

熱流体解析プログラムを使用した温熱環境及び 気流分布予測に関する基礎的研究

Basic Study on Prediction of Indoor Climate and Space Air Distribution using Thermal Fluid Analysis Program

田中 勉* 萩谷 宏三**
Tsutomu Tanaka Kozo Hagiya

要 約

質の高級化志向は建築空間へも波及し、それは快適空間の創造という形で具体化しつつある。

本論では、屋内空間の温熱環境および気流分布の最適化の手段として、市販の熱流体解析プログラムを使用し、その実用性の確認をした。

解析対象モデルには、某植物工場の1/20模型を使用し、定量的(温度分布)および定性的(可視化による気流パターン)に、計算値と実測値を比較検討した。

その結果、定量性を究明する場合には、ある一つのケースについて実験をし、計算値と実測値とのずれ(一定値)を補正することにより、その後の数値解析的展開が有効性を増すことを確認した。また定性的評価手段だけに計算値を利用するならば、模型実験をして補正することなく実用性が保証されることも見出した。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 熱流体解析プログラムの概要
- §3. 解析モデルおよび解析条件
- §4. 数値解析結果と実測値との比較検討
- §5. おわりに

§1. はじめに

今日、建築物の空気調和設備の企画・設計段階において、室内全体の空気環境(気流・温度分布)を解析・予測し、より良い快適空間を創造することが切望されている。その理由の一つに、大空間を取り入れた建築物の増加に伴い、大空間ゆえの快適空気環境創造の難しさがあ

げられる。

現在、具体的な予測手段としては、模型実験と数値解析がある。前者には、これまでに数多くの予測事例や実測との比較による妥当性の確認があるが、相似則や実験費用上の問題をかかえている。一方後者は、解析対象モデルの形や条件の変化への対応の容易性に加え、半導体の飛躍的な発展に伴うコンピュータの演算能力の高速化により、より高精度で信頼性のある解析が可能となった。

そこで本論では、市販の熱流体解析プログラムを用い得られた数値解析解を、その解析モデルと同一の模型による実験結果と比較し、市販プログラムの実用性の確認を目的とした。

§2. 熱流体解析プログラムの概要

2-1 基礎方程式

本論で使用した熱流体解析プログラムは、(株)構造計画

*技術研究所機電課
**技術研究所機電課係長

研究所が昭和58年に販売を開始し、その後数回にわたるバージョンアップを重ねた「HOTFLOW II」である。流れには層流と呼ばれる穏やかで規則正しい流れと、

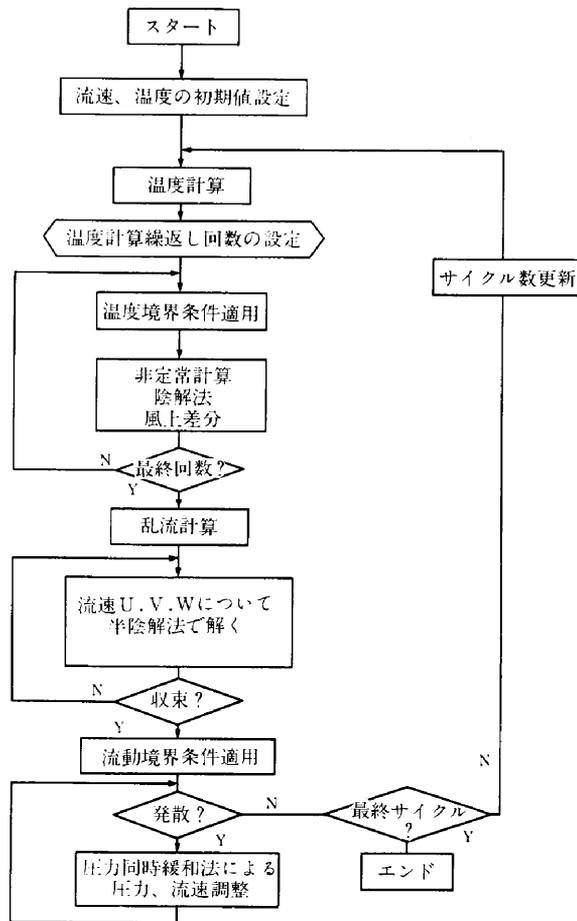


Fig.1 計算フロー

乱流と呼ばれる乱雑で不規則な流れとがあるが、建築工学的に扱う流れは全て乱流といっても過言ではない。

「HOTFLOW II」では、乱流(場)を数値シミュレーションする手段として、①パスキルギフォード・モデル(0方程式輸送モデル)、②K-εモデル(2方程式輸送モデル)および③Smagorinskyモデル(LESモデル)の3解法が可能である。その中から本論では、次に示すK-εモデルを基礎方程式として採用し、非定常計算を試みた。その計算フローをFig.1に示す。

(i) 連続方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

(ii) 運動方程式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \{ \nu_t + \nu \} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - g_i \beta \Delta \bar{T}$$

