

強風時の乱れ強度の鉛直特性

正会員 ○ 孟 岩\*  
松井正宏†  
日比一喜‡

1. はじめに 強風時の乱れ強度の鉛直分布は、ガスト影響係数や変動風荷重の評価に大きく影響するため、耐風設計上重要である。現在風工学の分野で、乱れ強度の鉛直分布を表すモデルとしては、平均風速のべき法則モデルと変動風速標準偏差 $\sigma_u$ のべき法則モデルとを組み合わせたと、修正対数モデルと無次元変動風速標準偏差 $A(=\sigma_u/u)$ の予測モデルとを組み合わせたとあるが、変動風速標準偏差のべき指数 $\alpha_r$ と無次元変動風速標準偏差 $A$ の値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、強風時の乱れ強度の鉛直分布及びそれを予測する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 表1には本研究で使用した数値モデルの概要を示す。この本数値モデルの有効性はすでに著者ら以前に行った研究で確かめられ、その詳細については文献[1]を参照されたい。

3. 大気境界層の特性量 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 $z_0$ 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、乱れ強度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。地表面付近の乱れ強度 ( $z=30m$ ) は傾度風速とコリオリス因子とにほとんど依存せず、地表面粗度のみの関数となっている。また、乱れ強度の鉛直分布については紙面の都合でその一部分 (CaseA1~A5) を図1に示す。図中の実線は計算値で、点線はべきモデル $(I_u(z)/I_u(z_0)=(z/z_0)^{\alpha_r-\alpha_u})$ でfittingしたものである。基準高さ $z_0$ は30mとした。ただし、粗度長 $z_0=3.0m$ のケースでは解析結果の全体傾向に合うように基準点での乱れ強度の下方修正値を用いた (表2の中の括弧内の値)。乱れ強度を表すべきモデルは計算値を厳密に近似している範囲が平均風速のべきモデルの適用範囲に比べかなり狭くなっている。また、べきモデルは、地表面付近を除いて、大気境界層の低層 ( $z/z_0 < 0.3$ )において乱れ強度の鉛直分布をよく近似するが、その以上の高さではべきモデルの予測結果が数値解析結果により大きくなる。その差は乱れ強度で2%程度である (図1(b))。

3.1 乱れ強度 $I_u(30)$  べき法則により乱れ強度の鉛直分布を予測する際には基準高さ $z_0$ における乱れ強度が必要となる。一般的に基準高さは、その場所の地表面粗度の効果を代表し、かつ非常に局所的な影響を受けない高さであるべきである。本研究ではCounihan[2]に習い、基準高さを30mとした。しかし、地表面粗度の大きい大都会では、30mを基準高さとするのもやや低い。ただし、便宜上大都会でも30mを基準高さとして使用されたい場合、基準高さでの乱れ強度を下方修正する必要がある。図2は、基準高さにおける乱れ強度 $I_u(30)$ と地表面粗度との関係を示す。白丸は観測値で、黒丸は数値解析の結果を示す。本解析結果から得られた乱れ強度は、観測データの下限値にはほぼ一致する。実際の観測では、大気が完全な中立状態にある場合が少なく、特に粗度長の小さい場所では、低層大気がやや不安定な状態にあり、変動風速の標準偏差が中立時よりやや大きくなる傾向がある。以上のことを考えると、本研究の解析結果は妥当な値を示していると考えられる。図中の実線は、図に示したすべてのデータをfittingしたもので、次式で表す。

$$I_u(30) = 0.13 \log z_0 + 0.037 (\log z_0)^2 + 0.0036 (\log z_0)^3 + 0.25 \quad (9)$$

ただし、この式は、基準高さを30mとする乱れ強度のべきモデルを用いることを前提として作成したもので、粗度長の大きい域での予測値は数値解析結果より若干低くなるようにした。

3.2 変動風速標準偏差のべき指数 $\alpha_r$  乱れ強度の鉛直分布をべき法則により求める際には、変動風速の標準偏差のべき指数 $\alpha_r$ が必要となる。しかし、これまでべき指数 $\alpha_r$ に関する研究は少なく、 $\alpha_r$ の値が-0.09~0の範囲内にあると報告した研究例[3,4,5]があるのみである。最近崔と神田[6]は多くの観測データを分析し、べき指数 $\alpha_r$ の値が、ばらつきは大きいものの、-0.05を中心に分布し

