

高層建物屋上の流れ場の乱流特性

Turbulence characteristics of the wind field over a roof of high-rise building

孟 岩*

日比一喜**

Yan MENG and Kazuki HIBI

ABSTRACT

Wind tunnel experiments have been performed to investigate wind field over a roof of high-rise building. Streamwise and vertical velocity components were measured with split-fiber probes designed for measuring flows with a high turbulence intensity and separation. As a results, vertical profiles of mean and standard deviation of the velocity components, as well as spectra of them, are presented and compared with those of approaching flow.

Key Words: Roof, High turbulence intensity, Separation, Split-fiber probes

1. はじめに

建物屋上の流れ場の乱流特性を定量的に評価することは工学上重要である^{1)~11)}。例えば、大気拡散の分野では、建物屋上の流れを予め把握することが建物屋上に排出された汚染物質濃度の予測や排出煙突の最適高度の設定に役に立つ^{2),3)}。風工学と気象の分野では、正確な風観測を行うために建物屋上の風の特性を知る必要がある^{5),6),7)}。また、高層ビル火災の消防ヘリコプターによる消火活動の可能性を検討するために建物近傍の流れ場を定量的に評価しなければならない¹⁰⁾。特に、最近都市防災の観点から高層建物の屋上にヘリポートを設置する機会が増加し、ヘリコプターの離着時の安全性と建物屋上の乱流場との関係を明らかにすることが重要となっている。

しかし、建物屋上の複雑乱流場を精度よく測定することは容易なことではない。その理由としては風洞実験でよく用いられている熱線プローブが逆流を測定できない上、乱れの強さが30%を超えると大きな測定誤差が生じること等が挙げられる。一方、逆流がありかつ大きな乱れの強さをもつ流れ場を測定できるLaser Doppler流速計は水を用いる流体実験に威力を発揮するが、光を反射する粒子の数の少ない気流の測定には困難を伴う。また、Laser Doppler流速計から出力される信号の連続性が粒子の数に大きく依存するため、変動風速に伴う高周波数成分が過小評価される問題もある。そのため、建物屋上の流れ場の乱流特性、特に変動速度のスペクトル性状が殆ど明らかにされていない。そこで、本研究では、逆流を検出できるスプリットファイバースプローブを用い、建物屋上の各速度成分の平均値及び標準偏差を調べるとともに、ヘリコプターや屋上に設置される物体の応答予測に必要な変動速度パワースペクトルの性状を明らかにする。

2. 実験概要

2.1 風洞と模型 実験は清水建設(株)技術研究所の小型回流式風洞を用いて行った。風洞の測定部の長さは7m、測定断面の高さと幅はそれぞれ0.9mと1.1mである。風洞の最大風速は20m/s、気流の乱れの強さは1%以下である。モデル建物は高さ16cm、幅と奥行き8cmの亚克力製直方体(高さ80mの高層建物を想定)であり、測定

* 研究員 工博 清水建設(株)技術研究所 (〒東京都江東区越中島3-4-17)

** 主席研究員 工博 清水建設(株)技術研究所 (〒東京都江東区越中島3-4-17)

部入り口より風下方向4.6mの所に設置される。Fig. 1には座標系と記号の定義を示す。X、Y、Z軸をそれぞれ流れ方向、風向直角方向、鉛直方向にとり、X、Y、Z方向の速度成分はそれぞれu、v、wとする。風洞風速は6m/sに設定した。

2.2 測定方法 一般に建物屋根面上の流れ場は、3次元性が強い上、乱れも大きい。また、屋根面前縁あるいは側面から剥離により間欠的に逆流が生じている。このような複雑流れ場の乱流特性を定量的に把握するため、本研究では、逆流を検出できるスプリットファイバースプロブ¹²⁾（以下SFPと略記）を用いた。SFPは、直径0.2mmの石英ファイバーに蒸着されたニッケルフィルム（厚さ5μm、有効長1.25mm）に2本の分割線をひき、2枚の半円筒状熱膜を形成させたものである。風向の判定は風上にあたるSFPのセンサーからの出力が風下のセンサーの出力よりも大きくなる特性を利用している。Fig.2にはSFP先端部分の形状を示す。SFPによる複雑乱流場の測定方法は佐々木、木谷¹³⁾により提案され、その有効性が風洞実験により検証されている¹⁴⁾。本研究では佐々木、木谷の方法に従い、流れ場の乱流測定を行った。すなわち、センサーに直角となる風速成分 U_N と流入角 θ は(1)、(2)式により求める。

$$U_N = f(E), E = E_1 + E_2 \quad (1)$$

$$\cos(\theta) = \begin{cases} \frac{\Delta E(\theta)}{\Delta E(0)}, E_1 \geq E_2 \\ \frac{\Delta E(\theta)}{\Delta E(180)}, E_1 < E_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\Delta E(\theta) = E_1(\theta) - E_2(\theta)$$

