

台風渦位ボーガスを用いた台風初期値化の高精度性の実証

A Validation Analysis on Typhoon Initializations Using the Tropical Cyclone Potential Vorticity Bogussing Scheme

吉野 純¹・児島弘展²・安田孝志³

Jun YOSHINO, Hironobu KOJIMA and Takashi YASUDA

In order to validate and verify the applicability of the tropical cyclone potential vorticity bogussing scheme (TCPVB) to future climate projections, typhoon hindcast experiments initialized by TCPVB are conducted with the high-resolution mesoscale meteorological model PSU/NCAR MM5. TCPVB is quite accurate through all life cycle stages in comparison with a traditional bogussing scheme developed by the Japan Meteorological Agency. The accuracy of typhoon predictions is strongly dependent on the vertical thermodynamic structure inside a typhoon estimated by both bogussing schemes. The realistic and dynamic initialization method, TCPVB, is expected to apply more generally to future climate projections exploring and assessing the potential maximum disaster impacts, as it does not require empirical parameters.

1. はじめに

2007年に発表されたIPCC第4次報告書は、人為的温暖化によって海面温度が上昇し、熱帯低気圧全体の発生数には殆ど変化が生じない（もしくは僅かに減少する）ものの、より強い熱帯低気圧の発生数は増加する可能性が高くなると警鐘を鳴らしている。また、Benderら(2010)のGFDLハリケーンモデルによる高解像度ダウンスケール実験の結果も、21世紀末には大西洋上ではカテゴリ4以上の強いハリケーンの数が増えたと試算している。温暖化のゆらぎによっては、台風強大化の時期がより早まることも懸念されることから、温暖化の影響を適切に加味した物理的に起こり得る最大（可能最大）の災害外力の高精度評価法の確立は急務となる。しかし、従来まで用いられてきた確率的台風モデルでは、「台風属性パラメータは温暖化によって変化しない」という仮定を要することから、温暖化による台風強大化の影響を適切に反映させることができず原理的な限界となっていた。

そのような背景の下、吉野ら(2009)は、これまでの確率論的手法に依らず大気・海洋力学に立脚した全く新しい台風外力評価法を開発している。この手法は、渦位の保存性と可逆性の利点を生かした「軸対称台風渦位モデル」と「渦位逆変換法」との組み合わせから構成される台風初期値化手法「台風渦位ボーガス」を導入するこ

とにより、気象庁台風ボーガス（上野，2000；大澤，2005）では決して成し得ない、将来気候において発生し得る可能最大級台風の物理的初期値化を実現している点に特徴がある。名古屋港を対象とした試算の結果、IPCC温暖化シナリオA1Bの場合には、伊勢湾台風時（潮位偏差3.55m）の倍近い可能最大高潮（潮位偏差6.5m）が発生する可能性が明らかなるなど、これまで不明であった温暖化による台風災害外力変化の定量化に成功している。日本全国の内湾・内海に対して本手法を適用すれば、温暖化により強大化した台風が最悪の進路をとることによってもたらされる高潮・高波・洪水などの災害外力の上限値評価が可能となり、長期的防災・減災対策に不可欠となる将来気候に対する台風災害ハザードマップの構築に貢献できると期待される。

この吉野ら(2009)の手法によって台風強大化の影響評価を行う場合、その精度を支配する「台風渦位ボーガス」の精度面での信頼性を確保することが不可欠となって来る。しかしながら、将来気候の台風に対する精度検証は現段階では不可能であることから、本手法による結果の妥当性を十分に実証できているとは言い難い。そこで最低限、既往台風の本手法を適用して、入手可能な観測値に基づく精度検証を実施することで、間接的にはあるものの本手法の将来気候への適用性を実証する必要があると言えよう。

そこで本研究では、複数の既往台風の発生から消滅までの全ライフサイクルに対して、メソ気象モデルPSU/NCAR MM5 (Dudhia, 1993)によるハインドキャスト実験を行い、気象庁ベストトラックに基づく精度検証を実施する。台風渦位ボーガス（吉野ら，2009）による台風初期値化の結果と、現業予報で採用されている気象

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 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
3 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

