

翼端渦と壁との干渉の実験観察

都立科技大 浅井雅人 (Masahito Asai), 高井知奈 (Shirena Takai),
山崎直 (Tadashi Yamazaki)

Department of Aerospace Engineering, Tokyo Metropolitan Inst. Tech.

1. はじめに

本研究では、平面壁近くを移動する有限翼から放出される翼端渦の振る舞い及び境界壁との干渉の様子を実験的に調べている。渦が壁近くに存在すると、鏡像の効果で壁に平行に移動することは周知であるが、その渦の強い誘起速度場により壁上に逆符号の渦度が生まれ、さらにその渦層を壁から浮上させる。その結果、二次渦 (Secondary Vortex) が生まれ得る¹⁻⁴⁾。このような孤立渦と壁との干渉は、壁乱流構造のみならず、層流境界層中の乱流楔のスパン方向成長 (ラテラルコンタミネーション) を理解する上でも重要である。乱流楔においては、両側の層流域に縦渦が発達するが、その縦渦が逆符号渦度の二次渦を励起し、縦渦対 (ヘアピン渦) を形成して壁から浮上していくことが観察されている^{5, 6)}。それら遷移や乱流境界層中での縦渦の渦レイノルズ数 (循環/動粘性係数) は数十~百程度であるが、本実験では、渦レイノルズ数が数千の翼端渦を対象として渦と壁との干渉を調べている。

2. 実験装置および方法

実験は、幅 750mm、長さ 4000mm の地面板の上をリニアモータアクチュエータにより走行する台車に取り付けられた有限翼モデルを用いて行なわれた。測定部の両側はアクリル板 (高さ 1000mm) で遮蔽してある。ただし、アクチュエータ側の遮蔽板には翼の支柱が通過できるようにスリット (幅 30mm) が設けられている。地面板と翼の距離は自由に調整できる。翼モデルはスパン 300mm、翼弦長 200mm のクラーク Y 翼型を使用し、片持ちで台車に支持され、 $-20 \sim 20^\circ$ の範囲で迎角 α が変化できるようになっている。リニアモータアクチュエータはストローク部 4m、最大速度 2m/s、最大加速度 2G であり、本実験では走行開始から 0.5s 後に 2m/s の等速走行になるように設定した。翼弦長に基づくレイノルズ数は $Re = 3.2 \times 10^4$ である。流れの可視化にはスモークワイヤ法を用いた。スモークワイヤは、流れが翼によってゆっくりと引きずられることを考慮して、観察位置より数 mm 下流に、地面板に垂直に設置した。煙の様子を高速ビデオカメラで後方

から撮影した後、パーソナルコンピュータに取り込み渦中心の軌跡を求めた。すべて毎秒 1125 フレームで撮影した。PIV 計測には DANTEC リアル PIV システム（ダブルパルス Nd:YAG レーザ使用）を用いた。画像取込み時刻を翼の通過と同期させるために、フォトセンサを使用した。本実験では翼後縁が測定部を通過してから 200ms, 300ms, 400ms 後の断面内流れについて PIV 解析を行った。

3. 実験結果および考察

図 1 は翼迎角 $\alpha=5^\circ$ 、地面板と翼後縁との距離 $h_c=32\text{mm}$ のときにおける連続可視化画像である。翼後縁が測定部を通過する時間を $t=0$ とし、そこから 120 フレームおきの画像 6 枚 ($t=0, 107, 0.213, 0.373, 0.427, 0.533, 0.640\text{s}$) を示す。地面板による鏡像の影響で翼端渦が左方向に移動しているのがわかる。また、同時に、渦は壁近傍に Secondary Vortex を誘起し、翼端渦はそれとペアをなして上昇していく様子もわかる。画像の下白い線は地面板である。翼端渦の運動を追跡するためビデオ画像から渦中心の座標を求めた。図 2 は $\alpha=5^\circ$ での各地面板高さにおける渦の軌跡を表示したものである。この図から、翼と地面板の距離が近づくにつれて、鏡像の効果が増すので翼端渦の横方向の移動速度は増加する様子がわかる。翼端渦の場合、同時に地面効果により翼の揚力が増し、その結果翼端渦の循環も増加することを追記する。また、この図より、翼端渦が Secondary Vortex の影響により壁から上方に移動し始める臨界高さ（渦中心と地面との距離）はおおよそ 77mm であることがわかる。この臨界値はもちろん渦の循環に依存し、 $\alpha=3^\circ$ の場合に同様の観察を行なうと、60mm 以下まで壁に近づくまで地面に平行に移動することを確認している。

