

1991年のサイクロンによるベンガル湾の高潮場の再解析 —波浪・高潮結合モデルによる白波砕波の影響評価—

金 庚玉*・山下隆男**

大気・海洋間のエネルギー輸送のモデル化には, (i) wave-induced stress のような風波により発生する比較的大規模な大気乱流による形状抵抗, (ii) breaker stress 等の定義による白波砕波減衰を通しての波浪から吹送流への運動量変換モデル, および (iii) 波齢の高い fast wave に対する波浪増幅・減衰機構の定式化に関する研究が必要となる. これらの研究成果を, 極浅海域での波浪・高潮相互作用場に適用するため, 波浪推算モデル (WW3), メソ気象モデル (MM5), 海洋モデル (POM) の連結数値モデルを構築した. これを用いて1991年のサイクロンによるベンガル湾の高潮場の再解析を行い, 波浪・高潮結合系における白波砕波の影響を評価した.

1. 緒 言

1991年4月29日バングラデシュに, 死者13万人を超す甚大な高潮災害を発生させたサイクロンから14年が経過した. 当時, 山下ら (1992) は移動境界を考慮した時間分割型 (非線形移流, 拡散, 伝播) の鉛直2次元の高潮数値モデルに, 客観解析したサイクロンデータと光田・藤井の台風モデルを適用してベンガル湾の高潮を解析した. 計算された高潮は現地調査の結果をほぼ説明できる値であったが, 海面せん断応力を評価する抵抗係数は大きめの一定値0.003が与えられていた. この場合, 波浪の影響はこの海面抵抗係数に全て押し込められた形になっているが, バングラデシュのような浅海域が広く続く海域では波浪変形が高潮に及ぼす影響は無視できないと考えられる. その後, 波浪と高潮の相互作用を入れた3次元モデルが, メソ気象モデルと並列して用いられるようになってきた (Kim・Yamashita, 2004). 本研究は, この大気・波浪・高潮結合モデルを1991年のサイクロンによる高潮, 波浪場の再解析に適用し, 白波砕波せん断応力がどの様にバングラデシュの高潮に影響を及ぼしているのかを検討したものである.

大気・海洋間の運動量, 熱, 物質の交換には, 風波が重要な役割をする. 風波の発生・発達・減衰機構のモデル化には, (i) wave-induced stress のような風波により発生する比較的大規模な大気乱流による形状抵抗と wavelets による空力学的粗度特性を波齢および大気の安定度との関数で系統的に表現できる理論の構築と, (ii) breaker stress 等の定義による白波砕波減衰を通しての波浪から吹送流への運動量変換モデル, および (iii) 波齢の高い fast wave に対する波浪増幅・減衰機構の定式化に関する研究が必要となる. これらの研究成果

を, 極浅海域での波浪・高潮相互作用場に適用するため, 波浪推算モデル (Wave Watch III (WW3)), メソ気象モデル (MM5), 海洋モデル (POM) の連結数値モデルを用いて, 1991年のサイクロンによるベンガル湾の高潮場の再解析を行い, 波浪・高潮結合系における白波砕波の影響を評価した.

2. 波浪・高潮結合モデル

以下に概要を示す MM5, WW3, POM の結合モデルである (金・山下, 2004). WW3 と POM は海面せん断応力と海面での粗度要素によって結合されており, 流れの場に作用する全海面せん断応力 τ_{total} , 流れの場に直接作用する風のせん断応力 τ_{total} , 海面上での気流の乱れによるせん断応力 τ_i , 波浪が存在することによって発生する気流のせん断応力 τ_{wave} (Janssen, 1991), 白波砕波によって波浪から流れへ移行する運動量流束を表すせん断応力 τ_{break} (山下ら, 2000) の相互関係が取り込まれている.

1) メソ気象モデル MM5 は, 米国の National Center for Atmospheric Research (NCAR) で開発されたオープンドメインのメソスケール気象モデルで, 非静力学方程式系に基づいた, 鉛直座標系には, 等圧面座標 (p -6系) を用いている (Grell ら, 1991).

