

室内気流の乱流の数値シミュレーションの 診断システムに関する研究 (第 11 報)

— $k-\epsilon$ 型 2 方程式乱流モデルの数値定数に関する検討—
Study on Diagnostic System for Simulation of Turbulent Flow (Part 11)
—Investigation on Empirical Constants of $k-\epsilon$ 2-equation model—

村上 周三*・加藤 信介**・永野 紳一郎***
Shuzo MURAKAMI, Shinsuke KATO and Shin-ichiro NAGANO

1. 序

$k-\epsilon$ 型 2 方程式モデルには含まれる経験定数が多く、この値の tuning により予測結果を調整¹⁾²⁾することがしばしば行われる。これはモデルの利点であると同時に大きな弱点でもある。今回、室内気流を対象にして数値定数の変化が結果に及ぼす影響について調べたのでこれについて報告する³⁾。

2. 数値解析の概要 (図 1, 表 1, 表 2)

解析の対象とした室内空間モデルとメッシュ分割を図 1 に、基礎方程式を表 1 に示す。境界条件は前報に同じ^{4)~6)}である。表 2 に示す数値定数の基本タイプは Launder-Spalding 等を参考にしたもの⁷⁾⁸⁾であり、これに対して定数を、はじめに 1/2, 2 倍, 次に 1 割前後という順序で変化させて解析を行う。

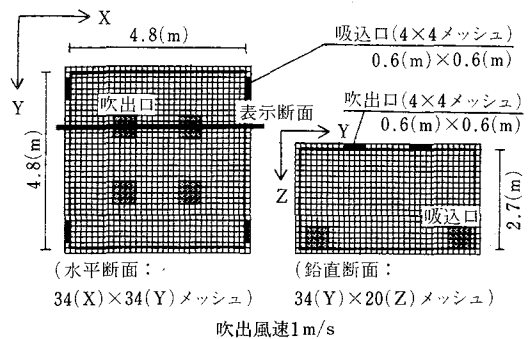


図 1. メッシュ分割図

(4 個吹き出し, 4 個吸い込みの室内モデル)

表 2 解析ケースと数値定数の変化

基本タイプ	(図 2)	$C_D \sim 0.09, \sigma_1 \sim 1.0,$ $C_1 \sim 1.59, \sigma_2 \sim 1.3$ $C_2 \sim 2.0$
Case 1		$C_1(1.59) \times 0.5$ $\times 2$ 注 2)
Case 2		
Case 3	(図 3)	
Case 4	(図 4)	
Case 5		$C_2(2.0) \times 0.5$ $\times 2$ $C_2 \times 0.9$ $C_2 \times 1.1$
Case 6		
Case 7	(図 5)	
Case 8	(図 6)	
Case 9		$C_D(0.09) \times 0.5$ $\times 2$ $C_D \times 0.9$ $C_D \times 1.1$
Case 10		
Case 11	(図 7)	
Case 12	(図 8)	
Case 13		$\sigma_1(1.0) \times 0.5$ $\times 2$ $\sigma_1 \times 0.9$ $\sigma_1 \times 1.1$
Case 14		
Case 15		
Case 16		
Case 17		$\sigma_2(1.3) \times 0.5$ $\times 2$ $\sigma_2 \times 0.9$ $\sigma_2 \times 1.1$
Case 18		
Case 19		
Case 20		
Case 21	(図 9)	メッシュ分割の粗密に関する検討 (定数は基本タイプと同じ)

表 1 $k-\epsilon$ 型 2 方程式モデルの基礎方程式 (3 次元)

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \frac{P}{\rho} + \frac{2}{3} k \right\} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_1} + \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + \nu_t S - \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{\nu_t}{\sigma_2} + \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right\} + C_1 \frac{\epsilon}{k} \nu_t S - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$\nu_t = C_D \frac{k^2}{\epsilon} = k^{\frac{1}{2}} l \quad (5)$$

$$S = 2 \cdot S_{ij} S_{ij} = 2 \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right\}^2 \quad (6)$$

