

濡れ性の悪い平面壁に衝突する単一気泡の挙動

園山 希*・井口 学*²・佐々木 康*²・石井 邦宜*²

Behavior of a Single Bubble Colliding with a Flat Plate of Poor Wettability

Nozomu SONOYAMA, Manabu IGUCHI, Yasushi SASAKI and Kuniyoshi ISHII

Synopsis : The behavior of a bubble in collision with a poor wettability plate was experimentally investigated. Equilibrium shape of a sessile bubble beneath a horizontal plate was determined from the condition minimizing the bubble energy being the sum of the potential energy and the surface energy. Rebound motion of an impacting bubble was observed for a poor wettability plate as well as good wettability plate. For the poor wettability plate, small bubbles ($d_b \approx 2 \times 10^{-3}$ m) attached to it up to an inclination angle θ_p of 60° . Large bubbles being attached to an inclined plate of poor wettability ascended along the plate. The limit between stopping and sliding of an attached bubble was determined from a force balance including the advancing contact angle θ_a and receding contact angle θ_r . There is not difference of bubble rising velocity between two flat plates.

Key words: steelmaking; wettability; single bubble; surface energy; equilibrium condition; bubble attachment; advancing contact angle; receding contact angle; collision.

1. 緒言

金属精錬プロセスや連続鋳造プロセスにおいて用いられる耐火物は、熔融金属に対して濡れが悪いことが知られている¹⁾。水モデル実験によれば、濡れ性の悪い壁近傍を上昇する気泡は壁にしばしば付着し²⁾、濡れ性の良い壁の場合とは明らかに異なる挙動を示す。従来、壁と気泡間の動的相互作用については非常に多くの研究が見られるが、多くは水に対し濡れ性の良い壁に関する研究であり³⁻⁷⁾、気泡が壁に付着するような濡れ性の悪い壁を対象とした研究は著者らの知る限りほとんど見られない²⁾。したがって、気泡の壁への付着形態や離脱体積などの情報はほとんどないのが現状である。

精錬プロセスにおいては、耐火物と気泡間の相互作用が耐火物の寿命に影響を与えており、局部溶損速度は気泡の発生位置および気泡の発生速度に強く影響される⁸⁾。またアルゴン気泡の固相への捕かくは、連続鋳造プロセスにおけるスリバーやピンホールといった気泡欠陥の生成要因となり、製品の品質低下の原因となるため好ましくない^{9,10)}。モールド内のアルゴン気泡の挙動は浸漬ノズル内のアルゴンガスの挙動と密接な関係を有している。すなわち気泡欠陥は、浸漬ノズルより吹き込まれたアルゴン気泡が凝固シェルに捕捉された結果であり、固液界面近傍の気泡の挙動を解析することは、気泡欠陥生成機構を考えるうえで重要である。このように理論的にも実用的にも濡れ性の悪い

壁面に付着した気泡、あるいはその近くの気泡の運動を解明することの意義は大きい。

熔融金属は非常に高温であるため、熔融金属中の気泡を直接観察することは難しい。X線を利用したX線透視法では、熔融金属中の気泡を観察することができるが¹¹⁾、解像度の面で課題が残る。そこで水やシリコンオイルなどを用いたモデル実験により、熔融金属中の気泡の挙動を予測する試みが活発に行われてきた^{2,12,13)}。このようなモデル実験は、常温下で行われるため、安全性やコストの面では熔融金属を用いる実験より有利である。また、水など透明性の高い液体を用いることで視認性が高く、精度良く直接観察することが可能である。しかし常温下では、水に対して長期間にわたって濡れ性の悪い状態が持続する材料は少なく、水モデル実験では水に対して濡れやすいアクリル樹脂が用いられることが多かった。

本研究では、パラフィンを塗布したアクリル板を用い、濡れ性の悪い平板に衝突する気泡の挙動および付着形態について実験的に検討した。また、湾曲型連続鋳造機では鋳型上面から深さが増すにつれ、凝固シェルと溶鋼がなす固液界面の状態は重力方向にほぼ平行な位置(重力に対してなす角度 0°)から始まり、最終的には垂直な位置(90°)まで変化する。そこで、湾曲型連続鋳造機におけるL面側凝固シェルに捕捉される気泡についての基礎的な知見を得るため、濡れ性の悪い傾斜平板に沿って上昇する気泡の挙動についても検討した。

平成11年8月2日受付 平成11年9月29日受理 (Received on Aug. 2, 1999; Accepted on Sep. 29, 1999)

* 北海道大学大学院生(Graduate Student, Hokkaido University)

* 2 北海道大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Hokkaido University, North 13 West 8 Kita-ku Sapporo 060-8628)

