

自然干潟における海底境界層内の流速構造について

内山雄介* ・ 中野博文** ・ 黒坂正和*** ・ 山脇秀仁****
柳嶋慎一***** ・ 栗山善昭*****

干出・冠水を繰り返す自然砂質干潟海域において、流速の周波数特性および平均的な鉛直分布構造に関する現地観測を実施した。スペクトル解析、CEOF 解析により、干潟の水理特性、特に波-流れ共存場としての海底境界層の力学特性を調べた。その結果、基本モードとしては潮流に対応した barotropic 成分が卓越するが、波や風による高次モードの影響も無視し得ないこと、そのため対数則速度分布からの逸脱が生じ、鉛直方向に流向が回転することが分かった。一方、瞬間的な流速変動に対しては波動成分の寄与が圧倒的に大きく、次いで乱流成分が卓越していた。

1. はじめに

干潟は冠水・干出を繰り返す独特な水理環境下にあり、主として水深と同一スケールの潮位変動と沖側から入射する波浪がそこでの底質輸送 (内山, 2001; Uchiyama, 2005) や物質循環 (Kuwaie ら, 2003) 等を支配している。海底面境界を通じた底質、栄養塩や酸素等のフラックスは、底面境界層の発達過程と密接な関係があるため、これを照査するためには底面近傍の詳細な流速データが必要となる。しかしながら、水深ゼロから境界層が発達する干潟では、観測上の困難さもあり、底層流速の詳細な鉛直構造についてはこれまで計測例がなかった。

本研究では、自然砂質干潟における一測点において、底面直上に超音波式 3 次元微細流速計 5 台を異なる鉛直高さに設置し、10分～20分毎のバースト計測により 16 Hz の高周波サンプリングを一朔望周期 (2 週間) にわたって実施した。バースト平均量の解析、瞬間値のスペクトル解析、水平流速ベクトルの CEOF 解析を通じて、自然干潟における平均的な水理特性、周波数特性、鉛直流速分布構造および底面境界層の発達・衰退過程に関するいくつかの重要な知見を得たので、ここに報告するものである。

2. 現地観測

2004年8月2～16日に東京湾東岸部に位置する、千葉県更津市久津間地先の小櫃川河口干潟 (以下、盤洲干

潟と呼ぶ) において現地観測を実施した (図-1)。盤洲干潟は二級河川小櫃川の河口に形成された中規模の自然砂質干潟であり、東京湾横断道路のやや北から木更津港へかけての沿岸距離約 8 km、岸沖距離 1 km 強の空間規模を有している。地下 30 cm までの底質は比較的均一な細砂 (中央粒径約 0.19 mm) で構成されており、地形の岸沖縦断勾配は約 1 : 1850 である (内山, 2001)。護岸より約 1.1 km 沖側の干潟砂面上に観測点を設け、砂面に約 1.5 m 貫入させた単管パイプに自記式計測機器類を固定し、15日間の連続観測を実施した。

使用した機器は 3 次元超音波式流速計 (ADV) 計 5 台 (Nortek 社製 Vector × 4 台, Sontek 社製 Hydra × 1 台) であり、Vector は 20 分毎、Hydra は 10 分毎のバースト計測を行った。サンプリング周波数は 16 Hz であり、各バーストのサンプル数は、Vector が 900 (56.25 s)、Hydra が 1600 (100 s) である。ADV のサンプリングボリューム中心点から底面までの距離は、3, 5, 9, 18, 34 cm であり、底面直上 3 cm の点は Hydra、それ以外は Vector により計測した。各 ADV は内蔵クロックによって制御された独立した自記式機器であり、厳密な同期を取ることは困難である。計測終了時に確認

