

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 23 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2012

課題番号：21560169

研究課題名（和文）軸流による渦輪の制御

研究課題名（英文）Flow control of vortex ring by means of swirl

研究代表者

内藤 隆 (NAITOH TAKASHI)

名古屋工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80242907

研究成果の概要（和文）：断面画像から再構築された 3-D 画像を観察することによって、軸流の強さが適切な渦輪は、軸流が渦構造を保持するため、流れ場の外乱の影響を受けにくいことが確認された。しかし、特徴的な流体の放出現象(Peeling off と呼ぶ)が現れ、渦輪の循環が低下する。この Peeling off が現れるメカニズムは、数値計算によって明らかにされた。また、軸流を伴う渦輪列による流体輸送の特徴がまとめられた。さらに、実用化を踏まえ、湾曲ブレードを取り付けたノズルから軸流を伴う渦輪を形成し、その特性が調査された。

研究成果の概要（英文）：The experimental observation for 3-D reconstructed images confirmed that a vortex ring with appropriate swirl is insensitive to disturbances since the swirling flow preserves its ring structure. However, the characteristic fluid discharging from a vortex ring with swirl referred to as “peeling off” appears and its circulation decreases. The mechanism generating the “peeling off” is revealed numerically. The features of fluid transportation by means of vortex rings with swirl are reported. Furthermore, in order to put a vortex ring with swirl into practical use, it is generated from the nozzle attached with curved deflecting blades and its feature is investigated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
2011 年度	400,000	120,000	520,000
2012 年度	400,000	120,000	520,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：物質輸送、渦輪、軸流、流れの制御、

## 1. 研究開始当初の背景

## (1) 渦輪による物質輸送の利点

渦輪のつくり出す流れ場は、それ自身とその近傍に誘起する速度場によって、それ自身を含むコンパクトな領域が驚くほど持続的に並進運動する。この性質を利用して熱や物質を効率よく輸送することができる。また、その経路に物質を取り残すことが少ない特徴も

ある。

Puff 状の噴流と 20 個の渦輪をオリフィスから同じ条件で噴出したときの様子を比較すると、渦輪の場合ではその経路に染料を取り残すことが少なく、噴出口から遠距離に到達することが出来る。<sup>1)</sup> その他、渦輪による物質輸送の利用として、土門ら<sup>2)</sup>の研究や、益田ら<sup>3)</sup>の特許事例などが存在する。

(2) 渦輪の波状変形と渦構造の崩壊（渦輪の到達距離を短くする要因）

一般に、層流渦輪は一定距離直進した後、Widnall instability<sup>4)</sup>によって波状変形し、その構造が崩壊して急激に並進速度を失う。つまり、渦輪による物質輸送の到達距離は、この遷移現象によって支配されている<sup>1)</sup>。そのため、渦輪の乱流遷移を遅らせることや、乱流遷移の際に渦構造が大きく崩れないようにすることによって、物質輸送の到達距離が大きくなることを期待できる。

(3) 軸流を伴う渦輪の性質

軸流を伴う渦輪を形成すると、適切な条件の場合には急激な渦構造の崩壊を伴う乱流遷移が抑制でき、その到達距離が増大することが分かった<sup>5)</sup>。図1に回転可能なシリンダから放出された渦輪の時間と位置の関係（約10回の平均と標準偏差）を示す。 $\omega$ はシリンダの回転角速度を示している。

$\omega = 0$  の場合は、通常の軸流を伴わない渦輪であり、○で示されている。この4つデータは、 $\omega$ 以外全て同じ条件で渦輪が形成されている。 $\omega = 0.2\pi \text{ rad/s}$  の条件で形成された渦輪(△)が最も遠くまで到達していることが分かる。そして、 $\omega$ が増大するにつれて、その距離及び並進速度が減少していく。例えば、 $t = 50 \text{ s}$  では、 $\omega = 0.2\pi \text{ rad/s}$  の条件で形成された渦輪の到達距離は、 $\omega = 0$  の場合に比べて、約1.8倍となっている。

