LES による非等温室内気流解析 - 水平冷風吹出を持つ非等温室内流れ場の LES データベースの構築 -

LES Analysis of Non-Isothermal Room Airflow

- LES database of non-isothermal Room Airflow in an enclosed space with horizontal cold jet -

〒270-1395 印西市大塚 1-5-1, E-mail:tsuchiya.naoya@takenaka.co.jp 土屋直也, 竹中工務店, 村上周三, 東大生研, 〒153-8505 目黒区駒場 4-6-1、 E-mail:murakami@iis.u-tokyo.ac.jp 加藤信介、東大生研、 〒153-8505 目黒区駒場 4-6-1, E-mail:kato@iis.u-tokyo.ac.jp 大岡龍三、福井大学、 〒910-8507 福井市文京 3-9-1. E-mail: ooka@anc.anc-d.fukui-u.ac.jp Naoya TSUCHIYA, Takenaka corp., Ohtsuka 1-5-1, Inzai-shi, Chiba 270-1395 Shuzo MURAKAMI and Shinsuke KATO, IIS., Univ. of Tokyo, Komaba 4-6-1, Meguro-ku, Tokyo 153-8505 Ryozo OOKA, Fukui-Univ., Bunkyo 3-9-1, Fukui-shi, Fukui 910-8507

A non-isothermal flow in a two-dimensional enclosed space with horizontal cold jet was analyzed by Large Eddy Simulation(LES). In this study, in order to investigate a turbulent structure of non-isothermal flowfield and evaluate various RANS models, LES database was generated. The reliability of LES computation was assessed by comparison with experimental data of the authors (1997). Vertical profiles of mean velocity and mean temperature predicted by the LES showed good agreement with the experimental data. LES database was used to evaluate the linear eddy viscosity/diffusivity model and the WET model proposed by Launder(1988), and the prediction accuracy of these models for a supply jet was examined.

1.序

本報では、冷風水平吹出しを持つ非等温室内気流を対象と して、十分な格子解像度を確保した大規模なLESを実施し、 各種乱流統計量のデータベースを構築する。このデータベー スを用い、勾配拡散近似(渦粘性/渦拡散モデル(EVM/EDM)) およびWETモデル⁽¹⁾のアプリオリテストを行い、これらモデ ルの挙動や予測精度について考察する。

2.計算概要

<u>2.1 計算対象(Fig.1)</u>室上部に吹出口、室下部に吸込口を持 つ2次元流れを意図した閉鎖空間内の非等温流れ。但し、 LESは3次元計算。比較する実験は筆者らによる精密模型実 験⑵。

2.2 計算条件 subgrid scale モデルは標準型 Smagorinsky モデル(S モデル、Smagorinsky 定数 Cs は 0.16)と dynamic 型 Smagorinsky モデル(DS モデル)を用い、精度の比較を行 った。DS モデルの概要は文献(3)を、その他の計算条件は注 1~3 参照。諸量は特に注記のない場合、全て吹出口幅 La、 吹出風速<u,,>、代表温度差<Δθ。>で無次元化している。

3.計算結果^{注 4)}

3.1 平均風速 < u_i >

Fig.2 に室中央位置(x₁=37.5, x₂=7.5)における平均風速 < u
₁ > の鉛直(x₂)方向分布および室中心高さ(x₂=7.5, x₂=25)の < ū₃ >の水平(x₁)方向分布を示す。LES の結果は、DS モデル と S モデルとの差はほとんどない。両計算結果ともに実験結 果と比べ、左・右壁面および床面近傍での対応がやや悪い結 果となっている。

3.2 平均温度 < 0>

Fig.3 に平均風速と同じ位置における平均温度 $\overline{\theta}$ >の軸 分布を示す。LES の結果は S モデルおよび DS モデルとも に実験との対応は良い。

4. EVM/EDM、WET モデルの評価^{注 5)}

4.1 検討モデルの概要

EVM/EDM、WET モデルの基礎式を以下 a.~e.に示す。 尚、各モデルの評価は、a.~e.に示す基礎式右辺の平均速度・ 温度勾配、k、等にLESの結果を代入して乱流応力< uīuí >、



