

# 後流の不安定性

浅井 雅人\*

## A Study on the Instability of the Wake

Masahito ASAI

Tokyo Metropolitan Institute of Technology

### ABSTRACT

In order to better understand the relation between the von Karman vortex shedding and the wake (absolute) instability, the wake development behind a blunt-ended flat-plate is examined experimentally. When the vortex shedding is controlled by another flat-plate in the wake, the shedding frequency is remarkably changed. Such change in frequency is found to be closely related to the change in the absolute instability characteristics in the near-wake field.

**Key Words:** wake, vortex shedding, absolute instability

#### 1. ま え が き

流れの中に物体が置かれたとき、レイノルズ数の広い範囲にわたって後流（伴流）中に規則的（周期的）な、いわゆるカルマン渦列が現われる。カルマン渦列の周波数選択性は極めて強く、しかも境界層や一般の混合層（自由剪断層）の場合と異なり、音などの外乱を、渦列周波数の極く近傍の周波数選択性を説明しようと以前から多くの研究がなされてきた<sup>1,2)</sup>。

その中で特に注目されているものに後流の絶対不安定性がある。平行流近似に基づく線形安定性理論によると、物体近傍の後流速度分布に対しては、複素群速度  $Cg = d\omega / d\alpha$  ( $\omega = \omega_r + i\omega_i$ ; 複素周波数,  $\alpha = \alpha_r + i\alpha_i$ ; 複素波数) が零で、かつ時間増幅する ( $Cg=0$ ,  $\omega_i > 0$ ) 固有モードが存在し<sup>3,4)</sup>、そのような攪乱は下流に流されることなく時間増幅する。カルマン渦列はそのような特定の周波数・波数をもつ固有モードが時間増幅した後の状態と考えられた<sup>5-8)</sup>。最近の、数値実験<sup>9,10)</sup> や渦列の制御実験<sup>11,12)</sup> は、渦列の発生に上記絶対不安定性が関係していることを強く示唆している。ただし、実際の後流の速度分布は物体後縁から流れ方向に急速に変化しているため、平行流近似に基づく安定性解析からは、渦列の周波数がどの位置の後流速度分布の絶対不安定性により決定されるかについては結論できな

い。また、局所的な不安定特性が最終的な（平衡状態に達した後の）渦列流れ全体を支配することができるかどうかについても明らかでない。本研究では、このようなカルマン渦列の周波数決定機構と絶対不安定性との関係を実験的に調べている。実験は厚い平板の後流について行われ、後流の非平行性や渦列の成長を人為的に制御するため下流の後流中にもう一枚の平板が挿入される。

#### 2. 実験装置および方法

実験は一辺 200 mm の噴き口を持つ吹き出し式風洞で行われた。測定部及び平板模型を図 1 に示す。測定部の左右には大きな側壁があり、主流の二次元性が維持されている。可視化写真撮影のため片方の側壁は透明アクリル板である。上流側平板は、厚さ  $d = 10$  mm スパン長 195 mm 流れ方向の長さ 100 mm で前縁は楕円形状（長軸 30 mm, 短軸 10 mm）である。後流側平板も諸元は同じであるが前縁は平にカットされている。座標系は、流れ方向に  $x$ 、平板に垂直上向きに  $y$  である。原点は上流側平板の後縁（中心線上）になる。上流側の平板は固定し、下流側平板を  $x$  方向に動かした。上流、下流の平板間の距離（すきま）を  $L$  とする。流れの可視化にはスモークワイヤを用い、平均流速及び変動の測定には I 型熱線プローブを用いた。実験は一様流速度  $U_\infty = 2$  m/s で行われた。板厚  $d$  と  $U_\infty$  に基づくレイノルズ数  $R$  は約 1400 である。

