

S型ベンドの流れの数値解析

山田 仁* 石垣 博* 望月宗和*

Numerical Analysis of Laminar Flow in S-Curved Square Duct with Inlet and Outlet Straight Region

by

Hitoshi YAMADA, Hiroshi ISHIGAKI, Munekazu MOCHIZUKI

Kakuda Research Center, National Aerospace Laboratory

Abstract

Developing laminar flow in a S-curved square duct with an inlet and outlet straight region, is studied numerically by using a finite volume method. In this study, Dean Number is 299 and curvature ratio is 7 and S-curved duct angle is 22.5 degrees respectively. Calculated results are compared with the experimental data by Taylor et al.. The calculated results showed good agreements with the experimental data.

1. 緒言

矩形S型曲り管内の層流の助走区間を含む流れについて数値解析を行い、従来の実験結果と比較した。S型ベンド内層流の実験研究についてはTaylor, Whitelaw, Yianneskis⁽¹⁾らの研究がある。しかし計算研究については円形S型ベンドについては行われている⁽²⁾が、矩形S型ベンドについてはあまりないようである。

本報告の目的は正方形ベンド計算研究の一連として、正方形断面90度ベンドの計算⁽³⁾に引きつづき矩形S型曲り管内の完全NS計算を行い、その結果を実験データと比較検討することにより矩形S型曲り管内の特性を把握しようとするものである。

2. 計算方法

流れは定常非圧縮層流とし、図1に上流及び下流に直管部をもつ正方形断面S型ベンドを示す。

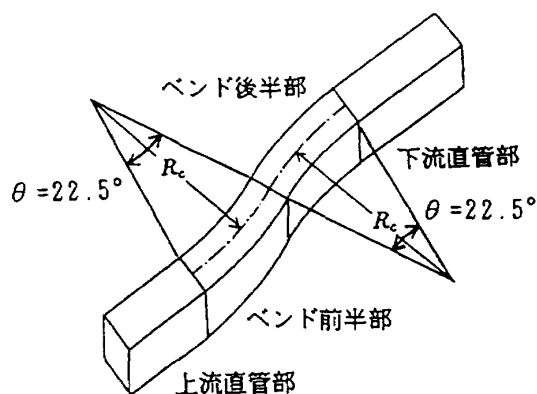


図1 計算の対象とした矩形S型ベンド
(実験はP.Taylor, H.Whitelaw, M.Yianneskisによる)

幾何形状は前節に述べたTaylorら⁽¹⁾の実験と同一にした。ベンド前半部の

*航空宇宙技術研究所角田支所

曲り角は22.5度で、ベンド後半部の曲り角も同様に22.5度である。また曲率半径比 λ はベンド前半部とベンド後半部で各々7.0としてある。ディーン数 K は299、レイノルズ数 R_e は790となる。

計算に用いた座標系を図2に示す。

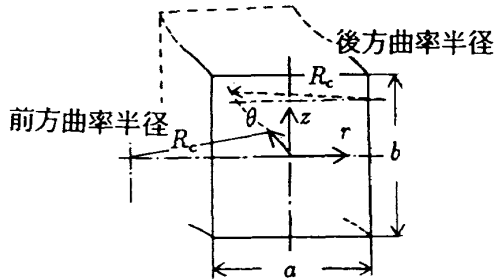


図2 ベンド座標

各速度成分を v_r, v_θ, v_z とすると S型ベンド前半部では連続式、運動量式は円柱座標系を用いて次のように表わされる。

連続式

$$\frac{1}{R_c + r} \frac{\partial}{\partial r} \{ (R_c + r) v_r \} + \frac{1}{R_c + r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

運動量式

$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{R_c + r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\theta^2}{R_c + r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left\{ \nabla^2 v_r - \frac{v_r}{(R_c + r)^2} - \frac{2}{(R_c + r)^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \right\}$$

$$v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{R_c + r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{v_\theta v_r}{R_c + r} =$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{1}{R_c + r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \nu \left\{ \nabla^2 v_\theta - \frac{v_\theta}{(R_c + r)^2} + \frac{2}{(R_c + r)^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right\}$$

$$v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{R_c + r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 v_z$$

ただし

$$\nabla^2 = \frac{1}{R_c + r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} (R_c + r) \frac{\partial}{\partial r} \right\} + \frac{1}{(R_c + r)^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

