

精密模型を用いた室内気流測定 - 流れの Reynolds 数依存性の検討

正会員 ○大川 泉^{*1} 正会員 加藤信介^{*2}

同 村上周三^{*3} 同 伊藤一秀^{*4}

1. 序

前報^{1,2,3,4)}までに、局所領域の濃度分布の構造を評価する指標として Visitation Frequency(VF)を、局所領域換気性状を評価する指標として Purging Flow Rate(以降 PFR)を導入し、その概念・解析手法・解析例を示すと共に詳細な VF、PFR の統計的性状の解析には Large Eddy Simulation (以降 LES)による Particle Tracing が有効であることを述べた。

一般に換気される室内は極端に換気回数の多い場合を除き、換気量の減少に伴い室内の気流性状が変化する現象が観察される。これは一般に室内の温度差等による浮力の影響の程度が換気回数の減少に伴い顕著になる例が多いと思われるが、流れ場に対する Reynolds 数依存性も無視できないものと思われる。

本報では LES 等の数値解析の検証用データとなり得て、更に実験的 PFR 解析の基礎となる精密な室内気流実験について流れ場の Reynolds 数依存性を検討するため、特に吹出風速を 3m/s から 1m/s に変化させた場合の平均風速、風速変動成分の測定結果を報告する。

2. 実験概要

2-1. 模型概要(図 1) 模型は一般的居室をモデル化したもので 1.5m(x) × 0.3m(y) × 1.0m(z)。測定はこの cavity で行い、working cavity と称する。この cavity を熱的に保護するため両脇に同形状(y 方向のみ 0.2m)の guard cavity を設けている。模型空間の下部半分領域 (z<0.5m) を居住域と仮定する。詳細は既報^{1,2,3)}参照。

2-2. 風速測定 2次元 LDV(Laser Doppler Velocimetry) システムを用いて平均風速、及び各種乱流統計量を測定している^{注1)}。

2-3. 測定ケース(図 2) 前報^{1,2,3)}までに、吹出風速 3m/s において吹出・吸入口位置、障害物、温度差の各パラメータを変化させたケースを設定した。本報では吹出風速 1m/s において、等温で吹出・吸入口位置を変化させて 3 ケース(case11 ~ case13)設定した。(吹出風速 3m/s の場合、吹出口 Re=4200 1m/s の場合、Re=1400 である。)

2-4. 実験条件 等温実験において吹出温度、模型内は 25℃ 一定に制御している。模型内表面温度はアルミ製通水パネルに温度制御されたブラインを供給することにより制御する。吹出空気温度・模型内表面温度のばらつきは最大でも 1℃以内であった。

3. 実験結果・考察

3-1. 流れの 2次元性の検討(図 3) 吹出風速 1m/s において、case11 の X=750mm における天井 50mm 及び床上 50mm の U 成分の Y 方向風速分布を示す。吹出口に近い天井下

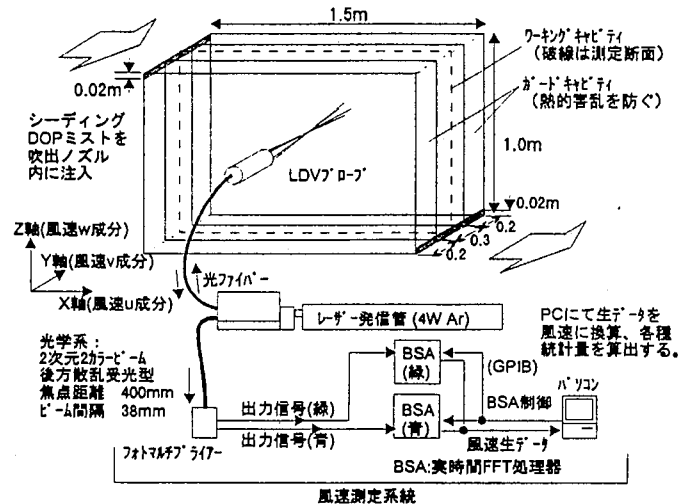
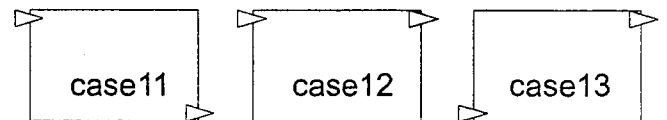


