

3次元広域海浜流数値モデルの適用性に関する研究

加藤 茂*・山下隆男**・路 明***

1. 緒 言

海岸のソフトビーチ化が海岸環境保全に果たす役割が認識され、海浜変形予測技術の重要性、実用化の緊急性が高まっている。戻り流れや吹送流が卓越する砕波帯近傍での海浜流場を実用レベルで数値的に再現するためには、3次元海浜流モデルの構築とその現地観測データによる検証が必要不可欠であり、これにより初めて信頼できる海浜変形予測が可能になる。3次元海浜流モデルの構築は、de Vriend and Stive (1987) や Svendsen and Lorenz (1989) に始まり、既に幾つかのモデルが提案されている(例えば、高木ら, 1996, 黒岩ら, 1997, 信岡ら, 1997)。しかし、その検証に用いることのできるデータが少ないこともあり、その実用性についての検討は十分なものとは言い難い。黒岩ら(1997)や信岡ら(1997)も、岡安ら(1992)の物理実験データを用いた検証は行っているが、現地海岸に適用し、モデルの検証を行った例は皆無である。

本研究では、砕波帯を含めた沿岸海域の広い範囲での漂砂(広域漂砂)の予測を目的として、そのための3次元海浜流モデルの構築と現地への適用性の検討を行う。すなわち、著者らが開発してきた3次元広域海浜流モデルにより、現地海岸での ADCP 観測の時系列データを追算し、モデルの適用性を検討する。さらに、広域海浜流場の形成に重要な役割を果たす海上風場を、観測データ以外で与える場合に、気象庁の GPV(Grid Point Value)地上面風速予測値を用いることを想定し、海上風の観測結果と比較することにより GPV データの特性を明らかにする。さらに、GPV データを用いる場合の補正式を提案する。

2. 広域海浜流モデルの適用性の検討

2.1 数値モデルの概要

本研究では、加藤ら(1998)が提案した3次元海浜流数値モデルを用いる。このモデルでは、平均流場、波浪

場、乱流場の各モデルから構成されており、各モデルを連立して解く。さらに、風による海面でのせん断応力を考慮することで、波浪、乱れ、風の影響を考慮した広域海浜流場の計算を行うことが可能である。水平方向には直交座標系、鉛直方向には σ 座標系を用いており、差分法を用いて計算を行っている。平均流場の計算には、静水圧近似、Boussinesq 近似を仮定した連続式と運動方程式を基礎式として用いる。波浪場の計算には Battjes and Janssen (1978) の時間平均波浪場に対するエネルギーフラックス保存式と Nairn ら(1990)の砕波 surface roller 内に対するエネルギーフラックス保存式を用い、乱流場の計算には Mellor and Yamada (1982) の 2.5 次モーメント乱流クロージャーモデルを用いている。

2.2 検証データの概要

数値計算結果の検証には、山下ら(1998a)が新潟県大潟海岸において行った、波、風、海浜流の長期連続観測の観測結果を用いる。この観測は、京都大学防災研究所大潟波浪観測所の観測棧橋を援用して行われ、海浜流の鉛直分布は海底設置型の高周波 ADCP によりサンプリング 18s で連続観測されている。また、棧橋先端ではコーシンペーン風速計による 10 m 高度の 30 分間平均風速・風向および 3 成分超音波風速計によるサンプリング 10 Hz の海上風データが得られている。波浪は、7 台の超音波式波高計により毎時 20 分間の観測が行われている。この観測結果から、砕波帯を含む沿岸域の流れは、広範囲に発生する吹送流(風により発生する流れ)と砕波帯周辺で発生する波浪流(砕波によって発生する流れ)とで形成され、海浜流の発生機構には波浪流だけでなく、吹送流の影響も考慮しなければならないことが指摘されている。

2.3 計算条件

図-1は大潟海岸における観測棧橋の位置と大潟海岸の海底地形を示している。吹送流の影響を考慮するためには、砕波帯周辺のみを対象とした計算領域では、吹送流が十分発達しない。そのため、計算対象領域は、図-1中に示すように直江津港の北東側から柿崎漁港付近までを領域 1、棧橋周辺を領域 2 と設定した。

