

# くぼみ付き流路内自律振動流の発達過程

国次 公司 (機械工学科) 西村 龍夫 (機械工学科)

## The Development Process of Self-Sustained Oscillatory Flow in a Grooved Channel

Koji KUNITSUGU(Dept. of Mech. Eng.) Tatsuo NISHIMURA(Dept. of Mech. Eng.)

The development process of self-sustained oscillation in a grooved channel, in the stream-wise direction, is studied by the electrochemical method. The unsteady wall shear stress measurements show that the flow periodicity in the stream-wise direction is preserved after the onset of the self-sustained oscillation. However, as the Reynolds number is further increased, the flow periodicity is not kept and the magnitude of unsteadiness increases in the downstream direction.

**Key Words:** Grooved Channel, Self-Sustained Oscillation, Wall Shear Stress, Electrochemical Method

### 1. 緒言

近年、省エネルギーのための熱交換器の小型化、高度医療のための人工臓器の開発、汚染物質を分解するための触媒反応器の解析などの分野において、中間レイノルズ数域の流れを扱う流路に注目が集まっている。特に重要視されるのは、レイノルズ数が制限された系で、どのようにして熱・物質移動速度を向上させるかという問題であり、有力な手法として、はく離を伴う流れを非定常化させた時に生じるはく離渦の運動を利用して、伝達面と流れ間の移動促進を図る、“渦混合”の方法が研究されている<sup>1)2)</sup>。

はく離を伴う流路の例として、平行平板流路の流れ方向に矩形断面のくぼみを周期的に設置したくぼみ付き流路<sup>3)-6)</sup>があげられる。平行平板流路では、流体力学的な不安定性により Tollmien-Schlichting (T-S) 波が出現して自律振動を生ずるが、はく離を伴う流路では、T-S 波の出現する臨界レイノルズ数が、はく離無しの場合の  $10^3$  から  $10^2$  の程度にまで低下する<sup>3)</sup>。このような流路では中間レイノルズ数域で流れを非定常化するために、自律振動を用いることができる。

西村らは、くぼみ付き流路を用いた物質移動実験を行い、自律振動発生後に著しい移動促進が生じること、また、くぼみの配置周期に対するくぼみの長さが大きくなるほど自律振動の臨界レイノルズ数が低下することを見出した<sup>5)</sup>。

ところでこれまでの研究では、流路の幾何的な周期性から類推して、流れ場にも空間的な周期性を仮定した解析が行われてきた。しかし、

Schatz らの流れ方向に周期的に配置した渦発生体を有する流路に対する実験および数値的な研究<sup>7)</sup>は、はく離を伴う流れ系内では、上流側で発生した不安定性が下流側に向かって発達するという“対流的”な性質が現れることを明らかにした。このことは、実際の流路において上流側と下流側では流れ場が異なる可能性を示しており、事実、Stone と Vanka による 14 個のセルからなる対称波状流路に対する数値シミュレーション<sup>8)</sup>は、自律振動の変動が下流側でより大きくなることを示している。よって、実際の流路における熱・物質移動速度を検討するためには、上流から下流側への自律振動の発達過程を調べ、移動速度に与える影響について検討する必要がある。本研究では、著者らが用いてきたくぼみ付き流路を用いて可視化と電極反応法<sup>5)</sup>による非定常計測を行い、自律振動流の対流的な発達過程について調べることを目的とする。