\* 東京都立科学技術大学

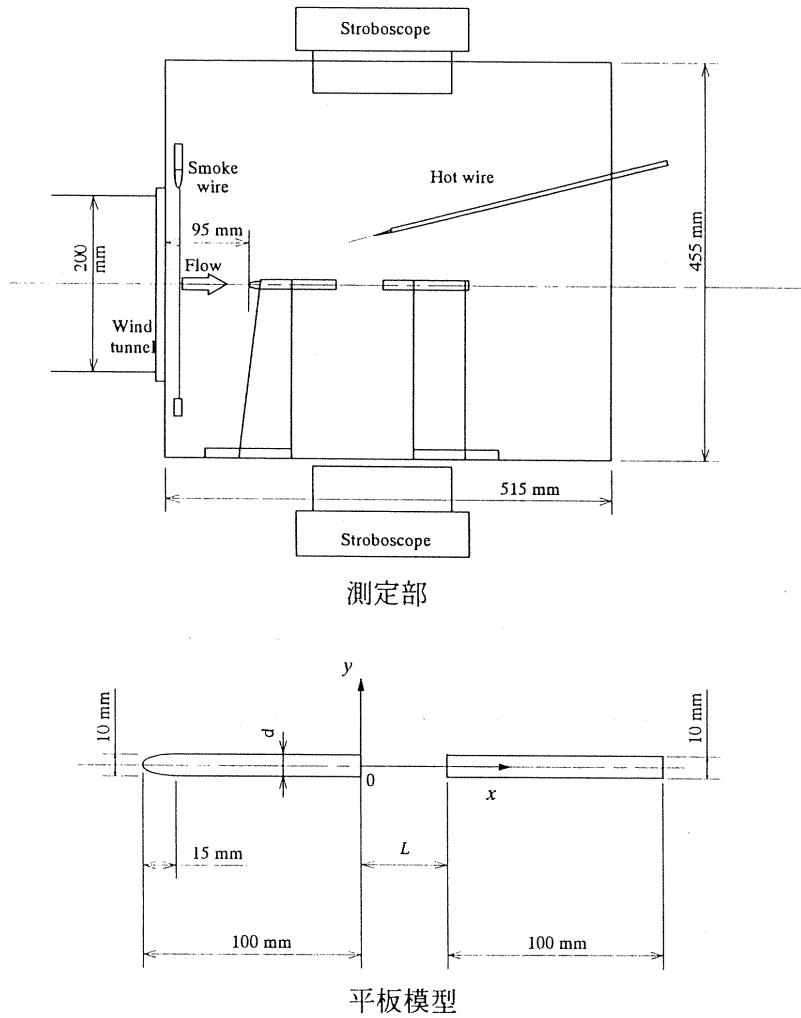


図 1 実験装置の概要 (単位 mm)

### 3. 結果および考察

図 2 は平板が単一で置かれたときの流れを可視化している。図のように後流中には極めて規則的な渦列が現われる。 $u$  変動のスペクトルを測定すると、図 3 のように鋭いピークを示し、カルマン渦列の強い周波数選択性が理解される。渦列周波数は約 45 Hz である。まず、この渦列周波数と絶対不安定モードの周波数との対応を見るため、物体近傍の  $x/d=0.1$  と  $x/d=0.5$  位置の速度分布について、レーリー方程式に基づき安定計算を行った。実験の速度分布を図 4(a) のように近似し(逆流を考慮)、固有値  $\omega = \omega(\alpha)$  を計算すると図 4(b) のようであり、鞍点点对應する絶対不安定モード ( $Cg = d\omega/d\alpha = 0$ ,  $\omega_i > 0$  の固有モード) の周波数 ( $f = \omega_r / U / 2\pi d$ ) は  $x/d=0.1$  と  $x/d=0.5$  位置共約 47 Hz である。これは実験と極めてよく一致しており、単一平板の後流に見られるカルマン渦列の周波数は後縁近傍の後流速度分布の持つ局所絶対不安定特性により十分予測できる。

この後流中に、前述のようにもう一枚平板を挿入すると渦放出が次のように影響を受ける。図 5 は二平板間の流れの可視化写真である。また、図 6 は二平板の間隔  $L/d$  の変



図 2 平板後流の可視化 ( $R=1400$ )

