

大気－海洋－波浪結合モデルによる高精度台風予測のための感度実験

Sensitivity Experiments for Highly Accurate Typhoon Prediction by a Coupled Atmosphere-Ocean-Wave Model

吉野 純¹・村上智一²・林 雅典³・吉田尚弘⁴・安田孝志⁵

Jun YOSHINO, Tomokazu MURAKAMI, Masanori HAYASHI
Naohiro YOSHIDA and Takashi YASUDA

In order to quantify mutual interactions between typhoon and ocean, idealized sensitivity experiments of typhoon are performed in this study using a coupled atmosphere-ocean-wave model which can simulate realistic sea surface processes. The sensitivity results indicate that the difference of the vertical ocean temperature gradient as well as the typhoon moving speed influences the typhoon intensity change owing to the difference of the resultant sea surface temperature decrease. To predict the typhoon intensity change more accurately, the coupled model requires the realistic ocean temperature profiles with the accuracy of about 1 degree C, at the near surface zone shallower than 50m below sea level.

1. はじめに

地球温暖化に伴って今後予期される台風・ハリケーン等の熱帯低気圧の強大化は、海岸工学分野に対して減災のための新たな対応を要求している。その1つとして、高精度な高潮・高波予測に要求される台風予測技術の確立が挙げられる。沿岸域に接近する台風の進路・強度を数時間～1日程度前に精度良く予測できれば、予期される災害に対して適切な事前対策が可能になるものと期待される。しかしながら、進路予測については着実に精度向上を示している一方で、高精度な強度予測については実現には程遠いのが現状である。

熱帯低気圧は、海水面と対流圏界面の間の温度差（熱効率）が大きければ大きいほどその強度が増すことが知られている（Emanuel, 1986）。台風内部に流入する気塊は、暖かい海面上で加熱を受け、壁雲内の上昇流により対流圏界面にまで気塊は運ばれ冷却される。つまり、台風内で生じる気塊のサイクルは、「不可逆的カルノーサイクルエンジン（reversible Carnot cycle engine）」と同等のものと見なすことができる。この様な台風の性質を考慮すると、高精度な台風強度予測のためには、台風直下において時々刻々と変化する海水面温度の時間・空間分布を極めて高い精度で入力する必要があると言

換えられる。

現在の気象庁台風モデルにおいては、海洋を無限の熱溜めと仮定し、台風直下の海水面温度を一定として取り扱っていることから、特に台風強度予測の誤差の主因となっているものと推測される。また、Bender et al. (1993)や吉野ら(2005)の事例研究により、台風－海洋間の境界面では強い相互作用プロセスが働き、海洋側では顕著な海水面温度低下が生じ、台風側ではその強度低下が生じることが明らかとなっている。つまり、高精度な台風予測のためには、台風気象場と海洋場を一体の系として取り扱う大気－海洋－波浪結合モデルによりその複雑な相互作用プロセスを定量化することが急務となってくる。これらの知見に基づき、台風の強度変化に本質的なプロセスのみを詳細にモデル化することで、効率的で高精度な台風強度予測が可能になるものと期待される。

今日まで、台風－海洋間の相互作用プロセスの解明を目的とした先行研究が散見されるものの、それらの大半は、特定の台風事例を対象としたものばかりである。台風は、周辺の様々な擾乱（前線、ジェット気流、トラフなど）の影響を受けることで強度を刻々と変化させるため、このような事例解析だけでは厳密に台風－海洋間の相互作用プロセスのみを定量化することは困難である。よって、台風周辺の擾乱の影響を排除した理想的環境場の中での台風の数値実験を行うことで、厳密に台風－海洋間の相互影響のみ評価する必要があると考えられる。

そこで本研究では、理想的環境場における台風気象場を作成できる独自の初期値化アプリケーションを用いて（吉野ら, 2007）、それにより作成された理想的な初期気象場に基づき、大気－海洋－波浪結合モデル（村上ら, 2004）による台風の理想実験を多数実施し、台風－海洋間の相互作用関係についてより詳細に定量化することを

-
- | | |
|--------------|-----------------------------|
| 1 正 会 員 博(理) | 岐阜大学助教大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻 |
| 2 正 会 員 博(工) | 豊橋技術科学大学産官学連携研究員工学部建設工学系 |
| 3 学生会員 修(工) | 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 |
| 4 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 |
| 5 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 |

