

沿岸地域における台風災害軽減のための台風強度予測手法に関する研究

吉野純*・村上智一**・林雅典***・安田孝志****

本研究では、沿岸地域における精度の高い台風災害リアルタイム予測システムを構築する一環として、大気-海洋-波浪結合モデルを用いて台風0416号の強度予報実験を行い、台風強度の予測精度に影響を及ぼす主たる物理過程について検討を行った。著者らの結合モデルによる48時間予報と、大気モデル単体によるそれとの間で比較した結果、台風の中心気圧に20 hPa もの差を生じることが明らかとなり、台風直下で生じる複雑な海面境界物理を考慮することの重要性が示唆された。台風直下の海洋場では、強い鉛直混合とエクマン湧昇が生じており、それらが海水面温度の低温化（台風強度に対する負のインパクト）に作用していた。

1. 緒 言

2004年の台風シーズンは、記録的な猛暑とも関連して、本州沿岸の海水面温度が例年に比べて高い状態にあった。そのため、強い勢力を維持した台風が次々と日本列島に上陸し（過去最多となる計10個の台風上陸を記録）、それに伴い、日本各地で強風・大雨・高潮・洪水といった被害に見舞われた。毎年のように繰り返される台風災害を未然に防ぐためには、沿岸に接近する台風の精度の高い進路・強度予測システムの構築が不可欠である。

台風の進路予測にあたっては、現行の気象庁台風モデル（空間解像度24 km）により、48（72）時間予測を誤差300（400）km以内と、既にある程度の成功を収めている。しかし、台風の強度予測（中心気圧、最大風速、最大風速半径等）に関しては、現行の気象庁の台風モデルでは、「海面境界物理の不正確さ」、「低い空間分解能」、「台風構造の初期値化」等の諸問題がネックとなり現実のものとなっていない。すなわち、台風強度予報の実現のためには、これらの問題点を解決させる必要がある。

特に、「海面境界物理」に関しては、台風の発達や減衰にインパクトを与える運動量・熱・水蒸気フラックスを評価する上で重要になるにも関わらず、気象庁台風モデルにおいては海面温度を固定値として運用されているのが現状である。台風の持つ莫大なエネルギーは、言うまでもなく、海面からの顕熱・潜熱供給にあり、台風モデルにおける海面境界物理の不正確さは、強度予測の大きな障害となるだろう。近年の研究によって、台風直下における大気海洋結合系において強い相互作用が働いて

いることが知られている。台風が強くなればなるほど、熱・水蒸気供給が強化されて、台風強度を強めることになる。しかし、海洋表層においては、強い風応力の結果として、顕著な乱流混合が生じる。また、静止した台風の直下ではエクマンパンピングにより湧昇流が生じる。これらの効果によって、海洋混合層中の海水とそれより低層の冷たい海水が混ざり合い、結果として海水面温度を低下させることになる。このような海面下のプロセスは、台風に入流する熱・水蒸気エネルギーを減じさせるように作用することから、台風の発達を抑制するようなフィードバックが働くものと考えられる。熱帯低気圧による海水面温度の低下は、1℃から6℃の範囲で生じると言われており、熱帯低気圧の移動速度が遅いものほど、正味の海面温度冷却量が大きくなる（Bender ら、1993）。以上のことを考慮すると、海水面温度を定常として取り扱う現状のモデルには大きな問題があり、次世代の台風モデルにおいては、海面をインターフェイスとした大気-海洋間の運動量・熱・水蒸気の交換過程を詳細に考慮できる海洋モデルとの結合が望まれる。

そこで本研究では、高解像度な大気-海洋-波浪結合モデルを構築し（村上ら、2004）、台風直下における大気場・海洋場・波浪場間の相互作用の実態を明らかにし、それらが台風の予測精度（特に強度予測）に及ぼす影響を定量化することを目的とする。

2. 台風0416号について

事例としては2004年8月に発生した台風16号を採用した。台風0416号は、2004年8月19日21時にマースシャル諸島近海で発生し、25日21時に沖ノ鳥島の東海上で中心気圧910 hPa、最大風速55 m/s、暴風半径280 km、強風半径南東側750 km、北西側560 kmと最大の勢力となった。強い勢力を維持した0416号は日本列島に上陸し、各地に高潮・強風などの大きな被害をもたらした。

