

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構築

Development of a New Typhoon Bogussing Scheme Based on Potential Vorticity Dynamics for Highly Accurate Typhoon Forecasts

吉野 純¹・児島弘展²・安田孝志³

Jun YOSHINO, Hironobu KOJIMA and Takashi YASUDA

In order to increase the forecasting accuracy of typhoon track and intensity, a new typhoon initialization method for mesoscale meteorological models is developed in this study. The new typhoon bogussing scheme is based on the potential vorticity inversion technique with a simple time-dependent axis-symmetric typhoon model, and can ingest a realistic high-resolution three-dimensional typhoon structure into low-resolution first guess fields, consistent with its environmental condition and atmospheric dynamics. Preliminary numerical experiments of Typhoon Bart (1999) using PSU/NCAR MM5 show that the new method is quite accurate compared with a traditional method operationally used, owing to the feature of having less dependence on empirical parameters and approximations.

1. はじめに

台風の接近・上陸前に得られる信頼性の高い台風の進路や強度といった予測情報は、迅速かつ確かな防災・減災対策を講ずる上で海岸工学的に重要である。上陸の24時間以上前に接近する台風を、高精度に予測できるようになれば、台風イベント毎にハザードマップの直前作成が可能となり、現在の堤防等の整備状況下での高波・高潮災害発生の有無や発生時刻・箇所・規模を予測できるようになる。その結果、効果的な避難対策は勿論のこと、ハードをソフトで補うに留まらず、直前の応急対策によって予測被災箇所を補強することで、海岸災害の未然防止が期待できるようになる。

現在、台風予測の際には、初期値・境界値問題を解くメソ気象モデルが用いられるのが一般的である。これによって、経験的な2次元台風モデルを用いるよりも高精度な推算が可能であることが実証されている(吉野ら, 2006)。しかし、その力学フレームは非線形方程式系から構成されるため、初期誤差のカオスの拡大を抑制する上で、高精度な台風気象場を初期値として入力することが求められる。しかし、現在の気象観測網では、台風のシャープな内部構造を捉えることは不可能であり、台風の内部構造を詳細に反映した初期値を観測によって作成することは困難を極める。よって、一般的には、「台風ボーガス」と呼ばれる擬似的な人工渦を、低解像度な第一推定値に投入することにより、メソ気象モデルの初期値を作

成している。しかし、気象庁で採用されている現状の台風ボーガス手法(上野, 2000; 大澤ら, 2005)は、1)台風周辺場との不連続、2)力学バランス関係の破綻、3)非軸対称性の表現不備、などの問題を有しており、精度低下の主因になっていると考えられる(吉野ら, 2007)。実際に、気象庁台風ボーガスを適用した予測実験によって、計算初期に台風が急激に減衰し強度予測に大きな誤差が生じてしまうことが指摘されている(日本気象協会, 2005)。現状のパラメトリックな台風ボーガスでは、現実の台風構造を十分に表現できないことから、台風周辺場との不整合により計算不安定を起こすものと推察される。

このような背景から、本研究では、従来手法に内包するこれらの問題点を解決させる手法として、「渦位」に基づく新しい台風ボーガス手法を開発することを目的としている。そして、構築された新しい台風ボーガス手法により、事例として台風9918号に関する強度予測実験を行い、その実用性を示す。本研究で開発された新手法は、渦位逆変換法による初期値化スキーム(Davisら, 1991; 吉野ら, 2007)と軸対称台風渦位モデル(Emanuel, 1995)を組み合わせしており、経験的・主観的要素を極力排除したより客観的な台風気象場の力学的初期値化手法であると言える。

2. 渦位に基づく台風ボーガス手法について

本研究では、Davisら(1991)や吉野ら(2007)による渦位逆変換法(potential vorticity inversion)とEmanuel(1995)による軸対称台風渦位モデルの組み合わせにより新たな台風ボーガス手法を構築した。ここでは、その理論的背景について解説する。

