

# 地球温暖化に伴う風速分布の変化と風災リスクの地域的傾向に関する研究

## A Study of Differential Distribution of Wind Speed on the Condition of Global-Warming and Regional Tendency of Wind Damage Risk

○岡崎 豪<sup>1</sup>, 佐土原 聡<sup>2</sup>, 矢代 晴実<sup>3</sup>

Takeshi OKAZAKI<sup>1</sup>, Satoru SADOHARA<sup>2</sup> and Harumi YASHIRO<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> 東京海上日動リスクコンサルティング株式会社 自然災害リスクグループ

Catastrophe Risks Quantification Group, Tokio Marine & Nichido Risk Consulting Co., Ltd.

<sup>2</sup> 横浜国立大学大学院 環境情報研究院

Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

A wind speed for building design at the end of 21<sup>st</sup> century is evaluated by typhoon simulation model that generates hypothetical typhoons using Monte Carlo simulation. Occurrence and intensity of tropical cyclones projected by global atmospheric models are then applied to probabilities of typhoon simulation model. The wind speeds of 50-year return period in the western Japan are projected to be stronger in the future. For the purpose of predicting a degree of wind damage, index value that correlates with insured loss is calculated. It is estimated that insured losses from high intensity typhoons will be higher in the future. In addition, the index value with each prefecture is calculated, and insured loss of densely populated prefecture will be higher in the future.

*Key Words* : Typhoon Simulation, Wind Damage, Global-Warming, Climate Change

### 1. はじめに

近年の異常気象の増加や自然環境の変化に伴い、地球温暖化に関する国際的な研究が活発となっている。そして、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の報告書は数百人の研究者らから構成されており、最新の研究成果を総括していると言える。しかし、IPCCの報告書においても地球温暖化が台風の被害に与える影響については十分な報告がなされていないため、将来に備えた対策への遅れにつながる恐れがある。例えば、将来において台風の活動度が増加する場合は、建築物の設計風速を見直すことも視野に入れなければならない。地球温暖化の影響が現れるのは数十年後の将来としても、建築物が使用される年数は非常に長期に及ぶことから、早期の検討が必要となる。また、設計風速が全国的に同じ割合で増加するとは限らず、特定の地域において影響が大きい場合は、地域的な取り組みも検討する必要がある。以上の背景から、台風シミュレーションモデルを活用して将来の気候場における再現期間100年の地表風速を評価し、現在の地表風速との違いを検証した<sup>1)</sup>。将来の気候場の予測にあたっては、全球大気モデルから得られた台風の発生個数と強度の結果を適用した。そして、設計風速の違いが風災被害に与える影響を定量的に把握するため、損害保険会社の支払保険金と相関の高い台風による風災被害指数(Typhoon Index Value: TIV)をもとに被害の増減傾向を評価した。本研究では、地域的な風災被害の差異を把握するため、TIVを都道府県別に評価した。そして、首都圏、中部圏、近畿圏などで予想される将来の気候場での被害の傾向を考察した。

### 2. 風災被害の定量的評価方法

#### 2.1. 台風シミュレーションモデルの概要と用途

台風シミュレーションモデルは、中心気圧などのパラメーターを確率分布として構築し、確率分布に乱数を適用することで仮想的な台風を数万通り発生させるモンテカルロシミュレーションである。台風を数万通り発生させることで観測期間を超えた再現期間の風速を求めることが可能となり、橋梁や高層建築物を設計する際の風荷重の評価や損害保険会社が巨大災害に備えるための準備金の評価などに活用されている。

#### 2.2. 台風の発生方法

日本の太平洋沿岸に沿って境界線を設定し、過去の台風の観測記録からそれぞれの境界線における上陸個数の確率分布を作成する。そして、確率分布に乱数を適用することで仮想的な台風を発生させる。

同様に上陸直前から消滅までの台風の中心気圧、進行速度、進行角度、最大旋衡風速半径、中心位置を乱数によって設定する。仮想台風の例を図1に示す。本評価では、1年間のシミュレーションを1万通り繰り返している。

