台風渦位ボーガスに基づく東京湾地域における 可能最大風速の大気力学的評価

Dynamic Estimation of the Maximum Potential Wind Speed in the Bay of Tokyo Based on the Typhoon Potential Vorticity Bogussing System

吉野 純¹・岩本学士²・村上智一³・安田孝志⁴

Jun YOSHINO, Satoshi IWAMOTO, Tomokazu MURAKAMI and Takashi YASUDA

In this study, the typhoon potential vorticity bogussing system (TYPVB) and high-resolution mesoscale meteorological model (MM5) are utilized to estimate the maximum potential wind speed in the bay of Tokyo. TYPVB can initialize the 3-dimensional well-matured typhoon structure for MM5 entirely consistent with the atmospheric dynamics, and MM5 can make it strike the arbitrary geographical area wherever powerful measures to prevent storm surge disaster are demanded. As a result of the appropriate settings of typhoon environment in TYPVB, it becomes obvious that well-matured typhoons which are modeled as Typhoon Vera (1959) causes a resultant wind speed of about 40m/s in the bay of Tokyo, where the worst wind speed is weakened by about 5m/s owing to the shadow effect of the upstream peninsula.

1. はじめに

可能最大級台風の上陸に伴う可能最大風速とその時空間分布を正確に評価することは、特に、背後圏に莫大な人口と資産を抱え、高潮災害の危険度の高い三大湾において、計画潮位・波高や避難対策などの適切な見直しを行う上で不可欠となってくる。

ここで「可能最大風速」とは、現在および将来の気候条件下で発生し得る可能最大級台風に伴う地上風速の物理的最大値のことを指し、今日までは、簡便かつ経験的な極値統計解析や2次元台風モデルに基づいて評価されるのが一般的であった。例えば、河合ら（2002）や増田ら（2003）では、伊勢湾台風をモデル台風として想定し、これと全く同じ強度変化で東京湾に直撃させることで可能最大風速を評価している。しかしながら、台風は上陸箇所周辺の地形の影響を受けて特有の強度変化を示すため、このような仮定が妥当であるとは言い難い。これら従来手法は、その簡便さ故に、精度面の問題があるのみならず、再現期間設定の任意性の問題や将来気候への適用性の問題も残されている。そのため、可能最大風速を求めるという目的においては必ずしも最適な手法であるとは限らない。本来、台風は大気力学に基づく数理的な取り扱いが可能であることから、統計モデルをベースと

する従来手法ではなく、数理モデルをベースとした高解像度メソ気象モデルによる可能最大風速の評価がより合理的であると考えられる。

このような背景の中、吉野ら（2009）は、従来手法に代わる全く新しい方法として、高精度かつ大気力学的な台風渦位ボーガスとメソ気象モデルの組み合わせによる新手法を提案している。台風渦位ボーガスとは、メソ気象モデルPSU/NCAR MM5（Dudhia, 1993）のための台風初期値化手法のことを指し、軸対称定常台風モデル（Emanuelら, 2004）、軸対称台風渦位モデル（Emanuel, 1995）、及び、渦位逆変換法（Davisら, 1991）の組み合わせによって構成される。軸対称定常台風モデルおよび軸対称台風渦位モデルにより解析された十分に発達した台風渦位を環境場渦位の中に挿入し、渦位逆変換法を適用することによって、台風の内部構造を詳細に解像する初期条件を作成できる。これを利用することで、実際の台風予報の高精度化に貢献することが実証されているだけでなく（吉野ら, 2010）、任意のモデル台風を設定し、任意の気候条件を想定することで可能最大風速を大気力学的に評価することも実証されている。吉野ら（2009）によると、伊勢湾での可能最大風速は、現在気候では約45m/s、将来気候（A1Bシナリオ2099年）では約50m/sとなり、それに伴う名古屋港での可能最大高潮は、現在気候では4.5m、将来気候では6.5mとなり、伊勢湾台風の高潮3.55mを大幅に上回る可能性が指摘されている。

しかし、この新手法の問題点として、伊勢湾台風をモデル台風として設定した場合には、伊勢湾以外の地域（例えば、東京湾）にそのまま適用することは難しい点が挙げられる。台風の進路や強度は周辺環境場に強く依存

-
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 正会員	博(工)	(独法)防災科学技術研究所 水・土砂防災研究ユニット
4 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 改良された台風渦位ボーガスの計算フロー

することから、伊勢湾台風をモデル台風を設定した上で他地域に適用する場合には、台風渦位のみならず環境場渦位の設定をも適切に改変する必要があると考えられる。

そこで、本研究では、伊勢湾台風をモデル台風とし、台風渦位ボーガスにおける環境場渦位の設定を適切に改変することで、伊勢湾台風規模の台風が東京湾地域周辺に上陸できるような初期条件を作成し、吉野ら (2009) と同様にして、東京湾地域における可能最大風速を大気力学的に評価することを目的としている。

