

## No. 9

## 2つの乱流斑点間の相互干渉

蔭田 秀治\*, 西沢 啓\*

## Interaction between Two Turbulent Spots

Hideharu MAKITA and Akira NISHIZAWA

Toyohashi University of Technology

A pair of horizontally displaced turbulent spots was artificially generated in a zero pressure gradient laminar boundary layer to analyze the interaction phenomena between them. When the two spots were simultaneously generated side by side, they merged into a larger single spot downstream. The merged spot had a larger velocity-defect region on their center plane, where the turbulence energy was intensified from either of the original spots. When the two spots were generated with phase lag, the upstream one reduced the area of its velocity-defect region and the turbulence intensity apparently decreased there. The merged spot, however, conformed almost the same horizontal outline as the superposition of each single spot except for the region around their trailing edge.

**Key Words** : turbulent spot, laminar boundary layer, turbulence measurement, conditional sampling

## 1. 緒言

境界層の乱流遷移はその最終段階における乱流斑点の発生によって特徴づけられる<sup>1)</sup>。下流への線形的な発達や形状の相似性<sup>2)</sup>など、初期条件やレイノルズ数に依存しない普遍的性質を有する乱流斑点の構造、および、その成長機構を解明することは、境界層の遷移機構を解明する上で有力な手掛かりとなる。乱流斑点は人為的に形成することが比較的容易であり、かつ初期攪乱の与え方に依存しない<sup>3)</sup>。したがって、多数の斑点を人工的に発生させる手法が境界層遷移過程の制御手法の1つとして考えられる。例えば、乱流域が下流へ向かって急激に拡大していくという乱流斑点の性質を利用し、これを多数発生させることで遷移の促進を図ることなどである。この手法は通常のラフネスなどでは不可能な能動的な制御の可能性があると利点を有するが、その際、斑点間の間隔や発生周期をどのように決定することが最も効率的な制御につながるのかという判断には、斑点同士の相互干渉の仕方によって遷移領域の構造がどのように変化するかを正確に把握することが必要である。逆に、その様な斑点の相互干渉にたいする知見は、遷移機構その

ものを解明する上でも重要な手掛かりとなる。

層流境界層中の単独の乱流斑点に関しては、内部の渦構造や成長機構などがかなり詳しく知られている<sup>4)</sup>のに対し、複数の斑点に関しては、隣り合った2つの斑点の線形的な干渉を観察したもの<sup>5)</sup>や、様々な配列で複数の斑点を形成した実験<sup>6)</sup>、流れ方向に並んだ2つの斑点の干渉について調べた例<sup>7)</sup>などがあるものの、その微細構造や内部の輸送機構などに関して系統的に扱った研究は少なく、未だ不明な点が多い。

層流境界層が多数の乱流斑点で埋め尽くされる結果として生じる乱流境界層の構造が、乱流斑点の構造と共通の性質を持つことは予想される。このような観点に基づいた境界層の制御手法として、近接した間隔で多数の乱流斑点を発生させ、時空間的なスケールが制限された乱流境界層の形成を試みた例<sup>8)</sup>がある。この時、摩擦抵抗が軽減されることが報告されているが、そのメカニズムに関しては乱流境界層中の大規模な渦構造の存在が緩和されたためとの定性的な説明があるのみで、詳しく述べられてはいない。その様な手法が乱流境界層の制御手法として有効か否かの判定には、乱流斑点と乱流境界層中の秩序構造との関連について理解することも必要であるが、両者の構造の類似性が可視化による観察から述べられている<sup>9,10)</sup>ものの、研究例は少なく、それが明確に示

