

閉 鎖 的 空 間 内 の 気 流 性 状

Statistical Analysis of Air Flow in a Closed Space

勝 田 高 司*・村 上 周 三*・小 林 信 行*・戸 河 里 敏*

Takashi SHODA, Shuzo MURAKAMI, Nobuyuki KOBAYASHI and Satoshi TOGARI

1. は じ め に

熱・物質等の拡散現象を理解するためには、気流性状、とりわけ、乱れの性状に関する知識が不可欠であるが、室内とか中庭のような閉鎖的空間内の乱れの性状に関する研究は非常に少ない。本研究は、乱れの統計量と 1) 基準風速 (吹出速度), 2) 測定位置, 3) 空間のスケールとの関係を明らかにし、また、拡散係数等の乱れの統計量の予測の方法についても検討した。

2. 記 号

 A : 比例定数 $A_r = \frac{g\beta \cdot \Delta\theta \cdot L}{U_0^2}$: 吹出のアルキメデス数
$$e = \frac{\frac{1}{2}\rho_0 s U_0^3}{\bar{\rho} V}$$

: 室内に持ち込まれる運動エネルギー, cm^2/sec^3 . (単位時間当たり、且つ室内空氣の単位質量当たり)

 g : 重力加速度, cm/sec^2 . $K_i = \bar{u}_i^2 \cdot T_i^*$: 渦動拡散係数, cm^2/sec . L : 空間の代表長さ (=室長), cm . L_i : 空間の長さ, cm . $l_i = \sqrt{\bar{u}_i^2} \cdot T_i^*$: 混合距離, cm . l_0 : 乱れの特徴的長さ, cm . $R_i(\tau)$: 自己相関係数. S : ノズル断面積, cm^2 . $T_i^* = \int_0^{\tau_0} R_i(\tau) d\tau$: 特徴時間, sec . U_0 : 吹出速度, cm/sec . $U_i = \bar{U}_i + u_i$: 風速, cm/sec . \bar{U}_i : 平均風速, cm/sec . u_i : 風速変動量, cm/sec . u_0 : 乱れの特徴的速度, cm/sec . $\sqrt{\bar{u}_i^2}$: 乱流速度, cm/sec . V : 室容積, cm^3 . β : 吹出空氣の体膨張係数, $1/\text{deg}$. $\varepsilon = \frac{A u_0^3}{l_0}$: エネルギー逸散率, cm^2/sec^3 . θ_0 : 吹出空氣温度, $^{\circ}\text{C}$. $\bar{\theta}$: 室内平均空氣温度, $^{\circ}\text{C}$. $\Delta\theta = \theta_0 - \bar{\theta}$: 吹出温度差, deg . ρ_0 : 吹出空氣密度, g/cm^3 . $\bar{\rho}$: 室内の平均空氣密度, g/cm^3 . τ_0 : 自己相関係数が初めて零となるまでの時間, sec . $\Delta\tau$: サンプリング周期.

座標のとり方: 図 1, 図 2 参照.

添字 $i = x, y, z$

3. 実 験 概 要

3.1 供試モデル

モデル 1: 図 1 に示すような実験装置を用いて、乱れの統計量に対する吹出速度および測定位置の影響をみる実験を行った。居室模型はベニヤ製で、奥行 480 cm × 幅 320 cm × 高さ 208 cm である。吹出口は、直径 12 cm の標準ノズルで、その中心は床 175 cm の位置にある。

モデル 2: スケールの影響を調べる目的で、図 1 の居室模型の縮尺 1/4 の相似模型を用いて実験を行った。

モデル 3: 大規模な閉鎖的空間内の気流性状を知る目的で、図 2 および写真 1, 2 に示す TWIN-CORRIDOR 型住棟 (片廊下向い合わせ型) の中庭中央で実測を行い、室内での測定結果と比較した。

3.2 測定方法

気流測定には、超音波風速計 (海上電機 PA-313-1 型および PA-121 型) を用い、図 3 に示す方法でデータ処理を行なった。シグマ・メータ・ユニット (海上電機 AD-801 型) の通過周波数帯域は、0.02~100 Hz である。自己相関係数 $R_i(\tau)$ の算出には、実時間デジタル型相関器 (TEAC C-110 型) を用い、一般的には Sampling Period $\Delta\tau = 0.2 \text{ sec}$, Average Constant 2048 を標準としたが、変動の性質に応じ、適宜変更して解析を行った。

