



高層建物屋上の流れ場の乱流特性と組織運動
Turbulence Characteristics and Organized Motions
on the Flat Roof of a High-Rise Building

孟 岩*1 日比一喜*2
Yan MENG Kazuki HIBI

SUMMARY

A wind tunnel experiment has been performed to investigate turbulence characteristics and organized motions on the flat roof of a high-rise building. Three velocity components were measured with split-fiber probes designed for measuring flows with a high turbulence intensity and separation. Flow patterns on the roof were also studied by means of flow visualization technique with a laser sheet. In the case of flow normal to a face ($\alpha = 0^\circ$), vortices shed at the windward edge generate a low mean velocity and high turbulence near the roof. The longitudinal distance between the vortices is estimated to be $0.6b$ and their frequency is about U_{oh}/b , where U_{oh} is the approaching velocity at the roof height and b is the width of the building. In the case $\alpha = 45^\circ$, conical vortices on the roof cause a low mean velocity and high turbulence near the axes of vortices, and a high mean velocity between them. The spectra of three velocity components suggest that high turbulence energies on the roof are not only generated by a high frequency motion corresponding to the vortex shedding at windward edges of the roof, but also by a low frequency motion, which has a period as same as that of Karman type vortex in the building wake. Vertical profiles of mean and standard deviation of the three velocity components, as well as spectra of them, are presented and compared with those of approaching flow for the two cases.

Keywords : flat roof, turbulence characteristics, organized motions,
split-fiber probes measurements, flow visualization.

*1 清水建設(株)技術研究所 研究員 工博
Institute of Technology SHIMIZU CORPORATION Researcher, DR. ENG
*2 清水建設(株)技術研究所 主席研究員 工博
Institute of Technology SHIMIZU CORPORATION Chief Researcher, DR. ENG
(原稿受理:平成9年3月2日)

1. はじめに

建物屋上の流れ場の乱流特性と組織運動を定量的に評価することは工学上重要である^{1)~8)}。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の拡散現象の解明や濃度の予測に必要である^{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を知る必要がある^{6)~8)}。また、高層建物の屋上にヘリポートを設置する場合、ヘリコプターの離着時の安全性を検討するために建物屋上の乱流場を定量的に評価しなければならない。ヘリコプターや屋上の設置物の風応答を評価する際には、各速度成分の平均値とその標準偏差だけではなく、変動速度のパワースペクトルに関するデータも必要となる。しかし、著者の知る限りでは、建物屋上の各速度成分のパワースペクトル特性を報告した研究例はない。建物屋上の流れ場は工学的に重要であると同時に、流体力学的な観点から見ても興味深い問題がいくつかある。例えば、風向45度の時に建物前縁剥離渦及びこれらの剥離渦により引き起こされた風圧パターンは大きく変動していることが報告されている^{9),10)}。

建物屋上の流れ場は、屋根前縁での剥離渦の影響を直接受け、複雑な乱流場となっている。そのため、従来風洞実験でよく用いられているX型あるいはI型熱線プローブはそのまま使用できなくなる。建物屋上の流れ場を初めて定量的に測定したのはCastro & Robins (1977)^{1),2)}による研究である。彼らは、一様流と乱流境界層に置かれた立方体モデル建物を対象に、風向0度と45度の時の建物屋上の対称面内における流れ方向の速度成分の平均値とその標準偏差をパルスワイヤプローブにより調べた。その結果、風向0度の場合、屋根面前縁の剥離に伴い建物屋上での平均速度が大きく減少し、変動速度の標準偏差が剥離剪断層の位置に大きなピークを持っていることが分かった。一方、風向45度の場合、屋上での平均速度の減少と変動速度の標準偏差の増大がほとんど見られなくなっている。その後、Ogawaら(1983)³⁾は、乱流境界層中の乱れの強さが屋上の拡散場に与える影響を系統的に調べるために、4種類の乱流境界層に置かれた立方体モデル建物を対象に風向0度と45度の時の建物屋上の対称面内における平均速度ベクトルをレーザ流速計により詳細に測定し、Castro & Robinsとほぼ同様な結論を得た。各速度成分の乱流統計量については論文の中で論じていない。最近、Martinuzziら(1992, 1993)^{4),5)}は、チャンネル内に置かれた立方体モデル近傍の流れ場をレーザ流速計によ

り調べ、風向0度の時の各速度成分の平均値及びその標準偏差に関する詳細なデータを示した。ただし、チャンネル内に置かれた立方体頂部での流れ場は、天井の影響を強く受けるため、実際の対称境界層中の建物屋上の流れ場とかなり異なっている可能性がある。それ以外に、崔, 神田(1989)⁶⁾と加藤ら(1989, 1992)^{7),8)}は、風観測を目的とし、建物屋上の風の性質をI型またはX型熱線プローブにより調べ、建物自体の影響を大きく受ける高さ範囲を明らかにした。しかし、これらの研究に使用したI型熱線プローブはスカラー風速しか測定できない欠点を持ち、また、X型熱線プローブは逆流を判別できない。

屋根面上に存在する組織的渦運動、特に風向45度の時に屋根面上に存在する円錐渦については最近幾つかの研究結果^{9),10)}が報告されている。例えば、Kawai & Nishimura⁹⁾は高さが見付け幅の1/2の模型を用いた風圧実験により幾何学的に対称な条件の下でも、屋根面に存在する円錐渦に起因する風圧がほぼ逆の位相をもって変動することを示した。また谷口と谷池¹⁰⁾は立方体模型を用いた可視化実験により、円錐渦はおおむね交互に風上面の前縁から発生していること(スイッチング現象)を確認した。円錐渦のスイッチング現象の起因については谷口と谷池¹⁰⁾が屋根面上に存在する幾つかの種類の渦の相互作用による可能性を示唆したが、結論に至っていない。

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コープを用い、自然風を模擬した乱流境界層に置かれたモデル建物の屋上の各速度成分の平均値及びその標準偏差を調べるとともに、これまでに測定されていない変動速度パワースペクトルの性状を明らかにする。更にレーザシートを用いた可視化により建物屋上に存在する組織運動の実態とその発生機構を調べるとともに、これらの組織運動と建物後流渦との関係を明らかにする。

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。風洞気流の乱れの強さは約0.5%である。モデル建物は高さ160mm、幅と奥行き80mmの亚克力製直方体(実スケールで高さ80mの高層建物に相当)であり、測定部入り口より風下方向4.6mの所に設置した。Fig. 1には本研究に用

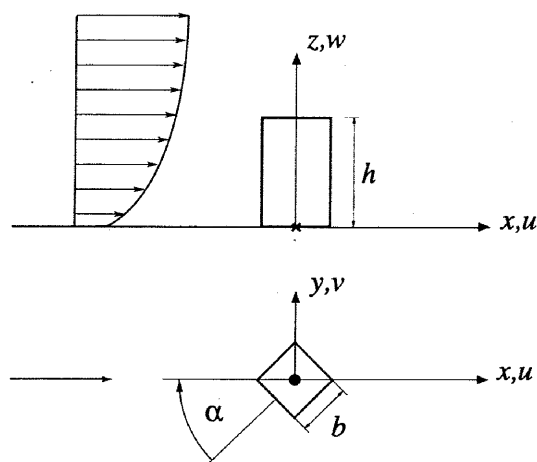


Fig. 1 座標系と符号
(Coordinate system and notations)

いた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, 流れ直角方向, 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。また, 本研究では建物屋根面から高さを $z' (= z - h)$ とする。ここで h はモデル建物の高さである。風洞風速は 6m/s に設定した。建物の見付け幅 b と軒高風速 U_{0h} により求められたレイノルズ数 ($U_{0h}b/\nu$) は約 2.1×10^4 である。実験風向は最も代表性のある 0 度と 45 度を選んだ。

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, 屋根面前縁または側面からの剥離により間欠的に逆流が生じている。このような流れ場を測定する場合, 現在風洞実験でよく用いられている X 型熱線プローブ (XWP と略記) では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¹¹⁾。一方, レーザ流速計は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ものの, 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, 粒子の数が少ない場合 (後流域) 変動風速に伴う高周波数成分が過小評価される問題がある。

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ケルプローブ¹²⁾ (SFP と略記) を用いた。この Split-fiber プローブは, 直径 0.2mm の石英ファイバーの表面に蒸着されたニッケルフィルム (有効長 1.25mm , 分割線の幅 $30\mu\text{m}$) 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。風向の判定は風上のフィルムからの出力が風下側のフィルムの出力よりも大きくなる特性を利用している。流れ方向の速度成分は直線型のプローブ (DANTEC, 55R55) により, 流れ

