ベンド内の旋回流れ*

須藤 浩三^{*1}, 高見 敏弘^{*1}

Swirling Flows in a Circular-Sectioned 90° Bend

Kouzou SUDOU and Toshihiro TAKAMI

Three components of mean velocities and wall static pressure have been measured in swirling flows through a circular-sectioned 90° bend with a curvature radius ratio of 4.0 under the Reynolds number of 60 000. The complicated correlation between internal flow behavior and wall pressure distribution has been clarified from a region of upstream straight pipe through a bend to a downstream one. Also, the shift of axial flow, the movement of the swirl center and the streamwise decay of swirl intensity have been investigated.

Key Words: Three-Dimensional Flow, Pipe Flow, Swirling Flow, Velocity Distribution, Curved Pipe, Bend, Swirl Number

1. 緒 言

軸流送風機あるいは水車などのターボ機械を通過した流れは、一般に管内を一方向へ旋回することが知られている。このような旋回流れが曲がり管に流入すると、管内の流れは著しく偏り、管路やダクトが振動したり、各種流体機器の性能が低下したり、あるいは激しい場合には思わぬ事故を引き起こすことがある。このため、旋回流れが曲がり管に流入した場合の流動状態や圧力分布を把握しておくことは、各種工業プラントおよび流体機器の設計や性能改善にとって重要な課題である^{(1)~(3)}。

本研究では、軸対称旋回流れが曲率半径比4の円形90°ベンド内に流入する場合について、弱い旋回流から逆流を伴う強い旋回流まで旋回強さを変えて実験を行い、熱線流速計を用いて断面内の三方向速度分布を、また静電容量式の圧力変換器を使って壁面静圧分布をベンド上流からベンド下流にわたって詳細に測定した。そして、管軸方向へ複雑に変化する内部の流動状態と壁面静圧分布の関係を明らかにするとともに、軸方向流れの偏りと旋回流れの旋回中心の関係や旋回強

さの減衰などに及ぼす旋回強さの影響について検討した。

おもな記号

d : 管直径 $=2a(=104\text{ mm})$

C_p : 圧力係数 [式(1)]

R_c : ベンドの曲率半径 $(=208\text{ mm})$

$\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$: $r, \theta, \varphi(z)$ 方向の時間平均速度

W_a : 管軸方向の断面平均速度 $(\approx 8.4\text{ m/s})$

$r, \theta, \varphi(z)$: 座標系 (図1参照)

$x, y, z(z')$: 座標系 (図1参照)

α : 案内羽根の角度 (図1参照)

Ω : 無次元角運動量 [式(4)]

2. 実験装置および方法

供試管路の概略および旋回流の発生装置を図1に示す。管路系は旋回流の発生装置、直径 $d=104\text{ mm}$ の円形断面を有する曲率半径 $R_c=208\text{ mm}$ (曲率半径比 $R_c/a=4$) の90°ベンド部、長さ $2\,600\text{ mm}$ ($25d$) の上流直管部、 $3\,640\text{ mm}$ ($35d$) の下流直管部および送風機から構成されている。旋回流は、外径 572 mm の2枚の亚克力円板間に長さ 130 mm 、高さ 26 mm の案内羽根を円周方向へ等間隔に24枚設けた装置によ

* 原稿受付 平成5年4月15日。

^{*1} 正員, 広島大学工学部 (〒724 東広島市鏡山1-4-1)。

り作られる。流れの旋回強さは、案内羽根の角度 α を変えることにより調整される。

実験は、常温の空気を用いて、断面平均速度 $W_a \approx 8.4 \text{ m/s}$ (レイノルズ数 $W_a d / \nu \approx 60\,000$) のもとで行った。まず、羽根角度 $\alpha = \pm 10, \pm 20, \pm 30, \pm 40^\circ$ の反時計・時計方向の旋回流および $\alpha = 0^\circ$ の旋回を伴わない流れについて、管壁に周方向へ 15° 間隔で設けた 24 個の直径 0.5 mm の静圧孔を用いて壁面静圧を測定した。ついで、羽根角度 $\alpha = 20^\circ$ および $\pm 40^\circ$ の旋回流に

