

〔特集〕ながれと地形

干潟のながれと地形変化

*港湾空港技術研究所 海洋・水工部

内山 雄介†

Hydrodynamics and Geomorphology on Intertidal Flats

Yusuke UCHIYAMA, Marine Env. and Eng. Dep., Port and Airport Research Institute

1 はじめに

干潟を構成する広大な潮間帯と浅場は多種多様な生物の生息空間であり、生態学的に重要な場所であると同時に、著しい水質浄化機能を有していることが知られている^{1,2)}。干潟の生態系を維持・修復・創造していく上で、底質の粒径、漣筋などの微地形や海底勾配を含む地形変化の予測を正確に行うことは、工学的に極めて重要な課題である。干潟で生じる地形変化が、たとえ砂浜では問題にならないほど小規模なものであったとしても、干潟に棲む生物に与えるインパクトは計り知れないほど大きい³⁾。例えば、砂質干潟では海底面の侵食量が僅か2cmを超えただけでアサリの個体数が激減することが報告されている⁴⁾。しかしながら、干潟の水理・地形変動特性に関する情報は砂浜に対する情報と比較すると極めて少なく、例えば人工干潟の整備^{5,6)}においては、砂浜海岸の漂砂特性に関する知見⁷⁾を援用しているのが現状であり、動的に安定した干潟地形を形成させることは非常に困難となっている。

干潟上の流動に対しては、潮汐の作用による潮流、風による吹送流、波浪の軌道流速（および位相平均された波浪の効果としての海浜流系統⁷⁾）、河川等からの浮力の流入や密度成層に伴うBaroclinic成分、地球自転に伴うコリオリ力等が重畳して作用している。砂浜の地形変化に対しては、通常は波浪の効果が卓越しているが、干潟地形の変形を惹起するのは主に潮汐および潮流である。また、砂浜は主に比較的均一な細砂で構成される

が、多くの干潟地盤は、シルト・泥に代表される細粒土砂を含んだ混合粒径土砂で構成されるため、外力に対する地盤のレスポンスも大きく異なったものになる⁸⁾。加えて、干潟の地形勾配は1/1000～1/2000程度と緩く、潮汐に伴って干出・冠水を繰り返す特異な水理環境下にあるため、実験室内で干潟上の流れを再現することはほぼ不可能である。数値シミュレーションに関しても、水深がゼロになる移動境界追跡を行う必要があるため、3次元計算は困難であった。これらのことから、干潟上の水理・底質輸送に関する研究は、主として現地観測(PRO-MAT ,INTRMUD ,Canadian LISP , LISP-UK 等⁹⁻¹¹⁾)と平面2次元計算¹²⁻¹⁴⁾によって進展してきた。

本稿ではまず、現地調査にもとづいた干潟上の長期および短期の地形変化の現状と、それを駆動する流れについて検討した事例¹⁵⁻¹⁸⁾を紹介する。次いで、干潟の流れと地形変化に関する最新の3次元シミュレーション技術¹⁹⁻²²⁾を紹介し、最後に関連する最近の話題を紹介する。

2 盤洲干潟における現地調査

2.1 干潟の長期的な地形変化の実態

現地調査を実施した海域は、東京湾東岸部に位置する木更津沖の小櫃川河口干潟（盤洲干潟）である（図1）。調査は2000年2月¹⁵⁻¹⁷⁾（河川出水なし）と9月¹⁸⁾に実施された。ここでは紙面の都合上、主として2月の観測結果の概略を紹介する。

盤洲干潟は典型的な砂質干潟であり、底質の中央粒径は190 μ m程度である¹⁷⁾。まず、長期的な地形変動を調べるために、1994年から2000年に

* 〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1

† E-mail: uchiyama@pari.go.jp

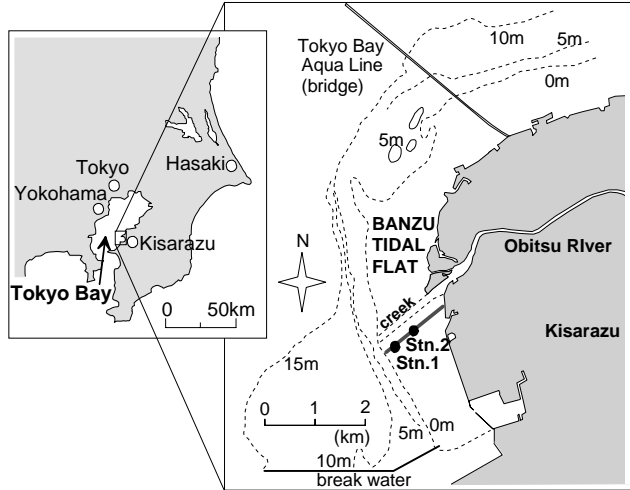


図1 現地観測実施海域（東京湾東岸部・千葉県木更津市地先、小櫃川河口盤洲干潟）

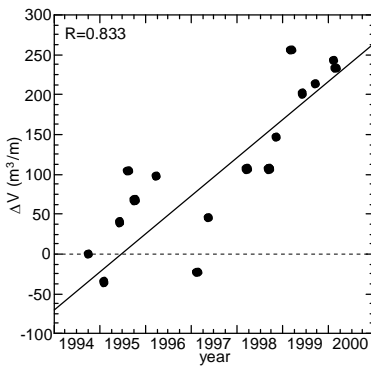


図2 盤洲干潟における長期的な土砂量変化。

かけて実施された地形断面測量結果を用いて、小櫃川河口付近の岸沖断面における単位沿岸距離あたりの土砂量の経年変化を求めた（図2）。図中では1994年10月の土砂量からの差を表示している。その結果、小櫃川河口干潟周辺は、侵食・堆積を繰り返しながらも、長期的には約 $45\text{m}^3/\text{m}/\text{y}$ 、地盤高に換算すると平均で約 $3.8\text{cm}/\text{y}$ の速度で徐々に堆積しつつあることが分かった。

