

高分解能台風強度予測モデルの開発とその高精度化に関する検討

Development of a High-resolution Typhoon Intensity Forecasting Model and its Modification

吉野 純¹・吉田尚弘²・岩本学士³・村上智一⁴・安田孝志⁵

Jun YOSHINO, Naohiro YOSHIDA, Satoshi IWAMOTO
Tomokazu MURAKAMI and Takashi YASUDA

In order to develop a high-resolution, high-efficiency typhoon intensity forecasting model for coastal disaster prevention, several kinds of idealized experiments of a decaying typhoon are performed in this study using a mesoscale meteorological model PSU/NCAR MM5 with changing the parameters of typhoon environment. The developed typhoon intensity forecasting model shows considerable errors under the typhoon's decaying stage. A number of sensitivity experiments by using MM5 suggest that the vertical wind shear and land surface roughness length in typhoon environment strongly influence the typhoon intensity during the decaying stage, and these processes should be parameterized appropriately in the typhoon intensity forecasting model to provide better forecasts.

1. はじめに

IPCC第4次報告書は、地球温暖化による海面温度の上昇に伴って、台風やハリケーンなどの熱帯低気圧の最大風速は増大する可能性が高いと警鐘を鳴らしている。地球温暖化の進行により予想される台風の強大化は、海岸災害の防止・軽減のための新たな対策を要求している。その1つに、高潮・高波予測の元となる高精度な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強度を数時間～1日程度前に精度良く予測できれば、予想される災害に対して適切な事前対策が可能になると期待されるが、高精度な強度予測については実現にはほど遠いのが現状である。

台風強度の予測誤差の原因としては、1) 台風強度に影響を及ぼす物理過程モデルの不正確さ、2) 初期条件中の台風ボーガスの不正確さ、3) モデルの水平解像度の不足、等が挙げられる。1) については、近年、大気-海洋相互作用を詳細に考慮した大気-海洋-波浪結合モデル(村上ら, 2004)が開発され、また、2) については、渦位逆変換法に基づく新しい台風ボーガス手法(吉野ら, 2008)が開発され、それぞれ台風強度予測の高精度化に貢献している。しかしながら、3) に関して、高精度な台風予測のためには、典型的な台風の水平スケールを考慮する

と、特に台風中心付近に対して1~10kmの高い分解能(雲解像スケール)でその内部構造を表現する必要がある。現状の気象庁台風モデル(2007年に全球モデルに統合され水平解像度は20kmとなった)では依然として不十分である。台風は一般的に低緯度(発生期)から高緯度(減衰期)にかけて長距離を移動するため、3次元のメソ気象モデルにより広範囲を雲解像スケールで予測することは現状では困難を極めると言わざるを得ない。

そこで本研究では、台風の発生期から最盛期、そして減衰期まで、その一生の強度を高精度に予測することを目的として、高効率でかつ高分解能な台風強度予測モデルを開発する。このモデルは、計算コストの高い3次元座標メソ気象モデルには頼らず、Emanuel(1995)をベースとする軸対称座標系気象モデルを採用することで、飛躍的に計算コストを低減させることを可能とする。この台風強度予測モデルを用いることで、台風中心付近の内部構造を雲解像スケールで表現できることから、本研究では試行的に1999年全22個の台風の強度予測実験を行い、その再現性について検討を行う。

本研究の台風強度予測モデルは、大幅な高解像度化の結果、台風の発生期から最盛期にかけての軸対称過程については精度よく表現できるものと予期される。しかし、その「軸対称」という仮定に起因して、日本付近での減衰過程(非軸対称過程)の再現性には依然として問題があると考えられる。つまり、台風が中緯度帯に接近してから顕著になる「風の鉛直シア」と「上陸」といった非軸対称過程の影響についてより適切にパラメタライズする必要がある。そこで本研究では、台風強度予測モデルの高精度化を目的として、高解像度な3次元メソ気象モデルPSU/NCAR MM5(Dudhia, 1993)を用いて、理想的な初期条件(吉野ら, 2008)の下で、「風の鉛直シ

-
- | | | |
|--------|------|-----------------------------|
| 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 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 |
| 4 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 |
| 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 |