$C_D, C_1, C_2, \sigma_1, \sigma_2$ については表 2 参照
 U_i : 平均速度 (m/s), $i=1,2,3$ P : 圧力 (N/m²) ϵ : 乱流散逸 (m²/s³)
 ν_t : 渦動粘性係数 (m²/s) k : 乱流エネルギー (m²/s²)
 l : 乱れの長さスケール (m)

注 1) 本数値解析は実スケールの物理量を用いて行っている

注 2) 境界条件は文献 4~6 を参照された

* 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 受託研究員 (フジタ工業 (株))

注 1) スペースの制約上 8 ケースのみについて結果を示す

注 2) 変化を与えた定数以外は基本タイプと同じ

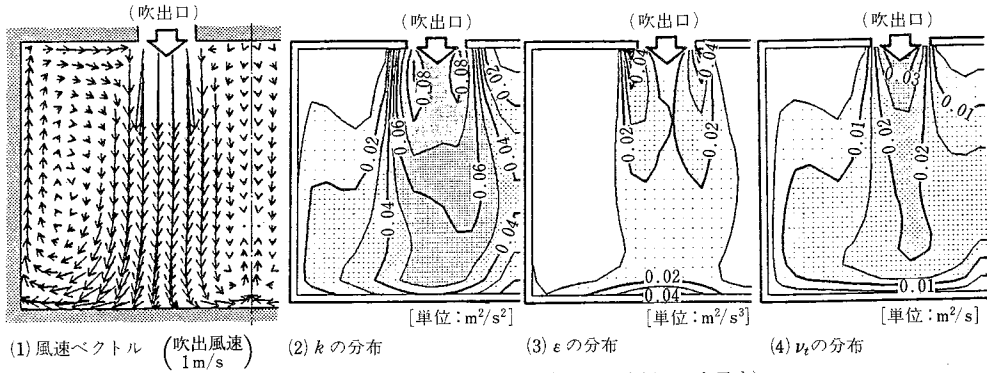


図 2 基本タイプ (モデルが対称であるから片側のみを示す)

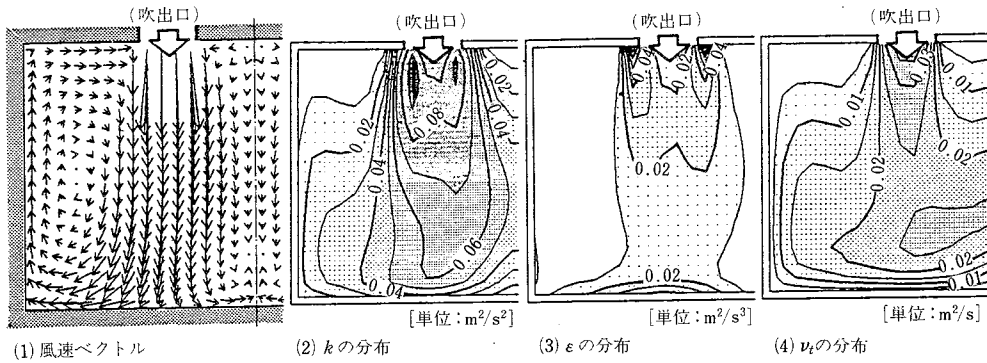


図 3 Case 3 ($C_1 \times 0.9$)

