

# スーパーコンピュータによるガラス屋根を持つ大空間内の 気流・温度分布の数値シミュレーション

片岡 浩人 表 佑太郎

## Numerical Simulations by Super Computer of Fluid Flow and Temperature Distribution in Room with Glazed Roof

Hiroto Kataoka Yutaro Omote

### Abstract

Numerical simulations of fluid flow and temperature distribution in a room with a glazed roof were carried out with a super computer. The results appeared to show that the principal characteristics of the flow and temperature field were well-simulated. The performances of air-conditioning units which are to be set were also estimated to be almost sufficient for this room. The numerical method, however, applied to calculations of radiation from the sun and heat transfer coefficients at the wall surface should be improved to simulate local characteristics accurately.

### 概 要

ガラス屋根を持った大空間内の気流・温度分布の予測を、スーパーコンピュータを用いて行なった。その結果、全体的な流れ場の特徴はよく再現されているものと考えられる。また、計画されている設備機器の能力がほぼ妥当なものであることも結果から予測された。しかし局所的な分布までも正確に予測するには、日射条件や壁面における熱伝達率の計算方法に改善の余地がある。

### 1. はじめに

近年のコンピュータの性能の向上には著しいものがあり、その恩恵を最も受けている分野の一つとして、流れの数値解析技術がある。

流体の運動を記述する基礎式である Navier-Stokes 方程式は、非線形の偏微分方程式群で構成されており、理論的に解くことは一部の単純な流れ場を除いて不可能である。そのため、コンピュータによる数値解析が不可欠であり、その計算対象となる問題もスーパーコンピュータの出現により大規模で緻密なものとなってきている。

また、流体の問題を扱う場合大きな障害となるものの一つに乱流の存在がある。実在の流れ場のほとんどが乱流状態にあり、この乱流現象そのものまでも直接計算で解くことは現在のスーパーコンピュータをもってしても未だに厄介な問題である。そのため現在では乱流をモデル化して扱う場合がほとんどで、そのモデルも乱れの指標である  $k$  と  $\epsilon$  を用いた 2 方程式モデルが大半である。これは流れ場の状態や場所によって異なる乱れの状態を上記の二つの変数の輸送方程式を解くことによって求める方法である。強いて言うならば、コンピュータの発達

とともにこの 2 方程式モデルの出現があったからこそ今日の様に広く工学分野において流れの数値解析が行なわれるようになったと言える。

しかしモデルはあくまでモデルであって、その妥当性には当然限界が存在する。また数値解析を行なう以上離散化の際に生じる誤差や、境界条件の適合性の問題は避けて通れない。これらのことを考慮すると、流れの数値解析技術は実用的な予測手法として決して完成されたものとは言えず、むしろ今後新たな乱流モデルの導入や離散化の改良に伴ってさらに発展していくものと考えられる。

ところで建築設備において流れの数値解析が最も多く行なわれているのは、クリーンルーム内の気流分布予測に関する分野である。この問題では計算領域内に卓越しかつ安定した流れ場が存在していることや、形状が比較的単純であることなど、数値解析の対象としてはこのうえない問題である。例えば村上・加藤ら<sup>1)</sup>によると、クリーンルーム内の全体的な流れ場は実験結果と比較してほぼ満足のいく解が得られることが報告されている。

一方、流れの数値解析技術の応用が強く期待されている分野として、近年多く見られるようになったアトリウ

ムや開閉屋根式ドームなどの大空間内における気流温度分布の予測、さらには事務室内における個別空調システムの効果の予測が挙げられる。しかしこれらの現象は先のクリーンルーム内の流れとは異なって、領域全体が卓越した流れ場によって必ずしも満たされないことや、温度成層による乱れの非等方向性が現在の2方程式モデルでは必ずしも再現されないことなどが、数値解析を行なう上で問題となる。さらに輻射や人体発熱などの熱的な境界条件の最適な与え方が存在しないことも相まって、この分野に関する報告は少ない。しかし、従来からの模型実験による予測手法では、その準備にかかる手間と費用は膨大なものであり、熱的な相似則を満たすことが困難であることが多いことを考えると、流れの数値解析によるいわゆる数値実験は、空調設備の計画段階において非常に有益な情報をもたらしてくれるものとする。同様な観点から坂本ら<sup>3)</sup>はガラス屋根に覆われたアトリウム内部の気流・温度分布に関する計算を行ない、その予測結果から設備計画にとって有用な多くの情報を得ることができることを示している。

