



Title	減圧密閉容器内を上昇する気泡の観察
Author(s)	熊谷, 剛彦; 岸本, 康夫; 中村, 修 他
Citation	鉄と鋼, 101(2), 93-100 https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.101.93
Issue Date	2015-02-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/75013
Rights	著作権は日本鉄鋼協会にある
Type	journal article
File Information	tetsu 101(2) 93.pdf



減圧密閉容器内を上昇する気泡の観察

熊谷 剛彦^{1)*}・岸本 康夫²⁾・中村 修³⁾・田川 俊夫⁴⁾・姫野 武洋⁵⁾・嶋崎 真一⁶⁾

Observation of Single and Continuous Bubbles Rising in Reduced Pressure Vessel

Takehiko KUMAGAI, Yasuo KISHIMOTO, Osamu NAKAMURA, Toshio TAGAWA, Takehiro HIMENO and Shinichi SHIMASAKI

Synopsis : The expansion and shape change behaviors of a single rising bubble and continuously rising bubbles in a reduced pressure vessel were observed. The main results obtained are as follows:

- 1) The aspect ratio, w/h , of a single rising bubble under reduced pressure is almost the same as that under atmospheric pressure. However, the width of the rising bubble expanded to 1.4 times, which is larger than the calculated expansion ratio. This may be explained by the change of the bubble shape while rising.
- 2) The observed single bubble shapes were ellipsoidal, spherical cap, and breakup of spherical cap. The upward velocity of the bubble increases with the initial volume of the bubble. The upward velocity also increases as the bubble rises.

Key words : vacuum refining; expansion of bubble; single rising bubble; cold model.

1. 緒言

鋼材の大型化, 高合金化, 高品質化, およびこれらの量産化と共に二次精錬法の重要性が高まっており, 転炉鋼, 電気炉鋼ともに現在二次精錬処理がほぼ100%近く行われている。二次精錬の重要な役割の一つが脱酸処理である¹⁾。溶鋼に脱酸剤を添加された後脱酸生成物(酸化物系介在物)を浮上低減させるいわゆる脱酸処理工程は, 鋼の清浄性を高める上で重要な処理である。

RH脱ガス法は真空槽内を0.86 kPa (1 Torr) 以下まで減圧し, 上昇管から吹き込まれるArガスのリフト効果で溶鋼を循環させるプロセスであり, 高効率で脱炭, 脱窒素, 脱水素を行うと同時に溶鋼の循環により Al_2O_3 などの非金属介在物を浮上分離させることができるため, 今日の二次精錬の主流プロセスとなっている。

三木ら²⁾はRH内の流動解析を実施し, 脱酸処理時の溶鋼中の介在物の低減機構について考察した。その結果, 介在物の乱流衝突・浮上に加え, アルゴン気泡による付着効果を考慮すると実測値を矛盾無く説明できること, および, 環流ガス気泡への介在物付着率は約3%と考えられることを示した。特に5 μm を越える大型介在物(クラスター径10 μm)の分離には還流ガスの影響が大きい。しかし, 三

木の計算ではガス気泡径を一定(5 mm径)として計算している。今後鋼材の高純度化がさらに進む中, さらに高効率の介在物除去方法を検討するためには, 減圧下での気泡の挙動を詳しく知る事が必要となる。

精錬装置の気泡吹き込みに関するモデル実験については, 溶鋼の動粘度に近い水を用いたモデル実験が多用されており, 大気下ガス吹き込み時の気泡挙動に関して数多くの水モデル実験が行われている。また減圧下の気泡の挙動についても, Iguchiら³⁻⁵⁾は, 14.2 kPa (0.14 atm)の圧力下でガスホールドアップやReynolds応力等が減圧による気泡の膨張を考慮した気泡の体積流量でおおむね整理できることを報告している。ただし水の蒸気圧が高いことから実機RHのような高真空下でのガス吹き込みの水モデル実験は困難である。

そこで, Tatsuoka and Ito⁶⁾は蒸気圧の低いシリコンオイル中にガスを吹き込み, 0.66 kPa (5 torr)の圧力下の単一気泡の観察を行った。この条件下では吹き込まれた気泡は上昇過程で膨張し, 特に浴表面近傍で急激に膨張する事を報告している。しかしこの研究においても, 浮上中の気泡の挙動, なかでも浮上中の気泡形状がどのように変化するか等は明らかにされていない。

減圧容器内で上昇に伴い膨張する気泡を可視化して, 寸

平成26年5月30日受付 平成26年8月5日受理 (Received on May 30, 2014; Accepted on Aug. 5, 2014)

1) 北海道大学大学院工学研究院材料科学部門 (Division of Materials Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Kita 13 Nishi 8 Kita-ku Sapporo 060-8628)

2) JFEスチール(株)(現:文部科学省)(JFE Steel Corporation, now MEXT)

3) 新日鐵住金(株)技術開発本部(R & D Laboratories, Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation)

4) 首都大学東京システムデザイン学部(Tokyo Metropolitan University)

5) 東京大学工学部(The University of Tokyo)

6) 国立高専機構香川高専(National Institute of Technology, Kagawa College)

