

直線状渦対の運動

辰野, 正和
九州大学応用力学研究所 : 助手

本地, 弘之
九州大学応用力学研究所 : 助教授

泉, 耕二
九州大学応用力学研究所 : 研究生

<https://doi.org/10.15017/4743547>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 45, pp.45-60, 1976-11. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



直線状渦対の運動

辰野正和* 本地弘之**
泉耕二***

概 要

2個の直線状スリットから静水中に同じ強さで、同時に放出されたそれぞれ2本の渦糸からなる渦対は、互いに離反する方向に、曲率をもった軌道を進行する。この離反運動は、本質的に粘性の効果に基づくものであるが、2渦対間の距離が近い程離反効果は大きい。

出口が波状をなしている1個のスリットから放出された渦対は、時間の経過とともに、渦対の軸方向に直線状になる傾向を示す。

1. 緒 言

直線状渦糸に関しては、これまで実用的立場から流れ方向に平行なトレイリング・ヴォルテックスの対の相互作用を調べた研究報告⁴⁾がなされている。しかし、著者らの知る限り、直線状渦糸がその軸と直角方向に運動する場合の詳細な研究報告はなされていないようである。

渦輪の運動については、理想流体理論に基づく研究が多くなされており、その結果は、粘性流体中での実験結果とも定性的によく一致している。一平面内に並んだ2個の円孔から同時に放出されてできる2個の渦輪の運動については、神部、大島ら^{2,3)}の研究がある。それによると、2個の渦輪は、前進しつつ、相互作用によって接近し、ついには合体する。この場合、理想流体中に、強さは等しく回転方向が逆の点渦の対を2組おいて定性的に説明できる。つまり、2組の渦対を構成している4個の点渦は、相互に作用し合うのであるが、内側の2個が相互に最も強く影響しあう。これらの2個の点渦は、回転方向が互いに逆であるため、相互に進行方向と逆方向の速度を誘起する。そのため、2組の渦対の内側の渦の速度が遅くなり、渦対は序々に内側に向きを変え、接近していく。

本論文で取り扱った渦は直線状の渦対であるが、2次元的に見れば、渦輪も渦対も構成は全く同等である。ところが、2つの直線状渦対は、進行とともに、相互に離反し、渦輪の場合と全く異なった振舞を見せる。これは、上記の理想流体力学の理論の立場からは、矛盾したものである。本研究は、粘性流体中における直線状渦対の運動およびその渦輪の運動と矛盾するメカニズムの解明を目的として行なわれた。

2. 実験装置および方法

本実験は、水中で行なわれ、使用した水槽は、57.6 cm×28.0 cm×35.5 cmの直方体であり、この中

* 九州大学助手，応用力学研究所

** 九州大学助教授，応用力学研究所

*** 九州大学研究生，応用力学研究所

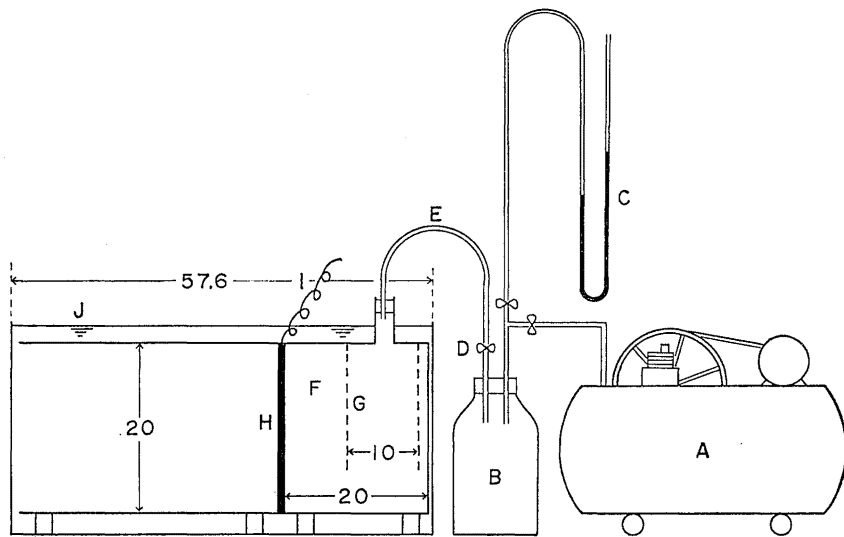


図 1 実 験 装 置 概 略 図

A : コンプレッサー B : 貯気槽 C : マノメーター D : コック
 E : ビニールパイプ F : 渦対発生箱 G : 圧力伝達円筒
 H : スリット I : 電解沈澱法のための陽極 J : 水槽

