

大空間暖房時の気流・温度分布の数値計算

小林 信行 *

高橋 雄司 **

菊池世欧啓 **

小磯 正博 **

Numerical Simulation of Airflow and Air Temperature Distribution in a Large Enclosure under Heating Conditions

Nobuyuki Kobayashi Yuji Takahashi
Seohiro Kikuchi Masahiro Koiso

Numerical simulation has been becoming realistic for predicting airflow and air temperature distribution under air-conditioning conditions. The prediction has recently been easier because of the development of computer hardware and skillful program software. The problem concerning CPU time and the cost of calculation, however, has still remained. To make air-conditioning designers use frequently numerical simulation for practical subjects, the simplification of the calculation is required.

The possibilities of simplification are investigated by using $\kappa - \varepsilon$ turbulence model ;

- 1) limiting the calculation region
- 2) substituting a 2-D simulation for a 3-D simulation

Several simplifications are compared with the simulation for a precise space shape. Under a certain circumstance of space configuration and an arrangement of air inlets and outlets, the first step prediction for the air-conditioning design can be available by the simplified simulation.

1. はじめに

大空間はその性格上、天井高が大きく、暖房時においては上下温度分布が生じ易いなど環境的な検討課題が多い。これらの空間の空調計画に数値計算による予測結果が利用されるようになってきている。計算機ハードの進歩や計算プログラムソフトの工夫により気流・温度の解析は従来に比べ容易になってきたが、空調計画時により頻繁に利用できるためには、計算時間、計算コストなどの点でなお問題が多い。ここでは大空間暖房時の気流・温度分布の数値計算を行う際に、計算対象モデルの形状、吹き出し口の配置などにより計算領域を限定したり、3次元を2次元に簡略化することが可能かどうかを汎用プログラムソフトを用いて検討した。空調設計の精度で簡略化が可能な状況があり、計算時間が短縮できることを示した。こ

れにより、より多くの条件下での検討ができ空調設計に役立てることができる。

2. 計算対象建物の概要

対象建物は寒冷地に建つ屋内レジャープール施設である。表1、図1-1、図1-2、写真1、2に建物概要を示す。構造は集成材による木造で、屋根にテフロン膜（一重）を用い、壁面は3面がガラス（単板）となっている。寒冷地に立地する建物としては熱負荷が大きく、温熱環境的に非常にきびしい条件である。空調方式は単一ダクト方式で、南北2系統に別けられており、温水式の床暖房を併用している。室内設定温度は32℃。吹出口は直径450mmと250mmの円形ノズル、吹出し風速は平均で5.4m/sである。吹出温度は還気温度により制御している。

* 本学建築学科，教授

**川本工業(株)開発部

1994年10月12日受理

本研究を行うに当っては、平成3年度工学部重点研究費の一部を使用しています。ここに記し謝意を表します。

3. 数値解析の概要

本報告の数値計算には汎用熱流体計算プログラムソフト「FLUENT Version4.22」と「FLUENT/BFC Version3.02」を使用した。

表 1 建物概要

建物用途	水泳場、会議場
竣 工	1993年11月
所 在 地	長野県下高井郡野沢温泉村
規 模 (プール棟)	床面積 2,080 m ² 天井高 18 m
構 造 (プール棟)	木造大断面集成材 テフロン膜
空調方式	単一ダクト方式 (床暖房併用)

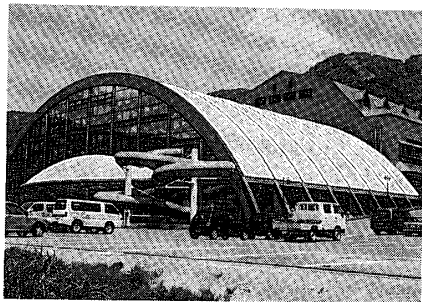


写真1 建物外観



写真2 プール内部

3.1 乱流モデル

今回は最も広く適用されている κ - ϵ 型乱流モデルを用いた。乱流は大小様々な渦によって構成されるが、大きな渦は分裂を繰り返し、次第に小さな渦になっていく。 κ - ϵ 型乱流モデルでは、これを乱れのエネルギー κ およびそのエネルギー逸散率 ϵ によって表現する。Navier-Stokes方程式を平均と変動分に分け時間平均を施せば平均流に関

