研　究　速　報
特　集　14
UDC 628.84 : 697.94 : 532.522 : 532.517.4

層流型クリーンルーム内の気流性状・汚染質拡散性状に関する研究(その6)
——床グレーチングの通風抵抗を考慮した新しいk-ε型乱流モデルの提案——

Study on Air Distribution in Laminar Flow Type Clean Room (Part 6)
——Refined k-ε Turbulence Model in consideration of Drag Effect by fine Grating of Subgrid Scale——

村　上　周　三*・加　藤　信　介**・B.E.ロンダー***・鈴　木　啓　泰**
Shuzo MURAKAMI, Shinsuke KATO, B.E. LAUNDER and Hiroyasu SUZUKI

1．は　じ　め　に

層流型クリーンルームでは，室内の高い清浄度を確保するため，天井面から床面に向かう一様な気流により内部で発生した汚染質の拡散防止と速やかな除去を図っている．しかし，室内に設置された生産設備，人体等の気流障害物によりこの気流が乱されるため，特にこれら周辺での流れ場を解析することが必要とされる[1]．また，層流型クリーンルーム内では，天井面の吹出気流がHEPAフィルターの高い圧力損失に助けられ一般に一様風速と見なせることが多い[1]が，床グレーチング面での排気風速に関しては，一様と見なせる例は少なく，むしろ床面での偏流の存在が気流制御上，大きな問題となっている[8]．本研究では，①床グレーチング上面の流速を既知と仮定して，室内のみを解析域とする場合[2~3]（以降Case 1と称す）と②この流速を未知とし床グレーチングの圧損特性等を考慮して，室内から床下排気チャンバーまで解析域とする場合[4]（以降Case 2と称す）の3次元数値シミュレーションを検討する．特に後者に関しては，差分メッシュ間隔以下の細い流体抵抗要素（床グレーチング）の流れ場に対する影響を考慮するために田中らが提案したモデル[8]とは異なり，kのsource term等まで考慮するなど新しいk-ε型モデルを考案・提示すると共に，これを用いて行った簡易な計算例を合わせて示す．

2．解析対象モデルと気流障害物

解析対象の全面垂直層流型クリーンルームを図1に示す．室内に設置される気流障害物のタイプは図2を参照．

3．解　析　領　域

境界条件が既知であれば計算量削減の見地から解析領域は小さいほど望ましい．本研究では，図1に示すように境界面Dの境界条件を既知とし解析領域を室内部分に限った場合（Case 1：境界面C～Dの間）と，境界面Dの風速・圧力分布等を未知とし床グレーチングの圧損特性等を考慮して解析領域を床下排気チャンバーまで拡張した場合（Case2-1およびCase2-2：境界面C～Fの間）の2種類を検討する．特に後者の場合，床グレーチングの形状は一般に微細であり，これを差分格子網にのせて解析することは困難である．本研究では，差分格子に比べ微細な床グレーチングの流れ場に与える影響を新たな見地からモデル化して通常のk-ε型乱流モデルに組み込んでいる．

