

平成 22 年度修士論文要旨

(東京大学大学院 新領域創成科学研究科 海洋技術環境学専攻)

メタンハイドレート被覆気泡の挙動に関する数値シミュレーターの開発

(Development of Numerical Simulator for rising Methane droplet covered by Methane Hydrate Membrane)

学籍番号 096640 飯田 泰樹

指導教員 佐藤 徹 教授

(平成 23 年 3 月 24 日修了予定)

キーワード:メタンハイドレート, 格子ボルツマン法, 気液二相流, 界面張力, 気泡運動

Keywords: Methane hydrate, Lattice Boltzmann method, two phase flow, interface tension, Bubble behavior

1. 序論

近年注目を集めているメタンハイドレート(以下 MH)の資源量は,日本の天然ガス消費量約 100 年分と推計されている. MH の商業的生産を実現するためには,生産性および回収率を向上させることが必須である.

この MH の生産を最も現実的とされる減圧法によって行う際,パイプ管内部で閉塞が起こり,パイプ管が破損するといった懸念がある.これは,管内で MH 再生成し,閉塞の原因となるためである.このため,MH 生産の際には管内の気泡の挙動を知ることが重要となってくる.そこで MH が表面を被覆した気泡が管内を上昇していく際の気泡運動を再現するため,杉田[1]の開発した気液二相流を扱える格子ボルツマン法を元にして,気泡同士が接触しても合一しない様な数値シミュレーターの開発を行う.

2. 数値計算手法

本研究で使用するコードは Inamuro[2]及び Yan.et.al.[3]の開発した気液二相流を扱える格子ボルツマン法を元に,杉田[1]が開発したものを使用する.

格子ボルツマン法は計算アルゴリズムが非常に単純で並列化処理もしやすいため,複数プロセッサを利用することによる計算時間の短縮が容易である,など多くの利点が挙げられる[4].

時間 t において格子点 x 上で粒子速度 c を持つ粒子の分布関数 $f_i(x,t)$ 及び $g_i(x,t)$ の時間発展方程式及び局所平衡分布関数はそれぞれ(1)~(4)式で,また界面パラメータ ϕ と流速の予測値 u^* は(5),(6)式で計算する.

$$f_i(x+c_i\Delta x,t+\Delta t)=f_i(x,t)-\frac{1}{\tau_f}[f_i(x,t)-f_i^{eq}(x,t)] \quad (1)$$

$$g_i(x+c_i\Delta x,t+\Delta t)=g_i(x,t)-\frac{1}{\tau_g}[g_i(x,t)-g_i^{eq}(x,t)]-3E_ic_{iz}g\Delta x+3E_ic_{i\alpha}\frac{1}{\rho}[\frac{\delta}{\delta x_\beta}\mu(\frac{\delta\mu_\beta}{\delta x_\alpha}+\frac{\delta\mu_\alpha}{\delta x_\beta})]\Delta x \quad (2)$$

$$f_i^{eq}=H_i\phi+F_i[p_0-k\phi\nabla^2\phi-\frac{k}{6}|\nabla\phi|^2]+3E_i\phi u_\alpha c_{i\alpha}+E_ikG_{\alpha\beta}(\phi)c_{i\alpha}c_{i\beta}x \quad (3)$$

$$g_i^{eq}=E_i[1+3u_\alpha c_{i\alpha}-\frac{3}{2}u_\alpha u_\alpha+\frac{9}{2}u_\alpha u_\beta c_{i\alpha}c_{i\beta}+\frac{3}{2}(\tau_g-\frac{1}{2})\delta x(\frac{\delta u_\beta}{\delta x_\alpha}+\frac{\delta u_\alpha}{\delta x_\beta})c_{i\alpha}c_{i\beta}] \\ +E_i\frac{k}{\rho}G_{\alpha\beta}(\phi)c_{i\alpha}c_{i\beta}-\frac{2}{3}F_i\frac{k}{\rho}|\nabla\phi|^2 \quad (4)$$

$$\phi=\sum_{i=1}^{15}f_i, \quad u^*=\sum_{i=1}^{15}g_ic_i \quad (5),(6)$$

3. 計算アルゴリズム

3.1 気泡の体積補正

杉田[3]の開発したコードで液相中に気泡を設置し、浮力によって液相中を上昇していく計算を行うと、小さく設定した音速によって流体に圧縮性を許してしまうため、タイムステップを追う毎に気泡の体積が条件によって増減してしまうという問題が生じた。

