

層流型クリーンルームにおける熱上昇気流に関する研究

西岡利晃

A Study on Heat Currents in Vertical Laminar Flow Clean Room

Toshiaki Nishioka

Abstract

Heat currents above a heat source installed in a vertical laminar flow (VLF) clean room were investigated both experimentally and numerically. In the experimental approach, parametric surveys for 12 kinds of air flow velocities and 4 kinds of surplus heat provide 48 temperature distributions. The results showed that when the mean downward air flow velocity was 0.20 m/s or greater the plume of the heated air was completely suppressed and rose only to a height of 25 cm. Computer codes simulating the turbulent flow were applied to analyze the three-dimensional heat current and to predict the temperature and the velocity. The velocity distribution clearly indicated the area within which the heat current disturbed the vertical flow. Comparisons between the experiment and the calculation provided significant information on how to apply the computer simulation to a practical design.

概要

垂直層流型クリーンルームに設置された熱源からの上昇気流を、実験と数値シミュレーションで解析した。4種類の発熱量と12種類の吹き出し気流速度を、組合わせて48種類の温度分布の測定結果を得た。実験結果によれば、気流速度が0.20 m/s以上で、熱上昇気流を効果的に制御することができ、熱上昇気流も熱源上25 cmの高さに収まる。上昇気流の範囲を R_i 数で定量化した。実験と同じモデルで数値シミュレーションを行ない、温度分布と気流分布を求めた。実験とシミュレーションで、熱源近傍の温度分布は必ずしもよい一致を示さなかったが、上昇気流の影響範囲を求めるためには、数値シミュレーションは十分役に立つことを示した。

1. はじめに

一方向に整流されたダウンフロー方式（いわゆる垂直層流型）クリーンルームでは、発生した塵埃が周囲に広がらないうちに直ちに室外に排除することにより、室内を常に高潔度に保つ。同時に、汚染を嫌う製品やゾーンを一方向流で覆うことにより、周囲から塵埃が到達するのを防ぐ。整流を乱す原因にたいしては、注意深く対策が取られる。例えば大きな渦の発生を、できるだけ少なくするように、装置や仕器の鋭いエッジを丸めたり、ガイドペーンを設ける等の対策が取られる。装置の高温部や加熱されたウエハによる熱上昇気流も、整流を乱す原因となる。前者は、覆いをして排気により冷却が可能であるが、後者は、周囲の整流によりコントロールせざるを得ない。このため吹き出し気流速度をどのように決定するかは設計の重要な課題である。これに関しては殆ど報告がなく、わずかに経験的な値が与えられているにすぎない¹⁾。このような高温熱源により生じる熱上昇気流が、クリーンルーム内の整流におよぼす影響と、その効果的な制御法を実験と数値解析により検討した。

2. 熱上昇気流の実験

2.1 実験装置²⁾

装置の概要を図-1、2に示す。全面垂直層流クリーンルーム（HEPA フィルターの面積比82%）のほぼ中心に事務用脇机を設置、その上に電熱器を設け、電熱器上部空間の温度分布を求める。温度測定点の詳細を図-3に示す。温度は、耐熱被覆を施したクロメルアルメル熱電対を使用して測定した。

2.2 実験条件の種類

表-1に示す吹き出し気流速度と発熱量をパラメータとし、計48種類の組合わせの実験を行なった。発熱量の変化はスライダックで電圧を調節して与え、気流速度はインバータによるファンの回転数制御によった。