渦の運動および二次渦の生成をより詳細に調べるために、2次元 PIV により断面内の速度ベクトルおよび渦度を計測した。図 3 (a) は $\alpha=5^\circ$ 、 $h_c=32\text{mm}$ の場合について、PIV により断面内の瞬間速度ベクトルを求めたものであり、図 3 (b) はそれから求めた渦度場である。いずれも翼後縁がレーザシートを過ぎてから 300ms 後のものであり、50 個以上の PIV データをアンサンブル平均して得られたものである。速度ベクトルおよび渦度の等値線共に翼端渦の左下に翼端渦とは逆の渦度をもつ Secondary Vortex の形成が捉えられている。また、渦度の面積積分をすることによって翼端渦の循環を求めると、 $\alpha=5^\circ$ 、 $h_c=82\text{mm}$ の場合で $\Gamma=0.075\text{m}^2/\text{s}$ 、 $h_c=32\text{mm}$ の場合には $\Gamma=0.080\text{m}^2/\text{s}$ である。この翼端渦の循環の増加は地面効果による翼の揚力増加に対応している。また、循環 Γ と動粘性係数 ν に基づく渦レイノルズ数 $R_v=\Gamma/\nu$ は、それぞれ約 5300, 5700 である。渦核の半径は 10mm 程度である。Secondary Vortex の発生は、翼端渦の誘起速度・誘起圧力場による非定常剥離が原因と考えられる⁴⁾。遷移境界層や壁乱流で見られる渦のレイノルズ数は数十の程度であり、その場合、層流境界層中でヘアピン渦（の脚）の再生成を調べた実験⁵⁾

からも判るように壁の極近傍の縦渦（ヘアピン渦の脚）によって Secondary Vortex が誘起されるが，翼端渦のように大きな渦レイノルズ数の渦では，渦中心と壁との距離が渦半径の 7～8 倍程度であっても二次渦が発生し始めることは注目すべきである．