ただし、 $\bar{P} = \bar{P} + 2k/3$ (m²/sec²)

$$\nu_t = C_\mu k^2 / \epsilon$$

ここで、 k は乱流エネルギー、 ϵ は散逸率、 C_μ は定数である。

また、 u_i, P, T を時間平均量 $\bar{u}_i, \bar{P}, \bar{T}$ と変動量 u_i', P', T' に分け、次式の形に分解する。

$$u_i = \bar{u}_i + u_i'$$

$$P = \bar{P} + P'$$

$$T = \bar{T} + T'$$

(iii) 乱流エネルギー式

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_q \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \nu_t S - \epsilon + g_i \beta \nu_\theta \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right)$$

ただし、 $\nu_q = \nu_t / \sigma_q$ (σ_q は定数)

$$\nu_\theta = \nu_t / \sigma_\theta$$
 (σ_θ は定数)

$$S = \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$$

(iv) 消散エネルギー式

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \nu_t \frac{\epsilon}{k} S - C_2 \frac{k \epsilon}{\nu t} + C_3 g_i \beta k \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right)$$

ただし、 $\nu_\epsilon = \nu_t / \sigma_\epsilon$ (σ_ϵ は定数)

$$C_1 \sim C_3 \text{は定数}$$

(v) 温度拡散式

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu_\theta + a) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right\}$$

ただし、 $\nu_\theta = \nu_t / \sigma_\theta$ (σ_θ は定数でプラントル数)

$$a: \text{温度拡散率 (m}^2\text{/sec)}$$

なお、記号の意味は次のとおりである。

- x_i : 位置ベクトル
- u_i : 速度ベクトル
- P : 密度当りの圧力
- ν : 動粘性係数
- β : 体積膨張率
- g_i : 重力加速度
- T : 温度

2-2 離散化の方法

「HOTFLOW II」で扱える運動方程式の離散化の方法をTable 1に示す。

流体の運動方程式は、①強い非線形性を持っていること、②連続の式と同時に解かねばならないこと、などの制約から、陽解法による離散化が最も一般的に行われて

Table 1 運動方程式の離散化方法

解法	対流項の差分スキーム	基礎となる計算手法
陽解法	風上差分法	SMAC法
半陰解法	風上差分法	SIMPLE法
	斜め風上差分法	SUDS法
	2次の重みつき風上差分法	QUICK法

きた、しかしながら、運動方程式を陽解法で計算していく場合、計算のタイムステップがある安定性条件（クラン条件、拡散数条件）を満足しなければならず、タイムステップを大きくとることができない場合がある。

これに対し陰解法、半陰解法により離散化を行うと、安定性の条件からくるタイムステップの制限は緩和され、陽解法よりタイムステップを大きくとることが可能となる。そのため、問題によっては陽解法よりも全体の計算時間を小さくできる場合もある。

「HOTFLOW II」では、運動方程式については、陽解法（SMAC法）と3つの半陰解法（SIMPLE法、SUDS法、QUICK法）、各輸送方程式（湿度、濃度、乱流エネルギー、消散エネルギー）については陽解法と陰解法の3手段を任意に選択できるようになっているため、問題に応じた最適の計算が行える。

Table 2に「HOTFLOW II」で扱える運動方程式の陽解法（SMAC法ベース）と半陰解法（SIMPLE法ベース）の比較を示す。

なお本論では、運動方程式と温度拡散式の離散化方法として、コントロールボリューム法に基づく半陰解法（SIMPLE法）と陰解法を採用した。

§ 3. 解析モデル及び解析条件

3-1 模型装置の概要

(1) 模型

「HOTFLOW II」を使用して、気流および温熱環境の予測を試みるために、Table 3に示す仕様で模型を製作した（Fig.2, Photo 1）。この模型には、次に示す2つの役割を持たせた。

実験ケース①

本論の主テーマである「HOTFLOW II」の実用性確認試験用モデル

実験ケース②

某植物工場の屋内温熱環境を実験的に予測するための1/20模型

しかし、運動方程式を半陰解法で解析する場合でも、タイムステップの制限を完全に免れることはできず、膨大な計算時間になりかねない。従って、フレキシビリティに富む実験ケース①の条件の一部（吹出しノズル径および空気速度）を、実験ケース②と換気回数を同一にするという条件のもとに変更した（Table 4）。

なお、実験ケース②に関する報告は他の機会に譲るが、吹出し・吹込みを伴う室内気流であるため、アルキメデス数の一致を設計条件とした。さらに、レイノルズ数の大小が気流および温熱環境に与える影響を解明するために、レイノルズ数を10倍まで上げられるようにした。

また、外部からレーザー光を照射し、模型内部の気流性状を可視化するために、その材料に透明アクリルを使用した。屋根は、育成台車や熱電対などの設置を容易に行うために、取り外し可能とし、パッキンで気密性を維持した。

Table 2 陽解法と半陰解法の比較(運動方程式)