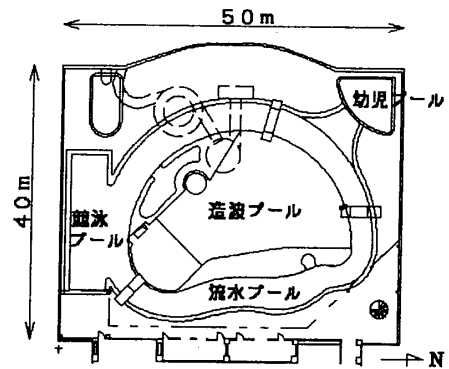


図1-1 プール棟平面

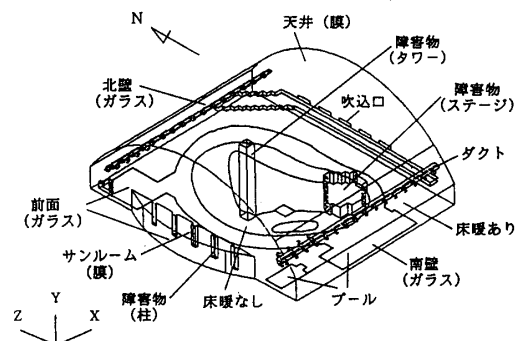


図1-2 プール内部空間の概要

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial X_j}(U_i U_j) - \frac{\partial \Pi}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_j}[(\nu + \nu_t) (\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i})] - g_i \beta \Delta T \delta_{i3}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial X_j}(T U_j) + \frac{\partial}{\partial X_i} a (\frac{\partial T}{\partial X_i}) + \frac{q}{\rho C_p}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial X_j}(k U_j) + \frac{\partial}{\partial X_j}[(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial X_j}] + P_k + G_k - \epsilon$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial X_j}(\epsilon U_j) + \frac{\partial}{\partial X_j}[(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial X_j}] + \frac{\epsilon}{k} [C_1 P_k + C_3 G_k - C_2 \epsilon]$$

$$\nu_t = C_D \frac{k^2}{\epsilon} \quad \Pi = \frac{P}{\rho} + \frac{2}{3} k \quad P_k = \nu_t (\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i}) \frac{\partial U_i}{\partial X_j} \quad G_k = g_i \beta \frac{\nu_t}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial X_i} \delta_{i3}$$

$$C_D = 0.09 \quad C_1 = 1.44 \quad C_2 = 1.92 \quad C_3 = C_1 \text{ or } 0 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\epsilon = 1.3 \quad \sigma_T = 1.0$$

X_i : 位置座標 t : 時間 U_i : 速度 ρ : 空気密度 P : 圧力 ν : 動粘性係数 ν_t : 渦動粘性係数
 T : 平均温度 ΔT : 温度差 C_p : 定圧比熱 a : 温度伝導率 q : 発熱量 k : 乱流エネルギー
 ϵ : エネルギー逸散率 δ_{ij} : クロネッカーのデルタ

図2 基礎方程式

する運動方程式を得る。また、Navier-Stokes方程式から平均流の式を引き、速度変動を掛けて時間平均を施すことによって乱流エネルギーの輸送方程式が得られる。すべての乱流輸送量は渦粘性の概念で近似している。図2に基礎方程式を示す。なお、方程式の記述にあたっては煩雑さを避けるためテンソル表示を用いた。

3.2 計算格子の構成

建物の屋根が曲面のため、計算格子の生成には「FLUENT/BFC Version3.02」を使用した。表2に計算領域の種類を、図3-1～図3-3に計算格子を示す。

各モデルの特徴を次に示す。




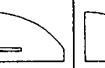
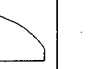
パターンⅠ：基本型として実際の形に極力一致させたものである。(3次元)

パターンⅡ：パターンⅠはほぼ南北に対称であるのでZ方向に2分割した。格子点の配分は変更しないが床の境界条件と障害物は簡素化した。(3次元)

パターンⅢ：計算時間の短縮の目的で、パターンⅡの1つの吹出口を含む空間だけを対象に計算した。(3次元)

