

近接して並走するヘアピン渦の結合 Connecting of the Hairpin Vortices Traveling Parallel to Each Other

○山口大翔¹, 川田治斗², 関谷直樹³*Hiroto Yamaguchi¹, Haruto Kawata², Naoki Sekiya³

Abstract: It was proposed that when two hairpin vortices close together, they will merge or reconnect. The purpose of this study was to experimentally confirm this phenomenon. Two hairpin vortices were made to travel in parallel in a laminar boundary layer, and we investigated their downstream development. From the results obtained, it was found that if the distance between the two hairpin vortices is within twice the width of the vortex, the two hairpin vortices reconnect. Furthermore, it was found that the phenomenon of two hairpin vortices merging does not occur.

1. 緒言

境界層の乱流遷移過程では、 Λ 渦やヘアピン渦といった3次元的な管状の渦が発達・崩壊し、乱流斑点と呼ばれる大規模な渦構造が形成される。この3次元渦の発達過程では横幅方向に渦構造が生成されることを契機に乱流斑点への遷移、すなわち渦構造の微細化(崩壊)が急速に進行することが明らかとなっており^[1]、近接して横幅方向に並んだ渦構造が崩壊現象に重要な役割を果たすと考えられる。Wark と Nagib は、近接して並んだ2つの3次元渦の振る舞いについて、2つの渦が1つに融合するモデルと、渦が分離し再結合する繋ぎ変わるモデルを提案している^[2]。崩壊前であっても斑点内には複数の渦が存在しており、2つの渦間に生じるこれらの現象を観察することは困難である。そこで、本研究は層流境界層内に近接して並走する2つのヘアピン渦を人工的に生成し、2つの渦間に生じる現象を実験的にとらえることを目的とした。

2. 実験装置および方法

実験には平板が設置された回流型の低乱風洞を使用した。平板には前縁より600mm下流に境界層に攪乱を与えるための直径1mmの小孔が複数設けられている。本研究では2つのヘアピン渦が近接するように3mmおよび4.5mm離れた小孔を用いた。各小孔にはチューブを介してスピーカーが接続されており、スピーカーコーンの振動により攪乱ジェットを噴出させヘアピン渦を生成した。スピーカーに印加する駆動電圧の時間差を調整することで、2つのヘアピン渦が近接して並走する現象を再現した。図1にスピーカーに印加した駆動電圧と小孔中央で計測したジェットの速度波形の例を示す。ほぼ等しい2つのパルス状のジェットが同時に噴出していることがわかる。本研究では攪乱ジェッ

トの波高値を単独で生成されたヘアピン渦が下流で減衰する強さ(主流速度 U_0 の40%)とした。

平板上に発達させる境界層は小孔位置における排除厚さに基づくレイノルズ数が $Re^* = 990$ の層流境界層とした。この時、主流速度は約8.5m/sである。速度分布の計測にはI型熱線風速計を用い、スピーカーへの印加電圧の立ち上がりトリガーとして10kHzで2048点のデータを64回繰り返し採取した。座標は中央の小孔中心を原点とし、主流方向を x 、壁面垂直方向を y 、幅方向を z とした。

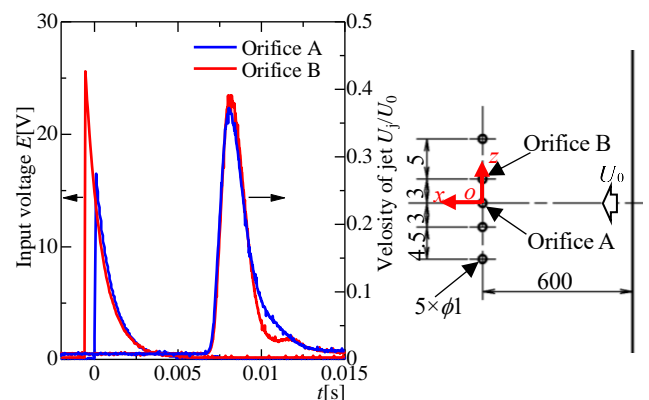


Figure 1 Velocity profiles of disturbance jet at center of each orifice.

3. 結果および考察

初めに、各小孔から単独の攪乱ジェットを噴出して生成したヘアピン渦の結果を図2に示す。図は2つのヘアピン渦の位置関係を明確にするために結果を重ねて示していることに注意されたい。図に示した等値面は境界層の平均速度からの偏差速度の集合平均の等値面で、黄色から赤色で示した領域は層流境界層よりも高速な領域を、緑色から青色で示した領域は低速な領域をそれぞれ示し、軸スケールは粘性長さで無次元化して示している。ヘアピン渦の脚部の内側では脚部間

に生じるイジェクションにより、低速領域が形成され、外側ではスイープにより高速領域が形成される。ヘアピン渦の中心はこの低速と高速の境に位置し、攪乱によって生成されて間もない $x=30\text{mm}$ ではヘアピン渦の幅はどれも $z^+ = 30$ 程度であると推測される。小孔間隔が 3mm ($\Delta z^+ = 40$) の場合、ヘアピン渦の頭部付近の外縁の高速領域の一部が重なるほど2つのヘアピン渦が近距離に位置することがわかる。一方、小孔間隔が 4.5mm ($\Delta z^+ = 59$) では高速領域が重ならないほど離れていることがわかる。図3に2つの小孔より同時に攪乱を与え並走する2つのヘアピン渦を生成した結果を図3に示す。ヘアピン渦の頭部に着目すると、小孔間隔が 3mm ($\Delta z^+ = 40$) では2つのヘアピン渦の頭部に相当する低速領域が互いに近寄り、繋がっていることが確認できる。一方、小孔間隔が 4.5mm ($\Delta z^+ = 59$) では低速領域は上流の $x=30\text{mm}$ 同様の距離を保って離れたままであることがわかる。Warkらは2つのヘアピン渦が近接すると、ヘアピン渦の内側の脚部が消失し、1つのヘアピン渦へと融合するモデルと、内側および外側の脚部同士が繋ぎ変わり、外側に大きなヘアピン渦、その内側に逆回転するU字型の渦が配置する二重構造のと変成するモデルを提案している。頭部が繋がった図3の2つのヘアピン渦の中央部は高速領域のままであることから、Warkらが提案した

