

プロジェクト 3

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 榮藏 (建築工学科)

1. はじめに

現在まで、風洞実験の乱流計測には、主に熱線風速計 (Hot Wire Anemometer : HWA) が用いられてきた。しかし、HWA は、建物模型周りの計測においてサポートの影響を受けるなど難点があった。そこで、非接触計測の特徴を持つレーザー風速計 (Laser Doppler Anemometer : LDA) による風洞実験が必要とされている。

これまで LDA は、data rate の低さを問題視しながらも、改善方法について検討が十分でなかった。さらに建物周辺流れに関しても高い data rate 下での 3 成分計測を行った 3 次元研究は、知見されていない。

本研究は、風洞実験における 3D-LDA の乱流計測方法を検討し確立すると共に、乱流境界層のシミュレーションについて検討し、かつ 3D-LDA を用いた風洞実験により Cube 周りの 3 次元気流性状について検討することによって、建築物周辺の 3 次元複雑流れについて明らかにすることを目的とした。

2. 実験諸元

本研究で使用した風洞は、風路断面 1.0m×0.8m、Fetch 3.5m、全長 8.53m のエッフェル型であるが、間仕切りで計測室から隔離した密閉室内を循環する回流型 (Fig.1) とした。送風機は、容量 14m³ のシロッコファンである。風洞気流は、日本建築学会荷重指針¹⁾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、縮尺 1/500 の乱流境界層を想定し再現した。なお、ラフネス配置は、丸田の方法²⁾に従い粗度密度を考慮しランダムに配置した。

3. 3D-LDA 計測の検討

3D-LDA による乱流計測においては、高い data rate 下での実験が必要であるので、以下の 3 項目について検討した。

- (1) レーザー出力
- (2) トレーサー濃度の確保
- (3) 計測ガラスのレーザー透過率

3.1 レーザー出力について

ガラスを除去した状況下において、空冷式 (出力 : 0.4W) を使用したところ、data rate は 1~20Hz 程度であった。そこでレーザーを水冷式 (出力 : 4W) に換え、出力を上げた状況で実験を試みた結果、data rate が 1~2kHz に飛躍的な向上を示した。

3.2 トレーサー濃度の確保について

風洞の噴出口とファン直前の 2 個所に煙発生装置を配置し、①煙排出時間 1 分間、②ガラス除去の条件下で、実験を試みた結果、Fig.2 に示す data rate でも分るように、ファン直前に設置した方が、風洞内のトレーサー粒子充満状態が良好ということが分った。これは、直接ファンに吸い込まれることでトレーサー粒子の発散を抑えることができたものと推察された。

3.3 計測ガラスのレーザー透過率について

10mm 厚のガラス透過する 3D-LDA は、高い data rate が期待できないので、ガラスを 1mm 厚のテンパックスガラスに換えて実験を試みた。Fig.3 より、アルゴンレーザーの波長約 0.5 μ m なので、コーティングなしの場合の透過率は、約 93% である。Fig.4 に示すように、テンパックスガラスを通した場合、ガラスを通さない場合と同じ高 data rate の計測が可能となった。ただし、測定高さ (Z) が 140mm を超えると、ガラスによるレーザーの反射光の影響により、data rate が大幅に減少した。そこで、テンパックスガラスに多層膜反射コーティングを施したところ、レーザーの透過率が約 97% と向上し、反射の影響を改善することができた。