パターンⅣ：パターンⅢの空間を2次元で解析した。その際、格子点数を約15倍に増やした。また、2次元化のために、吸込口は左下の欠けた部分とした。

表2 計算領域の種類

パターン	I	II	III	IV	V
モデル					
格子点数 X, Y, Z	89, 23, 51	89, 23, 26	6, 23, 26	111, 80, 1	111, 80, 1
吹出口個数	42	21	1	1	1

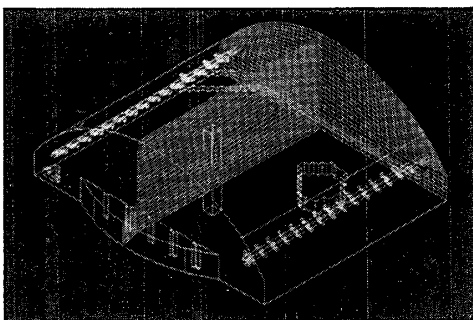


図3-1 パターンⅠの計算格子
(パターンⅡは半分)

パターンⅤ：格子点はパターンⅣと同じとし、吸込口は輪郭の左の壁全体とした。(2次元)

3.3 境界条件

表3に境界条件(流体の物性値、吹出口、吸込口、

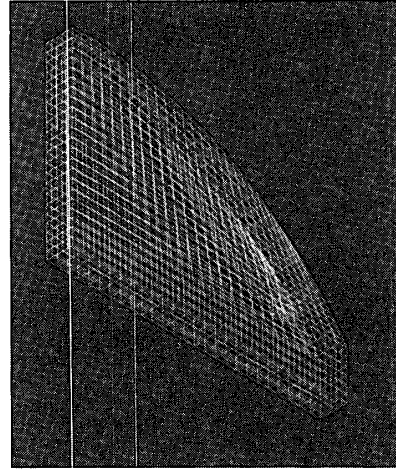


図3-2 パターンⅢの計算格子

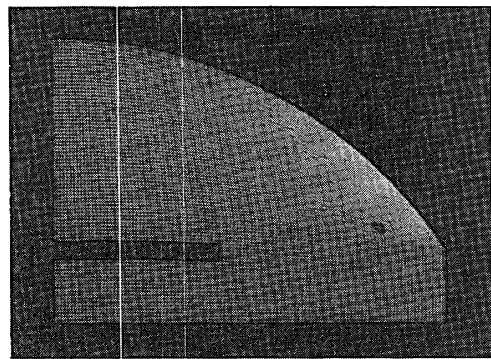


図3-3 パターンⅣの計算格子
(パターンⅤは吸込口以外は同様)

表3 境界条件

流体の物性値 (PHYSICAL-CONSTANTS)	流体：空気 分子量：28 密度：1atm=101,325Pa 粘性係数：Piecewise-Linear 熱伝導率：k(T)=0.0241+1.0×10 ⁻⁶ T 定圧比熱：Piecewise-Linear		
吹出口 (INLET)	450φ	10 m/s	55 °C
	250φ	2 m/s	55 °C
吸込口 (OUTLET)	自由流出		
壁境界 (WALL)	壁	： - 18.6 W/m ²	
	ガラス	： -203.5 W/m ²	
	膜	： -244.2 W/m ²	
	障害物	： 20 °C	
	プール	： 30 °C	
	床（暖房有）	： 35 °C	
	床（暖房無）	： 20 °C	
	ダクト	： 55 °C	
対称面 (SYMMETRY)	対称面に垂直な速度成分はゼロ		

壁面、対称面)を示す。

(1) 物性値 流体(空気)の定数および状態式を設定した。

(2) 吹出口 吹出口面積が実物とモデルで多少異なるが、吹出し風量を合わせるように吹出風速を決定した。吹出温度はすべて55℃とした。

(3) 吸込口 自由流出とした。

(4) 壁 壁はパターンによって壁表面温度を与えた。表面温度を想定しにくい場所については熱貫流率を与えた。

(5) 対称面 3次元部分モデルと2次元モデルはその切断面の境界条件として切断面に対する速度の鉛直成分をシンメトリーとした。

3.4 計算手法

計算には圧力速度同時緩和法としてPoisson型の圧力補正式を用いている。

図4に計算手順を示す。速度、スカラー量などの各変数はコントロールボリュームの幾何学的中心で保存されている。コントロールボリューム界面における値はべき乗法による内挿によって算出している。FLUENTでは計算時間を短縮するために、速度や温度の初期予測値を適当に与えられるようになっている。これを利用して、全計算領域全体の温度変数に初期値として25℃を与えた。計算の収束・発散状態を確認するために各変数の残差を履歴として保存する必要がある。エンタルピーとエネルギーの残差履歴ファイルを採り、ときどき