2.3 実験結果

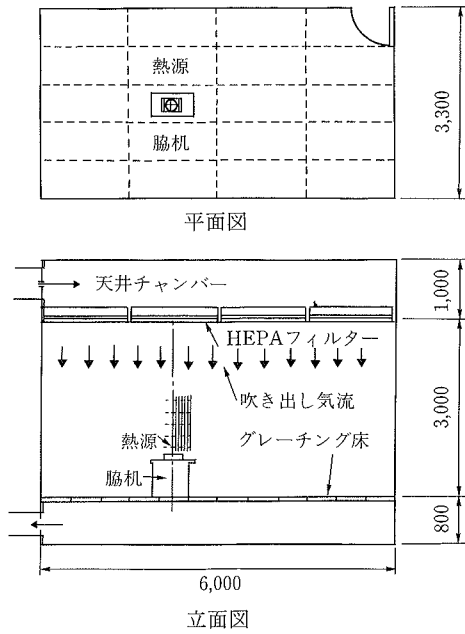
2.3.1 予備実験

(1) 熱源表面温度

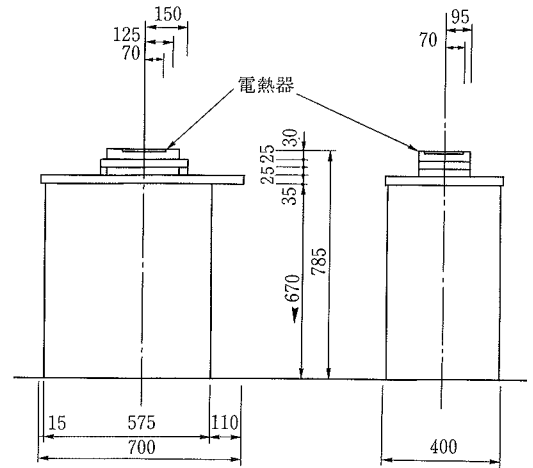
4種類の熱量（投入電力）と、各吹き出し気流速度での熱源表面温度の測定結果を図-4に示す。投入電力が小さいほど、表面温度が低くなるが、気流による変化は

表一 実験条件

| | |
|-----------------------|--|
| 発熱量 (kcal/h) | 516(600w), 430(500w), 344(400w), 258(300w) |
| 吹き出し 気流速度 (m/s) | 0.45, 0.4, 0.35, 0.30, 0.25, 0.2, 0.15, 0.10, 0.05, 0.025, 0.01, 0 |



図一 実験装置
(クリーンルームと熱源)



図二 熱源の詳細

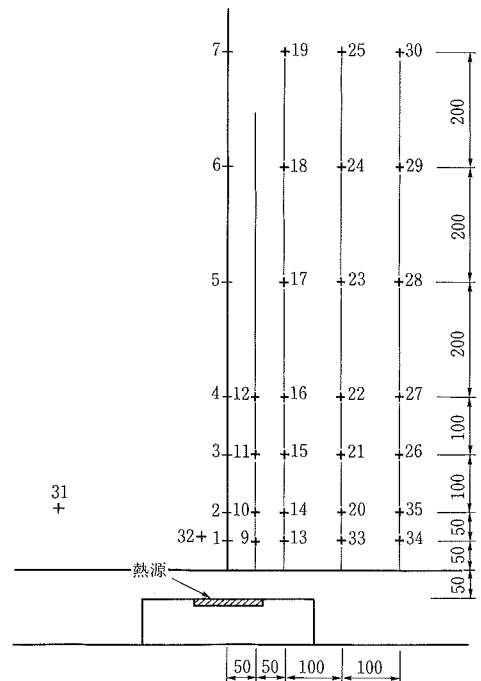
少なくほぼ一定温度である。

(2) 輻射の影響

輻射の影響を検討するため、熱源直上(熱源中心)5 cm のところで、輻射よけをつけた熱電対と、そうでない熱電対を用いて温度測定を行なった。輻射よけは、熱電対を金メッキした。結果を図一5に示す。図より明らかなように下降気流速度が大きくなるほど両者の差は大きく、ある速度以上になると、その差は一定になる。気流の低速時には熱源による上昇流とバランスし、伝達の効果がネグレクトされるためと思われる。これにより輻射の影響は補正できるので実験では輻射よけを用いなかった。

2.3.2 温度分布 発熱量が516 kcal/hの場合の温度分布の実験結果を図一6に示す。図より明らかなように吹き出し気流速度0.2 m/sのところでは温度分布に明確な差が認められる。このことは、他の発熱量の場合も同じである。この範囲の発熱量では、発熱量にかかわらず、吹き出し気流が0.2 m/s以上では、上昇気流が効果的に抑制されており、影響範囲は、熱源上約25 cm程度までである。

2.3.3 熱上昇気流の定量化 温度上昇域は、熱源からの熱量と下降気流速度によって決まる。熱量と速度の比はリチャードソン数 R_i に帰着する。吹き出し気流速度との差が10°Cである熱源中心軸上の距離 $H_{\theta=10}$ とリチャードソン R_i 数との関係を図一7に示した。リチャードソン R_i 数は以下による。