2. 実験装置

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。アクリル樹脂製の正方形容器（一辺 0.260 m、高さ 0.600 m）に水を満たした。水深は 0.500 m である。気泡が平板に衝突するまでに終末速度に達するように、水深約 0.100 m の位置に平板（0.250×0.180 m）を設置した。平板の角度 θ_p は水平方向を基準に 0 から 80 度まで変化させた。装置の底部に設置したシリンジを用いて、逆さにした半球状の容器（内径 4.1×10^{-3} m）に一定体積の空気を送り込み、この容器を半回転させることで単一気泡を生成した。所定の量の気泡をこの

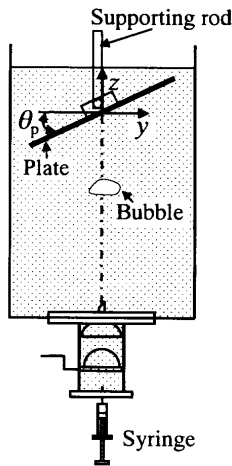


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

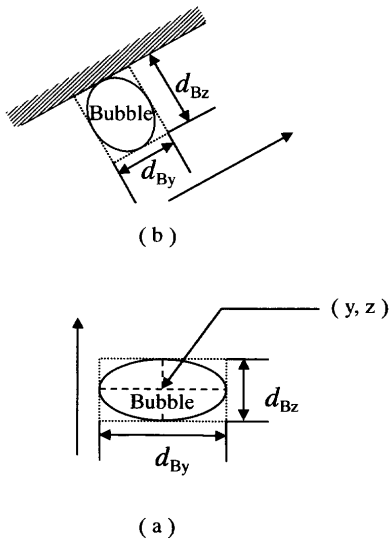


Fig. 2. Definitions of bubble diameter and position. (a) A rising bubble toward a flat plate; (b) A rising bubble along a flat plate or a sessile bubble beneath it.

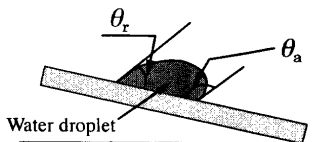


Fig. 3. Schematic of the inclined plate setup for contact angle measurement.

容器に捕集することにより上昇する気泡の体積を任意に変えることが可能である。

気泡の挙動は、容器側面より高速ビデオカメラを用いて撮影した。本論文で示した画像は、VHS テープに記録した後パソコンに取り込まれた動的画像を拡大出力しているためやや不鮮明になっているが、実際の測定上問題はない。画像は 200 frames/s で記録し、気泡径および座標は Fig. 2 のように定義した。平板に向かって上昇中の気泡に対しては、高速ビデオカメラの画像から、気泡の水平方向径 d_{By} 、垂直方向径 d_{Bz} および中心座標 (y, z) をそれぞれ測定した (Fig. 2(a))。また、上昇中の気泡径を代表気泡径 d_B とし、

$$d_B = (d_{By} \cdot d_{Bz})^{0.5} \dots \dots \dots (1)$$

で定義した。注入した空気の等価体積気泡直径と代表気泡径 d_B の偏差は、最大 20% であった。実験は、代表気泡径 d_B を 1×10^{-3} から 15×10^{-3} m の間で変化させて行った。気泡の中心座標 (y, z) の時間的変化から気泡の終末速度 $\bar{u}_{B,\infty}$ を算出した。平板上の気泡については、便宜上、平板を基準にして気泡径 d_{By} 、 d_{Bz} を測定した (Fig. 2(b))。

平板の濡れ性は、傾斜平板法 (Fig. 3) による前進接触角 θ_a で評価した。傾斜平板法では、前進接触角と後退接触角を同時に測定できる¹⁴⁻¹⁶⁾。所定の大きさの水滴を平板上へのせ、平板を順次傾けていく。その時の液滴の形状を写真撮影して接触角の変化を測定する。平板上を滑り出したときの接触角から前進接触角 θ_a および後退接触角 θ_r を求めた。これらの接触角は、平板表面における気相-液相-固相間の表面張力の関係以外に平板表面の粗さによる影響を含んでいる。

濡れ性の悪い平板としては、パラフィン塗布したアクリル板を用いた。比較のため、濡れ性の良い黄銅板でも同様に実験を行った。パラフィン塗布したアクリル板の前進接触角 θ_a は 104° 、後退接触角 θ_r は 50° 、黄銅板の前進接触角 θ_a は 80° 、後退接触角 θ_r は 17° である。以下の議論では、パラフィン塗布したアクリル板を濡れ性の悪い平板、黄銅板を濡れ性の良い平板と称する。

3. 実験結果と考察

3.1 気泡の付着形態

Fig. 4 は平板の傾斜角度 θ_p が 0、すなわち平板が水平に置かれたときの静止気泡の形態を示している。濡れ性の良い平板では気泡が平板に直接接触しておらず (Fig. 4(a)~(c))、また気泡が小さいときはほぼ球状である。気泡が平板に接していないことは、平板を傾けるとすぐに気泡が動き出すことから推測される。ただし、気泡が平板に接しないのは濡れ性が良い場合でも平板表面が非常に滑らかである場合に限り、表面が粗い場合には平板と気泡は直接接触する場合が観察された。気泡が大きくなると気泡の