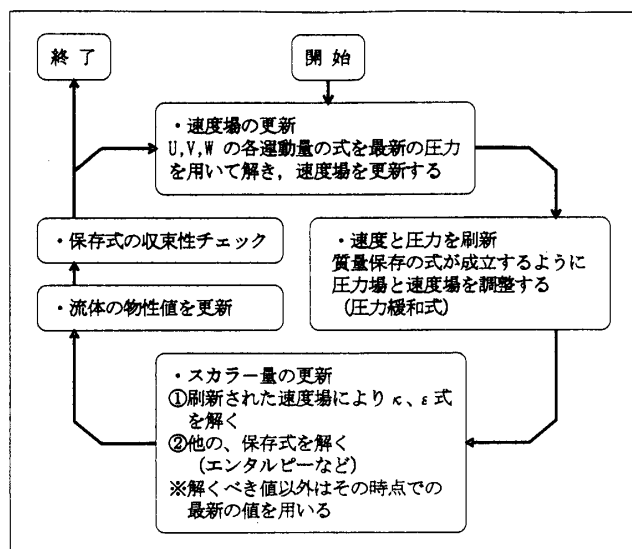


図4 計算手順

確認して収束判定をおこなった。また、ある程度計算が進んでから加速緩和係数を変更して計算を早める操作を施した。

4. 数値解析の結果と考察

図5-1～図5-14に各パターンにおける計算結果(風速ベクトルと温度分布図)を示す。

4.1 風速ベクトル

3次元の領域全体のパターンI(図5-1)と半分の領域のパターンII(図5-2)でYZ面について比較すると、サンルーム側では吹出口から膜屋根面に沿って上昇し、中央付近から下降している様子、吸込口付近では中央上部から吸込口へ向かう速度ベクトルの様子など両パターンとも似た傾向を示している。図5-3と図5-4でXY面を比較すると、吸込口付近の渦流を除き全体の気流はほぼ似た傾向を示している。パターンI(図5-5)は吹出口から出た気流がすぐに上昇し、膜屋根に沿って流れていく。やがて建物中央で気流は下降するという流れがあり、時計回りの大きな渦がダクトの右上にできている。パターンII(図5-6)でも似たような傾向がみられ、両モデルの計算結果は良く似た傾向を示している。

次にパターンIII(図5-7)では、流れは非常に複雑で、渦が4ヶ所に発生している。中央の下降流は見られるものの、吹出口上部では屋根に沿って下降流が生じている。また、低層部に窓側から空間中央部に向かう流れがみられ、そのすぐ上部は反対方向の流れになっており、パターンI、IIとは流れの様相は異なっている。

パターンIV(図5-8)、パターンV(図5-9)では吹出口から出た気流がすぐに上昇し屋根に沿って上昇している。吹出口下部では吹出し気流に誘引される気流もみられ、吹出口近辺は似たような流れを示している。パターンIVでは中央付近で下降流がみられるが、パターンVではその傾向はみられない。

4.2 温度分布

パターンI(図5-10)とパターンII(図5-11)を比較するとパターンIはサンルーム側上部の温度が高く、吸込口下部ほど温度が低い傾向が

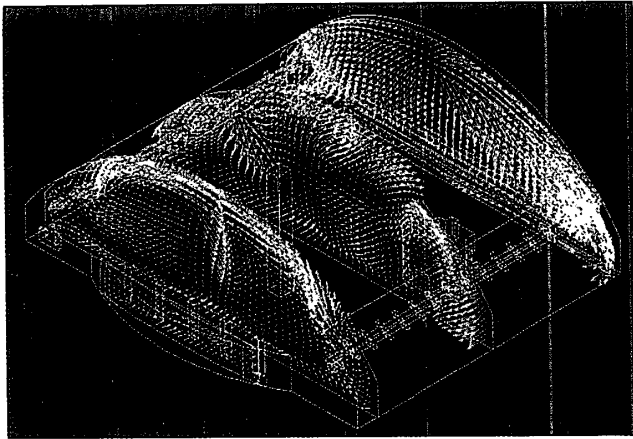


図5-1 パターンⅠ (Y-Z断面速度ベクトル)

