

電力中央研究所 正会員 牛 島 省
電力中央研究所 正会員 加 藤 正 進
電力中央研究所 正会員 守 屋 祥 一

1. はじめに 本論文は、昭和57年度に行われた2次元プレナム内の定常・等温循環水流の乱流計測実験¹⁾を対象とした、乱流モデルによる数値解析について述べたものである。解析に用いたモデルは、LaunderらのReynolds Stress Model (RSM) と $k-\epsilon$ Model ($k-\epsilon M$)²⁾ であり、これらの解析結果を計測結果と比較することによって、両モデルの有効性の検討を行い、さらに、RSM中のReynolds stress方程式の各項に関する若干の考察を行った。

2. 実験の概要 実験装置の概略及び座標系、流速成分を図1に示す。流速の測定には、He-NeイオンLDVが用いられた。本実験は、田中らによって行われたものであり、ここでは、その詳細については省略する。

3. 解析の概要 (a)基礎式 RSM及び $k-\epsilon M$ の基礎式と係数値を以下に示す。

① 連続式と運動方程式 (両モデルで共通)

$$\frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_m} = 0 \quad \dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = -\bar{u}_m \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_m} + F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_m} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_m} - \overline{u'_i u'_m} \right) \dots\dots (2)$$

② Reynolds stress $\overline{u'_i u'_j}$ に関する方程式

$$\begin{aligned} \text{[RSM]} \quad \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial t} = & \underbrace{-\bar{u}_m \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_m}}_{\text{移流項(C)}} + \underbrace{P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \epsilon - c_1 \frac{\epsilon}{k} \left(\overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right)}_{\text{生成項(P) 散逸項(E) (PS)}} \\ & + \underbrace{\left\{ -\frac{c_2 + 8}{11} \left(p_{ij} - \frac{2}{3} p \delta_{ij} \right) - \frac{30 c_2 - 2}{55} k \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{8 c_2 - 2}{11} \right.}_{\text{Pressure - Strain 項 (PS)}} \\ & \quad \left. + \left(D_{ij} - \frac{2}{3} P \delta_{ij} \right) \right\} + c_s \frac{\partial}{\partial x_m} \frac{k}{\epsilon} \left(\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \overline{u'_m u'_m}}{\partial x_1} + \overline{u'_j u'_i} \frac{\partial \overline{u'_m u'_m}}{\partial x_1} \right)}_{\text{乱流拡散項 (TD)}} \\ & + \underbrace{\overline{u'_m u'_i} \frac{\partial \overline{u'_j u'_j}}{\partial x_1}}_{\text{(TD)}} \dots\dots (3) \\ \text{[k-}\epsilon M] \quad \overline{u'_i u'_j} = & -c_v \frac{k^2}{\epsilon} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \delta_{ij} k \dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$P = -\overline{u'_m u'_n} \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_n} \quad \dots\dots (10)$$

$$D_{ij} = - \left(\overline{u'_i u'_m} \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_j} + \overline{u'_j u'_m} \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_i} \right) \quad \dots\dots (11) \quad \text{である。}$$