項目	解法	陽解法 (SMAC法ベース)	半陰解法 (SIMPLE法ベース)
運動方程式の離散化		テイラー展開による方法	コントロール・ボリューム法
運動方程式の計算方法		連続計算法	・SOR法 ・ADI法(三重対角法) ・ガウスザイデル反復法
連続の式の解法		圧力同時緩和法	圧力同時緩和法
計算メモリ		小さなメモリで可能	大きなメモリが必要となる
1サイクルの計算時間		小さい	連立方程式を解くため大きい
タイムステップ		小さい	大きい
必要な時間までの計算ステップ数		多い	少ない
計算精度		・1次精度の半陰解法よりよい ・評価は容易	・タイムステップを大きくすると精度は悪くなる。 ・評価が難しい。

Table 3 実物と模型の仕様

項目	実物	模型 (1/20)
寸法	44.6m × 10m × 4.45m	2.23m × 0.5m × 0.223m
吹出しノズル径	φ50mm	φ2.5mm
吹出空気速度	17m/s (~50°C)	3.80m/s ~ 38.0m/s (~50°C)
吹出しノズル本数	50カ所	50カ所
給気量 (1本当り)	2.00m³/min	1.12ℓ/min ~ 11.2ℓ/min
給気量 (50本)	100m³/min	56ℓ/min ~ 560ℓ/min
排気口面積	0.87 × 0.87 = 0.757m²	0.043 × 0.043 = 1.892 × 10⁻³m²
排出空気速度	1.14m/s	0.164m/s ~ 1.64m/s
排気量 (1台当り)	52m³/min	18.7ℓ/min ~ 187ℓ/min
排気量 (3台)	156m³/min	56ℓ/min ~ 560ℓ/min
吹出しノズルにおけるレイノルズ数 ($Re = \frac{U L}{\nu}$)	47,752.8 ($\frac{17 \times 50 \times 10^{-3}}{1.78 \times 10^{-5}}$)	533.7 ~ 5,337.1 ($\frac{3.8 \times 2.5 \times 10^{-3}}{1.78 \times 10^{-5}} \sim \frac{38.0 \times 2.5 \times 10^{-3}}{1.78 \times 10^{-5}}$)
吹出しノズルにおけるアルキメデス数 ($Ar = \frac{g B L}{U^2}$)	9.3 × 10⁻⁵ $\frac{9.8 \times 0.00366 \times 15 \times 50 \times 10^{-3}}{17^2}$	9.3 × 10⁻⁵ ~ 9.3 × 10⁻⁷ $\frac{9.8 \times 0.00366 \times 15 \times 2.5 \times 10^{-3}}{3.8^2} \sim \frac{9.8 \times 0.00366 \times 15 \times 2.5 \times 10^{-3}}{38^2}$

