



Title	鉄鋼2次精錬を想定した減圧容器内における気泡膨張挙動調査
Author(s)	熊谷, 剛彦
Citation	混相流, 30(4), 367-374 https://doi.org/10.3811/jjmf.30.367
Issue Date	2016-12-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/74954
Rights	著作権は日本混相流学会に帰属する
Type	journal article
File Information	jjmf 30(4) 367.pdf



鉄鋼 2 次精錬を想定した減圧容器内における気泡膨張挙動調査*

Observation of Single Rising Bubble in Reduced Pressure Vessel

Simulating Steel Secondary Refining

熊谷 剛彦**

KUMAGAI Takehiko

Abstract The expansion and shape change behaviors of a single rising bubble in a reduced pressure vessel were observed. The main results obtained are as follows: 1) The aspect ratio, h/w , 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.

Keywords: Vacuum refining, Expansion of bubble, Single rising bubble, Cold model

1. 緒言

鉄鋼製造プロセスでは鉄鉱石と石炭を主原料とし、高炉での還元処理で得られた溶銑から余剰の炭素を取り除く転炉での精錬処理（一次精錬）で溶鋼を得る。近年、その高品質化、特に清浄化への要求は高まる一途であり、ほとんどの溶鋼には更に清浄化処理（二次精錬）を施し高清浄度の鋼としている。二次精錬では溶鋼からの脱硫、脱酸と共に、窒素、水素の脱ガスを行い、清浄化を促す。また、合金元素を添加し、精確な成分調整を行うと共に、その組成ならびに温度の均一化を図るために攪拌が行われる。窒素、水素の脱ガスは、溶鋼を密閉容器内に導き減圧することでガス成分の除去が可能である。一方、脱酸は脱酸剤を溶鋼に添加し、酸素との反応生成物を除去する事によって行われるが、この脱酸生成物は直径数～数百 μm の介在物粒子となって溶鋼中に分散、浮遊するため、適切に捕集、除去しなければ最終製品の品質を大きく損なう事につながる[1]。介在物

の粒径が大きい場合には、溶鋼との比重差を利用して浮上分離することが可能であるが、粒径が小さい場合には浮上速度が小さく分離が難しい。このような背景から、溶鋼を攪拌[2,3]あるいは振動[4,5]させて粒子同士を衝突させ、その凝集成長を促進し、浮上速度を高める方法や、溶鋼にガスを吹き込んで気泡を上昇させ、これと衝突した粒子をその気液界面に補足して液面まで粒子を浮上させることが行なわれている[6,7]。

RH 脱ガス法[8]は真空槽内を 0.133 kPa (1Torr) 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のプロセスである。

三木ら[9]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、

* 2016.11.9 受付

** 北海道大学大学院工学研究院 〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目

TEL: (011)706-6337 E-mail: kuma@eng.hokudai.ac.jp

Ar ガス気泡への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 $5\mu\text{m}$ を越える大型介在物 (クラスター径 $10\mu\text{m}$) 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 (5mm 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、井口ら[10-12]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、龍岡と伊藤[13]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、なかでも気泡形状がどのように変化するかな等は明らかにされていない。また、数値計算による精錬容器内流動解析に関しても、気泡の膨張現象を考慮した報告はない。日本鉄鋼協会「精錬反応プロセスにおける混相流・多重スケール解析技術の開発研究会」では、水モデル実験と数値解析の両面から協調して実現象解明にアプローチし、現象の理解を深めると共に、数値解析による現象再現の精度の検討が行なわれた。本稿は上述した気泡膨張現象に関し、数値解析と実験条件を同一にするなど協調して行なった、水モデルによる気泡膨張観察実験について解説したものである。

実験は、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、形状の変化を高速度カメラを用いて観察、記録することを目的とした。現象を簡単化するため、単一気泡を観察対象とした。

2. 実験

単一気泡を観察するために用いた装置の概略を 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。容器寸法は内径 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.2 に示すような直径 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し、カップ内で合体させた。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、 $0.05\text{ cm}^3 \sim 10.0\text{ cm}^3$ の範囲で変化させた。

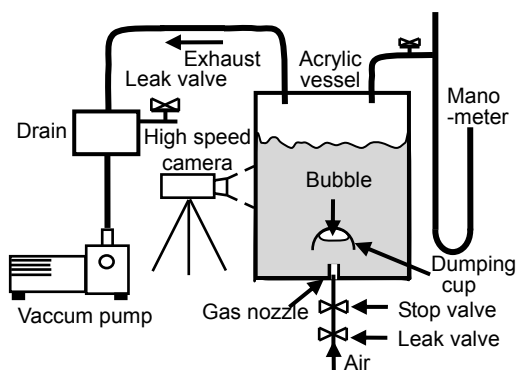


Fig. 1 Experimental apparatus.

