

猛烈な勢力の台風の全生涯に対する高解像度・高効率予測技術の開発

Numerical Simulations of the Life Cycle of Super Typhoon with High-Resolution and High-Efficiency

吉野 純¹・Jane STRACHAN²・Pier Luigi VIDALE³

Jun YOSHINO, Jane STRACHAN and Pier Luigi VIDALE

In this study, a high-resolution typhoon model is developed to accurately simulate the entire life cycle of super typhoon with high-resolution and high-efficiency. The ocean mixed layer parameterization, dissipative heating parameterization and sea-spray parameterization are implemented to reasonably reproduce the tropical cyclone intensity and structure. Moreover, a new movable nested domain, which is capable of tracking typhoon movement automatically, is also introduced to improve the computational efficiency of the high-resolution typhoon model. Results of numerical experiments show that the model can predict the realistic typhoon intensity and track across the entire life cycle stages, owing to the modifications suitable for super typhoon simulations.

1. はじめに

台風常襲地帯である我が国では、温暖化による台風強大化を視野に入れて、ハード対策とソフト対策の両面から防災・減災計画の見直しが急務となっている。IPCC第4次報告書が示すように、地球温暖化の進行により台風に伴う最大風速が増大する可能性が高いと懸念されることから、東日本大震災の反省を踏まえ（想定を超える津波襲来）、台風災害に対しても物理的に発生し得る最悪シナリオを過不足なく適切に再評価する必要がある。台風そのものは大気力学に基づく数理的な取り扱いが可能であることから、極値統計解析などの統計的手法に代わって、詳細な素過程の積み重ねに基づく力学的手法を新たに開発し、想定外の台風をも想定してゆくことが急務となってくる。

これまでに、中野ら（2006）や吉野ら（2010）などにより、経験的台風モデルに代わって領域気候モデルをベースとする力学的な台風推算手法が提案されている。これらの研究では、領域気候モデルに対して、「台風ボーガス」と「ナッジング」を適用することにより、台風に伴う高潮の推算精度の向上が確認されている。しかしながら、従来の領域気候モデルでは、台風の発生から消滅（温低化）までの全生涯を連続して再現することは不可能であり、そのため初期条件中に擬似的な台風渦構造を挿入する「台風ボーガス」を導入せざるを得なかった。台風ボーガスを用いることで、過去に観測された台風渦構造（大澤ら、2005）や軸対称台風モデルにより再現さ

れた台風渦構造（吉野ら、2010）を初期条件中に挿入し、台風強度の推算精度を向上させることができる。しかしながら、台風ボーガスは、極めて少ない観測データに基づく静的な台風初期値化手法であることから、不確実性は依然として高いものと懸念される。また、従来の領域気候モデルにおいては、台風進路の再現性を向上させるために、「ナッジング」による非物理的な同化項を導入することが一般的であった。しかしながら、ナッジングは再現される気象場を平滑化する効果もあるために、ナッジング係数の取り方によっては台風強度の再現性が大きく低下してしまうことが知られている（中野ら、2006）。このような「台風ボーガス」や「ナッジング」による台風推算精度上の問題点は、従来の領域気候モデルに対して自動移動ネスティングの枠組を導入し、台風の発生から消滅までの全生涯を高解像度かつ高効率に表現できるようにすれば解決されると期待される。

また、今日までの一般的な領域気候モデルにおいては、台風を表現する上で不可欠となる各種の海面境界物理過程が組み込まれておらず、特に、猛烈な勢力を有する台風強度を適切に表現できていないことが知られている（Elsberryら、1992）。台風直下の海洋混合層では、強い鉛直乱流拡散の卓越により、海水面温度が低下し、台風強度を弱めるように作用している（Shade, 1999）。また、台風内部の大気境界層下部においては、暴風の粘性散逸による加熱の効果により、最大風速が約20%程度強化されることが理論的に知られている（Bisterら、1998）。更に、猛烈な台風の直下では、暴風と暴浪により生じる多量の波飛沫により、大気への正味の蒸発量が増すものと考えられている（Wangら、2001）。これらの海面境界物理過程は、特に猛烈な勢力の台風においては無視できない影響を及ぼすものと推測される。

そこで本研究では、猛烈な勢力の台風の発生から消滅

1 正会員	博(理)	岐阜大学准教授 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻
2	Ph. D	Willis Research Fellow, NCAS-Climate, University of Reading
3	Ph. D	Professor, NCAS-Climate, University of Reading

