

微小重力下での温度勾配中の泡の挙動実験結果

PI: 東 久雄

CI: 吉原正一、大西 充、荻原綾千男

1. 序論

微小重力下での泡あるいは液滴の挙動を理解することは材料プロセッシングおよび流体力学のために極めて重要かつ有用である。泡や液滴の移動に影響する最も大きい要因は温度勾配による熱毛細管力である。

半径 R の気泡が、温度勾配 ∇T のついでいる、粘性 μ 、表面張力 σ の液体中にあるとき、その気泡移動速さ U_0 は Young 等 [1] により解析的に以下のように与えられる。

$$U_0 = -R/2\mu \partial \sigma / \partial T \nabla T$$

この解析はクリーピング流れ ($Re \ll 1$) と均一な温度分布 ($Pe \ll 1$) という理想的な条件を仮定している。 $Re > 1$ の範囲については、いくつかの解析的表現が提案されている [2, 3, 4]。Crespo 等は適度に大きい Reynolds 数での最終の速さを

$$U_\infty = -R/5.1\mu \partial \sigma / \partial T \nabla T$$

と与えている。しかし、上記の方程式と比較する十分な実験データを我々は持っていない。

この実験では、マランゴニ数の広い範囲 $0 \ll Ma < 1500$ で泡の移動速さを観察した。ここでマランゴニ数は

$$Ma = R^2 \partial \sigma / \partial T \nabla T / \mu \chi$$

で定義される。 χ は液体の熱拡散係数である。実験結果は上記理論値のどちらよりも低い値を示した。しかし、高温の壁の近傍の高マランゴニ数の領域では急速な加速とより速い気泡の速度が観察された。

もう一つの注目すべき現象、明らかな温度勾配が存在しないのにも拘わらず、気泡が高温壁に移動する現象である。これについても述べる。

2. 実験装置と手順

実験装置はシリコンオイル (10 cst) を満たした円筒 (内径 5 cm) で、図 1 に示すような光学系の内部に設置された。その円筒はヒータとクーラに挟まれている。円筒の壁はポリカーボネイトでコーティングされたパイレックスガラスで、ヒータとクーラはアルミ合金出で出来ている。円筒壁は注射針が挿入出来るようにゴムの部分を持っている。気泡はペイロードスペシャリストにより、注射針をクーラより 1.5 cm 下方に挿入することにより作られる。

気泡を注入後、円筒の上端と下端の間に温度勾配が徐々に形成された。この手順は広いマランゴニ数の範囲でデータを取得するために採られた。これはヒータ壁が約 60°C、クーラ壁が 10°C になるまで続けられた。しかし、一様な温度勾配は形成さ

れず、最大は高温壁の近傍で約 $20^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ に達している。温度は内壁に沿って設置された熱電対で測定された。時間的な温度分布の変化は図 2 に示される。気泡の挙動は直角に置かれた二本のファイバースコープを通して観察され、記録された。

実験は二度（実験 1 と実験 2）異なった日に行われた。

3. 実験結果

第一の注目すべき気泡の挙動は、注射針の先から、大きい一つの気泡が形成されることなく、多数の小さな気泡が作られたことである。ペイロードスペシャリストが速く空気を入れた時、大きな気泡が形成された。次に注目すべき振る舞いは、全ての気泡がすぐに高温壁の方向へ移動し、止まることである。この現象は実験 1 と実験 2 で共に観察された。温度勾配が付けられて、気泡は再び移動を始めた。温度勾配が付いていない時に移動している気泡の位置と測定された移動速度を図 3 に示す。

図 2 に示すように、温度分布は常に増加しているので、気泡の移動速度はけっして平衡に達することはないであろう。それ故、測定された気泡の移動速度は理論的予測よりは常に小さいに違いない。三つの気泡（半径 $0.25, 0.15, 0.11\text{cm}$ ）の測定された移動速度がマランゴニ数に対して図 4 に示される。これらのデータは、実験 2 における、図 5 に示されるような移動する三つの気泡から得たものである。図 6 に Young 等によって定義された速度 U_0 で正規化された速度が示されている。 Ma と U_0 の計算には、 $\partial\sigma/\partial T = -0.077$, $\mu = 0.0935\text{g}/\text{cm}\cdot\text{sec}$ ($T = 25^{\circ}\text{C}$ 値) と $\chi = 0.000947\text{cm}^2/\text{sec}$ が用いられた。粘性の温度による依存は考慮されている。図 5 から分かるように、三つの気泡はお互いに数 mm 離れて移動しており、気泡間の干渉の存在を示唆している。

気泡間干渉の他の例が図 7 に示されている。図 7 では、高温壁に付いている二つの大きい気泡からかなり（ 20mm 程）離れている小さい気泡が次々とその大きい気泡に引き付けられた。この図は実験 1 から作られたものである。

