

台風時の風向特性と複雑地形の増速特性を考慮した風速割増係数の評価手法の提案

Prediction of Wind Speedup Ratio Considering Wind Direction of Typhoon and Speed-up of Complex Terrain

菊地 由佳 石原 孟
Yuka KIKUCHI¹⁾ Takeshi ISHIHARA²⁾

ABSTRACT

It is important to assess the design wind speed reasonably for wind resistant design. In the current design in Japan, the maximum of the topographical wind speed-up ratio over all the directions is used, which may overestimate the design wind speed. This paper proposed a method for evaluation of speedup ratio considering wind direction of typhoon and speed-up due to the complex terrain. Speedup ratio is defined as the ratio of 50-year-recurrence wind speed over a real terrain to that in a flat surface. The wind speed estimated by the proposed method shows a good agreement with the measurement data at meteorological stations of JMA. Finally, the reduction factor and coefficient of variation of topography are proposed and the relationship between speedup ratio and topography is investigated by using several three-dimensional steep hills.

Key Words: Speedup ratio, Typhoon simulation, Reduction factor, Coefficient of variation of topography

1. はじめに

風車は大量に生産される工業製品であるため、設置地点毎の環境条件に基づき設計風速を求め、風車の健全性を評価することが重要である。2005年に発行された風車に関する国際基準 IEC61400-1 の第3版¹⁾においては、風車を建設する際には設置地点の風条件に基づき風車に作用する荷重を算出し、風車の健全性を評価することが求められている。欧州と異なり、日本における強風の主要因は台風であり、また局所的な地形による増速効果が設計風速に大きな影響を与える。建築基準法にも、「局所的な地形や地物の影響により平均風速が割り増されるおそれのある場合においては、その影響を考慮しなければならない」との記述がある。ただし、その評価手法については規定していない。一方、近年台風による風車の倒壊事故が発生したことを受け、2007年に土木学会により「風力発電支持物構造設計指針・同解説」²⁾が制定された。本指針では、地形による風速の割増効果を風向別の風速割増係数の最大値で評価し、基準風速に乗じることにより設計風速を評価している。しかしながら、この手法では台風時の風向特性を考慮しておらず、設計風速を過大に評価する可能性がある。

そこで、本研究では台風時の風向特性と複雑地形の増速特性を同時に考慮した風速割増係数の評価手法を提案し、気象台における風観測データを用いて本提案手法の妥当性を検証する。そして、風速割増低減係数及び地形変動係数を提案し、地形特性が風速割増係数に与える影響をモデル地形を用いて調べる。

2. 風速割増係数の評価手法の提案と検証

2.1. 風速割増係数の評価手法の提案

現在、局所的な地形の影響を受ける場合の設計風速を評価する際には、50年再現期待風速である基準風速 U_{50} に地形による風向別風速割増係数の最大値を乗じることにより以下のように評価される。

^{1),2)} 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 大学院生、教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

$$U_d = U_{50}(x, y, z) \times \max(C_i) \quad (1)$$

ここで、 U_d は設計風速、 C_i は i 方向における地形による風速割増係数であり、定義は式(8)に示す。この評価手法は設計風速を過大評価する可能性がある。そこで、本研究では、新たに風速割増係数 C_{50} を定義し、設計風速を次式より評価することを提案する。

$$U_d = U_{50} \times C_{50}, \quad C_{50} = \frac{U_{i50}}{U_{f50}} \quad (2)$$

ここで、 U_{f50} は平坦地形上の 50 年再現期待風速、 U_{i50} は実地形上の 50 年再現期待風速を表す。以下、 U_{f50} 、 U_{i50} の算定手順を詳細に示す。

まず、熱帯低気圧に伴う傾度風速場及び台風時の海面気圧場は、次式のように算出できる。³⁾

$$v_{\theta g} = \frac{c_\theta - fr}{2} + \sqrt{\left(\frac{c_\theta - fr}{2}\right)^2 + \frac{r}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}}, \quad v_{rg} = 0 \quad (3)$$

$$p(r) = p_c + \Delta p \exp\left(-\frac{R_m}{r}\right), \quad \Delta p = p_e - p_c \quad (4)$$

