

II-246 上昇気泡による二層系の混合

東京大学工学部 正員 玉井 信行
 東京大学大学院 学生員○諏訪洋二郎
 宇都宮大学工学部 正員 池田 裕一

1. はじめに

成層を形成した貯水池などに空気を注入して、気泡の浮力によって強制的に循環流を起こして全層を混合することが試みられている。曝気法には小気泡群を連続的に散気する方法や間欠的に大きな気泡を打ち上げる方法などがあるが、従来の研究では間欠的に打ち出した場合の流動についてよくわかっていない。本研究では、間欠的に気泡を発生させた時の流れの挙動を取り扱うための第一歩として、成層をつけた静止流体中に単一気泡を打ち出した時の流れの様子を可視化する事を行った。

2. 実験装置と実験方法

実験装置の模式図を図1に示す。水槽は縦横150cm×150cm×高さ100cmの矩型部分の底に縦140cm×横30cm×高さ30cmの部分がついた逆凸形のものをを用いた。気泡は半球カップ（半径4.7cm、容積210cm³）を伏せた中に空気を注入し、それを反転させることによって初期上昇速度ゼロの単一の大きな気泡を発生させる。

実験は、水深110cm一定で淡水層60cm-塩水層50cmの明確な界面をもった淡塩二層をつくり、底部中央、底から10cmの高さで単一の気泡を発生させた。塩水層濃度は1%または2%（比重1.007, 1.014）を用い、気泡体積は注入水深（100cm）において25, 50, 100ccという条件で行った。淡水あるいは塩水に一樣にウランやアルミ粉を懸濁し、気泡を一つ発生させた時の気泡と周囲水の流れの様子を、固定したビデオカメラと35mm一眼レフカメラで撮影して可視化を行った。また、導電率計を用いて水槽内の濃度分布の変化も測定した。

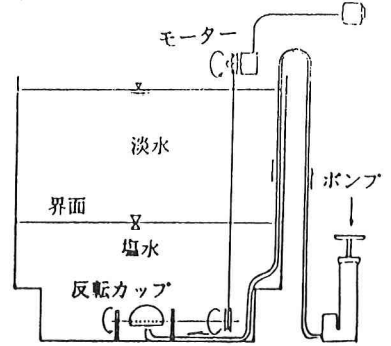


図1 実験装置の概要

3. 実験結果

i) 気泡の上昇過程とその後流

静止した水中を上昇する大きな気泡は、球の一部を切り出した形状になる¹⁾。今回用いた25~100ccの気泡でも同様で、前面が球形で底面が不安定ながらもほぼ平らな伏せたおわんのような形状になり、それは体積によらず相似形を保つ。図2は25cc気泡のビデオ写真である。



図2 気泡形状

前面の曲率半径Rと体積Vの関係

$$R = \alpha V^{1/3} \quad (\alpha \text{ は係数})$$

は、 $\alpha = 1.6 \sim 1.8$ という結果を得た。これは気泡底面をフラットとみなしたときの球の立体角 θ_m に換算すると $45^\circ \sim 41^\circ$ となるが、実際の底面は窪んでいて θ_m はこの値より多少大きく、気泡体積が大きくなるに従ってその窪みが深くなるように観察された。

また上昇速度Uについては次式が与えられていて²⁾

$$U = 2/3 (gR)^{1/2} \quad (g \text{ は重力加速度})$$

これは実験結果と良く一致していた。

この形の気泡が水中を上昇するときその後流は乱流で、閉じていないと従来言われてきた。図3はウランで可視化した後流の写真である。

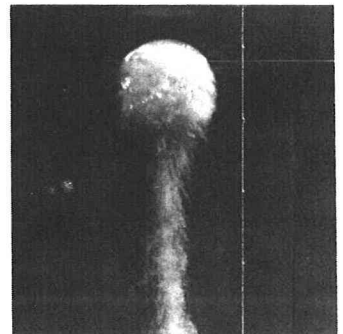


図3 気泡後流

気泡のすぐ後ろに渦輪状の構造があり、その大きく循環した領域に周囲流体が巻き込まれ捕らえられ気泡と共に上昇するが、完全には閉じていず、軌道上に一部を尾として残しながら上昇していく様子が観察された。循環領域は気泡の曲率半径をもった球体の領域であるとみなして、その体積は気泡体積のおよそ20倍であるという結果を得た。この気泡に追従する領域と周囲流体との交換の割合については、取り込まれた周囲流体が領域内で一様に混合されると仮定し、領域内の塩分濃度の変化を測定した結果、1秒間上昇した時に気泡についていくのはそのおよそ4割で、残りの6割の部分は周囲の流体と交換されて尾のように軌道上に残されていくことがわかった。以上のことは、気泡体積や塩水の濃度による差はほとんどなかった。また気泡の上昇に伴う周囲水の乱れ(2次的な後流)は軌道付近に限定されていた。

