

# 代数応力モデルによる2次元角柱周辺気流の数値解析

Numerical Simulation of Air Flow around Square Rib by means of Algebraic Stress Model

村上周三\*・近藤靖史\*\*\*・持田 灯\*・田中忠範\*\*

Shuzo MURAKAMI, Yasushi KONDO, Akashi MOCHIDA and Tadanori TANAKA

2次元角柱まわりの流れ場を $(\overline{u_i u_j})$ の輸送方程式を代数化して解く代数応力モデル(ASM)を用いて解析し, 風洞実験およびk-εモデルと比較した結果を示す。また, k-εモデルとの比較により代数応力モデルの有効性について検討した。更に, ASMの結果を用いて2次元角柱まわりのレイノルズストレス $(\overline{u_i u_j})$ 間の関連を各生産項 $(P_{ij})$ を通じて考察した。

## 1. はじめに

本報では, 1/4乗の風速プロファイルを持つ境界層内に設置された2次元角柱まわりの流れ場を代数応力モデル(ASM)を用いて解析し, 風洞実験およびk-εモデルと比較検討した。筆者らはすでに, k-εモデルを用いて建物周辺気流の数値解析を行った場合, ①建物風上コーナー部のkの分布②建物屋上面の逆流③建物後方の循環流等の再現に関して問題点のあることを示している<sup>2)3)</sup>。既往のBackward Step形状の流れの解析例によれば<sup>7-10)</sup>, k-εモデルは簡便さ, 数値計算の安定性等に優れているが, その反面ストレスの非等方性の評価に劣っている。それに対し, 応力方程式モデルはレイノルズストレス $(\overline{u_i u_j})$ の生産項 $(P_{ij})$ をモデル化せずに評価するため, ストレス間の相互の関係を正しくとらえることができ,  $\overline{u_i u_j}$ の非等方性が問題となる流れ場(建物前面コーナー部等)に適した乱流モデルであると考えられる<sup>13)</sup>。本報では,  $\overline{u_i u_j}$ の輸送方程式を代数化して解く代数応力モデル(ASM)<sup>4-6)</sup>を用いて2次元角柱周辺の流れ場を計算し, k-εモデルとの比較等により, 上記の問題(①~③)について検討する<sup>1)14)</sup>。また, ASMの結果を用いて2次元角柱まわりの流れ場についてストレス $(\overline{u_i u_j})$ 間の関連を各生産項 $(P_{ij})$ を通じて考察する<sup>13)15)</sup>。

## 2. 風洞実験の概要

模型は1辺5cm( $H_b$ )の角柱を使用した。風速の測定には, タンデム型熱線風速計を使用した。模型棟高風速( $U_b$ )は約5m/sで, 接近流は1/4乗のべき乗則とした。 $H_b$ と $U_b$ によるRe数は約 $1.8 \times 10^4$ である。

<記号>  $U_i$ : i方向平均流速の成分(1:主流方向, 2:鉛直方向)  $u_i$ : i方向流速の変動成分 P: 圧力の平均値 k: 乱流エネルギー  $P_k$ : kの生産項  $\epsilon$ : kの散逸率  $\nu_t$ : 渦粘性係数( $\equiv C_\mu k^2/\epsilon$ )  $P_{ij}$ :  $\overline{u_i u_j}$ の生産項  $\epsilon_{ij}$ :  $\overline{u_i u_j}$ の散逸率  $\Phi_{ij}$ : 圧力-歪相関項, Rotta項 $\Phi_{ij(1)}$ , Rapid項 $\Phi_{ij(2)}$ およびWall Reflection項 $\Phi_{ij(3)}$ ,  $\Phi_{ij(2)}$ で構成される。ただし,  $\Phi_{ij(2)}$ についてはモデル化について問題があると考えられ, 今回の計算では無視した。オーバーバーは平均操作を意味する。 $w_0$ は領域を囲む壁面境界の総数, 上添え字(w)はw番目の壁に対する値。 $n^{(w)}$ はw番目の壁に垂直な単位ベクトルの成分,  $h_n^{(w)}$ はw番目の壁からの垂直距離。 $\delta_{ij}$ はクロネッカデルタ

表1 代数応力モデル(ASM)の基礎式(等温)

(連続式)	$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$	(1)
(運動方程式)	$\frac{DU_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j}$	(2)
(k-方程式)	$\frac{Dk}{Dt} = D_k + P_k - \epsilon$	(3)
(ε-方程式)	$\frac{D\epsilon}{Dt} = D_\epsilon + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \epsilon)$	(4)
( $\overline{u_i u_j}$ 方程式)	$(P_k - \epsilon) \frac{\overline{u_i u_j}}{k} = P_{ij} + \Phi_{ij} - \epsilon_{ij}$	(5)
	$D_k = \frac{\partial}{\partial x_m} (C_k \overline{u_m u_i} \cdot \frac{k}{\epsilon} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j})$	(6)
	$D_\epsilon = -\frac{\partial}{\partial x_m} (C_\epsilon \overline{u_m u_i} \cdot \frac{k}{\epsilon} \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j})$	(7)
	$P_k = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$	(8)
	$P_{ij} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k}$	(9)
	$\epsilon_{ij} = \frac{2}{3} \cdot \delta_{ij} \epsilon$	(10)
	$\Phi_{ij} = \Phi_{ij(1)} + \Phi_{ij(2)} + \Phi_{ij(3)}$	(11)
	$\Phi_{ij(1)} = -C_1 \frac{\epsilon}{k} (\overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k)$	(12)
	$\Phi_{ij(2)} = -C_2 (P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} P_k)$	(13)
	$\Phi_{ij(3)} = \sum_{n=1}^{w_0} C_3 \frac{\epsilon}{k} (\overline{u_k u_n} \cdot n_k^{(w)} \cdot n_j^{(w)} \cdot \delta_{ij} - \frac{3}{2} \overline{u_k u_i} \cdot n_k^{(w)} \cdot n_j^{(w)} - \frac{3}{2} \overline{u_k u_j} \cdot n_k^{(w)} \cdot n_i^{(w)}) \cdot \frac{k^{3/2}}{C_1 h_n^{(w)} \epsilon}$	(14)
	$C_1: 1.8 \quad C_2: 0.6 \quad C_3: 0.5 \quad C_4: 0.22 \quad C_\epsilon: 0.16 \quad C_{\epsilon 1}: 1.44$ $C_{\epsilon 2}: 1.92 \quad C_1: 2.5$	

## 3. 計算概要

ASMの基礎式を表1に, 境界条件を表2に, 計算条件を表3に示す(計算手法等の詳細は文献11), 12) 參

\*東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター

\*\*東京大学大学院

\*\*\*民間等共同研究員(㈱日建設計)

照).

