熊本大学大学院　自然科学研究科
4 学生会員　熊本大学大学院　自然科学研究科
5 正会員　熊本大学工学部　技術部
6 正会員　修（工）　鹿島建設（株）　土木設計本部
7　Ph. D　デラウェア大学教授　応用海岸研究センター
8　理博　長崎大学教授　水産学部
9 正会員　工博　長崎大学教授　工学部

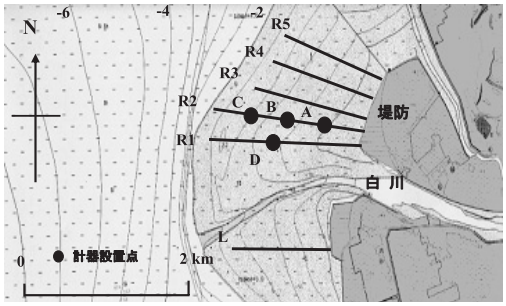


図-1　現地観測場所（白川河口域）

ライン上の堤防から沖に約1,000mに観測点（D点）を追加し，同様の底質浮遊輸送フラックス計測を実施した．4地点の観測概要を**表-1**に示す．

山田ら（2009）は，2006年10月～2007年10月の期間で直接地盤高測量とA，B，C点での底質浮遊フラックス計測結果を併用し，シルト・粘土の質量に基づく土砂収支を検討した．具体的には，**図-2**のR5境界とR2境界に挟まれた領域を北側，またR2境界とR1境界に挟まれた領域を南側とし，次式で算定した．

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

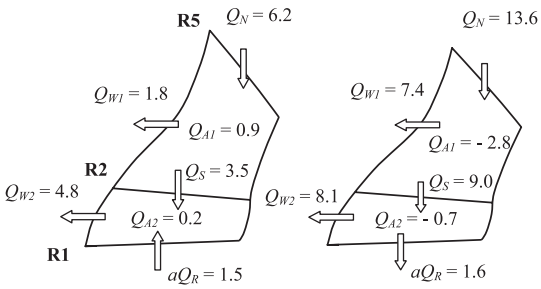
$$\text{南側：}Q_{A2} = Q_S + Q_{W2} + a \cdot Q_R \quad \cdots\cdots (2)$$

ここで，Q_{A1}・Q_{A2}は地盤高測量から求めた地盤高変化に寄与するシルト量，Q_Nは北側境界から流入・流出するシルト量，Q_S・Q_{W1}・Q_{W2}は浮遊フラックス計測から求めた沿岸・岸沖方向の流入・流出シルト量，Q_Rは河川から流入するシルト量，aは干潟地形変化への寄与率である．

解析の結果，平常時・出水時に関わらずR5・R2境界からは常に南向きの土砂移動が存在しており，また，河口に近いR1境界でも出水時に河口側へ土砂は流出し，干潟は侵食傾向を示す結果が得られた．上記の理由について，以下の2つの仮説を立て，今回検討を行った．