に直角となる成分は 90 度型のプローブ (DANTEC, 55R57) により測定した。Split-fiber プローブの二本のフィルムはそれぞれ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, 0.5ms の間隔で A-D 変換される。またローパスフィルタのカットオフ周波数を 1kHz に設定した。安定した統計量を得るために, 各速度成分の平均値とその標準偏差の平均時間を 60 秒とした。ただし, スペクトル解析のための時系列データの長さは 30 秒である。

Split-fiber プローブの較正方法は佐々木, 木谷¹³⁾ 及び Boerner & Leutheusser¹⁴⁾ により提案され, その有効性は木谷, 佐々木¹⁵⁾ の風洞実験により実証されている。本研究では佐々木, 木谷及び Boerner & Leutheusser¹⁴⁾ の方法を改良して, Split-fiber プローブの較正を行った。改良した点は主に以下の 3 つの点である。一つ目は放熱量 Q (佐々木, 木谷¹³⁾) あるいはヌッセルト数 Nu (Boerner & Leutheusser¹⁴⁾) を用いる代わりにセンサーからの電圧 E を直接用いた。実際, Split-fiber プローブのもつ二つのフィルムからの出力電圧の和が風向角に殆ど依存しないため, 二つのフィルムからの放熱量 Q あるいはヌッセルト数 Nu の差により求めた風向角と二つのフィルムからの出力電圧の差により求めた風向角とは等価である。二つ目は低風速と高風速の領域でともに高い近似精度を得るため, 単一関数を用いる代わりに, スプライン関数 (区分 3 次曲線) を用いた。三つ目は Split-fiber プローブのもつ二つのセンサーの性質の僅かの違いを考慮できるように, 風向角を較正式 (3) により求めた点である。

Fig. 2 は 55R55 型 Split-fiber プローブの先端部分の拡大図である。ここで, 速度成分 u, v はセンサー軸に直角となる面内の速度成分であり, 速度成分 w はセンサー軸に沿う方向の速度成分である。センサー軸に直角となる面内の速度成分 u を求めるために, スカラー風速 U_N と風向角 θ の較正式が必要である。フィルム 1 とフィルム 2 からの出力電圧を E_1, E_2 とする時, スカラー風速 U_N は出力電圧 E_1 と E_2 の和から (1) 式により求めることができる。

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

ここで, 関数 f は低風速と高風速域ともよい近似精度を得るため, スプライン関数を用いた。一般に, Split-fiber プローブに分割線 (幅 $30\mu\text{m}$) があるため, Split-fiber プローブにより求めたスカラー風速値 U_N は風向角 θ に

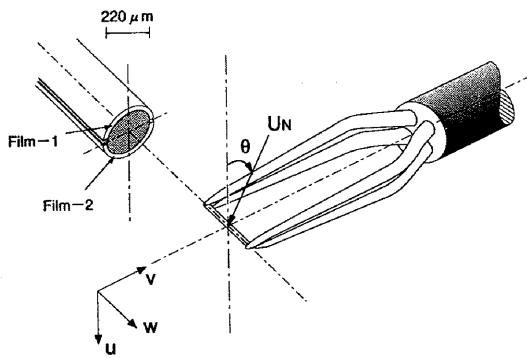


Fig. 2 スプリットファイバープローブのセンサー部分 (Tip of a Split-fiber probe)

より僅かに変化するが、その偏差の最大値は風速 $2\text{m/s} \sim 6\text{m/s}$ の範囲において 1.5% 以下である。

一方、風向角 θ は出力電圧 E_1 と E_2 の差から求める。一般にフィルム1とフィルム2からの出力電圧の差 $\Delta E (= E_1 - E_2)$ はスカラー風速 U_N をパラメーターとして風向角 θ の関数により次式により表わされる。

$$\Delta E = g(\theta) \Delta E_{max}(U_N) \quad (2)$$

ここで、 g は求めるべき関数であるが、実用的な観点から一般に cosine 関数が用いられる^{13),14)}。したがって、風向角 θ は (3) 式に求めることができる。

$$\theta = \begin{cases} \cos^{-1}(\Delta E / \Delta E_0) & E_1 \geq E_2, \\ \cos^{-1}(\Delta E / |\Delta E_{180}|) & E_1 < E_2. \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 ΔE_0 と ΔE_{180} はそれぞれ風向角 0 度と 180 度の時の電圧差であり、スカラー風速 U_N との関係はスプライン関数により近似する。従って、風速成分 u は (1) 式により求めたスカラー風速 U_N に $\cos \theta$ を乗じることににより求めることができる。風速成分 v の絶対値は、式 (4) により求めることができる。

$$v = \sqrt{U_N^2 - u^2} \quad (4)$$

しかし、風速成分 v の符号は流れが間欠的に逆流する場合一意的に定めることができないため、後流域における風速成分 v についても速度成分 u と同様な方法で求めなければならない。

Split-fiber プローブの較正は一樣流中で行い、風洞風速は 2m/s から 6m/s までに変化させた。また風向角 θ はセンサー軸まわり、風向角 γ はセンサーに直角となる軸まわりと定義した。Fig. 3 には較正式により求めた

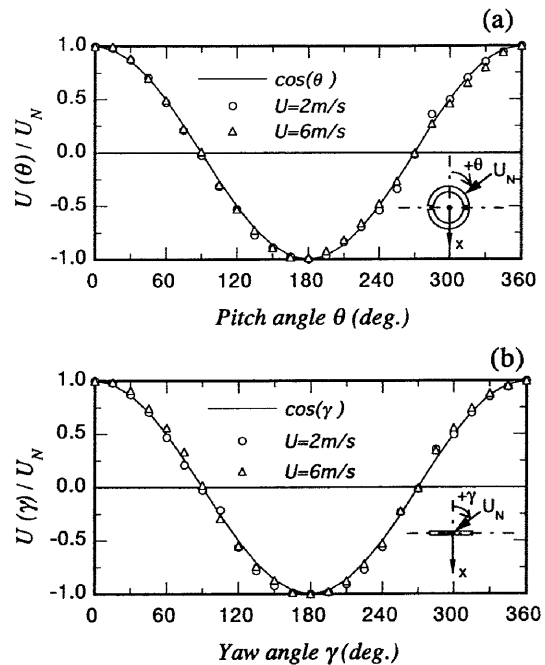


Fig. 3 一樣流中の較正結果、
(a) センサー軸まわり、(b) プローブ軸まわり
(Calibration in uniform flow,
(a) rotation around the sensor axes ;
(b) rotation around the probe stem)

流れ方向の平均速度成分 U の一例を示す。図中の実線は cosine 曲線である。風向角 θ (Fig. 3 (a)) と風向角 γ (Fig. 3 (b)) に対して両方ともよい近似精度が得られた。

3. 実験結果

3.1 風洞気流

本研究では、都市域における高層建物を対象にしているため、粗度区分 IV¹⁶⁾ に相当する大気乱流境界層を Irwin¹⁷⁾ の方法により作成した。用いたスパイヤとフェンスの高さはそれぞれ 600mm と 100mm である、また、フェンスの下流側に高さ $60, 20, 10\text{mm}$ の3種類のラフネスを設置し地表面粗度を模擬した。作成した乱流境界層のスケールは実大気の約 $1/500$ である。Fig. 4 には流れ方向の速度成分の平均値及び3つの速度成分の乱れの強さと積分スケールの鉛直分布を示す。図中の実線は日本建築学会の推奨値¹⁶⁾ (高さを $1/500$ に縮小) で、白印と黒印はそれぞれ X 型熱線プローブと Split-fiber プローブによる測定結果である。流れ方向の速度成分 u の平均値とその乱れの強さの鉛直分布は学会の推奨値によく一致している。一方、流れ方向の積分スケールの値は建物高さまでの領域において学会の推奨値によく

一致するが、それより高い領域においては若干小さくなっている。Fig. 5には建物高さでの3つの速度成分のパワースペクトルを示す。図中の一点鎖線はKarman型スペクトルを表している。Split-fiberプローブ（実線）とX型熱線プローブ（点線）の測定結果はすべての周波数領域においてよい一致を示した。

一般に風洞気流の慣性小領域が粘性の影響により実大気の気流に比べ狭くなっていることはよく知られている。本実験で得られた各速度成分のパワースペクトルは150Hzより高い周波数範囲においてスペクトルの勾配が $-2/3$ 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周波数の最大値を150Hzと判断した。この周波数は、建物の見付け幅 b と軒高風速 U_{0h} により無次元化された周波数 (nb/U_{0h}) で表すと約3となる。