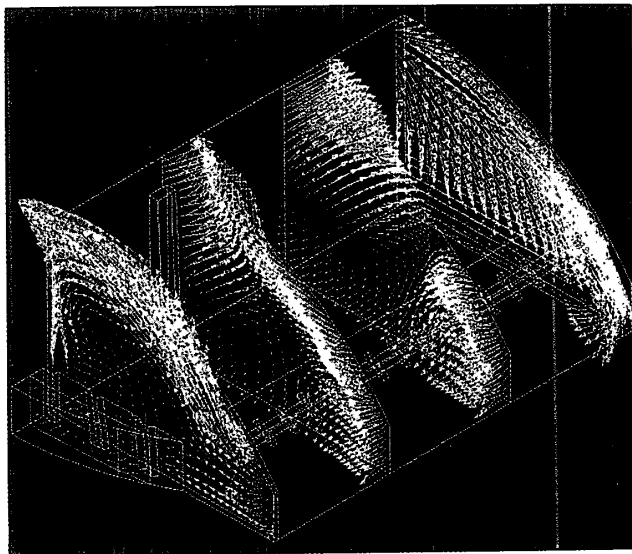


図5-2 パターンⅡ (Y-Z断面速度ベクトル)

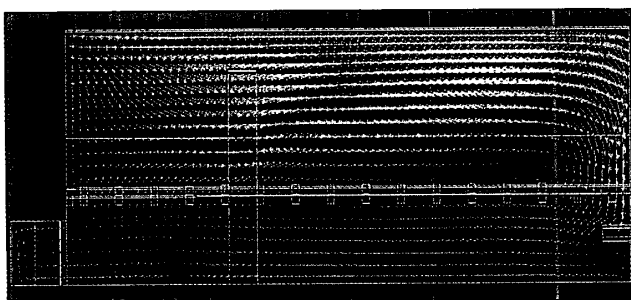


図5-3 パターンⅠ (X-Y断面速度ベクトル)

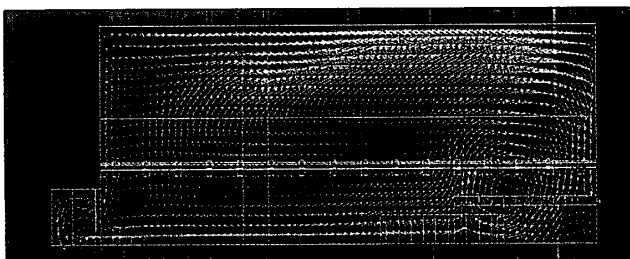


図5-4 パターンⅡ (X-Y断面速度ベクトル)

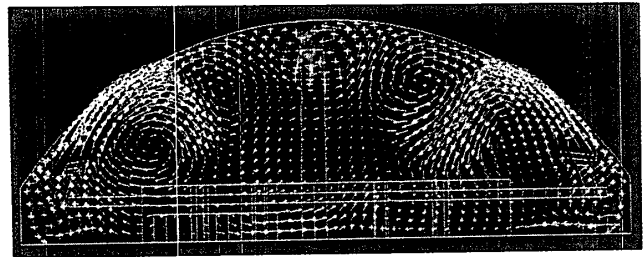


図5-5 パターンⅠ (Y-Z断面速度ベクトル)

