

非定常な風と波によって生じる吹送流・海浜流の予測モデル

Prediction Model of Coastal Currents due to Nonstationary Winds and Waves

作中淳一郎¹・間瀬 肇²・安田誠宏³・森 信人⁴・金 洙列⁵・馬場康之⁶

Junichirou SAKUNAKA, Hajime MASE, Tomohiro YASUDA, Nobuhito MORI
Soo Youl KIM and Yasuyuki BABA

A model of predicting coastal currents under non-stationary meteorological and wave conditions is developed. The current prediction model is composed of meteorological reanalysis data, a meso-scale weather prediction model and a coupling wave and surge model. The model is applied to the Joetsu Coast for predicting coastal currents and the predictions are compared with observations. The prediction model is also extended to statistically modeled time series of winds and waves. It has been found that coastal currents calculated by the prediction model depend strongly on ocean wind.

1. はじめに

沿岸海域で広範囲に形成される流れ（広域海浜流）は海上風への依存性が強く、特に強風・高波浪の荒天時には、砕波帯内のみではなく、その沖合においても流動場が形成されることが確認されている（馬場ら，2000）。この海浜流場は、広域における漂砂の主外力となるので、海浜変形の前測に重要となる。特に、冬季季節風が継続する日本海沿岸域では、気象変化を取り込み、波・流れの相互作用を考慮して非定常な風と波によって生じる海浜流を推算することが必須である。

本研究では、気象・海象条件の非定常な変化を考慮しつつ、波・流れの相互作用を考慮した海浜流を予測できる数値モデルを開発し、観測結果と比較・検討する。さらに、長期間の変化を計算するため、統計的に作成した波浪・風時系列を用いた海浜流前測の仮想再現実験を行い、平均的な海浜流場の観測結果との対応を調べる。

2. 海浜流推算システムの概要

吹送流を考慮した海浜流の計算には、主な外力としての海上風データが必要となる。本研究では気象再解析データをメソ気象モデル（WRF）によりダウンスケールし、得られた沿岸域スケールの海上風および気圧を入力条件として、潮位・高潮・波浪結合モデル（SuWAT）を用いて海浜流の推算を行う数値モデルを構築した。

再解析データとして用いた客観解析値は、アメリカ環境予報局（NCEP: National Centers for Environmental

Prediction）によって提供されているFNL（Final Analysis）である。これと並行して、気象庁と電力中央研究所によって共同で解析されたJRA-25（Japanese 25-year Reanalysis Project）も用い、外力の精度評価を行った。

沿岸域スケールの気象場は、WRF（Weather Research and Forecast model）を用いて客観解析値をダウンスケールし、風速および気圧を取り出した。そのデータはSuWATの第1領域（図-1）の計算条件として用いた。

高潮・波浪の相互作用計算は、Kimら（2008）によるSuWAT（Surge-Wave-Tide coupled model）モデルを用いた。SuWATモデルの計算フローを図-2に示す。高潮モデルには、radiation stressを含めた非線形長波近似モデルを用いている。波浪モデルには第3世代波浪推算モデルSWAN（Simulating Waves Nearshore）を用いている。

なお、ここで構築するモデルは、再解析データおよびWRFを使用して風データを入力条件とするだけでなく、任意の風場と波の沖条件を与えることにより海浜流計算を行えるようになっている。

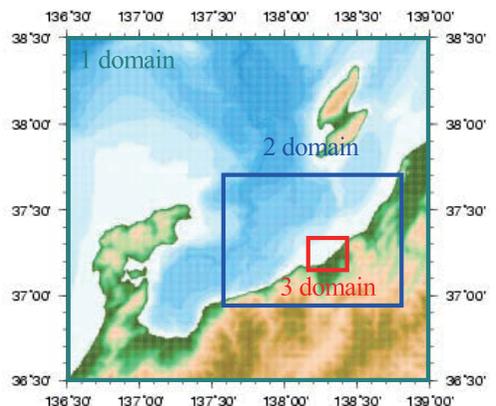


図-1 SuWATの計算領域

1 正会員 修 (工) (独法) 港湾空港技術研究所
2 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
3 正会員 博 (工) 京都大学助教 防災研究所
4 正会員 博 (工) 京都大学准教授 防災研究所
5 正会員 博 (工) 鳥取大学大学院助教 工学研究科
6 正会員 博 (工) 京都大学助教 防災研究所

