

建築物周辺の 3 次元複雑流れに関する研究 - 3D-LDA による気流性状の検討 -

丸田栄蔵 (建築工学科)

1. はじめに

建物周りの変動風特性を把握することは建物周辺流れはもちろんのこと、建物表面に作用する風圧変動や建物の振動を推論する上でも重要な事項となって来ている。特に、風速の変動に関するメカニズムについて考えることは、有益なことを考える。風洞実験において、建物周りの変動計測に関しては、村上¹⁾等によるタンデム型熱線計測による三次元的計測において建物風上と風下のパワースペクトルの性状を調べたものや、孟等²⁾によるスプリットフィルムを用いて屋上の剥離や円錐渦のスペクトル性状に対して検討したものがあある。LDA 計測では、これまで data rate が小さいことから十分に風速変動性状を踏まえることができなかった。

本研究では、建築物周辺流れ現象に関する基礎的実験として、一辺が 100mm の Cube 模型を使用し、3 次元レーザー流速計 (Three-Dimensional Laser Doppler Anemometry) を用いることで、建築物周辺流れの x、y、z、3 成分の同時計測を行なった。代表的な建築物周辺流れ現象について x、y、z、3 成分の風速変動のパワースペクトルを分析することによって考察を試みた。

2. 分析方法

本研究で用いた風洞は風路断面 1.0m×0.8m、Fetch 3.5m、全長 8.53m のエッフェル型で、送風機は、容量 14m³ のシロッコファンである。実験方法は、吉田、知久の論文⁴⁾⁵⁾を参照し、風洞気流は、日本建築学会荷重指針⁵⁾の地表粗度区分 IV (指数 $\alpha=0.27$) をラフネスとスパイヤーを用いて天井配置で、縮尺 1/500 の乱流境界層を再現した。

ラフネス配置は、丸田の方法⁶⁾に従い粗度密度を考慮しランダムに配置した。実験模型は、一辺が 100mm の Cube (アクリル製模型) を用いた。実験風向 θ は、 0° と 45° の 2 風向とし計測点是对称性を考慮して模型中心軸から半面にあたる風向 $\theta=0^\circ$ で 6,716 点、向 $\theta=45^\circ$ で 6,742 点を計測し、図 1 に計測点座標定義を示した。LDA のデータ取得は、サンプリング時間が一定でないため、1 測定点につき約 20 秒間のデータを取得し、かつ線形補間によりサンプリング時間 $\Delta t=1.2\text{mm sec}$ でデータ数 $n=16,384$ の計測と同等になるように等間隔にリサンプルした。

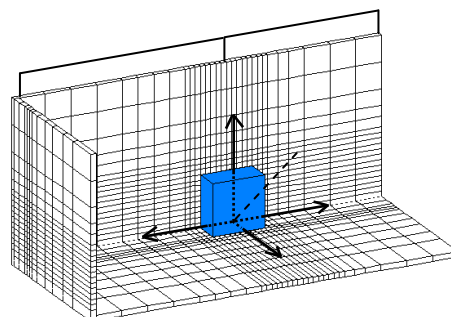


図 1 計測座標定義

表 1 実験条件

実験気流	粗度区分 IV
スケール	1/500
計測時間	約 20 秒
Δt	1.2 msec
Data 数	16,384
総計測点 0°	6,716 点
45°	6,742 点

また、表 1 に実験条件を簡単に整理した。スペクトル分析及び現象に対する考察は、風向 $\theta=0^\circ$ の Cube 前方の縦渦、側面での下降流と風向

$\theta=45^\circ$ の $\theta=45^\circ$ の屋根面の剥離、建物後の吹き上がる渦について集約して行った。

それらの現象を渦の発達や流れの変遷に伴うスペクトルの変化を時刻歴波形を参照しながら検討した。図 1 に座標定義及び図 2 に分析エリアを示す。図 3 には、模型中心($x=0, y=0$)での風洞気流の x, y, z 、3 成分のパワースペクトルを 3 種の高さ($z=30, 40, 100$)について示した。