① R5・R2境界での南向きの土砂移動は，潮流の空間分布や湾全体の潮汐運動の影響に起因する．

② 河口に近いR1境界での土砂移動は，河川出水のピークだけでなく，潮位との位相関係に影響を受ける．



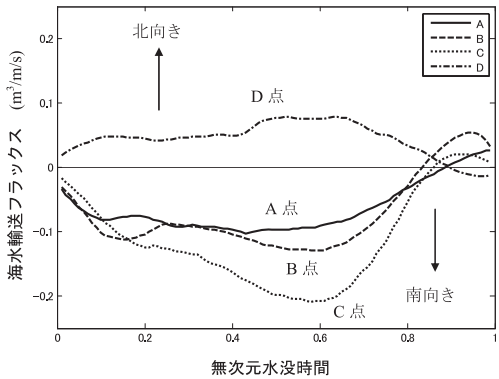
（a）平常時　　（b）出水時

図-2　土砂収支結果（単位：1.0×10^6kg/月；山田ら，2009）

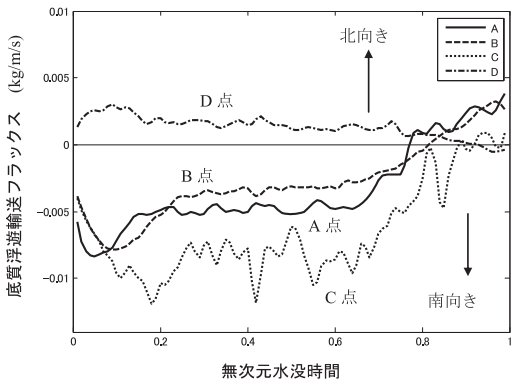
3. 潮汐運動の空間分布が海水・底質輸送に及ぼす影響

1）潮汐位相平均による海水・底質輸送フラックス特性

水没と干出を繰り返す潮間帯上で計測された不連続かつ不等間隔の時系列データから，平均潮位差による成分，大潮・小潮などの潮位差によって変動する成分，および波動による成分を分離するため，山田ら（2007）は，一潮汐毎に時系列データを重ね合わせた潮汐位相平均手法を提案した．具体的には，上げ潮時に20秒間平均水位が海底面から30cm（濁度計の設置位置に相当）を超える時間を一潮汐の開始時間t_1，また下げ潮時にそれを下回る時間を一潮汐の終了時間t_2とし，その間（$t_2 - t_1$）を一潮汐間の水没継続時間Tと定義する．水没時間内における20秒間平均値を抽出し，3次スプライン関数を用いて時間方向に内挿することで，時系列を作成する．このとき，1潮汐毎の水没継続時間の変動による影響を取り除くために，（3）式のような無次元水没時間t_*を定義し，一潮汐毎に時系列を無次元の時間軸上（$0 \leq t_* \leq 1$）に重ね合わせる．無次元水没時間0.5が満潮に相当する．



a）海水輸送フラックスの時間変化（沿岸方向）



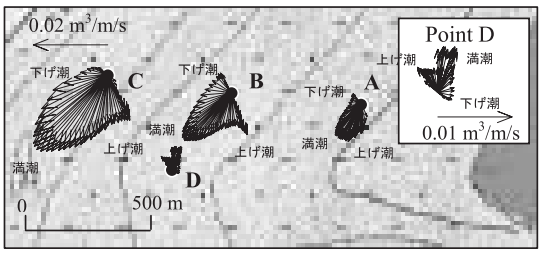
b）底質浮遊輸送フラックスの時間変化（沿岸方向）

図-3　潮汐位相平均による平均的な海水・底質輸送特性

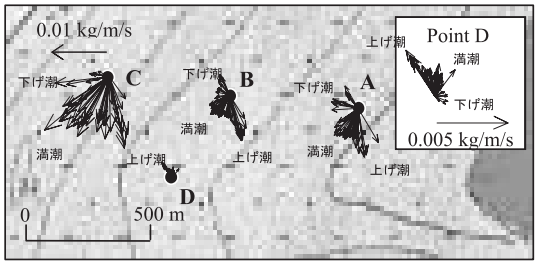
$$t_* = \frac{t - t_1}{T}\ ,\quad t_1 \le t \le t_2\ ,\quad 0 \le t_* \le 1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

図-3は，潮汐位相平均によるA，B，C，D地点の沿岸方向の海水・底質浮遊輸送フラックスの時間変化を示しており，まず各点の平均的な海水および底質浮遊輸送フラックスの輸送方向について比較する．R2ライン上の3点（A，B，C点）は，ともに南向きの輸送が卓越するが，河口により近いR1ライン上のD点はそれらとは逆位相となり，北向きの輸送が卓越する．これら海水・底質浮遊輸送フラックスの卓越方向は，前節の平常時（平均的）の土砂収支結果とよく一致する．次に，各点の海水・底質浮遊輸送フラックスの大きさに着目すると，R2ライン上の3点（A，B，C点）に比べてD点では，海水輸送フラックスで1/2，底質浮遊輸送フラックスで1/4程度の大きさである．また，D点での水没時間中の変動は他の3点に比較して小さく，特に，底質浮遊輸送フラックスには潮汐の影響が明確には見られない．

図-4は，岸沖方向の時間変化も含めた海水・底質浮遊輸送フラックスの時空間分布を比較するために，ベクトル表示したものである．A，B，C点は，上げ潮・下げ潮時は地形の等深線にほぼ直交する方向に海水・底質輸送が生じ，上げ潮時は岸向き，下げ潮時は沖向きである．また，満潮時にも等深線に沿って南向き（白川側）へ向かう輸送が存在し，1潮汐間では，海水・底質とも南向きの輸送が卓越する．一方D点は，上げ潮は沖向き，満潮時は北向き，下げ潮時は岸向きであり，1潮汐間では海水・底質とも北向きの輸送が卓越する．このような非対称性の強い平均流の発生要因として，Le Hirら（2000）は，沿岸域での広域循環の影響を指摘しているが，河口域に適用した場合，広域循環と河川流入との相互作用についても検討することが重要と考えられる．



