

正弦波状流路内の脈動流*

西村 龍夫*¹, 宮下 尚*²

Pulsatile Flow in a Symmetric Sinusoidal Wavy-Walled Channel

Tatsuo NISHIMURA and Hisashi MIYASHITA

Pulsatile laminar flow is examined experimentally in a two-dimensional furrowed channel with varying flow parameters. We present flow diagrams in which five flow modes are classified in terms of the Womersley number and oscillatory fraction of the flow rate for each net flow Reynolds number, on the basis of the process of vortex formation, growth and subsequent disappearance. A striking feature of pulsatile flow in the wavy-walled channel is that after the vortex ejects from the furrow, the vortex does not always disappear in the mainstream, but reattaches to the wall and eventually disappears under certain conditions, in contrast to oscillatory flow. We also show the transition to three-dimensional flow and a new flow structure in which a wave appears in the mainstream during the flow deceleration phase due to a shear layer instability.

Key Words: Fluid Mechanics, Wavy-Walled Channel, Pulsatile Flow, Flow Visualization, Three-Dimensional Flow, Shear Layer Instability.

1. 緒 言

はく離, 再付着流れ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⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾は以前, 壁面が正弦波状をなす流路を用い, 層流から乱流域での流れおよび物質移動特性を検討した。その結果流れは比較的低 Re 数 [$Re=O(100)$] で乱流へ遷移し, 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関連する。すなわち循環渦は層流域では定常状態を保持しているのに対して, 乱流域で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。類似の結果は多数の邪魔板を周期的に設けた円管の伝熱実験⁽⁵⁾でも得られている。

乱流域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, 層流域の移動促

進も人工臓器⁽⁶⁾, 小形空調装置⁽⁷⁾, 電子デバイスの冷却システム⁽⁸⁾, 食品工業で用いられる熱交換器⁽⁹⁾などに関連して, 最近, 重要視されるようになってきた。

層流ではく離, 再付着流れを利用した移動促進は上で述べたように定常流では実用的にあまり期待されない。そこで, Bellhouseら⁽¹⁰⁾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強制的に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。Sobey⁽¹¹⁾はこの移動促進機構を明らかにするため, 二次元正弦波状流路内の振動流を数値計算によって検討し, 周期的に起こる渦の形成と掃出し過程が物質移動を促進すると結論づけた。さらに著者らは⁽¹²⁾⁻⁽¹⁵⁾振動流の操作変数の影響を詳細に検討し, ある特定の操作変数の範囲で渦の強度が最大となり, また流れが二次元から三次元へ遷移することを見いだした。

これまで振動流が対象とされてきたのは, Bellhouseらが開発した膜型人工肺は振動流に近い条件で操作されたためである。すなわち振動流の効果を顕著にするため, 時間平均流量基準の Re 数を低く保ち [$Re=O(10)$], 振動成分基準の Re 数をかなり高くしている [$Re=O(100)$]。しかし, この移動促進法を他の工業装置へ応用することを考えれば, 振動流のみなら

* 原稿受付 平成3年11月13日。

¹ 正員, 山口大学工学部 (〒755 宇部市常盤台 2557)。² 正員, 富山大学工学部 (〒930 富山市五福 3190)。

ず脈動流の研究も必要である。

波状流路内の脈動流の研究はあまり多く行われていない。Latinopoulos-Ganoulis⁽¹⁶⁾は血管の狭さくモデルとして正弦波状流路を選び、壁面せん断応力分布の時間変化を有限要素法によって求めている。著者ら⁽¹⁷⁾は振動成分流量が定常成分のそれより小さい場合について数値計算を行い、渦の形成、消失過程に及ぼす操作変数の影響を詳細に検討している。これらの研究はいずれも操作条件が狭い範囲に限定され、脈動流の特性はまだ断片的にしか理解されていない。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、移動促進の主なメカニズムと考えられる渦の形成、消失過程を可視化実験によって検討した。

なお、本研究と直接関係しないが、動脈硬化などの血管障害のメカニズムを考察するため、流路が一部狭さくした脈動流の計算および実験がいくつか行われている^{(18)~(20)}。これらの研究も渦の形成、消失過程に着目している。

2. 実験装置および方法

実験装置は前報⁽¹⁵⁾の振動流の研究で使用したものと同一である。脈動流は定常流と振動流を重ね合わせ、流量は次式に示されるように時間に対して正弦波状に変化する。

$$Q_t = Q_s + Q_o \sin(2\pi t/T) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 Q_s は定常成分の流量、 Q_o は振動成分の最大流量、 T は振動周期である。

