

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1報) —室内気流数値解析において診断の指標として 用いられる各種乱流統計量について—

Study on Diagnostic System of Numerical Simulation for Turbulent Flow

村 上 周 三*・加 藤 信 介*
Shuzo MURAKAMI and Shinsuke KATO

1. はじめに 診断の必要性

乱流の数値シミュレーションは、乱流現象をモデル化して作成された数学モデルを数値解析手法により解くものである。その結果は基礎となる乱流の数学モデルおよび数値解析手法に依存し必ずしも現実の乱流現象に対応する保障はない。それゆえ工学分野への応用を試みるという立場からはシミュレーション結果に対してその妥当性に関する絶えざる検討すなわち診断が必要となる。

乱流の数値シミュレーション結果の妥当性を診断する最も良い方法は、これを直接実際の流れ現象と対応させて比較検討することである。筆者等はすでにこの観点からシミュレーションと実験を平均流および1~2の乱流統計量に着目して検討し、その有効性を論じてきた。^{1)~3)}乱流の数値シミュレーションの大きな利点の一つは、実験では測定しがたい乱れの統計量の詳細な分布を容易に求められることである。シミュレーションで得られるさまざまな乱流統計量の分布は、乱流の構造に対する深い理解を可能にするとともにこれより逆にシミュレーションの妥当性、最適な数値定数の与え方等の検討を可能にする。これらの乱流統計量の分布の検討は、一見平均流が正しく再現されているようでも実際にはそれが単に見せ掛けである場合のチェックやあるいは正しく再現されない場合の原因解明などに大いに役立つものとなる。

2. 診断に用いられる諸量

シミュレーションの妥当性の診断に利用可能な諸量としては、まず最初に関心的となる 1)平均流のほか、2)乱流エネルギー、レイノルズストレス、乱れのスケール、渦拡散係数等があげられる。またそのほか、3)平均運動エネルギーの収支式中の各項、4)乱流運動エネルギーの輸送方程式の各項、5)その他、渦度、平均渦度の二乗、渦度変動の二乗等の輸送方程式中の各項、等もあげられる。これらは乱流構造の理解に大きな助けとなる。なお診断のためにはこうした乱流統計量のほかに差分メッシュ分割の妥当性を計る目安となる 6)メッシュレイノルズ数などを取り上げることも必要と考えられる。

以下、今回検討対象とした各項について説明する。

2.1 k-ε モデルの基礎方程式について

k-ε 型 2 方程式モデルの基礎方程式を表-1 に示す。今回の診断では乱流エネルギー、渦動粘性係数等のほか乱流エネルギー輸送方程式中の各項を用いた。これらは乱れ性状の平均運動量輸送への係わりや、乱れのエネルギー

表-1 基礎方程式

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial X_j} = -\frac{\partial}{\partial X_i} \left\{ \frac{P}{\rho} + \frac{2}{3}k \right\} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right\} \tag{2}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_1} \frac{\partial k}{\partial X_j} \right\} + \nu_t \hat{S} - \epsilon \tag{3}$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_2} \frac{\partial \epsilon}{\partial X_j} \right\} + C_1 \frac{\epsilon}{k} \nu_t \hat{S} - C_2 \frac{k \epsilon}{\nu_t} \tag{4}$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} = k^{1/2} \cdot l \tag{5}$$

但し $\hat{S} = 2 \cdot S_{ij} S_{ij} = 2 \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right)^2 \right\}$

$\sigma_1 = 1.0$ $\sigma_2 = 1.3$ $\sigma_3 = 1.0$

$C_\mu = 0.09$ $C_1 = 1.59$ $C_2 = 0.18$

U_i : 平均速度 (m/s) p : 圧力 (N/m²)

ν_t : 渦動粘性係数 (m²/s) k : 乱流エネルギー (m²/s²)

ϵ : 乱流散逸 (m²/s³) l : 乱れの長さスケール (m)