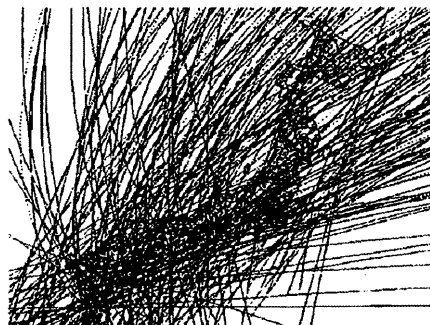


図1 モンテカルロシミュレーションによる仮想台風の例

### 2.3. 風速の評価方法

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評価しており、本モデルでも同様の手法を選択している。気圧分布は発達した台風の気圧場はその等圧線が同心円状になり、中心からの距離の関数として表されるとした Holland<sup>2)</sup>による式を適用している。傾度風速の予測式は、遠心力とコリオリ力が気圧傾度力につり合う運動方程式から求めた式を適用している。

地表風速の評価には岡崎・石原ら<sup>3)</sup>が提案した地表面粗度と地形の効果を反映した手法を適用した。同手法はナビエ・ストークス方程式と連続の式を離散的に解く非線形風況予測モデル MASCOT を用いることで、日本全国の各地点における地表面粗度と地形の影響を反映した地表風速を評価することが可能である。地表風速は地表からの高さ 10m における 10 分間平均の風速である。また、地表風速は 1km メッシュの解像度で評価している。

将来の気候場における仮想台風を発生させるため、台風シミュレーションモデルのパラメーターの確率分布を変化させた。確率分布の変化においては、地球温暖化と台風のメカニズムの関係を考慮するため、大気と海洋の運動を物理方程式に基づいた数値解析により予測する全球大気モデルの結果を適用した。

### 2.4 将来の気候場の評価方法

大内・吉村ら<sup>4)</sup>は 20km 格子の高解像度な全球大気モデルを用いて 21 世紀後半の熱帯低気圧の頻度を分析したところ、全球的な熱帯低気圧の発生頻度は約 30%減少したと報告している。同モデルによる結果は IPCC の第 4 次評価報告書でも引用されており、「インド洋や太平洋における熱帯低気圧の再現性は不十分であるが、全球的な熱帯低気圧の地理的分布や頻度はかなり良く再現されている。ただし、観測された最大風速や中心気圧の極値はモデル上で再現されておらず、強い勢力の熱帯低気圧を再現するためには更なる高解像度のモデルが必要であると大内らは主張している。」と記述されている。21 世紀後半の海面温度は、IPCC の排出シナリオに基づいた気象研究所の気候モデル (MRI-CGCM2.3) により計算された結果を適用している。IPCC の排出シナリオは A1B を適用しており、CO<sub>2</sub> 濃度が 2080~2099 年に現在の 2 倍となる前提としている。

Knutson and Tuleya<sup>5)</sup>はハリケーンが通過する領域のみを細分化するネスティング手法を適用し、21 世紀後半の熱帯低気圧の勢力を分析した。熱帯低気圧の対流活動を再現する対流スキームに 4 つのパターンを適用して比較したところ、熱帯低気圧の中心気圧は平均して 14%低下したと報告している。CO<sub>2</sub> の排出シナリオは年間 1%の上昇とし、80 年後までの気候モデルの結果を適用している。ハリケーンが通過する領域のみを細分化しているため、全球的な熱帯低気圧の発生数については述べられていない。

以上の全球大気モデルの結果を参考とし、変化させる台風パラメーターは中心気圧と上陸個数とした。台風シミュレーションモデルは上陸時から台風を発生させているため、発生個数と上陸個数が同じ割合で減少すると仮定して、上陸個数のパラメーターを変化させた。台風の中心気圧と上陸個数の確率分布は 1932 年から 1996 年の統計値に基づいて構築している。その確率分布の平均を中心気圧は 14%減少とし、発生個数は 30%減少とした。中心気圧の標準偏差は変化させていない。図 2 と図 3 に