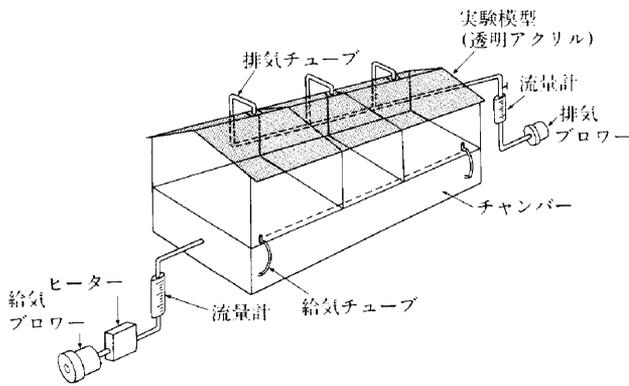


Fig.2 模型のイメージ

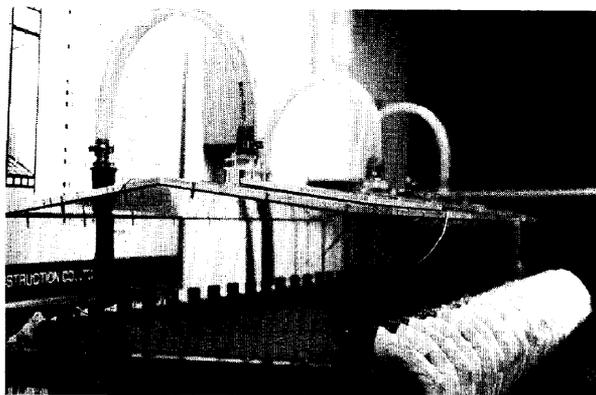


Photo 1 模型の外観

合計50本の吹出しノズルにおいて、均一な吹出し風速を得るために、模型下部にチャンバーを設け、各ノズルの吐出圧力の均一化を図った。また3個の排気口からの

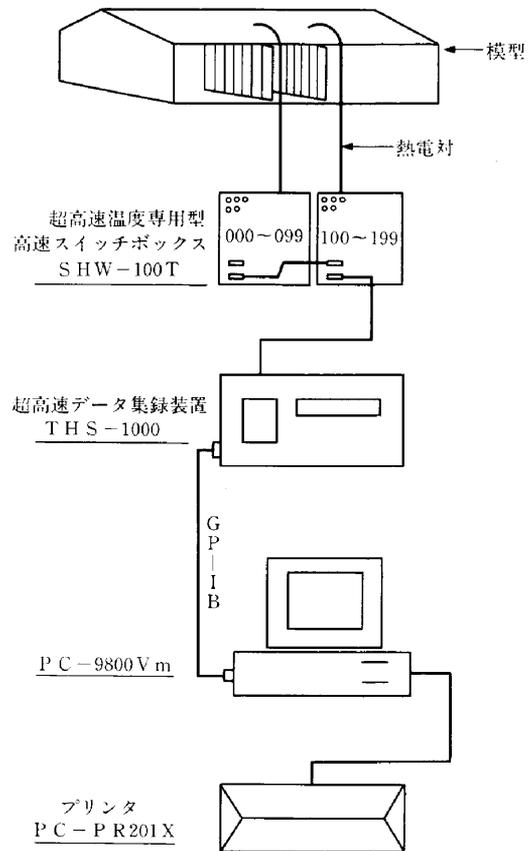


Fig.3 温度計測のフロー

排気量のバランスは、各排気管に取り付けた傾斜管マンメータで管理した。なお給・排気量は、インバータによるファンの回転数制御により、任意に設定することができる。

(2) 計測システム

屋内空気性状の実験的解析手法として、①熱電対による温度分布の測定（定量的解析）と②気流の可視化（定性的解析）を試みた。

実験で使用した熱電対は、JIS C1602（熱電対）に規定されている T 熱電対である。これは、+脚に純銅線、-脚に銅とニッケル合金のコンスタンタン線を使用している。許容差は、 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ または測定温度の $\pm 0.4\%$ (0.4級) で、超高速データ集録装置 (THS-1000, 榊東京測器研究所) の許容差 $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ を考慮しても最大誤差 $\pm 0.65^{\circ}\text{C}$ で屋内環境制御精度として満足できるものである。なお計測のフローを Fig.3, 熱電対の設置状況を Photo 2 に示す。

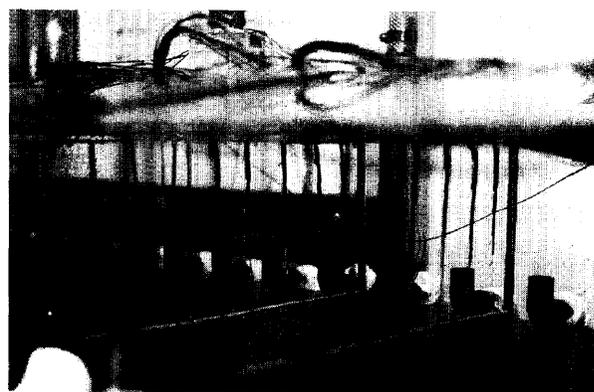


Photo 2 熱電対の設置状況

気流の可視化には、出力 4 W の光源をもつアルゴンイオンレーザー可視化システム (LLS, 理化精機工業株) を使用した。これは、ファイバースコープにレーザー光を入射し、その先端部に取り付けられたシリンドリカルレンズから LLS (スリット光のように薄くかつ面的なひろがりを持つ光) を取出し、それを観察断面に照射し 2 次元的に気流性状を把握するものである。ただし、レーザー光照射による側方散乱光を目視により観察する手法なので、トレーサとして煙 (オンジナオイル) や空気の物性に限りなく近い微粉体を用いた。

3-2 解析モデルおよび解析条件

(1) 解析モデル

Fig.2 に示す模型を 3 分割し、その中央部 (吹出しノズル 14 個, 排気口 1 個含む) を解析の対象とした。計算メッシュは $21(X) \times 23(Y) \times 12(Z) = 5,796$ である (Fig.4)。

(2) 解析条件

解析モデルにおける流動環境条件は、左右、天井および底面はすべりなし壁、そして手前と向側面はすべり壁 (対象条件) とした。吹出しノズルや排気口からの空気速度は、Table 4 に示した実験条件に合わせた。

熱的境界条件は、左右、天井および底面に対しては外部温度と統括熱伝達率を与え、流体部の熱伝導をも考慮して境界温度を決めている。外部温度は 20°C とし、解析モデル内温度の初期値もそれに合わせた。また手前と向側面は、断熱壁条件とした。

なおタイムステップは、0.05秒である。

§ 4. 数値解析結果と実測値との比較検討

4-1 数値解析結果

数値解析により得られた、吹出しノズルと排気口を含

Table 4 実験条件

項	目	実験条件
吹出しノズル径		$\phi 13\text{mm}$
吹出し空気速度		1 m/sec
吹出し空気温度		40°C
排出空気速度		1.2 m/sec
排気量 (50本)		400 l/min
排気量 (3本)		400 l/min
吹出しノズルにおけるレイノルズ数		730
吹出しノズルにおけるアルキメデス数		7.0×10^{-3}

TIME=1199.9952 CYCLE=24000 SECTION=Y-2

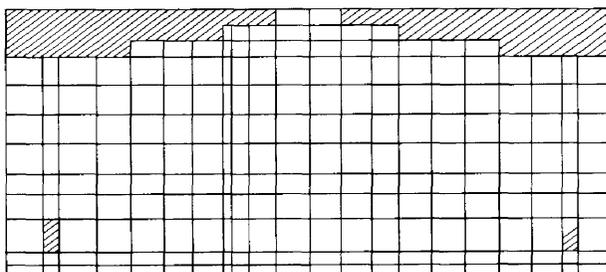


Fig.4 計算メッシュ ($21 \times 23 \times 12 = 5,796$)

