

ギネスビールの泡の挙動のシミュレーション

富永百合香 (指導教員: 河村哲也)

1 はじめに

ビールはその誕生から長い歴史を持ち、何千年にもわたって人々に愛され続けている飲み物である。過度の飲酒は禁物であるが、適度にたしなめば独特な味わいと香りを大いに楽しむことができる。

ビールの大きな特徴といえば、やはりグラス上部に浮かび上がるふっくらとした泡である。泡は気体であり液体より軽いので、この現象はごく自然なものとして捉えられるが、しかし例えばギネスビールというビールではグラスにビールを注いだ後、泡が下へ下へと沈んでいくさまを見ることができる。

本研究ではこのギネスビールの泡の特殊な挙動に注目し、泡の下降するメカニズムに迫るとともに、泡の大きさや容器の形を自在に変えてみることで、それらが現象に及ぼす影響についても解明していく。

2 モデル化・格子生成

2.1 格子

本研究では軸対称性を仮定し、容器の断面で計算を行った。

計算領域は Fig. 2.1. に示すように容器の断面の、軸対称の右側とし、格子は格子数 80×200 の等間隔格子を用いた。(Fig. 2.1)

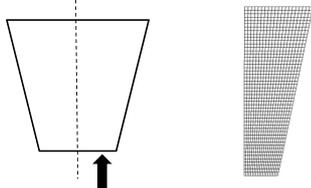


Fig. 2.1: 計算領域と格子

2.2 計算モデル

以下に示す2つの観点から実験を行う。なお、気泡を含む流れに対しては浮力による簡易モデルを使用する。また、初期条件は泡なしの状態からの一様泡流入とする。

(1) 容器の形状

直方体の容器と、Fig. 2.2 の様な3種類のグラスを用意し流れを観察する。下降流が見られたものについては、速度の最大値の分布を観察する。

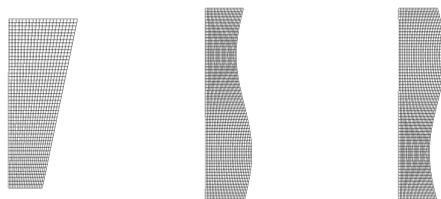


Fig. 2.2: 容器形状

以下左より Case 1, Case 2, Case 3 とする。

(2) 泡直径

グラスを固定し、泡直径を変化させて流れを観察する。各泡直径における速度の最大値を求め、比較して変化を見る。

3 計算方法

3.1 基礎方程式

二次元の場合の基礎方程式は以下の通りである。連続の式、Navier-Stokes 方程式、泡の方程式を使用する。

連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{Re} \Delta u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{Re} \Delta v + \alpha N$$

泡の方程式

$$\frac{\partial N}{\partial t} + u \frac{\partial N}{\partial x} + (v + v_p) \frac{\partial N}{\partial y} = \beta \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right)$$

u : 水平方向速度, v : 鉛直方向速度,
 P : 圧力, v_p : 泡の上昇速度, N : 泡の密度,
 α : 浮力の大きさを表す無次元パラメータ,
 β : 泡の拡散を表す無次元パラメータ,
 Re : レイノルズ数

3.2 解法

上記の方程式をストークスの流れ関数と渦度法を用いて書き換え、非線形項は3次精度上流差分で近似して解く。

4 結果と考察

4.1 容器の形状

以下泡直径:0.01mm, 10000 ステップで計算した。まず、直方体の容器で計算を行ったが、泡の下降現象は観察できなかった。そこで気泡密度の変化を見たところ、開始から泡が時間の経過とともに一律で上昇している様子が観察できた。

Case 1, 2においては、グラス側面に下降流が確認できた。(Fig. 4.1)

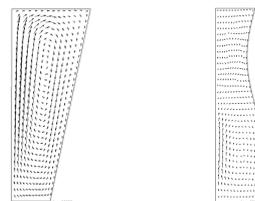


Fig. 4.1: Case 1, Case 2 の流れの様子

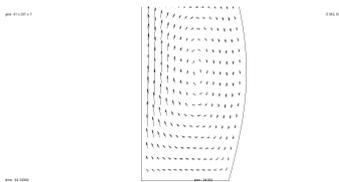
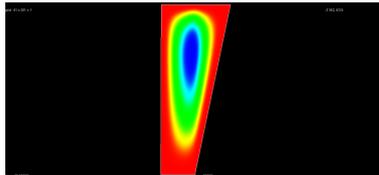


