

# 乱流斑点の融合と翼端部における内部構造の相互干渉

蒔田 秀治 西沢 啓

## Merging of Turbulent Spots and Interaction between Internal Structures at the wing tips

Hideharu Makita\* and Akira Nishizawa\*

\*Toyohashi University of Technology

### ABSTRACT

The wind-tunnel experiment was made to clarify the interaction phenomena between turbulent spots generated in a laminar boundary layer. Measurements using a rake of 16 I-type hot-wires gave instantaneous plane views of a single and merged spot. The results showed that the arrowhead-shaped turbulent region of the turbulent spot was composed of a number of small-scale streaky structures elongated in the streamwise direction. The spot is always accompanied by streaky velocity-defect regions around its both wing tips. When the two simultaneously generated spots came in contact with each other, strong mutual interaction occurred between the streaky structures at their inside wing tips, and gave birth to a strong ejection on the symmetry plane of the merged spot.

**Key Words:** turbulent spots, multi-point measurement, conditional sampling, laminar boundary layer

### 1. はじめに

層流境界層中に発達する乱流斑点は境界層の外側に突出した大規模な構造を有することから従来、乱流境界層中のバルジとの類似性が指摘されている<sup>1)</sup>。著者らは多数の斑点が融合し合って乱流境界層を形成していく場合に、斑点構造の変化が遷移領域や下流の乱流境界層の構造にどのような影響を及ぼすのかを明らかにするため、二つの斑点が融合する様子を調べてきたが、特に並進する斑点が融合する場合には鉛直方向への成長が促進することを示した<sup>2)</sup>。その機構は乱流バルジとの関連を調べる上でも重要であり、本報では並進する二つの斑点の翼端部が融合したときの内部構造の変化を多点同時計測により調べ、融合による成長促進の機構について検討した。

### 2. 実験装置・実験方法

風洞測定部(断面0.44m×0.75m、長さ8m)に鉛直に設置された境界層平板(幅0.75m、全長7.7m)に圧力勾配の無い層流境界層を形成した。前縁から700mmの位置に直径1mmの吹き出し孔を二つ設けた。それらのスパン方向間隔は40mmである。各孔から微小噴流を吹き出し、二つの乱流斑点を同時に形成した。主流流速は $U_\infty=5\text{m/s}$ とした。座標原点は二つの吹き出し孔の中央とした。本流れ場における層流境界層の平均速度分布は理論値と良く一致し、 $x=300\text{mm}$ における境界層厚さは $\delta=9.0\text{mm}$ 、吹き出し位置における

境界層排除厚さ $\delta_0^*=2.6\text{mm}$ に基づくレイノルズ数は約817である。実験装置の詳細は既報<sup>2,3)</sup>を参照されたい。計測には16チャンネル熊手型Iプローブ(線長1mm、線径 $5\mu\text{m}$ )を用いた。Z方向に並べられた各Iプローブの間隔は5mmである。

### 3. 実験結果と考察

図1に斑点を単独で形成した場合の $Y/\delta=0.4$ における速度変動 $u$ のZ-T断面分布(瞬間像)の流れ方向変化を示す。時間軸の向きは右から左であり、流れ方向を左から右とみなせる。ただし、各斑点は同一の斑点を下流方向に追跡したものではない。ここで、速度変動 $u$ は斑点のない層流時の局所平均流速からのずれである。どの流れ方向位置でも上流側には速度変動が正になる加速領域が緩やかに広がっているのに対し、下流側には速度変動が負になる減速領域と加速領域が細かく分かれて混在している。斑点内部には多数の縦渦やヘアピン渦が存在することが可視化によって観察されている<sup>4)</sup>が、上流側の加速領域(静隠領域<sup>5)</sup>)にはそのような小規模な渦構造は存在していないことがわかる。図1の横軸Tに主流流速 $U_\infty$ を乗じた長さスケール(図中矢印で示した間隔)と比較すると、細かく分かれた減速領域や加速領域は流れ方向に伸びた筋状になっていることがわかるが、そのZ方向間隔は従来観察されている斑点内部の縦渦の間隔と近い値であり<sup>3)</sup>、縦渦によって誘起された速度場を捉えたものと考えられる。並進する二つの斑点が融合する場合、最初に接触するのが翼端部であるから

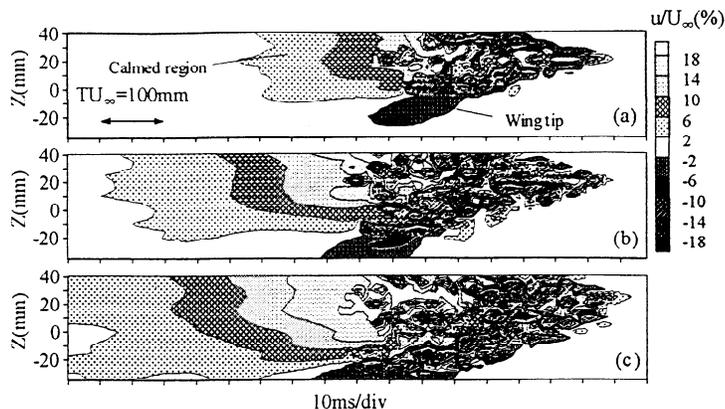


図1 単独斑点における速度変動  $u$  の  $Z$ - $T$  断面分布の流れ方向変化。  $Y/\delta = 0.4$ , (a)  $X=300\text{mm}$ , (b)  $X=400\text{mm}$ , (c)  $X=500\text{mm}$ 。