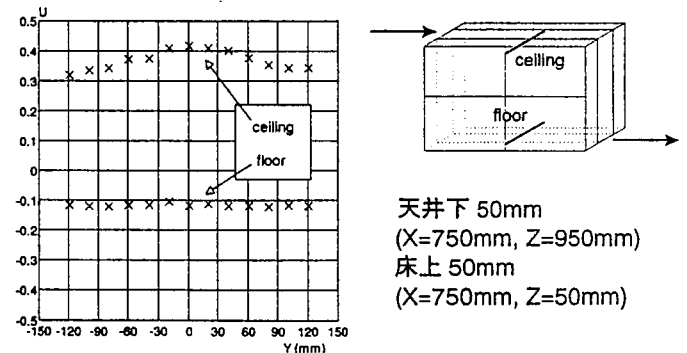
図 1 居室模型の構成と LDV システム



吹出風速 3m/s の場合 :Re=4200、1m/s の場合 :Re=1400

吹出温度・模型内壁面温度は等温(25℃)一定に制御

図 2 測定ケース



風速は吹出風速(1m/s)で基準化、横軸 Y=0 は working cavity 中心、Y=±150 は guard cavity との境界面

図 3 U 成分の Y 方向風速分布

50mm の位置では若干風速が Y 方向中心位置で大きくなる凸型の風速分布を示すが、同測線上における平均風速に対するばらつきは±10%以内におさまり、ほぼ 2次元性的であると見なせる。また床上 50mm の位置ではほぼ完全な 2次元性的風速分布が得られた^{注2)}。紙面の都合で図は割愛するが、左右両壁面近傍においても十分な 2次元性的風速分布が得られている。吹出風速 3m/s における流れの 2次元性に関しては既報¹⁾参照。

3-2. 室中央断面風速分布(図 4) 吹出風速 1m/s において、天井面に沿って吹出口、吹出口対向壁床面に沿って吸込口を設置した case11、及び吹出口対向壁天井面に沿って吸込口を設置した case12 では、両ケースとも右回りの大きな循環が観察され、cavity 隅角部では大きな循環とは逆向きの 2 次渦が観察される(図 4-1、4-2)。等温で Displacement Ventilation 型のケース case13 では床面に沿った水平吹出であり、吹出噴流に誘引された左回りの大きな循環が観察される。cavity 隅角部では大きな循環とは逆向きの 2 次渦が観察される。また case13 は Z=500mm のラインで case11 と線対称となるように吹出・吸込口位置を設定している。即ち case13 を Z=500mm のラインで線対称とした風速分布は case11 の風速分布と一致するはずである。図 4-1 及び 4-3 より、case13 の平均風速ベクトル図を線対称としたケースは case11 と全体的傾向は一致している。

図 4-4 に吹出風速 1m/s における各ケースの平均風速(U, W) 分布を示す。吸込口位置の違う case11 と case12 は壁面近傍及び室中央部の全ての領域で同様の分布を示している。また吹出口を床面に沿って設置した case13 では吹出噴流が直接到達する床面での風速が大きく、case11 の風速分布を Z=500mm のラインで線対称とした風速分布図と良く合っているが、case13 では吹出噴流の大きさが case11 に比べて若干小さく、より拡散的な流れとなっている。この差異は模型上部の濃度測定用スリット及び working cavity と guard cavity 間のガラス面における気密性、更には吹出噴流に若干の 3 次元性があることなどが原因と考えられるが、本測定では風速測定位置の微妙な差によって最大±10%の測定誤差が生じる可能性があり、その範囲内で両者は対応するものと考えられる。

