

建物周辺気流の乱流構造の風洞実験法に関する研究

——乱流統計量および最大瞬間風速の再現性について——

Method for Simulating Turbulence Characteristics in Wind Tunnel

——Correspondence of Turbulence Structure between Field Observation and Wind Tunnel Test——

村上 周三*・高橋 岳生*・森山 修治*・高倉 秀一**

Shuzo MURAKAMI, Takeo TAKAHASHI, Shuji MORIYAMA and Shuichi TAKAKURA

1. 序

接地境界層のシミュレーションについては、すでに多くの研究者が報告している^{1),2)}しかし既往の研究には高さ 10 m 以下のスペクトルスケールの垂直分布まで測定した例はなく、それをシミュレートした例も見られない。本研究ではまず野外において、高さ 10 m までの Approaching Wind の平均風速、乱れの強さのほかスペクトルの分布等について解析した。さらにこの接地境界層をシミュレートした風洞実験において、建物周辺気流の乱れのスペクトル、頻度分布および瞬間風速の極値分布の野外実験に対する再現性について解析し、検討した。

2. 野外実験

2-1 測定期間および場所

1984 年 2 月神奈川県厚木市東京工芸大学グラウンドに一辺 1.8 m (以下 H とする) の立方体模型を設置して行った。

2-2 実験概要

図 1 のマスト位置において高さ 2, 4, 6, 8, 10 m に三杯型風速計、高さ 10 m に風向計を設置した。さらに F 点にも超音波風速計を設置し、模型後流の測定高さ (H/2 および H) と同じ高さの Approaching Wind を測定した。野外実験でのマスト位置 10 m の平均風速は約 5 m/s であった。また、模型後流の測定点は図 1 の A~E 点の高さ H/2 および H である。

2-3 解析方法

データはデジタルデータレコーダーに収録 (サンプリング間隔 100 ms で約 30 分間収録) し、後にコンピューターにより解析を行った。スペクトル解析には FFT 法を用いた (Band 幅 0.15 Hz でウィンドウ処理)。また瞬間風速の極値分布の検討には、約 30 分間のデータを 16 分割 (1 分割のデータ数が 1024 個) し、それぞれの時間ごと (約 2 分) の中で算出した 16 個のピーク・ファクター (P.F) およびガスト・ファクター (G.F) の分布を用いた。

記号

- U : 風速 (主流成分) [m/s]
- $\sqrt{u^2}$: 乱流速度 [m/s]
- \bar{U} : 最大瞬間風速 [m/s]
- \bar{u} : 風速の最大偏差 ($=\bar{U}-\bar{U}$) [m/s]
- u : 偏差 [m/s]
- H : 立方体模型の一辺 ($=1.8$ m) [m]
- \bar{U}_{10} : マスト位置における平均風速 ($Z=10$ cm) [m/s]
- \bar{U}_F : 測定点 F における平均風速 (高さ H) [m/s]
- $S(f)$: スペクトル [m^2/s^3]
- x : 波数 [1/m]
- f : 周波数 [Hz]
- f_p : ピーク周波数 [Hz]
- L_x : スペクトルスケール ($=\bar{U}/f_p$) [m]
- G.F: ガストファクター ($=\bar{U}/\bar{U}$)
- P.F: ピークファクター ($=\bar{u}/\sqrt{u^2}$)
- suffix f, m : 野外実験値, 風洞実験値