Copyright © 2000 by JSCFD

乱流熱流束 < $\vec{u}_j \vec{\theta}' > \epsilon x \phi$ 、この値と LES の < $\vec{u}_j \vec{u}_j > \cdot, < \vec{u}_j \vec{\theta}' > \epsilon$ 比較するアプリオリテストにより実施する。

<u>a.渦粘性/渦拡散モデル(以降 EVM/EDM と略す)</u>

$$-\langle \overline{u}_{i}'\overline{u}_{j}'\rangle = v_{t}\left(\frac{\partial \langle \overline{u}_{i} \rangle}{\partial x_{i}} + \frac{\partial \langle \overline{u}_{j} \rangle}{\partial x_{i}}\right) - \frac{2}{3}\delta_{ij}k$$
(1)

$$-\langle \overline{u}_{j}'\overline{\theta}' \rangle = \frac{\nu_{t}}{P_{\pi}} \frac{\partial \langle \overline{\theta} \rangle}{\partial x_{j}}$$
(2) $\nu_{t} = c_{\mu} \frac{k^{2}}{\varepsilon}$ (3)

モデル定数は、 C_µ = 0.09, P_n = 0.9。

<u>b.低 Re</u>数効果を組み込んだ EVM/EDM(LEVM/LEDM)

渦粘性係数_{vt}は村上・加藤・近本⁽¹⁰⁾らのモデル関数_f(式 (5))を付加した(4)式を用いる。乱流応力・熱流束はこの(4)式 を用い(1),(2)式から求める^{注 6}。

$$v_{t} = c_{\mu} f_{\mu} \frac{k^{2}}{\epsilon}$$

$$f_{\mu} = \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{x_{n}^{*}}{14}\right) \right\} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{Rt^{3/4}}{2.4}\right) \right\} \left\{ 1 + \left(\frac{1.5}{Rt^{5/4}}\right) \right\}$$
(5)

 $x_n^*(=x_n/\eta)$: kolmogorov の長さスケール $\eta(=(v^3/\epsilon)^{1/4})$ を用いた 壁座標、 $R_1(=k^2/(v\epsilon))$: 乱流レイノルズ数。

<u>c.WET モデルの原型(WETe)</u>

乱流応力・熱流束の輸送方程式において局所平衡を仮定し て得られるモデル^注"。

$$\begin{aligned} - &< \overline{u}_{i}'\overline{u}_{j}' >= C' \frac{k}{\varepsilon} \left(< \overline{u}_{j}'\overline{u}_{k}' > \frac{\partial < \overline{u}_{i} >}{\partial x_{k}} + < \overline{u}_{i}'\overline{u}_{k}' > \frac{\partial < \overline{u}_{i} >}{\partial x_{k}} - \frac{2}{3} < \overline{u}_{k}'\overline{u}_{i}' > \frac{\partial < \overline{u}_{i} >}{\partial x_{k}} \delta_{ij} \right) \\ &+ C' \frac{k}{\varepsilon} \left(g_{i}\beta < \overline{u}_{j}'\overline{\theta}' > + g_{j}\beta < \overline{u}_{i}'\overline{\theta}' > -\frac{2}{3}g_{k}\beta < \overline{u}_{k}'\overline{\theta}' > \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3}k\delta_{ij} \\ &- < \overline{u}_{j}'\overline{\theta}' >= \frac{k}{\varepsilon} \left(C_{\theta^{1}} < \overline{u}_{j}'\overline{u}_{k}' > \frac{\partial < \overline{\theta} >}{\partial x_{k}} + C_{\theta^{2}} < \overline{u}_{k}'\overline{\theta}' > \frac{\partial < \overline{u}_{j} >}{\partial x_{k}} + C_{\theta^{3}}g_{j}\beta < \overline{\theta}'^{2} > \right) \end{aligned}$$
(6)
(7)

モデル定数は、 $C'=0.22, C_{\theta 1}=C_{\theta 2}=C_{\theta 3}=0.25$ ⁽¹²⁾。

<u>d.WET モデル(WET)</u>

(6)、(7)式右辺の乱流応力・熱流束はそれぞれ(1)~(3)式の EVM、EDM で求める。(7)式中右辺の< テ² > は以下に示す(8) 式で近似する(詳細は文献(15)参照)。

$$<\overline{\theta}'^2 >= -\frac{k}{\epsilon} < \overline{u}'_k \overline{\theta}' > \frac{\partial < \theta >}{\partial x_k}$$
(8)