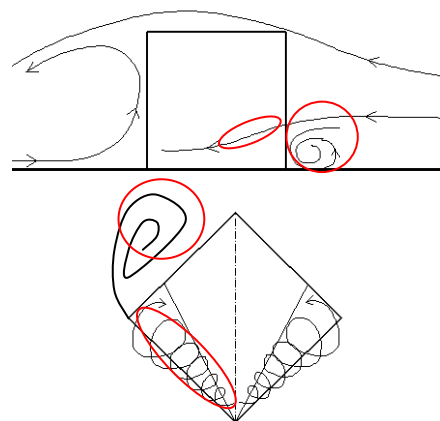


図 2 スペクトル分析エリア

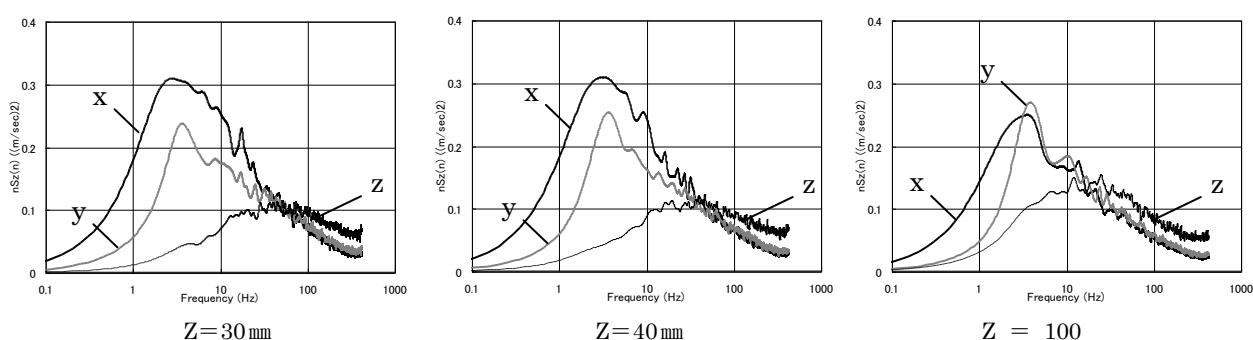


図 3 各高さの入射風パワースペクトル

3. 結果と考察

3. 1 Cube 前方縦渦域の風速変動

図 4 に建物風上前方に生じる縦渦のスペクトル検討 Point を示し、渦の外側から中心へ 1、2、3、4 の番号を付けた。図 5 に、スペクトルを、図 6 に時刻歴波形を、そして表 2 に座標及び主流風速 $\bar{V}$ と x, y, z 成分の風速変動 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ を示した。縦渦の内側と外側を比較することによって渦がどのように発達していくかを検討した。表 2 の $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ の風速変動値から分かるように、渦中心に近い程 x, z 成分の風速変動が大きく、特に z 成分の増大が顕著な性状を示し

た。このことは、図の 5 の x, y, z 、3 成分のパワースペクトルにおいても確認できた。特に、縦渦の発達が z 方向に著しい変動が生じ 8Hz 付近において鋭いスペクトルピークを示した。また、 y 成分のスペクトルは、どの Point においても周波数、パワーに関して大きな変化を示さない。この y 成分のピークは、入射風のもと同じであるが、パワーはわずかに増大している。一方、図 6 の時刻歴から認められる様に、建物中心($y=0$)では、 y 成分は 0 周りに変動しており、規則的な周期ではないが左右方向に流れを変えいわゆるスイッチングを示していると推察された。

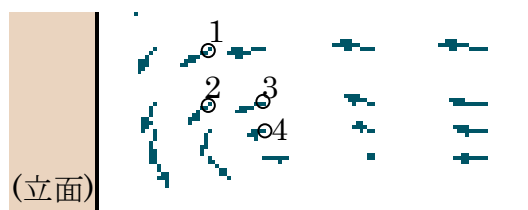


図 4 縦渦の検討 Point ($Y=0$)

表 2 座標及び風速 Data $(\bar{V} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2})$