まず、本研究で構築された新しい台風ボーガス手法の計算フローを図-1に示す。大まかには、1)台風予測のための初期値として必要となる気象庁GPVなどの客観解

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 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

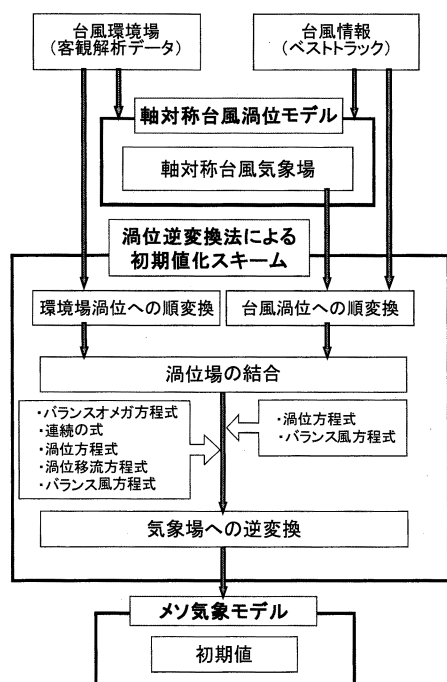


図-1 渦位に基づく新しい台風ボーガス手法の計算フロー

析データを入手する。2) 初期時刻における台風の中心位置(緯度・経度)と強度(中心気圧)の情報をベストトラックなどから入手する。3) 軸対称台風渦位モデルの境界条件設定に必要となる入力情報を、得られた客観解析データやベストトラックから整理する。4) 用意された入力値を基に、軸対称台風渦位モデルによる時間発展を計算する。5) 決められた強度になった時点で計算を終了し、得られた3次元気象場を渦位場に順変換する。6) 得られた台風渦位を客観解析データより評価された環境場渦位に埋め込む。7) 渦位逆変換法により台風の存在を考慮した渦位場から3次元気象場へと逆変換する。8) 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。9) 最終的に、得られた3次元気象場をメソ気象モデルの初期値とすることで台風予測計算を行う。の手順により計算が進められる。

吉野ら(2007)の研究により、既に、渦位逆変換法のフレームワークは完成していたが、上記6)における台風渦位を環境場渦位に埋め込む際には、メソ気象モデルによって予め計算された別事例の台風渦位が入力されるという問題が残されていた。しかし、このようなやり方では物理的整合性を欠くため、予測誤差に繋がるものと推測される。また、台風予測計算の度に、メソ気象モデルにより台風渦位を作成しては、莫大な計算コストを要することになり、リアルタイムで台風予測を行う際には致命的な欠点となる。よって、事例毎に如何にして適切な台風渦位を決定するかが重要な課題となってくる。

そこで、Emanuel (1995) による軸対称台風渦位モデルを導入することで、個々の台風事例に最適な台風渦位を作成する新たな手法を開発した。このモデルは、限られた計算機資源の下で、数少ない入力値により、現実的かつ高精度な台風内部の気象場を効率的に計算することが可能であり、上記の問題点を解消する合理的な初期値化手法になると考えられる。

(1) 軸対称台風渦位モデル

軸対称台風渦位モデルは、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2次元モデルである。このモデルは、静力学平衡、傾度風平衡、斜行平衡が仮定されており、気温減率は、角運動量面上で常に湿潤断熱的に変化することが仮定されている。また、台風内における湿潤対流は、1次元的な上昇・下降のプルームによって表現され、大気境界層内のエントロピー収支の式を満たすように質量フラックスが決定される。また、降水量は、環境場の対流圏中下層における相対湿度の関数で表現される。

モデル中の予報変数は、ポテンシャル半径座標上で計算される。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、次のように表される。

$$fR^2 = 2rV + fr^2 \quad (1)$$

ここで、 r は実空間の半径(台風中心からの距離)、 V は接線風速、 f はコリオリパラメータをそれぞれ示す。

本研究では、台風中心から半径1000kmまでの間の距離に、計50個のポテンシャル半径格子を設定している。平均的に見れば水平格子間隔は20kmとなるが、ポテンシャル半径座標を利用することで、特に鉛直渦度の強い領域(壁雲付近)で水平分解能が高くなり(水平格子間隔は1~2km)、壁雲構造の十分な解像が可能となる。