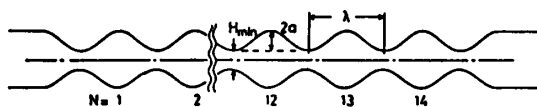
図1に使用した流路の詳細を示す。流路は上下2枚の波状板から構成され、各波状板はくぼみの深さ $2a = 3.5$ mm、長さ $\lambda = 14$ mm、幅 $W = 80$ mm であり、14個のくぼみからなる。最小流路間隔は $H_{\min} = 3$ mm で最大流路間隔 $H_{\max} = 10$ mm である。定常流の実験結果⁽⁴⁾より、流れの二次元性が保たれ、流路側壁の影響はほぼ無視できることを確認している。

脈動流を支配する操作変数は三つあり、次のように定義する。

$$\text{定常成分の } Re \text{ 数} \quad Re = Q_s / (Wv) \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{流量振幅比} \quad P = Q_o / Q_s \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{ウォーマスリー数} \quad \alpha^2 = H_{\max}^2 (2\pi / Tv) \dots\dots\dots (4)$$



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

図1 試験部の詳細

実験条件は緒言で述べたように層流域を対象としているので定常流の結果を踏まえて、 $Re = 24 \sim 240$ とし、他の操作変数はできるだけ広い範囲で変化させた ($P = 0.1 \sim 20$, $\alpha^2 = 100 \sim 1000$)。

流体には水を用い、アルミニウム粉をトレーサとした可視化法によって渦の形成、成長および消失過程を詳しく調べた。なお、他のトレーサの使用も試みたが、非定常流や三次元流の可視化にはアルミニウム粉が最適であった。観察は主として流路側面から行い、また三次元流れへの遷移を検討するため、流路上面からの観察も別途行った。可視化写真は振動流発生装置に取付けられた光センサの信号をトリガとし、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

実験は Re 数、流量振幅比、ウォーマスリー数をそれぞれ変化させ、計400の条件について渦の形成、成長および消失過程を観察した。その結果五つのタイプに分類されることがわかった。

分類の基準は次のとおりである。

(I) 一周期間 ($t/T = 0 \sim 1$) で渦の強度および大きさは変化するが、渦は消失することはない。図2にその一例を示す ($Re = 100$, $P = 0.29$, $\alpha^2 = 187$)。最大流量時のほうが最小流量時に比べて瞬間の Re 数、 Re_i は1.81倍大きい。くぼみ内に形成された渦は最小流量時のほうがわずかではあるが大きくなっている。これはウォーマスリー数が100程度になると、もはや擬定常の仮定が成立しないことを示す。

(II) 一周期間で渦の形成および消失が繰返され、特に渦は壁面上で消失する。図3にその一例を示す ($Re = 100$, $P = 0.91$, $\alpha^2 = 596$)。渦は加速期に流路拡大部のくぼみ壁で形成され、減速期になっても成長を続ける。そして最小流量時には渦はくぼみ全体を覆う。その後再び加速期に入ると主流が流路の中央を通過するため、渦は収縮して壁側に押しやられ、渦の発生場所とは異なる流路縮小部のくぼみ壁で完全に消失する。なおビデオテープを再生して連続的に流れ場を見ると、くぼみ内で形成された渦はくぼみから出てあたかも下流に流されているように見える。これは我々の目がトレーサの瞬間の動きのみならず、残像として過去のトレーサの軌跡をも見ているためである。したがって振動周期の短い非定常流の流線を目で見ることは困難である。

(III) 壁面で形成された渦は流体が壁面と渦の間に流れ込むため壁からいったん離脱するが、再び付着して消失する。これは一周期間で主流の方向が逆転する

場合($P > 1$)に見られる。図4にその一例を示す($Re = 50$, $P = 1.2$, $\alpha^2 = 392$)。瞬間の Re 数が正の場合を左から右へ向かう順方向流れとし、負の場合を右から左へ向かう逆方向流れとする。(II)と同様に流量が零近くになると渦はくぼみ全体を覆う。そのため逆方向流れにおける流体は流路中央ではなく壁近くを流れ、順方向流れにおいて形成された渦を壁から離脱させる。そ

