

地形効果を考慮した台風シミュレーション手法の開発

後藤 暁 大塚 清敏
川口 彰久

Typhoon Simulation with Topography Effects

Satoru Goto Kiyotoshi Otsuka
Akihisa Kawaguchi

Abstract

The mass-consistent flow simulation (MASCON) model is incorporated into an analytical typhoon model for evaluating the effects of topography under typhoon wind conditions. The validity of this model for flows over complex terrain under strong wind conditions is investigated. Through comparisons with the simulations with a meso-scale meteorological model, flow regimes where the MASCON model gives reasonable results are obtained. The effects on the long-term statistics of extreme winds of the inclusion of topographical effects into the typhoon model are further investigated for Hiroshima City through a Monte Carlo simulation with the revised typhoon model. A probability distribution of maximum typhoon wind speed generated by Monte Carlo simulation was well approximated by a normal distribution. Application to risk assessment by strong wind is also discussed.

概要

台風シミュレーションにMASCON (Mass Consistent flow) モデルを組み込んだ地形影響評価型台風シミュレーション手法を開発した。気象モデルのシミュレーション結果との比較からMASCONモデルの適用範囲について検討した。その後、実地形上を対象としたシミュレーションによりMASCONモデルの妥当性を検討した。その結果、設計風速として設定される風速レベルにおいては、MASCONモデルでの計算結果は気象モデルと同程度に地形影響を再現できる事を確認した。また広島を対象として1,000年間の台風シミュレーションを行った結果、地形影響を考慮した場合の風向特性が現地の地形状況と概ね一致した。

1. はじめに

建築物の耐風設計を実施する際に設計風速は日本建築学会編「建築物荷重指針・同解説」¹⁾の基本風速マップ等を利用して設定している。2004年の「建築物荷重指針・同解説」の改定に際しては、基本風速マップの作成ではこれまでの気象官署の観測データの統計解析だけでなく、確率モデルによる台風シミュレーション²⁾手法を適用して求められた強風の発生確率を反映させ、また、気象官署毎の風向特性を反映させた風向係数を採用するなど、設計風速算定の合理化を図っている。しかしながら、強風被害事例を分析すると、日本の起伏に富んだ地形の状況により、指針の値をそのまま適用できる地域は限定され、気象官署から離れている建設サイトや、地形の影響を受けやすい建設サイトに対して設計風速を設定するには慎重な対応が必要となる。

また、2004年には台風の上陸数が観測史上最多となった。この年は非常に強い台風が多く、各地で強風に起因する被害が多発したことが大きな特徴である。この理由の一つに海面水温が高いことや熱帯地域の風系が通常と異なっていたことなどが挙げられており、温暖化との関連も指摘されている。今後も温暖化の影響は長期的に続くので、台風は強い勢力を維持したまま日本に襲来することになる。強

風災害による被害発生を軽減するためにも台風の強さや襲来頻度等に関する研究はこれまで以上に重要となる。

そこで、建設地周辺の地形を考慮した設計風速の評価手法を確立し、耐風設計風速設定に適用することを目的として、地形影響評価型台風シミュレーションを開発した。

台風シミュレーションは、過去の上陸台風の性質を確率分布によりモデル化し、乱数によって多数発生させた仮想台風1つ1つの移動に伴う風速を時々刻々求め、その極値統計処理から設計風速や累積作用時間を算定するモンテカルロシミュレーション手法である。設計風速設定の補助的手法として、あるいは部材の疲労問題に適用するための強風の累積作用時間の検討などにも用いられている。これまで台風シミュレーション自体には地形の効果を取り入れられておらず、地形が平坦であるものとして、建築学会指針等に基づく地表面粗度区分により地上での風を予測していた。平坦な都市域における風速検討では地表面粗度区分の評価で対応が可能である場合が多いが、郊外の丘陵地帯や山間部に建設される建物については、そのままでは適用が難しい。そこで従来型の台風シミュレーションに地形影響評価を組み込み、複雑地形上での設計風速予測や評価対象地域における地形に起因する風向特性を評価できる手法を開発した。