領域 1 は、沿岸方向 $Y=12.5$ km, 岸沖方向 $X=5.6$

* 正会員 工博 京都大学助手 防災研究所
** 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所
*** 学生会員 工修 京都大学大学院工学研究科

km, 水平格子間隔は $dx=200\text{ m}$, $dy=500\text{ m}$, 鉛直方向には等間隔 10 層 ($d\sigma=0.1$) とした。境界条件は, 岸側で壁境界, 沖側および側方 (沿岸方向) 境界では開境界として放射条件を与えた。開境界条件の影響を抑えるために, 沖側境界の外側に一様水深領域, 側方境界の外側に沿岸方向に岸沖方向の海底勾配が一様な領域 (仮想領域) を設けている。領域 2 は, 沿岸方向 $Y=1.5\text{ km}$, 岸沖方向 $X=1.1\text{ km}$ とし, 水平格子間隔は $dx=20\text{ m}$, $dy=100\text{ m}$, 鉛直方向は等間隔 10 層とした。領域 1 と同様に, 側方境界の外側には, 仮想領域を設けている。また, 狭領域では最小水深を 4 m とし, 離岸堤や人工リー

フは水深 $3\sim 4\text{ m}$ としている。

波浪流の影響は砕波帯付近に限られ, 沖浜帯ではその影響は無視できると考えられるので, 広領域の計算では, 風 (吹送流) のみを考慮した。

狭領域での計算には波浪流と吹送流の影響を考慮した。平均波浪場は, 沖側境界で直江津港 (水深約 20 m 地点) での観測結果を与え, 波浪モデルによる伝播計算で求めた。そこで得られた砕波による海面せん断応力を風による海面せん断応力と合わせて, 海浜流の駆動力として与えている。

水平方向の渦動粘性係数は, 広領域計算では一定 ($60\text{ m}^2/\text{s}$) で与え, 狭領域計算では水深 8 m 以深では $0.1\text{ m}^2/\text{s}$ とし, それより岸側では Longuet-Higgins (1970) の評価式を参考に次式で与えた。

$$N_n = Nx\sqrt{g(h+\zeta)}\gamma_b \approx N'g^{1/2}h^{3/2}\gamma_b \dots\dots\dots (1)$$

$N' = N/\tan\theta$ で, N は無次元定数, θ は海底勾配, x は岸からの距離, g は重力加速度, h は水深, ζ は平均水位, γ_b は基準化された砕波率

$$\gamma_b = \frac{\gamma_0}{\gamma_{0\max}}; 0 \leq \gamma_b \leq 1 \dots\dots\dots (2)$$

である。ここでは, 波浪モデルから求められる砕波率 (Battjes ら, 1978) を用いている。

風は大潟波浪観測所の観測棧橋で得られた平均風速・風向を領域内一様で与え, 海面抵抗係数 C_D には山下ら (1998 b) が砕波帯近傍の観測データから得た推定式 (3) と Yelland ら (1996) が外洋での観測データから得た推定式 (4) とを組み合わせて, 図-2 のような空間分布を仮定して用いた。

・山下ら (1998b) による推定式

$$C_D = 0.0223 \left(\frac{10}{3}\right)^{-U_{10}^{0.16}}; U_{10} \geq 10.0\text{ m/s} \dots\dots (3)$$

・Yelland ら (1996) による推定式

$$\left. \begin{aligned} C_D &= (0.60 + 0.07 U_{10}) \times 10^{-3} \\ &\quad : U_{10} \geq 6.0\text{ ms} \\ C_D &= \left(0.29 + \frac{3.1}{U_{10}} + \frac{7.7}{U_{10}^2}\right) \times 10^{-3} \\ &\quad : 3.0 \leq U_{10} < 6.0\text{ m/s} \end{aligned} \right\} \dots\dots (4)$$

これは, 従来推定式 (4) を用いた場合には, 計算結果は常に観測結果を下回り, 沿岸域での風の影響が正しく評価されていないと考えられたためである。それに対して, 式 (3) は砕波帯近傍の観測データから得られた推定式であるため, この関係を沿岸域全体に適用することは適切でないと考えられるため, 図-2 のような 2 式の補間による空間分布を用いることとした。