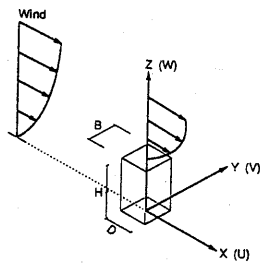


Fig. 1 座標系と符号

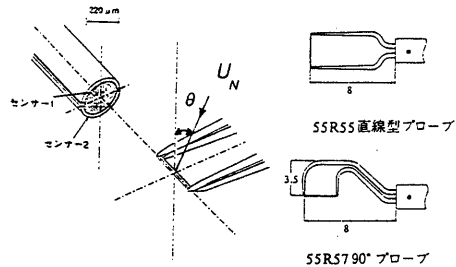


Fig. 2 スプリットファイバースプロブ形状

ここで、 E_1 、 E_2 はセンサー1とセンサー2からの出力電圧で、 $f(E)$ はスプライン関数（区分3次曲線）である。2本の分割線からなる面に直角となる速度成分は $U_N \cos(\theta)$ となる。SFPは、温度補償付きの定温度型熱線風速計（DANTEC, 56C-SYSTEM）に接続されており、風速計からの出力は、1.5msの間隔でA-D変換を行った。ローパスフィルタのカットオフ周波数は300Hzである。安定した統計量を得るために、平均時間を80秒とした。また、比較のため、X型熱線プロブ（以下XWPと略記）も用いた。

2.3 気流 本研究では、都市域に建設される高層建物を対象にしているため、粗度区分IVに相当する1/500の大気乱流境界層を作成した。Fig. 3には風洞気流の鉛直分布特性を示す。図中の実線は日本建築学会の推奨値¹⁵⁾で、白丸と黒丸はそれぞれXWPとSFPによる測定結果である。平均風速、乱れの強さの鉛直分布は学会の推奨値によく一致し、乱れのスケールは、建物高さ以上の領域において若干小さくなっている。風洞気流のパワースペクトル特性をFig. 4に示す。図中の一点鎖線はKarman型スペクトルを表している。一般に風洞気流の慣性小領域が粘性の影響で実大気の気流に比べ狭くなっていることがよく知られている。本実験から得

