

潮汐と風波による干潟の底質輸送と地形変化に関する数値計算

Numerical Study on the Sediment Transport and Morphologic Change of Intertidal Flats by Tides and Wind Waves

鶴崎賢一¹・栗山善昭²・坂本光³

Ken-ichi UZAKI, Yoshiaki KURIYAMA, Hikaru SAKAMOTO

The wave forcing term and a sediment transport model of sands were installed into the cohesive sediment transport model named "WD-POM" in order to calculate the morphologic change of intertidal flats due to tides and wind waves. Current fields and morphologic changes in the back of the offshore breakwater were calculated by using the improved model. Numerical results were agreed qualitatively with other experimental results. The model was also applied to the case of oblique incident waves on the uniformly inclined slope. The longshore sediment transport rate agreed quantitatively with the value estimated by using the longshore sediment transport formula. Furthermore, the improved model was applied to the Shirakawa intertidal flat in the Ariake Sea and current fields and morphologic changes were calculated.

1. 緒 論

干潟は、内湾の水質や生態系の維持という点で非常に重要な役割を果たしているという指摘が数多くなされている。そうした指摘にもとづいて、近年では人工干潟の造成が全国各地で行われるようになった。しかしながら、干潟上の底質移動に関しては未だ未解明な部分が多い。従って、底質を動的に安定化させ、人工干潟を維持・管理していくためには、干潟上の底質移動を詳細に明らかにし、その地形変化を予測する手法を確立することが必要となる。栗山・橋本(2004)は、有明海の白川河口干潟において、深浅測量データや波浪データなどから干潟上の土砂収支を計算した。しかしながら、現地観測データだけでは広範囲かつ任意の時間の底質移動量を把握すること、あるいは地形変化の将来的な予測は不可能である。このような問題にアプローチするためのツールとして、数値流体モデルにもとづいた干潟の地形変化予測モデルがいくつか提案されている。

鶴崎・栗山(2007)は、干潟上では潮流による底質輸送と地形変化が支配的であると考え、Uchiyama(2004, 2005)が開発したPOM(Blumberg and Mellor, 1983)をベースとするシルトの3次元底質輸送モデル「WD-POM」を有明海の白川河口干潟に適用し、潮流によるシルトの輸送ならびに干潟上の土砂収支の算定を行った。計算結果は、潮位、潮流速、底層濃度に関して中川(2002, 2003)の観測結果と良好に一致した。従って、静穏時には潮流が支配因子となり、このモデルによってシルトの巻き上げ

と輸送を計算することが可能であることがわかった。しかしながら山田ら(2007)は、潮間帯上での流速や濁度の時系列を比較すると、高波浪が継続して発生した時にもそれらの値が非常に大きくなると述べている。確かに現地では、満潮の高波浪時には相当量の底質が巻き上げられ、輸送されているように見受けられる。従って、干潟上の底質輸送を精度よく計算するためには、潮汐だけでなく暴浪時の風波による巻き上げと輸送を考慮する必要がある。また、現在対象としている白川河口干潟では底質の含泥率が低い領域が多く、その地形変化を精確に計算するためには砂の輸送モデルも導入する必要がある。

そこで本研究では、WD-POMにNewberger・Allen(2007a, b)が提案した、波と流れの相互作用を考慮したwave forcing termを導入し、まず風波によって引き起こされる海浜流を計算できるようにモデルの改良を行った。また、浮遊砂と掃流砂、ならびに平均流と振動流を同時に考慮できる漂砂量モデルであるBailardモデル(Bailard, 1981)を導入した。本論文では、改良モデルの概要と検証計算、ならびに白川河口干潟に再度適用して、その流れ場を調べた結果を示す。

2. モデルの概要

WD-POMは、Uchiyama(2004, 2005)が開発した潮汐によるシルトの輸送モデルである。このモデルは、POMに干出・冠水スキームを加え、極浅海域においても底面の抵抗係数を計算できるように拡張対数則を導入し、さらに移流拡散方程式と巻き上げ・沈降のサブモデルによるシルトの輸送モデルを加えたものである。本論文では、さらにNewberger・Allen(2007a, b)によるwave forcing termを導入し、漂砂量モデルとしてBailardモデルを組み込んだ。以降、このモデルを改良モデルと呼ぶこととする。このwave forcing termは、波・流れ共存場のレイ

