

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

Time-space Distributions of Suspended Sediment Transport Fluxes over Intertidal Mudflat using Tidal Phase Averaging

山田文彦¹・坂西由弘²・山口龍太³・蒲原さやか⁴
穴井広和⁵・小林信久⁶・玉置昭夫⁷・多田彰秀⁸

Fumihiko YAMADA, Yoshihiro SAKANISHI, Ryuta YAMAGUCHI, Sayaka KAMOHARA
Hirokazu ANAI, Nobuhisa KOBAYASHI, Akio TAMAKI and Akihide TADA

The water depth, flow velocity, salinity and suspended sediment concentration on an intertidal mudflat has been measured since July 2004. The measured time series were analyzed using time averaging to extract the wave components as well as tidal phase averaging to obtain typical variations and variability during the wet cycles. The phase-averaged water fluxes and suspended sediment fluxes were approximately the same as those estimated using the phase-averaged water depth, velocities and concentration. The phase-averaged quantities were used to understand the temporal variations of the flow and sediment transport during one typical wet cycle, which appeared to be influenced by the local bathymetry and the river discharge.

1. はじめに

地球温暖化は予想以上の速度で進展している (IPCC, 2007). 今後の沿岸管理においては, 長期的な海面上昇や台風の巨大化など, 地球温暖化に伴う外力要因の変動を適切に評価し, 持続可能な沿岸環境を創成するための保全・管理手法の早急な検討が求められている (Dyer, 1998). 本研究では, その基礎的研究として, 沿岸域の環境基盤を形成する底質輸送プロセスの定量的な理解を目指すものである. 特に今回は, 砂浜海岸に比較して研究例の少ない内湾潮間帯に位置する砂泥質干潟を研究対象とした.

潮間帯干潟上の底質輸送プロセスは, 潮汐・波浪・河川流入・高潮などの複数の外力要因が混在し, その詳細は未解明である. Christie ら (1999), Bassoullet ら (2000) は Macro-tidal 干潟 (大潮平均潮位差 4m 以上) 上の地形変動に関して, 水位・流速・濁度の現地観測結果から, 底質輸送フラックスがそのメカニズムを表す指標として有効であることを示した. 中道ら (2005) は Meso-tidal 干潟 (大潮平均潮位差 2m ~ 4m) で, また, Andersen・Pejrup (2001) は Micro-tidal 干潟 (大潮平均潮位差 2m 以下) で同様の現地観測を実施し, 底質輸送フラックスの有効性を確認している. しかし, 潮間帯上での流速や濁度の時系列を比較すると, 1) 干

潟が干出から水没へ移行する上げ潮進入時や下げ潮に伴う干出直前の水深が非常に浅い時刻, 2) 潮位差が大きくなる大潮時, 3) 高波浪が継続して発生した時に, 両者の値が急増することが確認された. そのため, 底質輸送プロセスにおける潮汐と波浪の寄与の程度や潮位差の影響について検討する必要があるが, そのような研究例は非常に少ない. Green ら (1997) は macro-tidal 干潟上での観測結果より, 底質輸送プロセスにおける潮汐と波浪の相互作用の重要性について示したが, 潮汐と波浪の寄与の程度や潮位差の影響については検討していない.

潮間帯干潟上の底質輸送プロセスに関する従来の研究例において, 潮汐と波浪の影響を分離した検討が行われてこなかった主な理由としては, 1) 潮間帯干潟上の現地観測では, 潮位変動に伴って計測器が水没と干出を繰り返すため, 干出時はデータが欠測し, その時系列は不連続となる. 2) 潮汐は, 天文潮だけでなく気象潮の影響も受けるため, 潮間帯干潟の水没時間は, 1 潮汐ごとに変動する (不等間隔). 3) そのため, 通常, 時系列の周波数成分分離に有効であるスペクトル解析では, 潮間帯干潟上の潮汐と波浪成分の分離が困難であるためである.

そこで本研究では, 不等間隔・不連続な時系列である潮間帯干潟上の計測データに対して, 新たなデータ解析手法 (潮汐位相平均) を提案し, 底質輸送プロセスに対する潮汐・波浪の寄与の程度や潮位差の影響を検討するとともに, 平常時の潮汐が卓越した場合と台風時の突発的な外力変動時の底質輸送パターンの特徴 (移流または巻き上げ) などについて検討を行った.