ここで、 $v_{\theta g}$ は傾度風の円周方向成分、 v_{rg} は傾度風の半径方向成分、 ρ は密度、 c_θ は台風移動速度の円周方向成分、 p_c は中心気圧低下量、 r は台風中心からの距離、 R_m は最大旋衡風速半径である。

次に、台風時の大気境界層内の風速分布 $u_r(z)$ と風向分布 $\theta_r(z)$ は次のように求める。³⁾

$$u_r(z) = u_G (z/z_G)^{\alpha_u} \quad (5)$$

$$\theta_r(z) = \theta_G + \theta_s (1.0 - 0.4(z/z_G))^{1.1} \quad (6)$$

ここで、 $u_G (= \sqrt{v_{\theta g}^2 + v_{rg}^2})$ は傾度風、 z_G は傾度風高さ、 z は地表面からの高さ、 α_u は鉛直プロファイルを表すべき指数、 θ_s は風向の偏角である。またこれらのパラメータは傾度風 u_G 、地表面粗度長 z_0 、絶対渦度 f_λ 、渦度の非一様性を表すパラメータ ξ を用いて以下のように表すことができる。

$$\alpha_u = 0.27 + 0.09 \log z_0 + 0.018 \log^2 z_0 + 0.0016 \log^3 z_0 \quad (7)$$

$$z_G = 0.06(u_G / f_\lambda)(\log R_{o\lambda})^{-1.45} \quad (8)$$

$$\theta_s = (69 + 100\xi)(\log R_{o\lambda})^{-1.13} \quad (9)$$

ここで、 $R_{o\lambda} (= U_G / f_\lambda z_0)$ は地表ロスビー数と呼ばれる無次元数である。以上に示す式により、粗度が一樣な平坦地形上の台風時の任意高さでの風速と風向が求められる。

そして、局所地形の影響を考慮した実地形上の風速の求め方を説明する。気流解析により、次式に示すように実地形と粗度一樣な平坦地形の風速比及び風向偏角を風向の関数として求める。