これは、無次元化の際に代表速度として擬似音速を使用しているが、現実の水中の音速である1500(m/s)を使用すると計算時間が膨大になるため、多少の圧縮性を許して小さい値を使用している。体積の増減は、主にこのために生じると考えられる。そこで、この体積誤差を補正するためのアルゴリズムを考えた。

体積を補正する際、領域全体の気相の体積ではなく、気泡毎の体積を一定に保つため、各気泡を識別できる様に格子点に情報を持たせる必要がある。このため、N 個の各気泡に 1~N の番号を持たせた。

また、界面パラメータ ϕ を用いて気泡の界面張力を計算する際にも、気泡毎の識別子は必要となる。気泡が接触した際に合一してしまうことを防ぐためには、気泡同士が接触した場合、これら二気泡を一気泡と見なした界面曲率で界面張力が働くと、二気泡は合一してしまう。このため、気泡ごとに ϕ を設定し、接触した二気泡のそれぞれにおける界面曲率によって、それらが合一しないような界面張力をかける(Fig.1(A)~(D))。

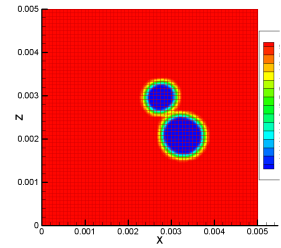
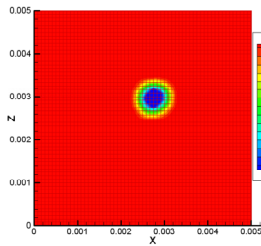
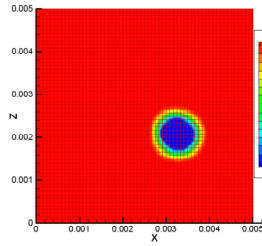


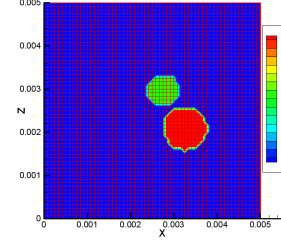
Fig.1(A) ϕ of entire domain



(B) ϕ of bubble 1



(C) ϕ of bubble 2



(D) Number of bubbles

領域内の密度は界面パラメータ ϕ を用いて以下の様に計算される。

$$\rho = \rho_G \quad (\phi < \phi_G) \quad (7)$$

$$\rho = \frac{\rho_L - \rho_G}{2} \left[\sin\left(\frac{\phi - (\phi_L + \phi_G)/2}{\phi_L - \phi_G} \pi\right) + 1 \right] + \rho_G \quad (\phi_G \leq \phi \leq \phi_L) \quad (8)$$

$$\rho = \rho_L \quad (\phi > \phi_L) \quad (9)$$

この計算を行う際に、閾値である ϕ_G の値を上下させることで、界面である ϕ_A の位置を調整して、あるべき体積に補正する(Fig.2)。この補正を行うことで、各気泡の体積を常に一定に保つこととする。

この時、気泡がパイプ管内を上昇した際に静水圧が減少するため、圧力変化による密度計算を毎ステップ行った。初期配置段階での気泡直径から計算された体積を元に、深度毎の密度から深度毎の体積を計算し、それに合わせて体積補正をかけた。

先に行った計算と同じく、気泡を二つ配置して、初期体積からの誤差 $\pm 1\%$ 以内に補正をかけて計算を行った。この時の気泡ごとの体積の時間経過を Fig.3 に示す。

