

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

加 藤 茂*・山 下 隆 男**

これまでに著者らが開発を行ってきた広域海浜流の 3 次元数値モデルを用いて, 1999 年冬季に実施された上越・大潟海岸における広域の流れの観測結果(新潟県・京大防災研)の再現計算を行い, 数値モデルの現地適用性および再現精度の検討を行った。その結果, 波浪の影響のみを考慮した計算では, 砕波帯沖側での流れ場が再現できないが, 風と波浪の両方を考慮することによって, 砕波帯内から沖合までを含めた広い範囲での流れの場の再現が可能になることを示した。また, 本モデルは強風高波浪時の沿岸域の流れの場の再現計算に十分使用可能な精度を有していることを示した。

1. 緒 言

強風・高波浪条件下では砕波帯内での海浜流(波浪流)のみでなく, その沖合においても強い流れが発生しており, 海底付近で 50 cm/s を超えるような平均流(平均時間は数分間以上)が発生していることが幾つかの現地観測により明らかとなっている(田中, 1994; 佐藤, 1995; 安田ら, 1996; Yamashita ら, 1998; 馬場ら, 1999; 田村ら, 2001 など)。この砕波帯沖合の流れは, 従来の波浪のみを外力とした海浜流の数値モデルでは再現できず, 沿岸域の流れに及ぼす風の影響を考慮することが重要であることが指摘されている(加藤ら, 1999; 田村ら, 2001)。しかし, 海上風が沿岸域の流れの形成にどの程度影響を及ぼすか, 海上風を考慮することによりどの程度再現性が向上するのかについては十分な検討がなされていない。また, 沿岸域での海上風による海面摩擦係数についても, 加藤ら(1999)や田村ら(2001)は, 通常用いられる摩擦係数よりも大きな値を与えることにより, 数値計算の再現性が向上することを示しているが, その与え方には理論的に明確な根拠が示されていない。

本研究では, 著者らが開発を行ってきた広域海浜流の数値モデルを用いて, 上越・大潟海岸で得られた沿岸域での流れの現地観測結果(Kato・Yamashita, 2000; 馬場, 2001)の再現シミュレーションを行い, 海上風と広域海浜流の再現性の関係および現地における砕波帯沖での流れの発生要因について検討を行う。

2. 広域海浜流の現地観測

1998 年 12 月～1999 年 2 月に新潟県によって, 上越・大潟海岸での広域多点観測が実施された。この観測では 13 測点で冬季波浪と平均流の計測が行われた(図-1)。また, 同じ期間中には京都大学防災研究所大潟波浪観測所の観測桟橋海域において, 波浪・海上風・平均流の冬季集中観測が実施されており, この観測と上記の広域多点観測との合同観測結果により, 沿岸域での流れの発生機

構, 時空間分布に関する解析が行われている。観測の概要と結果については, Kato・Yamashita (2000), 馬場(2001)に詳しいが, 主要な観測結果は以下の通りである。(1)砕波帯内では, 非常に強い沖向きの流れ(undertow)が間欠的に観測されており, 発生時刻は高波浪発生時と対応している。その流速は砕波帯内から沖に砂を輸送するのに十分な強さを有している。(2)砕波帯の沖では, 海上風の風速変動に対応した沿岸方向の流れが発生しており, 強風時には漂砂移動を発生させるのに十分な流速にまで発達する。また, その流速はそこでの岸沖方向平均流速よりもかなり大きい。(3)沿岸域の流れを駆動する外力としての風の影響は顕著であり, その影響範囲は広域にわたる。

3. 広域海浜流の再現シミュレーション

(1) 計算条件

再現シミュレーションは図-1の最も東側の測線(St. 09～St. 13)で得られた観測結果を対象とした。この測線は, 上越・大潟海岸の西端に位置する直江津港から 5 km 以上東側に位置しており, 水深 20 m 海域まで延長された直江津港の防波堤の影響もこれらの観測点までは及ばないと考えられる。また, 海底地形データから, 海底地形は水深 10 m 以深では沿岸方向にほぼ一様である(図-1)ことが確認できる。したがって, 計算には測線上の断面地形を用いて, 平行等深線を仮定した岸から水深約 40 m までの断面 2 次元(流速成分は 3 成分)で再現計算を行った(図-2)。3 次元数値モデルの詳細については, 加藤ら(1999)を参照されたい。観測点はこの測線上的水深 20 m (St. 09), 15 m (St. 11), 8 m (St. 12) および 5 m (St. 13) 地点に位置している。岸沖方向の水平グリッドは 100 m, 鉛直方向の分割数は 5 層とした。流れの発生外力としては, 海上風と波浪の観測結果を与えた。海上風は観測桟橋先端の平均海面上 10 m 地点で得られた 10 分間平均値を 1 時間間隔で更新して与え, 波浪情報は, St. 11 で得られた有義波高・周期および主波向きを沖波条件として 2 時間毎に更新する方法で与えた。沿岸域での風による海面摩擦係数については, 加藤ら(1999)