3.2 平均速度と乱れの標準偏差の鉛直分布

建物屋上の流れ場の乱流特性は風向によって大きく変化することがよく知られている。風向角0度の時、屋根面前縁に剥離渦が形成されるのに対して、風向角45度時に円錐渦と呼ばれる剥離渦は風上側面の前縁から発生する¹⁸⁾。Fig. 6は風向角0度と45度時の屋根面上の平均的な流れパターンを概念的に示したものである。このような流れ場の乱流特性を詳細に調べるため、対称軸線上と側面線上にそれぞれ3つの測定点を設けた。また、本研究では、建物が流れ場に及ぼす影響を定量的に評価するために、建物が設置されていない時の建物の中心軸における位置で測定された流れ方向の平均速度及び各速度成分の標準偏差を風洞気流（以下接近流と呼ぶ）の代表値として用いた。建物が設置された時に測定された流れ方向の平均速度及び各速度成分の標準

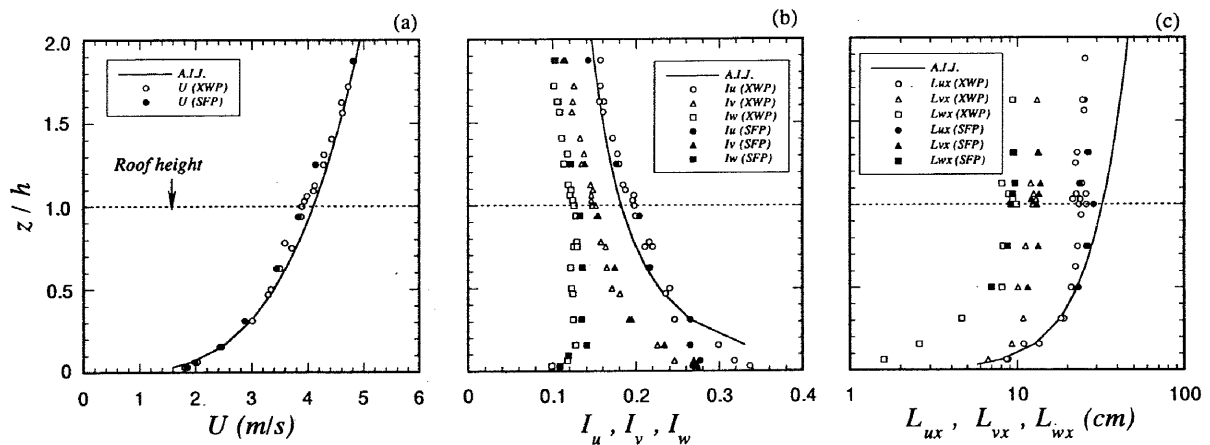


Fig. 4 風洞気流の計測, (a) 平均速度, (b) 乱れの強さ, (c) 乱れの積分スケール
(Flow measurements over the flat floor, (a) mean velocity; (b) turbulence intensity; (c) integral scale of turbulence)

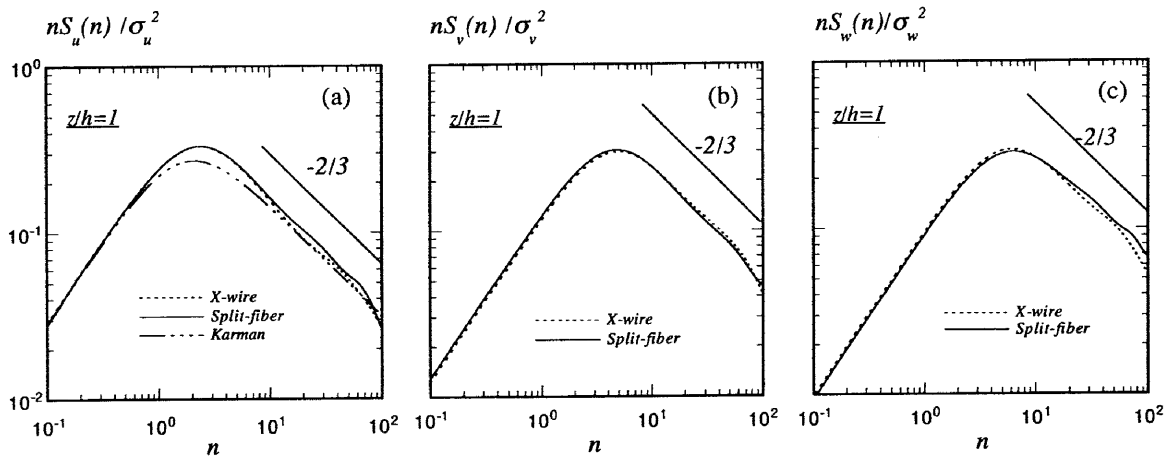


Fig. 5 風洞気流のパワースペクトル
(Spectra of three velocity components over the flat floor)

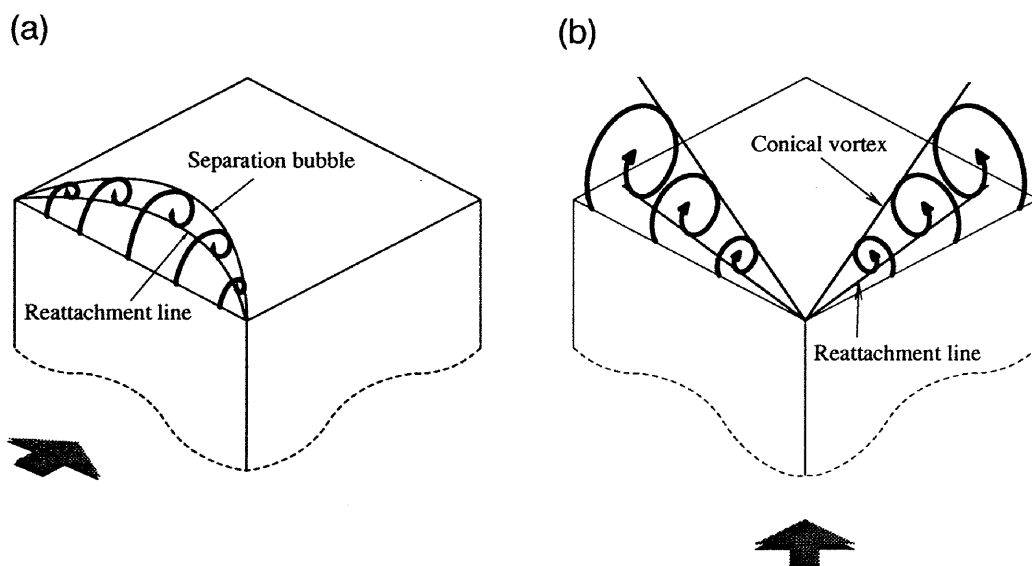


Fig. 6 建物屋上の平均流れパターンの概念図
(Sketch of mean flow patterns on the roof)

偏差と同じ高さでの接近流の値との比を平均速度比と変動速度比と定義し、次式により表す。

$$\gamma_U = \frac{U}{U_0} \quad (5)$$

$$(\gamma_{\sigma_u}, \gamma_{\sigma_v}, \gamma_{\sigma_w}) = \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_{u0}}, \frac{\sigma_v}{\sigma_{v0}}, \frac{\sigma_w}{\sigma_{w0}} \right) \quad (6)$$

ここで添字0は接近流を表す。

3. 2. 1 風向0度について

風向0度における平均速度 U , V , W の鉛直分布をFig. 7に示す。平均速度の値は軒高風速 U_{0h} により基準化されている。建物の対称軸線上では屋根面前縁A点での平均速度 U の鉛直分布が接近流のそれとほぼ一致しているのに対して、平均速度 W は屋根面近傍において大きく増大している。平均速度 W の最大値は風洞風速の7割にも達し、吹上角度に換算すると39度となっている。一方、屋根面の中央と風下側の測定点BとCでは平均速度 U が屋根面近傍において接近流の値よりかなり小さくなるが、屋根面から離れると反対に大きくなる。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。平均速度比 γ_U の最大値は加藤⁸⁾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流れが建物屋面前縁で剥離することにより気流が屋根面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 W の値は測定点

B, Cにおいて若干負の値となっている。似た結果は側面線上の測定点D, E, Fにおいても得られた。異なるところはスパン方向の平均速度成分 V の値が建物を回り込む流れの影響を受け、測定点Dで大きく負になり、また測定点Eの下層において正になっている点である。