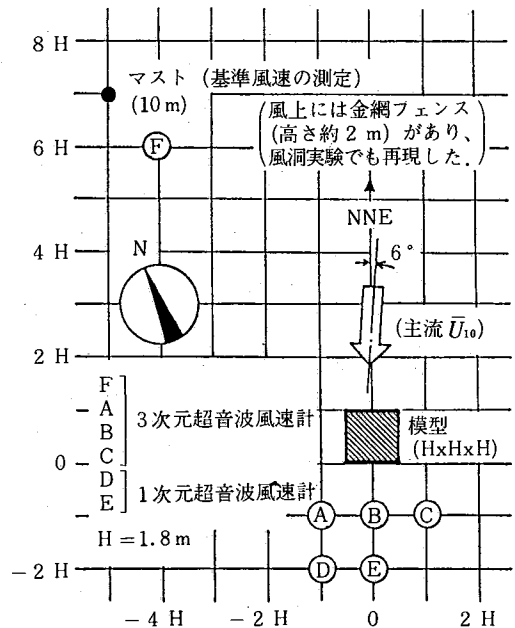


図 1 測定点

* 東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター

** 民間等共同研究員 (株)間組技研

研究速報

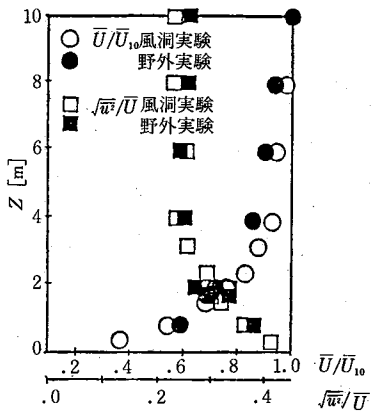


図2 Approaching Wind の Profile の比較

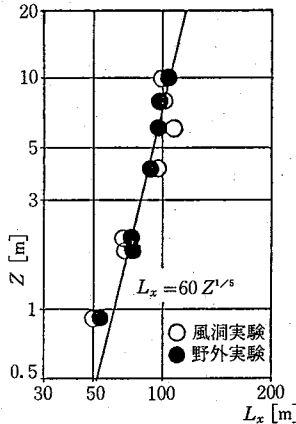


図3 Approaching Wind のスペクトルスケールの垂直分布の比較

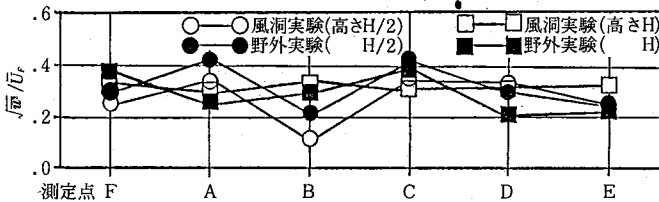
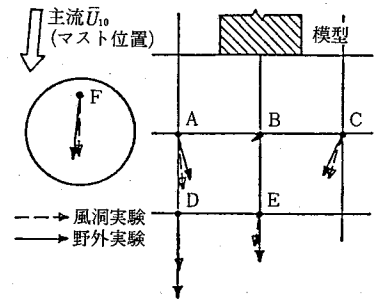
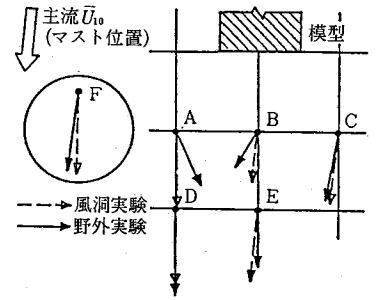


図5 模型後流の乱れの強さ(主流成分)の比較



(1) 測定高さ H/2



(2) 測定高さ H

図4 模型後流の風速ベクトルの比較

3. 風洞実験

3-1 実験概要

使用した風洞は、1.2×1.8×9.8 mの境界層型風洞である。境界層のシミュレーションは風洞内に人工芝および長方形フェンスを設置³⁾して行う。使用する風速計はおもにタンデム型熱線風速計⁴⁾である。風洞模型は野外模型の1/40で、一辺4.5 cm。測定点の位置は野外実験と同様(図1)である。ただし極値についてはC点の高さH/2のみで測定する。

3-2 解析方法

スペクトル解析等に用いるデータはサンプリング間隔3 msで4096個採取される。このサンプリング間隔は野外実験に対する時間スケールを考慮して決定されるものである。また瞬間風速の極値解析については3 ms, 1024個のサンプリング(観測時間約3秒、実物では約2分に相当)を50回繰り返し、それぞれ算出した50個のP.FおよびG.Fの分布を検討することで行う。データのサンプリング時には野外で用いた超音波風速計の応答性(10 Hz)に対応する333 Hzのローパスフィルターを設定している。また、基準となるマスト位置10 m(実物換算)での平均風速は約4.5 m/sである。以下風洞実験結果は全て実物換算した値を用いる。

