

2008年のサイクロンNargisの気象，海象外力の数値解析

Numerical Analysis of Atmospheric and Oceanic External Forces of 2008 Cyclone Nargis

マハメド ハガグ¹・山下隆男²・桜庭雅明³

Mohammed HAGGAG, Takao YAMASHITA and Masaaki SAKURABA

This article describes the application of the coupled process-based cyclone surge simulation model to the simulation of cyclone Nargis. The storm surge simulation has been conducted by a dynamically coupled atmosphere-ocean-land model. It has been made clear the following major results. (1) Gulf of Martaban has the very dangerous geographical feature characteristic for high storm surge. (2) The computed maximum storm surge anomaly was 7m in the inner bay with 1.5 m increased tide caused by wave breaking stress. (3) A possibility of the compound disaster with a heavy rain flood, high tide and high wave was pointed out.

1. 緒言

サイクロンNargisは2008年5月2日にミャンマー，マルタバン湾沿岸に壊滅的な高潮災害をもたらした．経済的損失は約100億米ドル，死者・行方不明者は138,000人を超えるとの報告がある．このサイクロンの特徴として上陸時に強度が衰えず，Saffir-Simpsonのハリケーンスケールでカテゴリ3～4と等価で，最大風速約58m/sの強風を持続していた．さらに，Nargisは総降水量約600mmの多量の淡水を外洋に供給するとともに，人口密度の高いイラワジ川デルタ海域に4m以上の高潮を発生させた．

Nargisは，国際共同観測システムIndOOS（Indian Ocean Observing System）が実行されている中で発生した最悪の自然災害であったが，その原因は早期警報が的確に行われなかった事に大きく依存しているようである（Webster, 2008）．

1991年4月末のバングラデシュのサイクロンのように，ベンガル湾では，ラニーニャからエルニーニョ移行期のプレモンスーンの4，5月にサイクロンが東部沿岸を直撃し災害を及ぼす傾向がある．最近の強いラニーニャは1975年，1991年，2008年に終息期を迎え，ベンガル湾東部海岸では，この時期にサイクロン災害が発生している．今後30年間はラニーニャが強まる卓越期に当たるため（山下ら，2008），ミャンマーやベンガル湾東部海岸ではサイクロン災害に対する警戒が必要である．

本研究はサイクロンNargisのベンガル湾およびマルタバン湾およびその沿岸域における気象，海象外力（海上風，地上気圧，高潮，波浪，降水量）の時空間変動特性を再現し，今回のサイクロンが災害外力としてどのような特性を持っていたのかを明確にする．

2. インド洋におけるサイクロンNargisの観測

IndOOSは，2004年12月26日のインド洋津波による大災害を契機として，サイクロンの発生機構を明確にするための大気・海洋過程の観測研究のために構築された国際共同観測システムである．

地球観測衛星は，SST（海面水温），地上風，海面高度観測とArgo global float arrayやRAMA（Research Moored Array for African-Asian-Australian Monsoon Analysis and Prediction, McPhaden et al., 2009（a））等の大気，海洋観測データ網を形成している．さらに，船舶を利用して計測されたXBT, XCTDによる電気伝導度・温度・水深は，ほぼ1°の間隔で1年当たり12～18回のサンプリングが実施されている．沿岸検潮器や津波観測ブイ等によるリアルタイム観測システムもIndOOSに埋め込まれている（McPhaden et al., 2009（b））．

この，IndOOS観測により得られたNargisの大気，海洋観測結果を以下に要約する．

1. SSTは28～30℃と比較的高く，熱力学的には不安定な大気状態で，海面の風のせん断応力は標準より30%弱く，サイクロン発生に対して好条件がそろっていた．
2. Nargisと同様の強度のサイクロンは1982年5月および2006年4月にミャンマーを直撃したが，これらの上陸地点は人口密度の高い地域のはるか北方であった．
3. Nargisが15° N, 90° EにあるRAMAの観測点に接近した4月後半には海面気圧は急速に低下し，風速は強まり，相対湿度は増加し気温は低下した．5月1日には，Nargisの乱流による海洋からのヒートロス3時間当たり600W/m²以上と劇的に増加した．このヒートロスはサイクロンを発達させるのに使われ，海面水温を下げた．
4. サイクロンにエネルギーを供給した高いSSTは多量の海洋降雨で形成された淡水によって維持された．この淡水が海面近傍の塩分成層を強め，サーモクライン下層