2.2 干潟の短周期地形変化と流れ

図3は Stn.1 における砂面高さと潮位、および Stn.2 における濁度の時系列を示している。観測期間は大潮 - 小潮 - 大潮にかけて行われており、Stn.1 は大潮の最干潮時でも多少冠水し、Stn.2 は

概ね干潮毎に干出していた。まず、最初の3日間で初期砂面高さから最大8cm程度の侵食が生じ、その後、侵食と堆積を小刻みに繰り返しながら徐々に堆積し、もとの砂面高さに戻っていく様子が捉えられている。また、濁度データと砂面変動は比較的良好な変動パターンを示しており、例えば2月8日～9日などに見られるように、砂面が大きく下降（つまり侵食）するときには必ず高い濁度が観測されていることが分かる。一方、水位の低下とともに波高が減少して（図4）埋め戻されるため、潮汐に対応した形で小規模な侵食と堆積を繰り返す。図4から、観測地点の平均水深が極めて浅いために波浪は潮汐の影響を強く受けていることが分かる。これは潮位が低いほど砕波点が沖側に移動することになるため、高潮位時に波高が大きく、反対に低潮位時には波高が小さくなるような変動が卓越しているからである。波高は最大で0.8m、周期は4秒程度で、東京湾奥部としては比較的大きな波が来襲していた。波向きは概ね風の吹送方向と一致しており、主としてNからNNW方向である。平均的な主波向きがNNWという事実から、岸沖方向ではなく、沿岸方向に伝播する波浪が卓越していたことが分かる。クロススペクトル解析の結果からも、干潟上の波浪（波高変動）は、広い帯域にわたって風よりも潮汐（つまり水深）との相関が高いことが確認されている。

次に、Stn.2 における平均流速ベクトル（図5）

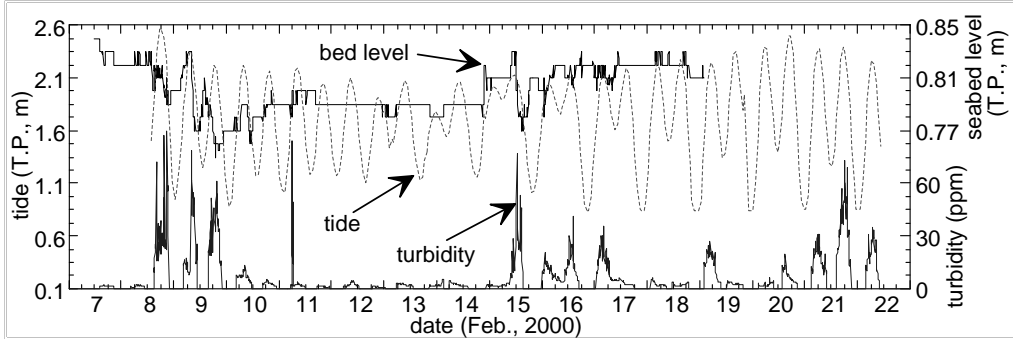


図3 盤洲干潟における底面高さ，潮位，濁度の時系列

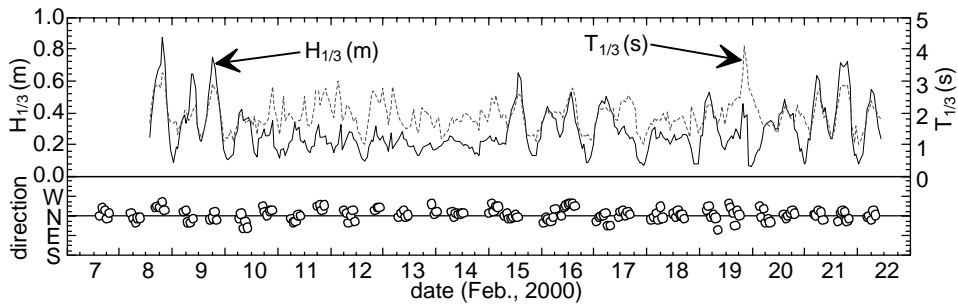


図4 第二海堡における有義波高 $H_{1/3}$ ，有義波周期 $T_{1/3}$ ，平均波向きの時系列

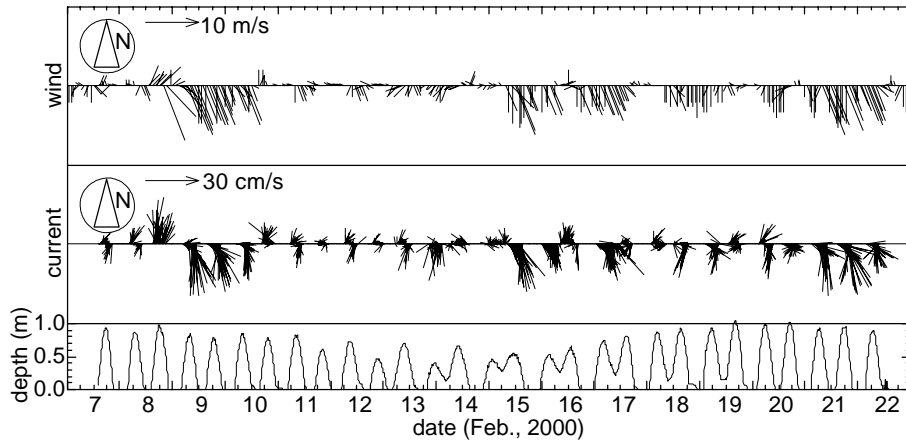


図5 AMeDAS 木更津による風向風速，干潟上の流速ベクトルおよび流速計測点における水深の時系列。

を見ると，観測期間全般にわたる長周期の流速変動は，風速変動パターンに対応していることが分かる．同時に，潮汐の干満によって流向を反転させていることから，潮汐の影響も強く受けている．加えて，波高も潮汐に追従して発達・減衰しているため，干潟上の流れは結局，風，潮汐，波の影響を受けていることになる^{23,24)}．クロススペクト