2. 現地観測

観測は図-1 に示す有明海中央部に位置する熊本県白川

1 正会員 博(工) 熊本大学准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) 日本港湾コンサルタント
4 学生会員 熊本大学大学院自然科学研究科
5 学生会員 熊本大学大学院自然科学研究科
6 非会員 Ph.D デラウェア大学教授
7 非会員 理博 長崎大学教授水産学部
8 正会員 博(工) 長崎大学教授工学部

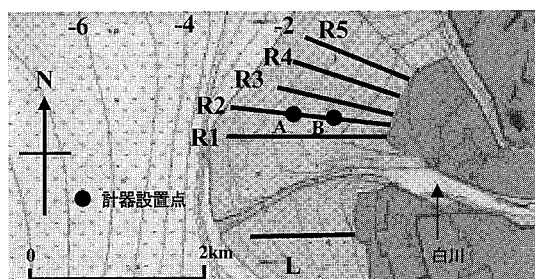


図-1 現地観測場所（白川河口域）

河口域に広がる潮間帯干潟上で実施した。観測場所・方法の詳細は Yamada・Kobayashi(2004)に詳しいが、対象海域の大潮平均潮位差は約 3.8 m (Meso-tidal)、平均有義波高は 20 cm 以下である。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(計測間隔 50 m; 測線長 1.5 km)は 2000 年 12 月から、右岸 R3 以外の 4 ライン(計測間隔 80 m; 測線長 R1, R2: 2.5 km; R4, R5: 1.5 km)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。次に、水位・流速・濁度・塩分の計測手法について述べる。機器は R2 ライン上の堤防から約 1,040 m の A 点と約 400 m の B 点の 2 箇所に設置した。水位は底面に設置した水圧計で計測し、流速は底面上 10 cm に設置した電磁流速計を用いて計測した(WaveHunter99, アイオーテック)。水位・流速はそれぞれ 2Hz 間隔で連続計測している。濁度は赤外線後方散乱式濁度計(COMPACT-CLW, アレック電子)を底面上 5 cm, 10 cm, 30 cm の水深方向 3 点に設置し、塩分は小型メモリ水温塩分計(COMPACT-CT, アレック電子)を底面上 30 cm の位置で固定し、それぞれ 10 分毎に 1Hz 間隔で 20 秒間計測した。濁度は現地泥を用いた検定試験より SS 濃度に換算した。以上のような観測を A 点では 2004 年 7 月から開始し、現在も継続中であり、これまでに 1,111 潮汐分のデータを取得した。また B 点では、2005 年 10 月～2006 年 9 月まで観測を行い、451 潮汐分の時系列を取得した。

図-2 は 2001 年 2 月～2006 年 12 月までに観測した R3 と L ラインの岸沖地盤高から求めた鉛直変位パラメータの時系列を示したものである。このパラメータは干潟断面の堆積・侵食傾向を表現するために、山田ら(2003)が提案したもので、全観測結果より求まる平均断面と各観測結果の偏差を岸沖方向に積分して得られる量であり、堆積傾向を示すならば正值、侵食ならば負値となる。図より、これらの時系列には大きく 3 つの特徴が見られる。1) 長期の堆積トレンド(左岸 0.7 cm/年, 右岸 0.4 cm/年) 2) 数年周期の変動(1 年間の移動平均として算出)。3) 季節的な周期変動(全体から 1), 2) の成分を除去; 夏場は堆積, 冬場は侵食)。Yamada ら

