

強風時の平均風速の鉛直特性

Characteristics of the vertical wind profile during the strong wind climate

孟岩*1)、松井正宏*2)、日比一喜*3)

Yan MENG, Masahiro MATSUI, Kazuki HIBI

1. はじめに 強風時の平均風速の鉛直分布を精度よく算定することは耐風設計上大変重要である。特に、近年超々高層構造物計画が具体化するにつれ、強風時の風速分布への関心はますます高まっている。強風時の大気境界層の鉛直特性に関しては、これまでにいくつかのレビュー論文[1, 2, 3]があるものの、平均風速の鉛直分布を予測するべき法則モデルの基本パラメータ(大気境界層の高さ z_g と平均風速のべき指数 α_u)については不明な点が残されている。そこで、本研究では、数値解析手法を用いて、強風時の大気境界層の風速分布及びそれを予測するべき法則モデルの基本パラメータを調べた。

2. 非台風時の大気境界層の数値モデルとその検証 表1には本研究で使用した数値モデルの概要を示す。乱流モデルについては、Mellor&Yamada[4]により提案された乱流closure modelを用いた。(6)式の中の経験定数 α は0.1とし、(8)式の中のモデルパラメータ γ は0.2とした。本数値モデルの有効性を確かめるため、高さ213mの気象観測用鉄塔で観測された強風データをシミュレートした[5]。数値解析に用いた大気境界層の外部パラメータ (U_g, z_0, f) 及び計算領域の上限高さ(H)はそれぞれ25m/s、0.9m、 $0.857 \times 10^{-4} 1/s$ 、4kmである。

図1(a)、(b)にはそれぞれ平均風速と乱れ強度の鉛直分布を示した。図中の実線は計算値で、データ・プロットは観測値を表す。平均風速と乱れ強度の計算結果は観測データによく一致し、数値モデル及びモデル定数の有効性が確かめられた。

3. 大気境界層の鉛直特性量 一般的に、大気の状態が中立であれば、方程式(1)、(2)で記述された大気境界層の性質が、傾度風速 U_g 、地表面粗度長さ z_0 及びコリオリ因子 f のみによって決定される。従って、これらのパラメータを系統的に変化させれば、大気境界層の鉛直分布の一般的な性質を上述した数値モデルにより明らかにすることができる。表2には本研究で解析した14ケースの計算条件及びその解析結果をまとめた。大気境界層の高さ z_g と平均風速のべき指数 α_u は、傾度風速 U_g 、地表面粗度長さ z_0 及びコリオリ因子 f によって大きく変化することが分かる。平均風速の鉛直分布については紙面の都合でその一部分(Cas eA1~A5)を図2に示す。平均風速は傾度風速で無次元した。図中の実線は計算値で、点線はべきモデルでfittingしたものである。 z_g の値としては、無次元風速の値が初めて1と等しくなる高さの値を用い、またこの高さを傾度風速高さとする。べき法則が適用可能な高さ z_g とべき指数の値は、粗度長の増大に伴い大きくなっていることが分かる。また、べき法則は地表面から離れた位置での平均風速をよく近似しているが、地表面近傍での風速を過大評価する傾向がある。べき法則の予測値と数値解析結果との差は、傾度風速高さの95%の範囲において、3%以下である(図2(b))。

3.1 大気境界層高さ 一般的に気象の分野では、大気境界層の高さが運動量の鉛直方向のフラックスがなくなる高さとして定義され、また、それを近似する式としては、Rossbyら[6]により提案された次式がよく用いられている。

$$z_g = \Lambda u_* / |f| \quad (9)$$

ここで、 Λ は無次元普遍定数で、気象学の分野で0.3をとるケースが多いが、DeavesとHarris[7]のモデルでは、0.17を採用している。この違いは、モデルの適用範囲の考え方の違いによるものと思われる。一方、平均風速の鉛直分布の予測モデルとしてべき法則が用いられている場合は、傾度風速高さ z_g が地表面粗度のみの関数として粗度区分に応じて経験的に設定されているが、その値は指針または観測によって大きく異なる。べき法則モデルの予測精度を高めるため、傾度風速高さに関する一般的な予測式の開発が望まれる。図3には傾度風速高さの地表面粗度長による変化を示

運動方程式

$$f u' = \frac{\partial}{\partial z} (K_m \frac{\partial u'}{\partial z}) \quad (1) \quad -f v' = \frac{\partial}{\partial z} (K_m \frac{\partial v'}{\partial z}) \quad (2)$$

境界条件

$$\text{上空: } \vec{v}'|_{z \rightarrow \infty} = 0 \quad (3) \quad \text{地表面付近: } U = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (4)$$

