

プロジェクト 3

LDAによる3次元乱流計測と境界層のSimulation検討

丸田 榮藏 (建築工学科)

1. はじめに

現在、風洞実験の流体計測手法として、主に熱線風速計 (HWA : Hot Wire Anemometer) が実用されている。しかし、熱線プローブの影響により正確な計測は困難とされてきた。近年、新しい流体計測手法として、非接触・非校正であり、物理的条件 (温度、圧力など) に比較的の影響を受けずに計測できるという特徴を持つ、レーザードップラー風速計 (LDA : Laser Doppler Anemometer) が注目されている。本研究は、3D-LDA の計測手法の確立 (図 1) 及びハイテクリサーチセンター (以下、HRC) の簡易風洞で再現される境界層の乱流特性に対するシミュレーションについて、LDA と HWA による計測結果を比較検討することにより、LDA の計測精度について検討を行うものである。写真 1 に HRC 乱流計測室の状況を示した。

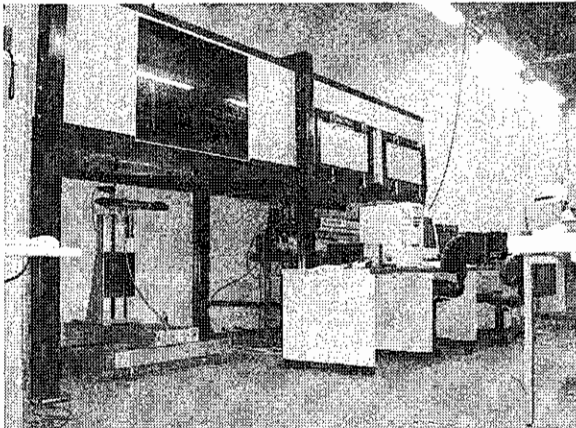


写真 1 HRC 乱流計測室

2. 3次元 LDA 計測方法の改善

前年度より行っている 3D-LDA 計測に対し、以下の 3 つに項目について検討した。

- (1) レーザーを空冷式から水冷式に換えることによる影響
- (2) 風洞風路内における煙粒子充填の方法
- (3) 計測ガラスをアルゴンレーザー用テンパックスガラスに換えることによる影響

2.1 レーザーの変更による影響

空冷式レーザー (0.4W) 使用時における Data Rate は、1Hz~20Hz 程度であった。この計測レベルでは、風洞内の風速変動を評価することはできなかった。そこでレーザーを水冷式 (4W) に換え、出力を上げた状況で実験を試みた。その結果、Data Rate が 1kHz~2kHz に飛躍的な向上を示した。レーザーの詳細については、表 1 に示したとおりである。

表 1 レーザーの詳細

メーカー	方式	名称	最大出力(W)
Spectra-Physics	空冷式	MODEL 177-02	0.4
	水冷式	MODEL 2016-04	4

2.2 煙粒子充填度の影響について

ここでは、煙粒子がデータレートに及ぼす影響について検討する。(煙発生装置は、Dantec 社製フォグジェネレーター 2001、フォグ液は、専用リキッドを使用した。) 以下の図 2 に示す 2 箇所に煙発生装置を設置し、①煙排出時間 1 分間、②計測ガラスを除去の状態、同様の条件下で実験を試みた。その結果、図 3 に示した Data Rate でも通り、ファンの前に設置の方が、風洞内の煙粒子充填ぐあいが良好ということが分かった。これは、風路を通らずに直接ファンに吸い込まれていくため、煙粒子の発散を最小限に抑えることが出来ることが要因であろうと推測される。