4. 実験結果と考察

4.1 乱れの統計量の定義

室内中央付近での風速は、正負に激しく変化しており、平均風速が乱れに比してはるかに小さい場合が多い。1 例を図 4 と写真 3 に示す。

* 東京大学生産技術研究所 第 5 部

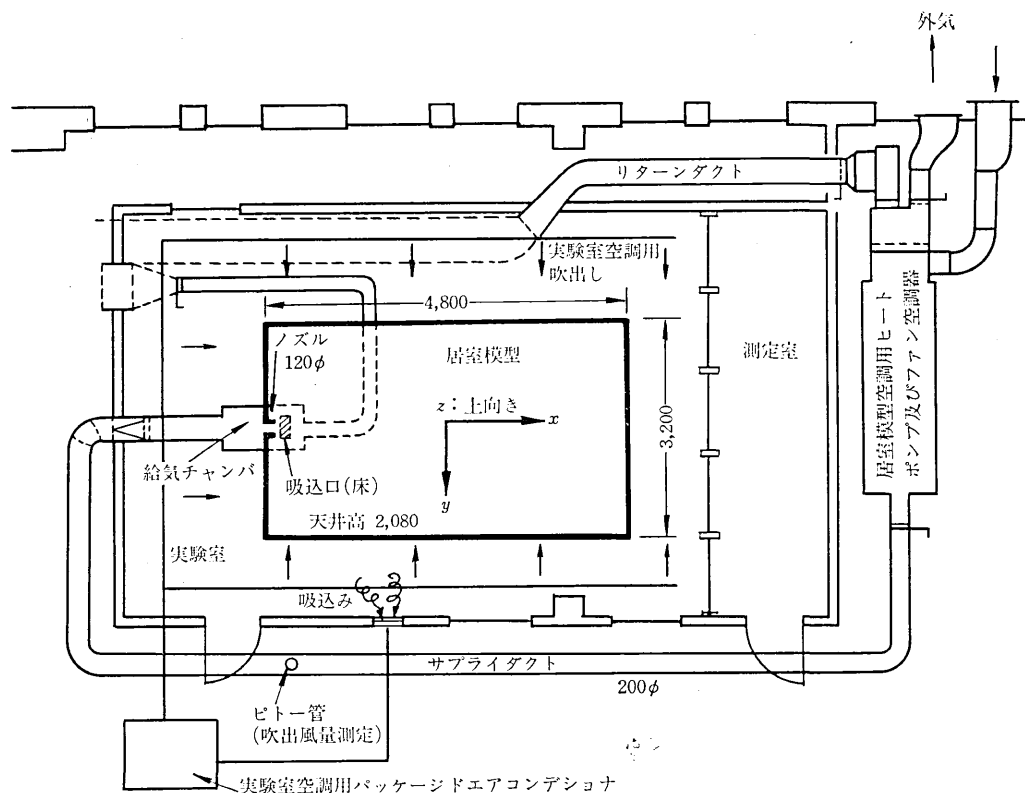


図1 実験装置

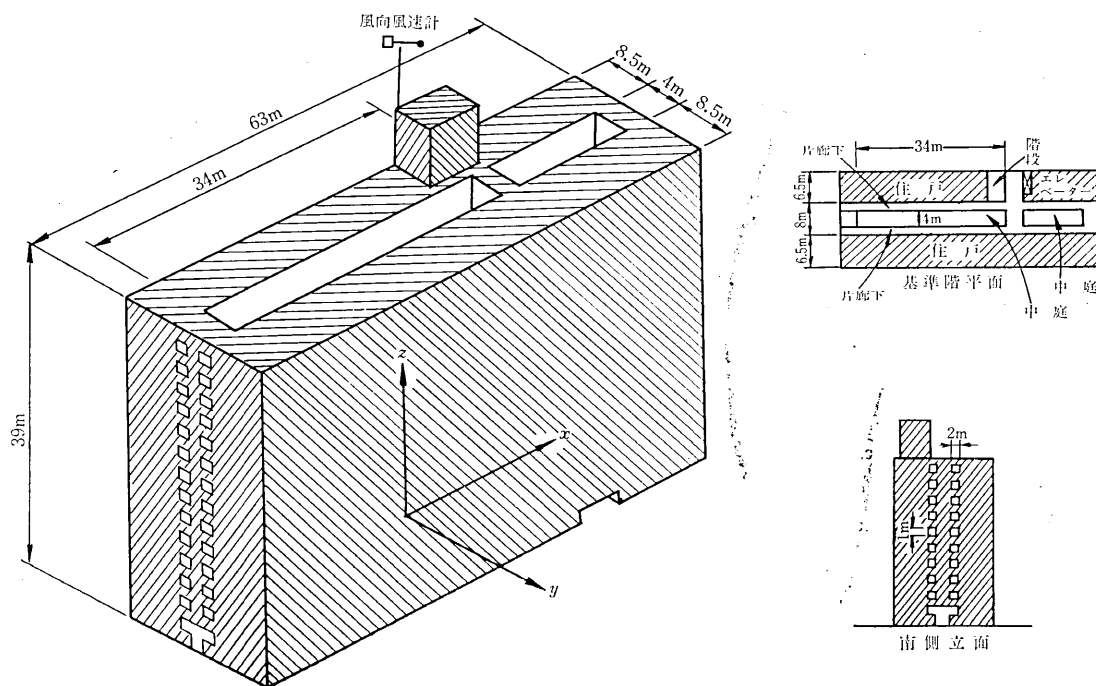


図2 実験住棟



写真 1 屋上