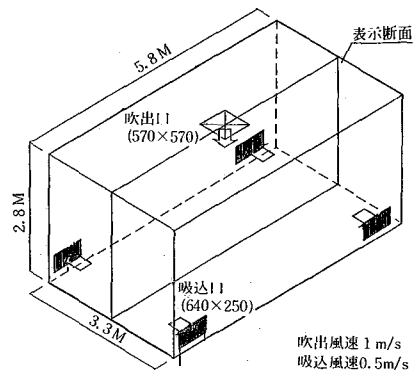


図-1 解析対象とした室内モデル
(コンベンショナルフロー型クリーンルーム)

* 東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター

研究速報
 一がどのように生成，輸送，散逸されるかを示す。乱流構造の理解に欠かせない要素であり診断するうえでも不可欠の要素となる。

2.2 平均エネルギーの収支式について

流体の平均運動エネルギーの収支式(6)式は，運動量や乱流エネルギーとはまた異なった観点からの乱流構造の検討の手段を与える。

$$U_j \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\frac{1}{2} U_i U_i \right) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left(-\frac{P}{\rho} U_j + 2\nu U_i S_{ij} - \overline{u_i u_j U_i} \right) - 2\nu S_{ij} S_{ij} + \overline{u_i u_j S_{ij}} \quad (6)$$

但し ν : 動粘性係数

2.3 メッシュレイノルズ数について

数値シミュレーションでは差分の打ち切り誤差等にもなる計算の不安定や解の振動等が生じる。空間差分分割の不足に起因するこうした現象を計る目安にメッシュレイノルズ数(7)式が用いられる。⁴⁾

$$Re_m = U \cdot h / \nu_i \quad (7)$$

但し

Re_m : メッシュレイノルズ数, h : メッシュ間隔,
 U : メッシュ点速度, ν_i : メッシュ点渦動粘性係数

3. 室内気流の数値解析における吹出噴流を主な対象とした診断

3.1 本ケーススタディにおける診断の目的

換気された室内の気流性状にはその吹出気流が支配的に大きな影響を与えている。したがってその数値シミュレーションでは，吹出噴流部分の差分分割，吹出噴流の境界条件をどのように与え，正しくシミュレートするかが大きな検討課題の一つとなる。なおここでは触れない

表-2 室内気流数値シミュレーションの境界条件

- (1) 吹出口 : $U_t = 0.0, U_n = U_{out}, k = k_{out}, l = l_{out}$
 添字 t, n : 接線方向, 法線方向を示す。
 U_{out} : 吹出風速, $U_{out} = 1.0 \text{ m/s}$,
 k_{out} : 流入乱流エネルギー, $k_{out} = 0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$
 l_{out} : 乱れの長さスケール, $l_{out} = 0.285 \text{ m}$
- (2) 吸込口 : $U_t = 0.0, U_n = U_{in}, \partial k / \partial n = 0.0, \partial \epsilon / \partial n = 0.0$
 U_{in} : 吸込風速, $U_{in} = 1.0 \text{ m/s}$
- (3) 壁面 : $(\partial U_i / \partial n)_{n=0} = m(U_i)_{n=0} / h, U_n = 0.0, \partial k / \partial n = 0.0,$
 $(\epsilon)_{n=0} = \{C_D(k)_{n=0}^{3/4} / \{C_D^{1/4} \kappa h\}$
 h : 壁面から第一セルの差分定義点までの距離
 m : U_t がベキ乗分布するとみなした時のベキ指数, $m = 1/7$
 κ : カルマン定数, $\kappa = 0.4$

(注) 本シミュレーションは実スケールの物理量を用いてなされている。

表-3 シミュレーションケース

ケース	メッシュ分割	(吹出口面)	流入乱流境界条件	備考
1	35×20×20	(4×4)	$k=0.05 \quad l=0.285$	基本タイプ
2	35×20×20	(4×4)	$k=0.005 \quad l=0.05$	流入乱流量小
3	31×16×20	(2×2)	$k=0.05 \quad l=0.285$	メッシュ分割粗

が吹出口での境界条件のほか，壁境界条件をどのように与えるかといった問題などほかにも検討すべき課題は多い。また一般に室内の空気は噴流部を除くとその乱れが小さい領域も多くこのような領域に対して充分発達した乱流を前提に作成された2方程式モデルを適用しうるか否かの疑問も生じる。ここでは診断システム開発の検討例として主にこの2点に関して簡単な検討を行う。

