

自然風中に置かれた立方体周りの気流・風圧性状

丸山 敬・谷口徹郎*・岡崎充隆**・谷池義人*

* 大阪市立大学

** (株)長谷工コーポレーション技術研究所

要 旨

建築構造物に加わる風圧特性を調べるために、接地境界層内に設置された立方体模型まわりの風速・風圧の多点同時計測を行った。得られた観測データをもとに接近流の気流性状および立方体模型に加わる風圧性状を明らかにした。接近流の気流性状に関しては、平均、分散、スペクトル、相関等、各種統計量を求め、乱流特性を明らかにした。さらに、接近流の風速変動と立方体模型に加わる風圧変動の相関を調べ、接近流が風圧変動に及ぼす影響について明らかにした。

キーワード：接地境界層，立方体模型，自然風，観測，気流性状，風圧性状

1. はじめに

耐風設計を行う場合、自然風による風荷重を正確に予測することは建設費の削減等経済面からだけでなく、安全上必要不可欠なものである。通常、風荷重は風洞実験や数値流体実験のデータを基に予測する場合が多いが、その際、接近流として自然風に近い気流性状を用いる必要がある。しかし、自然風の気流性状は必ずしも完全に再現できているわけではなく、実験結果と自然風中で実際に生じる風圧にどのような差があるのかについても完全に明らかにされたわけではない。また、自然風中で見られる突風のような急激な風速変化や、風向の急激な変化が生じる場合には強い局部風圧が発生するなど、実験で用いられる定常な乱流場では見られないような現象があることが明らかにされている（例えば Tamai et al., 2002）が、風洞や計算機中にこれらの現象を再現することは難しく、建物の風荷重に対する影響も不明な点が多いのが現状である。さらに、これまでに行われた自然風中における測定をみると、建物に加わる風圧の性状に注目して行われたものが圧倒的に多く（例えば Richards et al., 2000）く、接近流の気流性状との関連において研究されたものは非常に少ないといえる。このため、風圧性状だけでなく、接近流の気流性状を同時に計測し、両者の

性状を解明することは、自然風中で実際に生じている風圧を予測するだけでなく、これまで求められた各種の結果と、実際に生じる圧力との関係を議論する上でも貴重な資料となると考えられる。とくに、数値流体計算のように、建物周りの気流性状と圧力場を3次的に再現でき、その詳細を定量的に捉えることができる手法が実用可能となってきた現在のにおいては、それらの結果と、自然風中の実在建物周りの流れ場との比較・検証を行うことの重要性が高まっている。さらに、数値実験を行う際に、流入境界における気流性状を設定するために必要となる気流のデータとしても貴重なものとなる。

以上のような理由により、本研究では野外の観測フィールドに設置された観測鉄塔と建物模型を用いて、接近流の風速と模型に加わる風圧の時間変化を多点同時計測することを計画した。その際、多くの建物は地面近くに建設され、そのスケールも小さく、風荷重は地面付近の気流性状に大きく依存すること考慮し、一辺が2.4mの立方体模型を接地層内に設置して風圧の測定を行い、地面付近の気流性状と風圧の関係を明らかにすることとした。これにより、自然風の乱流性状が風圧に及ぼす影響を明らかにし、地面付近に建つ建物、とくに小規模な建物に対する耐風設計上の風荷重を設定できるような資料を提供する。

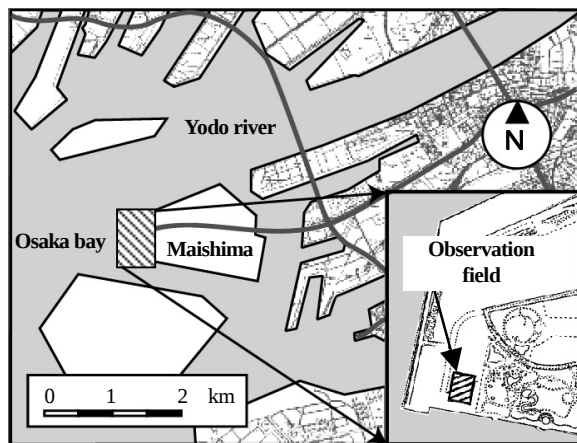


Fig. 1 Observation site

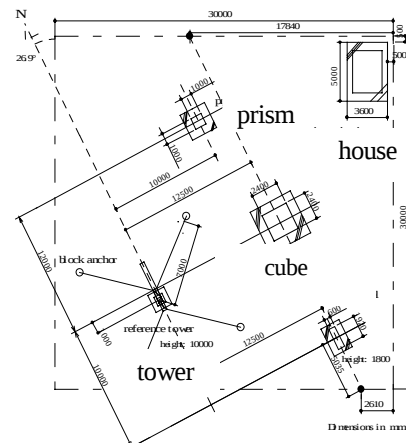


Fig. 2 Observation field

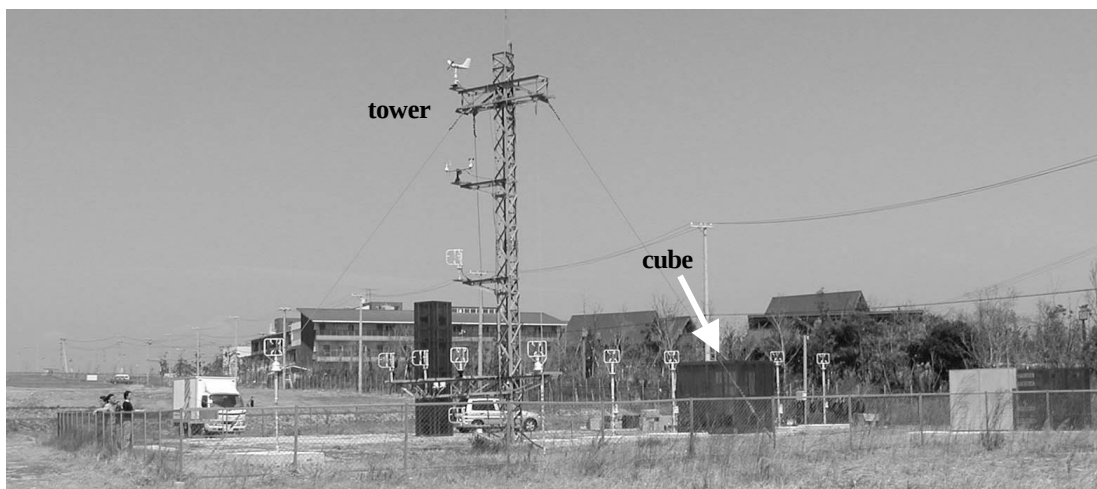


Photo 1 Over view of the observation field

2. 観測状況

観測は Fig. 1 に示す大阪市此花区の埋め立て地、舞洲にある大阪市立大学舞洲耐風構造実験所の観測フィールドに設置された一辺 2.4m の立方体周りで行った。観測フィールドは一辺 30m の敷地で、東側は大阪市立野外活動センターに接し、高さ 5m 程度の樹木が植えられている。南側は更地が約 50m あり、その向こうに海がある。北側には海まで更地が約 400m 広がる。観測フィールドの西側は敷地境界から約 5m 離れて傾斜約 20 度の斜面があり約 2m 下がっている。その先には更地が約 150m 広がり海に接している。敷地内には Photo 1, Fig. 2 に示すように、高さ 10m の風速観測用の鉄塔と、一辺 2.4m の立方体模型、一辺 1m、高さ 5m の直方体模型、内圧測定用模型および観測小屋が配置されている。観測用鉄塔と立方体模型、直方体模型、内圧測定用模型の各辺は東西南北軸に沿うように配置され、観測用鉄塔は立方体模型の西側にそれぞれの中心で 12.5m 離れて配置されている。

2.1 風速の測定

今回の観測に先立ち、観測フィールドでは約 1 年前から風速の観測が鉄塔において行われた。その結果および大阪管区気象台の気象記録によると、本観測地点の卓越風向は北東と西である。北東風は春から秋にかけて、西風は冬季に多く、特に冬場の季節風はほとんどが西風であった。前述のように北東方向には野外活動センターがあり、樹木や建物、敷地の高低があるため、気流性状が影響を受けて変化する恐れがあること。冬季の季節風はある程度の時間一定方向から吹くこと。西側には約 150m の更地が海まで続き、地表面の状態がほぼ一定と考えられることなどから、今回の観測では西側の季節風をターゲットとした。また、接近流および建物周辺の風速変動と建物に加わる風圧変動の関係を明らかにするため、立方体模型の風上・風下側および模型屋根の上に風速計を設置し、立方体模型表面に設けた測定孔における圧力変動を同時計測できるようにした。