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

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

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

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

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

表1 本研究で使用した数値モデルの概要

Case	$U_g$ (m/s)	$f$ (1/s)	$z_0$ (m)	$H$ (km)	$I_u(30)$ (%)	$\alpha_r$
A1	25.0	$0.857 \times 10^{-4}$	0.001	3.0	8.0	-0.03
A2	25.0	$0.857 \times 10^{-4}$	0.01	3.5	10.2	-0.03
A3	25.0	$0.857 \times 10^{-4}$	0.1	4.0	14.3	-0.03
A4	25.0	$0.857 \times 10^{-4}$	1.0	5.0	23.9	-0.05
A5	25.0	$0.857 \times 10^{-4}$	3.0	6.0	35.8(34.7)	-0.08
B1	10.0	$0.857 \times 10^{-4}$	0.001	1.5	7.5	-0.05
B2	10.0	$0.857 \times 10^{-4}$	0.01	1.5	9.7	-0.05
B3	10.0	$0.857 \times 10^{-4}$	0.1	2.0	13.7	-0.05
B4	10.0	$0.857 \times 10^{-4}$	1.0	2.5	23.0	-0.07
B5	10.0	$0.857 \times 10^{-4}$	3.0	3.0	34.3(33.0)	-0.10
C1	25.0	$1.458 \times 10^{-4}$	0.01	2.5	10.0	-0.04
C2	25.0	$1.458 \times 10^{-4}$	1.0	3.5	23.5	-0.05
C3	10.0	$0.499 \times 10^{-4}$	0.01	2.5	10.0	-0.04
C4	10.0	$0.499 \times 10^{-4}$	1.0	3.5	23.6	-0.05

表2 計算条件と解析結果

Characteristics of turbulence intensity profiles during the strong wind climate

Yan MENG et al.

ていることを示した。現在、学会指針[7]も-0.05の値を採用している。一般的に、変動風速の計測は平均風速の計測より難しく、また、高高度での乱れ強度のデータも平均風速のデータより少ない。従って、ばらつきの非常に大きい観測データからべき指数 $\alpha_R$ の一般的な性質を論じるのはかなり困難である。そこで本研究では、本数値解析の結果を用いて $\alpha_R$ の $\alpha_u$ による変化を示した。白丸は観測値で、黒丸は解析結果である。 $\alpha_R$ の値は $\alpha_u$ の増大に伴い小さくなる。図中の実線は次式から求めたものである。

$$\alpha_R = 0.1 \exp[-(\alpha_u/0.33)^9] - 0.14 \quad (10)$$

以上の解析から分かるように、地表面粗度の非常に大きい場所を除いて、 $\alpha_R$ の値が-0.05として用いるのは妥当である。

3.3 無次元変動風速標準偏差 $A(=\sigma_u/u)$  修正対数モデル(DHモデル[8])と無次元した変動風速の標準偏差を予測するモデルとを組み合わせさせたモデルでは、Aの決め方が乱れ強度の予測精度に大きな影響を与える。Counihan[2]の論文の中では、地表面付近でのAの値として $z_0=0.01m \sim 0.1m$ では2.5、 $0.1m \sim 5.0m$ の範囲では2.5~1.6の値が適当であることを示した。また、SimiuとScanlan[9]は、粗度区分ごとにおけるAの値を定めた。その値は、 $0.005m \sim 2.5m$ の範囲において2.55~2.0となっている。一方、Raupach[10]の風洞実験の結果によると、Aの値は地表面の粗度にほとんど依存せず、2~2.1の間の値となっている。実際の大気観測が完全な中立の状態で行われた場合が少なく、特に粗度長の小さい場所では、低層大気がやや不安定な状態にあり、Aの観測値も完全な中立状態にある風洞実験の結果より大きくなる可能性がある。従って、強風時のAの値を一定とするのは妥当であると考えられる。そこで、本研究では、Aの値の高さ方向の減衰を考慮した次の式を提案する。

$$A = 2.1 (1.0 - 0.7 z/Z_0)^{0.7} \quad (11)$$

この式の中では、Aの値が高さ $z$ 及び境界層高さ $Z_0$ の関数となっており、また地表面付近で2.1に漸近する。図4(a)には式(11)とDHモデルとを組み合わせさせた方法により求めたものと解析結果との比較を示す。地表面付近から境界層高さ $Z_0$ までの範囲において解析結果によく一致し、その差は、地表面付近を除いて、1%以下である(図4(b))。