写真 2 屋上から見た中庭

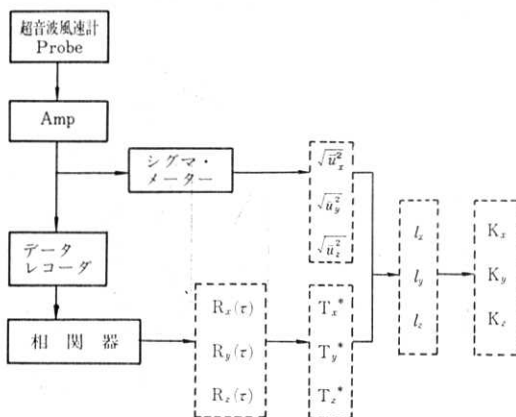


図 3 データ処理のフロー

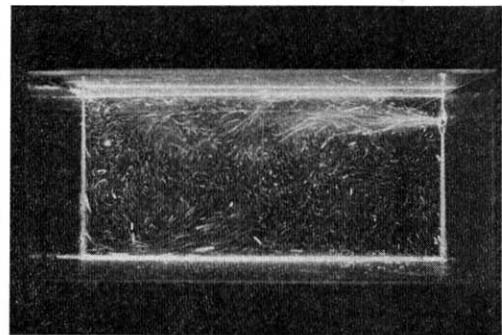


写真 3 室内中央断面における気流変動の可視化

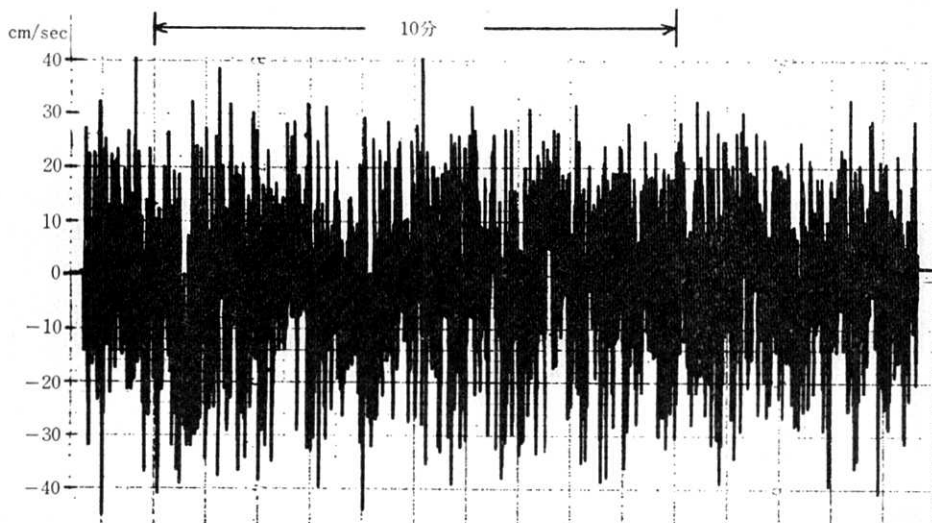
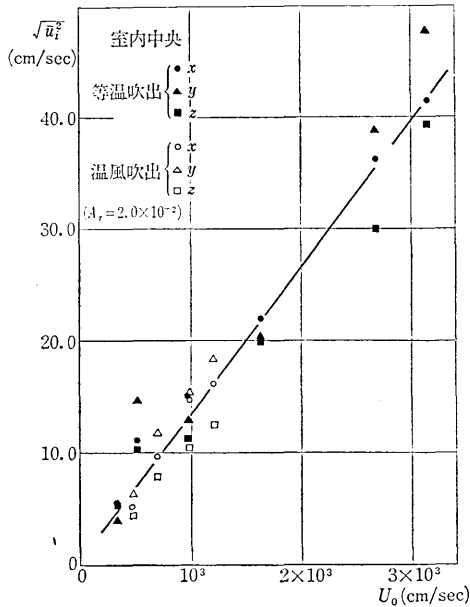