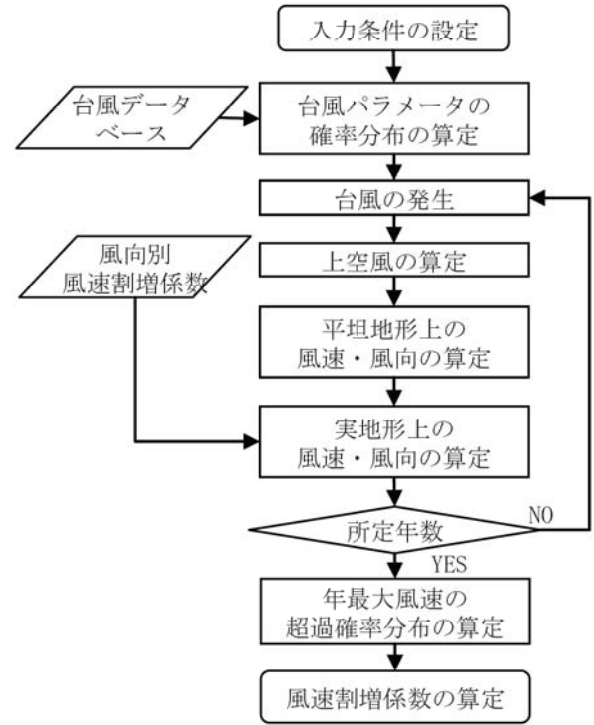


図1 風速割増係数算定の手順

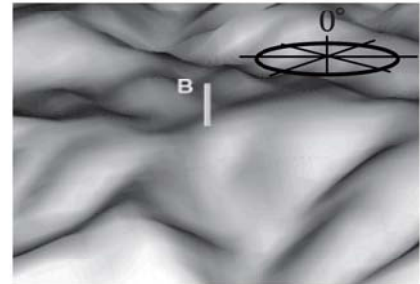


図2 対象地点の周辺地形（積丹半島）⁵⁾

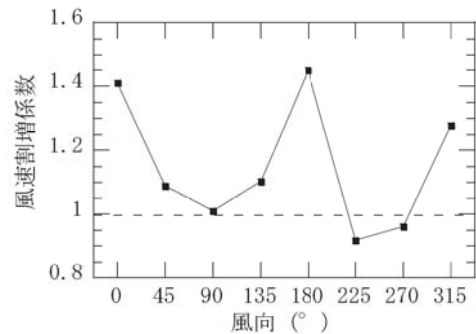


図3 対象地点における風向別風速割増係数⁵⁾

$$C_t(x, y, z, \theta_f) = \frac{u_t(x, y, z, \theta_f)}{u_f(x, y, z, \theta_f)} \quad (10)$$

$$D_t(x, y, z, \theta_f) = \theta_t(x, y, z, \theta_f) - \theta_f \quad (11)$$

ここで、 $u_t(x, y, z, \theta_f)$ 、 $u_f(x, y, z, \theta_f)$ は気流解析により求めた実地形と平坦地形上の風速であり、 $\theta_t(x, y, z, \theta_f)$ 、 θ_f は実地形と平坦地形上の風向を表す。詳細については、文献 4)、5)を参考されたい。

局所地形は総観場に影響を与えないと仮定すると、局所地形の影響を考慮した台風時の風速と風向は、平坦地形上の風速と風向及び式(10)、(11)により求めた実地形と平坦地形の風速比と風向偏角を用いて、次式のように求めることができる。⁶⁾

$$u_t(x, y, z, t) = u_f(t) \times C_t(x, y, z, \theta_f(t)) \quad (12)$$

$$\theta_t(x, y, z, t) = \theta_f(t) + D_t(x, y, z, \theta_f) \quad (13)$$

最後に台風モンテカルロシミュレーションにより平坦地形上の風速の時系列と実地形上の風速の時系列を求める。

まず、過去観測された台風経路と気圧分布から対象地点における台風パラメータの確率分布を求める。次に求められた確率分布に従い、台風を人工的に発生させるとともに、それぞれの台風に対して、対象地点における平坦地形上と実地形上の風速の時系列を求める。本研究では石原らにより提案された台風モンテカルロシミュレーション手法⁷⁾を用いて1万年分の台風モンテカルロシミュレーションを実施した。台風モンテカルロシミュレーションにより求めた年最大風速を昇順に並び替え、年最大風速の超過確率分布を求め、平坦地形上の50年再現期待風速 U_{f50} および実地形上の50年再現期待風速割増係数 U_{t50} を求めた。

図4には、積丹半島のある地点で提案手法により求めた年最大風速の超過確率分布を示す。図2には対象地点周辺の地形を示し、図3には対象地点における風向別風速割増係数を示す⁸⁾。図4から分かるように、平坦地形上の50年再現期待風速 U_{f50} は30.4m/s、実地形上の50年再現期待風速 U_{t50} は40.1m/sであり、式(2)により定義される風速割増係数は1.32となった。風向別風速割増係数の最大値は1.45であることを考えると、従来手法に比べ、本提案手法による風速割増係数が9%低減していることが分かる。

2.2. 気象台の風観測データによる検証

提案した手法の有効性を示すために気象台の風観測データを用いた検証を行った。気象台は全国で157箇所あり、そのうちの約1割が複雑地形の影響を受けることが言われている。本研究では、地形により増速する室戸岬特別地域気象観測所、減速する長崎海洋気象台、地形の影響を受けない宮古島地方気象台を選択した。気象台の風観測データは風速と風向の10分間平均値が揃っている1995年以降から2006年までのデータを用いた。