* Corresponding author: E-mail: kuma@eng.hokudai.ac.jp

DOI: http://dx.doi.org/10.2355/tetsutohagane.101.93

法、形状の変化を詳細に観察することは、実機内混相流の流動挙動を把握するための基礎として重要である。さらに近年、長足の進歩を遂げている数値計算による容器内流動解析の再現検証の観点からも、実現現象の詳細な観察は重要である。特に気液二相流では、気泡と液との複雑な相互の干渉を含んでいるため、数値解析を利用して流れをより正確に把握するためには、気泡の形状、寸法が精度良く再現される必要がある。

そこで本研究は、減圧容器内に満たしたシリコンオイル中にガスを底部より導入し、形成される気泡の上昇に伴う寸法、形状の変化を高速カメラを用いて観察、記録すること、ならびに気泡上昇時の形状の変化、速度変化に関する検討を目的とし、単一気泡として上昇させた場合、およびガスを連続的に吹き込んだ場合を対象とした。

2. 実験条件

単一気泡を観察する場合の装置の概略をFig.1に示す。装置は主に減圧容器、排気系、撮影記録系からなる。容器は透明アクリル製で内部の様子を外部より観察することが可能である。容器寸法はFig.2に示すように、内寸の直径100 mm、高さ200 mmの円筒形で、これに浴深が155 mmとなるようシリコンオイルを満たした。容器底中心にはガ

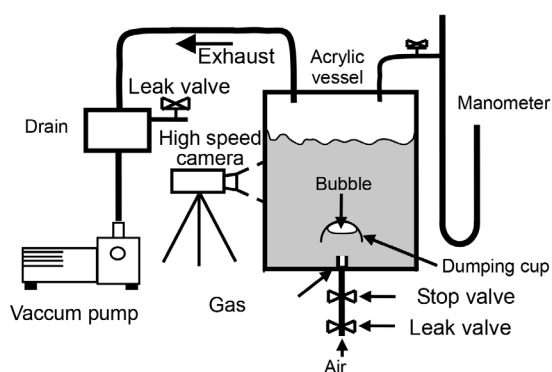


Fig. 1. Schematic drawing of the experimental apparatus.

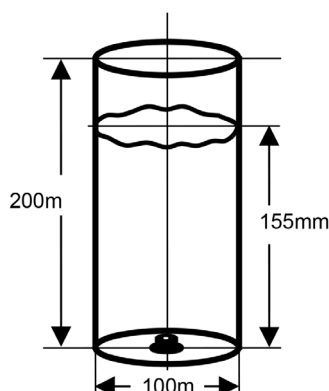


Fig. 2. Reduced pressure vessel (Inner).

ス導入ノズルを設置し、これにリークバルブ、ストップバルブを接続して、外部より空気を導入した。真鍮製ノズルの内径は1.0 mm、外径は10 mmで、ノズル上端面の底からの高さは約15 mmである。その中心線上にダンピングカップを設置し、単一気泡の生成、放出に用いた。カップはFig.3に示すように直径40 mmの半球状で透明樹脂製である。カップを伏せた状態で、ノズルより所定体積の空気を導入すると、個々の気泡はカップ内で合体する。単一気泡が得られたのちカップを反転させ上方に放出する。カップは液面上に配したサーボモーターにより、コネクティングロッド、プーリーを介して駆動される。回転可能な角度は約135 deg.であり、気泡の放出点の底からの高さは55 mmである。気泡をカップに導入し、単一とした時点での体積を初期体積とし、0.05 cm³~10.0 cm³の範囲で変化させた。

容器内の減圧は上蓋に穿った排気口よりロータリー式の真空ポンプを用いて行い、その内圧を上蓋に接続したマノメータで測定しながら、容器と真空ポンプの間に設けたバッファータンクにあるリークバルブにより1.3 kPa~101.3 kPa (大気圧) の間で調整、制御した。この円筒形の減圧容器 (内槽) の外側にはFig.4に示すように、方形の断

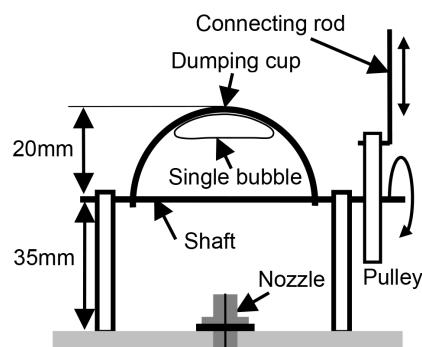


Fig. 3. Dumping cup.



Fig. 4. Overview of the outer vessel and the inner vessel.

面を持つ外槽を配し、内槽－外槽間に水を満たす事で、気泡観察時の光学的な歪を小さく止めた。気泡がカップから離脱して浴内を上昇、液面近傍で破裂するまでの一連の挙動を外槽外側より、高速度カメラにより記録し、観察、解析に供した。撮影速度は毎秒500コマである。なお、気泡寸法測定に際しては、浴内に水平、垂直両方向に設置したスケールをカメラで撮影し、箇所ごとの歪の度合いを確認している。用いたシリコンオイルの動粘度と、それぞれの物性をTable 1に示す。

ガスを連続供給する実験では、容器底部のダンピングカップを取り外し、空気を槽底ノズルより導入した。ガス流量を $2.5 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、 $5.0 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、 $10.0 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、 $20.0 \text{ cm}^3/\text{s}$ とし、マスフローコントローラを用いて制御した。また、液相をイオン交換水、浴深を120 mmとした。容器内圧は101.3 kPa、18.2 kPa、4.8 kPaの3段階に変化させた。

3. 結果および考察

3・1 大気開放下における単気泡上昇時の挙動観察

まず、単一気泡上昇の典型例として、気泡が膨張しない101.3 kPaにおける気泡挙動を記録し、減圧した場合との比較対象とした。上昇開始から破裂までの変形挙動をFig.5に示す。気泡初期体積は 1.0 cm^3 、液相動粘度は10 cStである。伏せた状態のダンピングカップが反転を開始し、気泡

Table 1. Properties of Silicon oil (Shin-etsu Silicone, Shin-Etsu Chemical Co.).