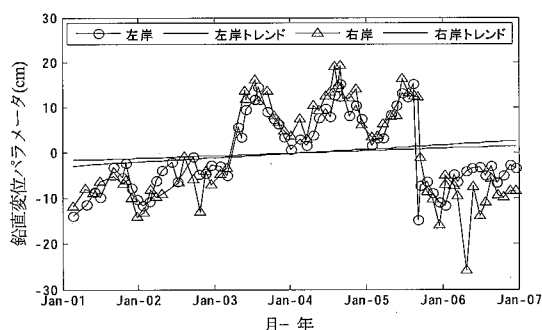


図-2 干潟岸沖断面の鉛直変位パラメータの時系列

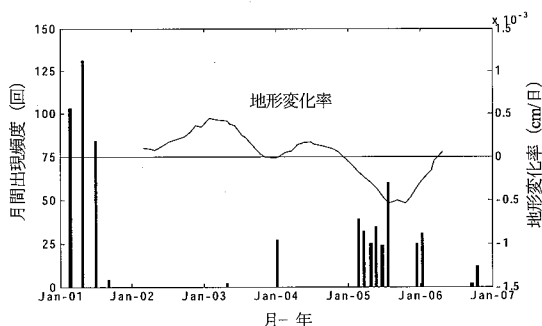


図-3 数年周期の地形変化率と高波浪出現頻度の関係

(2005) は、1) と 3) の要因について検討し、1) は過去 35 年間の有明海での海面上昇速度(約 0.3 cm/年)とほぼ同じオーダーである事、また 3) の季節的な周期変動は ± 5 cm 程度の大きさであり、河川出水や夏場の平均潮位の上昇(約 40 cm)と密接に関係し、タイムラグを無視した場合は、平均潮位の変動との相関性が最も高い(相関係数約 0.7)ことを示した。

次に、2) の数年周期での堆積・侵食傾向については、今回の検討で明らかになったものであり、その主要な外力要因については未解明である。上記 1), 3) の検討結果に見られるように、本潮間帯干潟上で地形変動に対する波浪の影響は明らかではないが、干潟地形の侵食に関する過去の研究例(Le Hir ら, 2000; Kim, 2003)では、その主要な要因として波浪が挙げられている。そこで、数年周期の地形変動の変化率を求め、熊本新港で観測された高波浪(有義波高 40 cm 以上)の月間出現頻度と比較した(図-3)。2005 年春～秋のように高波浪が高頻度に出現した期間には侵食傾向が顕著であり、両者には明確な相関性(相関係数で約 0.6 程度)が存在する。逆に、2002～2004 年の期間は低波浪状態にあり、潮汐が卓越した事から全体に堆積傾向を示している。この期間は、玉置ら(2007)によると、本干潟上でアサリの生残率が例年よりも高水準で維持された事が報告されており、潮間帯干潟での底質輸送プロセスが沿岸防災のみならず、生態環境にも大きな影響を与えることが再確認された。

3. 潮汐位相平均

海水および底質輸送フラックスにおける潮汐と波浪の寄与や潮位差の影響について検討するために、以下のデータ解析方法を提案した。観測では、水位(h)・流速(岸沖 u 、沿岸 v)は2Hzで連続計測、濁度(C)・塩分(S)は10分バーストで1Hz、20秒間の計測を行っているの、実測値を(1)式のように20秒間平均値($\bar{h}$, $\bar{u}$, $\bar{v}$, $\bar{C}$, $\bar{S}$)と変動値(h_w , u_w , v_w)に分離し、平均値を潮汐成分、変動値の標準偏差(σ_h , σ_u , σ_v)を波浪成分と仮定する。

$$\begin{aligned} h &= \bar{h} + h_w, \quad u = \bar{u} + u_w, \quad v = \bar{v} + v_w \dots\dots\dots (1) \\ \bar{h}_w &= 0, \quad \bar{u}_w = 0, \quad \bar{v}_w = 0, \end{aligned}$$

このように定義すると、濁度・塩分の輸送フラックスの時間平均は、(2)式で表現される。20秒間平均値を使用するため波の影響は含まれないが、海水の輸送フラックスの時間平均では、(3)式のように波の影響が考慮される。

$$\overline{u\bar{C}} = \bar{u} \cdot \bar{C}, \quad \overline{v\bar{C}} = \bar{v} \cdot \bar{C}, \quad \overline{u\bar{S}} = \bar{u} \cdot \bar{S}, \quad \overline{v\bar{S}} = \bar{v} \cdot \bar{S} \dots\dots (2)$$

$$\overline{hu} = (\bar{h} + h_w)(\bar{u} + u_w) = \bar{h}\bar{u} + h_w\bar{u} + \bar{h}u_w + h_wu_w \dots\dots\dots (3)$$

$$\overline{hv} = (\bar{h} + h_w)(\bar{v} + v_w) = \bar{h}\bar{v} + \bar{h}v_w + h_w\bar{v} + h_wv_w$$