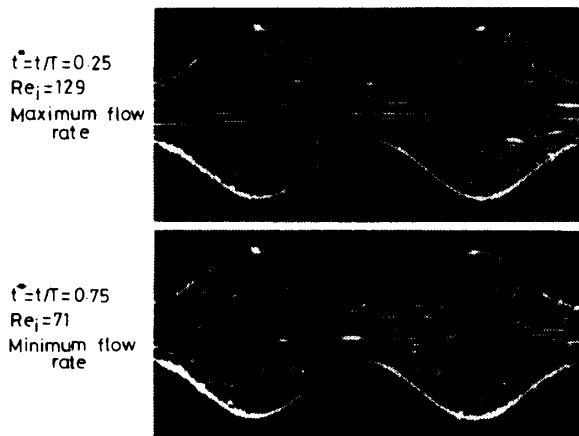


図2 流動状態(I) ($Re = 100$, $P = 0.29$, $\alpha^2 = 187$)

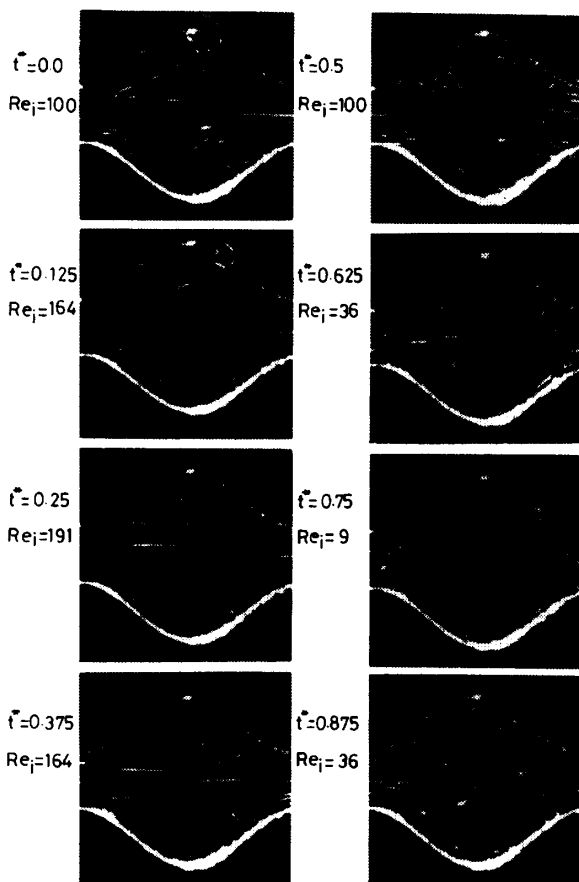


図3 流動状態(II) ($Re = 100$, $P = 0.91$, $\alpha^2 = 596$)

の後渦が消失しないままで再び順方向流れに変わるため、壁面への渦の再付着が起こり、(II)と同じように渦は壁で消失する。したがって(III)は一時的な渦の離脱を除いては(II)と同一である。

(IV) 順方向流れと逆方向流れで別々に渦が形成され、ともに主流中で消失する。図5にその一例を示す($Re = 50$, $P = 2.3$, $\alpha^2 = 188$)。順方向流れで形成された渦と逆方向流れで形成された渦は干渉することなく、先にできた渦が流れの逆転によって主流中で消失した後、次に次の渦が形成されている。したがって渦の形成、成長および消失過程は以前報告した振動流⁽¹⁵⁾と同じである。しかし脈動流では順方向流れと逆方向流れにおける渦の強度は異なる。

(V) 順方向流れで形成された渦と逆方向流れで形成された渦はある期間共存し、その後前者の渦は壁で消失し、一方後者の渦は主流中で消失する。図6にその一例を示す($Re = 50$, $P = 2.5$, $\alpha^2 = 408$)。逆方向流れにおける最大流量時でも順方向流れで形成された渦は主流中に残存しており、先に述べた(IV)とは異なる。そのためこの渦と逆方向流れで新しく形成される渦と流れが再び逆転するまで共存するという興味深い現象を生じる。流れの逆転後、(III)の結果から予想されるように順方向流れで形成された渦は壁面に再付着して消失する。一方逆方向流れで形成された渦はより早く主流中で消失する。

次にこれら五つのタイプを基に各 Re 数について流れの領域を示すマップを作製した。その結果を図7(a)~(e)に示す。なお、振動流発生装置上の制約から実験範囲は図7に示された平行四辺形の領域に限定される。