化に対する渦列周波数の変化を示している：破線は単一平板の渦放出周波数である。下流平板を十分遠方 ( $L/d=15$ ) から徐々に上流平板の後縁に近づけていくと、渦列周波数は単一平板の値から徐々に減少していき、 $L/d=2.7$  で最小の 32.5 Hz となる。これは単一平板の渦放出周波数のおよそ 72% である。その後は渦列の形成には至らないが規則的な波動が  $L/d=2.4$  になるまで観察され、その周波数は  $L/d$  の減少に対して逆に上昇していく。このような周波数変化が、安定性理論のみで予測できるかどうかを次に調べる。

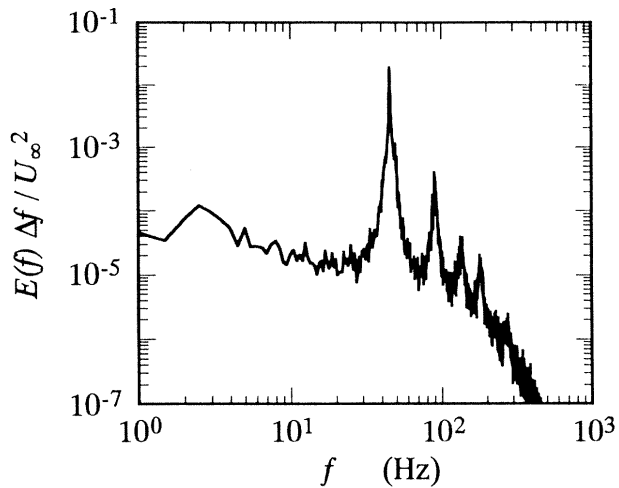
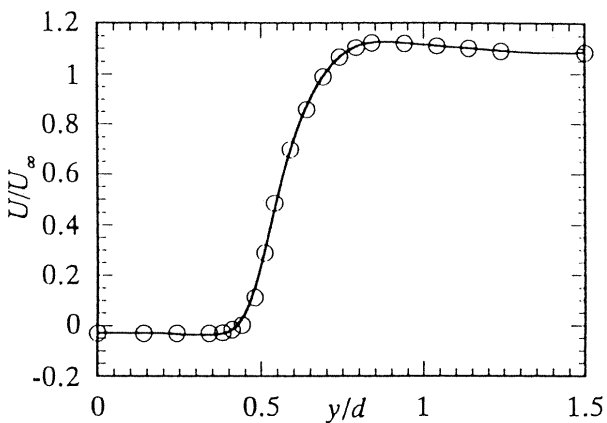
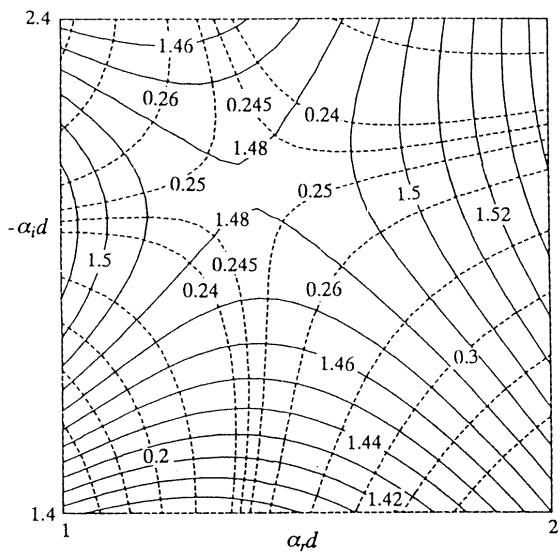


図3  $u$ 変動のスペクトル:  $(x/d, y/d)=(2, 0.4)$

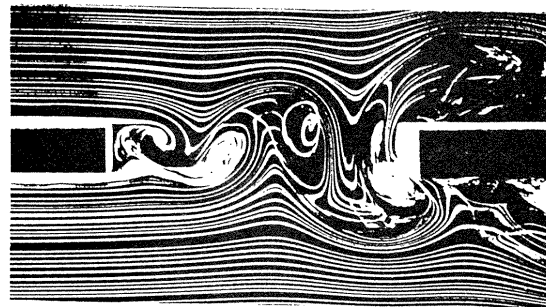


(a) 平均速度分布の近似(○; 実験, —; スプライン近似)