1 工博 広島大学研究員大学院国際協力研究科
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

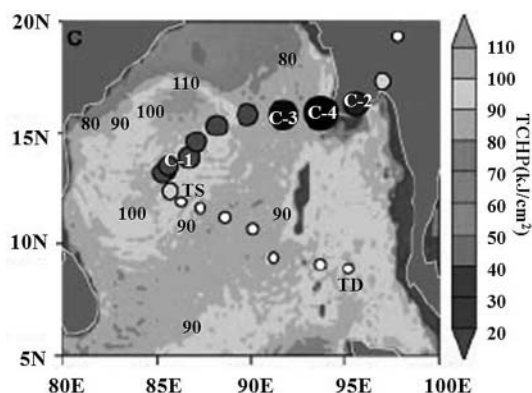


図-1 2008年4月の熱帯低気圧熱ポテンシャル (TCHP: kJ/cm^2) の分布特性と Nargis のハリケーンスケール

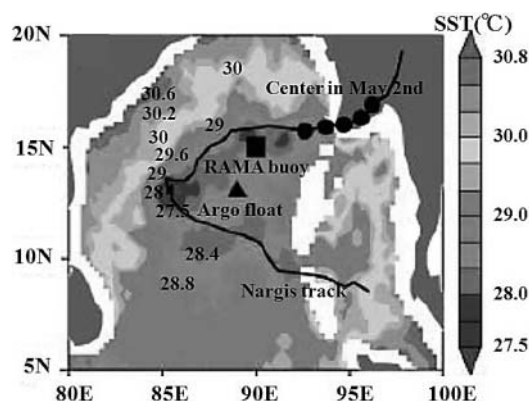


図-2 TRMMによる2008年5月2日のSSTと、同日の6時間毎のサイクロン中心位置

の冷水と表面水とを分離するバリヤー層を作った。さらに、風波や吹送流による海面の垂直混合が弱かったため、海面の混合層は低い熱容量状態を維持し、太陽からの放射熱が高いSSTを保持しやすい状況が形成されていた。

図-1に4月の熱帯低気圧熱ポテンシャル (TCHP: kJ/cm^2) の分布特性を示す。2008年4月の変動値は小さく $\pm 10 \text{ kJ}/\text{cm}^2$ であった。TCHPは26°C等温線以上に蓄積された熱量を表わす (Goni and Trinanes, 2003)。丸印はストーム強度を示し、TDは熱帯低気圧、TSは熱帯暴風雨を、数字はSaffir-Simpsonのハリケーンスケールを示す。図-2にはTRMMのTMI/AMSRE (TRMM Microwave Imager/ Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS) により2008年5月2日のSSTと、同日の6時間毎のサイクロン中心位置をドットで示す。図中、正方形RAMAのブイ位置、三角形はArgo floatの位置を示す。

3. 解析方法

解析期間は4月29日00 UTCから5月4日00 UTCまで

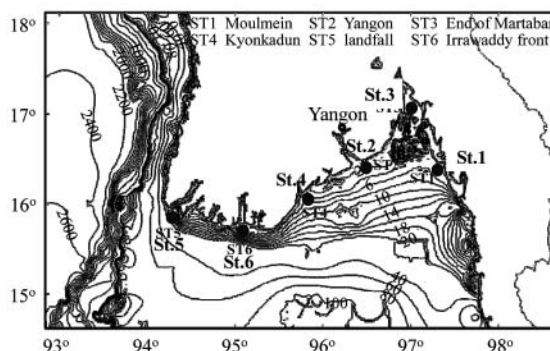
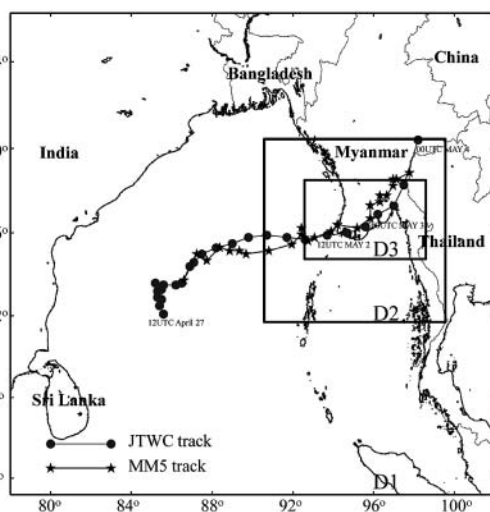