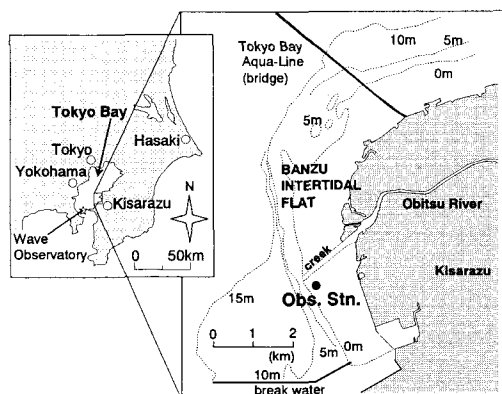


図-1 現地観測実施地点 (東京湾盤洲干潟)。●印は計測機器設置を、☆印は第二海堡波浪観測地点を示している。

* 正会員 博(工) カリフォルニア大学ロサンゼルス校 IGPP-CESR

** 学生会員 学(工) 豊橋技術科学大学(院) 建設工学専攻修士課程

*** 学生会員 学(工) 武蔵工業大学(院) 都市基盤工学専攻修士課程

**** 正会員 学(工) (独法)港湾空港技術研究所 地盤・構造部 地盤改良研究室

***** 正会員 学(工) (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 漂砂研究室

***** 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 漂砂研究室

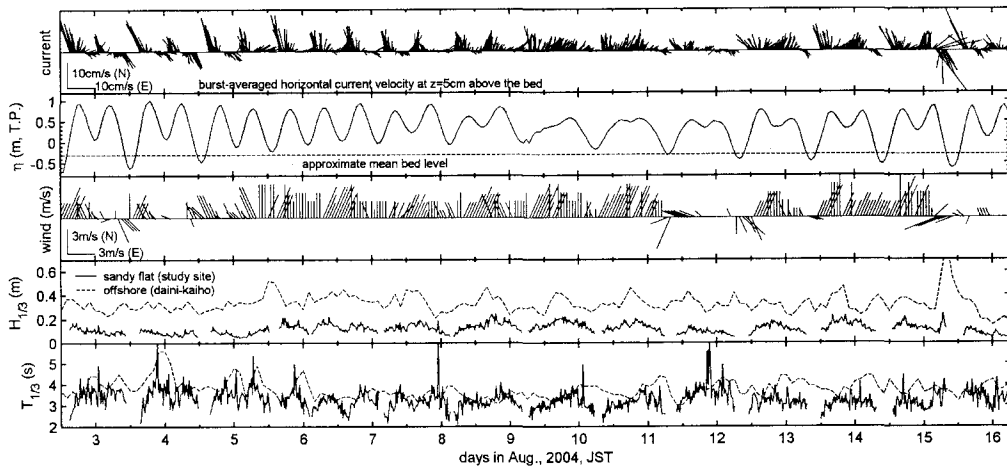


図-2 観測期間中における各統計量の時系列. 上から順に, ADVによって計測されたバースト平均水平流速ベクトル(底面上高き5 cm), 潮位, AMeDAS木更津における風向風速, 干潟上および第二海堡における有義波高および有義波周期.

したところ, 各クロックの誤差は1 s以下であった. そのため, 各ADV間の瞬間的な同期は取れていないが, 統計量については実用上, 同じ時刻のデータが取得できたとみなし, 以下の解析を進めることとした. また, 単管パイプの影響を受けたため, 各ADVの磁気コンパスの出力に疑問があった. そこで, 内蔵コンパスの情報を破棄し, ADVセンサーの幾何形状に基づいて定義された(XYZ)デカルト座標流速をベースに, 期間全体を通した水平流向の鉛直分布が一定になるように角度を補正した. なお, 干潟上の水位変動については, 底面上5 cmに取り付けたVectorの圧力センサーの出力を利用した. また, 参照データとして, AMeDAS木更津における1時間毎の風向風速, NOWPHAS第二海堡における2時間毎の波浪統計量, 観測地点沖側の水深10 m地点における10分毎の潮位データを使用した.

3. 観測結果と考察

(1) 全般的な水理特性

まず, 得られたデータの平均値の時系列を図-2に示す. 上から, 干潟底面上5 cmにおける平均水平流速(N-S成分およびE-W成分), T.P.基準の実測潮位, AMeDAS風向風速, 干潟上および第二海堡における有義波高と有義波周期を表している. 観測期間は大潮-小潮-大潮の一朔望周期に対応しており, 期間全体を通じて風速1~3 m/s程度のごく弱い南寄りの風が連吹していた. 風速に対応して観測海域の波浪は弱く, 干潟上の有義波高は10~25 cm程度, 有義波周期は2.5~4 s程度であった. Talke・Stacey (2003)は, 米国サンフランシスコ湾におけるADV観測結果から, 閉鎖性の強い内湾干潟域であっても, うねり性の外洋波浪の影響が強くなる場合があることを示しているが, 沖側の第二海

堡での統計量は波高30~40 cm程度, 周期3.5~5.5 s程度の値を示しており, 後述するスペクトル解析の結果と併せると, 本海域においては外洋からの長周期波の影響はほとんどなかったものと考えられる.