1 正 会 員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所 海洋水工部沿岸土砂管理チーム 研究官

2 正 会 員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所 海洋水工部沿岸土砂管理チーム チームリーダー

3 正 会 員 (株) プライア・コンサルタント

ノルズ応力をもとに、従来のradiation stressと一部等価な項と波と流れの相互作用の項を導いたものであり、式(1)で示される。式(1)の右辺第一項目が波のエネルギーの空間変化、第二項目が波と流れの相互作用を表す項であり、vortex force termと呼ばれている。本論文では、これに係数を相対水深 kh と関連づけた指数関数型の鉛直分布関数を乗じて用いている。

$$F_b^x = -\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{E}{D} \right) + \frac{M_w^y}{D} \left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$F_b^y = -\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{E}{D} \right) - \frac{M_w^x}{D} \left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} \right)$$

$$M_w = (M_w^x, M_w^y) = (Ek / \omega_r, El / \omega_r)$$

$$\omega_r^2 = HK^2 = (H_0 + \eta_B) K^2$$

ここで、 E は波のエネルギー、 k , l は x , y 方向の波数、 H_0 は水深、 η_B はセットアップ量、 $K = (k^2 + l^2)^{1/2}$ である。 ρ は水の密度を示す。式中の U , V はそれぞれ x , y 方向の断面平均流速である。

また、砕波帯内の水表面において、式(2)で示される砕波によるせん断応力項も考慮した。

$$\frac{K_M}{D} \frac{\partial (u, v)}{\partial \sigma} = \frac{(\tau^{xx}, \tau^{yy})}{\rho} \quad \text{at } \sigma = 0. \quad (2)$$

$$\frac{(\tau^{xx}, \tau^{yy})}{\rho} = (k, l) \frac{\varepsilon_d}{\omega_r}$$

ここで、 K_M は鉛直渦動粘性係数、 ε_d は砕波によるエネルギー散逸である。式中の u , v は、それぞれ x , y 方向の表層流速である。さらにNewberger・Allen(2007b)にもとづいて、乱れエネルギーの輸送方程式の水面の境界条件を、砕波による表面シアと水面の粗度を用いて改良した。波浪場の計算は、計算領域の沖側開境界で不規則波を与え、高山ら(1991)による砕波減衰、間瀬ら(1999)による回折項を導入し、堤体からの反射波も考慮したエネルギー平衡方程式を用いて行った。計算結果として得られた有義波高、有義波周期およびエネルギー散逸率を用いて式(1), (2)の各パラメータを計算した。

式(3)で示されるBailardモデルは今日比較的広く使われている漂砂量モデルであり、浮遊砂と掃流砂を同時に考慮することができるとともに、平均流と振動流を同時に考慮することができる。

$$\langle \vec{i} \rangle = \rho c_f \frac{\varepsilon_B}{\tan \phi} \left[\langle |\vec{u}_t|^2 \vec{u}_t \rangle - \frac{\tan \beta}{\tan \phi} \langle |\vec{u}_t|^3 \rangle \vec{i} \right] + \rho c_f \frac{\varepsilon_S}{W} \left[\langle |\vec{u}_t|^3 \vec{u}_t \rangle - \frac{\varepsilon_S \tan \beta}{W} \langle |\vec{u}_t|^5 \rangle \vec{i} \right] \quad (3)$$

ここで、 \vec{i}_t は単位幅当たりの全漂砂量、 c_f は抵抗係数で0.005、 ϕ は砂の内部摩擦角で 32° 、 W は砂の沈降速度であり、Rubey式を用いて算定した。 β は局所海底勾配、 ε_s , ε_B は浮遊砂と掃流砂の変換効率係数であり、それぞれ0.025, 0.05とした。 \vec{i} は各方向の単位ベクトル、 $\langle \rangle$ はパラメータの時間平均を表している。

3. モデルの検証

改良モデルの検証のために、離岸堤背後の流れ場と地形変化について計算(Run1)を行って既往の実験と定性的な比較を行うとともに、一樣勾配斜面上の斜め入射波による底質輸送の計算(Run2)を行い、沿岸漂砂量についてCERC公式との比較を行った。