3-3. 流れの Reynolds 数依存性の検討(図 5) 各ケースにおける吹出風速 1m/s と 3m/s の場合の X=750mm ライン、及び Z=500mm ラインの室中央断面平均風速分布を示す。天井に沿って吹出口、吹出口対向壁床面に沿って吸込口を設置した case11 では吹出風速 1m/s と 3m/s に変化させた場合、天井面近傍で風速分布が異なり、Reynolds 数の違いにより流れ場が変化する傾向が現れた(図 5-1)。室中央部及び左右両壁面の近傍ではほぼ一致した風速分布となった。天井面に沿って吹出口、吹出口対向壁天井面に沿って吸込口を設置した case12、及び床面に沿って吹出口を設置した case13 では吹出気流が case11 に比べ拡散的性状を持つことに対応し、壁面近傍だけでなく空間の全領域で風速分布が異なり、流れ場は Reynolds 数の違いにより変化する傾向を示す。また全てのケースにおいて吹出風速が 1m/s の場合には吹出噴流の減衰が早く、吹出風速が 3m/s の場合に比べ拡散的な流れとなっている。これは吹出風速が 3m/s の場合、吹出噴流の乱れは 1.15%であったのに対し、今回測定した吹出風速 1m/s のケースでは吹出噴流の乱れが 1.78%と吹出風速 3m/s のケースに対し 55%程度乱れが増加していることも原因の 1

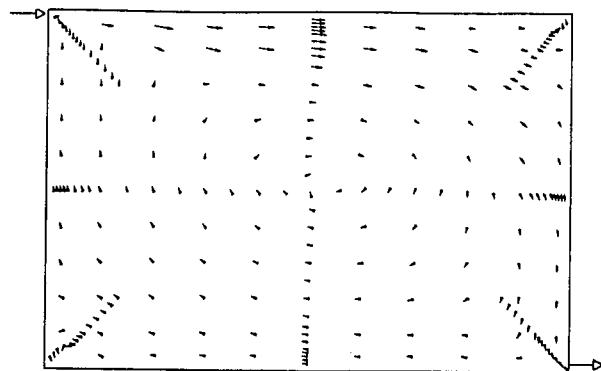


図 4-1 case11

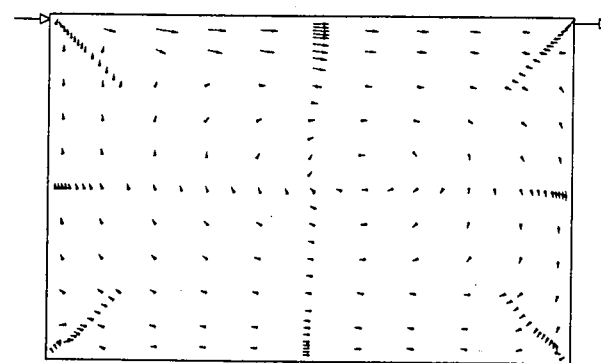


図 4-2 case12

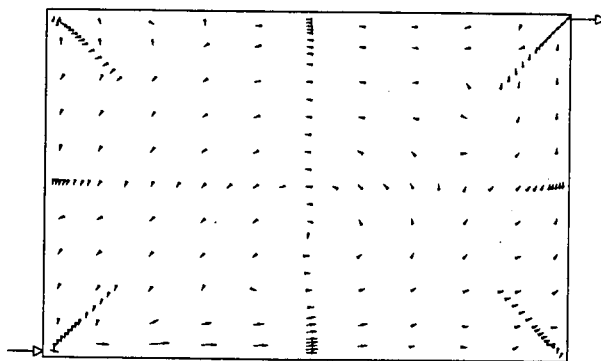
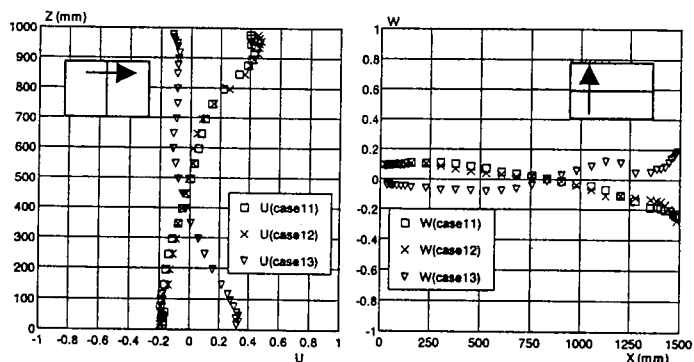


