13 波状流路内に生じる2次流れの構造

広島大工 西村龍夫*, 芳野 正, 矢野浩司, 河村祐治

Structure of secondary flow induced in wavy channels

by Tatsuo Nishimura*, Tadashi Yoshino*, Koji Yano* and Yuji Kawamura*

The structure of secondary flow induced in wavy channels have been investigated by the dye injection method.

The secondary flow is a kind of Taylor-Goertler vortices observed in a curved rectangular channel. However, the wavy channel is different from the curved rectangular channel in the processes of vortex development and destruction. It is found that an unstable mode in which the vortices formed at the upper and lower walls of the channel interact leads to the vortex destruction and significantly promotes the transition of turbulence.

1. 緒 言

波状流路は古くから熱交換器や拡散透過装置に用いられている。近年、省エネルギーという関点からこれらの装置の正確な特性および高性能化が要求され、波状流路について多くの研究が特に数値計算によって行われるようになってきた^{1,2,3)}。波状流路は流れの剝離現象が特徴であるが^{4,5)}、最近著者ら⁶⁾は流路間隔を狭くすることによって剝離を抑えた場合、遠心力の不安定性によって2次流れが発生することを見出した。この現象は従来より2次元と仮定して解析されてきた数値計算では予想できず、また熱・物質移動に少なからず影響を及ぼすものと考えられる。そこで本報では、この2次流れの構造を可視化法によって詳細に検討した。

2. 実験装置及び方法

実験装置は前報⁵⁾と同一で、定レベルタンクから水をテストセクションへ流し、その後ポンプを介して定レベルタンクへ戻す循環系からなる。Fig.1にテストセクションの詳細を示す。波状流路は、上・下2枚の亚克力製波状板で構成される。波状板は波長 $\lambda = 28\text{mm}$ 振幅 $a = 3.5\text{mm}$ の9波長の正弦波からなる。流路幅 W は 200mm で、流路間隔 H は可変で本報では $3\text{--}13\text{mm}$ の範囲で変化させた。したがって断面アスペクト比は $15.38\text{--}66.67$ となり、本波状流路は2次元流路とみなせる。 Re 数 ($Re = U_{av} H / \nu$) の範囲は遷移域を中心として $100\text{--}500$ とした。流れの可視化には染料注入法を用い、上・下波状壁面上のスパン方向に 4mm 間隔で設けた17個の小孔 (0.5mm) より染料を注入した。注入孔は流路の入口に設け、染料とし

* Faculty of Engineering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, 724 Japan

てフルオレセイン（上部壁）とローダミンB（下部壁）を使用した。観察は流路上面・側面の2方向及び断面について行った。特に流路断面部では Fig.1に示されるように、ある流路断面にスリット光を透過させ、スリット光に対して直角な方向から流れを観察した。なお、像のひずみをなくするためプリズムを用いた。観察場所は流れの遷移に着目しているので流路全域（ $N=1-9$ ）とした。染料の注入に当たっては流れに攪乱を与えないようにするため注入速度はできる限り小さくし、染料が壁面に沿って流れるようにした。

Fig. 1 Details of test section

3. 実験結果及び考察

2次流れの発生は流路間隔 H に依存し、本実験では $H \leq 7\text{mm}$ の条件（ $2a/H \geq 1$ ）で発生した。定性的なパターンはどの流路間隔でも同じであったので、以下 $H=6\text{mm}$ について述べる。

Fig.2に流路側面及び上面から撮影した可視化写真を示す。側面写真は第5波の部分、上面写真は第5と6波の下部壁の部分それぞれ示す。Fig.2(a)は2次流れの発生しない $Re=100$ の場合である。側面写真より2色の染料は上・下壁面に沿って移動しており、剝離は生じていない。また上面写真より染料はまっすぐに下流へ移動しており、2次元流であることを示している。Fig.2(b)は2次流れが発生する $Re=160$ の場合を示す。側面写真より染料線が上・下波状壁の谷部付近より浮上しており、上面

Fig. 2 Photographs of flow pattern observed from side and top views for various Reynolds numbers

写真では染料線は各谷部で再配列され、オフセットフィンのような規則的なパターンを形成する。すなわち流れは2次元ではなく、スパン方向に変化し、3次元になっていることがわかる。さらに Re 数が増加すると、この規則的なパターンは崩壊され、流れは非定常となり乱流へ移行する。Fig.2(c)は $Re=250$ の結果を示す。染料線の挙動より強い旋回流を生じていることが認められる。

