

第4章 微小重力環境下の気泡挙動とそのハンドリング

(独)産業技術総合研究所 機械システム研究部門 市川直樹

1. はじめに

宇宙空間のような微小重力(厳密には微小重量)環境下では,浮力や沈降の効果がなくなるために,比重の違うものを均一に混ぜ合わせることができると,地上では製造が不可能な高機能・高付加価値な新材料を作れるという期待がある^{1),2)}。しかし一方で,浮力がなくなってしまうために,溶融した材料に気泡がいったん混じってしまうと,その除去が極めて困難となってしまう。こうした気泡の存在は,できた材料の品質の劣化に直接つながる。1992年に実施されたスペースシャトルを用いて行われた第1次材料実験「ふわっと'92」において様々な材料実験が行われたが,気泡が材料の中に留まったまま凝固したものが数多くみられた²⁾。そのため,こうした除去を含めた気泡のハンドリング技術は,将来の宇宙工場での新材料の大量生産のためには,解決しなければならない大きな問題の一つである。

宇宙空間に限らず,材料生成で考えられている溶融・凝固のプロセスでは温度分布が融液内に存在する。また,一般に微小重力と呼ばれている環境は,現実の宇宙空間も含めて,厳密な無重力(0G)状態になることはなく,微小な重力加速度を有している^{3),4)}。この微小な重力加速度のうち,定常な成分を残留重力と呼び,周期的に振動する成分を重力揺らぎ(Gジッター)と呼んでいる。これら温度場や重力揺らぎの様な微小な振動は,宇宙での材料生成を考える上で避けられない環境である。気泡のハンドリングのためには,こうした環境における挙動をまず把握することが重要である。その上で,別の力を用いることによるハンドリングが可能になると考えられる。

気泡の挙動は,先に述べた材料生成時の問題だけでなく,沸騰現象や二相流伝熱などにも深く関わっている重要なものであり,こうした現象における微小重力下での研究もなされてきている^{5),6)}。沸騰時の気泡の挙動も興味深い,本年に特集記事として解説されたものでふれられているため⁷⁻⁹⁾,本稿では特に材料生成時のような比較的安定した場での気泡の挙動について,これまでに行われた研究の紹介をしたい。先に述べたように,宇宙での材料生成を考える上で避けられない環境としての,微小な振動や温度勾配のそれぞれの場における気泡の挙動に関して,主にこれまでの研究の解説を行う。また,そのハンドリングの可能性ということで超音波による気泡の位置制御の研究について述べる。最後に宇宙での材料生成で検討されているフローティングゾーン法において問題の一つになると考えられる液柱の共振現象に関して,気泡の存在の影響についてふれることとする。

2. 気泡挙動に与える微小振動の影響

2.1 気泡のGジッターによる移動

IshikawaらはTR-1A#2 ロケットを用いた微小重力環境下での気泡の移動に関する実験を行った¹⁰⁾。残留重力場およびピエゾ素子を用いた周期的なGジッターを能動的に与えた場合それぞれの直径2-5mmの気泡の挙動について調べている。60mm×60mm×80mmの容器中に2-5mmの気泡を作成し、その動きをCCDカメラで観察した。残留重力(10⁻⁴G オーダ)および1.47HzのGジッター(10⁻³G オーダ)のそれぞれの気泡の位置に対して解析を行い、それぞれ対応する動きを確認した。また、壁近傍の気泡や2つの気泡のカップリング挙動に関して、気泡周囲の流れとの関係を議論している。

2.2 スペースシャトルでの大気泡の変形

Kawajiらは1997年にスペースシャトルにおいて、カナダ宇宙局が開発したMIM(Microgravity Vibration Isolation Mount)を用いての流体実験として、比較的大きな気泡の変形挙動の実験ISCAP(Interfacial Stability and Capillary Wave)を行った¹¹⁾。MIMはシャトル本体からの振動を遮断する装置である。2Hz以上の振動を遮断する能力に加えて、本装置に搭載された実験機器を0.01Hzから50Hzまでの正弦波状に加振することも可能である。カナダ宇宙局では、この装置の性能確認のため、いくつかの流体実験を行ったが、この実験もその中の一つである。