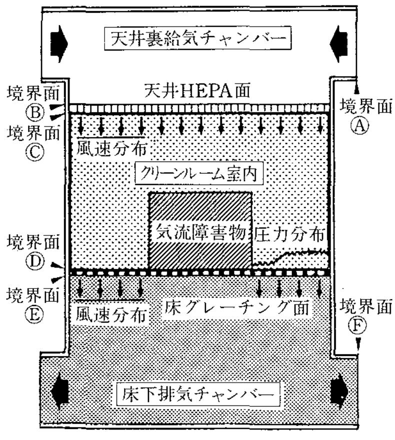


図1　解析領域と境界面

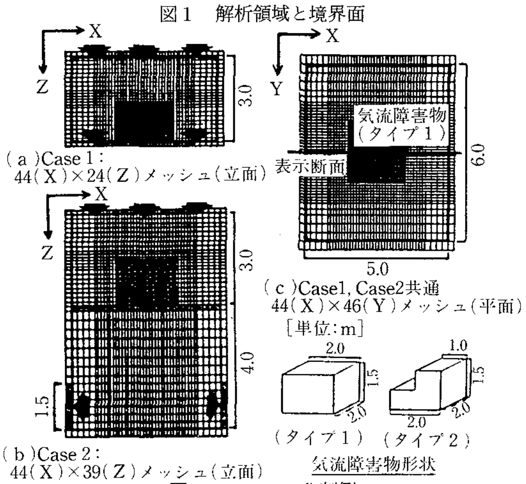


図2　メッシュ分割例

*東京大学生産技術研究所　付属計測技術開発センター
**東京大学生産技術研究所　第5部
***東京大学生産技術研究所　外国人客員研究員

表1　k-ε型2方程式モデル

・連続の式

$$\frac{\partial}{\partial X}(Gx\cdot U)+\frac{\partial}{\partial Y}(Gy\cdot V)+\frac{\partial}{\partial Z}(Gz\cdot W)=0 \tag{1}$$

・平均流の輸送方程式（x方向）

$$Gv\frac{\partial U}{\partial t}+\left\{\frac{\partial}{\partial X}(Gx\cdot U^2)+\frac{\partial}{\partial Y}(Gy\cdot U\cdot V)+\frac{\partial}{\partial Z}(Gz\cdot U\cdot W)\right\}=-\frac{\partial}{\partial X}\left\{Gx\left(\frac{P}{\rho}+\frac{2}{3}k\right)\right\}$$
$$+\frac{\partial}{\partial X}\left\{\nu_t\cdot 2\cdot Gx\frac{\partial U}{\partial X}\right\}+\frac{\partial}{\partial Y}\left\{\nu_t\cdot Gy\left(\frac{\partial U}{\partial Y}+\frac{\partial V}{\partial X}\right)\right\}+\frac{\partial}{\partial Z}\left\{\nu_t\cdot Gz\left(\frac{\partial U}{\partial Z}+\frac{\partial W}{\partial X}\right)\right\}-\frac{1}{2}Fx\cdot|U|\cdot U \tag{2}$$

（Y方向）

$$Gv\frac{\partial V}{\partial t}+\left\{\frac{\partial}{\partial X}(Gx\cdot V\cdot U)+\frac{\partial}{\partial Y}(Gy\cdot V^2)+\frac{\partial}{\partial Z}(Gz\cdot V\cdot W)\right\}=-\frac{\partial}{\partial Y}\left\{Gy\left(\frac{P}{\rho}+\frac{2}{3}k\right)\right\}$$
$$+\frac{\partial}{\partial X}\left\{\nu_t\cdot Gx\left(\frac{\partial V}{\partial X}+\frac{\partial U}{\partial Y}\right)\right\}+\frac{\partial}{\partial Y}\left\{\nu_t\cdot 2\cdot Gy\cdot\frac{\partial V}{\partial Y}\right\}+\frac{\partial}{\partial Z}\left\{\nu_t\cdot Gz\left(\frac{\partial V}{\partial Z}+\frac{\partial W}{\partial Y}\right)\right\}-\frac{1}{2}Fy\cdot|V|\cdot V \tag{3}$$

（Z方向）

$$Gv\frac{\partial W}{\partial t}+\left\{\frac{\partial}{\partial X}(Gx\cdot W\cdot U)+\frac{\partial}{\partial Y}(Gy\cdot W\cdot V)+\frac{\partial}{\partial Z}(Gz\cdot W^2)\right\}=-\frac{\partial}{\partial Z}\left\{Gz\left(\frac{P}{\rho}+\frac{2}{3}k\right)\right\}$$
$$+\frac{\partial}{\partial X}\left\{\nu_t\cdot Gx\left(\frac{\partial W}{\partial X}+\frac{\partial U}{\partial Z}\right)\right\}+\frac{\partial}{\partial Y}\left\{\nu_t\cdot Gy\left(\frac{\partial W}{\partial Y}+\frac{\partial V}{\partial Z}\right)\right\}+\frac{\partial}{\partial Z}\left\{\nu_t\cdot 2\cdot Gz\left(\frac{\partial W}{\partial Z}\right)\right\}-\frac{1}{2}Fz\cdot|W|\cdot W \tag{4}$$