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、乱れ強度の鉛直特性及びそれを予測するモデルの基本パラメータ( $I_u(30)$ 、 $\alpha_R$ 、A)を調べた。その結果、以下のことが明らかにされた。1) 乱れ強度 $I_u(30)$ の値は、地表面粗度 $z_0$ のみの関数となり、また、地表面粗度 $z_0$ の増大と共に増大する。本解析結果から得られた乱れ強度 $I_u(30)$ の値は観測データの下限值にはほぼ一致する。観測値が大気安定度の影響を受けている可能性があり、本研究の解析結果は妥当な値を示していると考えられる。2) 変動風速の標準偏差のべき指数 $\alpha_R$ が平均風速のべき指数 $\alpha_u$ の関数となっており、 $\alpha_u$ の増大に伴い小さくなることが分かった。3) 数値解析の結果に基づきAを予測する新しい式を提案した。この式とDHモデルとを組み合わせることにより求めた乱れ強度は解析結果によく一致し、新しい式の有効性が確かめられた。

参考文献 [1] 孟、松井、日比：風工学年次大会、1995。 [2] J. Counihan : Atmos. Environ., No.9, 1975, pp.871-905。 [3] A.G. Davenport: Proc. of Symp. on Wind effects on buildings and structures, Vol.1, Nalt. Phys. Lab., H.M.S.O., 1965, pp.53-102。 [4] D. Sfintesco, T.A. Wyatt: Proc. 4th. ICWE, Cambridge Univ. Press, 1977, pp.643-661。 [5] J. Kanda : J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 14, 1983, pp.455-466。 [6] 崔恒、神田順：日本風工学会誌、No.45, Oct., 1990, pp.23-43。 [7] 日本建築学会：建築物荷重指針、1994, pp.267。 [8] D.M.Deaves and R.I. Harris: CIRIA Report 76, 1978。 [9] E. Simiu, R.H. Scanlan: Wind effects on structures, 2nd. Ed. 1986, A Wiley-Interscience Pub. [10] M.R. Raupach : J. Fluid Mech. Vol. 108, 1981, pp.363-382。

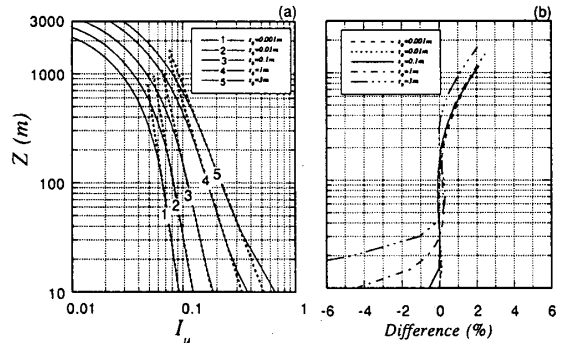


図1 乱れ強度の鉛直分布の地表面粗度による変化

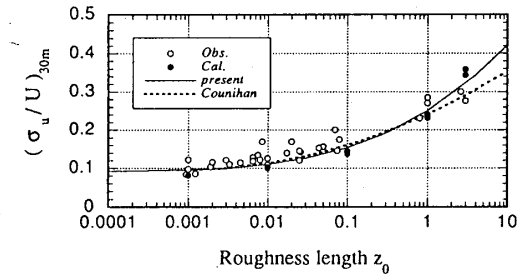


図2 乱れ強度 $I_u(30)$ の地表面粗度長 $z_0$ による変化

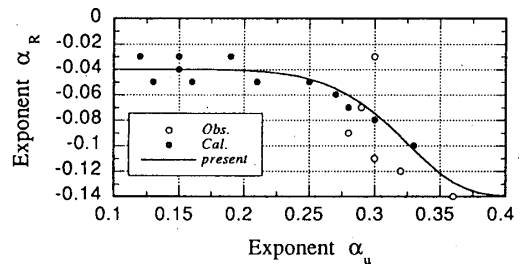


図3  $\alpha_R$ と $\alpha_u$ との関係

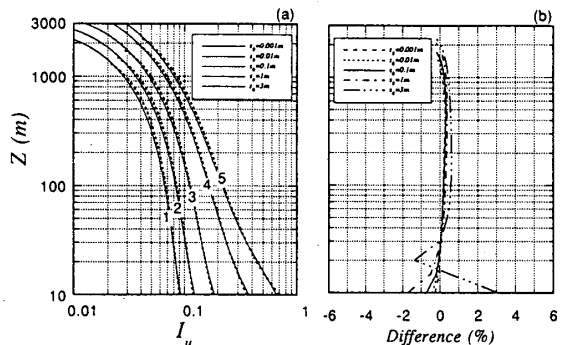


図4 乱れ強度の鉛直分布モデルと数値解析結果との比較

\* 清水建設(株)技術研究所 研究員 工博  
 † 同 研究員  
 ‡ 同 主席研究員 工博