* 正会員 博(工) 京都大学助手 防災研究所

** 正会員 博(工) 京都大学助教授 防災研究所

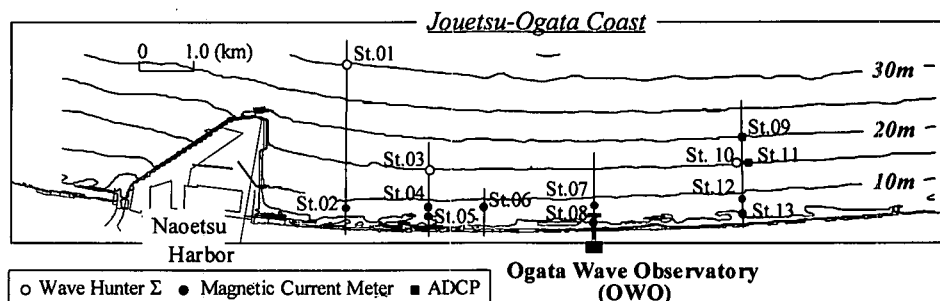


図-1 上越大潟海岸の海底地形および広域多点観測の観測点配置

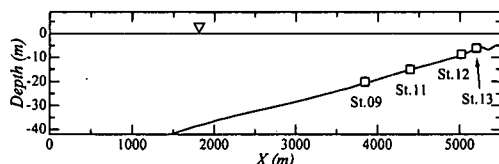


図-2 計算領域の水深作成に用いた断面地形

や田村ら (2001) によって、通常用いられる値よりも大きな値を与えることにより、数値計算の再現性が向上することが示されている。そこで、今回の計算では、海面摩擦係数は空間的に一様とし、Yelland・Taylor (1996) による推定式の2倍として与えた。波浪の影響としては、加藤ら (1999) が提案している砕波による海面せん断応力を考慮した。計算期間は、有義波高で5mを超える高波浪 (水深15m地点) と、15m/sを超える強風 (10分間平均風速) が観測された1999年2月13日を含んだ2月11日～15日の5日間を対象とした。

(2) 計算結果

a) 底面流速の時系列

図-3(a)はSt.09, St.11, St.12およびSt.13での観測結果と計算結果 (最下層) を比較した図 (岸沖・沿岸方向成分) である。流れの観測・計算結果と合わせて、その期間での有義波高 ($H_{1/3}$) と平均風速の沿岸・岸沖方向成分 (W_x , W_y) の時系列を合わせて示している。○(白丸) が観測結果、—(実線) が計算結果を示している。強い沖向き流れ (undertow) の発生と沿岸方向流速の変動は、砕波帯内 (St.12, St.13) でトレンドおよび流速値ともに精度良く再現されている。しかし、砕波帯沖の観測点 (St.09, St.11) では、沿岸方向流速の方向とオーダーは再現できているものの、最大流速の発生時刻 (2月13日) が再現できていない。

図-3(b)は、一般に用いられている海浜流シミュレーションのように風の影響を考慮せず、波浪の影響のみを考慮した場合 (波浪情報のみを流れの発生外力として与えた場合) の計算結果を観測結果と比較した図である。砕波帯内では、沖向き流れは波浪のみを考慮した場合で

