

広域海浜流・漂砂モデルによる冬季日本海沿岸での 海浜変形シミュレーション

加 藤 茂*・山 下 隆 男**

広域海浜流・漂砂系の結合数値モデルの構築を行い, 地形変化による波浪場・海浜流場の変化も考慮した広域海浜流・漂砂・海浜変形シミュレーションを行った。本モデルの現地での適用性, 再現精度を検証したところ, 地形変化の再現性には検討の余地が残されているが, 定性的な漂砂現象は再現できていることが確認された。また, ストーム来襲毎に地形が段階的に変化して, 数日程度での急激な地形変化が長期間の累積変化量に大きく寄与し, 長期間 (年スケール) での地形変化を検討する場合においても, 短期間 (ストーム来襲時) に発生する特徴的な地形変化を把握しておくことが重要であることが示された。

1. 結 言

ストーム時に碎波帯内で発生する強い沖向き流れと碎波帯沖での強い吹送流 (海洋物理学では沿岸流) の存在が, 最近の現地観測の積み重ねによって明らかにされてきた (Yamashita ら, 1998; 馬場ら, 1999; 田村ら, 2001 など)。著者らは, この観測結果を再現, 予測するための数値モデルの構築と観測データに基づく適用性の検証, 数値シミュレーションによる沿岸吹送流場での海上風と波浪の影響の検討を行ってきた (Kato・Yamashita, 2000; 加藤ら, 2003)。今後, これらの現象をより詳細に把握し, 効果的な沿岸環境予測, 保全に関する検討を行うためには, 流動場だけでなく, それによる物質輸送過程の再現を行うことが必要である。

冬季日本海沿岸では, 季節風によるストームが数日間継続し, 強い海水流動・漂砂系が形成される。これにより, 短期間で海底地形が大きく変化し, 深刻な海岸侵食 (海岸崩壊) を生じることも稀ではない。この急激な地形変化は, 年間の累積土砂変化量において支配的であることは深浅測量の結果から明らかで, 年スケールでの地形変化を検討する場合においても, 単一ストームにより短期間に発生する急激な地形変化を積算することで, より現実的な長期間での変形予測が可能になる。

本研究では, 著者らの開発した広域海浜流・漂砂系の数値モデルを用いた約 1 ヶ月間の海浜変形シミュレーションを行い, 観測棧橋 (京都大学防災研究所) 沿いでの断面海底地形および棧橋周辺での平面地形計測結果との比較から, 冬季に日本海沿岸で発生する海底地形変化がどの程度再現可能であるかを検討した。

2. 広域海浜流・漂砂モデルの概要

広域海浜流場の計算には, これまで著者らが開発を行ってきた 3 次元数値モデルを用いた (加藤ら, 1999)。

このモデルで波浪場は, 屈折特性と碎波特性を考慮した時間平均波浪場でのエネルギーフラックス保存式と碎波 surface roller 内でのエネルギーフラックス保存式を解くことにより求められる。また, 海上風の影響は海面でのせん断応力として与えられ, 波浪場の計算で与えられた碎波による海面せん断応力 (碎波せん断応力) と合わせて, 流れの駆動外力として広域海浜流場の計算で用いられる。

本研究では, 上記の広域海浜流モデルに漂砂量則を適用し, 広域海浜流・漂砂による海浜変形シミュレーションを行った。漂砂モデルとしては, 浮遊砂と掃流砂が同時に扱え, 波浪運動に加えて平均流の影響を考慮することができる Bailard (1981) の全漂砂量式 (1) を用いた。