前述したように、台風直下の海洋表層においては、強い風応力により顕著な乱流混合・湧昇を伴い、深層の低

* 正 会 員 博(理) 岐阜大学助手大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

** 学生会員 修(理) 岐阜大学大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

*** 学生会員 岐阜大学大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

**** フェロー 工博 岐阜大学教授大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

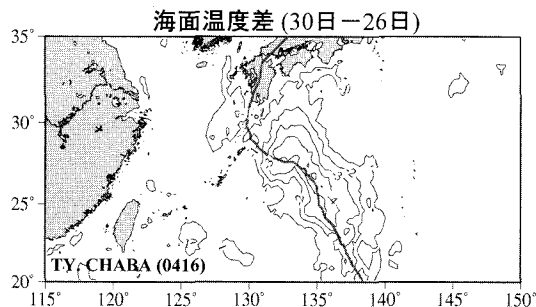


図-1 観測された台風進路（太実線）と、衛星による台風通過後の海面温度低下量（細実線，単位：K）

温水域が上方に輸送されることで、海水面温度は低下すると考えられる。図-1は、衛星に搭載されたマイクロ波放射計（TRMM/TMI, Aqua/AMSR-E）により観測された台風の通過後（30日）と通過前（26日）の海面温度差の分布である。台風通過前の26日においては、この海域においては、ほぼ一様に29°Cの高い海水面温度となっていた（図省略）。そして、台風の進路に沿って明らかに海水面温度が低下していることが見て取れる。この海水面温度の低下は、およそ25日から31日にかけて、約400 kmの幅にわたって最大で約4°Cの温度低下が生じ、約25°Cとなった。この温度低下量は、Benderら（1993）が指摘する移動速度の遅い熱帯低気圧のそれに匹敵する。この時間帯の台風0416号は、5 m/s以下のゆっくりとした速度で西北西に進み、台風の中心気圧は緩やかに上昇していることが分かる（図-3）。

3. 数値実験の概要

（1）大気—海洋—波浪結合モデル

本研究で使用した大気—海洋—波浪結合モデルは、大気モデルにMM5、海洋モデルにCCM、波浪モデルにSWANを採用している（村上ら，2004）。

MM5（5th generation Mesoscale Model）は、ペンシルベニア州立大（Pennsylvania State University）と米国大気研究センター（National Center for Atmospheric Research）により開発された非静力学平衡・完全圧縮・非膨張系の領域気象モデルである。モデル内では、雲微物理過程（Reisner graupel scheme）、積雲対流過程（Grell cumulus scheme）、大気放射過程（Cloud radiation scheme）、大気境界層過程（Mellor-Yamada Eta scheme）、地表面過程（5-layer soil scheme）など、気象要素に影響を及ぼす重要な物理過程が考慮されている。MM5の水平解像度は、10 kmとした。

CCM（Coastal Current Model）は、岐阜大学独自に開発された多重 σ 座標系海洋モデルである。モデルの基礎方程式系には、静水圧近似・ブジネスク近似が施さ

れた運動方程式、連続方程式、温度・塩分に関する移流拡散方程式、状態方程式によって構成される。このモデルの特徴は、1）深海から浅海域まで海底地形を正確に表した上で海面付近を解像度高く計算できる（多重 σ 座標）、2）Mellor-Yamada Level2.5乱流モデルを使用、3）差分の高精度化、等である。CCMの水平解像度は、14 kmとした。

SWAN（Simulating Waves Nearshore）は、デルフト工科大学（Delft University of Technology）で開発された沿岸浅海域に対応した第3世代波浪推算モデルである。このモデルの前身である波浪推算モデルWAM（Wave Model）で考慮されていた、風から波へのエネルギー輸送項、4波共鳴非線形相互作用による成分波間でのエネルギー輸送項、白波砕波によるエネルギー散逸項、海底面摩擦によるエネルギー散逸項に加えて、浅水砕波によるエネルギー散逸項、浅水領域で顕著となる3波共鳴非線形相互作用による成分波間でのエネルギー輸送項が追加され、深海域から極浅海域まで対応できるようになっている。SWANの水平解像度は、14 kmとした。