	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
(x, y, z)	(-70,0,30)	(-70,0,20)	(-80,0,20)	(-80,0,15)
$\bar{V}$ [m/sec]	2.1873	2.2132	2.4767	2.3549
σ_x [m/sec]	0.8745	1.1491	1.1592	1.4176
σ_y [m/sec]	0.9702	0.9798	1.084	1.0914
σ_z [m/sec]	0.7825	0.9827	1.3002	1.644

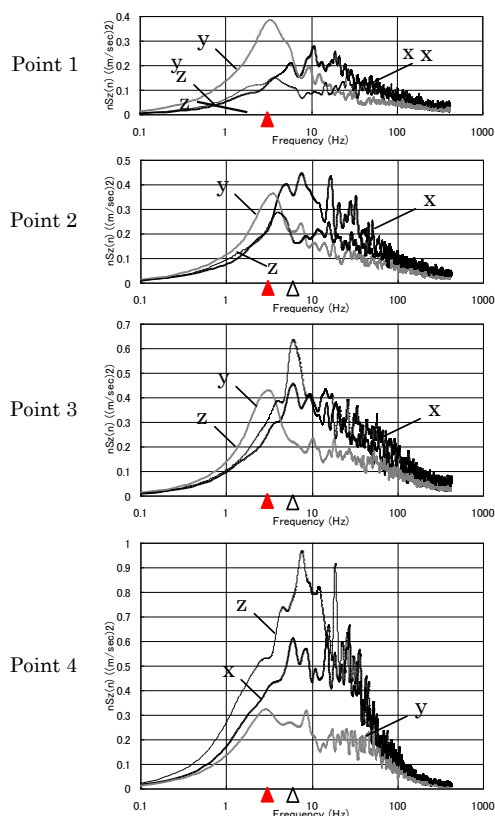


図 5 縦渦のパワースペクトル

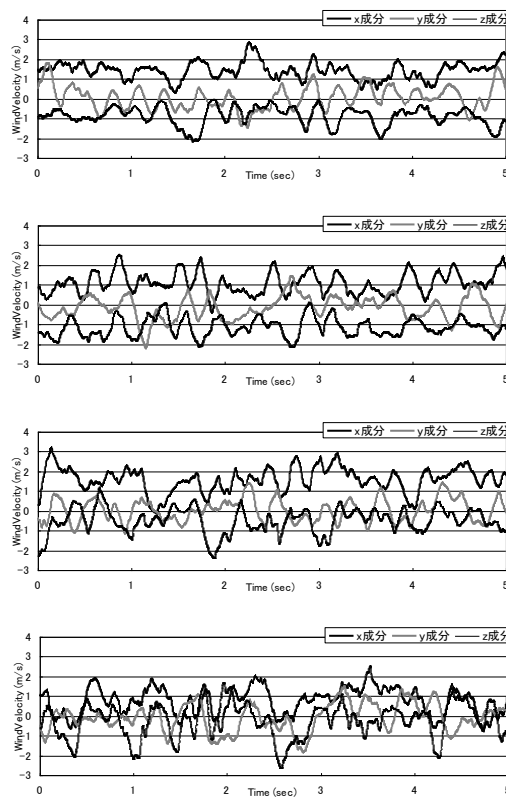


図 6 縦渦の時刻歴波形

3. 2 側面の下降流域の風速変動

図 7 は、側面で下降する剥離流の検討 Point の位置関係を示した詳細である。図 8 にパワースペクトルを、図 9 に時刻歴波形を、そして表 3 に各 Point の座標及び風速 Data を示した。図 8 から以下のことが分析された。流れの偏向が生じ始める Point 1 では前 3.1 に示した Cube 前方 Point 1 の変動がそのまま伝達している、剥離点近傍の Point 2 では x、z 成分の変動が抑制され逆に y 成分の変動が著しく増幅されている。そして剥離流による強風領域中にある Point 3 では、一転して y 成分の変動が抑制され、抑制されていた x 成分が突出した Power 増大を示した。そしてこの Point 3 のパワースペクトルは、4Hz と 8Hz 付近に顕著なピークを示した。これらの両スペクトルピーク周波数に関し、8Hz については図 5 の縦渦の x と z 成分のピーク周波数(△印)に一致していること、また、4Hz については Cube 風上で記述した流れのスイッチングに相当する周波数(▲印)に一致し偶然にも Cube のカルマ