$$\begin{aligned} \langle \vec{q} \rangle = & \langle \vec{q}_B \rangle + \langle \vec{q}_S \rangle = \frac{1}{(\rho_s - \rho)g(1 - \lambda)} \\ & \cdot \left\{ \rho C_f \frac{\epsilon_B}{\tan \phi} \left[\langle |\vec{u}_t|^2 \vec{u}_t \rangle - \frac{\tan \beta}{\tan \phi} \langle |\vec{u}_t|^3 \vec{i} \rangle \right] \right. \\ & \left. + \rho C_f \frac{\epsilon_S}{W} \left[\langle |\vec{u}_t|^3 \vec{u}_t \rangle - \frac{\epsilon_S}{W} \tan \beta \langle |\vec{u}_t|^5 \vec{i} \rangle \right] \right\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで, $\vec{q}$, $\vec{q}_S$, $\vec{q}_B$: 単位幅当たりの全漂砂量, 浮遊砂量, 掃流砂量 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$), ρ , ρ_s : 海水および砂の密度 (kg/m^3), g : 重力加速度 (m/s^2), λ : 砂の空隙率 (0.4), C_f : 抵抗係数 (0.005), ϕ : 砂の内部摩擦角 (32°), β : 局所海底勾配, ϵ_S , ϵ_B : 浮遊砂と掃流砂の変換効率係数 (0.02, 0.1), W : 砂の沈降速度 (m/s), $\vec{i}$: 各方向の単位ベクトルであり, $\langle \rangle$ は時間平均を示している。 $\vec{u}_t$ は海底面近くでの瞬間流速で, 平均流 $\vec{u}$ と波動振幅流 $\vec{u}'$ の和として表される。これに底質の質量保存式 (2) を付加し,

$$\frac{\partial z}{\partial t} = - \frac{\partial h}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (2)$$

広域海浜流場の計算と, 式 (1), (2) を連立して時間発展的に解くことにより, 地形変化による波浪場・海浜流場の変化も考慮した広域海浜流・漂砂・海浜変形のシミュレーションを行った。式 (2) において, z : 海底面の高さ (m), h : 水深 (m), q_x , q_y : 全漂砂量の x , y 方向

* 正会員 博 (工) 豊橋技術科学大学講師 工学教育国際協力研究センター
** 正会員 博 (工) 京都大学助教授 防災研究所

成分を示している。

3. 海底地形計測

京都大学防災研究所大渦波浪観測所（新潟県中頸城郡大潟町）では、観測棧橋に沿った海底面の断面地形計測が月1回の頻度で継続されている。計測方法は、測深用の鉛を用いたレッド測深で、岸沖方向約250 mを約2.5 m間隔で計測されており、非常に細かな地形データが得られている。

2003年10月17日には、小型船による魚探内蔵型GPSプロッタを用いた棧橋周辺での平面海底地形計測も行われた。この計測では、船を沿岸方向に50~100 m間隔で棧橋の沖合から岸に向かって15測線で走らせ、棧橋を沿岸方向のほぼ中央とした約1 km四方での水深データを取得した。計測時の波高は最大で50 cm未満の非常に静穏な海象条件であったことに加えて、計測は2時間半で終了し、当日の日本海沿岸での潮位差は最大で20 cm程度であったため(気象庁, 2003), 計測で得られた値はそのまま計測地点での水深とした。このようにして得られた測線上の水深データを空間的に補間することによって、平面地形情報を取得した(図-1, 図中の棧橋はGPS情報を基に作図)。この図から、棧橋先端付近が特に深く、その両横に浅い部分があるバートラフ地形となることが確認できる。これは、棧橋の左手側(南西側)には人工リーフが、反対の右手側(北東側)には離岸堤がともに海岸侵食制御のために設置されており、これらの構造物の影響により、棧橋先端部にトラフが形成される地形となったと推測される。これに伴い、海浜流系としては、トラフ部で離岸流が発生する、すなわち、沖への流れが棧橋周辺に集中する循環系が形成され、それによって棧橋沿いが深くなったと推測される。