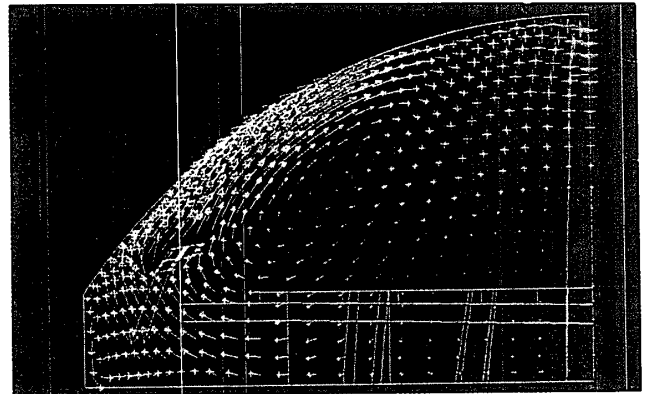


図5-6 パターンⅡ (Y-Z断面速度ベクトル)

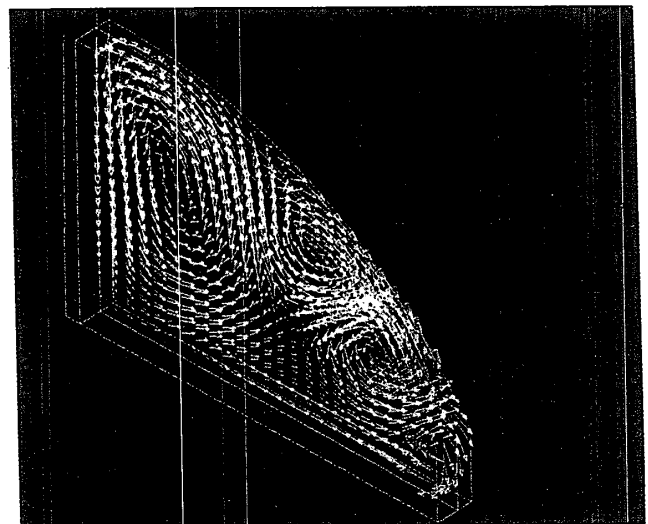


図5-7 パターンⅢ (Y-Z断面速度ベクトル)

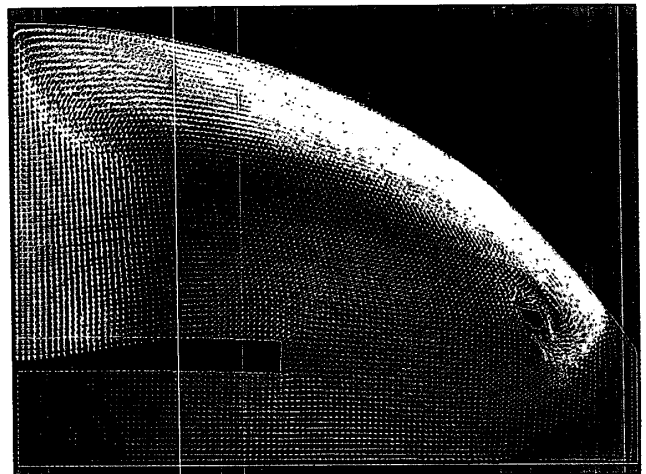


図5-8 パターンⅣ (Y-Z断面速度ベクトル)

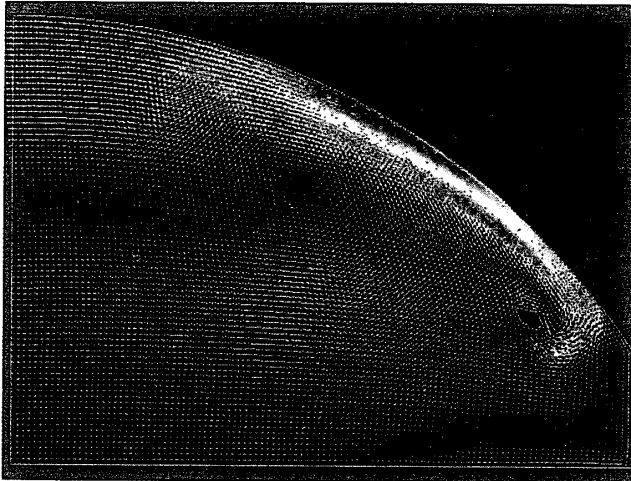


図5-9 パターンV (Y-Z断面速度ベクトル)

