

乱流斑点の相互干渉に関する実験的研究

藤田 秀治* 西沢 啓*

Experimental Investigation of Interaction between Turbulent Spots

Hideharu Makita and Akira Nishizawa

Toyohashi University of Technology

ABSTRACT

Interaction phenomena between turbulent spots were experimentally investigated by using a rake of 16 I-type hotwires. Instantaneous views of the single turbulent spot gave a quite different image from the ensemble-averaged one, being composed of several small scale velocity-defect and excess regions. These regions were elongated in the streamwise direction and alternately arranged along the leading edge of the spot. When the two spots were simultaneously generated, their wing tips came to overlap each other as they grew downstream and the velocity-defect regions at each wing tip were superposed. Then, a far stronger velocity-defect region was generated there.

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

1. はじめに

層流境界層中に局所的に微小擾乱を与えると乱流斑点が発生する。自然遷移では、比較的大きな主流乱れや壁面粗さなどによって、多数の乱流斑点が発生し、それらが融合するときの相互干渉が遷移領域の構造に影響を与えることが予想される。著者らは、遷移機構を解明する上での重要な現象の一つとして、この乱流斑点の相互干渉に注目し、平板層流境界層中に二つの乱流斑点をスパン方向に並べて形成し、それらが融合した場合の斑点の特性を調べた¹⁾。その結果、融合した斑点では、二つの斑点の中間の断面において高さ方向への成長が単独の斑点に比べ促進されることなどを見出した。しかし、一本のIプローブによる条件付き計測であったため、その機構の詳細に関しては、明確な説明を与えるまでには至っていない。

乱流斑点は多数の渦構造を内包しており、下流へいくにしたがってそれらが新たに生成されるために流れ方向およびスパン方向に成長することが、可視化による観察などから指摘されている^{2,3)}。従って、相互干渉が乱流斑点の成長に影響を及ぼす機構を解明するためには、斑点の成長に重要な役割を果たしている内部構造が、相互干

渉によってどのように変化するかを調べる必要がある。しかし、そのような小規模な構造は、斑点の実現の度に大きさや位置、個数などが異なる⁴⁾ため、通常のアンサンブル平均手法ではそれらを平滑化した大規模な構造^{5,6)}しか観察することができない。また、可視化のみでは定量的な評価が困難である。これに対し、Sankaranら⁴⁾は斑点の鉛直断面を多数のXプローブを用いて計測することにより、数個の渦が流れ方向に並んで存在している様子を描き出し、個々の渦構造に関してレイノルズ応力の寄与率などを求めている。Singer⁷⁾はDNSにより、流れ方向の渦度成分の空間的分布を求め、多数の縦渦が斑点内部に存在する様子を示した。これらの研究は乱流斑点の内部構造に関する定量的な情報を示し、単独の斑点の構造を解明する上で重要な手がかりを与えた。しかし、斑点の相互干渉に関して系統的に調べた研究は少なく、定量的データの蓄積が必要である。

本研究では、熊手型Iプローブを用いた水平断面の計測から、斑点内部の小規模構造を抽出する手法としての有効性を確認するとともに、相互干渉による斑点の平均特性の変化と、その内部構造との関連について検討した。

