# 軸対称台風モデルによる台風強度に関する感度実験とその高精度化

Sensitivity Experiments on Typhoon Intensity Change Using a Highly Accurate Axisymmetric Typhoon Model

吉野 純<sup>1</sup>·岩本学士<sup>2</sup>·安田孝志<sup>3</sup>

## Jun YOSHINO, Satoshi IWAMOTO and Takashi YASUDA

In this study, the sensitivity experiments on typhoon intensity using an axisymmetric typhoon model developed by Yoshino et al. (2009) are performed in order to improve the accuracy of typhoon intensity predictions. The model enables us to predict the typhoon intensity change with low cost and high accuracy, owing to the use of a high-resolution axisymmetric solver. A number of sensitivity experiments indicate that the changes of typhoon's moving speed and vertical wind shear have a significant influence on the typhoon intensity change. It is found that the modification of the axisymmetric typhoon model incorporating realistic values for these sensitive parameters allows for reducing the forecast error of all typhoons in the 1999 Pacific typhoon season.

## 1. はじめに

Emanuel (2007) は, 1970年代以降, 熱帯大西洋の海 水面温度上昇は年々増加傾向にあり,海水面温度と熱帯 低気圧 PDI (Power Dissipation Index) との間に極めて高 い正の相関関係があると指摘している. PDIとは、熱帯 低気圧の発生数, 強度, および存在期間から評価される 「熱帯低気圧の活動度」を表現する物理的な単一指標で あり,地球温暖化による熱帯低気圧への影響を評価する ための指標として近年脚光を浴びている.この結果が示 すように、将来の温暖化に伴う海水面温度上昇により、 我が国に接近する台風の活動度も増大する可能性が高 く、それらに伴う災害外力も増大するものと懸念されて いる.これらの影響は、沿岸域、とりわけ大都市を背後 に持つ3大湾(東京湾,伊勢湾,大阪湾)の湾奥や低平 地において大きくなると予見されることから、想定され る海岸災害に対して適切な事前対策を施すためにも、気 象・海洋力学に基づく高精度な台風強度予測技術の確立 が不可欠となってくる.

台風は、一般的に中心付近で極めてシャープな構造 (台風の眼や壁雲)を有することから、高精度な台風強 度予測のためには、特に中心付近では1~10kmメッシュ 程度の雲解像スケールのメソ気象モデルの適用が必須と なる.近年の計算機資源の拡大により、各国の現業予報 機関の台風モデルも徐々に高分解能化が進んでいるもの の、依然として強度予測への適用には不十分である(気 象庁は、2007年に水平解像度24kmの台風モデルの運用

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	字生会員		岐阜大字大字院上字研究科境境エネルキ システノ 東政
3	フェロー	丁博	ーンへ) ム 号 以 岐阜大学教授大学院工学研究科環接エネ
J	/	-T- 14-	ルギーシステム専攻

を止め、水平解像度20kmの全球モデルと統合している). 台風は、熱帯域で発生し、高緯度で温低化するまで数日 間かけて数千kmを移動することもあり、長期間かつ広 域にわたる3次元メソ気象モデルの高分解能化には限界 があることから、計算コストが低くかつ高分解能な新し い台風モデルの導入が不可欠となる.

そのような背景の下,吉野ら(2009)は、一般的に用 いられている3次元メン気象モデルには頼らず, Emanuel (1995)の軸対称座標系気象モデルをベースにすること により、台風強度予測に特化した軸対称台風モデルを開 発している.軸対称座標系の採用により、3次元座標系 に比べて飛躍的に計算コストを低減させることが可能と なり、高効率でかつ高分解能な台風の軸対称構造と強度 の時間発展を予測できる.また吉野ら(2009)は、この 軸対称台風モデルの予測精度を検証することにより, 1999年の全台風に対する予測誤差は平均RMS誤差にし て約15hPaとなることを明らかにし、現業予報機関によ る台風強度予測に匹敵する精度を有することを確認して いる.しかしながら、このモデルは、軸対称という簡略 化と引き替えに計算コストの削減がなされているため, 精度面への影響についても十分に配慮する必要がある. 幾つかの台風においては,軸対称の仮定に起因するもの と見られる誤差が生じていることから、軸対称台風モデ ルの更なる高精度化のためにも適切なパラメタライズへ と改良する必要があると言えるだろう.

