

台風ボーガスの高度化による 数値予報モデルを用いた海上風推算手法の精度向上

中野俊夫¹・大澤輝夫²・吉野 純³
益子 渉⁴・河合弘泰⁵・松浦邦明⁶

台風により発生する強風や波浪・高潮を高精度に推算することは、海岸工学上、極めて重要な問題である。本研究は、台風ボーガスの高度化および 4 次元データ同化の検討を通して、数値予報モデルの精度向上を図り、一般性のある海上風推算手法の確立を目指したものである。台風ボーガスの高度化、4 次元データ同化を行った結果、台風の中心気圧、進路の推算精度が向上することが確認された。また、この手法で推算された海上風を周防灘・八代海に高波・高潮をもたらした 10 事例で比較したところ、従来の簡易的な推算手法より精度の高いことが確認された。

1. はじめに

台風による局地的な強風や波浪・高潮の再現は、防波堤、護岸の設計をする上で、重要な問題である。これまで台風時の高波・高潮計算において、その入力となる風の与え方には、2 次元台風モデルで気圧を同心円状と仮定して風速分布を求め、Mascon モデルで地形の影響を評価する手法が用いられてきた（例えば、河合ら、2004）。しかし、この手法には、①対流活動や前線との相互作用などから生じる台風の非対称性を表現することができない、②海上と陸上の風速差など地形影響を精密に表現することができない、という問題があり、その精度が波浪・高潮の精度に影響を与えてきた（橋本ら、2000）。一方で、近年では、気象理論の進歩と計算機性能の著しい向上により、数値予報モデルを用いた高度な推算手法も用いられるようになってきた（大澤ら、2001）。

しかし、数値予報モデルを用いる場合においても別の問題があることが指摘されている。例えば、初期・境界値を与える気象庁領域客観解析値（RANAL）では、暴風・強風半径が小さな台風の場合、中心付近のシャープな気圧低下がモデルの解像度では表現できないため、中心気圧を浅めに設定する作業を組み込んでいる。したがって、そのまま高解像の推算に適用したとしても定量的に問題があるため、台風ボーガスという人工的な台風を投入する必要がある。また、数値予報モデルでは、2 次元台風モデルのように台風の進路や強度を自由に制御することが困難であるため、観測値との位相のずれが生じ

ないように、どのように 4 次元データ同化を行うべきかが重要な検討課題となっている。

そこで、本研究では、台風ボーガス手法の高度化およびデータ同化の検討を通して、台風の強度、進路の推算精度向上を図り、一般性のある高精度な海上風推算手法を確立することを目的とした。

2. 計算手法

(1) 数値予報モデル

数値予報モデルには、メソ気象モデル MM5 を用いた。MM5 (5th generation Mesoscale Model) は、ペンシルバニア州立大学と米国大気科学センターにより開発された圧縮性の非静力学モデルで、雲物理過程、放射過程、境界層過程、地表面過程を含んでいる。計算領域の設定においては 2-way ネスティングが可能になっており、本研究では水平格子間隔 13.5 km (140×140)、4.5 km (271×181) 格子の 2 領域を設定した。図-1 に、計算領域を示す。鉛直方向の気圧準拠座標については、地表から 70 hPa まで 32 層を設定し、最下層を $\sigma=0.997$ として、800 hPa より下層の大気境界層内に 12 層を集中させた。初期・境界値には、RANAL (20 km 格子)、海面温度には気象庁 Near-goos (0.25 度格子) を与えた。

(2) 従来の推算手法

従来の推算手法では、台風域内は、気圧分布を同心円状と仮定した Myers の式

$$P=P_c+\Delta P \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \cdots \cdots \cdots (1)$$

で与え、傾度風の関係から風場を求めた。ここで P_c は中心気圧、 ΔP は周辺気圧と中心気圧との差、 r_0 は気圧傾度が最大となる半径である。また、この場に台風の進行速度を非対称成分として考慮した。台風域外は Caldone ら (1969) の大気境界層モデルを用いた。地形によって気流の方向や強さが変化する効果は、Mascon モデルで評価した（磯崎ら、1998）。