む断面の気流 (ベクトル表示) と温度 (コンター表示) 分布を Fig.5 に示す。これは、気流および温度がほぼ定常となった 20 分後の分布である。

この図から、気流に関して次のことが言える。

- ① 両端の吹出しノズルからの噴流は、周囲の空気を誘引し、その後天井面に沿い上昇し排気口へ向かう。
- ② 排気口を境に、向って右側では半時計回りの循環流が形成されている。
- ③ しかしその中心部では、図 (紙面) に垂直方向の速度成分はほとんどない。
- ④ また左側では、循環流の形成は見られず左方向への一様流となっている。
- ⑤

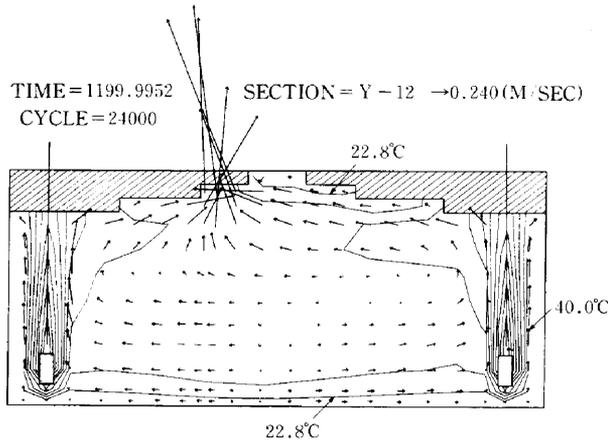


Fig.5 数値解析による空気性状1)
(吹出しノズルと排気口を含む断面)

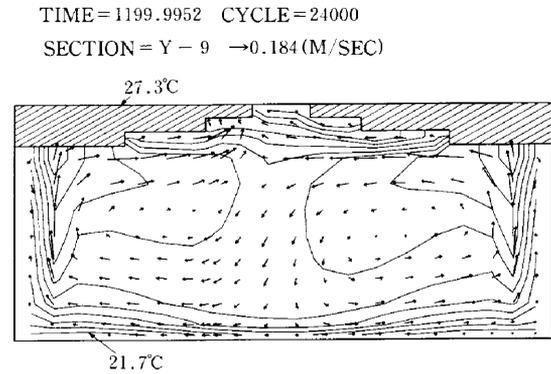


Fig.7 数値解析による空気性状2)
(吹出しノズルと排気口を含まない断面)

床面（底面）では、排気口のある位置を境に、それぞれ左右に床面に平行な気流を形成している。

また温度に関しては、吹出しノズル出口空気温度を40℃、天井および床面近傍の温度を約23℃とし、その間を9等分のコンター線で描いたものである。室中心部の温度は、設計温度である25℃付近にある。なお温度分布の計算値を Fig.6 に示す。

Fig.7は、吹出しノズルと排気口を含まない断面の気流と温度分布を示したものである。同様にこの図から判断する限り、次のことが言える。①断面の両端では、隣

接する吹出しノズルからの噴流の影響を強く受け、Fig.5と同じく天井に沿う流れが発生している。ただしその流速は、Fig.5の約70%である。②両端の天井面近傍に、下降流が発生している。③排気口のある位置を境に、向って右側では半時計回り、また左側では時計回りの循環流が形成されているが、その流速は非常に小さい。④床面近傍の気流については、Fig.5と同じ傾向を示しているが、その大きさも小さい。

また温度に関しては、両端の天井面近傍に最高温度27.3℃、その下方床面近傍に最低温度21.7℃が分布しており、その間を9等分のコンター線で描いたものであ

TEMPERATURE-T *TIME=1199.9952 *CYCLE=24000 (吹出しノズルと排気口を含まない断面)