実験装置は、ポリカーボネート製のテストセル容器(セル内径97.3mm高さ17.15mm)にミネラルオイルあるいは界面活性剤入りの水を約70%封入し、斜めの方向からCCDカメラで観察するようになっていた。空気の気泡は、テストセルを回転させることにより、宇宙空間では2枚の壁面に挟まれたつぶれた球形となった(図1)。気泡の直径は約90mmであった。実験としてはMIMにより、スペースシャトルに固定したモード、シャトルの振動を遮断し静止しているモード、およびシャトルからの振動を遮断した上で、テストセルに上下・前後に振動させるモードの3種類の状態を与え、それぞれ気泡の挙動の観察を行っている。

シャトルに固定したモードの場合、気泡の表面が時折振動することが観察された。これは、宇宙飛行士の動きなどに起因するGジッターの影響が現れているものと考えられる。振動を遮断するモードにすると、こうした表面の振動は全く見られなくなった。

様々な周波数の加振を与えるモードにした場合、気泡の上下左右4点の位置を得られた画像からもとめ、気泡重心位置や気泡の縦と横の最大長さの比(アスペクト比)の応答を調べている。気泡の重心位置の変化に関しては、セルの加振周波数と同じ周波数で振動すること、および加振振幅と気泡の

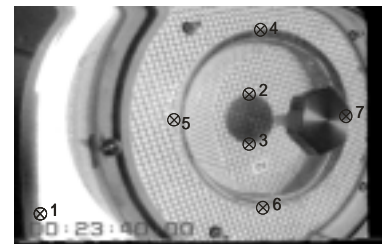


図1 気泡観察例¹⁰⁾

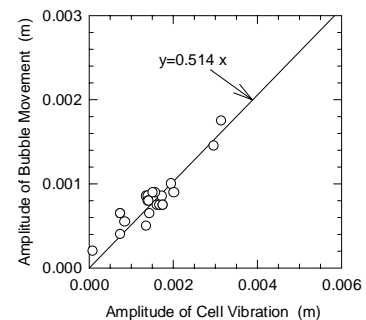


図2 容器の振幅と気泡の振幅の比較¹⁰⁾

振幅の間にほぼ比例する関係があることが分かった(図2)。液体の粘度の違いによる影響も観察されたが、加振と応答の位相差などは装置の制約上調べられていない。アスペクト比の検討において、0.4Hz より小さい周波数では、気泡の周波数と同じ周波数の振動が見られた。しかし、ある特定の周波数、この場合は0.1Hzの加振の場合、倍の0.2Hzの周波数で振動していることが分かった。これは気泡形状固有の1次の共振モードであると考えられた。また、0.4Hz とその1/3の0.133Hzが重なった加振条件の場合、加振のスペクトラムでは0.4Hzの振動が大きいにもかかわらず、共振周波数に近い0.133Hzでのアスペクト比の振動のみが観察され、0.4Hzの振動が観察されなかったのは、ある意味での引き込み的な現象が生じていることによると考えられる。共振は、小さな振動であってもその応答が無視できないほど大きな振動として現れる可能性があるために、注意が必要である。

2.3 壁近傍における気泡のGジッター環境による変形

IchikawaらはNASAのDC9を用いた微小重力環境下における気泡の挙動の実験を行った¹²⁾。実験装置を機体に固定あるいは機内でフリーフロートさせることによる、等温場における微小振動の状態による気泡の変形に対する影響を観察する実験と、フリーフロート環境下の微小振動の影響が無視できる場において、壁面を加熱することによる温度勾配をかけた際の気泡の周囲に生じるマランゴニ対流の可視化とそれによる気泡の変形について調べた。実験の概念図を図3に示す。1辺10cm角の容器中のシリコンオイルに窒素ガスによる直径10mm前後の気泡を上部にあけた穴から生成し、その様子をCCDカメラおよび高速度カメラにより撮影した。気泡周りの流れ場の観察には、フォトクロミック色素法を用いている。