<u>e.低 Re 数効果を組み込んだ WET モデル(WETf_)</u>

低 Re 数効果を表すダンピング関数 f_µを付加じた WET モ デルを(9)、(10)式に示す⁽¹⁶⁾。式中右辺の乱流応力・熱流束は EVM、EDM で求める。

$$-\langle \overline{u}_{i}'\overline{u}_{j}'\rangle = f_{\mu}C'\frac{k}{\varepsilon} \left(\langle \overline{u}_{j}'\overline{u}_{k}'\rangle + \frac{\partial \langle \overline{u}_{i}\rangle}{\partial x_{k}} + \langle \overline{u}_{i}'\overline{u}_{k}'\rangle + \frac{\partial \langle u_{j}\rangle}{\partial x_{k}} - \frac{2}{3}\langle \overline{u}_{k}'\overline{u}_{i}'\rangle + \frac{\partial \langle \overline{u}_{i}\rangle}{\partial x_{k}} \delta_{ij}\right) + f_{\mu}C'\frac{k}{\varepsilon} \left(g_{i}\beta \langle \overline{u}_{j}'\overline{\theta}'\rangle + g_{j}\beta \langle \overline{u}_{i}'\overline{\theta}'\rangle - \frac{2}{3}g_{k}\beta \langle \overline{u}_{k}'\overline{\theta}'\rangle \delta_{ij}\right) - \frac{2}{3}k\delta_{ij}$$

$$-\langle \overline{u}_{j}'\overline{\theta}'\rangle = f_{\mu}\frac{k}{\varepsilon} \left(C_{\theta i}\langle \overline{u}_{j}'\overline{u}_{k}'\rangle + \frac{\partial \langle \overline{\theta}\rangle}{\partial x_{k}} + C_{\theta 2}\langle \overline{u}_{k}'\overline{\theta}'\rangle + \frac{\partial \langle \overline{u}_{j}\rangle}{\partial x_{k}}\right)$$

$$(9)$$

$$- C_{\theta 3} g_{j} \beta \frac{k}{\epsilon} < \overline{u}_{k} \overline{\theta}' > \frac{\partial < \overline{\theta} >}{\partial x_{k}}$$
 (10)

4.2 対象流れ場の特徴

モデルの評価に際しては、室中心軸天井付近($42 < x_3 < 50$) を対象流れ場とした。Fig.4 ~ 7 に乱流諸量の分布を示す。 < $\overline{u}_1 > 0$ 分布は、実験結果に比べやや小さな値を示すが概ね 良好な結果となっている。LES の< $\overline{u}_3 >$ はほぼ0である。 < $\overline{0} >$ は天井面ごく近傍を除き実験値と良く対応している。 < $\overline{u}_i^2 >$ に関して、主流方向成分< $\overline{u}_i^2 >$ の値は他の2成分< $\overline{u}_2^2 >$ と< $\overline{u}_3^2 >$ に比べ大きく、非等方的な性状を示す。< $\overline{u}_1^2 >$ のピー ク値は速度のピーク部分より下方にずれ $x_3 = 47$ 付近に位置



4.3 各モデルの評価結果

4.3.1 < \overline{u}_1^2 > の比較(Fig.8,9)

 $<\overline{u}_{1}^{2} > O 収支^{注 9)}を Fig.8 ^{注 10)}、 <math><\overline{u}_{1}^{2} > C 関する各モデルの$ 比較を Fig.9 に示す。EVM と LEVM は同じ値($<\overline{u}_{1}^{2} >= 2/3k$) をもち、LES の 1/2 程度の大きさしかない。 $<\overline{u}_{1}^{2} > O 収支$ (Fig.8)を見ると生産項と散逸項、拡散項と移流項が平衡して いる領域(42<x₃<48)で、WETe(WET の原型)は LES と良く 対応する。平均速度勾配が 0 となる付近(x₃=49)から壁までは 拡散項の寄与が大きくなり WETe の精度が悪くなっている。 WET の結果は壁付近で LES と比べ大きな値となる。低 Re 効果を考慮した WETf_µは、LES の結果に近づくものの、LES との差は依然見られる。これはWETf_µで与えられる $<\overline{u}_{1}^{2} > \vec{x}$ ((9)式において_{i=j=1})、

