

振動流場における正弦波状流路内の流れの遷移*

西村 龍夫*¹, 村上 慎一郎*²
河村 祐治*³, 宮下 尚*⁴Flow Transition in a Symmetric Sinusoidal Wavy-walled Channel
for Oscillatory FlowTatsuo NISHIMURA, Shinichiro MURAKAMI,
Yuji KAWAMURA and Hisashi MIYASHITA

Oscillatory flow is examined experimentally in a two-dimensional furrowed channel. We show the transition of two-dimensional to three-dimensional flow due to instability of the flow at moderate Reynolds numbers. The critical value of the Reynolds number at the onset of three-dimensional flow strongly depends on the Strouhal number. The fluid motion is found to be most unstable in the limited Strouhal number range of 0.02 to 0.03. Two distinct three-dimensional flows are discovered and their boundary is determined only by the Strouhal number, i. e. $St \approx 0.02$.

Key Words: Fluid Mechanics, Wavy-walled Channel, Oscillatory Flow, Three-dimensional Flow, Flow Visualization

1. 緒 言

はく離, 再付着流れ⁽¹⁾を利用して流体混合, 熱および物質移動を促進させようとする装置がいくつか開発されている。その一つである拡大縮小流路は, 壁面の形状を周期的に変化させ, はく離を生じさせて移動促進を図ろうとするものである。著者ら^{(2)~(5)}は以前, 壁面が正弦波状をなす流路を用い, 層流および乱流域での流れおよび物質移動特性を検討した。その結果乱流域では平行平板流路に比べてかなりの移動促進効果があることが認められたが, 層流域ではその効果は小さいことが明らかとなった。この違いは波状壁のくぼみ内に形成された循環渦の挙動に起因する。すなわち乱流域では循環渦は非定常挙動を呈し, 循環渦領域と主流域で流体混合が促進される。

乱流域での移動促進は工業装置の高性能化および省エネルギー対策として不可欠であるが, 層流域での移動促進も人工臓器⁽⁶⁾, 小形空調装置⁽⁷⁾, 食品工業で用いられる熱交換器⁽⁸⁾などに関連して, 最近では重要視

されるようになった。

層流域ではく離, 再付着流れを利用した移動促進は定常流では上で述べたように実用的にはあまり期待されない。そこで, Bellhouse⁽⁹⁾らは流れに脈動を印加させてくぼみ内に停留する循環渦を主流中へ放出させて移動促進を図ろうと考え, これを膜型人工肺に適用した。この手法は他の工業装置への応用も可能であり, Sobey⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾はこの移動促進の機構を明らかにするため, 二次元正弦波状流路内の流れを数値計算によって検討し, 時間平均流量に比べて振動成分の流量がかなり大きい場合(振動流に近い条件), 循環渦の強度が大きくなり, 周期的に起こる渦の形成と掃出し過程が流体混合を促進することを示した。さらに Stephanoffら⁽¹²⁾は流れの可視化によってこれを実証した。その後, Ralph⁽¹³⁾は断面が円形である軸対称正弦波状流路について, 振動流の操作変数であるレイノルズ数(Re)やストローハル数(St)によって流れがどのように変化するかを実験と数値計算によって検討した。その結果彼は特定の St 数範囲で Re 数がある値を超えると時間に関して非対称な流れが現れることを見いだした。

このような特異な流れは二次元流路にも現れるものと思われるが, Stephanoffら⁽¹²⁾の研究では Re 数や

* 原稿受付 平成2年10月8日。

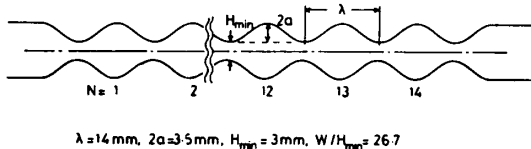
*¹ 正員, 山口大学工学部 (〒755 宇部市常盤台 2557)。*² 大日本印刷(株) (〒115 東京都北区赤羽南 2-3-6)。*³ 広島大学工学部 (〒724 東広島市鏡山 1-4-1)。*⁴ 正員, 富山大学工学部 (〒930 富山市五福 3190)。

St 数範囲が小さい値に限定されているため、非対称流れは観察されていない。そこで本研究では操作変数を広い範囲にわたって変化させ、二次元正弦波状流路でも非対称流れが存在するかどうかを可視化実験によって検討した。操作変数の影響を調べることは、装置設計において操作条件を決定する資料にもなり重要である。