本節では気泡挙動に与える微小振動の影響について、3.2節では温度勾配下での気泡の変形および流れの可視化について示す。

容器内が等温度環境である場合の気泡の微小重力環境の違いによる影響について調べた。図4と図5に、微小重力の質が違う環境下での気泡の挙動の違いを示す。図4の場合が機体に実験装置を固定した場合であり、微小重力環境は $\pm 2 \times 10^{-2}G$ から $\pm 1 \times 10^{-1}G$ 程度であった。この場合、気泡がある程度の大きさに成長すると、残留重力あるいは重力揺らぎから生じる(横向きの)浮力の

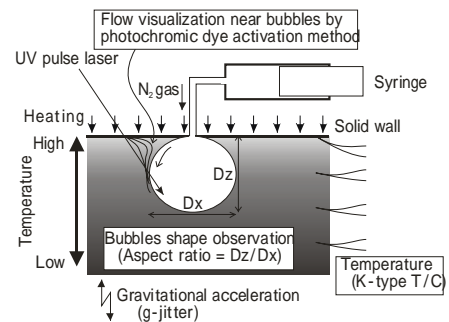


図3 実験の概念図(テストセクション部)¹²⁾

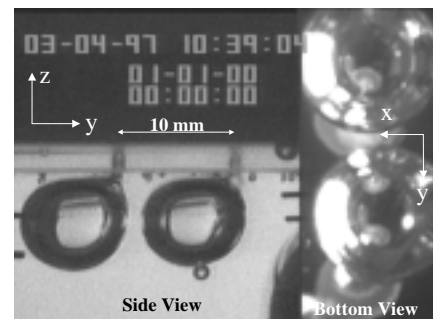


図4 機体に固定した場合の気泡の挙動¹²⁾

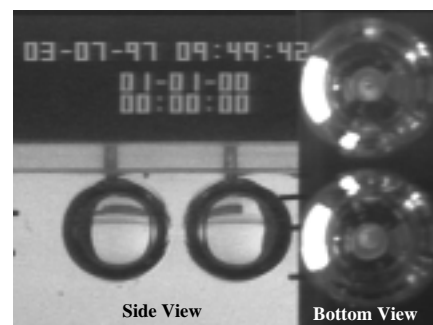


図5 フリーフロートさせた場合の気泡の挙動¹²⁾

ために、安定な形状及び初期の位置を保てなくなり、ある方向（図4の側面図では左方向）に大きく動いた。一方、図5は、フリーフロート時で、微小重力環境が、図4の場合に比べて一桁以上小さくなった時のものである。重力加速度が小さくなったため、気泡の形状はほぼ真球となり、完全に静止していた。気液界面の振動や初期位置からの変動などは観察されなかった。

得られた画像から、気泡のアスペクト比を計算し、気泡の変形の整理している。気泡への重力加速度の影響は、一般に重力加速度の表面張力に対する比を示す無次元量で

あるボンド数 ($Bo = \rho a D^2 / \sigma$, ρ : 液体密度, a : 重力加速度, D : 気泡の直径, σ : 表面張力) で表されることから、図4に示した時のアスペクト比と、それぞれの時刻における画像から得られた実効直径と同時刻の加速度データを用いて計算されたボンド数の関係を図6に示す。ボンド数が 10^{-1} 程度の値までは気泡の変形は見られず、この値を越えると急激に変形することが分かる。この傾向は、ほぼどの条件下でも同じであった。図5のフリーフロートの場合の計算をすると、加速度環境が一桁小さいことからボンド数はこの臨界値よりも1桁程度小さな値であった。以上のことから、気泡の変形に関しては、 10^{-1} オーダの値にボンド数の臨界値があり、ボンド数がこの臨界値以上の値の場合、残留重力や重力揺らぎによって気泡挙動が大きく乱されることを明らかにした。