図三 温度測定位置

$$R_i = \left(\frac{g\beta Q}{\gamma C_p l u^3} \right)^{\frac{2}{3}}$$

u ; 気流速度, Q ; 発熱量, l ; 熱源の直径
 β ; 空気の体膨張率, γ ; 空気の比重
 C_p ; 空気の定圧比熱, g ; 重力加速度

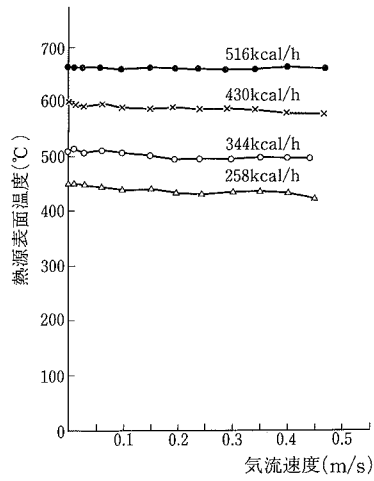


図-4 熱源表面温度

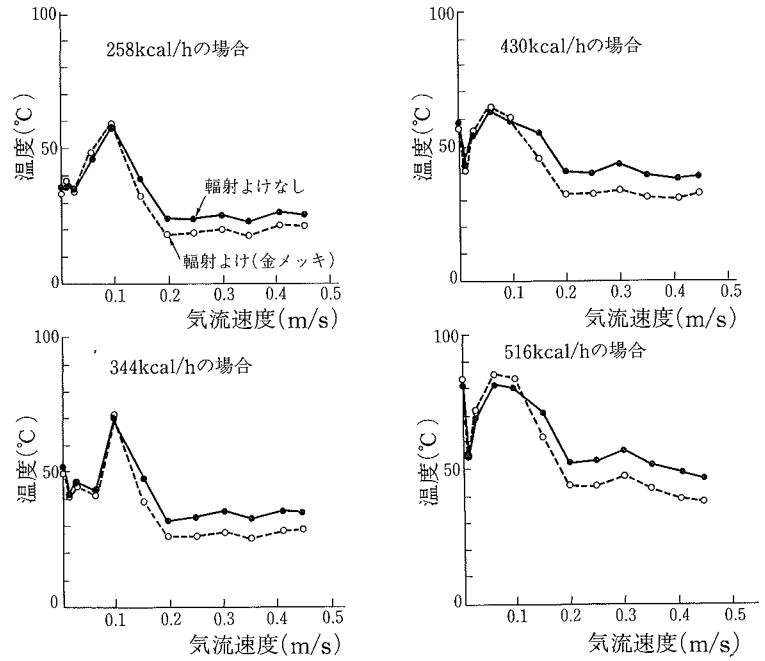


図-5 輻射の影響

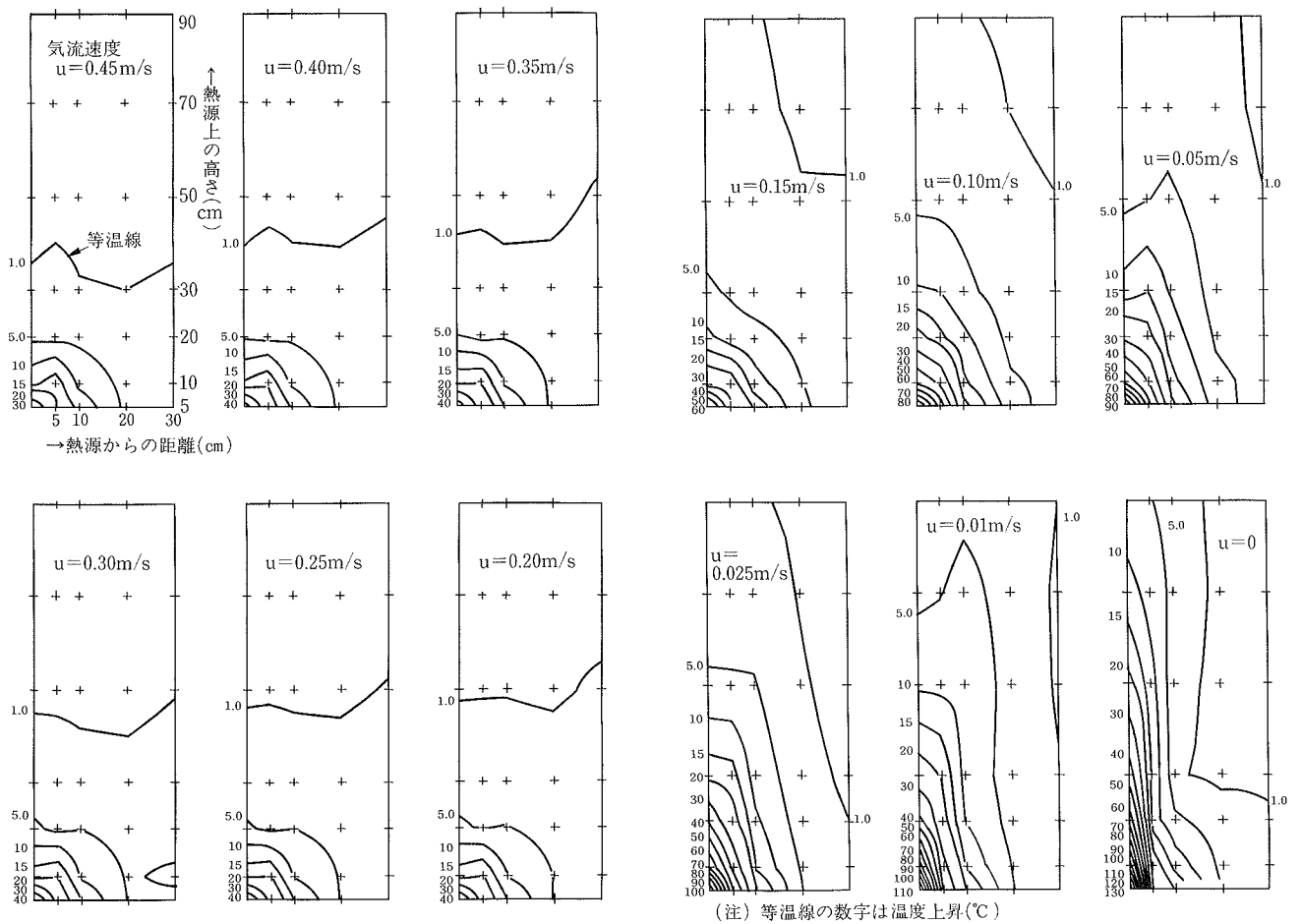


図-6 熱源上の温度分布 (516 kcal/h の場合)

3. 熱上昇気流の数値シミュレーション

3.1 シミュレーション概要

クリーンルームは気流の詳細な分布の情報自体が役に立つ数少ない例である。数値シミュレーションでは、気流や温度の詳細な分布が得られる。基本的なモデルで実験を行ない、その結果と数値シミュレーションとを比較し、計算モデルや境界条件の調整を行なえば、シミュレーションにより適用範囲を広げたり、より詳しい情報を得ることができる。前述の温度分布実験と同じモデルに数値シミュレーションを適用し、実験結果との照合を行なった。計算モデルを図-8に示す。図-9に示す2種類のメッシュシステムで計算を行なった。ただしメッシュタイプ1は領域も小さくした。

3.2 計算概要

乱流モデルは2方程式 ($k-\epsilon$) モデルを用いた。