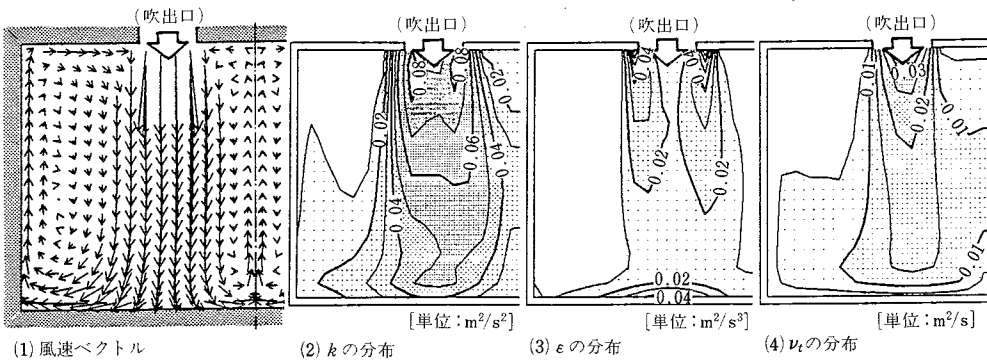


図 4 Case 4 ($C_1 \times 1.1$)

3. 解析結果

3.1 基本タイプ (図 2) 風速ベクトルが実験結果によく対応することはすでに報告している^{4)~6)}。

3.2 Case 3 (図 3, $C_1 \times 0.9$, ほかは基本タイプと同じ) 基本タイプに比べ ϵ はやや減少し, v_t と k は増加している。これは ϵ の生産項 (表 1, 式 (4) の $C_1 \epsilon v_t S / k$) が減少したためである。風速ベクトルはほとんど変わらないが、部屋中央における上昇流と下降流のぶつかる個所がやや下に移動している。

3.3 Case 4 (図 4, $C_1 \times 1.1$) 基本タイプに比べ ϵ がやや増加し, v_t と k は減少している。これは ϵ の生産が増加したためである。風速ベクトル (図 4 (1)) において、上昇流が天井まで到達している。これは v_t が減少して相対的にさらさらした流れになり、噴流域周縁において乱流粘性による拡散効果が減少したためと推定される。

3.4 Case 7 (図 5, $C_2 \times 0.9$) C_2 を小さくすると, ϵ の散逸項 (式 (4) の $C_2 \epsilon^2 / k$) が小さくなるため, C_1 を大きくした Case 4 と同様の効果があるはずである。実際基本タイプに比べ, Case 4 と同様の結果となり, ϵ は

研究速報

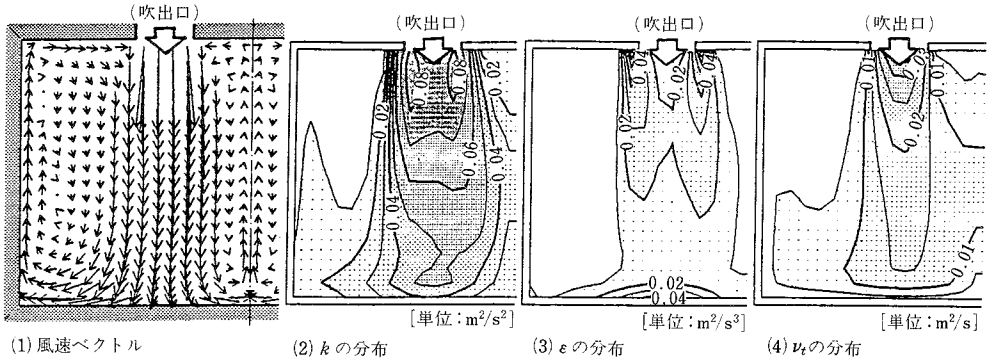


図5 Case 7 ($C_2 \times 0.9$)