\* 豊橋技術科学大学

された例は未だ存在しない。

本研究では、複数の斑点を人工的に発生する手法を用いて、それらの発生間隔や配列をパラメトリックに変化させることにより、乱流斑点間の相互干渉によって斑点の構造や成長の様子がどのように変化するかを詳細に調べること、および、それに基づいて境界層遷移の制御を行なうことを目的としており、最終的には、乱流斑点と、乱流境界層中の秩序構造との関連性を明らかにしたいと考えている。本報ではその第1段階として、スパン方向に並べて発生させた2つの乱流斑点の相互干渉について調べた。

### 2. 実験装置・実験方法

実験に使用した境界層風洞は全長約16mの吹き出し型で、境界層形成用平板(7.7m×0.75m)は測定部(8×0.75×0.44m<sup>3</sup>)の片方の側壁から70mm、縮流胴出口から0.3mの位置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することにより、平板上に圧力勾配のない層流境界層を形成した。

図1に実験装置の概略を示す。前縁から694mmの位置に、平板に対して45°の角度で上流側に向けられた吹き出し孔(孔径0.5mm)が、スパン方向に40mm間隔で2つ設けられている。スピーカーに、鋸歯状的な電圧を周期的(1Hz)に印加し、微小噴流を初期擾乱として与えた。

主流流速は $U_\infty=5.0\text{m/s}$ 、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 $R_{\delta^*} \cong 8.05 \times 10^2$ である。座標原点は2つの吹き出し孔の中央とした。計測位置は $X=600\text{mm}$ であり、ここでの境界層厚さは $\delta=10.2\text{mm}$ である。実験は $Z=20\text{mm}$ 、 $-20\text{mm}$ 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Case 1

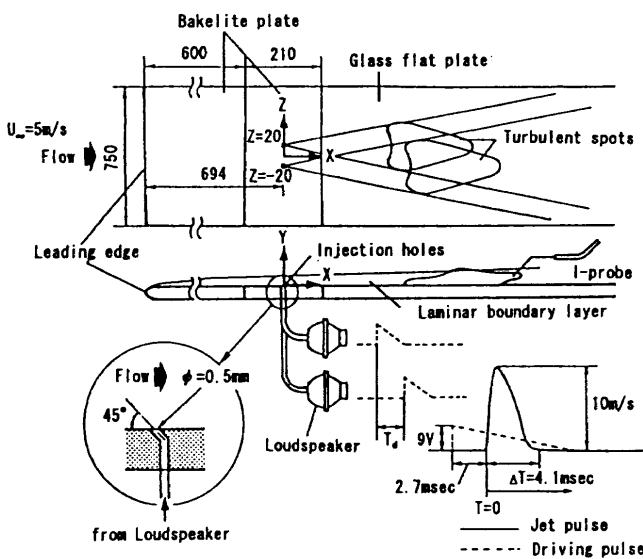


図1 実験装置概略図(単位:mm)

と2つの斑点を同時に形成したCase 2、流れ方向に位相差を持つ2つの斑点を形成したCase 3について行った。尚Case 3において、 $Z=20\text{mm}$ で発生した噴流の遅れ時間は $T_d=60\text{msec}$ である。

計測には定温度型熱線流速計とIプローブを用いた。得られたデータはA/D変換(5kHz)され、1波形当たり2000点のデータを取り込み、256回のアンサンブル平均処理を行った。

### 3. 実験結果と考察

実験はまずCase 1について行ない、単独に形成された2つの斑点がほぼ等しい形状と規模を有することを確認した。したがってCase 1については、主に $Z=20\text{mm}$ で形成された斑点のデータのみを示す。図2にCase 1の $Z=0\text{mm}$ における、斑点の通過に伴うアンサンブル平均速度分布 $\langle U \rangle$ の変化を示す。斑点が計測点を通過する以前( $T=100\text{msec}$ )の速度分布はBlasiusの理論値と良く一致しており、斑点の前後は層流境界層である。斑点の通過に伴って速度分布は変形を受け、上方で急激に減速( $T=170, 190\text{msec}$ )した後、下方で加速( $T=230\text{msec}$ )している。