表-1 数値計算の設定

	Domain 1 (D1)	Domain 2 (D2)
TC Case	Typhoon Vera (1959)	
Period	12Z/21-00Z/28 Sep 1959 (9360min)	
Horizontal resolution	27 km (250x250)	9 km (181x181)
Time step	90 sec	30 sec
Vertical resolution	24 layers (1000-70hPa)	
Initialization	ERA40 (2.5degree)	D1 (27km)
Movable nests	Off	On (every 15min)
Nudging (4DDA)	On	Off
Cumulus convection scheme	Kain-Fritsch	Off
Cloud microphysics scheme	Reisner graupel	
PBL scheme	Mellor-Yamada Level 2.5 Eta PBL	
Radiation scheme	Cloud radiation	
Land surface scheme	5-layer soil	
Ocean mixed layer scheme	Shade (1976)	
Sea spray scheme	Fairall et al. (1995)	
Dissipative heating scheme	Zhang and Altshuler (1999)	

表-2 感度実験の設定

	Sea spray scheme	Dissipative heating scheme
Control run (CL)	Off	Off
Sea spray run (SS)	On	Off
Dissipative heating run (DH)	Off	On
Full physics run (FL)	On	On

までの全生涯を高解像度に予測することを目的として、領域気候モデルに対して、自動移動ネスティングを導入し、更に、台風直下で無視できない各種の海面境界物理過程（海洋混合層過程、粘性散逸加熱過程、および、波飛沫蒸発過程）を組み込むことで、次世代の台風推算手法を新たに開発する。

2. 数値計算の方法

ここでは、使用した領域気候モデルの概要、および、台風の高解像度・高効率計算のための領域気候モデルの改良点について記す。

(1) 領域気候モデル PSU/NCAR MM5

使用したメソ気象モデルは、ペンシルバニア州立大学 PSU と米国大気科学研究センター NCAR により開発されたメソスケールの気象現象を再現・予測するための非静力学平衡・完全圧縮・非膨張系プリミティブ方程式系モデル MM5 である (Dudhia, 1993)。本研究での計算設定は、表-1 に示す。台風事例として猛烈な勢力（中心気圧 895hPa）まで発達した伊勢湾台風 (Typhoon Vera) を採用し、その発生 (1959 年 9 月 21 日 12 時 Z) から消滅 (同 28 日 00 時 Z) までの計 9360 分の数値計算を実施する。初期・境界・同化条件には、ECMWF 全球大気再解析値 ERA40 (2.5° 格子間隔；6 時間間隔) を使用しており、

台風ボーガスによる台風初期値化は適用していない。

(2) 台風の高解像度・高効率予測のための改良

台風の発生から消滅までの全生涯を高解像度かつ高効率に予測するために、領域気候モデル MM5 に対して、自動移動ネスティング、海洋混合層過程、粘性散逸加熱過程、および、波飛沫蒸発過程を新たに導入する。尚、これらの物理過程が台風強度に及ぼす影響を評価するため、表-2 に示すように計 4 種類の感度実験を行う。

a) 自動移動ネスティング

典型的な台風は、低緯度で発生し、中緯度帯を通過し、温低化しながら高緯度へと長距離移動する。そのため、計算領域全体（台風の全生涯）を高解像度に計算することは困難を極める。しかし、領域気候モデル内のネスティング格子が長距離移動する台風を自動的に追尾できるようになるならば、台風内部を一貫して高解像度に表現できるだけでなく、計算コストをも低減できるものと期待される。そこで本研究では、台風の長距離移動を表現できるよう低解像度な親領域 D1 (27km 格子) を設定し (図-1 参照)、更に、D1 内で移動する台風を自動的に追尾できる高解像度な自動移動ネスティング D2 (9km 格子) を導入する。15 分毎に D1 内の台風中心（海面更正気圧の極小値）を探索し、D2 中心と D1 内の台風中心が一致するように D2 を再配置し、これを繰り返すことによって台風を追尾する。この自動移動ネスティングの導入によって、台風内部の構造を全生涯にわたり高解像度かつ高効率に再現することができる。