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 $1.3\text{ kPa} \sim 101.3\text{ kPa}$ (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. 3 に示すように、方

形の断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。

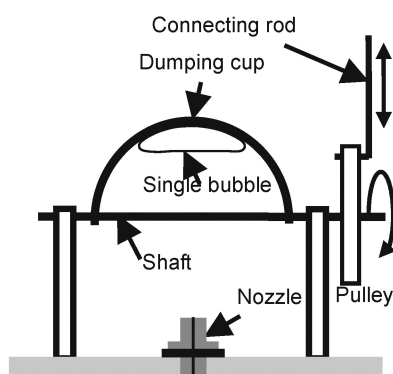


Fig. 2 Dumping cup.



Fig. 3 Overview of the outer vessel and the inner vessel.

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

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、気泡がほとんど膨張しない 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. 4 に示す。気泡初期体積は 1.0cm³、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。

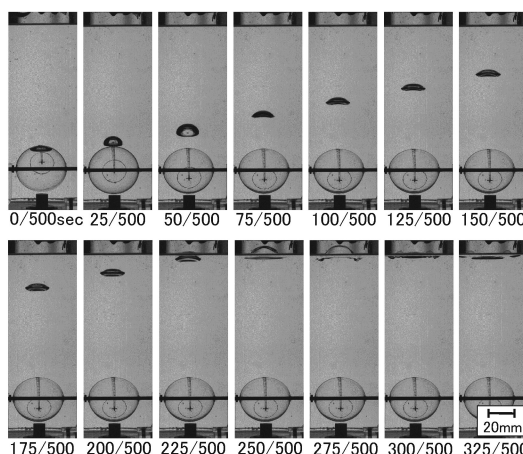


Fig. 4 Rising single bubble (101.3kPa, 1.0cm³).

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. 4 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 cm³、液相動粘度 10 cSt）の単一気泡の上昇時の画像を Fig.5 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.5 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。

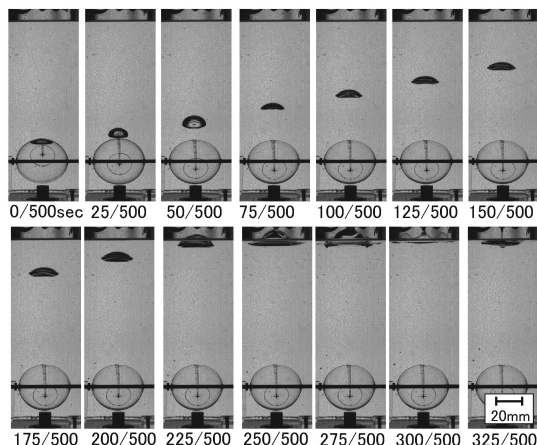


Fig. 5 Expansion of rising single bubble (1.3kPa, 1.0cm³).

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詳細に把握するため、一連の画像の中から、気泡形状が安定した時刻 (75/500 sec.、 $z=82$ mm) を基準として、これ以降、5/500 sec.ごとの画像より、Fig.6 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。

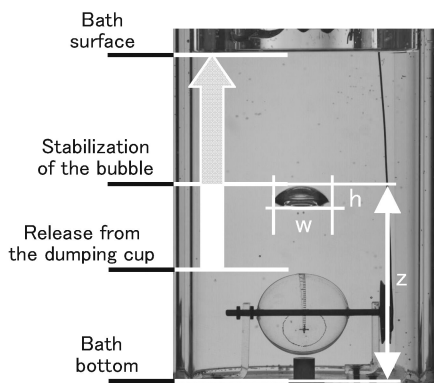


Fig. 6 Measurement of bubble size and rise distance from high speed photography image.