(I)または(II)はいずれの Re 数とも流れの方向が変化しない場合($P < 1$)におこる。(I)と(II)の境界は

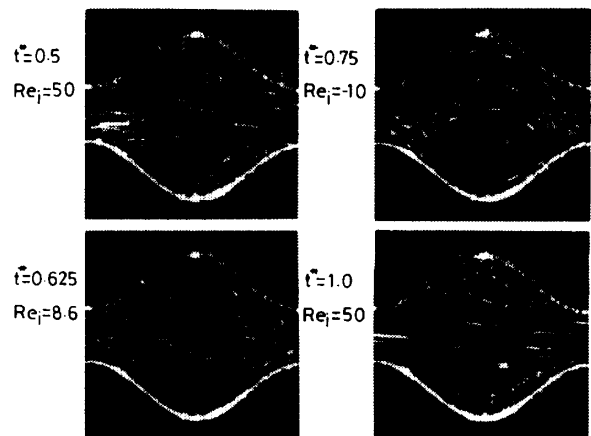


図4 流動状態(III) ($Re = 50$, $P = 1.2$, $\alpha^2 = 392$)

流量振幅比とウォーマスリー数とに依存し、マップ上で P に対して右下がりの境界線をなす。擬定常仮定が成り立たない領域で(II)がおこる理由は以前報告した数値計算結果⁽¹⁷⁾より、流体の時間的加速効果が促進されると壁面近くで流体が増速されて非粘性的な流れになり、特に加速期では離れが抑制されるためである。脈動流では流体の時間的加速効果は、式(1)と式(3)、(4)より P と α^2 の積に依存するので、 P が小さい値で(II)がおこるためには α^2 は大きくなければならない。そのため境界線は右下がりになるわけである。また本実験範囲からはずれないが、擬定常仮定が成り立つ領域($\alpha^2 \rightarrow 0$)では、瞬間の Re 数が定常流ではなく離れが発生する Re 数より小さくなれば渦はいったん最小流量時付近で消失することになる。本実験で使用した流路では以前行った数値計算⁽¹⁾からは離れが発生する Re 数は15であった。これを用いて渦が消失する流量振幅比を計算すると、その条件は Re 数によって異なり、図7の横軸に併示したようになる(▼印参照)。▼印は本実験で得られた境界線の外挿線近くであり、流量振幅比に関して(I)がおこる上限の境界を与えるものと思われる。

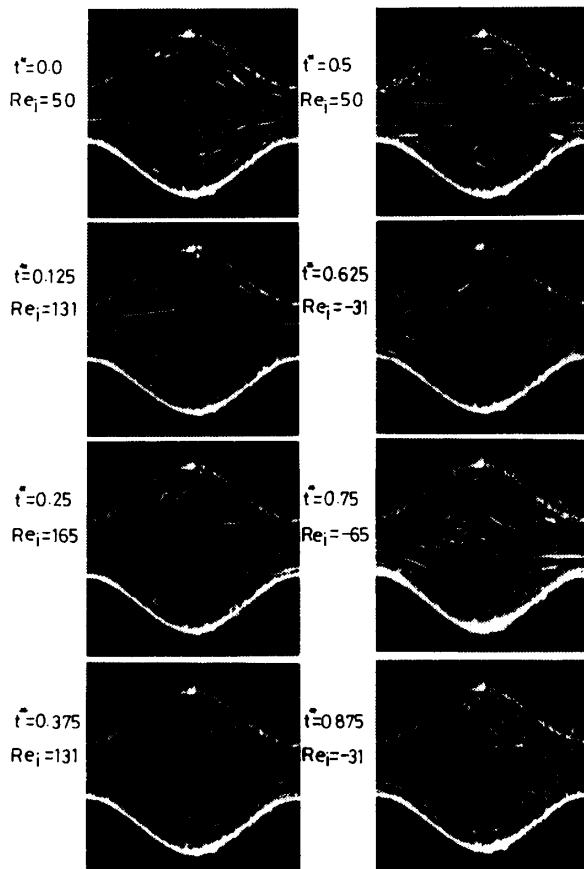


図5 流動状態(IV) ($Re=50$, $P=2.3$, $\alpha^2=188$)