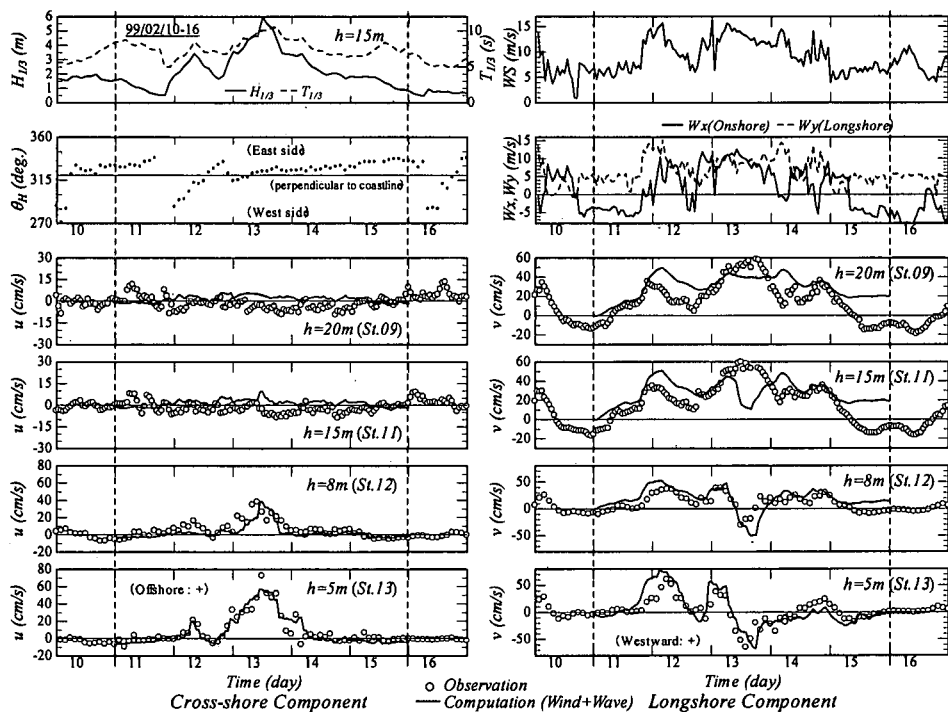
もほぼ再現できている。沿岸方向流速に関しては、方向変化に計算期間全体で若干の再現性の低下が見られるが、風と波浪の両方を考慮した場合の計算結果と同程度の再現性が得られている。しかし、砕波帯の沖では、沿岸方向の強い流れは全く再現されていない。これは、砕波帯沖合における沿岸方向の流れの発生には沿岸域の風の影響が大きく寄与しており、砕波帯からその沖合までを含めた広い範囲での流れの計算には、波浪のみを考慮した流れの場の計算では不十分であること、風と波浪の両方を考慮したモデルによって流れの場の再現性が向上することが示された。

b) 砕波帯沖合における沿岸方向流れの鉛直分布

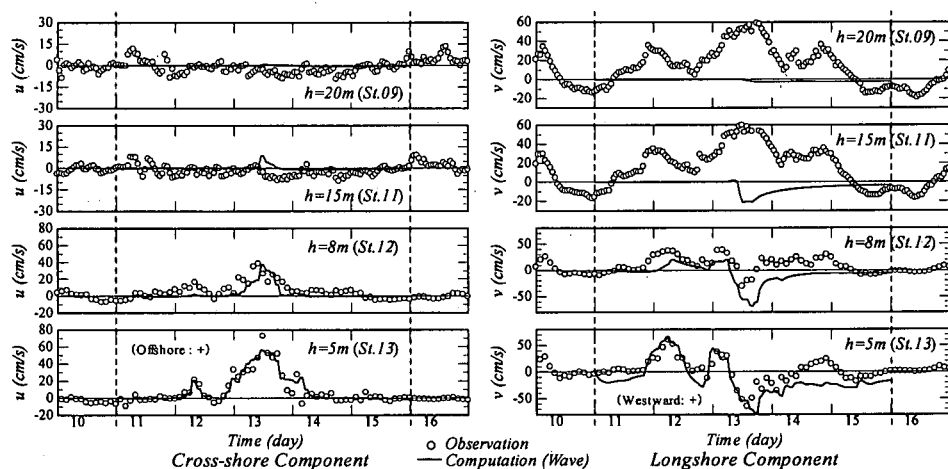
St.09 (水深20m地点) にはADCPが設置され、平均流 (10分間平均) の鉛直分布計測が連続で行われた。そこで、平均流の鉛直分布に関して観測結果と計算結果の比較を行った (図-4)。観測結果、計算結果ともに沿岸方向流速の最大値が計測された2月13日での1時間毎の鉛直分布を示している。観測結果においては、値に多少の変動はあるものの、上層から下層までほぼ鉛直方向に一樣な分布形上を示し、流速が大きくなると上層が中・下層よりもやや速くなる (分布形が少し傾く) 傾向が見られる。それに対して計算結果は、観測結果に見られるような流速の変動はほとんど見られないが、安定した鉛直分布を示している。計算結果では常に上層が中・下層よりも速く、直線上の鉛直分布を示しているが、これは今回の計算では外力として観測値を一樣に1時間または2時間一定として与えられたためで、時間分解能の粗さから細かい変動が再現できていないためであると考えている。

c) 海上風による沿岸域での流れの再現

海上風のみを考慮した場合の流れの再現性について検討を行った。図-5は、2月1日～28日までの1ヶ月間を対象として、前述の計算領域 (図-2) において風のみを考慮した場合の計算結果と観測結果の比較を示している。図からも明らかなように、沿岸方向流速の方向変化の再現性にやや不十分な箇所も見られるが、全般的には