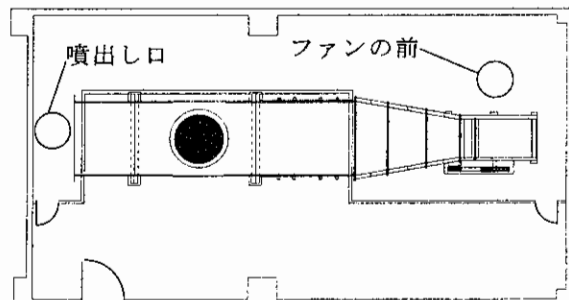


図 2 煙発生装置配置図

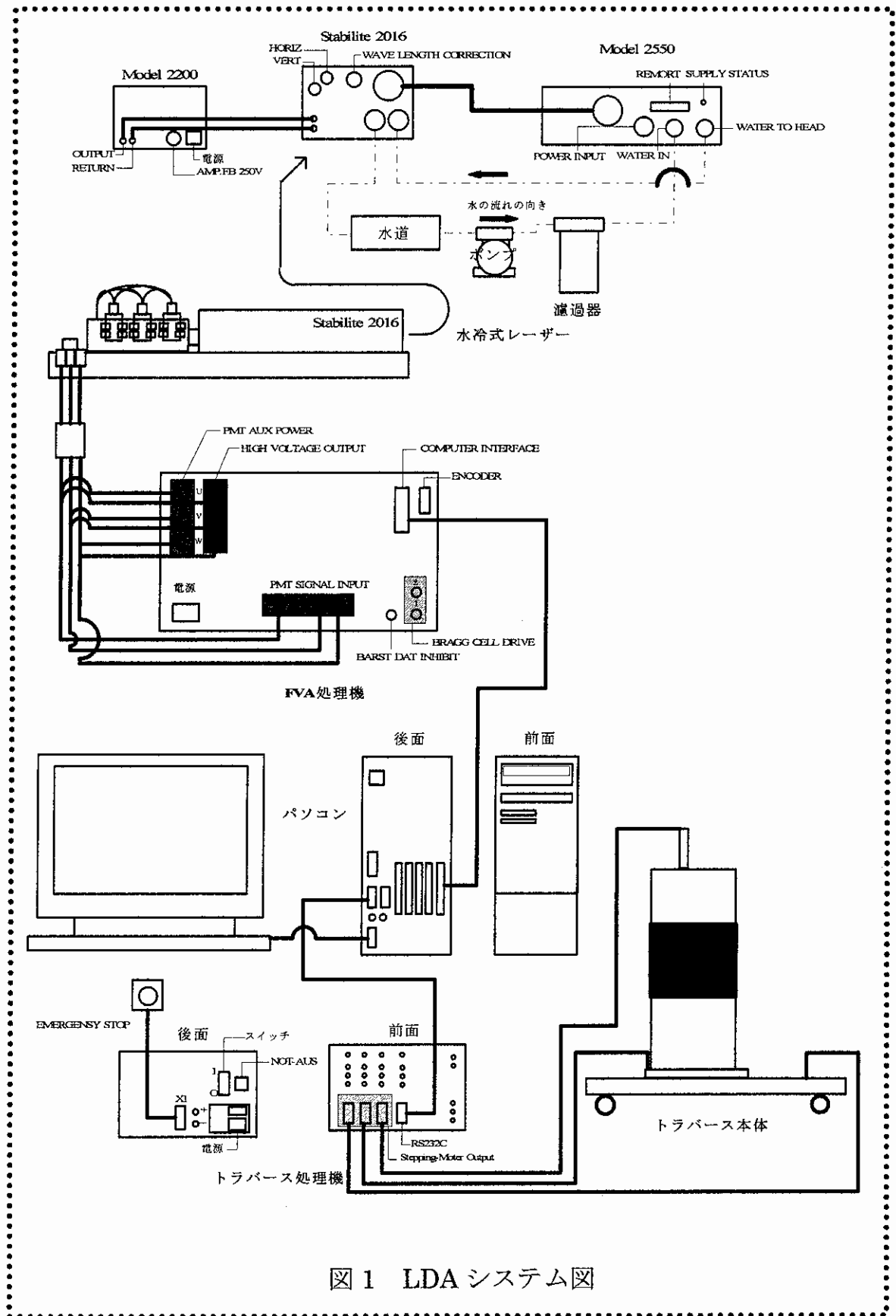


図1 LDA システム図

2.3 アルゴンレーザー用テンパックスガラスへの変更

本実験では、計測ガラスを通しての実験となる。昨年度使用した10mm厚の強化ガラスでは、

- ・ ガラスの屈折によりレーザーの焦点が大幅にずれてしまう
- ・ レーザーの透過率が低い

という致命的な欠点があった。このため3次元乱流計測において、Data Rateが極度に低下し、まったく計測不可能となっていた。そこで、計測ガラスをアルゴンレーザー用テンパックスガラスに換えて実験を試みた。アルゴンレーザー用テンパックスガラスの詳細については、図5より、LDAで使用しているアルゴンレーザーの波長(表2参照)におけるガラスの透過率は、約93%である。その結果、Data Rateは、以下の図4のようになった。図から、アルゴンレーザー用テンパックスガラスを通した場合は、ガラスを通さない場合と比べても、ほとんど遜色のない高レベルでの計測が可能となった。しかし、測定高さ(Z)が140mm~220mmにかけてレーザ