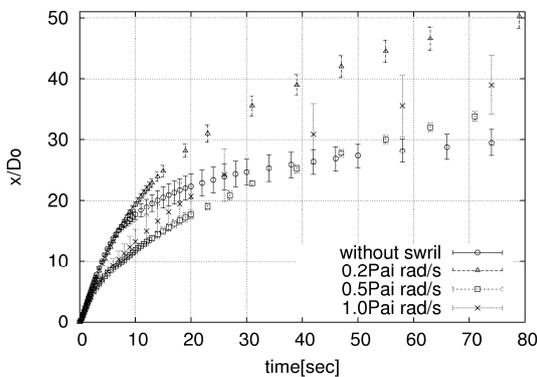


図1 渦輪の並進運動の様子：○；軸流なし，△； $\omega = 0.2\pi \text{ rad/s}$ ，□； $\omega = 0.5\pi \text{ rad/s}$ ，×； $\omega = 1.0\pi \text{ rad/s}$

以上のように、渦輪を利用して物質輸送するアプリケーションでは、渦輪の到達距離がその輸送距離を決定する重要な特性である。渦輪の渦軸に沿った流れ（軸流）を導入することにより、渦輪の到達距離が増大する場合がある。このメカニズムを解明し、到達距離を伸ばすために最適な渦輪生成パラメータについて研究する。

1) 内藤隆,大藏信之,内海友介,水谷航,天野智

之：渦輪と噴流による物質輸送の定量測定, 第4回日本流体力学学会中部支部講演会講演論文集,2006,pp.25-26.

2) K. Domon, O. Ishihara, S. Watanabe, "Mass transport by a vortex ring," Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 69, No.1, (2000), pp. 120 - 123.

3) 益田重明,小尾晋之介,長田泰一「水域の浄化方法及び装置」特許公開番号：2004-089781

4) The instability of short waves on a vortex ring, S. E. Widnall, D. B. Bliss, and C-Y. Tsai, J. Fluid Mech., Vol. 66, 35-47 (1974)

5) 内藤隆,大藏信之,岡本浩幸：軸流を伴う渦輪の挙動,日本流体力学学会年会 2007 講演アブスト集, 2007, p337.

## 2. 研究の目的

現在までの研究では、軸流と渦輪の移動距離の関係について、図1に示された一つの条件下での結果しか得られていない。この結果では、試行毎のパラツキが大きく、同一条件の実験でも異なった現象が生じているものと推測される。また、軸流が並進速度にどのように影響するかについては、明らかになっていない。そこで、本研究では、製品設計に参考となるデータ提供を目指し、詳細な可視化実験を中心にして軸流が渦輪の並進運動に影響するメカニズムを解明し、到達距離を伸ばすための最適な渦輪生成パラメータを系統だてて調査することを目的とする。加えて、可視化実験では得ることが困難な情報や再現性が問題を引き起こす部分には、数値計算も併用する。

従来の渦輪の制御に関する研究は、噴出速度と速度分布の時間的制御が中心であった。この数年、噴出直径の動的な制御なども加わり、理論、実験、数値計算の全てを駆使して研究が進められてきた。それに対し、粘性流体での軸流を利用した渦輪の制御の試みはこれまでに研究されていない新しい発想に基づいたものである。僅かに試験的に試行された図1の結果からは、驚くほど軸流が渦運動に影響を与えることが示されている。渦輪の制御（形成パラメータ）には、いろいろな方法が考えられてきたが、これに軸流が加わり、制御のバリエーションが広がる。特に、乱流遷移に関わる点から、外乱の影響を受け難い渦輪を形成できる可能性がある。さらに、渦輪は噴流をはじめさまざまな流れの基本要素であるため、渦輪による物質輸送の距離・効率の向上のみならず、そのメカニズムの解明は幅広い流れの制御に役立つと考えられる。

## 3. 研究の方法

(1) 軸流を伴う単独渦輪の実験的観察

幅 1120×奥行き 480×高さ 490mm の水槽に、内径 50mm のシリンダとピストンを取り付けた。シリンダの先端には、軸流を与えるための回転円筒と、出口直径 20mm のオリフィスを設置した。シリンダ中の水には染料を混入させておく。コンピュータ制御されたピストンを駆動することで、染料を含んだ流体が短時間噴出され、渦輪が形成される。