数値解析用の空間分割は、コントロールボリューム法による。変数の配置はスタッガード格子を用いた。移流項に関しては1次精度風上差分、拡散項に関しては中心差分、時間項に関しては単純前進差分を用いて離散化し、

SIMPLE 法を用いた³⁾。マトリクスの計算は圧力補正式のみ MICCG 法、速度は JACOBI 法、その他のスカラー量は ILUCR 法によった⁴⁾。使用したソフトは汎用流体プログラム「STREAM V 2.3」で、スーパーコンピュータ (日本電気製 SX-1 EA) を用いて計算した。

物性値を表-2に示す。

境界条件は以下の通りである。

表-2 空気 の 物性値

| 密度 (kg/m ³) | 動粘性係数 (m ² /s) | 体膨張率 (1/°C) | 定圧比重 (kcal/kg°C) | 熱伝導率 (kcal/ms°C) |
|-------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| 1.185 | 1.65×10 ⁻⁵ | 3.66×10 ⁻³ | 0.24 | 6.53×10 ⁻⁶ |

表-3 境界条件

| | 四周壁面 | 天井(流入) | 床(流出) | 熱源 | 机 |
|----------|-----------|------------------|-------|--------|-----|
| 速度 | free slip | 速度 | 速度 | 対数則 | 対数則 |
| 温度 | 断熱 | 基準温度 | —— | 表面温度*1 | 断熱 |
| (乱流量K,ε) | 0 | 10 ⁻² | —— | 0 | 0 |