4. 計 算 結 果

ASMと風洞実験およびk-εモデルとを比較した結果を示す。以下に示す諸量は、すべてH<sub>b</sub>とU<sub>b</sub>で無次元化されている。

4.1 風速ベクトル, 流線 (図 1, 2)

ASMとk-εモデル共通の指数則の壁面境界条件の計算において、k-εモデルでは建物屋上面の逆流が見られないが、ASMでは極めて小さいが再現され、風洞実験との対応もk-εモデルに比べると良い。この差は後述のkの評価の差に基づく乱流拡散(ν<sub>t</sub>)の差に由来すると考えられる。

4.2 k (図 3)

ASMの結果では、kのピークが建物屋上面にあるが、k-εモデルでは建物前面の角部にあり、またそのピーク値は、ASMのほうが多少小さい。この結果は、立方体周辺の流れ場の実験結果や後述するP<sub>k</sub>の分布を構造的に考察するとASMのほうが妥当な分布を示すと考えられる。

5. P<sub>k</sub>の考察 (図 4~7)

P<sub>k</sub>のピークを建物の角部で詳細に検討すると、k-εモデルでは建物前面の角寄りにあるが、ASMでは、屋上面の風上角寄りにあり、また、本来定義より生じてよい負の領域がASMでは見られるが、k-εモデルでは全く見られない。ここで、上記についてASMのP<sub>k</sub>の評価の妥当性を検討する。

P<sub>k</sub>は図7に示すようにノルマルストレスによるkの生産P<sub>k-n</sub> = (-u<sub>1</sub><sup>2</sup>∂U<sub>1</sub>/∂x<sub>1</sub> - u<sub>2</sub><sup>2</sup>∂U<sub>2</sub>/∂x<sub>2</sub>) (図5) とシアストレスによるkの生産P<sub>k-s</sub> = (-u<sub>1</sub>u<sub>2</sub>∂U<sub>1</sub>/∂x<sub>2</sub> - u<sub>1</sub>u<sub>2</sub>∂U<sub>2</sub>/∂x<sub>1</sub>) (図6) に分けられる。以下これらについて考察する<sup>3)</sup>。

5.1 P<sub>k-n</sub> (図 5, 図 7)

2次元では、連続式より-(u<sub>1</sub><sup>2</sup>-u<sub>2</sub><sup>2</sup>)∂U<sub>1</sub>/∂x<sub>1</sub>と表される。この中の-(u<sub>1</sub><sup>2</sup>-u<sub>2</sub><sup>2</sup>)の評価(ノルマルストレスの非等方性)にASMとk-εモデルで大きな差が見られる。すなわち、ASMではこれをモデル化せずに扱おうののに対し、k-εモデルでは、-(u<sub>1</sub><sup>2</sup>-u<sub>2</sub><sup>2</sup>) = 4ν<sub>t</sub>(∂U<sub>1</sub>/∂x<sub>1</sub>) と与えるため、P<sub>k-n</sub> = 4ν<sub>t</sub>(∂U<sub>1</sub>/∂x<sub>1</sub>)<sup>2</sup>となり∂U<sub>1</sub>/∂x<sub>1</sub>が大きくなる建物前面等では、常に大きな正の値となる(図5参照)。このため(∂U<sub>1</sub>/∂x<sub>1</sub>)が大きい領域(建物前面等)ではP<sub>k-n</sub>に大きな差が見られ、結果的にP<sub>k</sub>についてもk-εモデルのほうが大きい。したがってkの分布もk-εモデルでは建物前面で大きなピークを生じるが、ASMではこれが緩和されており、またピークは建物屋上面に生じている。以上のように、

表 2 境界条件

流入面	$U(x_2) = (x_2)^{1/4}, V(x_2) = 0, k(x_2) = 0.025,$ $l(x_2) = 4(C_\mu \cdot k(x_2))^{1/2} \cdot x_2^{3/4}$ (流入面でP <sub>k</sub> =ε) $\nu_t(x_2) = k(x_2)^{1/2} \cdot l(x_2)$ $\varepsilon(x_2) = C_\mu \cdot k(x_2)^{3/2} / l(x_2)$ $-\overline{u_1 u_2}(x_2) = \frac{1}{4} \cdot \nu_t(x_2) \cdot (U(x_2) / x_2)$ $\overline{u_1^2}(x_2) = \frac{2}{3} \cdot k(x_2), \overline{u_2^2}(x_2) = \frac{2}{3} \cdot k(x_2)$
流出面	$U(x_2) = (x_2)^{1/4}, V(x_2) = 0, k, \varepsilon; \text{ free slip}$ $-\overline{u_1 u_2}(x_2) = \frac{1}{4} \cdot \nu_t(x_2) \cdot (U(x_2) / x_2)$
上空面	$U(x'_2) = (x'_2)^{1/4}, V(x'_2) = 0$ $-\overline{u_1 u_2}(x'_2) = \frac{1}{4} \cdot \nu_t(x'_2) \cdot (U(x'_2) / x'_2)$ $k, \varepsilon; \text{ free slip}$
地表面 建物壁 面	$\partial U_i / \partial x_n = \frac{1}{4} (U_i)  _{F-c/h}, U_n = 0$ (壁面は $\frac{1}{4}$ 乗則を仮定) $k; \text{ free slip}, \varepsilon; \text{ 壁方則}, \varepsilon(x_2) = C_\mu^{3/4} \cdot k(x_2)^{3/2} / x_2 h$ $-\overline{u_1 u_2} = \frac{1}{4} (\nu_t)  _{F-c} \cdot (U)  _{F-c/h}$

ここで□(x<sub>2</sub>)はx<sub>2</sub>の関数を、添え字tは接線方向を、nは法線方向を示す。hは壁面第1セル差分定義点までの距離。x=0.4, C<sub>μ</sub>=0.09。( )|<sub>F-c</sub>は、第1セル差分定義点での値。x'<sub>2</sub>は、上空面第1セル差分定義点の地表面からの距離。諸量は棟高H<sub>b</sub>および棟高風速U<sub>b</sub>で無次元化している。