$$\langle \overline{u}_{1}^{\prime 2} \rangle \approx -f_{\mu}C' \frac{k}{\varepsilon} \left(\frac{4}{3} \langle \overline{u}_{1}^{\prime}\overline{u}_{3}^{\prime} \rangle \frac{\partial \langle \overline{u}_{1} \rangle}{\partial x_{3}} + \cdots \right) + \frac{2}{3}k$$
 (11)

において((11)式中、主要項以外は+…と省略する。以下の式 においても同様。)EVM で与えた<ī(īu、)>の値が、やや大きく 評価された(Fig.15,詳細は後述)ことに関連する。

4.3.2 < \overline{u}_2^2 >の比較(Fig.10,11)

 $<\overline{u_2}^2 > 0$ EVM と LEVM は同じ値($<\overline{u_2}^2 \gg 2/3k$)をもち、 LES より若干大きい。WETe は平均速度勾配が0となる付近($x_3=49$)を除き LES と一致する。WET、WETf_µの結果は 壁付近で負の値となる。これは $<\overline{u_1}^2 >$ と同様に WETf_µモデ



EVMによる < $\vec{u_1}\vec{u_3}$ > の近似精度に関連する。

 $4.3.3 < \overline{u}_3^2 > の比較(Fig.12,13)$

< \vec{u}_3^2 >の EVM と LEVM は同じ値(< $\vec{u}_3^2 \gg 2/3k$)をもち、 LES よりやや大きい。ノルマルストレス< \vec{u}_1^2 >に関して、壁 付近で LES との対応は悪く、等方型渦粘性モデルの欠陥が よくわかる。WETe は壁付近で LES との対応がやや悪い。 これは< \vec{u}_3^2 > (Fig.12)の収支を見ると、壁付近では圧力歪み 相関項の負の寄与が大きい、しかし WET モデルでは wallreflection 項を考慮しないためこの寄与を表現できないこと が一因であると考えられる。WET、WETf_µは壁付近で負の 値となる。これは、wall-reflection 項を考慮しない精度の低 下と、< \vec{u}_1^2 >、< \vec{u}_2^2 >と同様に WET モデル式中の< $\vec{u}_1\vec{u}_3$ >の 近似精度が関係している。

 $4.3.4 < \overline{u}_1'\overline{u}_3' > の比較(Fig.14,15)$

EVM は壁付近で LES に比べ大きい値となる。LEVM は EVM にf_uを乗じた分 LES に近づく。< ロ゙ロ゙₃ > の収支(Fig.14)



with various models

を見ると全体的に拡散項の寄与が大きく局所平衡が成り立っていない。そのため WETe は LES と若干差が生じる。 WET,WETf_µは LES との対応が非常に悪く、EVM、LEVM よりも悪くなる。これについては、以下の WETf_µで与えられる < $\vec{u}_1\vec{u}_3$ > の式を用いて考察する。

$$-\langle \overline{u}_{1}'\overline{u}_{3}'\rangle \approx f_{\mu}C'\frac{k}{\varepsilon} \langle \overline{u}_{3}'^{2} \rangle \frac{\partial \langle \overline{u}_{1} \rangle}{\partial x_{3}} + \cdots$$
(13)

WETf_µでは(13)式中の < \vec{u}_{3}^{2} > は、EVM から < \vec{u}_{3}^{2} >≈ 2/3k と近似する。

$$-\langle \overline{u}_{1}'\overline{u}_{3}'\rangle \approx C'f_{\mu}\frac{2}{3}\frac{k^{2}}{\epsilon}\frac{\partial \langle \overline{u}_{1}\rangle}{\partial x_{3}} + \dots = 0.146f_{\mu}\frac{k^{2}}{\epsilon}\frac{\partial \langle \overline{u}_{1}\rangle}{\partial x_{3}} + \dots$$
(14)