(1) 離岸堤背後の流れ場と地形変化

図-1に、離岸堤背後の流れ場に関する池野ら(1993)の実験結果を示す。図から、離岸堤背後では、波の回折によって、中央部で離岸堤に向かう沖向き流れとなる1対の水平循環流が形成されることがわかる。この循環流によって、離岸堤背後には舌状砂州が発達し、やがてトンポロに発達するものと考えられる。

表-1にRun1の計算条件を、図-2に波高分布を示す。

Run1では、沖側境界から岸向きに x 軸、沿岸方向に y 軸を設定し、 x 方向に1600m、 y 方向に2000mの矩形領域を計算領域とした。簡単のために、 y 方向の両側境界は壁面とした。計算領域中央部の、汀線から約600mの位置に、幅約600mの離岸堤を設置した。沖側境界において、有義波周期10s、有義波高2mの不規則波を直角入射させた。層数は10層とした。計算開始から6時間まで、作用応力を徐々に増大させる助走計算を行った。図-2では、離岸堤前面において反射波による波高の増大が若干認められる。離岸堤背後では、入射波浪が回折している様子がわかる。

図-3に、 $t=86400$ s(1日後)における断面平均流速分布を示す。図中の記号は、図-4に示される流れの鉛直分布の位置である。図から、離岸堤背後では、中央部で離岸堤に向かう沖向き流れとなる1対の水平循環流が形成されていることがわかる。また汀線近傍では、中央部に向かう収束流が形成されていることがわかる。現地スケールでの観測結果がないため定量的な検討はできないが、図-3に示される水平循環流の形成は、図-1に示した実験結果や計算結果と定性的には一致する。図-4に、流れの鉛直分布を示す。図から、水平循環流が形成されていない領域では、表層で岸向き、下層で沖向きとなる鉛直循環流が形成されていることがわかる。また水平循環流が形成されている領域では、表層から底層まで同一方向の流れ場となっている。図-5(a)~(d)に、 $t=86400, 172800$,

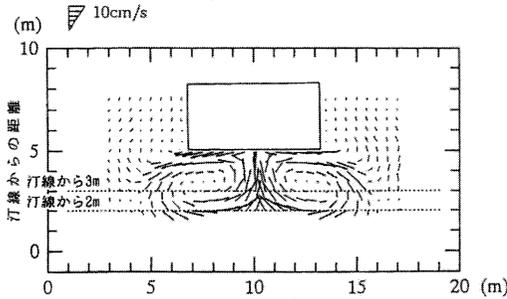


図-1 離岸堤背後の流れ場に関する実験結果(池野ら, 1993)

表-1 検証計算の計算条件(Run 1)

nx	41	H _{in}	2.0 m
ny	51	T _{in}	10.0 s
nz	10	?	0.0 °
dx	40 m		
dy	40 m		
dti	1.0 s		
dte	0.1 s		
tanβ	1/100		

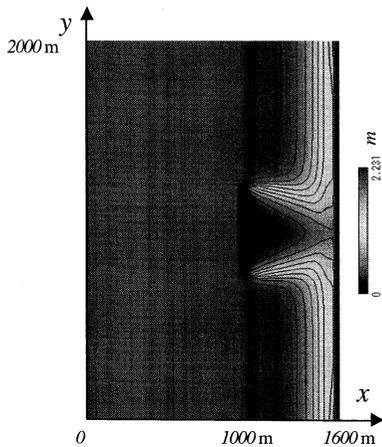


図-2 波高分布

259200, 345600sにおける水深分布を示す。図から、(a)では双頭型に初期の舌状砂州の発達が見られる。

やがて(d)では汀線近傍の収束流と離岸堤中央部の沖向き流れによって、1本の舌状砂州が発達していく様子がわかる。また、離岸堤のすぐ背後では沖向き流れが急速に減速するため、この領域でも底質の堆積が認められる。これらが連結して、トンボロ地形に発達するものと考えられる。

