

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

Evaluating Degree of Wind Damage Utilizing Wind Speed for Building Design on the Condition of Global-Warming

岡崎 豪*・矢代晴実**

Takeshi OKAZAKI and Harumi YASHIRO

Abstract

A wind speed for building design at the end of 21st 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.

Keywords

地球温暖化, 台風シミュレーション, 風災, Global warming, Typhoon simulation, Wind damage

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、風速が全国的に同じ割合で強まるとは限らず、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、本研究では台風シミュレーションモデルを活用して将来の気候場の極値風速を評価し、現在の極値風速との違いを検証した。ここでの極値風速とは再現期間50年、100年の最大風速を意味する。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。また、極値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）を評価した。

② 既往の研究

2.1. 地球温暖化が台風の活動度に与える影響の評価

IPCCの第1作業部会による第4次評価報告書¹⁾の政策決定者向け要約では、「1970年頃以降、熱帯の海面水温の上昇と関連して、北大西洋の強い熱帯低気圧の強度が増してきたことを示す観測事実があるとし、21世紀の将来において強い熱帯低気圧の活動度が増加する可能性は高い。」とまとめている。しかし、地球上で発生するすべての熱帯低気圧の平均的な傾向を述べており、台風やハリケーンなどに分類した地域的な見通しに関しては言及されていない。地域的に分類して熱帯低気圧の傾向を予測するためには、台風の挙動を再現することが可能な格子間隔10km以下の高解像度な全球大気モデルが必要となる。しかし、高解像度な全球大気モデルを実行するには、膨大な計算速度とメモリーに対応するための高性能なスーパーコンピューターが必要となる。また、空間スケールの小さい積乱雲などの対流活動を再現するパラメタリゼーションの改善が課題となっている。

2.2 風災被害の定量的な評価

国際連合環境計画金融イニシアティブ（UNEPFI）の報告書²⁾におけるMunich Re社が集計した世界の損害保険会社による支払保険金の実績データによると、風水災による経済損害は毎年6%増加している。毎年6%増加する傾向が今後も継続する場合、12年毎に支払保険金は2倍に増えていくことになる。2005年時点の風水災による経済損害が1,000億ドルとすると、2040年には風水災による経済損害が8,000億ドルに達することになる。また、2040年までに年間1兆ドルを超える年が発生する可能性がある指摘している。同報告書でRMS社は気候変動による経済損害の増加分は6%のうちの2%に相当すると試算している。

イギリス保険協会の報告書³⁾では、地球温暖化が台風リスクに

*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 修士 (理学)

**東京海上日動リスクコンサルティング株式会社 グループリーダー 博士 (工学)

Senior Consultant, Tokio Marine & Nichido Risk Consulting Co, Ltd. M. Sci.

Manager, Tokio Marine & Nichido Risk Consulting Co, Ltd. Dr. Eng.

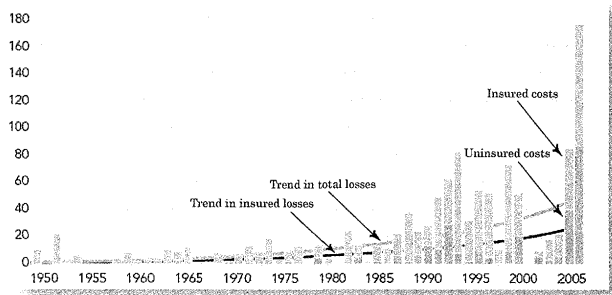


図1 1950～2005年の巨大災害による経済損害
(単位はUSD billion, 2005年時点の現在価値, 出典: UNEPFI)

与える影響を試算したストレステストの結果をまとめている。ストレステストを行ったAIR社によると、台風の風速が平均して6%上昇した場合、年間の平均的な支払保険金は約60%増加し、再現期間100年に相当する年間の支払保険金は67%増加すると試算している。

宮田ら⁴⁾は、台風の発生から消滅までをシミュレートできる台風シミュレーションモデルに海面温度の影響を反映させた。仮想台風の東西、南北方向の移動速度と中心気圧低下量の値を線形回帰式で設定するにあたり、海面温度を変数として加えている。地球温暖化後に想定される海面温度を入力して台風の活動度を評価したところ、台風の強度は増大したが、頻度は逆に減少する傾向が得られた。ただし、地球温暖化の影響は台風の生成・盛衰メカニズムに密接に関係していることから、今後その点についても検討が必要であると報告している。