図 4 風速変動測定例 (中央 x 方向)

研 究 速 報

図 5 $\sqrt{\bar{u}_i^2}$ と U_0 の関係 (モデル 1: 居室模型)

そこで速度変動の標準偏差 $\sqrt{\bar{u}_i^2}$ を乱流速度と呼び、混合距離 l_i 、渦動拡散係数 K_i は次のように定義して求めた¹⁷⁾。

$$l_i = \sqrt{\bar{u}_i^2} \int_0^{\tau_0} R_i(\tau) d\tau \quad (1)$$

$$K_i = \bar{u}_i^2 \int_0^{\tau_0} R_i(\tau) d\tau = \sqrt{\bar{u}_i^2} \cdot l_i \quad (2)$$

但し、 τ_0 は自己相関係数 $R_i(\tau)$ が初めて零となる時間である。

4.2 乱流速度 $\sqrt{\bar{u}_i^2}$

図 5 に示すように、室内中央点の乱流速度 $\sqrt{\bar{u}_i^2}$ は吹出速度 U_0 によく比例する。等温吹出の場合と温風吹出の場合 (吹出のアルキメデス数 $Ar = 2 \times 10^{-2}$ 程度) を比較すると、 U_0 が等しければ $\sqrt{\bar{u}_i^2}$ も等しくなっており、乱流速度 $\sqrt{\bar{u}_i^2}$ が局所的な速度・温度分布よりは、吹出速度 U_0 に強く規定されていることが分かる。

モデル 1 (居室模型) とモデル 2 (1/4 模型) の測定結果を比較したのが図 6 である。吹出速度 U_0 を等しくした場合、室内中央点の乱流速度 $\sqrt{\bar{u}_i^2}$ も等しくなっている。

図 7 に示す乱流速度 $\sqrt{\bar{u}_i^2}$ の垂直分布をみると、天井付近の 2 点で大きな値になっているが、これは、噴流域に含まれているためであり、この 2 点を除くと $\sqrt{\bar{u}_i^2}$ は同程度の値となっている。データの記載は省略するが、水平分布の測定結果でも乱流速度 $\sqrt{\bar{u}_i^2}$ は比較的ばらつきが小さくなっている。

4.3 混合距離 l_i

室内中央点の混合距離 l_i と吹出速度 U_0 との関係を

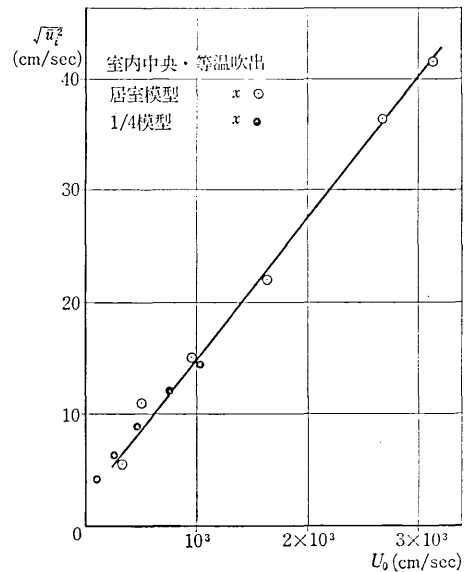
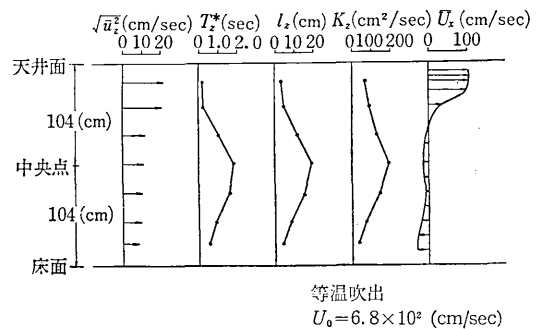
図 6 $\sqrt{\bar{u}_i^2}$ と U_0 の関係 (モデル 1: 居室模型とモデル 2: 1/4 模型の比較)図 7 室内中央における乱れの統計量 (z 方向) の垂直分布 (モデル 1: 居室模型)