また、親領域 D1 内に対してのみにナudgingを適用することで、観測された台風の移動を高精度に再現できると期待される (ナudging係数は、 1.0×10^{-5})。また、自動移動ネスティング D2 内にはナudgingを適用せず、平滑化の影響を排除することで、台風進路のみならず台風強度の再現性をも高められると期待される。

b) 海洋混合層過程

台風直下の海洋混合層内において生じる鉛直乱流混合

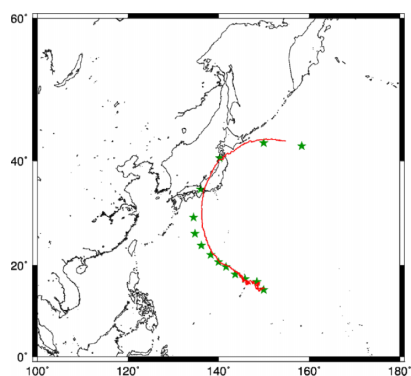


図-1 計算領域 D1 と FL で再現された台風進路 (星印は気象庁ベストトラック)

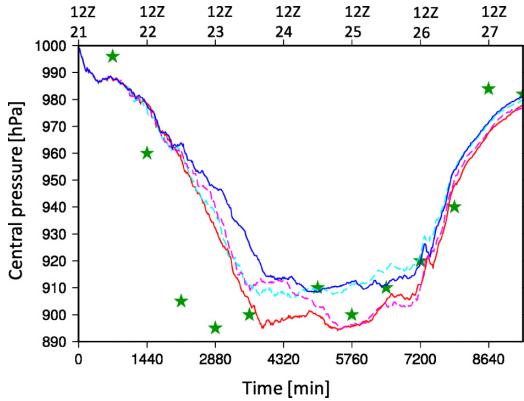
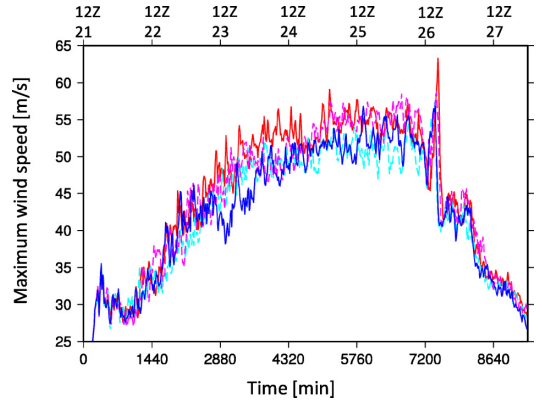

 図-2 伊勢湾台風の全生涯の中心気圧の時系列
(星印は気象庁ベストトラック)


図-3 伊勢湾台風の全生涯の最大風速の時系列

とそれによる海水面温度低下を表現するため、Shade (1999) や Emanuel ら (2004) の海洋混合層過程を MM5 に導入している。海洋混合層を単層で表現する運動方程式と熱力学方程式により構成され、

$$\frac{\partial \rho h u_m}{\partial t} = f \rho h v_m + \tau_{sx} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \rho h v_m}{\partial t} = -f \rho h u_m + \tau_{sy} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\int_{-\infty}^0 \rho C_l T_m dz = \int_{-\infty}^0 \rho C_l T_i dz \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表される。ここで、 ρ は海水の密度、 h は混合層厚さ、 u_m と v_m は混合層内の流速成分、 τ_{sx} と τ_{sy} は風応力成分、 f はコリオリパラメータ、 C_l は海水の熱容量、 T_m は混合層内の温度、 T_i は初期の温度である。また、海洋混合層下端でのエントレインメントを、バルクリチャードソン数 R が一定であると仮定することで、

$$R = \frac{g \alpha \Delta T h}{u_m^2 + v_m^2} = R_{crit} = 1.0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

と表現する。ここで、 g は重力加速度、 α は海水の熱膨張係数、 ΔT は温度躍層の温度差であり、式 (1) ~ (4) を連立することで台風直下の海水面温度低下 T_m を解くことができる。本研究では、初期の混合層厚さ h を領域一様 30m に設定している。

c) 粘性散逸加熱過程

台風内の大気境界層下部で、強風による粘性散逸による加熱が卓越することから、Bister ら (1998) や Zhang ら (1999) の粘性散逸加熱過程を MM5 に導入している。具体的には、MM5 の最下層の熱力学方程式に対して、以下の非断熱加熱項、