表 3 計算条件

計算領域を92×43に分割。最大メッシュ幅は、1.0、最小メッシュ幅を0.1(建物高さを1とする)。計算対象領域は、建物前方、後方ともに12H<sub>b</sub>、高さ方向に13H<sub>b</sub>。計算スキームは、(2)、(3)、(4)式の移流項はすべてQUICKスキーム。ただし、建物近傍では、部分的に1次風上差分を使用。時間差分は、Adams-Bashforthスキーム。

に、ASMでは、k-εモデルに比べP<sub>k</sub>の評価が妥当であると考えられる。ASMではこの評価の妥当性が、k、あるいは乱流拡散(ν<sub>t</sub>)<sup>\*)</sup>の値をより正しいものとし、その結果が建物屋上面の逆流の再現に反映されたといえる。

5.2 P<sub>k-s</sub> (図 6, 図 7)

シアストレスによるkの生産は、ASMでは、定義どおり-u<sub>1</sub>u<sub>2</sub>(∂U<sub>1</sub>/∂x<sub>2</sub>+∂U<sub>2</sub>/∂x<sub>1</sub>)としているのに対し、k-εモデルでは、ν<sub>t</sub>(∂U<sub>1</sub>/∂x<sub>2</sub>+∂U<sub>2</sub>/∂x<sub>1</sub>)<sup>2</sup>としており常に正となるが、ASMでは必ずしも正になるとは限らず、実際に負の領域も認められる(図6参照)。その結果、ASMでは、P<sub>k-n</sub>とP<sub>k-s</sub>が相殺する領域があり、ASMのP<sub>k</sub>は全般的にk-εモデルより小さくなる。

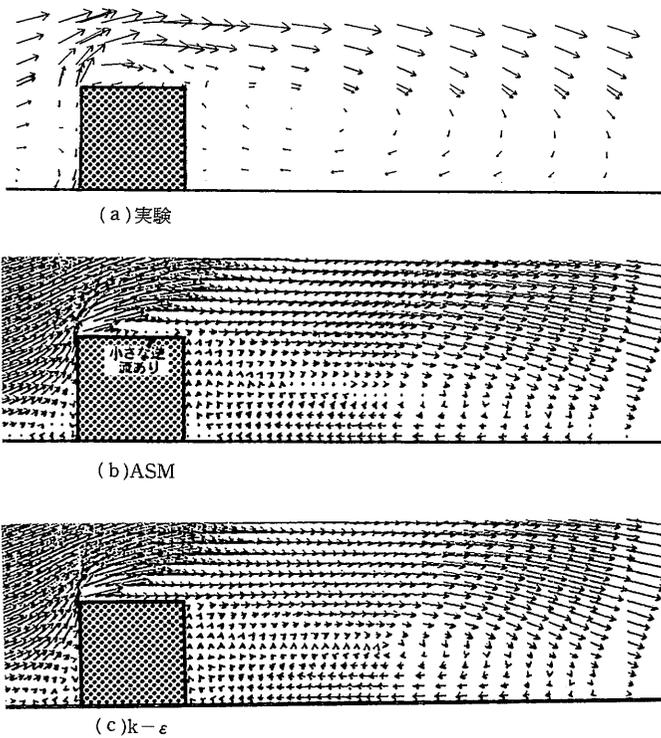


図 1 ベクトルの比較

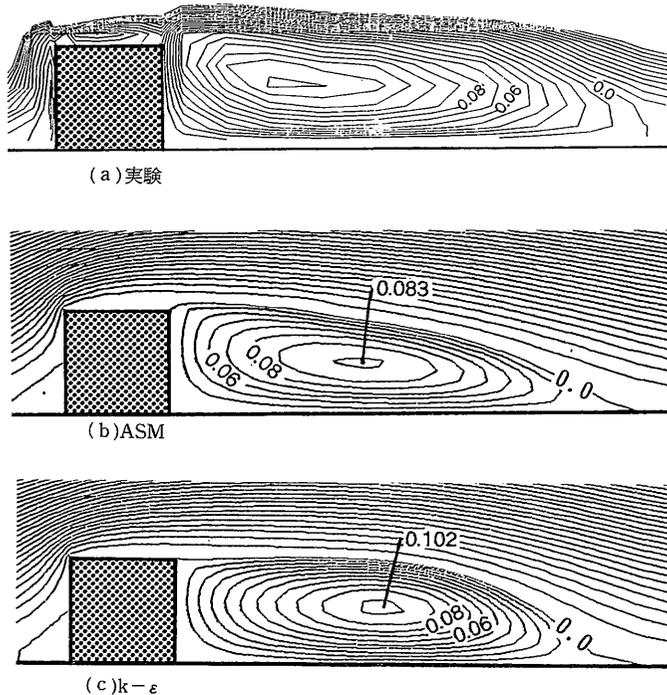


図 2 流線の比較

6.  $\overline{u_i u_j}$  の相互関連 (図 8 参照)

$\overline{u_i u_j}$  の値は周知のようにその生産項 ( $P_{ij}$ ) に大きく依存する<sup>13)</sup>といえる。また  $P_{ij}$  は各速度勾配と  $u_i u_j$  の積であり建物近傍のように速度勾配が急激に変化するような流れ場では、速度勾配が  $\overline{u_i u_j}$  の評価に大きな影響を与える。また、図 8 に示すように  $\overline{u_i u_j}$  の各成分は相互に依存している。たとえば  $\overline{u_1 u_2}$  の生産項  $P_{12} = -\overline{u_1^2} \frac{\partial U_2}{\partial x_1} - \overline{u_2^2} \frac{\partial U_1}{\partial x_2}$  には  $\overline{u_1^2}$  と  $\overline{u_2^2}$  が寄与する。また  $\overline{u_1^2}$  の生産項  $P_{11} = -2 \overline{u_1^2} \frac{\partial U_1}{\partial x_1} - 2 \overline{u_1 u_2} \frac{\partial U_1}{\partial x_2}$  には  $\overline{u_1^2}$  自身と  $\overline{u_1 u_2}$  が寄与し、 $\overline{u_2^2}$  の生産項  $P_{22} = -2 \overline{u_2^2} \frac{\partial U_2}{\partial x_2} - 2 \overline{u_1 u_2} \frac{\partial U_2}{\partial x_1}$  には  $\overline{u_2^2}$  自身と  $\overline{u_1 u_2}$  が寄与する。