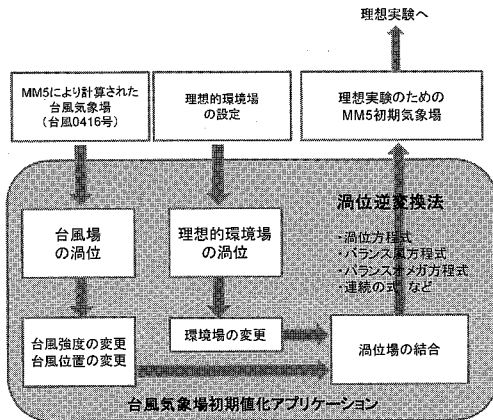


図-1 台風初期値化アプリケーションの計算フロー

目的としている。大気場・海洋場に対して理想的条件を多数設定し感度実験を行うことで、高精度な台風予測に必須となる入力データを特定でき、それらに要求される入力精度について明らかになるものと期待される。

2. 数値計算の概要

本研究では、Davisら(1991)、吉野ら(2003)、吉野ら(2007)による、渦位逆変換法に基づく台風気象場初期値化アプリケーションを用いて、理想的な環境場中における3次元台風気象場の解析を行い、それを初期気象場として村上ら(2004)により開発された大気-海洋-波浪結合モデルによる台風の理想実験を多数行った。

(1) 台風気象場初期値化アプリケーションについて

まず、台風気象場初期値化アプリケーションを図-1の流れで実行し、理想的な台風気象場（初期気象場）を作成した。このアプリケーションを用いることで、3次

表-1 大気-海洋-波浪結合モデルの計算設定

気象モデル MM5	水平格子数	200×200(東西×南北)
	水平解像度	10 km×10 km
	鉛直総数	24 層
	タイムステップ	30 秒
	大気境界層スキーム	Eta PBL scheme
	雲物理過程	Reisner graupel scheme
	放射過程	無し
	土地利用	全領域を海とする
海洋モデル CCM	設定緯度	北緯 15 度
	水平格子数	130×130(東西×南北)
	水平解像度	14 km×14 km
	タイムステップ	30 秒
	多重座標の適用領域数	6
	各領域の層数	領域Ⅰ: 6, 領域Ⅱ: 5, 領域Ⅲ: 5, 領域Ⅳ: 4, 領域Ⅴ: 4, 領域Ⅵ: 4
	境界面水深 S	$S_I=4\text{ m}$, $S_H=20\text{ m}$, $S_B=50\text{ m}$, $S_N=200\text{ m}$, $S_V=1000\text{ m}$
波浪モデル SWAN	水深	全領域水深 5000 m
	初期値	初期流速 0 m/s, 初期潮位 0 m
	水平格子数	130×130(東西×南北)
結合モデル	水平解像度	14 km×14 km
	タイムステップ	5 分
	交換時間間隔	10 分

元気象場（風速・風速，気温，ジオポテンシャル高度，湿度）から、ただ1つの物理量である「渦位」へと変換し、台風周辺の環境場の渦位に対して水平一様な場へと修正を施した後に、再び3次元気象場へと逆変換すること（渦位の可逆性原理）、台風周辺の擾乱を排除した理想的な初期気象場を作成できる。この初期気象場により、本研究の理解に悪影響となる台風周辺の擾乱を取り除いた理想的条件の下で台風-海洋間の相互作用を定量化できる。この初期値化アプリケーションに関する詳細については、吉野ら(2003)や吉野ら(2007)を参照されたい。

具体的な手順としては、1) メソ気象モデル PSU/NCAR MM5(Dudhia, 1993)により計算された台風0416号(2004年8月27日12時)の渦位(台風渦位)を抽出し、2) 任意に設定した水平一様な渦位場（環境場渦位）の中に台風渦位を組み込み、3) 渦位逆変換法により3次元気象場の解析を行い、4) 得られた結果を大気モデルの初期気象場として入力する、を理想実験の度に繰り返す。ここで、台風渦位は、台風中心から600 km四方のみを抽出し、環境場渦位の中に組み込んだ。環境場渦位については、台風0416号の周辺の平均的な鉛直温度プロファイルと、後述の鉛直風速プロファイルに基づき、水平一様な渦位場を設定した。