*10**1 J=9

I =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
K=12	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.300	2.316	2.312	2.169	2.157	2.150	2.133	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
K=11	2.000	2.000	2.000	2.000	2.398	2.366	2.362	2.300	2.316	2.312	2.315	2.281	2.150	2.133	2.237	2.303	2.383	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
K=10	2.505	2.789	2.681	2.605	2.398	2.366	2.362	2.403	2.453	2.456	2.395	2.371	2.352	2.306	2.237	2.303	2.383	2.625	2.703	2.788	2.514	2.514
K=9	2.505	2.789	2.681	2.605	2.598	2.588	2.576	2.570	2.557	2.525	2.469	2.480	2.516	2.550	2.574	2.597	2.615	2.625	2.703	2.788	2.514	2.514
K=8	2.448	2.695	2.652	2.623	2.607	2.596	2.586	2.580	2.569	2.540	2.509	2.523	2.556	2.583	2.598	2.610	2.618	2.632	2.665	2.699	2.451	2.451
K=7	2.398	2.669	2.590	2.567	2.565	2.566	2.563	2.554	2.547	2.535	2.520	2.533	2.559	2.578	2.584	2.579	2.570	2.569	2.604	2.665	2.398	2.398
K=6	2.372	2.663	2.536	2.532	2.542	2.546	2.545	2.542	2.539	2.532	2.524	2.534	2.554	2.568	2.570	2.557	2.542	2.525	2.544	2.602	2.369	2.369
K=5	2.365	2.614	2.513	2.518	2.527	2.533	2.536	2.535	2.533	2.529	2.524	2.531	2.547	2.556	2.552	2.538	2.522	2.507	2.498	2.541	2.350	2.350
K=4	2.358	2.557	2.489	2.497	2.508	2.518	2.525	2.526	2.526	2.524	2.521	2.526	2.537	2.539	2.530	2.513	2.495	2.481	2.473	2.437	2.338	2.338
K=3	2.332	2.456	2.427	2.441	2.460	2.480	2.495	2.505	2.507	2.509	2.509	2.511	2.513	2.508	2.489	2.464	2.440	2.422	2.409	2.262	2.311	2.311
K=2	2.244	2.280	2.267	2.290	2.324	2.366	2.405	2.441	2.450	2.460	2.469	2.470	2.457	2.426	2.380	2.333	2.290	2.262	2.249	2.262	2.224	2.224
K=1	2.145	2.132	2.115	2.134	2.163	2.196	2.226	2.259	2.271	2.293	2.316	2.317	2.282	2.250	2.213	2.177	2.141	2.115	2.108	2.123	2.130	2.130

TEMPERATURE-T *TIME=1199.9952 *CYCLE=24000 (吹出しノズルと排気口を含む断面)

*10**1 J=12

I =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
K=12	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.490	2.511	2.447	2.170	2.167	2.256	2.242	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
K=11	2.000	2.000	2.000	2.000	2.468	2.457	2.488	2.490	2.511	2.447	2.342	2.327	2.256	2.242	2.340	2.385	2.455	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
K=10	2.657	3.251	2.827	2.674	2.468	2.457	2.488	2.512	2.538	2.513	2.486	2.471	2.456	2.420	2.340	2.385	2.455	2.704	2.866	3.233	2.654	2.654
K=9	2.657	3.251	2.827	2.674	2.636	2.607	2.584	2.576	2.559	2.538	2.537	2.553	2.571	2.589	2.606	2.632	2.663	2.704	2.866	3.233	2.654	2.654
K=8	2.521	3.403	2.774	2.642	2.606	2.587	2.573	2.564	2.556	2.551	2.559	2.577	2.591	2.602	2.609	2.618	2.630	2.661	2.818	3.387	2.511	2.511
K=7	2.489	3.536	2.703	2.568	2.562	2.559	2.554	2.551	2.551	2.552	2.559	2.571	2.580	2.585	2.585	2.582	2.575	2.573	2.748	3.523	2.473	2.473
K=6	2.494	3.676	2.649	2.541	2.541	2.543	2.544	2.544	2.545	2.546	2.550	2.559	2.566	2.568	2.564	2.555	2.544	2.534	2.683	3.668	2.478	2.478
K=5	2.494	3.813	2.605	2.522	2.526	2.531	2.534	2.536	2.537	2.539	2.541	2.546	2.546	2.541	2.533	2.524	2.515	2.506	2.625	3.809	2.480	2.480
K=4	2.480	3.903	2.555	2.499	2.507	2.514	2.520	2.525	2.526	2.527	2.529	2.529	2.522	2.514	2.504	2.493	2.484	2.476	2.563	3.901	2.466	2.466
K=3	2.470	4.000	2.474	2.448	2.461	2.473	2.483	2.491	2.493	2.496	2.499	2.492	2.482	2.473	2.460	2.448	2.473	2.426	2.466	4.000	2.457	2.457
K=2	2.287	2.916	2.293	2.302	2.330	2.357	2.380	2.398	2.403	2.410	2.417	2.404	2.386	2.368	2.346	2.322	2.299	2.278	2.286	2.901	2.276	2.276
K=1	2.145	2.249	2.123	2.131	2.150	2.170	2.188	2.207	2.215	2.225	2.233	2.216	2.200	2.182	2.163	2.144	2.127	2.114	2.116	2.234	2.137	2.137

Fig.6 数値解析による温度分布の計算値

る。なお、温度分布の計算値は Fig.6 に示すとおりであり、室中心部の温度は設計温度の25.0℃付近にある。

4-2 実測値

(1) 温度の実測値

既述した市販プログラムの解析結果を定量的に評価するために、「3-1 模型装置の概要」で述べた方法により、模型内の温度分布を実験的に求めた。吹出しノズルと排気口を含む断面の温度分布を、Fig.8 に示す。これは、初期温度20℃の空間に40℃の温風を吹出し、約2時間後の定常状態とみなせる時点のものである。最高温度は32.2℃で右側吹出しノズル上方に、また最低温度は26.6℃で右下床面近傍に存在し、平均温度は約28.3℃である。Fig.9 は、吹出しノズルと排気口を含まない断面の温度分布である。最高温度は28.5℃でその位置はFig.8 にはほぼ等しく、また最低温度は26.6℃で左下床面