一方、 $P_{ij}$  を考える上で重要である各速度勾配は、2 次元角柱まわりでは図 9～12 に示すような分布をしている。この速度勾配の分布に基づいて、 $P_{ij}$  の生産に関して特徴的な領域を巨視的に分割すると図 12 のようになる。すなわち、建物前面 (㉑領域)、風上側コーナ部 (㉒領域)、建物上部 (㉓領域)、建物後部の自由せん断流 (㉔領域) および建物後流の逆流域 (㉕領域) の 5 領域である。

以下、例として (f), (㉑), (㉓) 領域について図 8 に示す  $\overline{u_i u_j}$  の相互関連について説明する。表 5 に各領域についての検討結果をまとめて示す。なお、表 4 中の  $P_{ij}$  の構成要素 (㉑, ㉒, ㉓, ㉔, ㉕) を図 13 に示し、図 14 に  $P_{ij}$  を、図 15 に  $\overline{u_i u_j}$  の結果について ASM と  $k-\epsilon$  モデルを比較して示す。

7.  $\overline{u_i u_j}$  の ASM と  $k-\epsilon$  モデルの比較

7.1  $\overline{u_1^2}$  (図 15(a-1) (b-1))

$k-\epsilon$  モデルでは ASM に比べ、建物風上コーナ部で大きな値をとっている。これは、前述の  $P_k$  の評価の差に由来するものといえる。

7.2  $\overline{u_2^2}$  (図 15(a-2) (b-2))

$k-\epsilon$  モデルと ASM とともに大差は見られないが、建物風上コーナ部で  $k-\epsilon$  モデルのほうが多少大きな値となっている。