長期的な平均流速変動は, 大潮期では潮位変動に対応して約12時間周期で流向が反転しており, 観測中盤の小潮期では風向に対応して北向き平均流が発達していることが分かる. 8月15日には昼間の干潮時に第二海堡で波高が最大値を記録しているが, このとき干潟上の平均流速は強い南向きの流れとなっている. これらのことから, 干潟上の平均水平流速は主に潮汐, 次いで風と波浪に追従していたものと推定される. これらの傾向は2000年の冬期および夏期に盤洲干潟において実施された観測結果(内山, 2001; 内山ら, 2001)と定性的に一致している. なお, ここでは示さないが, 観測期間全体を通じて干潟上では明確な密度成層は観測されなかった.

(2) バースト内の周波数特性

底面上5 cmにおける20分間隔のバースト毎に測定された16 Hzの3次元流速および圧力変動から周波数スペクトルおよび両者のクロススペクトルを求め, 周波数を縦軸とし, 横軸に時間を取ったコンター図を作成した(図-3). 全ての縦軸およびパワースペクトル密度(PSD)に関するコンター高さは対数表示されている. 連続的なコンターを表示させるため, 干出時のスペクトルおよびコヒーレンス(coh^2)は直近の水没時データを利用して, 3次畳み込み内挿法による時間的な補完を施している. バースト内の高周波流速・波高変動は, 風波の周波数帯($10^{-0.4} \sim 10^{-0.9}$ Hz, つまり周期2.5~4 s)に明瞭なピークが見られ, 同帯域において流れと波の相関(コヒーレンス)が非常に高くなっていることが分かる. この高周波の流速の影響は, 平均流速(図-2)には