	Kinetic viscosity (mm^2/s)	Specific gravity (-)	Surface tension (mN/m)
KF-96-1cs	1	0.818	16.9
10cs	10	0.935	20.1

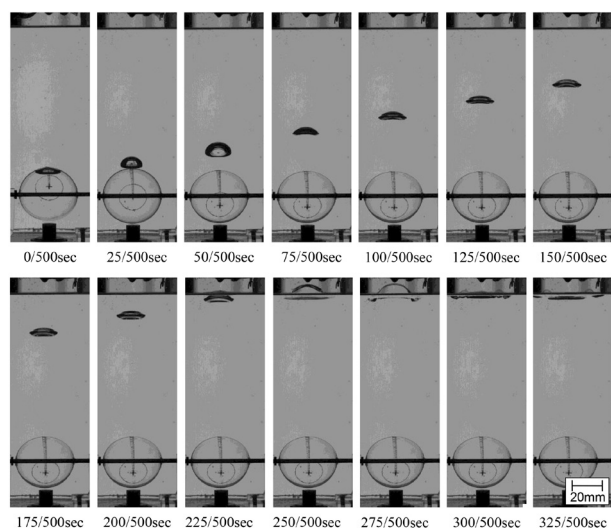


Fig. 5. Deformation of rising single bubble (101.3 kPa, 1.0 cm^3 , 10 cSt).

の離脱が始まった瞬間を開始時刻0/500 secとし、その後、液面まで上昇して気泡が破裂するまでの間を、25/500 secごとに示したものである。なお、カップ回転速度はおおよそ 450 deg./s である。

離脱が完了した後、鉛直方向に引き伸ばされた気泡は、表面張力および周囲の流れ場の影響を受けて縮み、Spherical-Cap型に遷移するが、その際、表面張力と慣性力の作用により、形状が周期的に変動を繰り返す振動状態になる。振動は徐々に減衰し、Spherical-Cap型に安定して、ほぼ鉛直上方に上昇し、液面で破裂した。振動が減衰して形状がほぼ安定した状態の気泡は、Fig.5において75/500 sec時点の画像に相当する。

3・2 減圧下における単気泡上昇時の挙動観察

次に、容器内圧を1.3 kPaに減圧した場合（気泡初期体積 1.0 cm^3 、液相動粘度10 cSt）の単一気泡の上昇時の画像をFig.6に示す。気泡の変形挙動に及ぼすカップ回転の影響は101.3 kPaにおける観察結果と同様で、カップ離脱後、気泡形状は振動を示した後、Spherical-Cap型に安定した（75/500 sec）。Fig.6における75/500 secの画像はその安定した様子を示しており、これ以降、気泡はその形状を保ちながらほぼ鉛直上方に上昇し、液面に衝突して破裂した。この間、気泡は上昇に伴い膨張し、幅、高さ共に増大することが一連の画像から見て取れる。

3・3 上昇に伴う気泡形状の変化

1.3 kPaに減圧した場合の膨張現象をより正確に把握するため、一連の画像の中から、気泡形状が安定した時刻（75/500 sec, $z = 82 \text{ mm}$ ）を基準として、これ以降、5/500 secごとの画像より、Fig.7に示すように槽底からの距離（ z ）、気泡高さ（ h ）、気泡幅（ w ）を抽出し、その経時変化を調査した。なお、槽底からの距離とは容器底より気泡上端までの距離である。

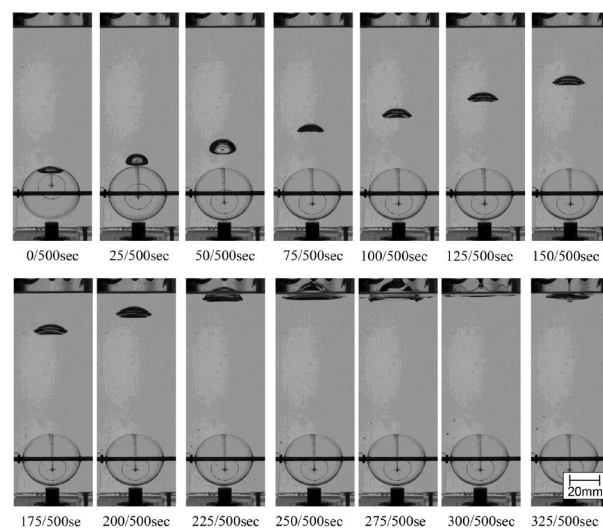


Fig. 6. Expansion of rising single bubble (1.3 kPa, 1.0 cm^3 , 10 cSt).