計算手順としては, 最初に広領域での計算を行い, 狭領域との接合部に相当する地点での値を求める。それを,

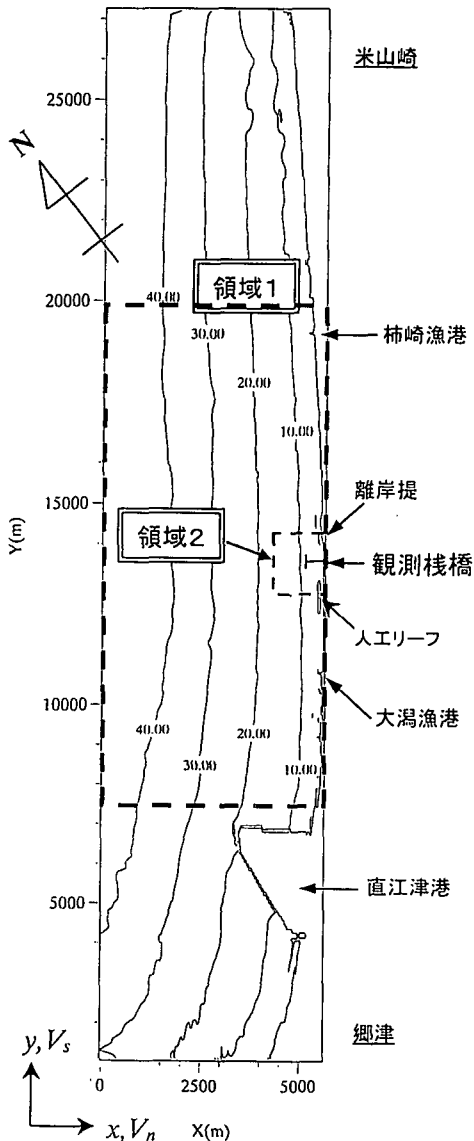


図-1 大潟海岸における観測棧橋の位置と海底地形および計算領域 (領域 1, 領域 2)