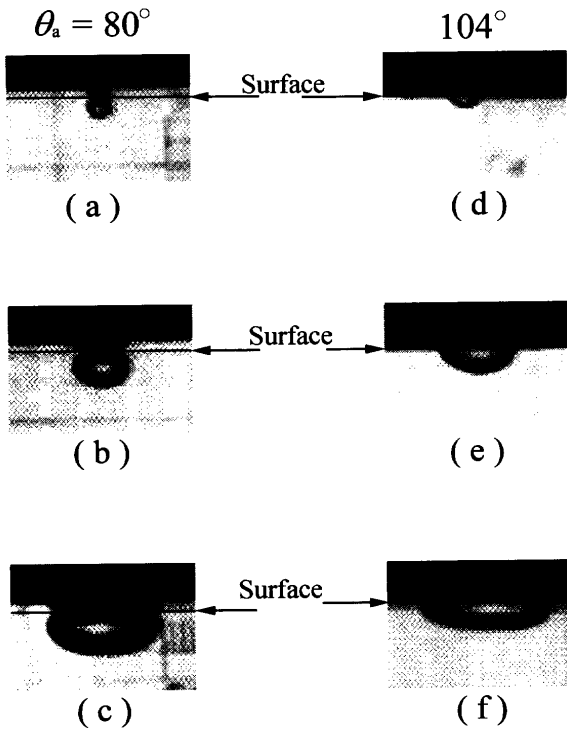


Fig. 4. Sessile bubble beneath horizontal plates of different wettability.

表面張力に対し水圧の影響が大きくなり、Fig. 4(c)に示すように気泡は横に引き伸ばされた形状になる。一方、濡れ性の悪い平板では、気泡が平板に直接付着している現象が観察された (Fig. 4(d)~(f))。濡れ性が良い平板の場合と同様に気泡が大きくなると横方向に引き伸ばされる。

静止気泡は、気泡自身のエネルギーが最小となるような形状で安定すると考えられる。気泡のエネルギーは、重力ポテンシャルエネルギーと表面エネルギーの和で表わされる。濡れ性の良い場合は、気泡と平板が直接接触していないことから気泡のエネルギーは、

$$E = (\rho_L - \rho_g)V_B g h_G + S\gamma_{Lg} \dots \dots \dots (2)$$

で表わされる。ここで ρ_L は水の密度、 ρ_g は気体の密度、 V_B は気泡の体積、 g は重力加速度、 h_G は平板表面から測った気泡の重心高さ、 S は気-液接触面積、 γ_{Lg} は気-液間の界面エネルギーである。

同様に、濡れ性の悪い場合は気泡と平板の接触面を考慮すれば、気泡のエネルギーは、

$$E = (\rho_L - \rho_g)V_B g h_G + S\gamma_{Lg} + rA(\gamma_{Sg} - \gamma_{SL}) \dots \dots \dots (3)$$

で表わされる。 A は平板が完全に滑らかであるときの気泡-平板間の接触面積、 r は粗さのパラメータであり、 rA で実際の接触面積を表す。また γ_{Sg} は固-気間の界面エネルギー、 γ_{SL} は固-液間の界面エネルギーである。

ところで前進接触角 θ_a と γ_{Sg} 、 γ_{SL} の間には

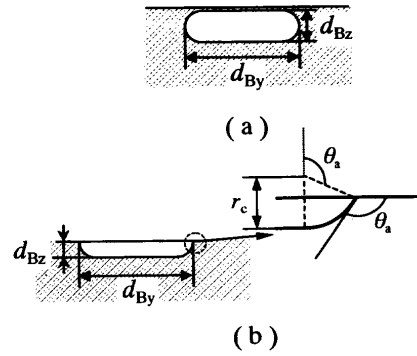


Fig. 5. Bubble profile beneath a horizontal plate. (a) $0^\circ < \theta_a < 90^\circ$; (b) $90^\circ \leq \theta_a < 180^\circ$

$$r(\gamma_{Sg} - \gamma_{SL}) = \gamma_{Lg} \cos \theta_a \dots \dots \dots (4)$$

の関係が成立することが知られている。これは、ヤングの接触角を修正したウエンゼルの接触角である¹⁷⁾。ウエンゼルの、細かい凸凹の面積を入れた実際の面積が見かけの面積よりも大きくなることを用い、見かけの接触角が式(4)で表わされることを示している。式(3)、(4)から付着気泡のエネルギーは次式となる。

$$E = (\rho_L - \rho_g)V_B g h_G + S\gamma_{Lg} + A\gamma_{Lg} \cos \theta_a \dots \dots \dots (5)$$