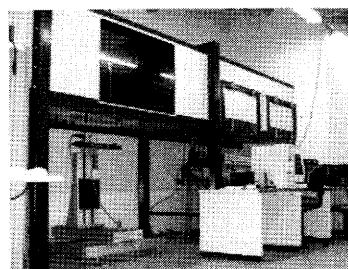


Fig.1 乱流計測室

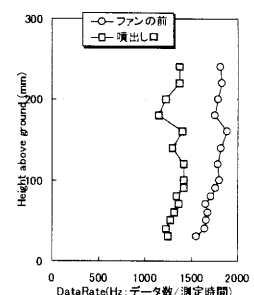


Fig.2 煙粒子の影響

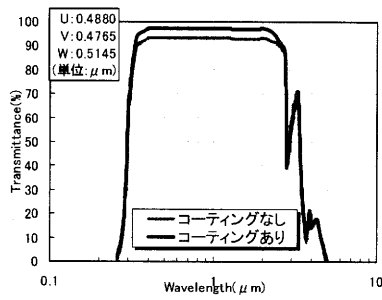


Fig.3 テンボックスガラスの透過率

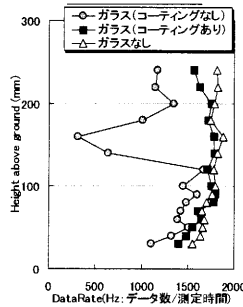


Fig.4 ガラスの影響

4. 乱流境界層の Simulation

4.1 3D-LDA と X 型 HWA との比較検討

データの取得に関し、HWA では、サンプリング時間 $\Delta t = 1\text{ms}$ 、データ数 $n = 8192$ とし、LDA では、サンプリング時間が一定でないため、約 11 秒間のデータを取得し、線形補間により HWA と同じ条件で等間隔にてリサンプルした。

風洞シミュレーションに対する結果は、Fig.5 に主流方向の平均風速比 U (U/U_{240}) の鉛直分布を、Fig.6 に乱れ強さ (u/U , v/U , w/U) の鉛直分布を、そして Fig.7 に乱れのスケール (L_x) の鉛直分布を示し、合わせて、J.Counihan³⁾の結果と比較した。

図より、べき指数 α は HWA、LDA 共に 0.27 にほぼ一致しているが、乱れ強さは LDA の値は v, w で多少大きく生じた。又、乱れのスケールは、LDA、HWA 共にほぼ同一の値を示したが、上層部では、丸田²⁾や J.Counihan よりも低下した。Fig.8 と Fig.9 にそれぞれ HWA と LDA による測定点 $Z = 100\text{mm}$ での変動風速の 3 成分パワースペクトルを示した。LDA、HWA 共に u 成分は、Karman Spectrum にほぼ一致したが、乱れ強さ同様に v, w 成分では、若干の相違が見られた。Fig.10 は、リサンプル以前の LDA のスペクトルを表しており、3 成分共に arising が大きかった。LDA と HWA では、 v, w 成分での変動成分に相違が見られた。溝田⁴⁾は、X 型 HWA は、センサーに対する流入角度が $\pm 45^\circ$ の範囲であれば、 x, y 成分を検出することができる」と述べており、裏を返せばその範囲外では、 v, w 成分を全て捉えきれないことを意味すると考えられ、それが相違の要因とも考えられる。

4.2 床と天井に再現した乱流境界層の比較検討

本研究の目的である Cube 周辺流れの計測において、トラバースの制約が生じたため、風洞床で作られる乱流境界層を鏡像的に再現する必要となり、天井にラフネス・スパイヤーを設置し、境界層を作成した。Fig.11 は、その時の状況を示している。

Fig.12 に平均風速比 (U/U_{240}) を、Fig.13 に乱れ強さ (u/U , v/U , w/U) を、Fig.14 に乱れのスケール (L_x) の鉛直分布を、そして Fig.15 に測定点 $Z = 100\text{mm}$ のパワースペクトルを示した。結果は、床上と天井の結果がほぼ一致し、天井部における計測に支障は生じないことが判断できた。