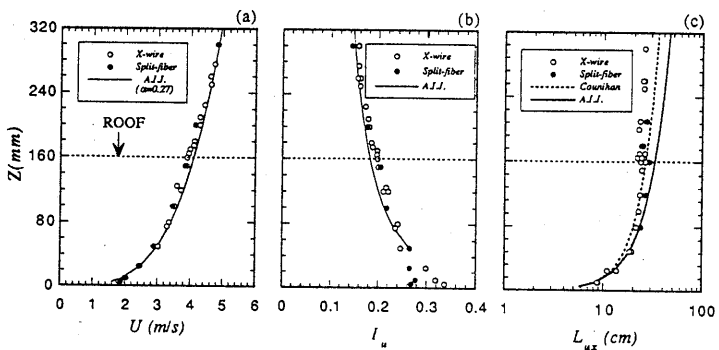


Fig. 3 風洞気流の鉛直分布特性

(a) 平均風速 (b) 乱れの強さ (c) 乱れのスケール

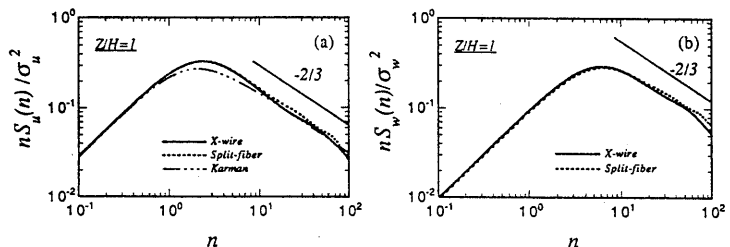


Fig. 4 風洞気流のパワースペクトル特性

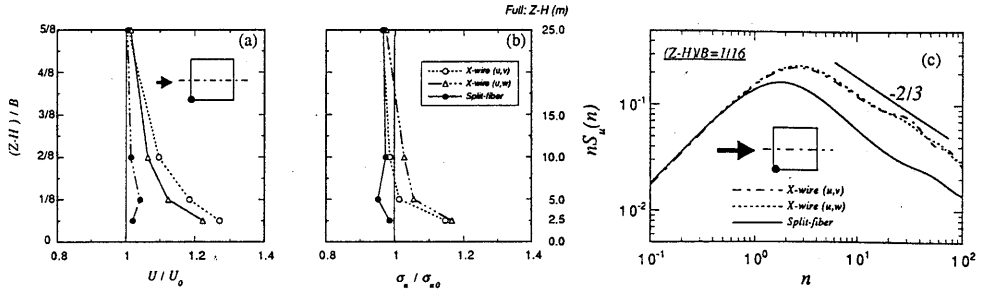


Fig. 5 スプリットファイバースプロブとX型熱線プロブによる測定結果の比較
 (a) 平均速度U (b) 速度成分uの標準偏差 (c) 速度成分uのパワースペクトル

られた風速スペクトルは150Hzより高い周波数範囲において-2/3乗則から離れる。従って、本風洞実験では実大気の気流を再現できる無次元周波数 (nB/U_H) の最大値を3と判断した。

2.4 SFPとXWPによる測定結果の比較 乱れの強さが30%を超えるとX型熱線プロブの測定結果には大きな測定誤差が含まれる。本来、X-wireのもつ2本のセンサーはセンサーに平行する面内（センサー面）の速度成分を感知するだけでなく、その面に垂直な速度成分も感知してしまう性質を持っている。流れの乱れが大きくなるにつれ、センサー面に直角となる方向の速度成分の変動値も大きくなり、X-wireのもつ2本のセンサーからの出力はその影響が大きく受けることになる。このような問題は、乱れの大きい場所にも発生する。Fig. 5 にはその1例を示す。風向0度の場合、屋根面の角部では下からの強い上昇流と建物を回るような流れが同時に存在する。そこでX-wireを用いて速度成分u,vを計る場合w成分の影響を受け、また速度成分u,wを計る場合v成分の影響を受けることになる。その結果、XWPにより得られた流れ方向の速度成分uの平均値と標準偏差はSFPの結果より20%近く大きくなり、また速度成分uのパワースペクトル密度の値は5Hz~100Hzの範囲において2倍以上大きくなる。

3. 実験結果

3.1 解析方法 建物が流れ場に及ぼす影響は平均速度と変動速度の増減及び変動速度のパワースペクトル密度分布の変化により評価することができる。本研究では平均速度と変動速度の増減を(3)、(4)式に示すような平均速度比と変動速度比により表す。

$$(\gamma_U, \gamma_V, \gamma_W) = \left(\frac{U}{U_0}, \frac{V}{U_0}, \frac{W}{U_0} \right) \quad (3)$$

$$(\gamma_{\sigma_u}, \gamma_{\sigma_v}, \gamma_{\sigma_w}) = \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_{u0}}, \frac{\sigma_v}{\sigma_{v0}}, \frac{\sigma_w}{\sigma_{w0}} \right) \quad (4)$$

ここで添字0は同じ高さでの一般流の値を表す。

3.2 平均速度比の鉛直分布 Fig.6とFig.7には風向0度と風向45度における平均速度比 γ_U 、 γ_W の鉛直分布を示す。風向0度の場合、屋根面前縁A点とD点における平均速度比 γ_U は高さ方向に殆ど変化していないのに対し