a）海水輸送フラックス



b）底質浮遊輸送フラックス

図-4　潮汐位相平均による海水・底質輸送特性（ベクトル表示）

2）理論的検討

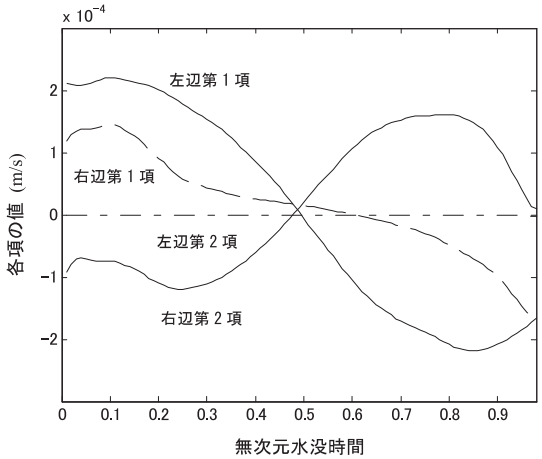
R2ライン上のA，B，C点の海水・底質輸送フラックスの卓越方向がすべて南向きとなる理由については，湾全体の潮汐運動や水面および地形勾配の影響などが考えられるので，本節では理論的な考察を行う．Friedrichs・Aubrey（1996）は，連続の式のみを用いた岸沖1次元の潮汐流の理論解を示した．この考え方は，浅水方程式の各項（局所加速度項，移流項，水面勾配項，底面摩擦項）の中で，水面勾配項のみを卓越項として取り扱うことに相当するため，水面の空間分布が考慮されない．そこで，連続の式のみを用いながら，水面の空間分布も考慮し，潮流の空間変化を理論的に考察可能なモデルを構築する．そのため，基礎方程式である平面2次元の浅水方程式を現地スケールで無次元化し，オーダリングを行った．その結果，対象海域では，水面勾配項のみでなく，底面摩擦項も考慮し，連続の式のみで平面的な流速成分を決定する方法を提案した．具体的には，地盤高と等深線に垂直・平行な潮流の断面平均成分を導入し，連続の式を（4）式のように変形する．

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{f_b\left(U_n^{\ 2} + U_p^{\ 2}\right)^{1.5}}{2gH} = \left(U\frac{\partial z_b}{\partial x} + V\frac{\partial z_b}{\partial y}\right) - H\left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y}\right) \quad \cdots\cdots (4)$$

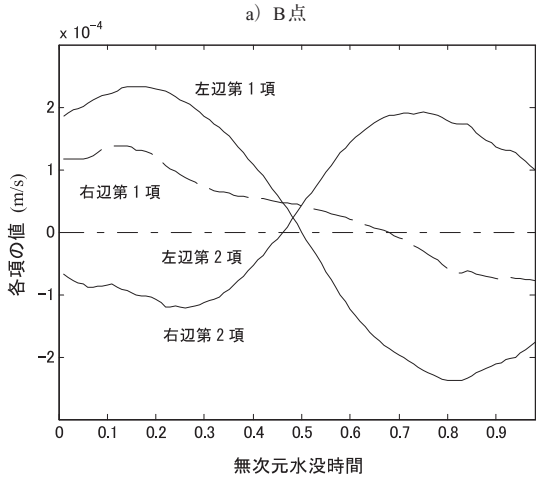
$$U_n = U \cdot n_x + V \cdot n_y,\ U_p = -U \cdot n_y + V \cdot n_x \quad \cdots\cdots (5)$$
$$\vec{n} = (n_x, n_y)$$

ここで，x，yは空間座標，tは時間，ηは潮位，f_bは底面摩擦係数，gは重力加速度，U，Vは東西・南北方向の潮汐の断面平均流速，U_n，U_pは等深線に垂直・平行な潮流の断面平均成分，$\vec{n}$は等深線の法線ベクトル，z_bは地盤高，Hは全水深である．つまり，（4）式の左辺第1項は潮位の時間変化，左辺第2項は底面摩擦，右辺第1項は潮流と地形勾配（測量結果より既知）の積，右辺第2項は潮流の空間変化（水深積分のため通常ゼロではない）を意味する．次に，（4）式の各項に潮汐位相平均値をそれぞれ代入し，各項のオーダーを時系列で比較することで，右辺第2項の影響を調べた．