・乱流エネルギー（k）の輸送方程式

$$Gv\frac{\partial k}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial X}(Gx\cdot U\cdot k)+\frac{\partial}{\partial Y}(Gy\cdot V\cdot k)+\frac{\partial}{\partial Z}(Gz\cdot W\cdot k)=\frac{\partial}{\partial X}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_1}\cdot\frac{\partial k}{\partial X}\cdot Gx\right)+\frac{\partial}{\partial Y}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_1}\cdot\frac{\partial k}{\partial Y}\cdot Gy\right)+\frac{\partial}{\partial Z}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_1}\cdot\frac{\partial k}{\partial Z}\cdot Gz\right) \tag{5}$$
$$+\nu_t\cdot S-\varepsilon Gv+\frac{1}{2}C_K\{Gx\cdot(Fx-Fs)\cdot|U|\cdot U^2+Gy\cdot(Fy-Fs)\cdot|V|\cdot V^2+Gz\cdot(Fz-Fs)\cdot|W|\cdot W^2\}$$

・乱流散逸（ε）の輸送方程式

$$Gv\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial X}(Gx\cdot U\cdot\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial Y}(Gy\cdot V\cdot\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial Z}(Gz\cdot W\cdot\varepsilon)=\frac{\partial}{\partial X}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_2}\cdot\frac{\partial\varepsilon}{\partial X}\cdot Gx\right)+\frac{\partial}{\partial Y}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_2}\cdot\frac{\partial\varepsilon}{\partial Y}\cdot Gy\right)+\frac{\partial}{\partial Z}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_2}\cdot\frac{\partial\varepsilon}{\partial Z}\cdot Gz\right) \tag{6}$$
$$+C_1\frac{\varepsilon}{K}\nu_t\cdot S-C_2\frac{\varepsilon^2}{K}\cdot Gv+C\varepsilon\frac{\varepsilon}{k}\cdot\left(\frac{k^{3/2}}{0.15deff}-\varepsilon\right)$$

ただし，
$$S=2\cdot\left\{Gx\left(\frac{\partial U}{\partial X}\right)^2+Gy\left(\frac{\partial V}{\partial Y}\right)^2+Gz\left(\frac{\partial W}{\partial Z}\right)^2+\left(\frac{\partial V}{\partial X}+\frac{\partial U}{\partial Y}\right)\left(Gx\frac{\partial V}{\partial X}+Gy\frac{\partial U}{\partial Y}\right)\right.$$
$$\left.+\left(\frac{\partial W}{\partial Y}+\frac{\partial V}{\partial Z}\right)\left(Gy\frac{\partial W}{\partial Y}+Gz\frac{\partial V}{\partial Z}\right)+\left(\frac{\partial U}{\partial Z}+\frac{\partial W}{\partial X}\right)\left(Gz\frac{\partial U}{\partial Z}+Gx\frac{\partial W}{\partial X}\right)\right\}$$

・渦動粘性係数の算出式

$$\nu_t=C_D\frac{k^2}{\varepsilon}=k^{1/2}\cdot l \tag{7}$$

・濃度（C）の輸送方程式

$$Gv\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial X}(Gx\cdot U\cdot C)+\frac{\partial}{\partial Y}(Gy\cdot V\cdot C)+\frac{\partial}{\partial Z}(Gz\cdot W\cdot C)=\frac{\partial}{\partial X}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_3}\cdot\frac{\partial C}{\partial X}\cdot Gx\right)+\frac{\partial}{\partial Y}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_3}\cdot\frac{\partial C}{\partial Y}\cdot Gy\right)+\frac{\partial}{\partial Z}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_3}\cdot\frac{\partial C}{\partial Z}\cdot Gz\right) \tag{8}$$