(2) 大気-海洋-波浪結合モデルについて

台風-海洋間の相互作用関係を調べるため、村上ら(2004)により開発された大気-海洋-波浪結合モデルを使用した。この結合モデルは、大気モデルMM5、海洋モデルCCM、波浪モデルSWANにより構成される。大気-海洋-波浪結合モデルに関する詳細については、村上ら(2004)を参照して頂きたい。

MM5は、ペンシルベニア州立大学と米国大気研究センター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。雲微物理過程、積雲対流過程、

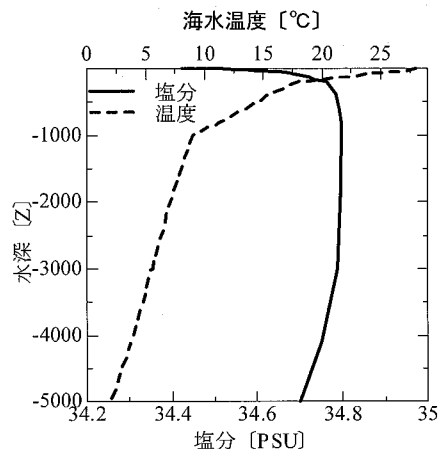


図-2 海洋場の初期の鉛直速度・塩分プロファイル(3.1節)

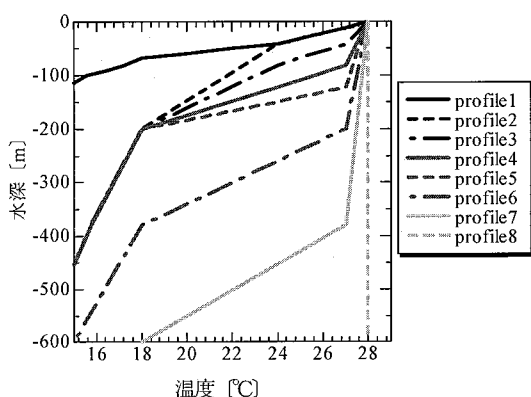


図-3 海洋場の初期の鉛直温度プロファイル (3.2節)

大気放射過程, 大気境界層過程, 地表面過程など, 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 による入出力値は, 後述の海洋モデル CCM や波浪モデル SWAN の入出力値と双方向的に相互交換される。

CCM は, 岐阜大学で開発された多重 σ 座標系海洋モデルである。基礎方程式系は, 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。CCM から MM5 には, 海水面温度が返されるよう設定されている。

SWAN は, デルフト工科大学で開発された深海域から極浅海域にまで対応した第 3 世代波浪推算モデルである。SWAN から MM5 には, 波浪による粗度高さが返されるよう設定されている。

これら 3 つの独立したモデルをシェルベースで相互結合し, タイムステップ 10 分毎にモデル間で物理量を相互交換し, 同時計算を行った。計算領域は, 全て土地利用区分は「海」として, 2000 km 四方をとり, 計 48 時間の時間積分を行った。また, 惑星渦度を領域内で一様となる f 平面を仮定した(本計算では北緯 15 度とした)。各モデルの詳細な計算設定については, 表-1 に整理した。

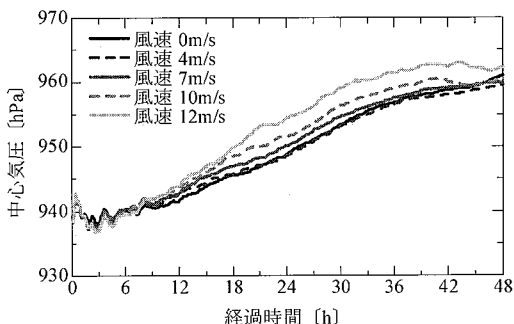


図-4 総合モデルによる台風の中心気圧の時系列。環境場の風速(台風の移動速度)の違い。

(3) 感度実験の設定

前述の大気-海洋-波浪結合モデルを用いて, 次の 2 種類の観点から感度実験を行い, 大気場・海洋場の比較・考察を行った。

1 つは, 台風の移動速度の違いが, 台風強度や海洋場に及ぼす影響について調べた。前述の台風初期値化アプリケーションにより台風環境場の風速(500 hPa 面より上層の風)を, 0 m/s, 4 m/s, 7 m/s, 10 m/s, 12 m/s と変化させることで初期気象場を作成し, これらに基づき感度実験を行った(500 hPa 面より下層の風速は一律 0 m/s とした)。このとき, 海洋モデルの鉛直温度・塩分プロファイルは全て図-2 で示す条件で統一した(第 3.1 節)。