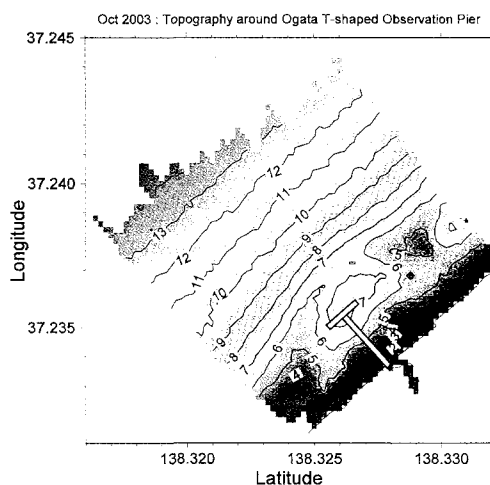


図-1 観測棧橋周辺の平面地形計測結果

4. 広域海浜流・漂砂・海浜変形シミュレーション

(1) 計算条件

沿岸域で発生する吹送流の影響を考慮するために、領域1(岸沖5.5 km×沿岸26 km, 図-2)では海上風のみを考慮した吹送流場の計算を行い、その計算結果を境界条件として観測棧橋周辺の領域2(同1 km×1 km, 図-2中央部のハッチ部分)においては波浪と海上風を考慮した海浜流場の計算および漂砂・地形変化の計算を同時に行う一方向ネスティングの計算を行った。計算格子は、領域1では岸沖200 m×沿岸360 m, 領域2では岸沖40 m×沿岸40 mとし、水深方向には領域1, 2共通で σ 座標系で7層とした。領域2の水深データには、前述の平面地形計測によって得られた値を初期条件として用いた。棧橋周辺の底質粒径 d_{50} は、汀線付近で1.0 mm前後であるが、水深10 m付近では0.1~0.2 mm程度であるので、漂砂量の計算には0.2 mmの単一粒径(代表粒径)とした。

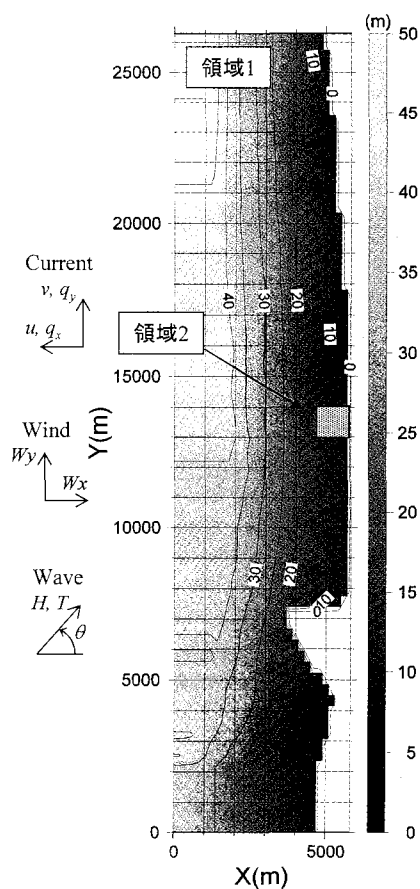


図-2 計算領域1(中央部のハッチ部分が領域2)

シミュレーションの対象期間は、平面地形計測の前に断面地形計測が行われた2003年10月11日から、次の断面計測が行われた同年11月14日までの約1ヶ月間とした。入力条件としての波浪と海上風は、観測桟橋で得られた20分間平均の波浪(有義波高, 有義波周期, 主波向き)と海上風(沿岸・岸沖成分)を30分ごとに更新する方法で与えた。(波浪は領域2での計算のみ, 海上風は領域1, 2で共通)。観測された波浪は有義波高で2mを超えると、かなり高い碎波率となっているが、本研究では観測波浪の領域2の沖側境界での換算沖波を与え、海上風は計算領域内で一様と仮定した。