1 修(理) (財)日本気象協会首都圏支社調査部応用気象課
2 正会員 博(理) 神戸大学助教授海事科学部
3 正会員 博(理) 岐阜大学助大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻
4 気象庁気象研究所台風研究部
5 正会員 修(工) (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工学部海洋・水理高潮研究室長
6 水修 (財)日本気象協会首都圏支社調査部応用気象課

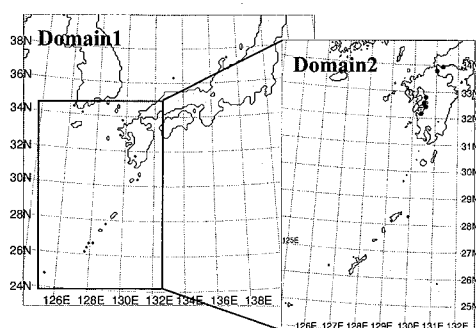


図-1 計算領域図 (●は観測地点)

3. 台風強度・進路の推算精度の検討

数値予報モデルを用いて台風に伴う風速の推算を行う場合、台風の強度と進路（台風中心の移動経路）を精度よく推算することが重要である。そこで、台風ボーガス手法の高度化およびデータ同化の検討を通して、台風の進路、強度の推算精度向上を図った。

(1) 台風ボーガス手法の検討

MM5 には既にオリジナルの台風ボーガス (Low-Nam・Davis, 2001) が実装されている (以降、既存ボーガス)。しかし、この台風ボーガスは、中心気圧を陽に設定できないため、中心気圧を現実の値に合わせるためには最大風速などのパラメータを適宜調整する必要がある、このパラメータがしばしば非現実的な値となる。そこで、より現実的な場を再現するために気象庁 ANL ボーガス (上野, 2000) に準じて作成された台風ボーガス (大澤, 2005) (以降、新ボーガス) を用いてその有用性について検討した。この新ボーガスは、気圧分布を Fujita (1952) の経験式を用いて表し、高度 D 値 (台風半径内の等圧面高度 Z の周辺値からの偏差) の 3 次元構造を、複数の台風のコンボジット解析から求められた解析関数を用いて記述するものである。既存ボーガスと新ボーガスの主な相違点を表-1 に示す。1999 年 9 月 22 日 21 時の台風 9918 号を例に、既存ボーガスと新ボーガスの比較を図-2 に示す。この図は気象庁 RANAL に各ボーガスを投入した際の、各解析値の台風中心からの距離と、その距離における平均気圧、及び平均風速の関係を示している。

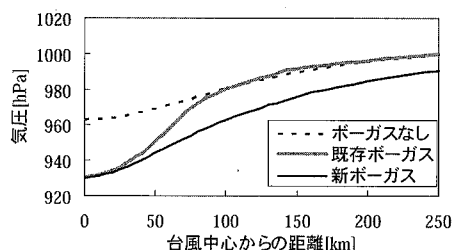
ベストトラック解析値によると、この時刻における台風 9918 号は、中心気圧が 930hPa で最大風速は 46.2 m/s であった。ところが、気象庁 RANAL (ボーガスなし) では、中心気圧が 960 hPa と浅く、最大風速も 31.9 m/s と小さい。ボーガス投入後は、既存ボーガス、新ボーガスとも、中心気圧はベストトラックに近い値を再現している。ただし、既存ボーガスは、中心気圧 930

hPa を再現するためには、最大風速を 70 m/s に設定する必要があったのに対し、新ボーガスでは最大風速も 41.7 m/s と現実に近い値を示していた。この違いは、新ボーガスが風と気圧の関係に傾度風を仮定しているのに対し、既存ボーガスは地衡風を仮定しているためと考えられる。

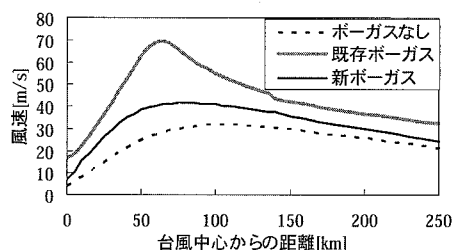
以上のことから、新ボーガスは、既存ボーガスと比較して現実的な場を再現できることが分かる。