### 2. 実験装置

実験装置は基本的に以前の研究<sup>5)</sup>で用いたも

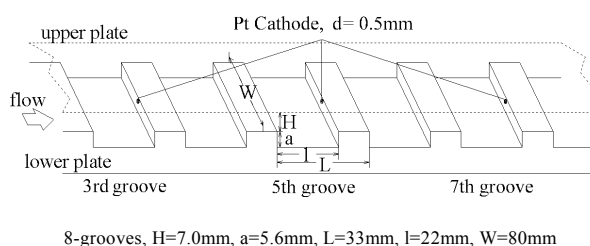


Figure 1 Grooved Channel

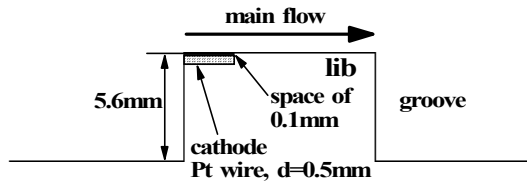


Figure 2 Detail of Electrode

Concentration of solution	
$K_3Fe(CN)_6$	0.01mol/l
$K_4Fe(CN)_6$	0.01mol/l
NaOH	1mol/l
Physical properties (at 25°C)	
Density $\rho$	1037kg/m <sup>3</sup>
Viscosity $\mu$	$1.091 \times 10^{-3}$ Pa·s
Diffusivity $D$	$0.6683 \times 10^{-9}$ m <sup>2</sup> /s

Table 1 Properties of Electrolyte

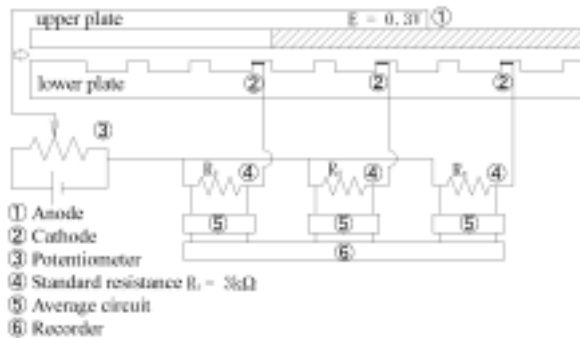


Figure 3 Position of Electrodes and Electrical Circuit

のと同じであり、くぼみ付き流路として図1に示す、当研究室でL-cavityと呼ぶ流路を用いた。以前の研究より、この流路ではレイノルズ数  $Re = \rho UH/\mu$  が約300以上になると自律振動が発生することが判明している<sup>5)</sup>。本研究では、振動数や振幅、位相といった自律振動の特性を計測するために、非定常計測が可能な電極反応法による計測を行い、動作流体として  $Fe(CN)_6^{3-} - Fe(CN)_6^{4-}$  イオン溶液を用いた。表1に液の組性と主な物性値を示す。8つあるくぼみの内、図1に示すように上流側から3、5、7番目のくぼみ下流側壁面上部に、直径  $d=0.5mm$  の白金線を電極として図2の要領で埋め込み、図3の電気回路で電極部分における拡散電流を計測する。移動速度の検討のために、次式に基づいて電極位置における壁面せん断速度を算出して時間平均量を評価した<sup>5)</sup>。

$$\tau_w/\mu = 3.55 \times 10^{-15} i_d^3 / (C_b^3 d^5 D^2) \quad (1)$$

ここで、 $i_d$  は図3の陰極で計測された拡散電流であり、 $C_b$  は  $Fe(CN)_6^{3-}$  イオンの濃度である。なお、図3に示した回路は時間平均値計測の際の構成であり、時間変動を計測する際は、図中⑤の平均回路を除く。これと併せて、流れ状況を観察するために、水を動作流体としてアルミ粉法により流線を可視化し、3、5、7番目のくぼみを側面から撮影した。実験条件としては、 $Re$  数を定常状態である53から、自律振動が十分に発達した1207の範囲で変化させた。

### 3. 実験結果

最初に、自律振動発生前の状況を確認する。図4は、流れが定常状態である  $Re=206$  のときの流線を3つのくぼみの中央断面で撮影したものであり、3者の流線に顕著な違いは見られない。定量的にこれを確かめるため、図5は数値シミュレーション<sup>5)</sup>により求めた、 $Re=200$  におけるくぼみ側壁面上の渦度分布を示す。これを見ると、渦度分布は入口付近を除いてくぼみ間では

