

渦輪による渦のつなぎ換えに関する実験

横浜国立大学・工学府 松村 直樹(Naoki Matsumura)

Department of Physics, Faculty of Engineering,
Yokohama National University

横浜国立大学・工学研究院 渡辺 慎介(Shinsuke Watanabe)

Department of Physics, Faculty of Engineering,
Yokohama National University

1. 概要

同じ方向に進む二つの渦輪の相互作用に関する実験を行い、渦輪対が一つの歪んだ楕円渦輪につなぎ換わり、その後再び二つの渦輪へとつなぎ換わる様子を実験により観測した。二回目のつなぎ換えの際、S.Kida らの研究で Bridging と呼ばれる現象を実験により初めて観測し、彼らのシミュレーション結果(S.Kida & M.Takaoka & F.Hussain^{1), 2)}, S.Kida & M.Takaoka³⁾)と類似した結果を得た。

Bridging が何故、従来のつなぎ換え実験(T.Kambe & T.Takao⁴⁾, T.Fohl & J.S.Turner⁵⁾, Y.Oshima & S.Asaka⁶⁾, Y.Oshima & N.Izutsu⁷⁾)では観測できなかった主な理由は渦輪がインクや煙により可視化されているためである。渦は引き伸ばされたときに、引き伸ばされた個所の渦度は強くなるが、インクや煙は引き伸ばされた個所でより拡散してしまう。このような渦とトレーサの運動の違いによりインクや煙では渦度領域をうまく表すことが出来ず、つなぎ換え詳細観測が困難になる。しかし、本実験では渦輪の高速回転によるキャビテーションにより渦輪は水中で空気芯により可視化される。空気芯は渦芯内部に閉じ込められるため、渦度領域を可視化することができ、つなぎ換えの詳細観測につながったと考えられる。

2. 局所誘導方程式

曲がった渦糸は自己誘導により変形する (F.R.Hama⁸⁾)。静止した無限に広い非圧縮流体中に循環 Γ の曲がった渦糸が Fig.1 のようにあるとする。座標軸は原点 O で渦度の向きと接線方向が一致するようにとり、単位ベクトル t, n, b はそれぞれ接線、主法線、陪法線方向である。原点 O 付近の Q 点での速度 v はビオ・サバルの法則を用いることにより

$$v = \frac{\Gamma}{2\pi r} (b \cos \phi - n \sin \phi) + b \frac{\Gamma}{4\pi R} \ln \frac{R}{r} + O\left(\left(\frac{r}{R}\right)^0\right) \quad (2.1)$$

と表せる。ここで r は原点 O から Q 点までの微小距離あり、 R は原点 O での曲率半径を表す。 r を渦糸の半径とすると(2.1)式の第一項は渦糸周りの循環流を表し、第二項が陪法線方向の速度を表す。注目するのは第二項であり、原点 O での渦糸の変形を表すものになる。 $r \ll R$ より $(\Gamma/4\pi)\ln(R/r) = c$ (定数) と見なすと第二項は

