

吸い込み渦における境界層の構造と不安定

Structures and Instabilities of Boundary Layers in a Suction Vortex

○雪本真治、野口尚史、フレデリック・ムーラン、木村龍治、新野宏（東大海洋研）

Shinji YUKIMOTO, Takashi NOGUCHI, Frederic MOULIN, Ryuji KIMURA, Hiroshi NIINO

Ocean Research Institute, University of Tokyo, Tokyo, Japan

We study a stationary sink vortex in a rotating tank with a sink hole at the center of the bottom. The flow is measured by PIV and visualized by laser induced fluorescence. The controlling parameters are the rotating rate and the volume flux. When the volume flux is low, the structure of flow is different from that based on the conservation of the angular momentum. The nonlinear model can explain this result. When we reduce the rotating rate of the tank at once, horizontal plumes appear near the side wall and ring shaped upwelling occur near the bottom.

はじめに

水槽の底に穴を開けて水を流すと強い渦ができる。角運動量の保存の結果できるこのような吸い込み渦は Rankine 型の渦で説明され、渦核の外は角運動量の保存則に従いポテンシャル渦になり、渦核部分は剛体回転する¹⁾。しかし実際には底面に回転境界層ができるため、Rankine 渦では説明できない。境界層はどのように内部領域の速度の構造に関わってくるだろうか。またポテンシャル渦部分は慣性不安定に対して中立であるが、乱れに対してどのように応答するだろうか。本研究では実験室内で定常な吸い込み渦をつくり、その構造と不安定について調べた。

2. 実験

2. 1 実験装置

Fig. 1 に実験装置の概略を示す。実験水槽は 3 層からなっており、内径 78 cm のアクリルの円筒水槽 A 内に、アクリルの 2 重円筒水槽があり、内径 59 cm の水槽 B と内径 48 cm の水槽 C になっている。水槽 B はリング状のベアリングののっている。水槽 B の底面の中心に直径 2.5 cm の穴が開いていて、水槽 A の底面から 5 cm 離れている。水槽 A から水槽 B へはポンプで水をくみ上げ、水槽 B から水槽 C へ側壁上端のスポンジを通して流れ込むことで回転になじませている。水槽 C から底面の穴を通して水槽 A に出て行き、ポンプによってまた同じように循環する。水槽 C の水位は常に 36.5 cm に調整されている。

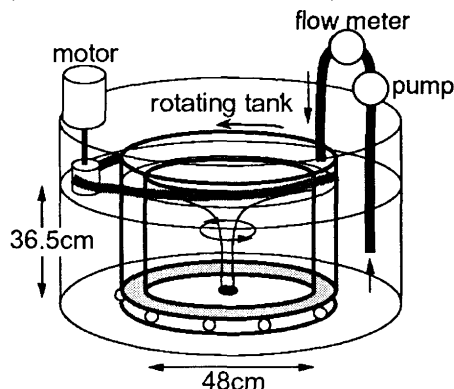


Fig. 1 Experimental tank.

2. 2 実験手順

水平面内の速度分布は水槽 B の底から 10 cm の高さにパルス

レーザーを当て、水中に混ぜたパールエッセンスの散乱光を水槽の底面から画像を撮り、PIV でベクトル図を求めた。鉛直面内の速度分布は PIV では求められないので、スポンジ部分から蛍光染料を流し込み、鉛直面にシート状のレーザーを当ててビデオカメラで撮影した。本実験の可変パラメータは水槽の回転数 Ω と循環させる水の流量 Q である。 $\Omega = 0.2, 0.4$ (rad/s)、 $Q = 30, 150$ (cm³/s) の各 2 通りずつ、計 4 通りの場合について実験を行った。観測は十分に時間をおいて定常状態になってから行った。不安定を見る実験では $\Omega = 0.4$ (rad/s) で定常になった後に $\Omega = 0.2$ (rad/s) に即時に減少させてその後の変化を観測した。

3. 結果と考察

3. 1 定常状態の渦の構造

Fig. 2 は水平面内の接線方向速度の半径分布を表している。PIV で得られた直角座標のベクトルを極座標に直し、水槽の 1 回転分を平均した。図は回転数を $R = 0.4$ (rad/s)、 $r = 0.2$ (rad/s) で表し、流量を $S = 150$ (cm³/s)、 $s = 30$ (cm³/s) で表している。破線は側壁での角運動量が保存されるとしたときに予想される速度分布である。流量が多いときには角運動量保存に良くあっているが、流量が少ないときには速度は小さくなっていた。

Fig. 3 は染料により可視化された鉛直断面の流れの様子である。側壁から注入された染料は内部領域には流入せず、側壁に沿って下降した後に底面に沿って中心へ向かっている。一部はそのまま穴から流出するが、一部は渦核付近の上昇流により内部領域へ流入していることがわかる。

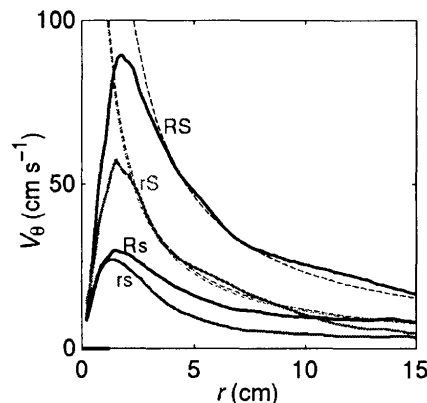


Fig. 2 Radial profiles of the averaged azimuthal velocities.