図3に $Z=0\text{mm}$ における、アンサンブル平均速度変動 $(\langle U \rangle - U_i)/U_\infty$ の $Y-T$ 断面分布を示す。ただし、 $U_i$ は斑点を形成しない時の局所平均流速である。また、時間軸 $T$ については図の右側を上流とみなすことができる。図中灰色で示した部分は、アンサンブル平均乱れ強度 $\langle u' \rangle/U_\infty$ が2%以上になる領域であり、斑点の大きさを表す。Case 1において、斑点は図2の速度分布の変形に対応する $Y/\delta \geq 0.3$ の減速領域とその下方に加速領域を有している。このような減速・加速領域の存在は斑点の構造がスパン方向に渦度を持つ大規模な渦

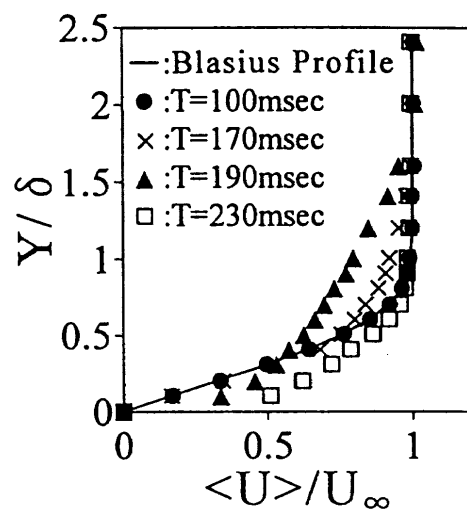


図2 斑点の通過に伴う速度分布 $\langle U \rangle/U_\infty$ の変化 (Case 1,  $Z=0\text{mm}$ )