4. 検討

図 3 に示されるように、気泡はその方向の温度勾配が存在しなくても、熱い壁に向かって動いた。最もありそうな理由は、気泡は電荷を伴って作られ、容器内の静電場を移動するということである。図 3 に示された速度から、電荷を持った気泡は注射針により形成される電場を移動すると推測される。注射針と気泡は同じ負の電荷を持ち、お互いに反発し合うと考えられる。もし、気泡表面に発生する電荷の量が、その気泡の体積に比例するとすると、気泡の移動の抗力はストークスの法則により気泡の半径に比例するので、気泡は大きい程、速く動くことになる。

図 7 に示したように、高温壁に付着した大きい気泡の先端に小さい気泡が引き付けられた事実は、大きい気泡に依るマランゴニ流の影響がかなり遠くまで達していた事を示している。一つの仮説として、大きい気泡が熱い壁に付着した時、熱い層がマランゴニ対流により、気泡の反対側に移送され、今度はそれがマランゴニ対流を減少させ、熱い層を安定的に存在させる。これがその気泡と他の気泡との間に強い温度勾配を発生させ、他の気泡を引き付ける。

図 6 に正規化された気泡速度 U/U_0 のマランゴニ数への依存、同時に理論値 [2,4] を示す。この図の注目すべき特徴は $Ma = 50$ の領域近くで正規化された速度が減少すること、およびより高いマランゴニ数で増加することである。マランゴニ数は運動

量とエネルギーの対流による輸送と熱伝導による輸送の比である。図6は、対流が増加すると、正規化した速度は減少する。より大きなマランゴニ数では、再び増大する。しかし、これは小さい気泡—大きい気泡の干渉（小さい気泡が熱い壁に付着した大きい気泡に引き付けられる）によると思われる。

温度勾配中にある、垂直に1.5mm離れた3mm径の二個の移動速度に関する我々の数値計算によると、二気泡系の先を移動している気泡は $Ma=50$ で単一気泡の速さに比べて75%、 $Ma=100$ で62%、 $Ma=200$ で75%の速さに減速する。今回の実験に対応する三個の気泡の場合は、一層の減速が考えられる。それに加えて、高温壁から離れた気泡は近くにある気泡より小さいマランゴニ数を持つことになり、より小さな移動速さをもたらすことになる。これらが $Ma=50$ の近傍で気泡の移動速さが減少する主な理由と考えられる。

5. 結論

高温の壁から比較的離れた気泡が、高温壁に付着した気泡により引き付けられるという、特異な現象が観察された。このことは、付着した気泡周りのマランゴニ流により、大量の熱が突然輸送され、温度場を変えることにより比較的遠方にある気泡に影響を与える。

マランゴニ数が大きい範囲で気泡の移動速さが測定された。測定された気泡の移動速さは、特に $Ma=50$ の近傍で、単一気泡の移動速さの理論値よりはるかに小さかった。この減少は気泡—気泡の干渉による。同じ実験で、高温壁の近くで理論予想値よりはるかに大きい移動速さを観測した。これは高温壁に付着した気泡にその気泡が引き付けられたためである。

文献

1. N.O.Young, J.S.Goldstein and M.J.Block, J. Fluid Mech. 6(1959), 350
2. A.Crespo and J.Jimenez-Fernandez, Microgravity Fluid Mechanics (IUTAM Symposium Bremen 1991), Springer-Verlag (1992), 405
3. D.Langbein, ditto, 413
4. R. Balasubramanian and L.H.Dill, ditto, 307