3.2 解析対象空間

図-1に示す室内気流を解析の対象とする。⁵⁾

3.3 数値シミュレーション

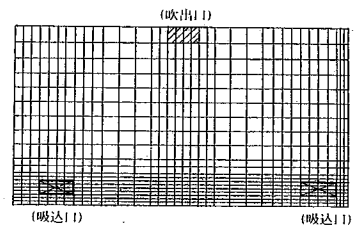
表-2に示す境界条件のもとで，図-2に示す差分分割により定常解を求める。吹出噴流部の差分分割や境界条件を検討するため図-2のように吹出口面を4×4=16分割のケースに対して吹出口面を2×2=4分割した計算および吹出流入乱流量としてより小さい値(乱流エネルギー，乱れのスケールともほぼ1/10とする)を選んだ計算を合わせて行う。表-3に各シミュレーションケースを示す。

3.4 診断結果

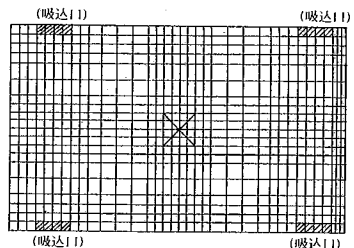
シミュレーション結果の診断は，主に吹出口を含む長手断面の分布に関して行う。また得られた結果は多少時間的・空間的に振動するがほぼ対称な性状を示す。なお諸量は無次元化せず実際の次元付きの値で表示する。

1) 平均流の運動エネルギー

各ケースの平均流ベクトルおよび平均運動エネルギーの分布を図-3に示す。各ケースとも平均流ベクトルの全般的傾向は，ほぼ実験結果と一致している。⁵⁾ この程度の



(a) 立断面 35×20 メッシュ



(b) 水平断面 35×20 メッシュ

図-2 メッシュ分割 (ケース1)

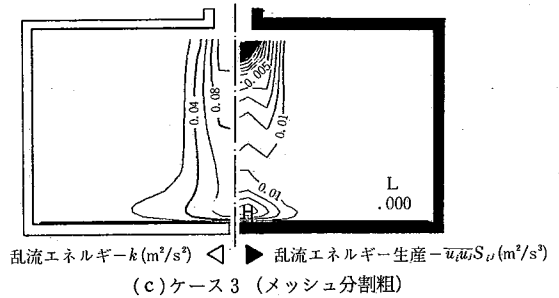
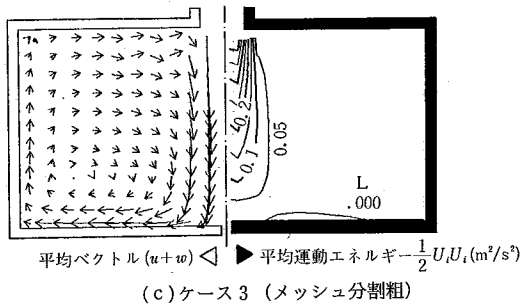
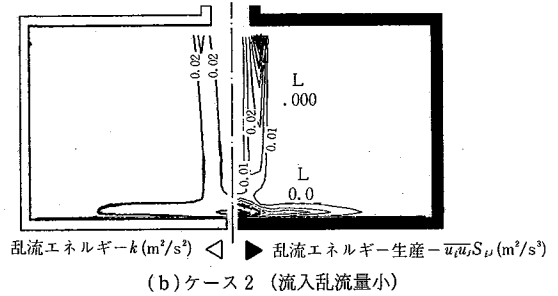
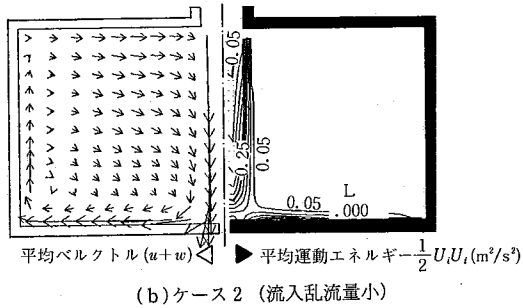
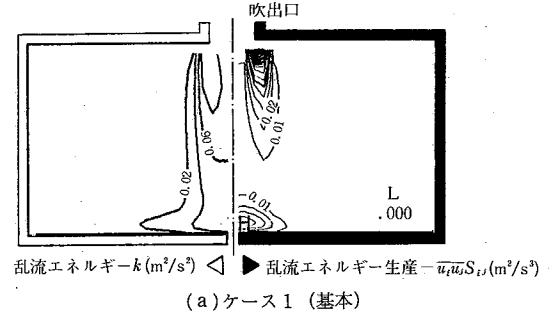
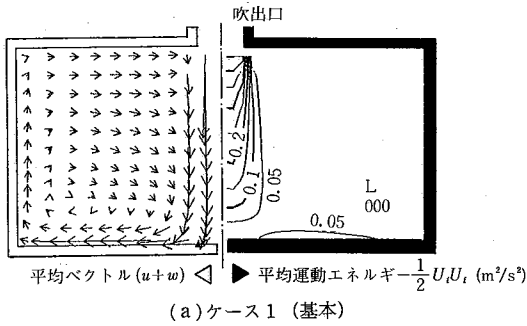