(III)、(IV)および(V)は流れ方向が逆転する場合 ($P>1$)におこる。(V)は(III)と(IV)の間に位置して閉じた領域であり、特異的である。そこでまず、(V)の領域を無視して考えれば、(III)と(IV)はいずれの Re 数でも右上がりの境界線で分割される。逆方向流れで渦が形成される条件は、擬定常仮定が成り立てば流量振幅比のみで決まる。すなわち逆方向流れにおける瞬間の Re 数が先に述べたはく離が発生する Re 数を超えれば、渦が形成されることになる。この条件は図7に▽印で併示され、実験で得られた境界線の外挿線近くであり、流量振幅比に関して(IV)がおこる下限の境界を与えるものと思われる。擬定常仮定が成り立たない場合、順方向流れで形成された渦の挙動が逆方向流れでの渦形成になんらかの影響を与えるものと推察される。可視化写真を調べると、 Re 数によっても異なるが、 $P<5$ ではウォーマスリー数が増加すると順方向流れで形成され主流に掃き出された渦は長く停留し、それが新しく形成される渦の発生を抑制する傾向にある。このことが(III)と(IV)の境界線を右上がりになっている原因と考えられる。特異的である(V)は(III)と(IV)の両方の渦の特性を併せ持ったものであり、両渦の強度が同程度となったために現れたものと思われるが、これ以上の考察は可視化実験だけでは困難である。今後、数値計算によってこれらの領域での渦の発生および成長過程を定量的に検討する必要がある。

以前流れの逆転を伴わない(II)の領域を対象にして数値計算を行い、渦の発生時刻を検討したところその

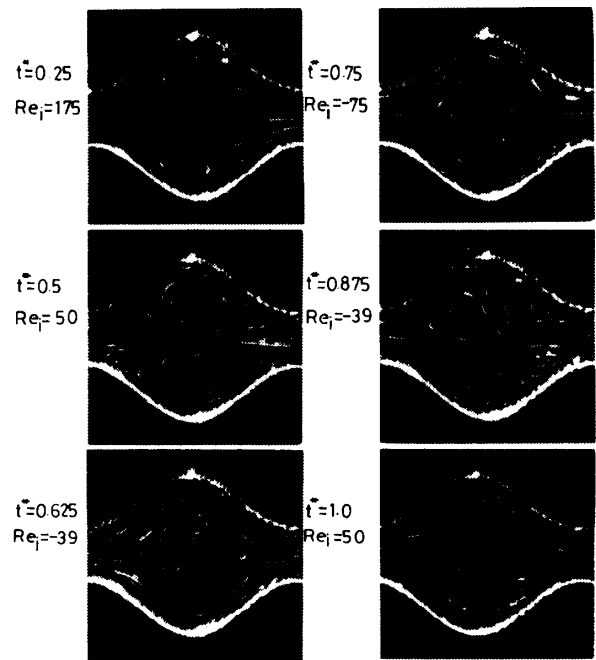


図6 流動状態(V) ($Re=50$, $P=2.5$, $\alpha^2=408$)

発生時刻は St 数 (α^2/Re) のみで決定されることを示した⁽¹⁷⁾。これを確認するため、本実験で得られた可視化写真より順方向流れて形成される渦の発生時刻を求めた。図8にその結果を示す。なお、写真で流線を得るためにはある露光時間が必要であり、そのため正確な発生時刻を決めることは難しく、実験値には最大 $\Delta t/T=0.05$ の誤差が含まれている。この点を考慮すれば実験と数値計算はよく一致し、 St 数の増加によって渦の発生時刻は加速期から減速期に移ることがわかる。しかしこの関係は流れの逆転を伴う領域(III, IV, V)では必ずしも成立せず、特に流量振幅比が大きくて定常成分の Re 数が小さい場合すなわち振動流に近づくとき大きく外れる。なお、振動流のはく離発生時刻も、 Re 数の定義は異なるが、 St 数によって決定され

ることがわかっている⁽¹³⁾。

先に示した可視化写真はいずれも隣接するくぼみ間で流動状態が等しく、空間的周期性を満足する。また流路の幾何形状から流れは上下対称でもある。しかし操作条件によっては流れの空間的周期性と対称性が破綻するところがあることを見いだした。図9にその一例を示す〔タイプ(II), $Re=240$, $P=0.75$, $\alpha^2=391$ 〕。加速期には流れは上下対称であり、空間的周期性も満足されている。しかし減速期には流路中央を通過する主流に蛇行が見られ、流れは非対称となる。この蛇行は最小流量時まで続き、非対称性の程度は最小流量時で最大となり、くぼみ内の渦は分断される。その後、再び加速期に入り対称性は急激的に回復する。このような非対称流れは図7に示されるように Re 数が小さい場合 ($Re \leq 50$) には決して現れないが、 Re 数の増加によってその領域は拡大される。なお、流路上面から流れを観察すると二次元流れであった。