2. 実験装置・実験方法

境界層平板 (7.7m × 0.75m) は風洞測定部 (8 × 0.75 ×

*豊橋技術科学大学

0.44m³)に、鉛直に設置されている。平板と対向する壁の広がり角を調整し、圧力勾配のない層流境界層を形成した。前縁から700mmの位置に吹き出し孔(孔径1mm)がスパン方向に40mm間隔で二つ設けられている(図1)。スピーカに電圧を印加し、微小噴流(最大流速10m/sec)を初期擾乱として与えた。主流流速は $U_\infty=5\text{m/sec}$ 、吹き出し位置における境界層排除厚さに基づくレイノルズ数は約780、境界層厚さは $\delta_0=7.5\text{mm}$ である。座標原点は二つの吹き出し孔の中央とした。計測位置は $X=300\text{mm}$ 、 500mm であり、ここでの境界層厚さはそれぞれ $\delta=9.0$ 、 9.8mm である。実験は $Z=20\text{mm}$ 、 $Z=-20\text{mm}$ に位置する吹き出し孔からそれぞれ単独の斑点を形成した場合についても行い、2孔共用いて2つの斑点を同時に形成した場合との比較を行った。斑点の発生周期は前に発生した斑点と次の斑点が流れ方向に干渉しない2sec($X=300\text{mm}$)および、3sec($X=500\text{mm}$)とした。

計測には16チャンネルの熊手形Iプローブ(線長1mm、線径 $5\mu\text{m}$)と定温度型熱線流速計を用いた。スパン方向に並べられた各Iプローブの間隔は5mmである。得られた信号はA/D変換(5kHz)された後、線形化演算を行った。また、瞬間流速 $U=U_t+u$ から瞬間速度変動 u および、256回の平均処理によりアンサンブル平均された速度変動 $\langle u \rangle = \langle U \rangle - U_t$ を求めた。ただし、 U_t は斑点を形成しないときの局所平均流速、 $\langle \rangle$ はアンサンブル平均値を示す。

3. 実験結果と考察

$Z=20\text{mm}$ で形成した単独の斑点が $X=300\text{mm}$ 、 $Y/\delta=0.4$ の計測位置を通過したときの瞬間速度変動波形 u/U_∞ の変化を図2に示す。斑点中心線($Z=20\text{mm}$)から離れるに従って速度変動の現れる時刻が遅れており、矢じり形状をした乱流斑点の瞬間的な外形を確認できる。しかし、波形を観察するのみでは内部の構造を連想する事は困難である。図3に図2と同じ斑点の、時刻 $T=120\sim 123\text{msec}$ における瞬間速度変動のスパン方向分布を示す。速度変動がスパン方向に波打つように見えるが、一つの山または谷が、わずかに一〜三点で捉えられているため、その振幅やスパン方向の周期を正確に知る事はできない。しかし、時刻 $T=120\sim 123\text{msec}$ の間にわたって、全体的な波形の形状は良く似ていることから、単なる瞬間的なランダム速度変動を捉えたものではなく、ある空間的な大きさを持ちスパン方向に速度変動が波打つような構造が存在する可能性がある。同図に示される速度変動のアンサンブル平均値 $\langle u \rangle / U_\infty$ のプロットと比較すると、 $Z < 0\text{mm}$ における周囲の層流との境界付近では、瞬間の速度変動とアンサンブル平均した速度変動は良く一致しており、再現性が良い。

これに対し、斑点中心線($Z=20\text{mm}$)の近くでは、瞬間の速度変動とアンサンブル平均した速度変動のずれが大きく、波形の再現性が悪いため、スパン方向に10~20mm程度の範囲で波打つような小規模な構造はアンサンブル

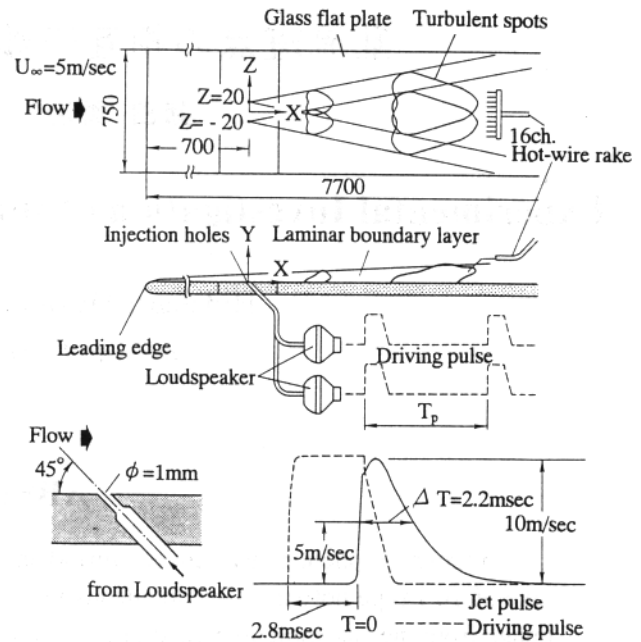


図1. 実験装置概略図 (単位: mm)

