

## 90度ベンド流れの数値シミュレーション

Numerical Simulation of Bend Flow with the Angle of 90

小林 敏雄\*・李 蓮源\*  
Toshio KOBAYASHI and Yeon Won LEE

## 1. はじめに

剥離や再付着を伴う流れ現象は工学のさまざまな分野において見られ、これらは機械や装置の性能、あるいは配管系の効率を大きく支配している。このような流れ場は、一般的に幾何学的形状が単純であっても、流れの力学的様相は非常に複雑となる。配管要素としてよく用いられる90度のベンドも剥離や再付着を引き起こす要因となる。90度ベンド流れの可視化写真<sup>1)</sup>から推測すると図1のように内壁に沿う流れはCONVEX CORNER Aで剥離してBに再付着する。また、外壁に沿う流れはC点で剥離してD点に再付着する。このような剥離によるコーナ部分のよどみの大きさは特に図1のような外壁の上面に発熱部があって、これを冷却する必要がある時冷却効率に大きく影響を及ぼすので、これを予測することは工学的に重要であると思われる。コーナ部分のよどみの大きさは縦横比、レイノルズ数等によって影響を及ぼされると予想される。しかし、設計便覧等を見ても損失係数等は求められているが、流れの局所的な知識は不足している。

一方、90度ベンドの数値計算における乱流モデルを考えると、レイノルズ応力方程式モデルは方程式系が複雑すぎ、またLES (Large Eddy Simulation) は工学的に興味のある乱流場に適用するには計算時間がかかりすぎる。現在では2方程式モデルの一つであるk-εモデルが最も実用的な乱流モデルとして広く普及されている。剥離や再付着を伴う流れ場をk-εモデルを用いた予測が実験と正確には一致しないことが知られている<sup>2)</sup>が、実用的な設計の立場から見ると、k-εモデルを用いた数値計算の結果から十分流れ場の理解ができるので経済性を考慮すると、k-εモデルを用いた計算は意義があると考えられる。

本報では、図1のような2次元チャンネルの90度ベンド(MITER BEND)の定常非圧縮流れに対し、k-εモ

デルを使った数値予測を行う。

## 2. 基礎方程式と乱流モデル

流れ場の変数は瞬間速度 $u_i$ と瞬間圧力 $p_i$ であり、これらの関係は次のような連続の式、N-S方程式により記述される。

$$\partial u_i / \partial x_i = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} \quad (2)$$

(1)、(2)式に対しレイノルズ平均をとると次のようになる。

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

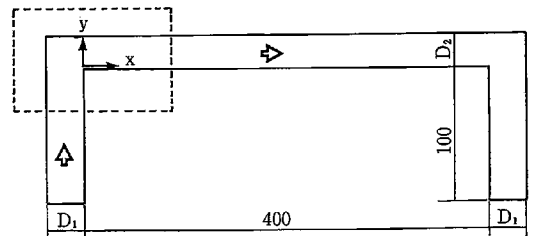
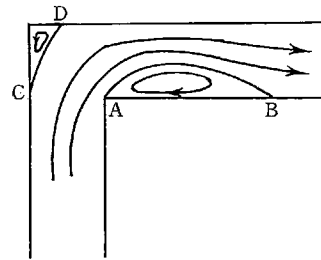


図1 Schematic Diagram and Calculation Domain

\*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

$$\frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i' u_j'} \right\} \quad (4)$$

ここで、 $-\rho \overline{u_i' u_j'}$ はレイノルズ応力である。レイノルズ応力に対し、以下の勾配拡散型の渦粘性近似<sup>3)</sup>を用いる。

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (5)$$

ここで、 $\mu_t$ は渦粘性係数である。

乱流エネルギー $k$ 、乱流エネルギー散逸 $\varepsilon$ の輸送方程式はそれぞれ次のように表現される。

$$\frac{\partial(\rho k U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu_t / \sigma_k + \mu) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + G - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu_t / \sigma_\varepsilon + \mu) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \rho \varepsilon^2 / k \quad (7)$$

ここで、

$$G = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \cdot \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$$