図-3 計算領域 D1-D3およびサイクロン経路 (上図), 計算領域D3の水深および潮位出力点 (下図)

で、気象モデルの初期、境界条件はNCAR (米国大気研究センター) の6時間毎の全球再解析結果 ($1^\circ \times 1^\circ$, 21気圧レベル) を用い、領域D1において6時間毎のFDDA (4次元同化) を行った。図-3にサイクロン経路、計算領域を示す。D1からD3では2方向のネスティングを行った。気象モデル (MM5)、波浪モデル (外洋: WW3, 近海: SWAN)、海洋モデル (POM) は図-4に示すような結合並

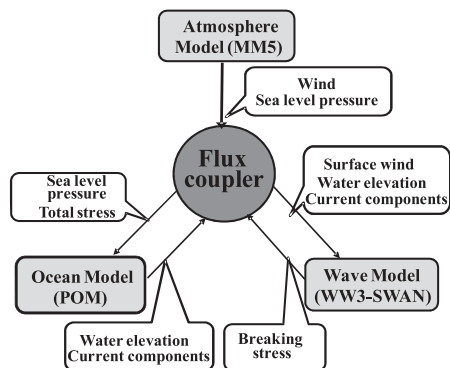


図-4 大気・波浪・海洋結合計算スキーム

列計算を実施した。大気・海洋間の運動量流束の受け渡しには、応力勾配項の空間解像度の問題を入れないため、白波碎波減衰効果をせん断応力として、エネルギー的に考慮した (Haggag, 2009)。

4. 解析結果

Nargisによる高潮偏差、波高分布、全降雨量分布の解析結果を以下に示す。

(1) 高潮

図-5に、唯一潮位観測結果のあるSt.1 (Moulmein)における観測潮位 (OBS)、推算潮位 (Tide)、吹き寄せ、吸い上げのみを考慮した潮位・高潮の計算結果 (Tide+Wind)、碎波せん断応力を考慮した場合の潮位・高潮の計算結果 (Tide+Wind+TBR)を示す。なお、出力点St.1~6の位置は、図-3に示されている。観測潮位と計算結果には1m近い基準面の相違が見られるが、振幅は計算によってほぼ再現されている。

図-6に、出力点St.1~6での天文潮位および高潮偏差の計算結果の時系列を示す。太い実線は碎波せん断応力を考慮した場合で、細線はしない場合の結果である。この図より、最大偏差はマルタバン湾奥で発生しており、極端に強いサイクロンではないが、St.3では5.5mに達している。ここでの白波碎波の影響は最大偏差で1m程度である。

図-7に白波碎波の影響を考慮した場合としなかった場合の高潮偏差の最大値の空間分布を示す。図-3に水深を示すように、マルタバン湾の湾奥では干潟が広く発達しており、ここにおける潮汐や高潮計算には、干潟の干出、水没を考慮した移動境界条件を入れた計算が必要である。しかしながら、今回の潮汐・高潮計算にはこの効果は入っていない。この点を考慮すると、マルタバン湾湾奥での計算結果は過大評価になっていると思われるが、計算された高潮最大偏差は湾奥では7mを超え、白波碎波による高潮増幅率は約1.5mの計算結果になっている。

(2) 高波

波浪モデルの特性を考慮して、外洋ではWW3 (領域D1, D2)、近海域 (D3) ではSWANを用いた。近海域 (D3)