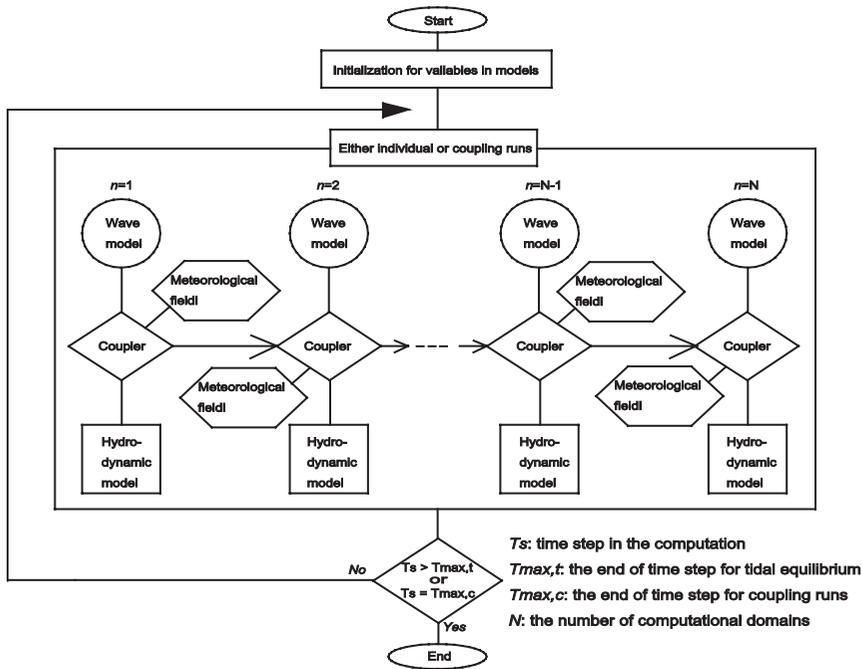


図-2 SuWATの計算フロー

3. 海浜流推算システムの検証

気象再解析データをWRFによりダウンスケールして地形の影響を考慮した高解像度の気象場を計算し、SuWATにより波浪と海浜流の追算を行い、海浜流の推定精度の検証を行った。風と波浪の精度の検証は、ナウファス観測網の一つである直江津港で観測された結果を用いた。海浜流の追算結果は、新潟県上越地域海岸で行われた観測結果(図-3;馬場ら, 2000)と比較した。ただし、図-3は海浜流場の概況を表しただけで、矢印の長さは流速を表すものではない。

図-3によれば、観測で得られた海浜流場の特徴は、沿岸方向の流れは北東方向に卓越していること、構造物背後の死水域には反流が生じていること、岸沖方向の流れについては、岸に近い領域(碎波帯内)では強い沖向きの流れが、水深15~30mの沖側の領域ではわずかではあるが岸向きの流れが生じていることである。

SuWATの計算領域には、図-1および表-1に示したように、3段階ネスティングを行う。計算タイムステップは、海浜流計算では1.0秒、波浪モデルでは300秒とした。高潮モデルで計算した水位および流速と、波浪モデルで計算したラディエーションストレスおよび波齢に依存した海面抵抗係数は、300秒ごとに相互にデータの受け渡しをする。

対象とする計算期間は1998年12月, 1999年2月, 2001年12月および2003年12月の合計4ケースである。前者2

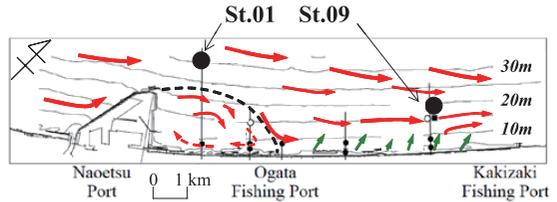


図-3 観測結果を基に得られた流動場の概況 (上越地域海岸, 1998年12月~1999年3月;馬場ら, 2000)