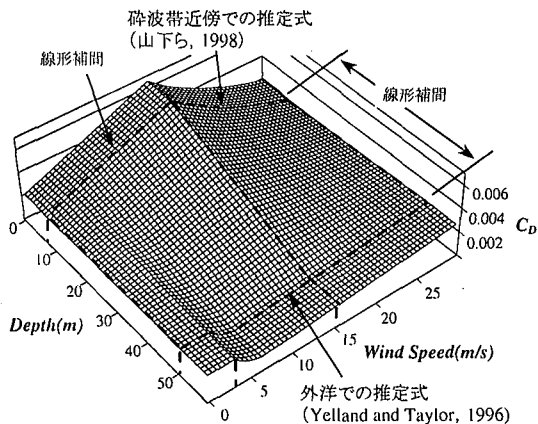


図-2 山下ら (1998) と Yelland et al. (1996) の推定式を用いて仮定した海面抵抗係数 C_D の空間分布

狭領域での沖側境界条件として用いることにより、2領域の結合計算を行った。

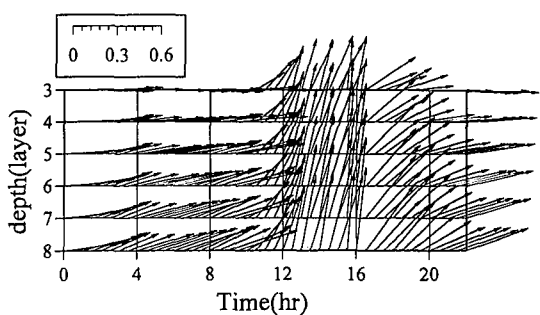
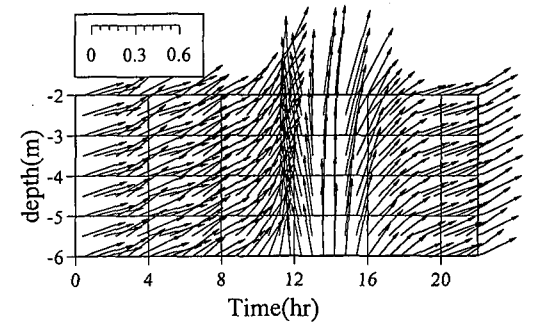
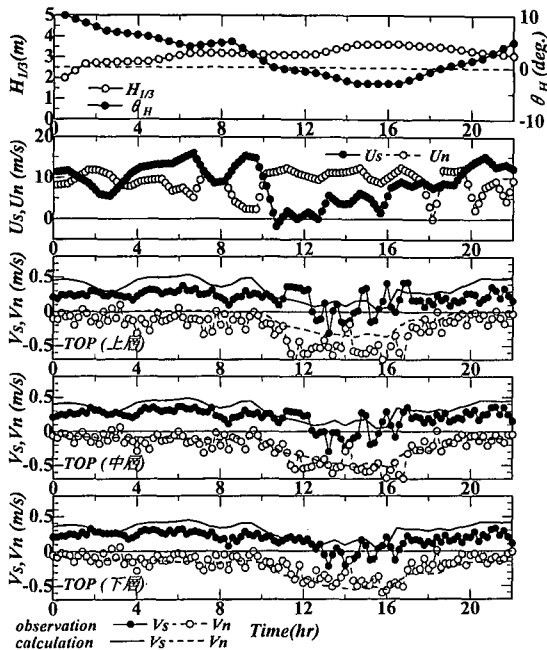
3. シミュレーション結果

追算計算は、山下ら (1998a) の解析結果 (Case A~E) の中で Case C を対象とした。図-3 は、観測結果と計算結果を比較した図である。(a) は上層、中層、下層にお

ける沿岸方向流速 V_s と岸沖方向流速 V_n の比較、(b) は観測結果の1時間移動平均流速ベクトル、(c) は計算された30分毎の流速ベクトルである。(a)には併せて、与えた波(有義波高 $H_{1/3}$ 、平均波向 θ_H)と風(風速 U 、風向 θ_U)の時系列も示している。波向、風向は汀線直角方向から柿崎方向を正として、進行および吹き出し方向を示している。また、 V_s は柿崎方向を正とし、 V_n は岸向きを正としている。(b) および (c) では、横軸が時間、縦軸が深さ方向、ベクトルは上向きが沖向きを示し、右向きが沿岸(柿崎)方向を示している。

計算結果は、観測結果に見られる沿岸流から沖向き流れへの方向変化の傾向をほぼ再現している。しかし、観測結果のような急激な方向変化はあまり再現されていない。山下ら (1998a) は、この急激な沖向き流れの発達を、それまで保たれていた海面勾配による沖向きの力と海面せん断応力による岸向きの力のバランスが崩れることにより、突然、発生するものであると説明している。それを踏まえると、今回の計算においては、海面勾配と海面せん断応力による力の微妙なバランスが再現できていないために、急激な流れの方向変化が再現できなかったと考えられる。