における最大波高の空間分布を図-8に示す。最大有義波高は外洋で高く、広大な浅海域の湾奥では、碎波減衰に

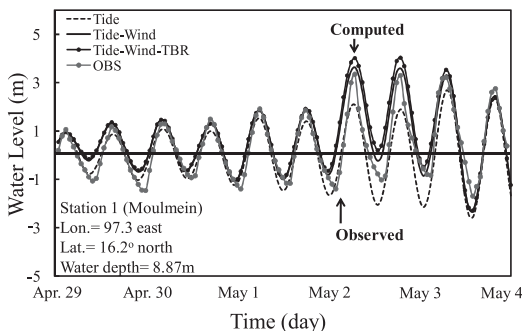


図-5 潮位出力点St.1での観測潮位と計算潮位

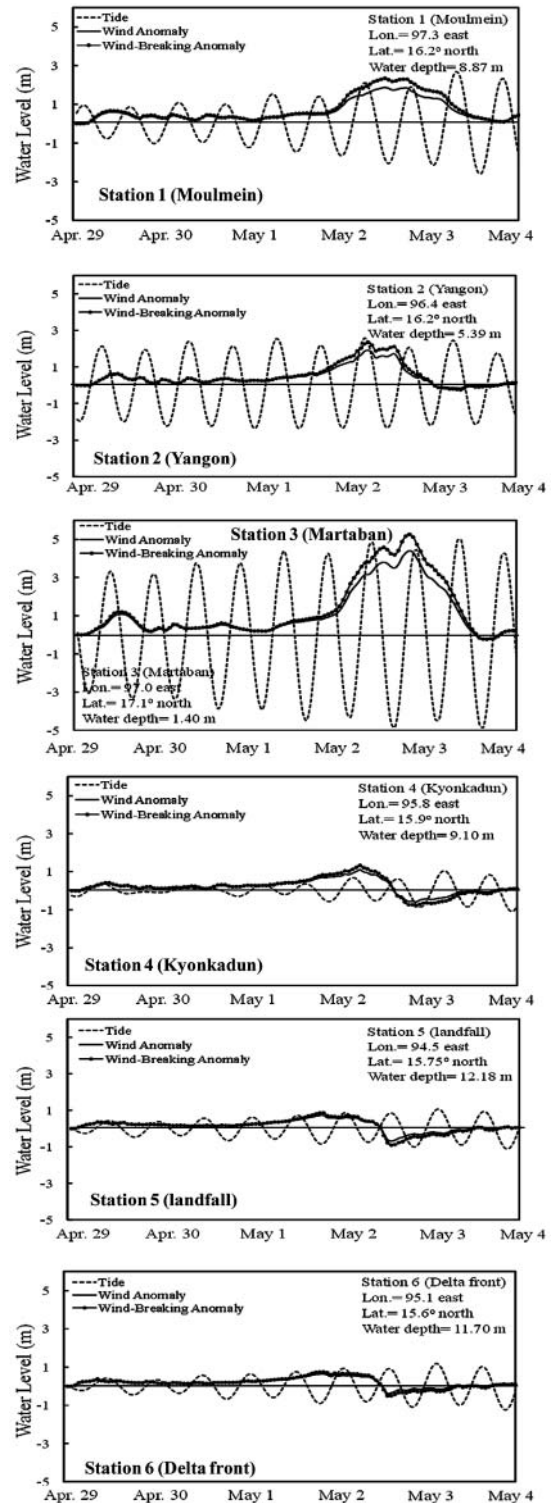
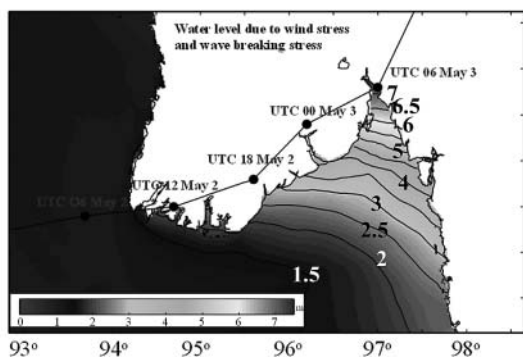
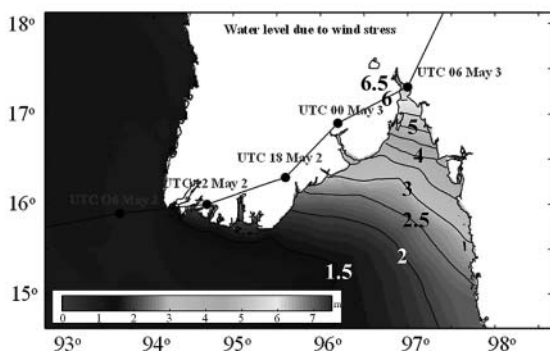