表-1 計算領域の諸元

| Domain | Range of Domain | Grid Size [m] | Num. Grids |
|--------|----------------------------------|--|-------------|
| 1 | 136.5E~139E 36.5N~39.0N | $\Delta x = 2500$ $\Delta y = 2500$ | 100 ×80 |
| 2 | 137.55E~138.83E 39.95N~37.77N | $\Delta x = 500$ $\Delta y = 500$ | 231 ×181 |
| 3 | 137.18E~138.45E 37.17N~37.33N | $\Delta x = 100$ $\Delta y = 100$ | 241 ×191 |

ケースは海浜流の観測データが存在している期間で、これらの期間については風・波浪・海浜流の検証を行う。1999年2月の風データは欠測している。後者2ケースは、2001年から2005年までの冬季に直江津港で大きな波高を観測した期間で、風・波浪の比較を行った。風の追算についてはNCEP/FNLを用いた方が精度は良かったが、1999年7月以前のデータは提供されていないので、それ以前についてはJRA-25を使用した。

風についての追算値と観測値の比較結果を図-4に示す

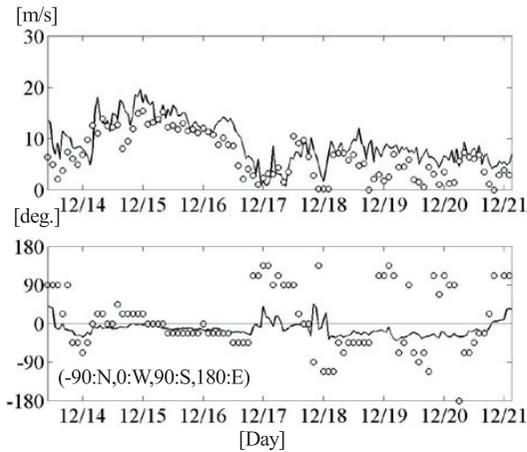


図-4 直江津港における風速（上図）および風向（下図）の追算値（実線）と観測値（○印）

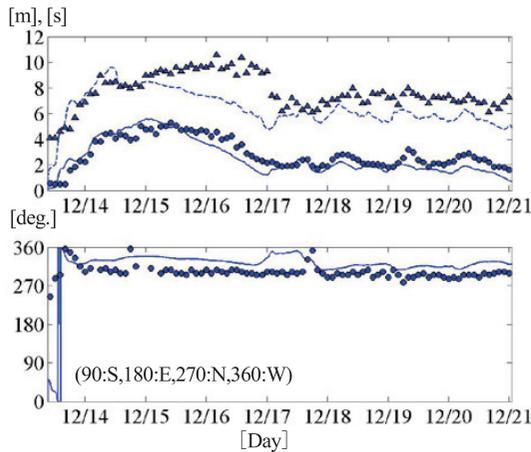


図-5 直江津港における有義波高と有義波周期（上図）、波向（下図）の追算結果（波高、波向：実線；周期：波線）と観測結果（波高、波向：●；周期：▲）

(2001年12月のケース)。風速については、追算値に多少の凹凸が見られるが、期間に渡って観測値との対応が良いことがわかる。風向については、風速が10m/s以下の小さい場合に観測結果との相違が見られるが、風速が10m/s以上と大きくなると、追算値と観測値の一致が良いことがわかる。

図-5に、2001年12月の波浪に関する追算値と観測値を比較した結果を示す。追算有義波高は12月15日0時のピーク後に観測値より少し小さくなるが、期間に渡って両者の一致が良いことを示している。追算有義波周期は、波高ピーク以後で過小評価になっていることが見られる。波向については、両者が良く一致している。