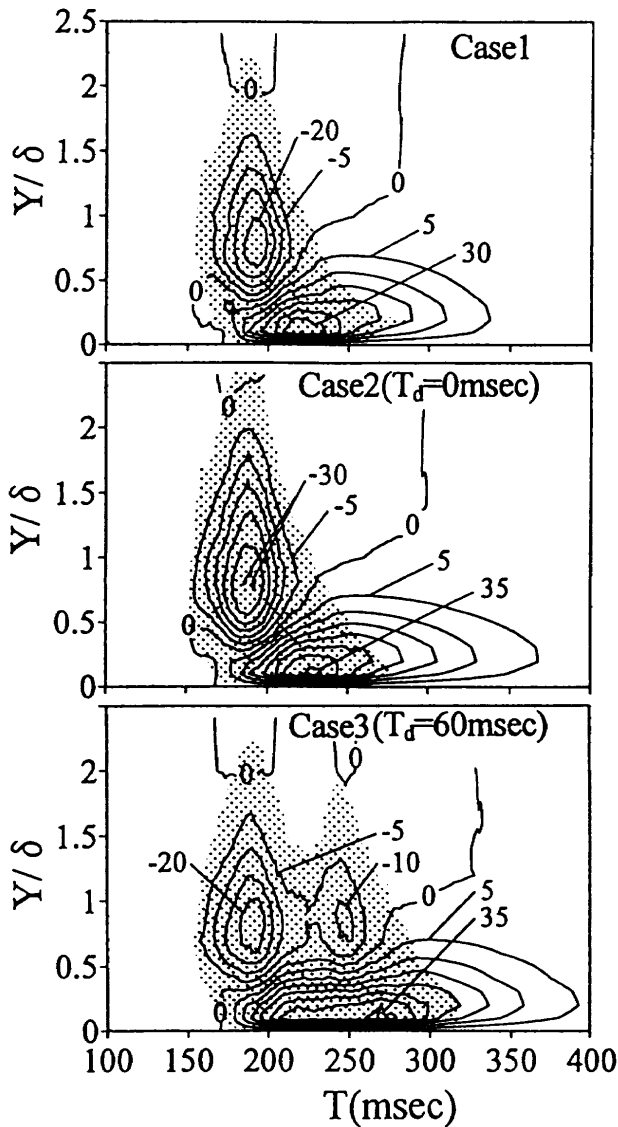


図3  $Y-T$ 断面における  $(\langle U \rangle - U_i) / U_\infty$  (%) の分布 ( $Z = 0\text{mm}$ , 等値線のレベルは外側が  $(\langle U \rangle - U_i) / U_\infty = \pm 5\%$ , 以下  $\pm 5\%$  ごとに变化, 灰色の部分は  $\langle u' \rangle / U_\infty \geq 2\%$ )

によって特徴づけられることを示している<sup>3,9)</sup>。実際の斑点の構造はこのような単一の大規模渦ではなく、それよりも小さい多数の渦から構成されていることが可視化による観察<sup>11,12)</sup>などで知られており、最近のDNSの結果<sup>13)</sup>も斑点内部の多数の渦構造を描き出している。しかし、斑点の全体的な形状の変化や比較的規模の大きい運動の寄与を見る場合には通常のアンサンブル平均手法による本研究結果でも問題ないと考えている。Case 2 (同位相) では、減衰領域、加速領域ともにCase 1のものよりも広く、各ピーク値も大きい。特に減速領域の鉛直上方への成長が顕著である。斑点の鉛直方向への成長機構としては、周囲の非乱流部分の entrainment によるものであると解釈されており<sup>3,9)</sup>、同位相で斑点が重なることによって内部の渦運動が強められ、entrain-

mentが増加したものと考えられる。しかし、これは1断面のみの観察による考察であり、その正確な評価を行なうには、斑点全域にわたって速度の各成分を詳細に計測する必要がある。一方、Case 1に比べCase 2の加速領域は、鉛直方向にはほとんど変化していないが、流れ方向上流側に伸長している。この加速領域の上流側の部分は、乱れがない“静隠領域 (calmed region)”<sup>2)</sup>として知られている。斑点の水平断面の可視化写真では、流れ方向に伸びた多数の縞が静隠領域内で観察されることが良くあり<sup>5,9)</sup>、静隠領域は流れ方向に軸を持つ縦渦によって構成されているのではないかと指摘<sup>9)</sup>もある。静隠領域の構造には未だ不明な点があるものの、相互干渉によってこの領域が拡張した原因としては、縦渦などのような別の渦構造の寄与も考慮しなければならないと思われる。

Case 3 ( $T_d = 60\text{msec}$ ) では、それぞれの斑点の減速領域が分離している。Case 1と比較すると、先行斑点の減速領域はその大きさがほとんど変化していないのに対し、後続斑点の減速領域は著しく狭くなっている。また、先行斑点の加速領域は、後続斑点の減速領域が重なることによって押しつぶされており、位相のずれによって互いの渦運動を弱め合う効果が確認できる。流れ方向に並んだ2つの斑点の相互干渉について実験的に調べた例<sup>7)</sup>では、後続斑点が、先行斑点の静隠領域に入ると、鉛直方向の成長が抑制されることが報告されており、その理由については静隠領域内の流れが安定であるためと述べられている。この場合、本実験とは斑点間の位置関係が異なるが、静隠領域がこのような効果を持つことは考慮すべき点であり、位相のずれによって互いの渦運動を弱め合う効果との関連や寄与の割合、そのメカニズムなどに関しては、斑点間の間隔や位相差を細かく変え、今後詳細に調べる必要がある。

また、アンサンブル平均乱れ強度  $\langle u' \rangle / U_\infty$  の分布形状から、斑点の大きさの変化に着目すると、Case 1と比べCase 2では乱れの分布域が鉛直上方に広がっている。一方、Case 3 ( $T_d = 60\text{msec}$ ) における分布域の流れ方向への広がり、位相がずれたことによる当然の結果であるが、後続斑点に対応する乱れの分布域は、減速領域と同様、先行斑点と比べ狭まっている。