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.7 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 cm³、液相動粘度 10 cSt)。 $z=90$ 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。

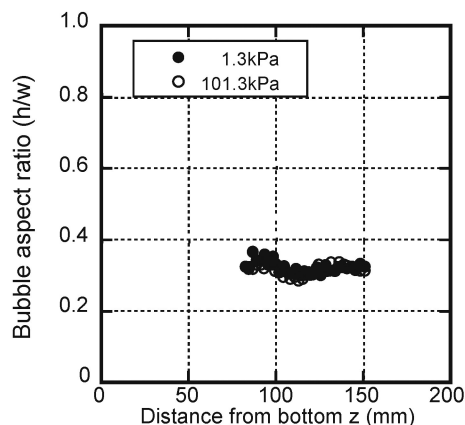


Fig. 7 Comparison of aspect ratio (1.0cm³, 10cSt).

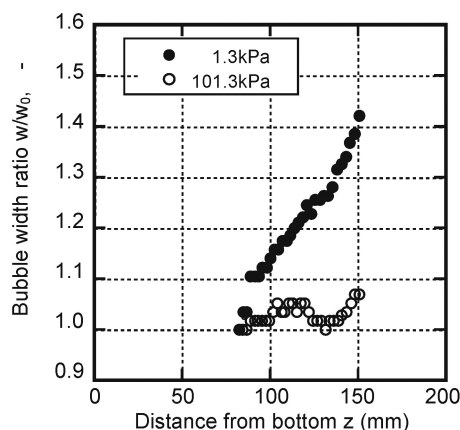


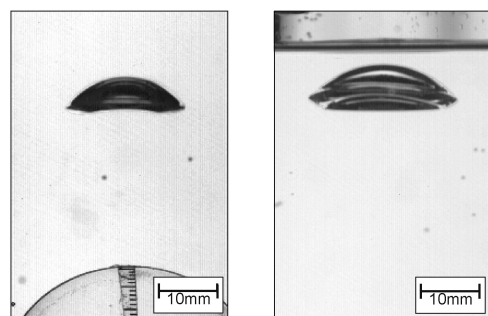
Fig. 8 Comparison of bubble width (1.0cm³, 10cSt).

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.8 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.9 (a) と、液面近傍到達時の画像 Fig. 9 (b) を比較して示す。Fig. 9 (a) では、気泡底面下に生じる Wake に相当する部分のくぼみはわずかである。しかし、Fig. 9 (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下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



(a) Stabilization of bubble shape (75/500sec.) (b) Collision to the bath surface (215/500sec.)

Fig. 9 Comparison of bubble shape (1.3kPa, 1.0cm^3).

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。

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 10cSt とし、初期気泡体積を 0.05cm^3 とした場合の上昇の観測を連続画像 Fig.10 に示す。気泡形状は 1.0cm^3 の場合と異なり、形状安定化 ($z=57\text{mm}$) 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 0.5cm^3 、 2.0cm^3 とした場合の連続画像を Fig. 11、Fig.12 に示す。

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

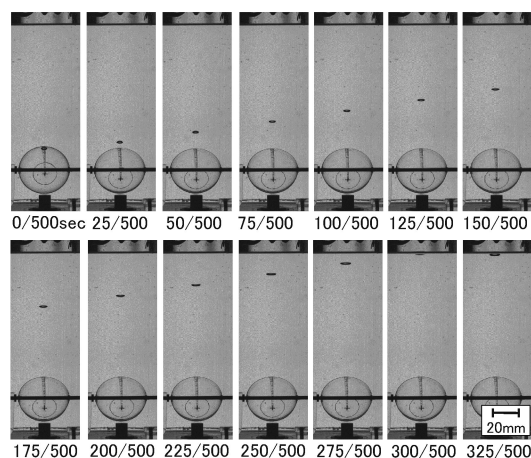


Fig. 10 Expansion of rising single bubble (1.3kPa, 0.05cm^3).