2) 外洋波浪モデル: 本研究では, 米国環境予測センター NOAA の Wave Watch III (WW3) を用いる (Tolman, 2002). これは, 波浪のエネルギー平衡方程式を基礎式としているモデルで, 水深, 平均流の変化に伴う波浪の屈折, 変形特性を考慮している. ソース項はそれぞれ, 風からのエネルギー供給項, 非線形エネルギー輸送項, 白波砕波によるエネルギー消散項および海底摩擦項で構成されている. これらのソース項は全て波浪の方向スペクトル密度に依存し, 移流項とのバランスで方向スペクトル密度が決定される. ソース項に非線形干渉等の非線形性を考慮した第Ⅲ世代の波浪モデルである. ま

* 正会員 工博 日本原子力研究所 研究員

** 正会員 工博 京都大学防災研究所 助教授

た、基礎方程式は完全非線形相互作用の計算も可能である。風からのエネルギー供給項は Tolman・Chalikov (1999) の数値計算公式が用いられており、実波浪の発達への適用性が高いことが示されている。

3) 海洋モデル：プリンストン大学の Princeton Ocean Model (POM) は、静水圧分布、Boussinesq 近似を仮定した σ 座標系の準 3 次元数値モデルであり、オープンソースコードであることから近年世界中で多くの分野の研究に使用されて、コード面での信頼性、適用性と問題点が明確にされている。乱流場には Mellor・Yamada (1982) の 2.5 次モーメント乱流クロージャモデルが使用されている。

3. ベンガル湾への適用

(1) 計算方法

気象場、波浪場、海流(高潮場)の計算には、Domain-1 (9km メッシュ、中心点 19° N, 91° E) と Domain-2 (3km メッシュ) の 2 段階のネステイングを行った。図-1 に計算領域と陸上地形を、図-2 には Domain-2 の水深データと水位出力点を示す。POM と WW3 は白波碎波せん断応力により連結し、碎波による海流への運動形態の変化が考慮されている。波浪には海流による伝播・変形効果が考慮され

ている。また、大気境界層での運動量、水蒸気、潜熱フラックスを介して POM と MM5 は相互作用している。外洋潮汐は NAO99 (Matsumoto ら, 2000) により計算した。

(2) サイクロンのシミュレーション

まず ECMWF の 40 年再解析データセット (ERA-40) をバックグラウンドデータとして、Domain-1 において MM5 により気象場を再計算し 1 時間毎のデータセットを作り、これを初期、境界条件としてしようした。両計算領域とも水平格子 130 × 130 点、鉛直 23 分割 (地上から 100 hPa まで) で、時間ステップは 20 s および 6.67 s である。JTWC (the Joint Typhoon Warning Center) の 6 時間毎の Best track data (図-3) を時間内挿して、1 時間毎にサイクロンボーガス (Davis・Low-Nam, 2001) を行った。

雲微細物理は、霰を含む水蒸気、雲水、雨水、雲氷、雪の 5 相の混合比と氷粒の数密度方程式を解く、Reisner graupel explicit moisture scheme を用いた (Reisnerl, 1998)。大気境界層スキームは高解像度の Blackadar scheme を使い、運動量、水蒸気、潜熱の混合フラックスを計算した。計算期間は 0000 UTC 28 April - 1200 UTC 31 April 1991 で、海面気圧、風速ベクトルの 1 例を図-4 に示す。