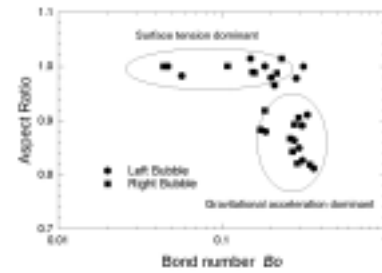


図6 気泡のボンド数とアスペクト比の関係¹²⁾

3. 温度勾配下での気泡の挙動

3.1 無限境界での気泡の挙動

気泡挙動に対しての温度場の影響は、シャトルによる微小重力実験が計画された以前に Young による解析と実験がなされていたが、解析・実験ともに多くなされるようになったのは具体的な宇宙での材料生成時の気泡の問題がクローズアップされてからと考えられる。ここでは、温度差マランゴニによる気泡の移動に関する研究について概説したい。

Young らは次元解析とシリコンオイル中の気泡の浮力とマランゴニ対流による力の釣り合いを求め実験を行い¹³⁾、気泡周りの流れ（座標を周りの流体に置けば気泡の移動速度）に対して、

$$V_{YGB} = \frac{\left(\frac{\partial \sigma}{\partial T}\right) \cdot G \cdot D}{\mu(\beta + 2)(3\lambda + 2)}, \quad (1)$$

という関係を得ている。ここで G は温度勾配、 D は気泡の直径、 σ は表面張力、 $\beta = k'/k$ は熱伝導率の周囲流体に対する気体の比、 $\lambda = \mu'/\mu$ は動粘性係数の比である（'は気泡内部の値）。この式は熱や質量の輸送に関して、対流が拡散に比べて十分に小さいという条件（すなわち十分に小さなレイノルズ数 $Re = U_0 D / \mu$ およびマランゴニ数 $Ma = U_0 D / \alpha$, ($U_0 = (\partial \sigma / \partial T) \cdot G / \mu$ は代表速度、 α は熱拡散率) の下のものであった。実際、Young らの実験は、非常に小

さい気泡（直径最大 0.2mm）を用いた装置自体小さな系で行われている．その後，対流を考慮に入れた解析¹⁴⁾， Ma における解析¹⁵⁾などが行われた．これらは球形の気泡を仮定していたが，気泡の変形やレイノルズ数やマランゴニ数として宇宙での材料生成を念頭に置いた数値シミュレーションも行われている¹⁶⁾．これらの様々な効果は，気泡の動きに関しては，式（1）に比べて小さくする方向に働いていることが示されている．一例として， $Re=Ma=50$ の場合， β や λ の値に依存するが，式（1）での値に対する比としておよそ 0.3-0.6 の値になる．更に，マランゴニ数が大きくなった場合の周囲液体の温度境界層の影響を考慮に入れた解析も行われた¹⁷⁾．

実験に関してもいくつか報告されている．1994年に行われたスペースシャトルを用いた実験 IML-2 (International Microgravity Laboratory) において Balasubramaniam と

Subramanian のグループらは，温度勾配をかけたシリコンオイル中に空気およびフロリナートの液滴を浮かべ，その気泡・液滴の移動についての微小重力実験を行った^{18,19)}．長さ 60mm，45mm×45mm の断面をもつセル中で広いパラメータの範囲の実験を行っている．上記シミュレーション等との比較を行い，マランゴニ数が 80 程度までは一致しているが，それ以上になると明らかな差が出てくることを見いだしている（図7）．また，気泡の変形について実験的に調べ，ウェバー数 $We (=Ca \cdot Re = \rho U_0^2 D / \sigma)$ に対してのアスペクト比の影響を調

べた．アスペクト比は We の増加によりほぼ比例して小さくなる傾向を見いだしている．この変形の割合は，以前に行われた解析²⁰⁾とその解析がマランゴニ効果を無視しているにもかかわらず，一致していると報告している．国内においても，JAMIC 落下塔を用いた実験が行われた²¹⁾．長さ 50mm，内径 12mm のセル内に粘度 1.5cSt のシリコンオイルを封入し，気泡の移動速度について，Young らの理論式との比較を行ない，0.3 から 0.5 倍の速度になることを見いだしている．

