

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

山田 文彦*・小林 信久**・柿木 哲哉***

内湾河口域の干潟上で約 2 年間に渡って地盤高の岸沖分布を計測した。干潟断面ではバー地形が顕著に表れないので、その岸沖分布を 2 次多項式で近似し、時間変動項を分離するデータ解析手法を提案した。さらに時間変動を考慮した 3 つの地形パラメータ (凹凸度・平均勾配・鉛直変位) を定義し、外力の時系列と直接比較することで干潟地形変化の要因分析を行った。その結果、鉛直変位パラメータは年周期の変動を行っており、平均潮位と正の相関性が高く、夏から秋にかけて平均潮位が約 40 cm 上昇すると、干潟は 5 cm 程度の堆積傾向を示す。また冬から春に平均潮位が下降すると -5 cm 程度の侵食傾向を示すことがわかった。

1. はじめに

地球温暖化により、西暦 2100 年までに約 1 m の海面上昇が予想されており、長期的な海面上昇に伴う沿岸域の事前影響評価の精度を向上することは、我が国の沿岸管理上、極めて重要な研究課題のひとつと位置付けられる。

特に内湾域に存在する干潟は、海面上昇の影響を受けて容易に変形・消失すると考えられるため、長期的に高潮による浸水危険度や越波量が増大するなど、国民の生命や生活への甚大な影響が懸念されている。そのため、長期的な海面上昇に伴う干潟地形の変化を精度良く評価することは重要な検討課題である。

Christie ら (2001) は、干潟が海面上昇とほぼ同じ速度で堆積傾向を示すと考え、地形変化と外力との間には平衡状態が存在すると仮定している。Lee・Mehta (1997) は、Bruun (1962) が海面上昇による砂浜の変形を取扱うために提案した平衡断面の概念を干潟断面に適用している。しかしながら、干潟の地形変動には 1 潮汐 (Christie ら, 1999)、半月 (O'Brien ら, 2000)、数ヶ月～季節 (Frostick・McCave, 1979) など様々な時間スケールが存在することが現地調査から明らかになっている。また、外力となる潮汐・波浪・風・河川流量なども常に時間変動しているので、両者の間に平衡断面の概念を適用するためには、それぞれの時系列変動の相関性やタイムラグなどについて検討しておくことが重要であると考えられる。

そこで本研究の目的は、秋口に熊本県白川河口域等で観測される平均潮位上昇 (約 40 cm) を利用することで、潮位・波浪等の外力の時系列変動と干潟岸沖断面の時空間変動特性との関係を現地観測結果に基づいて明らかにすることである。そのために、地形の時間変動を考慮できる 3 つの地形パラメータを提案し、河口干潟域での岸

沖断面の地形変動に対する外力の要因分析などを行なった。

2. 現地調査

有明海中央部に位置する熊本県白川河口域に広がる干潟上において、2000 年 12 月から約 2.5 年にわたって干潟地盤高の現地観測を実施しており、現在も継続中である。観測場所の詳細は Yamada・Kobayashi (2003)、柿木ら (2003) に詳しいが、白川河口域を観測場所として選定した理由は、有明海において潮汐・波浪等の定点観測を長期に渡って実施している場所は、白川河口から約 4 km 南西に位置する観測タワーに限られるためである。

白川河口域での潮汐は半日周期で、平均潮位差は約 3 m である。岸側境界には堤防 (天端高: +6 m T.P.) が設置されており、河口や堤防の前面には干潟が発達している。堤防前面の平均地形勾配は約 1/800 であり、大潮の干潮時には堤防から沖側に約 2 km の範囲で干潟が出現する。

(1) 底質分析

堤防から沖側へ 100 m, 500 m, 1,200 m の 3 地点 (両岸とも) において、2001 年 9 月に干潟表面から鉛直下方約 40 cm まで底質サンプリングを干潮時に行い、粒度分布・含水比・土粒子の比重などを 10 cm ごとに調査した。中央粒径 (D_{50}) は 0.1~0.18 mm の範囲で分布し、岸側でかつ干潟表面に近いほど中央粒径は細くなる傾向を示した。粒径 0.075 mm 以下の存在率を含泥率と定義すると、その値は 10~30% の範囲であり、両岸とも沖側 500 m 付近で低くなる傾向を示した。含水比は 40~60% であり、沖側 500 m 付近で低くなり、含泥率の分布と類似している。一方、土粒子の比重は岸沖・鉛直方向に比較的变化が小さく、2.72~2.78 の範囲で分布している。