図4に  $Y/\delta = 1.6$  における  $\langle u' \rangle / U_\infty$  の時間変化を示す。実線で示すCase 1に比べ、1点鎖線で示すCase 2では、図3における乱れ強度の分布域の拡大と対応してそのレベルも増加している。点線で示すCase 3は2つのピークを有しており、先行斑点に対応する乱れ強度の時間変化は、Case 1の単独の場合にほぼ一致し、後続斑点では分布域が狭まるのに対してそのレベルは著しく減少している。このことから、干渉によって渦運動が

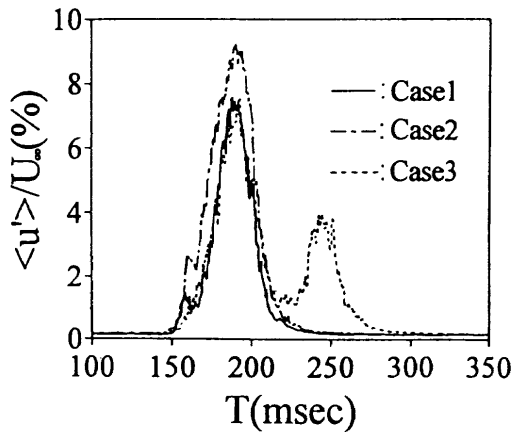


図4  $Z=0\text{mm}$ ,  $Y/\delta=1.6$ における  $\langle u' \rangle / U_{\infty}$  (%) の分布

強められるとそれに伴って乱れは増加し、また、渦運動が弱められると逆に乱れが減少することが解かる。

図5に  $Y/\delta=0.4$  における  $\langle u' \rangle / U_{\infty}$  の  $Z-T$  断面分布を示す。灰色で示す  $\langle u' \rangle / U_{\infty} \geq 2\%$  の領域は、融合した斑点の全体的形状である。 $\langle u' \rangle / U_{\infty} = 2\%$  の等値線は斑点の輪郭を表すが、Case 1 の単独の斑点それぞれの輪郭を点線で重ねて示す。単独の斑点の外形は、尖った前縁と、両端部の突き出た後縁が特徴的な、矢じり型の形状を有している。Case 2 の場合、外形に関しては、単独の斑点の後縁両端における突起状の形状が、 $Z=-50\text{mm} \sim 50\text{mm}$  付近においてそれぞれ消えている以外は、2つの斑点の輪郭を重ね合わせたものとはほぼ同じであり、 $Y-T$  断面で見られたような顕著な大きさの変化はない。Case 3 も同様に、融合した斑点の外形は単独の斑点の外形の重ね合わせとはほぼ一致している。したがって、スパン方向の成長に関しては相互干渉の影響をあまり受けていない。単一斑点のスパン方向の成長機

構としては、両サイドにおける新たな渦の生成とその外側へのシフト<sup>11)</sup>や、スパン方向に千鳥状に並んだ渦群の連鎖的生成<sup>12)</sup>などが提案されており、鉛直方向の成長機構として説明される entrainment とは異なる。これらの渦は、前述のスパン方向に軸を持つ様な大規模な渦ではなく、流れ方向に軸を持つ縦渦構造を有するものと考えられている。2つの斑点の内部に存在するこれらの渦が、相互の接近によってどのような相互干渉を生じるのかは今後詳細に調べる必要があるが、まだ重なりあっていない領域に存在している渦が、相手の斑点内の渦の影響をほとんど受けないことは、そのような渦構造モデルを支持するように思われる。

以上の結果から、2つの斑点間の位相差の違いは相互干渉に影響を与えることがわかった。このことは境界層遷移の過程で、局所的な斑点間の相互作用の違いが、下流の乱流構造に大きな影響を与える可能性があることを示すとともに、多数の乱流斑点を、それらの配列を変化させて発生することにより、遷移領域における境界層の速度分布や乱れの特徴を制御できる可能性があることを示している。