そこで本研究では、この軸対称台風モデルによる台風 強度予測の更なる高精度化を目的として、モデル中の各 種パラメータの台風強度に対する応答特性を多数の感度 実験より定量化し、それによって台風強度の主因子を抽 出することで、軸対称台風モデルの適切な改良を図りた い.更に、改良前と改良後の軸対称台風モデルを用いる ことで1999年の全台風に対するハインドキャスト実験を



行うことで,気象庁ベストトラックに基づく精度検証に よりその有用性を実証したい.

## 2. 軸対称台風モデル

本研究で使用する軸対称台風モデルは、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平面気象モデルをベースとしている.図-1は, 軸対称台風モデルの概念図を示す.このモデルでは,静 力学平衡,傾度風平衡,温度風平衡,および斜行平衡が 仮定されており,台風の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」の効果を鉛直1次元海洋混合層モデル により考慮でき,更には,台風周辺の環境場における 「風の鉛直シアー」や「上陸」の影響をも加味できる.

台風の内部構造を表現する半径r,流線関数ψ,および エントロピーχに関する時間発展方程式は、海水面温度 等の環境場パラメータを境界条件とすることで、対流圏 中層と境界層上端のボテンシャル半径R上にて計算され る.ボテンシャル半径Rとは、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する独立変数であ り、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、台風中心付近の強渦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 造を十分に分解することができる。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。

ここで、軸対称台風モデル中の各種設定パラメータを、 表-1に整理した.多数のパラメータは、大まかには「初 期渦パラメータ」、「環境場パラメータ」、「モデル物理パ ラメータ」、および「計算条件パラメータ」に大別され る.表中の太字の数値は、Emanuel (1995)の理想実験 で用いられている基準値(一定値)であり、必ずしも 個々の台風事例に見合った適切な値が設定されているわ けではなく、本来は環境場の変化に応じて、これら設定 パラメータの時間変化を適切に考慮する必要がある。そ こで吉野ら (2009)では、表-1の環境場パラメータであ る「海水面温度」、「対流圏界面温度」、「地表面の相対湿 度」、「対流圏中下層の相対湿度」、「発生時の中心緯度」、 「風の鉛直シアーの強さ」、および「環境場の海面気圧」 についてベストトラックや客観解析値(大気・海洋の月 平均場)に基づいて時々刻々と変化するような改良を加 えることで、現業予報機関に匹敵する高精度な台風強度 予測を実現している。

## 3. 台風強度に関する感度実験

ここでは、軸対称台風モデルの多数の設定パラメータ の中で、台風強度に大きな影響を与える支配パラメータ を把握するために多数の感度実験を行う.

## (1) 計算設定

表-1の設定パラメータに関して,基準値から大小多数 変化させることで感度実験を行った.感度実験の対象と なるパラメータ以外は,表-1の太字の基準値を計算期間 中に渡って一定値として与えた.いずれも,計算期間は 12日間とした.ただし,「風の鉛直シアーの強さ」に関 する感度実験のみ,計算開始10日以降に風の鉛直シアー が定常的に作用するように設定している.

## (2) 感度実験の結果

紙面の都合上,全ての感度実験を示すことはできない が、表-1には、各パラメータの定常状態(計算開始12日 後)での台風強度(中心気圧)を整理した.これらの感 度実験の結果から、 台風強度に対して特に影響の大きい 支配パラメータを同定することができた.特に,表中の 星印のパラメータの感度は大きく、高精度な台風強度予 測のためには、これらの高感度パラメータに対してより 現実的な値を入力する必要があると言える.環境場パラ メータについては、ベストトラックや客観解析値などに 基づいて,時空間的に高解像度で高精度な情報の入力が 比較的容易いことから、本節では、環境場パラメータの 感度特性を中心に考察する.多数の支配パラメータを有 するモデル物理パラメータについては、精度の高い観測 値をリアルタイムに入力することが現状では困難である だけでなく、比較的、時空間変化の小さなパラメータで あると考えられることから、本研究では考察や改良の対 象外とした。また、初期渦パラメータや計算条件パラメ ータについても、事例毎に変化させず、基準値に固定し

表-1	軸対称台風モデルの設定パラメータ,	感度実験の設定値	(太字は基準値),および,	感度実験による定常状態	(計算開始12日
	後)での台風強度(中心気圧)の一覧	笔. 星印は,中心気!	王40hPa以上の変化を示す高	<b>馬感度パラメータ</b>	