(b) レーリー方程式の固有値(実線:  $\omega_r d/U_\infty$ の等値線, 波線:  $\omega_i d/U_\infty$ の等値線)

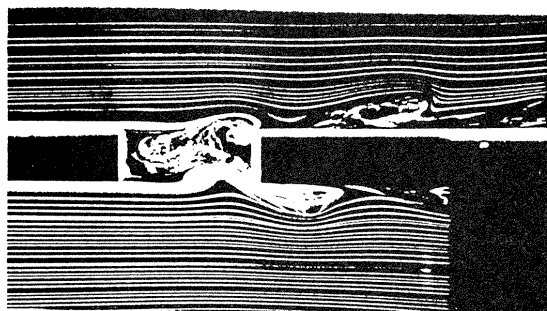
図4 後流速度分布の不安特性 ( $x/d=0.1$ )



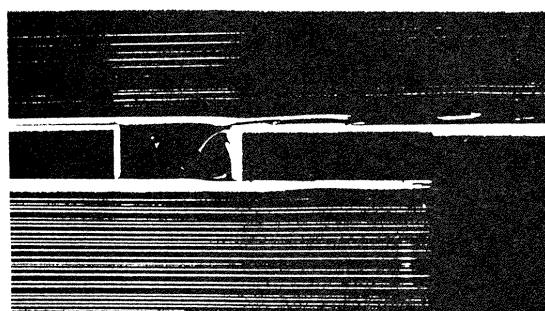
(a)  $L/d = 6$



(b)  $L/d = 4$



(c)  $L/d = 2.7$



(d)  $L/d = 2.4$

図5 後流と平板の干渉 ( $R=1400$ )

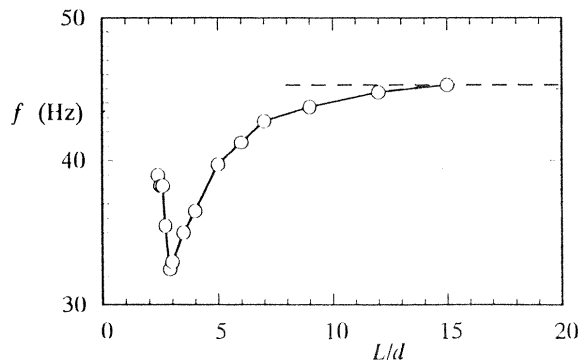
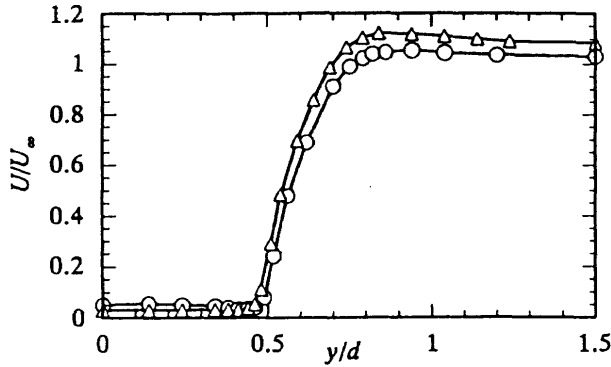
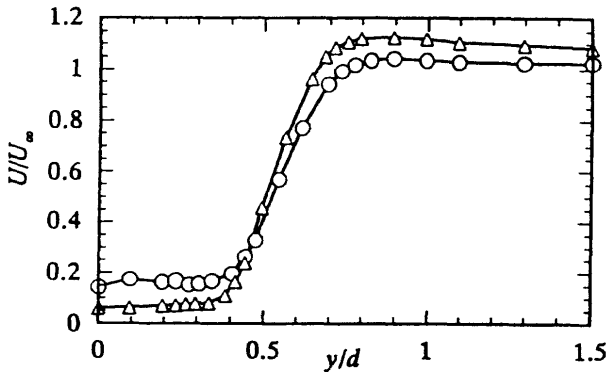


図6 渦列周波数の  $L/d$  に対する依存性



(a) :  $x/d=0.1$



(b) :  $x/d=0.5$

図7 平均速度分布の比較(△; 単一平板, ○;  $L/d=4$ )

