

地表面粗度と地形の効果を反映した台風シミュレーションモデルの開発

DEVELOPMENT OF TYPHOON SIMULATION MODEL IN CONSIDERATION OF SURFACE ROUGHNESS AND TERRAIN

岡崎 豪¹⁾ 石原 孟²⁾ 矢代 晴実³⁾ 渡部 弘之⁴⁾
Takeshi OKAZAKI¹⁾, Takeshi ISHIHARA²⁾, Harumi YASHIRO³⁾ and Hiroyuki WATABE⁴⁾

ABSTRACT

A typhoon simulation model was developed for risk estimation, which required highly accurate prediction of the total insurance loss caused by typhoon. In this study, the coast-crossing model was selected, since it can simulate the tracking of a typhoon from the formation to its disappearance. In order to improve the accuracy for predicting the surface wind speed, the method using a nonlinear wind prediction model MASCOT was introduced to the coast-crossing model. This method is able to evaluate the effect of surface roughness and terrain, and the accuracy was verified by the simulating significant past typhoon.

Key Words: Typhoon simulation, Surface roughness and terrain, Risk estimation

1. はじめに

1991年の台風19号を契機として巨額な損害をもたらす台風の被害に保険業界の関心が高まり、将来において発生が予想される支払保険金を台風シミュレーションモデルによって評価する動きが活発となった。現在では、再保険スキームの検討、大災害債券（キャットボンド）の評価に活用されるなど、台風シミュレーションモデルの重要性は益々高くなっており、より信頼度の高いモデルの開発が求められている。

台風シミュレーションモデルは大きく3つに分けられる。本稿では、これらをサイト限定型モデル、地域限定型モデル（Full-track type）、地域限定型モデル（Coast-crossing type）と呼ぶ。それぞれのイメージを図1～3に示す。サイト限定型モデルはRussell¹⁾により提案され、目標地点の半径500kmの範囲内を通過する台風をシミュレートし、目標地点で発生する強風を予測するものである。サイト限定型モデルは目標地点における長い再現期間の設計風速を評価するのに適しており、主に橋梁や高層建築物を設計する際の風荷重の評価を目的として活用されている。しかしながら、複数の地点の風速を同時に評価することはできない。

^{1),3),4)} 東京海上日動リスクコンサルティング株式会社 主任研究員、グループリーダー、主席研究員
(〒100-0005 東京都千代田区丸の内1-2-1)

²⁾ 東京大学 助教授 (〒113-8656 東京都文京区弥生2-11-16)

地域限定型モデル (Full-track type) は、台風の発生から消滅までをシミュレートする手法である。日本では、藤井・光田²⁾が日本の南方で台風を発生させ、時間とともに北上させる手法を提案した。このモデルは台風毎の予想損害額を評価することが可能である反面、発生から日本本土に上陸するまでに長時間の予測シミュレーションを行うため、精度面に課題が残されている。

地域限定型モデル (Coast-crossing type) は地域限定型モデル (Full-track type) を改善したモデルであり、対象地域近傍にゲートを設定し、ゲート上から台風を発生させる手法である。藤井・光田³⁾は日本の本土海岸線に沿ってゲートを設定し、上陸後の台風を評価する手法を提案した。ここで、地表風速の評価は、観測記録を基にした経験的な関数を用いており、風速の低減効果が大きい建物密集地における風速の予測に課題が残されていた。

損害保険のリスク評価を目的とした台風シミュレーションモデルでは、台風毎に予想される支払保険金を評価し、かつ建築物の集積の高い都市部の風速を高い精度で評価することが求められる。そこで本稿では、地表面の低減効果を反映した風速を予測することが可能な評価手法を提案し、同手法を地域限定型モデル (Coast-crossing type) の台風シミュレーションモデルに導入した結果について報告する。