表-1 既存ボーガスと新ボーガスの違い

	既存ボーガス	新ボーガス
基本となる場	Rankin 渦	Fujita の気圧分布
パラメータ	最大風速、 最大風速半径など	中心気圧、周辺気圧、 気圧分布パラメータなど
風と気圧の関係	地衡風	傾度風
要素	風、高度、気温、湿度	風、高度、気温



(a) 台風中心からの距離と気圧の関係



(b) 台風中心からの距離と風速の関係

図-2 台風ボーガス投入前と投入後の比較

次に、周防灘に高波・高潮をもたらした 6 つの台風 (台風 9711, 9719, 9918, 0215, 0416, 0418 号) を対象に、既存ボーガスと新ボーガスを初期・境界値に投入した場合の台風強度・進路の推算精度の比較を行った。計算を行う期間は、各台風が福岡県の苅田港に高波をもたらした 30 時間前から 36 時間とした。この計算では、台風ボーガス自体の影響を評価するために 4 次元データ同化は使用していない。図-3 に、既存ボーガス、新ボーガスの推算時間ごとの中心気圧誤差・進路誤差を示す。

中心気圧誤差は、既存ボーガス、新ボーガスとも推算時間が長くなるにつれて次第に増加し、36 時間後には、

既存ボーガス 10 hPa, 新ボーガス 13 hPa に達していたが, 両者に大きな相違はなかった. なお, 両手法とも計算開始後 3 時間で誤差が 10 hPa に増加していたが, これはスピニングの影響と考えられる. 進路誤差も, 推算時間が長くなるにつれて増加し, 既存ボーガスでは 36 時間後に約 200 km に達していた. 一方, 新ボーガスは推算時間 6 時間までは, 既存ボーガスと同程度の進路誤差であったが, 12 時間を過ぎてからは大きく増加せず, 36 時間後では既存ボーガスの約半分の 100 km 程度の誤差であった.

以上のことから, 新ボーガスを導入することにより, 中心気圧の推算精度は大きく変化しないものの, 進路推算誤差を減少させることから, 新ボーガスは推算精度を向上させることが分かる.

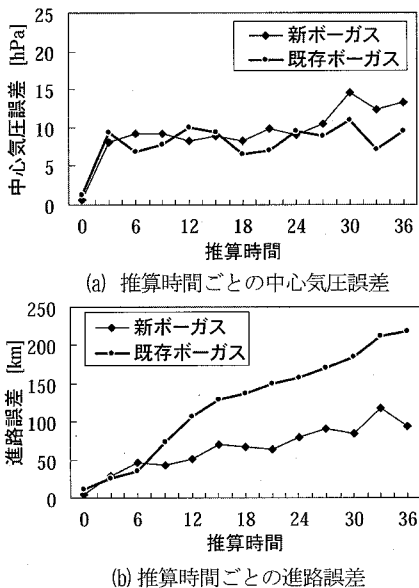


図-3 台風ボーガス投入前と投入後の比較

(2) 4 次元データ同化の検討

前節で述べたように, 台風の推算では中心気圧誤差・進路誤差ともに, 推算時間に比例して増加する傾向がある. そこで, 台風ボーガスを投入した解析値を 4 次元同化することにより, 推算誤差の減少を図った. 4 次元データ同化は, まず粗い格子間隔 (18 km) で 1 度計算を行い, それに新ボーガスを投入することにより 3 時間ごとの解析値を作成し, この解析値を同化に用いた. 図-4 に, ①ボーガスなし, ②新ボーガス, ③新ボーガス+データ同化について, 推算時間ごとの中心気圧誤差・進路誤差を示す. 対象台風は, 前述の台風 6 事例とした.