(14)式中、 $C' \times 2/3$ は 0.146 となるので、これは EVM のモデ ルの $C_{\mu} = 0.09$ に比べ 1.6 倍程大きい、そのため WET,WETf $_{\mu}$ は EVM と比較しても< $\vec{u}_{1}\vec{u}_{3}$ >を過大評価する傾向をもつ。

 $4.3.5 < \overline{u'_{10}} > の比較(Fig. 16, 17)$

EDM と LEDM はほとんど $0(\partial_{\partial_{a}} - \partial_{a_{1} \approx 0})$ である。一方、 WETe は鉛直 (x_{3})方向の平均速度・温度勾配 $(\partial < \overline{u}_{1} > / \partial x_{3}, \partial < \overline{\theta} > / \partial x_{3})$ を考慮することで EDM に比べ予測精 度が大幅に改善される。WET、WETf_µは壁際で大きな値と なる。これも以下(15)式に示す $< \overline{u'_{1}u'_{5}} >, < \overline{u'_{3}\theta'} > \varepsilon$ EVM,EDM で表現したことが一因と考えられる。

$$- < \overline{u}_{1}'\overline{\theta}' > \approx f_{\mu} \left(\frac{k}{\epsilon} C_{\theta 1} < \overline{u}_{1}'\overline{u}_{3}' > \frac{\partial < \overline{\theta} >}{\partial x_{3}} + \frac{k}{\epsilon} C_{\theta 2} < \overline{u}_{3}'\overline{\theta}' > \frac{\partial < \overline{u}_{1} >}{\partial x_{3}} + \cdots \right) (15)$$

4.3.6 < x3.6' > の比較(Fig.18,19)

LEDM は EDM に f₁を付加した分壁付近で EDM に比べ LES に近い値となる。WETe は LES に比べ全体的に小さい。 WET、WETf」はWETe に比べやや大きな値となる。これに ついても WET モデル中の < ī/3² > を EVM 近似したことに関 連している。

5.まとめ

水平冷風吹出を持つ3次元非等温室内流れ場のLESを実 施し乱流統計量のデーターベースを作成した。これを用いた アプリオリテストにより EVM、WET モデルを評価した。

乱流応力・熱流束の収支を詳細に調べることで、WET モデ ルは EVM に比べ良い精度をもつことを構造的に示した。

WET モデルは、そのモデル中に EVM の近似を含むこと により壁近傍で精度が悪くなる傾向が見られた。

これに関しては、壁の減衰効果を表すダンピング関数_{fu}を 課すことで改善されることを示した。

謝辞

本研究の実験データは東京工芸大学 伊藤一秀博士に御提供して 頂いた。また、研究の遂行にあたり資源環境技術総合研究所 飯塚悟 博士から多くの助言を頂いた。記して謝意を表する。

記号

 x_i : 空間座標の3成分、 u_i : 風速の3成分(i=1:噴流の主流方向, i=2: スパン方向、i=3:噴流と直角方向) f: 変数fの瞬時値、f: 変数 f にgrid filterを施した値、<f>: 変数f の時間平均値、f: 時間平 物などのずれくのです。 The grid miterを加した値、<1>. 安曇いの時間中均値、T. 時間中 均からのずれ(=f-<f>)、L₀:吹出口幅、<u_{in}>:吹出風候、< $\Delta\theta_0$ >: 代表温度差(左、右壁面温度(45)-吹出温度(15))、x_n⁺:壁座標 Pr:プラントル数、Prt:乱流プラントル数、k:乱流エネルギー, k の散逸率、t:渦動粘性係数、:分子動粘性係数。諸量は吹出口幅 L_0 , 吹出風速< u_{in} , 代表温度差< $\Delta \theta_0$ >で無次元化している。