(2) 計算結果

a) 流れの再現性と漂砂量の予測

2003年10月21日以降、大潟波浪観測所観測桟橋では、桟橋先端の海底面に ADCP が設置され、海浜流の鉛直分布の連続計測が実施されていた。この計測データを解析し、流れの計算結果の検証に用いた。

図-3 は、計算期間での波浪(有義波高・周期, 主波向き)、海上風(沿岸・岸沖方向成分)、ADCP で得られた底層での10分間平均流速(沿岸・岸沖方向成分)と領域2の ADCP 設置位置(観測桟橋先端)に相当する地点での平均流速(最下層)および同地点での海底面高さと漂砂量(沿岸・岸沖方向成分)の計算結果を示している。ここで、海上風の岸沖方向成分は岸向きを正、平均流と漂砂量は沖向きを正としている。沿岸方向成分は、海上風, 平均流, 漂砂量共通で、海に向かって右手方向(図-2において上向き)を正としている。また、波向きは進行方向を示しており、岸に対して直角な方向を0度とし、反時計回りを正としている。

碎波帯内での地形変化(砂の沖への流出)に大きな影響を及ぼす沖向きの流れ(正の岸沖方向流速)は、変化の傾向と流速のオーダーがおおよそ再現できているが、沿岸方向流速においては過大評価されている部分がやや目立つ。特に、図中に示した期間 A では、観測結果では