Fig. 8には風向0度における変動速度の標準偏差 σ_u , σ_v , σ_w の鉛直分布を示す。変動速度の標準偏差の値は軒高での接近流の各速度成分の標準偏差 σ_{u0h} , σ_{v0h} , σ_{w0h} により基準化されている。屋根面前縁A点における変動速度の標準偏差 σ_u の分布は接近流のそれによく一致しているが、 σ_v , σ_w の鉛直分布は屋根面に近づくにつれ大きくなっている。一方、屋根面の中央の測定点Bでは σ_u , σ_w の分布に大きなピークが見られた。変動速度比 γ_{σ_u} と γ_{σ_w} の最大値はそれぞれ2.5と1.9となっている。また σ_u と σ_w のピークの位置は剥離剪断層の位置にはほぼ対応している。これらの大きな乱れは建物屋根面前縁の剥離渦によって作られたもので、剥離渦の影響は屋根面の風下側の測定点Cにも見られる。また、剥離剪断層の発達に伴い測定点Cでの σ_u , σ_w の値は屋根面から離れる所において測定点Bでの値より大きくなっている。もう一つ特徴的なことはスパン方向の速度変動の標準偏差 σ_v の値は屋根面に近づくにつれ大きくなっている点である。同様な結果は側面線上の測定点D, E, Fについても見られる。異なる所は σ_u と σ_w の分布にはっきりしたピークが現れず、屋根面に近づくにつれその値が大きくなっている点である。

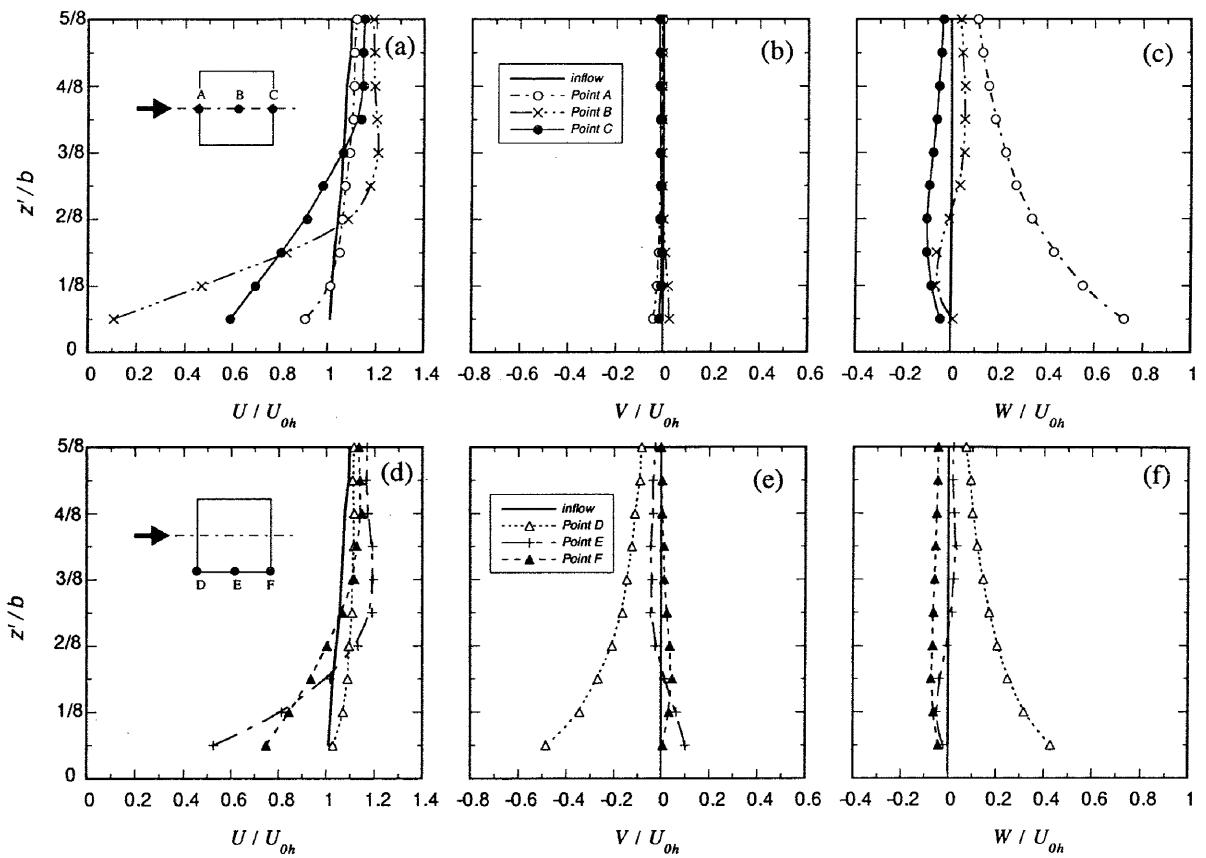


Fig. 7 風向0度における建物屋上の平均速度の鉛直分布
(Vertical profiles of three mean velocity components on the roof for the case $\alpha=0^\circ$)

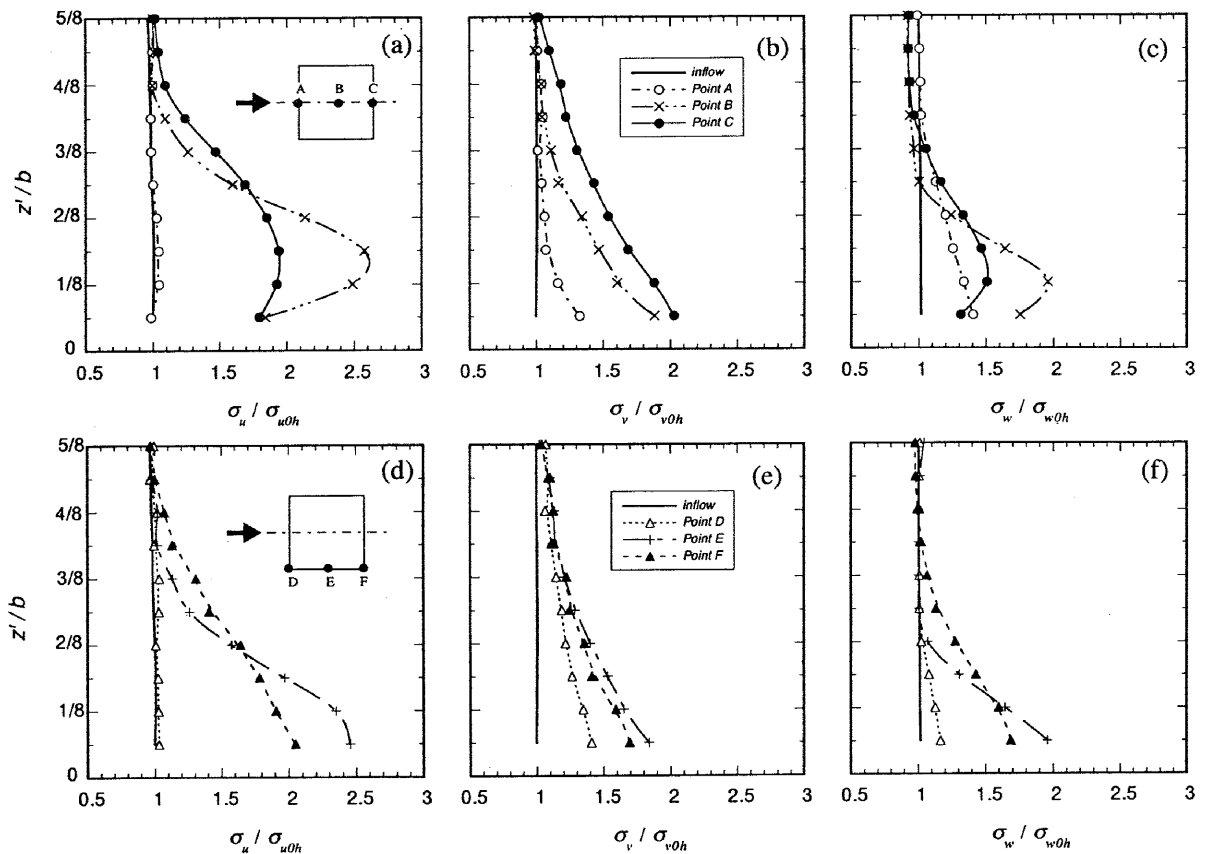


Fig. 8 風向0度における建物屋上の変動速度の標準偏差の鉛直分布
(Vertical profiles of three normal stress components on the roof for the case $\sigma=0^\circ$)