まず気流解析により風向別風速割増係数を算出した。本研究では、気流解析に局所風況予測モデルMASCOTを用いた。表1に気流解析の条件を示し、気流解析による風向別風速割増係数を図6に示した。風向別風速割増係数の最大値は各々1.51、1.00、1.13であることが分かる。

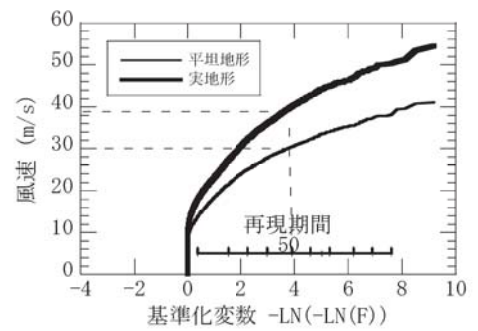


図4 対象地点における年最大風速の超過確率分布



図5 対象地形と解析格子

表1 気流解析の諸条件

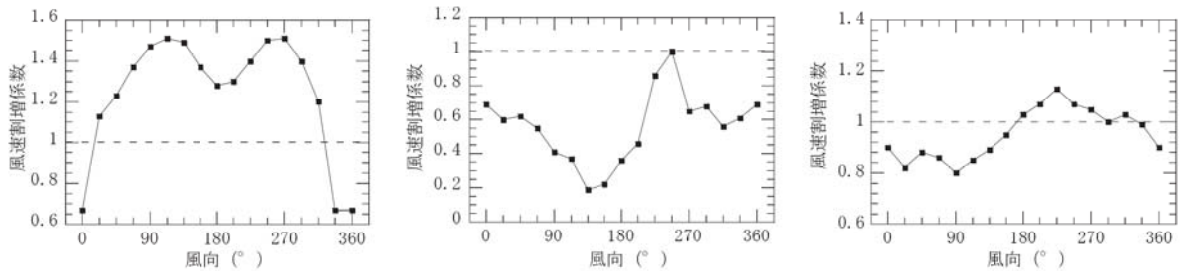
値		
位置	室戸岬	N33°15'06"E134°10'36"
	長崎	N32°44'00"E129°52'00"
	宮古島	N24°47'36"E125°16'36"
領域	5km×5km×10km	
最小格子	50m(水平)	
	5m(垂直)	
標高	国土地理院 50m	
土地利用	国土地理院 100m	
流入風	室戸岬	粗度区分Ⅲに対応
	長崎	粗度区分Ⅰに対応
	宮古島	粗度区分Ⅲに対応

次に、気象台における過去に観測された台風時の海面気圧場の統計分析を行い、台風気圧場の確率分布を求めた。ここでは、対象地点の半径 500km を通過し、中心気圧が 985hPa 以下となった台風に関する観測データから、台風の中心気圧低下量 ΔP 、最大旋衡風速半径 R_m 、進行速度 C 、進行方向 θ 、最接近距離 $d_{\min}$ 及び年発生頻度 λ を調べた。表 2 には台風パラメータに関する確率モデル及びモデル係数の一覧を示す。 μ は平均風速、 σ は風速の標準偏差、 k は形状係数、 c は尺度係数、 a は混合係数、 z は二次関数の係数、 λ は年発生回数の平均値である。

表 2 室戸岬特別地域気象観測所における各台風パラメータに関する統計モデルおよびモデル係数の例

台風パラメータ	確率分布関数		モデル係数
中心気圧低下量 ΔP	混合確率分布	$F_M(x) = a \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln x}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_{\ln x}}{\sigma_{\ln x}}\right)^2\right] + (1-a) \times \frac{k}{C}\left(\frac{x}{C}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{C}\right)^k\right]$	$\mu=1.64, \sigma=0.12, k=4.01, c=49.7, a=0.99$
最大旋衡風速半径 R_m			$\mu=1.98, \sigma=0.22, k=2.16, c=122.74, a=0.57$
進行速度 C			$\mu=1.54, \sigma=0.21, k=2.43, c=43.07, a=0.40$
進行方向 θ	標準正規分布	$F_S(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2\right]$	$\mu=161.02, \sigma=36.29$
再接近距離 $d_{\min}$	二次関数	$d_{\min} = z(x^2 - x) + 1000x - 500$	$z=-166.11$
台風の発生数 λ	ポアソン分布	$\frac{\lambda^x \exp(-\lambda)}{x!}$	$\lambda=3.30$