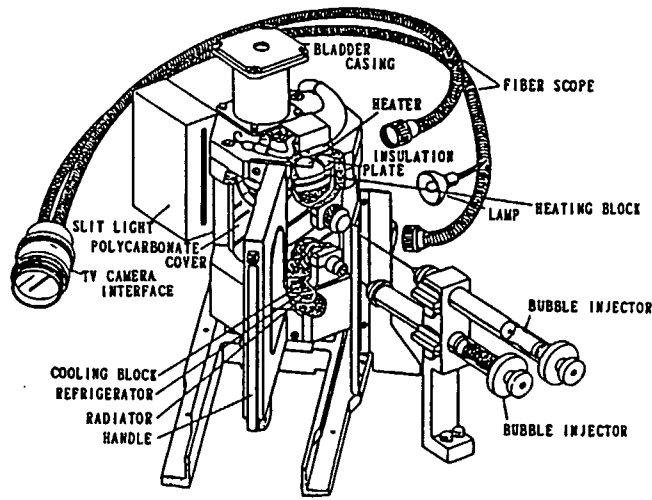


図1 BBU 実験装置

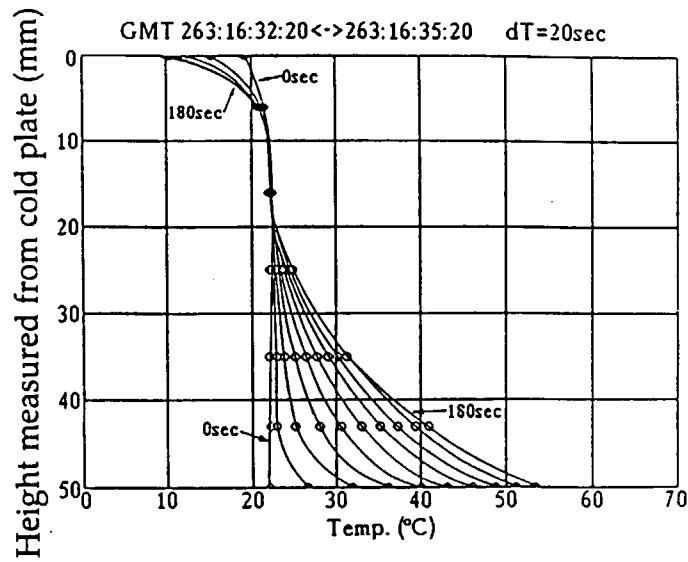


図2 内壁に沿っての時間的溫度分布變化

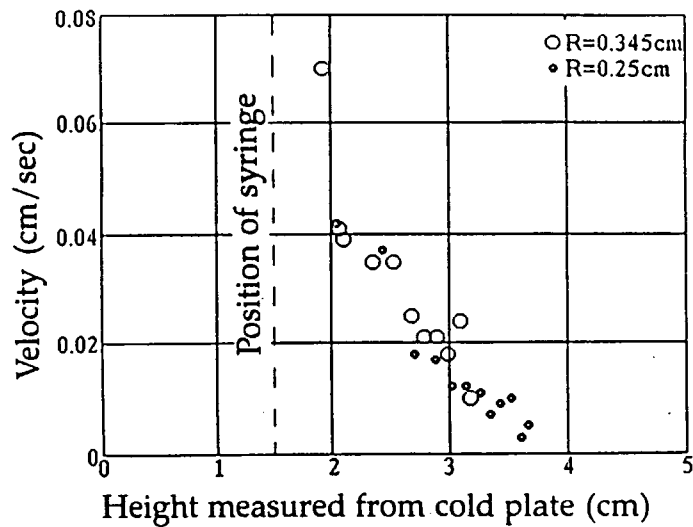


図3 溫度勾配が無しで移動する気泡の位置と速度

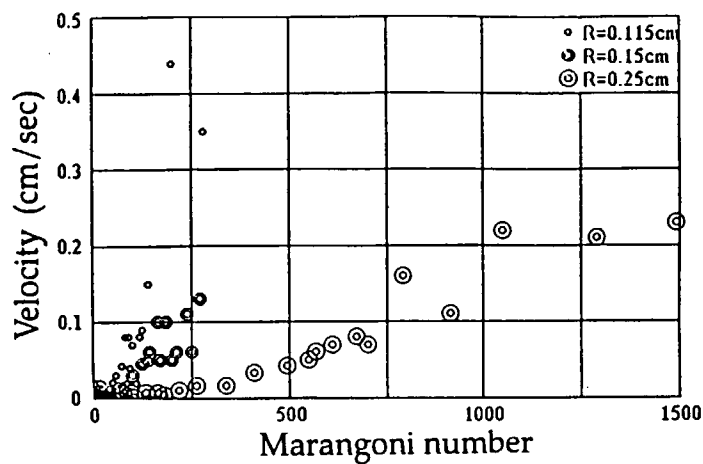