乱流モデル

$$\text{渦粘性係数: } K_m = B_1^{1/2} \kappa^{3/2} L^2 [(\frac{\partial u'}{\partial z})^2 + (\frac{\partial v'}{\partial z})^2]^{1/2} \quad (5)$$

$$\text{乱流特徴長さ: } L = \frac{\kappa z}{1 + \kappa z / L_0} \quad L_0 = \alpha \int_0^{\infty} \frac{z q dz}{q dz} \quad (6)$$

$$\text{乱流エネルギー: } q^2 = B_1 \kappa L^2 [(\frac{\partial u'}{\partial z})^2 + (\frac{\partial v'}{\partial z})^2] \quad (7)$$

$$\text{変動風速の標準偏差: } \sigma_u = (1 - 2\gamma) q^2 \quad (8)$$

表1 本研究で使用した数値モデルの概要

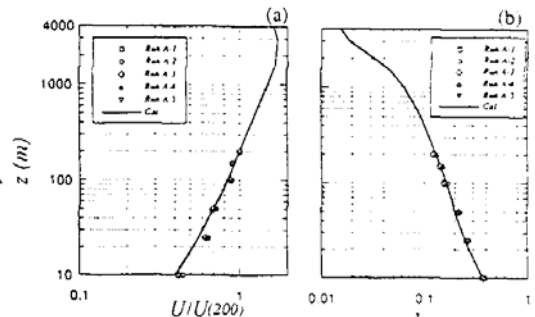


図1 平均風速と乱れ強度の数値解析結果と観測値との比較

Case	U_g (m/s)	f (1/s)	z_0 (m)	H (km)	z_g (m)	α_u
A1	25.0	0.857×10^{-4}	0.001	3.0	790	0.12
A2	25.0	0.857×10^{-4}	0.01	3.5	940	0.15
A3	25.0	0.857×10^{-4}	0.1	4.0	1145	0.19
A4	25.0	0.857×10^{-4}	1.0	5.0	1480	0.25
A5	25.0	0.857×10^{-4}	4.0	6.0	1770	0.32
B1	10.0	0.857×10^{-4}	0.001	1.5	345	0.13
B2	10.0	0.857×10^{-4}	0.01	1.5	410	0.16
B3	10.0	0.857×10^{-4}	0.1	2.0	515	0.21
B4	10.0	0.857×10^{-4}	1.0	2.5	670	0.28
B5	10.0	0.857×10^{-4}	4.0	3.0	830	0.35
C1	25.0	1.458×10^{-4}	0.01	2.5	590	0.15
C2	25.0	1.458×10^{-4}	1.0	3.5	950	0.27
C3	10.0	0.499×10^{-4}	0.01	2.5	665	0.15
C4	10.0	0.499×10^{-4}	1.0	3.5	1060	0.27

表2 計算条件と解析結果

*1) 清水建設(株)技術研究所 研究員 工博 *2) 同 研究員 *3) 同 主席研究員 工博
Institute of Technology, SHIMIZU Corporation

す。明らかに、傾度風高さの値は、地表面粗度長に依存するだけでなく、傾度風速とコリオリ因子にも依存する。図4は、図3に示された結果を整理し直して表示したもので、縦軸は、 U_g/f で無次元した傾度風高さ z_g^* を表し、横軸はロスビー数 Ro の対数值を示す。図中の実線は数値解析結果をbest fittingした関数である。最終的に、 z_g を表す式は

$$z_g = 0.06 U_g / f (\log Ro)^{-1.45} \quad (10)$$

となる。傾度風高さ z_g と大気境界層の外部パラメータとの関係をより分かりやすく説明するため、 z_g^* の対数值とロスビー数 Ro の対数值との関係を直線関数で近似すると、近似式 $z_g = 0.1729(U_g/f)^{0.905} z_0^{0.095}$ が得られる。傾度風高さ z_g は、地表面粗度長 z_0 の増加に伴って緩やかに増加し、 U_g/f の増大にはほぼ比例して増大する。このことは、台風時の大気境界層高さにも言える。ただし、その時、 f の代わりに、台風のもつ渦度を考慮したより一般的なパラメータ f_λ を用いる必要がある[8]。

3.2 平均風速のべき指数 α_u 地表粗度が平均風速の鉛直分布に及ぼす影響は、べき法則ではべき指数、対数修正法則では粗度長で表される。従って、任意の風速分布に対して両モデルが同程度の精度で近似可能であるならば、この二つのモデルにおける基本的パラメータ α_u と z_0 との間に一定の関係が成立すると予想される。例えば、Deavesら[7]は、高さ範囲10~200mにおいて修正対数法則とべき法則の観測結果に対する近似精度が同程度であると仮定し、べき指数と粗度長との関係を求めた。しかし、このモデルと既往の観測データとの比較を行った崔と神田の報告によると、粗度が大きくなると、この式がCounihanによって集められたデータを過大評価する傾向がある。実際、修正対数法則とべき法則を用いて観測結果を近似する時に、両モデルが同じ精度で表せる高さ範囲の下限値は z_0 が大きいほど高くなる。 $z_0 > 2m$ 場合に、高さの下限値が10mを超えるため、下限値を10mと仮定したDeavesらの式により求めた α_u にはかなりの誤差が含まれる。一方、既往の観測結果より提案されたCounihanの式は、 $z_0 = 0.001 \sim 10m$ の範囲内で観測データを近似的に表していると言われているが、本研究の解析結果と観測データに比べ、やや低めである。図5には平均風速のべき指数の粗度長による変化を示した。白丸はCounihanによって集められた観測データで、黒丸は数値解析結果である。数値解析結果は観測結果の平均値にはほぼ等しい。図中の実線は、数値解析結果をbest fittingしたもので、次式で表す。

$$\alpha_u = 0.09 \log z_0 + 0.018 (\log z_0)^2 + 0.0016 (\log z_0)^3 + 0.27 \quad (11)$$

