

## 低レイノルズ数域後方ステップ流れの不安定解析を用いた制御

山田俊輔、本阿弥眞治、元祐昌廣、石川仁（東理大）

Control of backward facing step flow  
by stability analysis in low Reynolds number

S. Yamada\*, S. Honami\*, M. Motosuke\*, and H. Ishikawa\*

\*Tokyo University of Science

## ABSTRACT

The objective of this study is to control the reattachment process of the separating and reattaching flow by the synthetic jet over a backward facing step in a low Reynolds number range. To determine the exciting frequency of the synthetic jet, this paper presents the stability analysis of the separating shear layer downstream of the step. The Reynolds number based on the step height ranges from 133 to 3670. The results show effectiveness of the synthetic jet for flow control. The reattachment length on the lower wall decreases due to the vortices which are generated by the synthetic jet with the exciting frequency.

Key Words: backward facing step, separating shear layer, instability analysis, flow control

## 1. 序論

近年、小型流体機械の開発が注目され、低レイノルズ数域におけるはく離再付着現象は、流体機械の駆動効率に影響することから、はく離再付着流れの制御が必要と考えられる<sup>①</sup>。本研究では、低レイノルズ数域後方ステップ流れにおける再付着距離のレイノルズ数依存性及び周期的な流れの構造に着目し、はく離せん断層における安定性解析を行った。この安定性解析に基づいて、シンセティックジェット(以下SJ)のじょう乱周波数を決定し、はく離せん断層の励起による再付着距離の制御及びその流動機構を解析することを目的とする。

## 2. 実験装置及び方法

図1に実験流路の概略を示す。風洞は流路入口にプロワを設置した吐出し式で、 $10 \times 150\text{mm}$ の矩形断面(アスペクト比15)を有し、ステップ高さ $H$ は $4\text{mm}$ 、拡大比は1.67とした。SJは $10 \times 150 \times 150\text{mm}$ のキャビティを有し、オリフィス部の長さは $10\text{mm}$ 、ジェット孔径 $d$ は $1\text{mm}$ 、ジェット孔間隔 $10d$ の多孔ジェットとした。駆動源にはスピーカを用い、ステップの対壁側で、ステップ端上流 $40\text{mm}$ の位置に設置した。

代表速度をステップ上流部の断面平均流速 $U_m$ 、代表長さを $H$ とするレイノルズ数 $Re_H$ は133から3670、そして、SJの $VR$ (ジェットの最大吹き出し速度と $U_m$ の速度比)は3とした。測定には、壁面近傍の流速と流れ方向を検知可能なMicro Flow Sensor(以下MFS)を用いた。MFSはステップ壁側のスパン中央に設置し、 $X/H=1$ から $X/H=28.5$ まで計測した。MFSのサン

pling周波数は $1\text{kHz}$ 、サンプリング時間は $10\text{s}$ である。再付着点は、計測時間に対する順流時間の割合である順流率 $\mu$ が下流に向かって増加する時の50%の位置と定義する。また、 $XY$ 断面の流れの可視化を実施した。トレーサとしてアルコールミスト、光源にはYAGレーザー、撮影にはハイスピードカメラを用いた。

はく離せん断層が不安定となる周波数帯を解析するために、安定性解析を行った。安定性解析には、二次元攪乱方程式としたOrr-Sommerfeld方程式の固有値解から、はく離せん断層が不安定となる無次元波数と時間成長率を計算した。この無次元波数と時間成長率からGaster変換を用いて空間成長率を算出した。

また、Orr-Sommerfeld方程式の固有値解を算出するために、PIV計測により得られた再付着点上流域における平均速度分布を使用した。

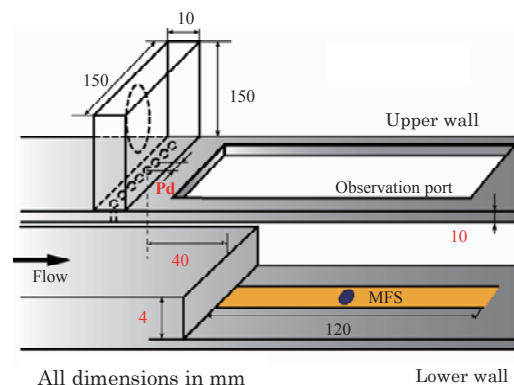


図1 実験装置

### 3. 結果および議論

図2に対壁側とステップ側における $Re_H$ とはく離及び再付着距離 $X_i/H$ を示す。添字*i*はLがステップ壁側、Uが対壁側を示す。また、添字*j*は、Rで再付着点、Sがはく離点を示す。 $Re_H = 133$ よりステップ側の再付着距離 $X_{LR}$ は増加し、 $Re_H = 670$ から減少する。

図3に $X_{LR}$ が増加する領域で $Re_H = 552$ におけるFFT解析のパワースペクトル密度(PSD)分布を示す。再付着点付近( $X/H = 20$ )から卓越周波数36Hz(印A)を中心に高いPSD値が分布する。また、36Hzよりやや低いピークが21Hzから27Hz付近に分布し、そのうち24Hz(印B)が最も高い。下流へ向かい24Hz、36HzのPSD値のピークは高くなる。 $X_{LR}$ が増加する流れでは、周期的な流れの構造が $X_{LR}$ 下流域で現れる。