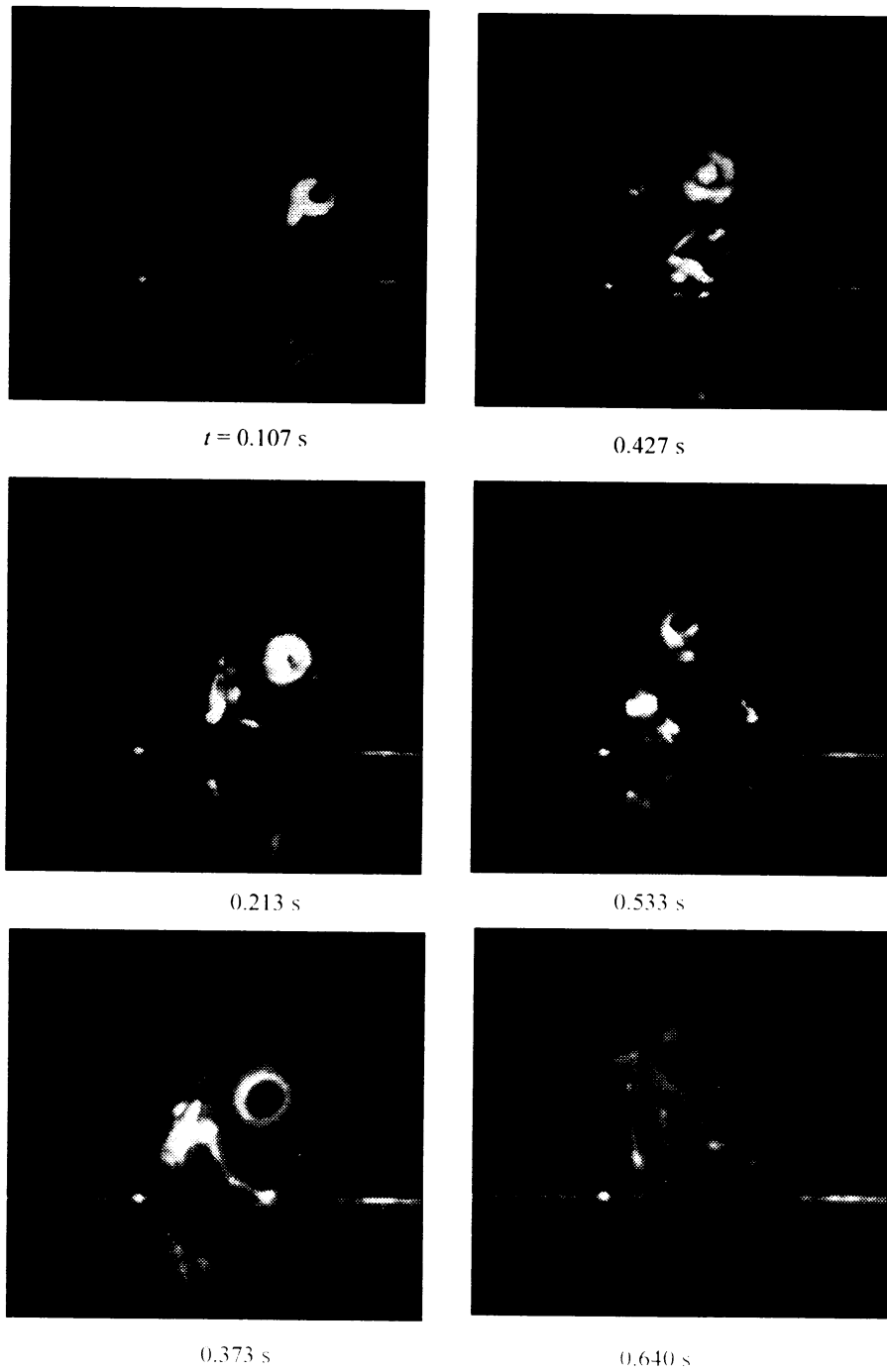


図 1. 高速ビデオカメラにより撮影された翼端渦の連続画像： $\alpha = 5^\circ$, $h_c = 32\text{mm}$

最後に、翼端渦の横方向の移動速度を、同じ循環値を持つポテンシャル渦糸の鏡像による移動速度 ($= \Gamma / 4\pi h$) と比較すると、Secondary Vortex が生じていない場合には、渦の移動速度は渦糸の鏡像による誘起速度とほとんど一致することが確認できたが、翼端渦が壁に近づき Secondary Vortex が発生する場合には、鏡像により計算される速度よりも速く移動することを追記する。

引用文献

- 1) Harvey, J.K. and Perry, F.J. (1971) Flow field produced by trailing vortices in the vicinity of the ground, AIAA J. 9, 1659-1660.
- 2) Walker, J.D.A., Smith, C.R., Cerra, A.W. and Doligalski, L.T. (1987) Impact of a vortex ring on a wall, J. Fluid Mech. 181, 99-140.