表-1 PSU/NCAR MM5によるハインドキャスト実験の設定

台風事例	9918号	9920号	0003号	0115号
計算期間 (UTC)	1999年 9月20日00時~ 9月25日12時	1999年 10月4日00時~ 10月9日12時	2000年 7月3日12時~ 7月9日00時	2001年 9月4日12時~ 9月12日00時
計算時間	36時間予測× 12時間毎 計9サイクル	36時間予測× 12時間毎 計9サイクル	36時間予測× 12時間毎 計9サイクル	36時間予測× 24時間毎 計7サイクル
時間ステップ	30秒			
第一推定値	NCEP Final Analyses (全球1°×1°格子, 6時間間隔)			
初期値・境界値	1) 第一推定値(ボ-ガス無し) 2) 第一推定値+台風渦位ボ-ガス 3) 第一推定値+気象庁台風ボ-ガス			
水平格子数	9km格子			
鉛直格子数	23層			
雲微物理過程	Reisner Graupel Scheme			
大気放射過程	Simple Radiation Scheme			
大気境界層過程	Eta Mellor-Yamada PBL scheme			
地表面過程	5-layer Soil Scheme			
標高・土地利用	USGS 5min			
4次元データ同化	なし			

序台風ボ-ガス (大澤, 2005) による台風初期値化の結果を比較することで, 台風渦位ボ-ガスの高精度性を実証し, その将来気候への適用性を裏付けたい。

2. 数値計算手法

本研究では, 複数の台風事例を対象として, 台風ボ-ガスによって作成された初期条件に基づき, メソ気象モデル PSU/NCAR MM5 によるハインドキャスト実験を行う。ここで「台風ボ-ガス」とは, 気象モデルの初期条件として用いられる擬似的な3次元台風渦のことを指し, 低解像度な第一推定値中にこの台風ボ-ガスを投入することで, より現実的かつ高精度な台風予測が実現される。ここでは, 本研究での数値計算の概要と計算設定について論じる。

(1) 台風渦位ボ-ガス

吉野ら (2008) は, Emanuel (1995) に基づく軸対称台風渦位モデルと Davis ら (1991) に基づく渦位逆変換法の組み合わせによる台風渦位ボ-ガスを開発している。

この手法では, まず, 台風の中心位置・強度と環境場に関する情報をベストトラックや第一推定値から取得し, 軸対称台風渦位モデルにより台風内部の3次元軸対称渦位構造を推定し, 第一推定値を順変換することで得られる環境場渦位の中に投入する。次に, 渦位逆変換法により, 渦位場から気象場へと逆変換することで, 台風周辺の環境場を考慮に入れた非軸対称的な台風初期値が完成する。この手法の適用により, 環境場と連続的な台風内部構造を物理的整合性を保持しながら推定できる点

に特徴がある。

本手法の詳細については, 吉野ら (2008, 2009) を参照して頂きたい。

(2) 気象庁台風ボ-ガス

大澤 (2005) は, メソ気象モデル PSU/NCAR MM5 のための台風初期値化手法として, 気象庁の現業予報でも運用されている台風ボ-ガスのアルゴリズム (上野, 2000) を導入している。

この手法では, まず, 台風の中心位置・強度に関する情報をベストトラックから取得し, Fujita の経験式に基づいて地上気圧分布を推定し, 高度の D 値 (台風域内の等圧面高度の周辺値からの偏差) の3次元軸対称構造を Frank (1977) のコンポジット解析関数によって記述する。風速場は, 推定された高度場に基づき傾度風方程式によって診断される。次に, 第一推定値より高度場の非軸対称成分を算出し, 軸対称成分と合成した後に, クレスマン内挿により第一推定値中に埋め込むことで台風初期値化が完了する。この手法により作成された台風内部の熱力学的構造は, 台風周辺の環境場の影響を一切受けず, 台風強度と Frank (1977) のコンポジット解析関数のみに依存して一意的に決定される。

本研究では, 大澤 (2005) によるアルゴリズムに対して, 吉野ら (2008) で指摘されているバランス関係の破綻に関する問題について改良を加えたプログラムを適用している。

(3) メソ気象モデル PSU/NCAR MM5

本研究では, 台風9918号, 9920号, 0003号, および0115号の計4事例に対して, 台風発生から消滅までの全ライフサイクルに対して, 「台風渦位ボ-ガス」, 「気象庁台風ボ-ガス」, および「ボ-ガス無し」の3種類の初期条件に基づき, それぞれメソ気象モデル PSU/NCAR MM5 によるハインドキャスト実験を行う。MM5 は, 非静力学平衡・完全圧縮・非膨張系のメソ気象モデルであ