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\tau_s \sqrt{u_1^2 + v_1^2}}{\rho_1 C_p Z_1} \quad \dots\dots\dots (5)$$

を付加した。ここで、 T_1 は最下層の気温、 u_1 と v_1 は MM5

の最下層の風速成分、 ρ_1 は最下層の空気密度、 Z_1 は最下層厚さ、 C_p は空気の定圧比熱である。式 (5) より、およそ風速の 3 乗に比例して粘性散逸加熱は増大することになる。

d) 波飛沫蒸発過程

台風直下の暴風と暴浪の環境下では、波飛沫が飛散することで、蒸発が促進されるだけでなく、気化熱を奪うことで下層大気は冷却される。本研究では、Fairall ら (1994) や Wang ら (2001) による波飛沫蒸発過程を MM5 に導入している。波飛沫による顕熱フラックス Q_{ss} と潜熱フラックス Q_{sl} は、それぞれ、

$$Q_{ss} = 3.2 \times 10^{-8} u_{10}^{3.4} \gamma(u_{10}) \rho_1 C_p (T_m - T_1) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$Q_{sl} = 3.6 \times 10^{-9} u_{10}^{5.4} \gamma(u_{10}) \beta(T_1) \rho_1 L_e (q_{sat}(T_1) - q_1) \quad \dots\dots\dots (7)$$

で表現される。ここで、 u_{10} は 10m 高度の風速、 L_e は凝結の潜熱、 q_1 は最下層の混合比、 q_{sat} は最下層の飽和混合比である。また、

$$\beta(T_1) = \left[1 + \frac{0.622 L_e^2}{R C_p T_1^2} q_{sat}(T_1) \right]^{-1} \quad \dots\dots\dots (8)$$

であり、10m 高度の風速 u_{10} は、

$$\gamma(u_{10}) = 1 - 0.087 \ln \frac{10}{0.015 u_{10}^2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

により補正される。MM5 により計算された顕熱フラックス H_s と潜熱フラックス H_L に対して、

$$H_s^* = H_s + Q_{ss} - Q_{sl} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$H_L^* = H_L + Q_{sl} \quad \dots\dots\dots (11)$$

と修正することで、波飛沫蒸発の効果を含む正味の顕熱フラックス H_s^* と潜熱フラックス H_L^* を得る。

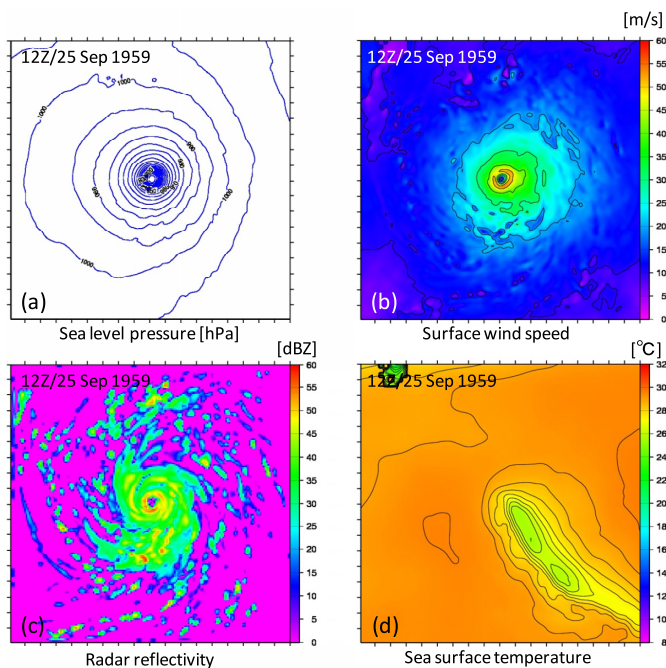


図-4 FLで再現された最盛期後半 (25日12時Z) における自動移動ネスティングD2内の台風構造,
(a) 海面更正気圧, (b) 10m 高度風速, (c) レーダー反射強度, (d) 海水面温度