この稿ではスーパーコンピュータ（日本電気製 SX-1EA）を用いて、ガラス屋根を持った大空間内部の気流・温度分布を予測した結果について報告する。使用したソフトは汎用流体解析プログラム STREAM Ver 2.3<sup>4)</sup>である。

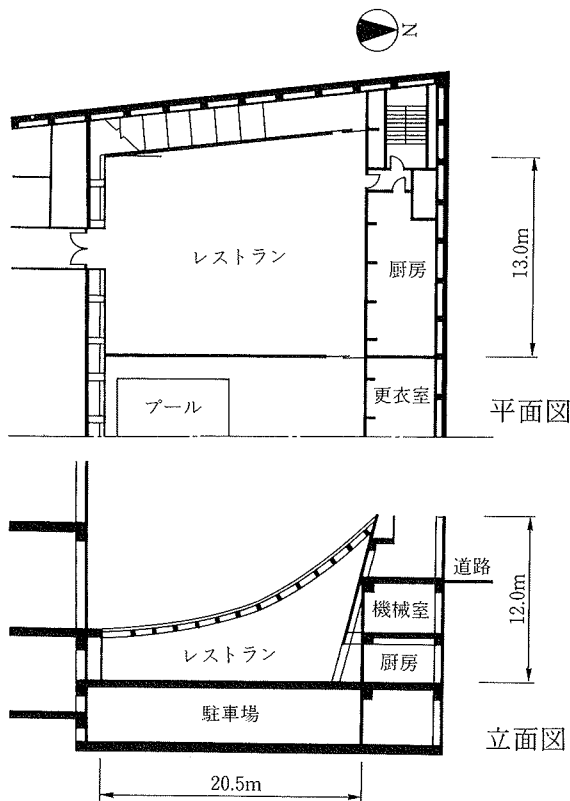


図-1 計算の対象となる建物

## 2. 計算対象

計算の対象となる建物を図-1に示す。この建物は地上20階地下3階からなるツインタワーの北隣に位置するもので、レストラン、スイミングプール、アスレチッククラブなどがテナントとして計画されている。意匠的な特徴として、曲面を持ったガラス屋根に覆われていることが挙げられる。このことは内部の空調設備に多大な影響を及ぼす。省エネルギー的な観点からは、特に夏期において居住域である床面付近のみを空調し、屋根面付近の大きな負荷が見込まれる場所はできるだけ吹出し気流が到達しないことが望ましい。

この報告では、この建物の夏期における以下のような三つの状況を予測することを問題として設定し、計算を行なった。

- ①非空調時：休日の日中、空調を行なわないで放置した場合。
- ②空調時I：吹出し風量、温度ともに一定で空調を行なった場合。
- ③空調時II：吹出し風量は一定で、現在計画されている能力で空調を行なった場合。

計算で用いたメッシュ図を図-2に示す。対象となる領域を西側のレストランとし、これを  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.5\text{ m}$  の三次元の直行座標系で分割したものである。

