

極浅海域における高潮の数値解析

Storm Surge Simulation in Extremely Shallow Water

金 庚玉¹・山下隆男²・桜庭雅明³

KyeongOk KIM, Takao YAMASHITA and Masaaki SAKURABA

In the modeling of air-sea energy transfer mechanism, it is the key to evaluate the wave energy dissipation transfer rate to mean current generation. We introduced the effective breaking dissipation stress factor, β , which indicates the contribution rate of dissipation stress caused by wave breaking to the total sea surface stress to generate the ocean mean currents. Numerical tests using the air-sea coupling model were conducted in this study to determine the factor ($\alpha = 0.3$) and the direct generation factor of mean current, $\beta(U_{10})$. Then the model was applied to storm surge simulation in the Bay of Bengal to confirm the model efficiency in the extremely shallow water.

1. 緒言

大気から海洋へのエネルギー伝達過程には、中間に波浪運動が介入する。大気乱流による海面せん断応力の大部分は、まず波浪を発生、発達させるために費やされる。これによって生じられた波動は進行方向にエネルギーを伝達するが、平均流成分としてはStokes drift程度の弱い流れしか発生させない。しかしながら、波浪が十分発達し、白波砕波により波浪エネルギーを散逸し始めると、この散逸分は乱流と平均流生成に使われる。ここに至って初めて、大気のエネルギーが流れへと伝達される。

極浅海域での大気、波浪、流れの相互関係を考えると、強風時には白波砕波および海底地形の影響を受けた砕波を介して波浪エネルギーが流れへと伝達される機構を考慮する必要がある。このような現象はベンガル湾の湾奥のような極浅海域での高潮で典型的に見られ、ここでの高潮を再現するためには、このような機構を考慮しなければならない。

本研究では、大気・波浪・高潮結合モデルを用いた極浅海域における高潮の数値解析手法について検討する。すなわち、流れを発生させるために働く海面せん断応力のうち、砕波エネルギーの散逸によって発生する成分を、砕波せん断応力で現し、その効率（寄与率）を検討する。ついで、大気乱流特性から定式化された海面せん断応力を用いて、これが直接平均流の生成に寄与する割合を推定し、これら両者の合計として、平均流生成のための海面応力を定式化する。

さらに、この平均流生成海面応力を、大気・波浪・高潮結合モデルに適用することによって、1991年のサイク

ロンによるベンガル湾の高潮の再現計算を行い、手法の適用性を検討する。

2. 平均流を生成する海面応力の定式化

通常の高潮数値解析では、風の応力と大気圧勾配とが外力となり、吹き寄せ、吸い上げ効果として高潮を発生させる機構を考えている。この方法では上述したような波浪を介したエネルギー伝達機構は考慮されていないので、極浅海域の高潮を再現する場合には、海面での抵抗係数を強くするような人為的操作が必要となる。しかしながら、波浪モデルを併用する計算を行う場合には、砕波を介して発生する吹送流のダイナミックスを考慮した高潮・高波解析が可能となる。

海洋の平均流を発生させるために働く海面せん断応力を、平均流生成海面応力と定義し、その全応力せん断応力を τ_{total} とする。平均流生成海面応力は、大気乱流によって定式化されるせん断応力 τ_a 、および砕波（白波砕波および水深に規定される砕波）によって発生する砕波せん断応力 τ_b とに分離して考える。それぞれの全応力せん断への寄与率を α と β とし、次式のように表現する。

$$\tau_{total} = \alpha \cdot \tau_{br} + \beta \cdot \tau_a \quad (1)$$

ここで、大気乱流によって定式化されるせん断応力 τ_a および砕波せん断応力 τ_b は、以下のように定義する。

$$\tau_a = \rho_a u_*^2 = \rho_a C_D |U_{10}| U_{10} \quad (2)$$

$$C_D = (0.63 + 0.066 |U_{10}|) \times 10^{-3} \quad (3)$$

1 正 会 員 工博 韓国成均館大学 ポスドク研究員
2 正 会 員 工博 広島大学教授 大学院国際協力研究科
3 正 会 員 工博 日本工営株式会社 中央研究所