2. 手法の概要

台風シミュレーションのフローチャートをFig. 1に示す。大まかな手順は次のようになる。①発生させた台風の時々刻々の位置での台風に伴う上空風（傾度風）を算定する。②鉛直分布を仮定して上空風から地上風を決定する。③得られた風速分布を初期値として、後述するMASCONモデルにより地形影響を評価する。④評価対象地点における風速データを必要年数分保存する。⑤風速データの統計処理により設計風速値や累積作用時間の評価を行う。

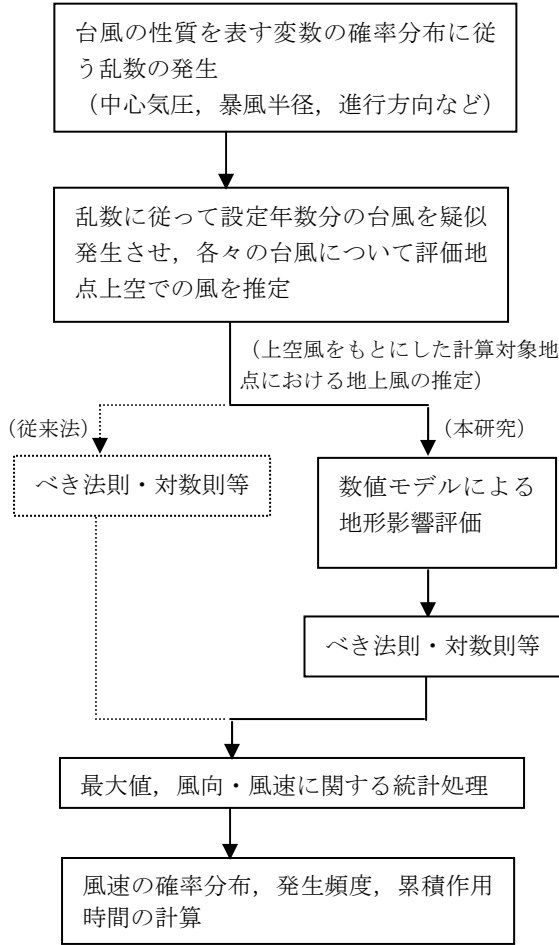


Fig. 1 台風シミュレーションのフロー
Flow Chart of Typhoon Simulation

2.1 上空風の評価

台風域内の上空での風速（傾度風速）分布を表すモデルは藤井、光田の方法³⁾に従う。上空における傾度風速 U_G は、(1)式で示す傾度風平衡式、(2)式のBlatonの公式、および(3)式のSchloemerの気圧分布式を連立させることにより算定できる。

$$U_G^2 / r_t + f \cdot U_G = (1/\rho) \cdot (\partial p / \partial r) \quad (1)$$

$$1/r_t = (1/r) \cdot \{1 + (C/U_G) \sin \alpha\} \quad (2)$$

$$p = p_c + \Delta p \cdot \exp(-r_m / r) \quad (3)$$

ここで、 r_t は空気塊の運動の曲率半径(m)、 f はコリオリパラメータ(s^{-1})、 ρ は空気密度(kg/m^3)、 r は台風中心から風を推算する場所までの距離(m)、 C は台風の進行速度(m/s)、 α は台風中心から風を推算する場所へ向く位置ベクトルが台風の進行方向となす角度、 p は推算位置での海面気圧(hPa)、 p_c は台風の中心気圧(hPa)、 Δp は中心気圧低下量(本件では $1013 - p_c$ とした)、 r_m は台風域内で旋衡風速が最大となる r の値(m)である。

2.2 地形影響評価法

地形影響を評価する手法としては計算流体力学 (CFD) モデルによる方法が多用されるようになってきており、その計算精度に関しても実用上妥当な結果が得られている。ところが、モンテカルロ法を用いた台風シミュレーションへのCFDの適用は、莫大な計算時間を必要とするため、現在の計算機能力では実用上不可能である。したがって、本研究ではMASCON (Mass Consistent flow) モデルを適用して高速に地形影響を評価することとした。MASCON モデルは、Shearman⁴⁾により提唱された手法であり、CFDが発達する以前は、風の流れに対する地形影響を評価する手段として、主に汚染物質の大気拡散の問題などに適用されてきた^{4),5)}。今日においても計算時間が短縮できることから、広域対象の風況予測に用いられている例がある⁶⁾。