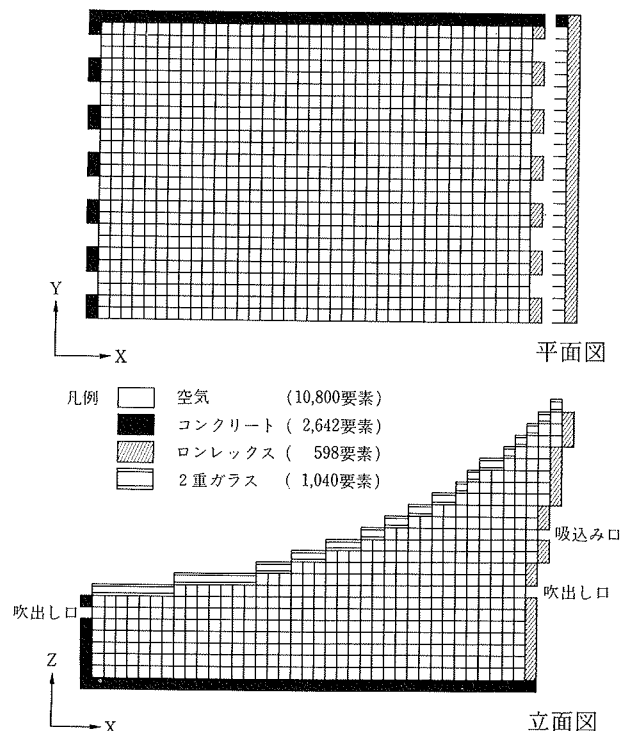


図-2 メッシュ図

### 3. 基礎式と計算条件

#### 3.1. 基礎式

解析に使用した基礎式を以下に示す。

連続の式

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

運動方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] - g_i \beta (T - T_{ref})$$

エネルギーの保存式

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho C_p T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_t \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + q$$

k-ε 方程式

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_s + G_r - \epsilon$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_j \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right]$$

$$+ C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_s + G_r) (1 + C_3 R_f) - C_2 \frac{\epsilon^2}{k}$$

ただし

$$G_s = \nu_t \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$G_r = g_i \beta \frac{\nu_t}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad R_f = -\frac{G_r}{G_s + G_r}$$

$$\nu_t = \nu + \sigma_t \frac{k^2}{\epsilon} \quad \Gamma_t = \Gamma + \frac{\nu_t}{\sigma_T}$$

$$C_1 = 1.44 \quad C_2 = 1.92 \quad C_3 = 0.0$$

$$\sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\epsilon = 1.3 \quad \sigma_t = 0.09 \quad \sigma_T = 0.9$$

このプログラムではこれらの基礎式を、対流項に関しては1次精度風上差分、拡散項については中心差分、時間項については単純前進差分を用いて離散化し、SIMPLE アルゴリズムに基づいて計算を行なう。

#### 3.2. 物性値

計算に必要な物性値は、表-1のように与えた。

コンクリートの熱伝導率は500 m<sup>2</sup>のスラブの熱貫流率2.0 kcal/m<sup>2</sup> h°Cを、ロンレックスの熱伝導率は120 mm<sup>2</sup>のALC板内壁の熱貫流率0.84 kcal/m<sup>2</sup> h°Cの値を、それぞれ0.5 mの厚さに等化換算したものである。

さらに二重ガラスは、普通板ガラス3 mm二重でブラインドありの熱貫流率2.54 kcal/m<sup>2</sup> h°Cを0.5 mの厚さに等化換算した。

#### 3.3. 日射条件

ガラス屋根における日射は、全天日射を1とした場合

	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	ν (m <sup>2</sup> /s)	C <sub>p</sub> (kcal/kg °C)	Γ (kcal/ms °C)	β (1/°K)
空気	1.205	1.5E-5	0.24	6.20E-6	0.003413
コンクリート	2,200		0.21	2.78E-4	
ロンレックス	710		0.27	1.17E-4	
2重ガラス	1.205		0.24	3.53E-4	

表-1 物性値

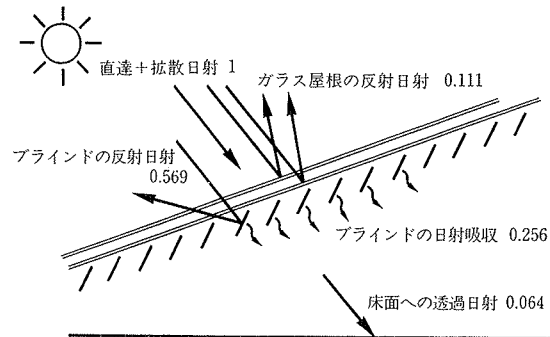


図-3 ガラス屋根における日射条件

の各割合を図-3に示す。

ブラインドが吸収した日射はガラス屋根直下のセルに発熱源として、また、室内に透過した日射は、床上直上のセルに発熱源として与えた。

屋根面の全天日射は、屋根を勾配で0°, 5°, 20°, 40°の4とおりに分割し、それぞれの勾配での直達日射に拡散日射を加えたものを、水平の投影面に換算して求めた。計算領域内の日射の負荷の合計はそれぞれブラインドの日射吸収が約72,000 kcal/h、室内への透過日射が約18,000 kcal/hである。