$$\tau_{br} = \rho g \iint \frac{S_{ds}(f, \theta)}{C(f)} df d\theta \quad (4)$$

ここに、 U_{10} : 10m高度での風速、 ρ_a : 大気密度、 ρ : 海水密度、 $C(f)$: 波浪の周波数、 $S_{ds}(f, \theta)$: SWANにおけるエネルギー散逸率（白波砕波および水深に規定される砕波の和）である。式(3)で表示される海面抵抗係数は、Smith and Banke (1975) によるものである。この係数の中には、大気乱流と海洋波浪との乱流特性に対する相互作用は考慮されているが、波浪から海洋の平均流に移行するエネルギー過程に関する情報は入っていない。このため、波浪の発生、発達過程をモデル化するための海面せん断応力としては適用できるが、海洋の平均流を再現するための情報としては不十分である。このため、ここでは平均流生成海面応力 τ_{total} を、式(1)により、砕波せん断能力を考慮した形で表現しているが、その寄与率については、これまで観測値潮位と計算潮位との適合性から経験的に決め、 $\alpha = 0.1$ 、 $\beta = 1$ として使用してきた（金・山下、2005）。ここでは、水深を変化させた一様水深の場合の数値実験を行い、波浪モデルSWANの砕波減衰項から計算される砕波せん断能力 τ_{br} の強度と水深、風速との関係を検討する。

図-1は寄与率を考慮しない場合の砕波せん断応力とSmith and Bankeの定式化から計算される海面せん断応力（ランダムサンプリング）との関係も示す。図中+印は水深9m以浅、・は9m以上90mまで、○は90m以深のデータである。実線はSmith and Bankeによるせん断応力である。この図より、低風速では式(4)で定式化される砕波せん断応力の寄与率は急速に小さくなり、高風速では砕波せん断応力は従来の海面せん断応力の3倍近くになっており、水深が浅くなるほどこの傾向が顕著になる（砕波する）ことが示されている。すなわち、低風速では大気乱流せん断応力の寄与率は100%に近く、高風速で浅水深の場合には砕波せん断応力寄与率が増加する。そこで、砕波せん断応力の寄与率を $\alpha = 0.3$ に固定し、大気乱流せん断応力の寄与率 β を次式のように表わすこととした。

$$\beta(U_{10}) = \begin{cases} 0.1 & \text{for } U_{10} \leq U_1 \\ 1 - 0.9 \frac{U_{10} - U_1}{U_2 - U_1} & \text{for } U_1 \leq U_{10} \leq U_2 \\ 1.0 & \text{for } U_2 \leq U_{10} \end{cases} \quad (5)$$