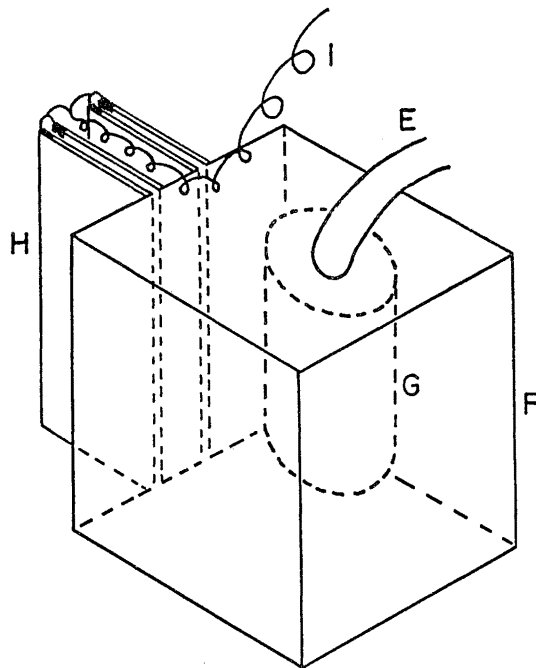


図 2 渦 対 発 生 装 置

平行 2 スリットを取付けた場合を示している。

E : ビニールパイプ F : 渦対発生箱 G : 圧力伝達円筒 H : 平行 2 スリット
 I : 電解沈澱法のための陽極

に渦糸の対を作るスリット装置を入れる。図1には、実験装置全体の概略図を、図2には、渦対発生部分の詳細図を示す。コンプレッサーにより貯気槽に任意の圧縮空気を貯めた後、貯気槽の出口のコックを瞬間的に解放してやれば、その圧力のため、流体の実質部分がスリットから噴出し渦対が形成される。スリットは、立方体の箱 (20 cm×20 cm×20 cm) の前面にとり付けられている。この箱の中には、図のように、直径 10 cm の下端が開放された円筒が固定されており、その内部は、パイプを通じて貯気槽につながっている。これは、スリット部分への空気の噴出を防ぐために取られた処置である。

3. 実験結果

3.1. 単スリット

実験室内で純粋な直線状渦糸を作ることは困難であり、上下に端を持つことになる。そのため、スリットから放出された渦糸は、その生成の初期においては、平行な一対の辺の極めて長い長方形状となつて一本に閉じていることになる。時間の経過とともに渦は前方に進行してくるが、同時に、両端部は円弧状になり、全体として亜鈴状を呈するようになる。結局、本研究は、こうした渦の中央の直線部分に着目し、その運動特性を調べたものである。図3に単スリット装置の概略図を示す。

1 個のスリットから 2 個の渦対を前後して放出させた場合、後からの渦対が強ければ、前方を進んでいる渦対に追いつき、その間をくぐり抜けて前方へ出、2 個の渦対は合体する。渦輪の場合に言われるような“追いつき追い越し”の繰返しの現象はこの場合見られなかった。

図4は、スリットの一方側に、スリットと平行あるいは直角に平面壁が置かれた場合を図示している。この場合、写真1、2に見られるように、渦対は平面壁から序々に遠ざかるように進行する。渦対は周囲の流体を動かしながら前進していくのであるが、そばに剛体壁面が存在すると、壁面上に境界層が形成され、渦対を構成している 2 本の渦糸のうち、壁面側の渦糸は、ここで運動エネルギーを他方より多く失うことになる。これは、2 本の渦糸の渦の強さを比較すると、壁面側が弱くなり、他方が強く残るということを意味する。回転方向が逆で強さの違う 2 本の渦糸が近くに存在した場合、相互作用によって、2 本の渦糸は同心円軌道上を運動する。その場合、強い渦糸が内側、つまり曲率の大きい軌道上を、弱い渦糸が外側の軌道上を運動することは周知のことである。以上述べたように、渦対は、粘性流体であるためのエネルギー散逸の非対称性と、渦の相互作用によって、写真1、2に示すように、序々に壁面から遠ざかる軌道を進行するわけである。

3.2. 平行2スリット、その他 (渦対の相互離反運動)

図5に装置の概略図を示す。この場合、噴出流の直進性を良くするため、それぞれ 2 枚の板で構成されたスリットは、前方にかなりつき出している。写真3は、この装置による渦対運動の典型的な一例であつて、水平断面で撮影したものである。写真から分かるように、平行なスリットから放出された渦対は、互いに離反する方向に進行している。この場合、電解沈澱法で可視化しており、各瞬間における渦対の位置は明瞭にわかるけれども、各渦糸の強さの程度は写真からは全くわからない。ところで、この装置の場合、前章で述べたように、渦放出のための加圧は、スリットを取り付けている箱の中央部でな

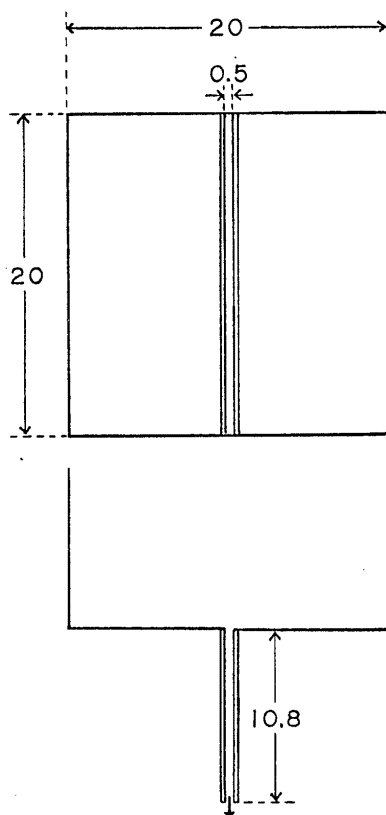


図 3 単スリット装置 上段：正面図，下段：水平断面図

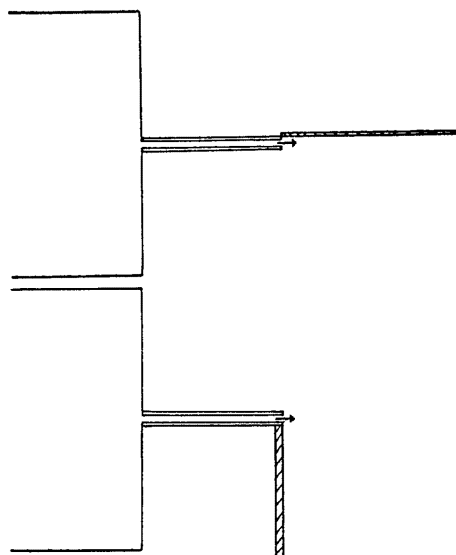
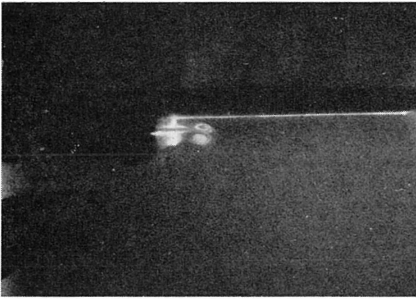
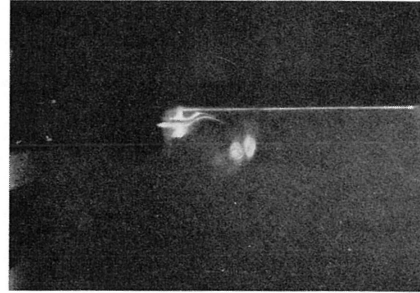


