

渦輪の衝突による水表面薄層の 水中への連行現象の可視化

Visualization of Entrainment of a Thin Layer
at Water Surface due to Collision of a Vortex Ring

江藤 剛治*, 竹原 幸生**, 宮原 和仁***

By Takeharu ETOH, Kosei TAKEHARA and Kazuhito MIYAHARA

A vortex ring colliding against water surface is visualized. The vortex ring is generated by ejecting a volume of water from a nozzle. As the vortex ring collides against water surface, it generates some secondary vortex rings of opposite rotation to that of the original one. It is observed that collapse of a vortex ring entrains water in a thin layer at water surface into the main water body.

keywords: vortex ring, water surface, visualization,
entrainment of surface water

1. はじめに

水表面付近の乱れによる気体輸送に関する多くの既往の研究がある。これらの研究の多くは、再曝気係数を、気体濃度とマクロな乱流特性量をもとに整理したものである。最近、水表面極近傍のミクロな現象の解明を通じて、これらの機構を評価する試みが始められている¹⁾。本研究では、単一の渦輪が水表面に衝突したときの、水表面極近傍の薄い層内の水の動きを可視化することを試みた。

2重境膜説を最初に提唱した Lewis and Whitman²⁾の論文の中に、静水状態と乱れを与えた場合での水表面の膜の厚さに関する次のような実験結果が引用されている。Adeney and Beckerによると、水温15℃の静水状態において、O₂とN₂に対して、水表面の境膜の厚さは1700 μ mである。また Beckerによると、水にある強さの乱れを与えた場合、境膜の厚さは45 μ mである。よって、これらの現象を実際に観察するためには、水表面の数10 μ mの水の層の動きを可視化する必要がある。本研究では、水よりもわずかに軽くて、長時間放置すると水表面に浮遊するが、ほとんど水中に没している直径が数10 μ mのトレーサー粒子を開発し、これを用いて可視化実験を行った。

水の乱れは様々な方向に軸をもつ大小の渦によって表現される場合がある。本研究では、乱れによる水表

* 正会員 工博 近畿大学教授 理工学部土木工学科 (〒577 東大阪市小若江 3-4-1)

** 正会員 工修 近畿大学助手 理工学部土木工学科 (同上)

*** 学生員 近畿大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (同上)

面からの気体の取り込みの解明のための基礎的研究として、単一の渦輪が水表面に衝突したときの水表面からの気体の連行について可視化実験を行った。この研究を行うためには、水表面に衝突する渦輪自身の挙動を正確に知っておく必要がある。まず、この点について実験を行い、既にまとめられた観察結果(Cerra and Smith, 1983³⁾等)を確認した。Cerra and Smith は単一の渦輪と表面との流れ相互作用の特徴をいくつかの文献から3つに分類している。表面が固体壁の場合、1)渦輪が表面に衝突すると、ある点で反対方向に跳ね返り反転する、2)表面近くでリングの外周に沿った2次渦度の層を形成する、そして、3)渦輪が表面に衝突した後、渦輪の組織だった流れが突然無秩序な流れに変わる。一方、表面が水表面の場合でも、ある条件のもとでは渦輪は水表面でスリップし、固体表面と似た挙動をする。それは表面張力が原因であるとしている。

2. 実験装置

単一の渦輪を発生させる方法として水頭差を駆動源としたピストン方式のものを自作した。

渦輪発生装置の概略図を図-1に示す。水槽は内径290mm、高さ300mmの透明アクリル製円筒水槽を用いた。観察における歪みをできるだけ小さくするために円筒水槽の外側に矩形的透明アクリル製水槽を設置し、その内部も水で満たした。円筒水槽の底面の中心に水塊を放出させるため、先端が刃型のノズルをつけた。図-1に示すように、 Δh の水頭を与えておき、弁を開けることにより、ノズルより水塊が放出される。