図-6 出力点St.1~6での計算高潮偏差



(a) 白波碎波の影響を考慮した場合



(b) 白波碎波の影響しない場合

図-7 高潮偏差の最大値分布

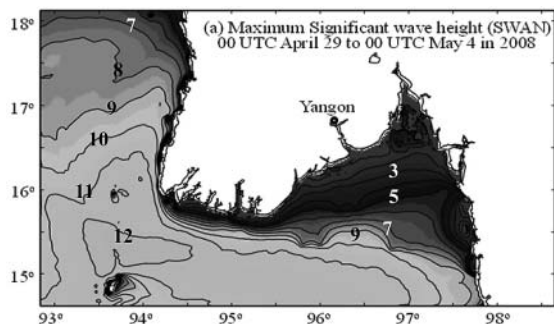


図-8 有義波高の最大値分布

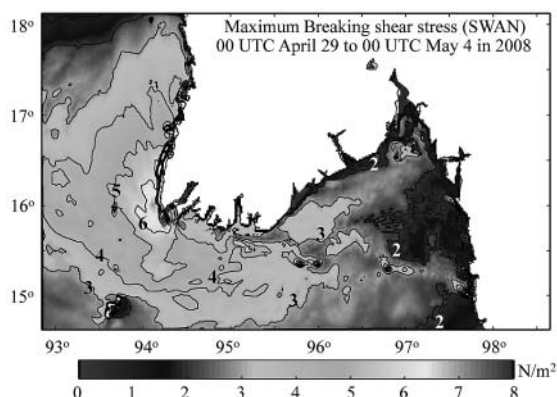


図-9 白波碎波せん断応力の分布

より、極端に小さくなっている。最大有義波高はSt.6で約5m, St.3で約3m, St.1では1m以下である。図-9にはSWANの白波碎波減衰項から計算される白波碎波せん断応力の分布を示す。イラワジ川河口部から東側の外洋域において急激な波高減衰が見られ、高潮生成機構におけるwave set-upの効果が大きかったことが推測される。また西側の外洋域では10m以上の高波浪が来襲しており、この海域においては高波浪による災害が発生していたのではないかと推測できる。

(3) 降水量

図-10にMM5による全降水量の計算結果とTRMM観測結果との比較を示す。TRMMでは図-1に示す4月の熱帯低気圧熱可能性 (TCHP) の気候値の高い、15°N, 85°Eでの降雨量が多いが、計算結果では、イラワジ川河口部が豪雨域となっており、降水量の計算精度には改善の余地があると思われる。しかしながら、経験的にMM5の全降水量の再現性は良いことから、Nargisの特徴として、降水量が多かったことが挙げられる。IndOOSの観測結果からも明らかのように、降雨による淡水の外洋への供給とサイクロンの発達機構に関する数値実験の必要性が指摘される。

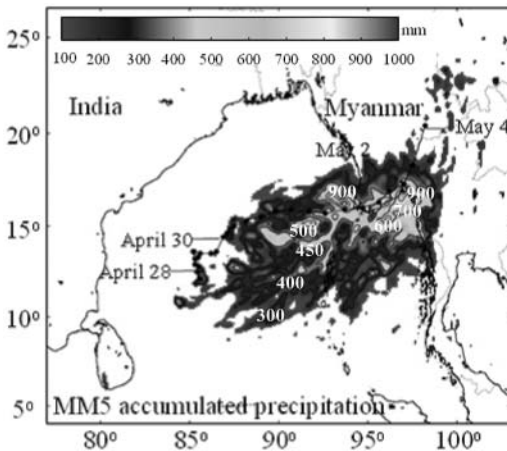
経験的に、TRMMの推定降水量の結果は多くの場合過

小評価となっており、実降雨量の1/2~2/3である。本計算結果でもTRMMは400~450mm, 計算結果は700~800mmとなっている。計算結果は降雨域が若干北側に寄っており、イラワジ川デルタに直接豪雨が降っている結果になっているが、観測結果は海域に豪雨が降っている。降雨域の分布はTRMMの観測結果の信頼性が高いことを考慮すると、計算で推定される陸域における豪雨は、実際には降っていなかったものと推測できる。しかしながら、雨域が北にシフトし、イラワジ川河口部に豪雨域があったとすれば、豪雨は直接内水位、河口水位を上昇させ、豪雨による浸水 (洪水) と高潮・高波の複合災害が発生する可能性が指摘できる。