これらのモデルを、シェルベースで相互結合することにより、10分毎に各モデル間の物理量を交換し、同時計算を行った（図-2）。今回の予報実験では、台風0416号が、緩やかに減衰する過程にあった2004年8月27日12時UTCから29日12時UTCまでの計48時間に対して、台風的环境場を十分広くカバーする計算領域（2000 km × 2000 km）を設定することで予報実験を行った。

（2）初期値・境界値条件

大気モデルMM5の初期値・境界値には、NCEP全球大気予報モデルの初期値としても使用されているNCEP Final Analyses（6時間毎）を使用した。しかし、1°格子間隔からなるこのデータセットは、空間解像度が粗いため、台風の内部構造を正確に表現できていない。台風0416号のように勢力の強い台風においては、中心から半径数10 kmの範囲内で、水平勾配の急なシャープな構造を有していることから、正確な強度予測のためには、擬似的な台風構造を初期値内に組み込む必要がある。本

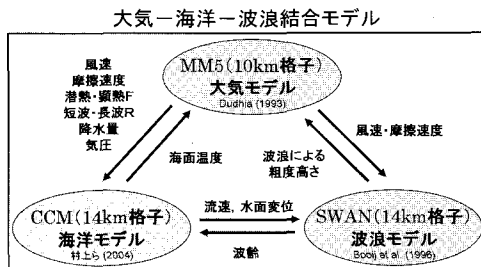


図-2 大気—海洋—波浪結合モデルの各モデルで相互に交換される物理量

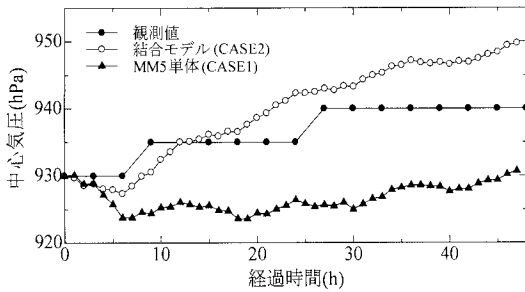


図-3 両 CASE の台風中心気圧の時系列

研究では、台風ボーガススキーム (Davis・Low-Nam, 2001) を用いることにより、典型的な台風構造を観測された緯度・経度に組み込むことで初期場の再解析を行った。

海洋モデル CCM の初期値・境界値には、JCOPE (Japan Coastal Ocean Predictability Experiment) 領域海洋客観解析データ (2 日間平均値) 中の水温、塩分、東西・南北方向流速データを使用した (10 km 格子間隔)。加えて、内部領域の水位の計算のために、グローバル海洋潮汐モデル NAO (Matsumoto ら, 2000) を側面境界条件として使用した。

波浪推算モデル SWAN では、初期海上風速場を元に定常解を診断し初期条件を設定した。

(3) 計算設定

本研究では、台風直下の海面境界で生じる複雑なプロセスが台風強度に及ぼす影響を定量化することを目的として、次の 2 種類の予報実験を行った。1 つは、大気モデル MM5 単体で海水面温度を固定値として与える従来の台風モデルと同じ手法に基づく実験である (CASE1)。大気モデルに入力する海水面温度として、NCEP Final Analyses 中の表面温度データを使用した。2 つ目には、JCOPE 海洋客観解析データを初期値・境界値条件とする大気-海洋-波浪結合モデルによる実験である (CASE2)。以上の設定以外は、両 CASE 共に全く同じ条件で実験を行い、海面境界物理が台風強度に与えるイ

ンパクトを定量化した。

4. 結果と考察

本章では、CASE1 と CASE2 の予報結果の差異に着目しながら考察を進めてゆく。

(1) 台風強度と鉛直構造の違い

図-3 は、両 CASE で予報された台風 0416 号の中心気圧の時系列である。予報実験の期間中、現実の台風 0416 号 (気象庁ベストトラック) は、緩やかに減衰する傾向を示し (2 日間で 10 hPa の上昇)、CASE2 の結果は、期間後半に若干の過大傾向であることを除けば、良い傾向の一致を示した。一方で、CASE1 では、期間を通して強い勢力 (930 hPa) を維持したままとなり、非現実的な結果となった。予報 48 時間後の中心気圧を比較すると、CASE1 と CASE2 の間で、約 20 hPa もの差が生じていることから、台風強度と海面境界過程との間には強い相互作用が働いているものと推察される。従来手法である海面温度一定として計算する台風モデルでは、台風強度予測に致命的な誤差を引き起こす可能性があるだろう。