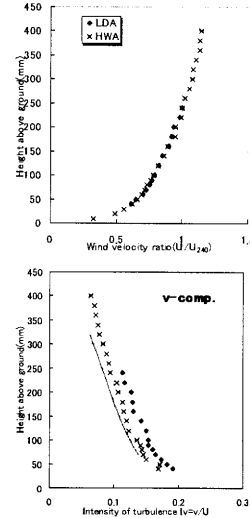


Fig.5 平均風速比の鉛直分布

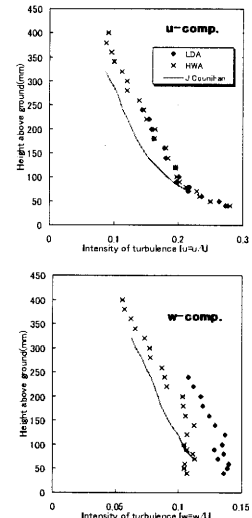


Fig.6 乱れ強さの鉛直分布

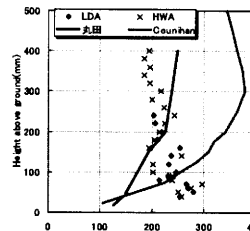


Fig.7 乱れのスケール

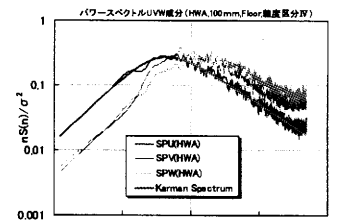


Fig.8 パワースペクトル (HWA)

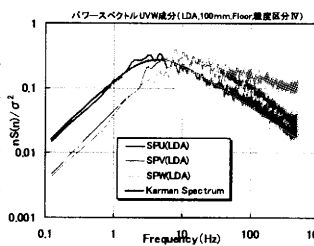


Fig.9 パワースペクトル (LDA)

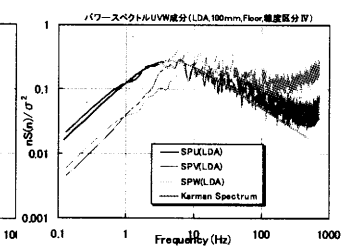


Fig.10 リサンプルなし

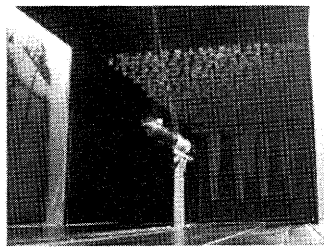


Fig.11 天井部における計測状況

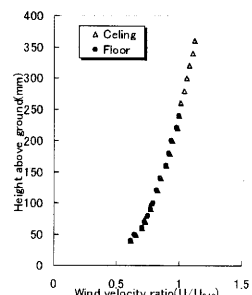


Fig.12 平均風速比の鉛直分布

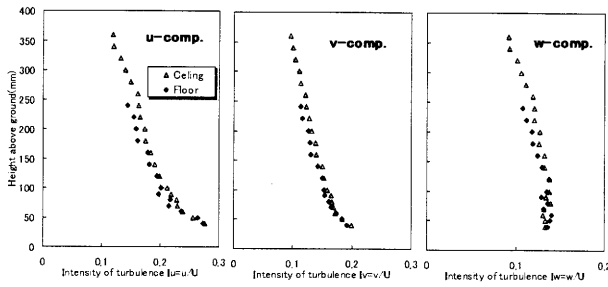


Fig.13 乱れ強さの鉛直分布

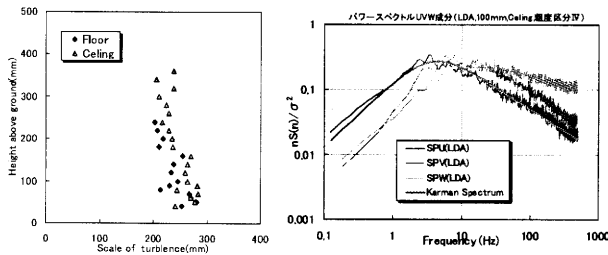


Fig.14 乱れのスケール Fig.15 パワースペクトル (Ceiling)