平均処理によって埋もれてしまうことが分かる。

次に、瞬間波形で観察された構造が空間的にどのように分布するのかを調べるため、図2の速度変動波形を等値線図として図4に示す。変動が2%以上になる領域は斜線で、-2%以下になる領域は灰色で示した。流れ方向を左から右とみなすため時間軸 T の向きは右から左とし、主流流速 U_∞ を乗じて流れ方向の長さスケールに変換した。ただし、乱流斑点は前縁が後縁よりも速く移流⁸⁾するため、一個の斑点が計測断面を通過する時間に大きさが二倍程度に成長する⁵⁾ことが知られている。従って、図4は乱流斑点の正確な空間スケールを表すものではなく、そのオーダーを見積もる目安である。この図から、瞬間の速度変動は斑点の内部で全く乱雑に分布しているわけではなく、変動が負になる領域(減速領域)や正になる領域(加速領域)が空間的に広がりを持つ島状に分布している事が分かる。その個々の形状は流れ方向に伸びた筋状を呈し、減速領域は主に斑点の前縁に沿って分布している。図4には $TU_\infty \leq 700\text{mm}$ の領域のみ示したが、筋状の減速領域や加速領域が存在するのはこの領域のみであり、 $TU_\infty \geq 700\text{mm}$ ($T \geq 140\text{msec}$)の領域は図2の瞬間波形からも分かるように、速度変動が単調に減衰していくcalmed region⁸⁾になっている。Matsui²⁾は可視化実験から、馬蹄形もしくはヘアピン形の渦群が乱流斑点を構成しており、流下に伴い斑点の両翼端部で次々に新たな渦構造が生成されるために斑点のスパン方向への成長が生じるとしている。また、Perryら³⁾も可視化によって多数のヘアピン渦が乱流斑点内部に存在する様子を観察しており、それらが千鳥状に配列した斑点のモデルを提案している。図4は、斑点の先端から前縁に添って互い違いに並ぶ減速領域と加速領域の分布を示しているが、その並び方はPerryらが提案したヘアピン渦が千鳥状に並