海上風が海浜流に与える影響を確認するために、まず海上風の影響を考慮せず、波浪のみによる海浜流計算を行った。1999年2月のケースの計算結果を図-6に、対象

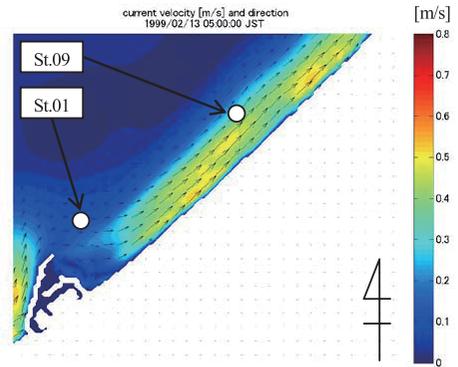


図-6 波浪による海浜流の追算結果：1999年2月13日5時（矢印：流向；濃淡：速さ）

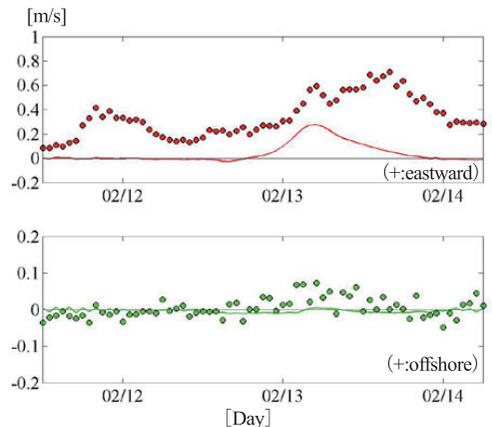


図-7 波浪のみを考慮した海浜流のSt.09における沿岸（上側）および岸沖方向流速（下側）の追算値（実線）と観測値（●）の比較

の期間のSt.09における追算結果と観測結果を比較したものを図-7に示す。図-6から沿岸方向に東向きの流れが再現されているが、図-7より沿岸方向流速の追算結果は観測結果に比べて小さくなっている。岸沖方向流速の追算結果と観測結果の差はほとんど出ていない。

海上風と波浪を考慮する海浜流の計算を行った結果を図-8に示す（1999年2月）。沿岸方向に東方向の流れが卓越していて、観測で得られた広域海浜流の概況（図-3）を良く再現している。図-9には、図-3に示した碎波帯沖側の測点（St.09）における沿岸および岸沖方向流速の追算値と観測値の比較を示す。沿岸方向流速については、ピークのずれが生じているが、絶対値に関して追算値と観測値はほぼ等しく、図-7の波だけによる海浜流時系列比較に比べて、再現性が向上していることが確認できる。ピークがずれる理由として、海流の影響などが考えられる。岸沖方向流速については、追算値の時間変化が小さいが、観測値との一致は良いと言える。これらのことより、碎波帯・沖合における沿岸方向の流れの発生

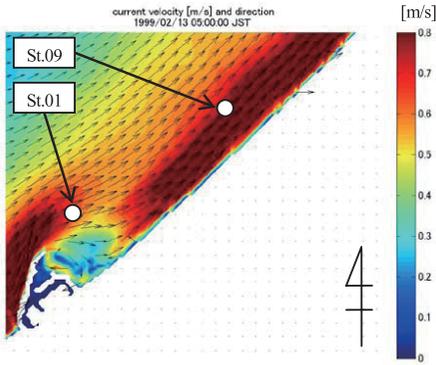


図-8 海浜流の追算結果：1999年2月13日5時（矢印：流向；濃淡：速さ）

4. 海浜流推算システムの応用

海浜変形などの長期間の変化を計算するためには、その外力となる海浜流も長期の予測計算をする必要がある。そこで、波浪・風の時系列を統計的に作成し、気象モデルを使用することなく、任意の風場と沖波条件を与えることにより海浜流の予測計算を行えるようにした。

入力条件とする波浪および風は、間瀬ら（2008）が上越地域海岸を対象として作成方法を示した波浪・風時系列モデルを用いた。すなわち、直江津港の2001年～2005年の波浪・風の観測結果から確率密度関数を推定し、その確率密度関数にしたがって冬季5年分の波浪・風時系列データを作成した。その時系列データの一部を取り出し、図-3のSt.01で観測された波浪・風の12月の平均値と合うように3ケース（表-2；Case1～3）取り出した。例として、Case 3の波高，風速および風向の時系列データを図-10に示す。