まず、図7は単一平板の場合と $L/d=4$ の場合について、 $x/d=0.1$ と $0.5$ 位置での平均速度分布を比較している：熱線出力をそのままプロットしており逆流は考慮していない。図のように、速度分布形状は顕著な変化を受ける。特に不安定特性に大きな影響を与えられとされる後流幅が明らかに異なる。実際、各 $L/d$ について、 $x/d=0.1$ と $x/d=0.5$ 位置の速度分布に対してレーリー方程式に基づき安定性解析を行った。図8に、実験の渦放出周波数と絶対不安定モードの周波数との比較を示す。実験では $L/d$ の減少に従って渦放出周波数は減少し $L/d=2.7$ から再び増加するのが観察されたが、それらはいずれも物体近傍の速度分布から計算される絶対不安定モードの周波数に極めて近い。特に、 $x/d=0.5$ 位置での絶対不安定特性は、 $L/d=3$ まで周波数は減少し、 $L/d=2.7, 2.4$ では実験と同様に周波数が増加する様子も予測する。

以上のように、渦放出周波数は後流構造を人為的に制御しても常に物体近傍の不安定特性に支配され、また、渦列構造と近傍速度場の絶対不安定特性とが常に対応した形で渦列流れが形成されるように見える。

引用文献

1) Huerre, P. and Monkewitz, P.A.: Local and global instabilities in spatially developing flows, Ann.

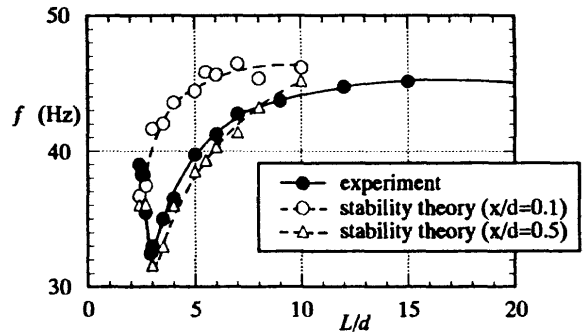


図8 渦列周波数と絶対不安定周波数の比較

Rev. Fluid Mech. 22, 473-537 (1990).

2) Oertel, H.: Wake behind Blunt Bodies, Ann. Rev. Fluid Mech. 22, 539-564 (1990).  
 3) Betchov, R. and Criminale, W.O.: Spatial instability of the inviscid jet and wake, Phys. Fluids 9, 359-362 (1966).  
 4) Mattingly, G.E. and Criminale, W.O.: The stability of an incompressible two-dimensional wake, J. Fluid Mech. 51, 233-272 (1972).  
 5) Koch, W.: Local instability characteristics and frequency determination of self-excited wake flows, J. Sound Vibration 99, 53-83 (1985).  
 6) Pierrehumbert, R.T.: Local and global baroclinic instability of zonally varying flow J. Atmos. Sci. 41, 2141-2162 (1984).  
 7) Huerre, P. and Monkewitz, P.A.: Absolute and convective instabilities in free shear layers, J. Fluid Mech. 159, 151-168 (1985).  
 8) Kupfer, K., Bers, M. and Ram, A.K.: Cuspmap in the complex-frequency plane for absolute instabilities, Phys Fluids 30, 3075-3082 (1987).  
 9) Hanneman, K. and Oertel, H.: Numerical simulation of the absolutely and convectively unstable wake, J. Fluid Mech. 199, 55-88 (1989).  
 10) Asai, M., Ohya, M. and Nishioka, M.: A numerical experiment on the generation process of Karman vortex street, Proc. 25th Turbulence Symp. (in Japanese), 10-13 (1993).  
 11) Monkewitz, P.A. and Nguyen, L.N.: Absolute instability in the near-wake of two-dimensional bluff bodies, J. Fluids and Structures 1, 165-184 (1987).  
 12) Strykowski, P.J. and Sreenivasan, K.R.: On the formation and suppression of vortex shedding at low Reynolds numbers, J. Fluid Mech. 218, 71-107 (1990).