表2 レーザーの波長

成分	波長(μm)
U	0.4880
V	0.4765
W	0.5145

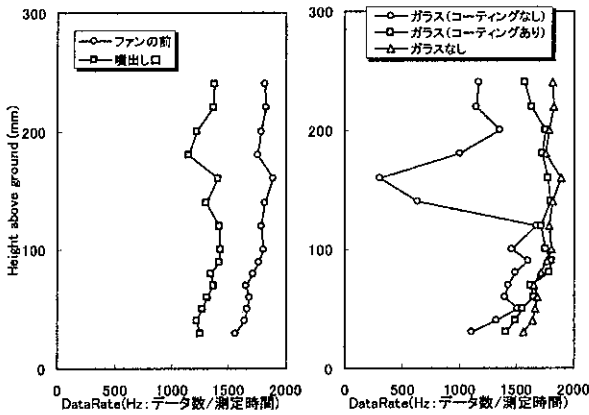


図3 煙粒子の影響

図4 ガラスの影響

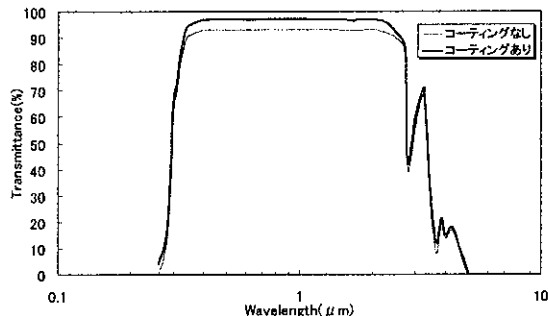


図5 アルゴンレーザー用ガラスの特性

ーの反射の影響により、Data Rateが大幅に減少した。そこで、この点を改善するために、アルゴンレーザー用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。その結果、図5より、レーザーの透過率が約97%となり、図4からも、反射の影響は改善されたといえる。

上記の改善法により、良好な状態で3D-LDAの計測が可能であることが見出された。

3. 乱流境界層の2D-HWAと3D-LDAの比較検討

昨年度の報告で示したHRCの風洞において再現した乱流境界層に対して、3D-LDAとX型熱線風速計(HWA)を用いてu, v, w成分の平均風速と乱れ強さ及びレイノルズ応力の計測を行い、LDAとHWAについて比較検討した。

本研究で使用したHRCの風洞は、風路断面1.0m×0.8m、Fetch 3.5mの乱流境界層形成を可能としたもので、全長8.53mのエッフェルタイプであるが煙を漏らさないために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とした。測定部のガラスは、多層膜反射コーティングを施した厚み1mmのアルゴンレーザー用ガラスとした。風洞送風機は、容量14m³のシロッコファンとした。写真2が3D-LDAの計測状況である。

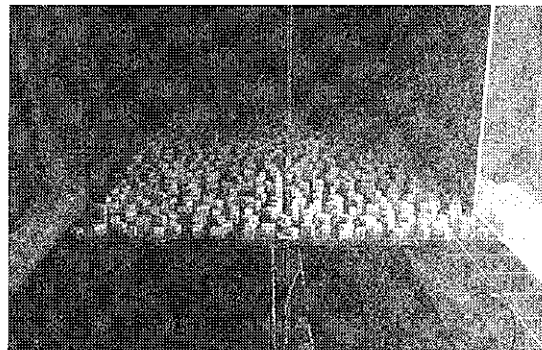


写真2 3D-LDA計測

結果は、主流方向の平均風速比U (Wind Profile)、レイノルズ応力 $-\rho uv/U_{240}^2, -\rho vw/U_{240}^2$ 、各成分の乱れの強さ $u/U, v/U, w/U$ 、乱れのスケール L_x (主流方向)、ならびにu, v, w3成分の変動風速パワースペクトル $S_u(n), S_v(n), S_w(n)$ を求め、LDAとHWについて比較検討した。