表-2 台風事例毎の計算初期から24時間後の平均進路誤差と平均強度誤差

台風事例		9918	9920	0003	0115	平均誤差
ボ-ガス無し	24時間後の平均進路誤差	152 km	164 km	128 km	147 km	148 km
	24時間後の平均強度誤差	+38 hPa	+38 hPa	+30 hPa	+42 hPa	+37 hPa
気象庁台風ボ-ガス	24時間後の平均進路誤差	87 km	108 km	74 km	93 km	91 Km
	24時間後の平均強度誤差	-10 hPa	-27 hPa	-15 hPa	-30 hPa	-21 hPa
台風渦位ボ-ガス	24時間後の平均進路誤差	74 km	158 km	111 km	99 km	111 km
	24時間後の平均強度誤差	+2 hPa	-16 hPa	+5 hPa	+9 hPa	0 hPa

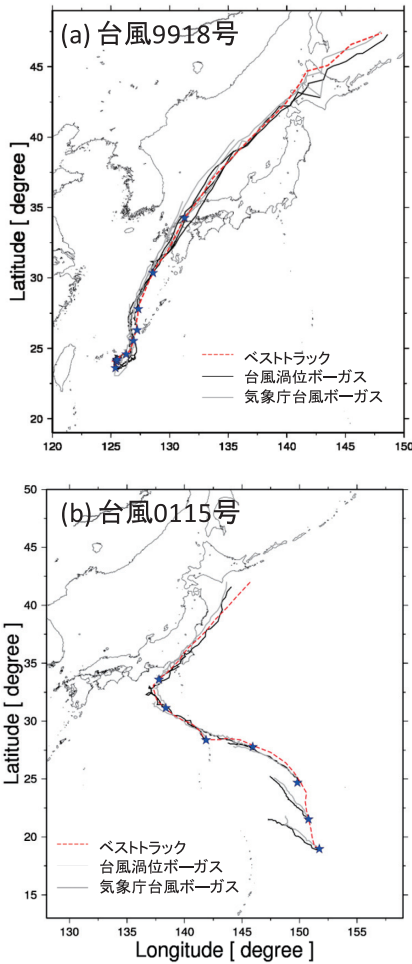


図-1 台風9918号と台風0115号の全予測計算に対する観測と予測の進路図（星印は計算初期地点）

る。雲微物理過程，積雲対流過程，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（Dudhia, 1993）。本研究では，4次元データ同化（ナッジング）は適用していない。

計算領域は，台風事例によって異なるものの全て水平解像度9kmとし，第一推定値は，水平解像度 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ で時間解像度6時間毎のNCEP Final Analysesを使用している。計算期間は，各台風事例の発生から消滅までの全ライフサイクルに対して36時間予測を複数回のサイクルで繰り返している。詳細な計算設定を，表-1に整理した。