(a) 海上風と波浪を同時に考慮した場合



(b) 波浪のみを考慮した場合

図-3 St. 09~13での観測結果と再現計算結果の比較

海上風のみを与えた場合の計算においても、沿岸方向流速の傾向はほぼ捉えられている。岸沖方向流速については、波浪の影響を考慮していないために、砕波帯での強い沖向き流れの発生は再現できていない。強い沖向き流れの発生は高波浪来襲時の砕波帯内だけに限られている。時間的には数日程度の期間に集中し、空間的には砕波帯内に限定される波浪流（海浜流）を対象とする場合

には、対象とする現象の空間・時間分解能に見合った計算条件によって別途再現・予測計算を行うことが合理的であろう。しかし、沿岸域の広い範囲における流れの特徴（全体像）を捉えるためには、風の影響を考慮することが非常に重要であり、風による流れ（吹送流）の計算によって広域の流れ場を十分な精度で再現・予測することが可能である。

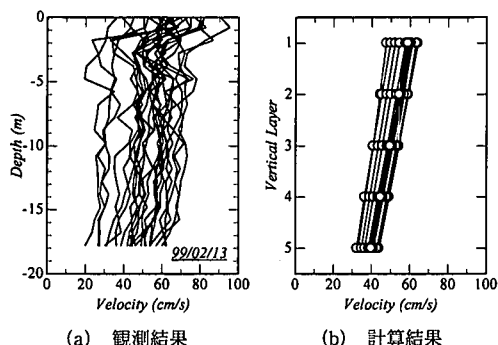


図-4 沿岸方向流速の鉛直分布の比較 (砕波帯沖: St. 09, 2月13日0時~23時)

d) 上越・大潟海岸における流れの平面分布

図-1に示された領域の岸沖・沿岸方向に若干拡張した計算領域を用いて、平面的な流れの再現性について検討を行った。流れの発生外力としては、海上風のみを考慮し、図-3と同じ期間を対象として計算を行った。図-6は2月13日12時に相当する時間における最下層での流れの平面分布を示している。新潟県の調査では、直江津港の沖防波堤の影響は大潟漁港付近にまで及ぶことが指摘されている(新潟県, 1997)。今回の平面観測においても、各測点の流向特性を調べてみると、大潟漁港西側に配置された St. 06 を境に、それよりも直江津港側(西側)の測点 St. 02~05 では直江津港へ向かう(西向き)流れが観測され、測点 St. 07~13 では東向きの流れが卓越していることが明らかとなっている(馬場, 2001)。

図-6においても、直江津港の下流側に循環流が形成されており、その範囲は大潟漁港付近にまで及んでいる。したがって、新潟県の調査および観測の結果を定性的に再現できていることが確認される。また、風のみを考慮した計算によって流れの平面場がおおよそ再現できたことから、沿岸域での大規模な流れ場(平面分布)の形成にも、海上風が大きく影響している(吹送流が大きく寄与している)ことが明確に示された。

(3) 再現精度向上のための検討課題

図-3の再現結果において、波浪と海上風の両方を考慮した場合でも水深 15 m 地点で沿岸流速の最大値が観測された時間帯(2月13日)の流速が減少しており、他の期間に比べて十分な再現性が確保されていない部分もある。これは、波浪の最盛期において波浪の影響として undertow が過大に評価(計算)されており、その影響が現地では風によって流れが発生している領域にまで及んでいるためであると考えている。その原因としては、今回の計算では計算効率の面から岸沖方向に 100 m 格子を用いていたため、波浪の影響を考慮するのに十分な空間分解能を有していない点が考えられる。もう1点は、今回用いた波浪・砕波モデルが砕波過程を十分に再現できていないことも考えられる。今後は、これらの問題点を検討し、undertow の流速分布の再現性も含めて、モデルの改善を行う。