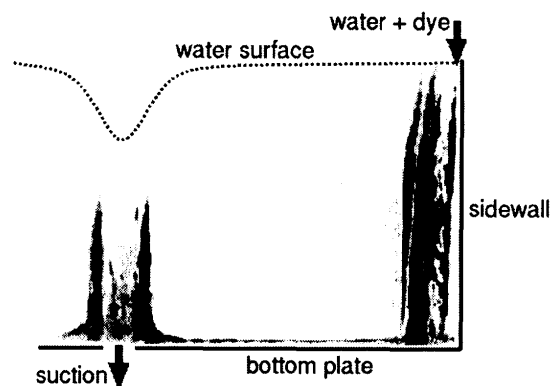


Fig. 3 Visualization of vertical structure.

3. 2 非定常現象

渦の外側が角運動量保存になっているとき、慣性中立なので不安定を起こしやすい。これを見るためにRSで定常状態になった後に急にrSに変えてその後の変化を記録した。Fig. 4, Fig. 5がその様子である。図は左から右へ5秒間隔で並んでいる。側壁付近では回転数の変化後すぐに慣性不安定が起こり、プリューム状の運動が中心に向かって起こった(Fig. 4)。この運動で側壁から10cm程度の混合層が形成された。それと同時に底面からは同心円状に上昇流が起こり、次第に発達していく様子が見られた(Fig. 5)。この構造の成因は今のところ不明だが、プリューム運動で励起された慣性波あるいは底面境界層の不安定ではないかと考えられる。



Fig. 4 Development of plumes at the side wall.

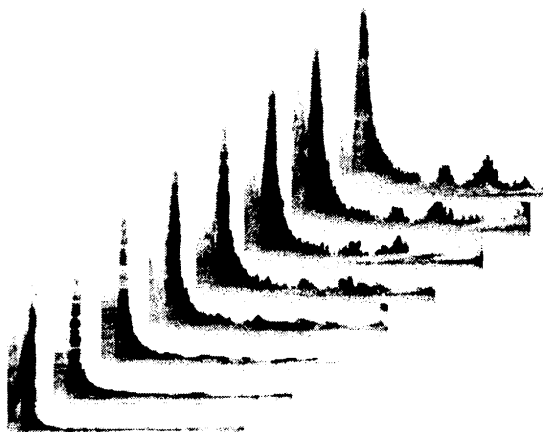


Fig. 5 Development of disturbances at the bottom

4. 理論モデル

定常状態の水平面内の速度分布を説明するために簡単な理論モデルを考える。角速度 Ω で回転する深さ H の流体に壁の位置から Q の流入がある場合を考える。軸対象を仮定し、水面の変形を無視する。穴の付近の流れは考えない。流れを内部領域と境界層に分け、半径 r での境界層内の半径方向の流れを $F(r)$ とする。非線形のEkman境界層の輸送は数値的に求めた相似解²⁾で見積もる。基礎方程式は流量の保存式(1)と運

動方程式(2)である。

$$2\pi H V_r(r) + F(r) = Q \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_\theta}{\partial t} = -V_r \left(\frac{V_\theta}{r} + \frac{\partial V_\theta}{\partial r} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 V_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \frac{V_\theta}{r^2} \right) \quad (2)$$

V_θ, V_r はそれぞれ慣性系での接線方向速度、半径方向速度で、 μ は粘性係数である。

定常状態を仮定し、内部粘性の効果を小さいとすると(1)、(2)式は、

$$(Q - F(r)) \left(2\Omega + \frac{v}{r} + \frac{\partial v}{\partial r} \right) = 0 \quad (3)$$

$v (\equiv V_\theta - r\Omega)$ は回転系から見た接線方向速度である。

これを室内実験のパラメータで解いたものがFig. 6である。室内実験の結果に良くあっている。

(3)式が成り立つのは、

① $Q=F(r)$ のとき。 $F(r)$ はあまり大きくないので、 Q が大きくなるとこのバランスは保てなくなる。

② $2\Omega + v/r + \partial v/\partial r = 0$ のとき。このとき解はポテンシャル渦になる。

したがって流量の大小で流れのレジームが変わる。流量が少ないときは流入がすべて境界層内を通り、内部領域の流れは境界層によって変化する。流量が多いときは内部領域にも動径方向の流れができるためポテンシャル渦が実現する。

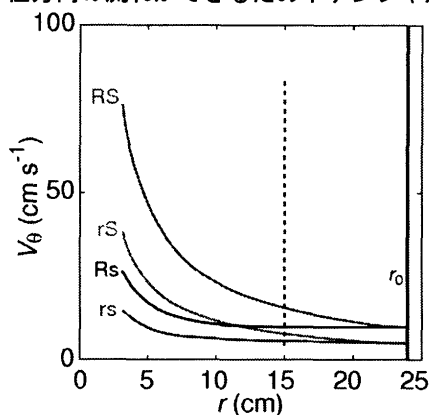


Fig. 6 Solutions of equation (3) for the experiments.

5. まとめ

定常な渦の室内実験より

1) 水平面内の速度構造は流量が多いときはRankine渦に似るが、少ないときは角運動量保存から大きくずれる。

2) 鉛直面内の流れの多くは側面や底面の付近に限られるが、渦核付近では上昇流が見られる。

水槽の回転数を突然減少させる実験より

1) 側壁付近では中心に向かうプリュームが発生する。

2) 底面付近では同心円状の上昇流が現れる。

非線形のEkman境界層の流れをパラメタライズした理論モデルにより、流量の大小によって流れのレジームが変化し、ポテンシャル渦が実現する場合としない場合とを示した。

引用文献

- 1) Lugt, H. J.: *Vortex flow in nature and technology*. John Wiley & Sons (1979) 297 pp.
- 2) Rogers, M. H., and Lance, G. N.: *J. Fluid Mech.*, 7 (1964) 617-631.