立方体は Fig. 3 のように一辺が東西に正対するように設置し、中心線上および西側に建てられた鉄塔上に風速

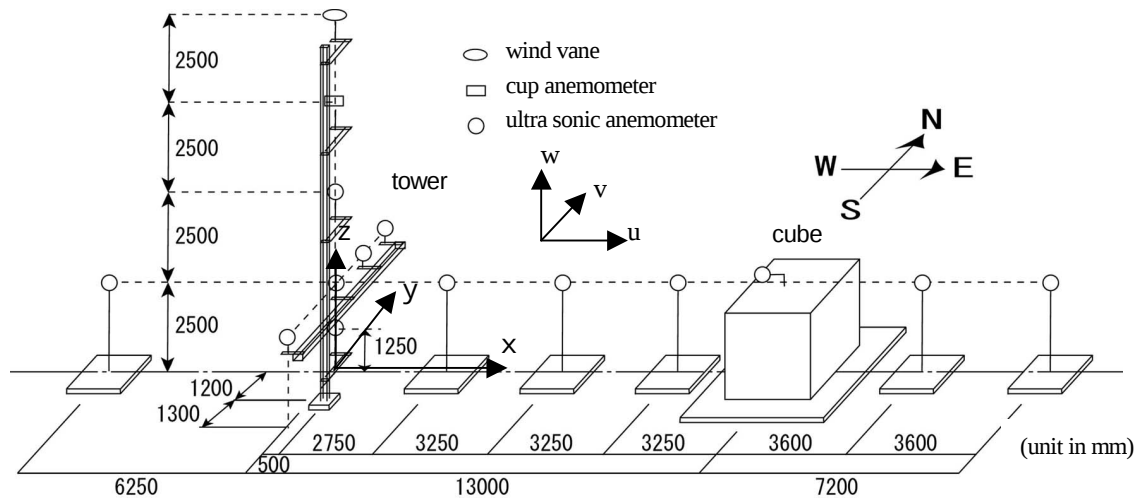


Fig. 3 Coordinate system and layout of anemometers around cube

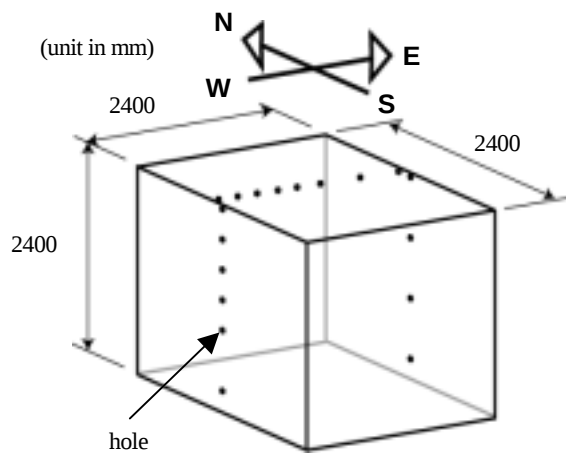
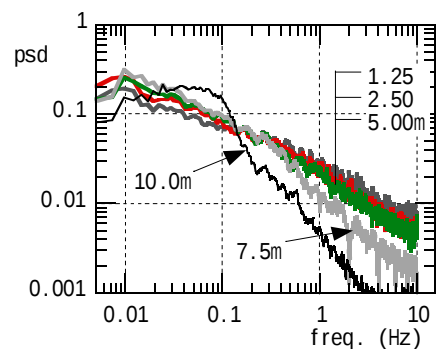


Fig. 4 Pressure holes on the wall of cube



$Z = 10\text{m}$ における平均風速が 11.7m/s 、西風のときの結果。 $Z = 7.5\text{m}$ における三杯矢羽根風向風速計と $Z = 10\text{m}$ における風車型風向風速計では高周波数成分のパワーが落ちており、とくに、風車型風向風速計ではパワーの低下が大きい。

Fig. 5 Power spectrum density of wind fluctuations

計を設置した。鉄塔には上から風車型風向風速計、三杯矢羽根風向風速計各 1 台と、残り 6 台の超音波風速計を Photo 1, Fig. 3 に示すように設置した。鉄塔上に鉛直方向に設置された風速計の中心軸は立方体中心を通る東西の鉛直面内にある。水平方向には東西方向に 6 本のポールを設け、地上 2.5m に 6 台、立方体屋根上に 1 台の超音波風速計を設置した。これにより、立方体の中心から西側 13m 地点で鉛直方向に 5 点、地上 2.5m で、水平南北方向に 4 点、さらに、立方体中心を通る地上 2.5m の測線上で 8 点の風速同時観測を行った。

2.2 風圧の測定

風圧の測定は Fig. 4 に示すように立方体模型の表面に穴を開け、ビニールチューブを圧力センサーに導いて、模型表面の穴の部分の圧力を測定した。測定位置は図に示すように西側壁面中央の鉛直方向に 6 点、屋根面中央から 15cm 北側にとった東西線上に 8 点、東側壁面中央の鉛直方向に 4 点の合計 18 点である。風速および圧力センサーからの出力は観測小屋に集められ、サンプリング

周波数 10Hz で A/D 変換され、8192 個のデータが 1 つのファイルとしてハードディスクに記録された。圧力測定時の基準圧にはフィールド内観測鉄塔の下部に掘った穴の中の静圧をとっている。また、立方体表面には合計 170 点の穴があげられており、一部の点の風圧も同時に計測した。

3. 接地境界層内の気流性状

3.1 各種統計量の変化

観測された風速変動の周波数特性は超音波風速計の応答特性により変化し、Fig. 5 に示すように頂部の風車型風向風速計および三杯矢羽根風向風速計では高周波数成分のパワーの低下が大きい。そこで、変動量の解析には $z = 5\text{m}$ 以下に設置した超音波風速計の記録を用いることにした。

観測は 2001 年の 1 月から 3 月にかけて行われ、冬季の季節風時のデータが得られた。観測期間中の卓越風向は西風で、高風速の出現は Fig. 6 a に示すように西風が最

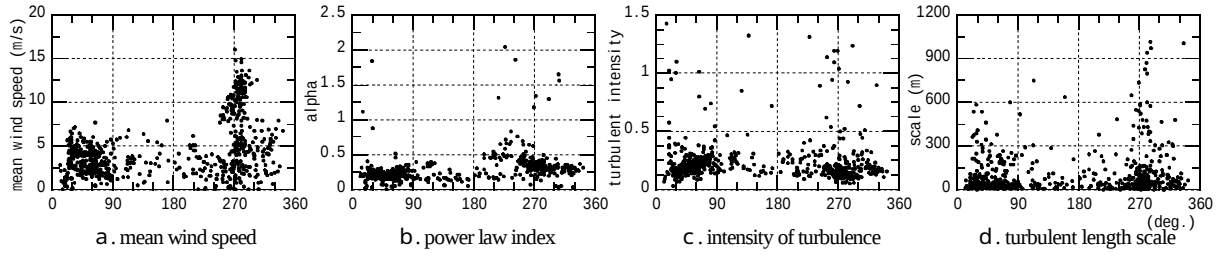


Fig. 6 Variation of wind characteristics with wind directions at $z = 7.5\text{m}$; $N = 0^\circ$, $E = 90^\circ$, $S = 180^\circ$, $W = 270^\circ$

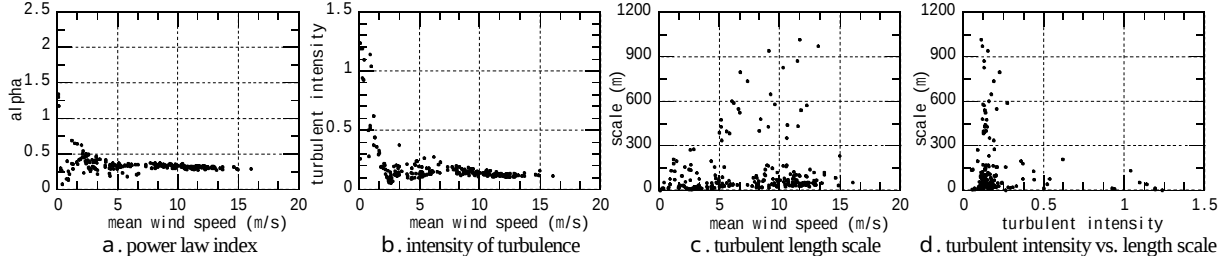


Fig. 7 Variation of wind characteristics with mean wind speed at $z = 7.5\text{m}$, wind direction from WSW to WNW

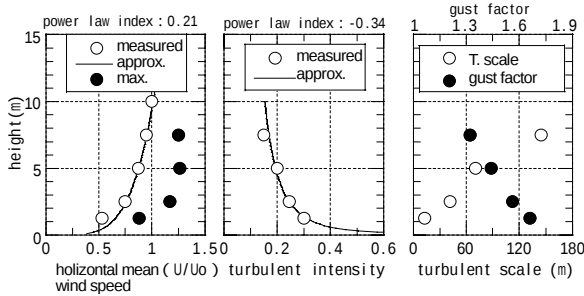


Fig. 8 Profiles of wind statistics

も多く、次が北東風であった。鉄塔の鉛直方向に取り付けられた風速計の観測データより求めた平均風速の鉛直分布をべき法則で近似すると、Fig. 6 bのように風向によって風速の分布形状は異なり、西風の方が北東風よりもべき指数の値が大きかった。乱れの強さは北東風の方が僅かながら大きな値をとり、乱れのスケールは Fig. 6 cのように西風の方が大きな値が発生することが多かった。

次に、高風速の出現が多かった西南西から西北西の風についてみると、Fig. 7 a, bに示すようにべき指数、乱れの強さともに低風速でばらつく。このばらつきは風速の増加とともに小さくなり、高さ 7.5m における平均風速 7m/s 以上ではほぼ一定になり、両方ともに風速の増加とともに僅かに減少する傾向が見られた。乱れのスケールは Fig. 7 cのように平均風速とともに増加する傾向をもつものと、一定値を示すグループがみられた。今回の観測では平均風速 16m/s が最大であり、それ以上の風速での変化はわからないが、Fig. 7 dに示すように乱れの強さが大きいときには乱れのスケールが大きくなることはなかった。そこで、 $z = 10\text{m}$ における 10 分間の平均水平風速が 10m/s を超えるデータについて、それらの平均風速や乱れの強さ、乱れのスケール、突風率の集合平均をとると、Fig. 8 のような鉛直分布を示す。観測データは、

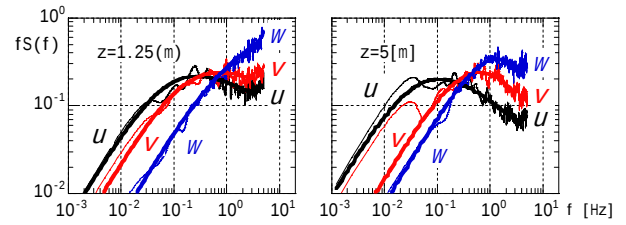


Fig. 9 Variation of power spectrum densities :

U ; streamwise, V ; lateral, W ; vertical wind components, thick lines; approximation by equation (1)

サンプリング周波数 10Hz で A/D 変換され、8192 個、819.2 秒のデータが 1 つのファイルとして保存されているが、これらのうち平均風向が西に最も近く風速の高いものの解析結果を以下に示す。

各風速成分のパワースペクトル密度 $S_i(f)$ に f をかけた $f S_i(f)$ は、Fig. 9 に示すように高度が高くなるほどそのピークが低周波数側に移る。求めた $S_i(f)$ の形状を、3Hz 以下でカルマン型の式(1)で近似し、その中に現れる係数 A, C および、スペクトルのピークを与える長さスケール L_i の最適値を求め Fig.10 に示す。

$$\frac{f S_i(f)}{\sigma_i^2} = \frac{A f L_i / \bar{u}}{\{1 + (f L_i / \bar{u})\}^C} \quad (1)$$

ここで、式(1)中 σ_i^2 は分散、 $\bar{u}$ は各測定点における x 軸方向の平均風速、下付 i は方向 1, 2, 3 を表し、それぞれ風向 (x 軸) 方向、風向直角水平 (y 軸) 方向、鉛直 (z 軸) 方向の風速成分を表す。