ii) 密度界面付近の混合の過程

界面を通しての下層から上層への揚水効果とその混合について述べる。図4 a)~d)はウランにて着色した1%塩水層を通過してきた50cc気泡の後流の様子である。a)界面下で形成された気泡と後流の循環領域は界面の影響を受けずに通過するが、気泡に置いてゆかれた2次的な後流は界面の壁に突き当たってほとんどが界面下を水平に流れる。この付近では混合はほとんど起こらない。b)界面を通過した循環領域の塩水は、淡水層を上昇するにつれて少しずつ周囲水と交換・混合しつつもある程度の塩水を保持して水面に達する。置いていかれた後流の尾の部分は周囲との密度差により上昇から下降に転じ、多少周囲の水と混合しながら鉛直に界面付近まで下降し界面上にうすくひろがってゆく。c)水面まで連れてこられた循環領域は、渦輪が固体壁にぶつかった時のように水面下に広がり、そこで大きく乱れて強く混合する。d)水面付近で混合した塩水はある程度まで水面下を広がるがやがて止まり、密度差によりゆっくりと界面近くまでまっすぐに下降し広がる。またその下降に伴って、塩水と混合しなかった遠方領域の淡水がその上に覆いかぶさっていく。そして最後には、全く混合しなかった塩水層、上昇過程で取り残された比較的濃い塩水層、水面付近で強く混合した薄い塩水層、混合しなかった淡水層の4層に落ちつくことになる。

以上のように大きな単一気泡による二層系の混合では、気泡に捕らわれた後流領域が大きな役割を果たすと思われた。個々の気泡を互いに影響を及ぼさないような時間間隔を開けて多数回打ち上げた時の結果を図5に示す。これは1%塩水層時100cc気泡を1分間隔で50発打ち上げた時の濃度分布を示す。界面低下量から揚水量を求めるとそれは注入空気量の約2.5倍で、別に気泡体積や塩水濃度を変えた時にもその値は2、30倍位という結果を得た。この値と循環領域の体積比(約20倍)と比べ、下層から上層への揚水混合を考えるに当たっては気泡に捕らわれた循環領域が重要であることがわかる。

4. まとめ

単一の大きな気泡による二層系の混合においては気泡に捕らわれた後流部分が大きな役割を果たすことがわかった。

- 参考文献 1) Wegener, P. P. et al, Ann. Rev. Fluid. Mech., 1973, Vol. 5
2) Davies, R. M. et al, Proc. Roy. Soc., 1950, A200 3) Coppus, J. H. C. et al, Trans. Instn Chem, Engrs, 1977, Vol. 55

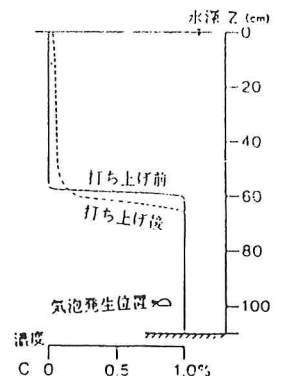
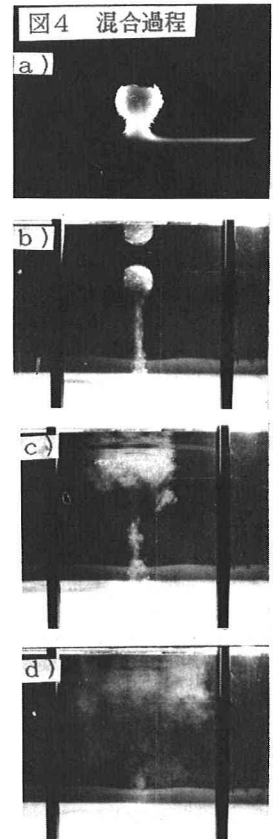


図5 濃度分布変化