ル解析の結果から，干潟上の流れは，1 日以上 の長周期変動に対しては風，半日周を中心とした短周期変動に対しては潮汐の干満と波浪の影響を強く受けていることが明らかになった．

2.3 地形変化に対する河川出水の影響

盤洲干潟は小櫃川河口部に広がっているため，

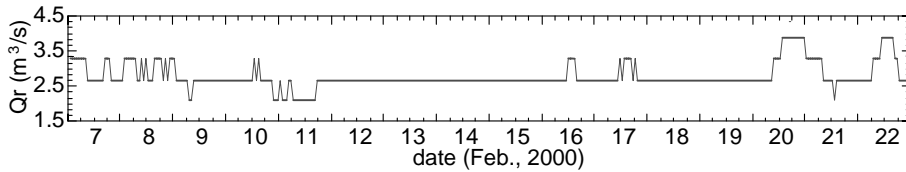


図6 観測期間中における小櫃川からの出水流量。(出水時流量は20~180m³/s)

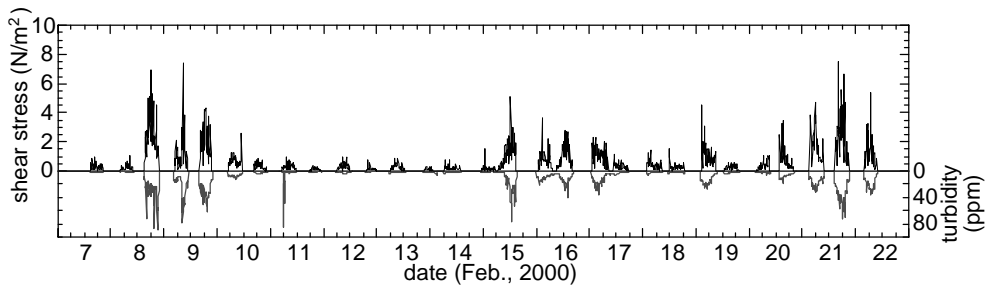


図7 底面せん断応力(上)と濁度(下)の時系列.

干潟上の流れ、浮遊砂、地形変動等を議論する際には、河川の影響を考慮する必要がある。そこで、河口部より5.6km上流に設けられた千葉県の水位観測所における水位の実測値から推定された小櫃川流量を図6に示す。本川における降雨直後の出水時流量は20~180m³/sであるため²⁵⁾、計測期間中の河川流出はほぼゼロであったと判断された。

流速データより直接、底面せん断応力を求め、濁度と比較したところ、両者はほぼ完璧に同じ変動パターンを示した(図7)。これらのことから、河川出水のない場合の盤洲干潟では、潮流および潮汐の影響を受けた短周期の風波による軌道流速の影響を複合的に受けた形で底面シアが変動し、シアが大きいつきに大量の浮遊砂が発生して地盤が侵食する、という傾向にあることが明らかになった。砂面上の限界シールズ数に関する知見と観測データを照合した結果、底面シアが比較的小さい静穏時には、沖側海域から土砂が岸側へ徐々に輸送されて緩慢な堆積が生じることが分かった。

河川水の影響を調べるために実施した2000年9月の観測¹⁸⁾では、降雨に伴う30~75m³/sの河川出水を捉えることに成功した。干潟底質は細砂、河川水中の浮遊土砂はシルト・泥分が多く含まれているため、干潟上で計測された濁度には混合粒径土砂濃度の情報が含まれている。この2つの粒径レンジの土砂濃度を分離するために、OBSによ

る光学式後方散乱強度²⁶⁾と、ADVによる超音波後方散乱強度²⁷⁾を用いた推定方法を構築し、それを用いてローカルな再懸濁土砂と系外(主として河川)から移流分散されてきた土砂を分離することに成功した。その結果、河川起源の土砂が干潟の地形変動に直接寄与する可能性は低く、非出水時と同様に、荒天時に底面シアが上昇することにより、干潟底質の再懸濁およびそれに伴う侵食が急激に進行し、その後の静穏時に緩やかな堆積が生じるものと推定された。この地形変動パターンは、河川から排出されて一旦沖へと流出した土砂の一部が、掃流状態で徐々に岸側へ輸送された現象を反映したものである可能性が高いものと推察された(同様の現象が、中小河川を有する開放性砂浜海域において確認されている^{28,29)})。

2.4 他の海域における干潟上の流れと地形変化

近年、欧州、米国、日本等の干潟海域において、流動と底質輸送に関する現地調査が精力的に実施されるようになってきた(例えば、オランダ Dollard Estuary^{30,31)}、英国 Humber Estuary³²⁾ および Severn Estuary³³⁾、フランス Marennes-Oleron 湾³⁴⁾、米国 San Francisco 湾³⁵⁾、有明海³⁶⁻³⁸⁾)。それぞれの干潟は潮汐が卓越する内湾域に存在しているため、いずれの場合も、ここで紹介した盤洲干潟と同様に、干潟上の流動と底質輸送は潮汐の影響を