ここに、寄与率の変化する風速の範囲を表わす U_1 、 U_2 はそれぞれ10m/s、35m/sを想定している。

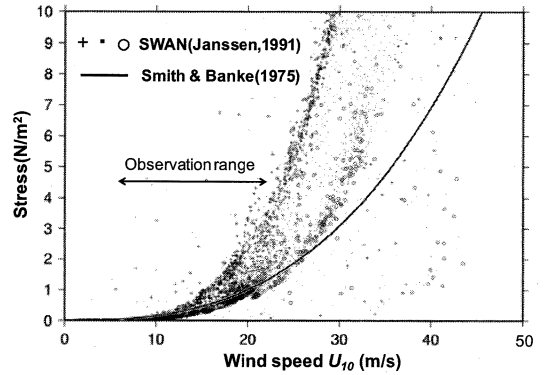


図-1 砕波せん断応力(式(4))とバルク則(Smith and Banke)から得られる海面せん断応力の風速依存特性

図-2には寄与率 $\alpha = 0.3$ 、式(5)の $\beta(U_{10})$ を用いた場合の平均流生成海面応力 τ_{total} および3種類のバルク則から得られる大気乱流場のせん断応力と風速の関係を示す。図中、破線で、Smith and Bankeの定式化から計算される海面せん断応力、点線でSmith (1980)、実線でOey et al. (2006) の定式化の結果を示す。この図より、ここで提案した平均流生成海面応力の計算結果は、深海域ではOey et al.の結果を下限とし、浅海域ではSmith and Bankeの大気乱流特性から推定される海面せん断応力よりかなり大きな値となっていることがわかった。これにより、深海域では波浪の影響が小さく、浅海域になるにつれて砕波せん断応力の影響が強く評価される、吹送流（風による平均流）を発生させる海面せん断応力を、波浪の効果を考慮して定式化することが可能となる。

一方、図-2と同様の数値実験の結果を抵抗係数と10m高度の風速との関係で表示したものが図-3である。実際の観測結果との比較と同様に、計算結果にもおおきなばらつきが見られる。計算結果のデータはランダムサンプリングによるもので、ある瞬間の砕波の状況（とインプット項とのバランス関係）に強く依存していることがわかった。

図-4には、10m/s以上の高風速成分の場合の砕波せん断応力 τ_{br} の寄与率を次式で仮定した場合の実験結果の風速依存性を示す。

$$\alpha^* = \frac{(1 - \beta)\tau_a}{\tau_{br}} \quad (6)$$

これより、このモデルで評価される砕波せん断応力の寄与率の平均値は0.287で、水深が10m以深の場合には0.308となっていることがわかる。

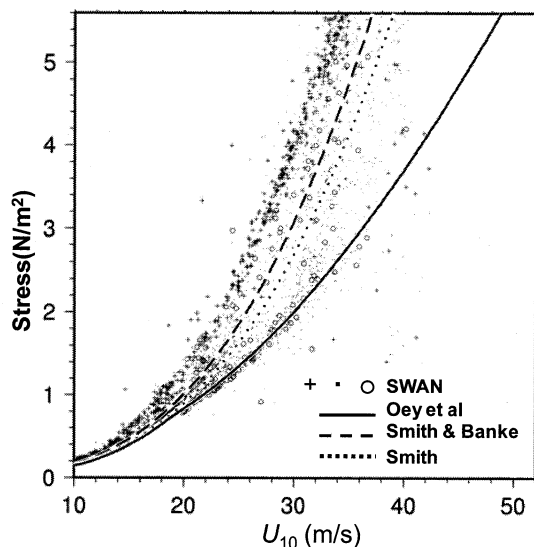


図-2 計算された平均流生成海面応力(SWAN)と3種類のバルク則から得られる大気乱流場の海面せん断応力と海上風速との関係

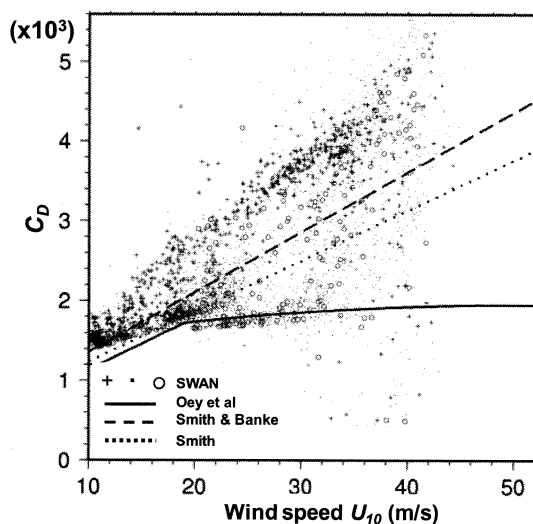


図-3 抵抗係数の風速依存性
(数値実験の結果と3種類のバルク則との比較)