#### 4. 結 論

- ① 2つの斑点の中間断面における相互干渉の影響は、減速領域の変化に顕著に現れ、同位相の場合、融合した斑点は広い減速領域とそれに伴う強い乱れ強度を有するが、位相差がある場合、後続斑点の減速領域は著しく減少し、それに伴って乱れ強度が弱まる。
- ② 融合した斑点のスパン方向のスケールは、相互干渉の影響を受けにくく、単独の斑点のそれぞれの外形を重ね合わせたものとはほぼ一致する。

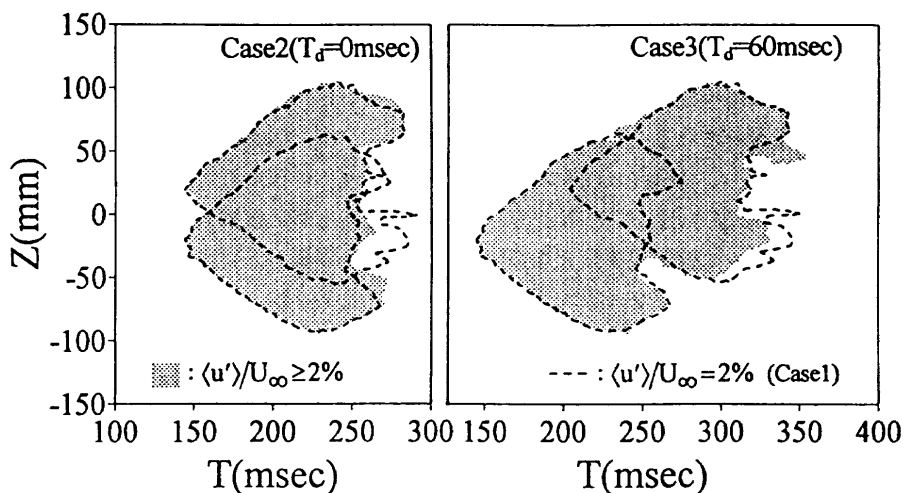


図5  $Z-T$  断面における  $\langle u' \rangle / U_{\infty}$  (%) の分布  
( $Y/\delta=0.4$ , 灰色の部分は  $\langle u' \rangle / U_{\infty} \geq 2\%$ , 点線はCase 1 の  $\langle u' \rangle / U_{\infty} = 2\%$ )

## 参考文献

- 1) Emmons, H. W. : J. Aeronaut. Sci. 18 (1951) 490.
- 2) Schubauer, G. B., & Klebanoff, P. S. : NACA TN-3489 (1955).
- 3) Wygnanski, I., Sokolov, M., & Friedman, D. : J. Fluid Mech. 78-4 (1976) 785.
- 4) Riley, J. J., & Gad-el-Hak, M. : Frontiers in Fluid Mechanics, Springer (1985) 123.
- 5) Elder, J. W. : J. Fluid Mech. 9 (1960) 235.
- 6) Savas, O., & Coles, D. : J. Fluid Mech. 160 (1985) 421.
- 7) Cherneys, M., & Pauley, W.R. : ASME FED 184 (1994) 21.
- 8) Goodman, W. L. : AIAA J. 23-1 (1985) 155.
- 9) Cantwell, B., Coles, D., & Dimotakis, P. : J. Fluid Mech. 87-4 (1978) 641.
- 10) Sankaran, R., Sokolov, M., & Antonia, R. A. : J. Fluid Mech. 197 (1988) 389.
- 11) Matsui, T. : Laminar-Turbulent Transition, Springer (1980) 288.
- 12) Perry, A. E., Lim, T. T., & Teh, E. W. : J. Fluid Mech. 104 (1981) 387.
- 13) Singer, B. A. : Phys. Fluids 8-2 (1996) 509.