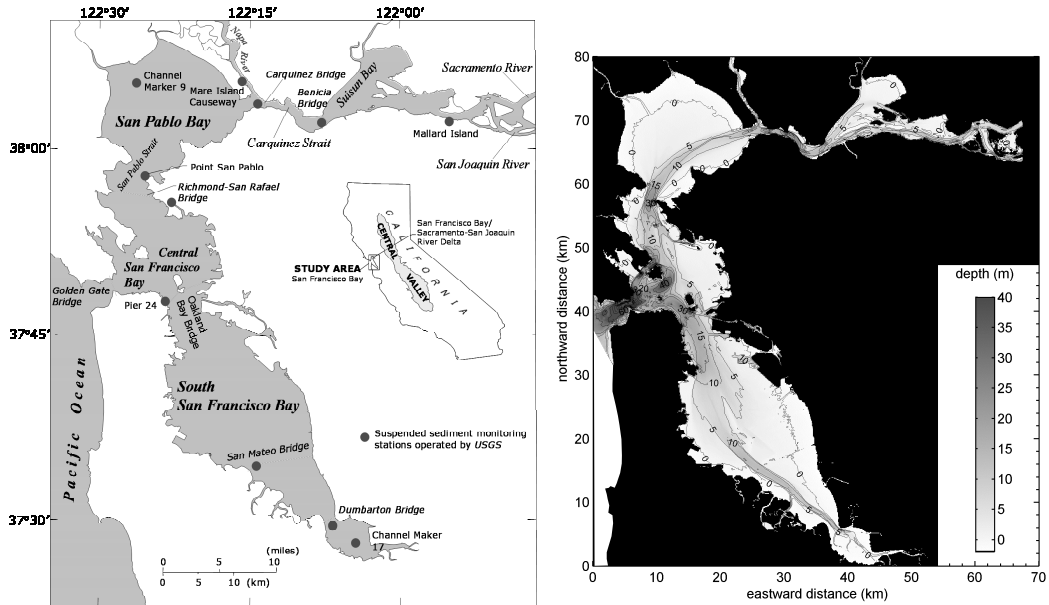


図8 米国 San Francisco 湾の位置 (左) と水深分布 (右)。

強く受けている。しかしながら、上記の多くの干潟は外力の弱い海域に発達した泥干潟であるため、地形変化量は1~2cm程度であり、10cm前後の変動量を有する砂質の盤洲干潟と比較すると、極めて微小である。

我が国の干潟は歴史的にその大部分が開発行為により埋め立てられてきた。近年では、ミチゲーションの考え方が浸透してきており、開発により消失する自然環境を再生するために浚渫残土を用いて人工的に干潟を整備したり、既存の干潟を再生したりするケースが増加している³⁹⁻⁴²⁾。中でも人工干潟は、一般に汚染された残土を用いて造成されるため、事業前後で生物の生息環境を評価することが求められてきており、数値生態系モデルも整備されつつある⁴³⁾。我が国に特有の問題は、人工干潟を比較的海象条件の厳しい環境に整備することが多いため、自然干潟と比較すると波浪の影響を強く受ける傾向にあり、波による地盤の液状化^{44,45)}や圧密沈下⁴⁶⁾の問題が懸念されていることである。なお、San Francisco 湾の泥干潟における観測例³⁵⁾では、対象領域が湾口近傍ということもあり、外洋からのうねり性の波の影響を強く受けることが報告されており、興味深い。

3 干潟の流れと地形変化に関する数値モデル

3.1 3次元モデルの必要性

干潟に限らず、塩性湿地、マングローブ林などの潮間帯水域は、潮位変動に伴う干出・冠水により海底地盤が周期的に露出するという特殊な水理環境下にあり、数値モデルにより流況を再現する際にはこの現象を合理的にモデリングすることが重要なポイントとなる。特に潮間帯での底質浮遊、熱収支、物質輸送などを考える上では、水深以下スケールの流動を正確に再現することが求められる。最近の観測⁴⁷⁾によると、干出する干潟域であっても明確な密度成層が形成され、それが潮位変動に伴ってダイナミックに移動することが分かってきた。従来、潮間帯での流動は鉛直積分型の平面2次元モデル¹²⁻¹⁴⁾で表現されることが多かった。また、層積分型の3次元多層モデルを用いる試みも幾つかなされている⁴⁸⁻⁵²⁾。しかしながら、これらのモデルでは潮間帯を単一層で表現するために鉛直構造を考慮できない点が大きな問題となっていた。一方、 σ 座標変換を用いた3次元海洋モデル⁵³⁾は、物理座標における水深を σ 座標に変換するため、水深が浅くとも鉛直構造を保持しながら計算を進められるという著しい利点がある⁵⁴⁾。

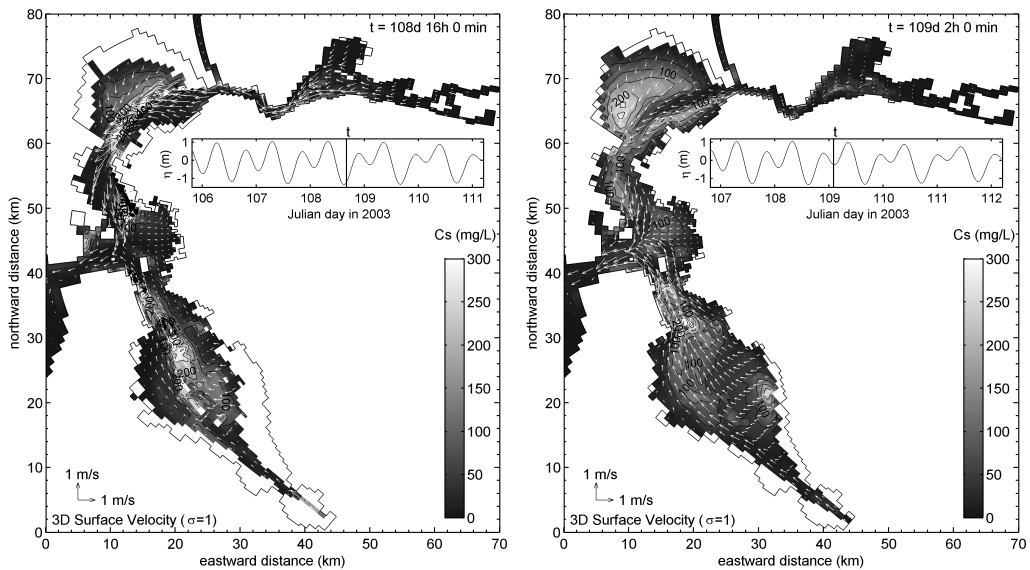


図9 Cohesive 土砂の表層分布のスナップショット。(左)下げ潮から干潮,(右)上げ潮から満潮の位相。

その反面、水深がゼロになると計算が破綻すること⁵⁵⁾、水位低下時に潮間帯での最下層格子高さが粗度長以下となり鉛直拡散係数が無限大となる¹⁹⁾などの問題を同時に包含している。