(2) 沿岸漂砂量の検証

Run2の計算領域は、Run1の計算領域において離岸堤をなくし、y方向の両側境界を周期境界としたものであ

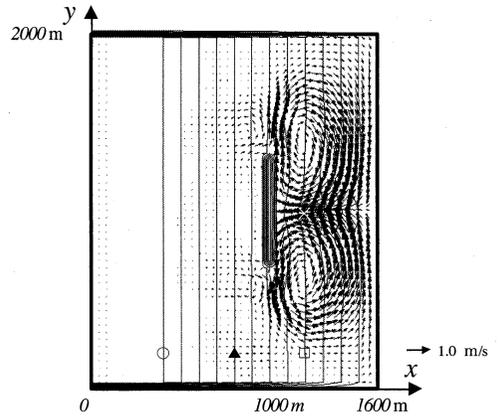


図-3 断面平均流速分布(t=86400 s)

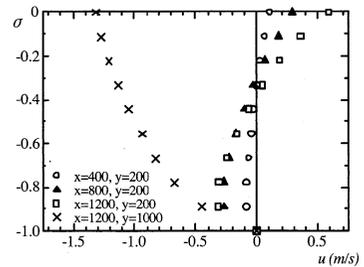


図-4 流れの鉛直分布

る。沖側境界において、有義波周期10s, 有義波高2mの不規則波を45°の角度で入射させた。計算開始から6時間まで助走計算を行った。図-6に、t=86400s(1日後)における、y=500, 1000, 1500mにおける断面平均流速の岸沖分布を示す。図から、全域でy軸負向きの沿岸流が形成され、砕波点のやや岸側で非常に大きな流速となることがわかる。斜め入射波なので、表層では岸向き成分、底層では沖向き成分の流れも形成されているが、断面平均をとるとほぼ相殺されている。

$$Q_0 = \frac{K_c H_b^2 c g_b \sin \alpha_b \cos \alpha_b}{8s(1-\lambda)} \quad (4)$$

式(4)に全沿岸漂砂量についてのCERC公式を、容積表示で示す。ここで、K_cはCERC公式の定数であり、0.385とした。H_bは砕波点における有義波高、c_gは群速度、sは海水に対する底質の密度比、λは底質の空隙率であり、0.4とした。本計算における砕波点での諸量と式(4)を用いると、全沿岸漂砂量は0.654m³/sとなる。Run2の計算結果から、y=1000mの位置で沖側境界から汀線までの沿岸漂砂量を積分すると0.363m³/sという結果となる。前者が移動限界水深から汀線までの全沿岸漂砂量と考えると、後者の計算結果は比較的良好な値といえる。以上の結果

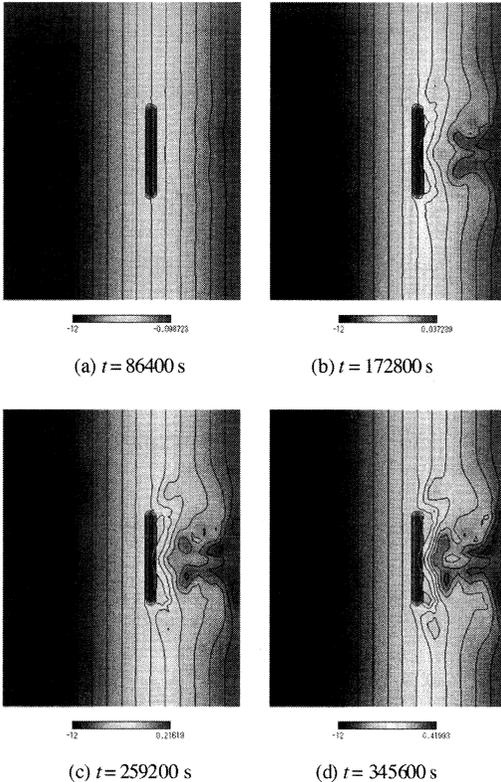


図-5 地形の時間変化

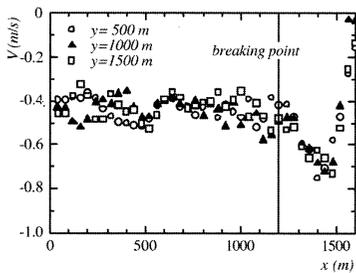


図-6 沿岸流速の岸沖分布 (Run 2)