次に、予報 36 時間後 (29 日 00 時 UTC) における台風に伴う風速場の鉛直構造について両 CASE の違いを見ると、CASE1 (図-4 (a)) では、半径 150 km 付近で 50~60 m/s を超える暴風域が対流圏中層 400 hPa 付近にまで達している。それに対して、CASE2 (図-4 (b)) では、それほど強さにはならず (約 40~50 m/s)、しかも、大気境界層内に限られた背の低い構造となっていた。中心から半径 400 km 以上離れた縁辺部では、両 CASE 共に 20 m/s を超える強風が卓越しており、中心付近ほどの顕著な差は生じなかった。

更に、両 CASE の台風内部の熱的構造の違いについて考察する。一般的に、台風の中心付近には明瞭な温暖核 (ウォームコア) が存在し、それを取り巻くようにして強い低気圧性循環が引き起こされる。強い勢力を維持したままの CASE1 (図-5 (a)) の中心付近の対流圏下層においては、390 K を超える異常に高い相当温位となっていることが分かる。しかし、CASE2 (図-5 (b)) に

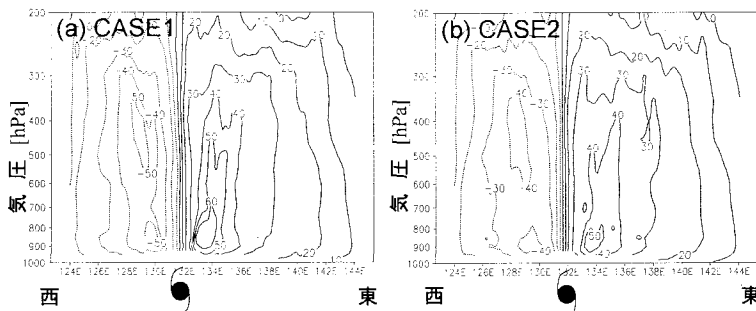


図-4 両 CASE における台風中心を横切る接線風速 (単位: m/s) の東西鉛直断面図 (29 日 00 時 UTC)