データ解析により、 $\overline{hu} \approx \bar{h}\bar{u}$, $\overline{hv} \approx \bar{h}\bar{v}$ と近似できることが確認され、本干潟上での波による海水輸送フラックス成分は無視できる大きさであることがわかった。

次に、潮汐成分を平均潮位差による成分と大潮・小潮などの潮位差によって変動する成分に分離するため、一潮汐毎に時系列データを重ね合わせた位相平均値(潮汐位相平均)を考える。具体的には、上げ潮時に20秒間平均水位が最上部の濁度計の位置(海底面から30 cm)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、(4)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、等時間間隔で位相平均値を算出する。図-4に一例として、A点での水位・岸沖流速の潮汐位相平均の算出過程を示す。図中の破線は1,174潮汐分の時系列を重ね合わせたものであり、太線が潮汐位相平均を表している。また、点線で示されているのは、潮位差による変動を示す標準偏差(d_h , d_u)である。(5)式の $\langle \rangle$ は、潮汐位相平均を表し、($\bar{h}$, $\bar{u}$, $\bar{v}$, $\bar{C}$, $\bar{S}$)は、潮位差の変動に伴う水位・流速等の変動成分を表している。

$$t_* = \frac{t - t_1}{T}, \quad t_1 \leq t \leq t_2, \quad 0 \leq t_* \leq 1 \dots\dots\dots (4)$$