2. 実験装置および方法

実験装置は前報⁽¹⁴⁾の鋭い角をもった波状流路で使ったものと同一である。振動流はスコッチヨーク機構による振動装置を用いて発生させ、流量は時間に対して正弦波状に変化する。ピストンの移動距離と振動数によって流量波形を種々変化させた。

図1に使用した流路の形状を示す。流路を構成する波状板はくぼみの深さ $2a=3.5$ mm, 長さ $\lambda=14$ mm, 幅 $W=80$ mm であり, 14 個のくぼみからなる。最小流路間隔は $H_{\min}=3$ mm で最大流路間隔は $H_{\max}=10$ mm である。従来の長方形ダクトの結果を参考にすれば, 波状流路の断面アスペクト比はそれぞれ $W/H_{\min}=26.7$, $W/H_{\max}=8$ であるので, 流路側壁付近を除い



$\lambda=14$ mm, $2a=3.5$ mm, $H_{\min}=3$ mm, $W/H_{\min}=26.7$

図1 試験部の詳細

ては流れは二次元性が保たれるものと思われる。

振動流を支配する操作変数は Re 数と St 数の二つがある。Sobey⁽¹⁰⁾ や Ralph⁽¹³⁾ と同様に最小流路間隔の半分を代表長さを選び, Re 数と St 数を次のように定義する。

$$Re = Q_p / (2W\nu) \dots \dots \dots (1)$$

$$St = fH_{\min}^2 W / (2Q_p) \dots \dots \dots (2)$$

ここで, Q_p は最大流量, ν は流体の動粘度, f は振動数である。

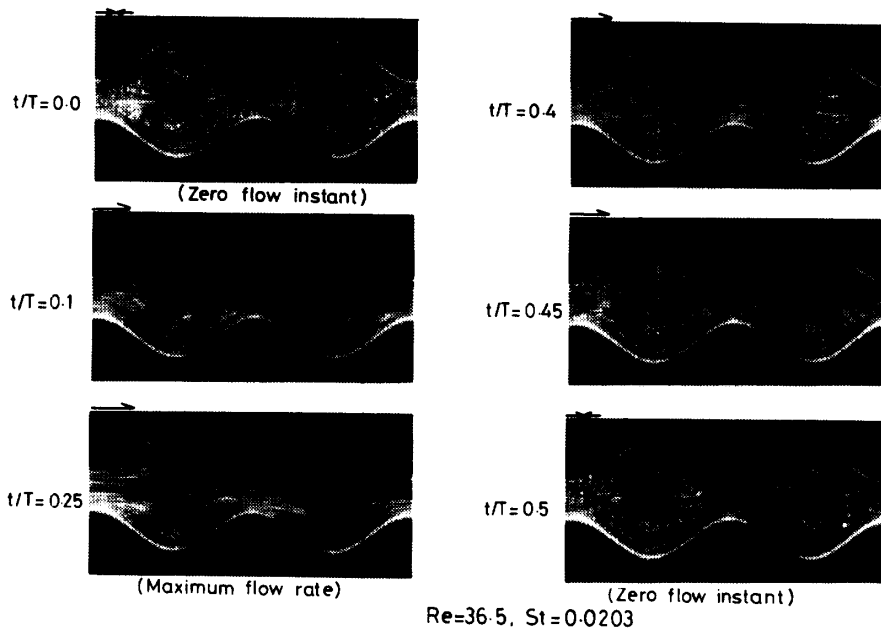
実験条件は Ralph の結果を考慮して $Re=10-500$, $St=0.008-0.05$ とした。なお St 数の大きい粘性支配域 ($St>0.05$) の流れは別報⁽¹⁵⁾ に詳述されている。

流体には水を用い, 流れの可視化はアルミニウム粉法と電解沈殿法によって行った。観察は流路側面および上面から行った。可視化写真は振動装置に取付けられた光センサの信号をトリガーとし, ビデオカメラやモータドライブカメラによる同期撮影を行った。

3. 実験結果および考察

低 Re 数域 ($Re<50$) での流れは, いずれの St 数でも二次元であり, 時間に関して対称であった。図2に一例として流路側面から撮影した可視化写真を示す ($Re=36.5$, $St=0.0203$)。隣接のくぼみ間で流動状態が等しいので, 流れは空間的周期性を満足し, また上下対称であることがわかる。