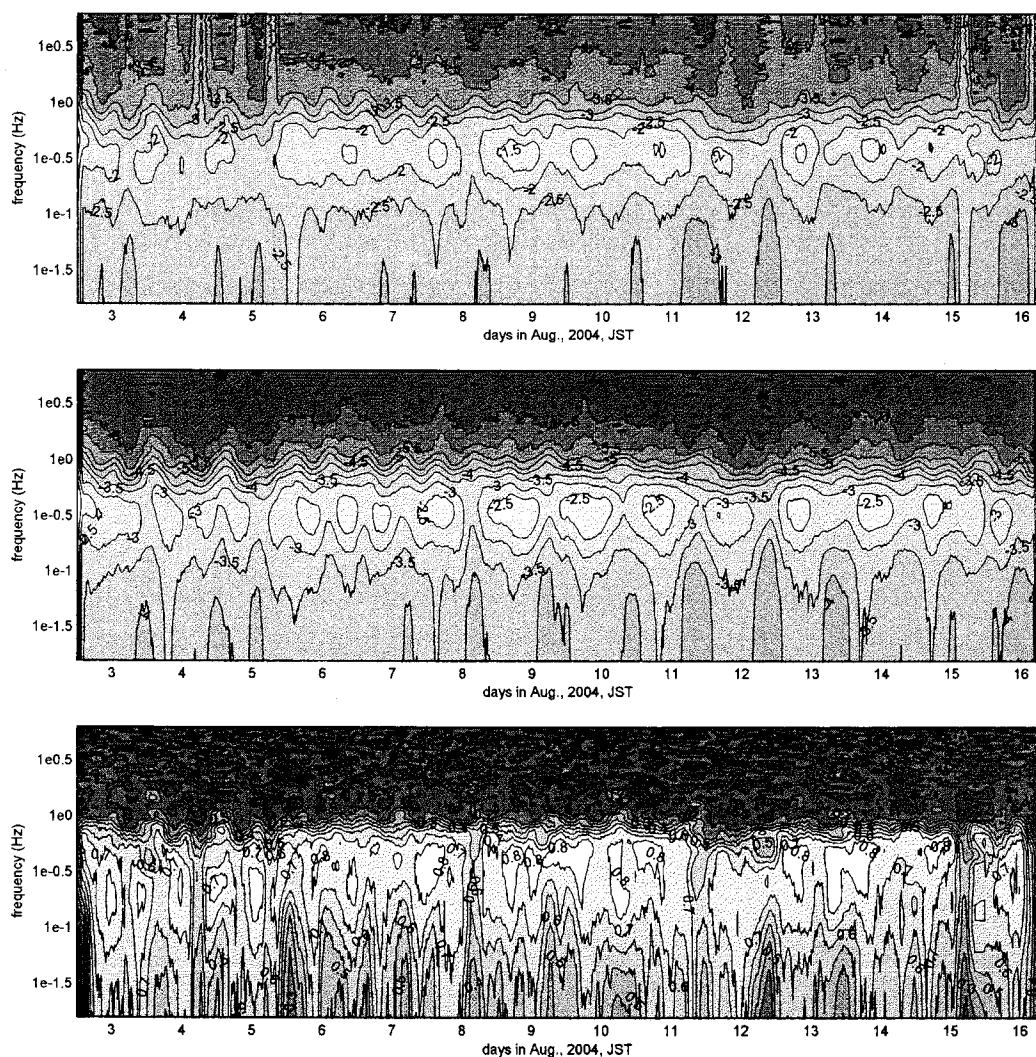


図-3 上から順に、底面上5 cm における南北流速と水深換算された水圧のパワースペクトル密度 (PSD) および両者のコヒーレンス (coh^2) の時間発展を示している。縦軸は対数表示の周波数、コンターは PSD については常用対数の指数を表示、 coh^2 については実数表示されている。コンター間隔は上から順に、 $10^{0.5}$ (m^2s^{-1}), $10^{0.3}$ (m^2s^{-1}), 0.1 (無次元) である。半日周の潮位変動の影響を受けつつも、期間全体を通じて $10^{-0.4}$ - $10^{-0.9}$ Hz (周期 2.5-4 s) の風波が卓越していることが分かる。

明示的に現れていない。高周波よりも低周波側の PSD の方が若干大きい傾向が見られるが、その値もピーク周波数における PSD よりも 1 オーダー以上小さく、明確な長周期波の影響は確認されなかった。PSD および coh^2 にはゆったりとした変動パターンが見られ、風波の周波数帯におけるピークはほぼ満潮時に対応している (内山, 2001; Uchiyama, 2005 参照。ただし、干潮時については内挿されたデータであることから、議論の対象にはならない)。このとき、大潮期よりも小潮期のほうがより大きなピーク値を示す傾向にある。これはバースト内の波動成分が、大潮期に潮流などによる一様流成分や低周波成分と比較して相対的に弱くなることを示し

ている。この傾向は必ずしも coh^2 の時間変動からは明確に読み取れないため、バースト時間 (56.25 s) 以上の長周期成分の影響を受けている可能性が強い。

高周波流速変動の周波数特性の時間的な変化を考察するため、底面上 5 cm の鉛直流速に対して FFT によるバンドパスフィルターを適用し、バースト毎の周波数帯別の RMS 流速を求めて時系列表示した (図-4)。設定した周波数帯は、低周波成分 w_L (0.125 Hz 未満)、波動成分 w_w (0.125 Hz 以上 2 Hz 未満)、乱流成分 w_T (2 Hz 以上) の 3 成分である。観測期間全体を通じて、ほとんどの時間で波動成分が最も大きく、次いで乱流成分が大きく、低周波成分が最も小さくなっている。3 者の比は

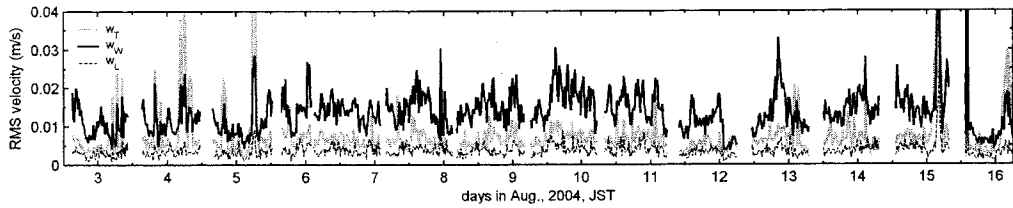


図-4 底面上5 cm における鉛直流速 w のバースト毎の標準偏差. FFT バンドパスフィルターにより, 低周波成分 w_L (0.125 Hz 未満), 波動成分 w_W (0.125 Hz 以上 2 Hz 未満), 乱流成分 w_T (2 Hz 以上) の3成分に分離している.