これらの確率分布に基づき、前述の手法により年最大風速の超過確率分布を求め、台風による年最大風速の観測値と一緒に図 7 に示す。本手法による年最大風速の超過確率分布と風観測データによる台風時の年最大風速の超過確率分布がよく一致し、本手法の妥当性が示された。また風向別風速割増係数の最大値に対する本手法による風速割増係数は、室戸岬では 1.51 に対し 1.43、長崎では 1.00 に対し 0.76、宮古島では 1.13 に対し 1.00 となり、風速割増係数は各々 5%、20%、11% 低減した。

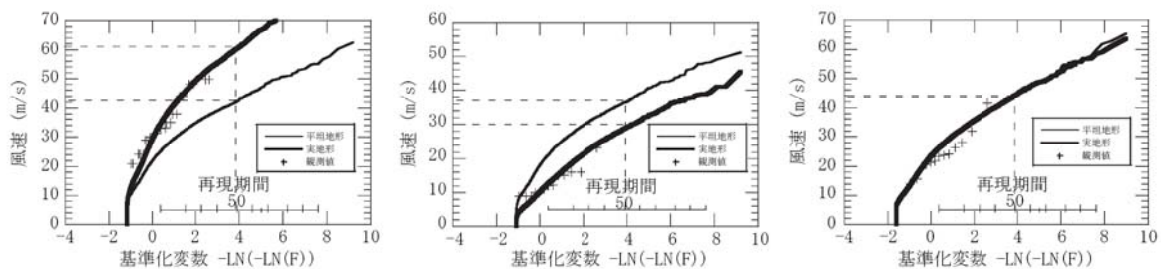


(a) 室戸岬特別地域気象観測所

(b) 長崎海洋気象台

(c) 宮古島地方気象台

図 6 気象台における風向別風速割増係数



(a) 室戸岬特別地域気象観測所

(b) 長崎海洋気象台

(c) 宮古島地方気象台

図 7 気象台における年最大風速の超過確率の予測値と観測値の比較

3. 風速割増低減係数と地形変動係数の提案

前節から台風時の風向特性を考慮することにより風速割増係数を低減できることが明らかになった。しかしながら、風向別風速割増係数が風向によらずすべて同じである場合には、風向別風速割増係数の低減は見込めない。孤立峰はその一例である。一方、尾根のように風向別風速割増係数が風向によって大きく異なる場合には、風速割増係数が低減することが予想される。風速割増係数の低減の度合は、実際に台風モンテカルロシミュレーションを行う前に予測可能であれば、シミュレーションの必要性を判断できる。そこで、本研究では地形の形状を代表する長さのアスペクト比を変化させることにより、地形の形状が風速割増係数に与える影響を調べる。

まず風速割増低減係数 r_f を次式のように定義する。

$$r_f = C_{50} / \max(C_i) \quad (14)$$

ここで、 C_{50} は本提案手法により求めた風速割増係数、 C_i は風向別の風速割増係数である。風速割増低減係数は風向別風速割増係数の最大値に対する低減率を表す。

次に、地形の変動を表す指標として地形変動係数 σ_t を次式により定義する。

$$\sigma_t = \sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^n (C_i / \max(C_i) - 1)^2 \right\} / 16} \quad (15)$$