まず、気泡形状の指標としてアスペクト比 (h/w) を求め、槽底からの距離 (z) で整理した。Fig.8には、この容器内圧1.3 kPaの場合と101.3 kPaの場合を合わせて示している (いずれも気泡初期体積 1.0 cm^3 、液相動粘度 10 cSt)。 $z = 90 \text{ mm}$ 付近を中心に見られるアスペクト比の一時的な上昇は、初期の形状振動に起因し、その振動が十分に減衰していなかったためと考えられる。その後、膨張しながらもアスペクト比はほぼ一定の値で0.3を示す。また、内圧が101.3 kPaの場合の結果は、1.3 kPaの場合の結果とほぼ一致することがわかる。

3・4 上昇に伴う気泡の体積膨張

気泡の上昇に伴う体積膨張の指標として気泡幅の変化を調査した。容器内圧が101.3 kPaの場合と1.3 kPaの場合を比較してFig.9に示す。気泡幅比 (w/w_0) とは気泡形状が安定した時点での気泡幅 (w_0) を基準として、その後の幅 (w) との比を示したものである。容器内圧が101.3 kPaの場合、上昇初期の形状振動に起因すると考えられる変動を示すものの、気泡の上昇に関らず、その比はおおよそ1と1.1の間の値を示す。これに対し、1.3 kPaとした場合、気泡の上昇とともに横幅は一様に増大し、気泡が液面に到達する際にはおおよそ1.4倍に達する。アスペクト比に変化がない

ことから、気泡形状の相似を仮定すると、体積膨張比はその値の3乗のおおよそ2.7倍と推算される。容器内圧が1.3 kPaで液相の静水圧のみで気泡位置の圧力が変化するとして求めた、形状が安定する $z = 80 \text{ mm}$ における圧力と、気泡が界面に衝突する直前の $z = 150 \text{ mm}$ における圧力の比は0.67である。これより等温膨張を仮定して求めた体積の膨張比は1.49倍であり、気泡幅増大より求めた体積膨張比との間には、大きな差がある。

これに関し、気泡放出後の形状がSpherical Cap型に安定した直後の画像Fig.10 (a) と、液面近傍到達時の画像Fig.10 (b) を比較して示す。Fig.10 (a) では、気泡底面に生じるWakeに相当する部分のくぼみはわずかである。しかし、Fig.10 (b) に見るように、液面近傍まで上昇した気泡には気泡底面に生じるくぼみは大きく発達していることがわかる。したがって、気泡形状は上昇に伴う膨張に際し、アスペクト比は変わらないものの、相似は保たれず、大きく変形していると推測される。

そこで、気泡の上昇、膨張に伴う、気泡厚み (気泡高さ (h) より、くぼみ高さを差し引いた気泡の肉厚) の変化を解析した。上昇時の気泡厚み、体積、幅をそれぞれ b , V , w とし、形状が安定した時点 ($z = 80 \text{ mm}$ 近傍) における、それ

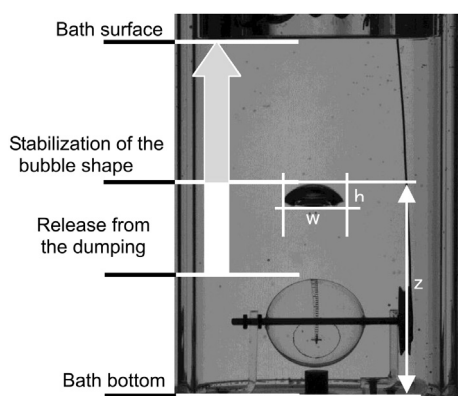


Fig. 7. Measurement of bubble size and rise distance from high speed photography image.

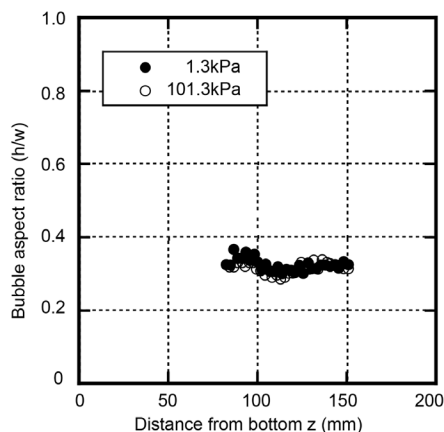


Fig. 8. Comparison of aspect ratio (1.0 cm^3 , 10 cSt).

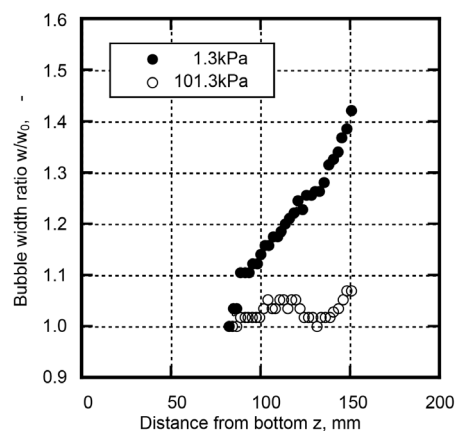


Fig. 9. Comparison of bubble width (1.0 cm^3 , 10 cSt).