(2) 地盤高の時空間分布特性

干潟上で地盤高の定点観測を行なうために、2000 年 10 月に河口から南北にそれぞれ約 700 m 離れた両岸に、測点用の長さ 2 m の木杭をそれぞれ 50 m 間隔で深さ 1.7 m まで打設し、測線長 1.5 km の観測線を 2 本設置した。

* 正会員 博(工) 熊本大学助教授 工学部環境システム工学科
** Ph.D. デラウェア大学教授 応用海岸研究センター
*** 正会員 博(工) 神戸市立工業高等専門学校講師 都市工学科

砂浜に比較して干潟の地形変化量は小さいと予想され、地盤高計測では数 cm オーダーの測定精度を要求される。また計測時間は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 (Yamada・Kobayashi, 2003)。本計測手法による測定誤差は陸上でのレベル測量との比較から ± 30 mm 以内であった。実際の計測は、2000 年 12 月より開始し、約 1~2 ヶ月毎に大潮の干潮時を選び、これまでに合計 23 回の観測を実施している。なお、今回は 2001 年 2 月~2002 年 12 月までの 19 回の観測データを用いた結果について報告する。

図-1 の上段と下段は地盤高観測より得られた岸沖方向の空間分布であり、上段は左岸、下段は右岸の結果をそれぞれ 19 個重ねて示したものである。両岸とも堤防から 800 m を超えて沖に向かうほど地盤高計測値の変動が大きくなっており、標準偏差は 2.0~8.0 cm の範囲である。つまり、侵食・堆積の岸沖分布は一様ではなく、岸よりも沖の方が大きく、一般的な砂浜とは逆の傾向を示す。

干潟上では足場の悪いところが点在し、19 回の観測期間中に常に計測できた測点は、両岸ともに堤防から 100~1,050 m の範囲にある 20 測点のみであった。そのため、今回の解析ではこの範囲をデータ解析の対象とし

た。

また、同図より両岸の平均断面はともに上に凸な形状を呈しており、左岸の方が右岸よりも断面曲率は大きいことがわかる。一般に上に凹な形状を呈する砂浜とは異なった岸沖分布を有している。平均勾配では左岸 (1/900) は右岸 (1/700) に比べて 1.3 倍程度緩やかである。

(3) 外力の時系列変動特性

図-2 は 2000 年 2 月~2002 年 12 月までの 1 時間毎の実測潮位 (η) と 56 日間の移動平均を用いた平均潮位 (η_{56}) の時系列とを重ねて示している。実測潮位は $-3.0 \sim +3.0$ m (T.P.) の範囲で変動しており、同期間中の平均潮位は $+0.14$ m (T.P.) である。ゼロアップクロス法により、実測潮位から 2,052 潮汐を抽出し、平均潮位差を求めると 2.88 m であった。また、56 日平均潮位 (η_{56}) は年周期の変動を示し、8~10 月にかけて約 40 cm 上昇する。なお、移動平均の区間を 7~56 日と変えて平均潮位の時系列を比較したが、顕著な違いは見られなかった。

図-3 は 2001 年 2 月~2002 年 12 月までの 3 時間毎の実測値から求められた有義波高の時系列を示している。2001 年 2 月~4 月までは 1.0 m 程度の有義波高が頻繁に見られるが、2001 年 8 月以降はあまり出現しておらず、全期間中の平均有義波高は 0.2 m である。また、有義波周期は約 3.0 s でほぼ一定であった。

次に、白川の河川流量の時系列を考えるが、河川流量データは 1 年遅れで公開されるため、ここでは熊本市での降雨量との相関性を調べた。図-4 の上段は 2000 年 2 月~2002 年 12 月までの 1 時間毎の熊本市での降雨量、下段は 2000 年 2 月~2001 年 12 月までの 1 時間毎の白