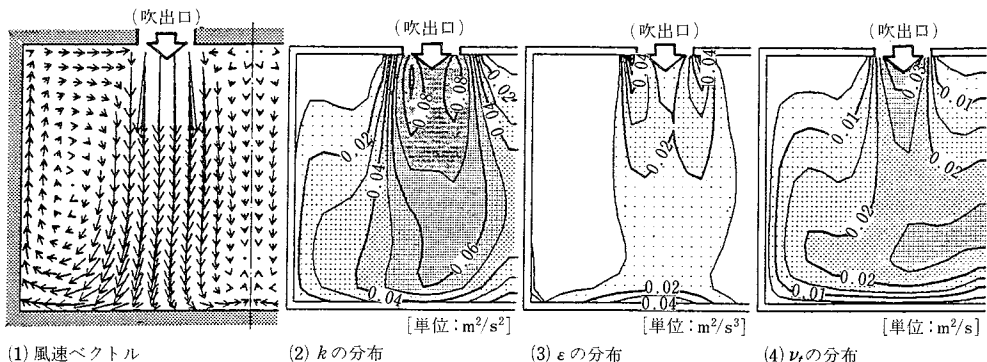


図6 Case 8 ($C_2 \times 1.1$)

増加し、 v_z と k は減少する。部屋中央における上昇流が顕著となる。

3.5 Case 8 (図6, $C_2 \times 1.1$) Case 3と同様の結果を得る。これは C_2 を大きくすると、 ϵ の散逸が大きくなるので、 C_1 の減少と同様の効果を持つためである。

3.6 Case 11 (図7, $C_D \times 0.9$) C_D の減少は、表1、式(5)からわかるように、 v_z を減少させる。しかし、その影響はわずかであり、Case 4ほど大きくはない。また k 、 ϵ に関しても基本タイプからの変化は大きくない。

3.7 Case 12 (図8, $C_D \times 1.1$) C_D の増加は、 v_z を増加させる効果を持つ。しかし、その影響は C_1 、 C_2 の変化に比べて小さい。

3.8 Case 15, 16, 19, 20 σ_1 、 σ_2 の1割程度の増減が、風速分布等と与える影響は小さく、 C_1 、 C_2 等の影響と異なる。図の掲載は省略する。

3.9 Case 21 メッシュ分割の影響 (図9) 参考のため、吹出口間を図9のように細かく分割した場合の結果を示す。Case 4やCase 7と同様の結果となり、 C_1 の増加あるいは C_2 の減少と同じ影響をもたらしている。この原因は、細かいメッシュ分割は、粗の場合にみられる

空間的なスムージング効果を持ちにくいので、 v_z を小さくすることと同様の効果を与えるためである。しかしながら中央の上昇流が強くなり実験値との対応からいえば、密な場合のほうが悪い結果を示している。メッシュを細かくしたとき結果が悪くなるということは、数値計算の常識から考えてありえないことであるから、これは C_1 、 C_2 等の経験定数の与え方が不適切であるという可能性を示唆している。

4. 結 論

- 1) 経験定数 C_1 、 C_2 の値を1割程度変化させることは、予測結果に十分認められる程度の顕著な変化を生じさせる。最適な数値定数の選択が大切である。
- 2) 数値定数 C_D 、 σ_1 、 σ_2 の場合、1割程度の変化では、結果に目立った変化は生じない。
- 3) メッシュ分割を細かくした場合の予測結果は今回基本タイプとして採用した数値定数の値が必ずしも適切でないという可能性を示唆している。

(1986年9月19日受理)

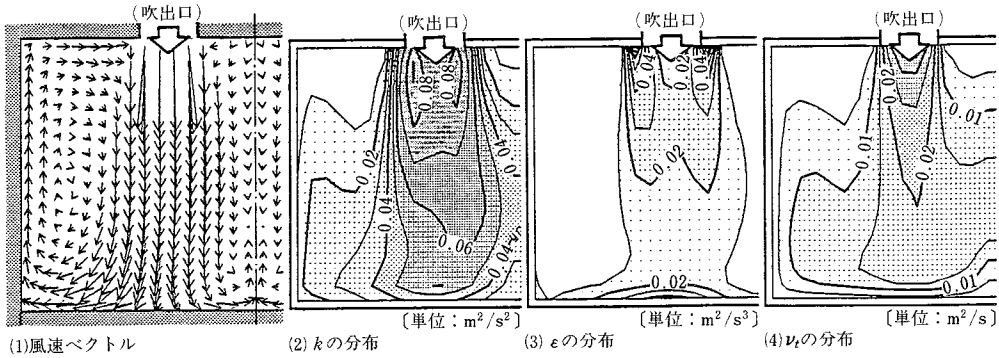


図 7 Case 11 ($C_D \times 0.9$)