3次元的可視化のための装置として、レーザーシートスキャナーを製作した。レーザーライトシートを高速で往復させ、染料を含んだ渦輪の連続的な断面画像を撮影する。撮影のフレームレートは 300fps とした。レーザーシートスキャナー本体をトラバースに乗せ、あらかじめ測定しておいた渦輪の並進速度で移動させことによって、同一の渦輪を繰り返しスキャンでき、時間的な変化を観察することが可能となった。得られた断面画像のうち必要な部分を切り出し、1つの渦輪に対し 20枚前後の断面画像が得られた。これを単純線形補完し、40枚程度の画像とし、Micro AVS を用いて立体像を作成した。

## (2) 軸流を伴う単独渦輪の数値計算による研究

非圧縮粘性流体は Navier-Stokes 方程式及び、連続の式に従うとする。空間微分はスペクトル法を採用し、時間発展は Runge-Kutta-Gill 法を用いた。境界条件は周期境界条件を用いた。

デカルト座標系に、 $x$  方向に並進するように初期の渦輪を配置した。 $R$  は初期の渦輪半径、 $r$  は  $x$  軸を含む断面における渦核中心からの距離を示す。その断面上の渦度分布は、 $r$  についてのガウス関数

$$\omega(r) = \frac{\Gamma}{\pi(\sqrt{2a})^2} \exp\left(-\left(\frac{r}{\sqrt{2a}}\right)^2\right) \dots (1)$$

で与えた。ここで  $\Gamma$  は渦輪の循環、 $a$  は渦核半径である。

(1)式で与えられた渦度分布をデカルト座標系の空間で渦度ベクトル  $\omega(\mathbf{x})$  に変換する。これをフーリエ変換した  $\omega(\mathbf{k})$  から、波数空間上で速度ベクトル  $\mathbf{u}(\mathbf{k})$  を計算する。初期の軸流のない渦輪がつくるこの波数空間上の速度分布を  $\mathbf{u}_{ring}$  とする。軸流の伴う渦輪の初期条件は、この  $\mathbf{u}_{ring}$  に  $\omega(\mathbf{k})$  と同じ分布を持つ  $\mathbf{u}_{swirl}$  を重ね合わせた。

$$\mathbf{u}(\mathbf{k}, t=0) = \mathbf{u}_{ring} - \mathbf{u}_e \cdot \mathbf{u}_{swirl} \dots (2)$$

ここで、 $\mathbf{u}_e$  は軸流の強さを、渦輪の循環  $\Gamma$  に対して相対的な値にするためのパラメータである。また、計算領域の一辺の格子数は 128、長さは  $2\pi$  [cm]、渦輪半径  $R = 2\pi/6$  [cm]、渦輪の循環  $\Gamma = 5.0$  [cm<sup>2</sup>/s] とした。

## (3) 軸流を伴う渦輪列による流体輸送

(1) と同様の渦輪発生装置を用いて、次

の渦輪列形成条件にて流体輸送を観察した。ただし、回転円筒の回転角速度  $\Omega$  [rad/s] は、 $0.0\pi, 0.2\pi, 0.5\pi$  の3種類を採用した。

表1 渦輪列の形成条件

Case	渦輪の数	$L_0/D_0$	$Re = \Gamma_{slug}/\nu$
A	20	0.63	$0.8 \times 10^3$
B	10	1.25	$1.6 \times 10^3$
C	7	1.88	$2.3 \times 10^3$

渦輪の形成時間間隔  $\Delta t$  は、5.00 s である。ただし、Case B については、 $\Delta t = 1.00, 3.00, 5.00, 10.00$  [s] の条件についても実験を実施した。