注1 staggered gridを使用。離散スキームは空間に2次精度中心差分、 時間に3次精度Runge-Kutta法⁽⁴⁾を用いた。計算領域は実験と同じ 75L₀(x₁) × 15L₀(x₂) × 50L₀(x₃) 。 grid 分割は107(x₁) × 39(x₂) × 105(x₃)=438,165。流入境界は速度^{主2}、温度ともに実験値。流出境界 は速度に流入平均風速<uin>の一様流を与え、温度は勾配の型。速度の 壁面境界条件はWerner-Wengle型linear-1/7 power law⁽⁵⁾。熱の壁面 側面(x₂)方向の壁面には実験と同様、温度に 境界条件に関しては、 対する勾配0型(断熱条件)、 左、右壁面および天井、床面には速度 同様、温度に対するlinear-1/7 power law^{注3)}を用い、左、右壁面の温 度に実験値の45 を、天井、床面の温度に実験値の15 を与えた。 注2 実験と同様に乱れ強さ約1.15%の流入変動風をLeeら⁶⁶の手法 _____ により生成して与えた。乱れの長さスケールは0.1L₀を仮定。変動風 生成方法の詳細については文献(7)を参照されたい。

<u>注3</u> 左,右壁面および天井,床面においては速度の境界条件との整合 性を保つため、温度に関してもlinear-power lawを用いた[®]((1),(2) $\vec{r})_{\circ} \theta^{+} = \Pr(x_{n}^{+} (x_{n}^{+} \le 13) (1) \quad \theta^{+} = 6.4(x_{n}^{+})^{1/7} (x_{n}^{+} > 13) (2)$ 但し、本計算で用いたgrid分割の場合、吹出口および吸込口の極近傍 の壁面を除き、壁面ほぼ全領域においてlinear lawが課されている。 注4 Sモデルの計算は、文献(9)のLES結果を初期値に無次元時間で 1650経過した時点で解が統計的定常状態に達したと判断し、その後、 時間平均量算出のために3750の計算を行った。DSモデルの計算は、 Sモデルの結果を初期値に無次元時間で1650経過後、時間平均量算 出のために3750の計算を行った。

<u>注5</u> DS の結果を用い乱流応力・熱流束の収支を算出した際、高次 相関量の振動等による残差が見られたため、各モデルの評価(アプリ オリテスト)はSモデルの結果で行った。

<u>注</u>6 モデル評価対象流れ場では、< \vec{u}_3^2 >、< $\vec{u}_1\vec{u}_3$ >、< $\vec{u}_3\theta$ >の収支 (Fig.12,14,18)から浮力の寄与はほとんど0である。そのため MKC⁽¹¹⁾、MKCO⁽¹²⁾モデルで提案された浮力による乱れの減衰・促進 を表すダンピング関数(f_{BV},f_{B0})の効果は少ないと考え、今回の低 Re 数型の EVM/EDM の検討では f_{BV}, f_{B0} を考慮していない。

<u>注7</u> WET モデルの導出法を簡単に以下に示す。Grid Scale の乱流 応力 < ឃុំ ឃុំ > の輸送方程式注8)は、

$$\frac{D < u_{i}'u_{j}' >}{Dt} = D_{ij} + P_{ij} + G_{ij} + \Phi_{ij} - \varepsilon_{ij} .$$
(3)

 D_{ij} :拡散項, P_{ij} :生産項, G_{ij} :浮力生産項, Φ_{ij} :圧力歪相関項, ϵ_{ij} :散逸項。 Φ., に Rotta 型と IP.型を用いると、

$$\begin{split} \Phi_{ij} = -C_1 \frac{\epsilon}{k} (<\overline{u}_i \overline{u}_j' > -\frac{2}{3} k \delta_{ij}) - C_2 (P_{ij} - \frac{2}{3} P_k \delta_{ij}) - C_2 (G_{ij} - \frac{2}{3} G_k \delta_{ij}) \quad \mbox{(4)} \\ \hline \mbox{CCC}, P_k = 1/2 P_{ii}, G_k = 1/2 G_{ii}, E デル定数は C_1 = 1.8, C_2 = 0.6 \ \mbox{(14)}, \\ \hline \mbox{(3) 式において定常状態で等方性散逸} (\epsilon_{ij} = 2/3 \epsilon \delta_{ij}), 局所平衡 \end{split}$$
(P_k+G_k=ε)を仮定し、移流拡散項を無視して< <u>u</u>['], z['], について整理 すると本文中(6)式が得られる。(本文中(7)式も同様にして得られる。) 詳細は文献(1),(11),(15)を参照されたい。