初期	パラメータ	設定値(太字は基準値)	定常状態(12日後)の台風強度(hPa)	
	初期台風の最大風速(m/s)	10, 15, <b>17.2</b> , 20, 25	1002, 931, <b>930</b> , 929, 929	*
渦	初期台風の最大風速半径(km)	50, 80, <b>100</b> , 150, 200	934, 929, <b>930</b> , 953, 1005	*
環境場	初期台風の影響距離(km)	200, 300, <b>350</b> , 400, 1000	1004, 931, <b>930</b> , 929, 927	*
	海水面温度(℃)	27, 28, <b>29</b> , 30, 31	939, 940, <b>930</b> , 923, 916	
	対流圏界面温度(℃)	-78, -77, <b>-76</b> , -75, -74	926, 928, <b>930</b> , 931, 933	
	地表面の相対湿度(%)	77, 78, <b>79</b> , 80, 81	917, 924, <b>930</b> , 936, 935	
	発生時の中心緯度(度)	15, <b>20</b> , 25, 30, 35	940, <b>930</b> , 916, 985, 925	*
	風の鉛直シアーの強さ(m/s) (200及び800hPa高度風の速度差)	0, 1.7, 5, 10, 15, 20	925, <b>930</b> , 942, 972, 989, 998	*
	風の鉛直シアー係数	0.01, 0.02, <b>0.03</b> , 0.04, 0.05	927, 929, <b>930</b> , 938, 937	
	台風の移動速度(m/s)	1, 5, <b>10</b> , 15, 20	987, 949, <b>930</b> , 918, 911	*
	対流圏中下層の相対湿度(%)	68, 70, <b>75</b> , 80, 85	929, 929, <b>930</b> , 927, 944	
	環境場の海面気圧(hPa)	990, 995, 1000, <b>1005</b> , 1010	915, 920, 925, <b>930</b> , 936	
	弱風時の地表面摩擦係数×10 <sup>4</sup>	6, 7, <b>8</b> , 9, 10	933, 930, <b>930</b> , 930, 930	
	強風時の地表面摩擦係数の増加率 (摩擦係数/風速)×10 <sup>5</sup>	2, 3, 4, 5, 6	953, 931, <b>930</b> , 929, 929	*
	地表面摩擦係数の上端×10 <sup>3</sup>	2, 3, 4, 5, 6	935, 929, <b>930</b> , 929, 929	
初期台風の   初期台風の最   初期台風の最   初期台風の最   初期台風の最   初期台風の   海水面   海水面   第   地表面の   第	エンタルピー交換係数と 運動量交換係数との比	0.8, 0.9, <b>1.0</b> , 1.1, 1.2	963, 936, <b>930</b> , 922, 914	
	平均混合距離×10 <sup>2</sup>	1, 2, 3, 4, 5	915, 916, <b>930</b> , 938, 950	
	放射冷却の時間スケール(h)	4, 5, 6, 7, 8	937, 930, <b>930</b> , 929, 929	
	放射冷却率の上端(K/day)	1.0, 1.5, <b>2.0</b> , 2.5, 3.0	924, 926, <b>930</b> , 937, 937	
	デトレインメント率	0.40, 0.45, <b>0.50</b> , 0.55, 0.60	937, 929, <b>930</b> , 927, 927	
	大気境界層厚さ(m)	30, 40, <b>50</b> , 60, 70	929, 929, <b>930</b> , 929, 930	
	海洋混合層厚さ(m)	10, 20, <b>30</b> , 40, 50	957, 939, <b>930</b> , 908, 912	*
	海洋温度ジャンプ(K)	0.4, 0.5, <b>0.6</b> , 0.7, 0.8	926, 928, <b>930</b> , 931, 933	
	海洋温度減率(K/100m)	2, 4, 6, <b>8</b> , 10	912, 920, 926, <b>930</b> , 932	
計	ポテンシャル半径のノード数	30, 40, <b>50</b> , 60, 70	929, 921, <b>930</b> , 932, 926	
算条	時間ステップ(s)	13, 15, <b>17</b> , 19, 21	929, 929, <b>930</b> , 930, 930	
希件	外側境界の半径(km)	1000, 1100, <b>1200</b> , 1300, 1400	933, 931, <b>930</b> , 929, 938	

て与えるべきであり,同じく考察や改良の対象外とした. ここで,環境場パラメータの中でも特に感度の大きかった「台風の移動速度」と「風の鉛直シアーの強さ」の感 度実験の結果を,図-2と図-3にそれぞれ示す.