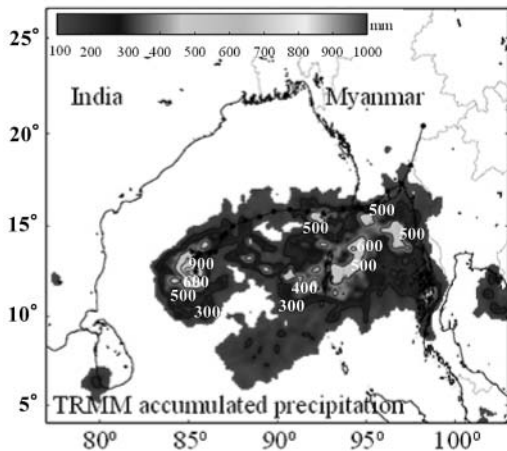
このような豪雨浸水は、上流域からの雨水流出とは異なり高潮と浸水 (洪水) の時間の遅れが無く、極めて危険な高潮・洪水の複合災害を発生させる。実際にはNargis通常のサイクロン経路より南側 (16-17°N) の特異なケースであり、雨域の北へのシフトは可能性の高い仮定であると言える。

5. 結語

本研究により得られたNargisの気象 (降雨量)、海象 (高潮、高波) 外力の特性は以下のようなものである。



(a) MM5による推定結果



(b) TRMM観測結果

図-10 全降水量 (4月29日00 UTC～5月4日00 UTC)

- (1) マルタバン湾は極浅海域が広範囲に広がり、湾奥に向けて幅の狭くなる地形特性を持っており、高潮に対して極めて危険な海域である。
- (2) 過大評価である可能性はあるが、最大高潮偏差はマルタバン湾湾奥で7m以上になる計算結果となった。こ

の内、白波碎波せん断応力による高潮の増加分は約1.5mと推定された。

- (3) 最大有義波高はイラワジデルタ前面で約5m、マルタバン湾湾奥で約3m、湾東海岸では1m以下で、西側のインド洋に面する外洋域では10m以上の高波浪の来襲が計算された。
- (4) 観測および今回のシミュレーションから、Nargisは総降雨量が600mm以上に達する広範囲な雨域を形成し、降雨による大量の淡水をインド洋の表層に供給したことが示された。
- (5) 計算での降雨域は必ずしも正確に再現されているわけではないが、TRMMの観測結果との比較から、Nargisによる豪雨域が北にシフトしていれば、イラワジデルタ内陸部での降雨による浸水(洪水)と高潮・高波の複合災害が発生する可能性があることが指摘できる。

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

- 山下隆男・駒口友章・三島豊秋(2008), 気候変動のゆらぎを考慮した海岸保全の適応策への一考察, 土木学会海岸工学論文集, 第55巻, 1341-1345.
- Goni, G. J., and J. A. Trinanes (2003), Ocean thermal structure monitoring could aid in the intensity forecast of tropical cyclones, *Eos Trans. AGU*, 84 (51), 573, 577-578.
- Haggag, M.: 2009, Regional Environment Simulator Atmosphere Ocean Land Surface Hydrology Coupled Model, Ph.D. dissertation, Hiroshima University.
- McPhaden, M. J., G. Meyers, K. Ando, Y. Masumoto, V. S. N. Murty, M. Ravichandran, F. Syamsudin, J. Vialard, L. Yu, and W. Yu (2009a), RAMA: The Research Moored Array for African- Asian- Australian Monsoon Analysis and Prediction, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, in press.
- McPhaden, M. J., G. R. Foltz, T. Lee, V. S. N. Murty, M. Ravichandran, G. A. Vecchi, J. Vialard, J. D. Wiggert, and L. Yu (2009b), Ocean-atmosphere interactions during cyclone Nargis, *Eos Trans. AGU*, 90 (7), 54-55.
- Webster, P. J. (2008), Myanmar's deadly "daffodil," *Nat. Geosci.*, 1, 488-490.