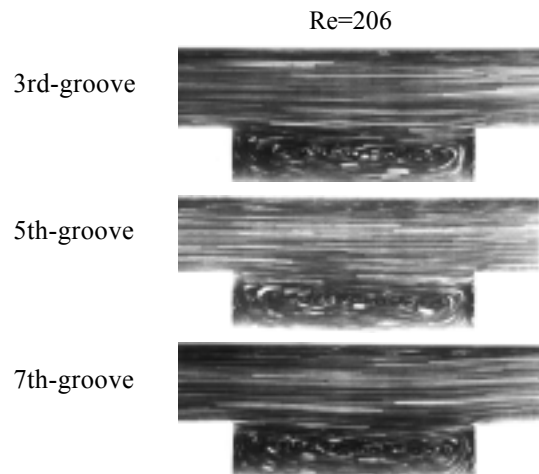


Figure 4 Visualized Stream Lines for Steady Flow at  $Re=206$

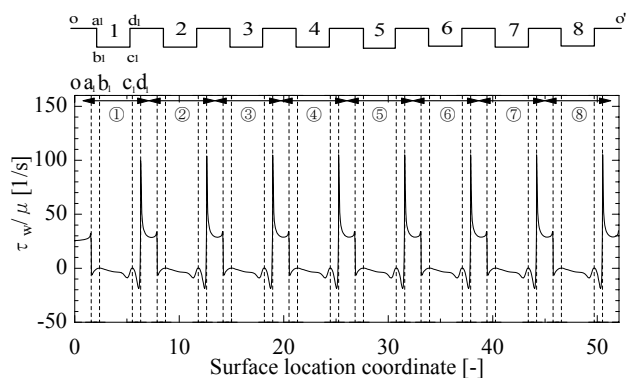


Figure 5 Wall-Vorticity profile by numerical simulation at  $Re=200$

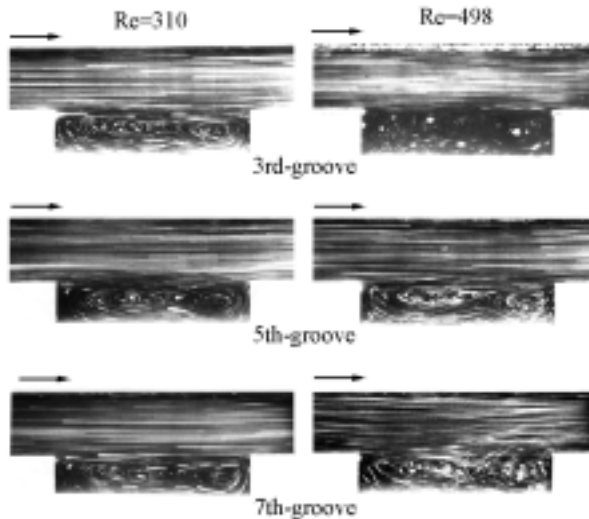


Figure 6 Visualized stream lines for self-sustained oscillatory flows at  $Re=310$  and  $498$

とんど同一であり、以上の結果より、自律振動発生前の条件では、流れ方向の周期性が保たれていることが分かる。

これより、 $Re > 300$  の自律振動状態についての結果を示す。図6は、自律振動発生後の2つの条件で撮影された、3つのくぼみの中央断面における流線の写真を示す。自律振動発生直後の  $Re=310$  では、撮影された振動の位相が各写真で異なるため渦形状はそれぞれで異なるが、変動が小さく、いずれのはく離渦もくぼみ内に収まっているという点ではくぼみ間の違いはそれほど顕著ではない。しかし、 $Re$  数が増大して自律振動が顕著になる  $Re=498$  では、7番目のくぼみで明らかに流れが乱れ、3次元化していることが分かる。そこで、以下ではくぼみ間の違いを定量的に調べるため、電極反応法によって得られた測定データの検討を行う。

図7は、図3の回路を通じて得られた4つの  $Re$  数における自律振動の信号のレコーダー記録である。自律振動発生前後の  $Re=301$  では、3つの電極での測定値に位相の良く一致した微小な振動が見られるが、その振幅は小さい。なお、3つの電極での測定値の違いは、電極の個体差によるものである。自律振動が発達する  $Re=341$  では、 $Re=301$  の場合よりも振動の振幅が増大し、これが自律振動による波形であると認めることができる。位相は大部分の領域で一致しており、これは連続性および自律振動の原因である T-S 波の空間的周期性から予想できる結果である。さらに  $Re$  数を増大させた  $Re=403$  では、Stone と Vanka の正弦波状流路の数値シミュレーシヨ