静止気泡の形状は Fig. 5(a), (b) のように仮定した。濡れ性の良い平板では、Fig. 5(a) のような半径 $0.5d_{By}$ とする半円の縁を持つ円盤状のモデル¹⁸⁾を適用し、濡れ性の悪い平板では、Fig. 5(b) で定義する曲率半径 r_c をもつモデル¹⁹⁾を適用した。それぞれのモデルにおける気-液接触面積 S 、固-液接触面積 A および体積 V_B は、次式で示される。

$$S = \begin{cases} \left. \begin{aligned} & \frac{\pi}{2}(d_{By} - d_{Bz})^2 + \pi^2 d_{Bz} \left(\frac{d_{Bz} + d_{By} - d_{Bz}}{\pi} + \frac{d_{By} - d_{Bz}}{2} \right) \\ & \dots \dots \dots \left(\theta_a < \frac{\pi}{2} \text{ の場合} \right) \end{aligned} \right\} \\ \left. \begin{aligned} & 2\pi r_c \left\{ \frac{1}{2}(d_{By} - 2r_c \sin \theta_a)(\pi - \theta_a) + r_c(1 + \cos \theta_a) \right\} \\ & + \frac{\pi}{4}(d_{By} - 2r_c \sin \theta_a)^2 \dots \dots \dots \left(\theta_a \geq \frac{\pi}{2} \text{ の場合} \right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

$$A = \begin{cases} \left. \begin{aligned} & 0 \dots \dots \dots \left(\theta_a < \frac{\pi}{2} \text{ の場合} \right) \\ & \frac{\pi}{4} d_{By}^2 \dots \dots \dots \left(\theta_a \geq \frac{\pi}{2} \text{ の場合} \right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

$$V_B = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi(d_{By}-d_{Bz})^2 d_{Bz}}{4} + \frac{\pi^2 d_{Bz}^2}{4} \left(\frac{2d_{Bz}}{3\pi} + \frac{d_{By}-d_{Bz}}{2} \right) \\ \dots \left(\theta_a < \frac{\pi}{2} \text{ の場合} \right) \\ \frac{\pi}{4} \left[\begin{array}{l} \{(d_{By}-2r_c \sin \theta_a)^2 + 4r_c^2\} r_c (1 + \cos \theta_a) \\ -\frac{4}{3} r_c^3 (1 + \cos^3 \theta_a) + \{2(\pi - \theta_a) + \sin 2\theta_a\} r_c^2 d_{By} \\ -2\{2(\pi - \theta_a) + \sin 2\theta_a\} r_c^3 \sin \theta_a \end{array} \right] \\ \dots \left(\theta_a \geq \frac{\pi}{2} \text{ の場合} \right) \end{array} \right. \quad (8)$$

ここで、気泡のアスペクト比 R を

$$R = d_{By}/d_{Bz} \quad (9)$$

と定義すると、式(6)~(8)は次式で表わされる。

$$S = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi}{2} d_{Bz}^2 \{R^2 + (\pi - 2)R + 3 - \pi\} \dots \left(\theta_a < \frac{\pi}{2} \text{ の場合} \right) \\ \frac{\pi}{4} d_{Bz}^2 \left[\begin{array}{l} R^2 + \frac{4}{1 + \cos \theta_a} (\pi - \theta_a - \sin \theta_a) R \\ -\frac{4 \sin \theta_a}{(1 + \cos \theta_a)^2} \{2(\pi - \theta_a) - \sin \theta_a\} + \frac{8}{1 + \cos \theta_a} \end{array} \right] \\ \dots \left(\theta_a \geq \frac{\pi}{2} \text{ の場合} \right) \end{array} \right. \quad (10)$$

$$A = \left\{ \begin{array}{l} 0 \quad \dots \left(\theta_a < \frac{\pi}{2} \text{ の場合} \right) \\ \frac{\pi}{4} d_{Bz}^2 R^2 \dots \left(\theta_a \geq \frac{\pi}{2} \text{ の場合} \right) \end{array} \right. \quad (11)$$

$$V_B = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi}{4} d_{Bz}^3 \left\{ R^2 + \left(\frac{\pi}{2} - 2 \right) R + \frac{5}{3} - \frac{\pi}{2} \right\} \\ \dots \left(\theta_a < \frac{\pi}{2} \text{ の場合} \right) \\ \frac{\pi}{4} d_{Bz}^3 \left[\begin{array}{l} R^2 + \left\{ \frac{2(\pi - \theta_a) + \sin 2\theta_a}{(1 + \cos \theta_a)^2} - \frac{4 \sin \theta_a}{1 + \cos \theta_a} \right\} \\ R + \frac{4(1 + \sin^2 \theta_a)}{(1 + \cos \theta_a)^2} - \frac{4(1 - \cos \theta_a + \cos^2 \theta_a)}{3(1 + \cos \theta_a)^2} \\ - \frac{2 \sin \theta_a \{2(\pi - \theta_a) + \sin 2\theta_a\}}{(1 + \cos \theta_a)^3} \end{array} \right] \\ \dots \left(\theta_a \geq \frac{\pi}{2} \text{ の場合} \right) \end{array} \right. \quad (12)$$

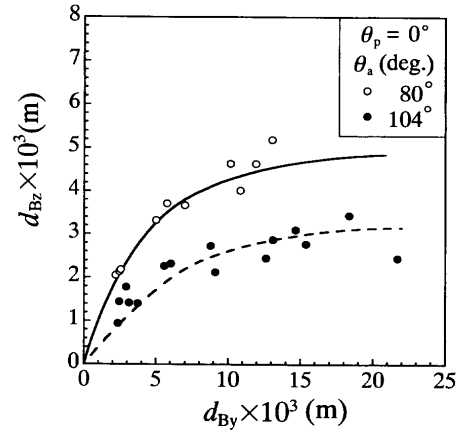


Fig. 6. Horizontal and vertical dimensions of a bubble beneath horizontal plates of different wettability.