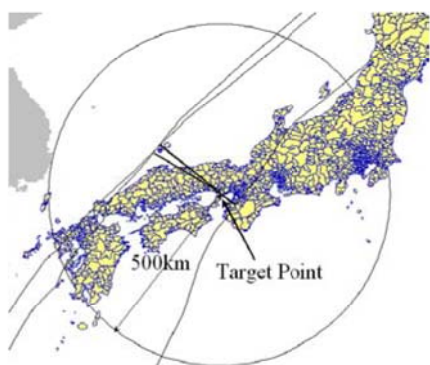


図 1 サイト限定型モデル
円は台風が発生する半径 500km の
範囲、実線は台風経路を表す



図 2 地域限定型モデル (Full-track type)
直線は台風発生地点、その他の実線は
台風経路を表す

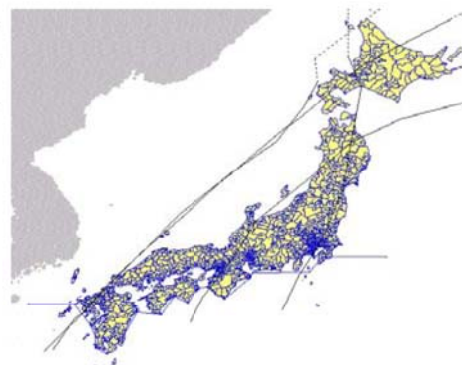


図 3 地域限定型モデル (Coast-crossing type)
本土海岸線に沿った実線はゲート、その他
の実線は台風経路を表す

2. 地表風速の評価手法

2.1 地表風速の評価手順

台風による支払保険金は地表風速から推定しているため、地表風速の予測精度が重要となる。地表風速の予測手法は、Tryggvason⁴⁾により提案された傾度風速から評価する手法が多く、多くの台風シミュレーションで用いられているため、傾度風速から地表風速を評価する手法が予測精度に大きな影響を及ぼす。

地表面付近の影響を反映した風速を解析的に求めるためには、ナビエストークス方程式を離散化した 3 次元の数値シミュレーションが必要である。しかし、数値シミュレーションは 1 回の計算に多大な時間を要するため、1 年間のシミュレーションを数万回繰り返さなければならない台風シミュレーションでは、膨大な計算時間が発生する。そこで、台風シミュレーションモデルを地表面の影響を反映した流れ場が予測可能な非線形風況予測モデル MASCOT (Microclimate Analysis System for COmplex Terrain) と組み合わせ、膨大な計算時間を回避しつつ、地表面付近の影響を反映させる次の手順による評価手法を提案する。

- (1) 日本全土を 16 のエリアに分割し、それぞれの対象エリアの地形、地表面粗度のデータを非線形風況予測モデル MASCOT に入力し、対象エリア内の高さ 10m、20m、50m、100m における風速分布と風向分布を計算する。この条件による風速を V_2 とする。
- (2) (1)と同じ対象エリアに対して、地形を平坦とし、地表面粗度を荷重指針の粗度区分Ⅱ（滑らかな田園地帯の粗度区分に相当）としたデータを MASCOT に入力し、対象エリア内の高さ 10m、20m、50m、100m

における風速分布と風向分布を計算する。この条件による風速を V_1 とする。

- (3) エリア内の各地点の同じ高さの風速比 V_2/V_1 、及び V_2 と V_1 の風向偏差を 1km メッシュのデータベースとして、高さ別風向別に構築する。風向は 16 方位とし、MASCOT の流入風の風向別に構築する。
- (4) 地形を平坦とし、地表面粗度を粗度区分Ⅱとした条件にて台風シミュレーションを実行し、高さ 10m、20m、50m、100m の V_1 に相当する風速と風向を算出する。そして、 V_1 に相当する風速に同じ高さの各地点の風速比 V_2/V_1 を乗ずることで、地表面の影響を反映した V_2 に相当する風速と風向を算出する。高さ 20m のときの V_1 に相当する風速分布の例を図 4、 V_2 に相当する風速分布の例を図 5 に示す。