図 8 に示した、 l_i は U_0 によらずほぼ一定となっている。

スケールの異なる空間における性質をみるため、モデル 3 (建物中庭) における測定結果を図 9 に示す。風の強い日や弱い日等の、異なる気候条件における建物中庭・中央点での測定結果から求めた渦動拡散係数 K_i と \bar{u}_i^2 を両軸にとっている。図中の直線の勾配は 1/2 であり、 $K_i \sim \sqrt{\bar{u}_i^2}$ なる関係があるから、式 (2) から分かるように、混合距離 l_i が気候条件によらず一定となることを示しており、室内の場合と同じ結果である。

図 10 は、中央点の混合距離 l_i と対応する空間の長さ L_i との関係を示したもので、図中の直線の勾配は 1 であり、 $l_i \approx 1/10 \cdot L_i$ である。この 1/10 という数値は、平板上の境界層内の混合距離 l と平板からの高さ y の関係 $l = \kappa \cdot y$ における、カルマン定数 $\kappa (=0.4)$ に相当するものである。

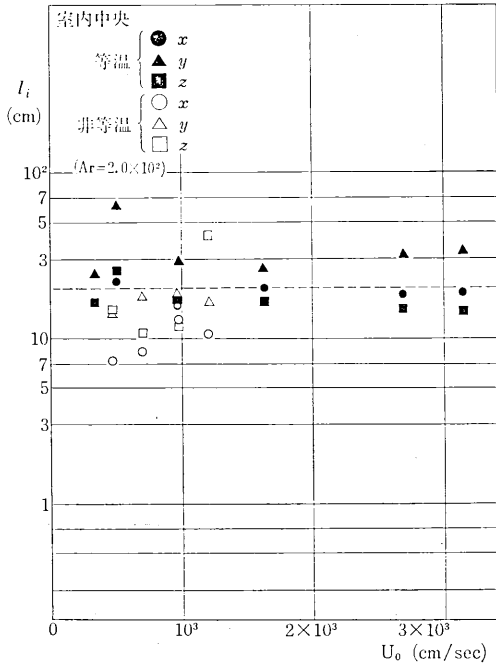
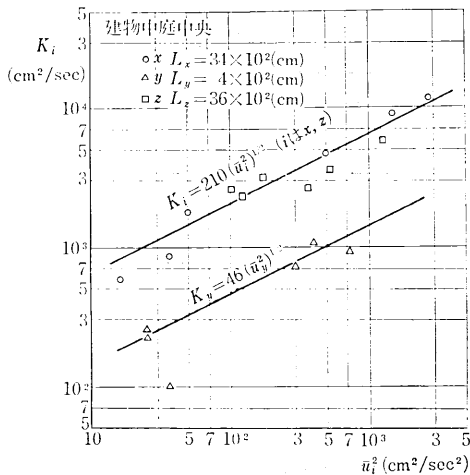
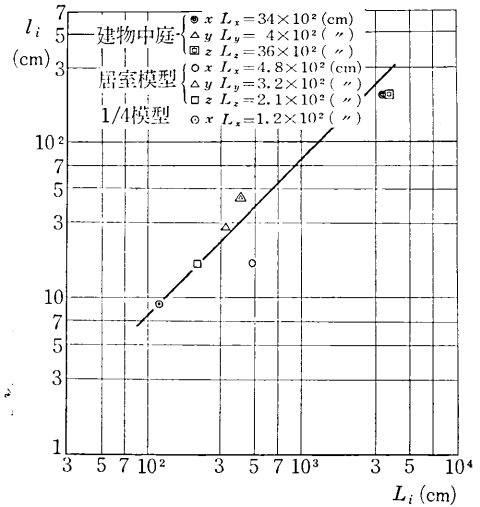
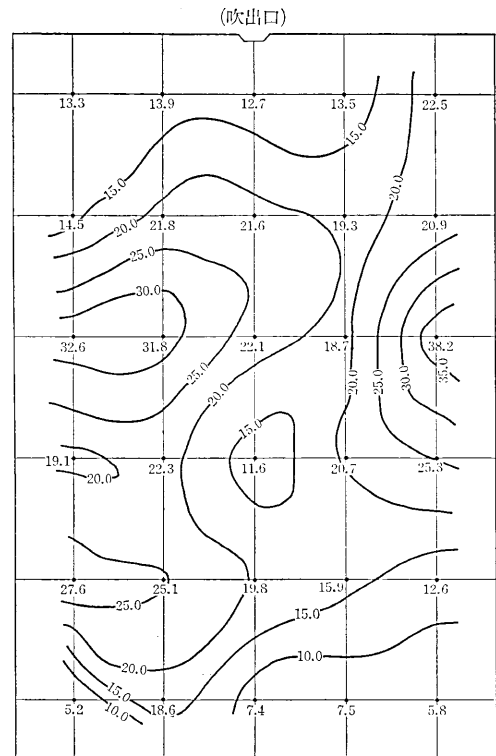
図 8 l_i と U_0 の関係 (モデル 1: 居室模型)図 9 K_i と \bar{u}_i^2 の関係 (モデル 3: 建物中庭)