図-4 は、波と風が海浜流に及ぼすの影響を比較した図であり、破線が波のみを考慮した場合、点線が風のみ



(a) 棧橋先端での沿岸方向流速および岸沖方向流速の比較

(c) 計算結果

図-3 観測結果と計算結果の時系列比較

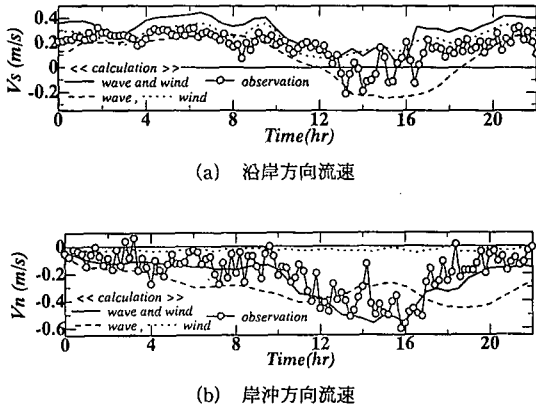


図-4 波および風の海浜流に及ぼす影響の比較

を考慮した場合の計算結果である。波のみを考慮した場合には、波向の変化に対応して沿岸流の方向も変化している。しかし、観測結果では計算結果ほどの波向に対する敏感な方向変化はしていない。沿岸流の方向が不安定になる時間が2~3時間見られるが、それ以外は常に $V_s > 0$ (栢崎方向) となっている。これは、波浪流による碎波帯周辺に限られた流れだけでなく、沿岸域全体に及ぶ流れ ($V_s > 0$) の影響が観測結果には現れていると考えられる。岸沖方向の流れについては、戻り流れによる沖向きの流れが常に発生している。風のみを考慮した場合には、風速の発達・減衰に伴い流速も変化し、沿岸流の方向は風の方向とほぼ一致している。前述の沿岸域全体に及ぶ流れは、この風によって発生する吹送流であると考えられる。しかし、風のみを考慮した場合には、沖向きの流れは常に弱く、観測結果に見られる急激な沖向き流れの発生は生じない。沖向き流れの発生には、波浪流が大きく影響していると考えられる。

以上の計算結果から、広域海浜流場は風による広範囲の流れと、波による碎波帯周辺の流れが組み合わさって形成されており、広域漂砂の予測を行うための広域海浜流場の推定には、波のみならず風の影響が重要な要因であることがわかる。また、この結果は、山下ら (1998a) が観測データの解析から指摘した海浜流場形成における風の重要性を、数値計算の観点から示したものであると言える。

さらに、図-3において計算結果と観測結果を比較すると、観測結果に対して計算結果は2時間程度の遅れが見られる。これは、1点で観測された風の時系列データを計算領域内で一様として与えているために、風の空間分布を考慮されておらず、それが遅れの生じる要因になっていると推測される。広域海浜流場の形成に風の影響が重要であるということは、風の時空間分布の特性も正しく評価する必要がことを意味している。

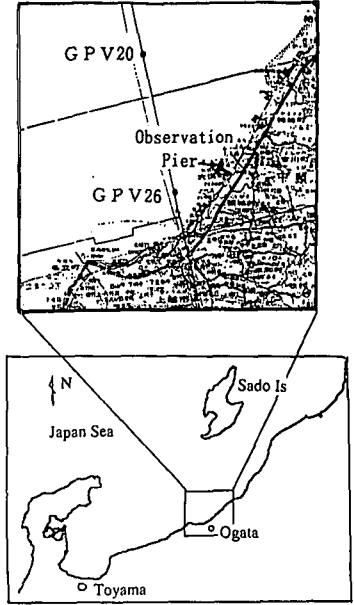
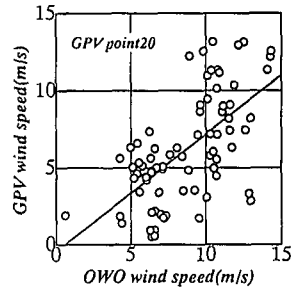
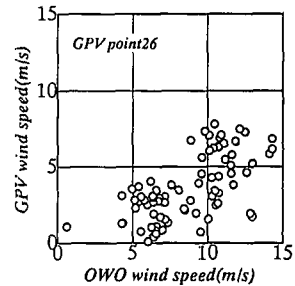


図-5 観測点とグリッドポイントの位置関係



(a) 観測値と Point 20 (海上)



(b) 観測値と Point 26 (陸上付近)

図-6 観測値と GPV データの比較

4. GPV データの広域海浜流シミュレーションへの適用に関する検討

広域海浜流の計算に風の空間分布を考慮する場合、最も容易で実効性のある方法として気象庁の GPV (Grid Point Value) データを援用することが考えられる。そこ

で、GPV データと海上風の観測データとの比較を行い、GPV データが海上風の観測データをどの程度再現しているか調べる。ここでは、大潟波浪観測所の棧橋で得られた海上風の観測データと、観測所に最も近い陸近傍のグリットポイント (point 26) と海上のグリットポイント (point 20) でのデータを比較してみた。観測所とグリットポイントの位置関係を図-5 示す。