2. 数値計算の方法

本研究では、台風渦位ボーガスに対して環境場渦位の設定方法に改良を加えることで、メソ気象モデルMM5のための初期条件を多数作成し、東京湾地域における可能最大風速を評価する。図-1は、それを実現するための本研究で提案する新たな計算アルゴリズムである。

数値計算の大まかな手順としては、1) モデル台風を設定し、台風環境場の適切な改変を行う、2) 台風渦位ボーガスを用いて、台風設定された台風環境場に基づき可能最大級台風を組み込んだ初期条件を多数作成する、3) メソ気象モデルMM5を用いて、作成された初期条件を元に多数の台風進路の下で可能最大風速を評価する、の3段階の計算プロセスによって構成される。以下に、各計算プロセスに関する概要を記述する。

(1) 台風環境場の改変設定

ここでは、まずモデル台風を設定し、台風渦位ボーガスに入力する台風環境場の合理的な改変を行う。本研究では、モデル台風として伊勢湾台風 (1959年9月25日21

時～同27日09時)を設定し、計算対象地域は東京湾地域としている。

伊勢湾台風は、昭和の三大台風の1つに挙げられる既往最大規模の台風事例であり、可能最大級台風を生み出す台風環境場として適切な選択であると言える。台風環境場の設定のために、同期間の $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ メッシュ (6時間毎) のECMWF 全球客観解析データERA40を使用する。また、海面温度には、1999年9月平均の $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ メッシュ (6時間毎) のNCEP/NOAA OI SSTデータを使用する (1959年9月当時の気象庁の海洋気象ブイによる海面温度の観測とよい一致を示す)。

このように設定された台風環境場のデータセットに対して、何の改変も加えずにその後の計算プロセスを実施した場合には、当然ながら台風は伊勢湾地域の近傍を通過することになる。よって、可能最大級台風が東京湾地域に直撃しやすくなるような台風環境場の適切な改変が要求される。本研究では、1) 台風環境場を渦位順変換 q する、2) 渦位平均場 $\bar{q}$ (1959年9月平均) と渦位偏差場 q' に分離する、3) 渦位偏差場 q' に対して東方向に 3.25° (伊勢湾と東京湾との距離) だけ平行移動して修正された渦位偏差場 q'^* を得る、4) 修正された渦位偏差場 q'^* と渦位平均場 $\bar{q}$ を再結合して改変された環境場渦位 $q^* = \bar{q} + q'^*$ を得る、5) 渦位逆変換法により改変された台風環境場を得る、6) これらの一連のプロセスを計算期間 (6時間毎) に渡って繰り返す、の手順により台風環境場の改変を行う。ここで渦位偏差場とは、台風の進路に強く影響する亜熱帯高気圧 (太平洋高気圧) や中緯度トラフ/リッジといった短周期的な渦位成分を示すことから、これを経度方向 (東方向) に平行移動させることによって、モデル台風である伊勢湾台風が東京湾地域に直撃しやすい気圧配置へと合理的に改変できる。一方で、渦位平均場は、地域固有の長周期の渦位成分を示しており、本研究の目的においてこれを改変することは好ましくない。

(2) 台風渦位ボーガス

ここでは、台風渦位ボーガスを用いて、用意された台風環境場に基づきメソ気象モデルMM5のための台風初期値化を行う。台風渦位ボーガスは、軸対称定常台風モデル (Emanuelら, 2004)、軸対称台風渦位モデル (Emanuel, 1995)、及び、渦位逆変換法 (Davisら, 1991) により構成され、気象庁台風ボーガス (大澤ら, 2005) に比べて経験的要素が少なく台風内部の軸対称構造を大気力学的に解析できるだけでなく、台風環境場に応じて非軸対称構造をも初期値化できるという利点を有しており、本研究の目的において最適な手法であることは疑う余地がない。台風渦位ボーガスに関する詳細については、吉野ら (2007, 2008, 2009, 2010) を参照して頂きたい。

図-2 MM5の計算領域と初期台風位置

図-3 MM5により計算された計50ケースの台風進路

本研究では、まず、前節で設定された台風環境場に基づき、軸対称定常台風モデルを用いて伊勢湾台風が1959年9月25日21時に位置した東経134.8度、北緯26.5度における可能最大強度を算出（中心気圧901hPa）する。熱力学的には、定常状態に達した台風はこの強度まで発達できると考えられる。次に、軸対称台風渦位モデルによりこの強度にまで発達した台風の軸対称構造を評価し、台風渦位へと順変換し、環境場渦位の中に挿入する。メソ気象モデルMM5により、微妙に異なる多数の進路で台風を東京湾に直撃させるためには、中心位置の異なる多数の初期条件を作成する必要がある。ここでは、北緯26.5度に緯度を固定し東経134.55度～東経138.90度の間を9km間隔毎にずらしながら台風渦位を投入し、渦位逆変換法により計50ケースの初期条件（水平解像度9kmメッシュ）を作成する（図-2）。初期条件は、東西風速、南北風速、鉛直風速、気温、ジオポテンシャル高度、相対湿