(a) 供試管路と座標系

(b) 旋回発生装置

図 1 実験装置の概略

図 2 上流直管部 ($z'/d = -2$) の速度分布

ついて、流れに対する単一傾斜熱線の傾きを変化させて測定する方法⁽⁴⁾により、管断面内の三方向速度成分 ($\bar{U}$, $\bar{V}$, $\bar{W}$) を測定した。測定断面の位置は $z'/d = -2$ から $z/d = 10$ までの 10 箇所である。なお、速度計測の不確かさ⁽⁵⁾は $\pm 3\%$ である。

ベンド上流の直管部 $z'/d = -2$ において測定した軸方向速度 $\bar{W}$ と周方向速度 $\bar{V}$ の分布を図 2 に示す。軸方向速度 $\bar{W}$ の分布は、弱い旋回 $\alpha = 20^\circ$ の場合、逆流領域は現れないが、強い旋回 $\alpha = 40^\circ$ の場合、管中央部 $r/a \leq 0.2$ に逆流領域が存在する。一方、周方向速度 $\bar{V}$ は、管内部で強制渦形、管壁側で自由渦形 of 速度分布を示す。鬼頭ら⁽⁶⁾が円筒形三孔ピトー管を用いて測定した直管内旋回流の速度分布と比べると、三者の速度分布は類似した特徴を示しており、軸対称な旋回流がベンドへ流入している。

3. 実験結果および考察

3.1 壁面の圧力分布 羽根角度 $\alpha = 20, 40^\circ$ の旋回流がベンド内へ流入する場合の壁面静圧を、圧力係数

(a) $\alpha = 20^\circ$

(b) $\alpha = 40^\circ$

図 3 壁面圧力の管軸方向分布

$$C_p = \frac{P - P_{ref}}{(1/2)\rho W_a^2} \dots\dots\dots (1)$$

で管軸方向へ整理した結果を図3に示す。ここで、 P_{ref} はベンド上流 $z'/d = -2$ における壁面の静圧であり、図3中の In., Out. はそれぞれ管路の内側壁、外側壁を表す。

強い旋回 $\alpha = 40^\circ$ の場合、ベンド上流 $z'/d = -1$ 付近ですでに壁面の静圧には位置 θ による差が生じ、旋回を伴わない $\alpha = 0^\circ$ の場合⁽⁷⁾や弱い旋回 $\alpha = 20^\circ$ の場合よりも上流でベンドの影響が現れ始める。ベンドへ流入すると、 $\alpha = 40^\circ$ の場合、曲がり外側では $\varphi = 15^\circ$ まで逆圧力こう配、 $\varphi = 15^\circ$ を過ぎると急激な順圧力こう配を示すのに対して、曲がり内側ではベンド流入後 $\varphi = 60^\circ$ 付近まで急激な順圧力こう配となり、ベンド出口付近では逆圧力こう配となる。また、 $\alpha = 20^\circ$ の場合も、ベンド入口付近では外側で逆圧力こう配、内側で順圧力こう配となり、ベンド出口付近では外側で順圧力こう配、内側で逆圧力こう配となる。このような圧力分布の管軸方向変化はベンド特有のもので、旋回を伴わない場合⁽⁷⁾にも同様の現象がみられるが、圧力係数が最大値・最小値を示す位置や内外壁の圧力差は旋回強さによって異なる。一方、管路の上壁と下壁の静圧もベンド入口付近から一致せず、壁面の圧力は複雑に昇降を繰り返す。ベンド流出後、 $\alpha = 20^\circ$ と 40° のどちらの場合も壁面上の位置による圧力差は少し小さくなるが、下流 $z/d = 10$ においても圧力分布曲線は波状の変化を示す。この下流直管部における圧力分布の変化は、後述する流れの旋回中心の偏心運動に伴って生じるものである。また、旋回を伴わない場合と比べると、測定した全区間にわたる圧力降下は旋回を伴う場合のほうが大きく、旋回が強くなるにつれてベンド部の流動抵抗は増加する。