*1 表面温度800°C, 表面熱伝達率8.348×10⁻³ kcal/ms°C

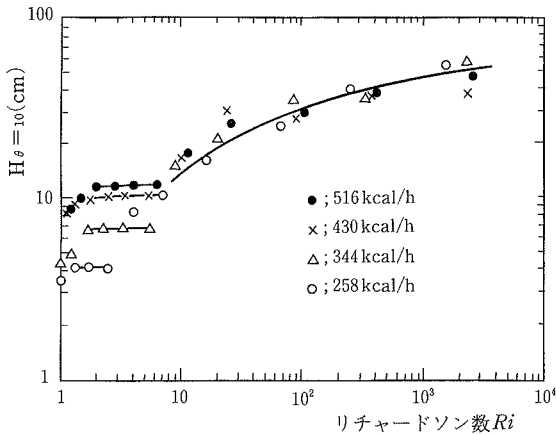


図-7 熱上昇気流の定量化

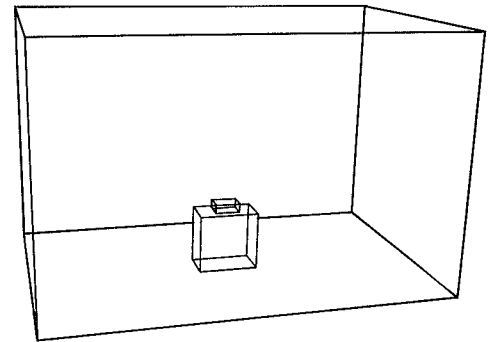


図-8 シミュレーションの対象

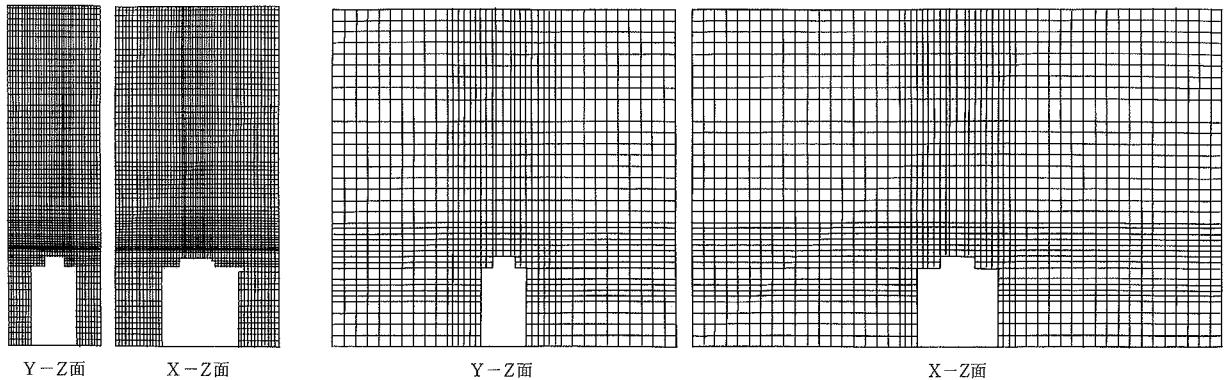


図-9 メッシュシステム (右:メッシュ1, 左:メッシュ2)

速度；四周の壁面は摩擦なし (free slip), 熱源および熱源を設置する机には対数則を用いた。天井および床は開口とし, 天井に流入境界を与え, 床は流出境界とした。

温度；熱源には表面温度と伝達率を与えた。その他の壁面は断熱条件とした。これらを表-3に示す。

3.3 結果と考察

3.3.1 自然対流 自然対流による温度分布の計算結果を図-10, 11に示す(吹き出し速度0)。実験結果とスケールを同一にするため熱源近傍を拡大した実験結果と計算結果を図-12, 13, 14に示す。実験は, 発熱量 $9.31 \text{ kcal/m}^2\text{s}$ であり, この時表面温度は約 640°C である。メッシュタイプ1 (図-13) は時間ステップ0.001秒5,000ステップ, 約5秒間の計算である。厳密には定常に達していないと思われる。計算に要した時間は約16.7時間である。メッシュタイプ2 (図-14) は時間ステップ0.01秒1,500ステップ, 約15秒間である。計算所要時間は約2.5時間である。これらの比較より, 熱源近傍ではメッシュ1と良く一致し, 熱源から離れるとメッシュ2と良く一致する。室全体の温度分布を調べるためには, メッシュ2を用いれば良いことが判る。計算結果は, 横への温度上昇が小さい。実験では上昇気流は図-10, 11の計算のように真っ直ぐ上昇せず左右にふれる。したがって時間平均を取ると温度上昇は小さく, 温度範囲は広がるものと思われる。