図-6 は冬型気圧配置の場合に限定して、point 20 および point 26 の 1 時間毎の GPV データと棧橋での観測海上風風速との関係を示している。この図より、陸近くの point 26 では全ての値が観測結果に比べてかなり小さくなっているが、海上の point 20 では観測結果に近い値となっている。したがって、GPV データでは、陸上の影響による風域場の減衰特性が強く評価されていると推測され、海上風のデータとしては陸上付近のグリットポイントのデータは用いない方が良いと考えられる。また、広域海浜流場の計算に GPV データを用いて風域場の影響を考慮する場合には、概して海上でのグリットポイントデータが観測結果を下回っていることを加味すると、次式のような補正式を用いることにより、海上風の風域場の推定精度を向上させることができると思われる。

$$W_{GPV} = 0.76 W_0 - 0.45 \dots\dots\dots (5)$$

ここで W_0 は観測結果、 W_{GPV} は GPV データによる風速である。

5. 結 語

本研究では、3次元海浜流モデルの構築し、現地海岸での ADCP 観測の時系列データを追算し、本モデルの現地への適用性について検討を行った。また、風の空間分布を考慮することを想定し、GPV データの特性を検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

1) 風を考慮した 3次元広域海浜流モデルを大潟海岸に適用し、概ね良好な計算結果が得られた。

2) 広域海浜流場は風の影響を強く受けており、観測結果から指摘された風の重要性を、数値計算からも明らかにした。すなわち、砕波帯周辺で発達する波浪流に、沿岸域の広い範囲で発生する吹送流が合わさって海浜流場は形成されており、これまでの波 (波浪流) のみでの検討では不十分である。

3) 風の空間分布特性の 1 つとして、風による海面での

抵抗係数の空間分布を提案した。

4) GPV データは陸上の影響による風域場の減衰特性が強く評価されていることが明らかとなった。

5) GPV データは観測結果を下回る傾向があるため、その補正式を示した。

最後に、本研究は文部省科学研究費 (奨励研究 A, No. 11750455) の研究成果の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 岡安章夫・原 幸司・柴山知也 (1992): 斜め入射波による砕波帯内定常流の 3次元分布, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 66-70.
- 加藤 茂・山下隆男・安田孝志・三島豊秋 (1998): 高次乱流モデルとローラー型砕波モデルとを援用した海浜流の 3次元数値解析, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 191-195.
- 黒岩正光・野田英明・芳地康征 (1997): 準 3次元海浜流場の数値シミュレーションに関する研究, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 151-155.
- 高木利光・川原睦人 (1996): モードスプリット有限要素法を用いた準 3次元海浜流シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 361-365.
- 信岡尚道・加藤 始・三村信男 (1997): 多層 3次元海浜流モデル, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 156-160.
- 山下隆男・加藤 茂・路 明・安田孝志・飯野智彦 (1998a): ADCP により長期連続観測した海浜流の鉛直分布とその強風, 波浪応答特性, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 201-205.
- 山下隆男・路 明・Ruscher Christophe (1998b): 砕波帯近傍における海面せん断応力の評価法, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 81-85.
- Battjes, J.A. and J.P.F.M. Janssen (1978): Energy loss and set-up due to breaking in random waves, Proc. 16th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 569-587.
- de Vriend, H.J. and M.J.F. Stive (1987): Quasi-3D modeling of nearshore currents, Coastal Eng., Vol. 11, pp. 565-601.
- Longuet-Higgins, M.S. (1970): Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, 1 & 2, Jour. Geophys. Res., Vol. 75, No. 33, pp. 6778-6780, pp. 6790-6801.
- Mellor, G.L. and T. Yamada (1982): Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, Rev. Geophys. Space Phys., 20, pp. 851-875.
- Nairn, R.B., J.A. Roelvink and H.N. Southgate (1990): Transition zone width and implications for modeling surfzone hydrodynamics, Proceedings of the Int. Conf. Coastal Engineering Conference, Delft, The Netherlands, pp. 68-82.
- Svendsen, I.A. and R.S. Lorcz (1989): Velocities in combined undertow and longshore currents, Coastal Eng., Vol. 13, pp. 57-79.
- Yelland, M.J. and P.K. Taylor (1996): Wind stress measurements from the open ocean, Jour. Phys. Oceanogr., 26, pp. 541-558.