図 4-3 case13



(1) U 成分の Z 方向分布 (2) W 成分の X 方向分布
(X=750, Z=0~1000mm) (X=0~1500, Z=500mm)

図 4-4 各ケースの平均風速分布 (U_{in}=1m/s で基準化)

図 4 室中央断面平均風速分布

つと考えられる。風速を 1m/s とした場合に吹出噴流の乱れが増加した原因として、今回使用した吹出ノズルは整流用に大きな圧力損失により整流効果を期待するメッシュを用いており、風速を小さくした場合には十分な整流効果が得られなかったこと等が考えられる。

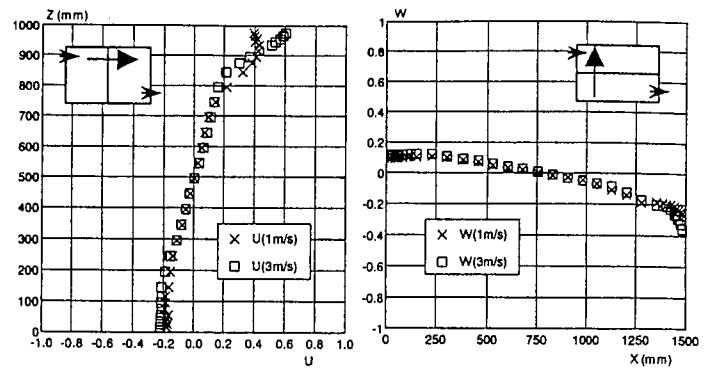
本実験はその再現性を同一条件の実験を繰り返すことにより確認している。Reynolds 数を変化させた場合、室内吹出空気の 2 次元性、乱れ性状を厳密に対応させることが出来ないが、この条件も考慮して今回検討した吹出風速の変化の範囲で流れ場の Reynolds 数による変化が生じるものとして、以後の検討を行う。

3-4. 乱れの分布性状(図 6) 各種乱流統計量(風速変動の r.m.s. $\sqrt{u_i^2}$ Reynolds Stress $u_i u_j$)の分布を示す。吹出風速が 1m/s 及び 3m/s の場合の両者において風速変動成分に関しては $\sqrt{u^2}$ 、 $\sqrt{w^2}$ の値はほぼ同様で、分布性状も吹出噴流の到達域で若干の相違が見られるものの、その他の領域では同様の傾向を示している(図 6-1、6-2、 $\sqrt{w^2}$ に関する図は割愛する)。吹出風速が 1m/s の場合、case11、case12 では吹出噴流の到達域である天井付近で $\sqrt{u^2}$ の値が大きくなっており、吹出風速で無次元化した乱れの強さは 10% 程度である。 $\sqrt{u^2}$ は天井面に近づくにつれ乱れの強さが大きくなっていく性状を示す。また吹出風速が 3m/s の場合、case11 では X=750mm 位置における吹出噴流の到達域において $\sqrt{u^2}$ の最大値が吹出風速の 2% 程度である。本測定では吹出風速を 3m/s から 1m/s に小さくした場合、風速の乱れは約 5 倍程度に大きくなっているが、これは吹出風速 3m/s に比べ 1m/s の場合に吹出噴流の乱れが 55% 程度増加しており、この影響が室全体の流れ性状に大きな影響を及ぼしたものと考えられる。この乱れにより吹出風速が 1m/s の場合には噴流の減衰が早く、拡散的な流れとなっている。