Fig.10 より、係数 A, C は u, v 成分において、高さ 7.5m 以下では高さ方向にほぼ一定、あるいは高さとともに少し増加し、 C の値は $-5/3$ に近い値をとる。 w 成分の係数は大きく変化するが、Fig. 9 に見られるとおり、パワースペクトル密度の形状を求めるのに十分な周波数分解能が

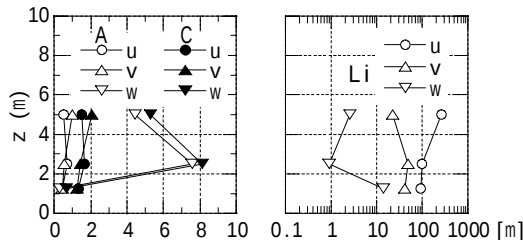


Fig.10 Profiles of optimized values; A, C and Li in equation (1)

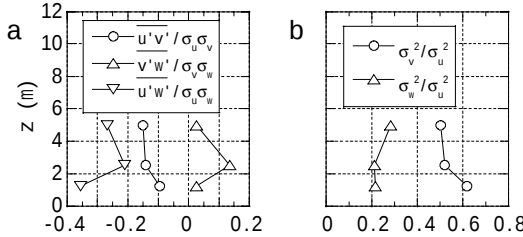


Fig.11 Profiles of cross correlation coefficients

得られていないため、高周波数側までを近似するものではない。長さスケール L_i は u 成分に比べて v, w 成分が小さくなっている。また、Fig. 8 に示した自己相関係数から求めた x 方向の乱れのスケールに比べ、 u 成分の長さスケール L_i は大きくなっている。

u, v および w 成分の変動風速 u', v', w' 間の相互相関係数の鉛直分布形状を Fig.11a に示す。いずれも地面に最も近い高度 1.25m でそれより上空と少し異なる分布形状を示す。 $u'v'/\sigma_u\sigma_v$, $u'w'/\sigma_u\sigma_w$ は負の値を、 $v'w'/\sigma_v\sigma_w$ は正の値をとる。各変動風速成分の大きさを比較すると、Fig.11b に示すように σ_w^2 は σ_u^2 の 2 ~ 3 割程度、 σ_v^2 は σ_u^2 の 5 ~ 6 割程度となっている。

立方体模型風上における風向方向の同様な変化を Fig.12, Fig.13 に示す。各種統計量は立方体模型に近づくにつれてわずかに変化し、立方体模型から風下にかけて大きく変化している。 u 成分の平均値が立方体模型風上側で流れ方向にわずかに減少し、乱れの強さが大きくなっていることは境界層の発達を示している。 v 成分、 w 成分に関する最大、最小、平均値、および、風向は立方体模型風上側でほとんど変化していない。乱れの強さは、流れ方向にわずかに増加しているが、 u 成分の平均値に対する強度として求めているため、 u 成分の平均値の流れ方向の減少の影響がでており、 v 成分、 w 成分の分散の大きさ自体は立方体模型風上側でほとんど変化していない。さらに、パワースペクトル密度の形状を式(1)中の係数の値で評価すると u 成分は立方体模型風上側でほとんど変化は見られず、 v 成分は立方体模型近くで減少している。なお、 w 成分に関しては係数 A, C のばらつきが大きい、前述のように良好なデータが得られていないためであると考えられる。一方、各風速成分間の相互相関係数、 u 成分の分散に対する v, w 成分の分散の割合、乱れのスケールは立方体模型風上側で流れ方向に減少し

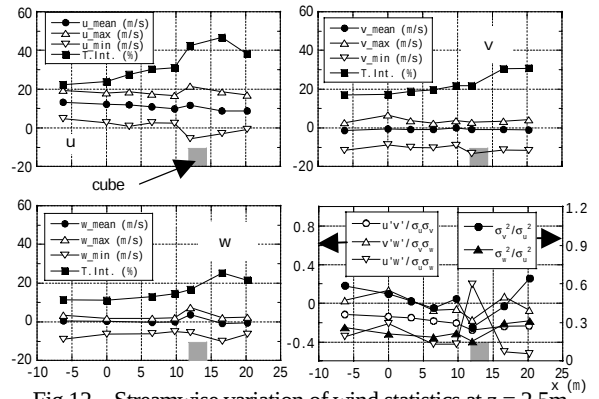


Fig.12 Streamwise variation of wind statistics at $z = 2.5m$

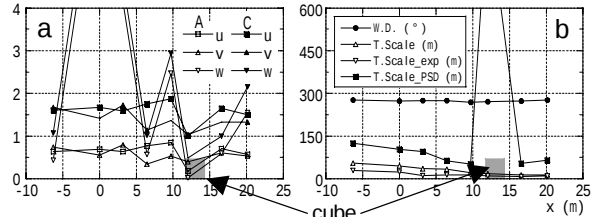


Fig.13 Streamwise variation of wind direction, length scale and optimized values; A, C and Li in equation (1) at $z = 2.5m$

W.D. ; wind direction
T.Scale ; by directly integrated autocorrelation coefficient
T.Scale_exp ; by approximated exponential function
T.Scale_PSD ; by optimized value L_i in equation (1)

ている。また、立方体模型の屋根面上では、乱流特性が大きく変わり、その影響が風下側の相関や、乱れのスケールの値の変化に映されている。ただし、立方体模型の 2.05m 風上までは各種統計量の変化が大きくないことから、模型の影響をほとんど受けていないこともわかる。

3.2 接近流の風速変動の空間構造

次に、接近流の空間的な乱流構造を調べるために、超音波風速計による変動風速波形を用いて、各変動風速成分間の空間相関を求める。

(1) 流れ方向鉛直面内の空間相関

高さ 2.5m で東西に設置された測定点と、塔上に水平および鉛直方向に設置された測定点間の相関係数の最大値および相関係数が最大値をとる際の時間遅れ τ_{max} の流れ方向鉛直 ($x-z$) 平面内の分布を Fig.14 に示す。相関係数は乱れの空間方向の変化の指標になり乱れの変化が大きく、相関が低くなるほど 0 に近づく。また、 τ_{max} は乱れの流下時間に対応している。図中の横軸 dx は測定点からみた観測鉄塔までの距離を示しており、縦軸は相関を求める相手の測定点の高さを示している。たとえば、測定点 $x=9.75m, y=0m, z=2.5m$ の観測鉄塔上高さ 5m に設置された測定点 $x=0m, y=0m, z=5m$ に対する相関は、図中 $dx = -9.75m, z=5m$ にプロットされている。Fig.14 a より u 成分の相関は流れ (x 軸) 方向に比べて鉛直 (z 軸) 方向に早く減少しており、鉛直方向への乱れ

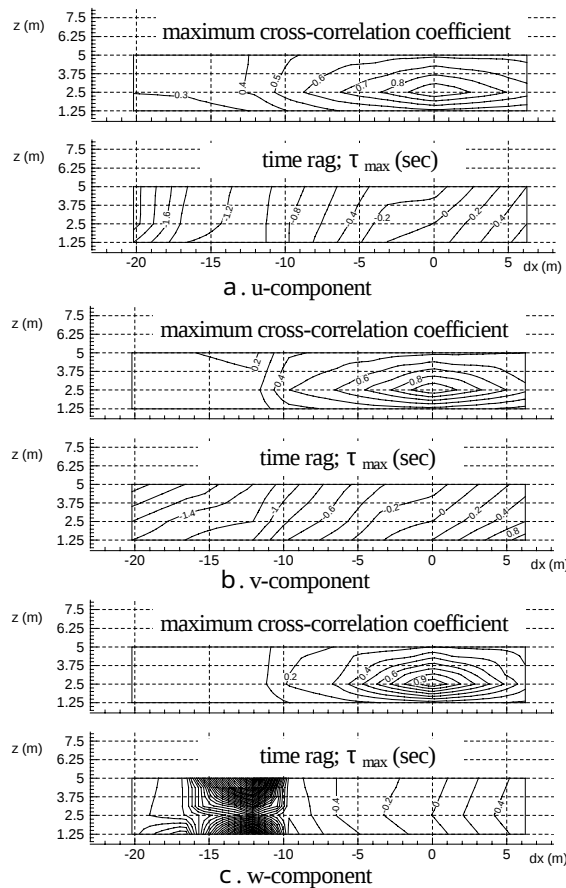


Fig.14 Vertical distribution of maximum cross-correlation coefficient and time lag when the cross-correlation coefficient takes its maximum value, reference point; $dx=0, z=2.5m$

構造の変化が大きいことを示している。また、相関係数が最大値をとる際の時間遅れ τ_{max} は上空ほど小さくなっており、相関が高い乱れが通過する時刻は上空のほうが早いことを示している。このことより、上空ほど乱れの流下速度が早いことがわかる。

v成分の相関係数の最大値と τ_{max} の鉛直平面内の分布は Fig.14 b のようになり、相関は流れ方向に比べて鉛直方向に早く減少し、u成分よりも早く減少する。相関係数が最大値をとる際の時間遅れ τ_{max} は上空ほど小さくなっており、相関が高い乱れが通過する時刻は上空のほうが早いことを示している。これより、上空ほど乱れの流下速度が早いことがわかる。

w成分に関しては Fig.14 c のようになり、相関は流れ方向に比べて鉛直方向に早く減少しており、uおよびv成分よりもずっと早く減少する。 τ_{max} は $z=2.5m$ 以外で上方、下方とも小さくなっている。とくに、 $z=1.25m$ および、 $dx=-9.75$ (風下側) では相関係数自体が非常に小さいため、それから求めた τ_{max} の値にはかなりの誤差が含まれると考えられる。