MASCONモデルは、与えられた流れの場を、質量保存則を満足するように修正する内挿手法である。流体力学的には、初期に与えられた風速場について、地面の起伏に起因する圧力のみによる非圧縮流れ場の変形を求める問題となるため、流れ場の形成過程で地面起伏による強制が支配的である場合、例えば比較的規模の大きな山稜のまわりの平均的な流れ場などに十分適用可能である。

地面標高を h として地面に沿った座標系($\xi=x$, $\eta=y$, $\zeta=z-h(x,y)$)を用いる。初期の風速場を($u_0(\xi,\eta,\zeta)$, $v_0(\xi,\eta,\zeta)$, $w_0(\xi,\eta,\zeta)$)とすると修正後の風速場($u(\xi,\eta,\zeta)$, $v(\xi,\eta,\zeta)$, $w(\xi,\eta,\zeta)$)は、スカラー $\lambda(\xi,\eta,\zeta)$ を用いて次のように表される⁴⁾。

$$u = u_0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \left(\frac{\partial \lambda}{\partial \xi} - \frac{\partial h}{\partial \xi} \frac{\partial \lambda}{\partial \zeta} \right) \quad (4)$$

$$v = v_0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \left(\frac{\partial \lambda}{\partial \eta} - \frac{\partial h}{\partial \eta} \frac{\partial \lambda}{\partial \zeta} \right) \quad (5)$$

$$w = w_0 + \frac{1}{2\alpha_2^2} \frac{\partial \lambda}{\partial \zeta} \quad (6)$$

ここで、 α_1 , α_2 は風速修正の重み係数⁴⁾で、大気安定度に関係している。浮力の影響が無視できる状態、すなわち中立状態では $\alpha_1=\alpha_2=1$ 、例えば地表付近が低温で上空が高温となる安定成層の場合では $\alpha_1 < \alpha_2$ となる。本論では、 $\alpha_1=1$, $\alpha_2=3$ を採用した。

修正後の風速場は非圧縮流体の連続式を満足するので、その条件を式(1)に適用すると、 λ に関する楕円型方程式、

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial \eta^2} + \left\{ \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial \eta} \right)^2 \right\} \frac{\partial^2 \lambda}{\partial \zeta^2} - 2 \frac{\partial h}{\partial \xi} \frac{\partial^2 \lambda}{\partial \xi \partial \zeta} - 2 \frac{\partial h}{\partial \eta} \frac{\partial^2 \lambda}{\partial \eta \partial \zeta} - \left(\frac{\partial^2 h}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial \eta^2} \right) \frac{\partial \lambda}{\partial \zeta} + 2 \alpha_1^2 \left(\frac{\partial u_0}{\partial \xi} + \frac{\partial v_0}{\partial \eta} + \frac{\partial w_0}{\partial \zeta} - \frac{\partial h}{\partial \xi} \frac{\partial u_0}{\partial \zeta} - \frac{\partial h}{\partial \eta} \frac{\partial v_0}{\partial \zeta} \right) = 0 \quad (7)$$

が得られる。適当な境界条件に対して式(7)をλについて解き、式(1)を利用すると修正後の風速場が得られる。

なお、境界条件は以下のように設定した。

$$\text{地上：} \quad \delta w = \frac{\partial h}{\partial \xi} \delta u + \frac{\partial h}{\partial \eta} \delta v \quad (8)$$

$$\text{その他の境界：} \quad \lambda = 0 \quad (\text{ディリクレ条件}) \quad (9)$$

大気は成層流体であるため、地形と流れとの力学的相互作用においては成層状態も関与している。MASCONモデルは、(4)～(6)式からわかるように、速度の修正の大きさを水平方向と鉛直方向で区別することで大気の安定度の影響を取り扱っている。しかし、浮力は本来、スカラー量の勾配で表されるものではないので、(4)～(6)式の形では安定度が完全に考慮されているとはいえない。

ただし、この点に関しては、風速が大きく乱流が十分に発達している大気境界層は、ほぼ中立であると判断できるので、ここに示した安定度修正の問題点は、強風を対象としたMASCONモデルの評価にはほとんど影響を与えない。実際、建築物を対象とした強風時の解析ではほとんどの場合中立が仮定されている^{6),7)}。