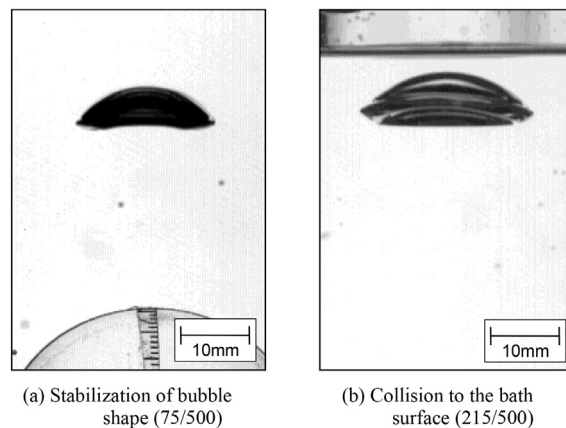


Fig. 10. Comparison of bubble shape (1.3 kPa , 1.0 cm^3 , 10 cSt).

それぞれの値を b_0 , V_0 , w_0 として比をとると、下式が成り立つ。

$$V/V_0 = (w/w_0)^2 (b/b_0)$$

ここで、 w/w_0 は実測の気泡幅比、 V/V_0 は気泡の等温膨張を仮定して静水圧変化より求まる。これより、気泡厚み比(b/b_0)を求め、上昇に伴う変化を調査した。その結果をほとんど体積膨張を示さない101.3 kPaの場合と比較してFig.11に示す。101.3 kPaの場合、気泡厚みは当初減少を示し、次いで増加に転じる。Fig.9に見る気泡幅変化と、ほぼ同期して逆の傾向を示す事から、上昇初期の形状振動に起因する、同じ変動を捉えていると考えられる。液面に衝突する直前の $z = 150$ mmにて、厚み比は約、0.88を示した。

一方、顕著な体積膨張を示す1.3 kPaの場合の気泡厚み変化は、101.3 kPaの場合にも観察された、気泡形状の変動に起因して、緩急を示すものの様な減少を示し、液面に衝突する直前の $z = 150$ mmでは約、0.73を示した。このことから、気泡が膨張しない場合も、上昇に伴い幅みは拡大するが、膨張する場合はその傾向がより顕著になることが分かる。

3・5 気泡変形挙動に及ぼす初期体積の影響

容器内圧を1.3 kPa、液相動粘度を10 cStとして、初期気泡体積を 0.05 cm^3 とした場合の上昇の観察を連続画像Fig.12に示す。気泡形状は 1.0 cm^3 の場合と異なり、形状安定化($z = 57$ mm)時点で楕円体を示し、形状を維持したまま、液面に衝突した。また、上昇に伴う膨張に関しては、気泡高さ(h)はほとんど変化せず、気泡幅(w)のみが増大した。

同様に、初期体積を 0.5 cm^3 , 2.0 cm^3 とした場合の連続画像をFig.13, Fig.14に示す。

気泡形状は、 1.0 cm^3 の場合と同じく、形状安定化($z = 82$ mm, 91 mm)から液面衝突前までの間、終始Spherical Cap型を示した。

さらに、初期体積を 5.0 cm^3 , 10.0 cm^3 とした場合の画像をFig.15, Fig.16に示す。放出前にカップ内で単一に合体さ

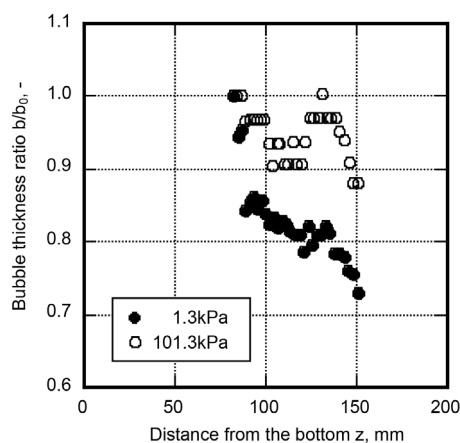


Fig. 11. Comparison of bubble thickness (1.0 cm^3 , 10 cSt).

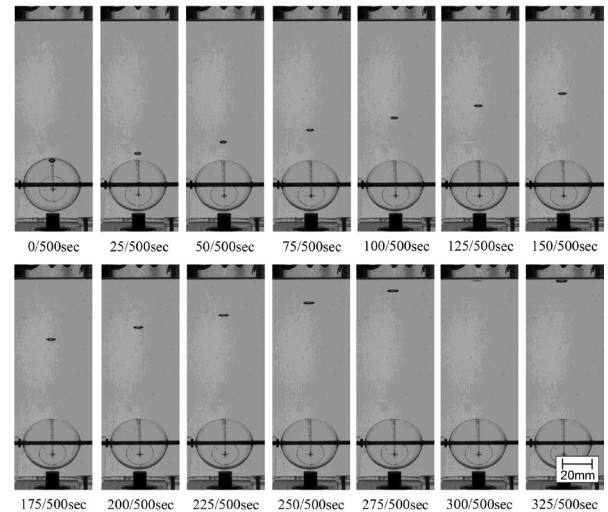


Fig. 12. Expansion of rising single bubble (1.3 kPa, 0.05 cm^3 , 10 cSt).

