

乱流斑点の二重構造

名城大 理工 松井辰彌

1. まえがき

乱流斑点の研究は、流れの可視化に始まり、その後熱線風計によって詳細な測定が行なわれるようになった。しかし、流れの可視化による研究と熱線風速計による研究と、必ずしもすべて一致した結果が得られているわけではない。この不一致を解消するために、一つの考え方として、乱流斑点内の流れの構造の二重性を提案しようとするものである。

2. 乱流斑点の構造と成長機構

これに関しては谷 (1) による要約がある。その後 Coles and Barker (2) は、圧力一定の層流境界層に発生する乱流斑点は本来一つの大きな渦より成るということを述べている。

Wynanski, Sokolov and Friedman (3) は、実験結果から Coles 等の結論に賛成している。しかし、その後これとは違った乱流斑点の構造が Cantwell, Coles and Dimotakis (4) によって提案され

ている。即ち、彼等は「平均の乱流斑点」は大小二つの渦から成るという構造を持つとしている。これらの著者は conditional sampling と ensemble mean の方法を用いて「平均の乱流斑点」の像を描くことを試みている。しかし、実際の乱流斑点はかなりの速さで常に成長しつゝあり、Cantwell 等の測定によれば、一定点を乱流斑点の前縁が通過してから後縁が通過するまでの時間内に、乱流斑点はその大きさがほぼ二倍になる。そこで、乱流斑点が一つの大きな渦、あるいは大小二つの渦から成るとすれば、このような渦は、斑点の前縁と後縁とが一定点を通過する時間内にその大きさが二倍になるまで成長しなければならない。ここで、どのような機構によつてそのような急速な成長が行なわれるのかという問題が起こる。なお、それ以前の問題として、このような急速な成長のどの段階での「平均の乱流斑点」の構造を彼等は調べているのか、同じ段階についで調べているのであろうかという問題がある。さらにその成長の間、乱流斑点は一つの大きな渦、あるいは大小二つの渦という同一構造を保持しているものであろうかという問題もある。

このような一つあるいは大小二つの渦から成るという乱流斑点の構造の見方に対して、多数の渦から成るという見方もある。

その一つは Prandtl の撮った写真である。Schlichting は、T. S. 波の中立曲線の下の方の上の一点に対応する流れの説明にこの写真を引用している (5) が、この一連の写真は、T. S. 波を表わす流れではなくて、乱流斑点の成長を示す写真であって、乱流斑点は次々に新たに渦を発生することによって縦方向に成長する様子が示されている。

Prandtl の写真はアルミ粉によって流れを可視化したものであるが、我々が水素気泡法によってとった写真も、次々に新しい渦が発生することによって乱流斑点が成長することを示している。(6) この実験によれば、先づ、乱流斑点内には幾つかの小さい渦、ヘアピン渦とでも言うべき渦が存在するのが見られ、乱流斑点が一つの大きな渦であるとは思われない。下流方向へ進むに従って、斑点の両側に新たにヘアピン渦が発生すると共に、斑点の後縁、すなわち上流側の端部にも新しい渦の発生が観察される。このようにして斑点は横方向と同時に縦方向にも成長して行くのである。

最近、第1回アジア流体力学会議において、Van Atta は、平板境界層内の乱流斑点の壁面上の圧力分布の測定結果を発表した。その圧力分布は、乱流斑点が一つの矢頭形の渦から成ることを示唆している。

この会議での Coles の発表においても、乱流斑点は大きな一

つの渦であるという主旨が含まれていたもので、もしそうだとすれば、その成長の機構はどのように説明されるかと尋ねた所、彼は講演では使わなかつた一枚のスライドを示して、このスライドの流れのパターンがその機構を示唆してゐるようと思われるというのであつた。そのスライドは色素法による流れの可視化写真であつて、その写真には矢頭形の一つの大きな渦と思われるものと、そのまわりにスパイラル状に巻きつてゐるように見えるすいらしいものが見られた。彼は、この二次渦らしいものが問題を解く鍵ではな里かと思われるという意見であつた。

以上を要約すれば次の通りである。

(1)、色素法による流れの可視化によれば、乱流斑点は一つの大きな渦のように見える。熱線風速計の測定によれば、乱流斑点は一つの大きな渦、又は大小二つの渦から成る。この点で色素法による可視化の結果と一致してゐる。しかし、この場合、乱流斑点の成長の機構を説明することは困難である。