$$v_b = c\kappa b \quad (2.2)$$

($1/R = \kappa$ とした)となり、渦糸が曲率に比例し陪法線方向に動くことが分かる。

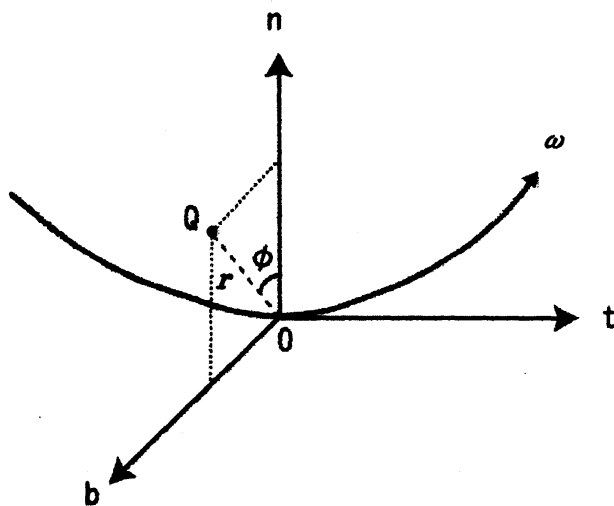


Fig.1. 渦糸の局所運動

3. 実験方法および実験装置

実験装置を Fig.2 に示す。アクリル製の水槽($0.5 \times 0.5 \times 1.3 \text{ m}^3$)上部に渦輪発生装置(Fig.3)が取り付けられ、それは一端(下方)が開放しているステンレスパイプ($\phi = 45 \text{ mm}$)の中に一対の電極が固定されたものである。電極にはステンレス製の寸切りボルト($\phi = 6 \text{ mm}$)を使用し、これらの電極はデルリンによって互いの電極および渦輪発生装置を構成する部品と絶縁されている。電極の先には直径 0.2 mm 、長さ 12 mm のタングステン線(Exploding wire)が取り付けられている。ステンレスパイプ内に空気が混入しないように噴水線をパイプの上端開口部よりも上にとった。渦輪発生装置の下端開口部には取り外しが可能なオリフィス取り付けられている。本実験は、等しい大きさの穴が二つ開いたオリフィス(Fig.4)を用いて行った。穴の直径は 14 mm であり、穴の中心間距離は 21 mm である。

Exploding Wire 法を以下に記す。高電圧発生装置からタングステン線に高電圧が印加されると、

タングステン線は大電流によって発生するジュール熱によって瞬時に融解する。融解したタングステン線と水との間で高速の熱交換が起こりパイプ内で蒸気泡が生じる。発生した蒸気泡によりパイプ内の水が押し出され、出口のオリフィス付近で流れが巻き込み、渦度を生じ渦輪が生成される。渦輪の高速回転によって引き起こされたキャビテーションにより空気の芯で可視化された渦輪が観測できる。タングステン線に印加する電圧が高いほど生成する蒸気泡の体積は大きくなり、円筒形のパイプから出る水の量は多くなる。そのため、渦輪の初速度は速くなる。

渦輪の連続写真を撮影する機器として、ハイスピードカメラ (Hi-Dcam PCI 1000S, NAC) を用いた。撮影速度は 1000 frames/sec で撮影した。渦輪の正面からの画像を撮影するために水槽中に鏡を 45° の角度で設置してある。撮影対象物 (渦輪) への照明としてフトリフレクタランプ (500W) を用いた。