3.2 WD-POM-SED の開発

これに対して著者は、3次元座標系海洋流動モデル⁵³⁾に適用可能な干出・冠水スキーム(WDS)を開発した¹⁹⁻²¹⁾。WDSでは、拡張対数則を新たに導入することにより、干出域を含む潮間帯において水深が極めて浅くなった場合でも底面境界層周辺の流速場を正確に再現することが可能となっている。このWDSはシンプルな形で定式化されているが、領域全体の質量保存と数値的なロバストネスを選択的に確保することができるようにモデリングされている。開発された3次元モデル(WD-POM)の再現性を確認するため、計算結果を理論解および米国San Francisco湾における潮位、3次元流速観測データと比較し、良好に一致することを確認した。San Francisco湾は広大な潮間帯・干潟により沿岸部を囲まれた典型的な閉鎖性内湾であり(図8)、干出・冠水現象が湾内流動に対して重要な役割を果たしている。しかしながら、潮間帯域の底質輸送を精緻に再現する3次元モデルはこれまで提案されていなかった。そ

こで、WD-POMに適用可能な3次元凝集性土砂(cohesive sediment)輸送モデルおよび地形変化モデルを開発した(WD-POM-SED)²²⁾。土砂輸送モデルは沈降速度を考慮した3次元の移流拡散方程式を基礎式とし、水塊のシアと凝集性土砂のフロック形成を考慮した沈降速度⁵⁶⁾、海底面における沈降堆積速度⁵⁷⁾および再懸濁侵食速度⁵⁸⁾の各サブモデルが含まれている。基礎方程式はWD-POMに適合するように3次元デカルト座標系から水平直交曲線座標系および鉛直座標系へと変換されている。海底地形変動モデルは底質の沈降、再懸濁を考慮した海底面における土砂の体積保存則に基づいており、底質の間隙率を通じて圧密沈下を考慮できるように定式化されている。

3.3 WD-POM-SEDによるSF湾の地形変化計算

WD-POM-SEDを用いてSan Francisco湾の土砂輸送・地形変動計算を行った²²⁾。凝集性土砂の再懸濁は湾中央に形成された水深の深い水路部において卓越しており、潮流によって潮間帯周辺を含む浅海域方向に土砂が輸送されて沈降するというプロセスが卓越することが明らかとなった(図9)。これに対応して、二朔望周期(約28日間)における潮流による地形変化結果(図10)から、水路部では侵食が、潮間帯干潟では堆積が卓越している

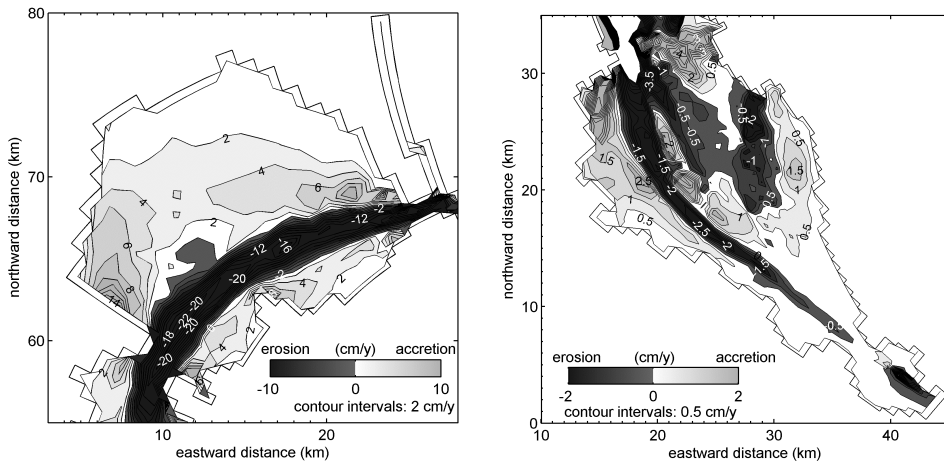


図 10 モデルによる地形変化速度。(左) 湾北部 San Pablo 湾, (右) 南 SF 湾。

ことが確認された(なお, 計算結果は音響測深から求められた地形変化量と良好に一致していたのを確認している)。すなわち, 潮間帯干潟域は内湾全体の流動だけではなく土砂収支の観点からも非常に重要な役割を果たしており, 潮流に対しては土砂の“シンク”として機能していることが示された。このことは干潟の発達消長が潮流による湾スケールの土砂輸送の影響を強く受けていることを示しており, 例えば人工干潟の整備に際して, 適地選定の観点から, ここで示したような数値シミュレーションを事前を実施することの必要性を示唆している。

4 最近のトピックの紹介とまとめ

2.4 で述べたように, 1990 年代後半から干潟上の流動, 底質輸送, 地形変化に関する研究が, 世界的に進展してきた。その流れの中で, AGU (アメリカ地球物理学会) の主催で「Salt Marsh Geomorphology」という国際会議が 2004 年 11 月にカナダの Halifax で開催された。Marsh と干潟に関する海洋学系(生物, 化学, 物理)の研究者が一同に介した, 特に地形に着目したテーマの会議で, この分野に携わる研究者の人口が急速に拡大していることを如実に示している。本稿で示した現地観測に類似した研究が多い中, 人為的な環境インパクト(堤防の建設等)に伴う Salt Marsh 地形と植生分布の変化⁵⁹⁾, 地球温暖化に伴う海面上昇の