## (4) ブレード付ノズルによる軸流を伴う渦輪列

渦輪を噴出する円筒自体を回転させる機構は、実用化に際して、コスト、故障率、メンテナンス、取り付けサイズなどの問題がある。そこで、噴出口に流れを偏向させる小さな平板（以後、ブレードと呼ぶ）を取り付けて軸流を伴う渦輪を形成し、その渦輪の移動距離の変化について調査した。この方法は渦輪に強い乱れを与えてしまうため、ブレードの形状を数種類試行し、渦輪の移動距離を調査した。

内径 20mm、長さ 160mm のノズルを用いた。ブレードには、厚さ 0.1 mm のステンレス製の板を使用し、ブレードの高さ  $H$  は 3.0 mm、5.0 mm、7.0 mm の3種類のを製作した。ブレードの幅は 10.0 mm とし、流れの向きを滑らかに変えるように三角関数を利用してブレードを湾曲させた。偏向の角度  $\theta$  は  $0^\circ, 8^\circ, 12^\circ, 16^\circ, 20^\circ$  の5種類、ブレードの枚数を 4枚、6枚、8枚の3種類とさまざまな条件でノズル内に取り付け、それらのノズルから形成される渦輪の様子を観察した。

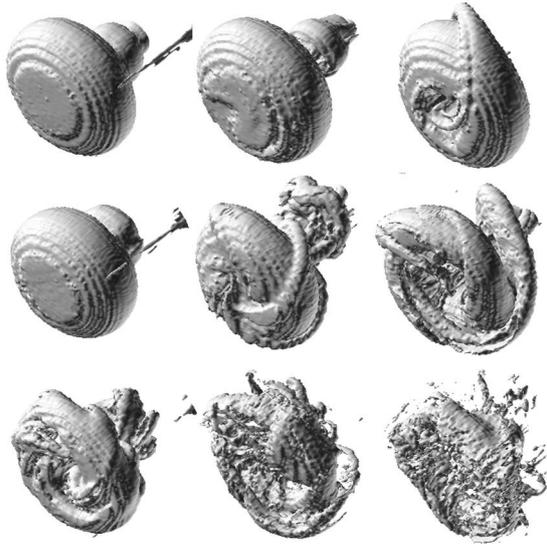
流体を噴出するピストンの速度とストローク長をそれぞれ  $V_p$  [mm/s] と  $L_p$  [mm] とする。 $L_p$  は 2.0 mm から 12.0 mm、 $V_p$  は 10mm/s から 60 mm/s の範囲で実験を実施した。

## 4. 研究成果

### (1) 軸流を伴う単独渦輪の実験的観察

渦輪に軸流を加えると、渦輪形成の初期条件に対応して循環を含む流体が渦輪から多量に放出（以後、Peeling off と呼ぶ）し、その移動速度が低下する。多数の断面画像から合成した立体画像（図2）を用いて、この現象の時間的な経過を詳細に調査し、次のことが明らかになった。1) 渦輪形成直後に、外側から渦輪の対称軸の中心へと続く螺旋状のストリークが現れ、これが渦輪の経路に取り残される。2) このストリークは、渦輪の中心で後方の後引き渦へと繋がっている。3)

軸流を相対的に強くするとこの螺旋状のストリークが複数現れ、取り残される流体の体積が増大し、周りの静止流体との混合も増大する。



$t = 1.3 \text{ s}$        $t = 2.0 \text{ s}$        $t = 3.1 \text{ s}$   
 図2 Peeling offの様子；上段:  $\omega = 0.2 \pi$  [rad/s], 中段:  $\omega = 0.5 \pi$  [rad/s], 下段:  $\omega = 1.0 \pi$  [rad/s]

(2) 軸流を伴う単独渦輪の数値計算による研究

図3(a)はレーザー誘起蛍光法による断面画像を3-D化した可視化画像である。図3(b)は図3(a)に対応したシミュレーション結果である。渦度の等数値面に重ねて、渦輪中央で粒子を一定間隔ごとに配置し、粒子が取り残されていく様子を示している。(a)の染料を含んだ流体と同様に、粒子がらせん状に取り残されるため、Peeling offを再現していると考えられる。また、粒子を配置した位置の流体には比較的強い渦度が集中しており、この部分の流体が後方に取り残されて渦が放出されていることが確認できた。