図4 マランゴニ数に対する測定された気泡の移動速度

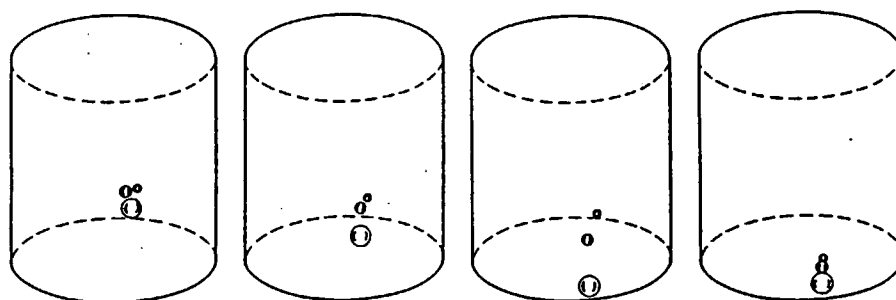


図5 一緒に移動する気泡の様子

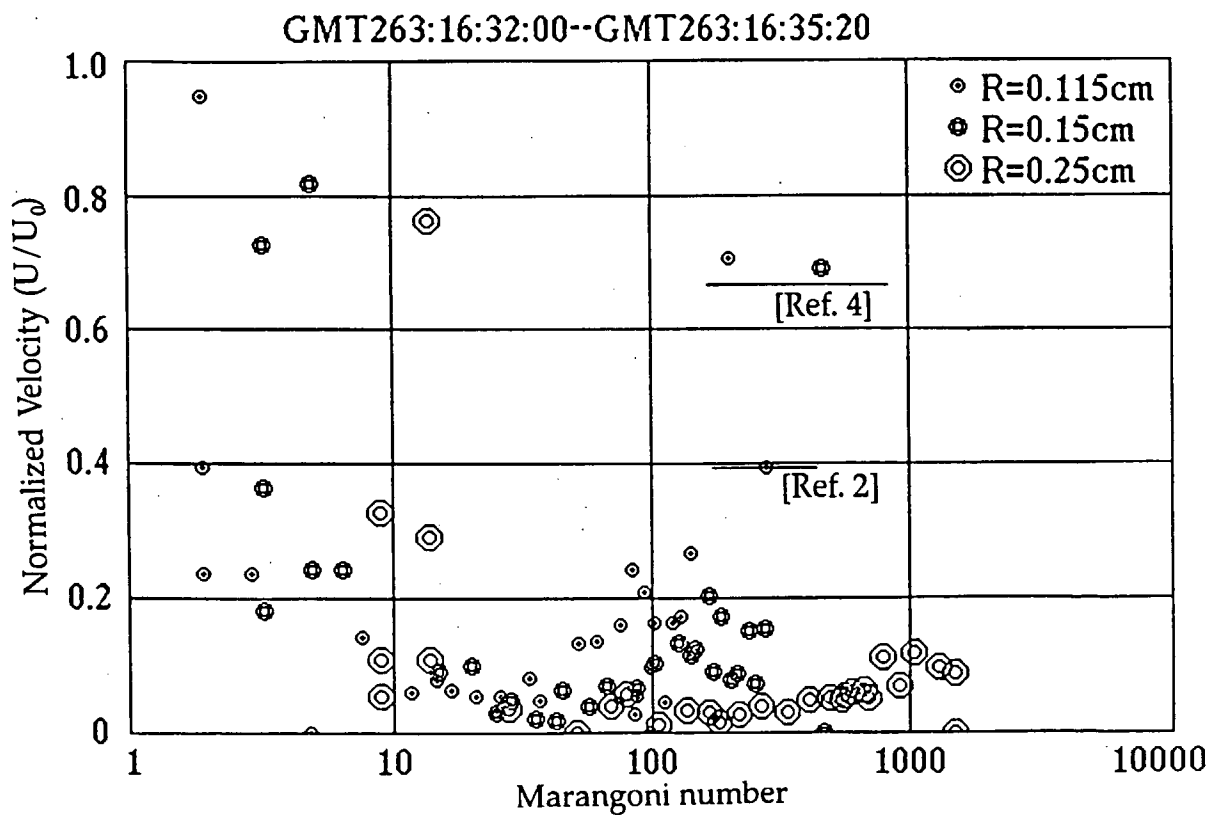


図6 マランゴニ数に対する正規化された速度

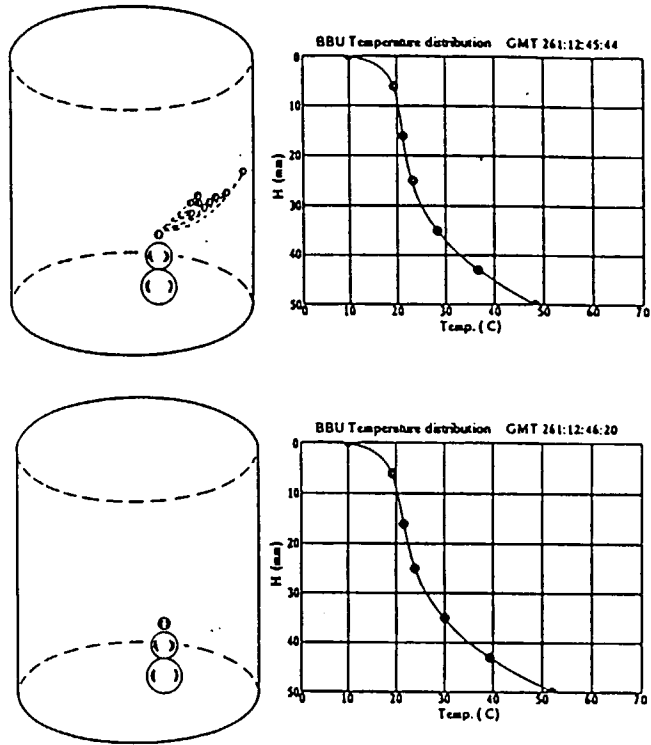


図7 小さい気泡と大きい気泡との干渉