図4は、圧力分布に及ぼす旋回強さの影響を調べるために、反時計方向の旋回流について壁面静圧の周方向分布を、圧力係数 C_p とその平均値

$$\overline{C_p} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} C_p d\theta \dots\dots\dots (2)$$

との差 $\Delta C_p (= C_p - \overline{C_p})$ で表示した結果である。各図の左側が管路の内側、右側が外側に対応し、中の円が $\Delta C_p = 0$ 、外の円が $\Delta C_p = +0.5$ 、中心が $\Delta C_p = -0.5$ を表す。

ベンド入口 $\varphi = 0^\circ$ では内外の圧力差が現れ、旋回を伴わない $\alpha = 0^\circ$ の場合には上下対称な分布を示すのに対して、旋回を伴う場合には非対称な分布を示す。この非対称性は下流に進むにつれて明りょうになり、 α が大きいほど、すなわち旋回が強いほど顕著になる。 φ

$= 60^\circ$ では、 $\alpha = 40^\circ$ の場合、旋回を伴わない場合には遠心力の作用により高圧領域となる外壁の一部 ($\theta = 30 \sim 70^\circ$) に低圧領域が生じる。この低圧領域は、 $\alpha = 30^\circ$ の場合ベンド出口 $\varphi = 90^\circ$ 付近で、 $\alpha = 20^\circ$ の場合ベンド流出後の $z/d = 1$ 付近で現れ、旋回が弱くなるにつれて低圧領域の出現は遅れ、その位置は下流に移動する。この外壁側の低圧領域の発生は、後述するように旋回中心が外壁側へ移動することに伴って、外壁近傍の周方向速度が高速となることによるものである。また、この低圧領域の位置は下流に進むにつれて旋回方向と同じ反時計方向へ移動するが、旋回が強いほどその移動量は大きく、また負の ΔC_p 値も大きく、低圧領域はより下流まで存続する。

図4 壁面圧力の周方向分布

図 5 断面内の流動状態 ($\alpha = 20^\circ$)

図 6 断面内の流動状態 ($\alpha = 40^\circ$)

3・2 断面内の速度分布 測定した各断面における軸方向速度 $\bar{W}$ の等速度線図と旋回流れの速度成分 ($\bar{U}$, $\bar{V}$) のベクトル線図を、図 5 ($\alpha=20^\circ$) および図 6 ($\alpha=40^\circ$) に示す。各図の左側が管路の内側、右側が外側に対応する。図 5, 6 中の数値は断面平均速度 W_a で無次元化した値、破線は数値零を表し、ベクトルの長さは管半径の $1/8$ が W_a に相当する。

ベンド上流 $z'/d=-1$ では、旋回を伴わない場合⁽⁷⁾ および $\alpha=20^\circ$ の弱い旋回の場合には軸対称な流れを示すのに対して、 $\alpha=40^\circ$ の強い旋回流ではベンドの影響により軸方向速度の高速領域が断面下方 ($\theta \approx -30 \sim -70^\circ$) に生じ、速度分布はわずかながら非軸対称となる。高速領域が断面下方に生じる理由として次のことが考えられる。前述のように、ベンド入口領域では一般に管路内側で強い順圧力こう配が生じるために(図 3)流れは加速され、これを補うために断面内には外側から内側へ向かう二次流れが誘起される。ところが、下半断面ではこの二次流れの方向と旋回方向が逆になるため、この領域における周方向への流体の輸送が抑制されて、高速領域が発生するものと思われる。