$t/T=0.0$ では流体は右から左へ流れていて流量が零になったときの瞬間の流れを示す。流量が零であるにもかかわらず, 各くぼみ内に大きな循環渦が形成さ



$Re=36.5$, $St=0.0203$

図2 側面から観察した流れ模様 (二次元流れ)

れている。 $t/T=0.1$ では流体が逆に左から右へ向かい、加速されているときを示す。半周期前にくぼみ内に形成されていた循環渦が主流中へ掃き出され、流路中央に残存しているのがわかる。 $t/T=0.25$ では最大流量時の流れを示す。流れが壁面からはく離し、くぼみ上流部に小さな循環渦が形成されている。その後流れは減速されるが、 $t/T=0.4, 0.45$ の可視化写真に示されるように、循環渦は膨張し続ける。 $t/T=0.5$ では再び流量は零となり、流れの向きは逆になるが、 $t/T=0.0$ の場合と等しい循環渦が各くぼみ内に存在する。これを時間に関して対称な流れと呼ぶ。このように Re 数が低い場合、流れの二次元性が保持されるが、 Re 数が大きくなると流れは三次元へ遷移した。

図3にその一例 ($Re=78.7, St=0.0284$) を示す。写

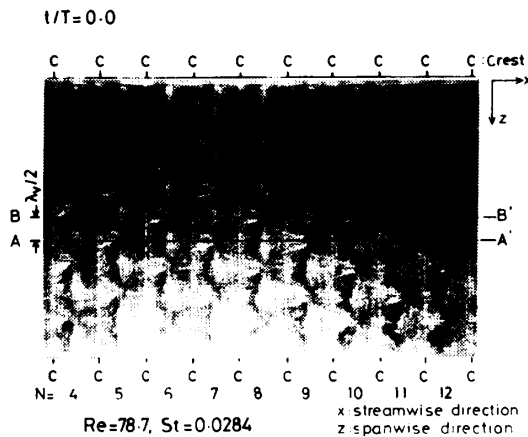


図3 上面から観察した流れ模様

真は $t/T=0.0$ において流路上面から下のくぼみ部分のアルミニウム粉の挙動を撮影したものである。アルミニウム粉は流路のスパン方向に様に分散されるのではなく、波長 λ_v の周期的な模様を描く。またその模様は隣接のくぼみ間で位相が 180° ずれている。すなわち流れが周期的な三次元構造をもっていることがわかる。また、半波長 ($\lambda_v/2$) 離れた A-A', B-B' 断面を観察すると、各くぼみ内の流れは A-A' と B-B' とでは逆になるだけで本質的には変わらないことを確認した。図4は A-A' 断面における半周期間 ($t/T=0.0-0.5$) の可視化写真を示す。流れはいずれの時間でも上下対称であるが、上面写真から予想されるように流動状態は隣接のくぼみ間で異なり、各くぼみで交互に変化する。たとえば $t/T=0.0$ では右側のくぼみのほうが左側よりも循環渦は大きくなっているのがわかり、 $t/T=0.1$ では循環渦は主流中へ掃き出されるが、左側のくぼみの渦のほうが早く消失する傾向にある。そのため新しく壁面上で形成される循環渦は逆に左側のくぼみのほうが大きく成長する ($t/T=0.25-0.45$)。したがって $t/T=0.5$ では各くぼみ内の循環渦の大きさは $t/T=0.0$ の場合と逆転する。

その結果あるくぼみの一断面を見れば、流れが左から右へ向かう場合と逆方向に向かう場合では流動状態は異なり、時間に関して非対称な流れになっていることがわかる。しかしこの非対称流れは Ralph⁽¹³⁾ が軸対称流路で見いだしたものと種類が異なる。すなわち、軸対称流路では非対称流れでも各くぼみ間で流動状態