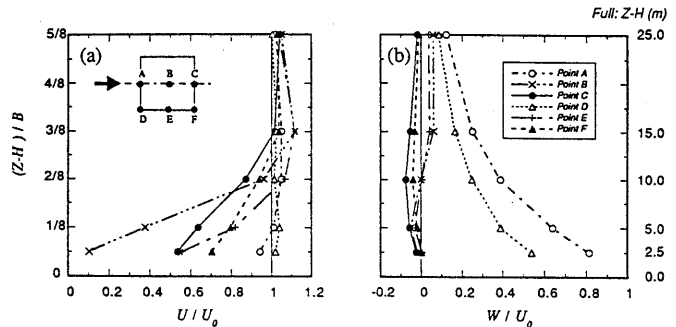


Fig. 6 風向0度の場合の平均速度比の鉛直分布

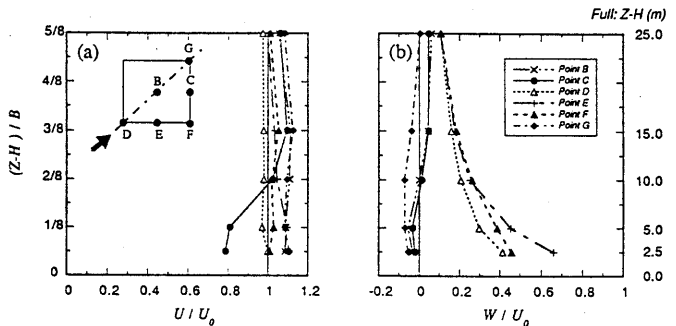


Fig. 7 風向45度の場合の平均速度比の鉛直分布

て、平均速度比 γ_w は大きく増大している。W成分の最大値は一般流の速度の8割にも達している。吹上角度に換算すると39度となる。一方、屋根面の中央と風下側の測定点B,E,C,Fでは平均速度比 γ_U が屋根面近傍において1より小さくなるが、屋根面から離れると反対に1より大きくなる。平均速度比 γ_U の最大値、最小値とも測定点Bで見られ、その値はそれぞれ1.12と0.1となる。この平均速度比 γ_U の最大値は加藤³⁾の実験結果とほぼ同じである。平均速度の屋根面上の増大は上流から来る流れが建物屋面前縁で剥離することにより本来屋根面に流れるべき流体が屋根面の上空に排除されることによるものである。この剥離流の影響で平均速度比 γ_w は測定点B,E,C,Fで若干負の値となっている。一方、風向45度の場合、平均速度比 γ_U は測定点Cを除いて平均速度成分Uの減少が殆ど見られない。

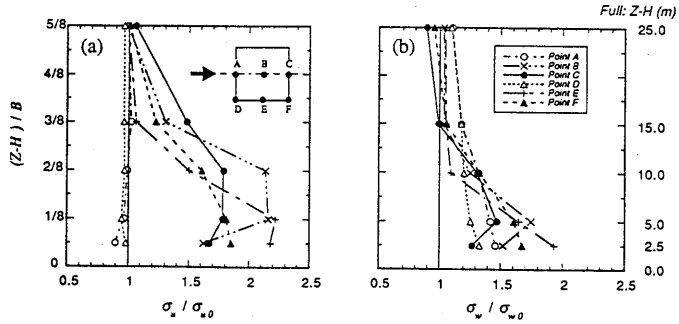


Fig. 8 風向0度の場合の変動速度比の鉛直分布

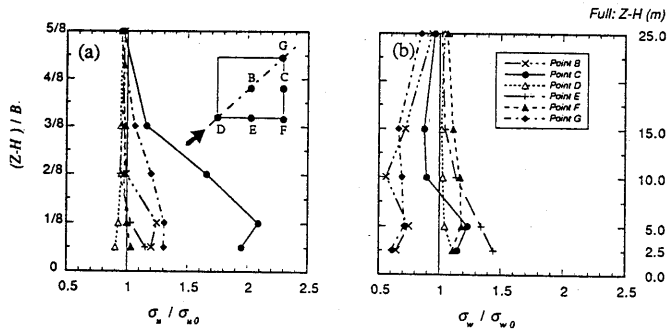


Fig. 9 風向45度の場合の変動速度比の鉛直分布

い。平均速度比 γ_U の分布が風向0度の場合のそれと大きく異なる場所は測定点Bで、平均速度比 γ_U が屋根面近傍から1より大きくなっている。このような現象はOgawa⁵⁾のレーザ流速計による測定結果からも見られる。一般に建物に風が斜めから当たる場合、屋根面上に一对の円錐状渦が存在していることがよく知られている¹⁾。この一对の円錐状渦の存在が流れを妨げるために渦のある領域での速度成分Uが小さくなり、反対に渦の間の領域(DBG線近傍)は増速域となり、速度成分Uが大きくなる。また円錐状渦の軸上にあるC点では平均速度比 γ_U が1より小さくなっている。平均速度比 γ_w は風向0度の場合と同様に建物屋面上前縁部での剥離により、屋根面風上側の測定点D,E,Fで大きく増大している。