中心気圧は, ボーガスなしでは, 初期の段階で既に約 20 hPa の誤差が生じていたが, 新ボーガスを投入する

ことで特に推算期間の前半で推算精度が改善されていることが分かる. さらにデータ同化を行うことで, 計算期間の後半で誤差が約 5 hPa 減少した. 進路は, ボーガスなしでは, 推算時間が長くなるにつれて誤差は大きくなり, 36 時間後では 98 km に達した. これに対して新ボーガスを投入した場合には, 進路への影響は小さく, 36 時間後で 94 km と変化は小さかった. この理由としては, 新ボーガスは RANAL に投入されている台風ボーガスと同じアルゴリズムであり, 進路に大きな変化を生じなかったことが考えられる. しかし, さらにデータ同化を行った場合は, 進路誤差は減少し, 36 時間後で 83 km と推算期間の後半を中心に 10~20 km ほど改善された.

以上のことから, 新ボーガスに 4 次元データ同化を行うことにより, 推算精度が向上することが分かる.

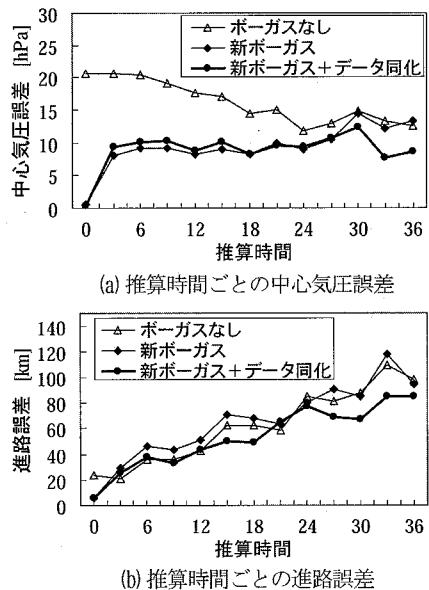


図-4 4 次元データ同化前と同化後の比較図

4. 従来の海上風推算手法との比較

従来の推算手法と, 新ボーガスに 4 次元データ同化を行う新手法とで, 海上風推算精度の比較を行った. ただし, データ同化される台風ボーガスは微細地形の影響による気圧場や気流の歪みまでを詳細に表現できるものではない. そのため, 複雑な地形の影響を受けやすい地域でデータ同化を行う場合は, 実現象と違う気象場に合わせこむことになる. そこで本研究では, 4 次元同化期間には台風が九州上陸する 3 時間前までとした.

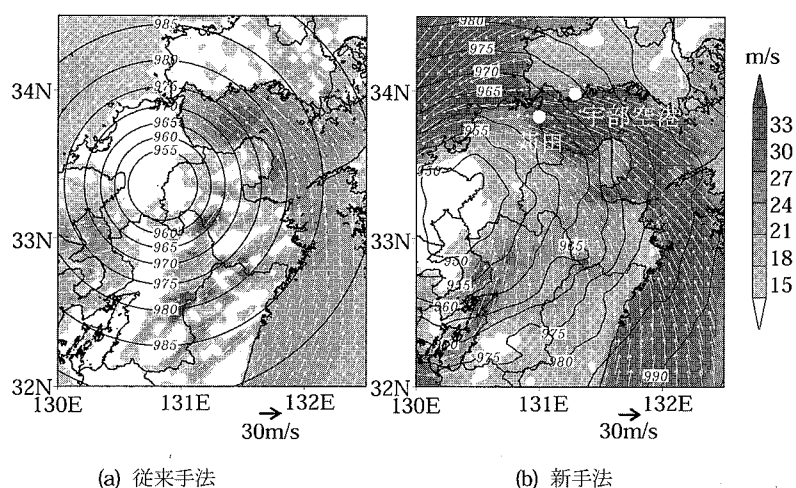


図-5 各手法による 10m 高度風速 (陰影部, 単位: m/s) と海面更正気圧 (実線, 単位: hPa) の分布 (1999年 9月24日 7時, ○は観測地点)

(1) 台風 9918 事例を対象とした検討

近年, 八代海・周防灘でもっとも被害が大きく, 牛深や日田, 大分などで観測開始以来の最大風を観測した台風 9918 事例について検討を行う。台風 9918 号は, 周防灘を 9 月 24 日 8 時頃に通過した。通過前の 7 時には荻田港で 33.8 m/s, 宇部空港で 31.9 m/s の最大風速を観測した。その時刻の 10 m 高度風速と海面更正気圧の分布を図-5 に示す。また, 図-6 には荻田港と宇部空港における従来手法と新手法の風向風速の経時変化を示す。