表-1 台風強度予測モデルの入力境界条件

入力値	データ
対流圏中下層の相対湿度	ECMWF Global Analyses (1ヶ月平均値) 水平解像度: 2.5° × 2.5° 時間解像度: 6時間
地表面の相対湿度	
対流圏海面温度	
850-200hPaの風の鉛直シア	NCEP/NOAA OI SST (1ヶ月平均値) 水平解像度: 1.0° × 1.0° 時間解像度: 1週間
海水面温度	
台風中心位置	
計算期間	気象庁ベストトラック 時間解像度: 6時間

アー」と「上陸」の影響に関する感度実験を多数実施することで、これらが台風強度に及ぼす影響についても定量化する。

2. 台風強度予測モデルの開発と検証

ここではまず、本研究で開発された台風強度予測モデルについて概要を説明し、1999年に発生した全22個の台風の強度予測実験の結果について議論する。

(1) 台風強度予測モデルの概要

台風強度予測モデルとして、Emanuel (1995) により開発された台風渦を軸対称円筒座標で表現した $r-z$ 平面気象モデルを採用する。このモデルは、静力学平衡、傾度風平衡、温度風平衡、斜行平衡が仮定されており、台風中心気圧のみならず接線風速、動径風速、鉛直風速、気温、気圧、相対湿度、等の台風内部における軸対称構造を予測できる。また、台風直下の「海水面温度変化」の効果を検討するために鉛直1次元海洋混合層モデルが適用され、更には、台風環境場における「風の鉛直シア」や「上陸」の影響も加味されている。

台風の内部構造を表現する半径 r 、流線関数 Ψ 、エントロピー χ に関する時間発展方程式は、台風環境場や海水面温度に関する情報を境界条件として(表-1)、対流圏中層と境界層上端におけるポテンシャル半径 R 上に計算される。ポテンシャル半径 R は、台風中心での単位質量当たりの絶対角運動量の平方根に比例し、本研究では、台風中心から半径1000kmまでの間に、計50個のポテンシャル半径 R を設定している。平均的な水平格子間隔は20kmとなるが、ポテンシャル半径 R の特性によって、台風中心付近の強高度領域では水平格子間隔が1~2kmとなることから、壁雲近傍のシャープな構造を十分に解像可能である。つまり、このモデルの最大の利点は、台風の強度や軸対称構造を高効率でかつ高分解能に評価できる点にある。

(2) 強度予測実験の結果と検証

この台風強度予測モデルを用いて、表-1の計算設定により、1999年の北西太平洋で発生した計22個の台風について、その発生から消滅までの強度予測実験を行った。気象庁ベストトラックとの対比により、特に中心気圧に着目した台風強度予測の精度検証を行った。

図-1は、1999年の計22個の台風の精度検証(バイアス誤差およびRMS誤差)の結果を示す。なお、ここでは「台風」と区分けされない熱帯低気圧時や温帯低気圧化後の予測値に対しても精度検証を行っている。バイアス誤差を見ると、過大評価の事例もあれば、過小評価の事例もあり、モデル自体の固有の誤差傾向は特に見いだせなかった。RMS誤差を見ると、台風強度の変動範囲が50~100hPaとすれば、誤差率は15~30%程度となり、安価な計算機資源で評価できることを考慮すれば、十分に実用的であると言える。しかしながら、秋季に発生する寿命が長く勢力の強い台風で誤差が大きい傾向にあり、依然として精度改善の余地が残されている。

