

II-245 レイノルズストレスモデルによる2次元成層せん断流の解析

電力中央研究所 正会員 牛島 省  
 電力中央研究所 正会員 角湯 正剛  
 電力中央研究所 正会員 守屋 祥一

1. はじめに 本報は、レイノルズストレスモデル(RSM)を用いて安定な2次元成層せん断流の数値解析を行い、非等温場における同モデルの適用性を検討するために、主として浮力効果の影響下における乱流量の解析結果に関する考察を加えたものである。

2. 実験の概要 実験は、図1に示す実験装置を用いて、表1に示した条件下で行った( $\bar{R}_i = \rho g H (T_1 - T_2) / (u_2 - u_1)^2$ )。記号及び座標系を図2に示す。実験では流下距離  $x/H = 1.79 \sim 3.57$  の区間における温度及び平均流速の鉛直分布を、それぞれシース外径0.3mm非接地型CA熱電対、直径3mmの小型プロベラ流速計を用いて計測した。温度計測の際のサンプリング時間は60秒、同周波数は200Hzである。これらの結果より、表1の全ケースにおいて平均温度及び平均流速に関する自己相関性が成り立つ領域が存在することを確認した。

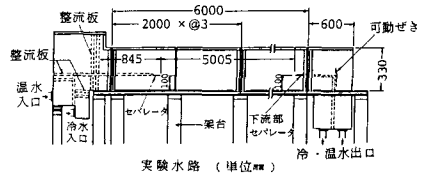


図1 実験水路(単位mm)

3. 数値解析 本報で用いたRSMはLaunder<sup>1)</sup>の提案したモデルを基礎としており、これに乱流量の各方程式の乱流拡散項の単純化(波線部分)等を加えたものである。その基礎式と係数値を以下に示す。

表1 実験条件

Run-No.	H (cm)	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	u <sub>1</sub> (cm/s)	u <sub>2</sub> (cm/s)	$\bar{R}_i$ (-)
Run-1	28.0	19.60	14.22	6.0	12.7	0.423
Run-2	28.0	27.18	12.34	6.0	12.7	1.166
Run-3	28.0	39.95	11.53	6.0	12.7	2.234

(1)連続式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

(2)運動方程式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_k^2} - \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u_i' u_k'}) + (1 - \beta) (\bar{T} - T_s) F_i \quad (2)$$

(3)平均温度 $\bar{T}$ の方程式

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_k} = -\frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u_k' T'}) + \alpha \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x_k^2} \quad (3)$$

(4)乱れエネルギーkの方程式

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial k}{\partial x_k} = P_k - \epsilon + C_s \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{k^2}{\epsilon} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

(5)乱れエネルギーの散逸率 $\epsilon$ の方程式

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (-\overline{u_m' u_n'} \frac{\partial \overline{u_m}}{\partial x_n}) - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} + C_{\epsilon 3} \frac{\partial}{\partial x_m} \left( \frac{k}{\epsilon} \overline{u_m' u_n'} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_n} \right) \quad (5)$$

(6)レイノルズ応力 $\overline{u_i' u_j'}$ の方程式

$$\frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_k} = P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \epsilon + C_s \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{k^2}{\epsilon} \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} \right) - C_1 \frac{\epsilon}{k} (\overline{u_i' u_j'} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k) - C_2 (P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} P_k) \quad (6)$$

(7)温度フラックス $\overline{u_i' T'}$ の方程式

$$\frac{\partial \overline{u_i' T'}}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial \overline{u_i' T'}}{\partial x_k} = -\overline{u_i' u_k'} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_k} - \overline{u_k' T'} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} - \beta F_i \bar{T}'^2 - C_{1T} \frac{\epsilon}{k} \overline{u_i' T'} + C_{2T} (\overline{u_k' T'} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} + \beta F_i \bar{T}'^2) + C_{\theta} \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{k^2}{\epsilon} \frac{\partial \overline{u_i' T'}}{\partial x_k} \right) \quad (7)$$