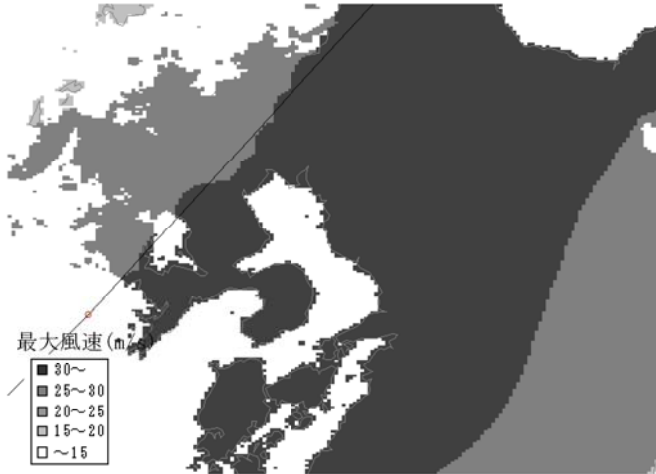


図 4 2004 年台風 18 号における対象エリアの地形を平坦とし、粗度長を荷重指針の粗度区分Ⅱとしたときの高さ 20m の風速分布図 (V_1 に相当する風速分布)

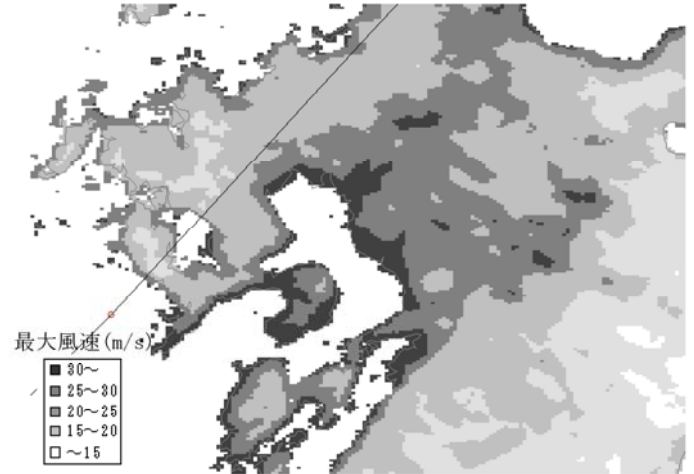


図 5 2004 年台風 18 号における地表面の影響を反映させたときの高さ 20m の風速分布図 (V_2 に相当する風速分布)

以下、非線形風況予測モデル MASCOT と台風シミュレーションモデルの傾度風速、及び V_1 に相当する地表風速の評価式について説明する。

2.2 非線形風況予測モデル MASCOT

非線形風況予測モデル MASCOT^{5), 6)} でナビエストークス方程式と連続の式を離散的に解くことにより、地形効果と地表面粗度の影響を反映した風速の評価が可能である。また山の下り斜面における剥離などの乱流効果を反映可能である。標高データは分解能 50m、地表面粗度データは分解能 100m でデータベースとして備えており、それぞれのデータは実行する格子間隔に応じて平均化される。地表面粗度の平均化は格子内のせん断応力が等価となるように求めた。座標系は地表面近傍の解像度を高めるために、一般曲線座標系を選択している。

2.3 台風シミュレーションの傾度風速の評価手法

多くの台風シミュレーションモデルは気圧分布から求めた傾度風速を介して地表風速を予測しており、本モデルでも同様の手法を選択した。

発達した台風の気圧場はその等圧線が同心円状になり、中心からの距離 r の関数 $P(r)$ として表され、Holland⁷⁾はこの関数を以下のように与えた。

$$P(r) = P_C + D_P \exp \left\{ - \left(\frac{R_M}{r} \right)^B \right\} \quad (2-1)$$

ここで、 P_C, D_P, R_M, B は台風の気圧場を表す変数で、それぞれ中心気圧、中心気圧低下量（周辺気圧 - 中心気圧）、最大旋衡風速半径、形状係数である。形状係数 B は 1~2.5 が適切であるとし、 $B=1$ の場合は Schlocmer⁸⁾の提案した同心円の式となる。日本本土南方海域の中心気圧 985hPa以下の台風の強風域内では、等圧線はほぼ同心円に分布するとみなせることが藤井・光田⁹⁾によって報告されており、本モデルでもこの仮定に基づいて気圧場を設定する。