このモデルの最大の利点は、台風の軸対称構造を効率的かつ高精度に評価できる点にある。安価なPCを使用して、典型的な1つの台風のライフサイクルを計算する場合、およそ1分を要する程度である。よって、このモデルを用いて、適切な環境場情報を入力しさえすれば、台風のライフサイクルを考慮した適切な台風渦位を即座に作成できることになる。

(2) 渦位逆変換法に基づく初期値化スキーム

渦位逆変換法の基礎方程式系は、渦位方程式とバランス風方程式に加え、バランスオメガ方程式や連続の式などの連立によって構成され、渦位の可逆性原理を利用することで、「渦位 q 」というただ1つの物理量から、3次元気象場(風速 (u, v, w) 、気温 T 、温位 θ 、ジオポテンシャル高度 H)を解くことができる。すなわち、適切な台風渦位と環境場渦位を入力できれば、全ての格子点において基礎方程式系を満足するような3次元気象場を評

表-1 軸対称台風渦位モデルの計算設定

入力値	データ
対流圏中下層の 相対湿度	
地表面の相対湿度	ECMWF Global Analyses (1ヶ月平均値)
対流圏界面温度	水平解像度: 2.5° 時間間隔: 6時間
850-200hPa風速の鉛直シアー	
海水面温度	NCEP/NOAA OI SST (1ヶ月平均値) 水平解像度: 1.0° 時間間隔: 1週間

表-2 メソ気象モデルMM5の計算設定

計算期間	1999年9月22日06時～9月23日18時
初期値・境界値	ECMWF
鉛直格子	23層(地表～70hPa)
水平格子	151×181 (9km格子)
タイムステップ	30秒
初期値・境界値	6時間
雲物理過程	Reisner graupel scheme
放射過程	simple radiation scheme
大気境界総過程	Eta M-Y 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

価でき、これによって台風気象場の初期値化が可能となる (Davisら, 1991; 吉野ら, 2007)。

渦位方程式は、次式で表される。

$$q = N(\Phi, \Psi) \quad (2)$$

ここで、 q は渦位、 N は非線形微分演算子、 Φ はジオポテンシャル、 Ψ は流線関数を示す。この渦位方程式を、次のバランス風方程式

$$\nabla^2 \Phi = M(\Psi) \quad (3)$$

と連立することにより、適当な側面境界条件と上部・下部境界条件の設定により、ジオポテンシャル Φ と流線関数 Ψ (風の回転成分) の3次元分布を解くことができる。ここで、 M は非線形微分演算子である。また、静力学平衡の式より、気温 T や温位 θ の3次元分布も得ることができる。加えて、バランスオメガ方程式と質量保存則を導入することで、精度の高い3次元風速の推定が可能となる。

従来の気象庁台風ボーガス手法と比較すると、本手法の利点は、1) 「渦位」というただ1つの物理量の改変によって、物理現象を破綻させないように全ての物理量を同時に改変できる (よって、従来手法のように全ての物理量を個別に改変する必要がない)。2) 台風内の気圧分布形を仮定する必要がなく、台風周辺の環境場の状態を加味したより現実的な台風気象場を作成できる (よって、従来手法のようにFujitaの式などの気圧分布形を仮定する必要がない)。3) 渦位逆変換はローパスフィルターとしての効果があるため、台風渦位と環境場渦位との間で生じる小スケールの重力波ノイズ (計算不安定の原因となりうる) を除去できる (よって、従来手法のように環境場と台風場の間で不連続が生じない)。4) 台風内部の3次元気象場は、台風渦位のみならず環境場渦位からの