図 4 単スリット壁面効果実験装置（水平断面図）



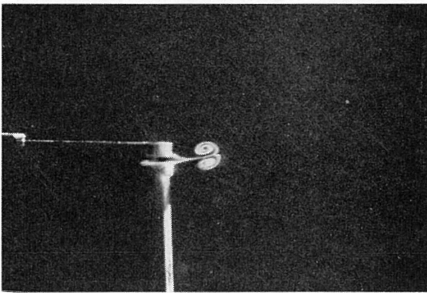
(a)



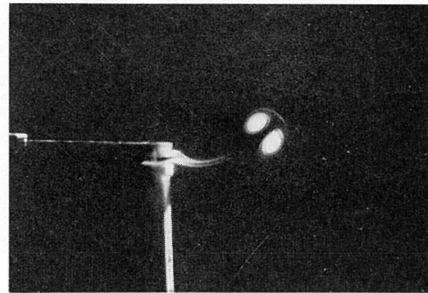
(b)

写真 1 単スリットから放出された渦対の運動

スリット出口近傍，片側にスリット壁面と平行に平板を置いている．
水平断面写真，電解沈澱法，露出時間 $t_e=1/30$ 秒．



(a)



(b)

写真 2 単スリットから放出された渦対の運動

スリット出口近傍，片側にスリット壁面とほぼ直角に平板を置いている．
水平断面写真，電解沈澱法， $t_e=1/30$ 秒．

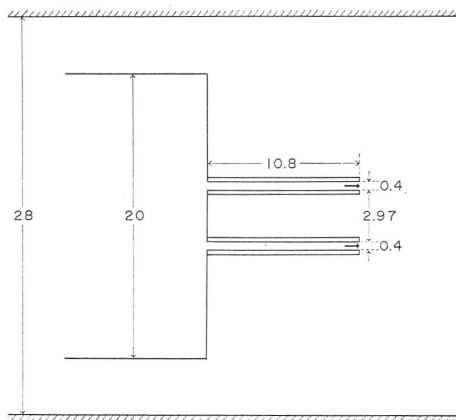


図 5 平行 2 スリット装置 (水平断面図)

されている。そのため、各スリットの内壁近傍の流体は両側同等の速度を持っていたかどうかという疑問の余地も残る。もし、1個のスリットの両側で強さの違う噴出流であるとすれば、渦糸もその生成された瞬間から強さが違うことになり、渦対が曲率を持った軌道を進行するのは当然であり、2渦対離反の原因は、流体力学以前の装置にあることになる。この疑問を調べるために、次に図6に示すような装置を作成した。この場合、スリット後方、スリットから等しい距離の位置に隔壁を置いている。このようにすれば、スリット部における噴出流は、スリット両壁面で同等になるはずである。写真4に、この装置による渦対運動を示す。まず、明らかなように、2渦対は互いに離反するように運動しており、写

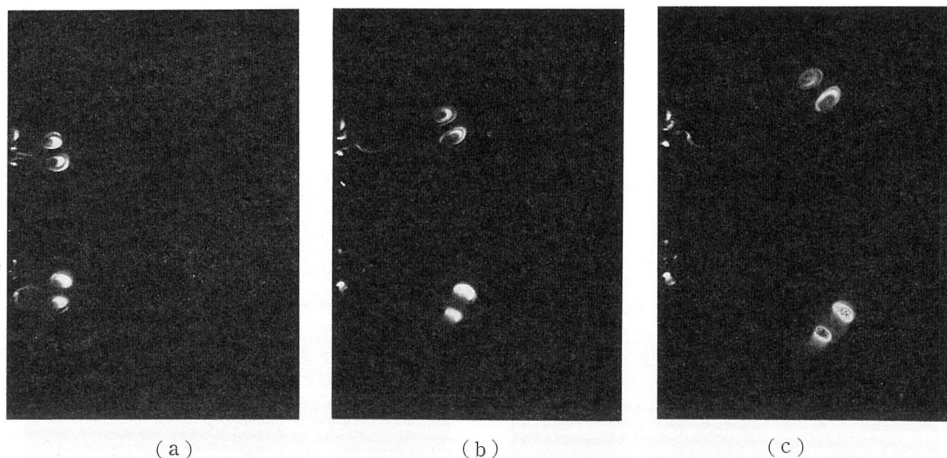


写真3 図5のスリット装置で生成された渦対の運動

水平断面写真，電解沈澱法， $t_e=1/15$ 秒。

渦対放出後 (a) 0.65秒，(b) 1.72秒，(c) 2.84秒。

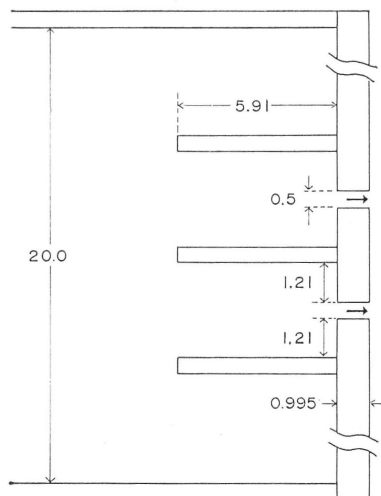


図6 平行2スリット装置（水平断面図）

真3に示した例と、定性的に全く同等である。このことから、スリットの構造および渦対生成の技術的問題に渦対離反の原因はないことがわかる。さらに、写真4はアルミ粉末法によって流れの可視化を行っているが、この写真から次のことが分かる。1個の渦対は回転が互いに逆向きの2本の渦糸によって構成されているが、その生成の瞬間には、同じ強さであったものが、しばらくすると、2本の渦糸の強さに強弱が現われていることが、写真から明瞭に判断できる。2本の渦糸のうち、隣の渦対に近い方の渦糸が弱くなり、その反対側の渦糸が強に残っている。