傾度風速の予測式は、気圧傾度力（気圧差により働く力）が遠心力とコリオリ力にバランスする運動方程式から求めた以下の式により表される。

$$v_{rg} = 0 \quad (2-2)$$

$$v_{\theta g} = \frac{c \cdot \sin \theta - f \cdot r}{2} + \sqrt{\left(\frac{c \cdot \sin \theta - f \cdot r}{2} \right)^2 + \frac{r}{\rho} \frac{\partial P(r)}{\partial r}} \quad (2-3)$$

ここで $v_{rg}, v_{\theta g}$: 円筒座標系 (r, θ) における r 方向、 θ 方向の傾度風速、 c は気圧場の移動速度、 θ は台風の中心から対象地点へ向かうベクトルを基準に台風の進行方向を表す角度（反時計回りを正）、 f はコリオリパラメーター、 ρ は空気密度を表す。

2.4 台風シミュレーションの地表風速の評価手法

台風発生時の平均風速 $v(z)$ は、地表面の影響を無視できる自由大気中の傾度風速 $v_{\theta g}$ と準定常的に発生する地表面の摩擦による成分 $v'(z)$ の和として表すことができる。

$$v(z) = v_{\theta g} + v'(z) \quad (2-4)$$

円筒座標系で表現すると傾度風速は式 (2-2) と (2-3) の関係式に相当し、地表面の摩擦による成分 $v'(z) = \{v'_r, v'_\theta\}$ は次式より表すことができる。

$$-\xi \cdot f_\lambda v'_\theta = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v'_r}{\partial z} \right) \quad (2-5)$$

$$\frac{1}{\xi} \cdot f_\lambda v'_r = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v'_\theta}{\partial z} \right) \quad (2-6)$$

f_λ は台風の持つ渦度と地球の自転による渦度（コリオリ因子）の和である絶対渦度を表し、 ξ は渦度の軸方向 r の非一様性を表すパラメーターである。ここで石原¹⁰⁾は渦動粘性係数 K_m に乱流closure modelを用い、数値的に台風時の大気境界層における強風を表す式を導いた。

$$Z_g = 0.06 \frac{v_{\theta g}}{f_\lambda} (\log R_{0\lambda})^{-1.45} \quad (2-7) \quad \gamma_s = (69 + 100\xi) (\log R_{0\lambda})^{-1.13} \quad (2-8)$$

$$U(z) = v_{\theta g} \left(\frac{z}{Z_g} \right)^{\alpha_u} \quad (2-9) \quad \gamma(z) = \gamma_s \left(1 - 0.4 \frac{z}{Z_g} \right)^{1.1} \quad (2-10)$$

$$\alpha_u = 0.27 + 0.09 \log_{10} z_0 + 0.018 (\log_{10} z_0)^2 + 0.0016 (\log_{10} z_0)^3 \quad (2-11)$$

ここで $U(z)$ は高さ z での風速、 $\gamma(z)$ は高さ z での風向の偏角、 α_u はべき指数、 Z_g は傾度風の高さ、 γ_s は表面せん断応力角度、 $R_{0\lambda}$ は修正表面ロスビー数を表す。高さ z は 10m、20m、50m、100m とし、それぞれの高さにおける $U(z)$ を求めた。

3. シミュレーションによる比較検討

本稿で提案した風速の評価手法を台風シミュレーションモデルに導入し、シミュレーションによる計算風速と観測風速の比較検討を行った。対象とした台風は過去2番目に高額を支払保険金（損害保険会社全社の合計による支払保険金は3,874億円¹¹⁾）を記録し、かつ近年に発生した2004年の台風18号とした。図6に2004年台風18号の計算風速の分布図を示す。また、観測所における日最大風速（最大風速は10分間の平均風速）の観測風速と計算風速を比較した結果を表1、図7に示す。観測所の風速計と一致した高さの計算風速を算出するため、10m、20m、50mの高さの計算風速を求め、線形補間により風速計の高さに相当する計算風速を算出した。