3. 数値計算の結果と考察

ここでは、表-1や表-2の設定に基づく数値計算の結果について順次考察する。

まず、図-1は、全ての物理過程を考慮した計算FLにより再現された台風進路を示す。気象庁ベストトラックに比べ若干のズレはあるものの、台風の発生から消滅までの進路をほぼ正確に再現できている。これは、親領域D1に対して適用したナッジングが上手く機能していることを意味しており、D1にナッジングを適用しない場合には、台風は非現実的な進路へと逸れていくことになる。FL以外のケースもほぼ一致した進路を示しており (図省略)、海面境界物理過程の取り扱いの相違は台風進路には殆ど影響しないと言い換えられる。

次に、図-2と図-3は、各ケースで再現された台風の全生涯の中心気圧と最大風速の時系列を示す。粘性散逸加熱過程や波飛沫蒸発過程を考慮しない標準計算CLでは、気象庁ベストトラックと比較して、特に最盛期における台風強度を大幅に過小評価していることが分かる。一方、FLでは、CLに比べてより現実に近い最盛期の台風強度を再現できている。最大風速は10% (5m/s) 程度増加している。発達期における台風強度の再現性には依然として問題があるものの、最盛期以降の強度変化についてはかなり高い精度で再現できている。つまり、高精度な台風強度予測のためには、領域気候モデルに対して粘性散

逸加熱過程と波飛沫蒸発過程を加えることが必須となると言い換えられる。

また、図-2と図-3には、波飛沫蒸発過程だけを考慮した計算SSと粘性散逸加熱過程だけを考慮した計算DHの強度変化についても示す。発達期には、いずれもFLに匹敵する強度変化を示し、CLよりも急激に台風強度が増大している。しかしながら、最盛期になると、いずれも現実の台風強度に比べて大きく過小評価していることが見て取れる。SSについては、最盛期前半にはCLよりも勢力が増すが、最盛期後半になるとCLよりも衰弱する。一方、DHについては、最盛期前半にはCLとほぼ同程度の強度であるが、最盛期後半になるとFLに匹敵するかそれ以上の強度に発達する。つまり、最盛期前半には相対的に波飛沫蒸発過程の効果SSがより卓越しやすく、最盛期後半になると粘性散逸加熱過程の効果DHがより顕著になると言えるだろう。最盛期前半のFLにおいては、SSやDHに比べてかなり大きな強度差が生じており、これらの物理過程の間に生じる非線形相互作用の結果として台風が一層強化されているものと示唆される。

図-4は、FLの最盛期後半 (25日12時Z) における、自動移動ネスティングD2により再現された台風構造を示す。自動移動ネスティングの導入により、常に台風中心がD2中心に固定されるため、中心付近の55m/s以上の暴風を再現できるだけでなく、台風の日や壁雲やスパイラルバンドといった降水過程までも忠実に再現できてい