減速期で流れが不安定になることははく離を伴わない円管内の脈動流の研究でよく知られている⁽²¹⁾⁽²²⁾。円管ではこの不安定現象は流量振幅比が1程度では定常成分の Re 数が乱流に遷移する臨界 Re 数を超えないと現れない。しかし波状流路では図9に併示された定常流の可視化写真より、定常成分の Re 数が乱流に遷移する Re 数以下でも流れは不安定になることがはく

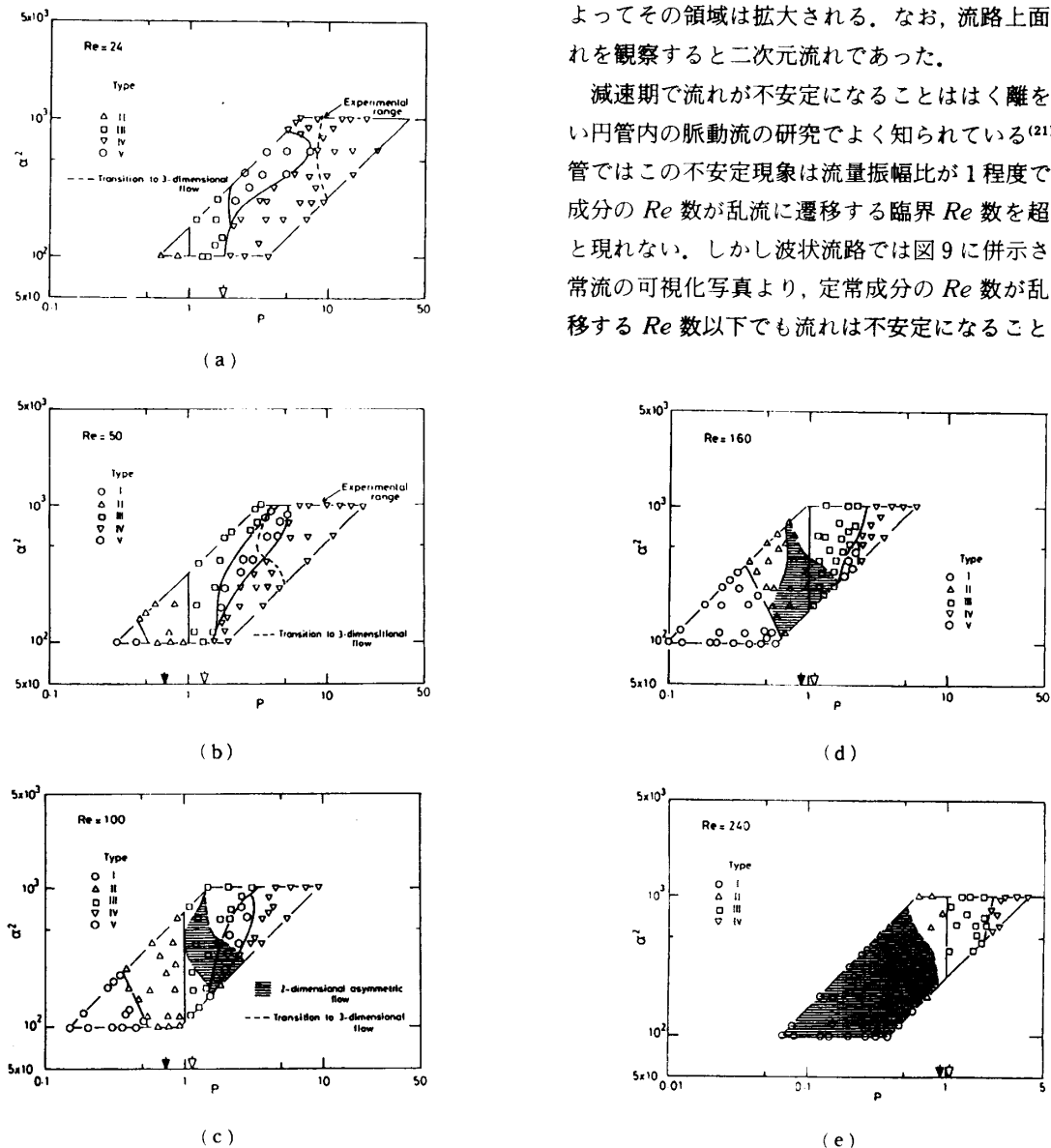


図7 流れの分類

離を伴わない流路と異なる点である。したがって波状流路でおこる主流の蛇行現象はあく離せん断層の不安定性に起因しているものと思われる。なお、流路が一部狭さくする場合にも同様の現象が観察されてい