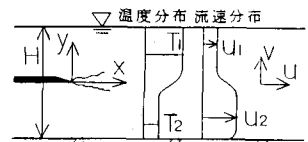


図2 記号と座標系

(8)温度変動量 $\bar{T}'^2$ の方程式

$$\frac{\partial \bar{T}'^2}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial \bar{T}'^2}{\partial x_k} = C_{\theta 2} \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{k^2}{\epsilon} \frac{\partial \bar{T}'^2}{\partial x_k} \right) - 2 \overline{u_k' T'} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_k} - \frac{1}{C_T} \frac{\epsilon}{k} \bar{T}'^2 \quad (8)$$

以上で、 $P_k, P_{ij}$ は、

$$P_k = -(\overline{u_i' u_k'} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} + \beta \overline{u_i' T'} F_i) \quad (9)$$

$$P_{ij} = -(\overline{u_i' u_k'} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + \overline{u_j' u_k'} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k}) - \beta (\overline{u_i' T'} F_j + \overline{u_j' T'} F_i) \quad (10)$$

係数値は以下のとおり。

$C_s$	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$C_{\epsilon 3}$	$C_1$	$C_2$	$C_{1T}$	$C_{2T}$
0.09	1.44	1.92	0.15	2.2	0.55	3.2	0.5
$C_{\theta}$	$C_{\theta 2}$	$C_T$					
0.07	0.13	1.25					

解析方法は前報<sup>2)</sup>とほぼ同様である。上流端境界条件のうち、乱れエネルギーk及びレイノルズ応力 $\overline{u_i' u_j'}$ については、実験から得られた平均流速分布より、Klebanoff<sup>3)</sup>の結果を参考にして設定した。自由表面はMAC法<sup>4)</sup>、また水路底面は対数則を用いてその境界条件を定めた。下流端では諸量のx方向の勾配を0とした。

4. 結果と考察 解析結果の検討は、前述した自己相似性の成立する区間内の  $x/H=2.50$  の断面を対象として行った。平均温度及び平均流速の分布を無次元化して図3,4に示す。両図より、 $R_1$ の増加とともに温度及び運動量の混合層厚が減少する傾向が認められる。

図5に、Ellison<sup>5)</sup>が提案した温度変動に関する特性長  $L_T (= \sqrt{T'^2} / (\partial T' / \partial y))$  と勾配型リチャードソン数  $R_1 (= \beta g (\partial T' / \partial y) / (\partial \bar{u} / \partial y)^2)$  との関係を示す。実験結果と解析結果は良く一致しており、 $R_1$ 数の増加とともに  $L_T$ は減少する。

次に、流速変動量の比  $\overline{v'^2} / \overline{u'^2}$ ,  $\overline{w'^2} / \overline{u'^2}$  ( $\overline{w'^2}$ は水路幅方向の流速変動量) と  $R_1$ 数との関係を図6,7に示す。解析結果のうち、 $\overline{v'^2} / \overline{u'^2}$ は低  $R_1$ 数 ( $R_1 \leq 0.2$ ) 領域でKomori<sup>6)</sup>, Young<sup>7)</sup>の結果と、また  $\overline{w'^2} / \overline{u'^2}$ は全般的にKomoriの結果と一致しているが、これらの領域内では  $\overline{v'^2} / \overline{u'^2}$ ,  $\overline{w'^2} / \overline{u'^2}$ ともに Webster<sup>8)</sup>の結果と比較すると値は小さく、かつ  $R_1$ 数に対する変化も小さくなっている。

また、 $u'$ と $v'$ の相関係数、 $v'$ と $T'$ の相関係数と  $R_1$ 数との関係は図8,9に示すようであり、いずれも低  $R_1$ 数 ( $R_1 \leq 0.2 \sim 0.3$ ) 領域では解析結果と実験結果との差異は小さいが、高  $R_1$ 数領域では解析結果の  $R_1$ 数増加に伴う低減が小さく、実験結果からの逸脱が大きくなっている。これは高  $R_1$ 数領域における流れの特性が、RSMでは適切に表現されていないことが一因であると考えられる。