変化の前後における確率分布の違いを示す。

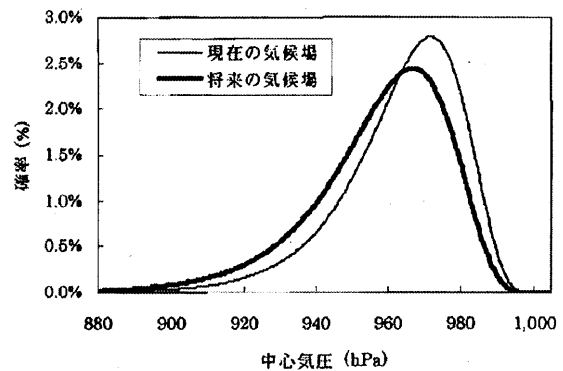


図 2 中心気圧の確率分布の設定

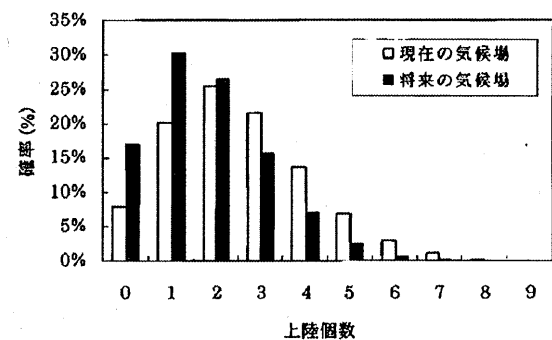


図 3 上陸個数の確率分布の設定

## 3. 結果

### 3.1. 将来の気候場における設計風速の評価

建築基準法の基準風速と同じ再現期間 50 年の最大風速の分布を台風シミュレーションモデルによって評価した。ここで、将来の気候場の再現期間 50 年とは、再び発生するまでの時間が 21 世紀後半から先の 50 年であることを表す。21 世紀後半からは 21 世紀後半と同じ気候場が維持されると仮定している。

現在に対する将来の再現期間 50 年における最大風速の増加率を図 4 に示す。図 4 から九州地方を中心とする西日本全域や太平洋に面した福島県や関東地方において、将来は現在よりも最大風速が増加する傾向となることが分かる。最大風速の増加率は九州地方が 2~5%、近畿地方が 0~3%、関東地方が 0~3%である。東北地方の変化は殆どなく、北海道は逆に減少する結果となった。台風が常襲する西日本全域の最大風速は将来の気候場において更に高まる結果となった。

再現期間 50 年と同様の手法で再現期間 100 年の最大風速を評価した。現在に対する将来の再現期間 100 年における最大風速の増加率を図 5 に示す。図 5 から将来の気候場における再現期間 100 年の最大風速の増加率は、再現風速 50 年と似た地域的な分布であるが、宮城県や岩手県においても最大風速の増加が確認され、再現期間 50 年よりも増加する地域が広範囲に及んでいることが分かる。以上から、上陸個数が 30%減少しても中心気圧が 14%低下することで、台風による再現期間 50 年と 100 年の将来の気候場における最大風速は西日本や関東地方を中心として広範囲で高まることを確認した。ただし、

上陸個数や中心気圧の確率分布は、台風を発生させるすべての地域において同じ割合で増加、もしくは減少させており、地域差は反映していない。また、結果に大きな影響を与えると予想される確率分布の標準偏差は変化させていない。将来の気候場における標準偏差を評価するためには、高解像度の全球大気モデルを用いた多メンバーのアンサンブル実験による研究成果などを待つ必要がある。