Reynolds Stress に着目すると、吹出風速が 1m/s の場合、分布の傾向は吹出噴流の到達域で値が大きく、その他の領域ではほとんど 0 である(図 6-4、6-4)。最大値はどのケースも $0.004(U_{in}^2)$ で基準化)程度である。

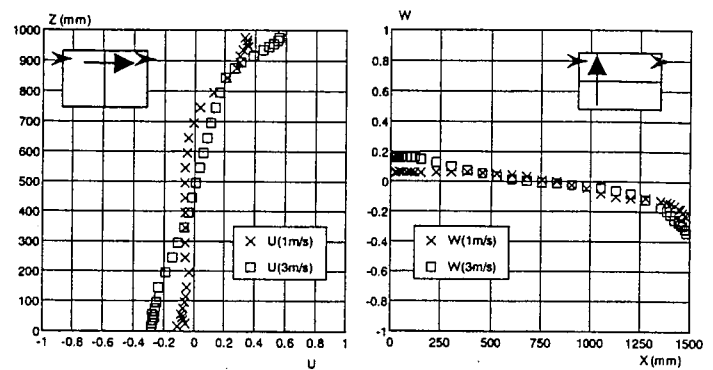
Reynolds Stress の分布は case11 と case13 において Z=500mm のラインに対してほぼ線対称である。また渦動粘性係数 ν_t は風速勾配が明確な領域で見積もりが可能である ($\nu_t = -uw / (\partial U / \partial Z)$)。例えば、吹出風速が 1m/s の場合に、case11 では天井付近で ν_t の最大値が約 $550 \text{ cm}^2/\text{s}$ であり、動粘性係数 ν の 1000 倍のオーダーである注 3)。吹出風速が 3m/s の場合では ν_t の最大値が約 $400 \text{ cm}^2/\text{s}$ であり、オーダーはほぼ同じであるが、吹出風速が 1m/s の場合と比較し若干小さめの値となった。これも吹出風速が 3m/s の場合に比べ、1m/s の場合に吹出噴流の乱れが増加したことが原因の 1 つと考えられる。

4. 結論



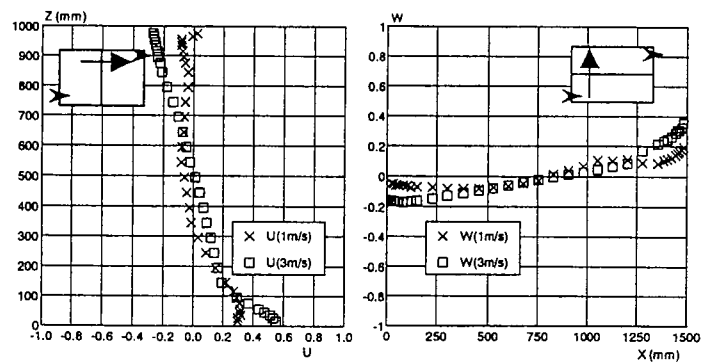
(1) U 成分の Z 方向分布 (2) W 成分の X 方向分布

図 5-1 case11 室中央断面風速分布



(1) U 成分の Z 方向分布 (2) W 成分の X 方向分布

図 5-2 case12 室中央断面風速分布



(1) U 成分の Z 方向分布 (2) W 成分の X 方向分布

(X=750, Z=0~1000mm) (X=0~1500, Z=500mm)

風速は吹出風速(1m/s)で基準化

図 5-3 case13 室中央断面風速分布

図 5 Reynolds 数効果の検討

- (1) LDV を用い吹出風速が 1m/s(Re=1400)の場合と 3m/s の場合(Re=4200)の平均風速・各種乱流統計量を測定した結果、吹出風速を変化させた場合に流れ場は明らかに変化した。しかし吹出気流の乱れ性状、2 次元性の確保を両者で厳密に対応させられていないので、流れ場の変化が純粋に流れ場の Reynolds 数依存性のためか不明である。今後検討したい。
- (2) 吹出風速が 1m/s の場合、どのケースも吹出噴流の到達

