水表面における気泡崩壊現象の数値計算

山口大学工学部　学生会員　○桂原　久典
山口大学大学院　学生会員　坪郷　浩一
山口大学工学部　正会員　朝位　孝二
山口大学大学院　学生会員　野村　明弘

1.はじめに

本研究の目的は，気液混相流解析法の一つである level set 法を用いて水表面での気泡の崩壊現象をシミュレートすることである．今回は水中の気泡が上昇する現象のシミュレーションは，運動方程式と level set 関数で用いる輸送方程式の移流項の数値解析手法を検討した．

2.流れ場の計算手法

2.1 基礎方程式

本手法の流れ場の計算は，連続の式(1)，運動方程式(2)･(3)，密度の保存式(4)を用いる．

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \quad \cdots\cdots(1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=F_x-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\upsilon\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \quad \cdots\cdots(2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial x}=F_y-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+\upsilon\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \quad \cdots\cdots(3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+u\frac{\partial \rho}{\partial x}+v\frac{\partial \rho}{\partial y}=0 \quad \cdots\cdots(4)$$

ここで，u, vはx, y方向の流速成分，F_x, F_yは外力項，pは圧力，νは動粘性係数，ρは流体密度，tは時間を表す．

2.2 level set 関数の輸送方程式 [1)]

密度場は式 (4) を直接解くのではなく，界面からの符号付き距離関数である level set 関数ϕの輸送方程式（式 (5)）を解く．気体内部で$\phi<0$，液体内部で$\phi>0$，界面で$\phi=0$となるようにϕの初期設定を行い，次式に従ってϕの時間発展を計算する．

$$\frac{\partial \phi}{\partial t}+u\frac{\partial \phi}{\partial x}+v\frac{\partial \phi}{\partial y}=0 \quad \cdots\cdots(5)$$

2.3 計算手順

図-1 に本数値解法のフローチャートを示す．まず，流速を仮定し，ついで圧力のポアソン方程式を解き，

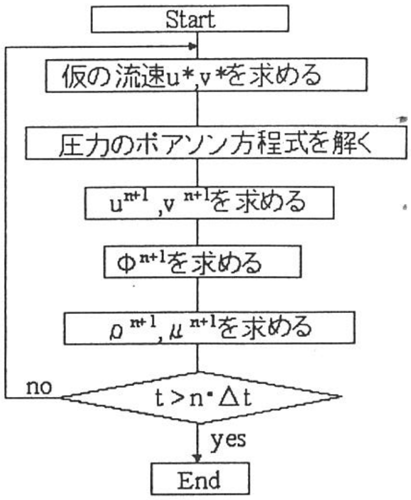


図-1　計算の手順

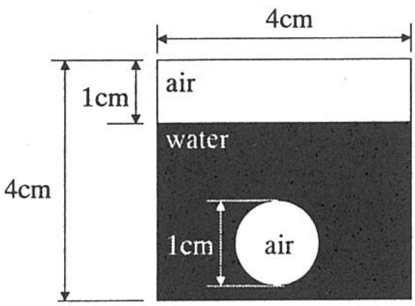
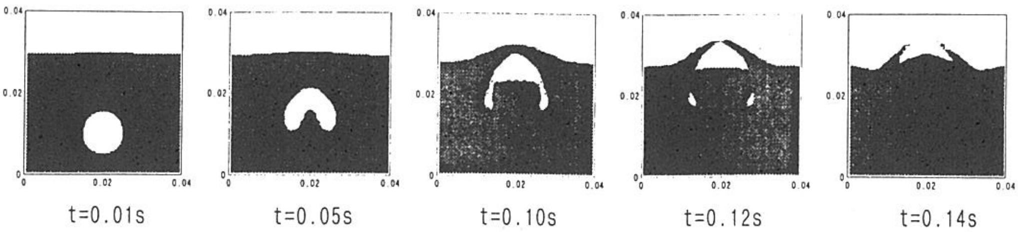


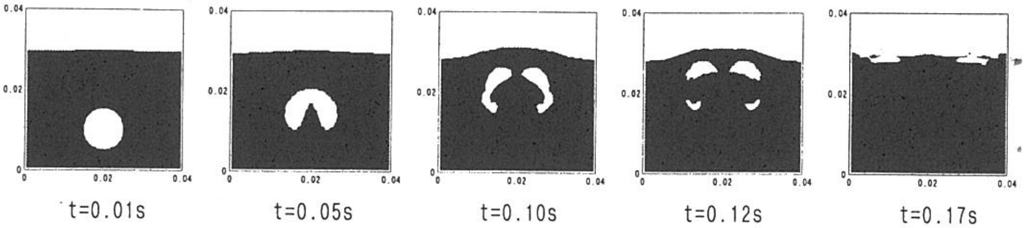
図-2　初期配置

表-1　各物性値の設定

物性	値
水の密度	1000kg/m^3
空気の密度	1.25 kg/m^3
水の粘性係数	1.0×10^{-3}(Pa･s)
空気の粘性係数	1.5×10^{-5}(Pa･s)
重力加速度	9.80(m/s^2)



(a) 運動方程式に TVD-MUSCL 法を用いたとき



(b) 運動方程式に CIP 法を用いたとき

図-3　単一気泡の流体場の解析

流速を求める．次に距離関数ϕを求める．求まった距離関数ϕから流体密度ρと粘性係数μが与えられる．所定の時間までこのループを繰り返す．

3.数値解析例と解析結果

静止流体中を上昇する水面と干渉しながら上昇する単一気泡周辺の流体場の解析を行い，高密度比，界面の大変形という 2 つの特徴を有している流体場への解析手法の適応性を検討した．計算領域は図-2 に示す配置であり，各物性値は表-1 に示す通りである．計算条件として格子間隔が$\Delta x = \Delta y = 0.0001$m，時間刻みは$\Delta t = 0.0001$s とする．境界は滑りなし個体壁とした．なお，運動方程式の移流項に TVD-MUSCL 法[2] または CIP 法[3] を用い，式(5)の移流項には CIP 法を用いる．ただし，表面張力は考慮しない．

TVD-MUSCL 法を用いた場合には，図-3(a)より，気泡の上昇過程で大きな変形を示す．初期に円形をした気泡は，上昇開始直後から変形し始め，すぐに下部中央から窪みを発生して馬蹄形へと変形していく．つぎに馬蹄形の両端部に巻き込みが生じ，巻き込みの付け根部分が次第に細くなっていく．気泡は，水面との干渉を強め，最終的には水面を抜けて上部の気体と融合する．CIP 法を用いた場合は，図-3(b)より，TVD-MUSCL 法と同様に初期に円形をした気泡は，上昇開始直後から変形し始め，馬蹄形へと変形していく．つぎに馬蹄形の両端部に巻き込みが生じ，巻き込みの付け根部分が次第に細くなっていく．しかし，t=0.12 s 前後で 4 つに分裂してしまう．

CIP 法より TVD-MUSCL 法の方がより気泡の変形過程を詳細に再現している．

4.おわりに

単一気泡の変形過程を再現できた．今後は，表面張力を加えたときの流体場の変化を検討する必要がある．

参考文献

1）　梁僑全，里深信行：標位関数を用いた非圧縮性気液二相流における移動気液界面の挙動の数値計算，日本機械学会論文集(B 編)，64 巻 617 号，pp.42-49，1998.

2）　藤井孝蔵：流体力学の数値計算法，東京大学出版会，pp.72-76，1994.

3）　越塚誠一：数値流体力学，培風館，pp.50，1997.