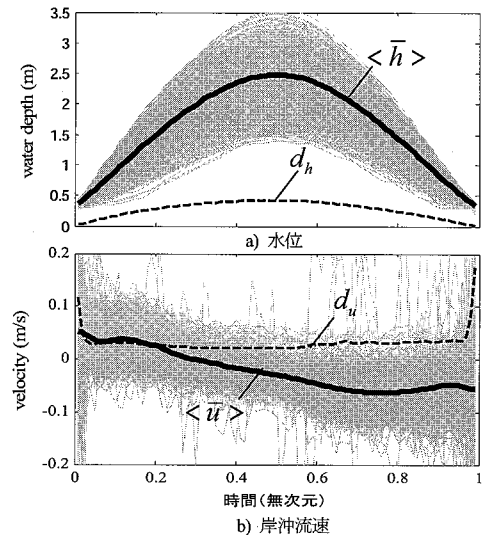


図-4 A点における潮汐位相平均の算出過程

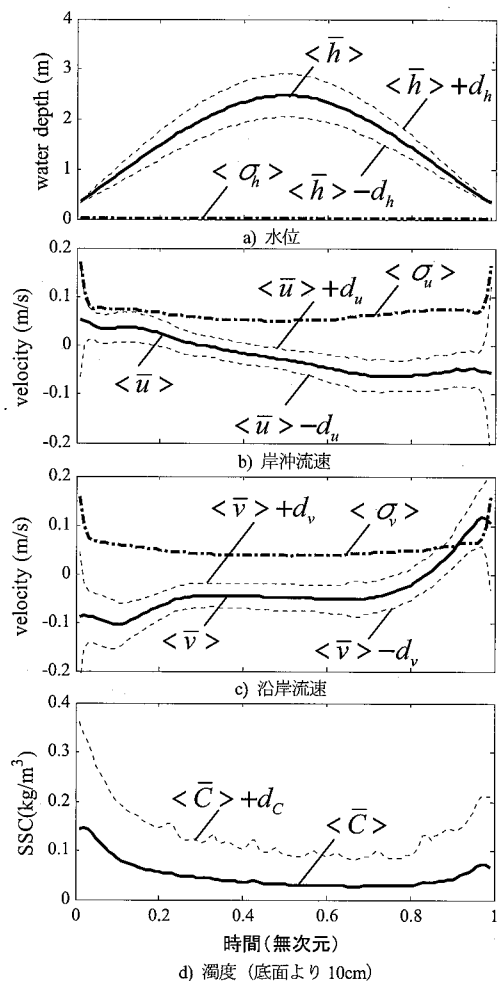


図-5 A点における各物理量の潮汐位相平均の時系列

$$\begin{aligned}\bar{h} &= \langle \bar{h} \rangle + \tilde{h}, \quad \bar{u} = \langle \bar{u} \rangle + \tilde{u}, \quad \bar{v} = \langle \bar{v} \rangle + \tilde{v}, \\ \bar{C} &= \langle \bar{C} \rangle + \tilde{C}, \quad \bar{S} = \langle \bar{S} \rangle + \tilde{S}\end{aligned}\quad (5)$$

図-5はA点における水位・流速・濁度の潮汐位相平均の結果を示す。平均水没時間はA点で7.9時間、B点で5.8時間であり、標準偏差はそれぞれ10%以内であった。a) 図より、平均的な潮位変動は時間軸に対称であり、最大水深は約2.5mである。満潮時に向かうほど、水位は大潮・小潮等の潮位変動の影響を受けるが、水位に対する波浪の影響は無視できる。b) 図は岸沖流速を示し、平均流（潮流）は水位変動より非対称性が大きく、冲向きの流れが卓越する。これはebb-dominanceと呼ばれる潮流の非対称性を示すもので、Dronkers (1986) はその要因は凸型の干潟岸沖断面形状であると指摘している。また、流速の波浪成分は潮流流と同等であり、底質の巻上げに影響を与える。c) 図は沿岸流速を示し、平均流の特徴は、南向き（白川側）の流れが卓越した非対称性にある。Le Hirら (2000) はこのような沿岸方向の特徴は、沿岸域での広域循環が支配的であると指摘している。また、岸沖流速と同様に流速の波浪成分は潮流流と同等である。d) 図は底面上10 cmの濁度を示しており、流速の上げ潮・下げ潮最強時に濁度が高くなる傾向を示す。また、潮汐位相平均値に比較して、変動成分が大きい。

上記の方法により、例えば(3)式の海水輸送フラックスの潮汐位相平均は(6)式のように表現される。

$$\begin{aligned}\langle \bar{hu} \rangle &= \langle \bar{h} \rangle \langle \bar{u} \rangle + \langle \tilde{h} \tilde{u} \rangle \\ \tilde{h} &= \bar{h} - \langle \bar{h} \rangle, \quad \tilde{u} = \bar{u} - \langle \bar{u} \rangle\end{aligned}\quad \dots\dots\dots (6)$$

図-6はA点での岸沖方向の海水輸送フラックスの潮汐位相平均 $\langle \bar{hu} \rangle$ (実線) とその変動範囲 $\langle \bar{hu} \rangle \pm d_{hu}$ (破線) の時系列を示す。海水輸送量は正值が岸向き、負値が冲向きを示し、A点では冲向きの海水輸送が卓越し、上げ潮時よりも下げ潮時の方が変動は大きいことが分かる。そこで、岸沖方向の海水輸送フラックスに対する平均的な潮位運動の寄与を調べるために、(6)式中の右辺第2項を無視して計算した結果、 $\langle \bar{hu} \rangle \approx \langle \bar{h} \rangle \langle \bar{u} \rangle$