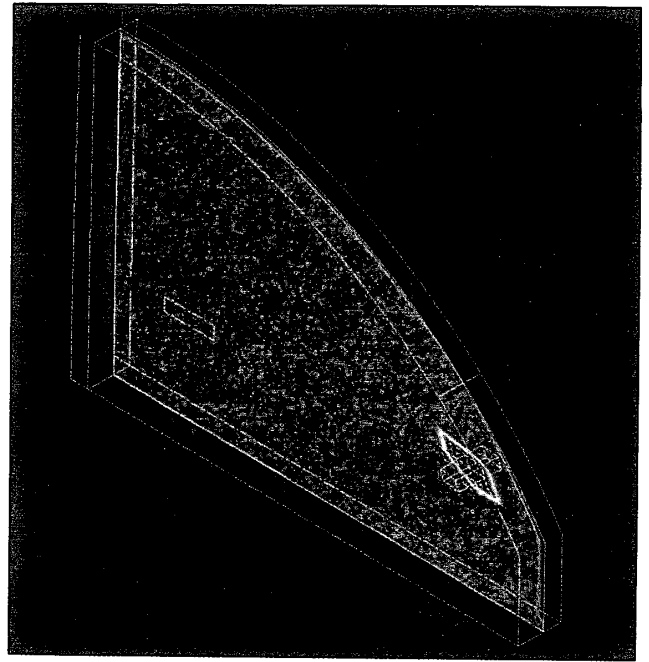


図5-12 パターンIII (Y-Z断面温度分布)

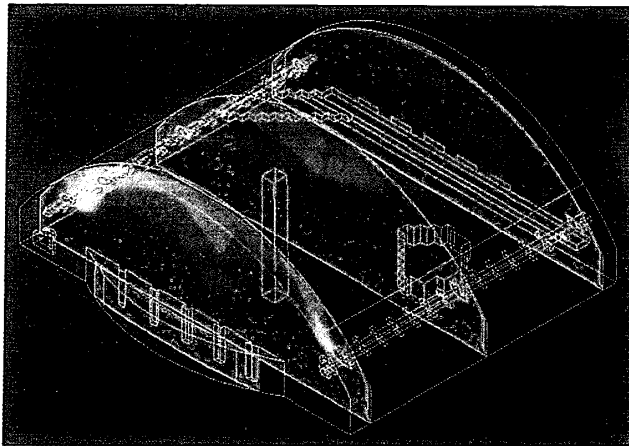


図5-10 パターンI (Y-Z断面温度分布)

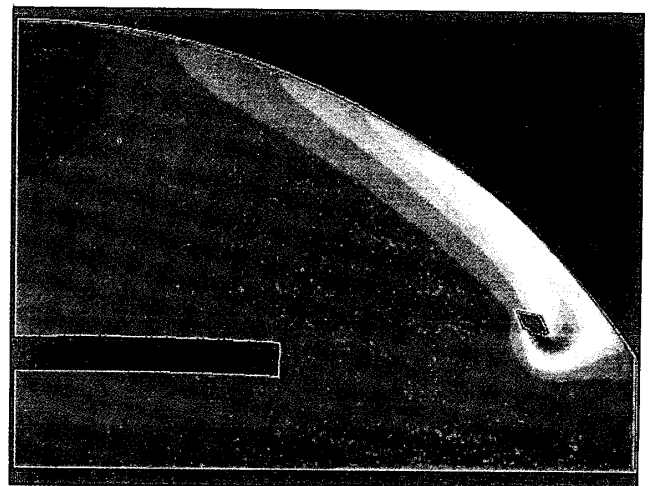


図5-13 パターンIV (Y-Z断面温度分布)

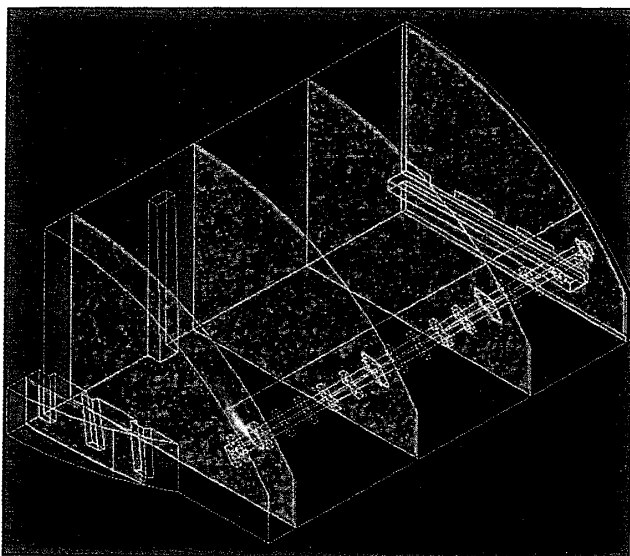


図5-11 パターンII (Y-Z断面温度分布)