乱流境界層は、ラフネスブロックとスパイヤーを用い、日本建築学会荷重指針¹⁾に規定される地表粗度区分IV (指数 $\alpha=0.27$ の指数分布式)に相当する風を目標として再現された。なお、ラフネスブロックは、丸田の方法²⁾に従い、ラフネスの体積密度と面積密度を考慮しランダムに配置した。実験条件は、HWがデータ数 $n=8192$ 、

サンプリングタイム $\Delta t=1\text{msec}$ とし、LDAのデータ取得はランダムであるので、実験データ数 $n=16384$ とし、線形補間によりデータ数 $n=8192$ 、サンプリングタイム $\Delta t=1\text{msec}$ という等間隔のデータにリサンプルしたものである。なお、リサンプルの信頼性について後述する。

風洞気流のシミュレーションに対する結果は、主流方向の平均風速比 U の鉛直分布を図6、 uv, uw 成分に対するレイノルズ応力の鉛直分布を図7、各成分の乱れの強さの鉛直分布を図8、乱れのスケールの鉛直分布を図9、そして変動風速スペクトルを図10に示した。乱れのスケールは、主流 u 成分についてのみ、Taylorの仮設($L_x=t \times U$; $t = \int C(\tau) d\tau$)により解析し、実寸表示としている。(縮尺: 1/500)

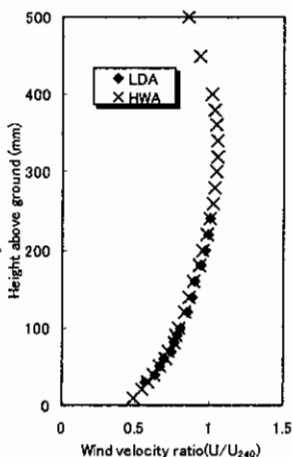


図6 鉛直速度分布

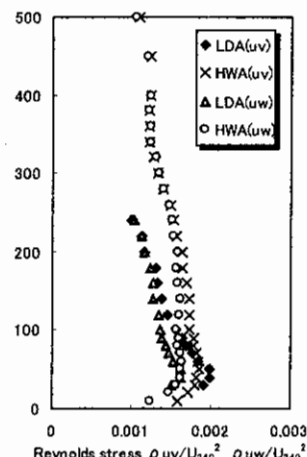


図7 レイノルズ応力分布

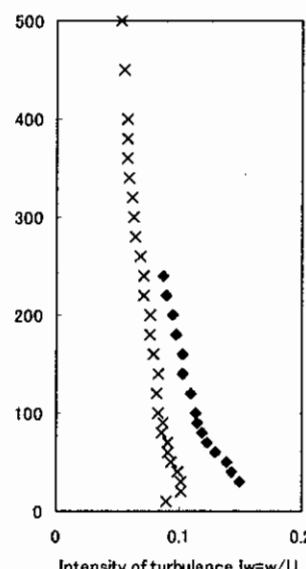
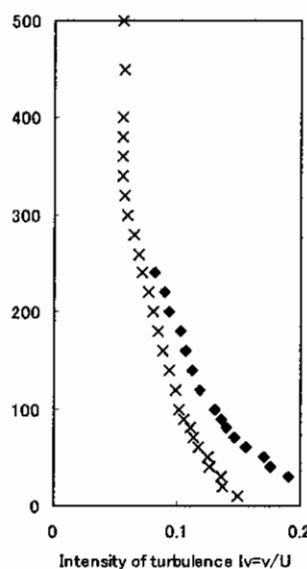
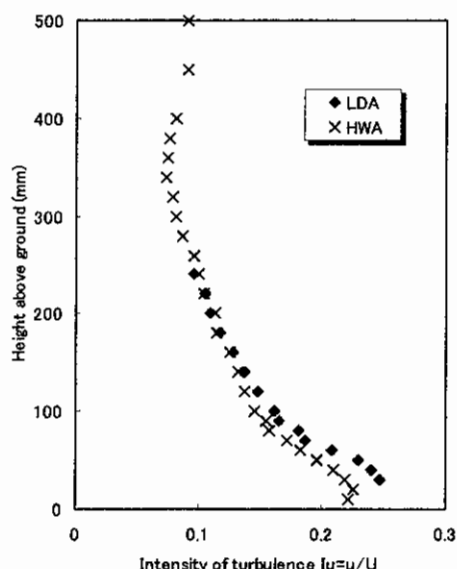