4. 結 語

本研究では、これまで開発を行ってきた広域海浜流の

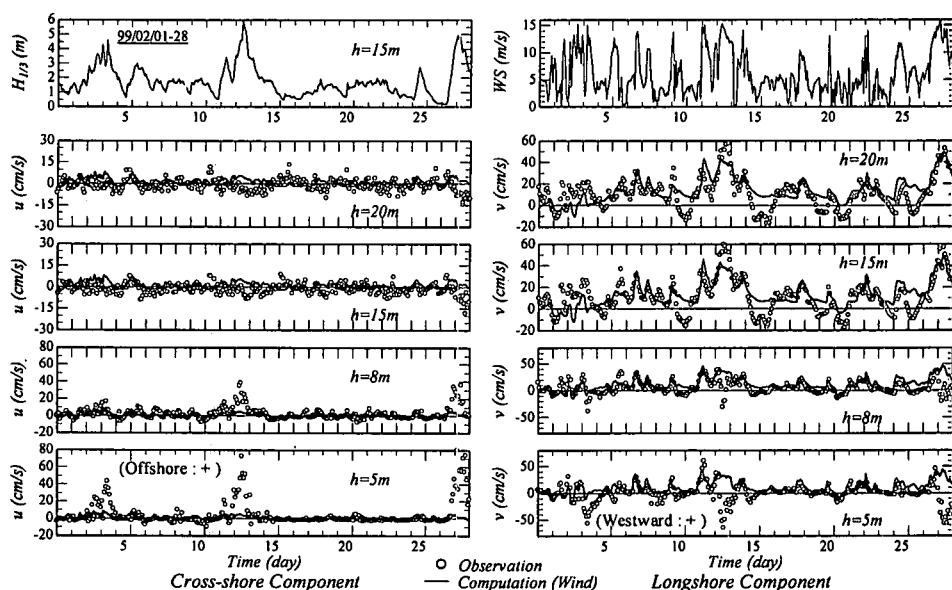


図-5 海上風による流れの再現計算結果 (再現期間: 2月1日~28日)

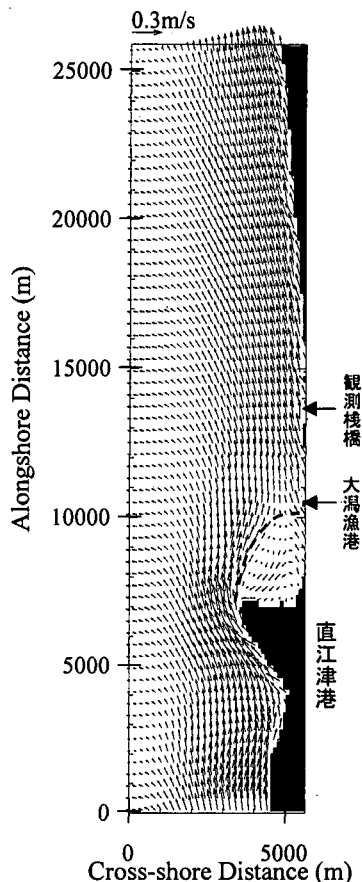


図-6 上越・大潟海岸における流れの平面分布 (2月13日 12時, 破線内側が直江津港の影響範囲)

3次元数値モデルを用いて、1999年に新潟県が行った現地観測結果の再現を行った。その結果、(1)波浪と風を考慮することにより、砕波帯内から沖合までを含めた広い範囲で発生している流れ(広域海浜流)を再現できること、(2)砕波帯内での強い沖向き流れ(undertow)の再現には波浪の影響が不可欠であること、(3)砕波帯沖合での沿岸流の発生には、海上風の影響が大きく寄与し、風を考慮しなければその再現はできないこと、が確認さ

れ、本数値モデルが現地を対象とした広域海浜流の再現計算において、十分に使用できる精度を有していることが示された。また、海上風のみを考慮した断面2次元領域(流速は3成分)における長期再現計算(1ヶ月間)および3次元領域での短期再現計算(5日間)では、波浪の影響を考慮しなくても、砕波帯以深での流速の時間変化や平面的な流速分布の特性をおおよそ再現することができ、沿岸域での流れの計算に風の影響が必要不可欠であることが示された。

最後に、本研究は科学研究費補助金(基盤研究B(2): 14380266, および若手研究B: 15760378)の補助を受けたことをここに付記し、深謝する。

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.
- 佐藤慎司 (1995): 日本海沿岸で観測された流れの特性, 土木学会論文集, No. 512/II-32, pp. 356-360.
- 田中茂信(1994): 気になる話, 海岸, Vol. 34, No. 1, pp. 20-27.
- 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.
- 新潟県港湾空港局港湾課 (1997): 直江津港湾計画調査(海岸保全調査)報告書, 新潟県.
- 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データの解析一, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 196-200.
- 馬場康之 (2001): 湾域の潮流場および外海に面した沿岸域の海水流動に関する研究, 京都大学学位論文, pp. 50-81.
- 安田孝志・加藤 茂・岩田 宏・佐藤慎司 (1996): 砕波帯沖合い流れの特性とその成因について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 366-370.
- 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.
- Yelland, M. J. and P. K. Taylor (1996): Wind stress measurements from the open ocean, Jour. Phys. Oceanogr., 26, pp. 541-558.