モデルの繋ぎ変えが生じていると推測される（融合した場合中央部は低速領域となる）。以上の結果から、単独のヘアピン渦の幅 ($z^+ = 30$) の2倍程度に離れると2つのヘアピン渦は並走し、これより近接した配置では繋ぎ変えが生じることが明らかとなった。今後、ヘアピン渦の強さ、レイノルズ数（粘性長さ）を変化させて、ヘアピン渦の幅と繋ぎ変えが生じる距離の関係性について系統的に調べることを計画している。

4. 結言

- (1) ヘアピン渦幅程度に近接して配置されたヘアピン渦は、頭部で渦の繋ぎ変えが生じる。
- (2) 2つのヘアピン渦が渦幅の2倍程度離れると頭部で渦の繋ぎ変えが生じることなく並走する。

参考文献

[1] 関谷 直樹, 松本 彰:「乱流斑点への遷移領域における不規則性の発達」, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 58, No. 678, pp. 210-217, 2010.
 [2] Wark, C. E. and Nagib, H. M. : “Relation between outer structures and wall-layer events in boundary layers with and without manipulation”, Proc. IUTAM, 1989.

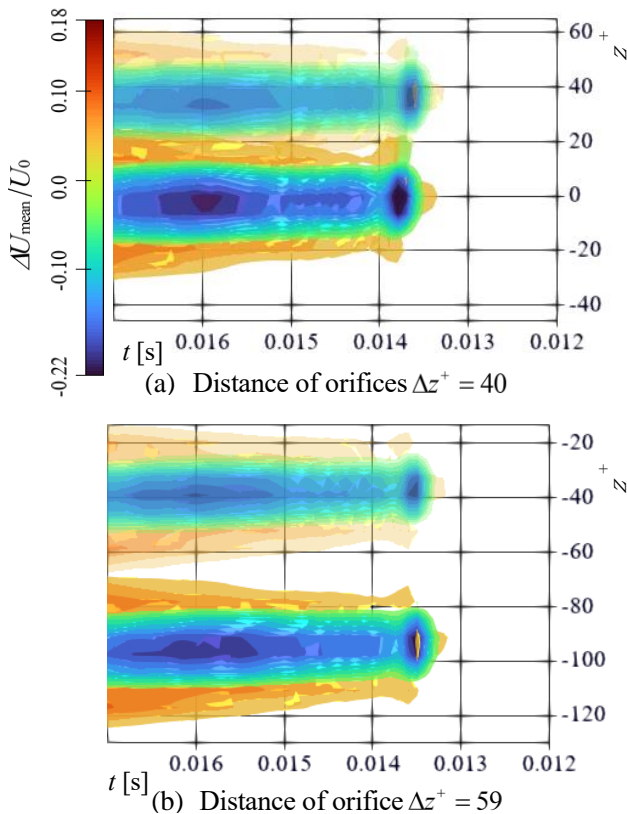


Figure 2 Iso-surface of $\Delta U_{\text{mean}}/U_0$ of hairpin vortex generated by single disturbance at $x=30\text{mm}$.
 *superimposed image

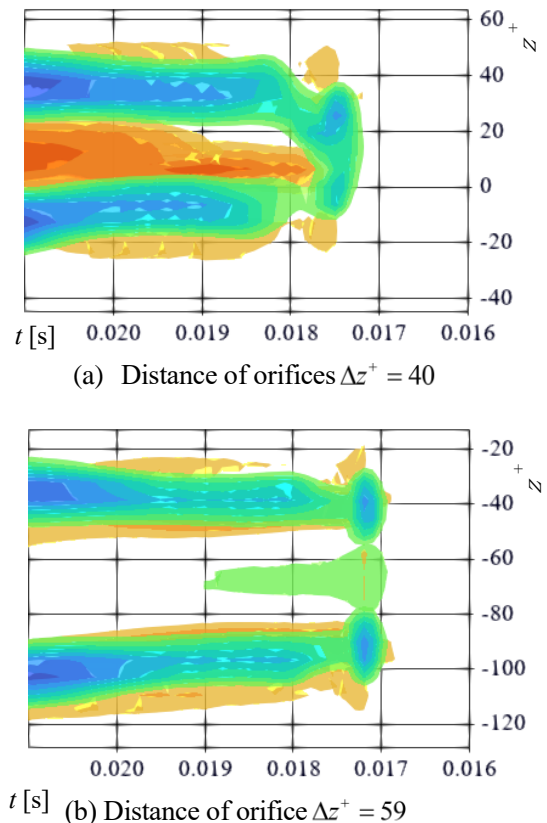


Figure 3 Iso-surface of $\Delta U_{\text{mean}}/U_0$ of hairpin vortices generated by dual disturbances at $x=60\text{mm}$.