3. 精度検証の結果

上記設定に基づき，メソ気象モデルMM5による進路予測と強度予測に対して，気象庁ベストトラックによる精度検証を行う。ここでは，紙面の都合上，台風9918号

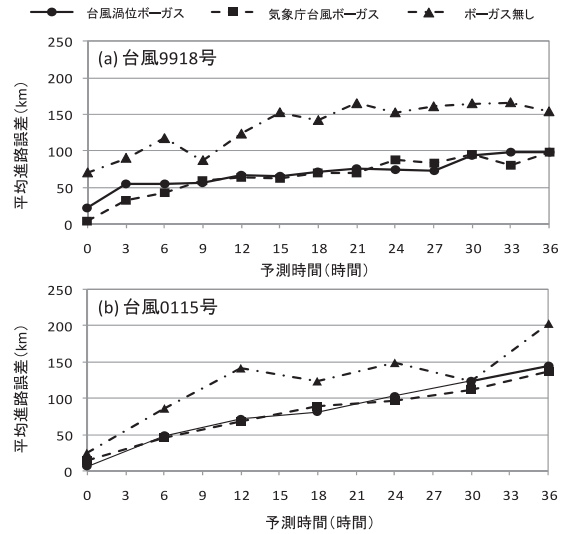


図-2 台風9918号と台風0115号の全予測計算に対する平均進路誤差の時系列

と台風0115号のみを詳細に比較・考察を行うが，全事例の進路予測と強度予測の平均誤差を，表-2に整理した。

(1) 台風進路予測

台風9918号と台風0115号の進路予測の結果を，図-1に示す。いずれのボーガス手法も，ベストトラックとはほぼ一致した進路を示しており，台風上陸の24時間以上前からほぼ正確に上陸箇所を予測できていることが見て取れる。特に，台風0115号では，上陸直前の台風の転向を精度良く表現できている点が特徴的である。また，台風の移動速度の小さい発生期（環境場の風が弱い段階）には，相対的に進路誤差が大きい傾向が見取れる。

図-2は，台風9918号と台風0115号の初期時刻からの平均進路誤差を示す。ボーガスを投入しない場合には，24時間予測でおよそ150kmの誤差が生じているが，ボーガスを投入することにより，平均進路誤差はおよそ100kmと大幅な高精度化に貢献していることが分かる。

進路予測については，2つのボーガス手法の間に有意な差を確認することはできなかった。この理由としては，進路予測が台風を流す環境場の風の精度，すなわち第一推定値の精度に強く依存していると見られ，いずれのボーガス手法も同じ第一推定値（NCEP Final Analyses）を適用していることから，予測精度がほぼ一致したと推察される。

(2) 台風強度予測

台風9918号と台風0115号の強度予測の結果を，図-3に示す。強度予測に関しては，進路予測とは異なり，2つのボーガス手法の間で大きく異なる誤差特性を示している。まず，気象庁台風ボーガスの場合，計算開始直後に急激に発達して中心気圧を過小評価する傾向が見取れ