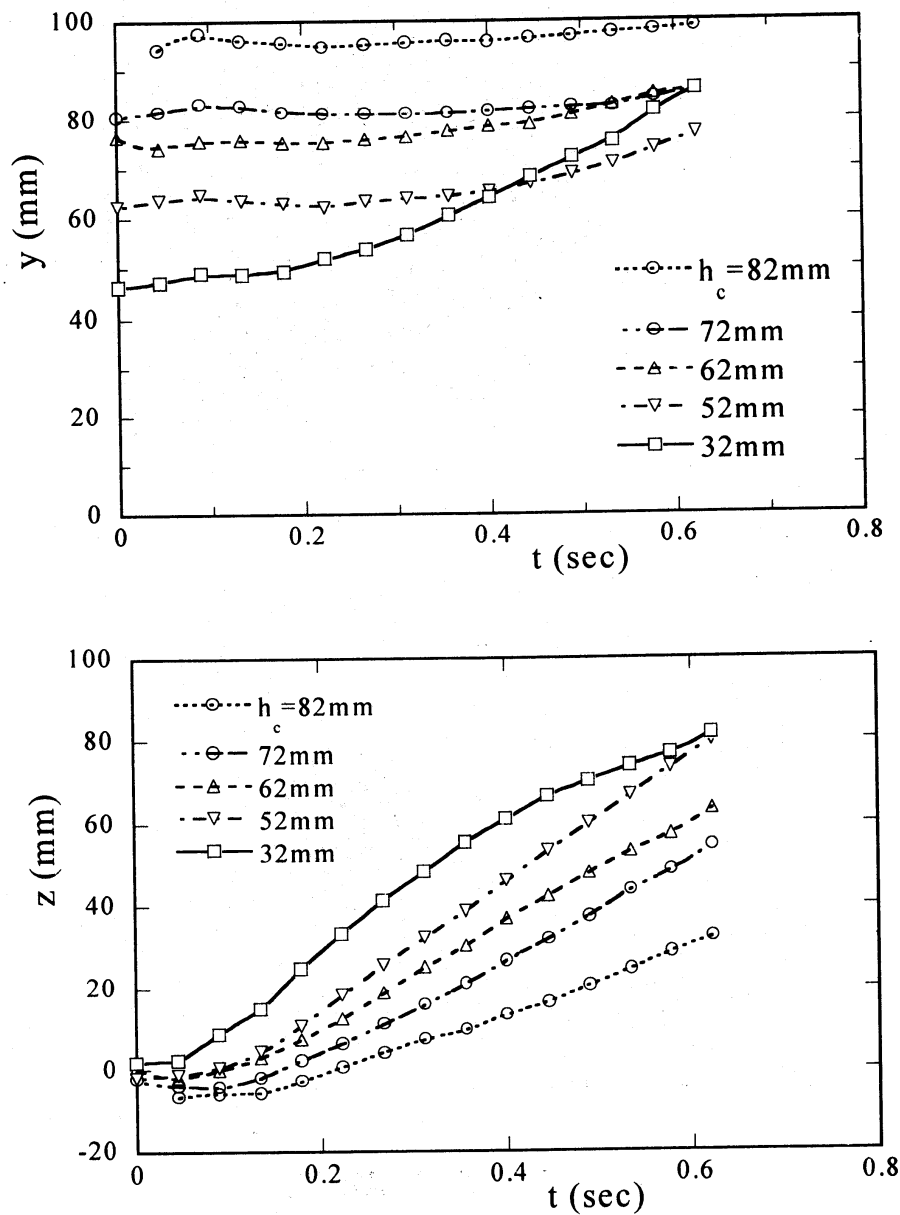


図2. 渦中心の位置の時間変化 ($\alpha = 5^\circ$). 上; 壁に垂直方向, 下; 横方向

- 3) Doligalski, T.L., Smith, C.R. and Walker, D.A. (1994) Vortex interaction with wall, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 26, 573-616.
- 4) Yamada, H., Kohsaka, T., Yamabe, H. and Matsui, T. (1982) Flowfield produced by a vortex ring near a plane wall, *J. Phys. Soc. Jpn.* 51, 1663-1670.
- 5) Haidari, A.H. and Smith, C.R. (1994) The generation and regeneration of single hairpin vortices, *J. Fluid Mech.* 277, 135-162.
- 6) Asai, M., Sawada, K. and Nishioka, M. (1996) Development of turbulent patch in a subcritical boundary layer, *Fluid Dyn. Res.* 18, 151-168.