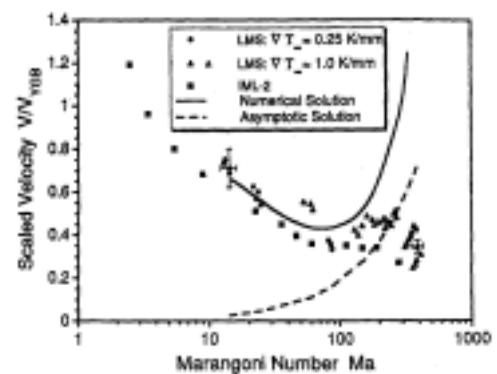


図7 マランゴニ数に対する実験（フロリナート）と理論の比較¹⁹⁾

3.2 壁近傍の気泡の挙動

3.1 節は無境界の一定温度勾配に置かれた気泡の挙動であった．この節では，2.3 節でもふれている Ichikawa らによる航空機実験のうち，壁面に張り付いた気泡の温度勾配環境下での変形と周辺の流れの観察について述べる¹²⁾．実験は，DC9 航空機内で装置をフリーフロートさせた環境下で行われた．フリーフロートの時の気泡は，ボンド数が臨界値より小さいため，非常に静

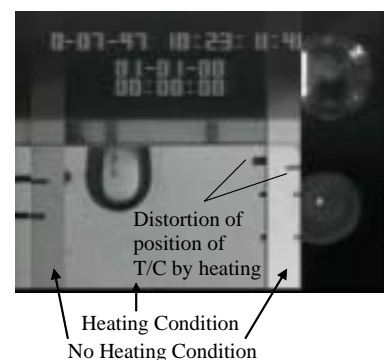


図8 加熱壁面近傍の光学的歪み²²⁾

かな挙動を示した。

上部ヒータを通電加熱して、液体内に温度勾配をつけると、上部壁近傍で画像の歪みが観察された。図8に一例を示すが、気泡の上部が歪みにより見えなくなっている。図中では、加熱時と非加熱時の熱電対の位置を合成しているが、上壁面から4mm程度の範囲の歪みが顕著である。

これは、上部の加熱面の側端において温度（すなわち屈折率）分布が平面形状を保てず、ゆがんでしまうことが原因と考えられた。こうした温度分布に起因する気泡形状の歪みは、詳細な形状を問題にする上では無視できない要因である。ここでは、アスペクト比の推定をするために、1) 水平方向には温度一定、2) 気泡の下部位置では温度が均一になっている、3) 気泡の上部位置は、非加熱時の気泡の上部の位置と一致する、という3つの仮定をおき、ヒータの温度と液体の温度との差による気泡の変形挙動を調べている。気泡のアスペクト比は、温度差を変化させていくに従い、小さくなるのが観察された。この気泡の変形について、変形による曲率の変化が周囲の流れによる圧力差で生じるとの仮定から出発したモデルで解析し、式(1)による気泡周囲の流れと温度差の関係をを用いると、マランゴニ数と気泡の変形(アスペクト比 S)について $S = 1 - A \cdot Ma^2$ の関係が得られ、実験から得られた結果から A の値として 3.1×10^{-12} と求めている。ただし、この結果は実際の流速との直接的な比較ではない。そこで、フォトクロミック色素法を用いて実験的に得られた流速をもとに気泡の変形の理論的な値との比較をしている。実験上の制約から気泡表面の速度の測定ができず、近傍の速度を用いて比較を行ったところ、定性的な傾向は一致するが、実験はかなり小さめの値となり、定量的には一致したとは言えない結果となった。より精密な表面流速の測定が必要であると結論している。