3. ベンガル湾の高潮の再現計算への適用

ここでは、上述の平均流生成海面応力 τ_{total} の定式化を用い、大気、波浪、海洋結合モデルによるベンガルの高潮の再現計算を行う。波浪推算モデルとしては、水深に規定される砕波減衰も考慮しているSWANを用いる。気象場はメソ気象モデルMM5、海洋の平均流場の解析に

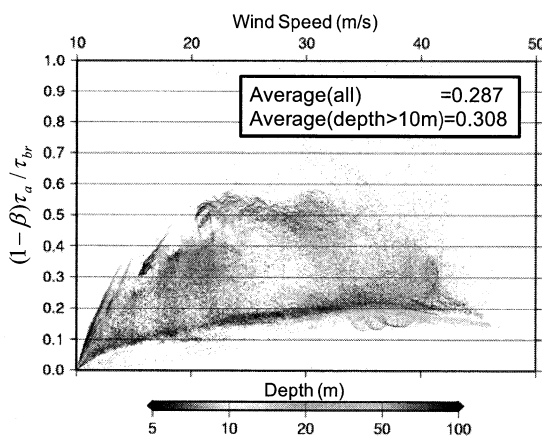


図-4 砕波せん断応力の寄与率と風速との関係

は海洋モデルPOMを用いる。

1991年のサイクロンによる高潮を対象とし、気象場、波浪場、海流(高潮場)の計算には、Domain1(9kmメッシュ、中心点19°N, 91°E)とDomain2(3kmメッシュ)の2段階のネスティングを行った。図-5に計算領域と海底地形と陸上地形を、図-6にはDomain2のサイクロン経路と計算水位の出力点を示す。POMとSWANは、前述したような方法で、平均流生成海面応力が砕波せん断応力と大気乱流応力との寄与率により表示されており、極浅海域において砕波による平均流生成過程が考慮されている。波浪の伝播・変形計算には海流による効果も考慮している。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により計算する。

波浪計算として、Wave Watch III(WW3)を用いた場合の計算も行ってSWANの結果と比較した。図-7に、1991年の4月29日18:00のSWANとWW3の有義波高の計算結果を示す。WW3を極浅海域に適用する場合には、水深に規定される砕波減衰が考慮されていないため、浅海域で異常な波高が計算され、ベンガル湾のような場の波浪計算には適用できないことがわかる。

図-7のSWANの計算結果から得られる砕波減衰項から計算された砕波せん断能力の平面分布を図-8に示す。極浅海域が始まるKhal以北での波高減衰の大きい領域に強い砕波せん断応力が作用していることがわかる。これは、白波砕波と水深に規定された砕波による波浪のエネルギー減衰が流れに変換される機構を表わすものである。このような極浅海域における平均流生成海面応力のモデル化にはSWANが適していると言える。