図-3 平均ベクトルおよび平均運動エネルギーの分布

図-4 乱流エネルギーおよび乱流エネルギーの生産項の分布

平均流に関しては差分分割や流入乱流量等の違いの影響は現れない。平均流の運動エネルギーはそのほとんどが吹出噴流および噴流が床に衝突した後の発散流部分に集中している。また流入の乱れが相対的に大きいケース 1, 3 (この値は実験で通例観察されるオーダーに近い。)では吹出噴流の運動エネルギーは吹出口から顕著な減衰を示し、通常の実験で吹出噴流がほとんど減衰することなく床面に衝突するのと性状を異にしている。⁵⁾一方流入の乱れのスケール、エネルギーを相対的にかなり小さくしたケース 2 (この乱れのスケールは通例観察されるオーダーよりもかなり小さい。)では吹出噴流の減衰は小さく、この点に関しては実際の流れと良く対応する。

2) 乱流エネルギーと生産項

各ケースの乱流エネルギーおよび乱流エネルギーの生産項の分布を図-4に示す。吹出口周辺のメッシュ分割が少なく吹出口の一辺を2メッシュ分割しかしていないケ

ース 3では、乱れのエネルギーは吹出口少し下で最大となりその後徐々に減衰している。一方吹出口周辺のメッシュを密にして吹出口の一辺を4メッシュ分割したケース 1, 2では吹出口両脇で最大となっている。特に流入の乱れの小さいケース 2では吹出噴流の中心でエネルギーが小さく周囲とのシアが大きくなる周辺で大きな値を示しており、実験結果から推定すればこちらが妥当な結果であると考えられる。メッシュ分割の違いによる乱流エネルギー分布の差異は乱流エネルギーの生産項の分布により明らかに示されている。乱流エネルギーの生産には平均流のシアが大きく係わっておりこれを充分再現できる密な差分メッシュ分割が吹出噴流部分では必要とされる。

3) 散逸と生産項

図-5にケース 1を対象にして散逸および生産項と散逸の比の分布を示す。エネルギー散逸は主に吹出噴流部

研究速報

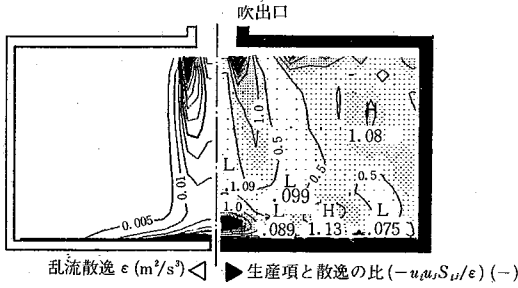


図-5 散逸および生産項と散逸の比の分布 (ケース1)

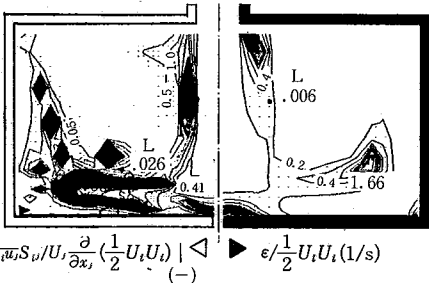


図-6 生産項と平均エネルギー移流の比および散逸と平均運動エネルギーの比の分布 (ケース1)