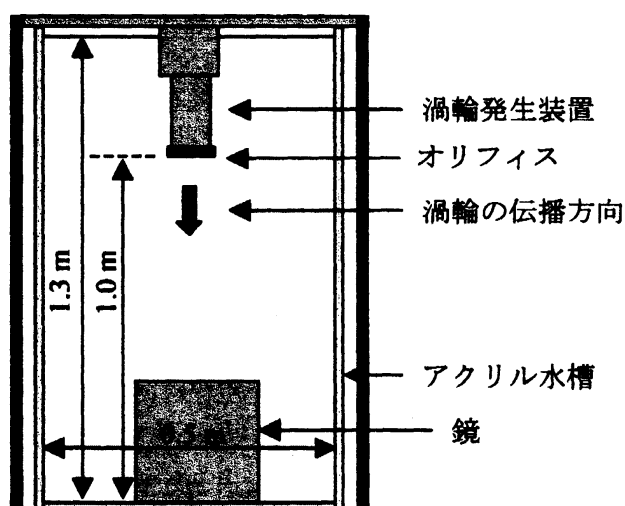


Fig.2. 実験装置図

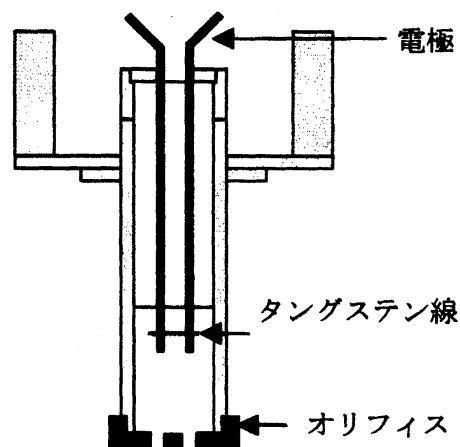


Fig.3. 渦輪発生装置

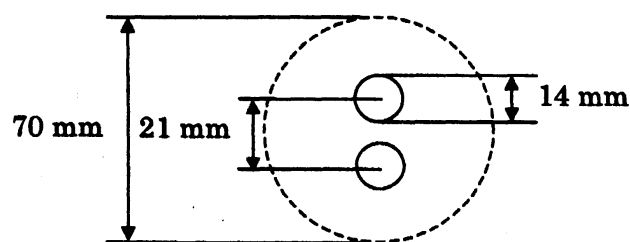


Fig.4. オリフィスの形状

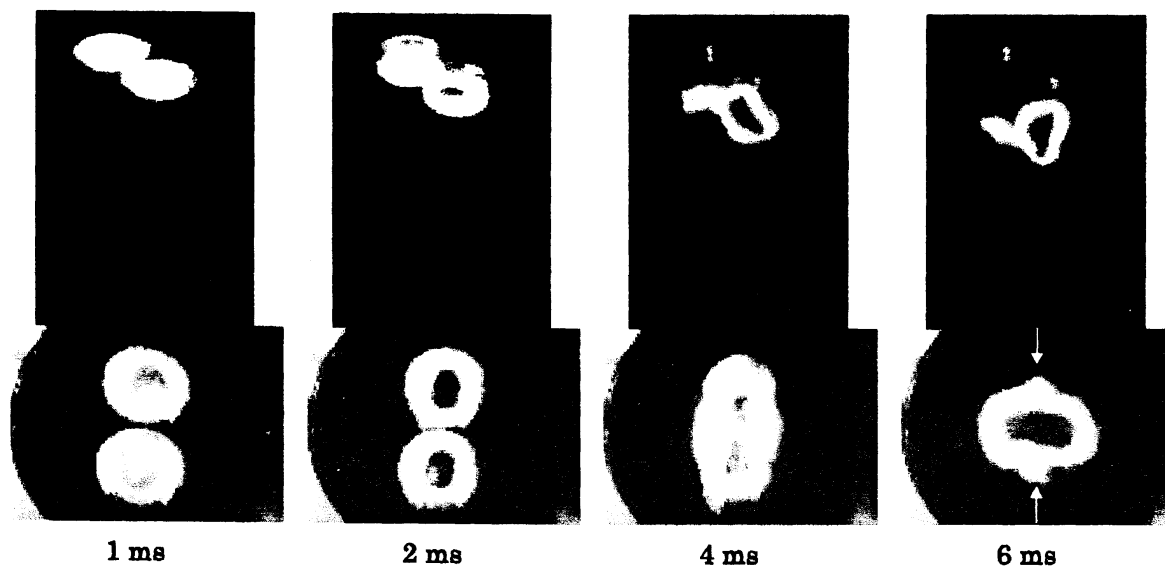
オリフィス直径(点線): 70 mm, 穴直径(実線): 14 mm, 穴の中心間距離: 21 mm

4. 実験結果

印加電圧 790 V の実験結果を載せた。印加電圧 790 V のとき、渦輪の初期伝播速度 U_0 は 4.62 m/s となった。レイノルズ数 $Re(=U_0 D/\nu)$ を求める際、代表長さは一つの穴の直径 $D(=14.0\text{ mm})$ 、水の動粘性係数 ν 、そして初期伝播速度 $U_0(=4.62\text{ m/s})$ を用いて計算すると、 $Re=6.05\times 10^4$ となった。

タングステン線融解時を $t=0\text{ ms}$ とし、 $t=1\text{ ms}$ 以降の実験結果を載せた。Fig.5 は斜め下から撮影した写真（上）と伝播方向から撮影した写真（下）である。

単独の円形の渦輪は自身がつくる速度場により直進する。しかし、渦輪が横に二つ並んだ場合、一方の渦輪が作る速度場の影響を他方の渦輪が受ける。このとき、双方のより近くにある渦管が強く影響を及ぼし合うため内側の渦管が外側の渦管に比べ遅れて伝播する。そのため二つの渦輪の伝播方向が向き合い、内側の渦管が接触し一回目のつなぎ換えが起こる（2～4 ms）。その結果、歪んだ一つの楕円渦輪が生成する（4 ms）。この楕円渦輪は各部分が曲率に比例し動くため三次元的に振動しながら伝播する（4～9 ms）。本来渦度を持った渦管同士は互いが作り出す速度場によって押し流されるため接触しづらい。しかし、渦管の曲率による局所誘導方程式の陪法線方向が、初め最も離れた場所に位置した渦管が接近し合う向き（6 ms の矢印の向き）となるため、その渦管が接触し二回目のつなぎ換えが起こる（9 ms 付近）。そして 10 ms 以降の写真は不完全なつなぎ換えの結果となっている。