図 7 で l_z の垂直分布をみると、中央点で最も大きく、床近傍および天井付近（噴流域）で小さい値を示している。 l_z, l_y の水平分布（図 11, 12）は、 l_z の垂直分布ほど顕著ではないが、中央付近で大きく壁近傍で小さくなる傾向がみられる。

4.4 渦動拡散係数 K_i

$\sqrt{\bar{u}_i^2}$ と l_i の測定結果より $K_i = \sqrt{\bar{u}_i^2} \cdot l_i$ を求めれば次のような性質がある。

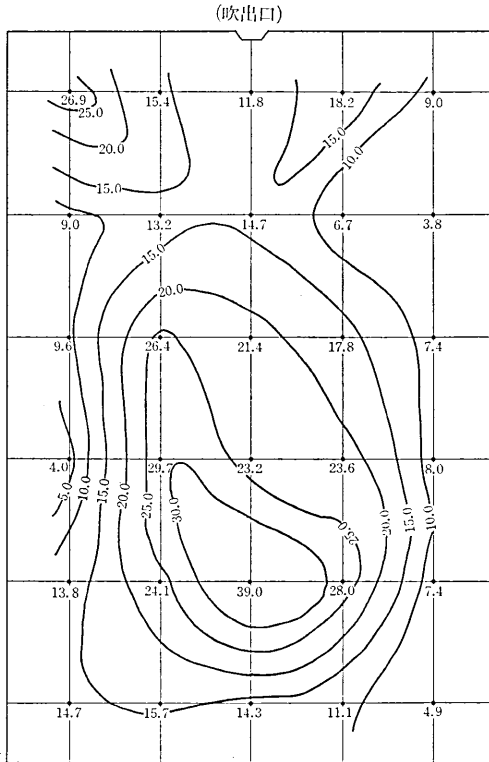
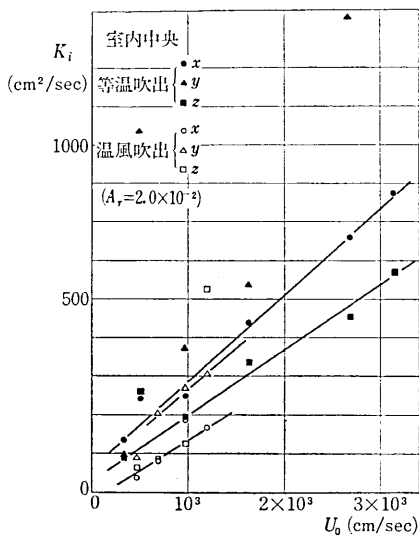
1. 中央点の渦動拡散係数 K_i は吹出速度 U_0 に比例する。（図 13）

図 10 モデル中央の l_i と L_i の関係 (モデル 1, 2, 3 について)図 11 l_z の水平分布 (モデル 1: 居室模型)