5. Cube 周りの気流性状について

これまで検討してきた 3D-LDA を用いて、Cube 周りの 3 次元気流性状について調べた。

5.1 実験方法

模型は、一辺が 100mm の Cube (アクリル製) である。風向は、 0° と 45° とし、計測点は、 $\theta=0^\circ$ が 6716 点、 $\theta=45^\circ$ が 6742 点とした。Fig.16 に計測点座標を示す。模型屋根近傍 (10mm) の計測では、模型表面のレーザーの乱反射による影響により、data rate が急激に減少し、計測が不可能となることから、黒のスウェードを模型屋根面に貼ることで、乱反射の影響を軽減し data rate を向上させた。データの取得は、約 20 秒間のデータを取得し、サンプリング時間 $\Delta t=1.2\text{ms}$ でデータ数 $n=16384$ で等間隔にてリサンプルした。

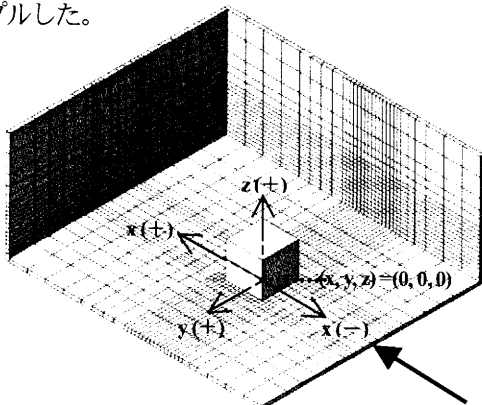


Fig.16 計測点座標

5.2 実験結果

実験結果は、各計測点の x,y,z 成分について平均風速、標準偏差、及び変動パワースペクトルを求め、2D-LDA との比較、I 型 HWA の分布との相違について検討した。

5.2.1 Cube 周辺の流れについて

Fig.17 と Fig.18 は、 $\theta=0^\circ$ における屋根近傍及び側面近傍における流れを 3 次元ベクトル図で示したものである。Fig.19 は、3 次元ベクトルを模型中心 ($y=0$) における $x-z$ 平面について表示したものである。図より、3D-LDA を用いることにより、側面、屋根面における剥離、側面における下降流、模型前の縦渦、模型背後での循環を伴う後流域など、代表的な建物周辺流れの現象を捉える事ができた。 $\theta=45^\circ$ においても同様の現象を捉えることが出来た。

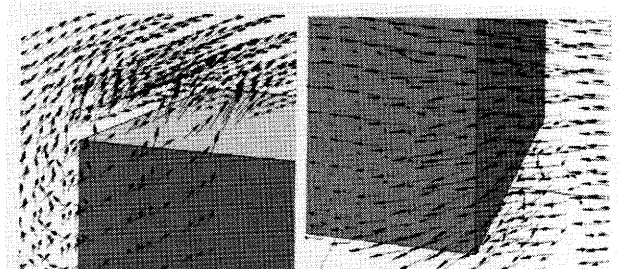


Fig.17 屋根近傍の流れ

Fig.18 側面近傍の流れ

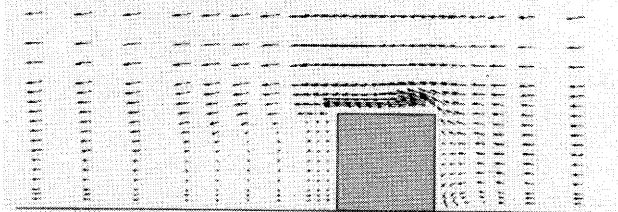
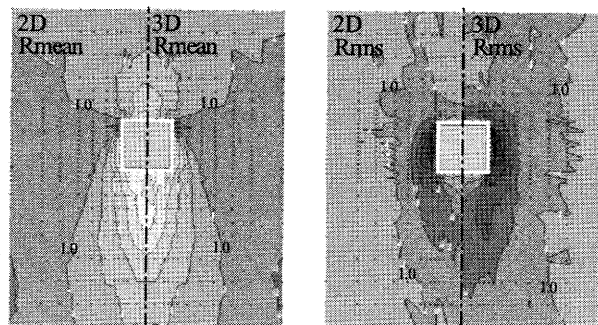