図-9に、計算された最大潮位の沿岸方向の分布とその

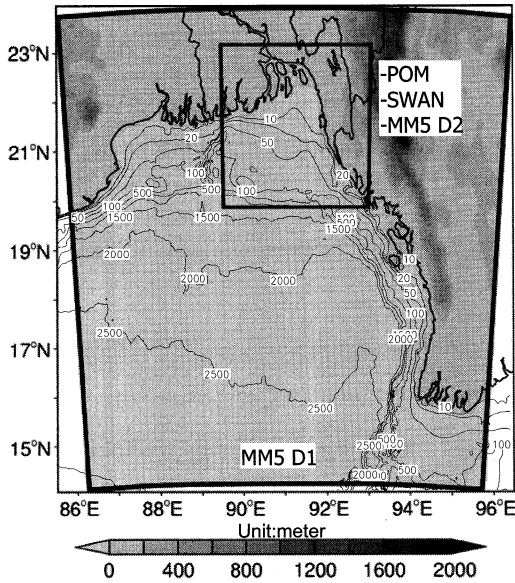


図-5 計算領域と海底地形，陸上地形

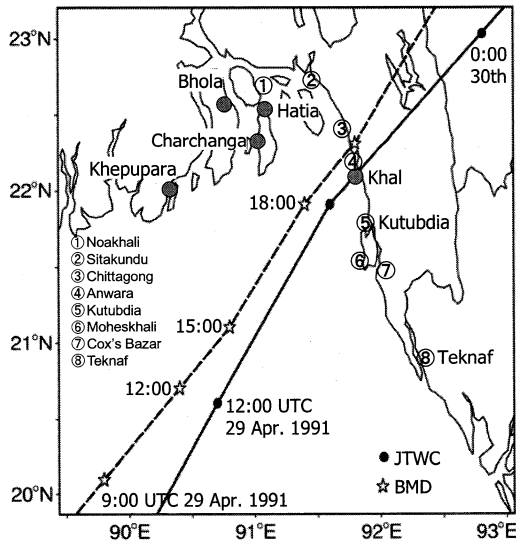


図-6 DOMAIN2における計算出力点とサイクロン経路

出力範囲およびサイクロンの経路を示す。図中，太い実線（Maximum Tide）は計算された最大天文潮位，黒丸はサイクロン発生後に計測された最大浸水高さから求めた最大水位，破線（Additional）は（ $\alpha=0.1$, $\beta=1$ ）とした2005年の計算方法（金・山下，2005），一点鎖線（This Approach）は本研究で示した寄与率（ $\alpha=0.3$, $\beta=U_{10}$ ）による計算結果である。なお，点線（Wind Only）で波浪の影響を考慮しない場合（ $\alpha=0$, $\beta=1$ ）の計算

結果も示した。これらの計算結果から，本研究で示した寄与率を用いた計算は，2005年の計算方法に比べ大きな差異はないが，深海域で低く，浅海域でより高い傾向の結果が得られ，観測値により近い傾向が再現できるようになったことがわかる。また，波浪の影響を考慮しなければ，ベンガル湾の高潮は再現できないことが確認できる。

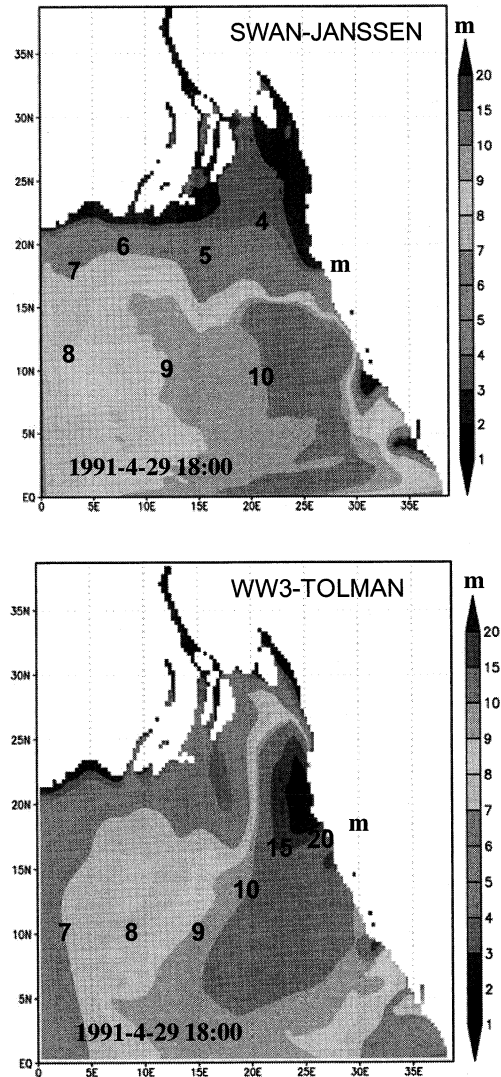


図-7 波浪の再現結果。SWANによる波高分布(上图)，WW3による波高分布(下图)