S型ベンド後半部では連続式、運動量式は図1に示されるようにベンド前半部と幾何形状が逆の関係になるため連続式、動量式は次のように表わされる。連続式

$$\frac{1}{R_c - r} \frac{\partial}{\partial r} \{ (R_c - r) v_r \} + \frac{1}{R_c - r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

運動量式

$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{R_c - r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{v_\theta^2}{R_c - r} =$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left\{ \nabla^2 v_r - \frac{v_r}{(R_c - r)^2} + \frac{2}{(R_c - r)^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \right\}$$

$$v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{R_c - r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} - \frac{v_\theta v_r}{R_c - r} =$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{1}{R_c - r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \nu \left\{ \nabla^2 v_\theta - \frac{v_\theta}{(R_c - r)^2} - \frac{2}{(R_c - r)^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right\}$$

$$v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{R_c - r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 v_z$$

ただし

$$\nabla^2 = \frac{1}{R_c - r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} (R_c - r) \frac{\partial}{\partial r} \right\} + \frac{1}{(R_c - r)^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

なお直管部ではカーテシアン座標系の方程式を用いて計算を行なう。流れは上下高さ方向で対称として半断面で計算を行なう。格子数は主流方向は90、高さ方向は15、半径方向は21とした。流入速度は実験と同様に直管入口で一樣速度とし、流出境界では下流の影響が上流に及ばないものとした。直管部とベンドとの接続はその部分で格子を密にしてつなぐ方法を用いた。

数値計算法は著者らが曲管、回転管の一連の研究に用いている⁽⁸⁾のもので、有限体積法、スタガード格子、べき乗スキーム、SIMPLE法などを用いている。

3. 計算結果と考察

3. 1 流れのパターン

図3にS型ベンド内の各角度における主流速度の等高線、ベクトル線図を示す。主流速度の最大値は、ベンド前半部で曲り角度が増大するにつれて徐々に外壁方向に移動する。ベンド後半部では最大速度の位置は曲り角度が増加してもあまり変化しないが、外側から内側にむけて流れ込む様な等速度分布となりベンド前半部とではパターンが異なってくる。ベクトル線図よりベンド後半部で上下2対の渦が外側壁近くに位置してくる。

また対称面の中心付近にはベンド前半部と異なり逆向きのベクトルがみられるようになる。

3. 2 主流速度分布

図4にベンド内での対称面での速度分布の計算結果を実験値と比較して示す。ベンド後半部の出口の壁近くで若干差がみられるが概ね実験値と一致している。図5は同様にベンド内での垂直方向断面での速度分布を実験結果と比較したものである。これについてもベンド後半部の出口の壁近くで差がみられるが概ね実験値と一致している。