図8 乱れ強さの鉛直分布

図6より、べき指数 α を求めると、HWAが0.258、LDAが0.262となった。よって、 u 成分の鉛直速度分布は、ほぼ近似したといえる。

レイノルズ応力は、低層部において近似しているが、測定高さが上がるにつれてズレが大きくなっている。

乱れ強さは、 u 成分は、ほぼ近似しているが、 v, w 成分でズレが生じている。特に低層部においてズレが大きくなっている。

乱れのスケールは、LDA、HWA共に同じ値であるが、指針値は、高さ100m以上で大きくなっている。

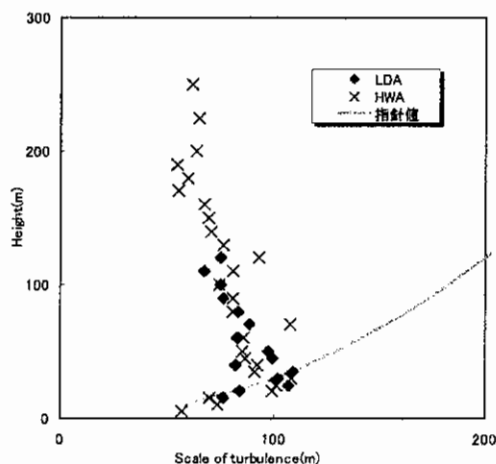


図9 乱れのスケール

変動風速の3成分パワースペクトルは、測定高さ $Z=100\text{mm}$ に統一して解析した。図 10-2 は、比較として LDA のデータをリサンプルせずに、解析を行ったもので、高周波域で3成分共に arising が生じている。それに対し図 10-3 は、リサンプル後の解析で、高周波域に至っても滑らかに散逸している。このことから、リサンプリング手法としての線形補間の信頼性は高いといえる。LDA と HWA の比較については、 u 成分のパワースペクトル $S_u(n)$ は、LDA、HWA 共にカルマンスペクトルとほぼ一致した。HWA は、LDA と比べ高周波域で arising が生じている。このことから、LDA による計測状況が良好であるといえる。

4. 天井に再現した乱流境界層シミュレーションの検討

LDA プロブを風洞床下に設置した状態で計測した場合は、レーザーの焦点距離が 300mm であるため、床面から 240mm までが計測範囲の限界であり、アルゴンレーザー用パンテックスガラスでなければ、良好な状態で計測できない。例えば、角柱模型周辺の流れを計測するためには、アルゴンレーザー用パンテックスガラスで模型を作成しなければならない。すなわち、計測、コストの点から見ても、不都合である。そこで、天井から乱流境界層を作成することが出来れば、この諸問題は解決できると考えた。

写真 3 が、天井にラフネスを設置した場合における 3D-LDA の計測状況である。

天井からの乱流境界層シミュレーションについて検討するために、前項の床上の、乱流境界層のデータと比較した。結果は、LDA 計測における天井と床について比較検討をすると共に、天井のデータについては、Counihan³⁾の値と比較した。

主流方向の平均風速比 U の鉛直分布を図 11、 uv, uw 成分に対するレイノルズ応力の鉛直分布を図 12、各3成分の乱れの強さに関する Counihan との比較を図 13、乱れのスケールの鉛直分布を図 14、そして変動風速スペクトルを図 15 に示した。

図 11 より、べき指数 α を求めると、天井が 0.255 、床が 0.262 となった。よって、 u 成分の鉛直速度分布は、ほぼ近似したといえる。

レイノルズ応力は、低層部において近似しているが、測定高さが上がるにつれてズレが大き

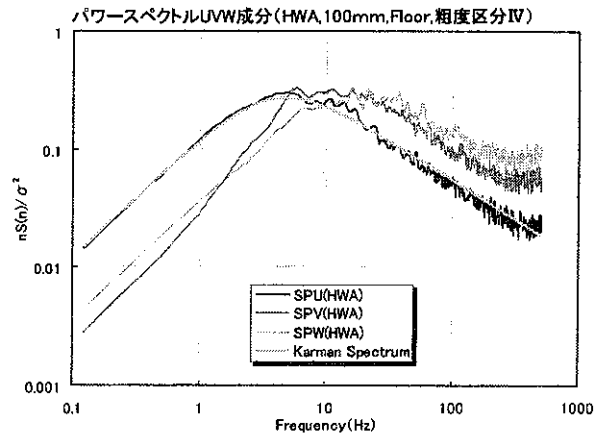


図 10-1 変動風速パワースペクトル(HWA)