近傍に存在し、平均温度は約27.6℃である。

(2) 気流の可視化

同様に、解析結果を定性的に評価するために、「3-1 模型装置の概要」で述べた方法により、模型内の気流パターンを実験的に求めた。なおトレーサーには、オンジナオイルを使用した。

Photo 3 は、吹出しノズルと排気口を含む断面の気流パターンであり、これから次のことが言える。①両端の吹出しノズルからの噴流は、周囲の空気を誘引し、その後天井面に沿い上昇し排気口へ向かう。②排気口の位置を境に、向かって右側では半時計回りの循環流が形成されている。③また、左側では逆に時計回りの循環流の形成が見られる。

Photo 4 は、吹出しノズルと排気口を含まない断面の気流パターンであり、同様にこれから次のことが言える。

29.9 (0.3)	28.5 (1.8)	28.3 (2.2)	28.6 (2.8)	28.3 (2.9)	27.3 (1.8)	28.5 (2.6)	29.0 (2.7)	28.8 (1.8)	31.2 (1.8)
30.1 (0.5)	28.0 (1.6)	28.3 (2.4)	28.3 (2.6)	27.9 (2.4)	28.5 (2.7)	28.7 (2.7)	28.7 (2.5)	28.8 (2.2)	31.8 (2.3)
28.2 (-1.9)	29.1 (3.4)	28.1 (2.5)	28.1 (2.6)	27.8 (2.3)	28.1 (2.4)	28.3 (2.4)	28.3 (2.5)	28.5 (2.8)	32.2 (2.2)
30.2 (-0.7)	28.1 (2.7)	27.9 (2.5)	27.9 (2.5)	28.0 (2.5)	27.9 (2.3)	28.1 (2.4)	27.9 (2.4)	27.7 (2.4)	30.4 (-0.4)
28.0 (-3.9)	27.8 (2.8)	27.8 (2.7)	27.8 (2.5)	27.9 (2.4)	27.8 (2.5)	28.0 (3.1)	27.8 (2.9)	27.4 (2.6)	27.8 (-4.1)
	26.9 (4.6)	27.3 (3.7)	27.4 (5.0)	27.4 (3.3)	27.3 (3.3)	27.1 (3.4)	26.6 (3.4)	26.6 (3.8)	

() : 実測値-計算値 単位:℃

Fig.8 模型実験による温度の実測値(1)
(吹出しノズルと排気口を含む断面)

28.1 (1.6)	28.0 (1.9)	27.8 (1.9)	27.4 (1.7)	27.3 (2.0)	26.7 (1.9)	26.8 (1.3)	27.9 (1.9)	28.5 (2.2)	28.5 (2.0)
27.6 (2.0)	27.9 (1.7)	28.0 (2.0)	27.9 (2.1)	27.6 (2.2)	26.6 (1.4)	27.0 (1.2)	28.0 (1.9)	28.4 (2.1)	27.7 (2.1)
27.5 (2.1)	27.6 (1.9)	27.8 (2.1)	27.7 (2.2)	27.5 (2.1)	26.8 (1.5)	27.1 (1.3)	27.9 (2.1)	- (-)	27.6 (2.2)
27.2 (2.0)	27.1 (1.8)	27.5 (2.0)	27.6 (2.2)	27.4 (2.1)	26.7 (1.4)	27.2 (1.5)	27.7 (2.1)	28.0 (2.7)	27.3 (2.2)
26.6 (2.0)	26.7 (1.7)	27.6 (2.4)	28.0 (2.7)	27.7 (2.5)	- (-)	28.0 (2.6)	28.2 (3.1)	28.4 (3.6)	28.0 (3.6)
	26.6 (3.7)	27.0 (3.3)	28.1 (3.7)	27.8 (3.2)	27.5 (2.8)	27.7 (3.4)	28.1 (4.8)	28.2 (5.6)	

() : 実測値-計算値 単位:℃

Fig.9 模型実験による温度の実測値(2)
(吹出しノズルと排気口を含まない断面)

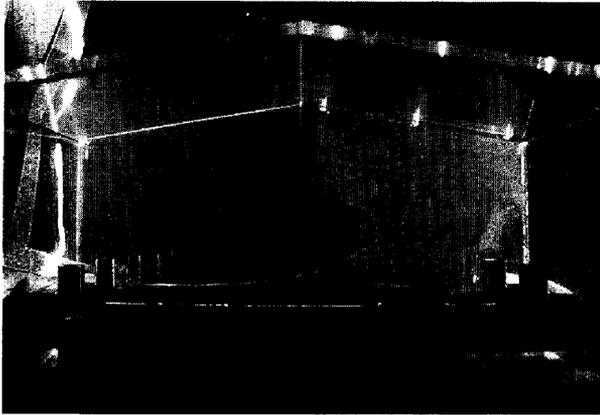


Photo 3 気流の可視化(1)
(吹出しノズルと排気口を含む断面)