はじめに、台風の移動速度の感度実験の結果(図-2) より、台風の移動速度の増加に伴って、定常状態での台 風強度が強まる傾向にあることが見て取れる.移動速度 の遅い台風(1m/s)ほど、台風直下における海洋の鉛直 混合がより活発となり、海水面温度がより低下しやすく、 台風の発達が抑制されるものと考えられる(中心気圧 985hPa).一方で、移動速度の速い台風(20m/s)ほど、 台風直下で鉛直混合が進む前に、暖水域へと移動するた めに、台風の発達が促進されるものと考えられる(中心 気圧910hPa).吉野ら(2009)の軸対称モデルにおいて は、「台風の移動速度」は、常に10m/sの一定値として 与えていたため、強度予測の誤差に繋がったと推察さ れる.

また、風の鉛直シアーの強さの感度実験の結果(図-3)

より,風の鉛直シアーの増大に伴って,台風強度の減衰 率は急激に増す傾向にあることが見て取れる.風の鉛直 シアーの大きな環境(20m/s)では,台風の移動速度が 増すことで軸対称構造が崩れやすくなり,台風強度は 1000hPa近くまで単調に減衰してしまう.一方で,風の 鉛直シアーの小さな環境(0m/s)では,台風の移動速度 が小さいため,軸対称構造の維持に適しており,中心気 圧930hPaの強い勢力を保つことができている.吉野ら (2009)の軸対称台風モデルにおいては,「風の鉛直シア ーの強さ」には,2.5°×2.5°メッシュの大気の月平均場 (ERA40)に基づく時空間解像度の粗い情報を入力して いたために,同じく強度予測の誤差要因になったと推測 される.

つまり, 台風の移動速度は, 台風 – 海洋相互作用によ って, 台風強度に対して正のフィードバック(台風強化) が働き, 一方で, 一般流 – 台風相互作用によって, 台風 強度に対して負のフィードバック(台風減衰)が働き, 全く相反する効果を有している点は興味深い.よって,



図-2 台風の移動速度の違い(1~20m/s)による台風強度 (中心気圧)に対する応答特性

軸対称台風モデルの高精度化のためには、これら両者の 微妙なバランスを適切に表現できるように、高精度なパ ラメタライズがなされる必要があると言えよう.

#### 4.1999年全台風のハインドキャスト実験

次に、これらの感度実験の結果によって明らかとなっ た支配パラメータに対して改良を加えることで、改良前 と改良後の軸対称台風モデルによる1999年全台風のハイ ンドキャスト実験を行い、気象庁ベストトラックによる 精度検証を実施した.

## (1) モデル改良と計算設定

ここで、本研究での軸対称台風モデルの主な改良点と しては、「台風の移動速度」と「風の鉛直シアーの強さ」 の取り扱いに変更を加えている点が挙げられる.

まず、「台風の移動速度」については、改良前には、 常に10m/sと一定値を与えていたが、改良後には、ベス トトラック記載の中心位置の情報(緯度・経度)から、 球面上の2点間距離の公式に基づき、台風の移動速度を 算出し入力値とした.この改良によって、台風移動に関 する正のフィードバック(大気 - 海洋相互作用)をより 適切に表現できるようになると考えられる.

次に、「風の鉛直シアーの強さ」については、改良前に は、2.5°×2.5°メッシュの大気の月平均場(ERA40)を入 力値とするパラメタライズがなされていたが、改良後に は、「風の鉛直シアーの強さ」の代わりに先述の「台風の 移動速度」を入力値とするパラメタライズへと変更した. この様な変更は、「風の鉛直シアーの強さ」と「台風の移 動速度」との間には一般的に比例関係が成立することか ら合理性があると言える.この改良によって、台風移動 に関する負のフィードバック(一般流-台風相互作用) をより高精度に表現できるようになると期待される.

ここでは、改良前と改良後の軸対称台風モデルの精度 検証を行うために、1999年の全台風(ただし、発生後に 全く発達せず単調に減衰した台風9911号は計算対象外と した)に対するハインドキャスト実験を行い、ベストト ラックによる精度検証を行った.この実験での入力境界 条件は、吉野ら(2009)の計算に準拠している.