3.3 変動速度比の鉛直分布 Fig.8とFig.9には風向0度と風向45度における変動速度比 γ_{ou} 、 γ_{ow} の鉛直分布を示す。風向0度の場合、屋根面前縁A点とD点における変動速度比 γ_{ou} は平均速度比 γ_U と同様に、高さ方向に殆ど変化していないが、屋根面の中央と風下側の測定点B,E,C,Fでは2以上の値を示す。この大きな乱れは建物屋面前縁の剥離によるもので、剥離の影響がほぼなくなる高さは $(Z-H)/B=5/8$ (実スケールで25mに相当)である。変動速度比 γ_{ow} はすべての測定点において1より大きい値を示す。一方、風向45度の場合、変動速度比 γ_{ou} は平均速度比 γ_U と同様に、測定点Cを除いて1に近い値をとる。また変動速度比 γ_{ow} は風向0度の場合と同様に、屋根面風上側の測定点D,E,Fで増大している。異なっている点は、測定点B,Gでの変動速度比 γ_{ow} が1より小さいところである。その理由は以下のように考えられる。風向角0度の場合、対角線(線DBG)近傍において流れの剥離がないため、上流側からくる流れはそのまま屋根面に到達する。この流れの中に含まれる鉛直方向の変動は屋根面の存在によりその運動が妨げられ、結果的に鉛直方向の変動速度が小さくなる。これは風洞にハニカムが入られた場合、風洞の乱れが小さくなるという現象と本質的に同じである。

3.4 変動速度のパワースペクトル 屋根面上の変動速度のパワースペクトルの性状は屋上で離着するヘリコプターや屋上に設置される物体の風応答に大きな影響を与え、特に風応答の中に共振成分を占める割合が高い場合、パワースペクトルの性状は決定的な要素となる。固有周期10s、軒高風速7m/sの時のヘリコプターの風応答を

考える場合、変換振動数 (nB/U) の一致という相似条件から分かるように28Hzでのパワースペクトルの値は共振成分の計算に用いる。従って、固有周期10sのヘリコプターを検討の対象とする場合、実風速2m/s~20m/sの範囲において10Hz~100Hzまでの周波数領域におけるパワースペクトル性状が最も重要となる。この周波数範囲を軒高風速 U_H と建物の見付け幅 B で無次元すると、0.2~2となる。Fig. 10とFig. 11には風向0度の場合の速度成分 u と w のパワースペクトルを示す。高さ $(Z-H)/B=1/8$ (実スケールで5mに相当) 以下の平面における速度成分 u のパワースペクトルの値は測定点A、Dを除いて0.2~2までの周波数域において一般流の値の約10倍となる。速度成分 u のパワースペクトルの高周波数側での増大は屋根面前縁の剥離渦により作られているものである。高さ $(Z-H)/B=3/8$ (実スケールで15mに相当) 以上になると、屋根面前縁での剥離の影響が次第に小さくなり、屋上の速度成分 u のパワースペクトルの性状も一般流のそれに似た形となる。一方、速度成分