本装置ではノズルを付け替えることにより、ノズルの内径、長さを変えられる。またピストン部を調節することにより、放出される水塊の量を変えられる。放出される水塊の速度は水頭差で変えられる。一定速度で弁を開閉させるため、電磁弁で制御できるエアシリンダ式バタフライ弁を用いている。バタフライ弁を開けるときに生じる振動をなくすため、水槽とバタフライ弁の間に緩衝パイプを設置した。摩擦損失をできるだけ小さくするため、この部分のパイプは大きいものを使っている(内径75mm)。

本実験において、ノズルは内径25mm、長さ100mmのものを用いた。水面からノズル先端までの水深を150mm、そしてノズルから放出される水塊の量を約 27cm^3 とした。図-2に水頭差に対するノズル内平均流速の関係を示す。

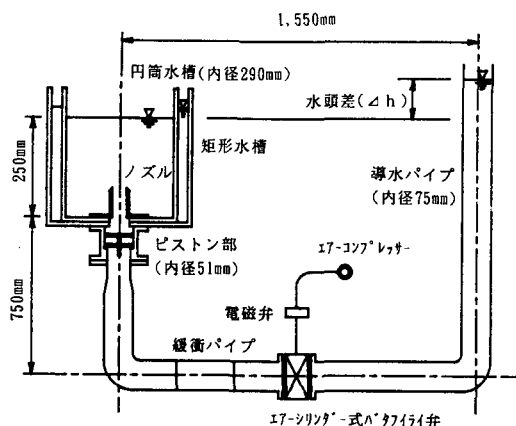


図-1 実験装置の概略図

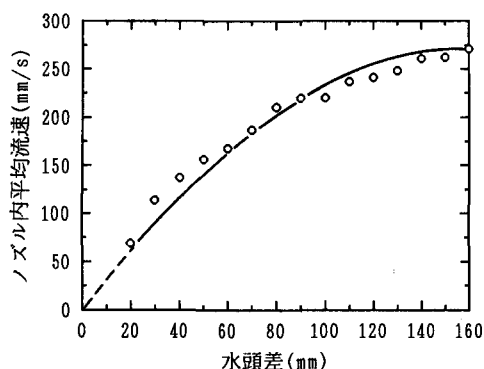
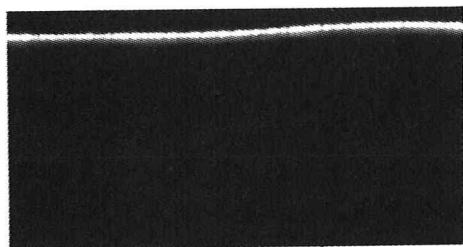


図-2 水頭差とノズル内平均流速の関係

3. 表面水の連行の可視化

水の乱れによる気体の連行現象の解明の第1段階として、水表面極近傍の水の取り込み過程を可視化する。本実験では、水表面にエチレン酢ビコポリマー (EVA) の微細な粒子を浮遊させる。粒径は $75\mu\text{m}$ 以下のものを用いた。その粒子を静かに水槽内に注入し完全に水表面に分散させるため一晩静置する。EVAの比重は0.95であり、粒径は $75\mu\text{m}$ 以下であるから、実際には水表面の数 $10\mu\text{m}$ の薄層中に各粒子の体積の大部分が没している。

粒子の分散した水表面に渦輪を衝突させたときの流れ相互作用を観察した。ズームアップレンズを装着したCCDビデオカメラにより、渦輪の進行軸を通るレーザー光シートで切断した $5.5 \times 4\text{cm}^2$ の領域を撮影し