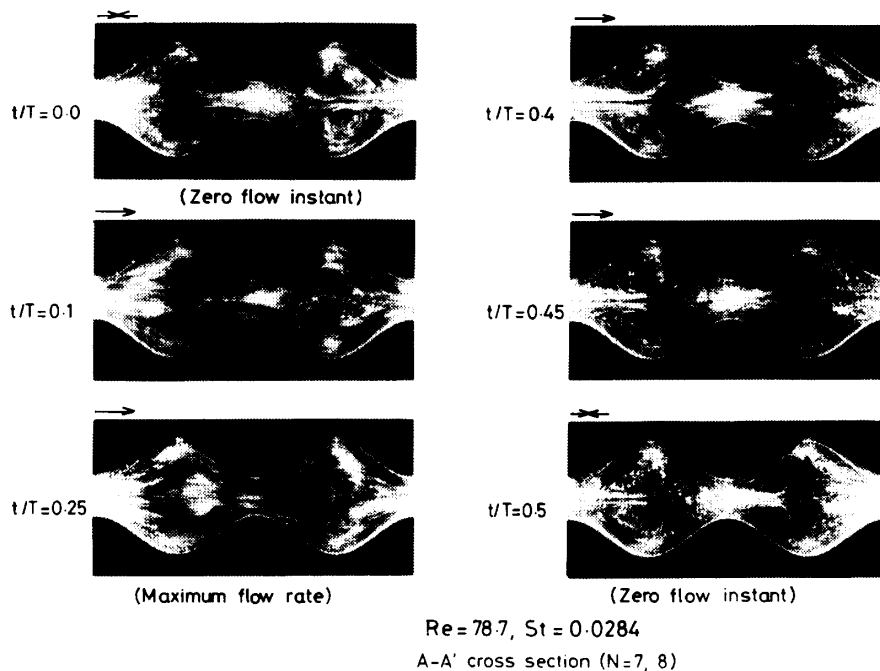


図4 側面から観察した流れ模様 (三次元流れ)

は同一であり、軸対称性も保持されると報告されている。これに対して二次元流路では流れが三次元へ遷移する結果として非対称流れが現れる。なぜこのような違いが表れるのかはよくわからないが、本研究では初期条件（静止状態でのピストンの位置）にかかわらず必ず同一の三次元構造が再現されることを確認している。

図5は流れが二次元から三次元へ遷移する点を Re 数と St 数に対してどのように変化するかを調べたものである。その遷移点は St 数に依存しており、 St 数が 0.02-0.03 の範囲では流れが最も低い Re 数で三次

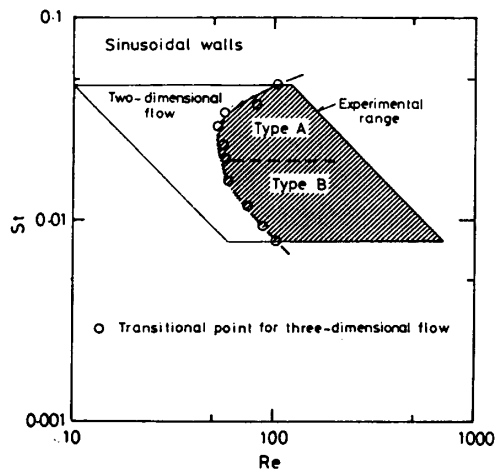


図5 二次元から三次元流れへの遷移

元へ遷移し、不安定になりやすいことがわかる。この領域は非対称流れが明確に識別できる箇所に対応している。また三次元構造は St 数によって二つに分けられ (Type A, B), その境界は $St=0.02$ 付近にある。

図6は一周期間における Type A の上面写真を示す ($Re=78.7, St=0.0284$). 対応する側面写真は図4に示される。いずれの時間ともスパン方向に波状模様が観察され、任意の時間から半周期経過した模様は半周期前のそれと向きが逆になるだけで等しいことがわかる。図6中の星印は $t/T=0.0$ において $N=7$ の谷部から $N=8$ の谷部に存在するアルミニウム粒子が振動流によってどの程度移動するかを調べるために示したものである。半周期間における粒子の移動距離は波状壁の波長 λ より小さいことがわかる。

St 数が 0.03 より大きくなると時間に関する非対称性の程度は急激に減衰するが、三次元構造はほとんど変化しなかった。

図7は Type B の上面写真を示す ($Re=77.3, St=0.0203$). 同じようにスパン方向に周期的な模様が形成され、隣接のくぼみ間で位相が 180° ずれているが、Type A とは模様が異なる。すなわち Type B ではしま状模様をなす。 $t/T=0.0$ から星印で示されたアルミニウム粉の移動を半周期間観察すると、 $t/T=0.0$ で形成されていたしま状模様は $t/T=0.25$ (最大流量) 付近でいったん消失するが、再び $t/T=0.4$ 付近で現れる。