- ①排気口のある位置を境に、向かって右側では時計回り、また左側では時計回りの循環流が形成されている。
②ただし左側の循環流は非常に不安定で、右側の循環流に吸収されることが多く、発生と消滅を繰り返している。

なおトレーサの分散性が悪いのか、それとも気流そのものが存在しないのか両写真に共通して床上付近の気流の詳細な状態は把握できなかった。

4-3 数値解析結果と実測値の比較検討

(1) 定量的比較検討

Fig.8, 9の図中に併記した()内の数値は、実測値から計算値を差引いたものである。この計算値は、実測値に対応する計算格子点のものである。しかし両端部(左右各5点)については、その対応性が完全にとれなかったため、隣接する2データの平均値とした。

吹出しノズルと排気口を含む断面の実測値と計算値の差 (Fig.8 参照) についてみると、室中心部で約2.5℃、両端部で-4.1~2.2℃そして床上で約3.8℃である。流動条件および温度差の激しい両端部を除いて、その値はほぼ一定値とみなすことができる。また吹出しノズルと排気口を含まない断面 (Fig.9 参照) においては、室中心部および両端部で約2.0℃ 床上で約3.8℃とそれぞれほぼ一定値とみなすことができる。すなわち、流動条件や温度差が比較的穏やかな場所では、両者の温度分布は相似性を有し、計算値にある一定の値を考慮すれば、定量的に一致する。

なお、床上の実測値が計算値に比べて高いのは、床上に吹出し風量および温度を均一にするために設けたチャンバーの影響と考えている。

(2) 定性的比較検討

気流パターンで、基本的に計算と実測 (可視化) で差異が生じたのは、吹出しノズルと排気口を含む断面においてである。すなわち、その左断面において、計算では

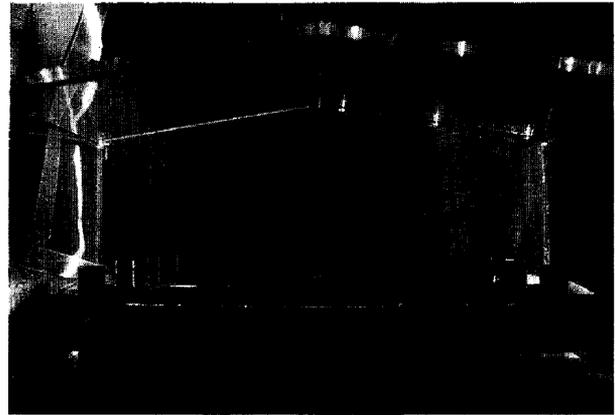


Photo 4 気流の可視化(2)
(吹出しノズルと排気口を含まない断面)

左壁へ向かう床面に対する平行流であるが、実測では時計回りの循環流となっている。しかしその流速 (計算値) は0.1m/sec以下であり、実際上平行流であるのか循環流であるのか居住環境に与える影響としては少ないと考えられる。また吹出しノズルと排気口を含む断面の可視化において、図の左側の循環流が非常に不安定で右側のそれに吸収されるが、流速が小さいので (0.1m/sec以下) 実用上無視できる。従って、両者は定性的にほぼ一致すると判断できる。

§5. おわりに

市販の熱流体解析プログラムを用いて得られた数値解析解を、その解析モデルと同一の模型を用いた実験結果と比較検討してきた。その結果、本論で扱った条件において得られた結果を以下に示す。

①計算値と実測値との定量的整合性について

流動条件や温度差が比較的穏やかな場所では、計算値にある一定の値を加えることにより、実測値と一致する。すなわち、温度分布に相似性が見られる。

②計算値と実測値との定性的整合性について

流速が無視し得るほど小さい (0.1m/sec) 場所以外では、計算と実測 (可視化) は定性的によく一致する。

以上より、本論で使用した熱流体解析プログラム「HOTFLOW II」は、定量性を追求する場合には一つの解析条件に基づいた実験的補足が必要だが、定性的評価だけを行う場合には問題ない。

最後に、数値解析に際し適切なアドバイスを頂いた(株)構造計画研究所 高嶋氏、また模型の製作に協力を頂いた(株)理化精機工業(株) 浜氏に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 流れの可視化学会編：流れの可視化ハンドブック，朝倉書店，1986
- 2) 日本機械学会編：流れの数値シミュレーション，コロナ社，1989
- 3) 林構造計画研究所編：3次元熱流動解析プログラム HOTFLOW II 利用者マニュアル，1988
- 4) 勝田・土屋：室内空気分布の模型実験法に関する研究第1・3報，空気調和・衛生工学会論文集，No.17，1981年10月
- 5) 中原・後藤・宮川：室内空気分布に関する模型実験と実測 その1，空気調和・衛生工学，第45巻第10号
- 6) 村上・加藤・孔・中川：大架構建築内の温熱・空気環境に関する研究，生産研究，UDC628.88：53.023
- 7) 村上・加藤・須山：乱流数値シミュレーションの診断システムに関する研究(第2報)，日本建築学会，1985
- 8) 堤・浦野・西田：閉空間における3次元熱対流の数値解析と可視化実験，日本建築学会，第368号，1986