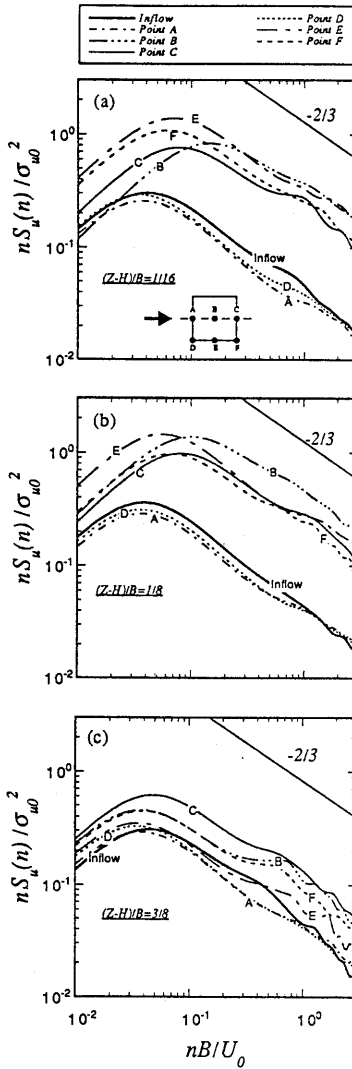


Fig. 10 風向0度の場合の速度成分 u のパワースペクトル

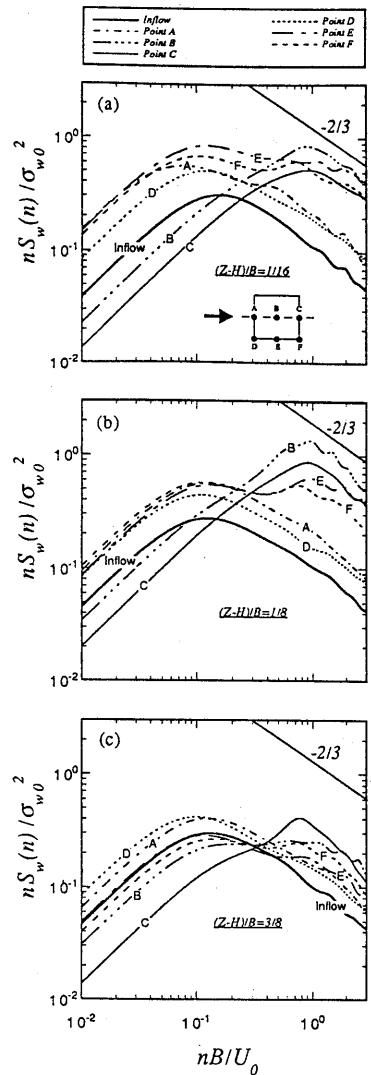


Fig. 11 風向0度の場合の速度成分 w のパワースペクトル

については剥離域に位置する測定点B、Cでのパワースペクトルにはっきりしたピークが高周波数側に見られる。ここで特徴となるのは屋根面の剥離渦の規模が建物の後流域に存在するカルマン渦に比べてかなり小さくなっている点である。一般に、後流域のカルマン渦の無次元周波数は約0.1であるのに対して、屋根面の剥離渦の無次元周波数は約1である。渦の移流速度がほぼ同じであると考え、屋根面の剥離渦の大きさは建物の後流域のカルマン渦の大きさの約1/10となる。屋根面の剥離渦の規模が小さいが、そのエネルギーが大きい。速度成分 u と同様に、速度成分 w のスペクトルの最大値は一般流の値の約10倍となっている。測定点B、Cに比べ、測定点E、Fでのパワースペクトルは一般流成分の上に剥離渦による成分を重ねた形となっている。一方、風向45度の場合、速度成分 u と w のスペクトルの形状 (Fig.12とFig.13) は風向0度の時と大きく異なる。速度成分 u のパワースペクトルは測定点Cを除いて、一般流のスペクトルに似た形となる。測定点Cでは速度成分 u のスペクトルの値は一般流の値の約5倍となっている。速度成分 w のパワースペクトルについては測定点E、Cでの値が大きくなっているのに対して、測定点B、Gでのスペクトル値は無次元周波数1以上の領域を除けばかなり小さくなっている。測定点B、Gでの速度成分 w のスペクトルの値が小さくなる理由は屋根面の存在によるもので、その影響は0.05~0.5の無次元周波数領域において最も顕著である。また、測定点Cでのスペクトルには屋根面近

倍 ($(Z-H)/B=1/16$) においては
 っきりしたピークが見られ、
 それに対応する無次元ピーク
 周波数は約1である。このこ
 とから、風向0度の時の前縁剥
 離渦と風向45度の時の円錐渦
 のスケールはほぼ同じである
 と言える。ただし、風向45度
 の場合、屋根面から離れるに
 つれ測定点Cでのスペクトル形
 状が大きく変化し、屋根面上
 の円錐渦が複雑な構造となっ
 ていることを示唆している。

4. まとめ

本研究では、スプリットフ
 ァイバープローブを用いて建
 物屋上の各速度成分の平均値、
 標準偏差及び変動速度パワ
 ースペクトルを測定した。その
 結果、これまでに殆ど知られ
 ていない建物屋上の流れ場の
 乱流特性が明らかになった。
 平均速度成分については、建
 物屋根面上での増大が10%程
 度であるが、変動速度の標準
 偏差は一般流の2倍以上にな
 っている場所もある。特に風応
 答の共振成分に大きく寄与す
 る速度成分パワースペクトル
 については、その最大値が一
 般流の10倍にもなっている。
 これらの結果は屋根面上の剥
 離渦に深くかかわっており、今後速度成分 v を調べるとともに、屋根面上の流れ場の詳細構造を明らかにしてい
 きたいと考えている。