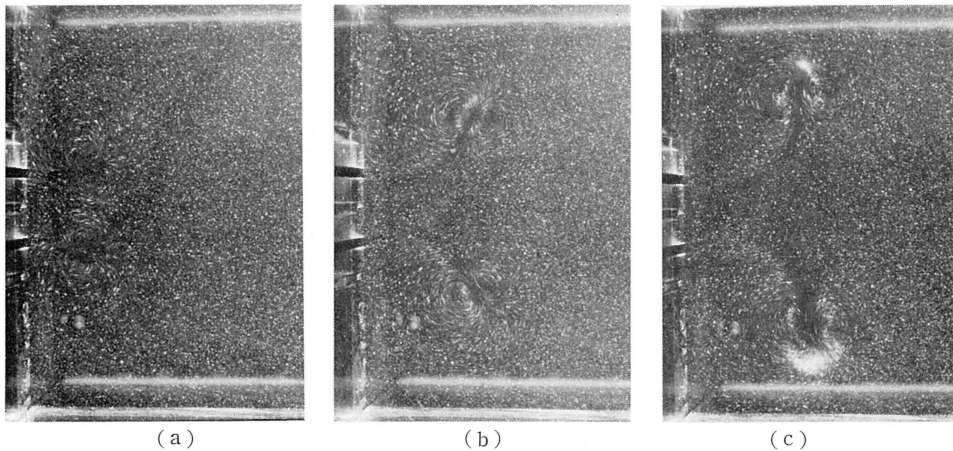


写真4 図6のスリット装置で生成された渦対の運動
水平断面写真，アルミ粉末法， $t_e=1$ 秒。

なぜ渦対を構成している2本の渦糸に強弱が現われるのか。それは次のようなメカニズムによると考えられる。まず理想流体理論の立場からは、最初同等の強さ（但し、符号は逆）を持っていた2本の渦糸に強弱が現われることを説明できないことは自明のことである。つまり、この現象は本質的に粘性流体としての効果に基づいているのである。渦対を構成している渦糸は前進しつつ、粘性によってその渦度を拡散していく。その場合、正と負の渦度の間に相互に打ち消し合いが起こることになる。2個の渦対を構成している全部で4本の渦糸について考えれば、この渦度の打ち消し合いの効果が最も顕著に現われるのは、内側の2本の渦糸である。そのため、各渦対の内側の渦糸の方が外側の渦糸に比べて渦の強さが弱くなるのである。次に、写真5には、図7に示すような2本のスリット間の側壁がない装置での渦対運動の写真を示す。この場合にも、2個の渦対は相互に離反する方向に進んでいる。しかし、写真4と比較すれば、写真5の場合の方が渦対進行軌跡の曲率はよりゆるやかであることが分かる。つまり、スリット間に壁面が存在すれば、そこで境界層が形成されるために、より多くのエネルギー散逸があることになる。

このように、粘性効果によって、渦対を構成している渦糸のうち隣の渦対に近い方の渦糸が弱くなるのであるが、渦糸間には相互に誘導速度をおよぼし合う効果が存在する。この渦糸間の誘導速度の大きさは、渦糸の強さに比例し、渦糸間の距離に逆比例する。2個の渦対を構成している4本の渦糸の相互

作用のうち、ここでは、隣り合った渦糸どおし、つまり、各渦対の2本の渦糸間の相互作用および隣の渦対に近い内側の2本の渦糸間の相互作用を考えれば十分である。なぜなら、他の相互作用はかなり小さいからである。上に述べた2種の相互作用を比較した場合、内側の渦糸どおしは渦糸の強さが弱まっているのに比べ、渦対を構成している2本の渦糸どおしは、外側の渦糸が強く残っているし、渦糸間の距離も近い。そのため、結果的には、外側の強い渦糸によるその対をなした渦糸に対する効果が現われることになる。3.1. で述べたように、回転方向が逆で、しかもその強さの絶対値が違う2本の渦糸の対は、相互に誘導し合う速度の大きさの差異に応じて、強い渦糸を内側とするような同心円上を運動する効果を持っている。今の場合、外側の渦糸が強いので、渦対は外側の方向、つまり2渦対は互いに離反する方向に進行するのである。ただし、粘性によるエネルギー散逸は常に存在し、また隣の渦対からの