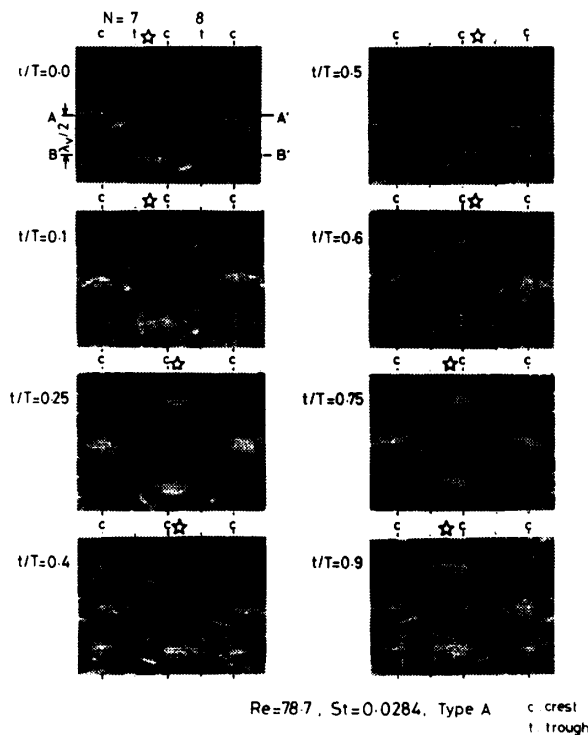


図6 上面から観察した流れ模様

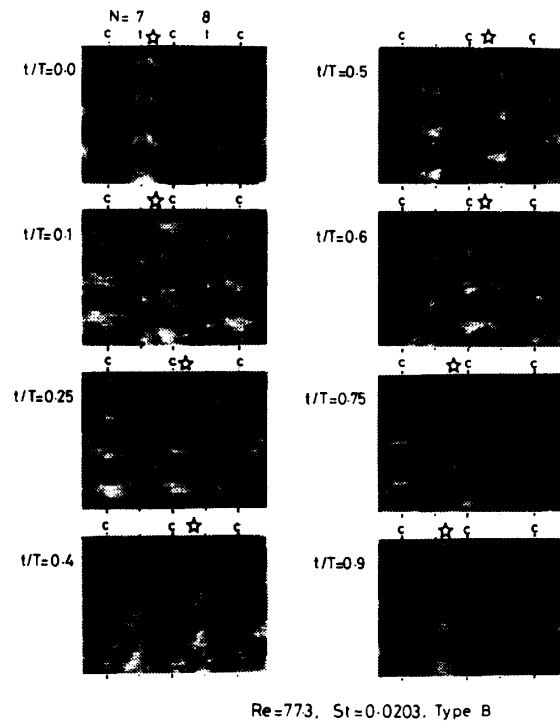


図7 上面から観察した流れ模様

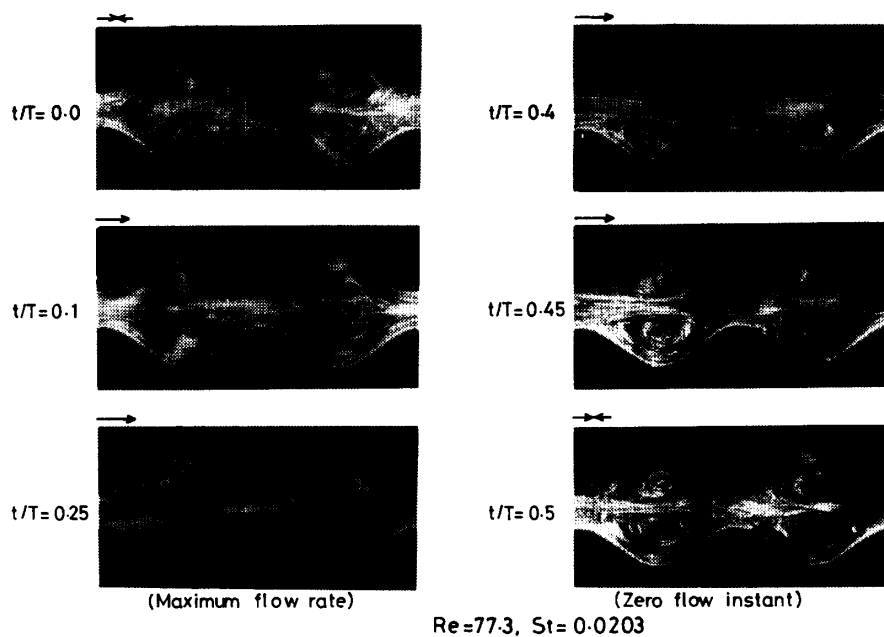


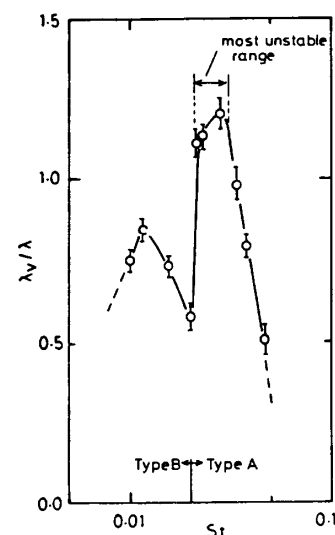
図 8 側面から観察した流れ模様 (三次元流れ)

しかししま状模様の位相は前に形成されたものとは 180° ずれており, Type A より複雑な流れ構造を有していることがわかる。また半周期間における粒子の移動距離は波状壁の波長にほぼ等しくなっていることをビデオにより確認した。図 8 は同一条件における側面写真である。隣接のくぼみ間でスパン方向における周期的な模様の位相が 180° ずれているにもかかわらず、側面から観察した循環渦の大きさは各くぼみ間でほぼ等しくなっている。このことは流れの三次元性が局所的であることを示唆する。側面写真を注意深く観察すると、はく離せん断層付近でアルミニウム粉が白く光っていることより、この部分にしま状模様が集中しているものと思われる。

St 数が 0.02 よりさらに小さくなくてもしま状模様は同様に観察されたが、しま状模様の全体的な配列は必ずしも規則的にはならなかった。