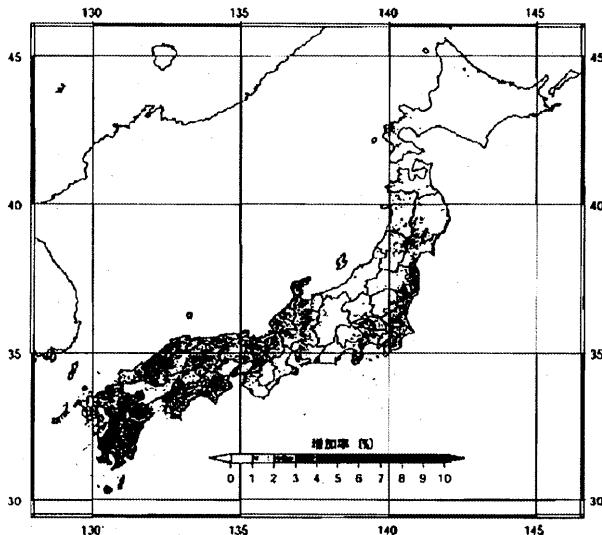


図4 現在に対する将来の最大風速の増加率 (再現風速 50年)

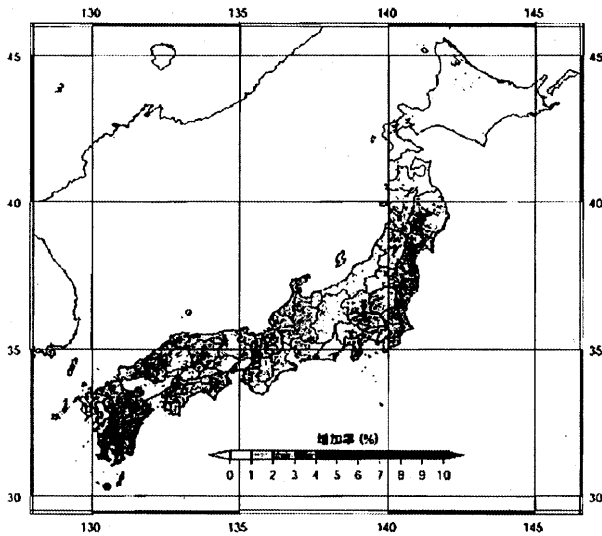


図5 現在に対する将来の最大風速の増加率 (再現風速 100年)

3.2. 将来の気候場における風災被害の定量的評価

設計風速の違いが風災被害に与える影響を定量的に把握するため、損害保険会社の支払保険金と相関の高い台風による風災被害指数(TIV)を評価した。TIVは式(1)及び式(2)で表される。

$$TIV = \sum_{i=1}^n \{w_i \cdot (V_i - V_0)^m\}, \quad V_i > V_0 \quad (1)$$

$$w_i = \frac{H_i}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad (2)$$

$V_i$ は地表風速の最大瞬間風速、 $H_i$ は平成12年度国勢調査の地域メッシュ統計データを基にした1kmメッシュの世帯数データ、 $w_i$ は世帯数データをもとにした1kmメッシュの重み付け係数、 $n$ は全国を1kmメッシュで区分した数を表す。 $w_i$ の全国分布であり、首都圏、中部圏、近畿圏などの住宅密集地域において $w_i$ の値が大きくなる。

$V_0$ と $m$ は定数であり、支払保険金とTIVの相関が最も高くなる係数を選択した。ここでは、係数 $m$ は2.0から3.6の範囲を0.2刻み、 $V_0$ は20から30の範囲を2刻みとし、1つの台風に対して54通りのTIVを計算した。そして、既往の7台風による国内損害保険会社の全社合計の支払保険金とTIVの相関係数が最も高くなる係数を選択し、 $V_0 = 26$ 、 $m = 2$ とした。

TIVは値が大きいくほど高額な支払保険金の発生が予想されることを意味し、自然災害リスクの証券化(CATボンド)の元本毀損率の計算などに活用されている。ただし、建築物の風災に対する強度は現状と同じと仮定する。

台風シミュレーションモデルによって1年間のシミュレーションを1万通り繰り返し、再現期間に応じたTIVを計算した。再現期間は7、10、25、50、100、200、250、500、1000年を選択し、現在の気候場と将来の気候場のそれぞれに対するTIVを計算した。表1及び図6に結果を示す。