次に規則的なパターンが形成される Re 数領域を中心として2次流れの構造を検討する。Fig.3は模式図中に示された流路断面の可視化写真である。 Re 数の増加によって曲率一定の長方形曲り流路に見られるような Taylor-Goertler 渦^{7,8)}が発生しており、Fig.2(b)の上面写真に示されたオフセットフィン状に配列された染料線は一对の渦によって形成される上昇流の部分に対応することがわかる。また渦形成直後、わずかな Re 数の増加によって渦は崩壊されており、これは長方形曲り流路と異なり注目すべき点である。

波状流路では曲率の方向が周期的に変化するため、Fig.2(b)の側面写真から予想されるように上・下波状壁面の各谷部付近から渦が形成される。これら上下壁の渦の干渉が渦崩壊の促進に関連しているものと考えられる。そこで Fig.4 に示されるように波状流路を構成する一波長当りの流路において2つの流路断面部を可視化した。

A-A' 断面において側面写真より下部壁では L 点そして上部壁では U 点より発生した渦がそれぞれ観察されると期待される。しかし結果はそうではなく、染料の集中点は上・下壁で半ピッチずれており、上部壁では明確な渦は認められない。この理由は一般に Taylor-Goertler 渦が遠心力の不安定性によって凹面の壁上から形成されることを考慮すれば次のように考えられる。A-A' 断面では渦の発生点は上・下壁で半ピッチずれており、渦は同時に存在することはできず、どちらか一方が減衰することになる。この場合下部壁は凹面をなし、上部壁は凸面であることから上部壁で形成されていた渦は減衰することになるわけである。これに対して B-B' 断面では渦の発生点は上・下壁で一致するため、渦は同時に存在することができる。しかし上部壁は凹面をなし、下部壁は凸面をなすため、上部壁の渦は下部壁の渦を押しつぶしたようなかっこうになる。したがってこの断面は A

Fig. 3 Development and destruction of Taylor-Goertler Vortices

Cross-sectional views

Fig. 4 Vortices arrangements between the upper and lower walls ($Re=170$, $N=5$)

-A-断面とは異なり渦の干渉が起こり、不安定な渦配列をなす。このため長方形曲り流路とは異なり、渦の崩壊が促進されるものと思われる。

以上の観察は特定の場所に着目したものであるが Taylor-Goertler渦はある Re 数を越えると、流路全体で同時に発生するのではなく、まず流路出口部 ($N=9$) のみに発生する。その後 Re 数の増加に伴って Taylor-Goertler渦の発生場所は上流へ移行すると同時に下流で形成されていた渦は崩壊され乱流へ遷移する。Fig.5は $H=6\text{mm}$ における各場所で渦が発生する Re 数を示す。実線より下の部分が 2次元層流域を表し、上の部分は渦発生直後すぐに渦が崩壊されることから、遷移及び乱流域を表す。なおこの流路間隔の場合、 $Re=120$ 付近より流路谷部に定常剝離を生じ、 Re 数の増加によって $N \leq 3$ の流路部分では比較的広い流路間隔の場合に見られるようなスパン方向に軸を持った横渦⁵⁾を生じる。したがって同一の流路でも場所によって乱流への遷移パターンが相異なることがわかる。このことが波状流路の流れ構造をより複雑にしており興味深い。しかし本報では 2次流れの構造を明らかにすることが目的なのでこの点については詳しく触れない。

以上の観察結果より波状流路に生じる 2次流れの構造は Fig.5に示された模式図のようになる。Fig.5(a)は流路上面からみたもので破線及び実線はそれぞれ上・下壁に形成された渦によって生じた上昇流線を表し、渦は流路の各谷部付近より発生し、流れ方向にその発生点が半ピッチずれるため、オフセットフィン状の模様を形成する。Fig.5(b)は Fig.5(a)の模式図中の A-A'、B-B' 及び C-C' 断面を示したものである。なお、出口が破線で示されるような場合渦配列は変化し、B-B' と C-C' 断面のパターンは逆転する。

参考文献

- 1) Anaro, R.S., J. Heat Transfer, **107**, 564 (1984)
- 2) Asako, Y. et al., 23rd ASME/AIChE, National Heat Transfer
- 3) Motamed, E.M.R. et al., Trans JSME, Ser. B, **53**, 722 (1987)
- 4) Nishimura, T. et al., J. Chem. Eng. Japan, **19**, 142 (1986)
- 5) Nishimura, T. et al., J. Chem. Eng. Japan, **19**, 449 (1986)
- 6) Nishimura, T. et al., J. Chem. Eng. Japan, **20**, 102 (1987)
- 7) Urai, I. et al., 4th Symp. Flow Visualization, 93 (1976)
- 8) Kelleher, M.D. et al. J. Fluids Eng., **102**, 92 (1980)

Fig. 5 The position of onset of secondary flow in the wavy channel

Fig. 6 Schematic diagram of vortices arrangements