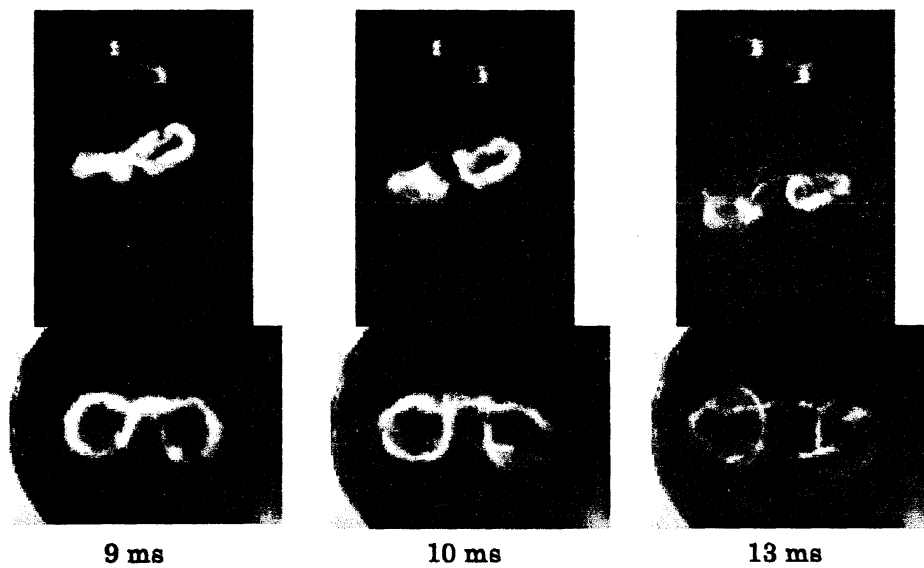


Fig.5. 渦輪の連続写真

(上) : 斜め下から撮影した写真 (下) : 伝播方向から撮影した写真

$U_0 = 4.62 \text{ m/s}$, $Re = 6.05 \times 10^4$

5. つなぎ換え詳細 (Bridging)

つなぎ換えの詳細を S.Kida らの論文を参考に二回目のつなぎ換えを例に挙げ説明する (Fig.6)。まず、接触した部分の渦線 (図(a)のハッチ部分) は渦度の向きが逆向きで粘性拡散によりキャンセルする。そして、渦線 p は相互作用領域 (図(a)のハッチ部分) の端で切りつながら二つの輪となる (図(a))。渦線 p は単独矢印の向きに渦芯部を回転する。同様に初め相互作用領域から離れた場所に位置した渦線 q も渦芯部を回転する。そのため、渦線 p と渦線 q は相互作用領域の端で絡み合う形となる (図(b),(c))。渦線 p と渦線 q はそれぞれ、 p がつなぎ換わったもの、 q がまだつなぎ換えが起きていない渦線の典型例となっている。つなぎ換えは連続的に生じるため、渦線 p は次第に増えてくる。つまり図(c)の実際の渦管は図(C)のようになっていると考えられる。また、図(C)のように不完全なつなぎ換えとなるのは、接触に必要な速度場が働いている内につなぎ換わることが出来なかった渦管が図(C)の渦管 Q のように残ってしまうことが原因である。接触を促すような速度場がないと渦度を持った渦管は互いに流し合うため、接近せず離れてしまう。そのため直ぐ四角で囲った部分の渦管 Q は互いに離れてしまう。

図(C)の四角で囲った部分の渦管 P, Q は S.Kida らの論文で P が bridge、 Q が thread と呼ばれる部分である。Bridge は thread が作り出す速度場により $+z$ 方向に、thread は bridge が作り出す速度場により $-z$ 方向に力を受けるため、次第に四角で囲った部分で渦管 P, Q は離れて行く。一方で、外側部分の渦管は P と Q 共に渦度の向きが同じで同心回転し絡まっていく (図(d),(D))。図(d)は図(a)で描いた渦線を追って描いたもので、図(D)は実際の渦管を描いた