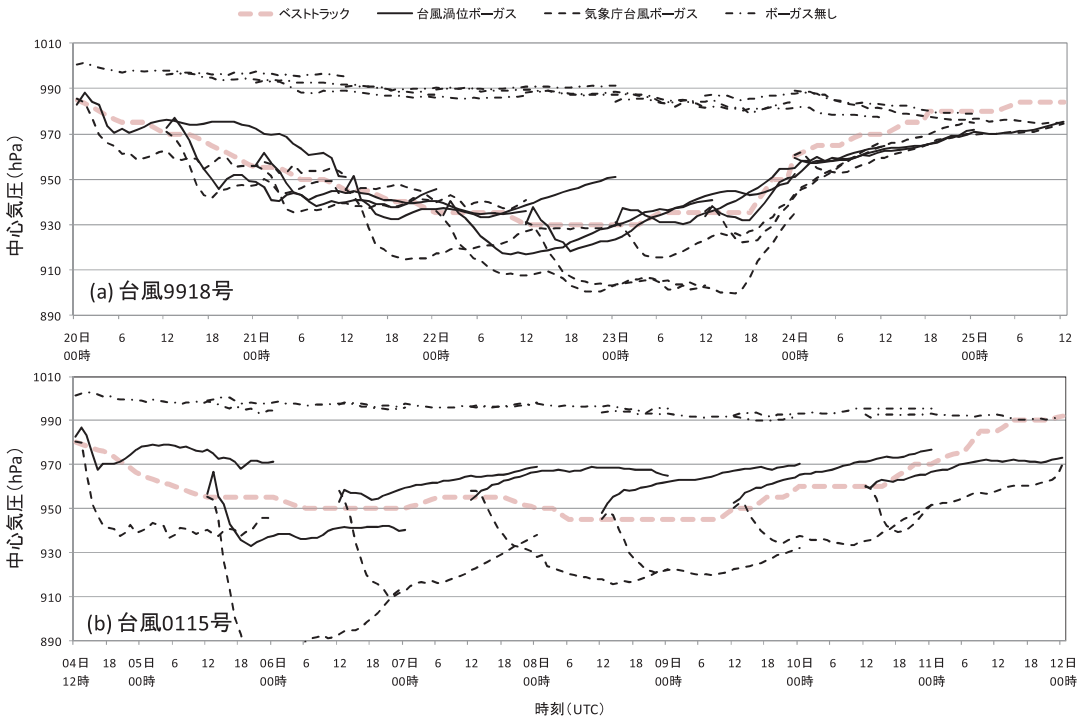


図-3 台風9918号と台風0115号の全予測計算に対する観測と予測の台風強度(中心気圧)の時系列

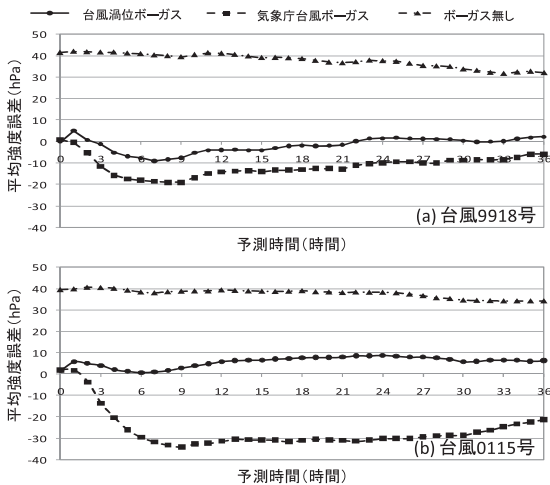


図-4 台風9918号と台風0115号の全予測計算に対する平均強度誤差の時系列

る。特に、最盛期には、900hPa近くの過剰に強い台風へと発達している。一方で、台風渦位ボーガスの場合は、台風の発生から消滅まで、過剰に発達あるいは減衰することはなく、現実的かつ高精度な強度予測が行えている。

図-4は、台風9918号と台風0115号の初期時刻からの平均強度誤差を示す。ボーガスを投入しない場合には、中心気圧を大きく過大評価(平均強度誤差は、24時間予測でおおよそ+40hPa)し、現実的な台風強度を全く表現で

きていないが、ボーガスを投入することによって、系統的誤差は大幅に減じて、より高精度な強度予測が行えている。しかし、気象庁台風ボーガスの場合には、24時間予測でおおよそ-20hPaの過小評価となり、台風強度を過剰に強く発達させる傾向にあり、依然として実用上の問題があると言える。一方で、台風渦位ボーガスの場合には、24時間予測で平均強度誤差はほぼ0hPa近くに収まり、極めて高い精度で強度予測を行えることが明らかとなった。

この様に、2つのボーガス手法の間で平均強度誤差に大きな差異が生じたことは、これらの初期条件の間に決定的な構造的差異があることに起因しているものと推測される。

(3) 鉛直構造の比較

図-5は、台風9918号が減衰初期(中心気圧935hPa)の段階にある1999年9月23日12時Zにおける、台風中心を東西に横切る相当温位の鉛直断面図を示す。ボーガスの投入によって、台風中心に明瞭な温暖核が形成されるようになることが見て取れる。気象庁台風ボーガスでは、シグマレベル0.2(250hPa)付近の対流圏上層で、相当温位410Kを超える顕著な温暖核が形成されている。一方で、台風渦位ボーガスでは、対流圏上層にはそれほど顕著な温暖核は形成されず、シグマレベル0.9(900hPa)より下層の大気境界層内に相当温位390K程度の温暖核が形成されている。このように、いずれのボーガス手法も、同じ中心気圧を有していながら、挿入される台風の熱力