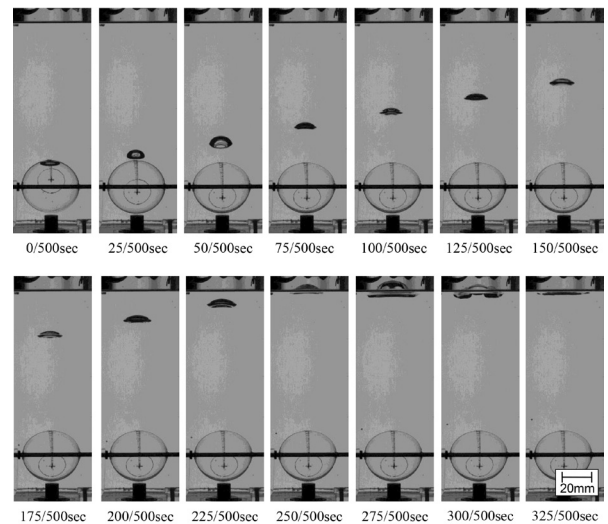


Fig. 13. Expansion of rising single bubble (1.3 kPa, 0.5 cm^3 , 10 cSt).

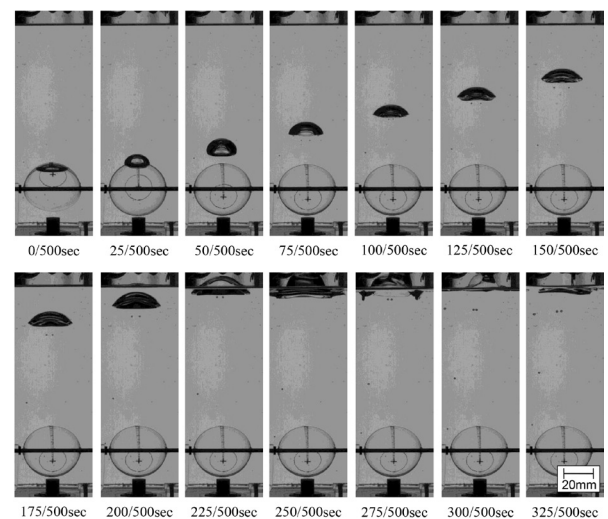


Fig. 14. Expansion of rising single bubble (1.3 kPa, 2.0 cm^3 , 10 cSt).

せているが、放出後気泡は上側のSpherical-Cap型部分と、下側のリング状部分に分裂し、距離を保ったまま上昇、膨張し、液面に衝突した。

これら、初期体積と観察された気泡形状との関係を Table 2に示す。

3・6 上昇に伴う気泡上昇速度の変化

初期気泡体積 1.0 cm^3 、容器内圧が 1.3 kPa の場合の気泡上昇速度の変化を 101.3 kPa の場合と比較してFig.17に示す。縦軸は気泡上昇速度 (v)、横軸は槽底からの距離 (z) である。容器内圧が 1.3 kPa 、 101.3 kPa のどちらの場合も、速度は定常とならず、気泡の上昇と共にその速度の上昇を示した。気泡が、上昇に伴う周囲流れ場の発達により、変形することは、先のくぼみ部分の変化からも明らかであり、速度上昇の要因の一つと考えられる。

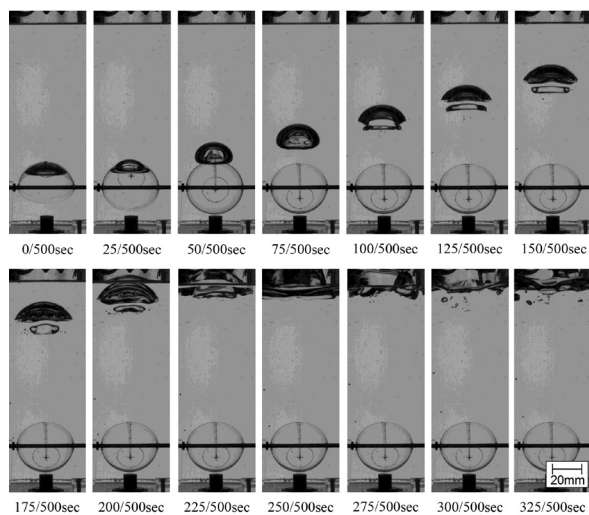


Fig. 15. Expansion of rising single bubble (1.3 kPa , 5.0 cm^3 , 10 cSt).

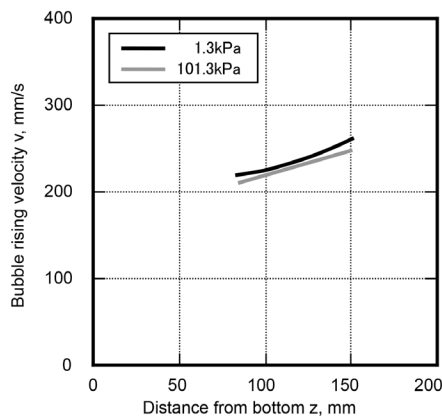


Fig. 17. Comparison of bubble rising velocity (1.0 cm^3 , 10 cSt).