7.3  $\overline{u_1 u_2}$

$k-\epsilon$  モデルと ASM とともに大差は見られないが、建物後方の分布は、 $k-\epsilon$  モデルのほうが多少大きくなっている。

以上詳細は次項に示す。

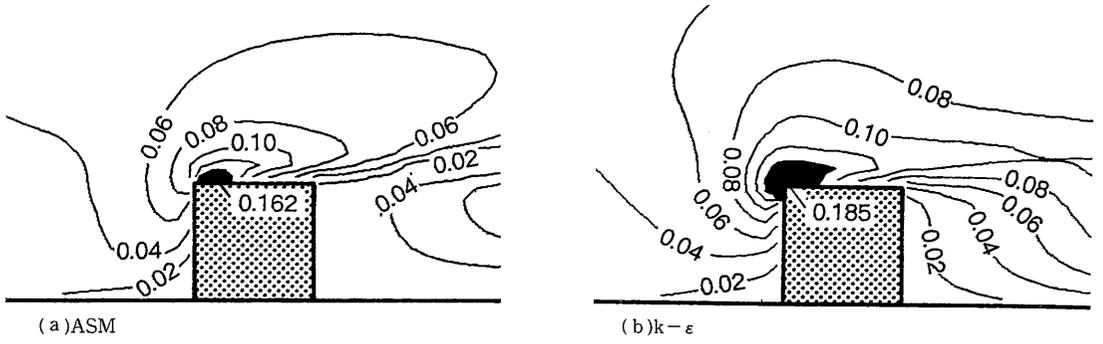


図3  $k$ の分布

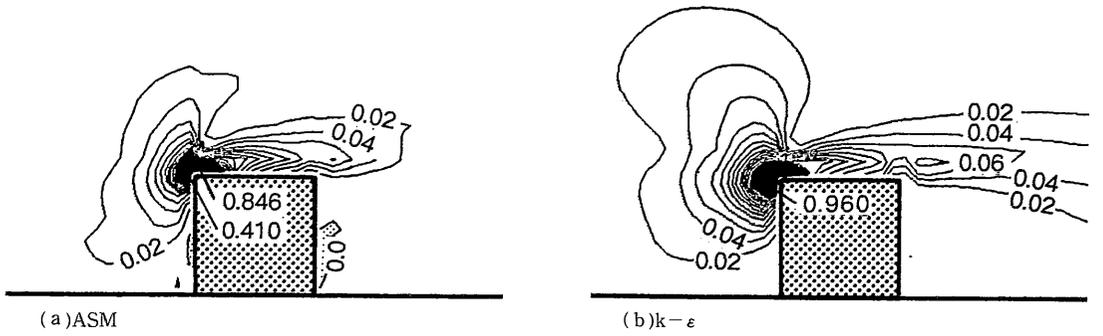


図4  $P_k$  ( $k$ の生産項)の分布

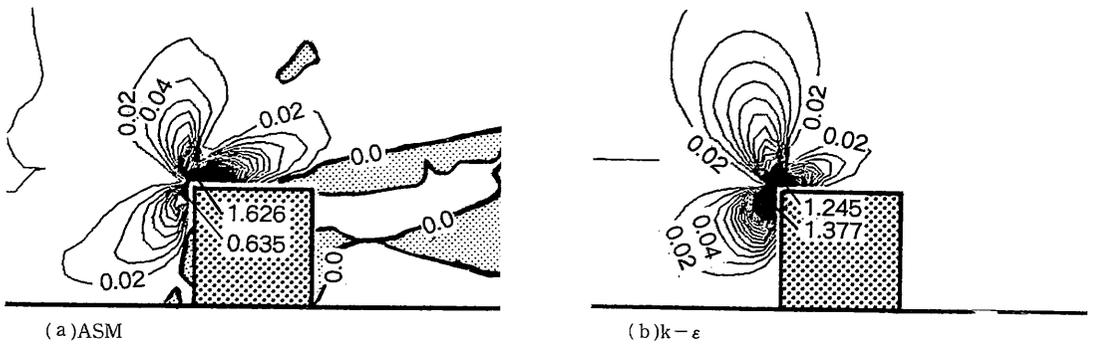


図5  $P_{k \cdot n}$ の分布

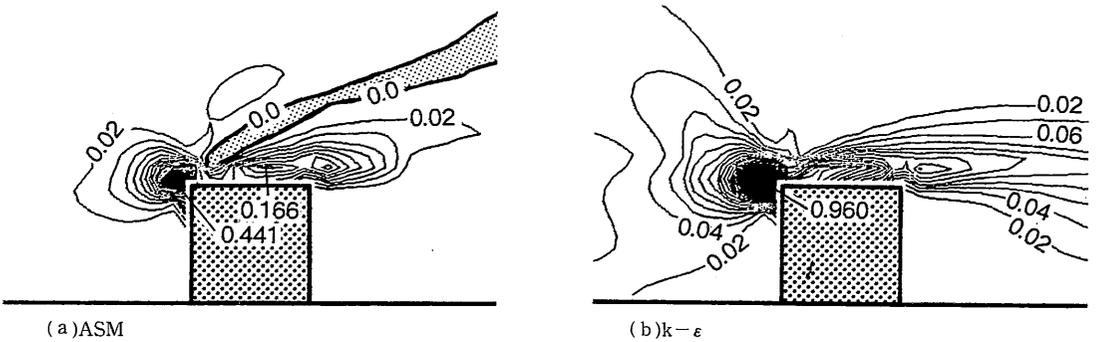


図6  $P_{k \cdot s}$ の分布

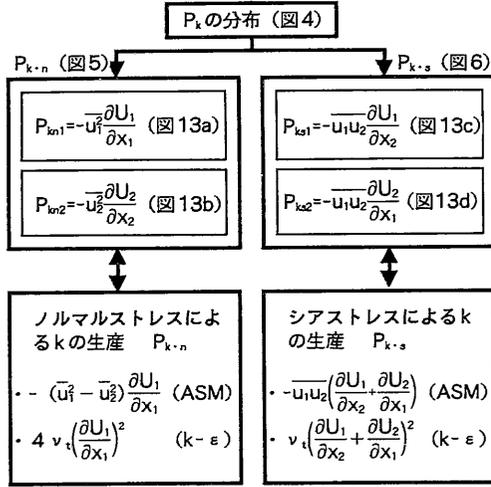


図7  $P_k$ の構造検討のためのフローチャート

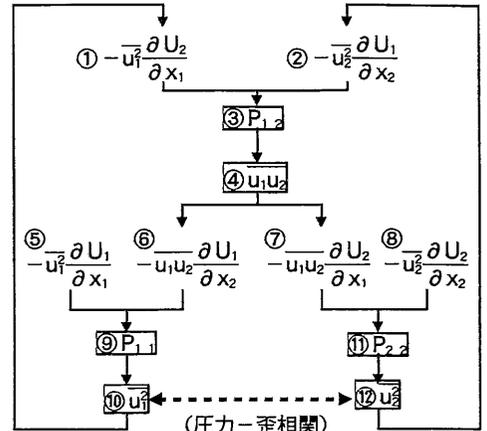


図8  $\overline{u_i, u_j}$ の相互関連のフローチャート

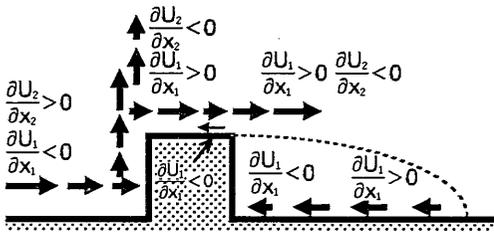


図9  $\frac{\partial U_1}{\partial x_1}, \frac{\partial U_2}{\partial x_2}$ の分布概念図

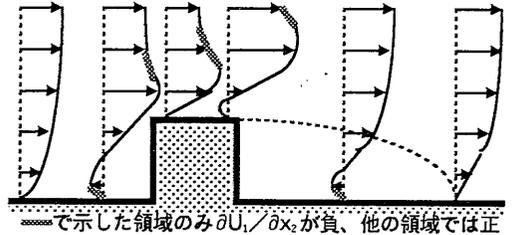


図10  $\frac{\partial U_1}{\partial x_2}$ の分布概念図

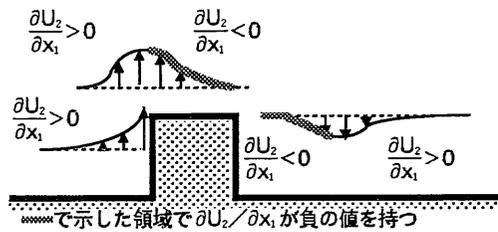


図11  $\frac{\partial U_2}{\partial x_1}$ の分布概念図

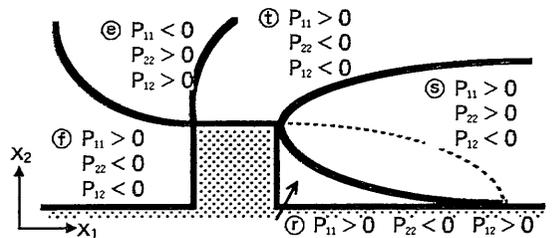


図12  $\overline{u_i, u_j}$ の生産の構造検討のための領域分割

8. ①領域における $\overline{u_i, u_j}$ の性状

8.1  $\overline{u_i, u_2}$

(表4(c)①<sub>12</sub>, 図13(e)(f), 図14(c), 図15(a-3)(b-3))

①<sub>12</sub>領域では $P_{12}(\overline{u_i, u_2}$ の生産項) =  $-\overline{u_i^2} \frac{\partial U_2}{\partial x_1} - \overline{u_2^2} \frac{\partial U_1}{\partial x_2} < 0$ である。これは $\frac{\partial U_2}{\partial x_1} > 0, \frac{\partial U_1}{\partial x_2} > 0$ による。この結果、 $\overline{u_i, u_2} < 0$ となる。この領域の $\overline{u_i, u_2}$ についてはASM,  $k-\epsilon$ モデルで似た結果(図15)を示す。

8.2  $\overline{u_i^2}$

(表4(a)①<sub>11</sub>, 図13(a)(b), 図14(a), 図15(a-1)(b-1))

①<sub>11</sub>領域で $P_{11}(\overline{u_i^2}$ の生産項) =  $-2\overline{u_i^2} \frac{\partial U_1}{\partial x_1} - 2\overline{u_i, u_2} \frac{\partial U_2}{\partial x_2} > 0$ である。これは、この領域で $\frac{\partial U_1}{\partial x_1} < 0, \frac{\partial U_2}{\partial x_2} > 0, \overline{u_i, u_2} < 0$ による。また、①領域では特に $\frac{\partial U_1}{\partial x_1}$ が大きいいため、 $P_{11}$ が大きく、 $\overline{u_i^2}$ の値も大きい。ただし、 $k-\epsilon$ モデルの建物前面の $\overline{u_i^2}$ のピークは $k$ の異常なピーク(図3)に由来するものであり、ASMの $\overline{u_i^2}$ のピーク値はそれほど大き