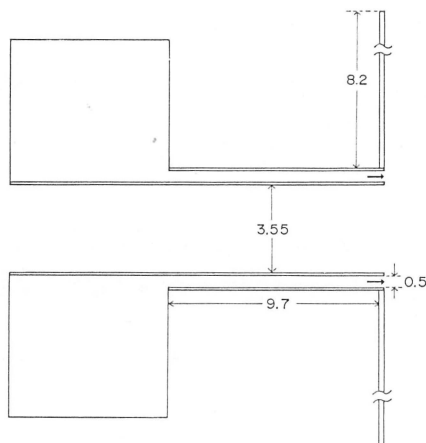
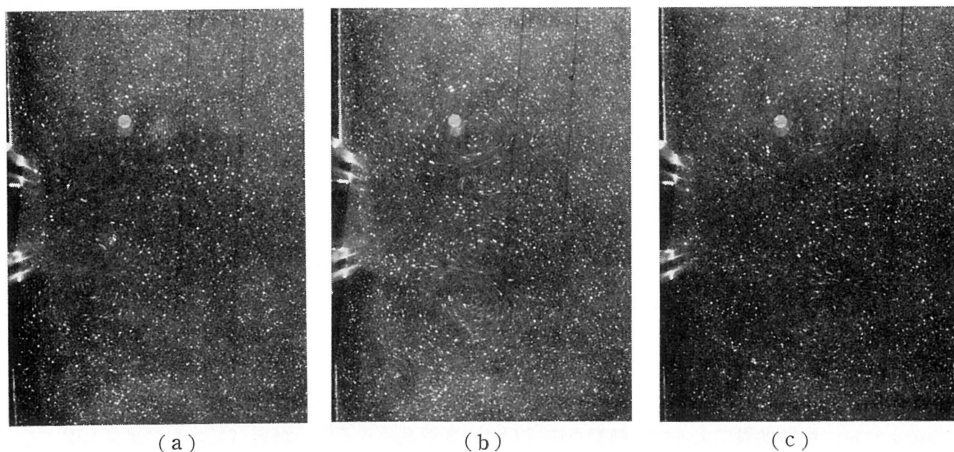


図 7 平行2スリット装置 (水平断面図)．壁面効果を一部除く．



(a)

(b)

(c)

写真 5

図7のスリット装置で生成された渦対の運動
水平断面写真，アルミ粉末法， $t_e=1.5$ 秒．

作用も、効果は小さいが、存在するため、渦対の軌跡は、理想流体理論で考えられる同心円状でなく、かなり複雑な曲率をもった曲線である。

図8に示すものは、渦対間つまり特に内側の渦糸どおしの相互作用を調べることを目的とした装置であって、図のように、スリット前方、渦対が運動する流体空間が狭くなっている。つまり、2本のスリットから等距離な中央線上に仮想的な壁面があるとし、その位置と実際の側壁との丁度中間にスリットがあるようにした。写真6は、こうした装置による実験写真である。流体空間が狭くなっているため、渦対は曲率を持った相互に離反する軌跡を画くことが出来ず、ほぼ平行に前進する。しかし、渦糸の位置関係に着目すれば、写真から分かるように、時間経過とともに、内側の渦糸が、序々に進行速度が落ちて、外側の渦糸に比べて遅れているのが分かる。このように、前述の1個の渦対内での強い渦糸の作用による運動を押えてやれば、2個の渦対間の相互作用（特に、内側の渦糸どおしが強く影響をおよぼし合う）が現われて、写真6のような位置関係となるわけである。

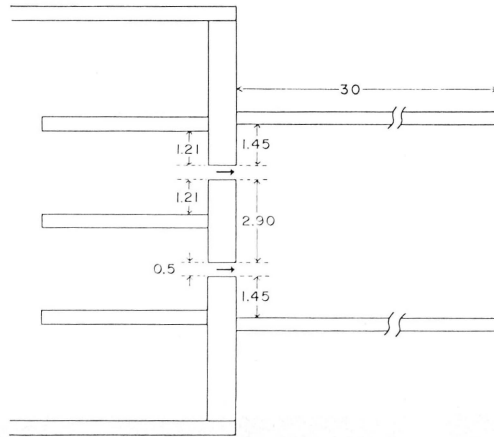


図 8 平行2スリット装置（水平断面図）。内側の渦糸どおしの相互作用を調べる。

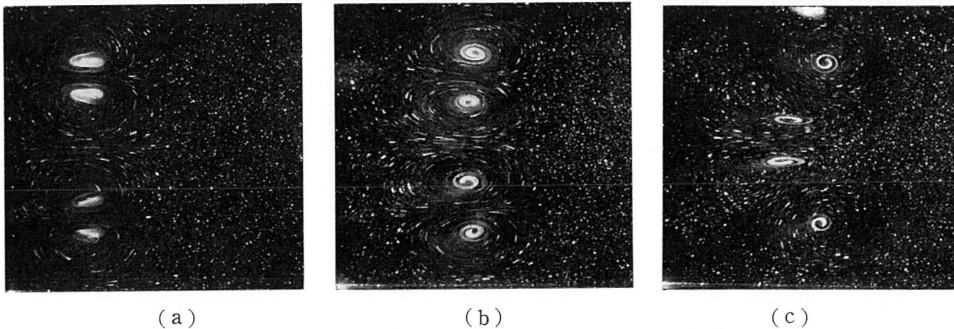


写真 6 図8のスリット装置で生成された渦対の運動
水平断面写真，アルミ粉末法と電解沈澱法， $t_e=1.5$ 秒。

ところで、大島ら³⁾の研究によると、並行放出された2個の渦輪は、互いに接近して合体し、渦糸の繋ぎかえを行なうということが報告されている。直線状渦対の離反運動と渦輪の接近運動は、一見矛盾しているように思われる。しかし、渦輪の場合、次のような理由によって、粘性効果が陽に現われないのである。渦輪は進行速度が大きく（自己誘導速度が大きいため）、境界壁の存在による粘性効果の影響を受けにくいことと、並んだ2個の渦輪の隣り合った部分での正負の渦度の拡散による打ち消し合う程度が小さい。なぜなら、正と負の直線状渦糸どおしの場合、上端から下端まで全体にわたって渦度の打ち消し合いが起こるのに比べ、渦輪の場合、円形であるという幾何学的構造によって正負の渦度の打ち消し合う程度は極めて小さくなる。そのため、各渦輪の部分について、渦の強さの不均衡はあまりなく、2個の渦輪の内側の隣り合った部分での相互作用が強く働いて、渦輪は序々に接近するのである。つまり、直線状渦対の運動と渦輪の運動との違いは、粘性効果による渦糸の渦度の弱まり方の違いによるのである。