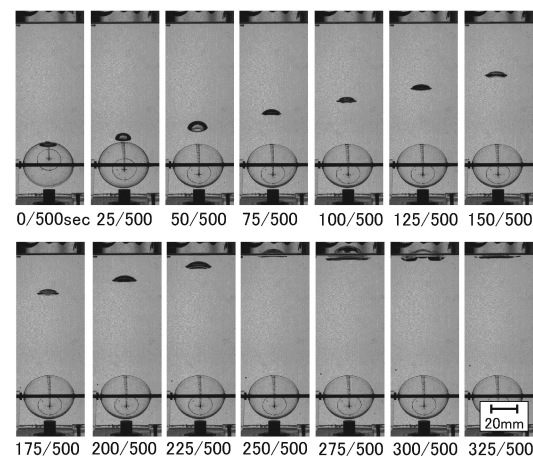


Fig. 11 Expansion of rising single bubble (1.3kPa, 0.5cm^3).

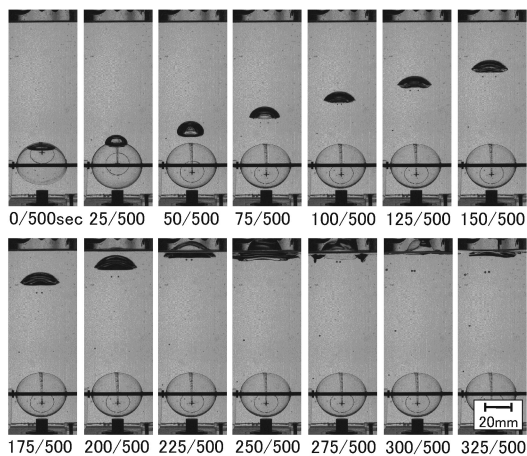


Fig. 12 Expansion of rising single bubble (1.3kPa, 2.0cm^3).

さらに、初期体積を 5.0cm^3 、 10.0cm^3 とした場合の画像を Fig.13、Fig.14 に示す。

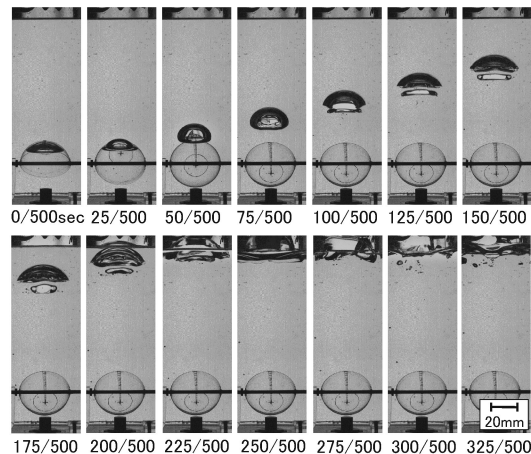


Fig. 13 Expansion of rising single bubble (1.3kPa, 5.0cm^3).

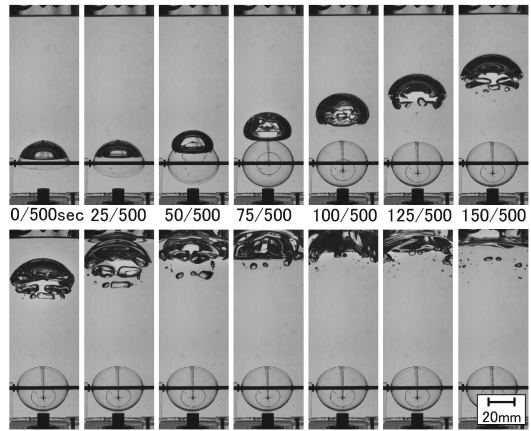


Fig. 14 Expansion of rising single bubble (1.3kPa, 10.0cm^3).

放出前にカップ内で単一に合体させているが、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。

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	←	←	Break up (spherical-cap)	←

3.6 上昇に伴う気泡上昇速度の変化

初期気泡体積 1.0cm^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. 15 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。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[14]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、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。

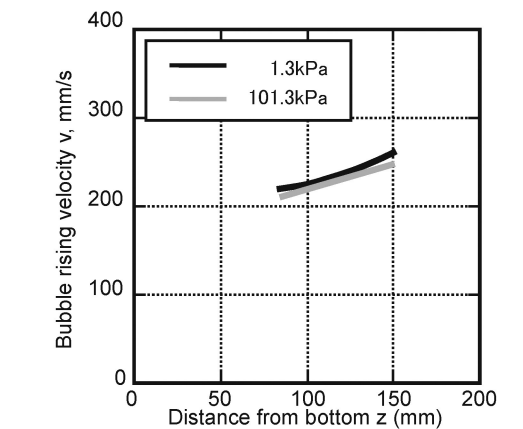


Fig. 15 Comparison of bubble rising velocity (1.0cm^3 , 10cSt).