次に、気泡体積 V_B を仮定し、気泡のエネルギー E が最も小さくなるような R を求める。式(12)から d_{Bz} は V_B と R の関数となる。ここで導かれた d_{Bz} を式(10), (11)に代入すると、気泡の気-液接触面積 S および固-液接触面積 A も V_B と R の関数で記述できる。したがって、気泡体積 V_B が一定であるとき、気泡のエネルギー E はアスペクト比 R の関数となる。そこで、仮定した各気泡体積 V_B それぞれについて、気泡のエネルギー E が最小となる R を繰り返し計算より求めた。 R は 0.001 刻みで変化させた。水の表面張力 γ_{Lg} は 72.75 mN/m、水の密度 ρ_L は 998.2 kg/m³、空気の密度 ρ_g は 1.20 kg/m³ である。計算結果は、実測値とともに Fig. 6 に示されている。濡れ性の良い平板および悪い平板のいずれも、仮定したモデルと実測値は良く一致しており、本モデルで静止気泡の形状を精度良く近似できると考えられる。

3・2 平板に衝突する気泡の挙動

傾斜角 $\theta_p = 40^\circ$ の平板と衝突した後の代表的な気泡形状を Fig. 7 に示す。濡れ性の良い平板では、気泡が小さいときは、ほぼ球状を保ったまま平板に沿って上昇していくが (Fig. 7(a))、気泡が大きくなると徐々に扁平な形状へと変化していく (Fig. 7(b), (c))。濡れ性の悪い平板では、平板の角度 θ_p が 40° と小さい場合には、気泡が平板に付着する現象が観察された (Fig. 7(d), (e))。ただし、Fig. 7(e) では、付着した気泡は浮力によりそのまま平板に沿って上昇した。Fig. 7(f) に示すように気泡が大きい場合、あるいは平板の角度が大きい場合は、気泡の平板への付着は観察されず、気泡は濡れ性の良い場合と同様に Fig. 7(a)~(c) のような形状で平板に沿って上昇していた。

濡れ性の悪い平板に衝突する気泡の挙動は、気泡の大きさ d_b および平板の角度 θ_p により Fig. 8 のようにまとめられる。すなわち、(1) 平板に衝突した気泡がいったん跳ね返り平板から離れるようなリバウンドをした後に平板に付着し停止する場合、(2) 平板上でリバウンドせずに付着し停止する場合、(3) 平板に付着した後浮力によりそのまま平

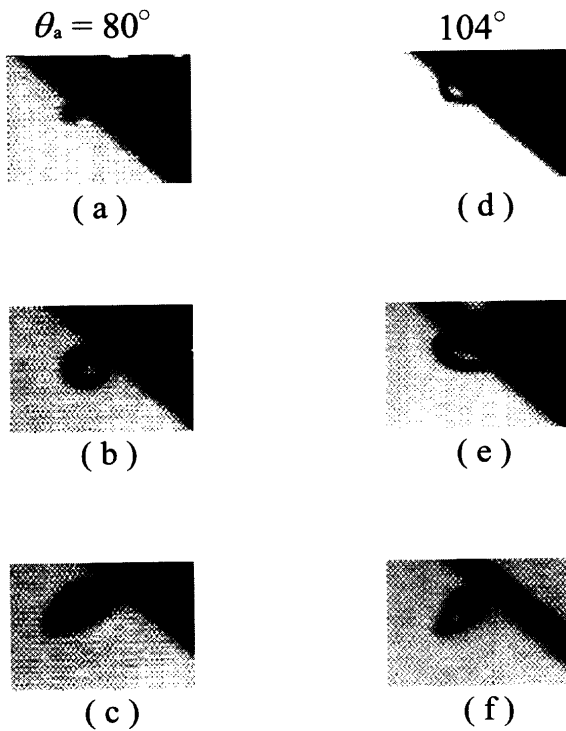


Fig. 7. Shape of bubbles rising along a inclined plate ($\theta_p = 40^\circ$). (a) $d_B = 1.6 \times 10^{-3}$ m; (b) $d_B = 3.96 \times 10^{-3}$ m; (c) $d_B = 7.76 \times 10^{-3}$ m; (d) $d_B = 2.16 \times 10^{-3}$ m; (e) $d_B = 4.46 \times 10^{-3}$ m; (f) $d_B = 8.16 \times 10^{-3}$ m.