ここで、 n は方位を表す。この係数はすべての風向における風速割増係数が同じ値であれば 0 となる。

最後に、モデル化した地形に対して気流解析することにより提案した地形変動係数と風速割増低減係数の関係を調べた。モデル地形には、過去に行われた風洞実験⁸⁾に基づき作成された風洞実験におけるモデル地形の 5000 倍の地形を用いた。モデル地形の式を以下に示す。

$$z = \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\left(\frac{x}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{y}{L_y} \right)^2} \right) \quad (16)$$

図 8 には風洞実験に用いられたモデル地形の断面図と座標系及び正面図を示す。y 軸方向を風向 0° とし、時計回りを正とした。また本研究で設定したモデル地形のアスペクト比 $L_x : L_y$ は 1:2~1:8 に変化させた。表 3 はモデル地形の寸法を示す。

気流解析に対しての妥当性と予測精度について確認するため、まず風洞実験におけるモデル山を 1000 倍にしたケース (Case 1) について気流解析を行った。そして、モデル地形の山頂における風速と平坦地形上との風速比を求め、風洞実験の結果と比較した。気流解析は、解析領域を水平方向 3500m×3500m、鉛直方向 900m とし、水平方向、鉛直方向最少格子をそれぞれ 10m、3m とした。粗度長は風洞実験にならい 0.3m とした。気流解析により

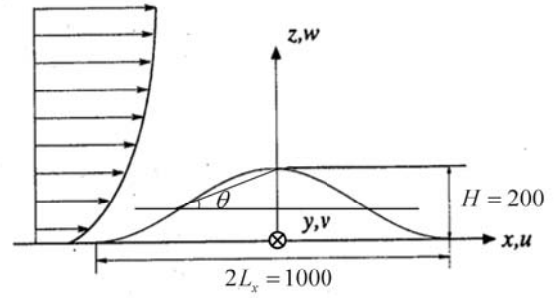


図 8 モデル地形とその座標系

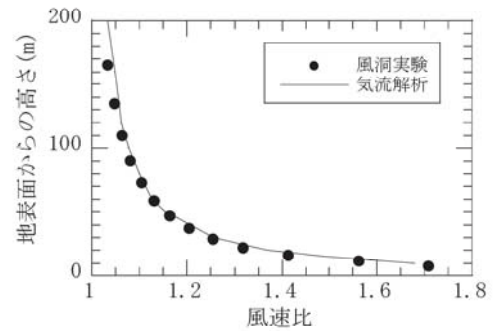


図 9 気流解析により得られた風速比と風洞実験により得られた風速比の比較

表 3 モデル地形の寸法とアスペクト比

	$\theta (^{\circ})$	$2L_x (m)$	$2L_y (m)$	$H (m)$	L_x / L_y
Case 1	21.8	1000	1000	200	1/1
Case 2	11.3	1000	2000	200	1/2
Case 3	5.7	1000	4000	200	1/4
Case 4	2.9	1000	8000	200	1/8

表 4 モデル地形における気流解析の諸条件

	格子間隔 (m)			最小格子領域 (m×m)
	水平		鉛直	
	最小	最大	最小	
Case 1	20	200	5	3500×3500
Case 2	50	200	5	7000×7000
Case 3	50	200	5	8000×8000
Case 4	50	300	5	1600×1600

得られた頂上部における平坦地形と実地形上の風速比を図 9 に示し、風洞実験より得られた風速比とよく一致していることがわかる。

次に、各モデル地形に対して風向別風速割増係数の最大値によって規準化した風向別風速割増係数を求めた。それぞれの地形における気流解析の諸条件を表 4 に、解析により求めたモデル地形頂上部における規準化風速割増係数の結果を図 10 に示す。モデル地形のアスペクト比が大きくなるにつれ、規準化された風向別風速割増係数は大きく変動する。本研究では、これらの地形が室戸岬特別地域観測所にあると仮定し、風速割増係数を求めた。結果を、図 11 および表 5 に示す。地形変動係数が大きくなるにつれ、風速割増低減係数は小さくなることから分かる。