$C_\mu$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ は経験定数である。また、渦粘性係数 $\mu_t$ は $k$ と $\varepsilon$ により次のように算出される。

$$\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$$

### 3. 計算結果と考察

計算対象は図1に示すような流れ場である。ここで行った数値計算手法および計算条件を表1に示す。まず、 $k$ - $\varepsilon$ モデルによるMITER BENDの数値計算結果の妥当性を検討するために、Heskestadの実験<sup>4)</sup>と同様、縦横比( $D_2/D_1$ ) 1.0, レイノルズ数34000の数値計算を行った。図2は壁面に沿う圧力係数 $C_p$ の計算結果について、実験結果やHaaseの自由流線(FREE STREAMLINE)理論<sup>5)</sup>と比較したものである。

表1 計算条件

差分格子	スタガード	流入	速度	一様流入
スキーム	ハイブリッド法 (SIMPLE)	条件	$k$ - $\varepsilon$	十分に発達した乱流
Re = $UD_1/\nu$	31000-100000	流出条件		自由流出
$D_2/D_1$	0.5-2.0	格子数		69×62, 103×122 103×112
モデル定数	$C_\mu = 0.09$ $\sigma_k = 1.0$ $\sigma_\varepsilon = 1.3$ $C_1 = 1.44$ $C_2 = 1.92$	壁面条件	速度	壁法則
			$k, \varepsilon$	壁法則に基づく補正 <sup>2)</sup>

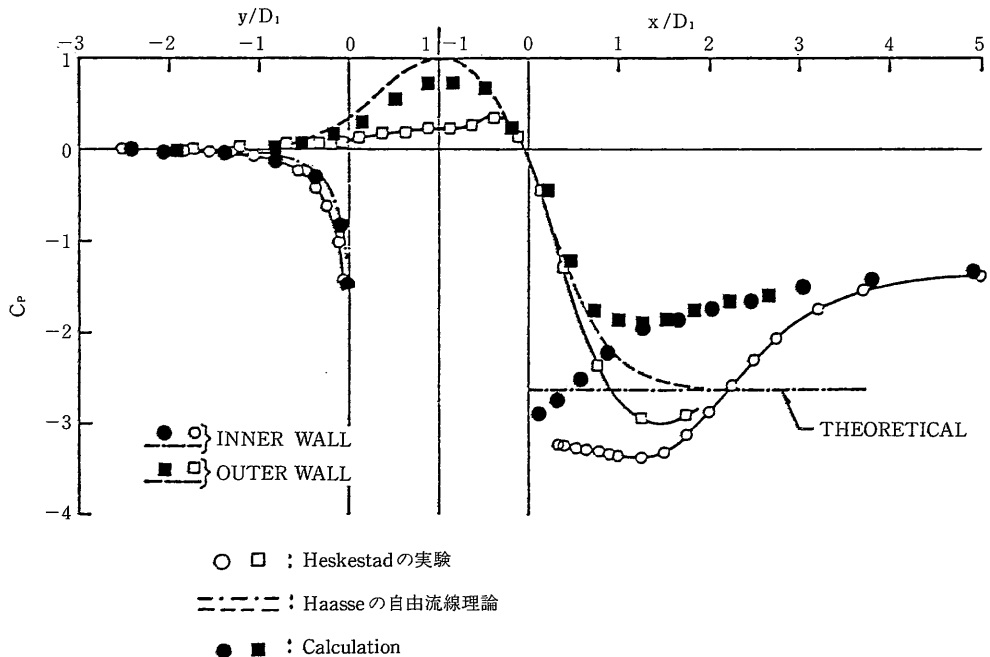


図2 Pressure Coefficient  $C_p$  ( $D_2/D_1=1.0$ ,  $Re=34000$ )

研究速報

ここで,  $C_p = (p - p_0) / p_{ua}$   
 $p$  = local static pressure  
 $p_0$  = reference static pressure  
 $(y/D_1 = -2.55$  の内壁の点,  $D_1 = 50.8\text{mm}$ )  
 $p_{ua} = 1/2\rho U^2$ , dynamic pressure  
 $U$  = 平均速度