図9は、4本および12本のスリットを持った渦対発生装置の断面図である。それぞれの装置による渦

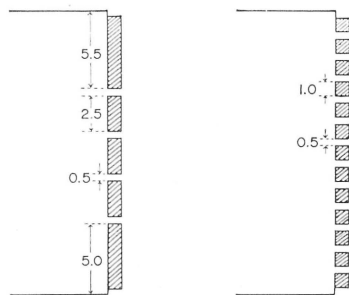
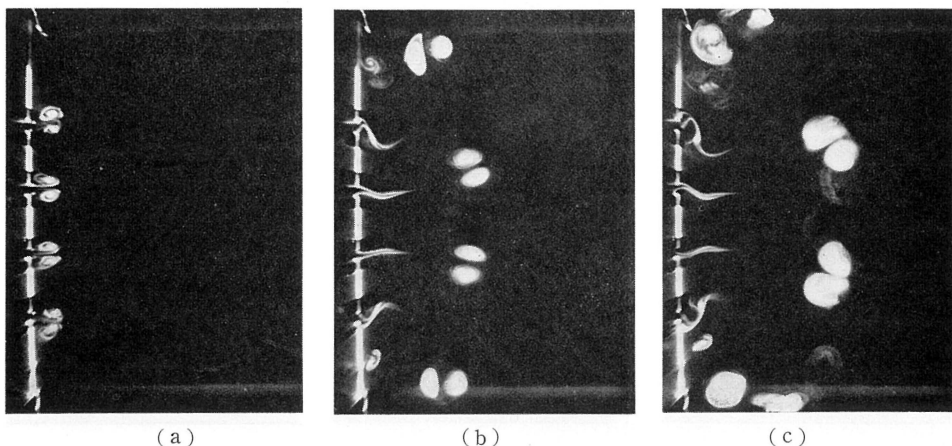


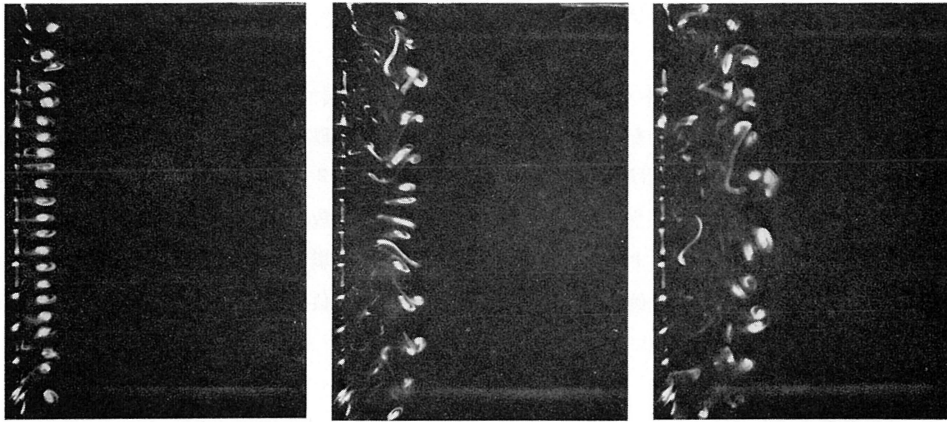
図 9 平行4スリットおよび12スリット装置（水平断面図）



(a) (b) (c)

写真 7

平行4スリットから同時放出された渦対の運動
水平断面写真，電解沈澱法， $t_e=1/15$ 秒。
渦対放出後 (a) 0.65秒，(b) 4.7秒，(c) 8.4秒。



(a)

(b)

(c)

写真 8

平行12スリットから同時放出された渦対の運動

水平断面写真，電解沈澱法， $t_e=1/15$ 秒.

渦対放出後 (a) 1.1秒，(b) 2.0秒，(c) 2.7秒.

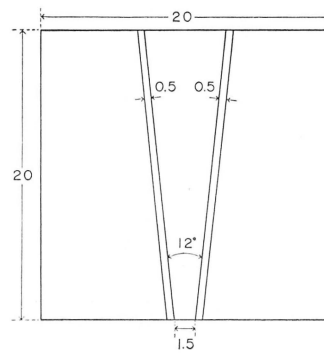
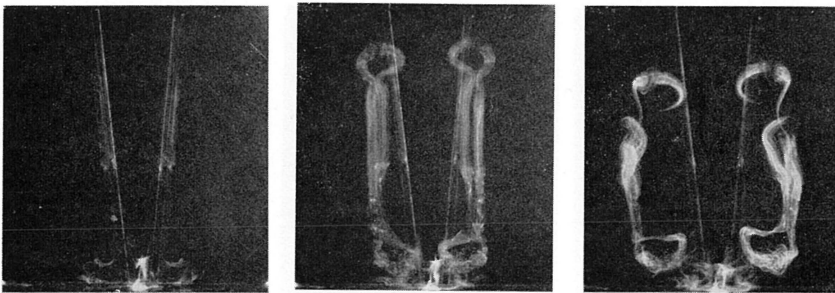


図 10 V字型スリット装置 (正面図)



(a)

(b)

(c)

写真 9

V字型スリットから放出された渦対の運動

正面写真，電解沈澱法， $t_e=1/60$ 秒.

上下両端部で作られた渦糸の部分は，しだいに円形になる.