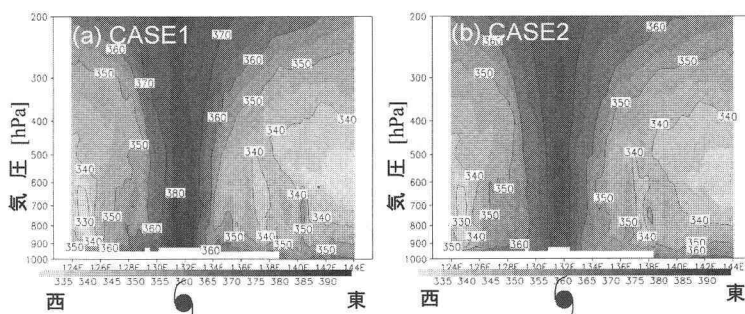


図-5 両CASEにおける台風中心を横切る相当温位（単位：K）の東西鉛直断面図（29日00時 UTC）

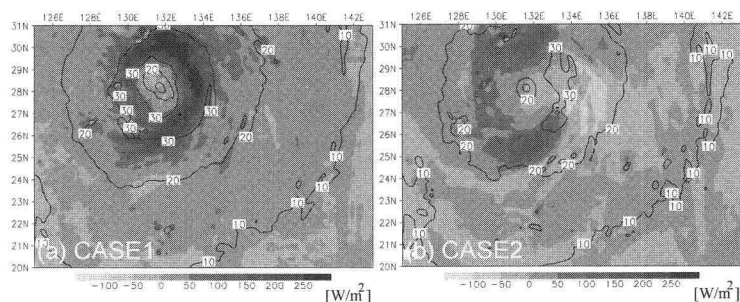


図-6 両CASEにおける10 m 高度風速（実線，単位：m/s）と顕熱フラックス（陰影部）の分布（29日00時 UTC）

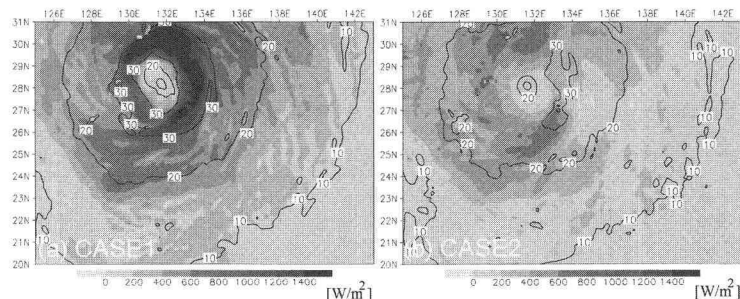


図-7 両CASEにおける10 m 高度風速（実線，単位：m/s）と潜熱フラックス（陰影部）の分布（29日00時 UTC）

おいては、そのような異常値を示さず、約20 K 低い370 K 程度にとどまった。風速場（図-4）と同じく、中心付近で特に顕著な温度差が生じ、縁辺部では大きな温度差は生じなかった。一般的に、海面気圧偏差 ΔP_s と相当温位偏差 $\Delta \theta_e$ （台風中心と台風縁辺部の差）の間には、次のような単純な線形関係が成り立つことが、Emanuel (1986) の研究によって示されている。すなわち、

$$\Delta P_s = -(3.3) \Delta \theta_e \dots \dots \dots (1)$$

であり、縁辺部を半径250 km 付近と定義すると、図-5 より CASE1では、おおよそ、 $\Delta \theta_e = -30\text{K}$ となり、CASE2では $\Delta \theta_e = -20\text{K}$ となる。このことは、台風の中心気圧にすると約-30 hPa 程度、CASE2に比べCASE1の方が強くなるとを意味している（但し、モデルの空間解像度10 km では依然として不十分であるせいか、CASE1でも920 hPa 以下に発達することはなかった）。

(2) 潜熱・顕熱フラックスの違い

CASE1の異常に高い相当温位（温暖核）の構造が如何にして形成されたのか、また、何故 CASE2では衰弱する台風構造を再現することができたのか、を明らかにする必要がある。そこで、次に、台風直下における両CASEの海面における潜熱・顕熱フラックスの相違について議論する。

CASE1の顕熱フラックス（図-6(a)）の分布を見ると、台風中心を取り囲むように、軸対称的に200~250 W/m²の熱エネルギー供給がなされている。この領域は、台風の壁雲領域や、30 m/sを超える軸対称的な高風速領域とも対応している。

一方で、CASE2（図-6(b)）では、CASE1のような軸対称的な分布とはならず、台風の進行方向前面で50~100 W/m²程度の偏った大気加熱が生じていた。台風後面にかけては、負のエネルギーフラックス（-50~

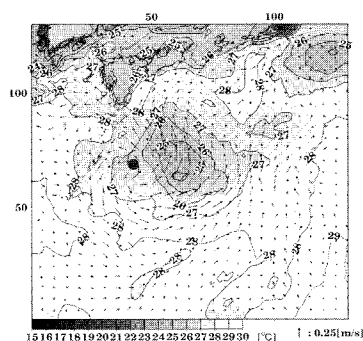


図-8 海洋表層流動（ベクトル）と海面温度（陰影部）の分布（29 日 00 時 UTC）

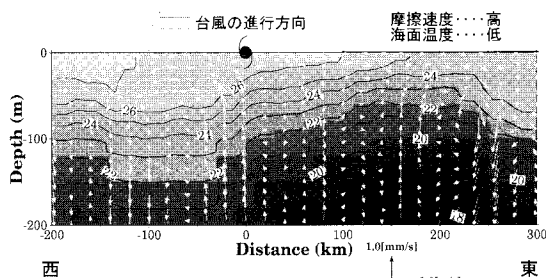


図-9 台風中心を東西に横切る海水温（陰影部，単位：m/s）と流動（ベクトル）の鉛直断面図（29 日 00 時 UTC）

-100 W/m^2) となり、大気中の熱エネルギーが海洋中に奪われている状態となっていた。海上風の分布を見ると、東側の負フラックスの領域と対応して、 30 m/s を超える高風速領域となり、非軸対称的な風速・加熱分布を呈していた。