・数値設定

$C_D=0.09$，$C_1=1.44$，$C_2=1.92$，$\sigma_1=1.0$，$\sigma_2=1.3$，$\sigma_3=1.0$

C_k ：本来は$C_k\fallingdotseq 1.0$と予測されるが，今回の計算では$C_k=0.0$としている

$C\varepsilon$ ：本来は床グレーチング部のみで大きな値（$C\varepsilon=\gg 1.0$）を持ち他では零となるが，今回の計算では，すべての領域で$C\varepsilon=0.0$としている

ここで，$Gx, (Gy, Gz)=\dfrac{\text{X, (Y, Z)方向のセル表面を通過する流体面積}}{\text{X, (Y, Z)方向のセル表面積}}$：有効面積

$Gv=\dfrac{\text{セル内の流体体積}}{\text{セル体積}}$：有効体積

Fx, Fy, Fz ：X, (Y, Z)方向における流体と床グレーチングの表面摩擦係数(1/m)

Fs：床グレーチングの圧損に伴う熱への直接散逸定数，$Fs\fallingdotseq 0.0$

deff：床グレーチング内の特徴長さスケール(m)，$deff^{-1}=dx^{-1}+dy^{-1}+dz^{-1}$

dx, dy, dz：X, (Y, Z)方向における床グレーチングをなす孔の直径(m)

U, (V, W)：X, (Y, Z)方向の気流速度(m/s)　P：圧力(N/m^2)　k：乱流エネルギー(m^2/s^2)

ν_t：渦動粘性係数(m^2/s)　ε：乱流散逸(m^2/s^3)　l：乱れの長さのスケール(m)

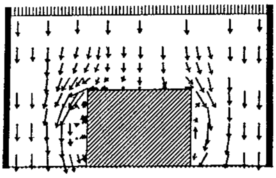
4．解 析 手 法

4.1　模型実験概要[2)]　縮尺1/6模型を使用．実験は等温を仮定．実大クリーンルーム(吹出風速0.3m/s)のRe数を再現し，吹出面風速のバラツキは±5％以内とした．風速はタンデム型熱線風速計による3次元的測定．汚染質拡散性状は，C_2H_4トレーサーの分布をF.I.Dにより測定．

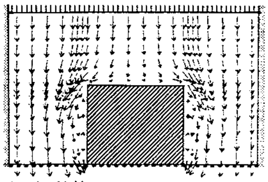
4.2　数値シミュレーション概要[4)]　改造k-ε型2方程式モデル(表1)を基礎とする3次元解析により行う[注1]．表1で新たに提案する乱流モデルの特徴は，通常よく用いられるk-ε型乱流モデルに以下の機能を付加しており，田中らのモデル[8)]とは異なる．①差分格子以下の物体(今回の場合は床グレーチング)の流れ場に及ぼす影響を差分格子以下の形状変化と，同じくこれら形状変化に起因する圧損効果に分ける②形状変化は各方向成分における有効面積(Gx, Gy, Gz)と有効体積(G_V)でモデル化する③差分格子以下の形状変化による圧損効果は圧損パラメター(Fx, Fy, Fz)[注2]からなる圧損項を運動方程式に付加する④乱流エネルギーkの輸送方程式に平均流の圧損項に対応した生産項を考慮する⑤床グレーチング内での乱れの特徴長さスケール(deff)を考慮し，乱流散逸εの輸送方程式に生産項としてこの効果を付加する等である．境界条件は文献4を参照．

(1)Case 1の場合[注3]：吹出面(境界面C)境界条件は，流入速度を一様と仮定するほか，流入乱流エネルギー$k=0.005(m^2/s^2)$とし，流入の乱れスケールは$l=0.03$(m)とした〔ほぼ実測値に対応〕[2~4)]．床グレーチング上面の境界条件は今回のモデルが圧損を大きく取っているため，速度を一様と与える速度型を適用した．