この結果から、気泡ごとの体積が保たれていて、体積補正のアルゴリズムが機能していると言える。

ここで気泡の体積が増減するという事は、 ϕ が増減していることと等しい。よって、補正された体積を元にし

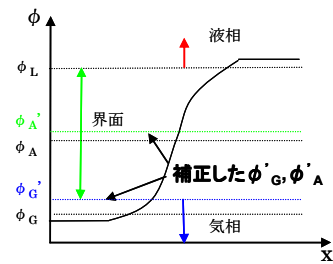


Fig.2 Calculation of ρ from ϕ

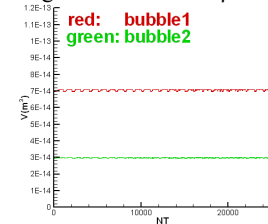


Fig.3 Volume of each bubble

て ϕ も補正する.この時,界面部分での ϕ に対して恣意的な値を与えると,気泡が正しい挙動をしなくなってしまうため,界面として気相と液相の中間密度を持つ格子を 6 セル取り,それら以外の ϕ を気相($=\phi_G$)と液相($=\phi_L$)として毎ステップ補正をかけた.Fig.4に気液界面における ϕ を補正する際のイメージを示す.

この時,界面部分のセルに対しては何もしていないので,さらに界面の 6 セルに対して,体積補正を行った際の閾値を用い,(10)式に従い補正をかける.

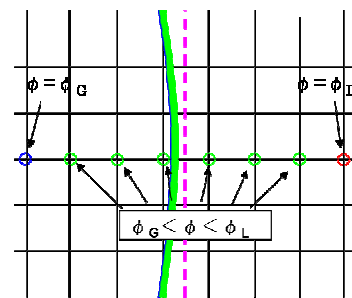


Fig.4 Image of interface

$$\phi_{new} = \frac{\phi_{old} - \phi'_A}{\phi_L - \phi'_G} + \phi_A \quad (10)$$

これらの補正により,計算を続けても体積が保存され,それに準じた ϕ を得られる様になった.

3-2.運動量に関する界面の取り扱い

気泡界面における粘性を(11)式に従って上乘せし,極端に大きな粘性にすることで,膜間での運動量のやり取りを防ぐ.

$$\mu_{after} = \mu_{before} - 4C \mu_L (\phi - \phi_L)(\phi - \phi_G) \quad (11)$$

$C=150$ として界面に最大で流体の 150 倍の粘性を与えて計算を行った際の気泡の様子を Fig.5(A),(B)に示す.またこの時,先述した界面張力の取り扱いを行うことで,二つの気泡が接触しても合一せず,浮力によって上昇していく様子を Fig.6 にそれぞれ示す.

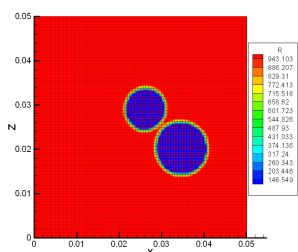
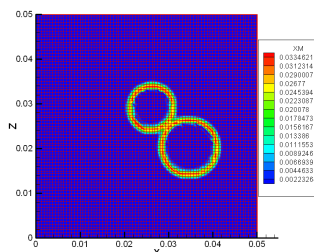


Fig.5 (A) Density of bubbles



(B) Viscosity at interface

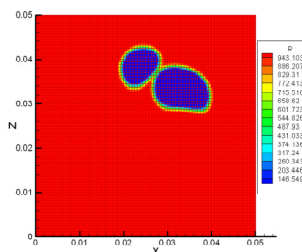


Fig.6 Bubbles without union

3-3.感度解析

本研究で設定した音速,界面厚さ,界面に上乘せする粘性係数の幾つかの値に対して,音速 20(m/s),界面厚さ 6,上乘せする粘性は流体の 150 倍を基本として感度解析を行った.

この時,計算が安定になるものに対してのみ終端速度による検証を行った.検証を行った値を表にしてまとめる.各値を使用した時の計算の安定性に対して,○(計算が安定),△(圧力計算は収束するが,結果が妥当でない),×(圧力計算が収束しない)の三つで評価をした.赤字はその条件時の気泡の終端速度(m/s)を表す(Table1).

この表から,音速は 20(m/s)の時のみ安定に計算が可能,界面厚さは大きい方が安定して妥当な結果に近く,上乘せする粘性は大きい方が安定であるが,100 倍を境に差がなくなると言える.