③ 台風シミュレーションモデルの評価方法

3.1. 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。

3.2. 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2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。

3.3. 傾度風速の評価方法

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

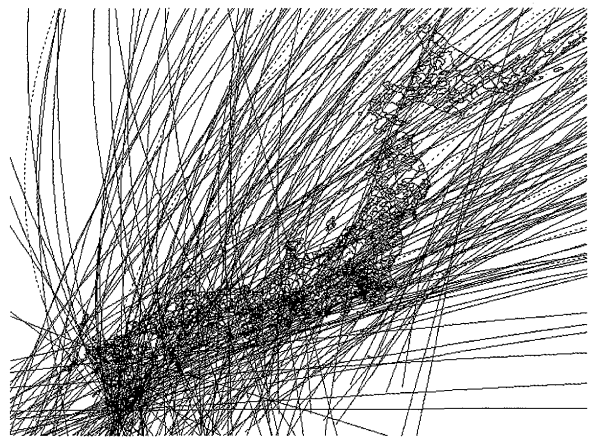


図2 モンテカルロシミュレーションによる仮想台風の例

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。

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、Holland⁵⁾はこの関数を次のように与えた。

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

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1.0～2.5が適切であるとし、 $B=1$ の場合はSchloemer⁶⁾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⁷⁾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以下の式により表される。

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

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

ここで v_{rg} 、 $v_{\theta g}$ は円筒座標系 (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、 ρ は空気密度を表す。

3.4. 地表風速の評価方法

岡崎・石原ら⁸⁾が提案した地表面粗度と地形の効果を反映した評価手法を適用する。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^{9), 10)}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。例として、2004年の台風18号における地表風速の分布を図3に示す。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

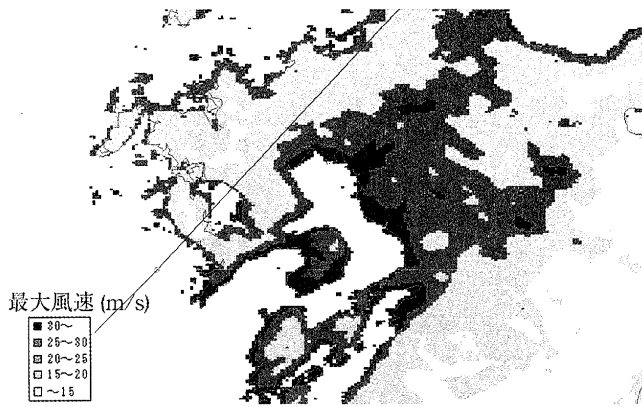


図3 台風シミュレーションモデルによる2004年台風18号の最大風速の分布

風速は1kmメッシュの解像度で評価している。

3.5. 将来の気候場の評価方法

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。

大内・吉村¹¹⁾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。同分析の21世紀後半の海面温度は、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。CO₂の排出シナリオはIPCCのA1Bを適用しており、CO₂濃度が2080~2099年頃に現在の2倍となる前提としている。

Knutson and Tuleya¹²⁾はハリケーンが通過する領域のみを細分化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。CO₂の排出シナリオは年間1%の上昇とし、9つの気候モデルの80年後まで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分析していない。

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発生個数とした。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

の標準偏差は変化させていない。図4と図5に変化の前後における確率分布の違いを示す。

4 結果

4.1. 将来の気候場における極値風速の評価

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。図6は現在の気候場のパラメーターを台風シミュレーションモデルに入力して得られた再現期間50年の最大風速の分布であり、図7は将来の気候場のパラメーターを台風シミュレーションモデルに入力して得られた再現期間50年の最大風速の分布である。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世紀後半から先は21世紀後半と同じ気候場が維持されると仮定している。

図6の現在の気候場における再現期間50年の最大風速は、九州地方、四国地方、近畿地方などで高く、東北地方、北海道で低くなり、地域的な特徴を再現した分布となっている。局地的に風速が強くなる地域が滋賀県にあるが、地表面粗度が小さい琵琶湖の水面の風速が高く評価されているためである。

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8に示す。図8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(図は