Counihanの式が観測結果をやや過小評価している理由は、Counihanの式が観測結果の平均値に合わせて作られたものではなく、観測結果のover-estimatesを防ぐために下方修正されたことによるものである。ただ、本数値計算結果から見る限りは観測結果を下方修正する必要がないように

思われる。一般に観測データはばらつきを持っているが、 z_0 が大きくなるにつれ、観測データのばらつきが大きくなる傾向がある。その理由は、Counihanが言うようなfetch距離の不足によるもの以外に、観測範囲の低さによるものもあると考えられる。 z_0 が大きくなると、地表面付近の風速分布がべき法則で当てはまらない範囲は広がる。その場合地表面付近の観測データを用いると、べき指数が過大評価される可能性がある。

4. まとめ 本論文では、非台風時の大気境界層の数値モデルを用いて、強風時の平均風速の鉛直特性と大気境界層の外部パラメータとの関係を調べた。その結果、以下のことが明らかにされた。1)傾度風高さ z_g は地表面粗度長 z_0 の増加に伴って緩やかに増加し、 U_g/f の増大にはほぼ比例して増大することが分かった。また、傾度風高さ z_g の値は本研究で新しく提案された式によりよい精度で近似された。2)平均風速分布のべき指数 α_u が地表面粗度 z_0 の関数として近似的に表せる従来の指摘は、本解析により確かめられた。数値解析の結果は、観測値の平均的な傾向によく一致し、観測データを下方修正する必要がないことが示された。また、べき指数 α_u と粗度長 z_0 との関係式については本数値解析の結果に基づいて新たに作成した。

参考文献 [1] A.G. Davenport: Proc. ASCE, Vol. 86 No. St5, 1960, pp.39-68. [2] J. Counihan: Atmos. Environ., No.9, (1975) pp.871-905. [3] 崔恒、神田順: 日本風工学会誌, No.45, Oct., 1990, pp.23-43. [4] G. L. Mellor and T. Yamada J. Atmos. Sci., Vol. 31, 1974 pp.1791-1804. [5] 花房龍男、藤谷徳之助: 第7回風工学シンポジウム, 1982, pp.15-22. [6] C.G. Rossby and R.B. Montgomery: Pap. Phys. Oceanogr. Meteorol., Vol. 3(3), 1935, pp.1-101. [7] D.M. Deaves and R.I. Harris: CIRIA Report 76, 1978. [8] 孟岩ら: 第13回風工学シンポジウム, 1994.

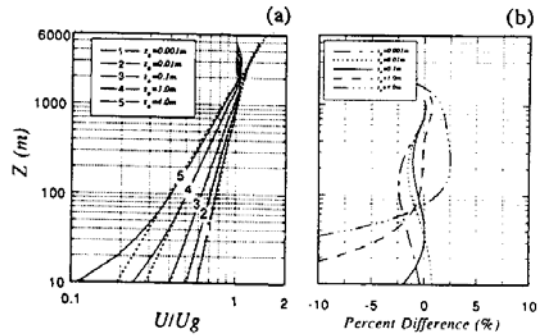


図2 平均風速の鉛直分布の地表面粗度による変化

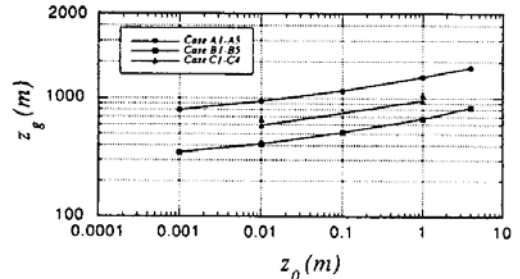


図3 傾度風高さ z_g の地表面粗度長 z_0 による変化

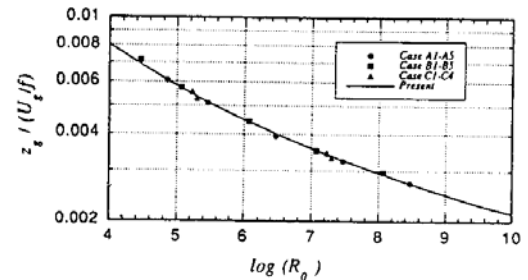


図4 傾度風高さ z_g^* のロスビー数 Ro による変化

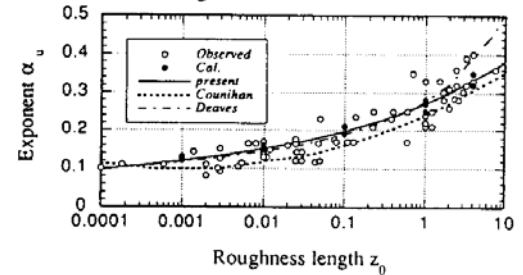


図5 平均風速のべき指数 α_u の粗度長 z_0 による変化