誤差特性を更に詳細に調べるために、1例として台風

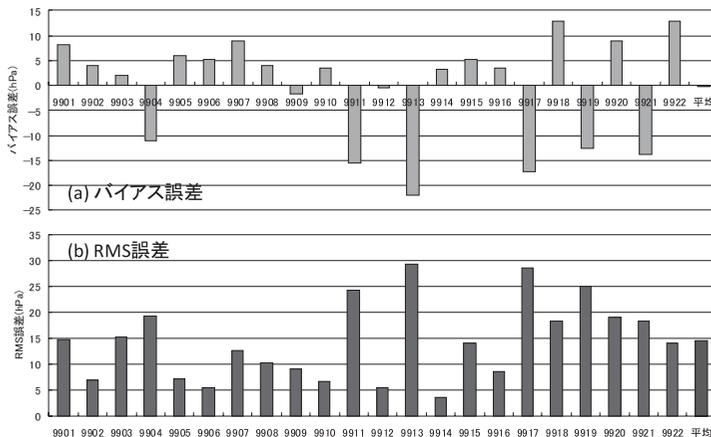


図-1 台風強度予測モデルの1999年全22台風の精度検証結果 (a) バイアス誤差, (b) RMS誤差

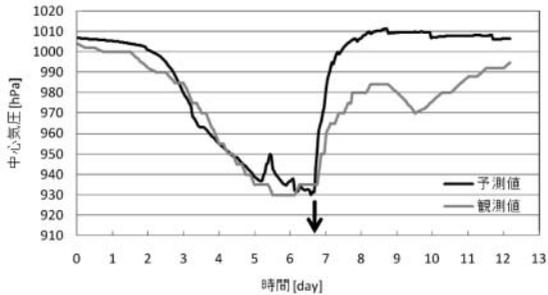


図-2 台風9918号の中心気圧の時系列(矢印は上陸時間を示す)

9918号の中心気圧の時系列予測を図-2に示す。台風9918号の発生期から最盛期にかけての時系列については、モデルの高解像度化の結果として、かなり高い精度で予測できているものの、台風が日本列島沿岸域に接近してからの減衰過程については顕著な誤差が生じており、何らかの原因により台風が過剰に弱められたものと推測できる。同様の誤差傾向は、台風9901号、9902号、9905号、9907号、9915号でも生じていた。このことは、「軸対称」の仮定により必要となる、「風の鉛直シア」や「上陸」といった非軸対称過程のパラメタリゼーションに問題があるものと推測され、改良のための各種検討が必要となる。現状においては、台風の温帯低気圧化後もそのまま本モデルを適用することには問題があると言える。

3. 台風の減衰過程に関する感度実験

そこで、この台風強度予測モデルの高精度化を目的として、高解像度な3次元メソ気象モデルを用いて、理想的な初期条件の下で、「風の鉛直シア」と「上陸」といった非軸対称過程の影響に関する感度実験を多数実施し、これらが台風強度に及ぼす影響について定量化する。

表-2 理想実験の計算条件

水平格子数	200×200格子 (東西×南北)
水平解像度	10km×10km
鉛直総数	23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
大気放射過程	無
土地利用	3章2節：全領域を海に設定 3章3節：北半分(200×100)を陸に設定 南半分(200×100)を海に設定
海水面温度	case1 : 30.0℃ case2 : 28.0℃ case3 : 27.8℃ case4 : 27.0℃ case5 : 26.0℃
設定緯度	北緯15度 (f平面)

(1) 数値計算の概要

ここでは、渦位逆変換法に基づき合理的に台風気象場を作成できる「台風渦位ボーガス手法(吉野ら, 2008)」により理想的な初期気象場を作成し、それを元に、高解像度な「メソ気象モデルPSU/NCAR MM5(Dudhia, 1993)」を用いて減衰過程における台風強度の理想実験を行い、「風の鉛直シア」や「上陸」の影響を定量化する。

具体的には、1) 感度実験のための理想的環境場(水平一様)を任意に設定する。2) 設定された台風環境場を境界条件として軸対称台風渦位モデルによる時間積分を開始する。3) 台風が定常状態(可能最大強度)に達した時点で計算を終了し、得られた軸対称気象場から軸対称渦位場(台風渦位)へと順変換する。4) 得られた台風渦位を水平一様な環境場渦位の中に埋め込む。5) 渦位逆変換法により3次元渦位場から3次元気象場へと逆変換する。6) バランスオメガ方程式などにより風の発散成分と鉛直成分を考慮した3次元気象場へと修正する。7) 得られた3次元気象場をメソ気象モデルMM5の初期気象場としてデータフォーマットの変換を行う。8) 最終的に、得られた初期気象場を元に、表-2の設定の下でMM5による理想実験を行う。の手順を感度実験の度に繰り返す。この台風渦位ボーガス手法の採用により、台風周辺の擾乱を一切排除した水平一様な理想的環境場中での台風渦の挙動解析を可能とする。この手法の詳細については、吉野ら(2008)を参照して頂きたい。