影響, チャンネルネットワークの形成⁶⁰⁾等に関する研究が行われつつあった。

そのほか, 干潟特有の現象として, 底生生物による表層土の Bioturbation, Biostabilization が流れや底質再懸濁過程に及ぼす影響を定量的に評価することも大きな課題である⁶¹⁾。また, 潮位変動による底面境界層の動的な変化についても不明な部分が多く, 例えば底面摩擦係数や粗度長は潮汐の位相等によって変化している可能性があるが^{35,51)}, これに関する研究は緒についたばかりである。また, 潮位変動は底質中の間隙水圧や浸透流の挙動に影響を与えるため⁶²⁻⁶⁴⁾, 地下水中の塩分環境だけではなく^{65,66)}, 侵食速度にも大きく関与する。さらに, 干潟上では潮汐の朔望周期に対応して潮流と波浪(風波および長周期波)の大小関係が変化³⁵⁾するため, 波-流れ相互作用という観点から, 流体力学的に興味深い。例えば, 波-流れ相互作用に関する概念として Radiation Stress^{67,68)} や Vortex Force^{69,70)} があるが, これらは波による軌道流速振幅が潮流や吹送流などの準定常な流動成分の振幅より大きいという仮定の下で構築された理論である。干潟上では両者の大小関係は時々刻々変動しており, 上記のような概念を直接用いるのは問題があるかも知れない。そのため, 波動方程式等を用いて波浪推算を行い, Radiation Stress の空間勾配項を通じて平均流の運動方程式に位相平均された波浪の効果を導入するような通常の手法では, 干潟上の波-流れ相互作用を正確に論じることは

困難であり、新たな枠組みが求められている。

以上のように、干潟上では干出・冠水をキーとする様々な特異な現象が生じているため、これらの要素を考慮しながら、今後の調査研究を進展していく必要があるものと考えられる。

引用文献

- 1) 栗原 康:干潟は生きている, 岩波書店, (1980), 219 p.
- 2) 細川恭史: 浅海域での生物による水質浄化作用, 沿岸海洋研究ノート, Vol.29, No.1, (1991), pp.28-36.
- 3) Paterson, D.M. : Short-term changes in the erodibility of intertidal sediments related to the migratory behaviour of epipelagic diatoms, *Limnol. Oceanogr.*, Vol.34, (1989), 223 – 234.
- 4) Kakino, J. : Dispersal of Japanese littleneck clam *Ruditapes philippinarum* (Adams and Reeve) in relation to changes of bottom level due to wave action on Banzu tidal flats, Tokyo Bay., *Fisheries Engineering*, Vol.37, No.2, (2000), 115-128.
- 5) 藤芳素生, 宇多高明, 松原充幸, 東智徳, 前野宗, 裴義光: 揖斐川および長良川河口部におけるなぎさ再形成のための養浜実験, 海岸工学論文集, 第 42 巻, (1995), 631-635.
- 6) 滝川清, 増田龍哉, 田中健路, 弥富裕二: 創生された人工干潟における環境変動のメカニズムに関する研究, 海岸工学論文集, 第 51 巻, (2004), 1201-1205.
- 7) 栗山善昭: 砂浜碎波帯のながれと地形変化, ながれ, (2005), 本号.
- 8) Chesher, T.J. and Ockenden, M.C. : *Tidal transport of mud/sand mixture, Development of an integrated numerical model*, HR Wallingford Rep. (1994), SR 380.
- 9) Black, K.S., Paterson, D.M. and Cramp, A., eds. : *Sedimentary processes in the intertidal zone*, Geol. Soc., London, (1998), SP 139.
- 10) Paterson, D.M. : Biological mediation of sediment erodibility: ecology and physical dynamics, In: *Cohesive sediments*, eds., Burt, N., Parker, R. and Watts, J., John Wiley and Sons, (1994), 215-229.
- 11) Dyer, K.R. : Intertidal mudflats: properties and processes, eds., Huntley, D.A. and Oltman-Shay, J., *Cont. Shelf Res.*, 20, (2000), Part I and II.
- 12) 加藤一正, 田中則男, 灘岡和夫: 干潟の地形変形予測モデルについて, 第 26 回海岸工学講演会論文集, (1979), 225-229.
- 13) Cheng, R.T., Casulli, V. and Gartner, J.W. : Tidal, residual, intertidal mudflat (TRIM) model and its application to San Francisco Bay, California, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 36, (1993), 235-280.
- 14) McDonald, E.T. and Cheng, R.T. : A numerical model of sediment transport applied to San Francisco Bay, California, *J. Marine Env. Eng.*, 4, (1997), 1-41.
- 15) 内山雄介, 加藤一正, 栗山善昭, 古川恵太: 東京湾盤洲干潟の漂砂特性について, 海岸工学論文集, 第 47 巻, (2000), 521-525.
- 16) 内山雄介: 冬期の東京湾盤洲干潟における浮遊砂生成機構および短期地形変動について, 土木学会論文集, No.677/II-55, (2001), 129-140.
- 17) Uchiyama, Y., Kuriyama, Y. and Katoh, K. : Suspended sediment and morphological response on Banzu tidal flat, Japan, *Proc. 4th Int'l Conf. Coastal Dynamics.*, (2001), 1038-1047, ASCE.
- 18) 内山雄介・中島 剛・上岡智志: 盤洲干潟における河川出水時の地形変化と漂砂特性について, 海岸工学論文集, No. 48, (2001), 531-535.
- 19) 内山雄介: 海底面の力学過程を考慮した冠水・干出スキームの開発と三次元 座標海洋流動モデルへの適用, 海岸工学論文集, No. 51, (2004), 351-355.
- 20) Uchiyama, Y. : Modeling wetting and drying scheme based on an extended logarithmic law for a three-dimensional sigma-coordinate coastal ocean model, *Rep. Port and Airport Res. Inst.*, Yokosuka, Japan, Vol.43, No.4, (2004), 3-21.
- 21) Uchiyama, Y. : Wetting and drying scheme for POM and its application to San Francisco Bay, *Hydrodynamics VI - Theory and Application*, (eds) L. Cheng and K. Yeow, Taylor & Francis Group, London, UK, (2004), 293-299.
- 22) Uchiyama, Y. : Modeling three-dimensional cohesive sediment transport and associated morphological variation in estuarine intertidal mudflats, *Rep. Port and Airport Res. Inst.*, Yokosuka, Japan, Vol.44, No.1, (2005, in print)
- 23) Whitehouse, R.J.S. and Williamson, H.J. : The relative importance of tide and wave influences on bed level change at an intertidal cohesive mudflat site, *HR Wallingford Report*, (1996), SR 445.
- 24) Dyer, K.R., Christie, M.C., Feates, N., Fennessy,