これら輻射による発熱は、厳密に言えば、日射を受ける固体表面の温度を境界条件として再現するのが望ましい。そのためには固体表面の要素ごとに、日射による熱取得と、対流や周囲への長波輻射による熱損失のバランスのもとに、温度分布を解く必要がある。しかし、計算対象となる形状が複雑な場合、長波輻射を求めただけでも計算に要する時間やプログラミングに要する時間は膨大なものになり、筆者らの知る限りにおいてはこれらを実行した例はない。今回用いた方法では吸収された日射がすべて室内負荷になり、空調時においては機器に不利側に働くことから、計算の目的からすると大きな問題とはならない。しかし非空調時の室内温度や、空調時でも屋根面付近の温度はこれらの仮定による誤差を含んでいることを考慮しておかねばならない。

#### 3.4. 人体発熱

領域内における収容人員を0.435人/m<sup>2</sup>、一人当たりの発熱量を顕熱のみの55 kcal/人 hとし、床上の2番目から3番目までのセルに発熱源として与えた。計算領域

内の人体発熱の合計は約 5,500 kcal/h である。

### 3.5. 隣室条件

屋根、壁、床各部の隣室および屋外の温度条件と、各部での熱伝達率は表一2のように与えた。

室名	室温 [°C]	熱伝達率	
		(内側) [kcal/m <sup>2</sup> h]	(外側) [kcal/m <sup>2</sup> h]
階下	29.2	10.0	5.0
北面 (厨房)	25.0	10.0	10.0
(機械室)	29.2	10.0	10.0
(屋外)	33.4	10.0	15.0
南面	29.2	10.0	10.0
西面	33.4	10.0	10.0
東面	完全断熱	—	—
屋根面	33.4	10.0	15.0

表一2 隣室条件

### 3.6. 吹出し、吸込み風速条件

吹出し、吸込みの各条件は表一3のように設定した。現在計画されている吹出し口は大きさが 1.0 m<sup>W</sup>×0.3 m<sup>H</sup> でルーバー付きであることや、計算では各吹出し口に対して格子数が2個しか取れていないことから、到達距離など吹出し気流そのものの性状は必ずしも再現されるものではないが、領域全体に及ぼす影響はさほど大きくないと考える。

	吹出し口 (1 m <sup>W</sup> ×0.5 m <sup>H</sup> )			吸込み口 (1 m <sup>W</sup> ×0.5 m <sup>H</sup> )		
	北側 (6 箇所)		南側 (6 箇所)	北側 (6 箇所)		
	風速 [m/s]	総風量 [m <sup>3</sup> /s]	温度 [°C]	風速 [m/s]	総風量 [m <sup>3</sup> /s]	温度 [°C]
非空調時	—	—	—	—	—	—
空調時 I	1.62	4.86	15	0.54	1.08	15
空調時 II	1.62	4.86	※	0.54	1.08	※

※ 空調時 II では南北の吹出し口各1個と吸込み口1個をダクトで結び、その途中に13,350kcal/h(部屋全体で80,100kcal/h)の冷却熱量を与えた。

表一3 吹出し、吸込み風速条件

## 4. 計算結果

### 4.1. 非空調時

室温の初期値を外気温と同じ33.4°Cとし、空調を行わないまま2時間放置した時の気流および温度分布の予測を試みた。この場合、人体発熱は見込んでいない。計算は時間刻みを1秒に固定して7,200ステップ進めた。計算に要した時間は約6時間であった。図一4、5に南北の垂直断面(y=7.25 m)内の気流ならびに温度分布を示す。

躯体への蓄熱や貫流熱のため、部屋全体に上下方向のゆるやかな温度勾配が形成され、屋根面上部で約50°C、床面付近で約44°C近くにまで上昇した。気流は、上空では屋根面に沿って北向きの流れが生じ、床面付近では壁

