17 正方形曲り管内流の三次元

N・S方程式による数値解と表示

宇都宮大学 工学部 秋山光庸，遠藤裕一。
鈴木道義，西脇一郎

Numerical Experiment on The Elliptic Nature of Laminar Flow in Curved Square Channels.

Mitunobu AKIYAMA*, Yuichi ENDO*
Mitsuyoshi SUZUKI* and Ichiro NISHIWAKI*

This paper presents second portion of study on the developing laminar flow in curved square channels. It was solved by using a finite-difference approximation adopted for the time dependent full N-S equation in toroidal coordinates. The flow intensity is of 1000 in Reynolds number and the channel is made of a 90° bend with curvature ratio of four having an inlet and outlet straight channel.

Typical flow field solutions are obtained for the present parameter and compared with previous results.

1 まえがき

曲り管内の流れでは二次流れの発生ばかりでなく，逆流や時間的なゆらぎを伴うことも容易に想像できる。これまで管内流の数値解析は，利用可能な計算機の制約により十分な計算点を得られず，二次元流れあるいは前進解法による放物型三次元流れの解析が主流であった。近年の目覚ましい計算機の発達によって，橋内型のN・S方程式による三次元流れの解析が可能となり，さらに困難は伴うが三次元非定常流れの解析も実行されつつある。前報⁽¹⁾では正方形断面の180°ベンド管の解析を示した。ここでは，90°ベンド管内の流れを三次元橋内型方程式で数値解析し，その結果を比較検討した。

2 計算手法

解析モデルを Fig. 1 に示す。(a)は前報のモデルで，曲率半径4deの180°ベンド管を水力直径deを代表長さ主流の平均流速 $\bar{W}$ を代表速度とした時のレイノルズ数 $Re = \bar{W}de/\nu = 500$ の場合を解析した。(b)は今回の計算に用いたもので(a)と同様に上流側に約5de，下流側に約70deの直管を接続した90°ベンド管であり，曲率半径は4deである。レイノルズ数は $Re = 1000$ について解析した。

基礎方程式は，トロイダル座標で表示された三次元非定常のN・S方程式を用いた。直管と曲管の接続部を介して，基礎方程式の中の曲率半径の逆数 $1/R$ は直管から曲管へは0から $1/4$ に，また曲管から直管へは $1/4$ から0に変化するが，三者の全域を連続的に計算し

*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Utsunomiya University, 2753 Ishii-cho, Utsunomiya 321, JAPAN

Fig. 1 Test section

(b) $Re=1000, 90^\circ$

ている。 $1/R=0$ とした時の基礎方程式は、一般のデカルト座標系のN-S方程式と完全に一致する。境界条件は入口断面、出口断面とも十分に発達した層流としている。流れは曲率半径を含む中心面を対称として半断面のみを計算する。主流方向の運動方程式は中心差分で、垂流方向の方程式は風上差分で離散化し、非定常陰解法とA・D・I法を用いて解いた。差分格子は管断面で 20×10 、主流方向を200分割した。

3 結果と考察

Fig. 2, 3に 90° ベンド管の主流方向速度の等高線と二次流れのベクトル図を示す。流れは、入口側の直管部ですでに下流の曲り管の影響を受けている。Fig. 2(a)の曲り管入口断面の主流方向速度分布は管の曲りの内側へ片寄る。この傾向は特に側壁近くで著しい。二次流れもこれに対応して断面全体で一様に内側へ向っているが、側壁近くでより強い流れを示している(Fig. 2(a))。この断面の二次流れの最大ベクトルは主流平均速度 W の10%である。主流方向速度は遠心力の影響により外側へ片寄っていくが、側壁付近での内側へ片寄りが続くため $1^\circ \sim 30^\circ$ で曲管外側の両角で逆流が発生し、その大きさは W の5%である。二次流れのベクトルの平均値 S は $27^\circ \sim 30^\circ$ 付近で最大となる。 35° の断面で主流速度は大きく外側へ片寄り(Fig. 2(b))、二次流れ渦も強いことがわかる(Fig. 3(b))。その後二次流れは減衰して、主流方向速度分布もより鉢状になっている(Fig. 2.3(c))。

Fig. 4, 5に前報⁽¹⁾の 180° ベンド管の計算結果を示す。 35° の主流方向速度は 90° ベンド管にはほぼ一致しており、二次流れもよく似ている。また、曲り内管の速度助走圧間長さは $L/de = 1.17 \times Re^{1/3} \times R^{2/3}$ (ここで $De = Re \sqrt{(de/2)/Rc}$) で表わされる⁽²⁾ 正方形断面を持つ曲管内流れでも曲率半径が同じ場合レイノルズ数の $1/3$ 乗に比例して流れが発達すると考えられる。そこで最大二次流れを持つ断面を経て、流れの変化が安定してくる点も同様に比例す

(a) 0°

(b) 35°

(c) 88°

Fig.2 Main velocity counters (Re=1000, 90°)

(a) 0°

(b) 35°

(c) 88°

Fig.3 Secondary flow vector (Re=1000, 90°)

(a) 35°

(b) 70°

Fig.4 Main velocity counters (Re=500, 180°)

(a) 35°

(b) 70°

Fig.5 Secondary flow vector (Re=500, 180°)

るとして、 $Re = 1000$ で 88° また $Re = 500$ で 70° を算出してその点の流れを比較してみる。主流方向速度はほぼ一致したが、二次流れはいわゆるデーン形の付加渦が $Re = 500$ の場合発

Fig. 6 Isobaric counters (Re=1000, 90°)

生していたが、今回の $Re = 1000$ では発生しておらず、差分法の違いによる差も考えて今後検討する必要がある (Fig. 5b)。

Fig. 6, 7 に断面内の圧力分布を示す。Fig. 6(a) に示すように曲り管入口断面で圧力差が発生していることがわかる。Fig. 6(b), Fig. 7(a) は二次流れの強さを反映して圧力差が大きく、また流れが発達するにつれて圧力差が小さくなる (Fig. 6(c), Fig. 7(b))。

Fig. 8 に二次流れのベクトルの平均値 S の主流方向の変化を示す。最大値は (a), (b) とともに同じような位置に表われ、その大きさは両者とも W の 23% 程度である。また曲り管内や出口側直管内の変化発達は、レイノルズ数の $1/2$ 乗に比例するのから、 $Re = 1000$ が 500 の場合より遅いことがわかる。

最後に、本研究を行うにあたり浦井技官の協力に感謝します。東京大原子力研究所センターの協力
参考文献 (1) 秋山他 4 流れの可視化 Vol. 4 No. 14 (1984-7) P. 181 (2) 秋山他 4 機論 50-452 B (昭 59-4) 990 に謝す。

Fig. 7 Isobaric counters (Re=500, 180°)

Fig. 8 Development of averaged secondary-velocity component