Peeling offによって後方に取り残される循環の起源を知るために、図3(b)と同じ時刻における対称軸近辺を通過する渦線を図4に示す。Peeling offによって放出される渦線は、渦輪の対象軸に沿って引き伸ばされている渦線とつながっている。つまり、軸流を作る渦線が時間とともに曲げられ、1つに寄り集まってきたと考えられる。図5は中心軸を通る断面に垂直な渦度のコンター図である。渦輪の前方には、渦輪と逆向きの渦度が発生している。実験でも観察されたこの領域は、軸流を作る渦度が曲げられたために出てきたものと推測できる。軸流を伴う渦輪の循環が減少していたのは、逆向きの渦度が発生するためだと考えられる。以上のように、実験的に観察されたPeeling offに関する詳細が数値計算によって調査され、その発生メカニズ

ムが明らかになった。

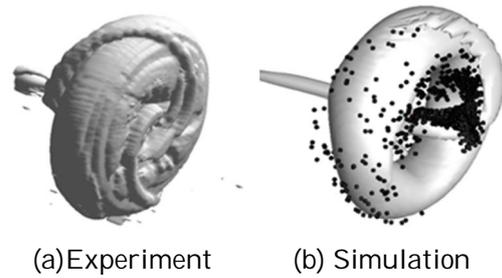


図3 Peeling offの様子

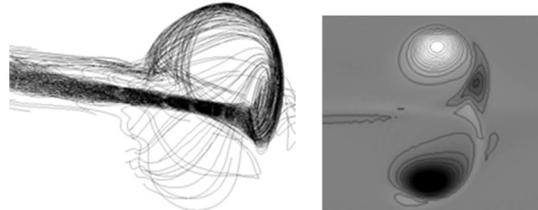


図4 対称軸近辺を通過する渦線

図5 渦度分布

(3) 軸流を伴う渦輪列による流体輸送

渦輪列によって輸送された流体の分布は、cluster, partial cluster, scatterの3種類に分類された。この分類に基づくと、流体輸送を制御するための渦輪の形成パラメータと分布の関係が表2のようになり、その機能が次のように明らかとなった。

表2 渦輪列形成条件と輸送分布の分類

Case	$\Omega = 0.0 \pi$	$\Omega = 0.2 \pi$	$\Omega = 0.5 \pi$
A	cluster	cluster	cluster
B	cluster	partial cluster	scatter
C	cluster	partial cluster	scatter

軸流は渦輪の周方向の波の増幅率を低下させ、その構造を保つので、流れ場の外乱の影響が小さくなる。そして、円筒の回転角速度 $\Omega$ が適切であれば、渦輪同士が相互干渉することなく独立に移動する。しかしながら、 $\Omega$ が大きすぎる場合には、Peeling offによる流体の放出が大きくなり、clusterの状態となる傾向が現れる。

単独渦輪については、軸流の有無に関わらず、その移動距離は $L_0/D_0$ とともに大きくなる。そして、輸送分布の状態がscatterの場合には、流体輸送の距離も $L_0/D_0$ とともに増大する。しかしながら、他の形成パラメータによって分布状態がclusterとなる場合には、輸送距離は渦輪が崩壊する位置によって決定される。

渦輪の形成時間間隔( $\Delta t$ )が小さい場合には、渦輪相互の干渉が強くなり、clusterの状態になる傾向が強い。 $\Delta t$ が大きくなると、scatterの状態になる傾向が強くなり、また、先行する渦輪の攪乱の影響が小さくなるため、渦輪の進行方向の偏向角度が小さくなる。

#### (4) ブレード付ノズルによる軸流を伴う渦輪列

ブレード付ノズルから形成された渦輪が通常のノズルから形成されたものより移動距離が大きくなった1例として、 $L_p = 6.0 \text{ mm}$ ,  $V_p = 40.0 \text{ mm/s}$  の条件で形成された渦輪の移動距離の結果を図6に示す。これは、形成後30 s経過したときの位置をノズルの直径で無次元化して示されている。通常のノズルから形成された渦輪の移動距離の平均は42.4であり、Normal nozzleとして図示している。また、平板ブレードと回転ノズルで形成した渦輪の移動距離も、比較できるように同じグラフに示した。