もう 1 つは, 海洋場における鉛直温度プロファイルの違いが, 同じく台風強度や海洋場に及ぼす影響について調べた。この時, 鉛直温度プロファイルは, 図-3 の様に計 8 種類(profile1 ~ 8)を設定し, それぞれ感度実験を行った。profile8 では, 全層一様 28°C で固定し, profile1 ~ 7 は, いずれも水深 1000 m で 9°C となり, 1000 m 以深では全て図-2 と同一のプロファイルとなるように設定した。鉛直塩分プロファイルについては, 特に変更せず, 図-2 と同一条件とした。また, 台風の環境場の風速も, 全て 500 hPa 面より上層で 7 m/s, 下層で 0 m/s となる設定で統一した(第 3.2 節)。

尚, いずれの感度実験においても, 台風渦位そのものの強度・位置に関しては変更を加えていない。

3. 結果と考察

ここでは, 大気-海洋-波浪結合モデルによる 2 種類の感度実験の結果を比較し, 考察を進めてゆく。

(1) 台風の移動速度の影響

はじめに, 台風の移動速度の違いが, 台風強度や海洋場に与える影響について議論する。図-4 は, 環境場の風速(500 hPa 面より上層)を, 0 m/s, 4 m/s, 7 m/s, 10 m/s, 12 m/s と変化させた時の, それぞれの台風強度の時系列を示す。いずれの台風も時間経過と共に徐々に