次に、形状が同じ Spherical-cap 型を示した 3 気泡（初期気泡体積 0.5cm^3 、 1.0cm^3 、 2.0cm^3 ）に関し同様の解析を行い Fig.16 に示す。体積が 0.5cm^3 、 1.0cm^3 、 2.0cm^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。

また、形状が異なる 3 気泡（初期気泡体積 0.05cm^3 、 1.0cm^3 、 5.0cm^3 ）に関し同様の解析を行い Fig.17 に示す。体積が 5.0cm^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。

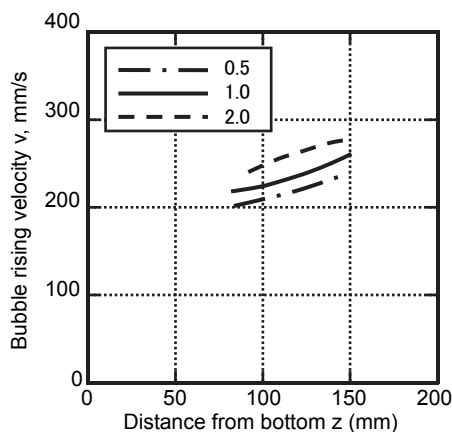


Fig. 16 Comparison of bubble rising velocity for initial volume of 0.5cm³, 1.0 cm³, 2.0 cm³ (1.3 k Pa, 10cSt).

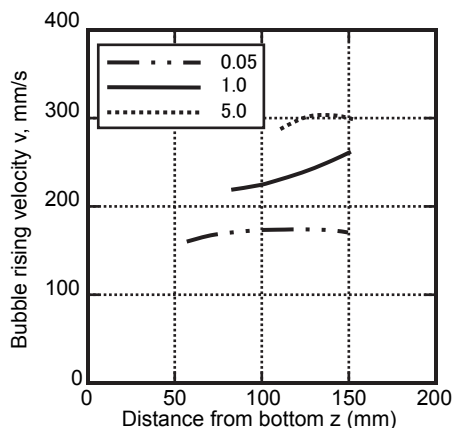


Fig. 17 Comparison of bubble rising velocity for initial volume of 0.05cm³, 1.0 cm³, 5.0 cm³ (1.3 k Pa, 10cSt).

Spherical-cap 型を示した 1.0cm³ の場合の傾きと、Ellipsoidal 形状を示す 0.05cm³ の場合の増加傾向を比較すると 1.0cm³ 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[14] 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. 18 に示す。

$$Eo = g \Delta \rho d_e^2 / \sigma \quad (1)$$

$$Re = \rho d_e v / \mu \quad (2)$$

ここで、 d_e : 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。

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

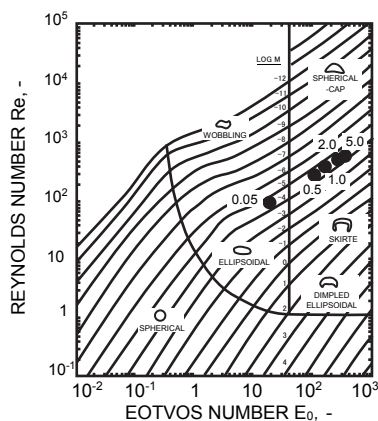


Fig. 18 Shape regimes and observed bubbles in this study (c.f. R. Clift et.al: Bubbles, Drops and Particles, (1978), p.27).