山越え気流の性状は、大まかには浮力振動数(プラントーパイサラ振動数) N, 水平風速U, 山稜の水平スケールLによって定義されるフルード数, $Fr=U/(LN)$ をパラメータとして評価される。中立状態の大気では $N=0$ なので $Fr=\infty$ となるが、成層流体でNが有限値であっても、風速Uが大きくなるとそれに伴ってFrが大きくなり、中立流体の性状に近づく⁹⁾。また、地形のスケールが小さくなる(Lが小さくなる)と、より低い風速において温度成層の影響が小さくなると判断できる。この考えに基づき成層を考慮した気象シミュレーションと比較することによりMASCONモデルの適用性を検討することとした。

3. 計算結果

3.1 地形影響評価法

まず、強風時気流の中立仮定の妥当性を確認するため、乾燥大気の圧縮性・非静水圧気象力学モデル¹⁰⁾を用いて、孤立峰を対象にした流入風速の違いによる山越え気流の性状変化について検討した。計算対象とした孤立峰の地表面からの高度は、 $z(x, y) = Ha^2 / (a^2 + x^2 + y^2)$ により与えた。ここで、x, yはそれぞれ東西、南北方向の座標値(原点:x=0, y=0), H(=1km)は頂上の高さ, a(=2.5km)は地表面高度が山頂高度の半分になる位置である。aは山稜の水平スケールを表している。

ールを表している。

気象力学モデルの計算は、Table 1 に示すように大気安定度を固定し、流入風速を系統的に変化させた4ケースおよび気流を中立状態とした1ケースの計5ケースについて行った。流入気流は地上から上空まで鉛直方向に速度勾配を有しない一様な風速を持つ西風(x軸と平行に流れる風)とした。また、風速に対する地形の影響のみを見るため地面摩擦、コリオリ力は無いものとした。計算領域は東西×南北×鉛直=90km×90km×15km, 格子点間隔は水平方向1km, 鉛直方向は可変で28層(最下層は層厚20m)とした。

Table 1 気象モデルの計算ケース

Cases of the Numerical Experiments			
ケース	風速	安定度	備考
1	10m/s	dθ/dz=4K/km	一様安定度
2	20m/s	dθ/dz=4K/km	一様安定度
3	30m/s	dθ/dz=4K/km	一様安定度
4	40m/s	dθ/dz=4K/km	一様安定度
5	40m/s	dθ/dz=0K/km	中立状態

計算結果をFig. 2 に示す。図は山稜の中心を通る東西方向の地上100mにおけるスカラー風速の分布である。ハッチ部は地形断面である。流入気流の風速によって、山稜に対して風速の分布が変化している。ケース1(風速10m/s)では地形に対して風速分布が非対称であり、風上・風下側山腹にそれぞれ風速の最小・最大が現れている。風速が上がるにつれ(ケース2～4), 風速分布は地形に対して次第に対称に近づく。風速40m/sのケース4を中立状態の気流(ケース5, 赤線)と比較すると類似した風速分布となっており、大気が安定度を持っていても風速の上昇により中立状態の気流分布に近づくことが確認できる。さらに、MASCONモデル(青線)の計算結果は、中立状態のケース5とほとんど同じであり、設計風速レベルのような高風速における地形影響評価に対するの適用は妥当であると考えられる。

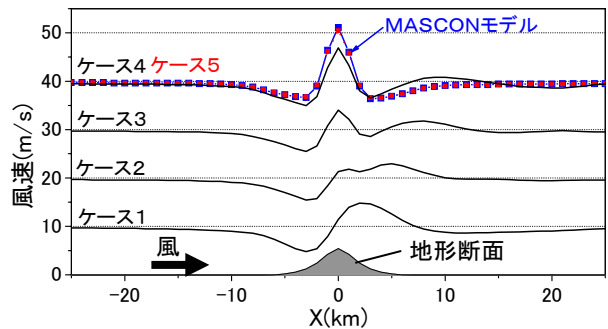


Fig. 2 孤立峰を超える風速度分布(地上100m)
Distribution of Wind over the Isolated Hill
at 100 meters above the Ground

次に耐風設計で問題となる風速レベルに対して、実地形を対象にシミュレーションを行い、MASCONモデルと気象モデルによる風速分布の結果を比較した。地形の起伏に富んでおり、西風の場合に海から陸に向かう風となって地形