計算領域は海浜流の追算を行った計算領域（図-1）のうち、第3領域に該当する部分のみ用いる。西側と北側の境界に波浪データを入力し、風は平面的に一律に与える。このように入力条件を設定して、海浜流の推算を行い、その平均流場を1998年12月に観測した流動場の平均と比較・検討をする。

図-11に、計算された海浜流の平面分布を示す。平均値であるために、追算結果に比べて流速は小さくなっているが、海浜流の方向は観測結果や追算結果と同様のパターンを示している。

図-12にSt.01とSt.09における1998年12月の観測結果と計算結果の沿岸方向平均流速を示す。3ケースの沿岸方向流速の相違は小さい。また、観測結果に見られるような沿岸方向東向きの流れが卓越している状況は再現できているが、計算結果は観測結果の半分以下となっている。この過小評価の原因としては、風の間の風速を小さく与えたこと、1つの時化で風速を一定として与えてい

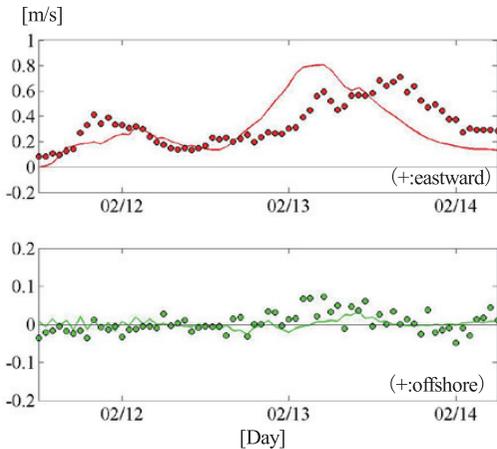


図-9 海浜流のSt.09における沿岸（上側）および岸沖方向流速（下側）の追算値（実線）と観測値（●）の比較

表-2 波浪・風の観測結果の平均値と統計の時系列によるケース別の平均値

| | 波高 [m] | 周期 [s] | 風速 [m/s] | 備考 |
|-------|--------|--------|----------|----------------|
| Case1 | 1.83 | 6.62 | 7.45 | 気圧は1013hPa一定 |
| Case2 | 1.85 | 6.72 | 7.25 | 気圧は1013hPa一定 |
| Case3 | 1.84 | 6.55 | 7.14 | 気圧は1013hPa一定 |
| 観測値 | 1.86 | 6.89 | 7.18 | 1998年12月のSt.01 |

には海上風の影響が大きく、風と波浪を考慮したモデルが必要であることがわかる。他の期間や計測点についても同様の検証を行い、砕波帯・沖合における海浜流推算システムの予測精度の妥当性を確認した。

砕波帯内での強い沖向き流れは本モデルを用いて再現できなかった。しかし、この沖向き流れは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だけに限られているので、このような海浜流を再現・予測する場合には、対象とする現象の空間・時間能に見合った計算条件によって別途計算・予測を行うのが合理的である。

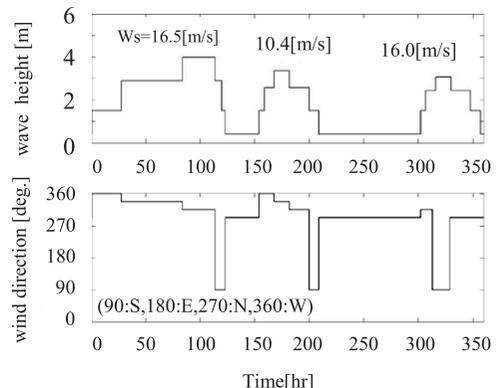


図-10 波高，風速および風向の時系列（Case3）

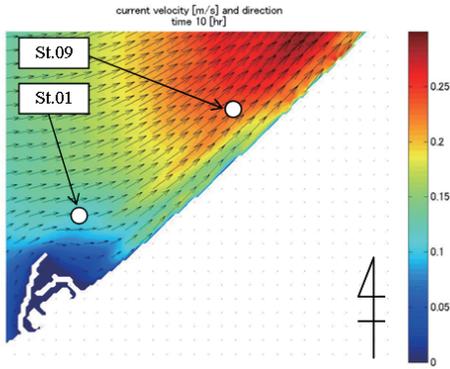


図-11 海浜流の計算結果：Case3 (矢印：流向；濃淡：速さ)