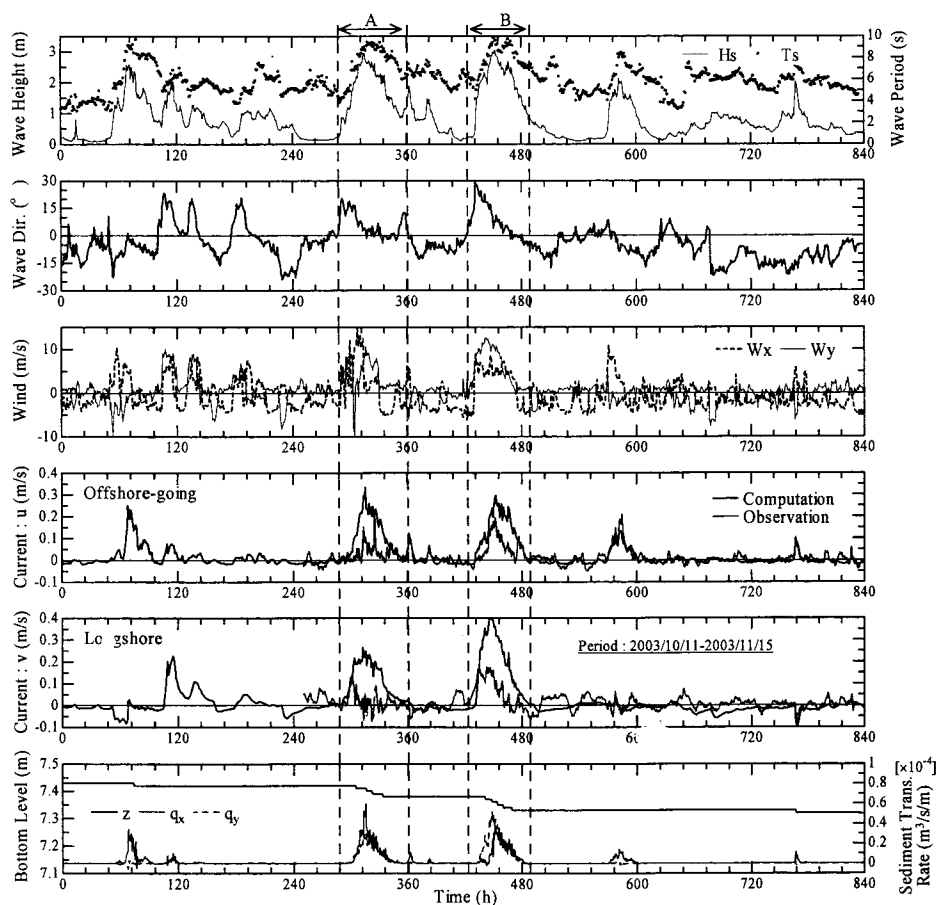


図-3 観測桟橋先端での観測結果と計算結果の比較

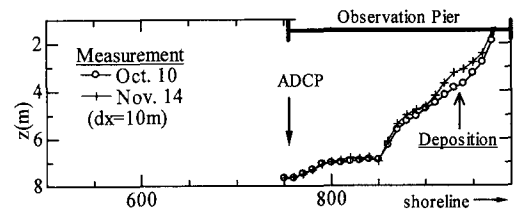
1 段目: 有義波高・周期, 2 段目: 主波向き, 3 段目: 海上風の岸沖・沿岸方向成分, 4, 5 段目: 平均流の岸沖・沿岸方向流速(最下層での計算・観測結果), 6 段目: 海底面高さと漂砂量の岸沖・沿岸方向成分

長時間(1日以上)に及ぶ沿岸流速の発達は見られないが、計算結果においては顕著な発達が見られる。また、沖向き流速においても、数時間以下での強い流れの発生は観測結果においても確認できるが、計算結果の見られるような1日以上に及ぶ流れの発生は見られない。一方、波浪条件がほぼ同様の期間Bにおいては、計算結果に沿岸流速の過大評価はあるが、継続時間が1日程度の強い沿岸・沖向き流速が観測、計算の双方で見られる。海上風に関しては、期間Bに比べてAでは変動が激しく、安定した海上風の継続時間が短い点が違いとして挙げられる。したがって、海上風の影響が砕波帯周辺の海浜流場の形成過程においても、かなり重要であることが確認できる。本研究で用いた数値モデルでは沿岸域での流れの発生に海上風の影響が考慮されているが、高波浪の影響の方が計算結果に強く表れていると考えられる。観測結果から推測すると、観測棧橋先端(水深約7m地点)で有義波高がおおよそ1mを超えるようなストームの場合には沖向きの流れが発生しており、本数値モデルによる計算結果においても、その傾向が再現されている。さらに、今回の計算においては、有義波高が2mを超えるようなストームでは波浪の影響が過大評価されていることが明らかとなった。しかし、期間Aの後半や期間Bの後の波高が2m程度までの海象条件であれば、岸沖・沿岸方向ともかなり精度良く再現されることも確認された。高波浪時の棧橋での計測波浪は高い確率で砕波している。したがって、今後、砕波の影響を考慮した沖波、入射波条件の与え方に改善が必要である。

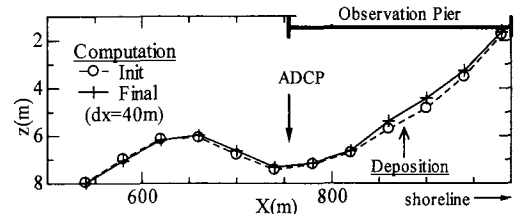
b) 海底地形変化(棧橋断面)の再現性

図-4(a)は、棧橋沿いでの断面地形計測で得られた10月11日と11月14日の海底地形を示している。また、図-4(b)は平面地形計測データの空間補間で得られた棧橋沿いでの海底地形(初期地形)と1ヶ月間の地形変化計算の結果である。断面計測結果(図-4(a))では、汀線(図の右側)から150m付近に急に深くなっているところがあることが確認できるが、計算に用いた初期地形(図-4(b))にはそのような地形変化は表現されていない。これは、小型船による計測を行うときに、安全上の理由から棧橋近傍での航行は行っておらず、棧橋沿いでのデータ密度が荒くなってしまい、細かな地形が再現できていないことが原因と考えられる。また、計算効率の点から、領域2での計算格子を岸沖・沿岸方向に40mと設定したため、格子サイズ以下の地形変化が再現できていない(再現できない)ためでもある。しかし、データ間隔40mでも大まかな海底地形(海底勾配)は再現されているので、今回の領域2におけるシミュレーションでは、40mの格子間隔を用いた。