3. 2. 2 風向45度について

風向45度における平均速度 U , V , W の鉛直分布を Fig. 9 に示す。風向0度の結果と異なる点が見られる。屋根面の中央と風下側の測定点 B と G での平均速度 U の値は接近流のそれより1割程度大きくなる。同様な現象は Ogawa ら³⁾ のレーザ流速計による測定結果にも見られた。実際、この現象は屋根面上に存在する円錐渦に関係している。Fig. 6 (b) から分かるように、屋根面上に存在する円錐渦が屋根面上の流れを妨げるため、一対の円錐渦の間の領域（屋根面の対称軸近傍）は増速域となり、平均速度 U が大きくなる。一方、測定点 C では円錐渦の軸に近いために平均速度 U が屋根面近傍において接近流の値より小さくなっている。また、C 点での平均速度 V , W の鉛直分布は円錐渦の動きを反映し、その値は屋根面近傍で負（屋根面の対称軸から離れていく流れ）となり、屋根面から離れると反対に正（屋根面の対称軸に向かう流れ）となる。風上側面上における測定点 D, E, F での平均速度 U , W の鉛直分布は風向0度の時の測定点 A, D でのそれによく似ている。また、建物を回り込む流れの影響を受け、測定点 F での平均速

度 V の値は屋根面近傍において負になっている。

Fig. 10 には風向45度における変動速度の標準偏差 σ_u , σ_v , σ_w の鉛直分布を示す。屋根面の中央と風下側の測定点 B と G においては、対称軸（線 DBG）近傍での流れが剥離していないため、 σ_u の分布が接近流のそれと大きく違いない。一方、 σ_w の値は接近流の値に比べかなり小さくなっている。この現象は風洞の整流部にハニカムが入れられた場合、風洞の乱れが小さくなるという現象によく似ている。実際、接近流の中に建物の規模より大きな渦運動が多く含まれている。これらの渦運動は屋根面の存在によりその鉛直方向の運動が妨げられ、結果的に変動速度のエネルギーが低い周波数域で減少する。このことは測定点 B と G での速度成分 w のパワースペクトル (Fig. 12 (g)-(i)) から確認することができる。同様な現象は円錐渦の軸に近い測定点 C での σ_w の分布にも見られる。ただし、屋根面の近傍では円錐渦の発生に伴う速度変動の影響で、 σ_w の値が接近流の値より大きくなっている。また、円錐渦の影響で測定点 C での σ_u の分布に大きなピークが見られる。一方、風上側面上における測定点 D, E, F では σ_u の分布が接

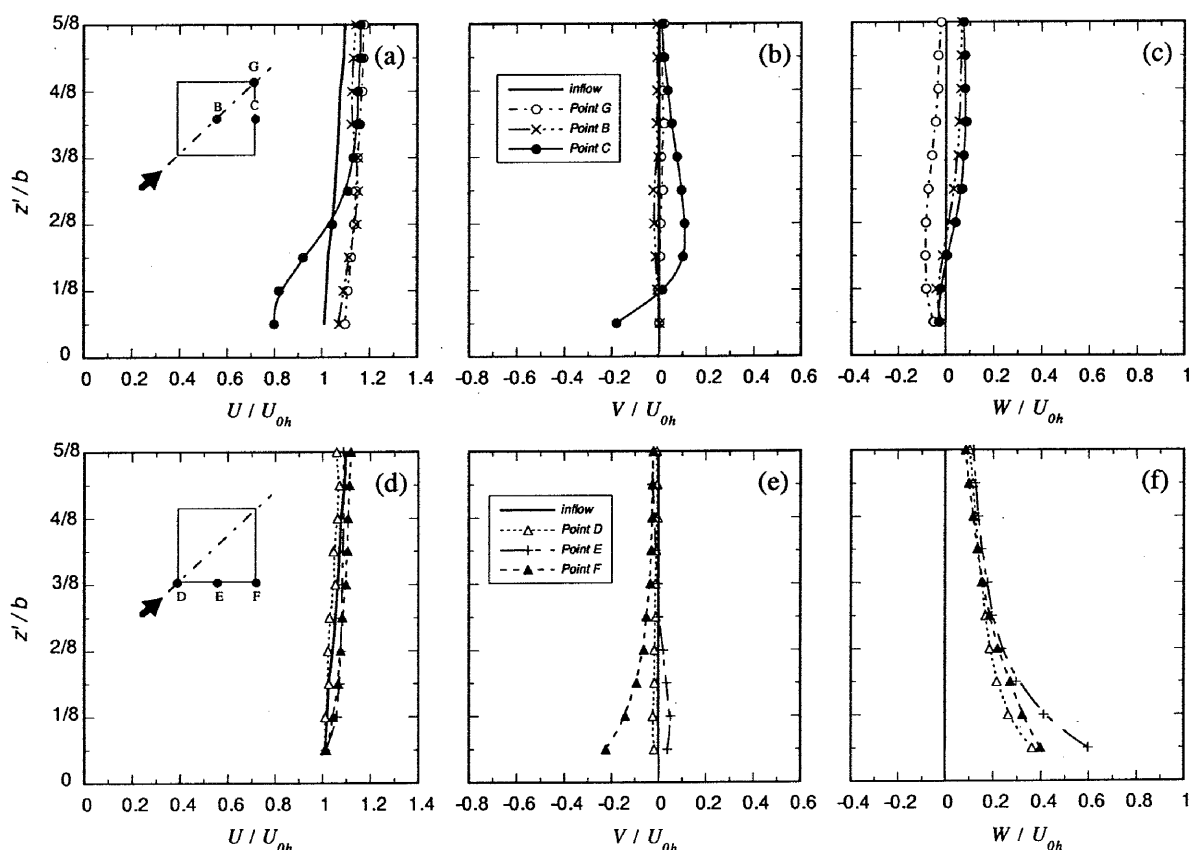


Fig. 9 風向45度における建物屋上の平均速度の鉛直分布
(Vertical profiles of three mean velocity components on the roof for the case $\alpha = 45^\circ$)

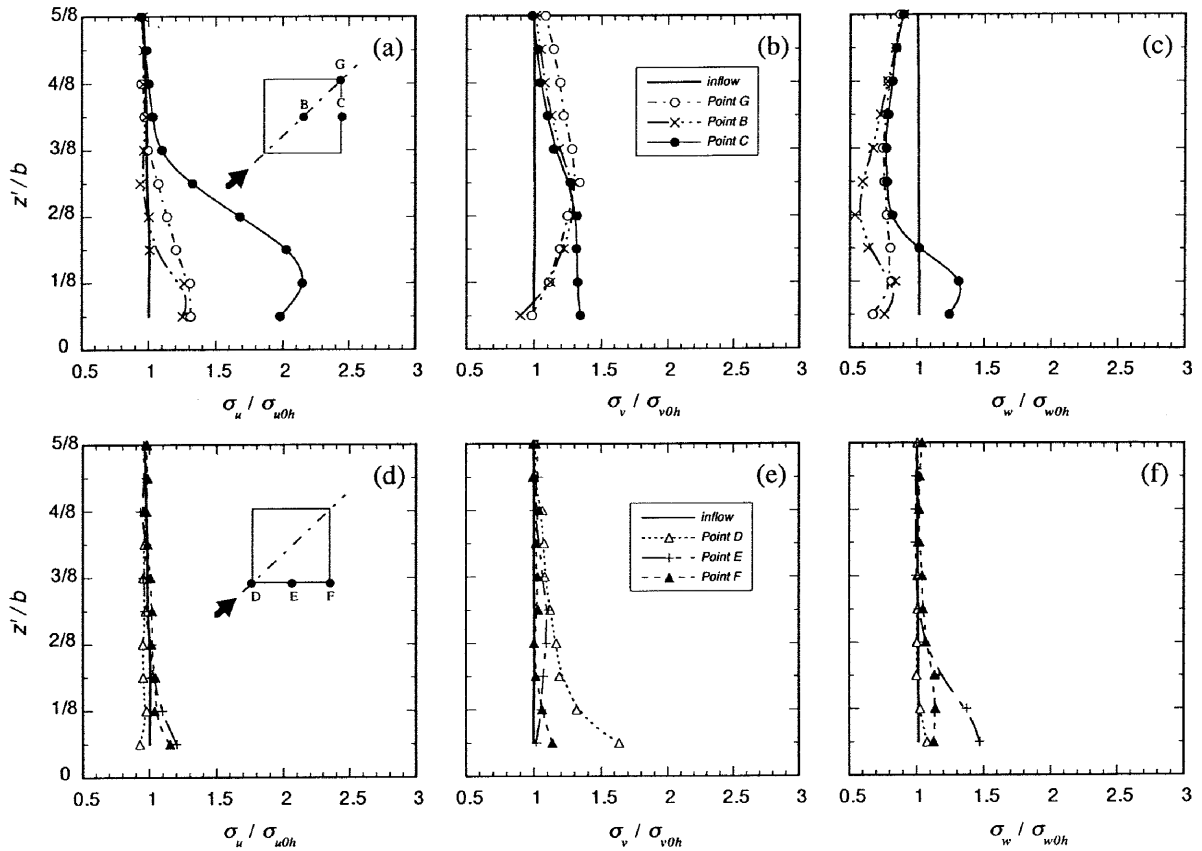


Fig. 10 風向45度における建物屋上の変動速度の標準偏差の鉛直分布
(Vertical profiles of three normal stress components on the roof for the case $\alpha = 45^\circ$)