Fig. 4.2: Case 2 の拡大図

Fig. 4.1, 4.2 から分かるように、Case 1, Case 2 においてはガラスが外に向かって開いた形をしている箇所でもガラス側面に下降流が発生していた。速度の最大値の分布は以下のようになっていた。(Fig. 4.3)

【Case 1】



【Case 2】

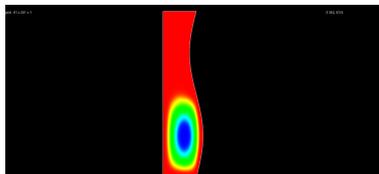


Fig. 4.3: Case 1, Case 2 の速度の最大値分布

Fig. 4.3 が示すように、ガラスの中央部、およびガラスの側面がもっとも速度の最大値が大きくなっていた。

以上の結果から、ガラスが上に向かって外に開いた形をしていると、泡とビールが上昇する際にガラス径が広がるため左右に拡散する。そうするとガラス下部の質量が減るので、そのなくなった部分を補うように側面から液体の流入が起こり、泡が流される。という仕組みで泡の下降が起こっているのだと考えた。

Case 3 では Case1, 2 のような側面の泡の下降現象は得られなかった。

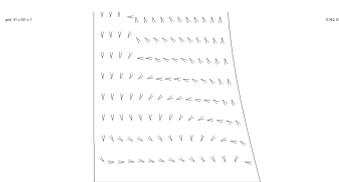


Fig. 4.4: Case 3 の流れの様子(拡大)

かわりに、Fig. 4.4 から分かるように、Case 1, 2 とは反対の、ガラス側面からガラス中央部に向けた下降の流れがわずかに確認できた。

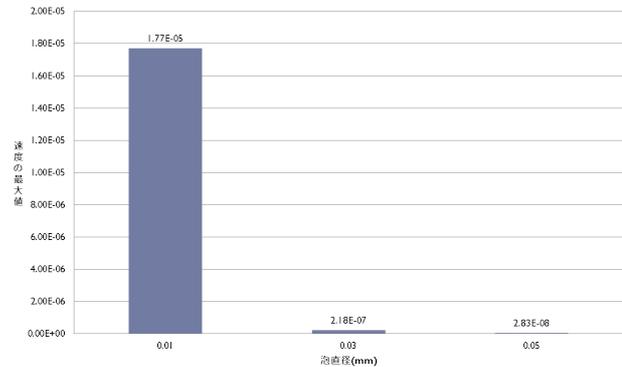
このことから、容器が上に向かって狭くなっていくような形をしていると、泡とビールの上昇の際に側面からの流入と中央の上昇流が競合するため、一部がガラス下部に押し戻されるようにして、中央部に向きの流れが発生するのだと考えた。

4.2 泡直径

泡の直径を 0.01mm, 0.03mm, 0.05mm と変化させていったときの Case 1 における速度の最大値の値は Table. 4.4(Graph. 4.5) のようであった。

Table. 4.4: Case 1 の計測結果

泡直径 (mm)	0.01	0.03	0.05
速度の最大値	$1.77E - 005$	$2.18E - 007$	$2.82E - 008$



Graph. 4.5: Case 1 の計測結果

Graph. 4.5 を見ると分かりやすいが、泡直径を大きくすると急激に泡の下降速度の最大値は小さくなっていった。

また、泡直径を変化させていく中で、値が 0.06mm 程度より大きくなると、どの容器においても側面における下降流を観察することができなくなった。このことから、泡の下降は、上昇速度に対する対流の強さが関係していると考えた。本シミュレーションでは、上昇速度をストークス則により定義しており、泡直径の 2 乗に比例するため、泡が大きいということは、当然それだけ上昇速度も大きくなっている。そのような状況においては対流の強さが上昇速度に対して不十分となり、泡の下降が起こらなかったものと考えた。

5 まとめと今後の課題

ギネスビールの泡の下降現象について、ガラスの形状、および泡直径に着目しさまざまな条件で検証を行った。その結果、この泡が下降する現象というものは、泡の大きさとガラスの容器の両方の要素が一定の条件を満たすことで起こるものであり、ただ闇雲にガラスに注いでも観察できるわけではない、ということが判明した。ただし、言い換えると、泡が細かく、かつ外に開いた形のガラスに注ぐことで、ギネスビールでなくとも泡の下降現象は起きるのだということも考え得るということである。

今後は、ガラスを三次元化し、一様泡流入の境界条件についても検討することで、より実際の状況に近いシミュレーションを目指す。

参考文献

- [1] 河村哲也. 数値シミュレーション入門. サイエンス社, 2006.