深浅測量の結果から、約1ヶ月間に汀線(図の右側)



(a) 断面地形計測結果



(b) 計算に用いた初期地形と1ヶ月後の計算結果

図-4 棧橋沿いでの地形変化の比較

から100m以内の範囲で最大約60cm浅くなっていることが確認されている。しかし、計算結果では棧橋中央付近で堆積する傾向が示されている。この期間内に現地では、高波浪時に消波ブロック背後の土砂が大量に流出しており、それが岸側からの土砂供給となり、一時的に堆積したものと推測される。計算では陸側境界を固定壁として与えていることにより、漂砂量の不連続性から陸側境界直近で極端な洗掘が生じてしまうため、漂砂量の計算では便宜的に陸側境界の法線方向成分を海側計算点(2点)から線形外挿する方法を用いている。しかし、この方法では岸側からの土砂供給が正確に考慮されていないため、岸近くでの堆積傾向が現れなかったものと考えられる。流れの3次元性や平面分布の影響は考慮され、前述の観測結果と計算結果との比較においても、現地での流動場の再現性は良好であるが、地形変化についてはその再現性に検討の余地が残されている。

図-5は、(a)計算された1ヶ月後の水深と(b)1ヶ月間での水深変化量の空間分布を示している。変化量は正が堆積を示している。初期地形と(a)を比較すると、図上でその違いはほとんど確認できなかったが、その変化量(b)では棧橋沖の水深8~10m付近で僅かではあるが負の領域(侵食)が見られた。岸近くでは堆積箇所が広く分布しており、これは前述の陸側境界条件に依るところが大きいと推測される。しかし、棧橋先端付近ではうねり性の波浪が来襲していると考えられるストームの後半には岸向きの漂砂量も計算されており、それによる堆積も生じていることが確認されているので、沿岸域での波と流れによる漂砂現象はおおよそ再現できていると考えられる。

計算された棧橋先端での漂砂量と海底面高の時間変化

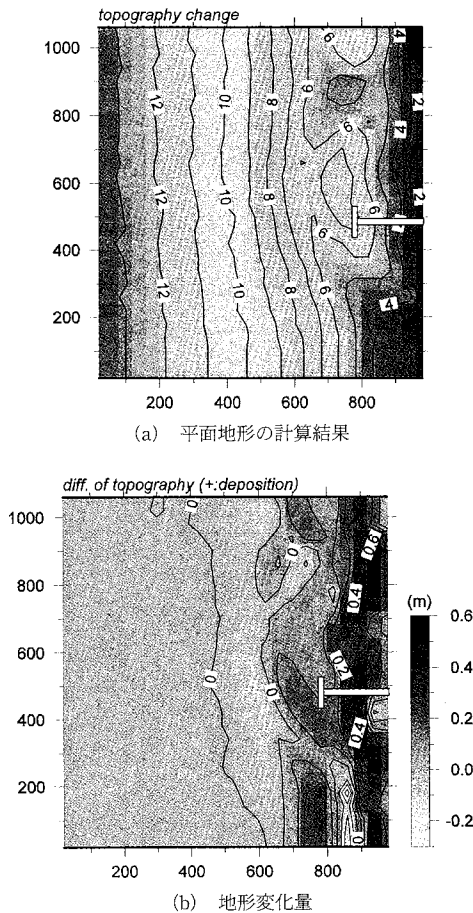


図-5 平面地形, 変化量の計算結果 (1ヶ月後)

(図-3 最下段)を調べてみると, ストームの来襲に対応して漂砂が急激に発生し, そのときにだけ地形変化が顕著に生じ, ストームの来襲毎に段階的に地形が変化している様子が分かる(今回の計算では堆積). これは, ストームが来襲した短期間(数日程度)での急激な地形変化が長期間の累積変化量に大きく寄与する事を示している. したがって, 長期間(年スケール)での地形変化を検討する場合においても, 単一ストームで短期間に発生する特徴的な地形変化過程を把握しておくことが重要で, 本数値モデルはそのようなニーズに対応できるものであると考える. また, 本数値モデルによる特徴的な短期地形変化予測を積算することにより, より現実的な長期間での変形予測も可能になると推測される.