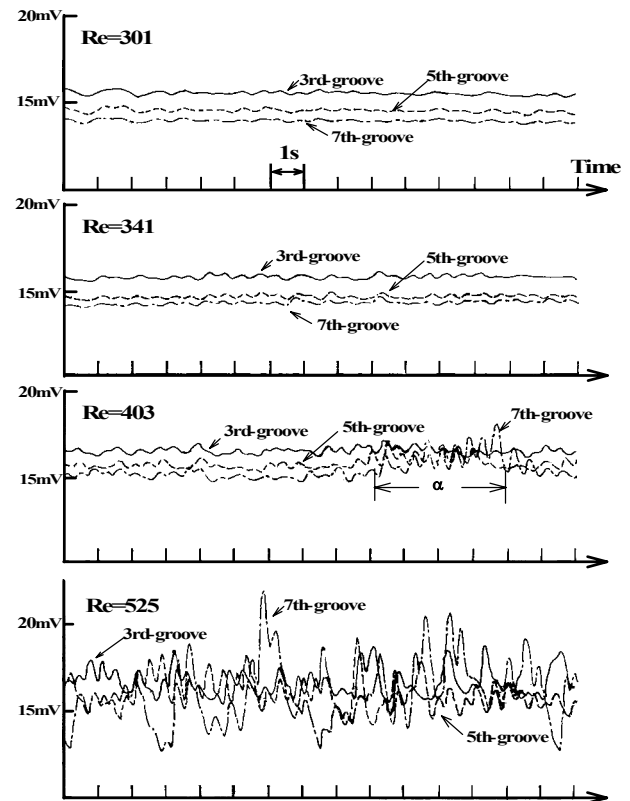


Figure 7 Time signals on three cathodes

ン<sup>8)</sup>で観察された、自律振動発生直後の振動の間欠性に対応するものと考えられる、振幅が突然増大する期間(図中  $\alpha$  で表示)が現われる。特に注目すべき点は下流側へ行くほど変動幅が大きくなっている点であり、本研究で用いているくぼみ付き流路において、上流側で生じた乱れが下流側に向かって成長して行く”対流不安定”の性質が現われていることを示す。以前の研究<sup>6)</sup>より、くぼみ上流側の流れが3次元化する領域であることが判明している  $Re=525$  では、下流側ほど振動振幅が大きくなるという傾向は維持されているものの、振動の位相が合わない部分が多く出現し、流れが乱れた状態になっていることを示唆する。位相のずれが何を意味しているのかは、流れの3次元かと併せて考慮する必要があると考えられ、検討は今後の課題である。

図8は、無次元振動数であるストローハル数  $St$  で整理した自律振動の振動数である。実験で得られた値を、図中に示す、平行平板における T-S 波の分散関係から予想される値<sup>3)</sup>と比較すると、ばらつきはあるものの良く一致しており、くぼみ付き流路内の自律振動は流路部分の T-S 波を原因として生じるという従来の結論<sup>3)-5)</sup>を確認している。ここで注目すべきは、3つのく