3.3.2 ダウンフローでの熱上昇気流 天井全面から吹き出すダウンフローでの, 各吹き出し速度に対するメッシュタイプ2の温度分布および気流分布の計算結果を図-15~図-20に示す。吹き出し速度が大きくなるにつ

れて温度上昇域が小さくなるのがよく判る。実験のように 0.2 m/s 前後での明確な温度分布パターン之差は認められず, 吹き出し速度の明確なきい値は確定できない。速度ベクトルの分布と併せて検討すれば, 熱上昇気流が整流を乱す範囲や, これを制御するために必要な吹き出し風速を決定することができる。

4. まとめ

ダウンフロークリーンルームにおかれた熱源による熱上昇気流は, 吹き出し速度のある値を境に明確な2つのパターンに分けられる。本実験の場合, 0.2 m/s を境いに, これより速度が大きい場合, 温度上昇はある範囲におさえられる。速度が小さい場合は室全体に広がる。実験と同じモデルに数値シミュレーションを適用し, 実験

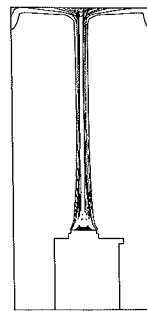


図-10
自然対流の
温度分布
(メッシュ1)

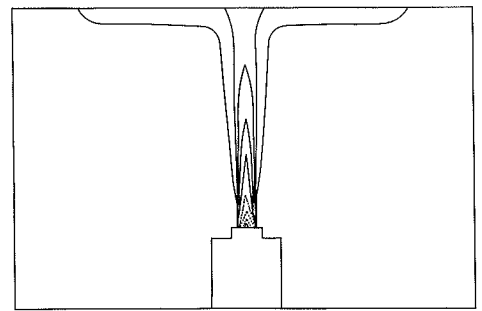


図-11 自然対流の温度分布
(メッシュ2)

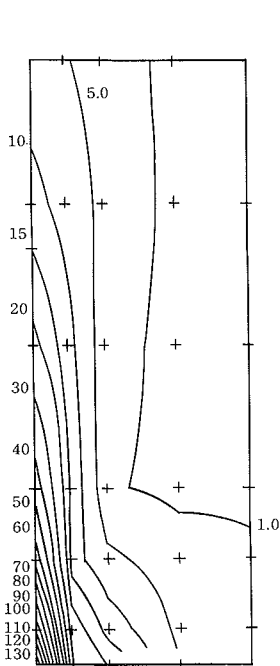


図-12 熱源近傍の温度分布 (実験)

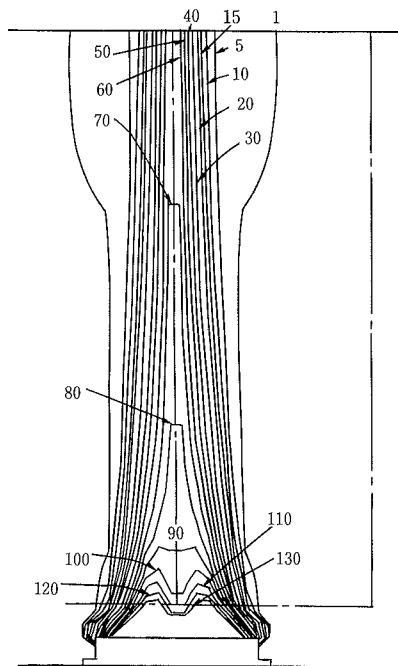


図-13 熱源近傍の温度分布 (メッシュ1)