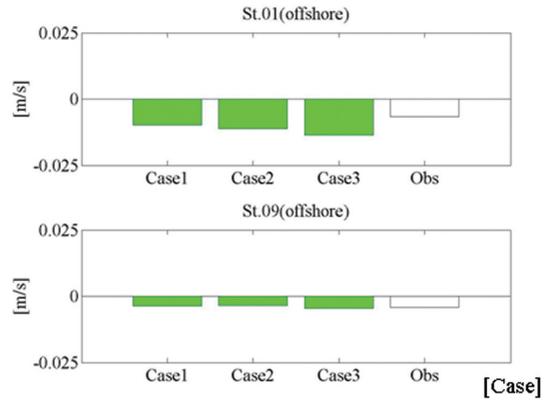


図-13 St.01,09における岸沖方向平均流速の比較 (□：観測値；■：計算値) (沖向き方向が正)

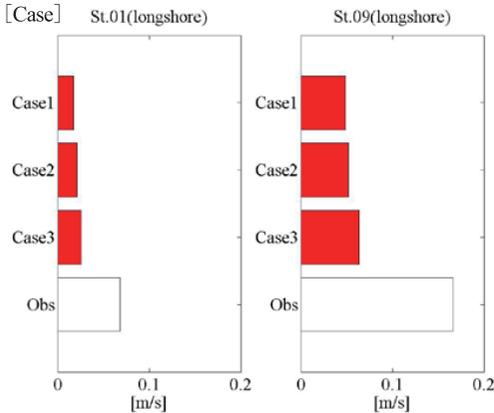


図-12 St.01,09における沿岸方向平均流速の比較 (□：観測値；■：計算値) (北東方向が正)

ることにより、風に起因する海浜流の発達が十分でなかったことが考えられる。

図-13には、St.01とSt.09における1998年12月の岸沖方向平均流速に関する計算結果と観測結果を示す。St.01では過大評価になっていて、St.09では追算値と観測値の差はほとんど出していない。

以上より、統計的に作成した波浪・風の時系列を入力条件として海浜流の計算を行うことで、海浜流場の観測結果の傾向を捉えることができた。

5. 結論

気象・海象条件の非定常な変化を考慮しつつ、波・流れの相互作用を考慮した海浜流を予測できる数値モデルを開発し、さらに、統計的に作成した波浪・風の時系列

を用いた海浜流予測の仮想実験を行い、それぞれ観測結果と比較した。本研究で得られた主要な結果を以下にまとめる。

- 1) 気象再解析データをダウンスケールし、風に関する推算値と観測値を比較した結果、両者はほぼ一致した。
- 2) 数値モデルにより、波浪場を再現することができた。
- 3) 波浪のみによる海浜流と波浪と風による海浜流追算結果の比較より、砕波帯・沖合における沿岸方向の流れの発生には海上風の影響が大きいことがわかった。
- 4) 波浪・風の統計的仮想時系列を入力として計算した海浜流場は、観測結果の傾向を捉えることができた。

参考文献

馬場康之・今本博健・山下隆男・加藤 茂・内山 清 (2000)：冬季日本海の広域海浜流特性について-1999年上越・大潟海岸での合同観測結果より-，京都大学防災研究所年報，第43号B-2，pp.433-442。

馬場康之・加藤 茂・木原直人・山下隆男 (2002)：広域海浜流の観測と定式化，京大防災研究所年報，第45号B-2，pp.459-465。

間瀬 肇，安田誠宏，勝井伸悟 (2008)：海浜変形評価に供する長期間の波浪・風時系列のモデル化-上越海岸を対象として-，海岸工学論文集，第55巻，pp.426-430。

Kim, S. Y., Yasuda, T. and Mase, H. (2008): Numerical Analysis of Effects of Tidal Variations on Storm Surges and Waves, *Applied Ocean Research*, Vol.30, pp.311-322.