対群の運動の写真を写真7および写真8に示す。渦対とおしが相互に離反する傾向は、2本のスリットの場合と定性的に同等である。

図10は、2本の直線状スリットをV字型に配置した場合の正面図である。写真9は、この装置から放出された渦対が進行するところを正面から撮影したものである。最初V字型を呈していた渦対が、序々に離反していくが、注目すべきは、ある程度時間が経過すると、2本の渦対はほぼ平行になることである。写真10は、図11に示すような双曲型のスリットから渦対を放出させたものであり、スリット間の距離は、中央部で最も小さく、上下端で大きくなっている。この場合にも、2本の渦対が最終的にはほぼ平行になっている。これらの例から分かるように、前述した正負の渦度が拡散して打ち消し合う効果は、渦糸間の距離が近い程大きいことが分かる。

3.3. 波状型スリット

前節までは、渦対間の相互作用を調べたのであるが、本節の実験目的は、1本の渦対のその軸方向の運動を調べようとするものである。この目的のためのスリット装置は、図12に示された概略図で分か

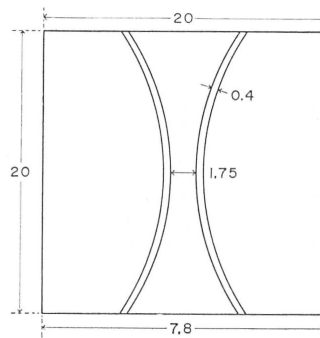
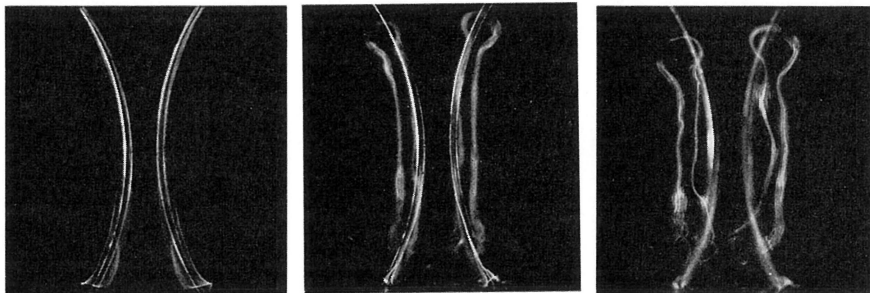


図 11 双曲型スリット装置 (正面図)



(a)

(b)

(c)

写真 10

双曲型スリットから放出された渦対の運動

正面写真, 電解沈澱法, $t_e = 1/30$ 秒.

渦放出後 (a) 0.57秒, (b) 7.5秒, (c) 16.4秒.

るように波状をした1本のスリットである。写真11がこの装置による実験写真であるが、最初スリットと同じ波形で放出された渦対が、前方に進行しつつ徐々に直線状になってくる。このように、渦糸はできるだけ曲率を小さくしようとする傾向があることがわかる。放出速度が小さいと、波状渦対は直線

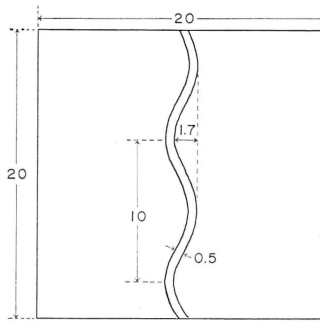


図 12 波状型スリット装置 (正面図)

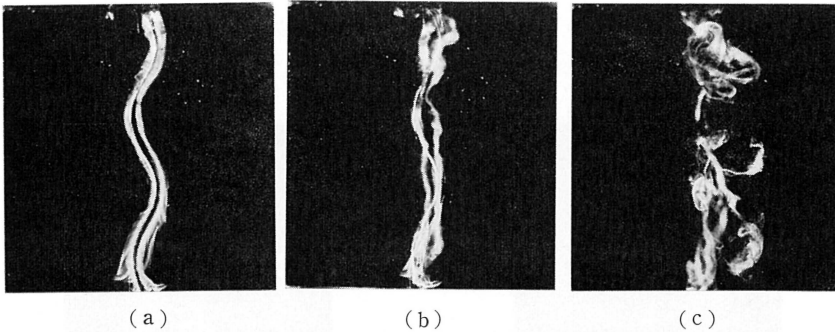


写真 11 波状型スリットから放出された渦対の運動
正面写真, 電解沈澱法, $t_e = 1/60$ 秒.

- (a) 渦放出直後, スリット形状に従う.
- (b) スリット形状からほぼ直線状となる.
- (c) 大きな3個の渦輪に分裂する.

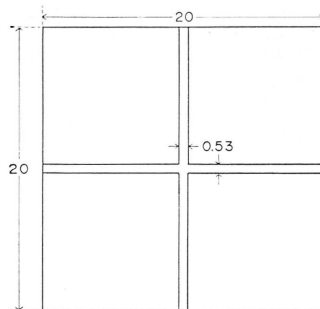


図 13 十字型スリット装置 (正面図)

状になるのが最終段階であるが、放出速度が大きいと、写真の例から分かるように、渦対は直線状になった後、3個の部分に分裂し、それぞれが渦輪となって前進する。この分裂する個数は、スリットの波数および振幅に依存している。

3. 4. 十字型スリット

図 13 に示されたような十字型をしたスリットから渦対が放出された場合、特徴的なことは、写真 12 で明らかなように、スリットの直線部分で 4 個の長円状の渦輪が出来る他に、スリットの中央部で 1 個の渦輪が出来ることである。4 個の長円状の渦輪は、長軸が短くなり、同時に短軸は長くなるという渦輪面内での縦横方向の振動的な形状変形を繰返しながら序々に円に近づいていく。これは、渦糸に曲率の違う部分があるために起る現象である。写真 13 は、同様な渦運動を、スリット中央部の水平断面で観測したものである。中央部に見える渦輪は、十字型スリットの中央で出来た渦輪であって、初期の段階から円形をしており、進行速度が大きい。