4. 気泡のハンドリング

気泡の能動的な位置制御のため利用できる力としては、前節で述べたような温度勾配の他に、静電気、磁場、超音波などが考えられる。しかし、温度場は、結晶育成に不可欠の条件であり、これを用いて制御するという事は、本来の目的との兼ね合いにより一般的には難しい。これまで、静電力・電場^{23, 24)}、磁場²⁵⁾などを用いて、微小重力環境下での単一あるいは複数の気泡の挙動を調べた報告もある。どの報告でも JAMIC 落下塔等の微小重力実験での検証を行い、それぞれの有効性を示しているが、実際の気泡の制御までは至っていない。これらの力を用いたものは、気泡の除去のために、全体的に気泡をどちらかの方向に動かすという目的には適しているが、詳細な気泡の位置制御には局所的な場の制御が必要であり、技術的に難しい点が多い。

そうした中で、阿部らは、超音波による音響定在波の位相を変化させることによる気泡の位置制御を行った²⁶⁾。

水で満たされた内径22mm、長さ104mmの円管の両端に19.3kHzの超音波源を設置した(図9)。コンピュータ

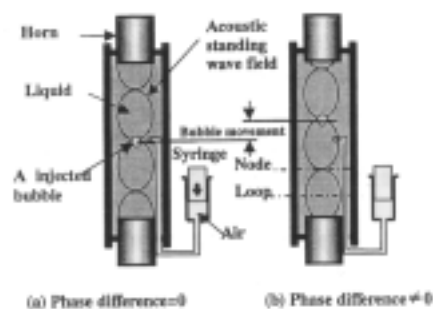


図9 超音波による気泡の位置制御実験装置²⁶⁾

で上下の超音波源の位相差を変化させることで音響定在波の位置を移動させ、約 2-3mm の気泡の管軸方向の位置の制御を行っている。位相差を 0° から 360° まで変化させることにより、水中の音速から推定される最初の節から次の節まで気泡が移動することを確認した。

また、一次元を仮定した理論解析を行い、各位相差における気泡位置の理論と実験の比較も行っている。音響定在波による音場分布が必ずしも一次元的でないことや気泡形状が球からずれてくるなどの影響により、理論的に予想される位相差と気泡位置が線形の関係にはならなかった（図 10）。今後の実際の応用を考える上では、広い空間での定在波のつくり方や大気泡の変形も考慮に入れた理論の構築などが必要と考えられるが、微小重力場における気泡の制御として非常に有望な方法の一つと考えられる。

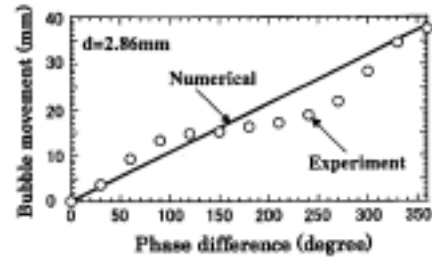


図 10 実験と理論の比較²⁶⁾

5. 液柱の共振と気泡の混入による影響

宇宙での単結晶生成の一つの方法にフローティングゾーン（FZ）法によるものが考えられている。FZ法は2枚のディスク間に液体をつなぐ液柱を形成するため、振動による液柱表面の様々なモードが観察される。様々な解析および地上実験としては同じ密度の混じり合わない二液を用いての実験が行われてきた²⁷⁻³⁰⁾。また、いわゆる液柱（周囲が空気）に関しては、横方向に振動が加えられた場合の共振モードを調べるシャトル実験も行われている³¹⁾。これらの解析は数値的に解かれていたが、Ichikawaらは簡単な式で一次の共振周波数を求める式を提案し、また地上での振動台を用いての液柱の実験を行った³²⁾。シャトル実験での結果も含めて、実験で求められた共振周波数と提案された式はよく一致していることが報告されている。更に、液柱の中に気泡を混在させた場合の実験も行っている。その場合、理論的な値よりも3割程度小さな値になると報告している。気泡の混在がどのように共振周波数に影響してくるかは、明らかではないが、理論よりも低周波数側に共振周波数がシフトすることは今後の設計の上で考慮に入れる必要があるものと考えられる。