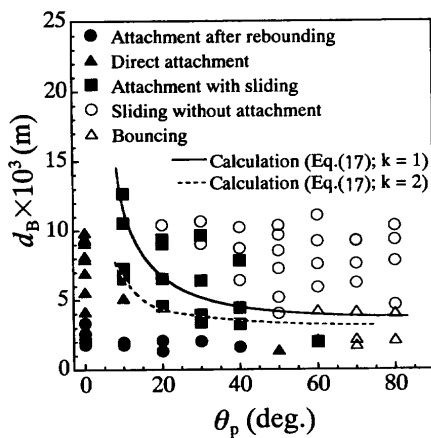


Fig. 8. Behavior of an impacting bubble to a poor wettability plate.

板上をすべりながら上昇する場合、(4)平板に直接付着せずに平板近傍を上昇する場合、(5)平板上を跳ねながら上昇する場合である。平板の角度 θ_p が 60° においても気泡が平板に付着する現象が観察された。

濡れ性の良い水平な平板に衝突する気泡のリバウンドは、ウェーバー数 We が 0.3 以上で起こることが報告されている⁹⁾。本研究においても濡れ性の悪い平板において、 2×10^{-3} m前後の気泡でリバウンドが観察され、例えば Fig. 9(a)の気泡ではウェーバー数は 2.0 であった。しかし、それより大きい気泡では、振動もしくはつぶれた形状となり、リバウンドする現象は観察されなかった(Fig. 9(b))。この

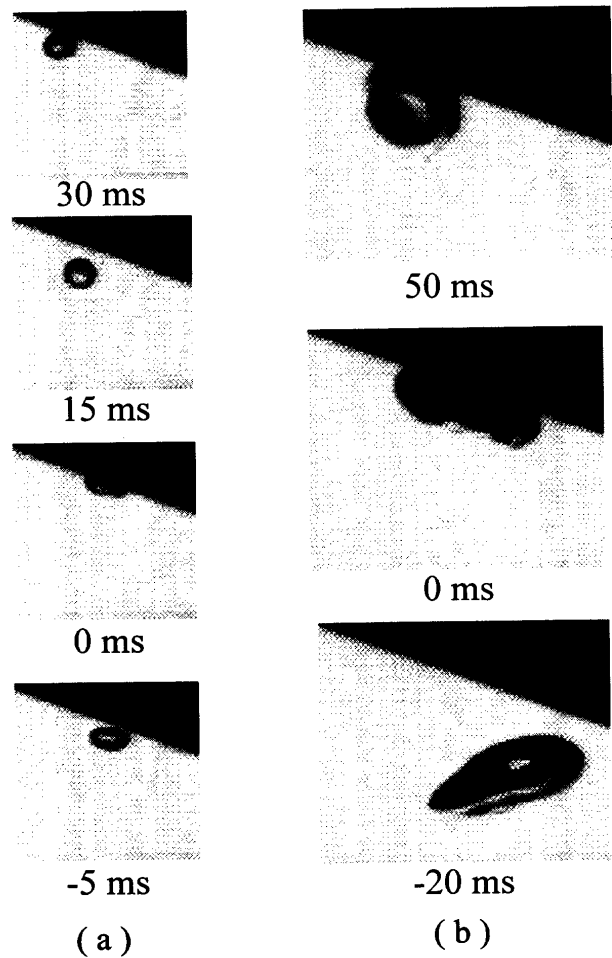


Fig. 9. Impact sequence of a bubble to a flat plate coated with paraffin wax. (a) $d_B = 2.66 \times 10^{-3}$ m, $u_B = 0.238$ m/s; (b) $d_B = 5.76 \times 10^{-3}$ m, $u_B = 0.22$ m/s.

ようなリバウンド現象は、気泡の界面エネルギー、重力ポテンシャルエネルギーおよび気泡に随伴する流体の運動エネルギーとのエネルギー交換の結果起こる。気泡が平板に衝突する際、気泡が随伴してきた流体が先に平板に衝突するため、気泡と平板の間の液膜内の圧力は大きくなる。気泡の大きさが 2×10^{-3} m前後では、液膜内の圧力および変形した気泡の復元力が気泡の浮力に対して大きいため、リバウンドが起こる。気泡が平板上でリバウンドする現象は、濡れ性の良い平板も悪い平板も同様の条件で観察された。したがって、衝突時は気泡と壁が直接接触せず、気泡と平板の間に常に薄い液膜が存在し、平板表面の濡れの影響を受けていないことを示している。

平板の角度 θ_p および気泡径 d_B が大きくなると、濡れ性の悪い平板に付着した気泡は、そのまま浮力によりすべりながら上昇する現象が観察される。Fig. 8中の実線と破線は、後述する付着した気泡が上昇する場合と静止する場合の境界であり、平板に付着した気泡の静止条件を示している。

以下、これらの境界の求め方について述べる。平板に付着している気泡がすべりながら上昇し始めるとき、気泡の

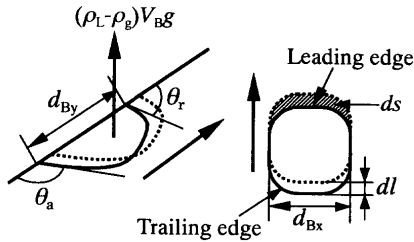


Fig. 10. Profile of a bubble sliding on a poor wettability plate.