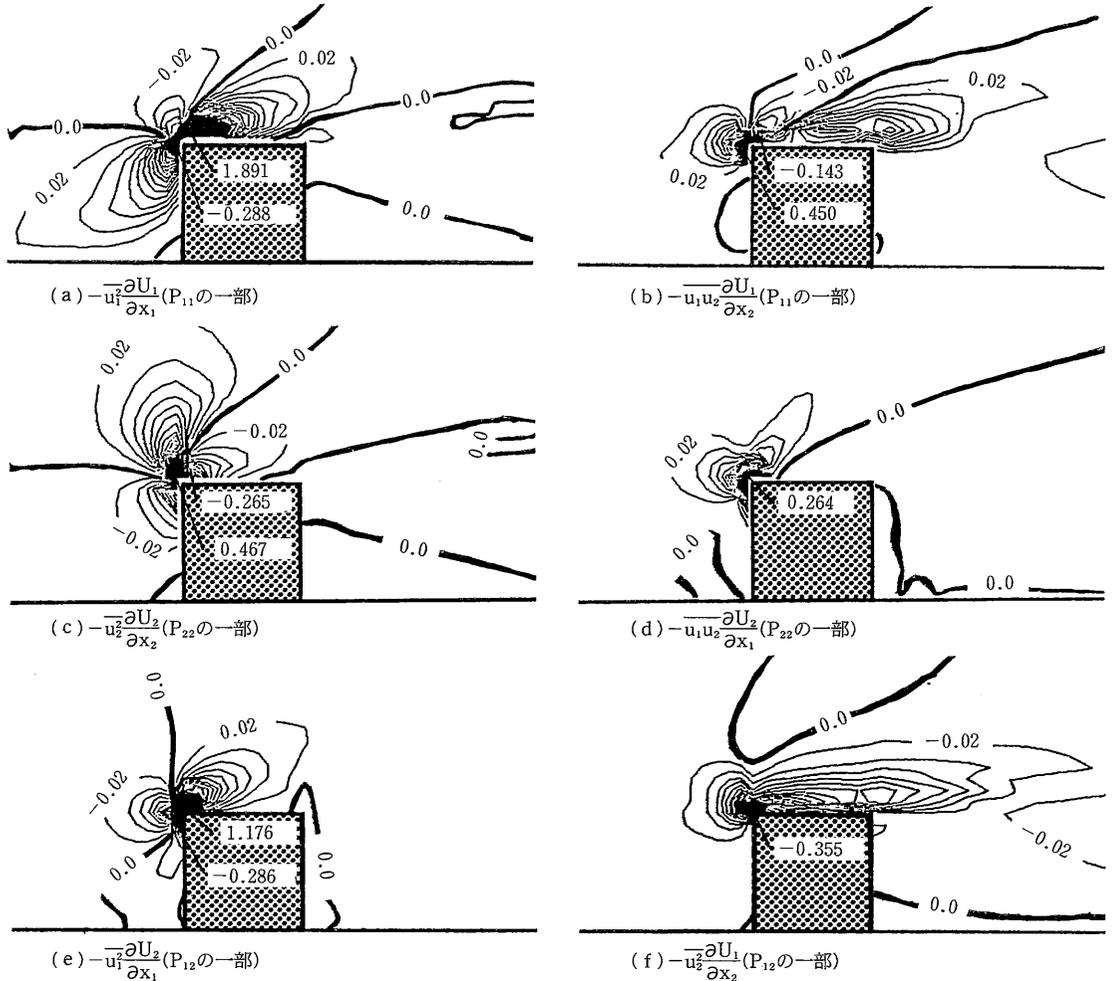


図13  $P_{ij}$  ( $\overline{u_i u_j}$ の生産項) の構成要素 (ASM)

くない。

8.3  $\overline{u_2^2}$

(表 4 (b) ①<sub>22</sub>, 図13(c)(d), 図14(b), 図15(a-2)(b-2))

①<sub>22</sub>領域で  $P_{22}$  ( $\overline{u_2^2}$ の生産項) =  $-2 \overline{u_2^2} \frac{\partial U_2}{\partial x_2} - 2 \overline{u_1 u_2} \frac{\partial U_2}{\partial x_1}$   $< 0$ である。この領域では  $\frac{\partial U_2}{\partial x_2} > 0$ ,  $\frac{\partial U_2}{\partial x_1} > 0$ ,  $\overline{u_1 u_2} < 0$  であり, 両項 (図13(c)(d)) が互いに相殺した結果,  $\overline{u_2^2}$ はこの領域で値が小さくなる。ただし, 圧力-歪相関項 (表 1 (12) (13)式) 等により, 負の値を持つことはない。

9. ①領域における  $\overline{u_1 u_1}$ の性状

9.1  $\overline{u_1 u_2}$

①<sub>12</sub>領域で  $P_{12} < 0$ 。これは  $-\overline{u_1^2} \frac{\partial U_2}{\partial x_1} > 0$ ,  $-\overline{u_2^2} \frac{\partial U_1}{\partial x_2} < 0$  であるが, この領域で  $\frac{\partial U_1}{\partial x_2}$  が正の大きな値を持つので  $-\overline{u_2^2} \frac{\partial U_1}{\partial x_2} < 0$  が卓越して  $P_{12} < 0$  となる。

9.2  $\overline{u_1^2}$

①<sub>11</sub>領域で  $P_{11} > 0$ 。これは  $-\overline{u_1^2} \frac{\partial U_1}{\partial x_1} < 0$ ,  $-\overline{u_1 u_2} \frac{\partial U_1}{\partial x_2} > 0$  で, この領域で  $\frac{\partial U_1}{\partial x_2}$  が正の大きな値を持つことにより  $-\overline{u_1 u_2} \frac{\partial U_1}{\partial x_2} > 0$  が卓越するためである。

9.3  $\overline{u_2^2}$

①<sub>22</sub>領域で  $P_{22} < 0$ 。これは  $-\overline{u_2^2} \frac{\partial U_2}{\partial x_2} > 0$ ,  $-\overline{u_1 u_2} \frac{\partial U_2}{\partial x_1} < 0$  で, 後者のほうが絶対値が大きいためである。また,  $P_{22} < 0$  であるため  $\overline{u_2^2}$ の値もこの領域で小さく, この傾向はASMのほうが  $k-\varepsilon$ より強いといえる (図15)。

10. ③領域における  $\overline{u_1 u_1}$ の性状

10.1  $\overline{u_1 u_2}$

③<sub>12</sub>領域で  $P_{12} < 0$ 。これは, この領域で  $\frac{\partial U_1}{\partial x_2}$  が正の比較的大きな値を持つため  $-\overline{u_2^2} \frac{\partial U_1}{\partial x_2} < 0$  が卓越して  $P_{12} < 0$