また、潜熱フラックスにおいても、同じように CASE1 (図-7(a)) では軸対称的な、CASE2 (図-7(b)) では非軸対称的な分布パターンが示された。フラックスの絶対量で比較すると、潜熱フラックスは、顕熱フラックスに比べて 5～6 倍程度大きく、台風内部に流入する主要なエネルギー源であることは、両 CASE に共通していた、しかし、顕熱フラックスと同様に、CASE 1 の潜熱フラックスは、非現実的に高い値を示しており、台風内部への異常なエネルギー供給に貢献していた。

(3) 結合モデルの海洋場構造について

CASE2 の台風直下では、CASE1 と比較して、より小さく適切な熱・水蒸気フラックスであることが確認された。これは、CASE2 における海上風の弱化（図-4）、及び、海水面温度の低下によって説明できるだろう。

図-8 は、結合モデルによる台風直下の海面温度分布と表層流動を表している。台風中心の東側で、顕著な海面温度低下が再現されていることが見て取れる。最も低温となる領域では 25°C に達し、衛星観測とも良い一致を示した。この温度低下領域と対応して強い表層流動が

卓越していた。台風に伴う非軸対称的な強風領域で、強い摩擦応力が作用した結果である。そして、表層において、強い鉛直乱流混合が働くことで、深層の低温水塊と攪拌され、低温化したものと推測される。

台風直下における水温と流動の鉛直構造（図-9）を見ると、台風中心の東側の海洋混合層は 30 m 程度とごく浅く、台風通過前となる西側領域では、暖かい海洋混合層が水深 60 m までより深く発達していた。東側の低温で浅い海洋混合層の底層においては、非常に低温な 24°C 以下の水塊がすぐ直下にまで上昇し、温度躍層を形成していた。これは、台風通過時に中心付近でピークを持つエクマン湧昇によって深層の低温水塊が持ち上げられたことに起因する。すなわち、台風中心のエクマン湧昇により持ち上げられた低温水塊の直上に、台風の西進の結果、強風域が達することで、強い鉛直混合が働き、効率的に海水面温度が低温化したものと結論づけられる。

5. 結 語

高解像度な大気—海洋—波浪結合モデルを適用することで、台風直下の海面境界では極めて複雑な相互作用が生じており、海洋表層における熱・流動構造の再現性が、台風強度の予測精度の向上に大きく寄与することが明らかとなった。特に、強風域における鉛直乱流混合の効果、エクマン湧昇は、海水面温度の冷却、ひいては台風減衰にも大きな影響を及ぼすことを示せたことは重要である。

加えて、著者らが開発した海面境界過程を強化した結合モデルは、台風強度予測の向上に繋がるのみならず、強風害・高潮害などの台風に伴う気象・海象災害のリアルタイム予測に極めて有効であると言えるだろう。

本研究は、科学研究費補助金若手研究 17740306、及び、基盤研究 (B) (2) 16360243 による成果であることを付記する。

参 考 文 献

- 村上智一・安田孝志・大澤輝夫 (2004) : 気象場と結合させた湾内海水流動計算のための多重 σ 座標モデルの開発, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 366-370.
- Bender, M. A., Ginis, I. and Y. Kurihara. (1993) : Numerical simulations of tropical cyclone-ocean interaction with a high-resolution coupled model. J. Geophys. Res., Vol. 98, pp. 245-263.
- Davis, C. and S. Low-Nam (2001) : The NCAR-AFWA tropical cyclone Bogussing scheme. Report for Air Force Weather Agency.
- Emanuel, K. A. (1986) : An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I : Steady-state maintenance, J. Atmos. Sci., Vol. 43, pp. 585-604.
- 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 around Japan, J. Oceanography, Vol. 56, pp. 567-581.