剥離を起こしている領域を除いては,  $C_p$  の計算結果と実験値がよく一致する。しかし, 剥離領域では差が見られる。これは数値計算による剥離の大きさが実験値より小さくなった結果, 速度が遅くなり, 圧力も高くなっていると思われる。内壁の再付着点 (B) 後は外壁と内壁の圧力係数が一致することがわかる。再付着 (B) は実験によると  $x/D_1 = 2.9$  であるが, 計算では  $x/D_1 = 2.0$  となり, 約 30% 小さく予測されている。これは再循環を伴う流れでは曲率の影響やレイノルズ応力の非等方的な性質が大きく現れ, 普通の  $k-\epsilon$  モデルではうまく再現できないことを示している。これらの点を改善するためには, 曲率や非等方性が考慮される高次の乱流モデルおよび高精度の計算スキームを検討する必要があると思われる。

左右のコーナ (以下第一, 第二コーナと呼ぶ) の現象は図 3 でわかるように類似するのでこれからは第一コーナ部分を中心として説明する。図 3, 図 4, 図 5 には  $D_2/D_1 = 1.0$ ,  $Re = 31000$  の計算結果を示す。図 3 にベクトル線図の計算結果を示す。全般的な流れの形態は予想どおりコーナ部分における流れが剥離し, 再付着する再循環領域を持っている。コーナ部では流れが回転するため外壁側が速い速度を持つ半面, 内壁側は速度が遅くなり, 流れの方向の運動量よりも圧力勾配が大きくなる結果として剥離が生じる。再付着後はすぐ圧力を回復して徐々に 2 次元チャンネル形の流れ場になる。図 4 は圧力分布を示している。圧力の等高線が左右コーナ部分に密集していることがわかる。これはこの部分での圧力変化が大きいことを示し, これによって速度場が影響を受けて速度変動成分も大きくなることが予想される。図 5 を見る

と, コーナを回り込む部分の剥離領域で乱流エネルギー  $k$  の値が大きくなり, 圧力分布のところで予想と一致している。第一の剥離領域 ( $x/D_1 = 1.0$ ) における  $y$  方向の断面の乱流エネルギー分布を考えると, 乱流エネルギーは剥離中心部まで増加した後減少し, 管路中心部でほぼ一定値となる。さらに, 壁面近傍で値が大きくなり壁面で 0 になる。この結果は Back-Step の結果<sup>6)</sup> と同じになっている。

図 6 は, (a) 縦横比, あるいは (b) レイノルズ数の変化による, コーナ部よどみの大きさに及ぼす影響を調べたものである。ここで, B, C, D おおのの点は図 1 のように定義される。まず, 図 6 (a) を見ると, 外壁は  $D_2/D_1$  の変化 (2.0 から 0.8 まで) によって剥離点 (C) が 0.28 から 0.18 まで変化し, 再付着点 (D) は 0.72 から 0.18 まで変化する。内壁の再付着点 (B) は 2.9 から 1.8 まで変化する。これより  $D_2/D_1$  の比を小さくすると, 外・内壁のよどみの大きさが小さくなることがわかる。図 6 (b) は  $D_2/D_1 = 1.0$  の時, レイノルズ数を 31000 から 100000 まで変化するこによるよどみの大きさの変化を示している。これを見ると, よどみの大きさはレイノルズ数にあまり影響されないことがわかる。

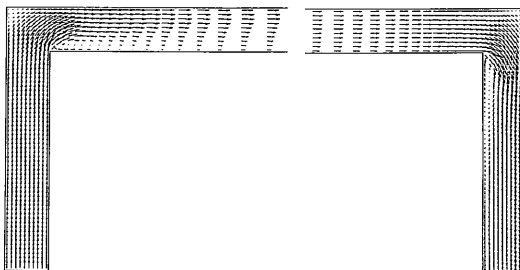


図 3 Vector Diagram ( $D_2/D_1 = 1.0$ ,  $Re = 31000$ )

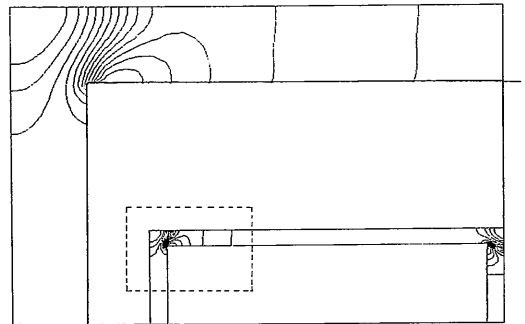


図 4 Pressure Contour ( $D_2/D_1 = 1.0$ ,  $Re = 31000$ )