形状を Fig.10 のように仮定する。気泡の前縁部において、斜線部分の見かけの面積要素 ds の固相-液相界面を固相-気相界面に置き換えるのに必要な仕事は、式(4)の粗さパラメータ r を用いると

$$W_A = -\gamma_{Lg} \{1 - (\cos \theta_r)/r\} r ds \dots \dots \dots (13)$$

である。ただし、 $\theta_r \geq 90^\circ$ ではこの仕事は無視される。同様に後縁部においては、 ds の固相-気相界面を固相-液相界面に置き換えるのに必要な仕事は、

$$W_T = \gamma_{Lg} \{1 - (\cos \theta_a)/r\} r ds \dots \dots \dots (14)$$

である。したがって、Fig.10 のような気泡が平板に沿って上昇するのに要する仕事は、式(13)、(14)から

$$W = W_A + W_T = \gamma_{Lg} (\cos \theta_r - \cos \theta_a) ds \dots \dots \dots (15)$$

となる。また、気泡が浮力により見かけ上 dl 進んだときになされた仕事は、

$$W = k(\rho_L - \rho_g)V_B g(\sin \theta_p) dl \dots \dots \dots (16)$$

である。 k は平板の粗さによる効果を表わしており、粗さパラメータ r の関数である。平板表面が滑らかなとき $k=1$ である。ここで、 $ds \cong d_{Bx} dl$ とすると、式(15)と(16)を等しくおくことで

$$k(\rho_L - \rho_g)V_B g(\sin \theta_p) = \gamma_{Lg} (\cos \theta_r - \cos \theta_a) d_{Bx} \dots \dots \dots (17)$$

の力のバランスが成立する。これは、 $k=1$ 、すなわち滑らかな平面の場合、液滴の平板上での釣り合いの式と一致する^{15,20-22)}。式(17)において、気泡体積 V_B が一定であると仮定すると未知数は θ_p 、 k 、 d_{Bx} である。ここで、付着気泡が動き出す直前を考え、簡単のため $d_{Bx} = d_{By}$ とおく。付着気泡の d_{By} は式(5)に基づきエネルギー最小原理を適用することで、気泡体積 V_B から決定される。したがって式(17)では V_B に対し未知数は θ_p 、 k となる。本実験条件下では、気泡が大きくなると V_B と d_B の間に従来のような気泡を球形とする近似が成立しないため、式(1)で定義される上昇中の代表気泡径 d_B とそのときの気泡体積 V_B との関係をあらかじめ実験式として求めておく必要がある。実験式は次式で表される。

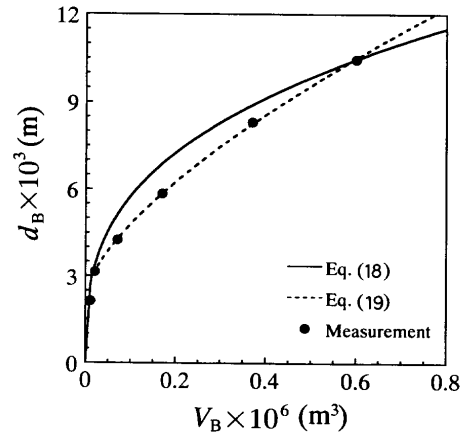


Fig. 11. Relationship between bubble volume V_B and bubble diameter d_B .

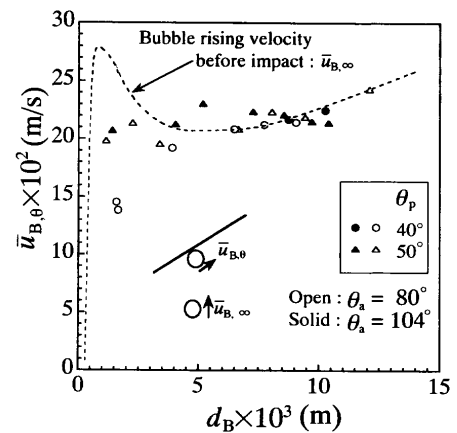


Fig. 12. Bubble rising velocity along an inclined plate.

$$d_B = \begin{cases} \left(\frac{6V_B}{\pi} \right)^{1/3} \dots \dots \dots (V_B \leq 1.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ の場合}) \dots \dots (18) \\ 115V_B^{2/3} + 2.32 \times 10^{-3} \dots \dots (V_B > 1.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ の場合}) \dots \dots \dots (19) \end{cases}$$