4. 結 論

本研究は、スリットから流体を噴出させて出来る渦糸の対の運動について調べたものである。その運動は本質的に粘性の効果に基づくものであることが分かった。

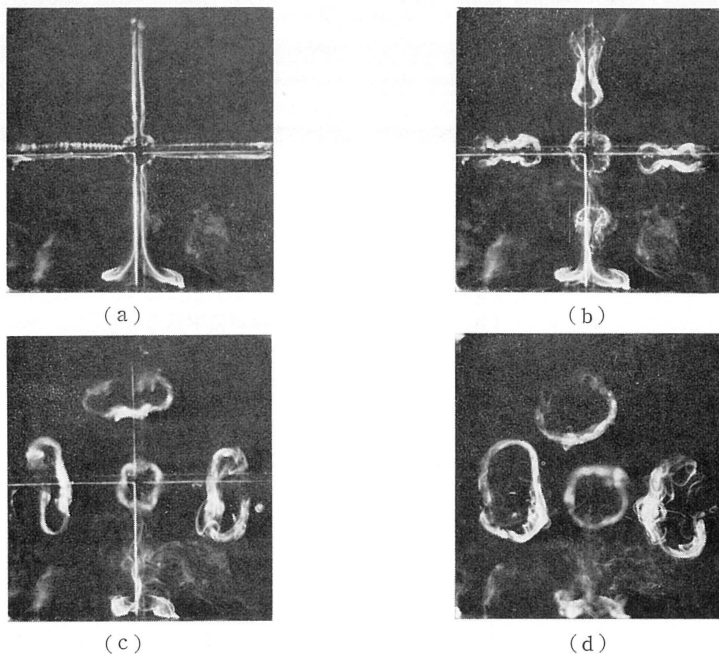


写真 12 十字型スリットから放出された渦輪の運動
正面写真、電解沈澱法、 $t_e=1/60$ 秒。
渦放出後 (a) 0.5秒、(b) 2.0秒、
(c) 6.6秒、(d) 15.5秒。

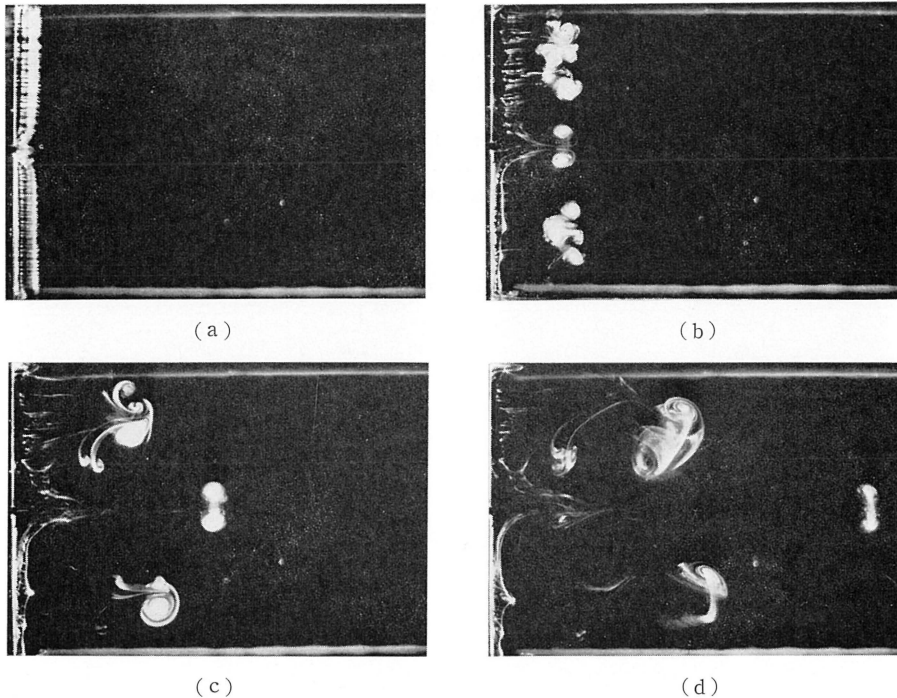


写真 13 十字型スリットから放出された渦輪の運動
 水平断面写真, 電解沈澱法, $t_e=1/15$ 秒.
 渦放出後 (a) 0.7秒, (b) 3.2秒,
 (c) 11.0秒, (d) 35.6秒

1) 壁面の側を渦対が進行する場合, 壁面近傍に境界層が発達し, 渦糸はそこで運動エネルギーを失うため, 渦対を構成している2本の渦糸の強さに違いが生じる. そのため, 渦糸の相互作用によって進行方向が曲率をもったものになる.

2) 2個の渦対は, 相互作用によって, 互いに離反する方向に進行する. それは, 1)に述べた境界層形成によるエネルギー消失と同時に, 各々の渦対を構成している2本の渦糸のうち, 内側の隣り合った渦どおし(強さは等しいが符号は逆)が, 渦度を打ち消し合う結果, 各渦対の内側の渦糸の強さが弱くなることに原因している. 各渦対を構成している2本の渦糸に強弱が現われると, 強い渦糸を内側とするような曲率を持った軌道を運動することになり, 2個の渦対は, 互いに離反する方向に進行する.

3) 軸方向に曲率をもった渦対は, その軸方向に直線状になろうとする性質を持っている.

4) 十字型ナリットによっては, 5個の渦輪が形成される.

謝 辞

本研究に多大の関心を示され, 多くの有益な御討論をしていただいた種子田定俊教授はじめ, 計測流体力学部門の各氏に厚くお礼申し上げます.

参 考 文 献

- 1) Batchelor, G.K. *An Introduction to Fluid Dynamics* Cambridge Univ. Press, 1967.
- 2) Kambe, T. and Takao, T. Motion of Distorted Vortex Rings, J. Phys. Soc. Japan vol. 31, no. 2, 1971, p. 591-599.
- 3) Oshima, Y. and Asaka, S. Interaction of Two Vortex Rings Moving Side by Side, Natural Sci. Rep. Ochanomizu Univ. vol. 26, no. 1, 1975, p. 31-37.
- 4) Crow, S.C. Stability Theory for a Pair of Trailing Vortices, AIAA J. vol. 8, no. 12, 1970, p. 2172-2179.

(昭和51年5月26日 受理)