以上の結果から、乱れをある大きさをもった渦と考え、その渦が変形しながら下流に流されているとすると、その変形のスピードは水平成分よりも鉛直方向成分のほう

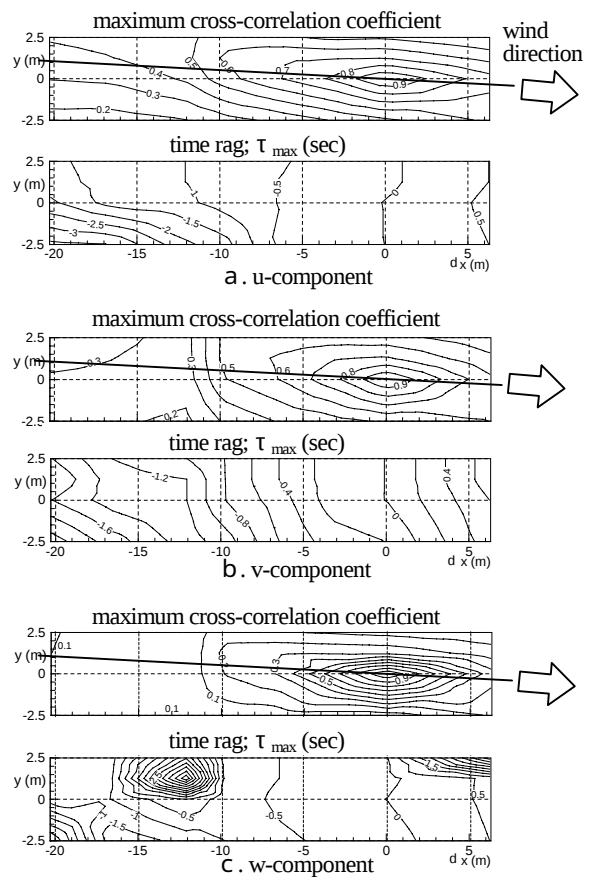


Fig.15 Horizontal distribution of maximum cross-correlation coefficient and time lag when the cross-correlation coefficient takes its maximum value, reference point; $dx=0, z=2.5m$

が大きく、また、上空のほうが流下速度が速いために、渦は斜め上空に引き延ばされるような変形を受けていると考えられる。また、vおよびw成分の空間方向の相関の変化はu成分の変化に比べて非常に早く、急激に相関が低くなっている。これは、vおよびw成分のもつ乱れのスケールがu成分に比べてずっと小さく、早く変形していることを示している。

(2) 流れ方向水平面内の空間相関

u成分の流れ方向水平 (x-y) 平面内の相関係数の最大値および相関係数が最大値をとる際の時間遅れ τ_{max} の内の分布は Fig.15 a のようになり、相関はおおまかにいってx軸方向に高く、y軸方向に低い。流れ方向に相関が高い部分を結んだ軸は図中実線で示す平均風向の向きにほぼ一致している。これは、今回の解析に用いたデータは流れの平均的な主流方向ができるだけ西から東に向かうx軸方向に近いものを選んではいないものの、正確にはx軸方向を向いてはならず、図中実線で示すように少し北よりの風向をもっており、その方向に相関が高くなることを示している。 τ_{max} は全体として dx の負の方向、すなわち、風下側にいくにしたがって小さくなり、相関係数の最大値をとる乱れの出現が遅くなって、乱れ

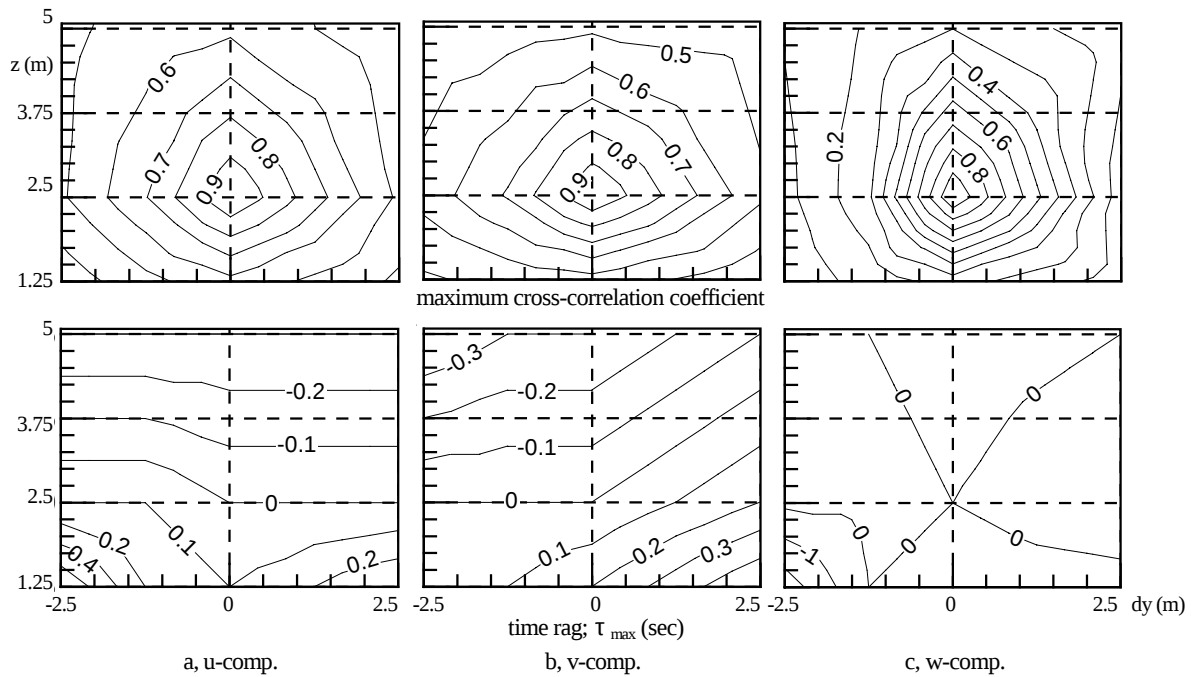


Fig.16 Vertical distribution of maximum cross-correlation coefficient and time lag when the cross-correlation coefficient takes its maximum value

が風下側に流下していることがわかる。このとき $dx = 7m$ では y 軸方向の差は少なく、それより風下側では図の左下方向で小さくなる。ただし、風下に行くほど立方体模型の影響が大きくなると考えられること、相関自体が非常に小さく、 τ_{max} の特定にはかなりのばらつきがあることなどから、図の左下方向で τ_{max} の値が小さくなるのが何らかの特徴を示しているものであるかどうかは不明である。

v 成分の流れ方向水平面平面内の分布は Fig.15 b のようになり、相関は u 成分と同様に x 軸方向にくらべて y 軸方向に低い。 x 軸方向の相関の減少は u 成分より早い、 y 軸方向の減少は u 成分とほぼ等しく、 y 軸方向の乱れの空間スケールが u 成分と v 成分でほぼ等しいことを示している。また、流れ方向に相関が高い方向を結んだ軸は図において左上に傾いており、図中に実線で示した平均風向の向きにほぼ一致している。時間遅れ τ_{max} は全体としては風下側にいくにしたがって小さくなり、乱れが風下側に流下していることがわかる。また、 τ_{max} は y の負側、すなわち南側で小さくなっている。

w 成分の流れ方向水平面平面内の分布は Fig.15 c のようになり、相関係数は x 軸方向にくらべて y 軸方向に極端に小さくなる。 x 軸方向および y 軸方向の相関の減少は u, v 成分より早く、 y 軸方向の乱れの空間スケールが u 成分と v 成分に比べて小さいことを示している。図において流れ方向に相関が高い方向もやや左上に傾いており、図中に実線で示した平均風向の向きにほぼ一致している。時間遅れ τ_{max} は全体としては風下側に行くにしたがって小さくなり、乱れが風下側に流下していることがわかる。相関が高い領域では τ_{max} の分布は u や v 成

分のそれとほぼ等しく、乱れの流下速度が u, v 成分とほぼ等しいことを示している。一方、相関が低い部分では τ_{max} の決定自体があやふやになるので、ばらつきも大きくなっている。

(3) 流れ直角鉛直面内の空間相関

u 成分の流れ直角鉛直面内の相関係数の最大値および相関係数が最大値をとる際の時間遅れ τ_{max} の分布は Fig.16 a のようになり、相関は $z=2.5m$ より上方では水平方向に比べて鉛直方向に高く、 $z=2.5m$ より下方では逆に水平方向の相関のほうが鉛直方向よりも高くなる。時間遅れ τ_{max} は上方にいくにしたがって小さくなり、相関係数の最大値をとる乱れの出現が上空ほど早くなっていることがわかる。

v 成分の相関係数の最大値および τ_{max} の分布は Fig.16 b のようになり、相関は鉛直方向に比べて水平方向に高く、地面に近づくほど相関は低くなる。 τ_{max} は上方にいくにしたがって小さくなり、相関係数の最大値をとる乱れの出現が上空ほど早くなっていることがわかる。図中 $dy=2.5m$ における値は、観測鉄塔南側の高さ $2.5m$ の点と観測鉄塔中央鉛直方向に配置された高さ $1.25, 2.5, 5m$ の観測点との相関を示しており、この範囲、すなわち y の正の方向である観測鉄塔の南側では τ_{max} の値が高さとともに大きくなっている。一方、 $dy=0m$ である観測鉄塔および北側にある観測点と観測鉄塔上の相関の τ_{max} は、水平方向の変化が少ない。この違いは考えられるとすれば鉄塔の影響であるが、はっきりしない。

w 成分の相関係数の最大値および τ_{max} の分布は Fig.16 c のようになり、相関は z 軸方向にくらべて y 軸方向に

極端に低くなる。また、地面に近づくほど小さくなる。
z 軸方向および y 軸方向の相関の減少は u, v 成分より早く、y 軸方向の乱れの空間スケールが u, v 成分に比べて小さいことを示している。時間遅れ $\tau_{\max}$ は相関が高い部分でほぼ 0、また、基準点との距離が離れると相関が急激に減少するので、 $\tau_{\max}$ の値の決定が困難になり、今回の観測結果においては水平、鉛直方向ともに 1.5m 程度以上離れた領域では $\tau_{\max}$ の値に関する議論ができない。