ン渦周波数致することは興味深い。

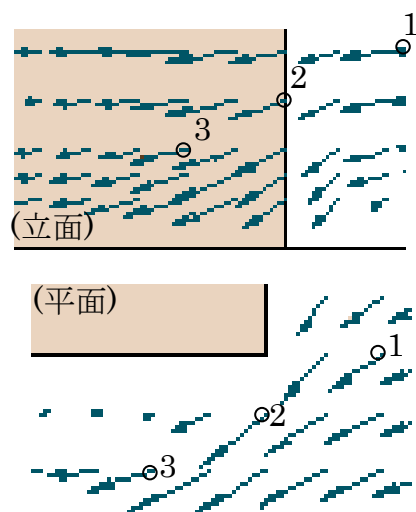


図 7 下降流域の検討 Point

表 3 座標及び風速 Data $(\bar{v} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2})$

	Point 1	Point 2	Point 3
(x,y,z)	(-70,50,40)	(-50,60,30)	(-30,70,20)
$\bar{v}$ [m/sec]	3.8603	5.4793	2.849
σ x[m/sec]	0.9193	1.0475	2.3454
σ y[m/sec]	1.0561	1.563	1.1305
σ z[m/sec]	0.7617	1.0494	1.1205

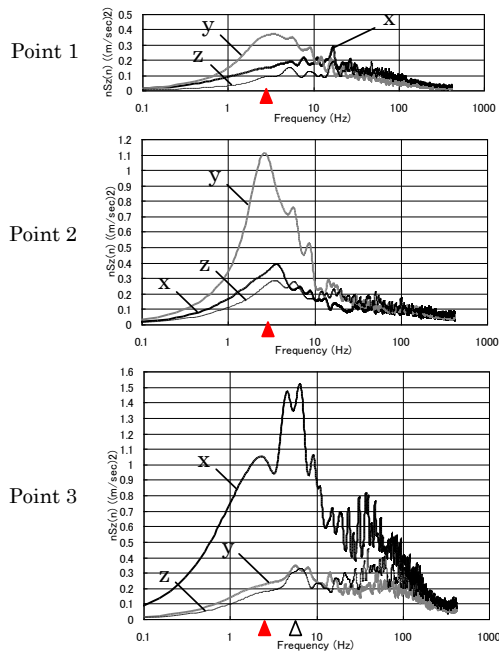


図 8 下降流のパワースペクトル

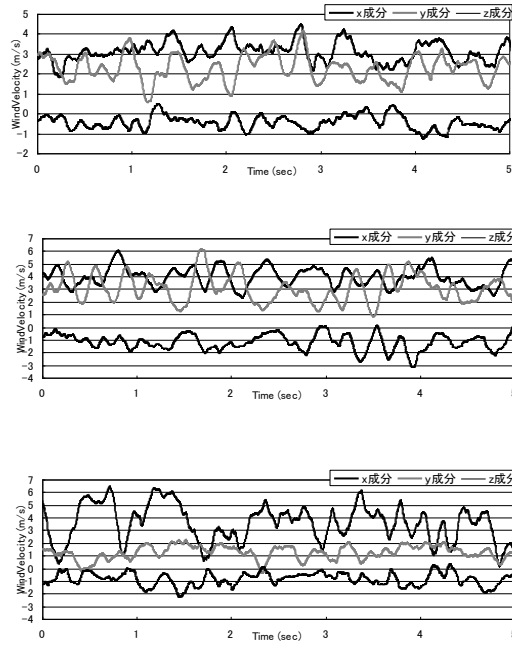


図 9 下降流の時刻歴波形

3. 3 屋根面の剥離流れの風速変動 (入射風向 45°)