ベンド入口 $\varphi=0^\circ$ では、 $\alpha=20^\circ$ と 40° のどちらの場合も、軸方向速度の高速領域は曲がり内側の低速領域 ($\theta \approx -120 \sim 0^\circ$) に位置する。この軸方向流れの偏りは、ベンド入口付近で軸方向圧力分布が曲がり内側で順圧力こう配、外側で逆圧力こう配となることによるもので、曲がり管内流れでは一般にみられる現象である。一方、周方向速度は、 $\alpha=40^\circ$ の場合圧力の高い外側領域 ($\theta \approx 40 \sim 120^\circ$) で少し遅くなり、 $\alpha=20^\circ$ の場合外側から断面下方 ($\theta \approx -20 \sim 90^\circ$) にかけて遅くなる。また、旋回流の中心はどちらの場合もまだ管中心にみられる。

ベンド流入後 $\varphi=30^\circ$ では、旋回強さによらず流動状態はよく似た特徴を示す。すなわち旋回中心が、 $\alpha=40^\circ$ の場合断面右斜め下方 ($\theta \approx 20^\circ$, $r/a \approx 0.25$)、 $\alpha=20^\circ$ の場合断面下方 ($\theta \approx 0^\circ$, $r/a \approx 0.2$) へ移動することに対応して、軸方向速度の高速領域は内側からやや断面上方 ($\theta \approx -140 \sim -80^\circ$) に偏り、低速領域を馬てい形状に取り囲む形となる。曲がり管内では高速領域の流体に外向きの強い遠心力が作用し、外側へ向かう二次流れが断面内に誘起されるが、反時計方向の旋回流れの場合この二次流れの方向は旋回流れの方向に対して断面上方で逆向きになる。このため周方向速度は断面上方 ($\theta \approx -110 \sim -210^\circ$) で遅く、断面下方 ($\theta \approx -20 \sim 60^\circ$) で速くなり、その結果、断面上方の圧力が高くなり、旋回中心は管中心から断面下方へ向かって大きく移動するものと思われる。

$\varphi=60^\circ$ になると、ともに軸方向流れの偏りはさらに顕著になり、曲がり内側に軸方向速度の最高速領域 ($\alpha=40^\circ$ の場合 $\bar{W}/W_a=1.6$, $\alpha=20^\circ$ の場合 $\bar{W}/W_a=1.35$) が現れ、この領域の周方向速度はかなり遅くなる。旋回中心は断面下方から曲がり外側へ移動し始めるが、この移動は旋回が強いほど大きい。また、旋回中心と管壁の間は周方向速度の高速領域となり、旋回が強いほど高速になる。このため、 $\alpha=40^\circ$ の場合、壁面の圧力分布は軸方向速度と周方向速度の高速領域が接近する 2 箇所 ($\theta \approx -30 \sim -150^\circ$ と $30 \sim 70^\circ$) で低圧領域となる。

ベンド出口 $\varphi=90^\circ$ では、 $\alpha=20^\circ$ と 40° のどちらの場合も、曲がり内側で軸方向圧力分布が逆圧力こう配となるため内側の軸方向流れは減速され、 $\varphi=60^\circ$ で生じた最高速領域は消滅する。しかし、軸方向速度の低速領域は旋回中心とともに外壁方向へ移動するため、軸方向流れは依然として曲がり内側に大きく偏り、旋回を伴わない場合⁽⁷⁾ のベンド出口の流動状態とは大きく異なる。また、旋回中心が外壁方向へ移動することに伴い、内側の広い範囲で周方向速度は非常に遅くなる。そして、 $\alpha=40^\circ$ の強い旋回流れでは、外壁近傍で周方向速度が速くなるため圧力の低下が顕著になる。 $\alpha=20^\circ$ の流れでは、断面下方 ($\theta \approx -60 \sim -40^\circ$) の管壁近傍に軸方向速度の低速領域がわずかにみられる。