3.3 風向直角鉛直面内の風速変動の相互スペクトル

ここでは観測鉄塔 ($x = 0m$) におけるデータを用いて風向直角鉛直面 ($y-z$ 平面) 内の風速変動の相互スペクトルを調べる。各測定点間の相関および位相差を周波数 f ごとくの変化で表すコヒーレンスとフェイズにより評価する。なお、コヒーレンス $coh(f)$ 、フェイズ $\theta(f)$ と相互スペクトル S_{ij} 、コスペクトラム K_{ij} とクワドラチュアスペクトラム Q_{ij} の関係は式以下に示すとおりである。

$$\text{コヒーレンス: } coh(f) = |S_{ij}(f)|^2 / S_i(f) S_j(f) \quad (2)$$

$$\text{フェイズ: } \theta(f) = \tan^{-1}\{Q_{ij}(f)/K_{ij}(f)\} \quad (3)$$

$$\text{相互スペクトル: } S_{ij}(f) = K_{ij}(f) + iQ_{ij}(f) \quad (4)$$

ここで、 i は虚数単位で $\sqrt{-1}$ である。

さて、風速の各変動成分は鉛直面内である相関をもって分布しており、Fig.16 に示したように $y-z$ 平面内で水平方向および鉛直方向に変化する。これを式 (2) の平方根であるルートコヒーレンスと式 (3) のフェイズにより示すと、u, v, w 変動成分どうし、および同一地点において負の相関が高い u と w 変動成分についてそれぞれ Fig.17 ~ 19 のようになり、周波数が高いほど、また距離が離れるほどルートコヒーレンスの値は小さくなる。位相のずれは平均的に見ると周波数が高く相関が低いところではばつぎが大きくなる。また、空間的には水平方向に変化がほとんどないが、鉛直方向には周波数が高いほど、また距離が離れるほど大きくなっている。

ルートコヒーレンスとフェイズに関するこれらの関係を以下の式(5)~(8)のように近似すると、図中実線で示すように測定結果をうまく表すことができる。

$$\text{ルートコヒーレンス: } \sqrt{coh(f')} = \exp(-\sqrt{B_h^2 + B_v^2}) \quad (5)$$

$$\text{フェイズ: } \theta(f') = F(\zeta/z_a)^G f' = F(\zeta/z_a)^G (\zeta/\bar{u}_a) f \quad (6)$$

ここで、

$$B_h = D_h(\eta/z_a)^{E_h}(\eta/\bar{u}_a) f \quad (7)$$

$$B_v = D_v(\zeta/z_a)^{E_v}(\zeta/\bar{u}_a) f \quad (8)$$

式中、 f' は無次元化周波数で y 軸方向、z 軸方向にそれぞれ $(\eta/\bar{u}_a) f$ 、 $(\zeta/\bar{u}_a) f$ と表される。 η と ζ はそれぞれ 2 点間の y 軸方向および z 軸方向の距離。 z_a と $\bar{u}_a$ はそれぞれ 2 点間の midpoint の z 座標および midpoint における x 軸方向の平均風速である。ルートコヒーレンスとフェイズは周波数の関数として表され、式中の係数 D_h, D_v, E_h, E_v, F, G は測定値から最適値を求めた。今回の測定結果から、風速 3 成分それぞれに対するこれらの値、すなわち u 成分どうし、v, w 成分どうしの値を求めると Table 1 のようになる。この他、u と v 成分、u と w、v と w 成分の相関が考えられるが、u と v、v と w の相関は低く無視できる。また、u と w 成分には負の相関があり、同一地点では式 (9)、(10) のように近似できる。

ルートコヒーレンス：

$$\sqrt{coh(f')} = A' \exp(-B' f') = A' \exp\{-B'(z/\bar{u}) f\} \quad (9)$$

フェイズ：

$$\theta(f') = C_0' + C_1' f' = C_0 + C_1 f \quad (10)$$

ここで、 $\bar{u}$ は z における x 軸方向の平均風速。また、 $A' = 0.61 z^{-0.25}$ 、 $B' = 2.91 z^{-0.75}$ 。 $C_0' = C_0 - 2.9$ で、 C_1', C_1 は 0 となる。

Table 1 Optimized value of coefficients in equations (5) ~ (8)

	u	v	w
Dh	14.4	4.89	210
Dv	11.5	6.08	10.1
Eh	0.77	0.24	4.66
Ev	0.02	0.18	1.02
F	10.4	10.1	0
G	0.65	0.79	0

結果を詳しく見ると、Fig.17 より v, w 変動成分どうしのフェイズには y 軸方向の変化が見られる。通常は主流直角方向に風速分布が一様で平均的な風向・風速の変化がなければ、式 (6) に示されるように同高度における y 軸方向のフェイズの変化はないとしてよい。しかし、前述のように平均風向が真西ではなく x 軸とずれており、また、y 軸方向に速度勾配をもつ風速分布のため、フェイズに y 軸方向の変化があると考えられる。さらに、y 軸方向の変化について、相関が高い部分でのフェイズの 0 からのずれが、鉄塔の南側の観測点を含む解析結果と、鉄塔の北側の解析結果とで傾向が異なる。すなわち、鉄

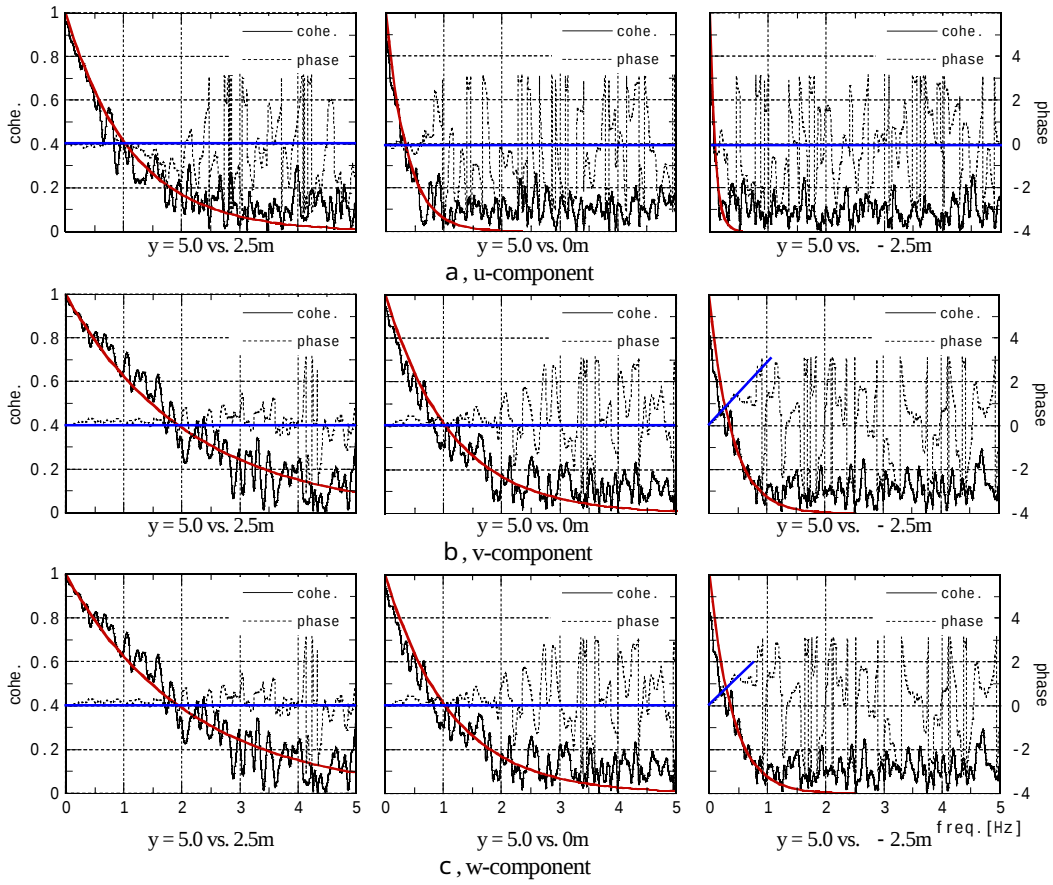


Fig.17 Horizontal variation of root coherence and phase between same velocity components at $x = 0$, $z = 2.5\text{m}$

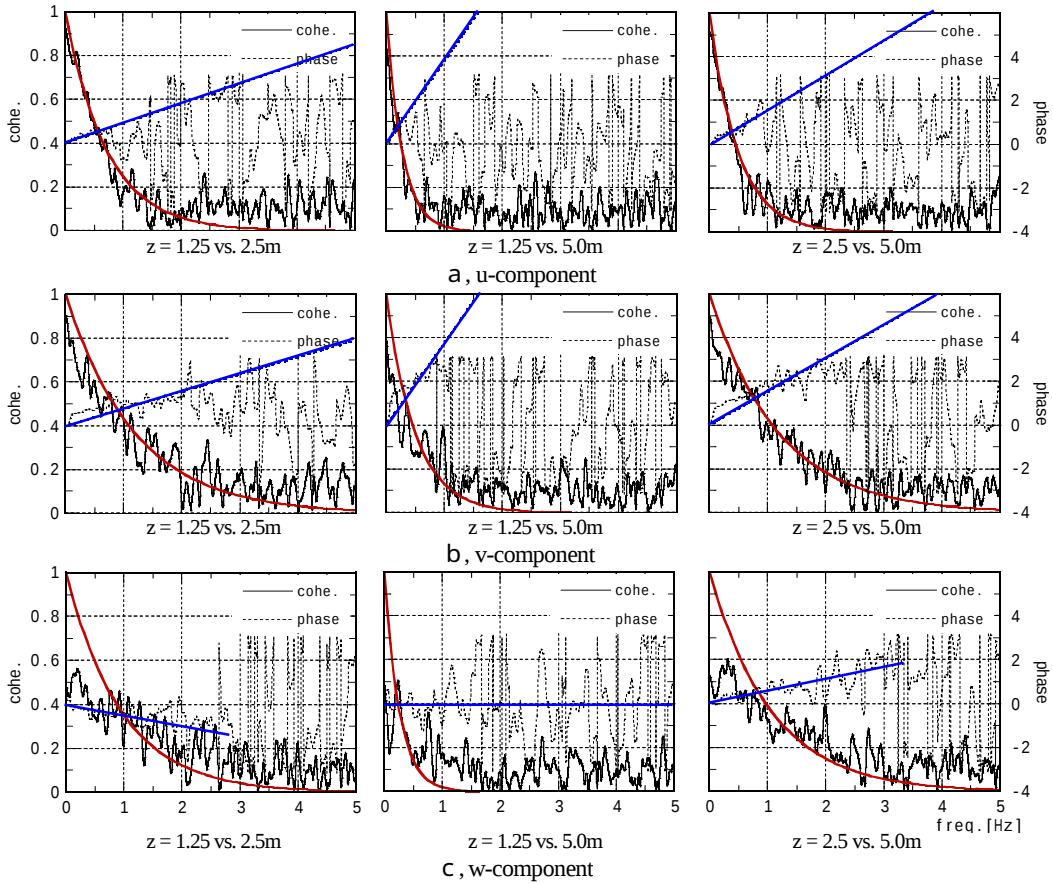


Fig.18 Vertical variation of root coherence and phase between same velocity components at $x = y = 0\text{m}$