従来手法では, 周防灘など地形の収束する地域や, 標高の高い地点に向かって風が吹き込む地域で比較的強い風を推算したが, 荻田港や宇部空港の経時変化では, 台風の目が通過した後に強風を推算し, 台風通過前の風速は過小評価であった。一方, 新手法では, 台風によって生じた強風が, 豊後水道を抜け, 国東半島を迂回して周防灘に吹き込む様子が表現されており, 特に海上では, 従来手法より全体的に強い風速が推算されていた。荻田港や宇部空港では, 台風の目が通過する前の 24 日 7 時に, 荻田港 34.5 m/s, 宇部空港 31.4 m/s の推算値が得られ, 観測値とほぼ一致している。

天気図によると, 台風 9918 号は, 九州を通過する時刻には, 前線が解析されており, 軸対称性は崩れ, 台風の前面に強風域が生じていた (Veltcheva ら, 2002)。しかし, 台風の気圧分布を同心円とする従来の推算手法では, Mascon モデルを用いることで地形による風場の変形は表現できるが, 台風の構造上の非対称性を考慮することはできない。そのため, 従来手法でも台風の進行方向の右側に強風域はある程度推算できるが, 台風前方の強風までは十分に再現できなかった。一方, 新手法では, 特に周防灘で気圧傾度が大きくなるなど気圧分布に

非対称性があり, この非対称性も台風前方の強風を再現できた理由の一つと考えられる。

また, 従来手法と新手法の風速差が顕著であったもう一つの理由としては, 粗度の扱いが考えられる。従来手法では陸上と海上の粗度の違いを直接的には考慮しておらず, 陸上と海上の風速の違いを十分には表現できないのに対し, 新手法では, 粗度の差などに代表される地形の影響を大気力学に基づいて詳細に表現できる。

以上の考察により, 新手法におけるメリットは, ①対流活動や中緯度に特有な前線との相互作用など, 様々な

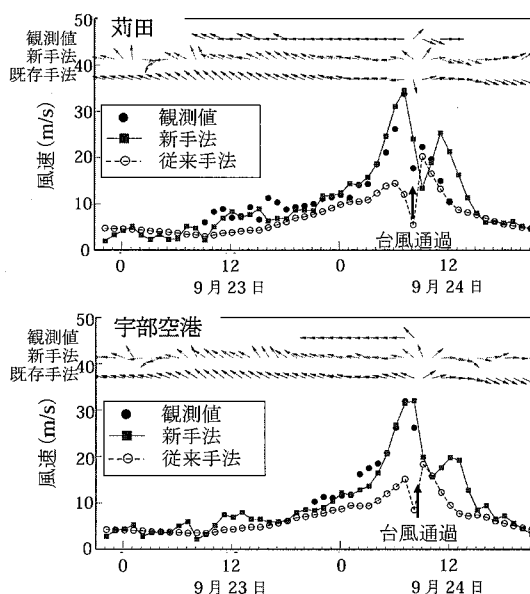


図-6 各手法による風向風速の経時変化

原因から生じる台風の非対称性を表現することが可能である、②海上と陸上の風速差など、地形影響を精密に表現することが可能である、という点にあると言える。

(2) 10事例を対象とした検討

新手法の一般性を確かめるために、八代海・周防灘に高波・高潮をもたらした10事例(台風9711, 9719, 9918, 0014, 0205, 0215, 0306, 0314, 0416, 0418)を対象に48時間の推算計算を行い、従来手法と新手法の精度の比較を行った。検証に用いる観測地点としては、比較的海上風を捉えていると考えられる地点として、八代海・周防灘近辺の港湾関係省庁の観測地点(熊本港、水俣港、八代港、三角港、荻田港、宇部空港)を使用した。

表-2に従来手法と新手法による風速の平均二乗誤差(RMSE)、相関係数の統計値を示す。これらの統計値は、それぞれの事例における全地点の48時間の海上風の観測値と推算値から算出したものである。