$0^\circ$ でブレードを取り付けた場合、ブレードによる乱れが影響し、移動距離が通常の渦輪より小さくなった。平板のブレードの場合については、 $5^\circ$ と $10^\circ$ の場合は渦輪に軸流が加わって若干移動距離が大きくなるが、傾きが大きくなるほど乱れが強くなり、 $15^\circ$ では $0^\circ$ の場合と変わらなくなってしまった。乱れが小さくなるようにブレードを湾曲させると、移動距離は大きく改善されている。また、 $16^\circ$ という大きな偏向角度の場合でも移動距離が下がっていないので、乱れを小さくする改善効果があったと考えられる。

回転ノズルの場合、横軸の尺度が異なり直接的に比較できないが、ブレード付きノズルと同様の傾向を示している。この場合は、ブレードによる乱れは無く、回転角速度が大きくなると渦輪内の流体が放出され、循環が低下する。

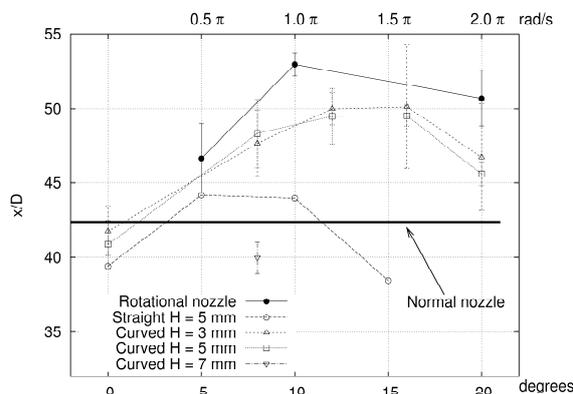


図6  $t = 30 \text{ s}$  における渦輪の位置

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ①大藏信之、内藤隆、奥出宗重、渦輪による物質輸送の特性、ながれ(日本流体力学会)、査読有、Vol. 31、2012、pp. 187-194
- ②内藤隆、大藏信之、奥出宗重、内海友介、渦輪による流体輸送の定量測定、日本機械学会論文集B編、査読有、Vol. 77、2012、pp. 156 - 166

[学会発表] (計10件)

- ①内藤隆、天野佳佑、今井康裕、浮力の影響を受ける渦輪の運動、第10回日本流体力学中部支部講演会、2012
- ②内藤隆、榊原啓太、進行方向に浮力が働く渦輪の運動、日本機械学会東海支部第61期総会講演会論文集、2012、No. 631
- ③伊藤雄大、内藤隆、長谷川健、湾曲ブレード付きノズルによる軸流を伴う渦輪列、第9回日本流体力学会中部支部講演会、2011
- ④宝元拓也、大藏信之、内藤隆、奥出宗重、渦輪の特性と物質輸送効率の変化、第47回日本航空宇宙学会中部関西支部合同秋季大会、2010
- ⑤河村将光、内藤隆、後藤俊幸、軸流を伴う渦輪に現れる渦放出過程、第8回日本流体力学会中部支部講演会、2010
- ⑥加藤雄資、内藤隆、大藏信之、軸流を伴う渦輪の速度場、第8回日本流体力学会中部支部講演会、2010
- ⑦内藤隆、堀口瑞樹、伊藤雄大、大藏信之、傾けたブレードを取り付けたノズルから噴出した軸流を伴う渦輪、日本機械学会2010年度年次大会、2010、No. S0502-5-6
- ⑧河村将光、内藤隆、後藤俊幸、大藏信之、軸流を伴う渦輪の推移と並進運動、日本機械学会流体工学部門講演会、2009
- ⑩加藤雄資、内藤隆、大藏信之、三次元画像による軸流を伴う渦輪の観察、日本機械学会流体工学部門講演会、2009

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

内藤 隆 (NAITOH TAKASHI)

名古屋工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80242907