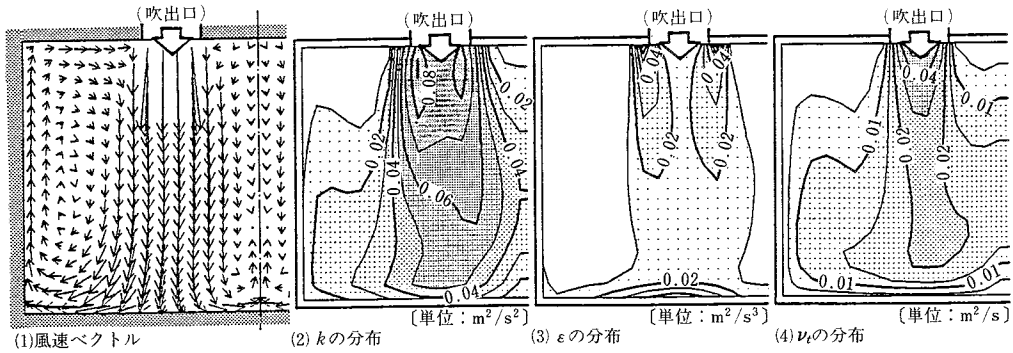


図 8 Case 12 ($C_D \times 1.1$)

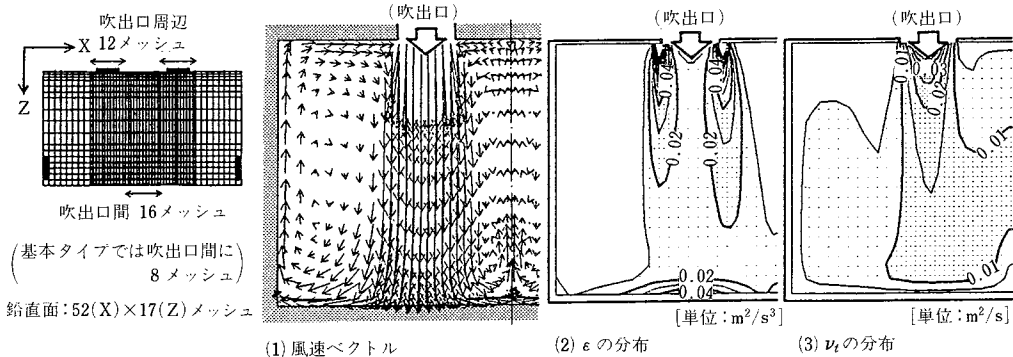


図 9 Case 21 (粗密に関する検討)

参 考 文 献

- 1) 貝塚, 管長, 高橋: 平面噴流の数値解析(その2), BLAD-BURY の実験との比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和 53 年 9 月
- 2) 河村: 高熱流束加熱ガスの 2 方程式乱流モデルによる予測, 日本機械学会論文集, 45-395, B, 昭和 54 年, 1038
- 3) 村上, 加藤, 永野: 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 8 報), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和 61 年 9 月
- 4) 村上, 加藤, 須山: 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, 吹出し, 吸込みを持つ室内気流の場合, 生産研究, Vol.38, 1, 1986
- 5) 村上, 加藤, 須山: 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 5 報), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和 60 年 10 月
- 6) 村上, 加藤, 永野: 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 7 報), 日本建築学会関東支部研究報告集, 昭和 61 年 7 月
- 7) B.E.Lauder and D.B.Spalding: Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, 1972
- 8) 野村, 松尾, 貝塚, 坂本, 遠藤: 室内空気分布の数値解法に関する研究. 3, 2 方程式モデルによる乱流の 3 次元解析, 日本建築学会論文報告集, 第 238 号, 昭和 50 年 12 月, 59-67