また、 1.3 kPa の場合には、体積膨張による上昇速度への影響も考えられる。Cliftら⁷⁾は水中の気泡でSpherical cap形状およびEllipsoidal形状をとる気泡に関し、相当径が大きいほど終端上昇速度が高いことを示している。したがって、浮上に伴う体積膨張と変形の2つが速度上昇の要因として考えられるが、2気泡の速度上昇の差に対する、膨張の寄与の評価は、今後の更なる知見の蓄積が必要と思われる。

次に、形状が同じSpherical cap型を示した3気泡（初期気泡体積 0.5 cm^3 、 1.0 cm^3 、 2.0 cm^3 ）に関し同様の解析を行いFig.18に示す。体積が 0.5 cm^3 、 1.0 cm^3 、 2.0 cm^3 と大きいほど上昇速度が高く、また気泡の上昇に伴い速度が高くなる傾向を示した。その度合いは3気泡ともほぼ等しいことから、これらの傾きは相応の再現性を有すると考えられる。

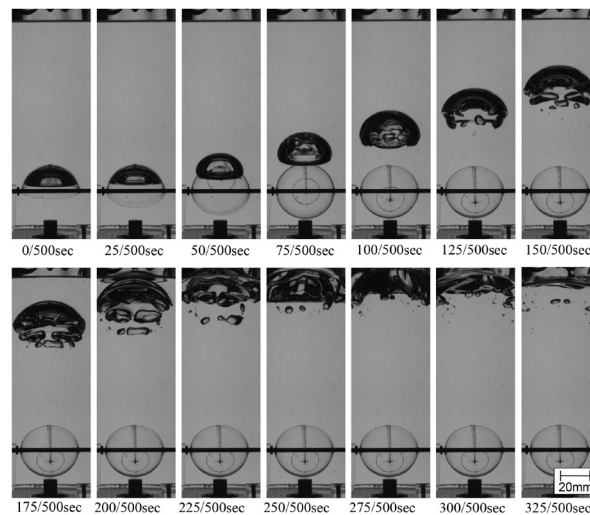


Fig. 16. Expansion of rising single bubble (1.3 kPa , 10.0 cm^3 , 10 cSt).

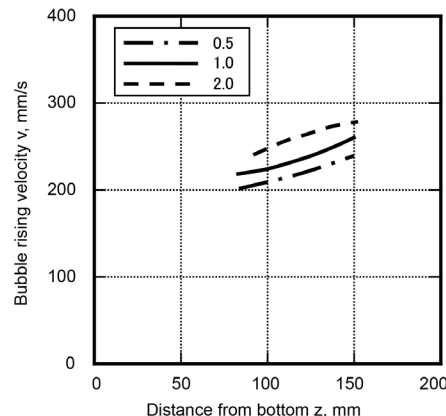


Fig. 18. Comparison of bubble rising velocity for initial volume of 0.5 cm^3 , 1.0 cm^3 , 2.0 cm^3 (1.3 kPa , 10 cSt).

Table 2. Relation between observed bubble shape and the initial volume.

Initial volume (cm^3)	0.05	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0
Bubble shape	Ellipsoidal	Spherical cap	Spherical cap	Spherical cap	Break up (spherical cap)	Break up (spherical cap)

また、形状が異なる3気泡（初期気泡体積 0.05 cm^3 、 1.0 cm^3 、 5.0 cm^3 ）に関し同様の解析を行いFig.19に示す。体積が 5.0 cm^3 の場合、上昇に伴い気泡が上下に分裂したため、上側気泡の上端の速度を測定した。やはり、体積が大きいほど上昇速度が高く、また気泡の上昇に伴い速度が高くなる傾向を示した。Spherical cap型を示した 1.0 cm^3 の場合の傾きと、Ellipsoidal形状を示す 0.05 cm^3 の場合の増加傾向を比較すると 1.0 cm^3 の場合のほうが大きい。この差が気泡形状あるいは初期体積に起因するかの評価には更なる知見の蓄積が必要と思われる。

3・7 気泡形状、体積および上昇速度の評価に及ぼす減圧の影響

気泡の体積、速度および形状に関しCliftら⁷⁾はその整理・分類法を示している。これは以下の式で示される Eo （エトベス）数を横軸に、 Re （レイノルズ）数を縦軸にとり、条件ごとに観察される気泡形状を重ね合わせて整理したもので、Fig.20に示す。

$$Eo = g\Delta\rho d_c^2 / \sigma$$

$$Re = \rho d_c v / \mu$$

ここで、 d_c ：体積相当直径、 $\Delta\rho$ ：気液密度差、 σ ：表面張力、 ρ ：液相密度、 v ：気泡上昇速度、 μ ：粘性係数、 g ：重力加

速度である。

共に示される右上がりの複数のカーブは M （モルトン）数で、下式で示される気液の物性値で決まる。本実験で用いたシリコンオイルでは M 数はおおよそ 10^{-5} である⁸⁾。

$$M = g\mu^4\Delta\rho / \rho^2\sigma^3$$

本研究で観察された気泡形状と上昇速度、体積との関係を、この整理法に則り初期体積毎にFig.20に重ねて示す。初期体積が 0.5 cm^3 、 1.0 cm^3 、 2.0 cm^3 、 5.0 cm^3 の場合のプロットは、おおよそ、 $M = 10^{-5}$ のカーブに沿っており、観察された気泡形状はSpherical cap型に準じる。また、初期体積が 0.05 cm^3 の場合も同じく $M = 10^{-5}$ のカーブに沿っており、観察された気泡形状Ellipsoidal型であったことから、本研究における減圧下で測定された上昇速度、観察された気泡形状は、既知の報告と概ね一致していることがわかる。

3・8 ガスを連続的に供給した場合の気泡群の生成および上昇挙動

ガス流量を $2.5\text{ m}^3/\text{s}$ として、容器内圧を 101.3 kPa 、 18.2 kPa 、 4.5 kPa と変化させながら、生成する気泡の挙動を高速カメラで撮影した。その画像をFig 21に示す。