表 4 各領域における  $\overline{u_i u_j}$  の生産項  $P_{ij}$  の検討結果

(a) $P_{11}$		$\textcircled{f}_{11}$	$\textcircled{e}_{11}$	$\textcircled{t}_{11}$	$\textcircled{s}_{11}$	$\textcircled{r}_{11}$
$\textcircled{5}$	$u_1^2$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$
	$\frac{\partial U_1}{\partial x_1}$	$\ominus$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	$\ominus$
	$-\overline{u_1^2} \frac{\partial U_1}{\partial x_1}$	$\oplus$	$\ominus$	$\ominus$	$\ominus$	$\oplus$
$\textcircled{6}$	$u_1 u_2$	$\ominus$	$\oplus$	$\ominus$	$\ominus$	$\oplus$
	$\frac{\partial U_1}{\partial x_2}$	$\oplus$	$\pm$	$\oplus$	$\oplus$	$\ominus$
	$-\overline{u_1 u_2} \frac{\partial U_1}{\partial x_2}$	$\oplus$	$\pm$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$
$P_{11}$	$\textcircled{5} + \textcircled{6}$	$\oplus$	$\ominus$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$

(b) $P_{22}$		$\textcircled{f}_{22}$	$\textcircled{e}_{22}$	$\textcircled{t}_{22}$	$\textcircled{s}_{22}$	$\textcircled{r}_{22}$
$\textcircled{8}$	$u_2^2$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$
	$\frac{\partial U_2}{\partial x_2}$	$\oplus$	$\ominus$	$\ominus$	$\ominus$	$\oplus$
	$-\overline{u_2^2} \frac{\partial U_2}{\partial x_2}$	$\ominus$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	$\ominus$
$\textcircled{7}$	$u_1 u_2$	$\ominus$	$\oplus$	$\ominus$	$\ominus$	$\oplus$
	$\frac{\partial U_2}{\partial x_1}$	$\oplus$	$\ominus$	$\ominus$	$\pm$	$\pm$
	$-\overline{u_1 u_2} \frac{\partial U_2}{\partial x_1}$	$\oplus$	$\oplus$	$\ominus$	$\pm$	$\pm$
$P_{22}$	$\textcircled{7} + \textcircled{8}$	$\ominus$	$\oplus$	$\ominus$	$\oplus$	$\ominus$

(c) $P_{12}$		$\textcircled{f}_{12}$	$\textcircled{e}_{12}$	$\textcircled{t}_{12}$	$\textcircled{s}_{12}$	$\textcircled{r}_{12}$
$\textcircled{1}$	$u_1^2$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$
	$\frac{\partial U_2}{\partial x_1}$	$\oplus$	$\ominus$	$\ominus$	$\pm$	$\pm$
	$-\overline{u_1^2} \frac{\partial U_2}{\partial x_1}$	$\ominus$	$\oplus$	$\oplus$	$\pm$	$\pm$
$\textcircled{2}$	$u_2^2$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$
	$\frac{\partial U_1}{\partial x_2}$	$\oplus$	$\pm$	$\oplus$	$\oplus$	$\ominus$
	$-\overline{u_2^2} \frac{\partial U_1}{\partial x_2}$	$\ominus$	$\pm$	$\ominus$	$\ominus$	$\oplus$
$P_{12}$	$\textcircled{1} + \textcircled{2}$	$\ominus$	$\oplus$	$\ominus$	$\ominus$	$\oplus$

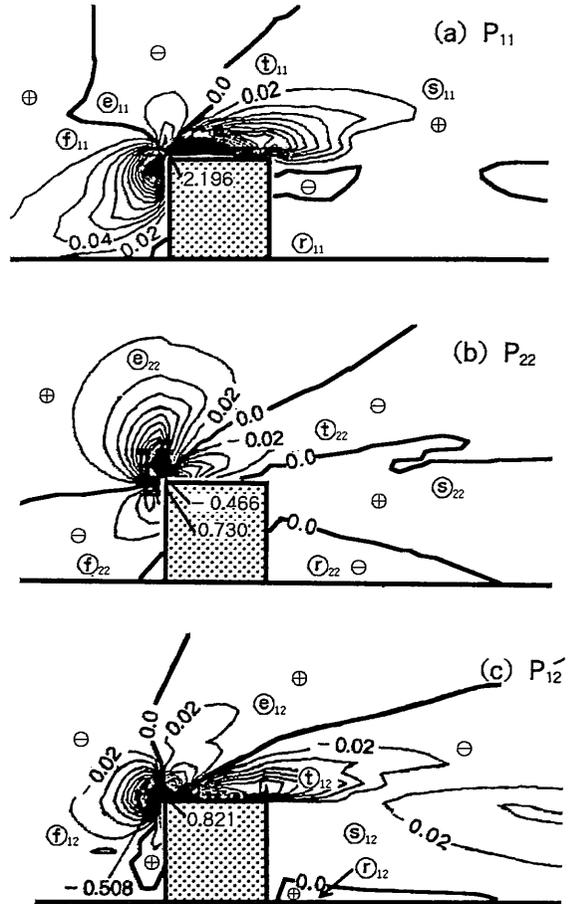


図14  $P_{ij}$  の分布 (ASM)

となる。

10. 2  $\overline{u_1^2}$

$\textcircled{5}$ 領域で  $P_{11} > 0$ 。これは、この領域では  $\frac{\partial U_1}{\partial x_2}$  がメイシアであり、 $-\overline{u_1 u_2} \frac{\partial U_1}{\partial x_2} > 0$  が  $-\overline{u_1^2} \frac{\partial U_1}{\partial x_1} < 0$  より  $P_{11}$  の評価に大きく寄与しているからである。

10. 3  $\overline{u_2^2}$

$\textcircled{8}$ 領域で  $P_{22} > 0$ 。これはこの領域で  $\frac{\partial U_2}{\partial x_1}$  が小さく、 $-\overline{u_2^2} \frac{\partial U_2}{\partial x_2} > 0$  の項が主要項となるためである。

11. ま と め

① k-εモデルでは建物前方角部でkのピークが見られたが、ASMでは建物屋上面にピークが見られ、立方体の実験結果から考察するとASMのほうが妥当な分布を示すと考えてよい。