従来手法には、相関係数にばらつきがあり、0.7以上のものは4事例あり、0.5を下回るものも4事例あった。全事例の平均値では0.49である。RMSEは3.5~9.0 m/sで全事例の平均は5.08 m/sであった。一方、新手法では、相関係数が、7事例で0.7以上であり、T0416を除くすべての事例で従来手法より相関係数が高く、全事例の平均値でも0.76と高い相関があった。RMSEは、2.5~7.0 m/sと7事例で従来手法よりRMSEが小さく、全事例でも4.85 m/sと従来手法より小さかった。以上のことから、新手法により推算された海上風は、従来手法より精度が高く、一般性のある推算手法であると判断される。なお、T9719, T0215, T0416事例で従来手法より精度が向上しなかったのは、これらの事例では、台

風の挙動を十分に制御することができず、進路推算誤差が大きくなったためと考えられる。この問題を解決するためには、同化手法の改善を行い、さらに進路の推算精度を向上させる必要があると考えられる。

5. 結 語

本研究では、一般性のある高精度な海上風推算手法を確立することを目的として、台風ボーガスの高度化とデータ同化の検討を行い、その推算精度を検証した。主な結果は以下のようである。

(1)気象庁ANLボーガスに準じた新しいボーガスを用いることにより、既存ボーガス使用時と比較して進路推算誤差を抑えることができた。さらに、4次元データ同化を行うことにより、進路の推算精度が向上した。

(2)本研究で開発した手法を用いると、従来手法と比較して大半の事例で海上風の推算精度が向上しており、一般性のある精度の高い推算手法であると考えられる。ただし、台風の挙動の制御には、まだ改善の余地があり、同化手法のさらなる改善が今後の検討課題である。

本研究は日本財団助成事業の成果であり謝意を表する。

参 考 文 献

- 磯崎一郎・鈴木靖(1998): 波浪の解析と予報, 東京大学出版会(第5章), pp. 65-108.
- 上野 充(2000): 数値モデルによる台風予報, 気象研究ノート(第3章), 197号, pp. 131-286.
- 大澤輝夫・竹山剛生・安田孝志(2001): メソ気象モデルと台風ボーガスを用いた伊勢湾台風時の風の場のシミュレーション, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 281-285.
- 大澤輝夫(2005): MM5用台風ボーガスツールの作成と2004年の5つの台風を対象とした動作検証, 月刊海洋, 号外42号, pp. 178-185.
- 河合弘泰・富田孝史・平石哲也・金度三・姜閔求(2004): 台風0314号による大韓民国馬山湾の高潮追算と現地調査, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 1361-1365.
- 橋本典明・真期俊行・吉松みゆき(2000): 波浪推算法による台風9918号の異常波浪の再現計算, 港研資料, No.970, 33p
- Veltcheva, A.D・河合弘泰(2002): 台風の気圧分布の歪みと超傾度風を考慮した高潮推算, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 241-245.
- Caldone, V.J., W.J. Pierson and E.G. Ward (1969): Hindcasting the directional spectra of hurricane generated waves, 7th Offshore Technology Conference May 5-8, pp. 871-878
- Fujita, T. (1952): Pressure distribution within typhoon, Geophys. Mag. vol23, pp. 437-451
- Low-Nam, S. and C. Davis (2001): Development of a tropical cyclone bogussing scheme for the MM5 system, The Eleventh PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop, Boulder, Colorado, pp. 130-134.

表-2 従来手法と新手法の比較(網掛けは優れている手法)

事例	従来手法		新手法	
	RMSE (m/s)	相関係数	RMSE (m/s)	相関係数
T9711	5.45	0.32	2.89	0.71
T9719	4.80	0.22	5.60	0.40
T9918	6.07	0.64	4.70	0.85
T0014	5.78	0.84	3.07	0.84
T0205	4.00	0.43	3.70	0.56
T0215	4.23	0.43	5.70	0.63
T0306	6.06	0.50	3.31	0.74
T0314	5.85	0.72	3.18	0.79
T0416	3.84	0.62	6.79	0.58
T0418	8.61	0.74	6.23	0.85
全事例	5.08	0.47	4.85	0.76