効果の検証がしやすい、九州西北部の120km四方の区域を対象とした。気象モデル、MASCONモデルともに、水平方向の格子点間隔は1kmである。風速40m/sの様な西風を流入させ、地面摩擦は考慮していない。気象モデルは全層にわたって中立を仮定した。この格子点における計算時間は気象モデルが2時間程度だったのに対し、MASCONモデルでは1分不足であった。

地上100mにおける風速分布をFig. 3 に示す。Fig. 3a) は気象モデルの計算結果であり、Fig. 3b) はMASCONモデルによる結果である。風速の等高線間隔は、0.5m/s、風速40m/s以上が実線、それ未満が破線で示されている。得られた風速分布を比較すると、細部には差異が見られるが、

全体的には相互にかなり類似している。気象モデルでは有明海において破線のコンター線があるが、これは0.1~0.2m/s程度の風速の微かな強弱によって生じたものである。

そこで地上100mにおける格子点毎のMASCONモデルと気象モデルの風速値を抽出し、比較したものをFig. 4 に示す。高風速側でMASCONモデルのほうがやや低めになっているが、両者の結果は概ね一致する。また、両者の結果を風速比 (MASCON計算値/気象モデル計算値) として分布図を描くとFig. 5 のようになる。山岳の山頂付近での差が大きいが、概ね5%以内の違いである。

MASCONモデルによる計算結果は、40m/s程度の強風時の風速分布に与える地形影響を気象モデルと同程度に表し

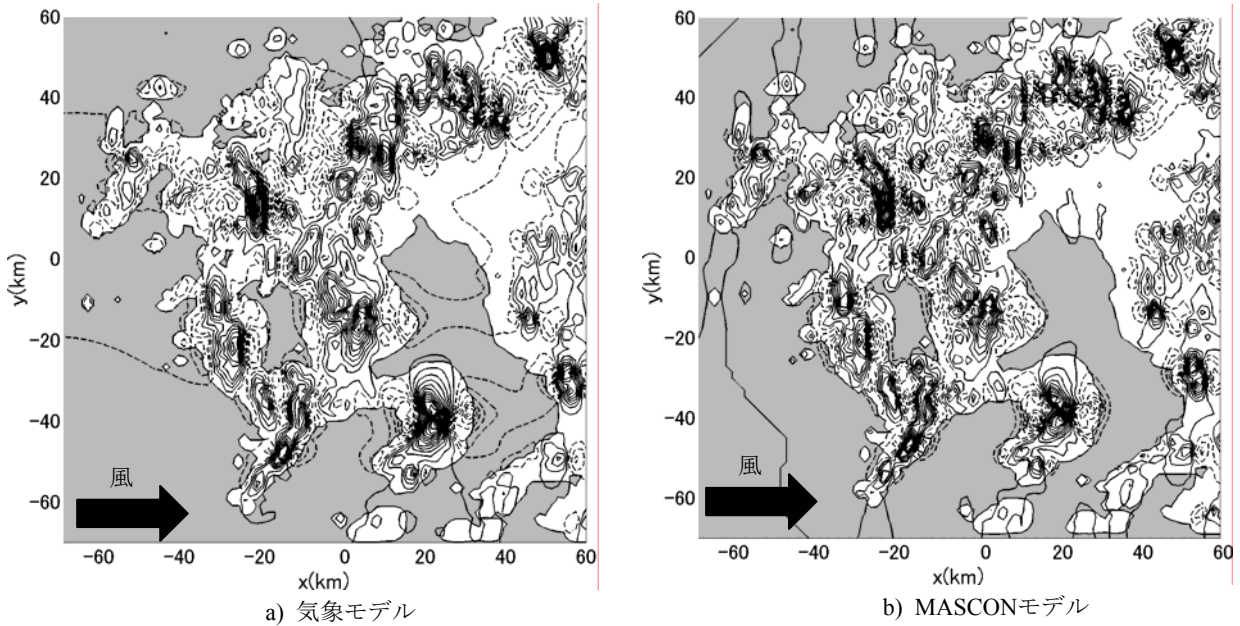


Fig. 3 実地形上での風速の分布 (九州地方, 地上100m高さ)
Horizontal Distributions of the Calculated Wind Speed
over the Kyusyu-island at 100 meters above the Ground