近流のそれによく似ているが、測定点Dでの σ_v の値と測定点Eでの σ_w の値は屋根面に近づくにつれ大きくなっている。その理由については3.3.2節で詳しく説明する。

3.3 変動速度のパワースペクトル特性

建物屋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の設置物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。例えば、本研究が対象にしたような高層建物(見付け幅 $b = 40m$)の場合、固有周期10sのヘリコプターが軒高風速 $8m/s$ での風応答を考える時に、換算振動数($n_* = nb/U_h$)の一致という相似条件から分かるように、風洞実験から得られた無次元周波数 $n_* = 0.5$ でのパワースペクトルの値は共振成分の計算に用いられる。もし、建物の影響でこの無次元周波数での変動風速のパワースペクトルの値は接近流の値より著しく増大していれば、ヘリコプターが建物屋上で大きく揺れると予測される。従って、軒高風速 $4m/s \sim 20m/s$ の範囲において固

有周期10sのヘリコプターの離着時の安全性を検討する際に、無次元周波数0.2~1の領域における変動風速のパワースペクトル性状は最も重要である。

3.3.1 風向0度について

風向0度の場合の速度成分 u, v, w のパワースペクトルをFig. 11 (a) ~ (i)に示す。縦軸は軒高での接近流の $\sigma_{u0h}^2, \sigma_{v0h}^2, \sigma_{w0h}^2$ により無次元化し、横軸は建物の見付け幅 b と軒高風速 U_{0h} により無次元化した。高さ $z'/b = 1/8$ (実スケールで5mに相当)以下の領域における速度成分 u のパワースペクトルの値は、風上面上の測定点A, Dを除いて、0.2~1までの周波数域において接近流の値の約10倍となっている。また側面線上の測定点E, Fでは速度成分 u のパワースペクトルの低周波数域での増大が見られ、その無次元ピーク周波数は約0.08である。同様なピークは速度成分 v のパワースペクトルの低周波数域にも見られる。また、この低周波数成分の影響は屋根面に近づくにつれ大きくなっており、 σ_v の最大値が屋根面近傍に形成される原因にもなっている。それ以外に速度成分 v のパワースペクトルには高周波数域

での増大も顕著に見られ、その最大値は接近流の値の約10倍となる。この高周波数域での速度成分 v のパワースペクトルの増大は屋根面前縁の剥離渦により作られたもので、そのメカニズムについては3.4節で詳しく説明する。屋根面前縁の剥離渦の影響は速度成分 w のパワースペクトルにも現れており、屋根面の中央と風下側に位置する測定点B, Cでの速度成分 w のパワースペクトルに見られた大きなピークはその結果である。このピークの無次元周波数は約1であり、建物後流渦の無次元周波数より一桁高い。屋根面前縁剥離渦の移流速度が軒高風速の5~7割¹⁵⁾であると考え、屋根面の剥離渦の規模は建物の見付け幅の0.5~0.7倍と推定され

る。屋根面上の剥離渦の規模が小さいが、そのエネルギーがかなり大きく、無次元ピーク周波数近傍では速度成分 w のパワースペクトルの値が接近流の値の約10倍となっている。一方、低周波数域では測定点B, Cでの速度成分 w のパワースペクトルの値がかなり減少している。その理由は3.2.2節にも説明したように屋根面の存在により接近流中の規模の大きな渦の鉛直方向の運動が妨げられたことによるものである。側面線上の測定点E, Fでは速度成分 w のパワースペクトルが接近流成分の上に前縁剥離渦による成分を重ねた形となっている。屋根面前縁剥離渦の影響は高さ $z'/b=3/8$ (実スケールで15mに相当)以上になると、次第に小さくなり、速度

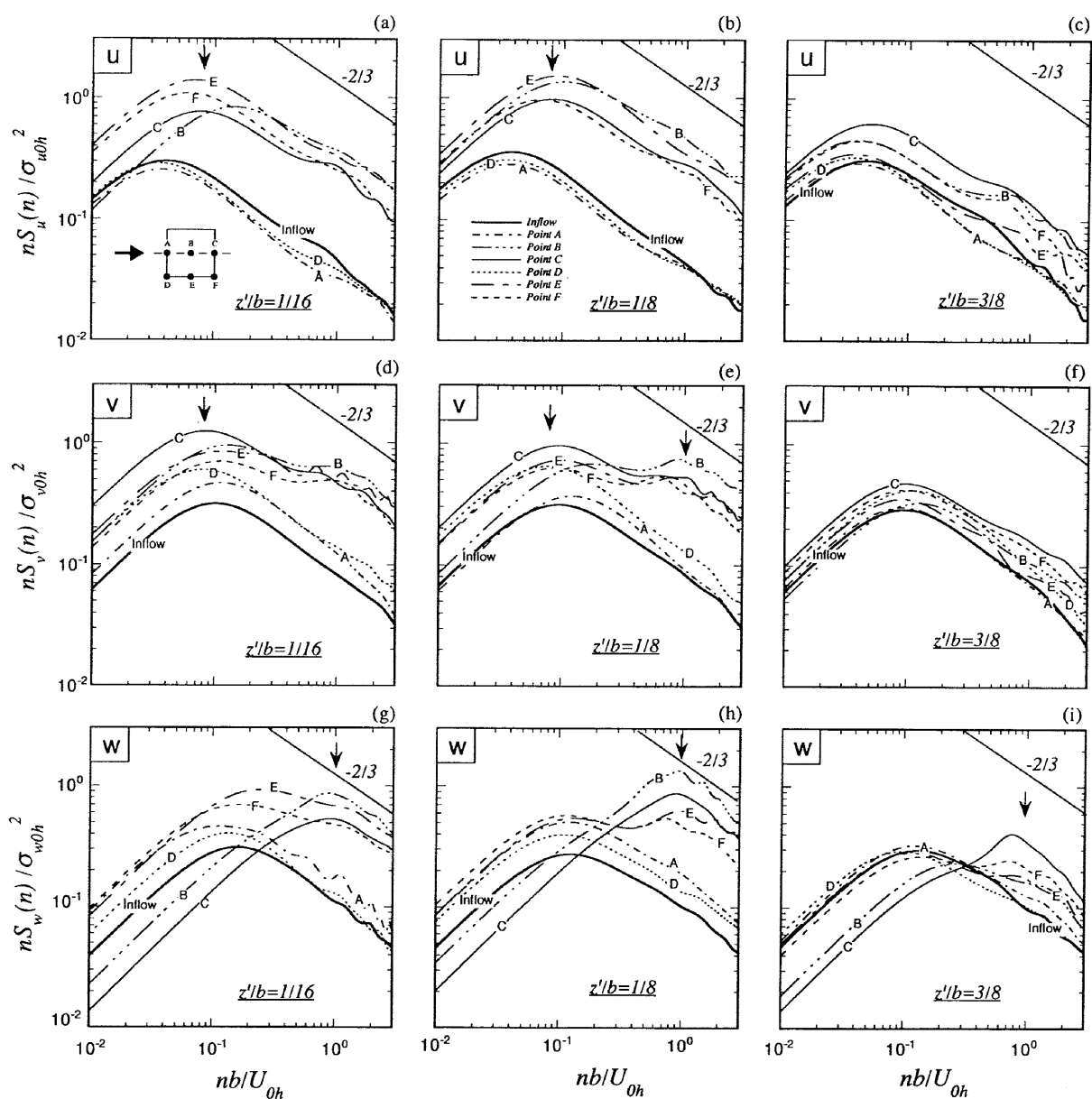


Fig. 11 風向0度における建物屋上の変動速度のパワースペクトル (Spectra of three velocity components on the roof for the case $\alpha = 0^\circ$)