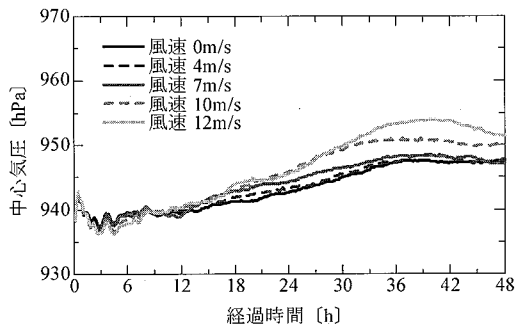


図-5 MM5 単体による台風の中心気圧の時系列。環境場の風速(台風の移動速度)の違い。

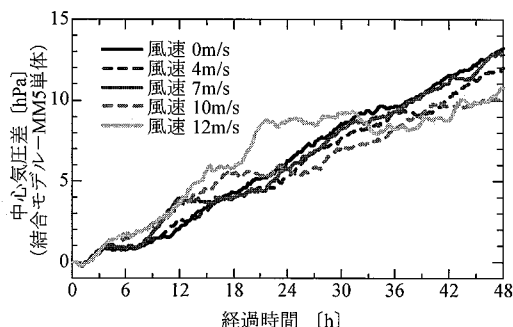


図-6 総合モデルとMM5単体との間の中心気圧差[hPa] 時系列。環境場の風速(台風の移動速度)の違い。

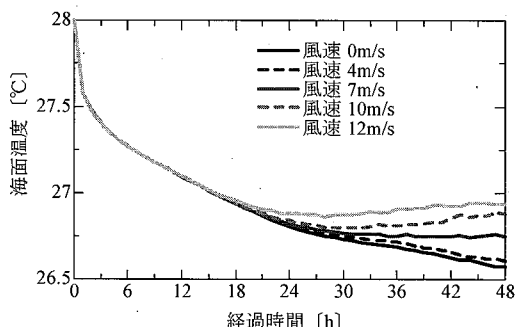


図-7 台風直下における海面温度[°C]時系列。環境場の風速(台風の移動速度)の違い。

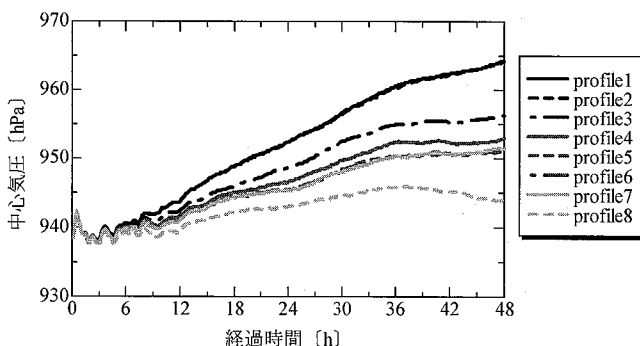


図-8 総合モデルによる台風の中心気圧の時系列。海洋場の鉛直温度プロファイルの違い。

に減衰してゆく様子が見て取れる。特に移動速度の大きな台風ほど、より衰弱の度合いが大きい(最大 5 hPa 差)。ちなみに、図-5 は、MM5 単体(非結合)で同様の入力条件の下で計算した場合の台風強度の時系列である。結合モデルによる結果と同じく、移動速度の大きな台風ほどより大きく減衰している。移動速度の大きな台風は、環境場における強い鉛直シアの影響を受けて発達しにくい(減衰しやすい)環境にあるものと考えられる。この結果は、現実の台風の発生・発達の実環境と比較しても定性的に無矛盾である。しかし、結合モデルの結果と比較すると、より強い勢力を計算期間にわたって維持しているように見える。

図-6 は、結合モデルと MM5 単体との間の中心気圧差をそれぞれ時系列で示したものであり、この差は、台風の移動速度の違いにより海洋モデルや波浪モデル(海洋場)が台風強度変化に及ぼす正味の影響量を示している。最終的には(48 時間後には)、移動速度の小さな台風の方が、海洋場からの影響を大きく受けてより減衰しているが、しかし、前半の 24 時間までは、逆に移動速度の大きな台風の方が、海洋場からの減衰効果をより大きく受けていることが分かる。

図-7 は、台風直下における 600 km 四方の平均海面温度の時系列を示す。いずれのケースも、時間発展と共に

徐々に海面温度が低下する様子が見て取れる。これは、台風直下で強いせん断応力が作用することで、深層の低温水塊との強い鉛直混合が生じ、海面温度が低下したものと考えられる。期間前半 24 時間までは台風の移動速度に依存せず、ケース間で海面温度に殆ど差は生じていないが、24 時間以降になると、ケース間で海面温度差が拡大しはじめ、48 時間後には最大で 0.5 °C 程度の差が生じている。図-6 で示したように、期間後半において移動速度の小さな台風の方がより減衰するのは、特に、この海洋モデル中の海面温度の低下に起因しているものと考察できる。逆に、図-6 の期間前半に移動速度の大きな台風が減衰するのは、波浪モデルによる減衰効果(粗度高さ)が影響しているものと考えられる。なぜなら、図-7 が示すように、期間前半には全ケースで殆ど海面温度に差がないからであり、海洋モデルが大気モデルに対して全く同じ応答をするならば、自ずと波浪モデルの応答(減衰効果)に差が生じていることとなる。移動速度の大きな台風の直下では、風向の急変により波が十分に発達できず、波齢の比較的小さな波が卓越し、波浪による粗度高さが大きくなることで、台風をより減衰させるものと推測される。逆に、移動速度の小さな台風の直下では、風向の急変が生じず、比較的、波が発達しやすい(波齢が大きい)環境となるため

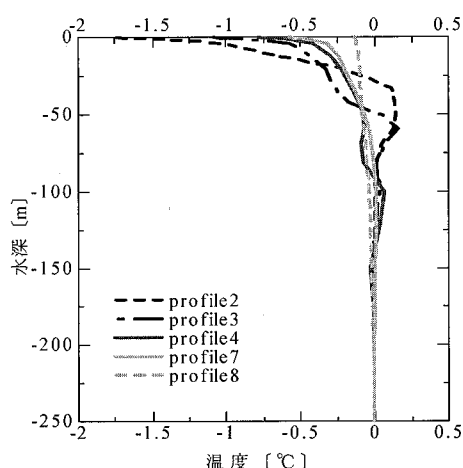


図-9 48時間後における海水温偏差(初期海水温からの変化)の鉛直分布. 海洋場の鉛直温度プロファイルの違い.