Fig.19 3次元ベクトルの $x-z$ 平面表示 (模型中心: $y=0$)

5.2.2 3D-LDA と 2D-LDA の比較

Fig.20 は、3D-LDA 及び 2D-LDA による、高さ比 $Z/H=0.2$ (Z : 計測高さ, H : 模型高さ) における風速及び変動増減分布図を示したものである。図より、3D-LDA での風速及び変動増加領域が 2D-LDA のそれと比べ大きいものであった。



$\left[\begin{array}{l} V_{ref} = 4.015\text{m/s} \\ rms_{ref} = 1.338\text{m/s} \end{array} \right]$
 $\left[\begin{array}{l} R_{mean}, R_{rms} \text{ は、同じレベル} \\ \text{の Profile との比較} \end{array} \right]$

5.2.3 3D-Vector 分布と I 型 HWA の分布の相違

Fig.21 は、一例として $\theta=0^\circ$ 及び 45° における高さ比 $Z/H=0.1$ の風速及び変動増減分布図を示し、合わせて Fig.22 に示す I 型 HWA の分布⁵⁾と比較した。

図より、 $\theta = 0^\circ$ 45° 共に、側面での剥離による風速増加及び剥離せん断層での乱れの増大が確認できた。I型HWAの分布との比較では、I型HWAでは、捉えきれないy,z成分の大きい個所で3D-LDAの計測値が大きくなる。

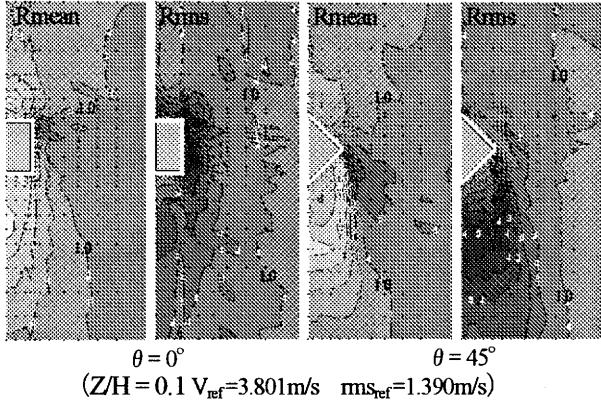


Fig.21 風速及び変動増減分布図

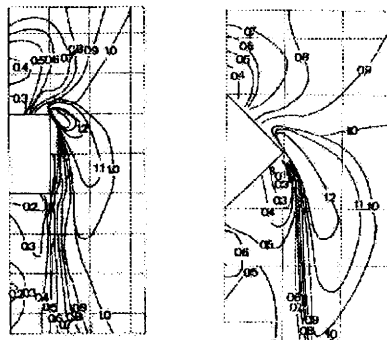


Fig.22 I型HWAの分布⁹⁾ (Z/H=0.1)

5.2.4 パワースペクトル

パワースペクトルは、代表的に Fig.23 に示す、(a) $\theta = 0^\circ$ における建物前方の縦渦、(b)建物側面の下降流、(c)建物背後の後流域、及び(d) $\theta = 45^\circ$ における建物屋根の円錐渦の4点に対して求め、Fig.24~Fig.27に示した。