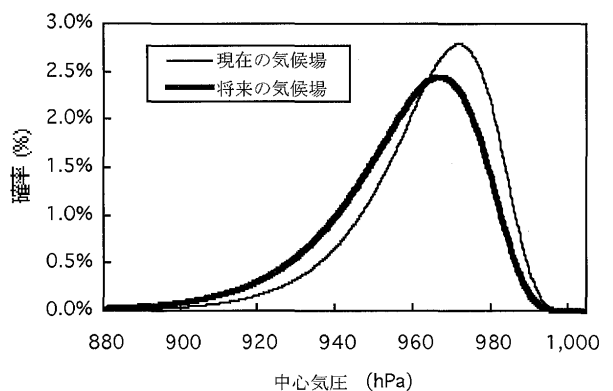


図4 中心気圧の確率分布の設定

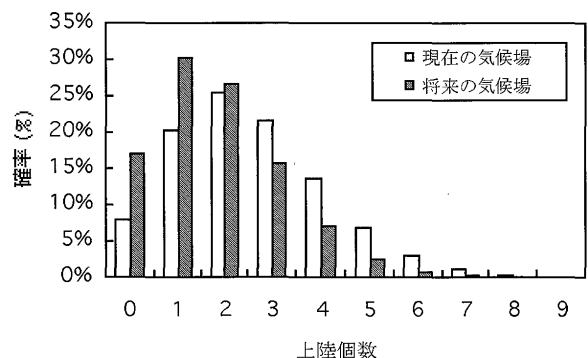


図5 上陸個数の確率分布の設定

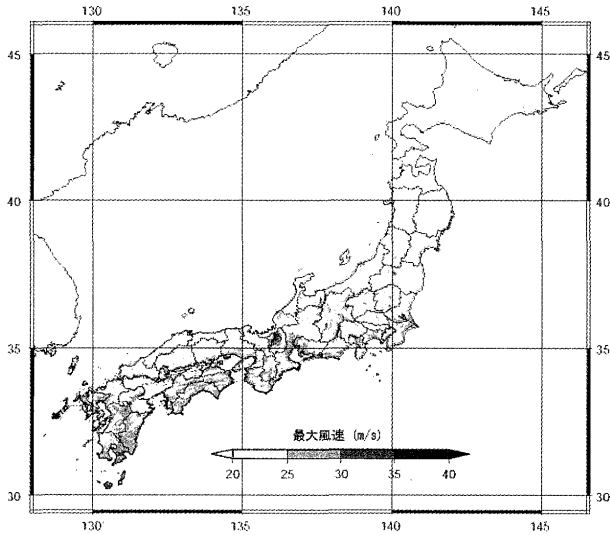


図6 再現風速50年の最大風速の分布 (現在の気候場)

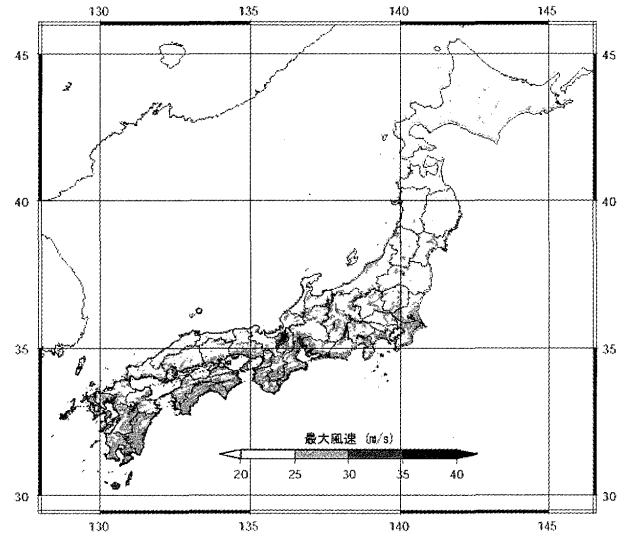


図9 再現風速100年の最大風速の分布 (現在の気候場)