面に沿って生じた下降気流が部屋のほぼ中央で衝突する形となっている。

### 4.2. 空調時 I

吹出し口の温度を15°Cに設定して空調を行なった場合の計算結果を図一6、7に示す。

居住域では20~22°C程度に温度が保たれている一方、ガラス屋根付近ではブラインドの日射吸収のために温度は高く、特に吸込み口の上部では40°C程度の高温の安定成層が形成される。吹出し気流は温度差により吹出し角度10°よりも低い位置で床面に到達し、南北の気流が衝突する位置で緩やかな上昇気流となって屋根面に到達する。その後ブラインドからの熱を吸収しながら屋根面に沿って上昇し、吸込み口へと到達する。吸込み口上部では強い安定成層によって、気流の上昇は妨げられる。このような大空間では、特に冷房時において吹出し口及び吸込み口を出来るだけ居住域近くに設けることが、設備計画上望ましいことが、この結果から分かる。

### 4.3. 空調時 II

北壁の吸込み口1箇所について北壁と南壁の各1箇所ずつの吹出し口をダクトで結び、その途中に計画されている空調機器の能力を配分し、より現実に近い状態での計算を行なった。従って吹出し風速はIの場合と同じであるが、吹出し温度は吸込み温度と空調器の能力に依存することになる。結果を図一8、9に示す。

吸込み温度約28°Cに対して吹出し温度は15°C前後となり、吸込み温度がIの場合と比べて2°C程上昇したものの、全体の温度分布の計算結果はIの場合と大差ないものとなった。吸込み温度が上昇したのは、ダクトを計算領域内に取り込む際、吹出し口及び吸込み口回りの壁面を一部省略したことにより、この面からの貫流熱が減少したことによるものと考えられる。また、吹出し口での風向をIの場合のように10°下向きに設定できなかったために、特に北側からの吹出し気流が床面に到達する位置が遠くなった。

計算結果から、計画されている空調機器はほぼ妥当な能力であると言える。

## 5. おわりに

計算結果として得られた領域内の「全体的な」温度分布や気流分布は、対象とした問題の特性を再現していると言える。しかし「局所的な」(例えば吹出し気流周辺や屋根面直下)分布については、本文中に述べたようにメッシュの粗さや日射の条件の与え方によるところが大きい。メッシュの粗さはハードウェアの能力の範囲内での改善は容易である。しかし、日射条件の与え方については坂本ら<sup>2)</sup>も述べているように流れの数

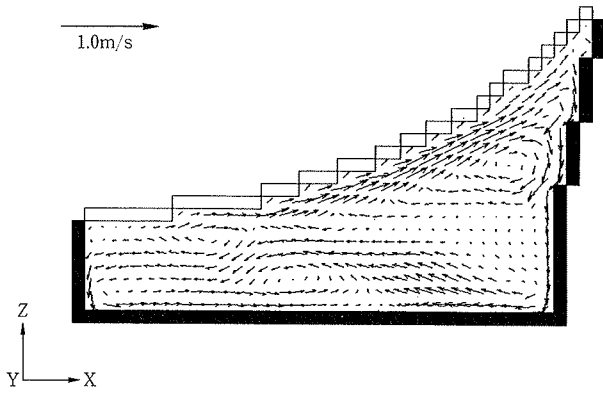


図-4 非空調時の気流分布 (y=7.25 m)

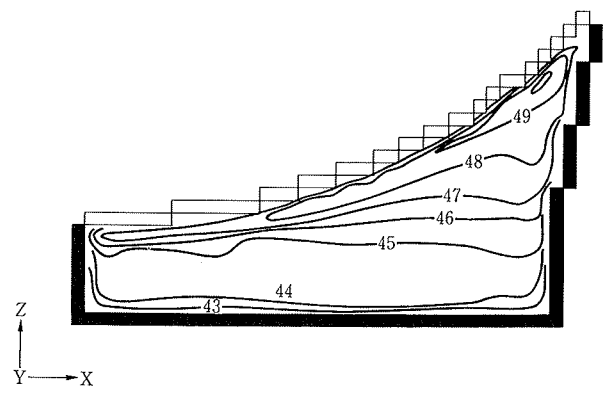


図-5 非空調時の温度分布 (y=7.25 m)