(2)Case 2の場合：流入境界条件は，Case 1と同様．境界面Fには速度型境界条件を適用．本報では，床グレーチングの効果を形状効果と摩擦抵抗効果の両者を考慮した解析[8)](以降精密モデル〔Case2-2〕と称す)と運動方程式中の圧損効果としてのみ考慮する解析[5~7)](以降単純圧損モデル〔Case2-1〕と称す)の2種を検討する[4)]．

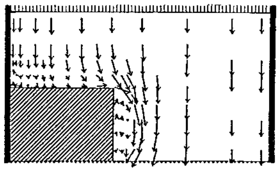


(a) 模型実験

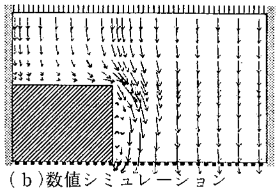


(b) 数値シミュレーション
速度型，l =0.03(m)

図3　流れ場に関する模型実験と数値シミュレーション(Case 1)の対応：鉛直断面
(床グレーチング上面の境界条件を既知として解析)

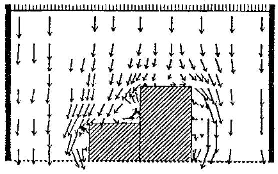


(a)模型実験

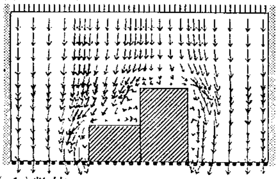


(b)数値シミュレーション

(壁際に気流障害物設置)



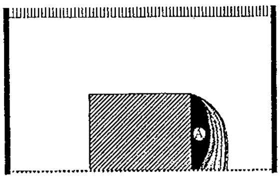
(c)模型実験



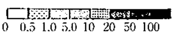
(d)数値シミュレーション

(高さの異なる障害物の複合)

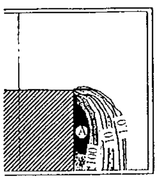
図5　流れ場に関する模型実験と数値シミュレーション(Cace 1)：鉛直断面
(障害物の配置，形状を変化)



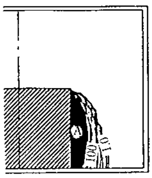
(a)模型実験



*吸込口平均濃度(瞬時一様拡散濃度)で無次元化

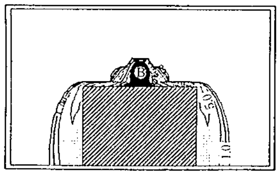


(b)数値シミュレーション
風上差分スキーム

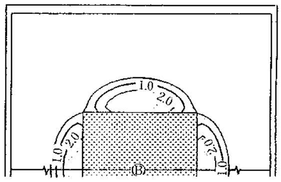


(c)数値シミュレーション
QUICKスキーム

図4　拡散場に関する模型実験と数値シミュレーション(Case 1)の対応：鉛直断面 (汚染質発生点A)
(濃度輸送方程式における移流項のスキームの検討)

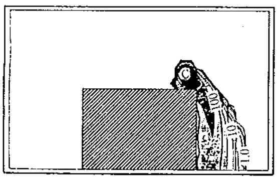


(a)鉛直断面

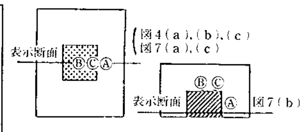


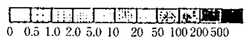
(b)水平断面

(汚染質発生点B)



(c)鉛直断面 (汚染質発生点C)





*瞬時一様拡散濃度を1として表示

図6　拡散場に関する数値シミュレーション(Case 1)：鉛直断面
(汚染質発生点を変化)

(3)濃度計算：Case 1の場合に関して，濃度輸送方程式の移流項を1次精度の風上差分スキームと2次精度のQUICKスキームを用いて計算を行い，数値粘性が拡散場に及ぼす影響を検討する．なお，汚染質発生量は瞬時一様拡散濃度が1となるように設定する．今回の解析に用いたメッシュ分割を，図2に示す(Case 1：約5万メッシュ，Case 2：約8万メッシュ)．