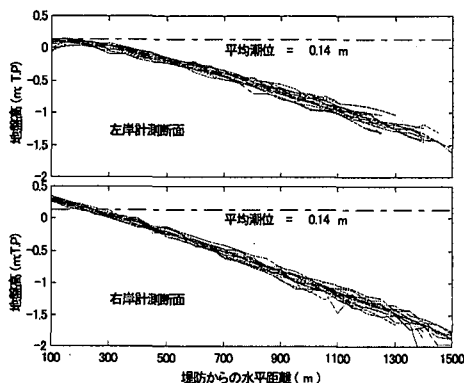


図-1 地盤高の計測結果

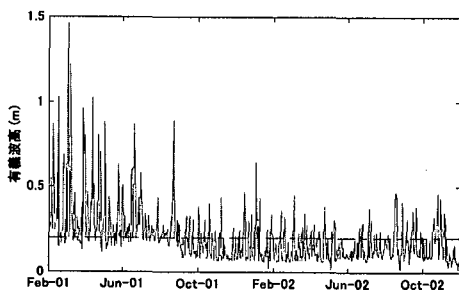


図-3 有義波高の時系列

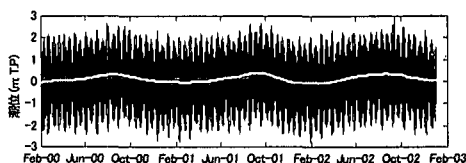


図-2 実測潮位と平均潮位の時系列

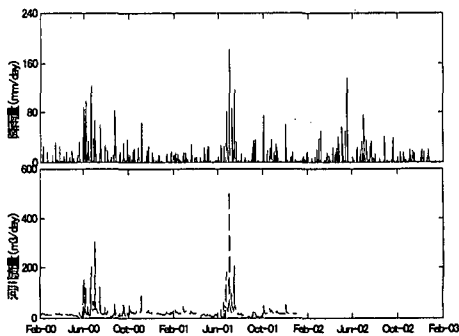


図-4 河川流量と降雨の時系列

川の流量を示している。図より、両者のピークはほぼ一致し、6月の梅雨時期の大雨時に河川流量も大きくなるなど相関性が高いことがわかる。そこで、白川の流量の検討では熊本市での降雨データを代用して用いた。

3. 干潟岸沖断面の2次多項式近似

Kirby (2000) は、干潟岸沖断面の変形特性を表す地形パラメータとして(1)断面曲率を、Dyer ら(2000)は(2)地形の平均勾配を用いて潮汐や波浪が地形変化に及ぼす影響について検討した。しかし、季節的な平均潮位の上昇など外力の時系列変動は考慮されていない。ここでは新たに(3)干潟地形の鉛直変位を加えた3つの地形パラメータを用いて干潟岸沖断面の時間変動を表現することを考える。そのために、以下の2次多項式を用いて各観測断面を近似するデータ解析手法を提案した。

$$z(t, x) = -a(t)x^2 - b(t)x + c(t) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 z は地盤高、 x は堤防から沖方向への水平距離、 t は時間を示し、パラメータ a, b, c は時間のみに依存すると仮定する。また、パラメータ $a(\text{m}^{-1})$ は断面曲率の2分の1であり、パラメータ b は $2ax + b$ が任意の点 x での局所的な地形勾配を表すことから、 $x=0$ での地形勾配、またパラメータ $c(\text{m})$ は $x=0$ での鉛直変位を表している。

つまり、式(1)では干潟断面の岸沖空間分布を2次多項式と仮定することで、観測断面を空間分布と時間変動とに変数分離して取扱うことを意味している。もし観測期間中の全観測断面が式(1)で精度良く近似できるならば、この仮定は妥当性が高いものと考えられる。

なお、砂浜海浜ではその岸沖断面の時間・空間変動を検討する場合、経験的固有関数法(Empirical Orthogonal eigenFunction method; EOF)がよく用いられるが(例えば、Winant ら, 1975; 栗山, 2001)、本手法と EOF の基本的な相違点は岸沖空間分布の取扱い方にある。

表-1は2次多項式近似の全計測断面への適用結果をまとめたものである。なお、式(1)による地形の再現精度(ϵ)は式(2)で求めた。

$$\epsilon = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |z_n - (-ax_n^2 - bx_n + c)| \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 N は今回のデータ解析範囲($100 \text{ m} \leq x \leq 1,050 \text{ m}$)に含まれる観測線上の測点数であり、今回は $N=20$ である。表より、全観測断面が測量誤差($\pm 30 \text{ mm}$)程度で表現できており、式(1)の妥当性が確認できる。