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. 18 に重ねて示す。初期体積が 0.5cm³、1.0cm³、2.0cm³、5.0cm³ 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 0.05cm³ 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。

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、浮上中に気泡のくぼみが拡大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。

なお、本稿は「鉄と鋼」第101巻第2号の特集号「精錬プロセスにおける混相現象」[15]より加筆、修正の上、転載したものある。また、本実験と同一条件で行なわれた、中村、田川、姫野らによる数値解析の再現結果が、同特集「精錬プロセスにおける混相現象」[16-18]に報告されているので、合わせてご参照頂ければ幸いである。

参考文献

- [1] Kajioka, H., Bubbles, Ladle Refining, 11,13, Chijin syokan, Tokyo (1997).
- [2] Taniguchi, S. and Kikuchi, A., Mechanisms of Collision and Coagulation between Fine Particles in Fluid, Tetsu-to-Hagané, Vol. 78, 527-535(1992).
- [3] Nakaoka, T., Taniguchi, S., Matsumoto K. and Johansen, S.T., Particle-Size-Grouping Method of Inclusion Agglomeration and its Application to Water Model Experiments, ISIJ International, Vol. 41(10), 1103-1111 (2001).
- [4] Yamao, F., Sassa, K., Iwai, K. and Asai, S., Separation of Inclusions in Liquid Metal Using Fixed Alternating Magnetic Field, Tetsu-to-Hagané, Vol. 83, 30-35 (1997).
- [5] Maruyama, A. and Iwai, K., Enhancement of Collision among Non-conductive Particles in Electrically Conductive Liquid by Imposing an Oscillating Electromagnetic Field, Tetsu-to-Hagané Vol. 102(3), 113-118 (2016).
- [6] Okumura, K., BAN, M., Hirasawa, M., Sano, M. and Mori, K., Rate of SiO₂ Inclusion Removal from Molten Cu to Slag under Gas Injection Stirring Condition, ISIJ International. Vol. 35(7), 832-837 (1995).
- [7] Arai, H., Nakamura, S., Okayama, A., Matsumoto, K. and Taniguchi, S., Experiment on Adhesion and Removal of Suspended Particle in Liquid by Bubble -Investigation on Removal Rate Constant at Initial Stage-, Tetsu-to-Hagané Vol.92(10), 584-590 (2006).
- [8] Semura, K. and Matsuura, H., Past Development and Future Prospects of Secondary Refining Technology, Tetsu-to-Hagané Vol. 100(4), 456-471 (2014).
- [9] Miki, Y. and Thomas, B. G., Final research report for super clean steel, The Iron and Steel Institute of Japan (ISIJ), Tokyo, 241 (1999).
- [10] Iguchi, M., Morita, Z., Kuranaga, T., Kotani, S., Ueda H. and Chihara, T., Bubble and Liquid Flow Characteristics in a Bottom Blown Bath under Reduced Pressure, CAMP-ISIJ Vol. 6, 1049 (1993).
- [11] Iguchi, M., Morita, Z., Ueda H. and Kuranaga, T., Reynolds Shear Stress and Effective Kinematic Viscosity in a Vertical Bubbling Jet under Reduced Pressure, CAMP-ISIJ Vol. 7, 267 (1994).
- [12] Iguchi, M., Morita, Z., Kawabata, H., Chihara, T., Takanashi, T., Ueda, H. and Kuranaga, T., Frequency of Bubble Formation in a Vessel under Reduced Pressure, CAMP-ISIJ Vol. 7, 1098 (1994).
- [13] Tatsuoka, T. and Ito, K., Behavior of Bubbles and Complete Mixing Time of Bath under the Reduced Pressure, CAMP-ISIJ Vol. 7, 1100 (1994).
- [14] Clift, R., Grace, J.R. and Weber, M.E., Bubbles, Drops and Particles, 27, Dover publications Inc., New York, (2005).
- [15] Kumagai, T., Kishimoto, Y., Nakamura, O., Tagawa, T., Himeno, T. and Shimasaki, S., Observation of Single and Continuous Bubbles Rising in Reduced Pressure Vessel, Tetsu-to-Hagané Vol. 101(2), 93-100 (2015).
- [16] Nakamura, O., Kumagai, T. and Takatani, K., Numerical Simulation of Bubble Rising in Liquid, Tetsu-to-Hagané Vol. 101(2), 117-122 (2015).
- [17] Tagawa, T., Anzai, Y. and Kumagai, T., Numerical Analyses of Single Rising Bubble in a Viscous Fluid in an Enclosure, Tetsu-to-Hagané Vol. 101(2), 101-108 (2015).
- [18] Himeno, T. and Kumagai, T., Numerical Analysis of Rising Bubble in Reduced-Pressure Environment, Tetsu-to-Hagané Vol. 101(2), 109-116 (2015).