最後に、台風の風向特性と風速割増低減係数の関係について考慮する必要がある。本研究では、室戸岬特別地域気象観測所において Case 2~Case 4 の 4 つのモデル地形について地形の主軸を 0° 、 45° 、 90° 、 135° の 4 方位に回転させ、12 ケースについて風速割増係数を求めた。その結果を図 11 に示す。地形変動係数が 0 の場合は風向に影響されないため風速割増低減係数の値は変わらないが、地形変動係数が大きくなると風向により値が変動する。よって、厳密に風速割増低減係数を求めるためには台風モンテカルロシミュレーションが必要であることがわかる。

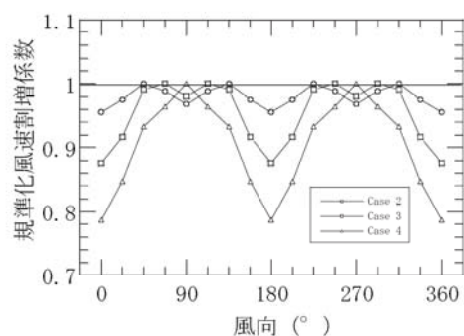


図 10 各モデル地形における規準化風速割増係数の風向による変化

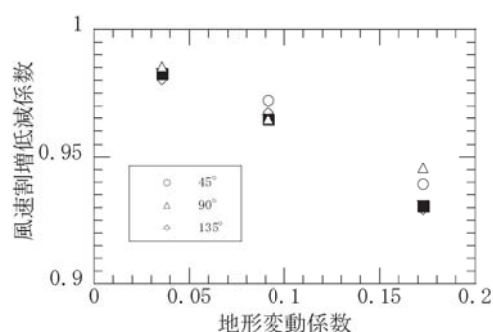


図 11 風速割増低減係数の地形変動係数による変化

4. まとめ

本研究では台風モンテカルロシミュレーションと気流解析を用いることにより、台風時の風向特性と複雑地形の増速特性を考慮した風速割増係数の評価手法を提案し、以下の結論を得た。

- 1) 従来の設計風速の評価手法に比べ、台風時の風向特性を考慮した本評価手法は、地形による風速割増係数を低減可能であることを示した。
- 2) 本提案手法により求めた年最大風速の超過確率は 3 つの代表的な気象台で検証し、風観測データによる超過確率することを確認でき、本提案手法の有効性を示した。
- 3) 地形の変動を表す地形変動係数を提案することにより、風速割増低減係数と地形の形状との関係を評価できることを示した。しかし、台風の風向特性を考慮するため厳密な風速割増低減係数の評価には台風モンテカルロシミュレーションが必要である。

参考文献

- 1) IEC 61400-1: Wind turbines-Part1: Design requirements, Ed.3, 2005.
- 2) 土木学会：風力発電設備支持物構造設計指針・同解説(2007年版), 構造工学シリーズ 17, 2007.
- 3) 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, 日本風工学会誌, No.66, pp.3-14, 1996.
- 4) 石原孟, 日比一喜：急峻な山を越える乱流場の数値予測, 日本風工学会論文集, No.83, pp.175-188, 2000.
- 5) 石原孟, 山口敦, 藤野陽三：複雑地形における局所風況の数値予測と大型風洞実験による検証, 土木学会論文集, No.731/I-63, pp.195-221, 2003.
- 6) Ishihara, T., Siang, K. K., Leong, C. C. and Fujino, Y. (2005), Wind field model and mixed probability distribution function for typhoon simulation, The Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, pp. 412-426.
- 7) 石原孟, ホタイホーム, チョンチーリョン, 藤野陽三：台風シミュレーションのための混合確率分布関数と修正直交変換法の提案, 第18回風工学シンポジウム論文集, pp.5-10, 2004.
- 8) 石原孟, 日比一喜：急峻な山を越える乱流境界層に関する実験的研究, 第15回風工学シンポジウム論文集, pp.61-66, 1998.