図-3 風の鉛直シアーの強さの違い(0~20m/s)による台風 強度(中心気圧)に対する応答特性

### (2) 精度検証の結果

改良前と改良後の軸対称台風モデルによる,台風9903 号,9913号,9920号,および9922号の強度予測の時系 列を,図-4に示す.いずれの台風も,改良前に比べて改 良後のモデルでは,発生から消滅に至るまで,かなり高 い精度で強度予測を行えていることが見て取れる.最盛 期において,改良前では台風強度を弱めに予測する傾向 があるが,改良後にはこのような系統的誤差は生じず, ピーク時の台風強度を適切に表現できている.一方で, 改良後であっても,減衰期における強度予測については 精度向上の度合いは限定的である.

図-5は、1999年全台風の発生から消滅までの強度予測 のRMS誤差を示す. ほぼ全ての台風において,改良後の モデルではRMS誤差は大幅に減少しており,強度予測の 高精度化を実現している.全台風の平均RMS誤差に関し ては,改良前には約12hPaであったものが,改良後には 約6hPaの誤差へと半減し,現業予報機関のそれを大幅に 上回っている.しかしながら,減衰期(温低化の過程) にも強い勢力を維持しているような台風(例えば,台風 9918号など)においては,改良後であっても依然として 比較的大きな誤差が残っている(吉野ら,2009).

図-6は、1999年全台風の発生から最盛期(強度ピーク) までの強度予測のRMS誤差を示す.発生から消滅までの 誤差(図-5)と比べて,強度予測のRMS誤差は更に減少 し,改良前には約8hPaであったものが,改良後には約 4hPaまで減少している.現段階の改良では減衰期(温低 化の過程)にある台風の表現には依然として問題がある と考えられるが,台風発生から最盛期にかけては,極め て高い精度で強度予測が行えることが明らかとなった.

この軸対称台風モデルの精度向上は、「台風の移動速 度」と「風の鉛直シアーの強さ」といった環境場パラメ ータの取り扱いを改良したことに起因しており、高精度 な台風強度予測のためにはこれら入力条件の高精度化が 必須になると結論づけられる.この軸対称台風モデルの 利用により、台風進路を既知として扱えるならば、台風 発生直後に即座に台風強度に関する事前情報を提供でき るため、想定される災害に対して適切な事前対策が可能



図-4 改良前と改良後の軸対称台風モデルによる台風9903号,9913号,9920号,9922号の台風強度の予測と観測の時系列



図-5 改良前と改良後の軸対称台風モデルの1999年全台風に対する発生から消滅までの台風強度予測のRMS誤差



図-6 改良前と改良後の軸対称台風モデルの1999年全台風に対する発生から最盛期までの台風強度予測のRMS誤差

になるものと期待される.

### 5. 結語

本研究では、台風強度予測のための高解像度かつ高効 率な軸対称台風モデル(吉野ら、2009)の更なる高精度 化を目的として、まず、軸対称台風モデルの各種の設定 パラメータが台風強度に及ぼす影響を感度分析により明 らかにした.その結果、環境場パラメータである「台風 の移動速度」や「風の鉛直シアーの強さ」による台風強 度への影響が特に大きく、定常状態での台風強度に大き な差異が見られた.次に、これらの感度実験の結果に基 づいて、軸対称台風モデルの改良を加えることで、1999 年全台風に対してハインドキャスト実験を実施し、精度 検証を行った.改良前と改良後の対比により、モデル改 良の結果としてほぼ全ての台風強度予測の高精度 化を実現しており、特に、発達期から最盛期にかけての 精度改善の効果が著しい(RMS誤差が半減する)ことが 明らかになった.

この高精度な軸対称台風モデルをリアルタイムに運用

することで、今後の地球温暖化の進行に伴い危惧される 強大化台風に対しての信頼性の高い早期警戒情報を配信 できるようになり、効果的な避難対策は勿論のこと、直 前の応急対策により予測被災箇所を補強することで、海 岸災害の未然防止に繋がると期待される.

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

- 吉野 純・吉田尚弘・岩本学士・村上智一・安田孝志 (2009): 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,海岸工学論文集,第56巻, pp. 1261-1265.
- 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.
- Emanuel, K. A. (2007): Environmental factors affecting tropical cyclone power dissipation, J. Climate, 20, pp. 5497-5509.