② 同じ境界条件の計算において、建物上部の逆流がk-εモデルでは全く現れないのに対し、ASMでは極めて小さいが見られる。

③ 2次元角柱まわりの  $\overline{u_i u_j}$  の生産 ( $P_{ij}$ ) の構造をASMの結果より考察した。

④ 速度勾配の分布に着目して領域を分割し、各領域についてストレス間およびストレスと速度勾配の相互の関連を明らかにした。

⑤ ASMによって評価される  $\overline{u_i u_j}$  の分布は各領域で流れ場の特徴 (速度勾配の正負・大きさ等) が反映されたものとなっている。

今後、壁面境界条件・流出境界、メッシュ分割等をより適切なものに変えて検討を進めていく。

(1989年11月9日受理)

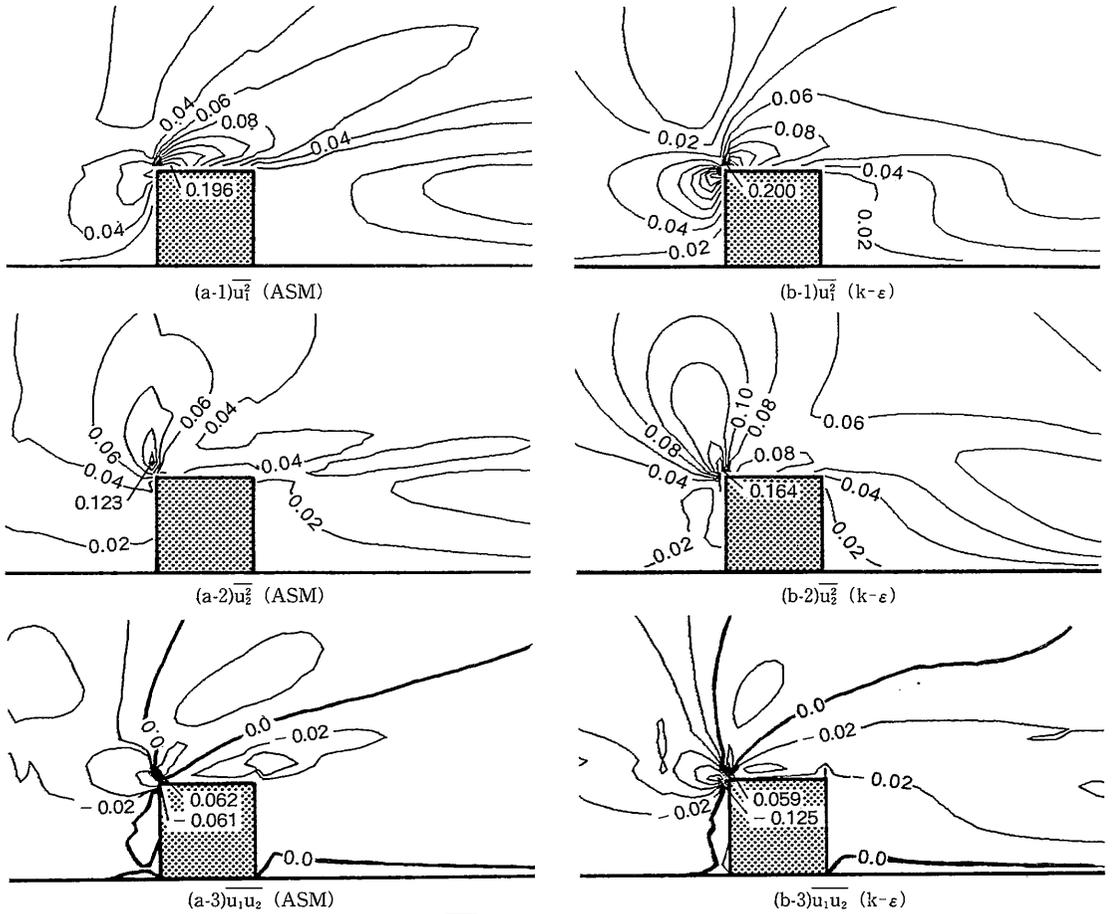


図15  $\overline{u_i u_j}$  の分布 (ASM と  $k-\epsilon$  の比較)

注 1) ASM の計算では  $\nu_t$  を用いる必要はないが、たとえば  $\overline{u_i u_j}$  等から算出した  $\nu_t$  と  $k-\epsilon$  モデルで用いている  $\nu_t$  とを比較した場合、非等方性を考慮できる ASM のほうが乱流拡散の評価はより正しくなるという意味である。

参 考 文 献

- 1) 田中・村上・加藤・近藤：日本建築学会学術講演梗概集，環境工学，pp. 463-464 (1989.10)
- 2) 村上・持田・林・大和田：建築学会論報，第392号，pp. 11-21 (1988.10)
- 3) 村上・持田・林：生産研究，vol. 41, No. 1, pp. 44-47 (1989. 1)
- 4) B.E. Launder, G.J. Reece, W. Rodi: J. Fluid Mech, vol. 68, pp. 537-566 (1975)
- 5) M.A. Leschziner, M. Kadja, C.J. Lea: Refind Flow Modelling and Turbulence Measurements, 3rd Int. Symp. IAHR pp. 83-90 (1988)
- 6) W. Rodi, G. Scheurer: Phys. Fluid, vol. 26(6), pp. 1422-1436 (1983)
- 7) R.S. Amano, P. Goel: AIAA JOURNAL. VOL. 23, NO. 9, pp. 1356-1361 (1985)
- 8) M.M. Sindir: ASME Paper 83-FE-10 pp. 1-8 (1983. 2)
- 9) R.K. Avva, S.J. Kline, J.H. Ferziger: AIAA 26th Aerospace Science Meeting, pp. 1-10 (1988)
- 10) C.G. Speziale, T. Ngo: Int. J. Eng. Sci. VOL. 26, NO. 10, pp. 1099-1112 (1988)
- 11) 近藤・村上・加藤：日本建築学会学術講演梗概集，環境工学，pp. 759-760 (1988.10)
- 12) 村上・加藤・近藤：生産研究，vol. 41. No. 1, pp. 11-20 (1989. 1)
- 13) 村上・加藤・近藤・田中：日本建築学会学術講演梗概集，環境工学，pp. 465-466 (1989.10)
- 14) 近藤・村上・持田・田中：日本風工学会誌，No.41 (1989.12)
- 15) 村上・近藤・持田・田中：日本風工学会誌，No.41 (1989.12)