101.3 kPa では、楕円形の気泡がほぼ等しい時間間隔で生

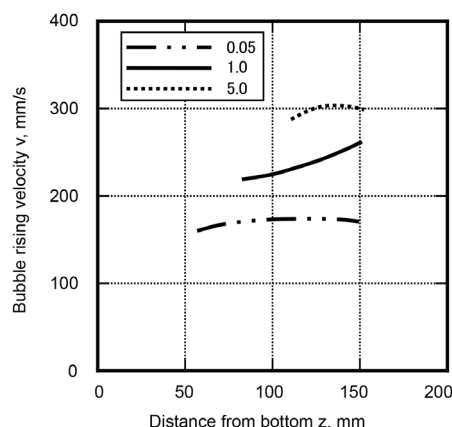


Fig. 19. Comparison of bubble rising velocity for initial volume of 0.05 cm^3 、 1.0 cm^3 、 5.0 cm^3 (1.3 kPa 、 10 cSt).

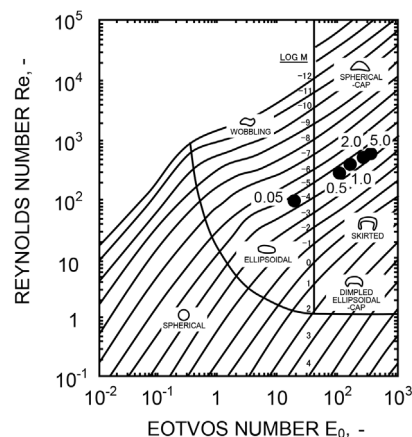


Fig. 20. Shape regimes and observed bubbles in this study (c.f. R. Clift et.al: Bubbles, Drops and Particles, (1978), p.27).

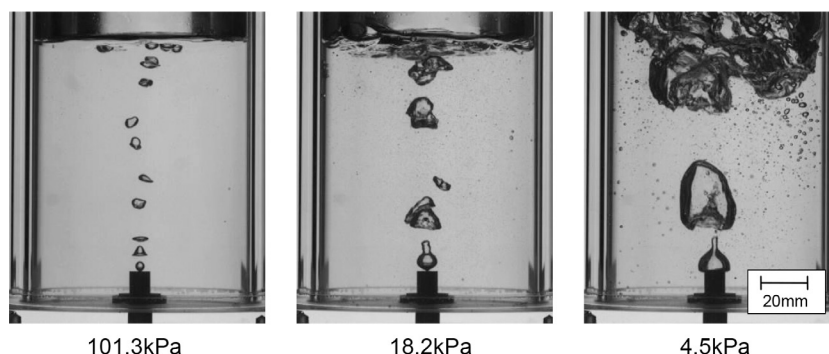


Fig. 21. Observed continuous bubble behavior ($Q_g = 2.5\text{ cm}^3/\text{s}$, water).

成し、そのまま上昇するのに対し、18.2 kPaでは気泡の合体による成長が観察される。更に4.5 kPaでは、合体成長した大気泡による液面の揺動が観察された。配管内も含めノズルよりガス吹き込み直後には、膨張が既に完了しているため、減圧条件では体積流量が大きくなったものと思われる。

4. 結論

減圧容器内において、単一および連続気泡が上昇する際の膨張および変形を観察し、以下の結果を得た。

- 1) 減圧下において得られた単一気泡のアスペクト比, h/w は常圧の場合とほぼ同一であった。浮上中気泡幅は1.4倍に達したが、これより予想される体積膨張比は静圧比から予想される膨張比よりも大きいことから、気泡形状の相似は保たれず、浮上中に気泡の厚みが減少していると推測される。
- 2) 単一気泡の観察で確認された気泡形状は、Ellipsoidal型、Spherical cap型およびSpherical capが分裂する型の3種

類であり、気泡上昇速度は初期気泡体積が大きいほど高く、かつ浮上しつつその速度は上昇した。速度上昇の理由は気泡が上昇開始間もなく、過渡的な状態にあり、周囲の流れ場の発達が十分でなく、気泡の浮上に伴う形状変化および体積膨張によると考えられるが、それらの寄与を評価するには、今後の更なる知見の蓄積が待たれる。

文 献

- 1) 梶岡博幸：取鍋精錬法，地人書館，東京，(1997)，11，13.
- 2) 三木祐司，B.G.Thomas：超清浄鋼研究会最終報告書，日本鉄鋼協会，東京，(1999)，241.
- 3) M.Iguchi, Z.Morita, T.Kuranaga, S.Kotani, H.Ueda and T.Chihara: *CAMP-ISIJ*, **6**(1993), 1049.
- 4) M.Iguchi, Z.Morita, H.Ueda and T.Kuranaga: *CAMP-ISIJ*, **6**(1993), 7(1994), 267.
- 5) M.Iguchi, Z.Morita, H.Kawabata, T.Chihara, T.Takanashi, H.Ueda and T.Kuranaga: *CAMP-ISIJ*, **7**(1994), 1098.
- 6) T.Tatsuoka and K.Ito: *CAMP-ISIJ*, **7**(1994), 1100.
- 7) R.Clift, J.R.Grace and M.E.Weber: *Bubbles, Drops and Particles*, Dover Civil and Mechanical Engineering, New York, (1978), 27, 173.
- 8) T.Tagawa, Y.Anzai and T.Kumagai: *Tetsu-to-Hagané*, **101**(2015), 101.