6. まとめ

微小重力環境下での気泡の挙動に対する影響について、特に材料生成の観点から重要であると思われるものを中心に解説した。気泡は古くから意識されている問題であるが、なかなか技術的に解決できない難しい問題である。最初に述べたように、材料生成だけでなくあらゆる分野に関係する問題であるので、今後の展開に期待したい。

参考文献

- 1) Regel, L.L., *Materials Science in Space*, John-Wiley&Sons, Inc., 1987.
- 2) ふわっと ' 92 宇宙実験成果報告会予稿集,宇宙開発事業団, 1993.
- 3) 大西充, “スペースシャトルミッションにおける g - ジッター解析”, 日本マイクログラビティ応用学会, 16-4, (1999) pp.225-233.
- 4) Herring, R.A., Duval, W.M.B., Smith, R.W., Rezkallah, K.S, Varma, S., Redden, R.F. and Tryggvason, B.V., “Recent Measurements of Experiment Sensitivity to g-jitter and Their Significance to ISS Facility Development”, J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., 16-4, (1999) pp.234-244.
- 5) 岡利春, 阿部宣之, 田中耕太郎, 森康彦, 長島昭, “航空機による微小重力下のプール沸騰実験”, 日本マイクログラビティ応用学会誌, 8-4, (1991) pp161-167.この他, 微小重力下の沸騰に関する Review として, Marco, P.D., Graassi, W. and 賞雅寛而, “微小重力環境下における沸騰熱伝達研究の現状”, 日本マイクログラビティ応用学会誌 15-2, (1998) pp.71-78.など
- 6) Ohta, H. Inoue, K., Yamada, Y., Yoshida, S., Fujiyama, H. and Ishikura, S., Proc. ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conf., 4, (1995) pp.547-554.このほか, 二相流に関する Review として例えば Takamasa, T, “Research on Gas-liquid Two-phase Flow using the JAMIC Drop Shaft”, J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., 17-2, (2000) pp.121-124.など
- 7) Marco, P.D., “Review of Reduced Gravity Boiling Heat Transfer: European Research”, J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., 20-4, (2003) pp.252-263.
- 8) Kim, J., “Review of Reduced Gravity Boiling Heat Transfer: US Research”, J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., 20-4, (2003) pp.264-271.
- 9) Ohta, H., “Review of Reduced Gravity Boiling Heat Transfer: Japanese Research”, J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., 20-4, (2003) pp.272-285.
- 10) Ishikawa, M., Nakamura, T., Yoda, S., Samejima, H. and Gshozono, T., “Hydrodynamic Interactions of Bubbles in a Finite Container under the Influence of Periodic G-jitter”, J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., 10-4, (1993) pp.221-233.
- 11) Kawaji, M., Ichikawa, N., Kariyazaki, A. and Tryggvason, B.V., “Large Bubble Motion in a Fluid Cell under Microgravity: ISCAP Experiments on the Effect of g-jitter and Forced Vibration”, J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., 16-4, (1999) pp.245-254.
- 12) Ichikawa, N., Kawaji, M. and Misawa, M, “An Experimental Study of Bubble Behavior in a Temperature Gradient near a Heated Wall under Low-gravity