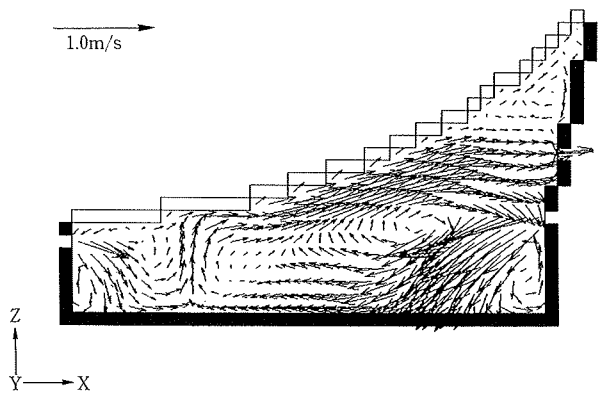


図-6 空調時 I の気流分布 (y=7.25 m)

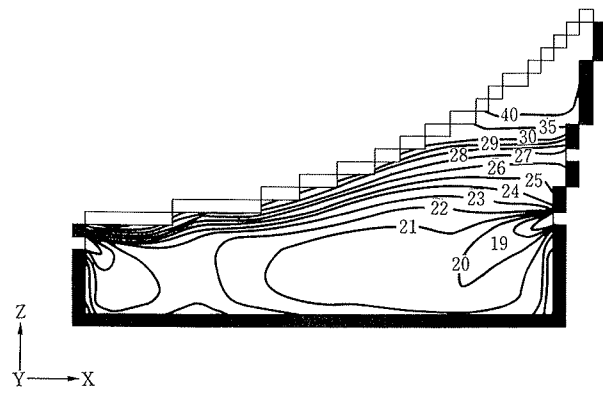


図-7 空調時 I の温度分布 (y=7.25 m)

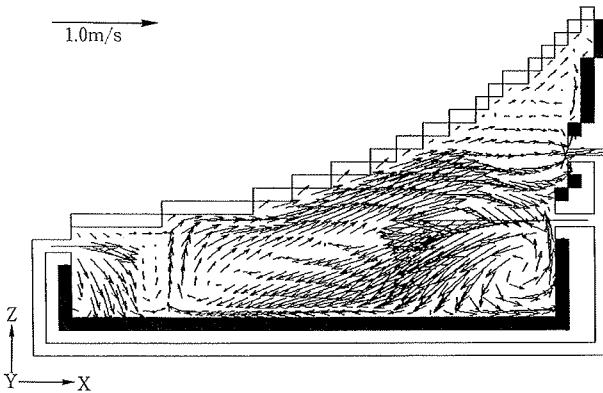


図-8 空調時 II の気流分布 (y=7.25 m)

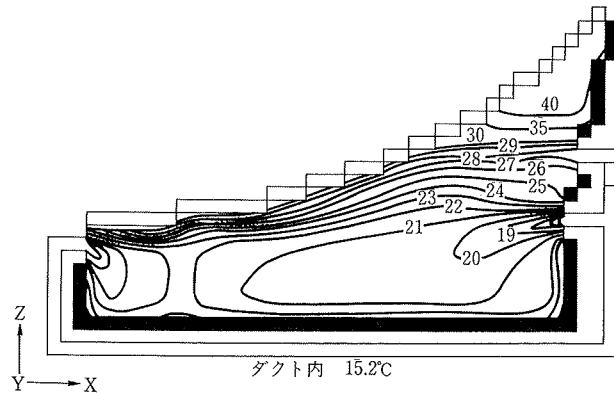


図-9 空調時 II の温度分布 (y=7.25 m)

値解析のような緻密な手法に較べて条件設定に粗さがあるので、今後充分検討していく必要がある。また今回の計算では一定値を与えた固体表面の熱伝達率は、本来はその近傍の流れ場の状態に依存するものなので、適切に表現する為には、乱流モデルなど流れの数値解析技術をより厳密に研究する必要がある。

参考文献

1) 村上・加藤・須山：クリーンルーム内の気流性状に

関する研究(その5)，日本建築学会大会学術講演梗概集 D, (1985), pp. 259～260

2) 坂本・関根，他：数値解析による大空間の気流・温度分布に関するケーススタディ，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 (1987), pp. 161～164

3) ソフトウェアクレイドル：3次元熱流体解析プログラム STREAM Version 2 使用説明書