ベンド流出後 $z/d=1$ では、軸方向流れの高速領域は曲がり内側から断面下方へ少し移動し、 $\alpha=20^\circ$ の場合断面左斜め下方 ($\theta \approx -40^\circ$) の管壁近傍にベンド出口 $\varphi=90^\circ$ において現れた低速領域が明りようになり、旋回の強い $\alpha=40^\circ$ の場合断面下方 ($\theta \approx -30^\circ$) の管壁近傍に低速領域が現れる。旋回中心は旋回方向と同じ反時計方向へ移動するが、旋回強さにより移動速度が異なるため、旋回中心は $\alpha=20^\circ$ の場合外壁側に、 $\alpha=40^\circ$ の場合断面上方に位置する。また、 $\alpha=40^\circ$ の場合旋回中心と管壁の間で周方向速度は最高速領域 ($\bar{V}/W_a=1.3$) となり、近傍の壁面圧力は著しく低下する。ベンド下流 $z/d=2$ になると、断面下方の壁面近傍に生じた軸方向流れの低速領域がさらに発達し、 $\alpha=40^\circ$ の場合高速領域を内側と外側に分けた形となる。周方向速度の高速領域は旋回方向と同じ方向へ移動し、移動速度の大きさは $\alpha=40^\circ$ の場合やや減衰する。

下流 $z/d=5$ では、軸方向速度と周方向速度の高速領域は管壁に沿って反時計回りに移動した状態になる。また、 $\alpha=40^\circ$ の場合、旋回流れの減衰に伴い軸方向速度の低速領域 ($\theta \approx -20^\circ$, $r/a \approx 0.5$) にみられた逆流部が消滅する。さらに下流の $z/d=10$ では、二つに分けられた軸方向速度の高速領域が再び一つになり、

図 7 軸方向流れの偏り

図 8 旋回流れの中心位置

低速領域の速度は徐々に増加する。旋回中心は依然として大きく偏心し、周方向速度の高速領域周辺では低圧領域が存続している。

3.3 断面平均量 軸方向流れの偏りを表す目安として

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \frac{8}{\pi d^2 W_a} \int_0^{2\pi} \int_0^a (r \sin \theta) \bar{W} \cdot r dr d\theta \\ \bar{y} &= \frac{8}{\pi d^2 W_a} \int_0^{2\pi} \int_0^a (-r \cos \theta) \bar{W} \cdot r dr d\theta\end{aligned}\quad \dots\dots\dots (3)$$

なる量を算出し、軸方向流れの偏りと旋回流れの中心位置の関係を調べた。流れの偏り $(\bar{x}, \bar{y})$ を図 7 に、旋回中心の位置 (x_e, y_e) を図 8 に示す。

ペンド流入後、軸方向流れは急激に曲がり内側に偏る。旋回を伴わない場合⁽⁷⁾、曲がり外向きの二次流れの成長に伴い、内側に偏った軸方向速度の高速領域は外側へ移動したが、旋回流れの場合、旋回中心が外側へ動くため軸方向流れの低速領域も外側へ移動し、高速領域は内側に偏った状態を保持する。このため軸方向流れは内側に偏ったままペンド内を通過する。ペンド流出後の偏りは断面下方、外側、断面上方、内側と旋回方向と同じ反時計方向へらせん状に移動する。また、偏り量およびその移動速度は旋回が強いほど大き

図 9 旋回強きの減衰

い。一方、旋回中心 (x_e, y_e) は、旋回の強い $\alpha = 40^\circ$ の場合、軸方向流れの偏りを表す $(\bar{x}, \bar{y})$ とほぼ同じ位相で移動し、ペンド内で生じた軸方向流れの高速領域と旋回流れの中心とは管中心をはさんで反対側に位置し、その位置関係を保持した状態で流れは全体として反時計方向へ旋回しながら流下する。ちなみに、羽根角度 $\alpha = -40^\circ$ の時計方向の旋回流れがペンド内に流入する場合、旋回中心は $\alpha = 40^\circ$ の場合と上下対称な位置にあり、流れの旋回方向と同じ時計方向に移動する。旋回の弱い $\alpha = 20^\circ$ の場合、旋回中心の移動速度は $\alpha = 40^\circ$ の場合に比べて遅く、ペンド内では軸方向流れ