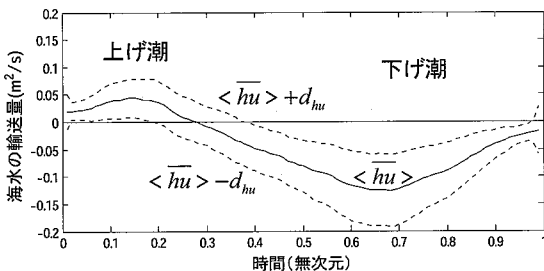


図-6 A点での海水輸送フラックスの位相平均（岸沖方向）

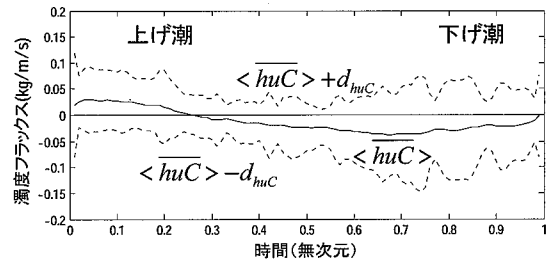


図-7 A点での底質輸送フラックスの位相平均（岸沖方向）

$\langle \bar{u} \rangle$ となり、観測地点での海水輸送は半日周期の平均的な潮流運動で説明でき、大潮・小潮等による変動の影響は小さい。

図-7は、A点での潮汐位相平均を用いた底質輸送フラックスの解析結果を示す。実線が潮汐位相平均 $\langle \bar{huC} \rangle$ 、破線が変動成分 $\langle \bar{huC} \rangle \pm d_{huC}$ を表し、正值が岸向き、負値が冲向きの底質輸送を表す。図より、A点では冲向きの底質輸送が卓越することが分かる。位相平均の時系列の標準偏差は、位相平均の約2倍以上の大きさを持つが、これは濁度の変動が主要因であると考えられる。

4. 底質輸送パターンと卓越輸送方向

平均的な潮流による濁度変化の要因を調べるため、A点での浮遊底質量 (hC) の潮汐位相平均を求めた (図-8)。1潮汐間の浮遊底質量の変動は非常に小さいため、平常時の濁度変化は、底質の局所的な巻き上げではなく、流れに伴った濁度の移流成分に起因すると考えられる。

次に、台風0613号通過時の濁度変化の要因を調べた (図-9)。台風の最接近と天文潮の満潮時刻(18:37)が一致したため、最大約1.7mの高潮が生じ、さらに、風速20m/sを越える南風により高波も同時発生した (A点の最大有義波高は約1.2m)。流速の波浪成分も18:00過ぎから徐々に増大し、高潮の水位降下が始まり平均流が冲向きが変わった21:30以降は急激に増大し、平均流の約8倍に達している。この状況下、底面直上5cmの濁度も波浪の発達とともに急激に増大している。そこで、底面から鉛直向上に5, 10, 30cmの3点で計測した濁度を用いて混合長スケールを求めると、平常時

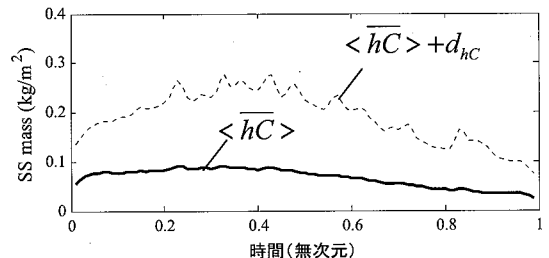


図-8 A点での浮遊底質量の潮汐位相平均

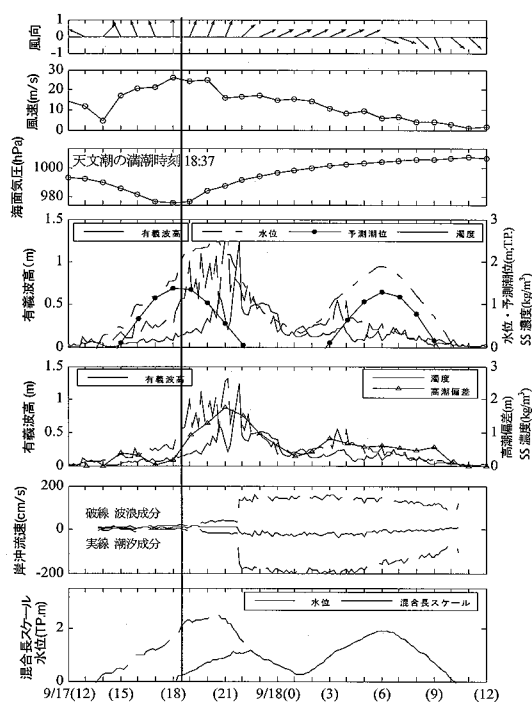


図-9 台風0613通過時の実測データの時系列
(2006年9月17日12時~9月18日12時)