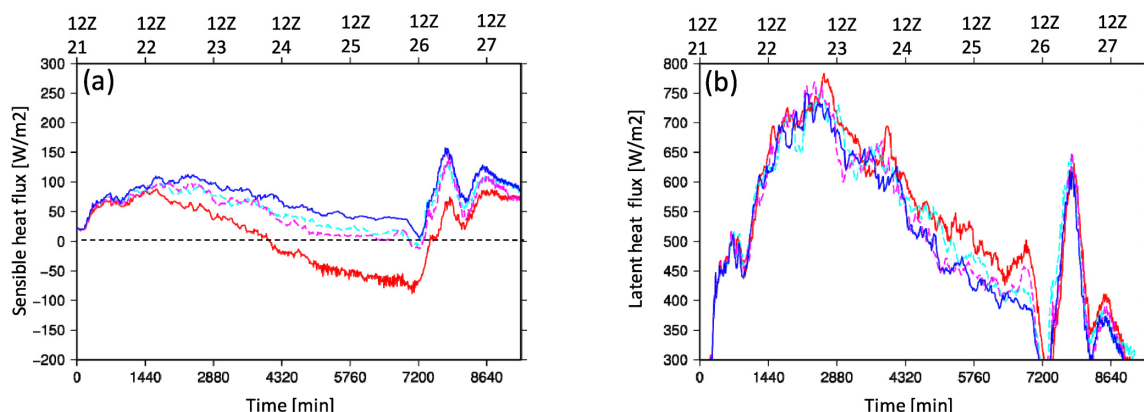


図-5 伊勢湾台風の全生涯の半径270km以内の平均の (a) 顕熱フラックスと (b) 潜熱フラックスの時系列

る。また、海洋混合層過程を導入することで、台風中心の右側には約4℃の海水面温度の低下が再現されており、台風推算精度の向上に貢献している。

図-5は、各ケースの台風中心から半径270km内の平均の顕熱フラックス H_S (SSとFLについては H_S^*)と潜熱フラックス H_L (SSとFLについては H_L^*)の時系列を示す。いずれのケースも海上においては、 H_S に比べて H_L がかなり大きく、 H_L が台風の主要なエネルギー源となることが分かる。SSについては、 H_S を低下させ、 H_L を増加させる傾向にあり、一方でDHについては、 H_S を低下させ、 H_L には殆ど影響していない。しかし、SSとDHの両者を考慮したFLでは、 H_S をより一層低下させ、 H_L をより一層増大させている。式(5)で表現される粘性散逸加熱過程DHの効果(粘性散逸による加熱促進)は、式(6)や(7)で表現される波飛沫蒸発過程SSの効果(波飛沫による蒸発促進)にも影響していることから、これらの物理過程の非線形相互作用の結果として台風強度をより一層強化させていると推察される。

4. 結語

本研究では、領域気候モデルPSU/NCAR MM5に対して、自動移動ネスティングを導入し、さらに各種の海面境界物理過程を組み込むことで、猛烈な勢力の台風をその発生から消滅までの全生涯にわたって高解像度かつ高効率に再現できることを明らかにした。また、組み込まれた粘性散逸加熱過程と波飛沫蒸発過程は、これらの非線形相互作用によって猛烈な台風を一層強化させており、高精度な台風強度予測を行う上で、これらの物理過程を同時に考慮することが必須になると結論付けられた。

今後は、本手法を更に多数の事例に適用することで、その有用性を明らかにする必要がある。また、全球気候モデルによって予測された将来気候下の台風に対して、より信頼性の高い本手法を適用することで、気候変動が

全国の台風災害ポテンシャル(高潮・波浪・暴風・大雨・洪水)に及ぼす影響を高精度に定量評価する必要がある。

謝辞：本研究は、平成22年度岐阜大学活性化経費(研究：若手在研支援)、および、科学研究費補助金若手研究A(24686058)による成果であることをここに付記する。

参 考 文 献

- 大澤輝夫(2005)：MM5用台風ボース導入ツールの作成と2004年の5つの台風を対象とした動作検証，月刊海洋，第42巻，pp. 178-185.
- 中野俊夫，大澤輝夫，吉野 純，益子 渉，河合弘泰，松浦邦明(2006)：台風ボースの高度化による数値予報モデルを用いた海上風推算手法の精度向上，海岸工学論文集，第53巻，pp. 1286-1290.
- 吉野 純・児島弘展・安田孝志(2010)：台風渦位ボースを用いた台風初期値化の高精度性の実証，土木学会論文集B2，第66巻，pp. 391-395.
- Bister, M. and K. A. Emanuel (1998): Dissipative heating and hurricane intensity, Meteorol. Atmos. Phys., 65, pp. 233-240.
- Dudhia, J. (1993): A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: Validation test and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, Mon. Wea. Rev., 121, pp. 1493-1513.
- Elsberry, R. L., K. A. Emanuel, G. Holland, H. Gerrish, M. DeMaria, and C. Guard (1992): Is there any hope for tropical cyclone intensity prediction?, Bull. Amer. Meteor. Soc., 73, pp. 264-275.
- Emanuel, K. A., C. DesAutels, C. Holloway and R. Korty (2004): Environmental control of tropical cyclone intensity, J. Atmos. Sci., 61, pp. 843-858.
- Fairall, C. W., J. D. Kepert and G. J. Holland (1994): The effect of sea spray on surface energy transports over the ocean, Global Atmos. Ocean Syst., 2, pp. 121-142.
- Shade, L. R. and K. A. Emanuel (1999): The ocean's effect on the intensity of tropical cyclones: Results from a simple coupled atmosphere-ocean model, J. Atmos. Sci., 56, pp. 642-651.
- Wang, Y., J. D. Kepert and G. J. Holland (2001): The effect of sea spray evaporation on tropical cyclone boundary layer structure and intensity, Mon. Wea. Rev., 129, pp. 2481-2500.
- Zhang, D.-L. and E. Altschuler (1999): The effects of dissipative heating on hurricane intensity, Mon. Wea. Rev., 127, pp. 3032-3038.