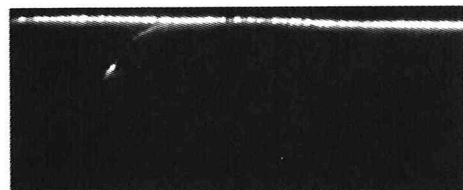
(a) $t = 0.00 \text{ s}$



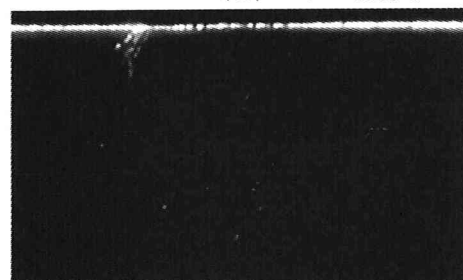
(b) $t = 0.20 \text{ s}$



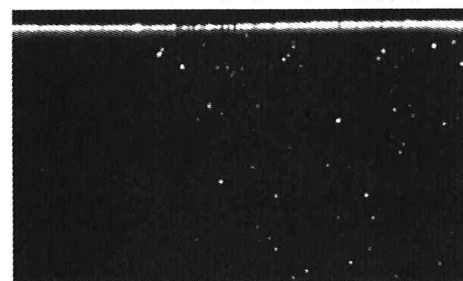
(c) $t = 0.27 \text{ s}$



(d) $t = 0.33 \text{ s}$



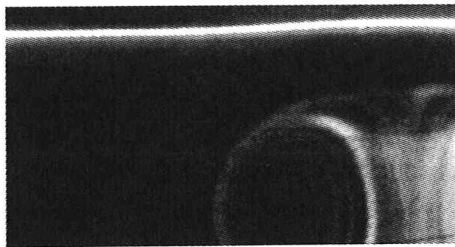
(e) $t = 1.07 \text{ s}$



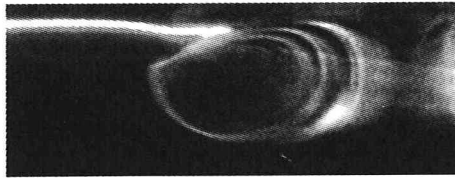
(f) $t = 2.27 \text{ s}$

10mm

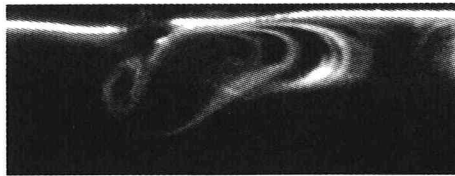
写真-1 粒子のみの可視化



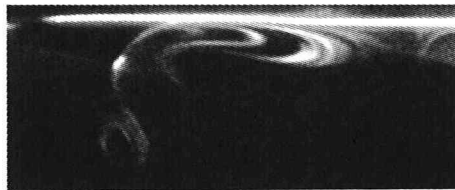
(a) $t = 0.00 \text{ s}$



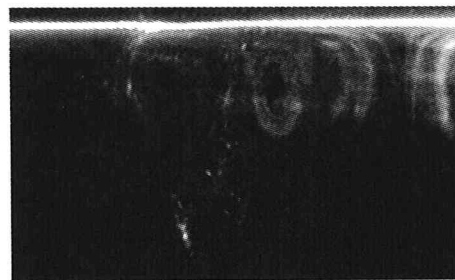
(b) $t = 0.20 \text{ s}$



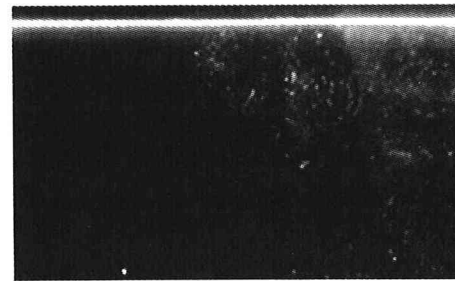
(c) $t = 0.27 \text{ s}$



(d) $t = 0.33 \text{ s}$



(e) $t = 1.07 \text{ s}$



(f) $t = 2.27 \text{ s}$

10mm

写真-2 渦輪と粒子の可視化

た。実験は、水表面に渦輪を衝突させ、浮遊している粒子だけを散乱光により可視化する方法と、蛍光染料により色付けした渦輪と水表面に浮遊している粒子を同時に可視化する方法で行った。