係数値は、RSMでは、Launder²⁾らの提唱した値を用い、 $k-\epsilon M$ では、標準的な値を用いた。それらを以下に示す。

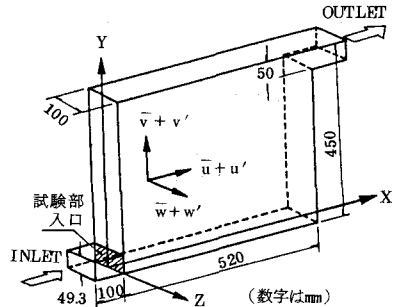


図1 実験装置概略図

③ 乱れエネルギー k に関する方程式

$$\begin{aligned} \text{[RSM]} \quad \frac{\partial k}{\partial t} = & -\bar{u}_m \frac{\partial k}{\partial x_m} + P - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_m} \left(c_s \frac{k}{\epsilon} \right. \\ & \left. \left(\overline{u'_i u'_n} \frac{\partial}{\partial x_n} \overline{u'_i u'_m} + \overline{u'_m u'_n} \frac{\partial}{\partial x_n} \overline{u'_i u'_m} \right) \right) \dots\dots (5) \\ \text{[k-}\epsilon M] \quad \frac{\partial k}{\partial t} = & -\bar{u}_m \frac{\partial k}{\partial x_m} + P - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_m} \left(c_k \frac{k^2}{\epsilon} \right. \\ & \left. \frac{\partial k}{\partial x_m} \right) \dots\dots (6) \end{aligned}$$

④ 乱れエネルギーの散逸率 ϵ に関する方程式

$$\begin{aligned} \text{[RSM]} \quad \frac{\partial \epsilon}{\partial t} = & -\bar{u}_m \frac{\partial \epsilon}{\partial x_m} + \frac{\partial}{\partial x_m} \left(c_\epsilon \frac{k}{\epsilon} \overline{u'_m u'_n} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_n} \right) \\ & + c_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P - c_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \dots\dots (7) \\ \text{[k-}\epsilon M] \quad \frac{\partial \epsilon}{\partial t} = & -\bar{u}_m \frac{\partial \epsilon}{\partial x_m} + \frac{\partial}{\partial x_m} \left(c'_\epsilon \frac{k^2}{\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_m} \right) \\ & + c'_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P - c'_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \dots\dots (8) \end{aligned}$$

$$\text{ここに、} P_{ij} = - \left(\overline{u'_i u'_m} \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_j} + \overline{u'_j u'_m} \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_i} \right) \dots\dots (9)$$

C_1	C_2	C_3	C_{ϵ_1}	C_{ϵ_2}	C_ϵ	C_ν	C_k	C'_ϵ	$C_{\epsilon_1'}$	$C_{\epsilon_2'}$
1.5	0.4	0.11	1.44	1.90	0.15	0.09	0.09	0.07	1.44	1.92

(b)解析方法 運動方程式の計算は、セミ・インプリシット法、圧力のポアソン方程式の計算は、SOR法を用いて行われた。境界条件は、入口部分で、平均流速及び乱れ量(RSMの場合のみ)の計測値を与え、 k と ϵ については $k = \frac{1}{2}(\overline{u^2} + \overline{v^2})$, $\epsilon = -\overline{u} \overline{v} \frac{\partial \overline{u}}{\partial y}$ とし、計測値から求めた値を与えた。出口部分では、諸量の x 方向の勾配を0とした。壁面部分では、平均流速には壁関数を用い、乱れ量は、フリースリップとした。

4. 結果と考察 (a)平均流速分布 $\overline{u}$ の分布を図2に示す。平均流速に関しては、両モデルの結果は、計測値と良く一致している。

(b)Reynolds stressの分布 ここでは、入口部から形成される壁面噴流のouter layerに相当する部分を対象とした。図5より、 $-\overline{u} \overline{v}$ については、両モデルの結果とも計測値と良く一致しているが、図3, 4に見られるように、 $\overline{u^2}, \overline{v^2}$ については、 $k-\epsilon$ モデルでは、乱れの非等方向性が適切に表現されていない。これは、(4)式で表わされるBoussinesqの仮説に原因があるものと考えられる。

(c)RSMのReynolds stress方程式中の各項の構成

(b)と同様の領域における、RSMの $\overline{u^2}, \overline{v^2}, \overline{w^2}$ 方程式の各項の構成をそれぞれ図6, 7, 8に示す。図6, 7には、計測値を最小二乗法により多項式近似して得られた移流項(C), 生成項(P)が示されているが、これらと解析結果とは、定性的に良く一致している。

解析結果から、 $\overline{u^2}, \overline{v^2}, \overline{w^2}$ の間では、Pressure-Strain項(PS)を通じて乱れの再配分が行われていることが認められた。また、図7に示されるように、 $\overline{v^2}$ 方程式の生成項は、ある領域で解析及び計測結果ともに負の値をとる。これらのことは、Irwinの壁面噴流の実験結果にも良く似た傾向であらわれている。