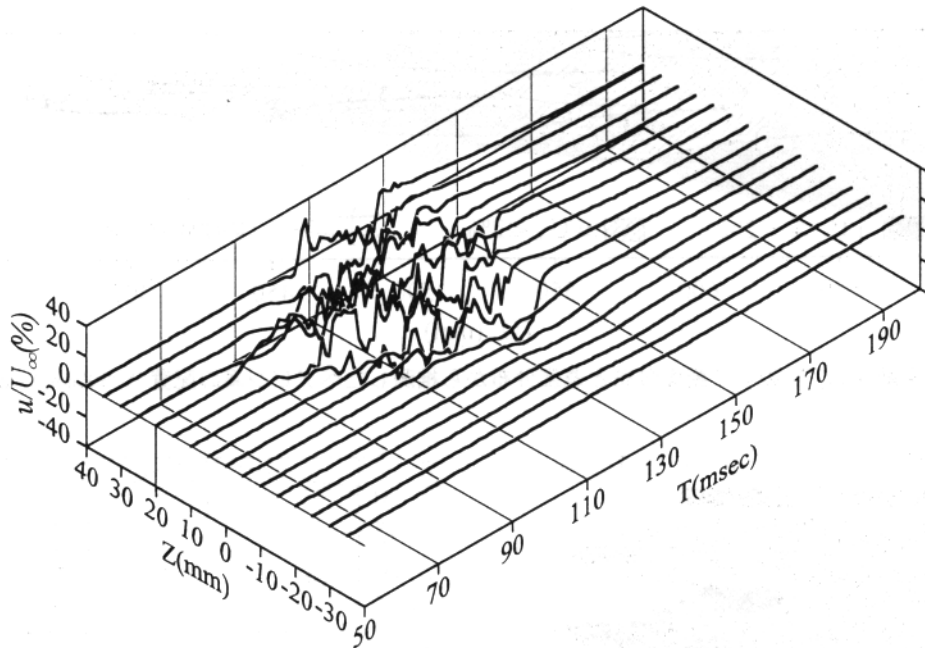


図2 Z=20mm で発生した単独の乱流斑点の通過に伴う瞬間速度変動波形 u/U_{∞} (%) の変化 ($X=300\text{mm}$, $Y/\delta=0.4$).

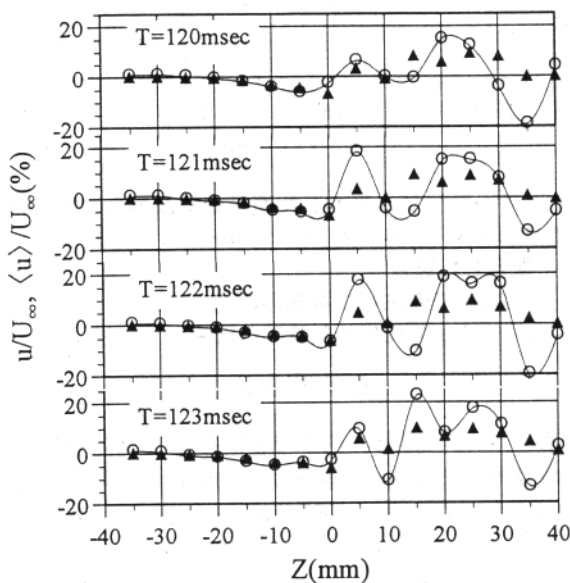


図3 速度変動のスパン方向分布 ($Z=20\text{mm}$ で発生した単独の斑点, $X=300\text{mm}$, $Y/\delta=0.4$).

—○—: 図2の瞬間速度変動 u/U_{∞} (%)

▲: アンサンブル平均された速度変動 $\langle u \rangle / U_{\infty}$ (%)

ぶ様子を連想させる。Matsui や Perry らの示した斑点の内部構造は、いずれも流れ方向に伸びた縦渦的な構造であることから、図4に示される筋状の領域は、同様な縦渦によって誘起された速度場であるとも考えられる。本速度場の分布から推測される渦構造の配置を図中に実線で模式的に示す。縦渦の回転運動による下向きの流れが正の u を、上向きの流れが負の u を誘起するものと考え、ヘアピン渦の脚部とその回転方向(図中に矢印で示す)を想定した。この場合、ヘアピン渦の頭部がどこに位置するのかは、一つの水平断面を観察するのみでは判断することは困難である。ここでは単に、どの渦対が一つのヘアピン渦の脚部に相当するのかを示すものとして図のよ

うに描いた。Perry らはヘアピン渦脚部のスパン方向間隔が境界層排除厚さの約4.9倍であるとしたが、図4からヘアピン渦の脚部の間隔を読み取ると10~20mmである。この値は本実験における境界層排除厚さ($\delta^* \approx 3\text{mm}$)の3~7倍の程度であり、Perry らの示した値と近い。このことから図4における筋状の減速領域及び加速領域の分布は、縦渦の存在に対応していることが推察される。ただし、速度の流れ方向成分のみの計測であることから現段階では渦構造と断定するには至っていない。