(2) 風の鉛直シアの影響に関する感度実験

台風渦位ボーガス手法において、5種類の初期台風強度と海水面温度 [case1 : 898hPa (30.0℃), case2 : 939hPa (28.0℃), case3 : 952hPa (27.8℃), case4 : 968hPa (27.0℃), case5 : 983hPa (26.0℃)], 更に、16種類の風の鉛直シア [0.0, 1.4, 4.2, 7.1, 9.9, 12.7, 15.6, 18.4, 21.2, 24.0, 26.9, 29.7, 32.5, 35.4, 38.2, 41.0m/s] を設定することで計80ケースの理想的な感度実験を行い、

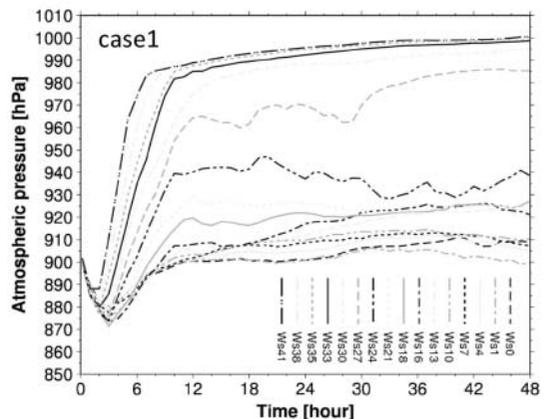


図-3 風の鉛直シアの違いによる中心気圧の時系列

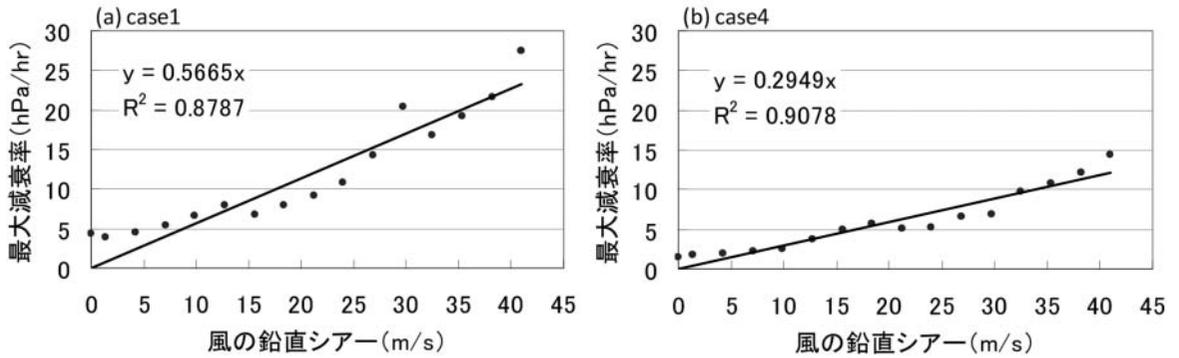


図-4 風の鉛直シアアと最大減衰率との関係 (a) case1, (b) case4 (図中R²は帰帰直線の決定係数を示す)

台風の強度減衰について詳細な解析を行った。なお、風の鉛直シアアについては、500hPaより上層では上記の風速が一樣に与えられ、500hPaより下層では一樣に0m/sと設定された。風の鉛直シアアは、一般的に、偏西風の卓越する中緯度帯でより強まり、亜熱帯では10~20m/s程度、中緯度では50m/sを超えることもある。