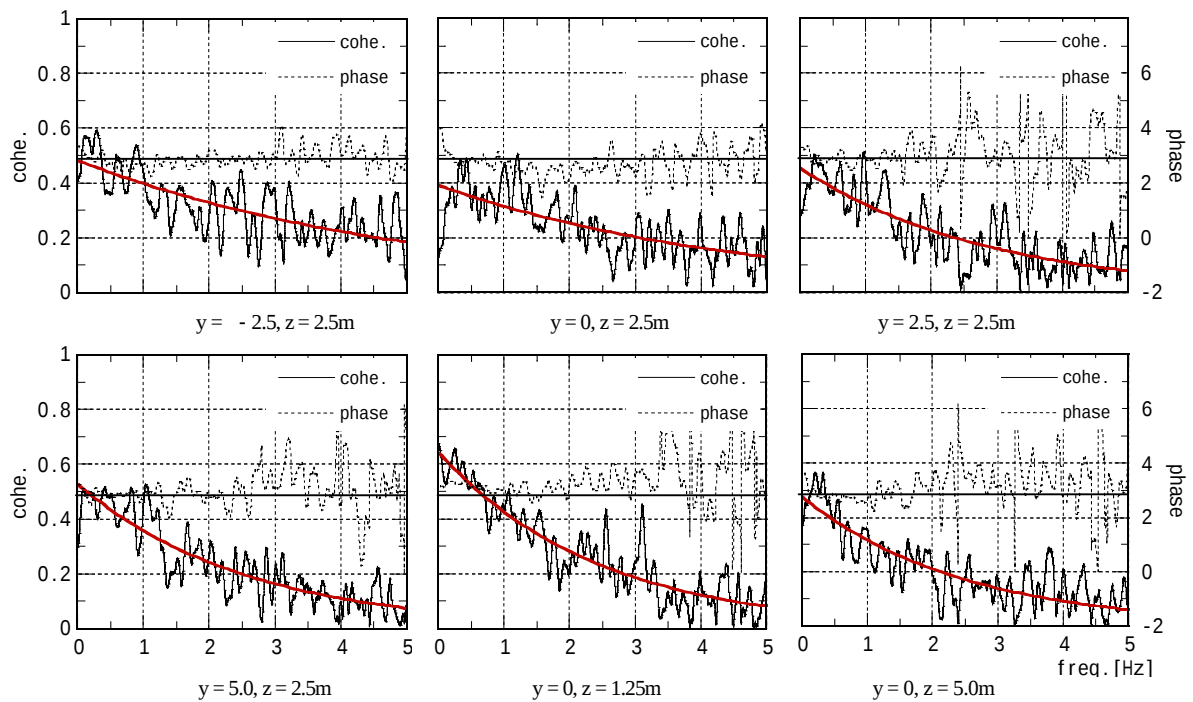


Fig.19 Spatial variation of root coherence and phase between u' and w' velocity components at $x = 0m$

塔の南側の観測点を含む結果ではフェイズは周波数とともに大きくなり、位相差が進んでいるのに対し、北側の解析結果では周波数による位相差はない。主流風向が少し北側を向いており、鉄塔の南北で流れが対象でないこと、平均風速の分布が南北方向に一樣でないことなどが上記の原因であると考えられるがそれ以上の詳細はわからない。

鉛直方向の変化については Fig.18 から u, v 成分どうしは高さ方向の距離が離れるにしたがって正の位相差が大きくなる。 w 変動成分どうしのフェイズが、低い周波数で $z = 1.25m$ と $z = 2.5m$ の間では周波数が高くなるとともに小さくなり、負の位相差を持つものに対して、それより上方の $z = 2.5m$ どうしでは位相差がなく、さらに上方の $z = 2.5m$ と $z = 5m$ との位相差は周波数とともに大きくなって正の位相差を持つようになる。これがどのような意味をもつものか現在のところよくわからないが、 $x = 0$ において境界層が発達中であること、最下点である $z = 1.25m$ の気流性状が地面付近の影響を大きく受けること、鉄塔自身の影響、さらには、鉄塔よりも風上側、観測フィールドの敷地の西側における地面の高低差（敷地の西側約 5m 地点で西側に傾斜約 20° の斜面があり、西に向かって下がっている）の影響で、地面付近の境界層が流れ方向に平衡状態になっていない、等の原因が考えられる。いずれにせよ、 w 変動成分どうしのルートコヒーレンスは周波数の低い部分で 0.5 程度と小さい。

同一地点における u と w 成分間のルートコヒーレンスは Fig.19 に示すとおり周波数の低い部分で 0.5 ~ 0.6 程度、位相差はほぼ π だけずれている。

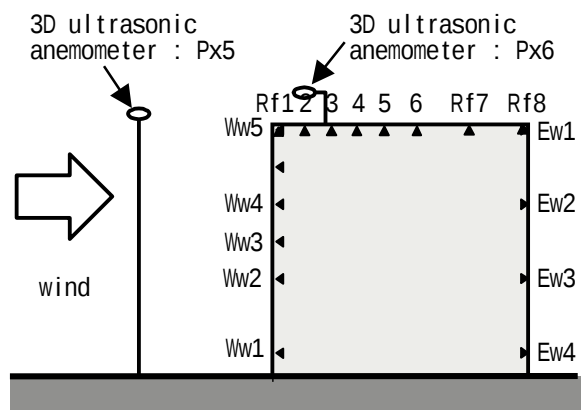


Fig.20 Notation of anemometers and pressure holes around the cube

4. 風速と圧力の関係

前節までに示したような気流性状をもつ接近流のもとで、立方体模型に生じる圧力分布性状について考察する。観測フィールド内の地面に掘られた穴における静圧を基準圧とし、立方体模型にかけられた測定孔と基準圧の差として測定された各測定点における圧力差 Δp から、観測鉄塔の高さ 2.5m における観測点 $x = 0, y = 0, z = 2.5m$ における平均水平風速 $\bar{U} = (u^2 + v^2)^{1/2}$ を用いた速度圧 $q = \rho \bar{U}^2 / 2$ によって風圧係数を $C_p = \Delta p / q$ として求めた。測定孔は Fig. 4 に示したとおり、 xz 平面と立方体模型のほぼ交線上に、西側壁面に 6 点、屋根面上に 8 点、東側壁面上に 4 点とってある。今回の解析に用いたデータでは、西側壁面上方から 2 番目のセンサーが不調のため、Fig.20 に示すように西側壁面では 5 点のデータ

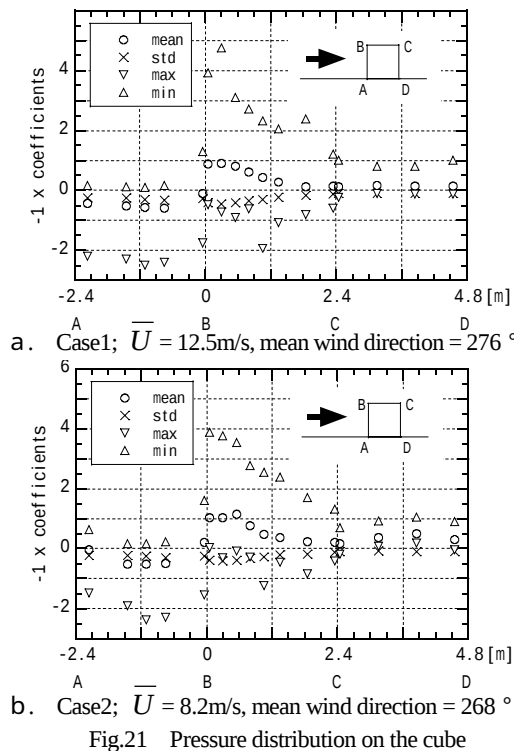


Fig.21 Pressure distribution on the cube

を用いてある。以下の考察における圧力測定点の呼び名は Fig.20 中に示すとおりである。

4.1 風圧の分布

前節で示した気流性状と同様に、平均風向がほぼ西の場合の立方体模型上における風圧係数の平均、標準偏差、最大、最小値の分布を Fig.21 に示す。ここでは、得られたデータのうち、風向がほぼ西で、できるだけ風速の高いものを2例示しているが、他の例でも同様に風圧分布の再現性は良く、ほぼ同様な風圧係数の値を示す。変化が見られるのは東側背面壁面の地面に近い測定点 Ew3 における低風速の場合で、高風速の場合に比べて圧力は平均、標準偏差、最大、最小値ともに少し大きくなる傾向が見られる。また、風上西側壁面の中央上よりの測定点 Ww3,4 の平均風圧係数の値が約 0.6 と通常の乱流境界層中におかれた立方体における値よりもやや小さいが、立方体模型にもっとも近い測定点 Px5 の平均水平風速を基準とすると、例えば、前節で示した気流性状に対応する Case1 の場合には、平均水平風速が Px5 で、10.1m/s であるので、平均風圧係数の値も約 0.92 となり、妥当な値となっている。なお、 $z = 2.5\text{m}$ における平均水平風速が x 軸方向に変化するの、前節で述べたとおり、この区間で境界層が発達しているためと考えられる。

4.2 風圧変動と接近流の相関

(1) 風上西側壁面の風圧変動

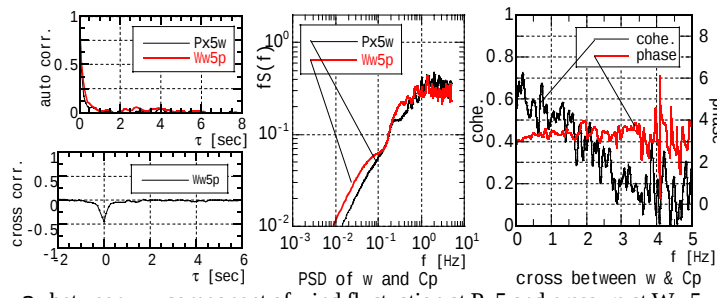
風上側西側壁面上の圧力の変動は u 成分および速度圧 $q = \rho(u^2 + v^2 + w^2)^{1/2} / 2$ と正の相関が高く、Fig.