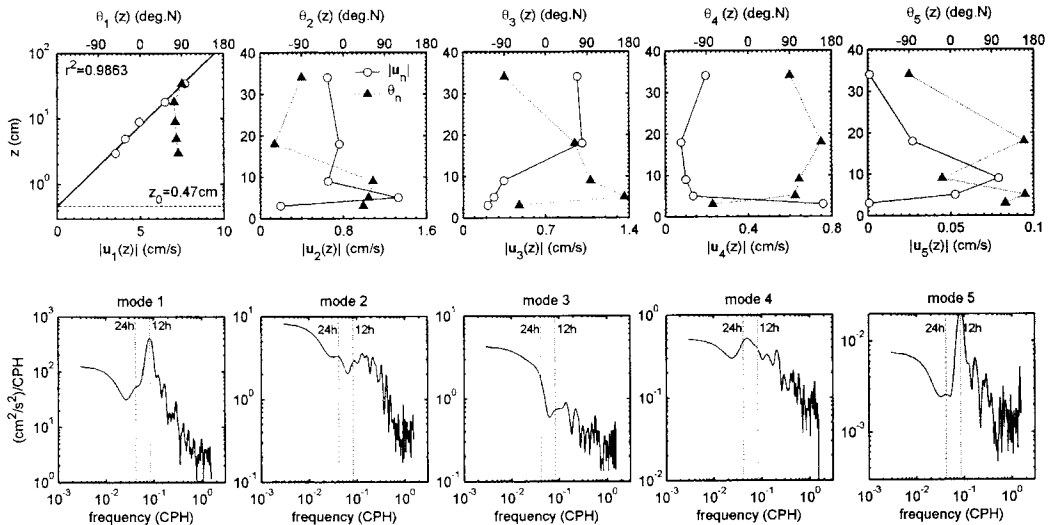


図-5 CEOF 解析による干潟上における鉛直流速分布の時空間構造. モード1 から5 に分解された, (上) 流速ベクトルに変換された空間関数 $e'_n(z)$ の鉛直分布, (下) 時間係数変動に対する期間全体のパワースペクトル密度をそれぞれ示している.

概ね10:5:4程度であり, 運動エネルギー比は100:25:16程度となっていることが分かる. 水平流速2成分および水圧変動データに対して同様のフィルター操作を行ったところ, 定性的には鉛直流速とほぼ同様の傾向が確認された. つまり, 本干潟上における観測期間中のバースト内の瞬間的なエネルギー特性は, 波動流速成分が圧倒的に卓越しており, 乱流成分と低周波成分の寄与は波動成分の16~25%であることが明らかとなった.

(3) 平均水平流速鉛直分布の低周波変動

観測期間全体を通じた平均水平流速の鉛直構造を調べるために, 流速の水平2成分をそれぞれ実部, 虚部とした複素行列に対して経験的複素固有関数 (CEOF) 解析を行う. ここでは, Preisendorfer (1988), Stacey ら (2001) と同様に, ベクトル量としての性質を保持したまま鉛直流速分布構造をモード分解するため, まず, 以下のような複素データ行列を定義する.

$$x(z, t) = u(z, t) + iv(z, t) \quad (1)$$

ここに, $u = (u, v)$: バースト平均水平流速2成分, z : 底面からの高さ, t : 時間, i : 虚数単位である. 複

素行列 x の共分散行列に対する固有値問題を解くことにより, 最終的に x は以下のように変数分離された形でモード分解される.

$$x(z, t) = \sum_{n=1}^{n_{\max}} e_n^*(z) \cdot c_n(t) \quad (2)$$

n : モード番号, $e_n(z)$: モード n の空間関数, $c_n(t)$: モード n の時間係数であり, アスタリスクは共役複素ベクトルを表している. 時間係数は元のデータの次元を有しているが, 空間関数は固有値 λ_n で正規化されているため無次元量である. ここでは, e_n についてもモード間の直接的な比較を容易にするため,

$$e'_n(z) = \sqrt{\lambda_n} e_n(z) \quad (3)$$

により有次元化する. なお, スカラーデータ行列に対する CEOF では, 式 (1) の代わりに元データの Hilbert 変換を虚部に用いることにより, データの時空間変動の進行波的挙動を追うことも可能である (例えば, 内山・栗山, 2003). しかしながら本研究における CEOF では, 式 (1) の定義から, 単一のモードだけでは進行波を捉えることはできない点に注意されたい.