ところで、式(1)中のパラメータ b, c は前述のように $x=0$ での局所的な地形勾配と鉛直変位を表す量であり、このままでは今回のデータ解析範囲外で定義された量となる。そのため、パラメータ a, b, c を、データ解析範囲を代表する新たな3つのパラメータ(凹凸度、平均勾配、鉛直変位)に変換することを考える。

(1) 凹凸度パラメータ: Q

断面曲率を平均潮位や有義波高などと時系列で比較するため、断面曲率を鉛直方向の長さスケールで代表させることを考える。データ解析範囲の開始点 $x=x_1$ と終了点 $x=x_2$ ($x_2 > x_1$) において近似後の地盤高をそれぞれ z_1, z_2 とする。今、任意の点 x ($x_1 \leq x \leq x_2$) において2点 $(x_1, z_1), (x_2, z_2)$ を結ぶ直線から近似後の地盤高までの鉛直偏差を $z_d(x)$ とすると、 $z_d(x)$ の最大値は式(3)で表され、この値を凹凸度パラメータ $Q(\text{m})$ と定義する。

$$Q = a \left(\frac{x_2 - x_1}{2} \right)^2 \dots \dots \dots (3)$$

つまり、岸沖断面が $Q < 0$ ならば上に凹、 $Q > 0$ ならば上に凸な形状を呈し、直線であれば $Q=0$ となる。

なお、今回の解析では $x_1=100 \text{ m}, x_2=1,050 \text{ m}$ である。

(2) 平均勾配パラメータ: S

任意の点 x での局所的な地形勾配 $2ax + b$ をデータ解析範囲 ($x_1 \leq x \leq x_2$) で積分し、その区間平均値を求めると式(4)となる。この値を平均勾配パラメータ S と定義する。

表-1 2次多項式近似の適用結果

	左 岸				右 岸			
	$a \times 10^7 (\text{l/m})$	$b \times 10^3$	$c \times 10 (\text{m})$	$\epsilon (\text{cm})$	$a \times 10^7 (\text{l/m})$	$b \times 10^3$	$c \times 10 (\text{m})$	$\epsilon (\text{cm})$
最大	7.76	0.60	2.31	2.85	4.55	1.26	4.68	2.72
最小	4.48	0.22	0.89	1.27	1.58	0.93	3.72	1.18
平均	5.82	0.40	1.69	2.16	3.14	1.11	4.17	1.89

表-2 凹凸度・平均勾配・鉛直変位パラメータ

	左 岸			右 岸		
	$Q (\text{cm})$	$S \times 10^3$	$D (\text{cm})$	$Q (\text{cm})$	$S \times 10^3$	$D (\text{cm})$
最大	17.5	1.18	5.62	10.3	1.59	7.06
最小	4.65	1.02	-6.68	3.57	1.37	-6.04
平均	13.1	1.07	0.00	7.09	1.47	0.00

$$S = a(x_1 + x_2) + b \quad \dots\dots\dots (4)$$

この平均勾配パラメータ S は、今回のデータ解析範囲の中心点 $x = (x_1 + x_2)/2$ での地形勾配および開始点 (x_1, z_1) と終了点 (x_2, z_2) を結んだ直線の勾配に等しい。

(3) 鉛直変位パラメータ: D

干潟断面の季節変動(堆積と侵食)を表現するために、鉛直変位パラメータ $D(m)$ を式(5)で定義する。この値は、式(1)で表される2次多項式による地盤高 z と全観測結果より求まる平均地盤高 z_m との偏差 $(z - z_m)$ をデータ解析範囲で積分し、その区間平均値として求めた。

$$D = -\frac{(a - a_m)}{3}(x_2^2 + x_1x_2 + x_1^2) - \frac{(b - b_m)}{2}(x_2 + x_1) + (c - c_m) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、平均地盤高 z_m は観測断面と同様に式(6)により2次多項式で近似される。