域で $\sqrt{u_i^2}$ $u_i u_j$ 共に大きな値となり、それ以外の領域ではほぼ0となった。また吹出風速が3m/sの場合に比べ、1m/sの場合に吹出噴流の乱れが55%程度増加しているために、 $\sqrt{u_i^2}$ の最大値は吹出風速が3m/sの場合に比べ5倍程度大きい結果となる。

(3) 吹出風速が1m/sの場合と3m/sの場合を比較した結果、吹出風速が1m/sの場合には吹出噴流がより乱れているために、吹出噴流の減衰が早く、拡散的な流れとなる。

(4) 本測定では吹出風速を1m/sとした場合、case13を線対称とした流れ場は吹出噴流の性状が一致しないため case11と厳密には一致しない。吹出風速を小さくした場合には模型の気密性、吹出噴流の3次元性等が流れ場に大きな影響を及ぼす。

[記号]

U_i : 平均風速、 u_i : 風速変動成分、 U_{in} : 吹出風速 (1m/s)

$\sqrt{u_i^2}$: 風速変動の r.m.s.、 $u_i u_j$: Reynolds Stress

[注] (1) 測定はトラバース装置により LDV probe を位置決め精度 0.1mm で移動させて行う。Seeding 粒子には DOP(フタル酸ジオクチル)ミストを用いた。ミストの発生にはエアロゾル発生装置を用いた。データ数は 15000 個以上を確保したが、サンプリング間隔は不等間隔。また Reynolds Stress の測定では、BSA をシンクロバスで接続し、 u, w の同時性を確保している。(2) 模型内の Y 方向風速分布の 2 次元性を向上するために working cavity に guard cavity に対して 0.4mmAq の微小圧力を加えている。詳細は文 1) 参照。(3) 動粘性係数 ν は 25℃ で約 0.16 cm²/s である。(4) 今回測定に用いた模型の全体の隙間面積は 0.0011m² 程度であった。既報^{*}1) 参照。この影響が天井付近及び領域②の隅角部での流量バランスの誤差、及び風速分布の 2 次元性に大きな影響を与えることが確認されている。

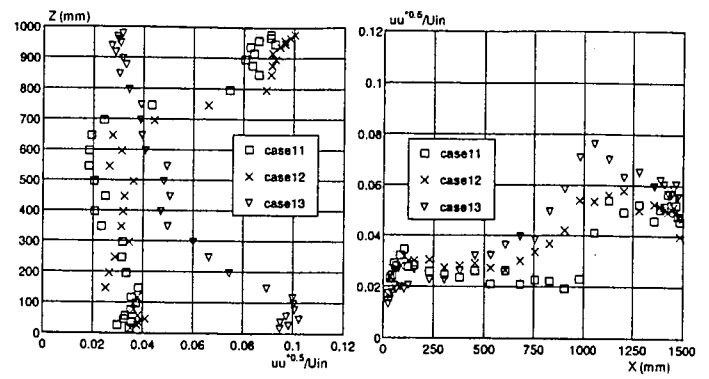
[参考文献] (1) 鈴木、伊藤、加藤、村上、小林: 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究 (その 3) Purging Flow Rate 検討用精密模型を用いた室内気流測定: 空気調和衛生工学会講演論文集 1996.9、1pp45-48

(2) 鈴木、伊藤、加藤、小林、村上: 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究 (その 5) 精密模型を用いた室内気流測定 一居住域に障害物がある場合の検討一: 日本建築学会関東支部研究報告集 1997.3、pp1-4

(3) 伊藤、加藤、小林、鈴木、村上: 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究 (その 6) 精密模型を用いた室内気流測定 一居住域に温度差がある場合の検討一: 日本建築学会関東支部研究報告集 1997.3、pp5-8