- and Microgravity Conditions aboard NASA DC9 Airplane”, *Microgravity Science and Technology*, 14-1, (2003) pp.34-43.
- 13) Young, N.O., Goldstein, J.S. and Block, M.J., “The Motion of Bubbles in a Vertical Temperature Gradient”, *J. Fluid Mech.*, 6, (1959) pp.350-356.
 - 14) Subramanian, R.S., “Slow Migration of a Gas Bubble in a Thermal Gradient”, *AICHE J.*, 27-4, (1981) pp.646-654.
 - 15) Balasubramaniam, R. and Subramanian, R.S., “Thermocapillary Bubble Migration - Thermal Boundary Layers for Large Marangoni Numbers”, *Int. J. Multiphase Flow*, 22, (1996) pp.593-612.
 - 16) Haj-Hariri, H. and Shi, Q., “Thermocapillary Motion of Deformable Drops at Finite Reynolds and Marangoni Numbers”, *Phys. Fluids*, 9, (1997) pp.845-855.
 - 17) Balasubramaniam, R. and Subramanian, R.S., “The Migration of a Drop in a Uniform Temperature Gradient at Large Marangoni Numbers”, *Phys. Fluids*, 12-4, (2000) pp.733-743.
 - 18) Balasubramaniam, R., Lacy, C.E., Woniak, G. and Subramanian, R.S., “Thermocapillary Migration of Bubbles and Drops at Moderate Values of the Marangoni Number in Reduced Gravity”, *Phys. Fluids*, 8, (1996) pp.872-880.
 - 19) Hadland, P.H., Balasubramaniam, R., Woniak, G. and Subramanian, R.S., “Thermocapillary Migration of Bubbles and Drops at Moderate to Large Marangoni Number and Moderate Reynolds Number in Reduced Gravity”, *Exp. Fluids*, 26, (1999) pp.240-248.
 - 20) Balasubramaniam, R. and Chai, A., “Thermocapillary Migration of Droplets: An Exact Solution for small Marangoni Numbers”, *J. Colloid Interface Sci.*, 119, (1987) pp.531-538.
 - 21) 山岡英司, 永澤茂, 宮田保教, 栃川哲朗, 川又広, 森嵩, “マランゴニ対流による気泡の移送実験”, *日本マイクログラビティ応用学会誌*, 12-1, (1995) pp.38-47.
 - 22) 市川直樹, 三澤雅樹, 川路正裕, “大型航空機を用いた微小重力環境下での壁面近傍の気泡の挙動”, *機械技術研究所所報*, 54-5, (2000) pp.216-226.
 - 23) 今井良二, 矢野歳和, “静電気力を利用した気泡移送”, *日本機械学会論文集(B編)*, 60-580, (1994) pp.3979-3986.
 - 24) Tsukada, T., Y. Yamamoto, M. Sato and M. Hozawa, “Effect of EHD Convection on Motion of a Bubble under Microgravity”, *J. Chem. Eng. Japan*, 28-6, (1995) pp.810-815.
 - 25) Wakayama, N. I., “Magnetic Buoyancy Force Acting on Bubbles in Nonconducting and Diamagnetic Fluids under Microgravity”, *J. Appl. Phys.*, 81-7, (1997) pp.2980-2984.
 - 26) 阿部豊, 渡辺正, 足立和成, 山本憲一, “音響定在波による液中大気泡の並進運動制御シス

- テムの開発”, 日本機械学会論文集 (B 編), 66-644, (2000) pp.1184-1190.
- 27) Sanz, A., “The Influence of the Outer Bath in the Dynamics of Axisymmetric Liquid Bridges”, *J. Fluid Mech.*, 156 (1985) pp.101-104.
 - 28) Chen, T.Y. and Tsamopoulos, J., “Nonlinear Dynamics of Capillary Bridges: Theory”, *J. Fluid Mech.*, 255 (1993) pp.373-409.
 - 29) Mollot, D.J., Tsamopoulos, J., Chen, T.Y., and Ashgriz, N., “Nonlinear Dynamics of Capillary Bridges: Experiments”, *J. Fluid Mech.*, 255 (1993) pp.411-435.
 - 30) Sanz, A. and Diez, J.L., “Non-Axisymmetric Oscillations of Liquid Bridges”, *J. Fluid Mech.*, 205 (1989) pp.503-521.
 - 31) Martinez, I., “Stability of Liquid Bridges. Results of SL-D1 Experiment”, *Acta Astronautica*, 15 (1987) pp.449-453.
 - 32) Ichikawa, N., Kawaji, M., Misawa, M. and Psfogiannakis, G, “Resonance Behavior of a Liquid Bridge Caused by Horizontal Vibrations”, *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.*, 20-4, (2003) pp.292-300.