度の3次元データ（1,000hPaから70hPaまで）からなる。

(3) メソ気象モデルMM5

最後に、台風渦位ボーガス手法により作成された多数の初期条件を元に、メソ気象モデルMM5（Dudhia, 1993）を用いて、計50ケースの可能最大級台風を東京湾地域に直撃させ可能最大風速を大気力学的に算出する。

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り、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。吉野ら（2006, 2010）などの一連の研究により、MM5による台風進路や台風強度に関する予測結果の高精度性が既に実証されている。

計算領域については、図-2に示す通りであり、台風の強度や移動を表現できる領域I（9km×9km）と、局地的な地形の影響を表現できる領域II（3km×3km）によって構成される。いずれの領域も、1959年9月25日21時～同27日09時の計36時間の時間積分を行う。基本的な計算設定については、吉野ら（2009）に準拠している。

3. 東京湾地域に上陸する可能最大級台風がもたらす可能最大風速

ここでは、台風渦位ボーガスとメソ気象モデルMM5による計50ケースの計算結果を元に、可能最大級台風がもたらす可能最大風速を評価した。

(1) 可能最大級台風の進路と強度

本研究によって初めて導入された台風環境場の改変設定を用いることで、メソ気象モデルMM5中において、可能最大強度に達した伊勢湾台風を、大気力学的に矛盾なく東京湾地域に直撃させることに成功した。

図-3は、メソ気象モデルMM5により計算された計50ケースの台風進路を示す。初期条件において台風中心位置を東西にずらしながら配置しているため、これら多数の台風は東京湾を中心として東西100km程度のばらつきをもって上陸していることが分かる。いずれも伊勢湾台風の進路と良く類似した進行速度や進行方向を取っており、本研究の台風環境場の改変設定により、伊勢湾台風が東京湾地域に直撃しやすい気圧配置へと適切に改変できたものと見なせる。

図-4は、メソ気象モデルMM5により計算された計50ケースの台風強度の時系列を示す。初期に可能最大強度（中心気圧901hPa）にあった台風は、いずれも北進することで徐々に減衰し、上陸時には925hPa～930hPaとなる。北進することで海水面温度が徐々に低下するだけでなく、中緯度トラフに伴う強い風の鉛直シアによって台風の発達が抑制されるものと推測される。これらの数値は、吉野ら（2011）によって評価された伊勢湾台風の

図-4 計50ケースの可能最大級台風の中心気圧の時系列

図-5 計50ケースの東京港における風速(10m高度)の時系列

図-6 (a)東京湾地域と(b)伊勢湾地域における可能最大風速(10m高度)

上陸時の観測中心気圧(929hPa)ともほぼ一致しており、台風環境場の改変設定が適切に機能しているものと見なせる。また、上陸後の台風強度の減衰が、台風上陸箇所の微妙な違いに応じて大きく異なっている点についても興味深い。台風が、東京湾よりも西を上陸・通過する場合には台風強度は急激な減衰(36時間後に約975hPa)を示すが、東京湾よりも東を上陸・通過する場合には上陸時の勢力を維持したまま(36時間後に約940hPa)となる。このような違いは、東京湾地域の地形に起因しているものと考えられる。東京湾の西側では、東側に比べて、伊豆半島や関東山地などの大規模な山岳地形の影響を受けやすく台風が急激に減衰しやすい環境にあるものと考えられる。また、台風が東京湾の東側を通過する場合には、大規模な山岳地形も存在しない上に、海面からの熱・水蒸気供給が及びやすい位置にあるため、西側を通過する場合に比べて、台風勢力を維持しやすい環境にあるもの

と推測される。

以上の結果は、従来手法のように伊勢湾台風の強度変化と同じであると仮定して他地域(例えば、東京湾)に適用した場合には、無視できない多大な誤差を伴う可能性があることを意味しており、本研究のように大気力学に基づく評価手法でなくては解決できない問題であると考えられる。

(2) 東京湾地域における可能最大風速

東京湾地域を直撃する計50ケースの可能最大級台風を統合的に解析することで、これらが最悪の進路で接近した場合に生じる可能最大風速を格子点毎に評価した。

まず、図-5に、東京港における計50ケースの地上風速(10m高度)の時系列を示す(図-2の領域IIのデータを使用)。台風進路によって風速の極大値は大きく異なっており、進路の微妙な違いが風速にも大きく影響していることが分かる。可能最大級台風が最悪の進路で東京港に