図-5より，B，C点ともに各項の大きさと時間変化は同様の傾向を示しており，左辺第2項（底面摩擦項）は他項に比べると無視できるものの，右辺第2項（潮流の空間変化）は無視できない大きさであることがわかる．つまり，潮間帯上での潮流の空間分布は有意な大きさを持つことが確認された．そこで，潮下帯を含めた湾全体の潮汐流の空間分布の影響を検証するために，国土交通省九州地方整備局港湾空港部が公開している有明海におけ



a）B点



b）C点

図-5　(4) 式中の各項の時間変化

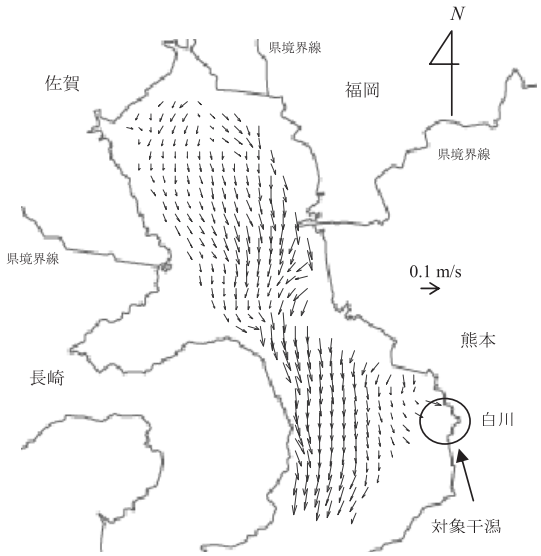


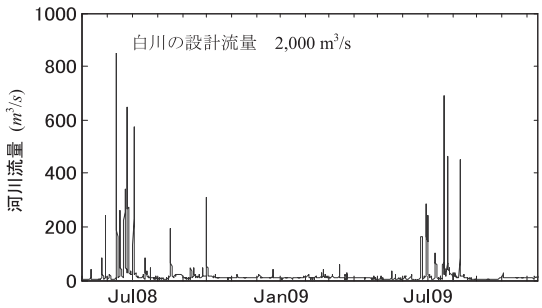
図-6　HFレーダによる表層付近の平均流速の空間分布
（有明海：2009年2月-5月）

るHFレーダの観測結果を用いて検討した．

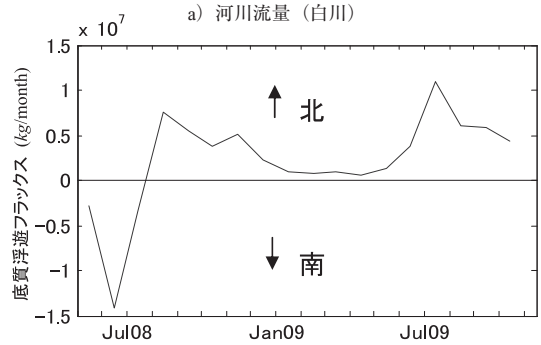
図-6は，HFレーダによる観測結果を基に2009年2－5月の平均表面流速・流向分布を求めた結果である．図より，湾全体においても表面付近の平面流速は南向きの流れが卓越していることが確認できる．HFレーダによる観測範囲には本潮間帯は含まれないが，同期間に対象潮間帯で実施した11台のフロートブイの漂流実験においても，南下する流れが確認された（西ら，2010）．これらの結果より，1つ目の仮説である湾スケールの潮汐運動が潮間帯上の流れや底質輸送にも影響を与えている事が確認できた．

4. 潮汐と河川出水の相対的な重要度の検討

2つ目の仮説である土砂収支に対する河川出水のピークと潮位の関係を検証するために，河口付近で特異な変化を示しているR1ライン上D点において観測を行い，2008年5月から2009年11月の間で底質浮遊フラックス量と河川流量との比較を行った（**図-7**）．図より，2008年の出水時には底質浮遊輸送フラックスの卓越方向は南向きであるが，2009年の出水時には北向きの輸送量が卓越している．この異なった輸送方向の生じた原因についてさらに検討するために，2008年6月10-15日と2009年7月23-28日の出水時において**図-8**に示すように河川流量と潮位の時系列を直接比較することで定量的な検討を行った．