ここでは入射風向 45° で生じる、いわゆる円錐渦内の渦の放出性状をパワースペクトルから検討している。評価点の高さは、LDA で計測できた屋根表面近くの変動が著しく高くなる位置を選定している。図 10 は、スペクトル検討 Point の位置関係を示した詳細である。図 11 にパワースペクトルを、図 12 に時刻歴波形を、そして表 4 に座標及び風速 Data を示す。図 11 のパワースペクトルから分かることは、y 成分のスペクトルが風上屋根面隅角部に最も近い Point 1 で前述した 4Hz 近傍において鋭いピークを有するパワー増大を示すが、後剥離に位置する Point 4 になるにつれ変動が抑制されパワーが減少している。

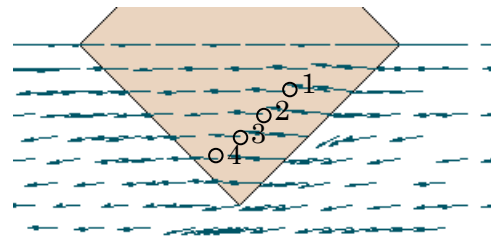


図 10 風向 $\theta = 45^\circ$ 屋根面剥離の
検討 Point

x 成分は、後流の Point 4 に移動するにつれ渦放出の特性により 5~6Hz 付近でピーク周波数が鋭くなりながら著しいパワーの増大が示される。z 成分のパワースペクトルは屋根稜線で剥離する流れの最付着と屋根面により z 変動が抑圧された性状を示している。

表 4 座標及び風速 Data

	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
(x,y,z)	(-20.7,20.7,112)	(-10.7,30.7,112)	(0,40.7,112)	(10.7,50.7,112)
$\bar{v}$ [m/sec]	6.1265	5.6169	5.3151	5.0037
σ_x [m/sec]	1.4451	1.8924	2.185	2.2559
σ_y [m/sec]	1.3159	1.269	1.236	1.1785
σ_z [m/sec]	0.7047	0.8154	0.9928	1.0109