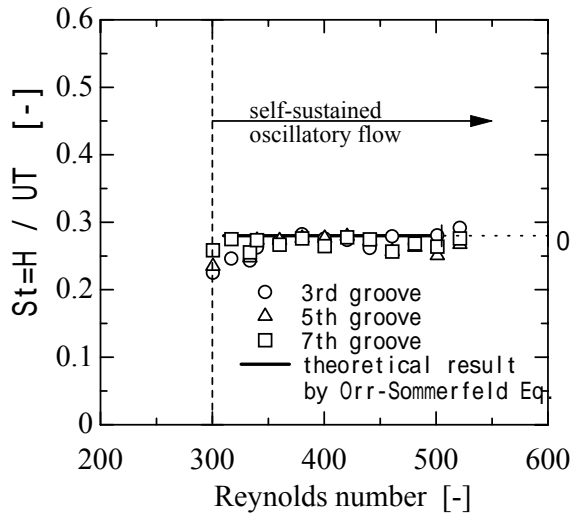


Figure 8 Strouhal numbers vs Reynolds number

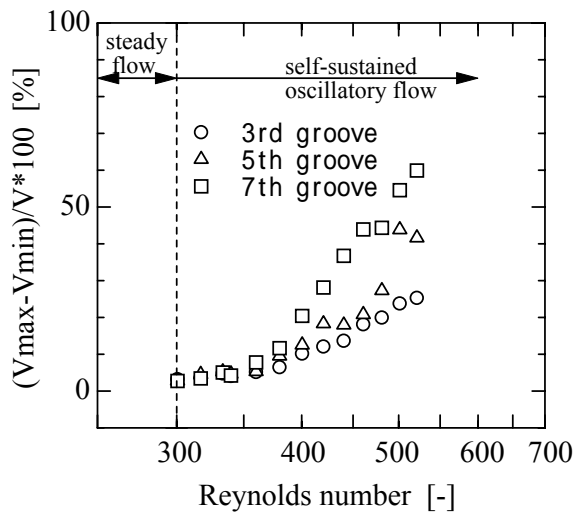


Figure 9 Amplitudes of oscillation

ぼみで測定された振動周期がほとんど一致していることで、T-S波が流路全体に発生していることを示している。図9は、出力の振動振幅比を示すものである。Re数が400付近までは3つのくぼみの測定値には一致が見られるが、Re数が400より低いところでまず7番目のくぼみにおける測定値が急激な増大を始め、次いでRe=450付近より、5番目での測定値にも急激な増大が生じ、下流でより不安定となる対流不安定性の効果が明瞭である。正弦波状流路の数値シミュレーション<sup>8)</sup>との比較より、上流から下流側への自律振動の発達過程がよく似ていることが示され、空間的周期性を持った流路でも流れの周期性が保証されないことがわかる。