- M.J., Pejrup, M. and van der Lee, W. : An investigation into processes influencing the morphodynamics of an inter tidal mudflat, the Dollard Estuary, the Netherlands, I. Hydrodynamics and suspended sediment, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 50, (2000), 607-625.
- 25) Uchiyama, Y. and Kuriyama, Y. : Hydrodynamics and morphological processes on an intertidal sand-flat, *J. Coastal Res.* (2005, in submission)
- 26) Conner, C.S. and A.M. De Visser : A laboratory investigation of particle size effects on an optical backscatterance sensor, *Mar. Geol.*, 108, (1992), 151-159.
- 27) Vincent, C.E., D.M. Hanes and A.J. Bowen : Acoustic measurements of suspended sand on the shoreface and the control of concentration by bed roughness, *Mar. Geol.*, 96, (1991), 1-18.
- 28) 内山雄介・栗山善昭：仙台湾蒲生干潟前面海浜の中期地形変動に関する複素主成分解析，土木学会論文集，No.747/II-65, (2003), 135-154.
- 29) Uchiyama, Y. and Kuriyama Y.: Complex principal component analysis of medium-term nearshore geomorphology at North Sendai Coast, Japan, *Proc. Coastal Structures 2003*, ASCE, Portland, OR, USA, (2003), 1176-1188.
- 30) Christie, M.C., Dyer, K.R. and Turner, P. : Sediment flux and bed level measurements from a macro tidal mudflat, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 49, (1999), 667 – 688.
- 31) Mikkelsen, O. and Pejrup, M. : Comparison of flocculated and dispersed suspended sediment in the Dollard Estuary, In: *Sedimentary processes in the intertidal zone*, (eds.) Black, K., Paterson, D. and Cramp, A., Geol. Soc. London, SI 139, (1998), 199-209.
- 32) Van Der Lee, W.T.B. : Temporal variation of floc size and settling velocity in the Dollard estuary, *Cont. Shelf Res.*, 20, (2000), 1495 – 1511.
- 33) O'Brien, D.J., Whitehouse, R.J.S. and Cramp, A. : The cyclic development of a macrotidal mudflat on varying timescales, *Cont. Shelf Res.*, 20, (2000), 1593 – 1619.
- 34) Bassoullet, Ph., Le Hir, P., Gouleau, D. and Robert, S. : Sediment transport over an intertidal mudflat: field investigations and estimation of fluxes within the “Baie de Marennes-Oleron” (France). *Cont. Shelf Res.*, 20, (2000), 1635 – 1653.
- 35) Talke, S.A. and Stacey, M.T. : The influence of oceanic swell on flows over an estuarine intertidal mudflat in San Francisco Bay, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 58, (2003), 541-554.
- 36) 柿木哲哉，滝川清，山田文彦：白川・緑川河口域の干潟形成に及ぼす潮位・潮流と河川流入の影響，海岸工学論文集，第 47 巻，(2000)，636-640.
- 37) 柿木哲哉，木下栄一郎，滝川清，山田文彦，外村隆臣：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，(2003)，471-475.
- 38) 栗山善昭，滝川清，榎園光廣，野村茂，橋本孝治，柴田貴徳：熊本白川河口干潟における土砂収支の検討，海岸工学論文集，第 50 巻，(2003)，556-560.
- 39) 新保裕美，田中昌宏，越川義功，柵瀬信夫，池谷毅：現地調査によるアサリ生息量と環境要因との関係の検討 --- 神奈川県金沢湾・平潟湾を対象として --- ，海岸工学論文集，第 46 巻，(1999)，1216-1220.
- 40) 村上和仁，石井裕一，瀧和夫，長谷川昭：東京湾奥部に位置する潟湖化干潟の遷移特性，海岸工学論文集，第 47 巻，(2000)，1121-1125.
- 41) 上野成三，高橋正昭，原条誠也，高山百合子，国分秀樹：浚渫土を利用した資源循環型人工干潟の造成実験，海岸工学論文集，第 48 巻，(2001)，1306-1310.
- 42) 岡本庄市，矢持進，大西徹，田口敬祐，小田一紀：大阪湾阪南 2 区人工干潟現地実験場の生物生息機能と水質浄化に関する研究 --- 浚渫土砂を活用した人工干潟における地形変化と底生生物の出現特性 --- ，海岸工学論文集，第 49 巻，(2002)，1286-1290.
- 43) 杉田繁樹，中瀬浩太，古川恵太，重松孝昌，青木伸一(2002)，物理外力を考慮した生態系モデルによる干潟生態系の評価，海岸工学論文集，第 49 巻，pp.1236-1240.
- 44) 姜閔求，高橋重雄，野々村治，高野忠志，黒田豊和(2000)，人工干潟地盤耐波安定性に関する基礎実験，海岸工学論文集，第 47 巻，pp.526-530.
- 45) 姜閔求，高橋重雄，奥平敦彦，黒田豊和(2001)，自然および人工干潟における地盤の安定性に関する現地調査，海岸工学論文集，第 48 巻，pp.1311-1315.
- 46) Teisson, C. Ockenden, M., Le Hir, P. Kranenburg, C. and Hamm, L. : Cohesive sediment transport processes, *Coastal Eng.*, 21, (1993), 129-162.