影響も受けて決定されるため、入力する台風渦位が軸対称構造であったとしても、非軸対称的な台風気象場を評価できる (よって、従来手法のように非軸対称ボーガスを別途埋め込む必要がない)、等が挙げられる。このため、近似や不整合が極めて少ない現実的かつ合理的な手法であると言える。

3. 数値計算の設定

本研究で開発された新しい台風ボーガス手法を用いて、台風9918号を事例として初期値を作成し、メソ気象モデルMM5 (Dudhia, 1993) による台風予測の予備的実験を行った。また、従来の気象庁台風ボーガス手法 (上野, 2000; 大澤ら, 2005) による計算も実施し、相互に比較を行った。

数値計算の手順は、図-1の通りであり、軸対称台風渦位モデルの計算設定は表-1に、メソ気象モデルMM5の計算設定については表-2にそれぞれ示した。軸対称台風渦位モデルやメソ気象モデルの入力情報として、2.5° × 2.5° メッシュのECMWF全球大気再解析データ (ERA 40) を使用し、台風ボーガスに入力する台風情報として、気象庁ベストトラック (気象庁提供) を使用した。ここでは、台風ボーガスの投入の効果が最も顕著に現れる台風の最盛期を初期時刻 (1999年9月22日06時UTC) として、計36時間の時間積分を行った。このとき台風9918号は、沖縄本島付近 (北緯25度54分, 東経127度0分) に位置し、中心気圧は935hPa, 最大風速は85ノット (約44m/s)

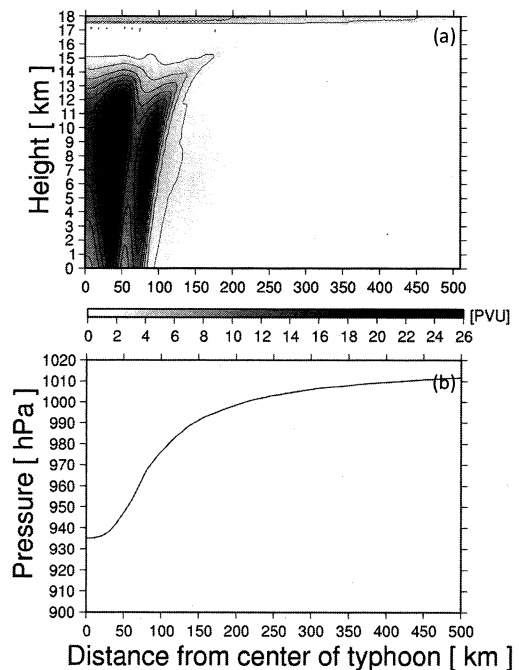


図-2 軸対称台風渦位モデルによる(a)渦位と(b)海面気圧分布

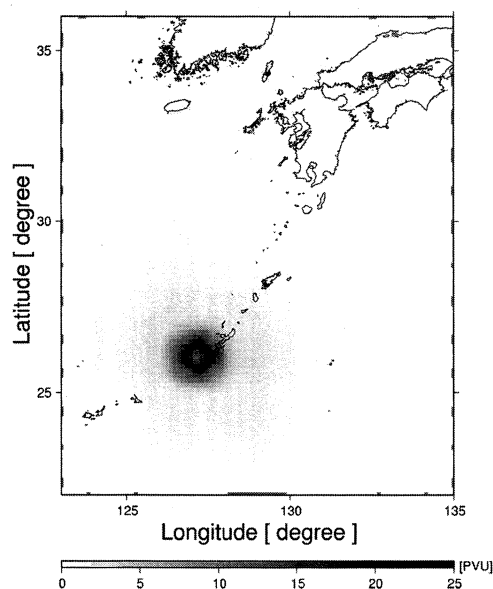


図-3 逆変換前の500hPa面における渦位分布

であった。

4. 台風気象場の初期値化と予測計算の結果

まず、軸対称台風渦位モデルにより評価された、軸対称台風の構造について考察する。図-2(a)および、図-2(b)は、台風9918号の環境場の下で発達した時の台風渦位の軸対称構造および、海面気圧分布を示している。これらの図より、観測された台風の中心気圧(935hPa)で計算が正常に終了し、その時の現実的な渦位構造が表現できていることが分かる。台風渦位は、半径100km以内で大きな値(最大で約25 PVU)を示し、それより外側