$$z_m = -amx^2 - bmx + cm \quad \dots\dots\dots (6)$$

表-2 は今回の解析より得られたパラメータ Q, S, D のまとめである。鉛直変位パラメータ D は $-7 \sim 7 \text{ cm}$ で変化し、両岸の結果には顕著な相違はない。平均勾配パラメータ S は 10^{-3} のオーダーであり、右岸の方が左岸より約1.5倍大きく、急勾配であることを示す。凹凸度パラメータ Q は 10 cm のオーダーであり、左岸の方が右岸より約2倍大きく、より上に凸な形状を呈することを示している。このように3つの地形パラメータを用いると、データ解析範囲 $(x_1 \leq x \leq x_2)$ での両岸の岸沖断面の特徴と相違点が良く表現できることが分かる。

次に、今回の月単位の観測データから得られるこの3つの地形パラメータの時系列変動を平均潮位・潮位差・波高・風・降雨(河川流量)の時系列変動とを比較すること、干潟断面の時系列変動の要因分析を行った。

4. 干潟断面の季節的な変動特性の要因分析

図-5 に示すように、鉛直変位パラメータは年周期の変動パターンを有し、夏～秋は堆積傾向、冬～春は侵食傾向を示すことがわかる。また、この時系列変動は平均潮位 η_{56} (56日の移動平均) の変動と相関性が高いことが分かったので、両者の関係を式(7)のように仮定し、線形回帰を行った。

$$D(t) = A[\eta_{56}(t) - \eta_0] \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 A は平均潮位の上昇量に対する干潟の鉛直変位量を表す定数、 η_0 は $\eta_{56}(t)$ のシフト量であり、 $D=0$ の時 $\eta_{56}(t) = \eta_0$ である。

回帰分析の結果では、シフト量 η_0 は2年間の観測期間

中の平均潮位 ($+0.14 \text{ m}$) とほぼ等しいことがわかった。また、相関係数は両岸ともに0.7以上であり、平均潮位と鉛直変位パラメータの間には比較的良好な正の相関関係が存在するとともに、タイムラグも比較的小さいことが確認できた。図-5には式(7)による予測値も合わせて示しているが、簡便な式にもかかわらず、比較的良好な結果が得られている。

ところで、Bruun (1962) の海面上昇に伴う平衡断面の概念では、岸沖断面が海面上昇量と同等の鉛直変位を行なうことを仮定しており、これは式(7)において $A=1.0$ と考えることに相当する。しかし、今回の解析では両岸とも定数 A の値は0.2程度であり、平均潮位の上昇量に比較して干潟の鉛直変位量は約5分の1である。この理由としては、平均潮位の上昇が夏から秋にかけての数ヶ月であることが大きな理由であると考えられる。

図-6に示すように、平均勾配パラメータは鉛直変位パラメータと同様に年周期の変動を行なっているが、平均潮位とは負の相関性を示す。つまり、堆積時に平均勾配は15%程度緩やかになり、侵食時には同程度急な勾配となる傾向を示す。そこで、平均潮位と平均勾配パラメータの関係を式(8)のように仮定し、線形回帰を行った。

$$S(t) = -\frac{\eta_{56}(t)}{L_c} + S_0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 L_c は平均潮位の変動による地形勾配の変化を表す代表スケール、 S_0 は $S(t)$ のシフト量であり、 $\eta_{56}(t)=0$ の時 $S(t)=S_0$ である。

回帰分析より、シフト量 S_0 は2年間の観測期間中の平均勾配にほぼ等しいことが分かった。また、 L_c は 4 km オーダの値であり、干出する干潟の幅(約 2 km) よりも大きなスケールである。図-6には式(8)による予測値も示しているが、鉛直変位パラメータ同様、比較的良好な結果が得られている。