5．床グレーチング上面の境界条件を既知として解析する場合(Case 1)

5．1　流れ場に関する模型実験と数値シミュレーションの対応　数値解析結果(図3(b))は，障害物側面で剝離が再付着する様子等，模型実験(図3(a))によく一致する．

5．2　装置周辺の流れ場　壁際に障害物を設置した場合，シミュレーション(図5(b))と模型実験(図5(a))は，よく一致する．障害物形状を変化させた場合も，シミュレーション(図5(d))と模型実験(図5(c))はよく一致する[4]．

5．3　拡散場に関する移流項スキームの検討：(汚染質発生点A)　濃度輸送方程式の移流項を一次精度の風上差分スキームにより解析した結果(図4(b))は，模型実験(図4(a))に比べ汚染質がより拡散的な傾向を示す．これは，層流型クリーンルームでは，流れ場の拡散係数ν_tが乱流型クリーンルーム等のそれに比べて小さく数値粘性による偽拡散の影響が顕著に現れやすいためと考えられる[4]．移流項を数値拡散のより小さいQUICKスキームにより解析した結果(図4(c))は，模型実験とよく一致する．

5．4　装置周辺の拡散場　障害物上面中央(発生点B)で汚染質を発生させた場合，シミュレーション結果(図6

(a), (b))では，汚染質が障害物の四方に拡散し高濃度域は障害物上面の汚染質発生点直下に限られる．障害物右側上面(汚染質発生点C)の場合，シミュレーション(図6(c))では，高濃度域は障害物側面まで達するが，拡散範囲は汚染質発生点Bの場合(図6(a)，(b))に比べ限定される．

6．室内と床下チャンバー一体の流れ場を解析する場合(Case 2)

6．1　単純圧損モデルによる解析〔Case2-1〕　圧力損失を考慮するための諸係数は表2(a)に示す．X，Y方向における圧損パラメターを0.0とし，Z方向に働く圧損パラメターは，Fz＝150とした[4]．このモデルによる数値シミュレーション結果(図7)の室内気流分布は，床グレーチングの上面に速度型境界条件を与えて計算した結果(図3(b))のそれとよく一致している．

6．2　精密モデルによる解析〔Case2-2〕　床グレーチング部のX，Yにおける有効面積は1.0[注4]とし，Z方向の有効面積を0.58とした[注5](表2)．精密モデルによるシミュレーション(図8)の室内気流分布は，床グレーチング上面で速度型境界条件を与えて解析した場合(図3(b))や床グレーチングの効果を圧力損失のみに限定した場合(図7)のそれとほとんど差異が見られない．これは，今回の解析モデルとして用いた床グレーチングが，かなり大きな圧損を持つことにも助けられているものと考えられる．

7．ま と め

①Case 1に関し，床グレーチング上面の境界条件が妥当(シミュレーションでの想定と実物との対応が妥当)であれば，シミュレーションは模型実験とよく一致する．

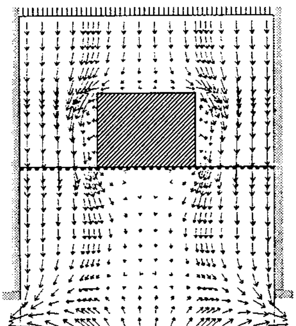


図7　単純圧損モデルによる流れ場のシミュレーション(Case2-1)

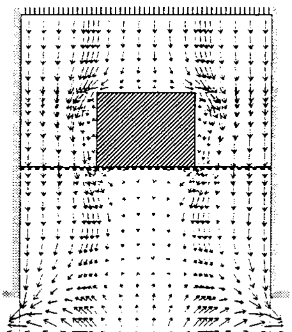


図8　精密モデルによる流れ場のシミュレーション (Case2-2)