図 10 旋回中心の移動角度(下流直管部)

の偏り ($\bar{x}$, $\bar{y}$) と位相がやや異なるが、ペンド流出後は流れの偏りに対して管中心をはさんで反対側をほぼ同じ位相で反時計方向へ旋回する。

流れの旋回強さを表す無次元角運動量(スワール数)

$$\Omega = \frac{8}{\pi d^3 W_a^2} \int_0^{2\pi} \int_0^a (r \bar{V} \bar{W}) \cdot r dr d\theta \quad \dots\dots\dots (4)$$

を算出し、管軸方向に整理した結果を図 9 に示す。図 9 中のこの配表示は無次元角運動量 Ω の減衰率を表す。

ペンド部における旋回強さ Ω は、旋回強さによらず類似した変化を示す。旋回流れがペンドに流入すると、内側で流れが加速されるとともに遠心力の作用を受けて旋回流れは非軸対称となり、旋回中心は流れの旋回方向と同じ方向に管断面内を移動する。既述のように、周方向速度の高速領域も旋回中心の運動とともに移動して、軸方向速度の高速領域とは対面する形で旋回中心と壁面の間に位置する。その結果、軸方向速度 $\bar{W}$ の高速領域に周方向速度 $\bar{V}$ の遅い領域が、 $\bar{W}$ の低速領域に $\bar{V}$ の高速領域が重なる形となり、旋回強さ Ω はペンド内で急激に減衰する。ペンド流出後の下流直管部では、旋回中心が大きく偏心したまま流下するが、 $\alpha=40^\circ$ の場合、旋回強さの減衰はペンド部よりも緩やかに減衰する。一方、 $\alpha=20^\circ$ の場合、ペンド内で減速された内側の周方向速度はペンド流出後増速され、外側の高速領域は $z/d=2$ までは減衰しないため、旋回強さ Ω は $z/d=2$ までいったん増大し、その後指数関数的に減衰する。なお、この配表示で示す減衰率は旋回強さによって異なるが、旋回中心が偏心していても直管内の軸対称旋回流れ⁽⁸⁾とほぼ同じ減衰率を示す。

3・4 考察

前述のように、管断面内の流動状態は旋回中心の移動に伴って大きく変化する。図 10 は、下流直管部における旋回中心の角度 θ_e とペンド出口 $\varphi=90^\circ$ ($z/d=0$) における旋回中心の角度 θ_0 との差

(a) 渦糸モデル (b) 壁面の圧力分布

図 11 渦糸の運動

$\Delta\theta (= \theta_e - \theta_0)$ を表したものである。実験データは下流へ向かって直線的に増加しており、ペンド流出後の旋回中心はほぼ等速度で移動することを示している。また、図 8 に示したように、この旋回中心は半径 $r/a \approx 0.45 \sim 0.50$ の円上を運動する。以下において、この旋回中心の運動について簡単な検討を試みる。いま、図 11(a) に示すように旋回流れを循環 Γ の渦糸で置き換え、この渦糸の運動を考える。よく知られているように、円筒容器内の渦糸は速度

$$v = \frac{\Gamma}{2\pi} \cdot \frac{b}{(a^2 - b^2)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