22 に示すように自己相関係数、相互相関係数、パワースペクトル密度、およびルートコヒーレンスとフェイズの形状は最上部の測定点 Ww5 を除いた測定点 Ww1~4 でよく似ている。全体として、コヒーレンスは低周波数で高く高周波数側で相関が低くなり、フェイズも周波数が高くなると圧力のほうが位相が遅れ、風速の測定点と圧力の測定点が流れ方向に離れている分のずれが見られるが、相互相関係数でみた場合に、ピーク値に明らかな時間差は見られない。また、圧力変動は v 成分および w 成分と負の相関をもつが、 u 成分および速度圧に比べて相関は低い。一方、最上部の測定点 Ww5 では圧力の高周波数成分における変動のパワーの割合が大きく、接近流の u 成分および速度圧とのフェイズのずれは周波数によらずほぼ 0 である。特徴的なのは圧力変動のスペクトル形状が w 成分とよく似ており、負の相関も他の測定点に比べて高くなっている。

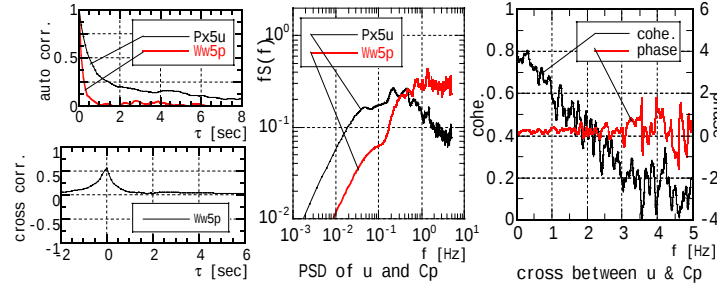
(2) 屋根面上の風圧変動

Fig.23 に示すように屋根面風上側前縁付近の圧力変動は風上側の風速の観測点 Px5 における u 成分と負の相関をもっている。相互相関係数のピークはプラス側にずれ、フェイズも正の値をもって、圧力変動のほうが位相が遅れている。また圧力変動のほうが高周波成分のパワーの割合が大きく、スペクトルの形状も高周波数側で圧力の割合のほうが大きくなっている。速度圧との相関は u 成分とほぼ同じ傾向をもっているが、風速変動の v および w 成分と圧力変動との相関は u 成分に比べて低い。また、すべての風速変動成分と圧力変動の間の相関は図に示す圧力測定点 Rf2 付近およびそれより前縁側の Rf1 で最も高くなり、風下に行くにしたがって相関は低くなる。

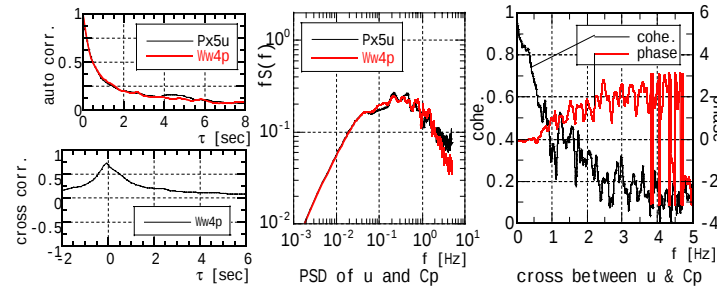
次に立方体風上側前縁上部の風速測定点 Px6 における風速変動成分と屋根面上の圧力変動との相関をみる。測定点 Px6 は前縁から風下側に 30cm、屋根面から上方に 30cm 離れており、測定された気流性状より前縁からの剥離剪断層の上方に位置していることがわかっている。Fig.24 に示すように圧力変動は u 成分および速度圧に対して負の相関が高く、スペクトル形状もよく似ている。相互相関のピークは圧力の測定点 Rf3,4 で時間遅れはほぼ 0 となる。さらに下流側に進んで、圧力の測定点 Rf7 で相関は最も低くなり、圧力の測定点 Rf8 で相関は少し回復するがその値は小さい。コヒーレンスは低周波数で高く周波数が高くなるにしたがって急激に小さくなる。位相は低周波数側で約 $-\pi$ だけずれており、周波数と共に位相は増加する。また、距離が離れると位相の増加率が小さくなる。 v 成分は圧力変動と正の相関を持つが、 u 成分および速度圧に比べて相関は低く、スペクトルの形状も異なっている。 w 成分は負の相関をもち、圧力の測定点 Rf3,4 では u 成分および速度圧と同程度に相関が



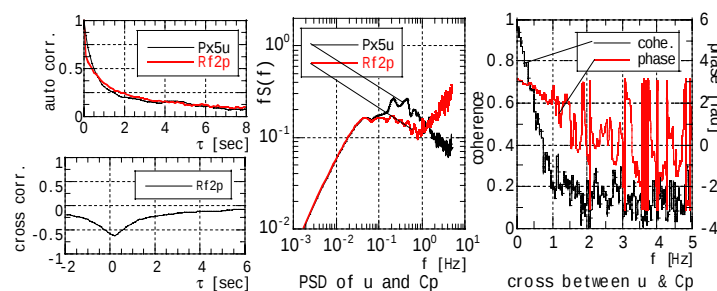
a. between w - component of wind fluctuation at Px5 and pressure at Ww5



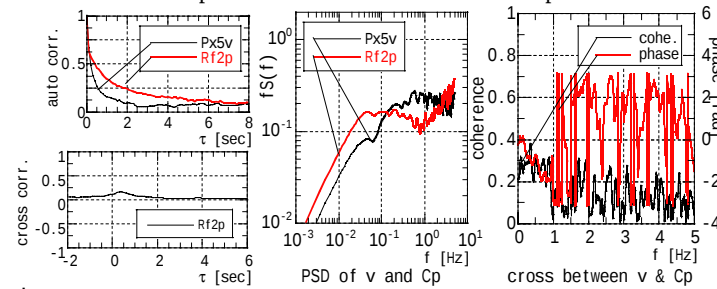
b. between u - component of wind fluctuation at Px5 and pressure at Ww5



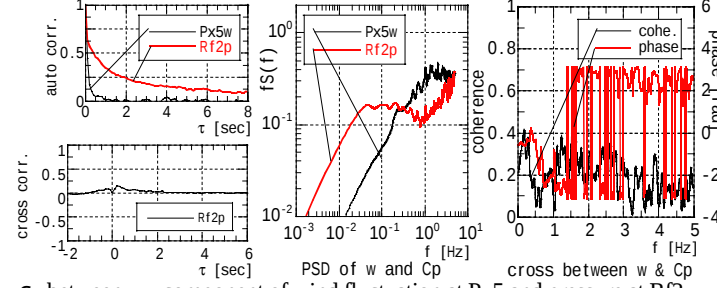
c. between u - component of wind fluctuation at Px5 and pressure at Ww4



a. between u - component of wind fluctuation at Px5 and pressure at Rf2



b. between v - component of wind fluctuation at Px5 and pressure at Rf2



c. between w - component of wind fluctuation at Px5 and pressure at Rf2

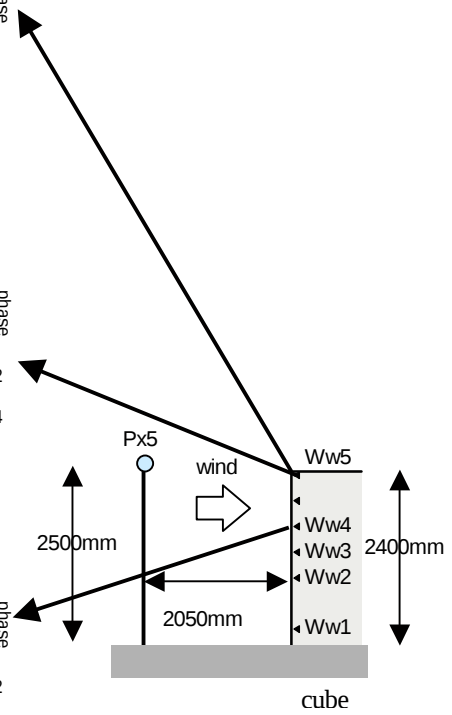


Fig.22 Correlations between wind fluctuation at Px5 and pressure on the windward wall

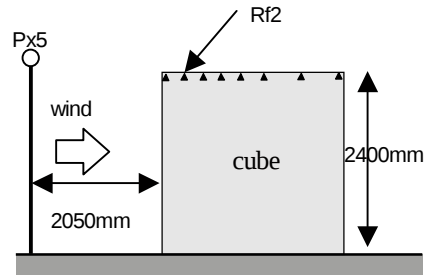
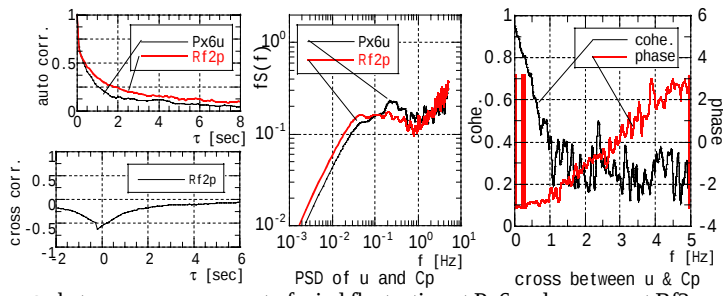
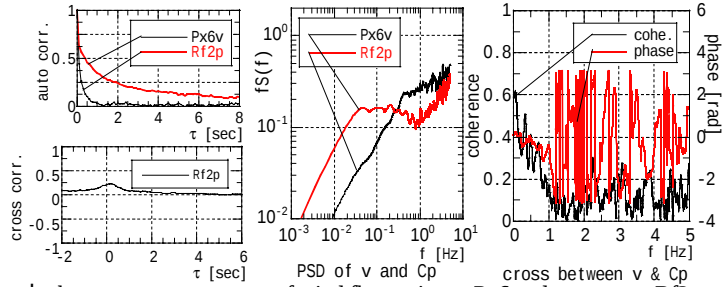