渦動熱拡散係数  $\epsilon_H$ と渦動粘性係数  $\epsilon_M$ の比  $\epsilon_H / \epsilon_M$  (乱流プラントルの逆数) と  $R_1$ 数との関係を図10に示す。図中の実線はLaunder<sup>1)</sup>の関係式を示すが、ここでの解析結果はこれより全般的にやや小さい値となった。

5. おわりに RSMによる乱流量の解析結果は、既往実験結果をも含めて検討すると、低  $R_1$ 数領域ではほぼ妥当なものであると考えられるが、高  $R_1$ 数領域では両者の差異が比較的大きかった。このような非等温場におけるRSMの適用に関しては、今後より詳細な検討を行ってゆきたい。

本研究を行うにあたり御援助頂いた藤本健氏(電中研)、田口富貴子氏(電力計算センター)に謝意を表します。なお、本研究は(株)三菱重工業とのFBR実用化共同研究の一環として行ったものである。

<参考文献> 1) Launder, B.E.; JFM, vol.67 2) 牛島 他; 土木学会第40回年報 3) Klebanoff, P.S.; NACA Tech. Rep., No.1247 4) 武本 他; 第27回水講演文集 5) Ellison, T.H.; JFM, vol.2 6) Komori, S., Ueda, H., Ogino, F. & Mizushima, T.; JFM, vol.130 7) Young, S.T.B.; Queen Mary Coll., London, Rep.QMC-EP6018 8) Webster, C.A.G.; JFM, vol.19

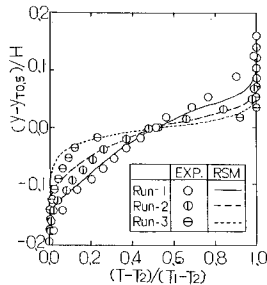


図3 平均温度分布

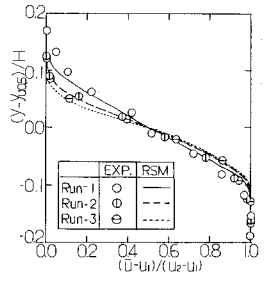


図4 平均流速分布

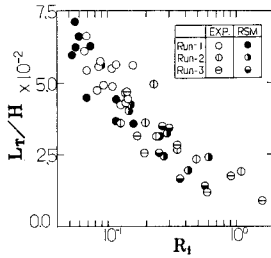


図5  $L_T/H \sim R_1$

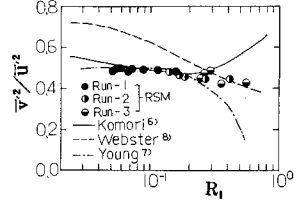


図6  $\overline{v'^2} / \overline{u'^2} \sim R_1$

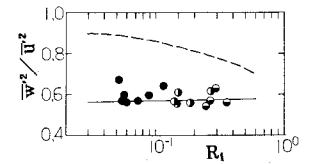


図7  $\overline{w'^2} / \overline{u'^2} \sim R_1$   
(記号は図6と同じ)

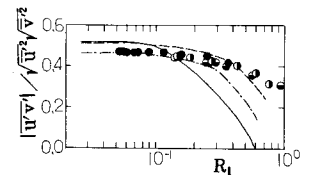


図8  $|u'v'| / \sqrt{\overline{u'^2} \overline{v'^2}} \sim R_1$   
(記号は図6と同じ)

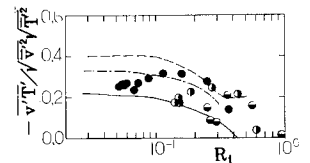


図9  $-v'T' / \sqrt{\overline{v'^2} \overline{T'^2}} \sim R_1$   
(記号は図6と同じ)

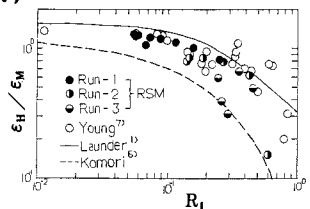


図10  $\epsilon_H / \epsilon_M \sim R_1$