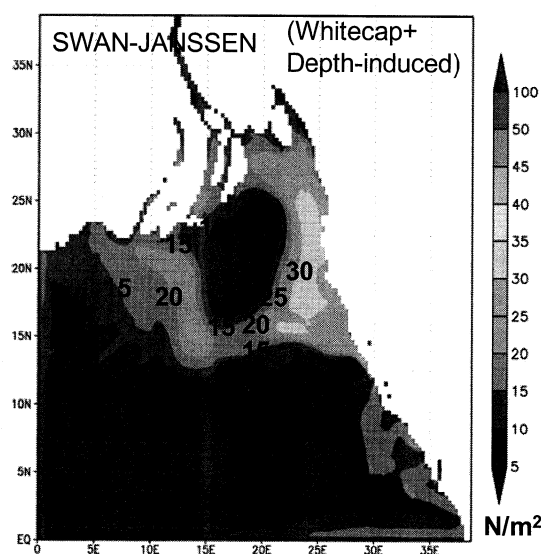


図-8 SWANの碎波減衰項から計算された碎波せん断応力の平面分布

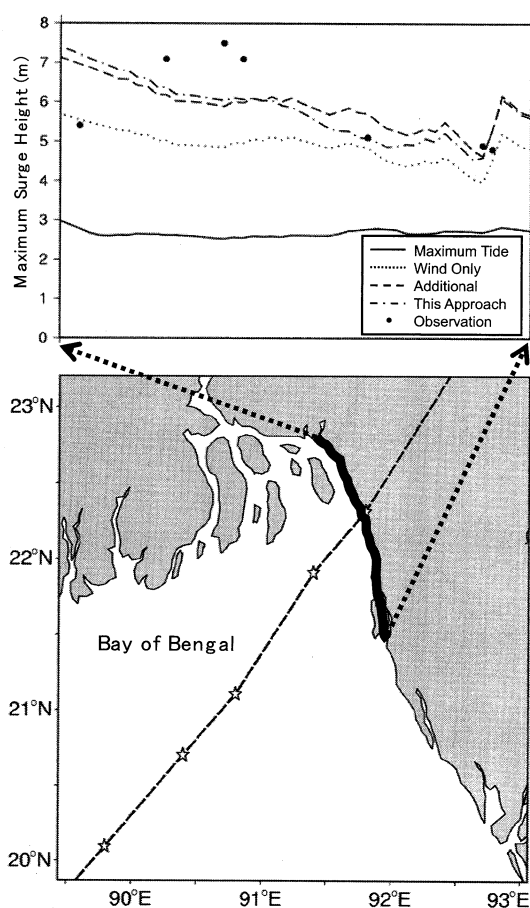


図-9 計算された最大潮位の沿岸方向の分布とその出力範囲およびサイクロンの経路

4. 結 語

本研究で得られた結果の要約は以下のようである。

(1) 碎波せん断応力の寄与率を $\alpha=0.3$ に固定して、大気乱流せん断応力 τ_a の寄与率 β を風速の関数で記述した平均流生成海面応力を提案した。(2) 大気・波浪・海洋結合モデルに平均流生成海面応力を適用した数値実験で、せん断応力の風速依存特性を明確にした。(3) 以上の計算方法をベンガル湾に適用し、極浅海域の高潮の数値解析の方法論を示した。

なお、本研究は、科学研究費基盤研究 (B) (No.183101128) の研究成果の一部として行った。

参 考 文 献

- 金庚玉・山下隆男 (2005):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碎波の影響評価—, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.211-215.
- Oey L.-Y., T. Ezer, D.-P. Wang, S.-J. Fan and X.-Q. Yin (2006) Loop Current warming by Hurricane Wilma, Geophys. Res. Lett., 33, L08613, doi:10.1029/2006GL025873.
- Smith, S.D. and E.G. Banke (1975) Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. Quart. Journal of Royal Meteorological Society, 101, pp.665-673.
- Smith, S.D. (1980) Wind stress and heat flux over the ocean in gale force winds, J. Phys. Oceanogr., 10, pp.709-726.