図 9 は St 数と三次元流発生直後における周期的模様の波長 λ_v との関係を示す。 λ_v の最大値は遷移 Re 数が最も低い St 数範囲に存在する。また λ_v は Type A と Type B の境界 ($St \approx 0.02$) で急激的に変化している。その境界を示す St 数は、観察されたアルミニウム粉の軌跡より、流体粒子の移動距離が波状壁の波長に対応するということを意味しているものと思われる。したがって流れの三次元構造は流体粒子の移動距離が波状壁の波長より大きいか小さいかによって異なることがわかる。

ここで観察された三次元流れは、波状流路では今まで報告されていない。定常流⁽⁵⁾では二次元性が保持さ

図 9 周期的模様の間隔と St 数の関係

れて、このような三次元構造は現れていない。したがってこれは振動流特有の現象であると考えられる。Honji⁽¹⁶⁾は無限流体中で円柱を大きい振幅で振動させた場合、特定の条件において流れが三次元に遷移することを実験的に示した。その後 Hall⁽¹⁷⁾はこの現象に興味をもち、安定解析を行った。その結果凸形の曲面を有する固体壁と振動流の相互作用によって Taylor-Görtler 渦が発生することを示した。すなわち遠心力の不安定性がこの遷移に起因しているということである。本報で使用した流路も凸形の曲面を有した壁面であり、したがって観察された三次元流れは遠心力の不安定性によるものと考えられる。しかし、なぜ $St = 0.02$ 付近を境にして流れ構造が全く異なるのかはまだ