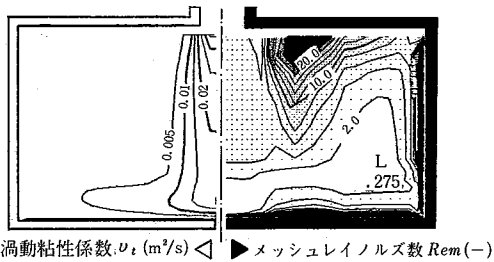


図-7 渦動粘性係数とメッシュレイノルズ数の分布 (ケース1)

および噴流の床面衝突域で大きい。特に散逸の大きい部分は乱流エネルギーと同じくシアの大きい噴流周辺部に集中しており、こうした部分のメッシュ分割の細かさがこのような領域に求められる。生産項と散逸の比は乱流生産の大きい噴流の周辺部分及び噴流の床面衝突域で1より大きく室内の大部分の領域でほぼ一様に1より小さくなっている。

4) 平均運動エネルギーと乱れの特徴量

図-6に乱れの生産項と平均エネルギーの移流項(平均エネルギーの収支式中)の絶対値の比および平均エネルギーに対する散逸の比を示す。乱れや粘性の影響の少ない流れ(ポテンシャルフロー等)では(6)式右辺の第2項の粘性拡散, 第3項の乱れによる拡散, 第4項の直接粘性散逸, 第5項の乱れの生産項などは微量量となるはずであり左辺の移流項や右辺第1項の圧力拡散に比べ充分小さくなるものと思われる。乱れの生産項と平均エネ

ルギー移流項の比はこの意味で流れ性状に対する「充分乱れているのかポテンシャルフローに近いのか」を示す一つの目安と考えることができる。散逸と平均エネルギーの比も同様である。図-6に示されるように、噴流の周辺のシア領域および噴流衝突域から天井に至る壁面近傍は充分乱れているが、噴流周辺の室内の大部分は相対的に充分乱れていない領域であることが示されている。実験的には噴流およびその衝突域を除く室内の大部分は、乱れが小さくポテンシャル流の様相を示すことから、乱流境界層等充分発達した乱流の解析に用いられる $k-\epsilon$ 型2方程式モデルが、こうした領域でもある程度、現象を再現していることが示されている。

5) メッシュレイノルズ数

図-7に渦動粘性係数およびメッシュレイノルズ数(図中のメッシュレイノルズ数は(7)式により各方向成分ごとに算出した値の二乗和の平方根)を示す。計算を安定して行うにはある程度小さいメッシュレイノルズ数になるよう差分分割を行う必要がある。今回のシミュレーションは壁面近くでメッシュレイノルズ数が大きく、この部分でより細かいメッシュ分割が要求されていることがわかる。また最も大切な吹出噴流部分に関しては充分細かいメッシュ分割がなされていることが判る。

5. おわりに

数値シミュレーション結果の診断を行う資料としてシミュレーションで求めた各種の乱流統計量の分布が利用できることを示した。ここで示した検討により完全な診断がなされたと言うことは決してできないがこれらは数値解析の妥当性を主張するために少なくとも必要な検討と思われる。今後こうした検討の組合わせによる乱流シミュレーションの診断システムの開発を進める。

謝 辞

本研究は本所に設けられたNST研究グループ内の討論による示唆が大きい。本所第一部吉沢徹助教授, 同第二部小林敏男助教授をはじめ各メンバーに謝意を表します。(1985年4月9日受理)

参 考 文 献

- 1) 村上周三, 野村豪, 小峯裕己, 加藤信介, 佐藤正章「室内気流に関する数値計算予測と実験の対応」生産研究, 1979, 7
- 2) 村上周三, 加藤信介「室内気流に関する数値計算予測と実験の対応(続報)」生産研究, 1981, 3
- 3) 村上周三, 加藤信介「室内気流の数値シミュレーションと実験の対応」生産研究, 1984, 12
- 4) 野村豪, 松尾陽, 加藤信介「MAC法の空間差分間隔に関する考察」日本建築学会論文報告集, 1980, 6
- 5) 村上周三, 加藤信介, 田中幸彦, 宗像康光「クリーンルーム内の浮游微粒子の拡散性状に関する研究」生産研究, 1985, 5