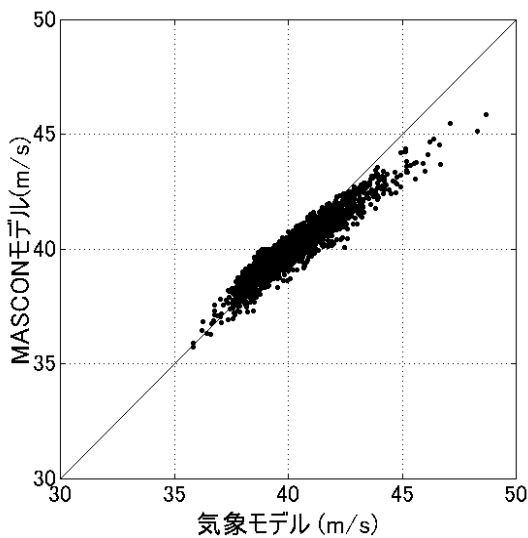


Fig. 4 各格子点毎の風速の比較 (地上100m高さ)
Comparison of the Wind Speed between
the MASCON and the Meteorological Models.

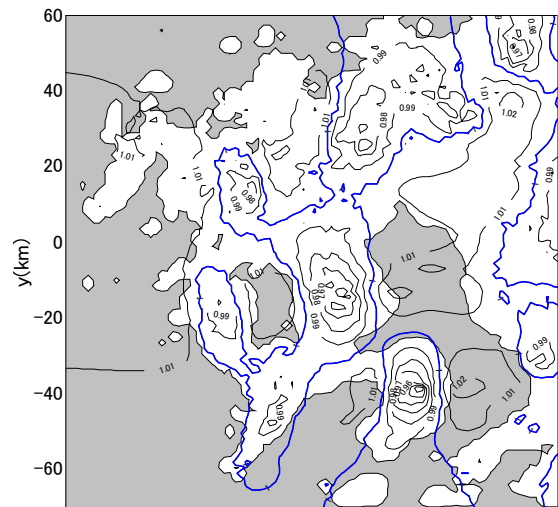


Fig. 5 風速比の分布
(風速比=MASCON計算値/気象モデルの計算値)
Distribution of the Ratio of the Wind Speed
(Ratio=MASCON/Meteorological Model)

ていると考えられる。

3.2 地形影響を考慮した台風シミュレーション

2004年の台風襲来により市内各所で強風の被害を受け、周辺地形の影響が大きいと考えられる広島を対象に1,000年間のモンテカルロシミュレーションを試みた。台風発生に関するパラメータは藤井・光田のモデル³⁾を適用した。広島市周辺の地形をFig. 6に示す。対象地点(広島地方気象台)は広島盆地に位置している。その周囲は、南側は広島湾に面しているが、他の3方は山地に囲まれており、図中に示したように北東-南西方向の谷地形が支配的である。

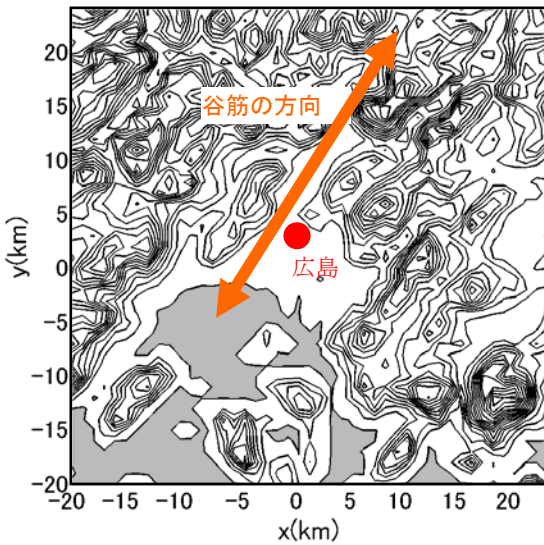


Fig. 6 広島周辺の地形の状況
Topography around Hiroshima City

風速の非超過確率は建築物荷重指針¹⁾でも用いられている修正Jensen & Frank法¹¹⁾(以後、MJF法とする)により定める。非超過確率を定める方法として従来より一般的に使われている(10)式のHazenの方法¹²⁾が年最大風速に対して非超過確率を当てはめるのに対し、MJF法では台風シミュレーションで計算された各々の台風の最大風速に対して非超過確率を与えられるので年2番目以降の強風も考慮できる事が特長である。N年間にn個の台風が存在する場合、m番目の風速値の非超過確率Fは(11)式で表される。(Hazenの方法)