凹凸度パラメータに関しては、図は示していないが、半年周期の変動を行っており、両岸の変動パターンは常

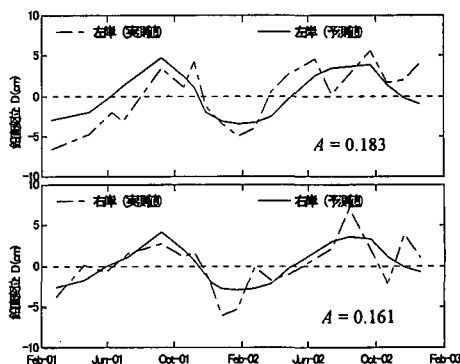


図-5 鉛直変位の時系列

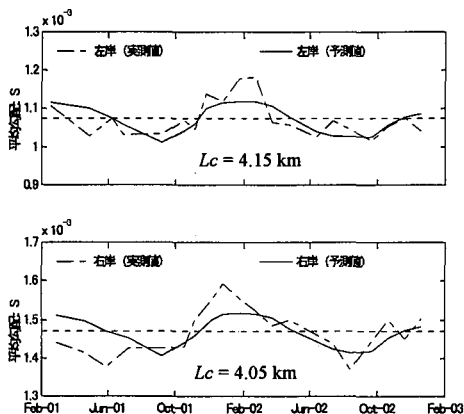


図-6 平均勾配の時系列

に同じではない。凹凸度パラメータは平均潮位・潮位差・降雨量との間に若干の相関性が見られるが、それらの時系列変動には2ヶ月程度のタイムラグが存在し、今回の解析では凹凸度パラメータと相関の高い外力を抽出するまでには至っていない。

5. 結 論

内湾河口域の干潟上で約2年間に渡って地盤高の岸沖分布を計測した。干潟断面ではバー地形が顕著に表れないため、その岸沖分布を2次多項式で近似し、時間変動項を分離するデータ解析手法を提案した。本手法を用いると±30 mm以内で全計測断面を近似できることがわかったので、時間変動を考慮した3つの地形パラメータ(凹凸度・平均勾配・鉛直変位)を定義し、その時系列と平均潮位・潮位差・波浪・風・降雨量(河川流量)の時系列と比較した。

その結果、平均勾配と鉛直変位パラメータは平均潮位の年周期変動とタイムラグも無く、相関性が高いことがわかった。半年周期で変動する凹凸度パラメータの主要因は特定できなかったが、2ヶ月程度のタイムラグが存在するものの平均潮位・潮位差・降雨量との間に若干の

相関性が確認できた。

謝辞: 海象観測データをご提供いただきました国土交通省熊本港湾空港工事事務所に感謝いたします。本研究は財)九州産業技術センターの助成を受けて、第1筆者がデラウェア大学滞在中に行った研究の一部であり、ここに記して感謝の意を表します。また、現地調査に際しては熊本大学の滝川教授、田中助手、外村技官をはじめとする海岸研究室各位にお世話になりました。

参 考 文 献

- 柿田哲哉, 木下栄一郎, 滝川 清, 山田文彦, 外村隆臣 (2003): 平均水面の季節変動が干潟地形に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 471-475.
- 栗山善昭 (2001): 沿岸砂州の長期変動特性と底質移動特性, 土木学会論文集, No. 677, II-55, pp. 115-128.
- Bruun, P. (1962): Sea-level rise as a cause of shore erosion, J. Wtrwy., Harbors Div., ASCE, 88, pp. 117-130.
- 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.
- Dyer, K. R., M. C. Christie and E. W. Wright (2000): The classification of intertidal mudflats, Cont. Shelf Res., 20, pp. 1039-1060.
- Frostick, L. E. and I. N. McCave (1979): Seasonal shifts of sediment within an estuary mediated by algal growth, Estuarine and Coastal Marine Science, 9, pp. 569-576.
- Kirby, R. (2000): Practical implications of tidal flat shape, Cont. Shelf Res., 20, pp. 1061-1077.
- Lee, S.-C. and A. J. Mehta (1997): Problems in characterizing dynamics of mud shore profiles, J. Hydraulic. Engrg., ASCE, 123 (4), pp. 351-361.
- O'Brien, D. J., R. J. S. Whitehouse and A. Cramp (2000): The cyclic development of a macrotidal mudflat on varying time scales, Cont. Shelf Res., 20, pp. 1593-1619.
- Winant, C. D., D. L. Inman and C. E. Nordstorm (1975): "Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunctions." J. Geophys. Res., 80 (15), pp. 1979-1986.
- Yamada, F. and N. Kobayashi (2003): Parameterization of mudflat profile changes caused by seasonal tide level variations, Res. Rep. No. CACR-03-02, Ctr. for Appl. Coast. Res., Univ. of Delaware, Del, 192 p.