表1 再現期間に対する風災被害指数(TIV)の増減率

再現期間 (年)	風災被害指数 (TIV)		(B-A)/A
	A: 現在の気候場	B: 将来の気候場	
7	49	44	-11%
10	81	78	-4%
25	189	199	5%
50	285	311	9%
100	390	434	11%
200	503	565	12%
250	539	609	13%
500	654	745	14%
1,000	774	880	14%

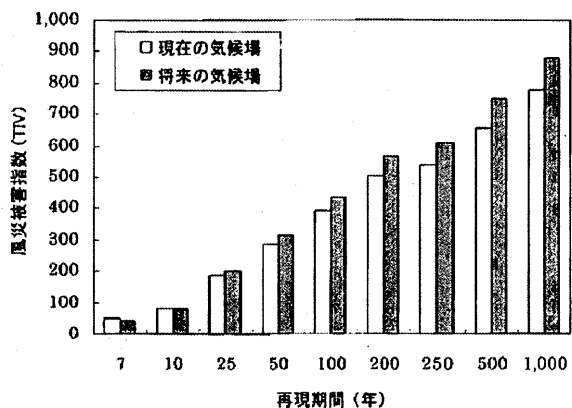


図6 再現期間に対する風災被害指数(TIV)

表1から再現期間7年と10年のTIVは将来の気候場の方が小さい値となり、再現期間25年以上の場合は将

来の気候場の方が大きい値となることが確認される。この結果は、勢力の弱い台風による支払保険金は現在よりも低くなるが、稀に発生する勢力の強い台風による支払保険金は現在よりも高くなることを示唆している。

また、現在に対する将来の気候場における TIV の増減率は再現期間 50 年で 9% の増加、再現期間 100 年で 11% の増加となり、再現期間 500 年以上では 14% の一定の増加率となる。稀に発生する台風であるほど風災の被害が現在の気候場よりも高まる結果となった。

次に現在の気候場と将来の気候場の TIV を都道府県別に算出し、比較した結果を図 7 に示す。TIV の増加率は大阪府が 20%、東京都が 15%、愛知県が 10% であり、世帯数データによる重み付け係数  $w_i$  が大きい大都市圏で TIV の増加が大きいことが分かる。すなわち、将来における大都市圏の被害額が増加することが予想される。一方で、北海道は 9% の減少、青森県は 1% の減少となった。これらの県は将来の気候場における地表風速が現在の気候場よりも弱い結果となったためである。

ここで、TIV と相関係数の高い損害保険会社の支払保険金は、風災による支払保険金だけでなく、高潮や洪水などの水災による支払保険金も含まれる。しかし、風災による支払保険金が大部分の割合を占めるため、ここでは風災被害の結果として用いた。

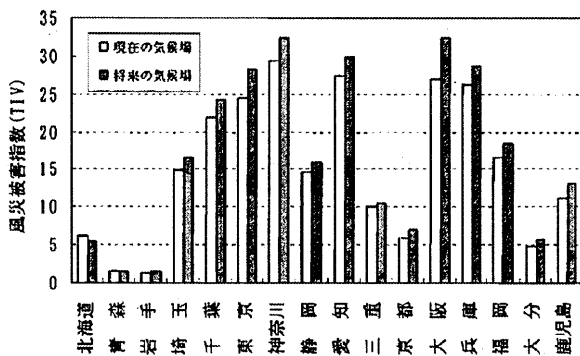


図 7 都道府県別の風災被害指数の比較 (再現期間 100 年)

#### 4. まとめ

地球温暖化が建築物の被害に与える影響を把握するため、全球大気モデルによる 21 世紀後半の熱帯低気圧の発生頻度、中心気圧の予測結果を台風シミュレーションモデルに適用し、将来の設計風速と風災被害を定量的に評価したところ、以下の結論を得た。