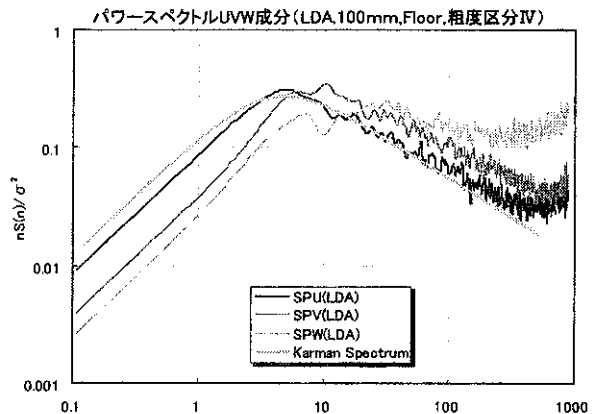


図 10-2 変動風速パワースペクトル (リサンプルなし)

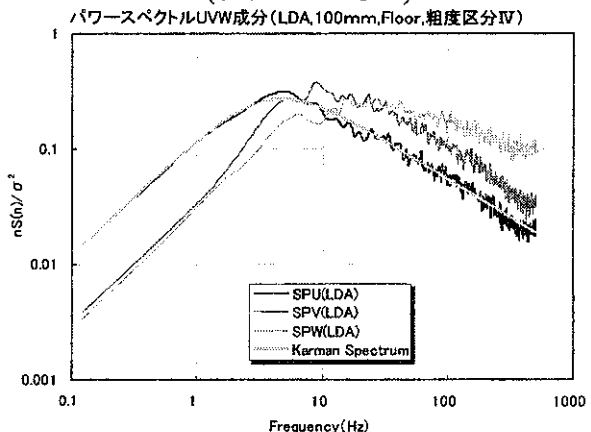


図 10-3 変動風速パワースペクトル(LDA)

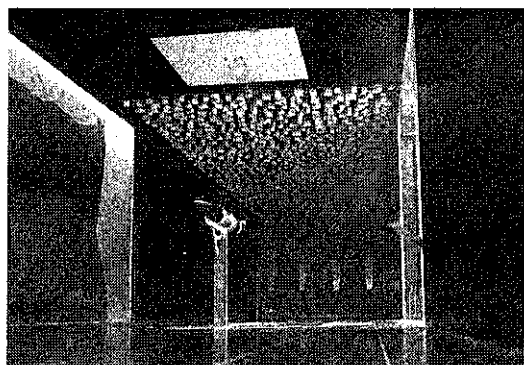


写真 3 3-DLDA 計測 (天井)

くなっている。

乱れ強さは、天井と床の比較に関しては、 u, v, w 成分共に低層部は、ほぼ近似しているが、測定高さが上がるにつれて若干のずれが生じている。Counihan との比較に関しては、 u 成分は低層域で近似している。3成分とも測定高さが大きくなるにつれて、ズレの幅が大きくなっている。

乱れのスケールは、天井・床共に近似した。変動風速の3成分パワースペクトルは、測定高さ $Z=100\text{mm}$ について解析したものである。 U 成分のパワースペクトル $S_u(n)$ は、カルマンスペクトルとほぼ一致した。3成分共に床面とほぼ一致した。