Fig.11 に d_B と V_B の測定値および式(18)、(19)による計算値を示す。測定値と実験式はよく一致しており、仮定した気泡体積 V_B から代表気泡径 d_B が求められる。したがって k が既知であれば、式(5)に基づくエネルギー最小原理および式(17)、(18)、(19)より代表気泡径 d_B に対して θ_p が求まる。Fig. 8 中の実線は、 $k=1$ としたときの計算結果である。濡れ性の悪い平板の粗さは不均一であるため、粗さの正確な評価はできなかった。そこで、 k が実測値と最も良く一致する値を求めた。その値は $k=2$ であり、Fig. 8 中の破線で示されている。

Fig.12 に気泡が平板に付着しない場合、平板に沿って上昇している気泡の速度 $\bar{u}_{B,\theta}$ を示したが、濡れ性の良い平板と悪い平板の間で顕著な差は見られない。代表気泡径が $4 \times 10^{-3} \text{ m}$ 以下では、 $\bar{u}_{B,\theta}$ は衝突前気泡の終末速度 $\bar{u}_{B,\infty}$ より小さな値を示しているが、気泡が大きくなると $\bar{u}_{B,\theta}$ は $\bar{u}_{B,\infty}$

とほぼ等しくなる。これは、気泡形状の変化により、気泡に働く抵抗が減少することを示しており、Maxworthyの報告⁵⁾と一致する。

4. 結論

熔融金属中の気泡が固相に衝突し付着するプロセスおよび気泡の付着形状について、水モデル実験により検討した。本研究で得られた主な結果を以下に示す。

(1) 濡れ性の悪い平板に付着する気泡の形状は、エネルギー最小の原理を用い、モデル化した気泡形状および前進接触角から精度良く予測することができた。

(2) パラフィンを塗布したアクリル板では、平板の角度が最大60°まで気泡が付着する現象が観察された。付着した気泡の静止条件は、接触角の前進接触角 θ_a 、後退接触角 θ_r および粗さの補正係数 k を含む釣り合い式(17)から決定できることが明らかとなった。

(3) 気泡が付着しないで平板に沿って上昇する場合の気泡上昇速度は、濡れ性の良い平板と悪い平板で顕著な差は見られなかった。

文 献

- 1) N.Shinozaki, N.Echida, K.Mukai, Y.Takahashi and Y.Tanaka: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 748.
- 2) N.Sonoyama and M.Iguchi: *ISIJ Int.*, **39** (1999), 673.
- 3) H.Takahira, S.Fujikawa and T.Akamatsu: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. B*, **55** (1989), 2720.
- 4) P.J.Shopov, P.D.Minev, I.B.Bazhlevkov and Z.D.Zapryanov: *J. Fluid Mech.*, **219** (1990), 241.
- 5) T.Maxworthy: *J. Fluid Mech.*, **229** (1991), 659.
- 6) H.Tsao and D.L.Koch: *Phys. Fluids*, **9** (1997), 44.
- 7) Q.X.Wang: *Theor. Comput. Fluid Dynamics*, **12** (1998), 29.
- 8) Z.Tao, K.Mukai and T.Takahashi: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 208.
- 9) G.Abbel, W.Damen, G.de Gendt and W.Tiekink: *ISIJ Int.*, **36** (1996), S219.
- 10) N.Kasai, Y.Watanabe, T.Kajiwara and M.Toyoda: *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 24.
- 11) M.Iguchi, T.Chihara, N.Tkanashi, Y.Ogawa, N.Tokumitsu and Z.Morita: *ISIJ Int.*, **35** (1995), 1354.
- 12) M.Iguchi, T.Nakatani and H.Ueda: *Metall. Trans. B*, **28B** (1997), 87.
- 13) W.Zhe, K.Mukai and K.Matuoka: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 68.
- 14) G.MacDougall and C.Ockrent: *Proc. R. Soc. (London) A*, **180A** (1942), 151.
- 15) M.Shoji and X.Y.Zhang: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. B*, **58** (1992), 1853.
- 16) J.Fukai, Y.Shiiba, T.Yamamoto, O.Miyatake, D.Poulikakos, C.M.Megaridis and Z.Zhao: *Phys. Fluids*, **7** (1995), 236.
- 17) R.N.Wenzel: *Ind. Eng. Chem.*, **28** (1936), 988.
- 18) M.Fujita and H.Madarama: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. B*, **49** (1983), 1676.
- 19) K.Murakami, T.Sunada and N.Ueki: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. B*, **64** (1998), 2071.
- 20) K.Kawasaki: *J. Colloid Sci.*, **15** (1960), 402.
- 21) C.G.L.Furmidge: *J. Colloid Sci.*, **17** (1962), 309.
- 22) B.K.Larkin: *J. Colloid Interface Sci.*, **23** (1967), 305.

1) N.Shinozaki, N.Echida, K.Mukai, Y.Takahashi and Y.Tanaka: *Tetsu-*