2. K_z の垂直分布は、中央付近で大きく、壁近傍で小さい。（図 7）
3. 図 10 より $l_i \sim L_i$ であり、また、図 6 より相似模型では、 U_0 が等しければ $\sqrt{\bar{u}_i^2}$ も等しく、したがって K_i の定義より、 $K_i \sim L_i$ となる。

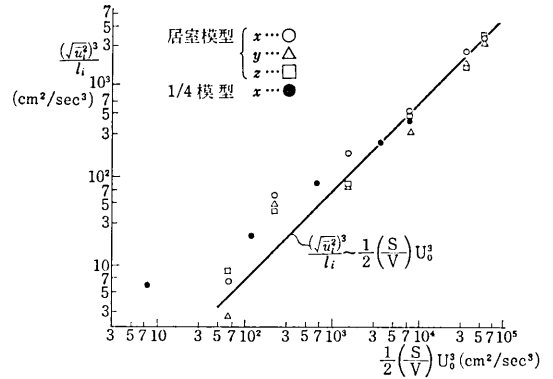
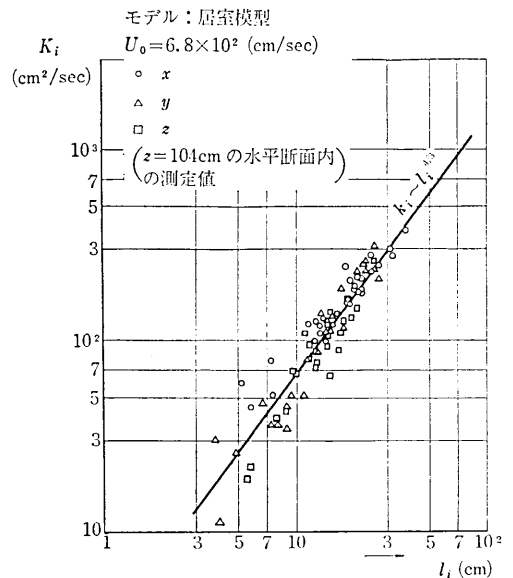
4.5 エネルギー逸散率に関する考察

研究速報

図 12 l_y の水平分布 (モデル 1: 居室模型)図 13 K_i と U_0 の関係 (モデル 1: 居室模型)

乱流速度 $\sqrt{\bar{u}_i^2}$ および混合距離 l_i の性質より、閉鎖的空間内の気流性状は、供給される運動エネルギーと空間の大きさに強く規定されると考えられるので、室内中央でのエネルギー逸散率 ε が、単位時間当たり室内に持ち込まれる運動エネルギー e に比例すると仮定する。

e は次式で表わされる。

図 14 $\left(\frac{\sqrt{\bar{u}_i^2}}{l_i}\right)^3$ と $\frac{1}{2}\left(\frac{S}{V}\right)U_0^3$ の関係
(モデル 1 とモデル 2 について)図 15 K_i と l_i の関係 (モデル 1: 居室模型)

$$e = \frac{\frac{1}{2}(\rho_0 s U_0) U_0^2}{\bar{\rho} V} \quad (3)$$

一方、エネルギー逸散率 ε は、

$$\varepsilon = \frac{A u_0^3}{l_0} \quad (4)$$

で与えられる⁶⁾。特徴的速度 u_0 として乱流速度 $\sqrt{\bar{u}_i^2}$ 、特徴的長さ l_0 として混合距離 l_i を用いれば

$$\varepsilon = \frac{A(\sqrt{\bar{u}_i^2})^3}{l_i} \quad (5)$$

となる。これより、初めの仮定は、

$$\left(\frac{\sqrt{\bar{u}_i^2}}{l_i}\right)^3 \sim \frac{1}{2} \left(\frac{\rho_0 S}{\bar{\rho} V}\right) U_0^3 \quad (6)$$

と表現される。

モデル 1・居室模型およびモデル 2・1/4 模型における測定値を用いて (6) の関係を検討したものが図 14 で

ある。 U_0 が小さい場合にはずれる傾向にあるが、全体的には(6)の関係の成り立つことが明らかになった。したがって、エネルギー逸散率 ε と e が比例するという仮定が妥当なものであると考えられる。