次に二つの斑点を同時に形成した場合の結果について述べる。図5にアンサンブル平均した速度変動の $Y/\delta=0.4$ における $Z-T$ 断面分布を示す。 $TU_{\infty}=350\sim 500\text{mm}$ に位置する下流側先端部の構造は元の斑点を明確に区別できるが、上流側($TU_{\infty} \geq 500\text{mm}$)の領域は互いに融合しており、元の斑点を区別できない。二つの斑点の間である $Z=0\text{mm}$ の周囲で、減速領域がピーク値を示すが、ここは単独の斑点それぞれの翼端部近傍に相当する。図6に $Y/\delta=0.4$ の $Z=0\text{mm}$ 及び、 $Z=10\text{mm}$ における速度変動のアンサンブル平均値を示す。実線は融合した斑点、破線は $Z=20\text{mm}$ で発生した単独の斑点、一点鎖線は $Z=-20\text{mm}$ で発生した単独の斑点を示す。二つの斑点の間である $Z=0\text{mm}$ における単独の斑点それぞれの波形は、振幅が異なるものの位相はほぼそろっている。融合した斑点の波形はどちらの斑点のものよりも減速のピーク値が大きく、それぞれの斑点の翼端部に存在する減速領域が重なり合った結果、さらに強い減速領域が形成されたことが分かる。ただし、二つの斑点を形成した場合の瞬間像(図示はしていない)から、図5に示される減速領域がピークになる位置の近傍において、単独の斑点より強い減速領域が瞬間的にも形成されているかどうかを、定量的に判断する事は困難であった。これは、単独の斑点であっても瞬間的には、アンサンブル平均で得られる融合した斑点の

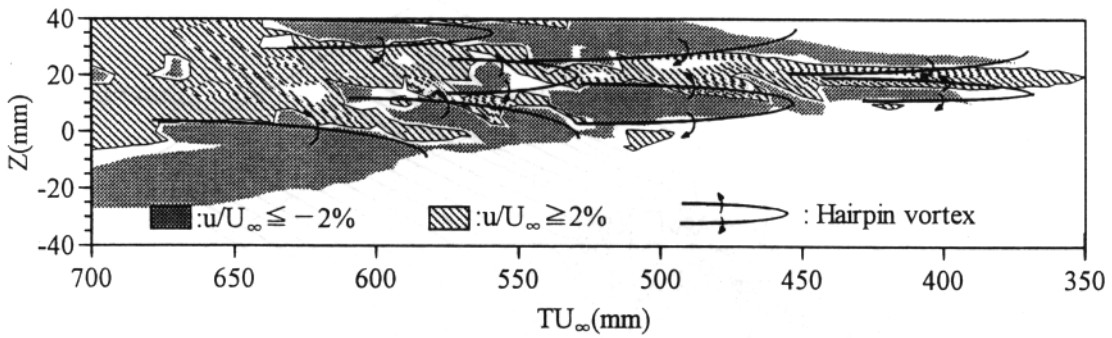


図4 瞬間速度変動 u/U_∞ (%) の Z-T 断面分布と速度分布から推測したヘアピン渦の配置 ($X=300\text{mm}$, $Y/\delta=0.4$).

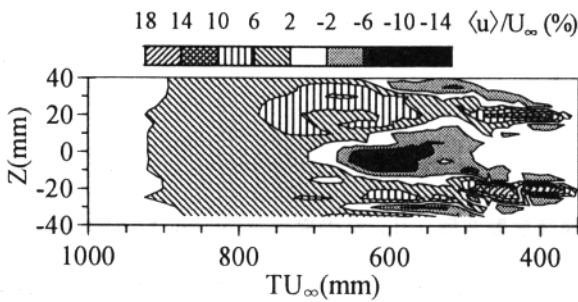


図5 2つの乱流斑点を形成した場合のアンサンブル平均した速度変動 $\langle u \rangle / U_\infty$ (%) の Z-T 断面分布 ($X=300\text{mm}$, $Y/\delta=0.4$).