- 47) Ralston, D.K. and Stacey, M.T. : Three-dimensional modeling of intertidal flow and transport: Periodic stratification and its implications for sediment transport, *Suppl. AGU Chapman Conf. Salt-marsh Geomorphology*, (2004), 27-28.
- 48) Lin, B. and Falconer, R.A. : Three-dimensional layer-integrated modeling of estuarine flows with flooding and drying, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 44, (1997), 737-751.
- 49) Inagaki, S. : *Effects of a proposed San Francisco airport runway extension on hydrodynamics and sediment transport in South San Francisco Bay*, Engineer's Degree Thesis, Stanford University, Stanford, CA, USA (2000).
- 50) 稲垣聡, Stephen G. Monismith, Jeffery R. Koseff, Jeremy D. Bricker : 南サンフランシスコ湾における底泥輸送解析, *海岸工学論文集*, 第 48 巻, (2001), 641-645.
- 51) Bricker, J.D., Inagaki, S. and Monismith, S.G. : Modeling the effects of bed drag coefficient variability under wind waves in South San Francisco Bay, *Proc. 8th Int'l Conf. Coastal and Estuarine Modeling*, ASCE (2004).
- 52) Nakagawa, Y. : Fine sediment transport in Ariake Bay, Japan, *Proc. INTERCOH 2003*. (2005, in print, Pers. Comm.)
- 53) Blumberg, A.F. and Mellor, G.L. : Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight, *J. Geophys. Res.*, 88, (1983), 4579-4593.
- 54) Zheng, L., Chen, C. and Liu, H. : A modeling study of the Satilla River Estuary, Georgia. I: Flooding-drying process and water exchange over the salt marsh-estuary-shelf complex, *Estuaries*, 26 (3), (2003), 651-669.
- 55) Xie, L., Pietrafesa, L.J. and Peng, M. : Incorporation of a mass-conserving inundation scheme into a three dimensional storm surge model, *J. Coastal Res.*, 20, (2004), 282-296.
- 56) Burban, P.Y., Xu, Y., McNeil, J. and Lick, W., 1990: Settling speeds of flocs in fresh and sea waters, *J. Geophys. Res.*, 95, 18213-18220.
- 57) Partheniades, E., 1992: Estuarine sediment dynamics and shoaling processes, In Herbick, J. (ed), *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, 3, 985-1071.
- 58) Krone, R.B., 1962 : Flume study of the transport of sediment in estuarial processes, *Final Report, Hydraulic Eng. Lab. and Sanitary Eng. Res. Lab.*, Univ. Calif., Berkeley, CA, USA.
- 59) Van Proosdij, D., Daborn, G.R. and Brylinsky, M.: Environmental Implications of Expanding the Windsor Causeway (Part 2): Comparison of 4 and 6 Lane Options: *Report Prepared for Nova Scotia Department of Transportation and Public Works., Contract # 02-00026*, (2004), 18pp.
- 60) Fagherazzi, S.; Sun, T. : A stochastic model for the formation of channel networks in tidal marshes, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 31, No. 21, (2004), doi: L21503 10.1029/2004GL020965.
- 61) Black, K.S., Tolhurst, T.J. Paterson, D.M., and Hagerthey, S.E. : Working with natural cohesive sediments, *J. Hydr. Eng.*, 128, (2002), 2-8.
- 62) 内山雄介・P. Rolke・足立久美子・瀬岡和夫・八木 宏 : 海岸地下浸透流およびそれに伴う沿岸域への栄養塩輸送過程, *土木学会論文集*, No. 635/II-49, (1999), 127-139.
- 63) Uchiyama, Y., Nadaoka, K., Rolke, P., Adachi, K. and Yagi, H. : Submarine groundwater discharge into the sea and associated nutrient transport in a sandy beach, *Water Resour. Res.*, 36 (6), (2000), 1467-1479.
- 64) 内山雄介 : 砂浜海岸帯水層における潮位変動に伴う循環流の形成機構, *土木学会論文集*, No.670/II-54, (2001), 37-48.
- 65) 喜岡渉, 永田誠一, Rodney J. Sobey : 干潟の地下浸透流と塩分濃度の変動特性, *海岸工学論文集*, 第 47 巻, (2000), 1141-1145.
- 66) Greenblatt, M.S. and Sobey, R.J. : Subsurface flow and salinity response patterns in a tidal wetland marsh plain, *J. Coastal Res.*, Special Issue 27, (2001), 88-108.
- 67) Longuet-Higgins, M.S. and Stewart, R.W. : Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents, *J. Fluid Mech.*, 8, (1960), 565-583.
- 68) Hasselmann, K. : On the mass and momentum transfer between short gravity waves and larger scale motions, *J. Fluid Mech.*, 50, (1971), 181-201.
- 69) Craik, A.D.D. and Leibovich, S. : A rational model for Langmuir circulations, *J. Fluid Mech.*, 73, (1976), 401-426.
- 70) McWilliams, J.C., Restrepo, J.M. and Lane, E.M. : An asymptotic theory for the interaction of waves and currents in coastal waters, *J. Fluid Mech.*, 511, (2004), 135-178.