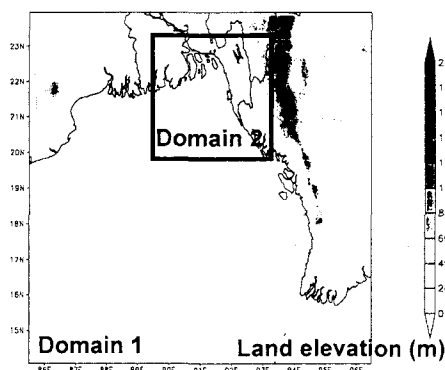


図-1 計算領域と陸上地形

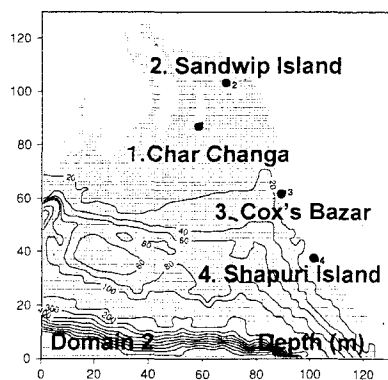


図-2 Domain 2 の水深データと水位出力点

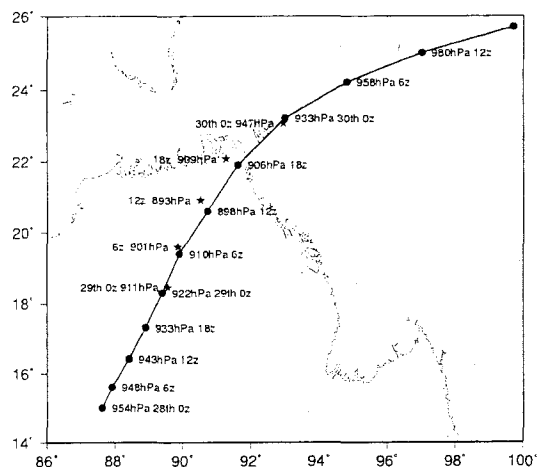


図-3 JTWC の 6 時間毎の Best track data

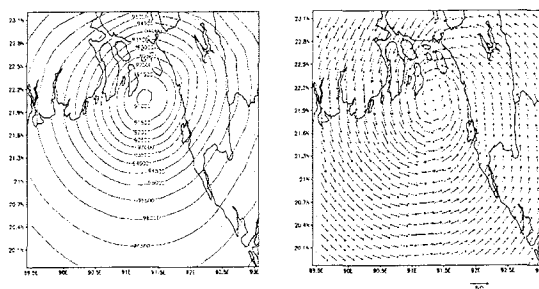


図-4 海面気圧、風速ベクトルの 1 例

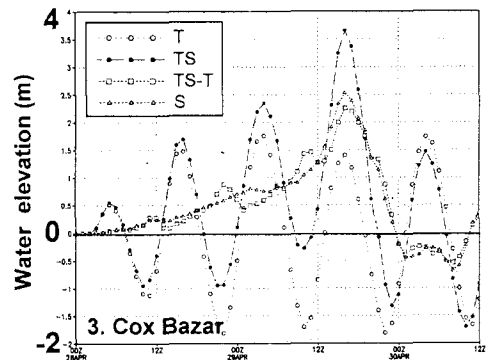
(3) 潮位と高潮の再現

表-1 に計算内容と簡略記号を示す。計算内容は、高潮成分のみの計算 (S)、天文潮のみの計算 (T)、高潮と潮汐の同時計算 (TS) および、TS に白波砕波応力として波浪の影響を考慮した場合の計算 (TSW) である。TSW-1は波浪の伝播・変形計算に流れの影響を考慮しない場合、TSW-2は影響浪の計算は、流れの影響を考慮した場合を示す。

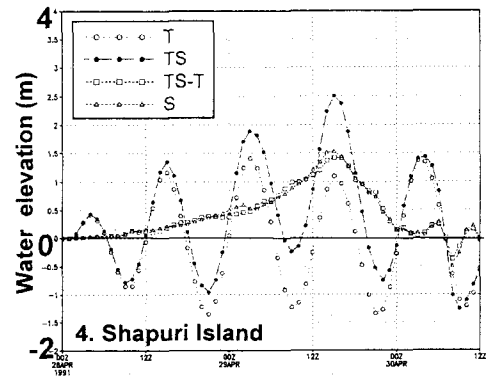
表-1 計算内容と簡略記号

abbreviation	Simulation contents
T	Tide
S	Surge
TS	Tide + surge
TSW-1	Tide + surge + wave(no current effect)
TSW-2	Tide + surge + wave(current interaction)