- (1) 再現期間 50 年の将来の最大風速は、九州地方を中心とする西日本全域、太平洋に面した福島県や関東地方において現在よりも増加する結果が得られた。増加率は九州地方が 2~5%、近畿地方が 0~3%、関東地方が 0~3% であり、台風が常襲する西日本の最大風速は将来において更に高まる結果となった。
- (2) 再現期間 100 年の将来の最大風速は、再現風速 50 年の結果と似た地域的な分布で現在よりも増加するが、宮城県や岩手県においても最大風速が増加し、再現期間 50 年よりも増加する地域が広範囲に及んでいることを確認した。
- (3) 風災被害に及ぼす影響度を定量的に把握するため、国内損害保険会社の支払保険金と相関の高い台風による風災被害指数 (TIV) を評価したところ、再現期間 7 年と 10 年の場合は将来の TIV は現在よりも小さい値

となったが、再現期間 25 年以上の場合は将来の TIV は現在よりも大きい値となった。勢力の弱い台風による支払保険金は現在よりも低くなるが、稀に発生する勢力の強い台風による支払保険金は現在よりも高くなることが予想される結果が得られた。また、都道府県別に風災被害指数を評価したところ、大都市圏において風災被害指数 TIV の増加率が高くなり、将来における大都市圏の被害が増加することが予想される結果が得られた。

全球大気モデルによる地球温暖化後の熱帯低気圧の予測は、モデルにより異なる結果が報告されており、研究者らの意見は統一されていない。また、全球大気モデルの解像度が高くなるにつれて、低い中心気圧の台風がモデル上で再現される可能性がある。全球大気モデルの新たな研究成果をもとにして、再計算を行う必要がある。熱帯低気圧の中心気圧は風速に大きな影響を及ぼすパラメーターであり、風災被害指数は風速の 2 乗に比例するため、熱帯低気圧の中心気圧の増減は風災被害指数に大きな変化を及ぼす。また、熱帯低気圧の頻度は、首都圏、中部圏、近畿圏などの住宅密集地域を通過する台風が増減することで、風災被害指数に大きな影響を与えると予想される。

台風による被害は風災だけでなく、洪水や高潮も含まれる。IPCC の第 2 作業部会による第 4 次評価報告書<sup>6)</sup>では、「暴風雨の発生頻度は多くの地域で高まる可能性が非常に高い。また、海面上昇により、2080 年代までに洪水の被害を受ける人口は追加的に毎年数百万人増えると予測されている。」とまとめている。風災被害だけでなく、降水量などのパラメーターをもとに洪水被害の定量的評価にも取り組むことが課題とされる。また、現在の多くの地域の防潮堤は、伊勢湾台風を基準として設計されているが、将来の気候場においてはこの基準では不十分となり、全国的に高潮の被害が頻発することも考えられる。防潮堤の補強を検討するためにも高潮被害の評価が必要である。

#### 5. 参考文献

- 1) 岡崎豪, 矢代晴実: 地球温暖化の影響を反映した極値風速による風災被害評価, 日本建築学会 総合論文誌第 6 号 地球環境と防災のフロンティア, pp.105-110, 2008
- 2) Holland, G.J.: An Analytic Model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricanes, Mon. Weather Rev., 108 No.8, pp.1212-1218, 1980
- 3) 岡崎豪, 石原孟, 矢代晴実, 渡部弘之: 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, 第 19 回風工学シンポジウム, pp.217-222, 2006
- 4) Oouchi, K. and Yoshimura, J. et al.: Tropical Cyclone Climatology in a Global-Warming Climate as Simulated in a 20 km-Mesh Global Atmospheric Model: Frequency and Wind Intensity Analyses, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 84, No. 2, pp.259-276, 2006
- 5) Knutson, T. R. and Tuleya, R. E.: Impact of CO<sub>2</sub>-Induced Warming on Simulated Hurricane Intensity and Precipitation: Sensitivity to the Choice of Climate Model and Convective Parameterization, Journal of Climate, Vol. 17, No. 18, pp.3477-3495, 2004. 9
- 6) The Intergovernmental Panel on Climate Change Working Group II: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2007