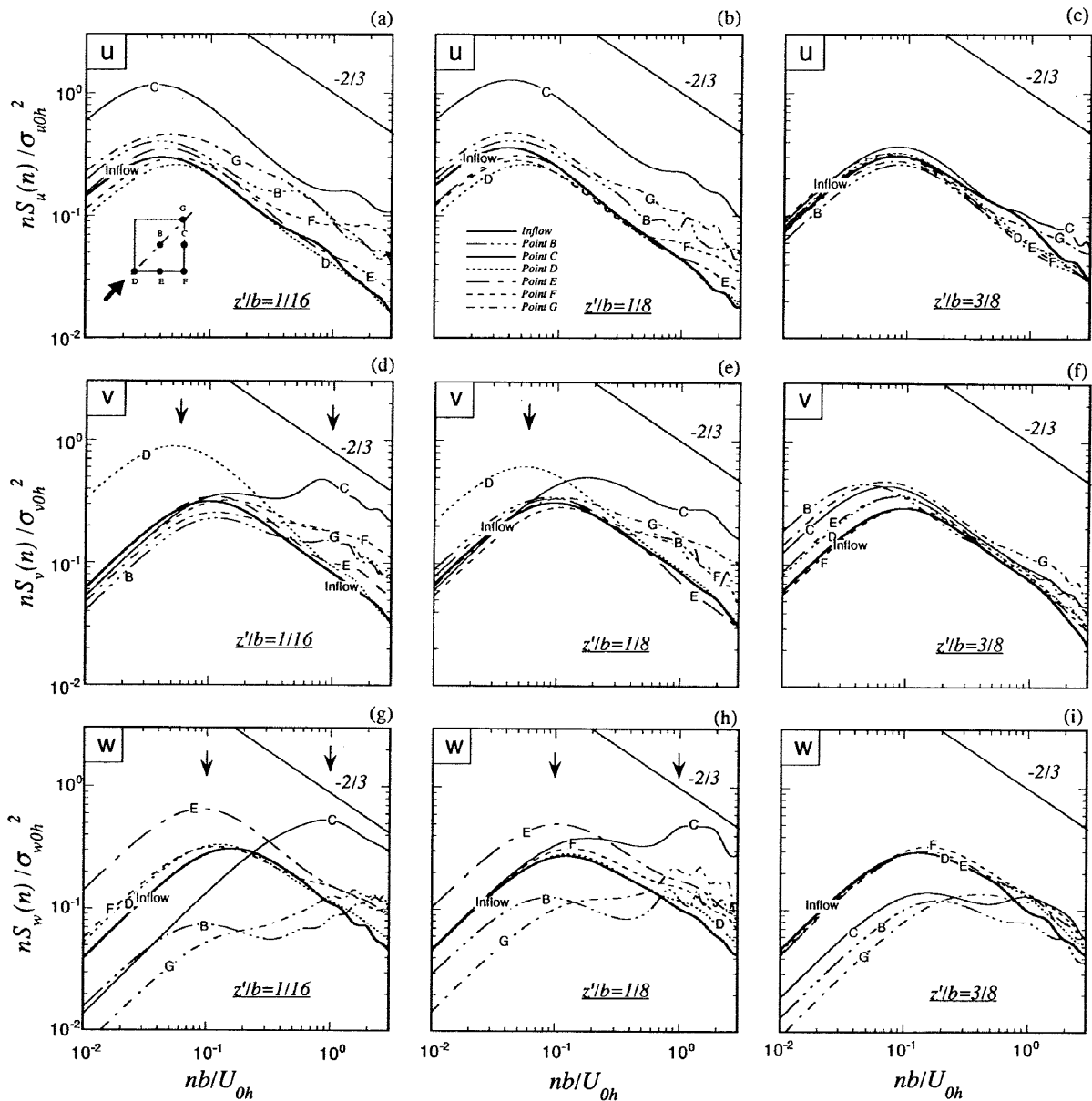


Fig. 12 風向45度における建物屋上の変動速度のパワースペクトル
(Spectra of three velocity components on the roof for the case $\alpha = 45^\circ$)

成分 u, v のパワースペクトルの性状は接近流のそれに似た形となるが、測定点Cでの速度成分 w のパワースペクトルには前縁剥離渦の影響がまだはっきり残されている。

3. 3. 2 風向45度について

Fig. 12 (a) ~ (i) には風向45度の場合の速度成分 u, v, w のパワースペクトルを示す。風向0度の時と異なり、速度成分 u のパワースペクトルは測定点Cを除いて、低周波数領域において接近流のそれに似た形となっている。測定点Cでは速度成分 u のスペクトルが低周波数領域から高周波数領域までにわたって大きく増大し

ており、その最大の値は接近流の値の約5倍となっている。速度成分 u のパワースペクトルの高周波数域での増大は建物風上前面縁で発生する円錐渦により作られたものと考えられるが、低周波数域での増大は別の組織運動によって作られていると推測される。低い周波数の組織運動の影響は速度成分 v のパワースペクトルにもはっきりと現れている。測定点Dでは速度成分 v のパワースペクトルの増大がすべて低い周波数の運動によって作られている。実際、測定点Dで得られた変動速度の波形はかなり周期的で、速度成分 v のパワースペクトルに見られた大きなピークの無次元周波数は約0.06である。一方、測定点Cでは速度成分 v のパワースペクトルの増

大が殆ど高周波数領域に集中しており、また、無次元周波数1の近傍に大きなピークが見られる。同様なピークは速度成分 w のパワースペクトルにも現れている。このことから、風向45度の時の円錐渦の規模は風向0度の時の前縁剥離渦とほぼ同じであると推定される。3.2.2節に説明したように屋根面の存在により接近流中の規模の大きな渦の鉛直方向の運動が妨げられる。その結果、測定点B、Gでの速度成分 w のパワースペクトルの値は無次元周波数1以上の領域を除けばかなり小さくなっている。またその影響は無次元周波数0.05~0.5の領域において最も顕著である。もう一つの特徴的なピークは測定点Eでの速度成分 w のパワースペクトルに見られ、そのピーク周波数は0.1となっている。測定点Eでの σ_w の屋根面近傍での増大はこの低周波数変動によって作られている。

3.4 建物屋上の組織運動

前節の説明から分かるように、建物屋上の変動速度の増大は大きく分けると二つのタイプの組織運動によって作られている。一つは建物見付け幅とほぼ同じ規模の高周波数運動で、もう一つは建物見付け幅の数倍規模の低周波数運動である。この二つのタイプの組織運動の実態を明らかにするために、レーザシートを用いた可視化実験と後流の測定を行った。

まず、建物見付け幅とほぼ同規模の高周波数運動について調べる。Fig. 13には風向0度の時の建物屋上の対称面内の組織運動の一例を示している。図中に見られた二つの渦は建物の前縁に発生した剥離剪断がちぎれ

た時に形成されたもので、渦の間隔は建物の見付け幅の約0.6倍である。実際、剥離渦の移流速度が軒高風速の5~7割¹⁵⁾であると考え、剥離渦の発生周波数はテラーの渦凍結仮説により求めることができ、その値は約 U_{0h}/b である。この渦の発生周波数は建物の見付け幅 b と軒高風速 U_{0h} により無次元化すると1となる。この値は速度成分 w のパワースペクトルの高周波数域で見られた無次元ピーク周波数に一致する。同様な現象は風向45度の時にも見られる。以上のことから分かるように、建物屋上の変動速度中の高周波成分の増大は建物屋上の剥離渦によって作られている。

次に、建物見付け幅の数倍規模の低周波数運動について調べる。一般に、建物屋上の流れ場は接近流中の大きなスケールの渦運動の影響を受けていると考えられる。しかし、本実験では接近流の影響だけで屋上の変動速度のスペクトルの低周波数側に見られたピークを説明できない。なぜならば、接近流の無次元ピーク周波数は速度成分 u と v においてそれぞれ0.04と0.1であるのに対して、屋上の変動速度のスペクトルの低周波数側での無次元ピーク周波数は0度と45度の場合においてそれぞれ0.08と0.06となっている。接近流の影響以外に考えられることは建物後流の影響である。一般に建物の後流域にアーチ型の渦またはカルマン型の渦が存在することはよく知られている。風向0度の場合については、Okudaら(1988)¹⁹⁾は可視化によりモデル建物の後流の渦運動を詳細に調べた。その結果、レイノルズ数が小さい時に建物側面からほぼ左右対称に渦が放出され、アーチ型の渦は後流域で形成される。一方、レイノルズ数が