から、本モデルは砕波帯内の海浜流ならびに底質輸送をある程度精確に再現できることがわかる。

4. 白川河口干潟への適用

図-7に、有明海と白川河口干潟を対象とした計算領域を示す。まず大領域として有明海全体の計算を行い、得られた潮位データを境界条件として小領域の計算を行った。大領域の境界潮位は、中川(2003)によって調節された調和定数を用いて与えた。小領域は、北向きにx軸、西向きにy軸を設定した。図中に灰色の実線で示された四角は、栗山・橋本(2004)による深淺測量の領域である。小領域の計算では、白川河口の汀線位置において河川か

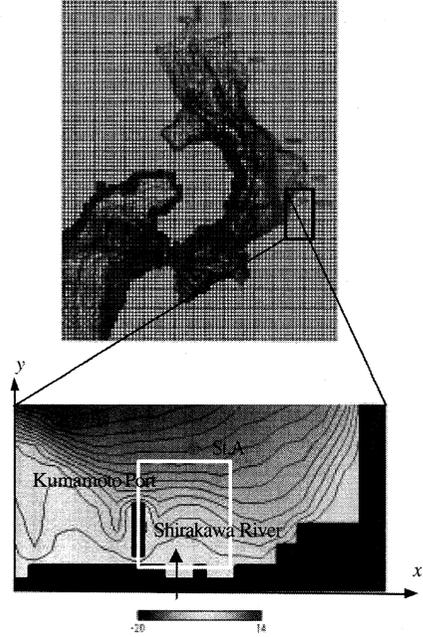


図-7 現地計算の計算領域

表-2 計算条件

		大領域	小領域
格子数	nx	90	55
	ny	110	28
	nz	11	6
格子間隔	dx	900 m	300 m
	dy	900 m	300 m
時間間隔	dt	0.5 s	0.1 s

らの流入水量、シルト量を、流速とSS濃度に換算して与えた。計算期間は、大領域・小領域ともに15日間とした。計算開始から12時間までの間は助走計算とした。また、熊本港の波浪データをもとにして、沖側開口部で波高1.0m、周期6.0sの入射波を与えた。表-2に計算条件を示す。

図-8(a)~(d)に、大潮の下げ潮時(t=425353s)、十潮時(t=438646s)、上げ潮時(t=451938s)、満潮時(t=465230s)における断面平均流速分布を示す。(a)から、沖合いではやや南西向き、汀線近傍ではほぼ西向きの流れが生じていることがわかる。(b)では汀線が熊本港沖側端程度まで後退し、現地の状況をほぼ再現していることがわかる。また(c)の上げ潮時では、沖合いでやや北東向き、汀線近傍では東向きの流れが生じている。図-9に、計算開始から5日後までの地形変化量を示す。汀線近傍で侵食、そのやや沖合いで堆積という傾向が認められるが、これらの計算結果については、今後、詳細な検証を行っていく必要がある。そして、栗山・橋本(2004)による深