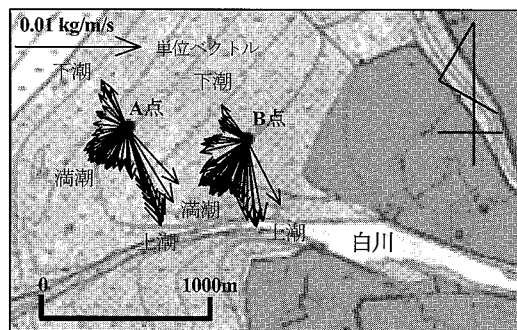


図-10 底質輸送フラックスの時空変動

はほぼゼロであるが、台風による波浪の発達により水深程度まで増大することが分かった。混合長スケールは物理的には底面近傍の乱れ規模を表すもので、波浪の発達とともに底面付近の流速場の3次元性が顕著となることを示している。つまり、高波浪時の急激な濁度変化の要因は局所的な底質の巻き上げであると考えられる。

最後に、底質の卓越輸送方向を検討するために、底質輸送フラックスの時空間変動をベクトルで表示した(図-10)。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、満潮時には白川側への有意な底質輸送が存在し、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、上げ潮・下げ潮時は潮汐の影響が支配的であるが、満潮時には白川の河川流出の影響を受けるためと考えられる。

5. おわりに

潮間帯干潟上の底質輸送フラックスに対する潮汐・波浪の寄与の程度や潮位差の影響を調べるために潮汐位相平均手法を提案し、約2年間の計測データを解析した。その結果、平均的な潮汐に伴う潮間帯上の濁度変化は、流れに伴う濁度の移流成分が支配的であるが、台風時には高波浪に伴う底質の局所的な巻き上げが卓越する。また、白川河口干潟上の底質輸送フラックスの移動方向には、上げ潮・下げ潮時は潮汐の影響が支配的であるが、満潮時には白川の河川流出の影響を受け、1潮汐間では白川向きの底質輸送が卓越することなどが分かった。

謝辞：本研究は文部科学省科学研究費・水産基盤整備調査委託事業・鹿島学術振興財団研究助成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

- 玉置昭夫, 中岡 歩, 前川英樹, 山田文彦(2007): 有明海の砂質干潟における植物プランクトン食ギルドのなかの二枚貝資源, ベントス学会誌, pp. 73-81.
- 中道 誠, 山田文彦, 外村隆臣, 玉置昭夫, 小林信久(2005): 季節的な平均潮位の昇降に伴う干潟岸沖断面の堆積・侵食メカニズム, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 526-630.
- 山田文彦, 小林信久, 柿本哲哉(2003): 地形パラメータを用いた干潟断面の季節変動の要因分析, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 551-555.
- Andersen, T. J. and M. Pejrup (2001): Suspended sediment transport on a temperate, microtidal mudflat, the Danish Wadden Sea, Marine Geology, 173, pp. 69-85.
- Bassoullet, P., P. L. Hir, D. Gouleau and S. Robert (2000): Sediment transport over an intertidal mudflat: Field investigations and estimation of fluxes within the Baie de Marennes-Oleron (France), Continental Shelf Research, 20, pp. 1635-1653.
- Christie, M. C., K. R. Dyer, and P. Turner (1999): Sediment flux and bed level measurements from a macro tidal mudflat, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 49, pp. 667-688.
- Dronkers, J. (1986): Tidal asymmetries and estuarine morphology, Netherlands J. Sea Research, 20, pp. 117-131.
- Dyer, K. R. (1998): The typology of intertidal mudflats, Sedimentary processes in the intertidal zone, pp. 11-24.
- Green, M. O., K. P. Black and C. L. Amos (1997): Control of estuarine sediment dynamics by interactions between currents and waves at several scales, Marine Geology, 144, pp. 97-116.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): Climate change 2007, The physical science basis, Summary for policy maker, <http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>, 18p.
- Kim, B. O. (2003): Tidal modulation of storm waves on a macrotidal flat in the Yellow Sea, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 57, pp. 411-420.
- 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. and N. Kobayashi (2004): Annual tide level and mudflat profile, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 130, pp. 119-126.
- Yamada, F., N. Kobayashi, M. Nakamichi and T. Kakinoki (2005): Seasonal Mudflat Profile Evolution, Proc. of 29th International Conference on Coastal Engineering, pp. 2243-2255.