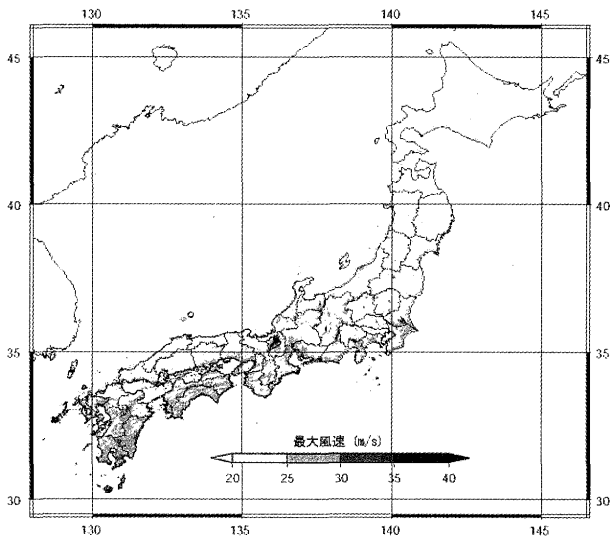


図7 再現風速50年の最大風速の分布 (将来の気候場)

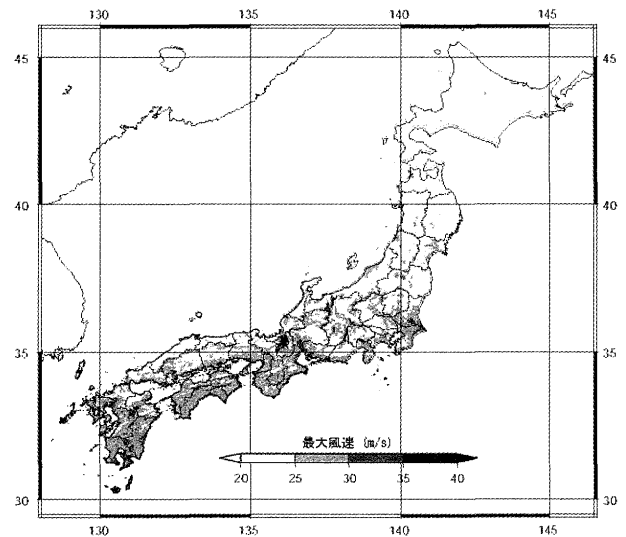


図10 再現風速100年の最大風速の分布 (将来の気候場)

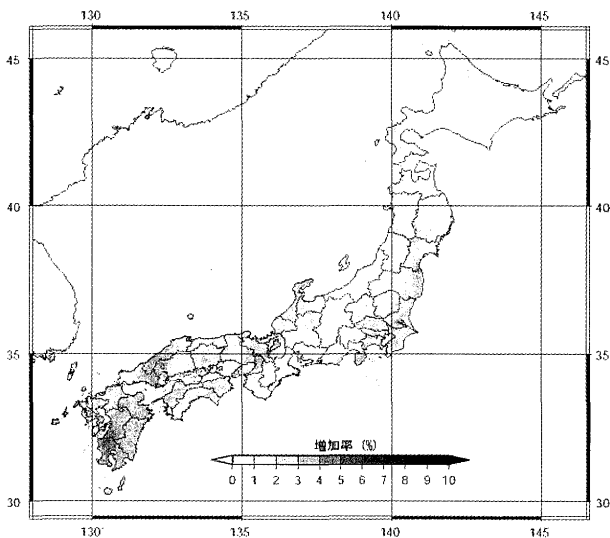


図8 現在に対する将来の最大風速の増加率 (再現風速50年)

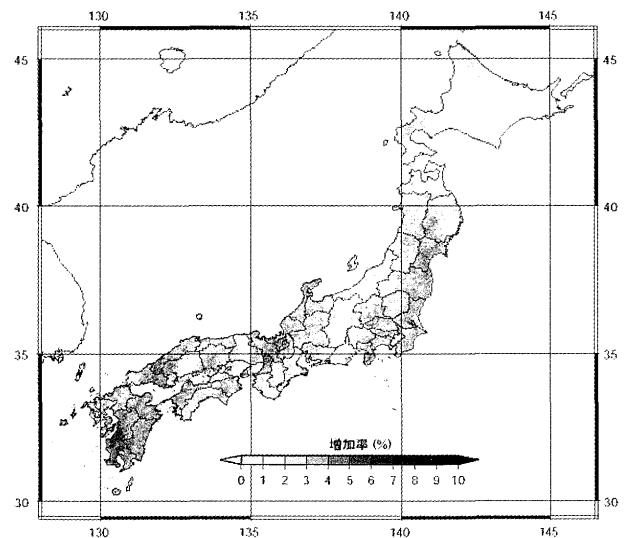


図11 現在に対する将来の最大風速の増加率 (再現風速100年)