参考文献

- 1) Castro, I.P. and Robins, A.G.: J. Fluid Mech., 79, 307-335, (1977).
- 2) Robins, A.G. and Castro, I.P.: Atmos. Environ., 11, 291-297, (1977).
- 3) Hunt, J.C.R., Abell, C.J., Peterka, J.A. and Woo, H.: J. Fluid Mech., 86, 179-200, (1978).
- 4) Ogawa, Y. and Oikawa, S.: Atmos. Environ., 16, 207-222, (1982).
- 5) Ogawa, Y., Oikawa, S. and Uehara, K.: Atmos. Environ., 17, 1145-1159, (1983).
- 6) 崔、神田: 日本風工学会誌, No.39, 1-10, (1989).
- 7) 加藤、斉藤、新津: 研究時報, 41, 1-13, (1989).
- 8) 加藤: 研究時報, 44, 1-13, (1992).
- 9) Martinuzzi, R. And Tropea, C.: Proc., 6th Symp. on Appl. of Laser Tech. to Fluid Mechanics, Lisbon, 399-414, (1992).
- 10) 日比、花房、加藤: 日本風工学会誌, No.55, 25-26 (1993).
- 11) 河井、西村、草柳: 日本風工学会誌, No.63, 113-114 (1995).
- 12) DISA Information Sheet: DISA Elektronik, A/S, Skovlunde, Denmark, (1980).
- 13) 佐々木久郎、木谷勝: 日本機械学会論文集, B 51, 1615-1618., (1985).
- 14) Kiya, M. and Sasaki, K.: J. Fluid Mech., 137, 83-113, (1983).
- 15) 日本建築学会、建築物荷重指針・同解説、(1993).

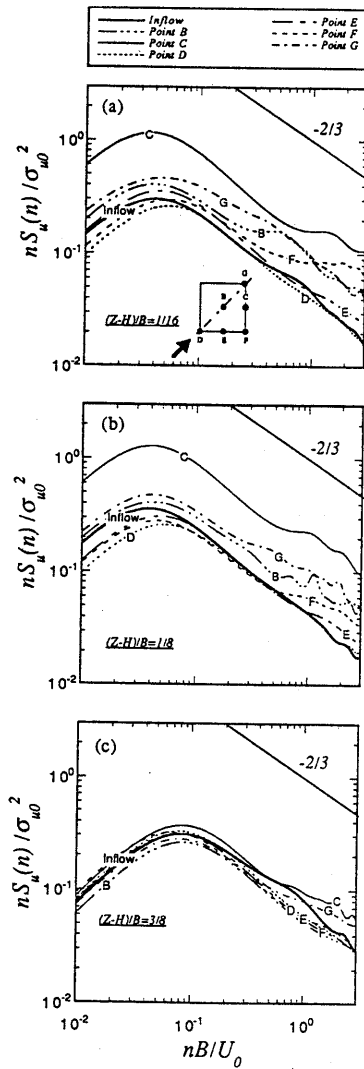


Fig. 12 風向45度の場合の速度成分 u のパワースペクトル

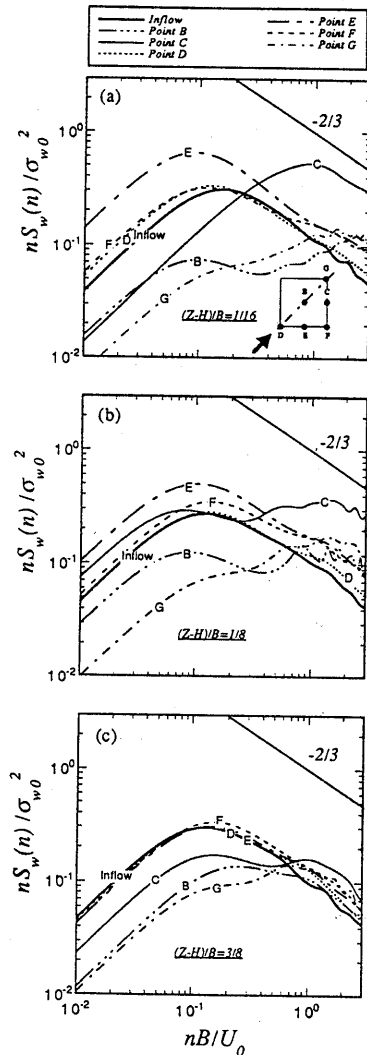


Fig. 13 風向45度の場合の速度成分 w のパワースペクトル