に、波浪による台風の減衰効果は抑制されるものと考えられる。

以上の結果より、台風の移動速度の違いは、海洋場や波浪場にまで差をもたらし、複雑な相互作用の結果として台風強度に少なからず影響することが理解された。また、複雑な相互作用のため、台風の移動速度と台風強度を一義的な関係では説明できないことも理解された。

(2) 鉛直温度プロファイルの影響

次に、海洋モデル中の初期の鉛直温度プロファイルの違いが、台風強度や海洋場に及ぼす影響について議論する。図-8は、profile1～profile8の鉛直温度プロファイルを想定した時の、それぞれの台風強度の時系列を示す。これら鉛直温度プロファイルの違いは、48時間後には最大で約20hPaの差に繋がっている。海洋貯熱量の大きなケースほど、台風はより強い勢力を長く維持している。つまり、海洋混合層が薄く、温度躍層の上方に存在するケースであるほど海水面温度は低下しやすく、台風は衰弱しやすい状況となる。profile1とprofile2では、50m以深で大きなプロファイルの違いがあるにも関わらず、殆ど台風強度に違いが生じなかった。また、profile4～profile7においても、海洋混合層の厚さにかなり大きな相違があるが、殆ど強度変化に明瞭な差が現れていない。これらの結果から、特に、海水面から水深50mまでの比較的浅い場所での鉛直温度プロファイルが、海水面温度の低下や台風強度の変化に大きな影響を及ぼすと言え換えられる。図-9は、48時間後における台風直下における600km四方平均の温度偏差の鉛直プロファイルを示す(初期温度からの変化)が、実際に、台風による強いせん断応力による温度変化は、せいぜい水深100m程度までしか及んでいないことが見て取れる。

これらの結果から、高精度な台風強度予測を行う上で、

48時間先までの強度予測誤差を5hPa以内程度に抑えようとするためには、特に海水面から水深50mまでの温度プロファイルを1℃以内の精度入力する必要があると結論付けることができる。

4. 結 語

本研究では、台風-海洋間の相互作用関係を定量化するために、台風気象場の初期値化アプリケーション(吉野ら, 2007)と、大気-海洋-波浪結合モデル(村上ら, 2004)を用いて台風に関する理想実験を多数実施した。

台風の移動速度は、台風-海洋間の相互作用を定量化する上で無視できない要素であり、移動速度の小さい台風ほどより海洋モデルの影響を受けやすく、移動速度の大きな台風ほどより波浪モデルの影響を受けやすいことが示唆された。高精度な台風強度予測を行うためには、単に海水面温度の精度向上のみならず、波浪場の精度向上や台風進路の精度向上までも要求されることを意味している。

また、台風直下の海洋温度プロファイルもまた、台風強度に大きな影響を及ぼし、台風強度の48時間予測を誤差5hPa程度に抑えるためには、特に海水面から水深50mまでの温度プロファイルを1℃以内の精度で入力する必要があることが明らかとなった。

本研究は、科学研究費補助金若手研究(B)17740306、及び、基盤研究(B)(2)18360236による成果である。

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座標モデルの開発, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 366-370.
- 吉野 純・石川裕彦・植田洋匡(2003): Piecewise Potential Vorticity Inversionを用いた中緯度帯における台風9918号の衰弱・再発達過程に関する診断的解析, 京都大学防災研究所年報, 46B, pp. 423-442.
- 吉野 純・村上智一・小林孝輔・安田孝志(2007): 台風気象場初期値化アプリケーションによる可能最大高潮評価手法の検討, 海岸工学論文集, 第54巻, (印刷中).
- 吉野 純・村上智一・林雅典・安田孝志(2005): 大気-海洋-波浪結合モデルを用いた台風0416号の強度予報実験, 月刊海洋, 第42巻, pp. 194-202.
- Bender, M. A., I. Ginis and Y. Kurihara (1993): Numerical simulations of tropical cyclone-ocean interaction with a high-resolution coupled model, J. Geophys. Res., 98, pp. 245-263.
- Davis, C. A. and K. A. Emanuel (1991): Potential vorticity diagnostics of cyclogenesis, Mon. Wea. Rev., 119, pp. 1929-1953.
- 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.
- Emanuel, K. A. (1986): An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady-state maintenance, J. Atmos. Sci., 43, pp. 585-604.