省略)。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。図9に現在の気候場における再現期間100年の最大風速の分布、図10に将来の気候場における再現期間100年の最大風速の分布を示す。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11に示す。図11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。

4.2. 将来の気候場における風災被害の定量的評価

極値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 (4) 及び式 (5) で表される。

$$TIV = \sum_{i=1}^n \{w_i \cdot (V_i - V_0)^m\} \quad , V_i > V_0 \quad (4)$$

$$w_i = \frac{H_i}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad (5)$$

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

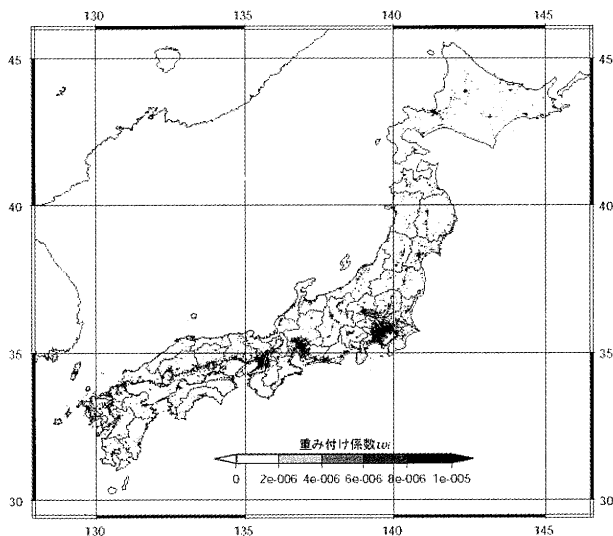


図12 重み付け係数 w_i の全国分布

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。ここで、図12は 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 の値が大きいことが確認できる。

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。

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13に結果を示す。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

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%

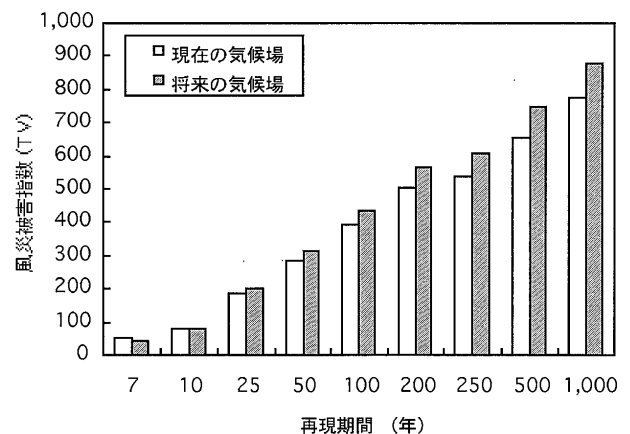


図13 再現期間に対する風災被害指数 (TIV)

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。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。また、将来の建築物の風災に対する耐力は現状と同じとする。

5 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、将来の極値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を示唆している。

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、且つ風速の2乗に風災被害指数は比例するため、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可能性がある。また、熱帯低気圧の上陸個数は、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変化を及ぼす可能性がある。

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¹³⁾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高潮被害の評価も必要である。

参考文献

- 1) The Intergovernmental Panel on Climate Change Working Group I: The Physical Basis of Climate Change, 2007
- 2) UNEP Finance Initiative Climate Change Working Group: Adaptation and Vulnerability to Climate Change: The Role of the Finance Sector, 2006.11
- 3) Association of British Insurers: Financial Risks of Climate Change, 2005. 6
- 4) 宮田利雄, 山田均, 勝地弘, 西脇三智子: 海面温度の影響を考慮した台風シミュレーション, 第17回風工学シンポジウム, pp.29-34, 2002. 12
- 5) 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
- 6) Schloemer, R.W.: An analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Lake Okeechobee, Florida. Hydro meteorological Report, No.31, 1954. 3
- 7) Fujii, T. and Mitsuta, Y.: On the radial pressure profiles of typhoons, Annuals, Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No.38 B-1, pp.101-116, 1995. 4
- 8) 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. 11
- 9) 石原孟: 非線形風況予測モデルMASCOTの開発とその実用化, ながれ, 第22巻 第5号, pp.387-396, 2003. 10
- 10) 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. 4
- 11) 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. 4
- 12) Knutson, T. R. and Tuleya, R. E.: Impact of CO2-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
- 13) The Intergovernmental Panel on Climate Change Working Group II: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2007