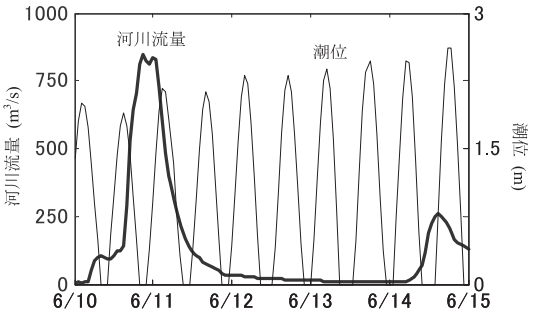


a）河川流量（白川）

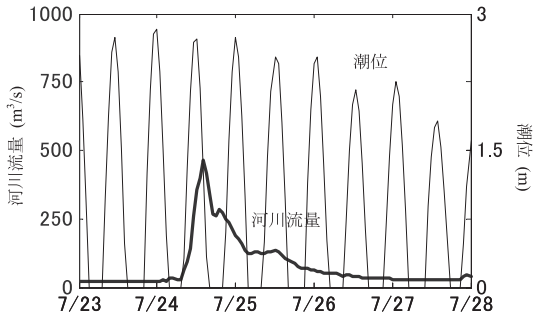


b）D点の沿岸方向の底質浮遊輸送フラックスの時系列

図-7　河川流量とD点の底質浮遊輸送フラックスの関係
2008年5月～2009年11月



a）2008年6月10日～2008年6月15日



b）2009年7月23日～2009年7月28日

図-8　河川出水と潮位の位相関係

図-8より，2008年6月11日の出水は下げ潮時から生じ，干潮時に出水のピークを迎えている．そのため，潮間帯上の底質は下げ潮による沖向き流れが過剰な河川出水により南側に引き込まれるように南向きに輸送されたものと考えられる．一方，2009年7月24日の出水時においては，上げ潮から満潮にかけて出水のピークを迎えており，潮位と出水の位相（タイミング）が2008年6月11日の出水とは異なっている．また，出水規模が半分程度であることも重なり，底質浮遊フラックスは北向きに輸送されたものと考えられる．これらの結果より，出水のピークが上げ潮付近，または下げ潮付近のどちらの潮位に重なるかによって，河口付近での底質浮遊輸送フラックスの卓越移動方向が変化することが示され，河川流量と潮位の位相差が土砂移動に与える影響の重要性が現地観測により確認された．

5. 結論

潮間帯干潟において，地盤高と底質浮遊フラックスの現地観測結果を用いて潮汐運動の空間分布による土砂動態への影響，および潮汐と河川出水の相対的な重要度の検討を行った．本研究で得られた主要な結論は以下の通りである．

(1) 平常時の底質浮遊フラックスの時間変化は岸沖・沿岸方向ともR2上の3点は同じ傾向を示すが，R1上のD点は位相が逆転し，沿岸方向では北向きが卓越しており，土砂収支の結果と一致する．

(2) 式（2）の右辺第2項は無視できない大きさであり，流速の空間分布は有意である．HFレーダの観測結果より湾全体の潮汐流が対象海域付近で南向きの反流を生じていることが確認された．

(3) 土砂収支検討期間外の期間では，出水時R1境界で北向きの土砂流入が生じている時期が確認された．そこで，河川流量と潮位の時系列を比較したところ，出水のピークが干潮，あるいは，満潮付近と重なるかによって土砂移動の方向が変化し，両者の位相差の重要性が現地データで確認された．

今後は，観測結果を説明できる数値モデルの構築を行い，地球温暖化に伴う潮間帯域のリスク評価と対策の一助としたい．

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

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.1074，16p.

西　敬浩・郷原慎一郎・Charles Lemckert・外村隆臣・山本浩一・濱田孝治・山田文彦（2010）：ラグランジュ・ブイを用いた潮間帯での渦動粘性係数・渦拡散係数の時空間分布推定，土木学会論文集B2（海岸工学），B2-66（投稿中）

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.

山田文彦・白川雄一郎・穴井広和・草合由友・坂西由弘・山本浩一・小林信久（2009）：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，土木学会論文集B2（海岸工学），B2-65，pp. 476-480.

Friedrichs，C. T.，and Aubrey，D. G. (1996) : Uniform bottom shear stress and equilibrium hypsometry of intertidal flats，Mixing in estuaries and coastal seas，C. Pattiaratchi，ed.，Am. Geophys. Union，Washington D.C.，pp. 405-429.

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

Le Hir，P.，W. Roberts，O. Cazaillet，M. Christie，P. Bassoullet and C. Bacher (2000): Characterization of intertidal flat hydrodynamics，Continental Shelf Research，20，pp. 1433-1459.

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.