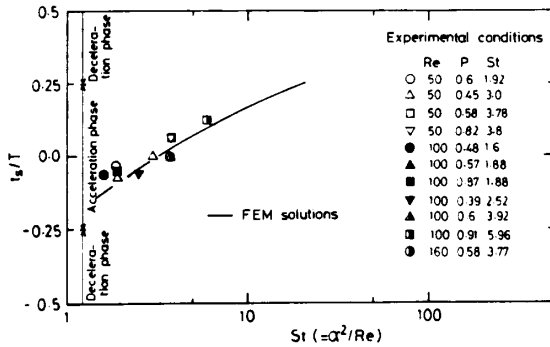


図 8 渦の発生時刻

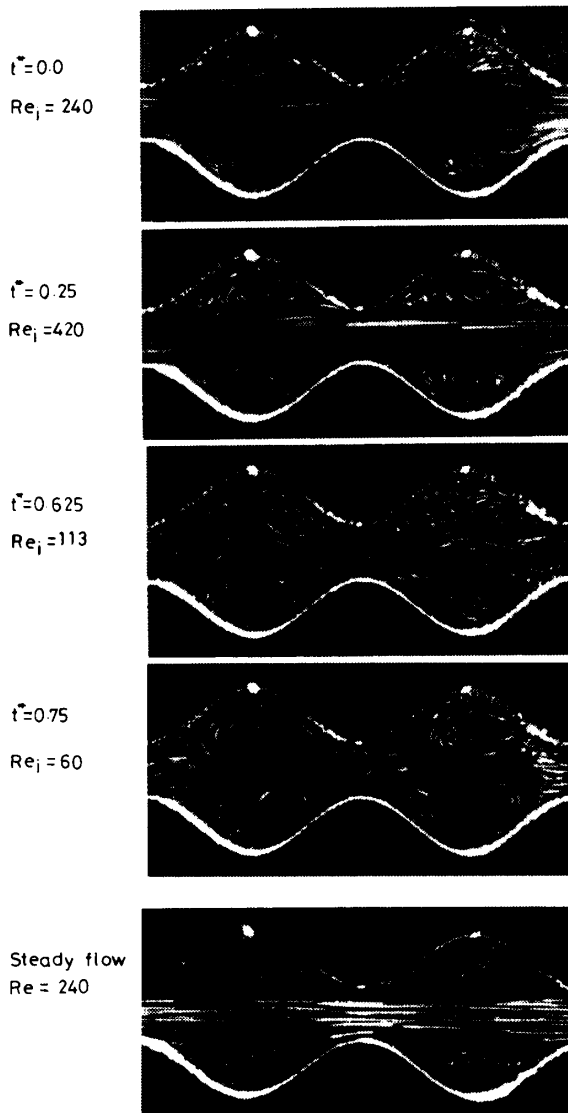


図 9 非対称流れ ($Re=240, P=0.75, \alpha^2=391$)

る⁽²⁰⁾。

流れの二次元性は定常流では満足されるが、振動流ではある操作範囲で規則正しい三次元構造が形成されることを以前報告した⁽⁹⁾⁽¹⁵⁾。脈動流でも規則正しい三次元構造が形成されるかどうかは興味ある問題であり、この点を可視化観察によって調べた。図 10 は定常成分の Re 数が低い場合 ($Re=24$) の流れを流路上面から撮影した写真を示す。図 10 (a) は規則正しい三次元構造が形成される場合を示したもので、スパン方向に周期的なしま模様が現れ、隣接するくぼみ間でその位相が 180° ずれているのがわかる。しかしこの規則正しい流れ構造は図 10 (b) に示されるようにウオーマスリー数や流量振幅比の増加によって徐々に崩壊され、流れはやがて乱流になる。規則正しい三次元構造が形成される理由は振動流⁽¹⁵⁾ と同様に遠心力の不安定性によるものと思われる。これに対して定常成分の Re 数が高い場合、しま模様の全体的配列は規則正しくなかった。この理由は必ずしも明確ではないが、 Re 数が高い場合上述したように流れが二次元でも上下非対称となり主流が蛇行することが関係しているものと思われる。三次元流れの領域は図 7 に併示され(破線が二次元と三次元流れの境界を示す)、定常流に振動流を重畳させることによって流れの三次元化がおり、また Re 数の増加によってその領域が拡大されることがわかる。