5. 結 語

これまでに著者らが開発を行ってきた広域海浜流の3次元数値モデルに漂砂・地形変化モデルを結合することにより, 広域海浜流・漂砂系の結合数値モデルの構築を行った. また, それを上越・大潟海岸の大潟波浪観測所

観測機橋周辺に適用し, 本結合数値モデルの適用性を検討した. その結果, 漂砂・地形変化モデルについては, 現象の再現性に検討の余地が残されているが, 定性的な漂砂現象は再現できていることが確認された. 本モデルの構築により, 沿岸域での空間的な物質輸送(漂砂), 地形変化の詳細なシミュレーションが可能となると考えられる. 現在, 再現性の向上のために, 入射波条件の与え方, 波浪変形モデルの改良, swash zone のモデル化を含めた岸側境界条件の取り扱い方法を検討し, 実用的な計算精度への改良を検討している.

また, 山下ら (2003) は機橋沿いの底質サンプルを解析し, 沿岸部の海底質は粗・細粒砂が層状に堆積した鉛直分布構造を形成しており, 粗・細粒砂の鉛直混合過程を考慮した侵食・海岸保全対策の重要性を指摘している. 本研究では, 単一粒径による漂砂量・地形変化の算定を行ったが, より正確な地形変化の再現, 予測を行うためには, 粗・細粒砂の影響を考慮した混合粒径での漂砂量の算定および地形変化計算が必要である. 今後は混合粒径の影響を考慮できる漂砂・地形変化モデルへの拡張も検討する必要がある.

最後に, 本研究で使用した断面・平面地形データの取得においては, 京都大学防災研究所観測実験研究センターの芹澤重厚助手と内山 清技官にご協力頂いた. ここに記して, 感謝の意を表する. また, 本研究は科学研究費補助金(若手研究 B: 15760378)の補助を受けて行われたことをここに付記する.

参 考 文 献

- 加藤 茂・山下隆男・路 明 (1999): 3次元広域海浜流数値モデルの適用性に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 211-215.
- 加藤 茂・山下隆男 (2003): 上越・大潟海岸で観測された広域海浜流の再現数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 391-395.
- 気象庁 (2003): 潮汐観測資料, <http://www.data.kishou.go.jp/marine/tide/genbo/index.php>
- 田村 進・近川喜代志・西條正輝・高野剛光・山谷弘幸・泉 正寿 (2001): 風を考慮した2層海浜流モデルによる新潟西海岸の流況特性, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 41-45.
- 馬場康之・今本博健・山下隆男・吉岡 洋 (1999): 砕波帯近傍における平均流の発生要因の分離一波崎海洋研究施設でのADCPデータの解析, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 196-200.
- 山下隆男・林 健太郎・朴 柱 (2003): 底質粒径の時空間変化を考慮した海浜変形予測について, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 541-545.
- Bailard, J. A. (1981): "An energetics total load sediment transport model for a plane slope beach", Jour. Geophys. Res., Vol. 86, No. C11, pp. 10, 938-10, 954.
- Kato, S and T. Yamashita (2000): Three-dimensional model for wind, wave-induced coastal currents and its verification by ADCP observations in the nearshore zone, Proc. 27th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 3777-3790.
- Yamashita, T., H. Yoshioka, S. Kato, Lu Ming and T. Shimoda (1998): ADCP observation of nearshore currents structure in the surfzone, Proc. 26th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 787-800.