$$F = 1 - \left(\frac{m - 0.5}{N} \right) \quad (10)$$

(MJF法)

$$F = \left(1 - \frac{2m - 1}{2n} \right)^{n/N} \quad (11)$$

風速と再現期間の関係を図7に示す。再現期間の短いところでは風速に大きな差は見られないものの、再現期

間が長くなるにつれて地形影響を評価した場合としない場合での風速の差が大きくなる。例えば再現期間100年で地形の影響を評価しない場合の風速は40.5m/s程度であるが、地形の影響を評価すると風速は43m/sとなり、約6%の差となる。これは地形影響を評価しない場合の200年再現期間風速相当の風である。もちろんこの風速増加の割合はあくまで広島地方気象台観測高さにおける結果であり、全ての地点に対して風速が一樣に増減するわけではないが、強風災害リスクという観点からは決して小さい差ではない。

また、風速20m/s以上の風向別発生頻度をFig. 8に示す。地形の有無で分布が大きく異なる。地形影響を評価しない場合には東よりの風向が多いのに対し、地形評価すると北東-南西方向に流れる風が多い。その直角方向(北西-南東)の風の頻度はほとんど無い。これは広島周辺の谷筋の方向とほぼ一致している。

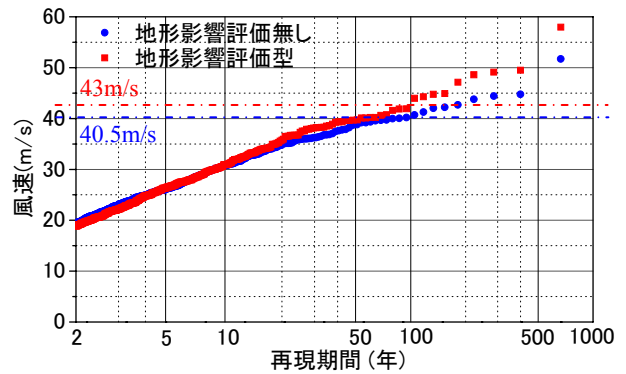


Fig. 7 再現期間と風速の関係

Relations between Return Period and Wind Speed

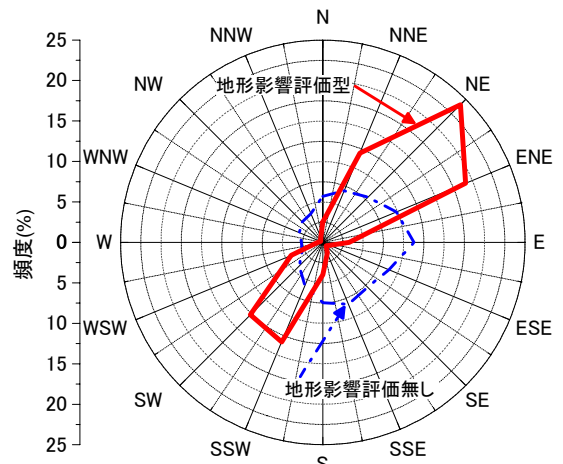


Fig. 8 風向発生頻度(風速20m/s以上)

Wind Rose Obtained from the Monte Carlo Simulation

4. 強風災害リスク評価への展開

台風の襲来は、建築物への致命的な被害を及ぼし、国民生活に計り知れない影響を与えることもある。建築物の強風被害を低減するためには、襲来する台風の影響を把握し

た上で必要な強度を施すことが必須である。そこで、台風シミュレーションの結果を強風災害に対するリスク評価に展開することを目的として、強風の発生確率のモデル化を試みた。

広島を対象とした台風シミュレーションで計算された個々の台風の最大風速の頻度分布をFig. 9 に示す。横軸は発生した風速階級を平均値と標準偏差で規格化した確率変数であり、縦軸は発生頻度(%)である。頻度は図中実線で示される正規分布曲線と良好な一致を示している。