4. 結 言

脈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) くぼみ内に形成される渦の成長および消失過程から流れは五つのタイプに分類される。これらの分

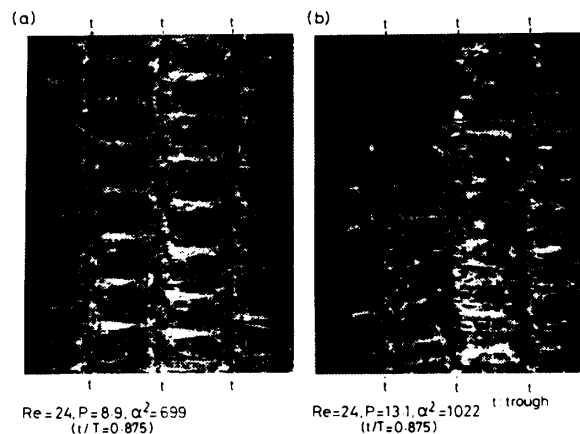


図 10 上面から観察した流れ模様(三次元流れ)

類に基づいて流れの領域を示すマップを作製した。

(2) 脈動流で興味ある現象は渦がいったん主流中へ放出されても、再び壁面へ付着して消失する場合があることである。この現象は振動流では見られない。

(3) 定常成分の Re 数が臨界値より小さくても、はく離せん断層の不安定性によって減速期に主流が蛇行する。

(4) 定常流に振動流を重ねさせることによって流れの三次元化がおこり、 Re 数の増加によってその領域は拡大される。

本研究の実施にあたり、島崎将成氏のご協力を得た。また本研究の研究費の一部は文部省科学研究費 (No. 63750899) および (No. 03302031) の助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) Nishimura, T., ほか2名, *J. Chem. Eng. Jpn.*, **17**-5(1984), 466.
- (2) Nishimura, T., ほか3名, *J. Chem. Eng. Jpn.*, **18**-6(1985), 550.
- (3) Nishimura, T., ほか2名, *J. Chem. Eng. Jpn.*, **19**-2(1986), 142.
- (4) Nishimura, T., ほか3名, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **33**-5(1990)835.
- (5) Mackley, M. R., ほか3名, *Chem. Eng. Sci.*, **45**-5(1990), 1237.
- (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) Grimella, S. V. and Eibeck, P. A., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **34**-9(1991), 2427.
- (9) 設楽・ほか4名, 化工論, **15**-4(1989), 924.
- (10) Bellhouse, B. J., ほか7名, *Trans. Am. Soc. Artif. Int. Organs*, **19**(1973), 77.
- (11) Sobey, I. J., *J. Fluid Mech.*, **96**(1980), 1.
- (12) Nishimura, T., ほか3名, *Chem. Eng. Sci.*, **44**-10(1989), 515.
- (13) Nishimura, T., ほか3名, *J. Chem. Eng. Jpn.*, **22**-5(1989), 505.
- (14) Nishimura, T., ほか3名, *Chem. Eng. Sci.*, **46**-3(1991), 757.
- (15) 西村・ほか3名, 機論, **57**-537, B(1991), 1611.
- (16) Latinopoulos, P. and Ganoulis, J., *Comput. Methods. Appl., Mech. Eng.*, **20**(1979), 279.
- (17) Nishimura, T., ほか2名, *J. Chem. Eng. Jpn.*, **20**-5(1987), 479.
- (18) 武藤・水野, 機論, **48**-436, B(1983), 2441.
- (19) Yamaguchi, R., *J. Biomech. Eng.*, **111**(1989), 47.
- (20) Ojha, M., ほか3名, *J. Fluid Mech.*, **203**(1989), 173.
- (21) 近江・ほか2名, 機論, **47**-418, B(1981), 1015.
- (22) Stettler, J. C. and Hussain, A. M. F., *J. Fluid Mech.*, **170**(1986), 169.