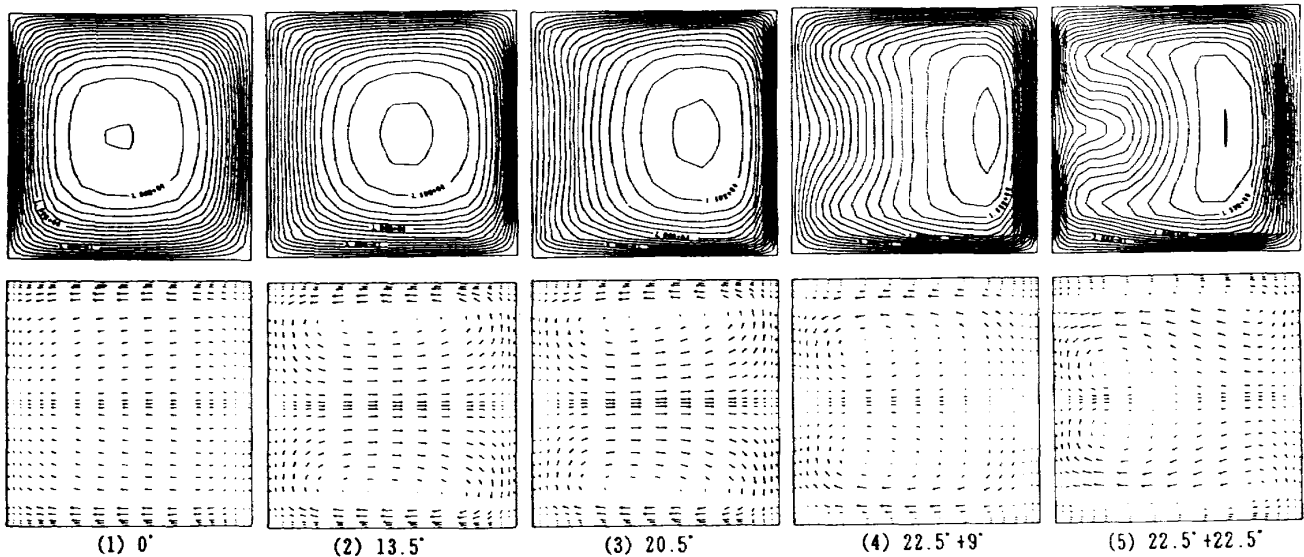


図3 等速度線とベクトル図
($K=299, \lambda=7.0$)

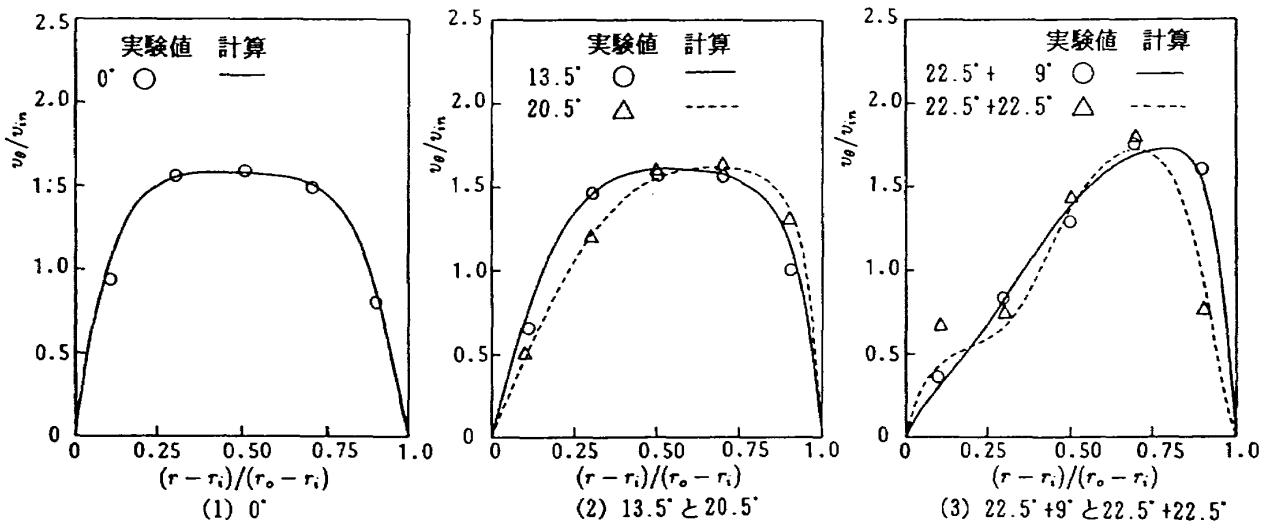


図4 対称面での速度分布
($K=299, \lambda=7.0$)