4. Approaching Wind のシミュレーション結果

4-1 平均風速および乱れの強さ(図2)

図2に示すように平均風速および乱れの強さとも、野外実験に非常に良く一致する垂直分布を風洞で作成することができた。なお、べき指数は約1/5である。

4-2 スペクトルスケール(図3)

図3に示すように今回の野外実験では、主流方向のスペクトルスケール L_x と高さ Z との関係は $L_x = 60 Z^{1/5}$ となっており(Bermanは $Z \geq 30$ mで $L_x = 200 Z^{1/4}$ を提案)⁵⁾、 $U(z)$ と $L_x(z)$ のべき指数が一致している。また、この関係は風洞内においても良く再現されている。図の掲載は省略するが、スペクトルの形状も各高さにおいて極めて良好に再現されている。

5. 模型後流の乱流性状の再現性

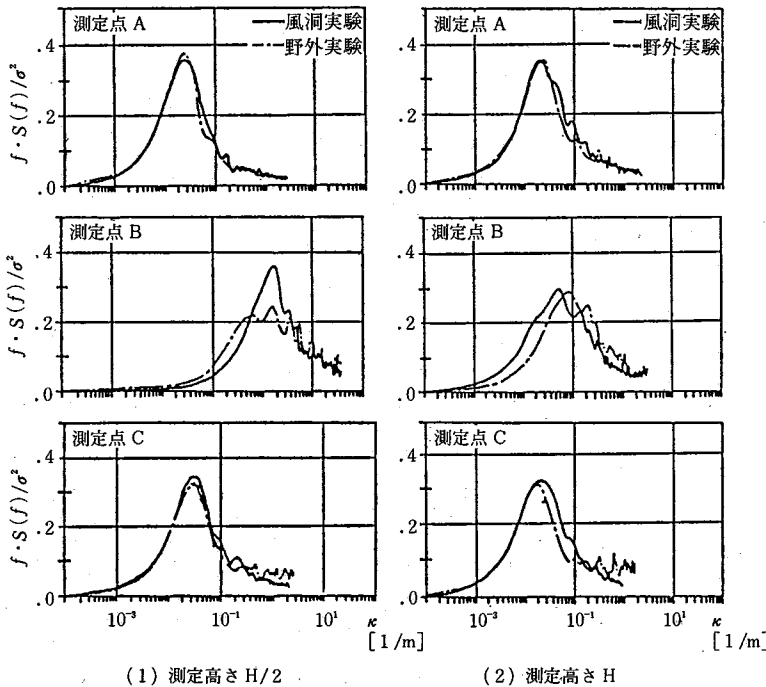
5-1 風速ベクトル(図4)

図4に風速ベクトルを示す。ここで測定高さH/2の風速ベクトルは全体的に良く一致しているが、測定高さHでA, B点があまり一致していない。これは野外実験における風向変動の影響と考えられる。

5-2 乱れの強さ(図5)

図5に示すように $\sqrt{u^2}/\bar{U}_F$ の値は野外実験と風洞実験の間で、測定点による変化の傾向を含めほぼ一致している。

5-3 風速スペクトル(図6)



(1) 測定高さ H/2 (2) 測定高さ H

図6 模型後流の風速スペクトル(主流成分)の比較

図6に各測定点共ピークの位置は極めて良く一致している。また模型後流の中央に位置するB点とそれ以外の点でピークの異なる傾向が風洞でもよく再現されている。たとえばB点とA、C点の間ではピークの位置が2桁ずれているところまで再現できた。スペクトルの形状も各測定点で良く一致した。ただし測定高さ H/2 のB点(図6-(1))においてはピークの位置は一致したが、風洞実験は野外実験のスペクトルに比べてがった形状をしている。

5-4 頻度分布 (図7)

全体的に極めて良く一致している。しかしスペクトルの形状と同様に測定高さ H/2 のB点(図7)ではピークの位置は良く一致しているが、風洞の方がややとがった形状をしている。

5-5 P.FとG.Fの極値分布 (図8, 図9, 図10)