<u>注8</u> 拡散項(Diffusion term)はGSの乱流拡散+圧力拡散+分子拡散 +SGS応力(SGS温度フラックス),散逸項(Dissipation term)は分子粘 性散逸+SGS応力(SGS温度フラックス)散逸項としてあらわす。これ らの項の式表現は文献(13)を参照されたい。

<u>注9</u> 乱流応力・熱流束の輸送方程式の各項を算出する際、数値誤差を _____ 防ぐためにコンシステントスキーム^(13,17,18)を導入した。それぞれの 収支の残差はほとんど0であり収支算出にあたって数値誤差は小さ く、コンシステントスキーム適用の効果が現れていることがわかる。 <u>注10</u> Fig.8,10,12,14において、Convは移流項、Prodは平均速度勾配 による生産項、Prod.Gは浮力生産項、Diffは拡散項、Pre-Sは圧力歪 相関項、Dissiは散逸項。Resi.は残差を示す。また、Fig.16,18にお けるProdは平均速度勾配項と平均温度勾配項による生産項の和、 P-GradTは圧力温度勾配相関項を示す。

参考文献

- (1) Launder, B.E.: On the Computation of Convective Heat Transfer in Complex Turbulence Flows, J. of Heat Transfer,
- Vol.110, (1988)pp.1112-1128. 伊藤,加藤,小林,鈴木,村上:不完全混合室内の居住域換気効率の (2)評価に関する研究(その6),日本建築学会関東支部(1997)pp.5-8.
- 松井,村上,持田:LES による非等温室内気流解析,第8回数値流 体力学シンポジウム論文集(1994)pp.269-272. (3)
- J.H.Williamson: J.of Comput. Phys. (1980) pp.35-48.
- Werner, H.and Wengle, H.: Large-Eddy Simulation of Turbulent Flow over and around a Cube in a Plate Channel, Turbulent Proc.8th Flows 19-Symp. on Shear 4(1991)pp.155-158.
- S.Lee, S.K.Lele, P.Moin: Simulation of spatially evolving turbulence and the applicability of Taylor's hypothesis in
- compressible folw,Phys. Fluids A4(7)(1992)pp1521-1530. 飯塚,持田,村上,李:LES のための流入変動風の作成法に関する 研究,第 10 回数値流体力学シンポジウム論文集(1996)pp.170-(7)171
- 小杉,村上,加藤,村上,飯塚,土屋:LES における壁面境界条件に関 する検討(その2)熱の壁面境界条件について、日本建築学会関東 支部報告集(1999)
- (9) 飯塚,土屋,村上,加藤,大岡: 非等温室内気流性状の LES データ ベース作成に関する研究(その 2),日本建築学会大会梗概集 (2000)pp.685-686. (10) 村上,加藤近本:低 Re 数領域にも適用可能な新しいk- モデル,
- (10) 日本建築学会計画系論文集,第 476,(1995.10)pp.9-17.
 (11) 近本,村上,加藤:アカダンピング下の低 Re 数流れに対応可能な 新しい k- モデル,日本建築学会計画系論文集,第 481,(1996.3)pp.67-74. (12) 大平,村上,加藤:浮力による安定・不安定流れへの適用を考慮し
- モデル,日本建築学会計画系論文集,第 た修正 k-503,(1998.1)pp.33-38.
- (13) 土屋,大岡,村上,加藤,飯塚:非等温室内気流性状の LES データベ ・ス作成に関する研究(その1)日本建築学会大会,環境工学 (2000)pp.683-684.
- (14) Launder, B.E.: Second-Moment Closure, UMIST Rep. No. TFD /82/4(1983)
- (15)村上周三:建築・都市の環境設計工学,東京大学出版会(2000.9). (16)大平,加藤村上:浮力の影響を考慮したk-モデルによるサーマルプリューム,非等温室内気流解析,日本建築学会計画系論文集,
- 第 522,(1999,8)pp.37-43. (17) 鈴木,河村:乱流の直接数値シミュレーションにおける差分式の
- 整合性,日本機械学会論文集(B)60巻 578(1994)pp.3280-3286. (18) 大岡,村上,持田:コロケーショングリッドを用いた LES におけ るエネルギー非保存性の検討,日本建築学会計画系論文集,第 492 号,(1997.2)pp.47-55.