図7からシミュレーションによる計算風速は全般的に観測風速とほぼ一致した傾向を示している。下関、萩、福岡のように計算風速と観測風速が乖離している地点があるが、この原因は観測所の測器が周辺の遮蔽物の影響を受けていたり、風速比データベースを作る際のMASCOTで設定しているメッシュの間隔が大きいためと考えられる。後者に関しては、本稿ではMASCOTを4kmメッシュの間隔で実行し、4kmメッシュの風速データを得た後、補間により1kmメッシュの風速を求めている。そのため、海岸部付近の観測所において、海上の地表面粗度の条件下で算出しているケースがある。例として、萩特別地域気象観測所の観測風速と計算風速が乖離しているが、観測所が海岸から約100m程度しか離れておらず、風の流れ場を十分に再現できていないためと考えられる。改善のためには、メッシュ幅を100m以下にして実行する必要がある。しかし、そのためには計算機のメモリ容量の制限から対象エリアの領域を狭めなければならない、

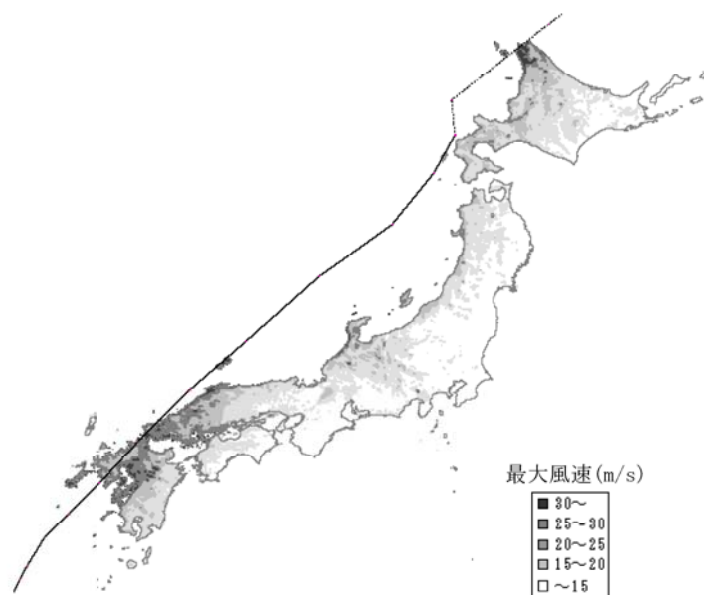


図6 2004年台風18号の計算風速の分布図

表1 2004年台風18号の観測風速と計算風速の比較

地点名		観測日時分	最大風速(m/s)		風速計高さ
			観測記録	計算風速	
宿毛	(高知県宿毛市)	9/7 13:16	14.7	18.8	17.8
清水	(高知県土佐清水市)	9/7 13:15	14.5	18.6	13.6
室戸岬	(高知県室戸市)	9/7 14:54	28.6	18.5	41.8
山口	(山口県山口市)	9/7 12:24	24.4	24.3	15.1
下関	(山口県下関市)	9/7 11:58	21.1	34.2	14.4
萩	(山口県萩市)	9/7 12:35	17.1	33.1	15.6
福岡	(福岡市中央区)	9/7 11:11	11.4	25.6	24.4
飯塚	(福岡県飯塚市)	9/7 11:28	20.7	22.6	11.0
大分	(大分県大分市)	9/7 11:04	19.4	19.2	19.7
日田	(大分県日田市)	9/7 11:10	17.7	21.6	10.5
長崎	(長崎県長崎市)	9/7 09:44	23.3	23.3	18.6
厳原	(長崎県対馬市)	9/7 11:23	17.7	19.2	36.0
佐世保	(長崎県平戸市)	9/7 09:53	23.7	25.9	13.0
佐賀	(長崎県佐世保市)	9/7 10:40	21.9	26.5	56.1
熊本	(長崎県福江市)	9/7 10:26	23.2	31.4	23.7