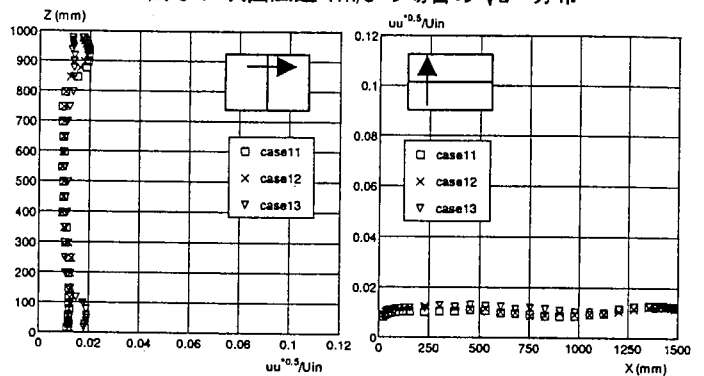
(4) 伊藤、村上、加藤: 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究 (その 9) Visitation Frequency, Purging Flow Rate による局所領域換気効率の評価: 空気調和衛生工学会講演論文集、1997.9、II、pp.421-424

(5) 大川、村上、加藤、伊藤: 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究 (その 10) 精密模型を用いた室内気流の測定と可視化 一居住域に障害物がある場合の検討一: 空気調和衛生工学会講演論文集、1997.9、II、pp.425-428



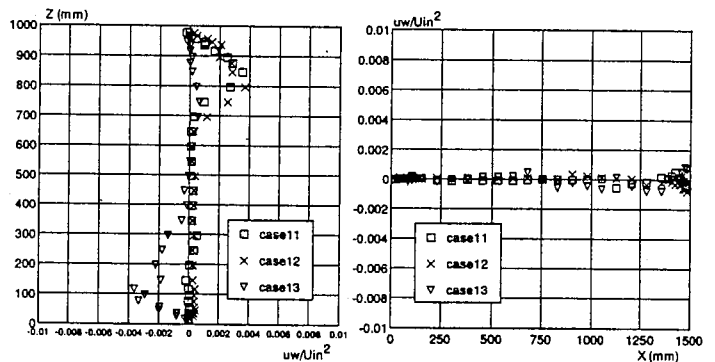
(1) $\sqrt{u^2}$ の Z 方向分布 (2) $\sqrt{u^2}$ の X 方向分布

図 6-1 吹出風速 1m/s の場合の $\sqrt{u^2}$ 分布



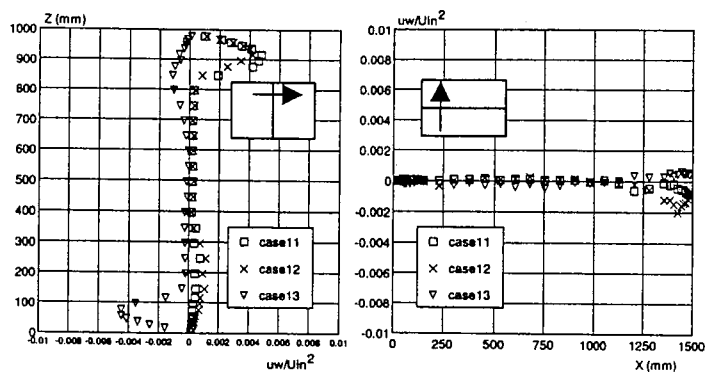
(1) $\sqrt{u^2}$ の Z 方向分布 (2) $\sqrt{u^2}$ の X 方向分布

図 6-2 吹出風速 3m/s の場合の $\sqrt{u^2}$ 分布



(1) uw の Z 方向分布 (2) uw の X 方向分布

図 6-3 吹出風速 1m/s の場合の uw 分布



(1) uw の Z 方向分布 (2) uw の X 方向分布
(X=750, Z=0~1000mm) (X=0~1500, Z=500mm)

図 6-4 吹出風速 3m/s の場合の uw 分布

図 6 室中央断面各種乱流統計量の分布