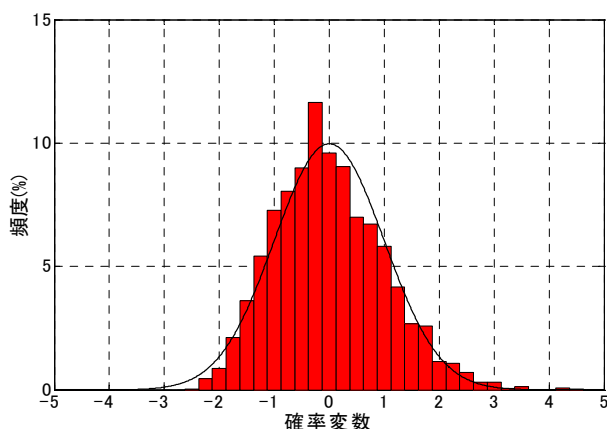


Fig. 9 最大風速の確率分布

Probability Distribution of Maximum Wind Speeds

そこで、個々の台風の最大風速の発生頻度が正規分布に従うと仮定すると、確率密度関数は以下の式で示される。

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right), \quad z = \frac{U - \bar{U}}{\sigma} \quad (12)$$

ここで、 \bar{U} は分布の平均値、 σ は標準偏差、 z は確率変数である。(12)式の U に「建築物荷重指針・同解説」¹⁾で求められる再現期間100, 500年の風速 U_{100} , U_{500} を代入し、 f は荷重指針からでは推定できないので台風シミュレーションの結果に基づいた再現期間100, 500年に相当する確率密度を適用することにより \bar{U} と σ が決定できる。これに基づくと、例えば広島の場合では、建築基準法で対象となる再現期間50年の風速は再現期間100年の風速に比べて約6%程度の低減であるが、供用期間50年での遭遇確率で比べると、再現期間100年の風が約50%なのに対し再現期間50年では約76%にもなる。風速の発生確率と部材の破壊確率との結合確率を求めることにより強風災害リスク評価へと展開を図ることができる¹³⁾。

5. まとめ

台風シミュレーションに地形影響評価を組み込む手法を開発し、その適用範囲について検討した。気象モデルの

計算結果から、耐風設計で問題となる風速レベルでは中立状態の気流に近づくこと、さらに気流が中立状態に近い場合には、MASCONモデルでの計算結果は気象モデルと同程度に地形影響を再現できることを確認した。その後、広島を対象とした台風シミュレーションを実施し、風速風向の計算結果について妥当性を検討した。さらに、強風災害リスク評価に展開するため、台風シミュレーションの結果から風速の発生確率を正規分布でモデル化する手法を示した。大規模な生産施設や、通信施設などは都市部を離れ郊外の丘陵地や山間部に建設されることが多く、そうした施設における耐風設計、あるいは強風災害リスク評価を行う上で地形影響の評価は重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説(2004)
- 2) 松井, 他：風向特性を考慮した矩形高層建物の風荷重評価, 第17回風工学シンポジウム論文集, pp.499~504, 2002
- 3) 藤井, 他：台風の確率モデルによる強風のシミュレーション, 日本風工学会誌, 第28号, pp.1~12, 1986
- 4) Shearman, C.A.: A Mass-Consistent Model for Wind Fields over Complex Terrain, J. Appl. Meteorol., vol. 17, pp.312~319, 1978
- 5) 横山長之編：大気環境シミュレーション, 白亜書房, pp.112~133, 1992
- 6) Panagiotidis, T.C., et al.: A hybrid micro-siting model for wind flow simulation over complex topographies, Proc. EWEC 10-14 Oct. Thessaloniki, 1994
- 7) 孟, 他：中立時の大気境界層における強風の鉛直分布特性 その1 非台風時の強風, 日本風工学会誌, 第65号, pp.1~15, 1995
- 8) 崔, 他：風荷重評価のための平均風速と乱れの強さの鉛直分布特性, 日本風工学会誌 第45号, pp.23~43, 1990
- 9) 小倉義光：メソ気象の基礎理論, 東京大学出版会, pp.19~54, 1997
- 10) 大塚清敏：地域気象モデルによる複雑地形上の風の場のシミュレーション, 第13回風工学シンポジウム論文集, pp.585~592, 1994
- 11) Cook, N.L.: Improving the Gumbel analysis by using M-th highest extremes, Wind and Structures, Vol.1, No.1, pp.25~48, 1998
- 12) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説, 1993
- 13) 川口, 他：強風災害リスクの簡易評価法, 日本建築学会大会学術講演梗概集(構造I), pp.131~132, 2006