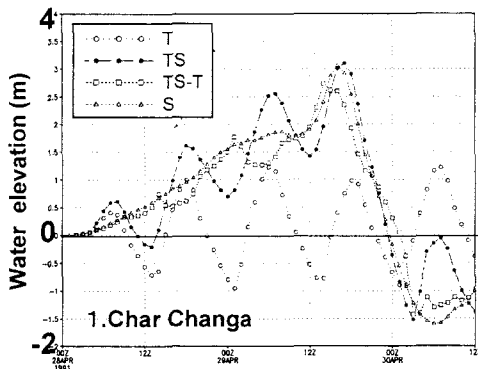
図-5 には、4 水位出力点での天文潮 (T)、高潮 (S)、潮汐・高潮 (TS) および TS と T から求めた高潮偏差 (TS-T) のシミュレーション結果を時系列で示す。これらの計算には波浪の効果 (波浪エネルギーが砕波により流れに変わる影響) は考慮されていない。実際には 5 m を越える水位上昇が現地調査で指摘されている Cox Bazar において、計算結果は 4 m 弱の最大水位上昇しか



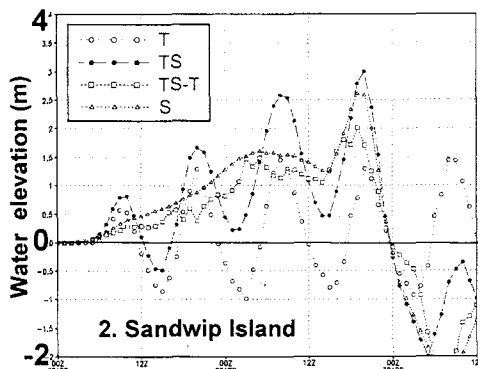
(c) Cox Bazar



(d) Shapuri Island



(a) Char Changa



(b) Sandwip Island

図-5 天文潮 (T)、高潮 (S)、潮汐・高潮 (TS) および高潮偏差 (TS-T) のシミュレーション結果

再現されておらず、MM5と POM だけの結合モデルでは、ベンガル湾、湾奥での水位変化は再現できないことがわかる。

高潮偏差も、CharChangaで2.8 m、Cox Bazarで2.3 m、Sandwipt 島で2 m、Shapuri 島で1.5 m とかなり過小に評価されている。

MM5と POM に WW3で計算される波浪減衰特性、すなわち流れから見ると流れエネルギーへの移行の影響、を考慮するとどのようになるかを示したものが、図-6 である。図中、TS-T は潮汐と高潮計算だけからえら得る高潮偏差、TSW1-T、TSW2-T は波浪の影響も入れた場合の高潮計算から得られる偏差を示す。

(4) 波浪と高潮の再現

TS-T は波浪の影響を考慮しない場合の計算偏差を示すので、TSW1-T、TSW2-T と比較すると、この差は波浪を介して流れに変化したエネルギーにより発生した高潮偏差分に相当する。これらの図から明らかにように、広い浅海域の湾奥での水位には、波浪の影響が大きく、CharChanga では最大で1.7 m、Sandwipt 島で1.25 m となっているが、浅海域の幅の狭い Cox Bazar や Sha-