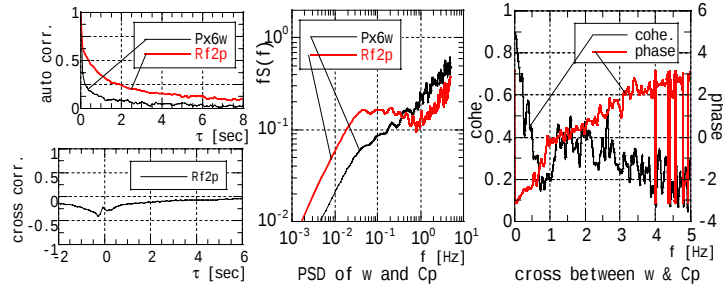
Fig.23 Correlations between wind fluctuation at Px5 and pressure on the roof at Rf2



a. between u - component of wind fluctuation at Px6 and pressure at Rf2



b. between v - component of wind fluctuation at Px6 and pressure at Rf2



c. between w - component of wind fluctuation at Px6 and pressure at Rf2

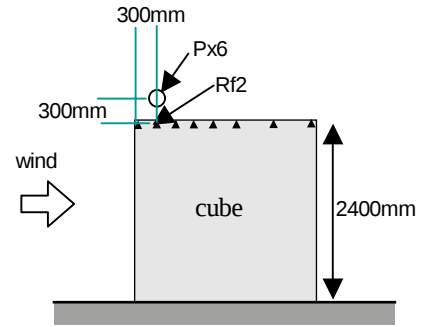
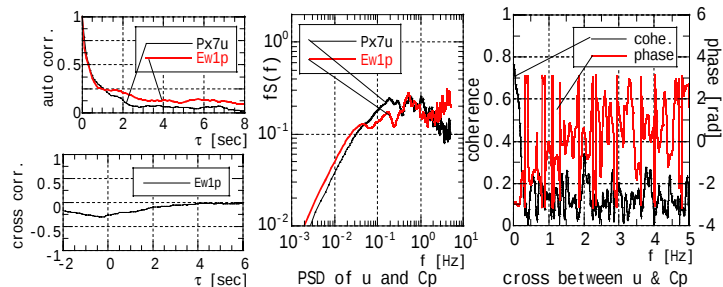
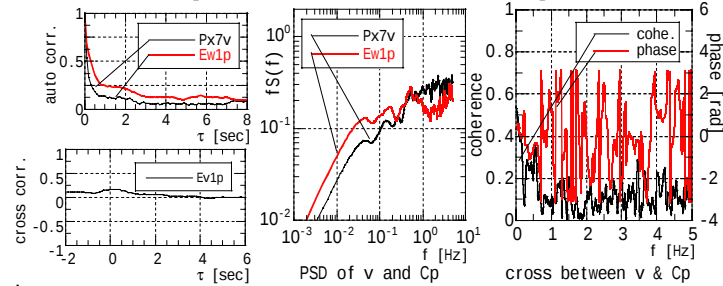


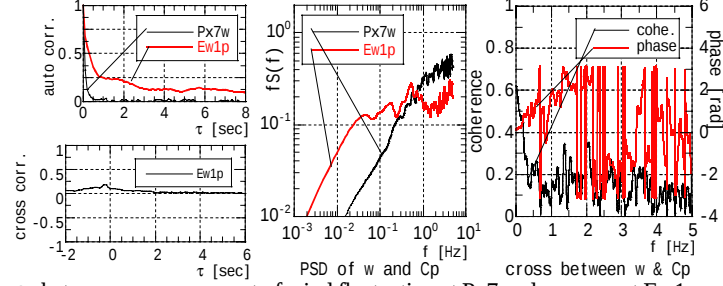
Fig.24 Correlations between wind fluctuation at Px6 and pressure on the roof at Rf2



a. between u - component of wind fluctuation at Px7 and pressure at Ew1



b. between v - component of wind fluctuation at Px7 and pressure at Ew1



c. between w - component of wind fluctuation at Px7 and pressure at Ew1

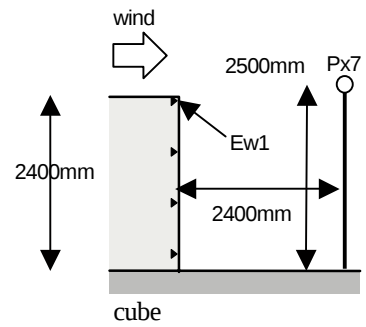


Fig.25 Correlations between wind fluctuation at Px7 and pressure on the leeward wall

高いが、ピーク位置の時間は風速よりも圧力の方が少し早くなっている。上流側の圧力の測定点 Rf 1, 2 では相互相関が時間遅れがほぼ 0 のときに極大値をとり、相関は風下に行くほど低くなる。コヒーレンスも低周波数側で相関が一度低くなったあと増加し、周波数が増すにつれて再び小さくなるという特徴的な変化がみられる。

(3) 風下東側壁面の風圧変動

立方体模型東側壁面上の風圧は風速の測定点 Px6 における u 成分と負の相関をもつがその大きさは小さく、場所による変化もほとんどない。また、速度圧との相関は u 成分とほぼ同じ、w 成分とは負の相関をもつが、u 成分よりも低い。v 成分とは正の相関をもち、w 成分との相関よりもさらに低くなっている。さらに、立方体模型の風下側にある風速の測定点 Px7 における風速変動 u 成分および速度圧と圧力変動は Fig.27 に示すように負の相関を、v および w 成分と圧力変動は正の相関をもつが、いずれも相関は低い。

5. まとめ

本研究では建物に加わる風荷重、とくに地面付近に建つ小規模な建物を対象とし、地面付近の気流性状とそれによって生じる風圧力の関係を明らかにすることを目的として、野外の観測フィールドに多点配置された風速計と、その風下に設置された一辺 2.4m の立方体模型を用いて、地面付近に吹く接近風の風速と模型に加わる風圧力の変化を多点同時計測し、自然風の乱流性状とそれによって生じる風圧力との関係を明らかにした。以下に結果をまとめる。

1: 高風速時の風速の統計量

高さ 10m における 10 分間の平均水平風速が 10m/s を超えるデータ（最高は 16.1m/s）について、平均水平風速の鉛直分布形状をべき法則で近似したときのべき指数は 0.21 であった。乱れの強さについても同様に、鉛直分布形状をべき法則で近似したときのべき指数は -0.34 であった。また、乱れのスケールはほぼ高さに比例して大きくなり、突風率は地上付近高さ 1.25m で 1.7、上空にいくにしたがって減少し、高さ 7.5m で 1.3 となった。

2: 接近流の乱流性状

接近流の乱流性状について以下のことがわかった。

- 立方体模型の風上側において、地面付近で乱流境界層が発達中であった。
- 高さ 2.5m における気流性状は、立方体模型に最も近い風上側の風速測定点、（一辺 2.4m の立方体模型風上側前縁から 2.05m 上流）において立方体模型の影響をほとんど受けていない。

- 風速 3 成分について、それぞれ自身および他の成分間どうしの相関から、主流方向、主流直角水平方向、鉛直方向に関するパワースペクトル密度、相関の変化、乱れの空間スケールを求めた。パワースペクトル密度を本文中に示すカルマン型の式で評価した場合に、最適化された係数およびスペクトルのピークを与える長さスケールの値を求めた。主流方向の相関は流れ方向 u 成分、流れ直角水平方向 v 成分、鉛直方向 w 成分の順に低くなる。主流直角水平方向の相関は v, u, w 成分の順に低くなり、鉛直方向の相関は u, v, w 成分の順に低くなる。高さ 2.5m において、乱れは平均水平風速の約 90% で流下している。このとき、乱れは下流に流されながら変形しており、その変形のスピードは水平成分よりも鉛直成分のほうが大きい。また、上空のほうが乱れの流下速度が速い。v および w 成分の空間方向の相関の変化は u 成分の変化に比べて非常に早く、急激に相関が低くなる。自己相関係数の時間積分と平均水平風速の積から求めた乱れのスケールは、相関係数の距離方向の積分から求めた乱れの空間スケールよりも小さくなる。

- 立方体模型の風上側の観測鉄塔において、主流方向に直交する鉛直平面内の風速 3 成分の変動成分について、相互スペクトルの空間方向の変化をルートコヒーレンスとフェイズとして定量的に評価し、それぞれ、指数関数および線形関数として近似したときの係数を最適化した値を求めた。

3: 立方体模型上の圧力分布

立方体模型の中心を通る鉛直平面との交線付近上に開けられた圧力測定孔に加わる圧力に関して風圧係数を求め、高風速時の平均、標準偏差、最大、最小値の分布を求めた。その結果をみると、風向が一定している場合にこれらの分布の再現性は非常によく、また、勾配流を流入気流として用いた過去の風洞実験による結果との整合性も良い。

4: 風速変動成分と立方体模型上の圧力変動の関係

接近流および、立方体模型風上側前縁付近上方の風速変動成分と、立方体表面の圧力変動との相関を求め、以下のような結果を得た。

- 西側風上壁面における圧力変動は、接近流の u 成分および速度圧の変動成分との正の相関が高い。
- 屋根面風上側の圧力変動は、接近流および前縁付近上方の u 成分および速度圧の変動成分との負の相関が高く、前縁付近上方の w 成分と負の相関が高い。一方、前縁付近上方の v 成分とは正の相関をもつが相関は低い。また、屋根面風下側に向かうにしたがって、接近流および前縁付近上方のいずれの風速成分とも相関は低くなる。

c . 東側風下壁面における圧力変動は，前縁付近上方の u, w 成分および速度圧の変動成分との負の相関を， v 成分とは正の相関をもつが相関は低い。

参考文献

Richards et al.. "Wind pressures on a 6m cube" J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., vol.89, pp.1553-1564, 2000.
H. Tamai, Y.Okuda and J. Katsura: On relation between Reynolds Number and Karman Vortex Formation on a Bluff Body in Natural Winds, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.89, pp. 1619 - 1633, 2002.

謝 辞

本研究の一部は財団法人能村膜構造技術振興財団の助成および科学研究費（基盤研究B）の補助を受けて行われたものである。また，本研究を進めるにあたり，京都大学防災研究所の林泰一助教授および石川裕彦助教授には測定装置の設置等で多大の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

Characteristics of Approaching Flows and Pressures on a Cube in the Natural Wind

Takashi MARUYAMA, Tetsuro TANIGUCHI*, Mitsutaka OKAZAKI**, Yoshihito TANIIKE*

*Osaka City University

**Technical Research Institute, Haseko Corporation

Synopsis

This study presents the results of an experiment where a field measurement was arranged using a 2.4m cube located on the ground and a number of anemometers arrayed around it. The characteristics of approaching flows are described and the velocity-pressure correlations are discussed .

Keywords: surface layer, cube, natural wind, observation, wind characteristics, pressure characteristics