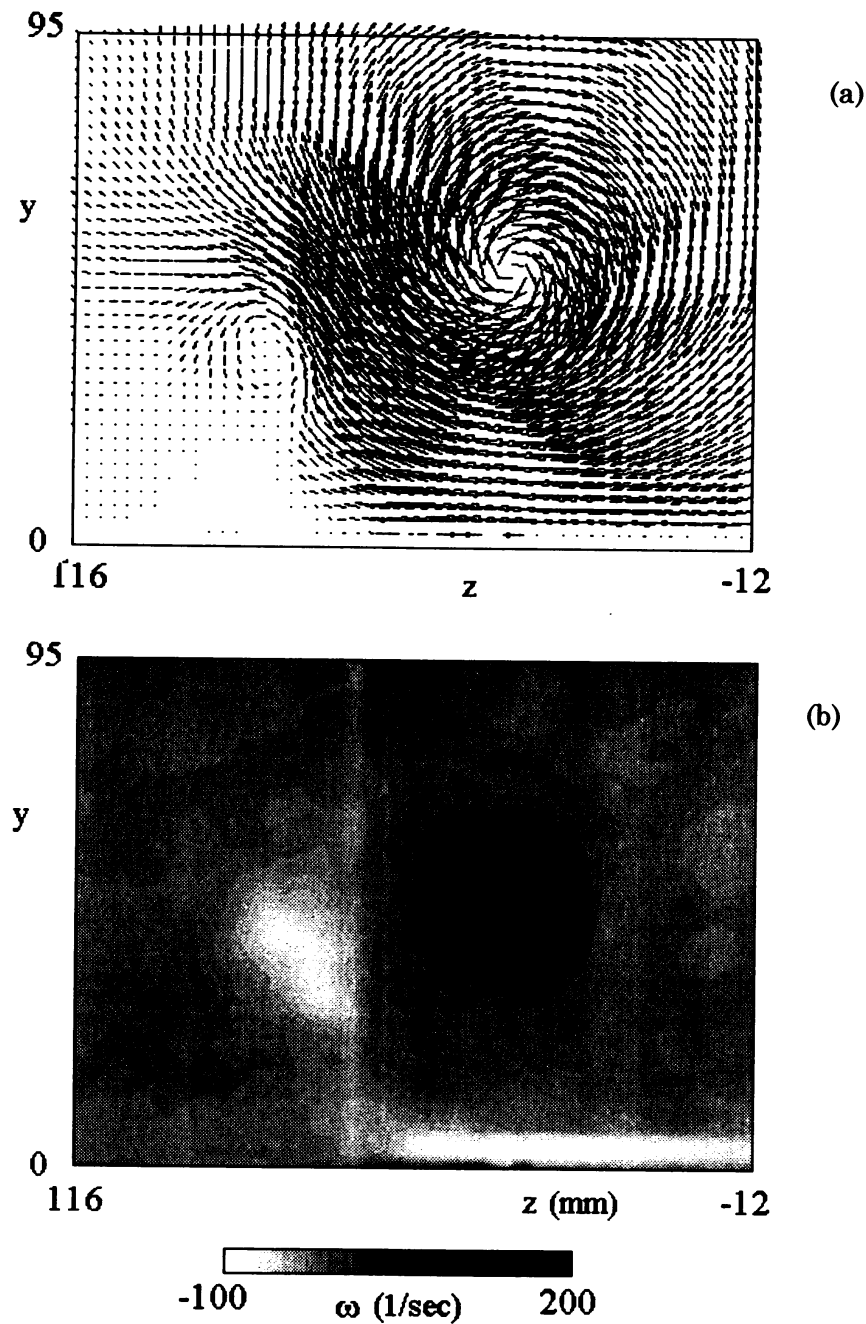


図3 アンサンブル平均速度ベクトル (a) と渦度場 (b). $\alpha=5^\circ$, $h_c=32\text{mm}$, $t=300\text{ms}$