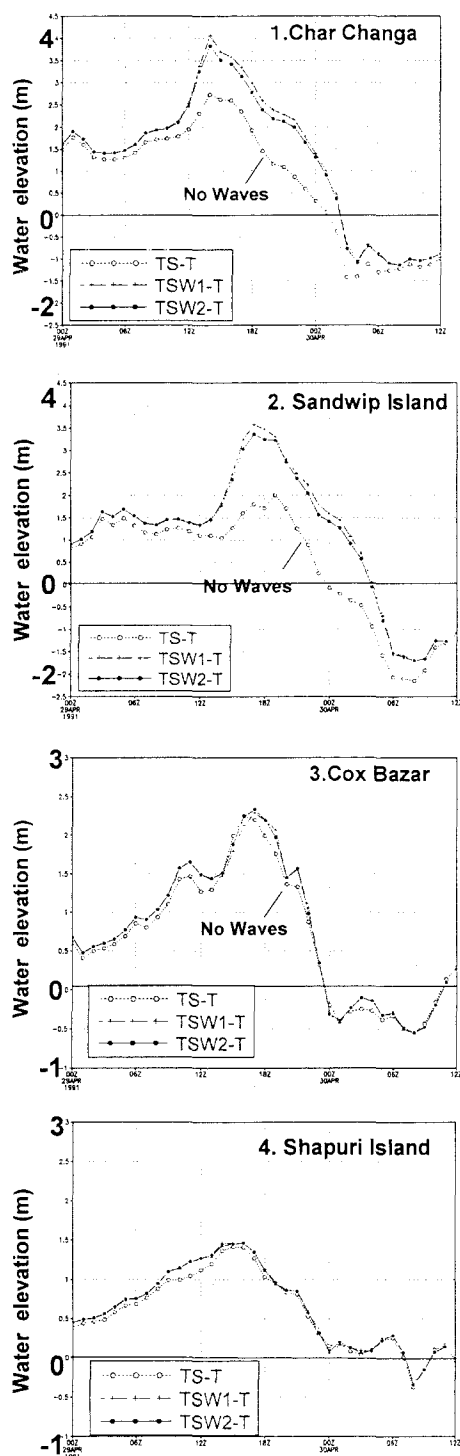


図-6 高潮偏差の時系列

puri 島では波浪の効果はほぼゼロである。

一方、波浪の再現結果を見ると、図-7 に29日18時 (UTC) の有義波高分布を示すように、浅海域中央部で

急激な波高減衰が再現されている。しかしながら前面水深の深い Cox Bazar では碎波減衰は小さく12 m の波高が計算されている。図-8 に TSW1 の波高分布と平均周期の平面分布を示したが、TSW2 との顕著な差異は見られない。いずれにしてもこの波高減衰が大きく影響を及ぼす湾奥での高潮には波浪の効果を考慮することが極めて重要であることがわかる。

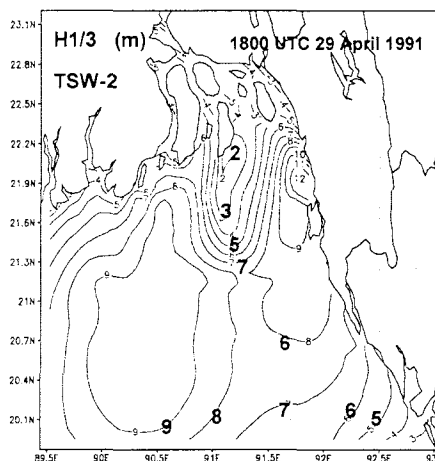


図-7 TSW 2 の場合の有義波高の分布

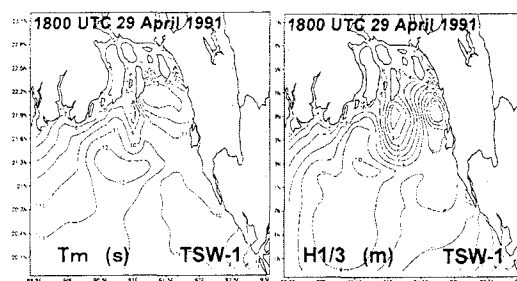


図-8 TSW 1 の場合の平均周期、有義波高の分布

高潮に及ぼす潮汐の影響と波浪の影響が空間的にどのように分布しているのかを見るため、図-9 に高潮潮成分 (S) のみの最大偏差、潮汐・高潮同時計算 (TS-T) の最大偏差、および波浪の影響を入れた場合 (TSW2-T) の最大偏差の空間分布を示した。

S と TS-T との比較から、ベンガル湾の湾奥のような浅海域が広範囲に分布している海域では、海底摩擦の影響が大きく、高潮成分だけで計算された高潮偏差は、潮汐と同時計算された高潮場からの偏差に比べて、若干大きめに再現されていることがわかる。

一方 TS-T と TSW2-T との比較から、明らかに、湾奥部での水位上昇には波浪の影響が大きく影響しており、波浪成分を考慮しない場合には高潮偏差が1 m 以上小さく再現されることが示された。