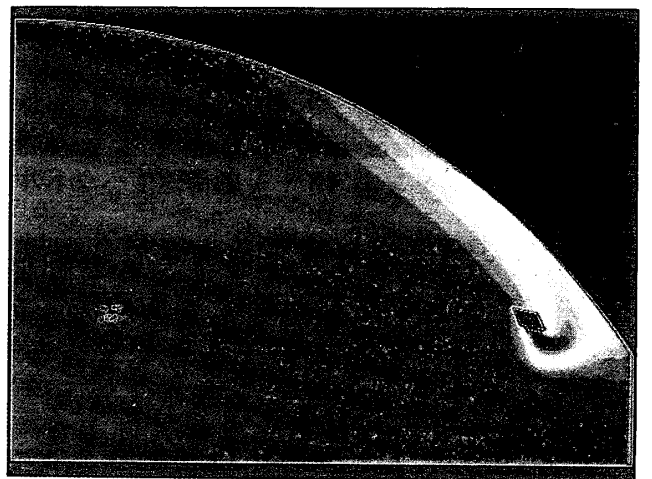


図5-14 パターンV (Y-Z断面温度分布)

みられる。パターンⅡでもパターンⅠほど顕著ではないが、同様な傾向がみられる。パターンⅢ（図5-12）では空間全体がほぼ一様な温度になっている。パターンⅣ（図5-13）とパターンⅤ（図5-14）では吹出口から屋根面にかけての傾向は良く似ている。しかし中央上部や窓側下部では異なった傾向がみられる。

4.3 解析結果の比較

表4に各パターンごとの結果の比較を示す。
（表中の計算時間については端末の利用状況によって変わってくるがおよその目安）

表4 解析結果の比較（パターンⅠを基準）

パターン	風速ベクトル		温度分布		計算時間
	全体	部分	全体	部分	
Ⅰ	—	—	—	—	100
Ⅱ	類似	類似	類似	類似	50
Ⅲ	異なる	異なる	異なる	異なる	10
Ⅳ	異なる	類似	異なる	類似	2
Ⅴ	異なる	類似	異なる	類似	2

注：パターンⅠを基準とした場合

- 4) 野村、松尾、貝塚ほか：室内気流分布の数値解法に関する研究3、2方程式モデルによる乱流の3次元解析、日本建築学会論文報告集、第238号、1975.12.
- 5) T. Kurabuchi, J.B.Fang, Richard A.Grot : Numerical Method For Calculating Indoor Airflows Using A Turbulence Model, Report of National Institute of Standards and Technology (NISTIR 89-4211), 1990. 1.
- 6) 村上、加藤、中川：水平非等温噴流を有する室内の流れ場・温度場の数値解析、日本建築学会論文報告集、第423号、1991.5.

5 結論

気流分布についてはパターンⅠに比べ、パターンⅡは全体の様相が似ているので、およその気流を検討する場合には有効である。従って、対象空間がほぼ対称ならパターンⅡのように計算領域を限定することもできる。また部分的な気流や温度分布を検討する場合には適当な断面について2次元で計算することも有効である。

このように格子の配分や境界条件の設定により解析結果は異なってくる。しかし空間を全体と部分にわけて考えると、ある程度の簡略化は可能であり、計算の効率をあげることができることがわかった。

参考文献

- 1) スハス パタンカー：コンピュータによる熱移動と流れの数値解析、森北出版、1985.
- 2) B. E. Launder, D. B. Spalding : Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, 1972.
- 3) 野村、松尾、貝塚ほか：室内気流分布の数値解法に関する研究1、MAC法による3次元数値解析、日本建築学会論文報告集、第231号、1975. 5.