野外実験と風洞実験とでそれぞれ算出したP.FおよびG.Fを二重指数確率紙上にプロットし、Fisher-TippettのI型に近似させたのが図8,9,10である。図8に風洞実験での評価時間を移動平均により3,24,96msの3段階に変化させた場合のP.Fの分布の変化を示す。野外実験と風洞実験とで評価時間を一致させた場合(野外の100msと風洞の3ms)に両者のP.Fの分布が一致することが明らかである。また評価時間が大きくなるに

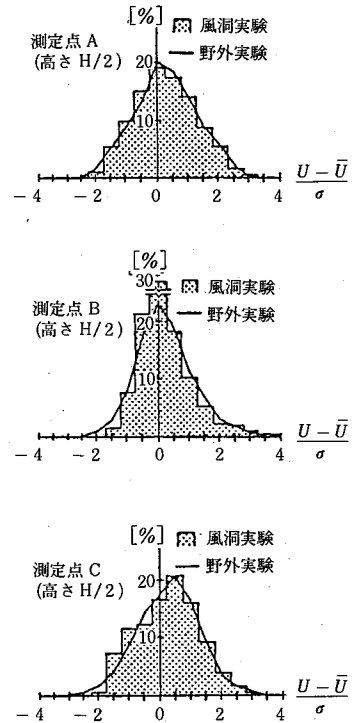


図7 模型後流の頻度分布の比較(主流成分)

つれて、P.Fの値の分布が小さい方に移動し、野外実験結果との隔たりが大きくなるのがわかる。図9に示されるように野外実験と風洞実験のG.Fの分布は一致していない。この原因としては、この測定点(C点高さ H/2)の乱れの強さが野外実験に比べて小さいこと(図5参照)や野外実験における平均風速の変化の影響等が考えられる。乱れの強さがあまり一致していないのにP.Fの分布が一致したのは、以下に述べるとおりである。

スペクトルの形状は図6(1)に示すように極めて良く一致しているのに、風洞における乱れの値が野外より小さいということは、ほとんどの周波数において振幅が同じ比率で減衰されていることを示唆している。

これより以下の(1),(2)式が仮定できるものとする。

$$u_m = \alpha u_f \tag{1}$$

$$\hat{u}_m = \alpha \hat{u}_f \tag{2}$$

α : 減衰定数 (1より小さい)

ゆえに

$$P.F_m = \frac{\hat{u}_m}{\sqrt{u_m^2}} = \frac{\alpha \hat{u}_f}{\sqrt{(\alpha u_f)^2}} = \frac{\alpha \hat{u}_f}{\alpha \sqrt{u_f^2}} = P.F_f \tag{3}$$

$$G.F_m = \frac{\bar{U} + \hat{u}_m}{\bar{U}} = \frac{\bar{U} + \alpha \hat{u}_f}{\bar{U}} \neq G.F_f \left(= \frac{\bar{U} + \hat{u}_f}{\bar{U}} \right) \tag{4}$$

このように、P.Fは一致するがG.Fは一致しないとい

研究速報

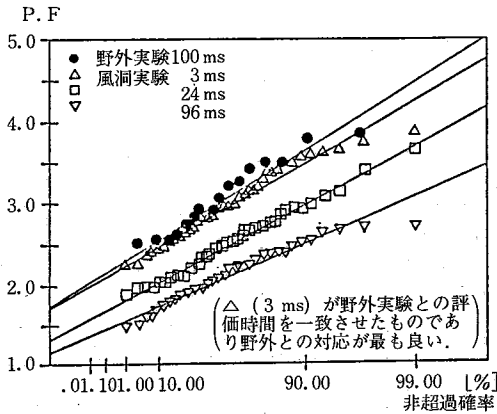


図8 P.F.の極値分布の比較——評価時間を変化させた場合(測定点C高さH/2)

うことが説明される。^{*} またP.Fは平均値を除去しているため、野外実験中の平均風速の変化の影響を受けにくい。

次に、図10にサンプリング間隔を変化させた場合のP.F.の分布の変化を示す。サンプリング間隔を野外実験との時間スケールに一致させた場合のP.F.の分布は野外実験の結果にかなり良く一致している。それに対して、サンプリング間隔が時間スケールに一致しない場合は、近似直線の傾き等の一致の程度が悪くなる傾向にある。なおこの場合、サンプリング間隔は変わっても瞬時値の測定については、同一のローパスフィルターを用いているのでその評価時間は両者の間で同じである。