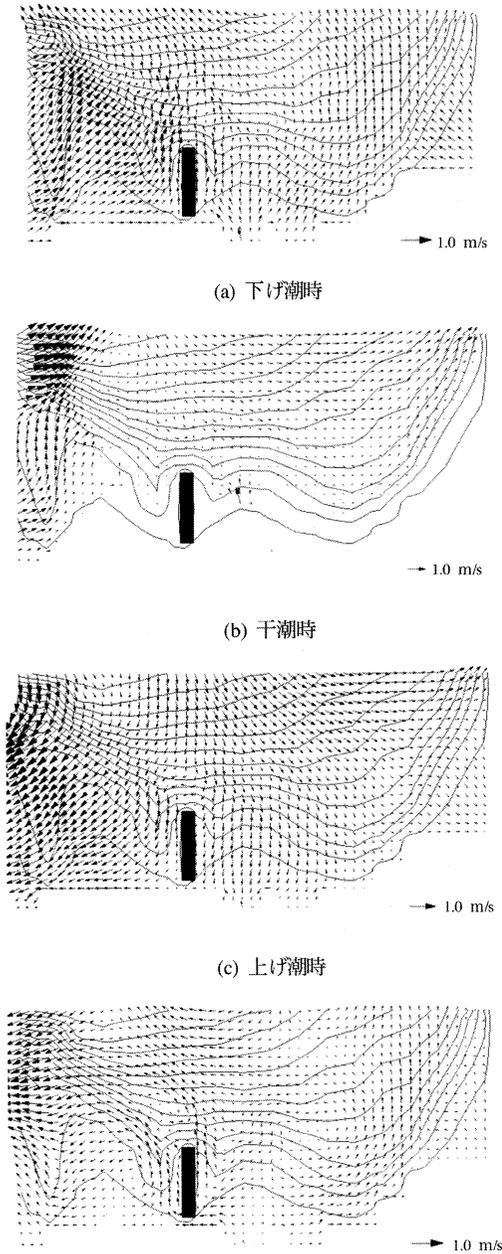


図-8 大潮時の断面平均流速分布

浅測量結果から算定した土砂収支との比較検討を行なって底質輸送の詳細を明らかにする予定である。

5. 結論

潮汐によるシルトの3次元輸送モデル「WD-POM」に、wave forcing termと漂砂量モデルを導入し、潮汐と風波によるシルトと砂の輸送と地形変化の計算が可能となるように改良した。また、モデルの妥当性の検証計算を行っ

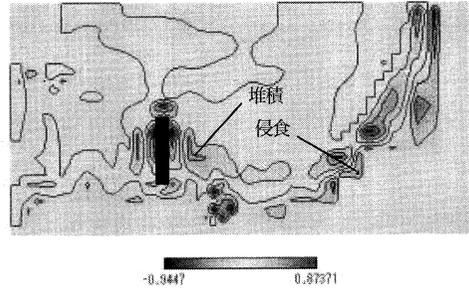


図-9 地形変化量(5日後)

た上で白川河口干潟に適用した。その結果、本モデルによって現地干潟の流れ場と底質輸送および地形変化の計算が可能であることがわかった。

参考文献

池野正明・鹿島遼一・松山昌史・榊山勉・窪泰浩(1993)：人工島式発電所背後の波浪場・海浜流場に関する実験的研究，海岸工学論文集，第40巻，pp.621-625。
 鶴崎賢一・栗山善昭(2007)：白川河口干潟における凝集性土砂の土砂収支に関する数値計算，海岸工学論文集，第54巻，pp.456-460。
 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，港空研資料，No.1074。
 高山知司・池田直太・平石哲也(1991)：碎波および反射を考慮した波浪変形計算，港湾技術研究所報告，第30巻，第1号。
 中川康之(2003)：有明海における底泥輸送現象のモデル化，港湾空港技術研究所報告，第42巻 第4号。
 間瀬肇，高山知司，国富蔣嗣，三島豊秋(1999)：波の回折を考慮した多方向不規則波 波の変形モデルに関する研究，土木学会論文集No.628/II-48，pp.177-187。
 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・多田彰英(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。
 Bailard, J. A. (1981) : An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach, Jour. Geophys. Res., 86, pp.10938-10954.
 Blumberg, A. F. and G. L. Mellor (1983) : Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight, J. Geophys. Res., 88, pp.4579-4593.
 Newberger, P. A. and J. S. Allen (2007a) : Forcing a three-dimensional, hydrostatic, primitive-equation model for application in the surf zone : 1. Formulation, Jour. Geophys. Res., 112, C08018, doi : 10.1029/2006JC003472.
 Newberger, P. A. and J. S. Allen (2007b) : Forcing a three-dimensional, hydrostatic, primitive-equation model for application in the surf zone : 2. Application to DUCK94, Jour. Geophys. Res., 112, C08019, doi : 10.1029/2006JC003474.
 Uchiyama, Y. (2004) : Modeling wetting and drying scheme based on an extended logarithmic law for a three-dimensional sigma-coordinate, Rep.Port and Airport Res. Inst., Vol.43 No.4.
 Uchiyama, Y. (2005) : Modeling three-dimensional cohesive sediment transport and associated morphological variation in estuarine intertidal mudflats, Rep.Port and Airport Res. Inst., Vol.44 No.1.