ピーク値よりも大きな値を有する減速領域が形成されており、一回ごとの値のばらつきの方が、図6(a)における単独の斑点と融合した斑点の減速のピーク値の差よりも大きいこと、ピークの位置や減速領域の形状が実現のたびごとに異なるためである。

図6(b)に示すように、 $Z=10\text{mm}$ ではそれぞれの単独の斑点の波形は位相がずれている。しかし、融合した斑点の波形は $Z=20\text{mm}$ で発生した斑点の波形とほぼ一致しており、 $Z=-20\text{mm}$ で発生した斑点の影響をほとんど受けていない。このことから相互干渉の影響が現れるのは、二つの斑点の中間の領域に限られていることがわかる。この理由としては、乱流斑点の構造が、斑点のスパン幅全域に渡って広がるような大規模な単一構造⁵⁾ではなく、図4のように、流れ方向に伸びた筋状の構造がスパン方向に並んでいるために、個々の構造のスパン幅程度の範囲でしか相互干渉の影響が及ばないためではないかと考えられる。

ここには $X=300\text{mm}$ の結果しか示していないが、下流 $X=500\text{mm}$ では、二つの斑点の中間の領域において、融合した斑点は単独の斑点に比べ、アンサンブル平均された速度変動の減速領域が上方へ拡大する事が確認され、前報¹⁾で示した結果とほぼ同様の結果が得られた。図6に示すように、それぞれの斑点の翼端部に位置する減速領域が重なり合う上流側において、単独の斑点よりも強い減速領域が形成されたことが、減速領域の鉛直上方への発達を促進された原因ではないかと考えられる。

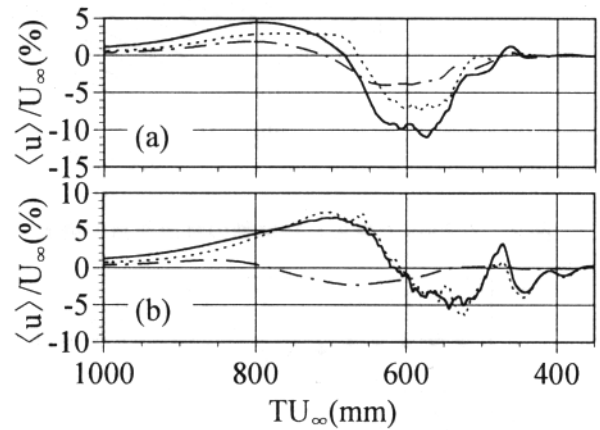


図6 アンサンブル平均した速度変動波形 $\langle u \rangle / U_\infty$ (%) の比較 ($X=300\text{mm}$, $Y/\delta=0.4$), (a) : $Z=0\text{mm}$, (b) : $Z=10\text{mm}$.

—: 融合した斑点
 ----: $Z=20\text{mm}$ で発生した単独の斑点
 - · - ·: $Z=-20\text{mm}$ で発生した単独の斑点

4. まとめ

多線プローブを用いて水平断面における乱流斑点の瞬間像を観察した結果、乱流斑点の前縁に沿って筋状の減速領域や加速領域が互い違いに分布すること、および、二つの斑点を同時に形成すると翼端部に存在するそれぞれの減速領域が重なり、極めて強い減速領域が形成されることが分かった。

参考文献

- 1) 蒔田・西沢: 航空宇宙技術研究所特別資料 SP-33 (1997).
- 2) Matsui, T.: Laminar-Turbulent Transition, Springer (1980) 288
- 3) Perry, A.E., Lim, T.T., & Teh, E.W.: J. Fluid Mech. 104 (1981) 387
- 4) Sankaran, R., Antonia, R.A., Bisset, D.K., & Sokolov, M.: Phys. Fluids A3, (1991), 1560
- 5) Wygnanski, I., Sokolov, M., & Friedman, D.: J. Fluid Mech. 78-4 (1976) 785
- 6) Cantwell, B., Coles, D., & Dimotakis, P.: J. Fluid Mech. 87-4 (1978) 641
- 7) Singer, B.A.: Phys. Fluids 8-2 (1996) 509
- 8) Schubauer, G.B., & Klebanoff, P.S.: NACA TN-3489 (1955)