で渦糸の回転方向と同じ方向へ半径 $r=b$ の円上を運動する⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。この結果を用いて下流直管部における旋回中心の移動角度を概算すると、

$$\Delta\theta = \frac{v}{b} \cdot \frac{z}{W_a} \quad \dots\dots\dots (6)$$

と見積もられる。そこで、ペンド出口 $\varphi=90^\circ$ において測定した旋回流の周方向速度 $\bar{V}$ の分布を偏心した旋回中心を原点として整理し直し、強制渦形⁽¹⁰⁾の速度分布を示す領域について循環 Γ を求め、式(5)、(6)により旋回中心の移動角度 $\Delta\theta$ を算出すると、計算結果は図 10 に示す実線(破線は実験データを連ねた線)となる。この実線は実験データとかなりよく一致する。このことより、一般に、旋回流れの中心が何らかの原因によって偏心すると、その中心は流れの旋回と同じ方向へ回転運動すると考えることができる。図 11(b) は、渦糸により誘起される円筒壁上の速度を求め、ベルヌーイの式を用いて求めた壁面の圧力分布である。渦糸に近い壁面上の速度は大きくなるため、壁面圧力は低下する。この結果は、図 4 に示す測定結果と定性的に一致する。すなわち、旋回中心の移動に伴って壁面の圧力も変化し、その分布曲線はほぼ同様な形状を保って旋回中心の移動とともに反時計方向へ旋回する。その結果、軸方向の圧力分布(図 3)は波状の変化を示すことになる。また、ペンド流れの一般的特性として、ペンド入口領域ではペンド内側で順圧力こう配となるため軸方向速度は内側で大きくなる。一方、旋回流れの

中心部は低速域($\alpha=40^\circ$ の場合, $z/d \lesssim 2$ までは逆流)を形成するため, いったん旋回中心が偏心すればそれとは反対側に高速域が存在することになる。したがって, ベンド入口領域で生じた高速領域は流れの旋回中心の移動に伴い, 旋回中心と約 180° の位相を保持しつつ断面内を移動する。そして, ベンド部においても波状の圧力分布を示すことになる。

4. 結 論

軸対称旋回流れが曲率半径比 4 の円形 90° ベンド内に流入する場合について, 管断面内の速度分布および壁面の圧力分布を測定し, 以下の知見を得た。

(1) ベンド上流では, 旋回が強いほどより上流でベンドの影響が現れ始める。

(2) 壁面の圧力分布は, 軸方向速度と周方向速度の高速領域付近の 2 箇所で低圧領域を示し, 旋回が強いほど壁面の圧力分布は軸方向に顕著な波状変化を示すようになる。

(3) 軸方向流れの非軸対称化に伴って旋回中心は偏心し, 下流に進むにつれて旋回方向と同じ方向へ移動する。この移動速度は旋回が強いほど速い。

(4) 軸方向の高速領域と旋回中心は管中心をはさ

んでほぼ反対側に位置し, 両者は管軸の周囲を旋回方向と同じ方向へ移動する。このため, 90° ベンド内では軸方向の高速領域が曲がり内側に偏ったまま流下する。

(5) 旋回強さはベンド内で急激に減衰するが, ベンド流出後の減衰は旋回中心が偏心していても小さく, その減衰率は旋回強さによって異なる。

(6) 直管部における旋回中心の振れ回り運動を円筒容器内の渦糸の運動とみなすと, 旋回中心の移動をほぼ見積もることができる。

ここに, 本実験に協力いただいた当時の大学院生岡田政信君および古川努君に謝意を表する。

文 献

- (1) 村上・清水, 機論, 43-375 (1977), 4127.
- (2) 清水・杉野, 機論, 46-401, B (1980), 18.
- (3) Kitoh, O., *J. Fluid Mech.*, 175 (1987), 429.
- (4) 須藤・高見・檜原, 機論, 58-546, B (1992), 379.
- (5) ASME (日本機械学会訳), 計測の不確かさ, (1987), 26, 丸善.
- (6) 鬼頭・鈴木, 機論, 51-471, B (1985), 3461.
- (7) 須藤・高見・矢野, 機論, 58-548, B (1992), 1015.
- (8) 村上・鬼頭・片山・飯田, 機論, 41-346 (1975), 1793.
- (9) 今井, 流体力学(前編), (1973), 201, 裳華房.
- (10) 佐々木, 完全流体の流体力学, (1954), 78, 金原出版.