次に、エネルギー逸散率 ε の水平分布を調べてみる。

図 15 は、モデル 1・居室模型で U_0 を一定とした場合の K_i と l_i の水平分布の測定結果であり、 $K_i \sim l_i^{4/3}$ という関係が成り立っている。(2), (4)より $K_i = \sqrt{\bar{u}_i^2} \cdot l_i = (\varepsilon/A)^{1/3} \cdot l_i^{4/3}$ であり図 15 に示された結果より $\varepsilon^{1/3} = \text{const.}$ 即ち、エネルギー逸散率一定という関係が導かれる。

当然、垂直方向にも同様の傾向のあることが予想されるので、エネルギー逸散率 ε は、噴流域などを除く、かなり広い範囲に亘ってほぼ一定となっていると思われる。

5. 結 論

1. 混合距離は、乱れの幾何学的スケールを代表する量であり、閉鎖的空間の場合、乱れのスケールは周壁により限定されるが、測定の結果、中央点の混合距離 l_i は、基準風速(吹出速度)によらずほぼ一定であり、対応する空間長さ L_i の約 1/10 であった。

2. 居室模型での測定から、中央点のエネルギー逸散率 ε は、供給される運動エネルギー e (単位時間当たり、且つ室内空気の単位質量当たり) に比例することが分か

った。そして、エネルギー逸散率 ε は、室内のかなり広い範囲に亘ってほぼ一定であった。

3. 上の2つの結果を用いることにより、空間の大きさと供給される運動エネルギー e が知れば、中央点の乱流速度 $\sqrt{\bar{u}_i^2}$ が推定され、 $K_i = \sqrt{\bar{u}_i^2} \cdot l_i$ より渦動拡散係数もわかるものと考えられる。

4. エネルギー逸散率 ε と e の関係および各統計量の水平・垂直分布については、更にデータを蓄積していく必要があると考える。(1974年3月16日受理)

参 考 文 献

- 1) 勝田・村上・小林: 室内気流の渦動拡散係数に関する実験的研究, 日本建築学会学術講演梗概集 (1972)
- 2) 勝田・村上・小林: 室内気流の乱れの性状, 建築学会関東支部・研究報告集 (1972)
- 3) 勝田・村上・小林・戸河里: 温風暖房時の室内気流変動ならびに温度分布に関する実験的研究, 建築学会学術講演梗概集 (1973)
- 4) 勝田・土屋・寺沢: 室内空気の渦動粘性係数について, 建築学会学術講演梗概集 (1969)
- 5) 岩切 敏: ハウス内気層の乱流特性, 農業技術研究所物理統計部・研究成果 (1971)
- 6) 島貫 陸: 境界層と乱流, 気象研究ノート 114 号 (1973)
- 7) 小倉義光: 乱流と気象, 気象研究ノート (1953)
- 8) 井上栄一: 地表風の構造, 農業技術技術研究報告 A 第 2 号 (1952)
- 9) Pasquill, F.: Atmospheric Diffusion, D. Van Nostrand, London (1962)
- 10) Schlichting, H.: Boundary Layer Theory, McGraw Hill, N. Y., (1955)

(P. 29よりつづく)

非破壊検査画像の研究 超音波画像の入力、処理、3次元表示、任意の断面図の作成などを行っている。また、溶接部のX線画像についても、欠陥の検出、溶接線の抽出などについて研究を行っている。

ファクシミリ信号の帯域圧縮に関する研究 画像処理の応用として、種々の方式の検討を行っている。2次元予測方式を考案し大幅な圧縮率の向上を行えることを示した。ファクシミリの場合に問題となるランレングスの符号化についても高効率多モードランレングス符号を開発し、両者を組合わせてデジタル方式では最も高い圧縮率を得ている。さらに圧縮率を上げるために信号変換を行う方式も開発し、大きな成果が得られている。

その他、ソフトウェア関係では種々のものを開発しているが2次元FFTを高速に行うアルゴリズムを開発し、1000×1000の画像のFFTを少ないコアとディスクの組合わせで可能とした。今後、基礎的な面も充実させると共に応用面を広げる予定であるが、今年度からの臨時事業で村井研究室に協力して隔測への応用も計画されている。

本所には画像に関連した実験が行われている研究室が数多くあるものと思われるが、当研究室を充実して画像処理に関して多くの研究室のお役に立てることを切望している。

(高木幹雄記)