$$(\bar{v} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2})$$

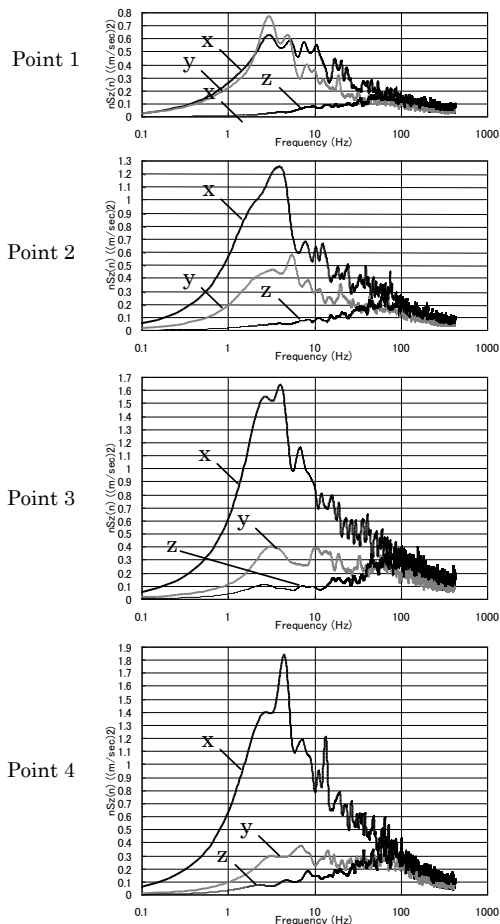


図 11 風向 $\theta=45^\circ$ の屋根面のパワースペクト

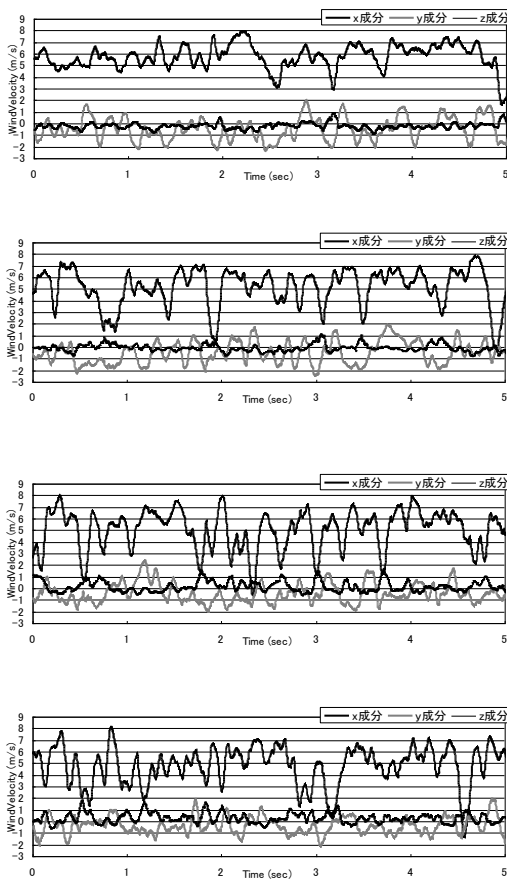


図 12 風向 $\theta=45^\circ$ 屋根面の時刻歴波形

3. 4 建物後流の風速変動（入射風 45° ）

ここでは、入射風向 45° において後流が、渦を形成しながら上昇していく過程をパワースペクトルの性状から分析する。図 13 は、パワースペクトル検討 Point の位置関係を示した詳細である(Point1,2 は同じ高さ)。図 14 にパワースペクトルを、図 15 に時刻歴波形を、そして表 5 に各点の座標及び風速 Data を示す。剥離流に近い Point1 では、x 成分のパワーが非常に強いが、後流渦を形成し始めた Point2 では、x 成分が抑えられ y 成分のパワーがわずかに増大し、そのピーク周波数は Point1 の y 成分のピークほとんど同じである。Point3 になると渦運動になりこの Point以降は渦の中心に近づきながら上昇していく。全体を通して y 成分のパワーが増加傾向にあるが、Point5 では低下している。