図-3は、初期台風強度が898hPa (case1) の時の、各々の風の鉛直シアアの条件下における台風中心気圧の時系列を示す。計算開始から6時間までに、全てのケースにおいて台風強度が急激に減衰した。その中心気圧の時間変化率、すなわち、強度減衰率 [hPa/hr] は、風の鉛直シアアが強いほど大きくなる傾向が見て取れる。また、風の鉛直シアアが強い場合には、中心気圧は1000hPa近くまで単調に上昇 (減衰) するが、風の鉛直シアアが弱い場合には、減衰は途中で頭打ちとなりその強度で再び定常状態となった。風の鉛直シアアがある閾値を超えることで (case1の場合、25m/s以上)、台風としての勢力が急激に弱まり、上空の強風により台風中心付近の壁雲や温暖核の構造が崩壊してしまっていた。また、風の鉛直シアアがその閾値を超えない場合 (case1の場合、25m/s未満) には、台風中心付近の壁雲や温暖核は崩壊せず維持できており、風の鉛直シアアによる減衰に勝るだけの強い上昇気流 (浮力) が卓越していた (図省略)。

次に、図-4に、case1とcase4における風の鉛直シアアと最大減衰率との関係を示す。風の鉛直シアアによる最大減衰率 dP/dt [hPa/hr] は、風の鉛直シアア V_{shear} [m/s] に比例しており、また、初期の台風強度が強いほど比例定数 A は大きくなることを見て取れる。case1~case5までの全ての感度実験の結果を整理すると、風の鉛直シアア V_{shear} による最大減衰率 dP/dt の式は、

$$dP/dt = A \cdot V_{shear} \dots\dots\dots (1)$$

$$A = -0.0059P_0 + 5.9240$$

と表せる。ここで、 P_0 は初期台風強度 [hPa] である。

(3) 上陸の影響に関する感度実験

台風渦位ボアガス手法において、5種類の初期台風強度と海水面温度 [case1: 898hPa (30.0℃), case2: 939hPa (28.0℃), case3: 952hPa (27.8℃), case4: 968hPa (27.0℃), case5: 983hPa (26.0℃)], 更に、10種類の陸面における粗度長 [0, 0.01, 0.1, 1, 5, 20, 30, 40, 50, 100cm] を設定することで計50ケースの理想実験を行い、台風の強度減衰について詳細な解析を行った。なお、環境場の風速は全層一樣に9.9m/sとし、前述の風の鉛直シアアによる減衰は生じないように設定した。粗度長の目安として、静穏な海面上において0.01cm、草原において10cm、都市域において80cmとなる。

図-5は、初期台風強度が898hPa (case1) の時の、各々の粗度長の設定下における台風中心気圧の時系列を示す。いずれのケースも、計算開始後18時間で陸地に上陸しており、陸面における粗度長が大きいほど、上陸後の台風の強度変化率 [hPa/hr] も大きくなる傾向が見て取れる。台風が海から陸に向かって上陸することにより生じる粗度長の増大の効果は、単に、台風内部の運動エネルギーを低減させるのみならず、乱流輸送の増大の結果として台風内部への熱エネルギーの供給も増加させるも

