B113 くぼみ付き流路内の3次元流れ構造

山口大学 西村龍夫、国次公司[○]、小竹暁

Three-Dimensional Flow Structures in Grooved Channels

Tatsuo NISHIMURA, Koji KUNITSUGU and Akira KOTAKE

The present work studied experimentally three-dimensional flow structures within periodically grooved channels with different groove lengths at intermediate Reynolds numbers. It is found that a regular three-dimensional structure with Taylor-Görtler like vortices appears near the bottom of each groove after the onset of self-sustained oscillation. The Reynolds number for the onset of three-dimensional flow decreases with the increase of groove length.

1. 緒言

近年、層流移動促進技術が注目されている。たとえば、高粘性流体や高いずり変形で崩壊してしまうような生体物質を含む混相流体を取り扱う熱交換器や人工臓器やバイオリアクターでは高い移動速度を得るため、いくつかの移動促進方法が提案されている。特にはく離と流体振動を組み合わせた方法が多く研究されている。著者らはくぼみ付き流路における自律振動流の物質移動促進について検討しており、2次元数値計算によって自律振動の発生はトルーミン・シュリヒティング波(T-S波)がくぼみ上部のせん断層によって励起されることが原因であることを示した。しかし、実験では流路側壁の存在によって流れが3次元化する可能性があるが、従来の実験研究では流れの3次元性はほとんど着目されていない。一方、計算機の飛躍的進歩によって3次元数値計算も可能となり、岩井⁴⁾は断面アスペクト比を変化させてダクト内後ろ向きステップ流れと伝熱を解析し、アスペクト比が大きくてもレイノルズ数が増加すると側壁の影響は無視できないことを報告している。そこで、本研究では以前計算に用いたくぼみ付き流路内の流れの3次元性を調査するため、遷移域を対象として流れを可視化した。

2. 実験装置および方法

実験装置は正弦波状流路の実験⁵⁾で使用したものと同一であり、流体はポンプによって助走区間を経て試験部に供給される。図1は試験部を示す。長方形断面を有する流路の下部壁に8個のくぼみが設けられている。本研究では流路間隔 H 、流路幅 W 、くぼみ間隔 L 、くぼみ深さ a は、一定とし($H = 7 \text{ mm}$, $W = 80 \text{ mm}$, $L = 33 \text{ mm}$, $a = 5.6 \text{ mm}$)、くぼみ長さを3種類($l/L = 2/3, 3/4, 7/8$)変化させた。レイノルズ数 Re は流路間隔とその平均速度を基準とし、前報の計算結果をふまえて40 - 800とした。

Fig. 1 Test section

Yamaguchi University, Tokiwadai 2557, Ube 730

流れの可視化にはアルミ粉法、染料注入法および電解沈殿法を用い、光源にはプロジェクターランプとアルゴンイオンレーザを使用した。特に流れの3次元性および空間的発達を詳細に調べた。なお、可視化像はビデオに収録され、画像解析を行なった。

3. 結果および考察

定性的な流れパターンはいずれの流路でも類似であったので、代表的に $l/L = 2/3$ の場合について述べる。図2は上流から第5番目のくぼみスパン方向中央部における自律振動発生前の流れパターンと2次元計算による流線パターンを示す。実験と計算の一致は良好であり、Re数の増加によってくぼみ内で循環渦は大きくなり、 $Re = 232$ では渦中心はくぼみ下流に位置する。この流路では自律振動は $Re = 300$ で発生し、周期的である($St=0.3$)。図3は $Re = 428$ における一周期間における流れパターンと対応する計算結果を示す。くぼみ上流端で2次渦が形成され、その後下流へ移動し主渦と合体する過程を周期的に繰り返している。この自律振動は前報で述べたようにT-S波によるものであり、流路一周長さ l 当たりに2波長の波が存在している。