接近した場合（東京湾のすぐ西側を通過するケース）、可能最大風速は約42m/sとなると見積もられる。この値は、吉野ら（2009）によって評価された伊勢湾における可能最大風速（約47m/s）に比べて、約5m/s程度（約10%程度）低い。東京湾の西側を通過する台風は、前述したように、山岳の影響を受けて上陸後に急激に減衰していることが影響しているものと推測される。

次に、図-6(a)に、格子点毎に評価された計50ケース・計36時間の中での地上風速（10m高度）の極大値分布、すなわち、東京湾地域における可能最大級台風がもたらす可能最大風速の分布を示す（図-2の領域IIのデータを使用）。また対比のために、図-6(b)に、同様にして算出された伊勢湾地域における可能最大風速の分布を示す（吉野ら、2011）。東京湾内においては、40m/s以上の可能最大風速となり、房総半島東岸では、45m/s以上の可能最大風速となることが見て取れる。同じ規模の台風が直撃しても、前述したように上陸後の強度変化に大きな違いがあるため（図-4）、可能最大風速の分布にも地域差が生じたものと考えられる。一方、伊勢湾では、房総半島東岸の可能最大風速に近い45m/sとなっており、伊勢湾地域に比べて東京湾地域は、台風による風災害の影響を受けにくい地勢にあると推察される。伊勢湾では、湾口が南東方向に広く開けており、接近する台風に伴う強風が直接入り込みやすい地形となっている。一方で、東京湾では、湾口が比較的狭い上に、東側に位置する房総半島によって風の影となることで風速は弱まり易くなるものと推測される。

以上の結果は、いずれも、大気力学的な評価手法を採用したからこそ得られた新しい知見であり、本研究により改良された台風渦位ボーガスとメソ気象モデルの併用は、日本各地の可能最大風速を高精度に評価する上で他に類を見ない極めて強力なツールとなることが期待される。

4. 結語

本研究では、伊勢湾台風をモデル台風を設定し、台風渦位ボーガスとメソ気象モデルMM5を使用することで、東京湾地域における可能最大風速を大気力学的に評価した。メソ気象モデルMM5において伊勢湾台風を伊勢湾以外の地域に直撃させるためには、台風環境場の適切な改変が必要となる。本研究では、台風渦位ボーガスにおける台風環境場の改変設定に関するオプションを新たに追加することで、伊勢湾台風を東京湾へと多数の進路設定の下で直撃させることに成功した。

台風渦位ボーガスによって作成された初期位置が微妙に異なる計50ケースの初期条件を使用して、メソ気象モデルMM5により東京湾地域の可能最大級台風を評価した。可能最大級台風が最悪の進路で上陸することによっ

て、東京湾では約40m/sの強風が卓越する可能性が明らかとなった。この風速規模は伊勢湾における可能最大風速（約45m/s）に比べて若干低く、同じ規模の台風が直撃したとしても、東京湾地域の周辺地形に起因して、台風に伴う強風の影響は伊勢湾ほど激甚なものにはならないと考えられる。

これらの結果は、本研究ならではの大気力学的評価により初めて明らかとなった科学的知見であり、従来手法に見られる非現実的な仮定は、深刻な誤差をもたらす可能性があると言い換えられる。今後、本手法を日本各地の沿岸地域に適用し、更に、吉野ら（2011）による地球温暖化の影響をも取り込んだ計算を行うことで、高精度でかつ信頼度の高い台風災害ハザードマップの早期の構築が待たれる。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金基盤研究（B）（2）21360234による成果であることをここに付記する。

参考文献

- 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。
- 河合弘泰・竹村慎治・原 信彦（2002）：東京湾における台風による高潮と高波の同時性と継続時間特性，海岸工学論文集，第49巻，pp. 251-255。
- 増田勝人・柴本秀之・仲井圭二・鈴山勝之（2003）：東京湾岸の想定高潮偏差と新たな計画偏差について，海洋開発論文集，第19巻，pp. 689-694。
- 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，海岸工学論文集，第54巻，pp. 316-320。
- 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。
- 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，海岸工学論文集，第56巻，pp. 396-400。
- 吉野 純・児島弘展・安田孝志（2010）：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，土木学会論文集B2，第66巻，pp. 391-395。
- 吉野 純・岩本孝士・安田孝志（2011）：地球温暖化の力学的影響評価のための台風渦位ボーガスの改良，土木学会論文集B2，第67巻，（印刷中）。
- 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.
- Emanuel, K. A., C. DesAutels, C. Holloway and R. Korty (2004): Environmental control of tropical cyclone intensity, J. Atmos. Sci., 61, pp. 843-858.