ものとなっている。描いた絵の形状は実験結果と良く一致している。

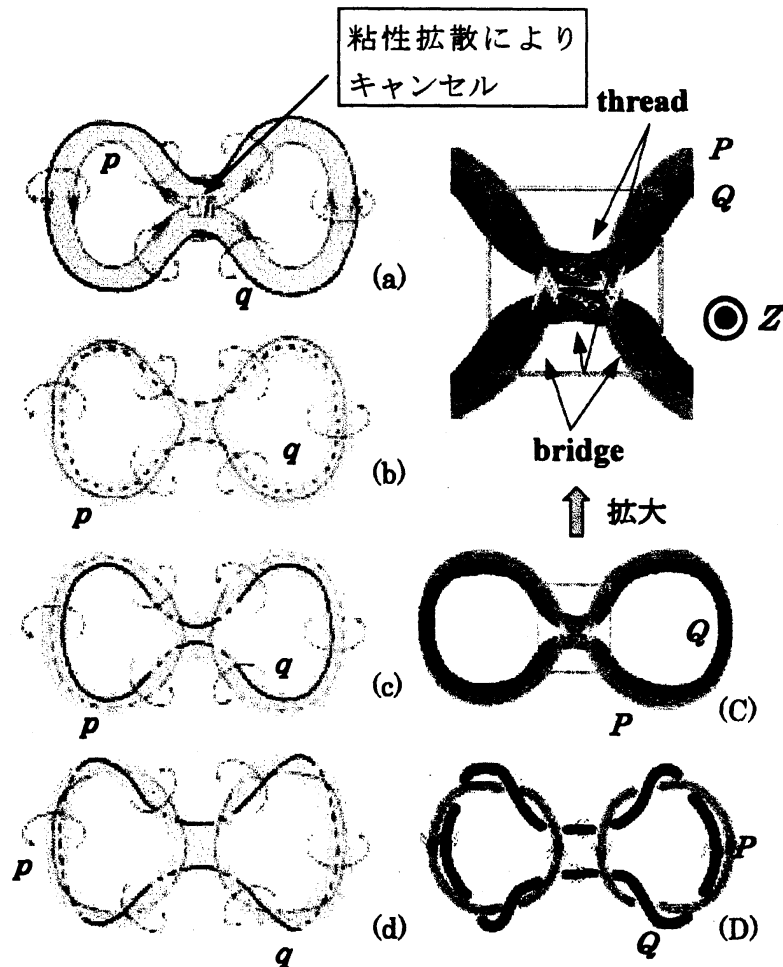


Fig.6. つなぎ換え詳細図(Bridging) (a~d)ある特定の渦線のみを追って描いた図
図の二つ矢印は渦度の向き、単独矢印は渦線の回転方向を示す。図の点線は図面の裏
側(奥)を示す。図(C), (D)は図(c), (d)の実際の渦管を描いたものとなっている。

6. 結論

渦が半分ほどつなぎ換わった状態を観測することでつなぎ換えの詳細を知ることが出来た。また、実験結果は S.Kida らの数値計算結果と一致した。

渦のつなぎ換えの詳細を観測することが出来たのは、本実験の二つの特性によると考えられる。一つ目は渦輪が空気の芯で可視化されていること。空気芯は渦芯内部に閉じ込められた状態となるため、うまく渦度領域を可視化することが出来たと思われる。また、空気で可視化されているためインクや煙のようにトレーサ自身の拡散による観測妨害の影響が起こり難く、シャープな輪郭で観測できる。二つ目は煙やインクを用いた同様な実験と比べ本実

験はレイノルズ数が一桁以上大きい。あまりにもレイノルズ数が大きいと渦は壊れてしまうが、初期状態として非常に安定な渦輪を作る最適条件で実験が行えたことも Bridging を観測できた要因だと思われる。しかし、実験結果に対し間違った誤解を避けるために流れそのものを観測しているのではなく、流れに運ばれた空気を観測していることには注意を払う必要がある。

参考文献

- 1) S.Kida, M.Takaoka and F.Hussain: Phys.of Fluids A 1 (1989) 630
- 2) S.Kida, M.Takaoka and F.Hussain: J.Fluid Mech. 230 (1991) 583
- 3) S.Kida and M.Takaoka: Annu. Rev. Fluid Mech. 26 (1994) 169
- 4) T.Kambe and T.Takao: J.Phys.Soc.Japan 31 (1971) 591
- 5) T.Fohl and J.S.Turner: Phys.of Fluids 18 (1975) 433
- 6) Y.Oshima and S.Asaka: J.Phys.Soc.Japan 42 (1977) 708
- 7) Y.Oshima and N.Izutsu: Phys.of Fluids 31 (1988) 2401
- 8) F.R.Hama: Phys.of Fluids 5 (1962) 1156