では、殆ど0 PVUに近い分布となっている($1\text{PVU}=10^{-6}\text{m s}^{-3}\text{K Pa}^{-1}$)。このように軸対称台風渦位モデルにより評価された台風渦位(図-2(a))を、環境場渦位の中に埋め込むことで、渦位逆変換法による初期値化スキームの入力値として必要となる渦位の3次元分布を得ることができる(図-3)。

本手法によって作成された初期値のうち、海面気圧分布を図-4(a)に、海上風分布を図-4(b)に示す。また、従来の気象庁台風ボーガス手法により作成された初期値のうち、海面気圧分布を図-5(a)に、海上風分布を図-5(b)に示す。海面気圧(図-4(a)と図-5(a))について比較すると、中心気圧についてはほぼ一致しているが、その分布形が大きく異なっていることが見て取れる。その結果、最大風速(図-4(b)と図-5(b))は、従来手法(約35m/s)に比べて、本手法ではより強く(約50m/s)、その影響はより遠方にまで及んで初期気象場を調整していることが見て取れる(例えば、東経124度、北緯33度付近)。また、従来手法では台風縁辺部で風速の不連続が生じているが、一方で、本手法ではそれが解消されて連続的な分布となっている。また、台風の非軸対称構造についても、本手法では適切に表現できていることが見て取れる。

これらの初期値に基づき、メソ気象モデルMM5による台風9918号の予測を行った結果、特に台風強度の時間変化に大きな結果の違いが生じた(図-6)。本手法により評価された台風強度の時間変化は、極めて現実的であり、期間を通して予測誤差は小さく、安定して計算ができていたことが分かる。一方、従来手法の中心気圧の時間変化は計算初期に大きく上昇しており、計算期間を通じて適切な強度予測が行えていない。これは、前述したように、初期値において適切に台風構造が表現できてい