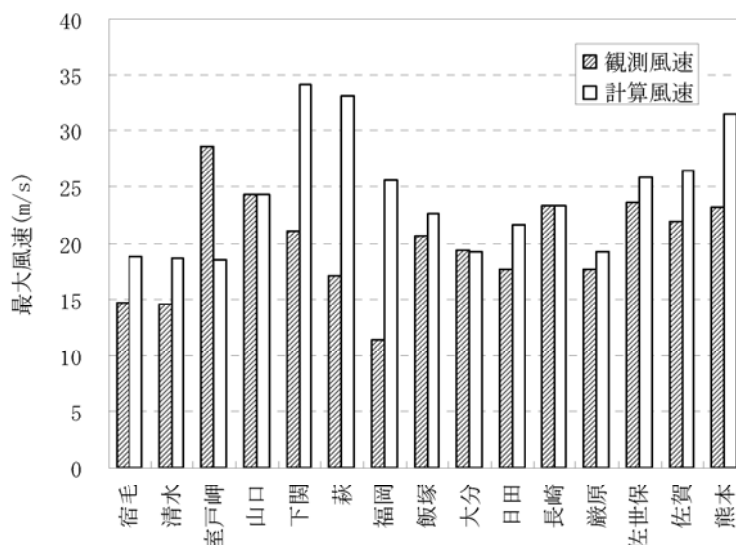


図7 2004年台風18号の観測風速と計算風速の比較

日本全土を対象とする場合は繰り返し多くの実行が必要となるため、計算時間が膨大となる。

4. まとめ

本研究により、以下の結論を得た。

- (1) 損害保険の風災リスク評価を目的とした精度の高い台風シミュレーションモデルを開発するため、台風シミュレーションモデルと非線形風況予測モデル MASCOT を組み合わせた風速の評価手法を提案した。
- (2) 同手法を適用し、地表面の低減効果を反映した風速を評価可能な地域限定型モデル (Coast-crossing type) の台風シミュレーションモデルを開発した。
- (3) 2004 年の台風 18 号のシミュレーションによる計算風速と観測風速を比較検討したところ、海岸部付近を除き観測風速を良好に再現できていることを確認した。

計算風速の更なる精度向上のためには、MASCOT を用いて構築する風速比データベースの解像度の向上が課題として挙げられる。

参考文献

- 1) Russell, L.R.: Probability distributions for hurricane effects, J. of the Waterways, Harbor and Coastal Engineering Division, ASCE, Vol.97, No.WW1, Feb, pp.139-154, 1971
- 2) Fujii, T. and Mitsuta, Y.: Model of Severe Typhoon (1), Annuals, Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., 10, pp.227-234, 1975
- 3) Fujii, T., and Mitsuta, Y.: Simulation of winds in typhoons by a stochastic model, J. Wind Eng., No.28, pp.1-12, 1986
- 4) Tryggvason, B.V., Surry, D. and Davenport, A.G.: Predicting Wind Induced Response in Hurricane zones, J. of the Structural Div., ASCE, Vol.102, No.ST12, pp.2333-2350, Dec., 1976
- 5) 石原孟: 非線形風況予測モデル MASCOT の開発とその実用化, 日本流体力学会誌, 第 22 巻 第 2 号, pp. 387-396, 2003
- 6) 石原孟, 日比一喜: 急峻な山を越える乱流場の数値予測, 日本風工学論文集, No. 83, pp. 175-188, 2000
- 7) Holland, G.J.: An analytic model of the wind and pressure profiles in Hurricanes, Mon. Weather Rev., 108 No.8, pp.1212-1218, 1980
- 8) Schloemer, R.W.: An analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Okeechobee, Florida, hydrometeorological Report, No.31, 49, 1954
- 9) Fujii, T., and Mitsuta, Y.: On the radial pressure profiles of typhoons", Annuals, Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No.38 B-1, 1995
- 10) 石原孟, 松井正宏, 日比一喜: 中立時の大気境界層における強風の鉛直分布特性, その 2 台風時の強風, 日本風工学論文集, No. 66, pp. 3-14, 1996
- 11) 社団法人日本損害保険協会: 過去の高額支払保険金, 2006
- 12) 石原孟, 山口敦他: 風洞実験と気流解析に基づく台風 0314 号の最大風速の推定, 土木学会構造工学論文集, pp. 911-920, 2005