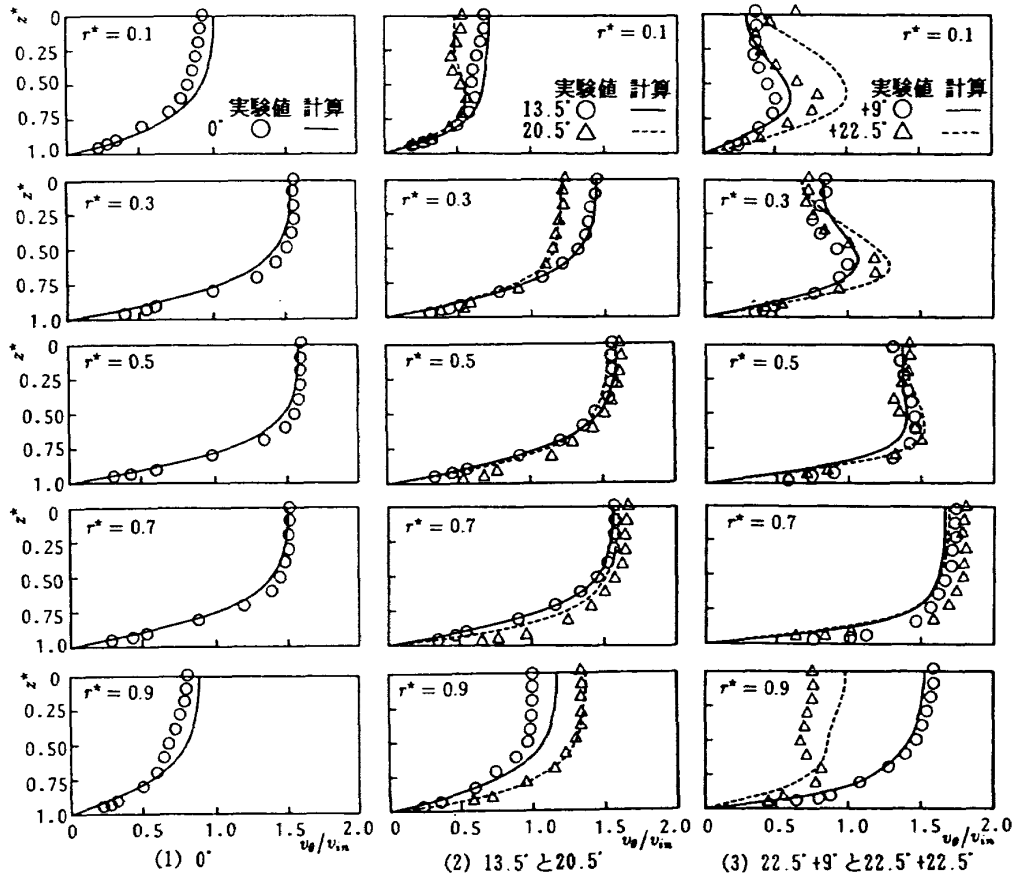


図5 垂直断面での速度分布 $r^* = (r - r_i)/(r_o - r_i)$ $z^* = z/z_{0.5}$

3. 3 摩擦係数と圧力係数

図6はベンドの摩擦係数の内側壁、外側壁、上側壁および平均の値が主流方向に変化する様子を示したものである。ベンド内で摩擦係数はかなり変化するがベンド下流直管部で次第に同一の値になっていく。図7に圧力係数の主流方向に対する変化を示す。ベンド前半と後半では圧力係数が反転し、S型ベンドの特徴が示される。

4. あとがき

上流、下流に直管部を有する正方形断面 S型ベンドの完全NS計算を行い、Taylorらの実験結果と比較した。S型ベンド出口付近で実験値と若干差が見られるが全体的には実験と良く一致しているものと思われる。

5. 参考文献

(1) Taylor, A.M.K.P., Whitelaw, J.H.

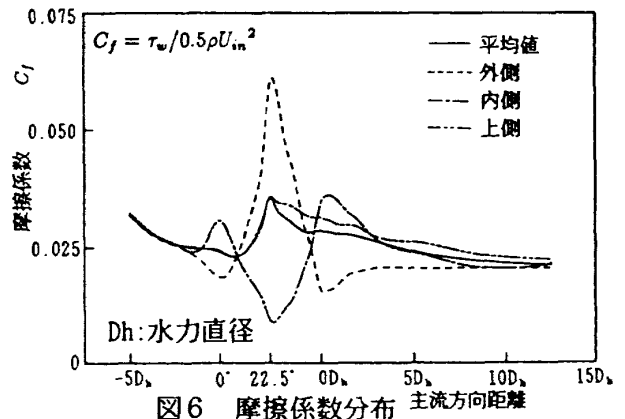


図6 摩擦係数分布

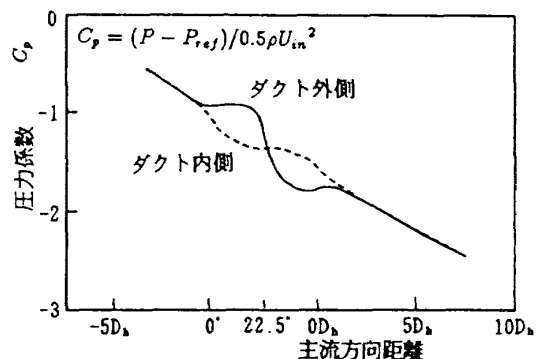


図7 圧力係数分布

Yianneskis, M., NASA CR-3550, (1982)

(2) 菊地、田村、1987、航技研特別資料、SP-8

(3) 山田、石垣、望月、1990、航技研特別資料、SP-14