表2　床グレーチング部の圧損特性を考慮するための諸係数

解析種類 ＼ 諸係数	形状パラメター				圧損パラメター		
	Gx	Gy	Gz	Gv	Fx	Fy	Fz
(a) 圧力損失のみ考慮	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	150
(b) 形状効果と圧損の両者を考慮	1.0	1.0	0.58[注5]	1.0	0.0	0.0	34.5[注6]

拡散場に関して，層流型クリーンルームでは乱れが小さく渦拡散係数ν_tも小さいので濃度輸送方程式の移流項には数値粘性の小さいQUICKスキームを用いる必要性が高い．②Case 2の差分格子以下の形状を有する床グレーチングを含む流れ場に対し，新たなk-ε型乱流モデルを提案した．この場合，圧力損失特性だけを考慮した場合と圧損特性のほかに有効面積および有効体積を考慮した場合の2種類の解析を行ったが，両者は模型実験とよく対応した．③差分格子以下の形状要素を持つ流れ場のシミュレーション(特に精密モデル)は，これを考慮しない通常のk-ε型モデルに比べ収束解を得ることがかなり困難であった．これらを含め，今後さらに検討を重ねたい．

(1987年11月5日受理)

注1）今回の差分格子以下の物体を形状パラメター，圧損パラメターでモデル化した方程式に関しては，検討の第一段階ということでとりあえずk，ε輸送方程式の係数C_k，C_εをそれぞれ0.0として計算を行った．今後，早急に諸係数値の検討を行いたい．

注2）精密モデルの場合，圧損パラメターFx，Fy，Fzは，床グレーチング部のみならずその下流域でも実際に圧損が生じることを考慮すると，その両者にこの数値を割り振る必要がある．

注3）基礎方程式(表1)中の形状パラメターをGx，Gy，Gz＝1.0，圧損パラメターをFx，Fy，Fz＝0.0およびC_k＝0.0，C_ε＝0.0とすると通常のk-εモデルと同様となる．

注4）床グレーチング部では，流れ場がZ方向に卓越している．すなわち，X，Y方向の速度成分はほぼ零とみなせるU≒0.0，V≒0.0を考慮し，形状パラメターGx，Gyは1.0として差分格子以下の障害物がないものと仮定している．また，同様の理由により圧損パラメターFx＝0.0，Fy＝0.0としている．

注5）本来はFz＝0.23(床グレーチングのZ方向の開口比)で計算するべきであるが，今回の検討ではFz＝0.23を用いると圧力速度同時緩和のイテレションで連続条件を満たす収束解を得ることが，通常のk-ε型モデルを基礎とするシミュレーションに比べかなり困難であり，ある程度条件を緩和(Z方向の有効面積の緩和)をしないとシミュレーションが収束しなかった．これらの原因などに関しては，今後検討したい．

注6）表面通過率を考慮するとFz＝150×0.23≒34.5となる．

参 考 文 献

1) 村上周三，加藤信介，池鯉鮒悟，“層流型クリーンルーム内の気流のレーザーライトシートによる可視化”，生産研究，昭和60年3月
2,3) 村上周三，加藤信介，鈴木啓泰，須山喜美，“層流型クリーンルームの気流性状・汚染質拡散性状に関する研究(その3，4)”，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和61年8月，昭和62年10月
4) 村上周三，加藤信介，鈴木啓泰，“層流型クリーンルーム内の気流性状・汚染質拡散性状に関する研究(その5)”，空気調和・衛生工学会学術論文集，昭和62年10月
5~7) 小林敏雄，中山亨，石原智男，“円錐ディフューザにおける抵抗体の効果の数値予測(第1報)，(第2報)，(第3報)”，生産研究，昭和59年3月，昭和60年2月，昭和60年6月
8) 田中晃，前田真之，斉木篤，“室内気流，温度分布シミュレータの開発(第2報)”，空気調和・衛生工学会学術論文集，昭和60年9月