以上のことから、天井からのほぼ良好な状態で計測できたことが関係していると推測される。

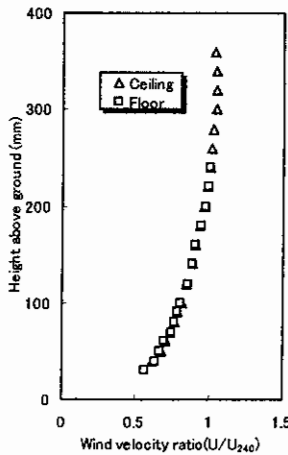


図 11 鉛直速度分布

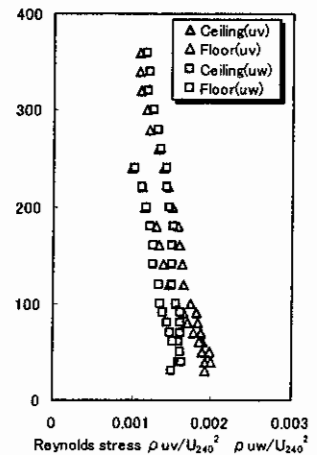


図 12 レイノルズ応力分布

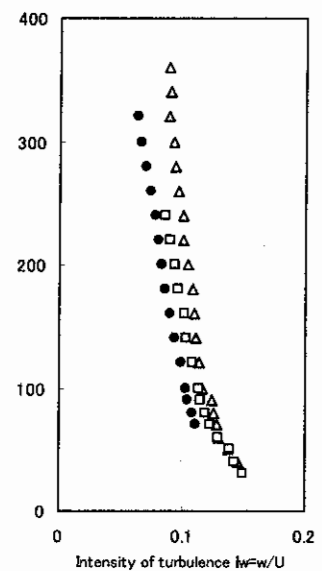
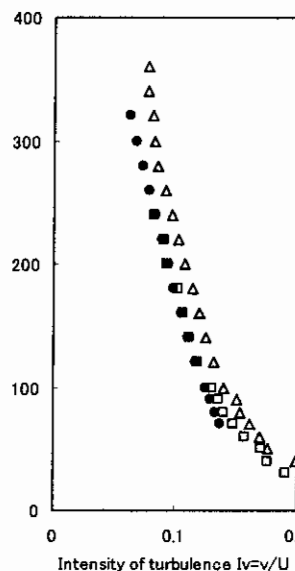
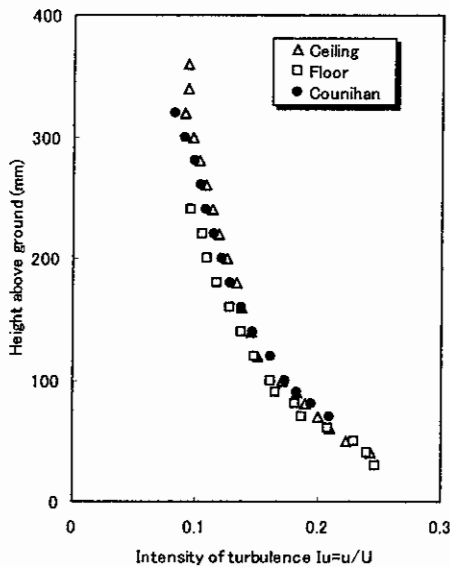


図 13 乱れ強さに関する Counihan との比較

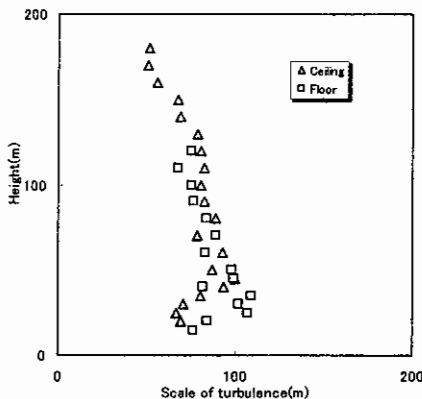


図 14 乱れのスケール

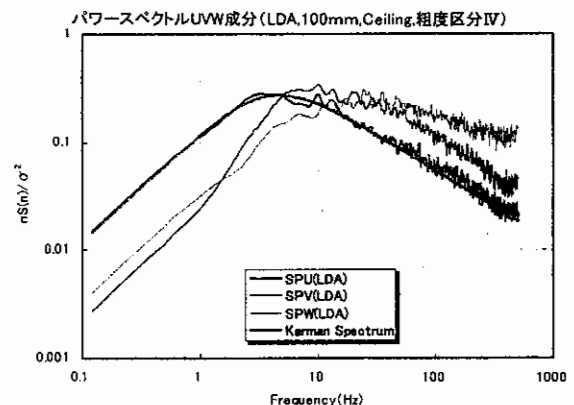


図 15 変動風速のパワースペクトル (天井)

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 (第三報 大気乱流境界層の Simulation) 生産工学部報告、1981年6月、第14巻第1号、pp.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 July 1972