水頭差は20, 40, 80mmの3ケースとした。写真-1に水頭差80mmの場合に渦輪の衝突により水中に連行される粒子の一連の挙動を示す。粒子と渦輪の挙動を対応付けるため、写真-2に同じ条件で、ほぼ同じステージで渦輪と粒子の挙動を同時に撮影した一連の写真を示す。これらより以下の結果が得られた。

- 1) いずれの水頭差に対しても Cerra and Smith によりまとめられた観察結果が確認された。
- 2) 水頭差20mmでは全く表面水は連行されない。このとき表面の持ち上がりは観察されない。40mmではごく少量の粒子が連行される。80mmでは以下に述べるような過程で多くの粒子が連行された。
- 3) 渦輪が水表面に近づくと、水面が持ち上がる(写真-1(a), 写真-2(a))。
- 4) 水表面に衝突した渦輪はリング直径を広げながら、元の渦輪と水表面との相互作用により元の渦輪の回転と反対方向の2次渦輪を形成しはじめる。このときまでは、粒子の連行は観察されない。一時、水表面の粒子像が消えるが、その理由はわからない(写真-1(b), 写真-2(b))。
- 5) 2次渦輪が十分に形成されてから粒子が間欠的に連行されはじめる(写真-1(c), 写真-2(c))。
- 6) 間欠的に連行された粒子は、一塊の粒子として渦輪の外郭に沿って2次渦輪の運動とともに元の渦輪の中に巻き込まれる(写真-1(d), 写真-2(d)中の白く写っている塊)。
- 7) 2次渦輪を元の渦輪の中に巻き込んだ後、ある時点で水中に連行される粒子数は一気に増える(写真-1(e), 写真-2(e)で花火のように一斉に入っている)。連行される場所は渦輪の外郭の端部のみである。
- 8) その後、組織だった渦輪が無秩序な乱れに変わる。水中に連行された多数の粒子が、ほぼ一様に、無秩序な乱れの範囲に分布する(写真-1(f), 写真-2(f))。

写真-3には、乱れが治まった後の水表面の写真を示している。渦輪の当たったところは粒子が消え、その中心部には粒子が残っている。

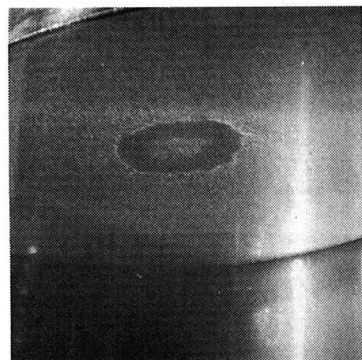


写真-3 乱れがおさまった後の水表面の様子

4. 結語

- 1) 表面水は、ある限界値以上の強度を持つ渦(多分水表面を変形させる渦)によってのみ連行される。
- 2) 渦輪が水表面に衝突した直後には、表面水は水中に連行されない。
- 3) 2次渦輪の小さい鋭い渦の動きで生ずる局所的な大きな剪断力により間欠的に表面水が巻き込まれる。
- 4) 2次渦輪を元の渦輪の中に巻き込んだ後、水中に連行される粒子数は一気に増える。

本実験における観察はまだ不十分であるが、少なくとも本論文に示した手法により水表面極近傍の薄い層の水の水中への輸送過程を可視化できることがわかった。今回の実験では詳細な機構を明らかにするまでには到っておらず、今後さらに検討していく必要がある。

参考文献

- 1) B. Jahne : From mean fluxes to a detailed experimental investigation of the gas transfer process, Air Water Mass Transfer, ASCE, pp.244-256, 1990.
- 2) W.K. Lewis and W.G. Whitman : Principles of gas absorption, Ind. Eng. Chem., vol. 16, pp. 1215-1220, 1924.
- 3) A.W. Cerra, Jr. and C.R. Smith : Experimental observations of vortex ring interaction with the fluid adjacent to a surface, Rep. FM-4, Lehigh University, 1983.