z 成分が、Point3、4、5 と順次低下傾向にあり

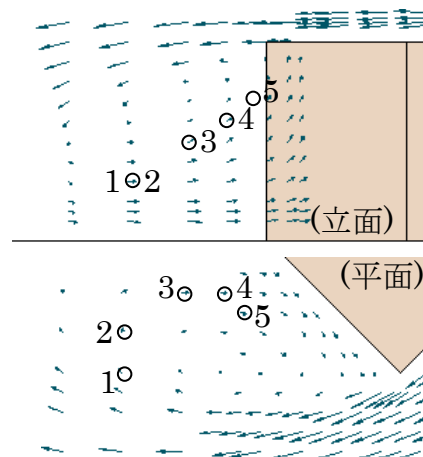


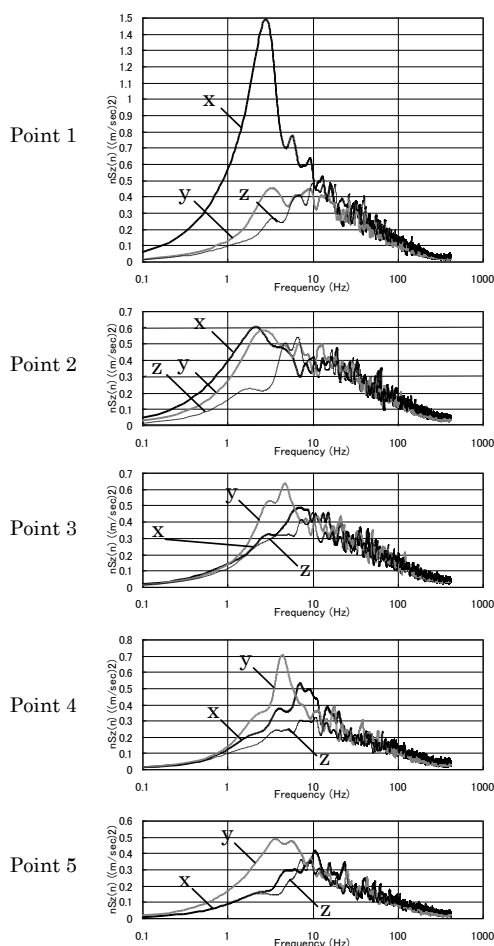
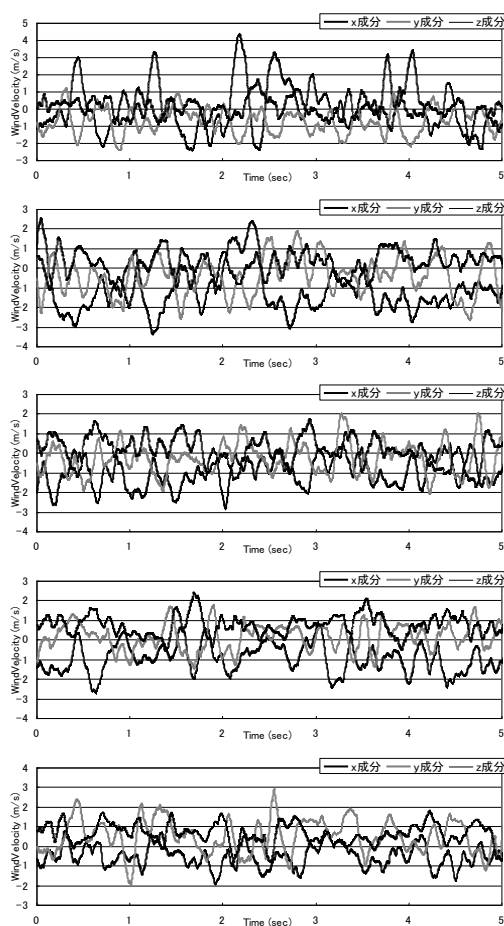
図 13 風向 $\theta=45^\circ$ 建物後の検討 Point

渦の中心に近づくと同時に上昇する流れにおいては、屋根を越える上層の剥離流に制約され変動が抑制されているものと考えられる。

表 5 座標及び風速 Data

$$\bar{V} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}$$

	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
(x,y,z)	(140.7,70.7,30)	(140.7,50.7,30)	(110.7,30.7,50)	(90.7,30.7,60)	(80.7,40.7,70)
$\bar{V}$ [m/sec]	2.4061	2.5762	2.3826	2.0997	1.9457
σ_x [m/sec]	1.8399	1.5236	1.3026	1.2034	1.0631
σ_y [m/sec]	1.2582	1.4588	1.3382	1.2612	1.2098
σ_z [m/sec]	1.221	1.295	1.2274	1.0571	1.0063

図 14 風向 $\theta=45^\circ$ 後流渦のパワースペクトル図 15 風向 $\theta=45^\circ$ 後流渦の時刻歴波形

4. まとめ

本研究では、パワースペクトル及び時刻歴波形を用いて比較することによって、Cube 周辺の 3 次元流れを分析することができた。以下に本研究で分析した結果をまとめる。

- 1) 建物中心における縦渦の風速変動は、y 成分にスイッチングと見られる現象が認められた。渦の発達に伴い z 成分が激しく変動し、また
- 2) 強風領域は、側面の下降流の細かく変動する

参考文献

- 1) 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計測、1980 年 11 月、第 297 号、59-68
- 2) 孟、日比：高層建物屋上の流れ場の乱流特性と組織運動、日本風工学会誌、第 72 号、1997 年 7 月、
- 3) Flow around three-dimensional obstacles in boundary layers、Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics、90(2002)、265-279

y、z 成分に、また、中心部から側面に流れ込む x 成分、y 成分のパワーが置換されたり、付加されることがスペクトルより確認された。

- 3) 風向 $\theta=45^\circ$ の屋根面の円錐渦は、本研究では、各成分のパワースペクトルと時刻歴波形を検討することで、周辺流れと風速変動の関連性が明確になり、総合的に建築物周辺流れを捉えることができた。

- 4) 吉田、丸田：LDA による 3 次元計測と境界層の simulation 検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、2003 年 9 月
- 5) 知久、丸田、吉田、永塚：3D-LDA による Cube 周辺の流れ計測 その 1 平均風速と変動風速の分布、日本建築学会大会学術講演梗概集、2004 年 12 月