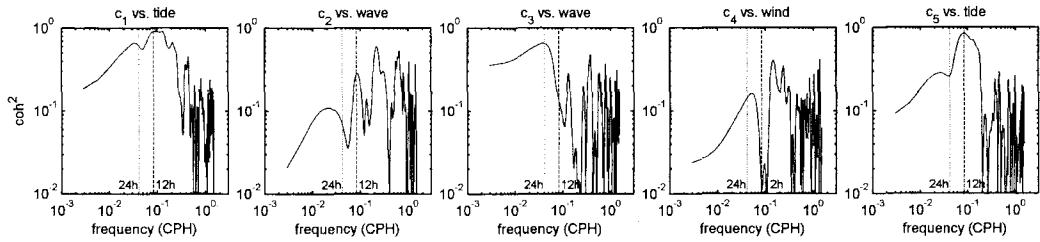


図-6 CEOF 各モードの時間係数の実部と外力（モード1と5：潮流，モード2と3：有義波高，モード4：風速）とのコヒーレンス。

CEOF 解析によってモード分解された鉛直流速分布の時空間構造を図-5 示す。また、各モードの時間係数実部と各外力のコヒーレンスを求め、最も相関のピーク値が高かったものをモード毎に抽出した図を図-6 に示す。モード1には潮流による順圧的な一様流成分が出現し、水平流速の鉛直分布はほぼ対数分布に従っている。モード2と3はそれぞれ有義波高の高周波・低周波変動と、モード4は風速変動と、モード5は潮流との相関がそれぞれ高かった。モード1のエネルギー的な寄与率は96%と突出して高く、本干潟上では、基本モードとして潮流による対数則速度分布が成立していることが明らかとなった。しかしながら高次モードの空間関数も最大でモード1の20%程度の大きさを持っており、紙面の都合上ここでは示さないが、潮流の反転時位相前後などにおいて高次のモードの寄与が急激に上昇し、対数分布から大きく外れるケースが頻繁に観測されていたことを確認している。図-5（上）より、高次モードでは流向の鉛直分布が一定ではないことが分かる。その結果、各モードを式（2）により再合成した平均流速の鉛直分布は、高次モードの影響を受けて高さ方向に流向を回転させ、3次元的になっていた。

4. おわりに

自然砂質干潟において底面境界層周辺の流速の鉛直構造に関する現地観測を実施し、スペクトル解析、CEOF 解析を通じて波-流れ共存場としての海底境界層の力学特性を調べた。成層構造が発達しにくい極浅海域であるにも関わらず、海底境界層内流速は複雑な鉛直構造を有していた。すなわち、CEOF 解析の結果から、長期的な流速の鉛直分布構造は、基本モードとしては潮流に対応した順圧的な一様流成分が卓越しており、そのためモード1（寄与率96%）による流速分布はほぼ完全に対数則に従っていた。しかしながら、波高等の外力の低周波変動に対応して高次モードの寄与が強くなる状況も頻繁に生じていたことが確認された。この高次モードの寄与により、対数分布からの逸脱が生じ、3次元的な流況が形成されていた。

一方で、バースト内流速変動のスペクトル解析結果から、瞬間的な流速場はむしろ高周波の波動成分、乱流成分の影響を強く受けていた。これらのことから、本干潟の海底境界層の水理特性は、時間的な多重構造（バースト内：波動、平均：潮流）で特徴付けられることが示された。各瞬間では高周波の強い流速変動の存在により波動境界層が発達することになるため、底面せん断応力や各種フラックス交換量の評価にはこの波動成分を十分に考慮することが重要であることがデータから具体的に示された。

謝辞：本研究は住友財団（代表者：内山雄介）および国土交通省港湾事業調査費の援助を受けて実施された。現地観測に際しては、港湾空港技術研究所の漂砂研究室および沿岸生態研究室のスタッフ並びに関係者諸氏に多大なご協力をいただいた。港空研海象情報研究室の永井紀彦室長には第二海堡における波浪データをご提供いただいた。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 内山雄介(2001)：冬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，pp. 129-140.
- 内山雄介・中島 剛・上岡智志(2001)：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，第48巻，pp. 531-535.
- 内山雄介・栗山善昭(2003)：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，pp. 135-154.
- Kuwae, T., E. Kibe and Y. Nakamura(2003)：Effect of emersion and immersion on the porewater nutrient dynamics of an intertidal sandflat in Tokyo Bay, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, Vol. 57, pp. 929-940.
- Preisendorfer, R.W. (1988)：Principal Components Analysis in Meteorology and Oceanography, Elsevier, New York, 426p.
- Stacey MT, J.R. Burau and S.G. Monismith (2001)：Creation of residual flows in a partially stratified estuary, *J. Geophys. Res.*, Vol. 106(C8), pp. 17013-17037.
- Talke, S.A. and M.T. Stacey (2003)：The influence of oceanic swell on flows over an estuarine intertidal mudflat in San Francisco Bay, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, Vol. 58(3), pp. 541-554.
- Uchiyama, Y.(2005)：Hydrodynamics and associated morphological variations on an estuarine intertidal sand-flat, *J. Coastal Res.*(accepted for publication)