図4に安定性解析による無次元波数 $\alpha_r$ に対する空間成長率 $\alpha_i$ を示す。各 $Re_H$ における $\alpha_i$ の極大値はおおよそ3.2となる。この $\alpha_i$ を周波数に換算し、安定性解析の結果よりSJの周波数 $F_{SJ}$ を10、36、70、150Hzとした。

図5及び6に、SJによる流れの可視化と $\gamma_p$ を示す。図5(b)では、はく離せん断層の横渦は、図5(a)の横渦よりも上流から形成され、横渦は $X/H = 6$ 付近でステップ側の壁に付着する。図6(a)を見ても、 $F_{SJ} = 36$ Hzの時、

$X_{LR}$ は減少し、SJの効果を確認できる。一方、図6(b)では、全ての周波数で $\gamma_p$ の傾向は $F_{SJ} = 0$ Hzの時とは大きく異なり、再付着距離も著しく減少する。また、SJによる $\gamma_p$ はステップ付近から高く、下流に向かうに従って減少から増加へ転じる。

図7は、 $F_{SJ} = 0$ Hzの時の $X_{LR}$ で無次元化した各じょう乱周波数の再付着距離を示す。再付着距離の減少に効果的なじょう乱周波数は、 $Re_H$ の増加と共に36、70、150Hzと増加している。従って、 $Re_H$ の増加に伴い、SJによる制御に有効な周波数域は拡大する。

### 4. 結論

低レイノルズ数域後方ステップ流れの制御に対し、安定性解析から決定したじょう乱周波数は、再付着距離の制御に有効であることが判明した。

### 参考文献

- (1) M. G. el. Hak, (2000) "Flow Control : Passive, Active, and Reactive Flow Management", Cambridge University Press, London, United Kingdom

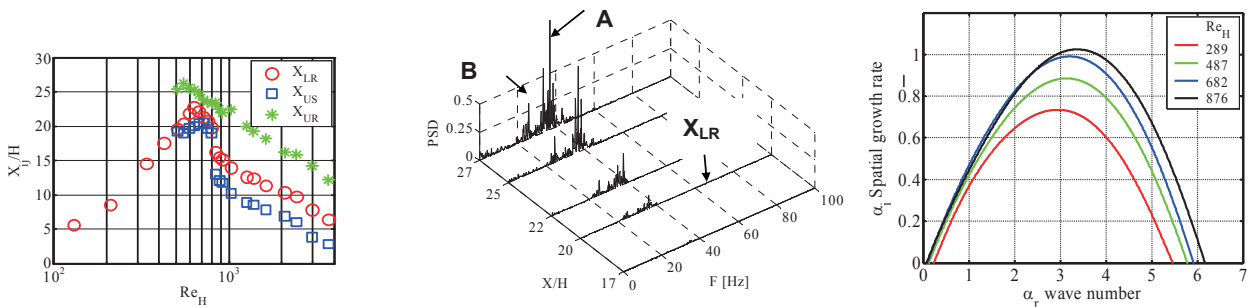
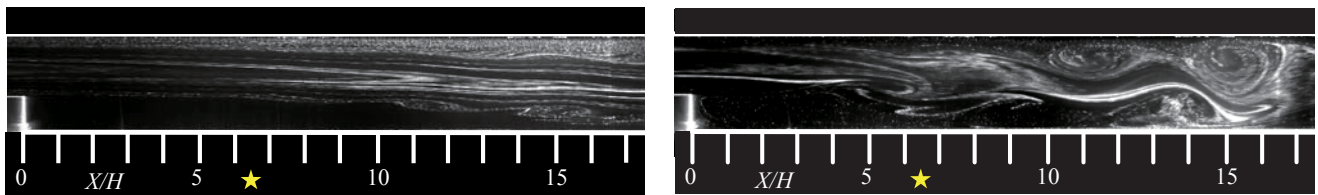
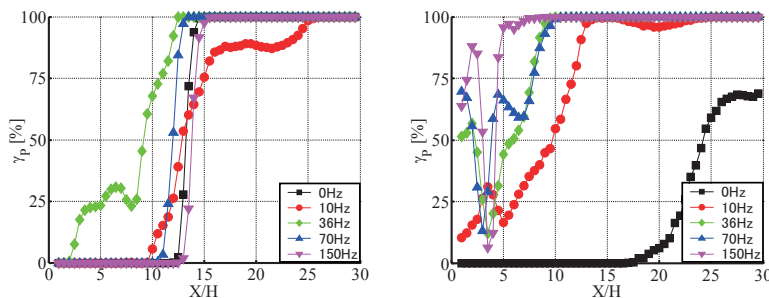


図2 最付着距離のレイノルズ数依存性 図3 FFT解析( $Re_H = 552$ ) 図4 波数に対する空間成長率



(a)  $Re_H = 300, F_{SJ} = 0$ Hz (b)  $Re_H = 300, F_{SJ} = 36$ Hz

図5 流れの可視化



(a)  $Re_H = 300$  (b)  $Re_H = 700$

図6 SJによる順流率

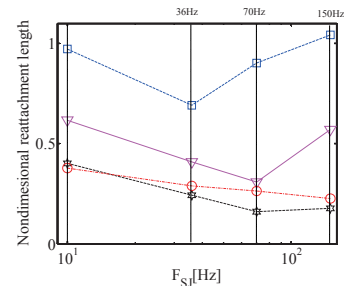


図7 SJによる再付着距離減少率