(2)、水素気泡法による流れの可視化によれば、乱流斑点内には多数のヘアピン渦が存在するように見える。この場合、その成長機構は、斑点の両側と後縁部とに新しい渦が発生することによつて説明される。

3. 乱流斑点の二重構造

先づ、流れの可視化の方法の違いによって、可視化された流れのパターンに相違の起こり得ることについて述べる。

色素法を用いて流れを可視化する場合、着色水は着色されたり水と比重はほぼ同じであるがやゝ大となっている。水素気泡法の場合、水素気泡は水に比べて比重が非常に小さい。流れの中に渦があるとその中心部の圧力は周囲より低いため、水素気泡はその渦の中心部に容易に集中する。従つて流れの中の比較的小さい渦をもよく可視化することができる。しかし、これらの集合体としての大きい渦を可視化することは難しく、それを可視化するためにはカメラを斑点と共に走らせ、かつ適当な長時間露出を与える等の方法がとられなければならないであろう。他方、色素法を用いた場合、これらの小さい渦を可視化することはできなから、大きい強い渦があれば、それを可視化することができる。乱流斑点の可視化において、色素法を用いた場合一つの大きい矢頭形のパターンが見られ、水素気泡法を用いた場合、多数のヘアピン形渦のパターンが見られるのは上記の理由によるものと思われる。

次に、熱線風速計によつて conditional sampling を行ない、ensemble mean をとると、水素気泡法によつて可視化されたような小さい渦は、一つの斑点内での配置と他の斑点内の配置

とでランダムに相異してゐると思われるので、これらのヘアピン渦による速度変動は互に cancel されて現われなくなり、結局大きな渦のみが結果として残るものと思われる。従つて、その結果は色素法による可視化のパターンと対応することになる。

以上のことから次のように考えられる、即ち、乱流斑点は平均的に見れば一つの大きい矢頭形の渦であるが、その内部には多くのヘアピン形の小さき渦が含まれてゐる。乱流斑点の成長はヘアピン形の渦が新たにその西側と後縁部とに発生することによる。

Coles の示したスライドに見られた大きい渦に巻きついた二次渦は、大きい渦が境界層内の速度勾配によつて引き伸ばされたときに、その周囲の流体の一部がその渦の回転流に entrain されて、そこにあつたヘアピン渦が可視化されたものではないかと思われる。このような境界層内の速度勾配による渦の引き伸ばしの過程で乱流斑点への一様流からのエネルギーの供給が説明される可能性が考えられる。

乱流斑点を一つの大きい渦と見れば、それは乱流境界層の coherent structure と対比され、斑点内の小さきヘアピン渦は乱流境界層内の従来述べられてゐる random motion と対比されるであらう。こう考えると、乱流斑点は平均的に見れば一つ

の大きい矢頭形の渦であり，その内部に多くの小さいヘアピン形の渦を含むという二重構造は，極めて自然な見方であると言えよう。

4. むすび

乱流斑点は，平均的には一つの大きい矢頭形の渦と見られる。これは乱流境界層の *coherent structure* に対応する。斑点の内部には多数の小さいヘアピン形の渦が存在する。これは乱流境界層内の *random motion* に対応する。乱流斑点はこのような二重構造を持つものと思われる。

文 献

1. Tani, I.: 1969, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.1, pp.169-196.
2. Coles, D. and Barker, S.J.: 1975, *Turbulent Mixing in Nonreactive and Reactive Flows* (ed. S.N.B. Murthy), p. 285, Plenum.
3. Wygnanski, B., Sokolov, N. and Friedman, P.: 1976, *J. Fluid Mech.*, 78, 785-819.
4. Cantwell, B., Coles, D. and Dimotakis, P.: *J. Fluid Mech.*, 87, 641-672, 1978.
5. Schlichting, H.: 1979, *Boundary Layer Theory*, 7th ed., McGraw-Hill,

pp. 474-475.

- 6 . Matsui, T. : 1979, Laminar-Turbulent Transition, ed. Eppler, R. and Fasel, H., Springer, pp. 288-296.