Fig. 2 Steady flows

Fig. 4 Streaklines at $Re = 428$

Fig. 3 Self-sustained flow at $Re = 428$

自律振動によるくぼみと主流部の流体交換を観察するため、ローダミンB染料を助走区間から流路下部壁面に沿って注入した。図4は $Re = 428$ における染料線の挙動を示す。ただし、各写真は図3のそれとは位相が一致していない。非定常流であるので、染料線と流線とは一致せず、くぼみ上部のせん断層で染料線はロールアップし、くぼみ下流端でロールアップした染料線はくぼみ部と主流部とに分離され、流体交換が行なわれる。図5は $Re =$

Fig. 5 Streaklines at $Re = 548$

Fig. 6 Streakline patterns near the side wall

548 の結果であり、図4とは異なり、染料線の輪郭が明瞭ではなくなり、流れの3次元化を示唆する。そこで、流れの3次元化が著しい側壁近傍を電解沈殿法を用いて可視化した。図6はその結果の一例であり、流路上面から観察したものである。Re数の増加によってくぼみ内ではらせん運動によって側壁からスパン中央へ向かう流れが認められる。この流れは別途計算した3次元閉キャビティ流れ⁶⁾でも見い出されおり、スパン方向の圧力勾配によって生じる流れである。しかし、このスパン方向流れはRe数があまり大きくない場合にはスパン中央部においては無視することができ、そのため図2-図4に示したように中央部は2次元性が保持される。次にくぼみのスパン中央を可視化した。その結果、 $Re < 450$ では流れの2次元性は保たれるが、 $Re = 450 - 470$ でくぼみ上流底部付近で規則正しい3次元構造が新しく形成された。しかし、この構造はRe数の増加によってすぐに崩壊し、擬2次元構造へ移行した。図7はそれらの可視化写真を示す。くぼみ底部にトレーサ発生用の導電性塗料が塗布してあるため、写真のコントラストはよくないが、目では十分観察可能である。 $Re = 469$ ではくぼみ上流部においてトレーサがスパン方向に局所的に集まり、中央部でもスパン方向流れが存在することがわかる。トレーサが集まる間隔はほぼ一定で、くぼみ長さの0.7倍程度であり、Taylor-Goertler型の渦が存在する。 $Re = 548$ では集積されたトレーサは時空間的に変動しながら下流側へ移動し、側面から観察するとくぼみ上部へ巻き上げられていた。この挙動が図5の染料線の輪郭を不明瞭にするわけである。 $Re = 678$ ではトレーサはくぼみ底部の真ん中よりやや下流でのみ巻き上げられ、スパン方向の変動幅も小さくなり、擬2次元構造へ変化する。くぼみ長さが大

Fig. 7 Streakline patterns at the bottom of groove

きくなくても同様の構造変化が観察されるが、自律振動および3次元構造発生に対するRe数は上述した流路に比べて低下した。 $l/L = 7/8$ では自律振動は $Re = 200$ 付近で発生する。

Fig. 8 Streakline patterns viewed from the top

Fig. 9 Streakline patterns viewed from the side

ぼみ底部での流線の曲がりによる遠心力不安定が原因と思われる。さらに、3次元構造の急激的な崩壊はくぼみ上部のせん断不安定 (T-S 波) とくぼみ内の遠心力不安定の干渉によるものと考えられる。詳細な検討は今後の課題としたい。

4. 結言

従来ほとんど着目されていなかったくぼみ付き流路内の流れの3次元化について、遷移域を対象として実験的に検討した。本研究で用いた流路では、3次元化は自律振動発生後にくぼみ底部から起こり、くぼみ長さが大きいほどより低いRe数で観察される。また、この3次元化は流路下流から上流へ伝播し、数値計算で仮定されていた空間的周期性が破綻することが示唆される。

参考文献

- 1) T. Nishimura, Trends in Chem. Eng., 2, 199-214 (1994)
- 2) T. Nishimura et al., Trans JSME Ser.B, 62, 2106-2112 (1996)
- 3) C. Herman et al., ASME HTD, 15, 33-44 (1995)
- 4) H. Iwai et al., Trans JSME Ser.B, 62, 2729-2736 (1996)
- 5) T. Nishimura and N. Kojima, Int. J. Heat Mass Transfer, 38, 1719-1731 (1995)
- 6) K. Kunitsugu and T. Nishimura, Memoirs of the Faculty of Eng., Yamaguchi Univ. 48 (in press)