Table1 Results of Sensitivity analysis

Sound of speed c_0 (m/s)	10(×):—	20(○):0.266	30(△):—	50(×):—	100(×):—
Interfacial thickness D	4(△):—	6(○):0.266	8(○):0.288	—	—
Adding viscosity C	50(△):—	100(○):0.265	150(○):0.266	200(○):0.266	—

4.計算結果と考察

本研究で開発したコードの正当性を検証するために、終端速度及び気泡形状の二点の比較を行った。佐藤[5]は、耐圧容器内にて高压低温条件下で、被覆した気泡の挙動を実験的に追った。この実験結果とコードを比較して、検証を行う。

4-1.気泡の上昇速度

本コードを用いて、直径 10(mm)の気泡が浮力によって上昇する際の計算を行った。音速は 20(m/s)、上乗せる粘性係数は流体の 150 倍で、界面張力は 100(mN/m)である。この時の速度の時間結果を描画したものを示す(Fig.7)。図中の青の破線は、約 10(mm)の気泡が耐圧容器内を上昇するのを実験的に計測した際の上昇速度のおよその平均値である。

気泡の上昇速度の実験値は約 0.280(m/s)、また計算の中の終端速度は約 0.266(m/s)であり、その誤差は 5.3%である。

4-2.気泡の形状

4-1.と同様に、直径 10(mm)の被覆気泡が、浮力によって上昇する様子を実験的に捉えたもの、及びシミュレーションによる気泡運動の連続画像を Fig.8 に示す。

図から、気泡が扁平しながら浮力によって上昇する際に左右に蛇行する現象が表現されている。この時の蛇行の周期を比較して検証する。

蛇行しながら上昇する気泡の様子を実験的に捉えた画像を Fig.9 に、またシミュレーションした気泡の X 方向速度を Fig.10 に示す。

実験の気泡の振動周期は約 0.21(sec)で、シミュレーション結果では約 0.20(sec)である。以上より、蛇行する気泡運動及び気泡形状が、本研究で開発したコードを用いて良く再現できていると言える。

5.結言

本研究で開発したコードを用いることで、気泡が上昇する際に接触を起こしても合一することなく上昇する様子が再現できた。

今後の課題として、MH 被覆気泡のより正確な界面張力の値の使用、MH 膜間での接触時の圧着力、温度、接触時間による単位面積あたりの吸着力を用いた粒子間での吸着現象の考慮、また音速による計算の安定性の検証をする必要がある。

参考文献

- [1].杉田年男：修士学位論文、東京大学(2008 年)
- [2].T.Inamuro: Fluid Dynamics Research 38(2006) 641-659
- [3].Yan, YY: Journal of Computational Physics 227(2007) 763-775
- [4].蔦原道久,「格子気体法・格子ボルツマン法 -新しい数値流体力学の手法-」(1999 年),(56-121)
- [5].佐藤康晴：学士卒業論文、東海大学(2009 年)

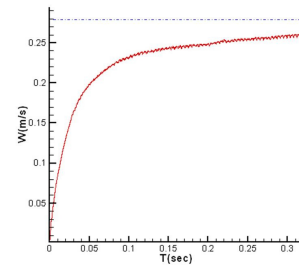


Fig.7 Velocity of rising bubble from calculation and experiment

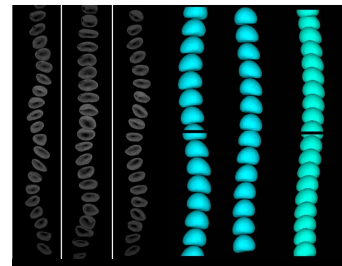


Fig.8 Comparison of experimental and simulated bubble behavior

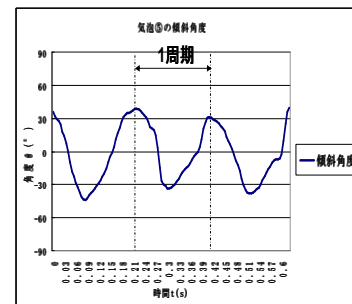


Fig.9 Oscillation period

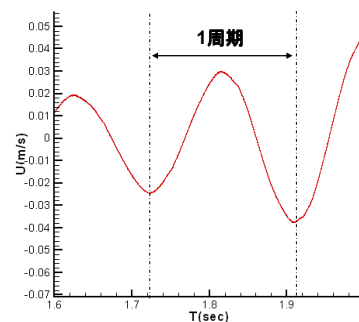


Fig.10 Horizontal velocity