5. 結論 本報文で対象とした流れの場においては、Reynolds Stress Modelは、 $k-\epsilon$ Modelと比較して、特に乱流量の予測に関して、より有効であることが明らかとなった。今後は、非一様な温度場における乱流モデルの特性について検討を行う予定である。

最後に解析に御協力頂いた

田口富貴子氏(電力計算センター)に謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 田中, 守屋, 片野; 第28 回水購論文集.
- 2) B.E. Launder 他; JFM, vol. 68.
- 3) H.P.A.H. Irwin; JFM, vol. 61.

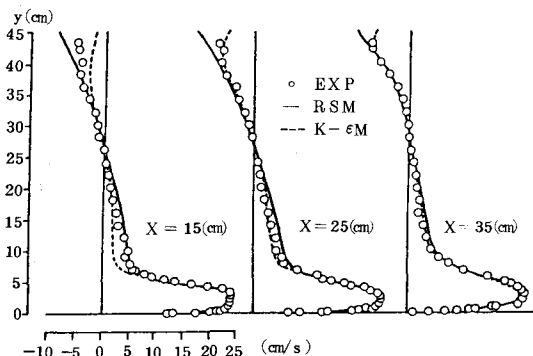


図2 $\overline{u}$ の分布

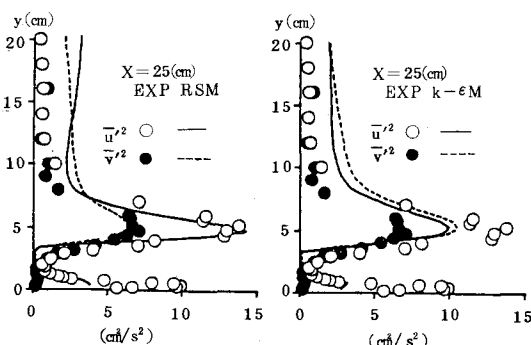


図3 $\overline{u^2}, \overline{v^2}$ の分布

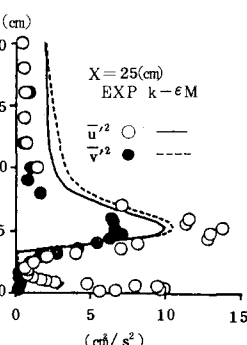


図4 $\overline{u^2}, \overline{v^2}$ の分布

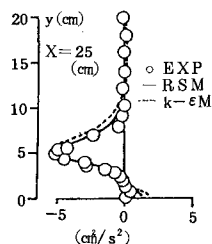


図5 $-\overline{u} \overline{v}$ の分布

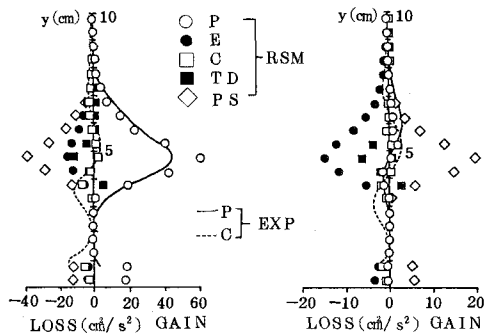


図6 $\overline{u^2}$ 方程式の各項構成

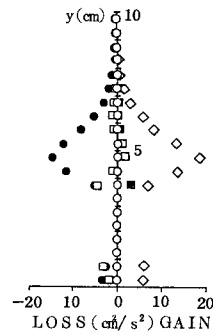


図7 $\overline{v^2}$ 方程式の各項構成

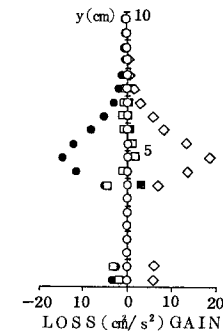


図8 $\overline{w^2}$ 方程式の各項構成