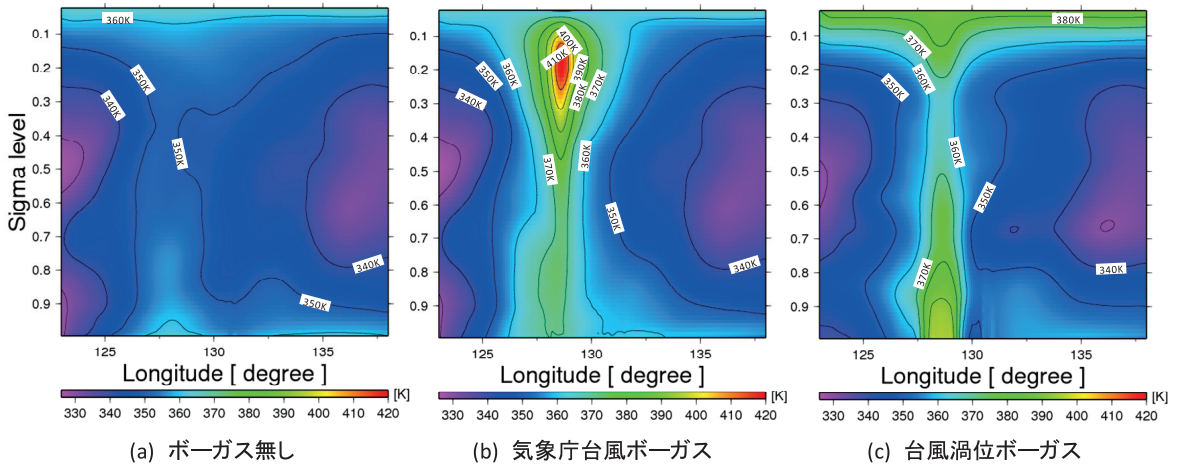


図-5 1999年9月23日12時Z (台風9918号の減衰初期) の台風中心 (北緯30.4度) における相当温位の鉛直断面図

学的構造は全く異なっていることが明らかとなった。

台風渦位ボーガスでは、台風周辺的环境場の影響を物理的に加味して台風初期値化が施されることから、気象庁台風ボーガスに比して、より現実的な台風内部構造を推定できていると見られ、このことが強度予測の高精度化に貢献していると結論付けることができる。

4. 結語

本研究では、台風渦位ボーガスの高精度性を実証することを目的として、台風9918号、9920号、0003号、および0115号の計4事例を対象に、台風発生から消滅までの全ライフサイクルに対して、「台風渦位ボーガス」、「気象庁台風ボーガス」、および「ボーガス無し」の3種類の初期条件を作成することで、それぞれメソ気象モデルPSU/NCAR MM5によるハインドキャスト実験を行った。

いずれのボーガス手法においても、進路予測については、ほぼ一致した高い精度を有しており (24時間予測で平均誤差約100km)、ボーガス投入のない場合に比べて大きな精度改善を示した。一方で、台風強度については、気象庁台風ボーガスに比べて台風渦位ボーガスの方がより高い精度で予測できることが明らかとなった。いずれの事例においても、気象庁台風ボーガスについては台風強度を過大評価 (中心気圧を過小評価) する傾向を示し、台風渦位ボーガスには目立ったバイアス誤差は見られず優れた予測精度を有していた。それぞれの初期条件の間で台風の鉛直構造を比較したところ、気象庁台風ボーガスでは台風のライフサイクルに関係なく最盛期に典型的な過剰に強い温暖核が常に形成されるのに対して、台風渦位ボーガスでは環境場の時空間変化 (台風のライフサイクル) に応じたより現実的な熱力学的構造が再現できていることが明らかとなった。

以上より、将来気候の台風に対する高精度な台風初期値化のためにも、環境場の変化を数的に取り扱うことができる台風渦位ボーガスの利用が不可欠であると結論付けられる。今後、この台風渦位ボーガスを将来気候の台風に対して活用することにより、海域施設及び沿岸域に対する高精度な台風外力評価が可能になると期待される。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金若手研究 (B) 20760325、基盤研究 (B) (2) 21360234、及び、国土交通省建設技術研究開発助成による成果であることを付記する。

参考文献

上野 充 (2000)：数値モデルによる台風予報，気象研究ノート，第197号，pp. 131-286。
 大澤輝夫 (2005)：MM5用台風ボーガ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。
 吉野 純・児島弘展・安田孝志 (2008)：台風予測精度向上のための渦位に基づく新しい台風ボーガス手法の開発，第55巻，pp. 436-440。
 吉野 純・小林孝輔・児島弘展・安田孝志 (2009)：大気・海洋力学的手法に基づく伊勢湾の可能最大高潮・波浪の評価，第56巻，pp. 396-400。
 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. (1995): The behavior of a simple hurricane model using a convective scheme based on subcloud-layer entropy equilibrium, J. Atmos. Sci., 52, pp. 3959-3968.
 Frank, W. M. (1977): The structure and energetic of the tropical cyclone. I: Storm structure, Mon. Wea. Rev., 105, pp. 1119-1135.
 Bender, M. A., T. R. Knutson, R. E. Tuleya, J. J. Sirutis, G. A. Vecchi, S. T. Garner and I. M. Held (2010): Modeled impact of anthropogenic warming on the frequency of intense Atlantic hurricanes, Science, 327, pp. 454-458.