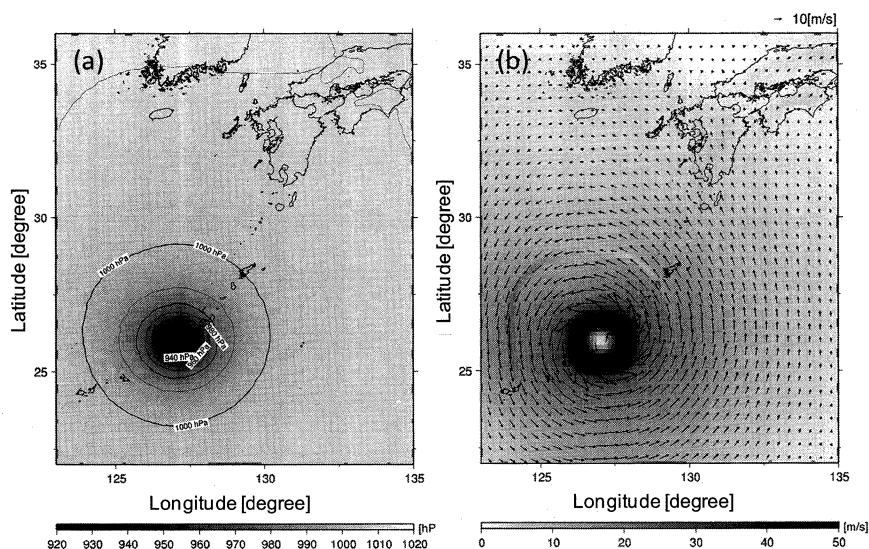


図-4 新手法(渦位に基づく台風ボーガス手法)による初期の(a)地上風速と(b)海面気圧の分布

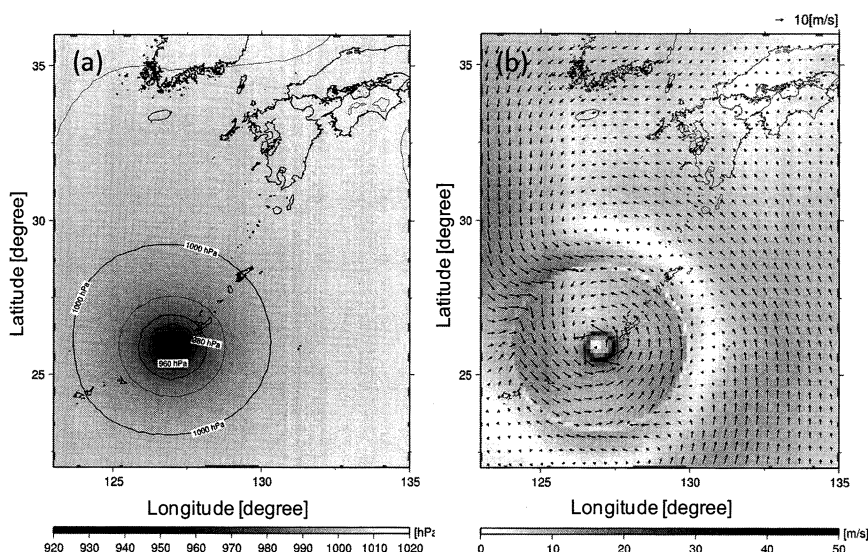


図-5 従来手法(気象庁台風ボーガス手法)による初期の(a)地上風速と(b)海面気圧の分布

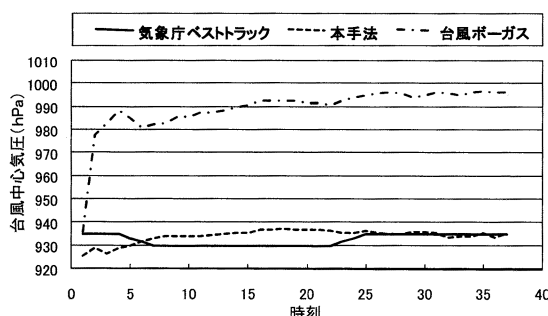


図-6 台風9918号の36時間予測による強度の時間変化

ないために、計算初期に人工的ショックが生じ、急激に減衰してしまったものと推測される。また、那覇に最接近した時(9月22日11時UTC)の観測データ(気圧969hPa, 風速32.2m/s)と比較したところ、本手法による予測精度(気圧954hPa, 風速37.6m/s)は従来手法のそれ(気圧1007hPa, 風速24.3m/s)を大幅に上回っていることが確認できた。

以上より、高精度な台風予測のためには台風ボーガス手法の選択が極めて重要となり、本研究による「渦位に基づく台風ボーガス手法」は、その合理性・実用性・計算精度の全ての面において最適な手法であると言える。今後、さらに多くの台風事例計算を行い、詳細な精度検証を行うことで、本手法の有用性及適用限界を示す必要があると言える。

5. 結 語

本研究では、従来の気象庁ボーガス手法の問題点を解消する新しい手法として渦位に基づく台風ボーガス手法

を構築し、従来手法との相違について比較し、メソ気象モデルMM5による予測精度の検証を行った。本手法による台風強度予測の結果は、従来手法に見られた初期の人工的ショックが生じず、計算期間を通じて高精度に予測できることが明らかとなった。今後、現業の台風予測においても本手法が活用されることで、海岸災害を引き起こす来襲台風の進路・強度予測の精度が改善されると期待できる。

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)18360236による成果であることをここに付記する。

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.
- (財)日本気象協会 (2005): 台風時の内湾海上風推算の研究(その1) 報告書, 日本財団助成, 101p.
- 吉野 純・村上 智一・林 雅典・安田 孝志 (2006): 高潮計算精度に及ぼす入力台風気象場の再現性の影響, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.1276-1280.
- 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, 第54巻, pp.316-320.
- 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.