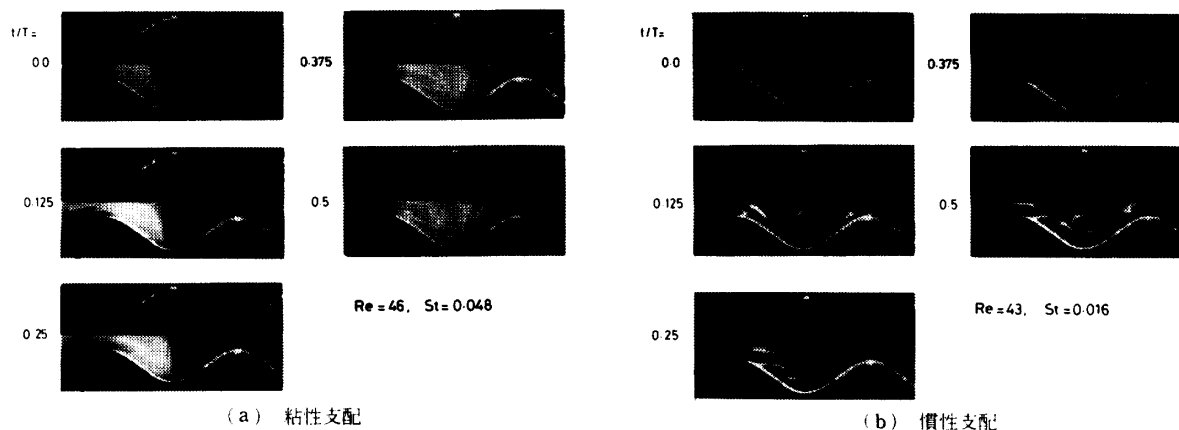


図 10 電解沈殿法による可視化写真

よくわからない。今後この点を検討する必要がある。

図 10 に電解沈殿法による可視化写真を示す。トレーサは流路下部壁面に塗布した導電性塗料より発生させている。電解沈殿法は Re 数の高い領域ではトレーサの拡散が大きく可視化には適さなかったが、低 Re 数では有効であった。図 10(a) は粘性支配域の結果を示す ($Re=46, St=0.048$)。粘性支配の流れであるため、壁面から発生したトレーサの動きは、循環渦の形成、放出の影響よりも振動流によって誘起された定常二次流れ⁽¹⁵⁾の影響を強く受けている。これに対して図 10(b) に示された慣性支配の流れ ($Re=43, St=0.016$) では、循環渦の形成、放出の影響を強く受けている。両者を比較すると Re 数が等しい場合、流体混合、熱および物質移動の促進のためには、 St 数が小さいほうが有効であることがわかる。しかし St 数を限りなく小さくすれば、流れは擬定常となるので、中間の St 数域で最適な条件があるように思える。これを確かめるためには、今後熱および物質移動の実験を行う必要がある。

4. 結 言

振動流場における二次元正弦波状流路内の流れの可視化を広い操作条件にわたって行い、以下の知見を得た。

(1) 軸対称流路で見いだされていた時間に関する非対称流れとは異なる流れが二次元流路では存在することが示された。

(2) 二次元流路であるにもかかわらず、比較的低い Re 数で流れは二次元から規則正しい三次元へ遷移

する。特に遷移 Re 数が最も低くなる St 数範囲が存在することがわかった。

(3) 三次元流れは 2 種類あり、これは流体粒子の移動距離が波状壁の波長より大きいか小さいかで決定されることがわかった。

本研究の遂行に際し、岐阜大学工学部 永田拓教授から電解沈殿法について有益なご教示をいただいた。また本研究の研究費の一部は文部省科学研究費 (No. 63750899) の助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) 木谷, 機論, 55-511, B(1989), 559.
- (2) Nishimura, T., ほか 2 名, *J. Chem. Eng. Jpn.*, 17-5(1984), 466.
- (3) Nishimura, T., ほか 3 名, *J. Chem. Eng. Jpn.*, 18-6(1985), 550.
- (4) Nishimura, T., ほか 2 名, *J. Chem. Eng. Jpn.*, 19-2(1986), 142.
- (5) Nishimura, T., ほか 3 名, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 33-5(1990), 835.
- (6) 谷下・星野, 機論, 55-516, B(1989), 2383.
- (7) 鈴木・ほか 4 名, 機論, 55-516, B(1989), 2457.
- (8) 設楽・ほか 4 名, 化工論, 15-4(1989), 924.
- (9) Bellhouse, B. J., ほか 7 名, *Trans. Am. Soc. Artif. Int. Organs*, 19(1973), 77.
- (10) Sobey, I. J., *J. Fluid Mech.*, 96(1980), 1.
- (11) Sobey, I. J., *Chem. Eng. Sci.*, 40-11(1985), 2129.
- (12) Stephanoff, K. D., ほか 2 名, *J. Fluid Mech.*, 96(1980), 27.
- (13) Ralph, M. E., *J. Fluid Mech.*, 168(1986), 515.
- (14) 西村・ほか 3 名, 日本流体力学会誌, 8-4(1989), 359.
- (15) Nishimura, T., *Chem. Eng. Sci.*, 44-10(1989), 2137.
- (16) Honji, H., *J. Fluid Mech.*, 107(1981), 509.
- (17) Hall, P., *J. Fluid Mech.*, 146(1984), 347.