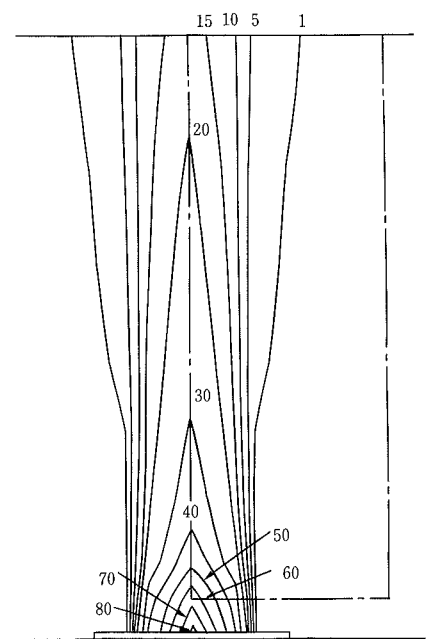


図-14 熱源近傍の温度分布 (メッシュ2)

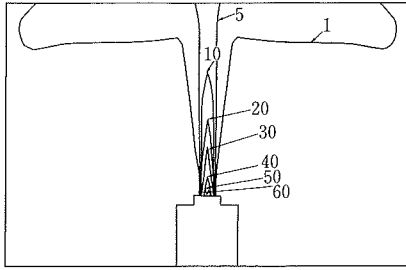


図-15 温度分布
(気流速度 $u=0.01$ m/s)

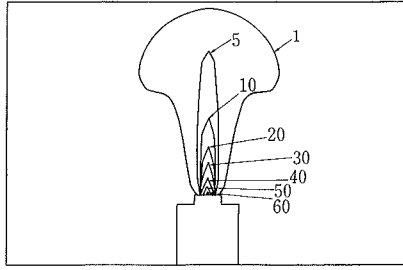


図-16 温度分布
(気流速度 $u=0.25$ m/s)

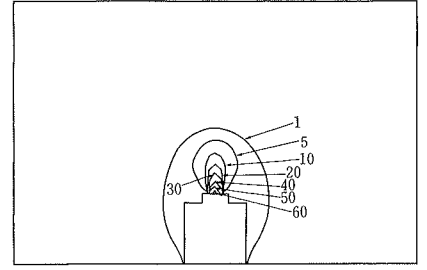


図-17 温度分布
(気流速度 $u=0.45$ m/s)

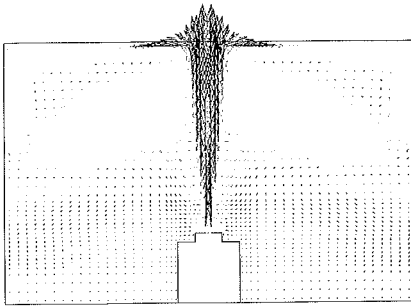


図-18 速度ベクトル
(気流速度 $u=0.01$ m/s)

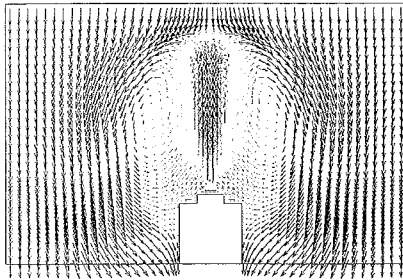


図-19 速度ベクトル
(気流速度 $u=0.25$ m/s)

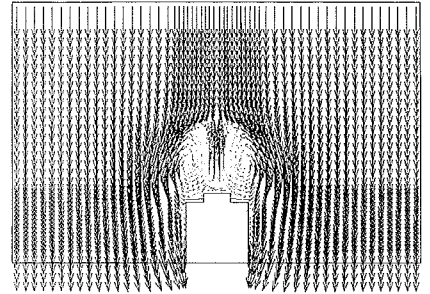


図-20 速度ベクトル
(気流速度 $u=0.45$ m/s)

と比較した。熱源近傍の詳細な温度分布は小さなメッシュを、熱上昇気流の影響範囲を推定するには大きいメッシュを適用すれば充分利用できる。上昇気流のゆらぎを解くために、より適切な乱流モデルやダイレクトシミュレーションを検討する予定である。

参考文献

1) Stokes, K. H.: Clean Room Classification, The Journal

of Environmental Sciences, N/D, p38, (1985)

2) 西岡利晃：クリーンルームの気流解析，第8回コンタミネーションコントロール 研究大会予稿集，空気清浄協会，p. 229, (1989)

3) Patanker, S. V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill Book Co., p. 130, (1980)

4) 村田，他：大型数値シミュレーション，岩波書店，p. 135, (1990)