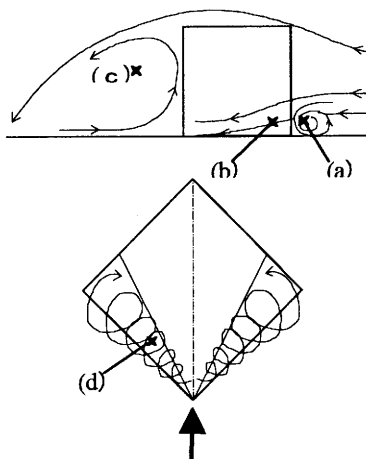


Fig.23 スペクトル評価ポイント

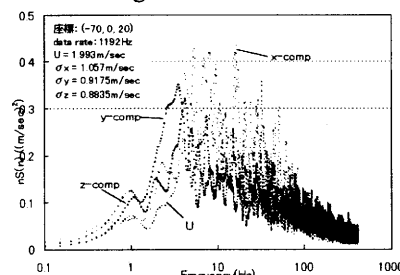


Fig.24 (a)点の変動パワースペクトル

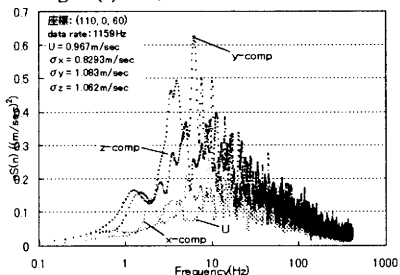


Fig.26 (c)点の変動パワースペクトル

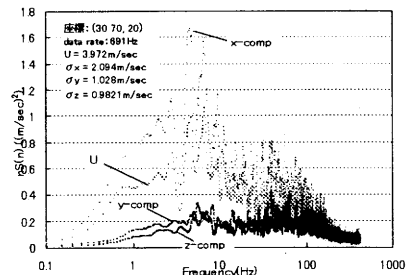


Fig.25 (b)点の変動パワースペクトル

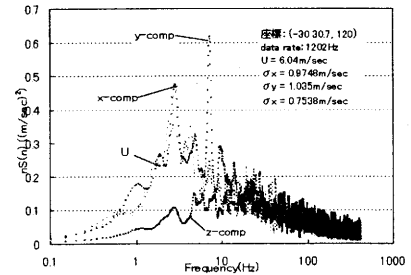


Fig.27 (d)点の変動パワースペクトル

(a)点では、4Hz付近でy,z成分のスペクトルピークが見られ、縦渦の周期を示した。(b)点では、剥離せん断層・下降流による流れの圧縮によりy,z成分は減少し、逆にx成分で大きくなったことを示した。(c)点では、後流域における渦の形成によりy,z成分は増大し、逆にx成分で小さくなったことを示した。(d)点では、y成分において7.3Hzにスペクトルピークが形成され、参照データが十分ではないが、円錐渦の周期ではないかと推測された。

6. まとめ

1. 「レーザーの出力」「トレーサーの濃度の確保」「計測ガラスのレーザー透過率」の3項目について検討した結果、改善方法により、data rateが飛躍的に向上した。
2. LDAとHWAとの比較を行った結果、u成分では、ほぼ同一の値を示したが、v,w成分での変動に相違が見られた。
3. 天井に再現した乱流境界層は、床上と差はなく、乱流計測が可能となった。
4. 3D-LDAを用い、計測器自体の影響を受けずにCube周辺流れについて3次元乱流計測を行い、これまで捉える事ができなかった建物周辺の変動性について明らかにすることが出来た。

参考文献

- 1) 日本建築学会編、建築物荷重指針・同解説 (1993)
- 2) 丸田、亀井：建築物周辺気流に関する風洞実験方法 (第III報大気乱流境界層のSimulation) 生産工学部報告 第14巻第1号 (1981)、89-107
- 3) J. Counihan: The Structure and the Wind Tunnel Simulation of Rural and Urban Adiabatic Boundary Layers, Symposium on External Flow, University of Bristol, 4 to 6 (1972)
- 4) 溝田：風速計の種類と特徴、熱線・熱膜風速計 日本風工学会誌特集 (1990) 76-87
- 5) 丸田：高層建築物周辺に生ずる強風領域に関する研究 学位論文 (1984)