翼端部の構造は斑点間の相互干渉を調べる上で特に重要であるが、翼端部にはどの  $X$  位置においても常に減速領域が位置する。可視化では斑点の内部構造としてヘアピン渦<sup>4)</sup>も観察されるが、その脚部縦渦対の間に低速上昇流(減速領域)を、脚部の外側に高速下降流(加速領域)を誘起すると考えると、外側に減速領域を誘起する翼端部の渦構造はヘアピン型ではなく片足の縦渦になっている可能性がある。下流へ行くと斑点は成長するが外形は相似形を保ちつつ内部の構造の数が増えていることがわかる。これは翼端部および後縁部において新たな渦構造が形成されることにより斑点がスパン方向と流れ方向に成長する<sup>4)</sup>ためである。

図2に並進する二つの斑点が融合した直後の  $X=300\text{mm}$  における瞬間像を  $Y/\delta = 0.4, 0.2$  の断面について示す。 $Y/\delta = 0.4$  において二つの斑点の間には明確な強い減速領域が広範囲にわたって形成されている。単独斑点の場合(図1)、翼端部には常に減速領域が位置するから並進する各斑点の隣接した翼端部には、それぞれの外側に低速上昇流を誘起する互いに逆回転する縦渦が対を成して位置すると考えられる。したがって、二つの斑点の融合時には向かい合った各斑点の翼端部に位置する縦渦間に相互干渉が生じ、低速流体の上昇が活発になった結果、強い減速領域が形成されたものと考えられる。 $Y/\delta = 0.2$  ではほとんどの領域が加速領域であるが二つの斑点の間においてのみ明確な減速領域が形成されている。また、 $Y/\delta = 0.2$  において二つの斑点の中間に形成された減速領域は、流れ方向に伸びた筋状であり、かつ  $Y/\delta = 0.4$  の減速領域よりも上流側に達している。これは融合した翼端部に位置する各縦渦が  $X$  軸に対し傾斜した構造を有するためと考えられる。互いに逆回転する各翼端部の縦渦が二つの斑点の融合により結合し、一つの強いヘアピン渦が形成される可能性もあるが、融合部にヘアピン渦が形成されるかどうかは融合部の成長が促進される機構を調べる

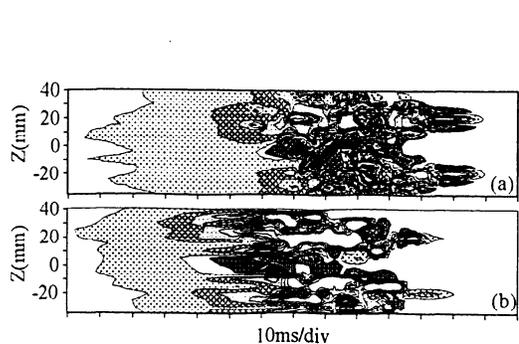


図2 融合斑点における速度変動  $u$  の  $Z$ - $T$  断面分布。 $X=300\text{mm}$ , (a)  $Y/\delta = 0.4$ , (b)  $Y/\delta = 0.2$ 。

二つの斑点の融合によって両者の中間に形成された強い構造は、周囲の他の渦構造とともに下流へ流されながら発達していくと考えられるが、その前方には他の渦構造が存在しないため、前縁側下層部から層流部分を取り込む<sup>6,7)</sup>上で妨げとなるものがないなど、発達のための好条件を備えている。斑点内部にはヘアピン型だけでなく片足のみの縦渦構造も存在している<sup>4)</sup>が、並進する斑点の融合部は各翼端部の縦渦に挟まれるためそこには両足を有するヘアピン渦が形成されやすい可能性もある。したがって、融合により生じた強い構造は鉛直上方へ成長する能力が卓越していることが予想され、このため下流において融合斑点の高さが単独斑点のものより増加する<sup>2)</sup>ものと考えられる。

融合部における渦構造の発生・発達過程を解明するには、今後、多線プローブを用いて速度の二成分を同時計測すること、および、融合部の構造を詳細に調べられるようプローブの空間分解能を高めることなどが必要であり、その結果については続報にて述べる。

#### 4. まとめ

乱流斑点は流れ方向に伸びた多数の筋状の構造によって構成されており翼端部にはその外側に減速領域を誘起する構造が常に存在する。二つの斑点の融合時には融合部に強い減速領域を形成するような翼端部構造の相互干渉が生じ、融合部の減速領域の上方への発達が促進される。

#### 参考文献

- 1) Coles, D. & Barker, S.J.: Turbulent Mixing in Nonreactive and Reactive Flows, Plenum (1975) 295.
- 2) 蒔田・西沢: 機論 B 編 64-627 (1998) 3682.
- 3) 蒔田・西沢: 機論 B 編 65-632 (1999) 1283.
- 4) Matsui, T.: Laminar-Turbulent Transition, Springer (1980) 288
- 5) Schubauer, G.B., & Klebanoff, P.S.: NACA TN-3489 (1955)
- 6) 蒔田・西沢: 機論 B 編 65-630 (1999) 573