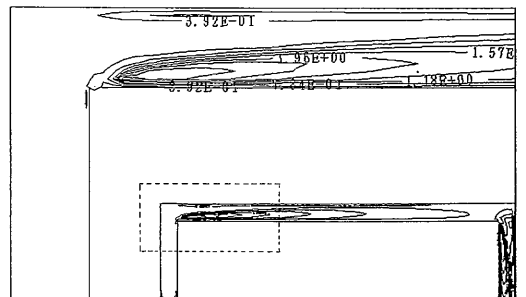


図 5 Turbulence Energy Contour ( $D_2/D_1 = 1.0$ ,  $Re = 31000$ )

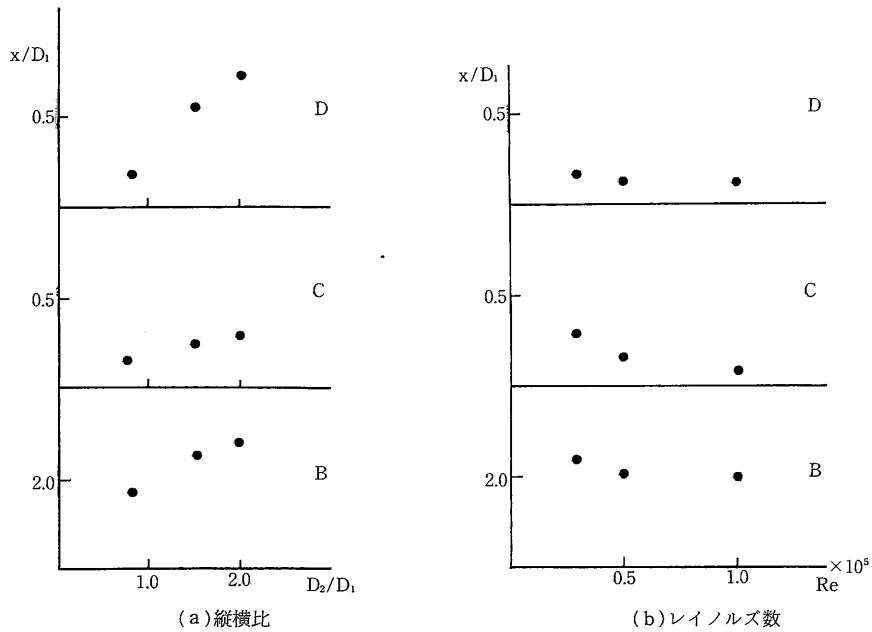


図6 Corner部におけるよどみの変化

4. ま と め

90度ベンド流れに対し、 $k-\epsilon$ モデルを用いた数値計算を行い、以下の結論を得た。

(1) 剥離領域を小さくするためには縦横比 ( $D_2/D_1$ ) が小さくなるように設計すると良いことが予想される。

(2) 乱流エネルギーは流れがコーナを回り込む部分の剥離領域に一番大きく生じる。

(3) 再循環を伴う流れ場について、 $k-\epsilon$ モデルの数値計算による再付着距離は従来から指摘されているように実験結果より小さい値を与えるため、曲率の影響および非等方性をよく再現できる乱流モデルを検討する必要がある。

ある。

(1989年11月2日受理)

参 考 文 献

- 1) Ackeret, J., "Aspects of Internal Flow", Elsevier Publishing Company, New York, 1967, pp. 1-26.
- 2) 小林, 森西, 呉, 佐田, 生産研究, 41-1, p. 56, 1989
- 3) A.D. Gosman and F.J.K. Ideriah, TEACH-2E code (1983).
- 4) G. Heskestad, ASME, J. of Basic Engineering (1971), p. 433
- 5) Haasse, D., "Stromung in einem 90-Knie", Ingenieur-Archiv, vol. 22, 1954, pp. 282-292.
- 6) 小林, 大町, 明, 生産研究, 42-1, p. 67, 1990