4. 結 語

大気・波浪・高潮結合モデルを1991年のサイクロンによる高潮、波浪場の再解析に適用し、白波砕波せん断応力がベンガル湾の高潮に及ぼす影響を検討した。得られ

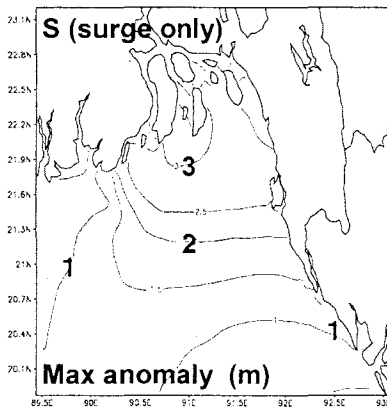
た主な結果は以下のである。

(1) ECMWF REA-40をバックグラウンドデータとして1991年のベンガル湾におけるサイクロン発生時のメソスケール気象場を再現した。(2) サイクロン発生時のメソ気象場によりベンガル湾の波浪、高潮を再現した。(3) ベンガル湾の湾奥のような浅海域が広範囲に分布している海域では、海底摩擦の影響が大きく、高潮成分だけで計算された高潮偏差は、潮汐と同時計算された高潮場からの偏差に比べて、若干大きめに再現されていることがわかる。(4) ベンガル湾の湾奥部での水位上昇には波浪の影響が大きく影響しており、波浪成分を考慮しない場合には高潮偏差が1 m以上小さく再現されることが示された。

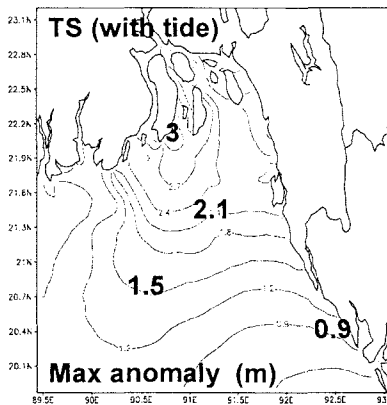
なお、本研究は科学研究費補助金（基盤研究(B) (2)、研究代表者 山下隆男、課題番号：14350266）、研究の一部として行われた。

参 考 文 献

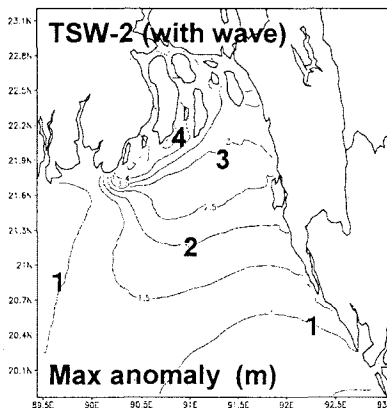
- 金 庚玉・山下隆男(2004)：大気・波浪・海洋結合モデルによる台風9918号の高潮・高波の追算，海岸工学論文集，第51巻，pp. 236-240。
- 山下隆男・土屋義人・藤井 健(1992)：1991年のサイクロンによるバングラデシュの高潮の数値計算，海岸工学論文集，第39巻，pp. 236-240。
- 山下隆男・路 明・榊原 弘(2000)：砕波による海面せん断応力を導入した吹送流の数値モデル，海岸工学論文集，第47巻，pp. 121-125。
- Davis, C.A., and S. Low-Nam(2001)：The NCAR-AFWA tropical cyclone bogussing scheme, A report prepared for the Air Force Weather Agency, AFWA.
- Grell, G.A., J. Dudhia, and D.R. Stauffer(1991)：A description of the fifth-generation Penn State-NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR Tech. Note NCAR/TN-398+STR, NCAR.
- Janssen, P.A.E.M. (1991). Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting, J. Phys. Oceanogr., 21, pp. 1631-1642.
- Kim, K.O. and T. Yamashita (2004)：Wind-wave-surge parallel computation model and its application to storm surge simulation in shallow water, Proc. 24th International Conference on Coastal Engineering, Lisbon, pp. 1578-1590.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe(2000)：Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model Around Japan, Journal of Oceanography, 56, pp. 567-581.
- Reisner, J., R.M. Rasmussen., and R.T. Bruinjes (1998)：Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 124, pp. 1071-1107.
- Tolman, H.L.(2002)：User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22, MMAB.
- Tolman, H.L., and D.V. Chalikov (1996)：Source terms in a third-generation wind-wave model, J. Phys. Oceanogr., 26, pp. 2497-2518.



(a) 高潮成分(S)のみ



(b) 潮汐・高潮同時計算(TS-T)の最大偏差



(c) 波浪の影響を入れた場合 (TSW-2) の最大偏差

図-9 高潮偏差の最大値の空間分布