6. 結 論

1) 風洞実験において Approaching Wind の平均風速および乱れの強さの垂直分布だけでなく、スペクトルスケールの垂直分布も良く再現することができた。

また、本研究の場合スペクトルスケール L_x と高さ Z との間には $L_x = 60Z^{1/5}$ の関係が成り立ち、 $U(z)$ の分布と同じべき指数を持った。

2) Approaching Wind の平均風速、乱れの強さ、スペクトルスケールの垂直分布を再現した場合、模型後流において平均風速、乱れの強さばかりでなく変動風速のパワースペクトル、頻度分布まで一致させることができた。

3) 風洞実験における最大瞬間風速の再現性についてG.FおよびP.Fの極値分布で検討した結果、P.Fの極値分布が野外実験と非常に良く一致することがわかった。また、その際に野外実験と風洞実験で評価時間およびサンプリング間隔の時間スケールを一致させることが重要である。

謝 辞

野外実験に際し、グラウンドの使用にあたって東京工芸

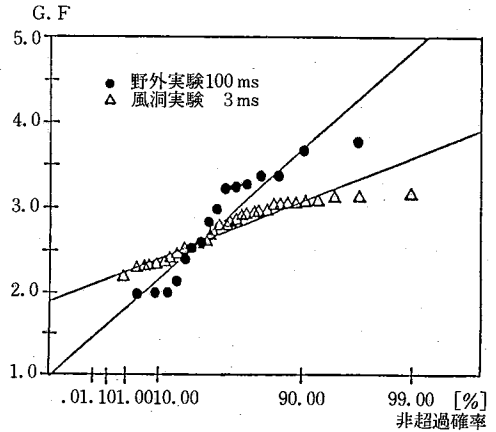


図9 G.F.の極値分布の比較(測定点C高さH/z)

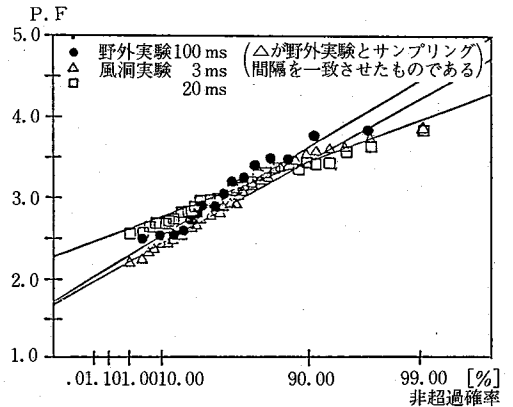


図10 サンプリング間隔を変化させた場合のP.F.の変化(測定点C高さH/2)

注: 本文(4)の式に従えば常に $G.F_m < G.F_f$ となるはずであるが、野外実験においては平均風速 \bar{U} が常時変化しているため、図9のように $G.F_m > G.F_f$ となることも生じるものと考えられる。

大学助教授小林信行氏 同 大場正昭氏の協力を得ました。記して感謝の意を表します。(1985年1月14日受理)

参 考 文 献

- 1) 村上, 小峯「建物周辺気流の乱れの性状の風洞における再現性に関する研究—野外実験と風洞実験の比較—」風工学シンポジウム論文, 1980
- 2) A. G. Davenport: "The Application of the Boundary Layer Wind Tunnel to the Prediction of Wind Loading" Wind Effects on Buildings and Structures, London, 1975
- 3) 村上, 加藤, 森川「低層建物壁面風圧に関する Aylesbury 国際共同研究実験」生産研究, 第35巻, 10号(1983-10)
- 4) 村上, 小峯, 「タンデム型熱線風速計による変動風速の三次元的な測定」建築学会大会学術講演梗概集, 昭和53年
- 5) Berman, S.: "Estimating the Longitudinal Wind Spectrum near the Ground", Quart. Jnl. Roy. Met. Soc., Vol.91, 1965