図9に示されたような対流不安定性が熱・物質移動速度にどのような影響を与えるかを調べるために、計測値の時間平均値を検討する。図

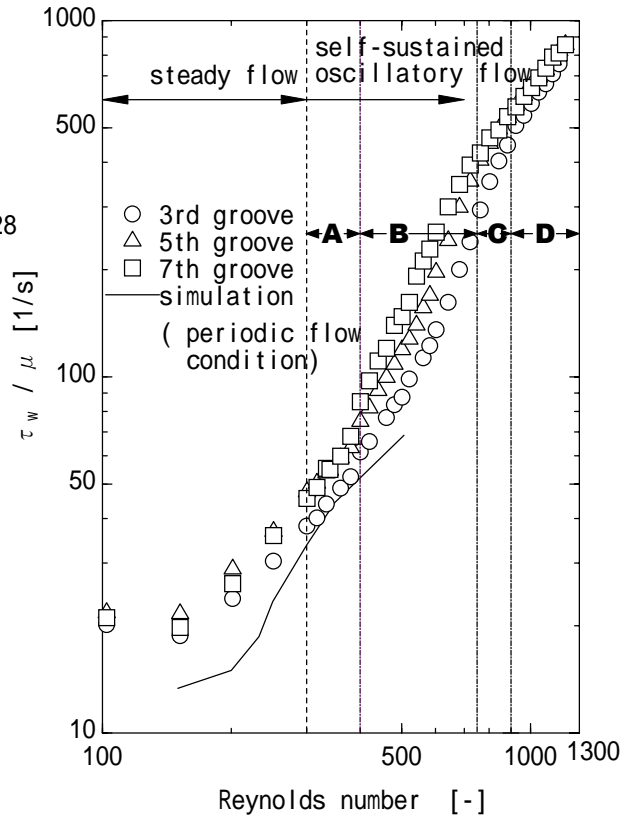


Figure 10 Wall shear rates vs Reynolds number

10は、3つのくぼみで計測された拡散電流から式(1)を用いて計算された壁面せん断速度のRe数依存性を示す。図中に示す、数値シミュレーション<sup>5)</sup>の結果との比較より、得られた値は妥当なものと判断される。Re<300での自律振動発生前の条件では、Re数の増大と共に5番目と7番目のくぼみでの速度が一致するようになる一方で、3番目の速度は他の2つよりも低い値を示している。これは、3番目のくぼみでは流れがまだ十分発達していない可能性を示唆している。この傾向は自律振動発生後の図中Aで示した領域で維持されているが、Re数が増大して図中Bの領域に入ると7番目のくぼみでのせん断速度が5番目のものより大きくなり、下流側に行くほど、せん断速度が大きい、すなわち相似性の観点からは熱・物質の移動速度も大きいという状況が出現する。領域Bの始まりが、図9において7番目のくぼみの振動振幅が急激に増大するRe数とほぼ一致している点は興味深い。しかし、領域Bでは5番目のくぼみでもRe~600付近よりせん断速度の急激な増大が生じ、Re~750以降では再び7番目の値と一致するようになる(領域C)。さらに、3番目でのせん断速度もRe=600付近から急激な増大を示し、Re~900

以降では他の2つとほとんど同じ値を示すようになる。これは、流れが乱流の領域に近づき、流路全体で流れが均質に乱れるために流れ方向への変化が見えなくなることを示唆している。

以上述べてきた結果は、遷移域における熱・物質移動速度を考察するためには対流不安定性の考慮が必要であることを示している。しかし、現時点では流れ場と測定値の関係は明確ではなく、今後はこの点についてさらに研究を進めていくつもりである

#### 4. 結言

可視化実験と電極反応法による計測結果に基づいて、くぼみ付き流路内自律振動流の流れ方向の発達過程について検討し、次の結果を得た。

- 1) 自律振動発生直後は流れの空間周期性はほぼ保たれている。
- 2) Re 数が増大すると、流れの変動は共に下流側に向かって発達する傾向を示し流れの空間的な周期性は保証されなくなる。しかし、系が乱流状態に近づくと流れ方向への変化は顕著ではなくなる。

#### 参考文献

- 1) Nishimura, T.: Heat and mass transfer enhancement by chaotic mixing in laminar flow, Trends in Chem. Eng., Vol. 2, pp. 199-214, 1994.
- 2) Howes, T., Mackley, M.R. and Roberts, E. P. L.: The simulation of chaotic mixing and dispersion for periodic flows in baffled channels, Chem. Eng. Sci., Vol. 46, No. 7, pp. 1669-1677, 1991.
- 3) Ghaddar, N. K., Korczak, K. Z., Mikic, B. B. and Patera, A. T.: Numerical investigation of incompressible flow in grooved channels, Part 1. Stability and self-sustained oscillations, J. Fluid Mech., Vol. 163, pp. 99-127, 1986.
- 4) Nigen, J. S. and Amon, C. H.: Time-dependent conjugate heat transfer characteristics of self-sustained oscillatory flows in a grooved channel, J. Fluid Eng., Vol. 116, pp.499-507, 1994.
- 5) 西村龍夫, 中桐裕明, 国次公司: 中間レイノルズ数域におけるくぼみ付き流路内の流れパターンと壁面せん断応力(くぼみ長さの影響), 日本機械学会論文集, B編, 62 巻, 598 号, pp.2016-2112, 1996.
- 6) 西村龍夫, 国次公司, 中桐裕明: 自律振動流におけるくぼみ付き流路内の流体混合と局所物質移動特性, 日本機械学会論文集, B編, 63

巻, 609 号, pp.1707-1712, 1997.

- 7) Schatz, M. F., Barkly, D. and Swiney, H.: Instability in a spatially periodic open flow, Phys. Fluids, Vol. 7, No. 2, pp. 344-358, 1995.
- 8) Stone, K. and Vanka, S. P.: Numerical steady of developing flow and heat transfer in a Wavy passage, J. Fluid Eng., Vol. 121, pp. 713-719, 1999.

(平成 13 年 12 月 27 日受理)