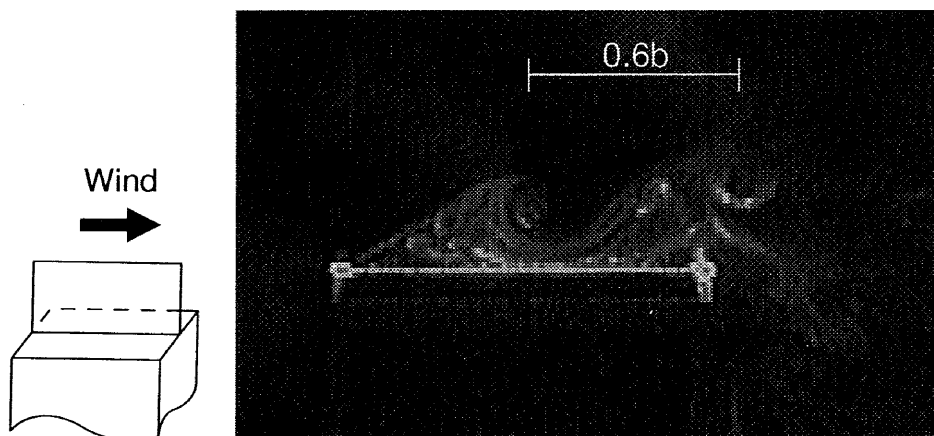


Fig. 13 レーザシートによる流れの可視化
(Flow visualization with laser sheet)

高くなると、後流の不安定性により建物側面から交互に渦が放出され、カルマン型の渦は後流域で形成される。高さで見付け幅との比が2:1の建物についてはレイノルズ数が 2×10^4 より高くなると、後流域の渦のほとんどはカルマン型の渦となる。本研究では実験レイノルズ数が 2.1×10^4 であり、モデル後流域の渦はカルマン型の渦となっている。また、後流域での流れの測定から求められたカルマン型の渦の無次元周波数は風向0度と45度においてそれぞれ0.08と0.06となっている。これらの無次元周波数は変動速度のパワースペクトルの低周波数域で見られた無次元ピーク周波数にほぼ一致している。このことから、建物屋上の流れに伴う低周波数変動はかなりの部分において後流域に存在するカルマン型の渦によって引き起こされていると考えられる。ただし、接近流が乱流であるため、建物屋上の流れに伴う低周波数変動のどの部分が建物後流によって引き起こされているかをはっきりと区別することは困難であり、今後一様流で建物屋上の流れに伴う低周波数変動と建物後流との関係を更に調べて行きたいと考えている。

4. まとめ

本研究では、スプリットファイバースコープを用いて建物屋上の各速度成分の平均値、標準偏差及びそのパワースペクトルを測定し、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を明らかにした。また、レーザシートを用いた可視化と後流の測定により建物屋上に存在する組織運動の実態及びそれと建物後流渦との関係を明らかにした。その結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 建物屋上の平均速度については、風向0度の場合、建物の前縁剥離に伴い、平均速度 U が屋根面近傍において接近流の値より小さくなり、屋根面から離れるにつれて大きくなる。一方、風向45度の場合、円錐渦が存在する場所では平均速度 U の減少が見られるが、円錐渦の間の領域においては反対に増速域となっている。平均速度 U の増大は何れの風向において最大で接近流の約1割程度である。
- (2) 変動速度の標準偏差については、風向0度の場合、建物の前縁剥離に伴い、剥離剪断層の位置に σ_u と σ_w の分布に大きなピークが見られ、その最大値はそれぞれ接近流の値の2.5倍と1.9倍となっている。同様な現象は風向45度の場合、円錐渦が存在する場所にも見られ、 σ_u と σ_w の最大値はそれぞれ接近

流の値の2.1倍と1.3倍となっている。異なるところは、風向45度の場合 σ_w の値が屋根面の対称軸線上において大きく減少する点である。この現象は接近流中の規模の大きな乱流渦の鉛直方向の運動が屋根面の存在により妨げられることによるものである。一方、スパン方向の速度変動の標準偏差 σ_v の値は風向0度の場合屋根面に近づくにつれ大きくなっており、その最大値は接近流の値の2倍となっている。同様な現象は風向45度の場合にも建物屋根面の先端部で見られ、その最大値は接近流の1.6倍となっている。

- (3) 風応答に大きく寄与する変動速度パワースペクトルについては、高周波数域と低周波数域においてともに大きく増大し、その最大値は接近流の10倍にもなっている。高周波数域で見られた無次元ピーク周波数は0度と45度風向ともに1である。それに対して、低周波数域で見られた無次元ピーク周波数は風向0度と45度の場合においてそれぞれ0.08と0.06となっている。
- (4) 建物屋上の流れ場の乱流特性は二つのタイプの組織運動の影響を受けていることが分かった。一つは流れの建物前縁での剥離に伴う渦運動であり、その規模は建物見付け幅とほぼ同じである。変動風速のパワースペクトルの高周波数域での増大はこの渦運動によって作られている。もう一つは建物の後流域に存在するカルマン型の渦により引き起こされる低周波数運動であり、その規模は建物見付け幅の数倍となっている。変動速度のパワースペクトルの低周波数域で見られたピーク周波数は建物後流渦の放出周波数にほぼ一致する。変動風速のパワースペクトルの低周波数域での増大はかなりの部分においてこの組織運動によって作られていると考えられる。

参考文献

- 1) I.P. Castro, and A.G. Robins : The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams, J. Fluid Mech., Vol. 79, 1977, pp.307-335.
- 2) A.G. Robins and I.P. Castro : A wind tunnel investigation of plume dispersion in the vicinity of a surface-mounted cube, Part I The Flow Field, Atmos. Environ., Vol.11, 1977, pp.291-297.

- 3) Y. Ogawa, S. Oikawa, and K. Uehara : Field and wind tunnel study of the flow and diffusion around a model cube, Part1. Flow measurements, Atmos. Environ., Vol.17,1983, pp.1145-1159.
- 4) R. Martinuzzi and C. Tropea : Flow around surface-mounted cube, Proc., 6th Symp. on Appl.of Laser Tech. to Fluid Mechanics, Lisbon, 1992, pp.399-414.
- 5) R. Martinuzzi, A. Melling and C. Tropea : Reynolds stress field for the turbulent flow around a surface-mounted cube placed in a channel, Proc. of ninth symposium on turbulent shear flow, 1993, pp.13-4-1.
- 6) 崔 恒, 神田 順 : 建物頂部における風速特性変動に関する実験的研究, 日本風工学会誌, No.39, 1989, pp.1-10.
- 7) 加藤真規子, 齊藤三行, 新津美春 : 風観測の基準化に関わる気象官署庁舎の形状調査とそれに基づく建物屋上における風速分布の風洞実験, 研究時報, Vol.41, 1989, pp.1-13.
- 8) 加藤真規子 : 基本的な形状の建物屋上における風観測に関する風洞実験, 研究時報, Vol.44, 1992, pp.1-13.
- 9) H. Kawai and G. Nishimura : Characteristics of fluctuating suction and conical vortices on a flat roof in oblique flow, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 60, 1996, pp. 211-225.
- 10) 谷口徹郎, 谷池義人 : 陸屋根面上の円錐渦に関する可視化風洞実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 448, 1996, pp.31-37.
- 11) N. K. Tutu and R. Chevray : Cross-wire anemometry in high intensity turbulence , J. Fluid Mech., Vol. 71, 1975, pp.785-800.
- 12) DISA Information Sheet : Split-fiber probes, types 55R55, 55R56, 55R57, 55R58 for two-dimensional flow field measurements, DISA Elektronik, A/S, Skovlunde, Denmark, 1980.
- 13) 佐々木久郎, 木谷 勝 : スプリットフィルムプローブによる逆流領域の乱流測定, 日本機械学会論文集, B 51, 1985, pp.1615-1618.
- 14) Boerner, T. and Leutheusser, H. J. : Calibration of split-fiber probe for use in bubbly two-phase flow, DISA Info., No.29, 1984, pp.10-13.
- 15) M. Kiya, and K. Sasaki : Structure of a turbulent separation bubble, J. Fluid Mech., Vol. 137, 1983, pp.83-113 .
- 16) AIJ recommendations for loads on buildings, Architectural Institute of Japan, 1996.
- 17) H.P.A.H. Irwin : Design and use of spires for natural wind simulation, National Aeronautical Establishment, Laboratory Technical Report, LTR-LA-23, 1979.
- 18) N. J. Cook : The designer's guide to wind loading of building structures, Part1, 1985, 371pp.
- 19) Y. Okuda and Y. Taniike : Flow visualization around a three dimensional square prism, 日本風工学会誌, No.37, 1988, pp.25-32.