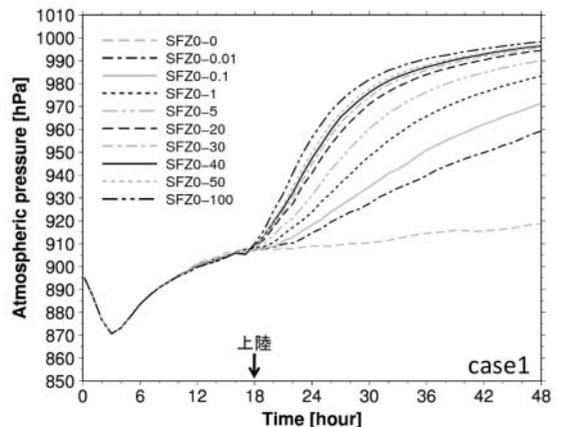


図-5 陸面の粗度長の違いによる中心気圧の時系列

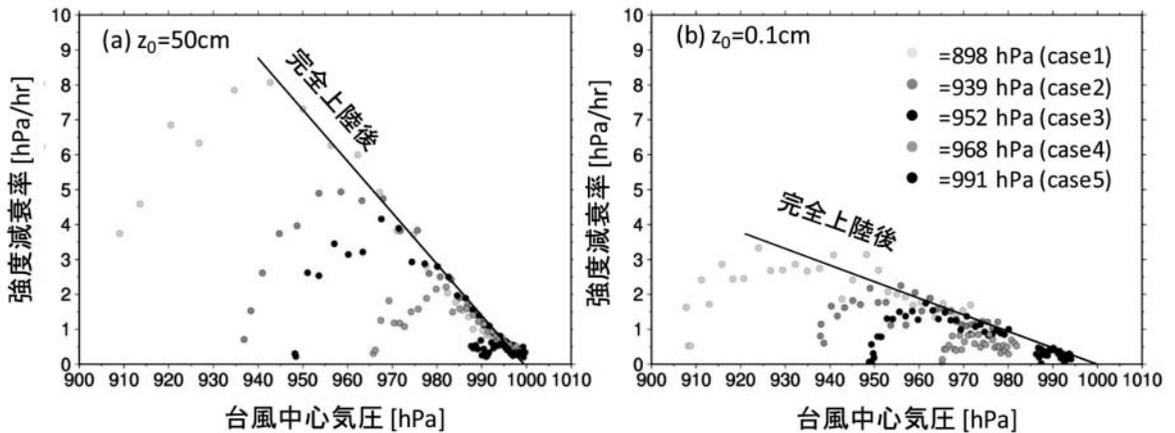


図-6 台風中心気圧と強度減衰率との関係 (a) 粗度長50cm, (b) 粗度長0.1cm

のと推測される。しかしながら、陸面の地表面温度や蒸発効率、海面のそれに比べて極めて小さいことから、台風内部の全エネルギーは正味として減少するよう作用していた (図省略)。

次に、図-6に、陸面における粗度長が50cmと0.1cmの時の、全ケースの中心気圧と強度減衰率との関係を示す。台風が完全に上陸した後は、初期台風強度 P_0 に関係なく、台風減衰率 dP/dt [hPa/hr] は、その時の中心気圧 $P(t)$ に比例して減少しており、粗度長 z_0 が大きいほど、その負の傾き B は大きくなるが見取れる。上陸後の台風は、上陸前(初期)の台風の特性的には全く依存しないという点において、風の鉛直シアアの感度実験の結果とは異なっている。全ての感度実験の結果を整理すると、台風上陸後の強度減衰率 dP/dt の式は、

$$dP/dt = B \cdot (P(t) - 1000) \dots\dots\dots (2)$$

$$B = -0.0634 z_0^{0.181}$$

となる。ここで、 $P(t)$ は時間 t の台風強度 [hPa] である。

これらの感度実験による強度減衰率の式に基づいて、本研究で構築された台風強度予測モデルのパラメタリゼーションを改良することで、台風の発生から消滅まで一貫した高精度な強度予測が可能になると期待される。

4. 結語

本研究では、高潮・高波予測の元となる高精度な台風強度予測の実現のために、高効率でかつ高分解能な台風強度予測モデルを開発した。このモデルは、軸対称座標系気象モデルの採用により飛躍的に計算コストを低減することに成功し、1999年の全22個の試行的な強度予測実験の結果、台風の発生期から発達期にかけての軸対称過程を精度良く表現できることが明らかとなった。一方で、

沿岸域に接近してからの減衰過程の再現性には問題があり、特に、「風の鉛直シアア」と「上陸」といった非軸対称過程の影響を正確にパラメタライズすることの必要性が認識された。

更に、「風の鉛直シアア」と「上陸」の効果が台風強度に及ぼす影響を定量化するために、高解像度な3次元メソ気象モデルにより多数の理想的な感度実験を行った。「風の鉛直シアア」による台風の強度減衰率は、風の鉛直シアアそのものの大きさに比例しており、その比例定数は計算初期の台風強度に依存していることが明らかとなった。また、「上陸」による台風の強度減衰率は、その時の台風強度に比例して決まり、その比例定数は粗度長に依存していることが明らかとなった。

今後、これらの感度実験により得られた定式化を、この台風強度予測モデルに適切にパラメタライズし、更には、入力データに関する最適設定の検討や、中心気圧以外の物理量の精度検証を行うことによって、このモデルの実用化に繋がるものと期待される。

本研究は、科学研究費補助金若手研究 (B) 20760325、及び、基盤研究 (B) (2) 21360234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 σ 座標モデルの開発, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.366-370.
 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, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.436-440.
 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.