

二つの水-空気系気泡噴流の干渉

佐々木 清人*・井口 学*²

Interaction between Two Water-Air Bubbling Jets

Kiyoto SASAKI and Manabu IGUCHI

1. 緒言

鉄鋼精錬の分野では、浴槽内の攪拌を強化するために複数のノズルからのガス吹込み操作が行われている。しかし、ノズル間距離が近いと複数の気泡噴流がコアンダ効果¹⁻⁴⁾によって合体し、浴槽内の流動状態が単一ノズルの場合とほぼ等しくなってしまうという報告^{5,6)}もあり、干渉する複数の気泡噴流の挙動を明らかにすることは重要である。二つの気泡噴流の干渉に関して行われた実験はJooら⁷⁾、小沢ら⁸⁾の報告にも見られるが、いずれもコアンダ効果が起きて噴流が合体する条件については言及していない。本研究でも、まず二つの気泡噴流に着目し、どのような条件下で合体するのかを、水モデル実験を行って明らかにした。

2. 実験装置および方法

実験装置の概要は、前報⁹⁾を参照いただきたい。容器直径 D が0.400 m、高さ H が1.200 mの透明アクリル製円筒容器に、浴深 H_L が0.350 m、0.500 m、0.650 mとなるように水を満たした。用いたランスノズルは2本であり、各々のノズル内径 d_n は0.0013 m、0.0020 m、0.0038 mと変化させた。ノズルは黄銅製であり、水との濡れ性はよい。ノズルの水平間距離 L_H は0.020~0.100 mの範囲で0.020 mごとに変化させた。また、二つのノズル先端の高さは等しくなるようにしている。浴底からの距離 H_{nb} は気泡特性にほとんど影響を及ぼさないので、実験の容易な0.050 mに設定した。

前報の結果⁹⁾によれば、二つの気泡噴流の合体距離 H_c は約 $6.2L_H$ となることが知られているが、本実験におけるノズルから浴表面までの距離 $(H_L - H_{nb})$ は容器直径 D の0.75倍から1.5倍の範囲にあり、 H_c の約0.5倍から約3倍となっている。この条件下では気泡噴流の旋回は生じない。

二つのノズルから吹き込むガス流量 Q_{g1} と Q_{g2} は

$0.500 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ の範囲で変化させ、以前の研究⁹⁾を参考に、ガスを吹き込んでから浴内が十分定常状態に達したことを確認した上で、二つの気泡噴流の挙動を目視により観察した。気泡噴流の干渉パターンをFig. 1に示すように4種類に分類した。

- 二つの気泡噴流が全く干渉しないで、まっすぐ上昇してゆく(非干渉型)。
- 二つの気泡噴流がお互いに干渉しあって近寄るが、合体するまでには至らない(接近型)。
- 二つの気泡噴流が合体したり離れたりする挙動を繰り返す(離着型)。
- 二つの気泡噴流が合体する(合体型)。

ガス流量 Q_{g1} と Q_{g2} が異なる条件下において、上記4種類の

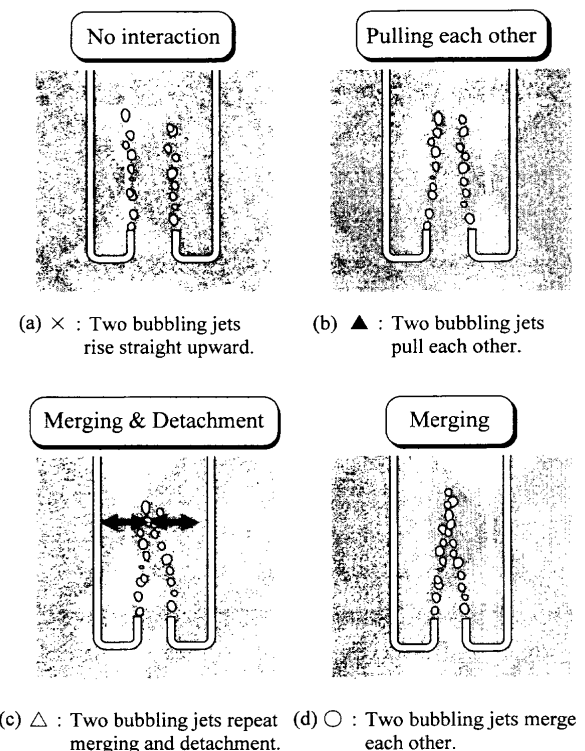


Fig. 1. Interaction patterns of two bubbling jets.

平成14年1月7日受付 平成14年4月29日受理 (Received on Jan. 7, 2002; Accepted on Apr. 29, 2002)

* 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)

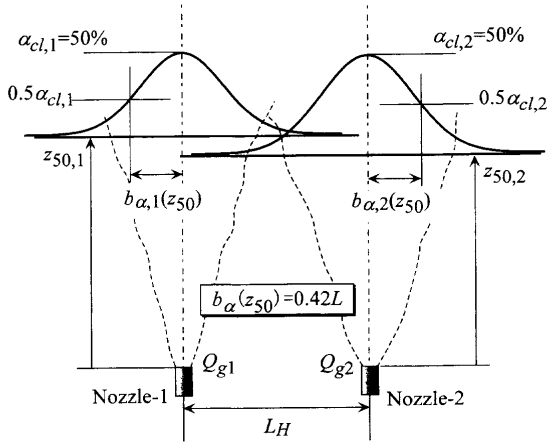


Fig. 2. Schematic of two bubbling jets.

干渉パターンが現れる領域を明らかにし、各々の境界を表す実験式を導いた。なお、非干渉型と接近型の境界は、それぞれの気泡噴流の各時間における中心線がノズルの真上からそれぞれ内側へ寄った距離の和が L_H の20%になったときと定義した。

3. 実験結果と考察

3.1 非干渉型と接近型の境界

Fig. 2に二つの気泡噴流の模式図を示す。気泡噴流はノズル出口から順次運動量支配領域、遷移領域、浮力領域、浴表面領域に分類される。ガスはノズル近傍の運動量支配領域で半径方向に急激に広がるが、浮力領域での広がり弱い。本実験の範囲では浴内全体がほぼ浮力領域となっているので、気泡噴流の合体には運動量支配領域外縁での気泡噴流の広がり幅が関与しているものと仮定する。気泡噴流のガスホールドアップ α が50%となるノズル軸上での位置 z_{50} における気泡噴流の半値幅 $b_\alpha(z_{50})$ は

$$b_\alpha(z_{50}) = 0.42(Q_g^2/g)^{1/5} \dots\dots\dots (1)$$

と表わされる¹⁰⁾。ここで、 g は重力加速度である。本論文では、ガス流量 Q_{g1} 、 Q_{g2} のときの気泡噴流の半値幅を参考にして求められる特性長さ L_1 、 L_2 に着目して、4種類の干渉パターンの境界線を導出する。

$$L_1 = (Q_{g1}^2/g)^{1/5} \dots\dots\dots (2)$$

$$L_2 = (Q_{g2}^2/g)^{1/5} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、添字1,2は左右のノズルでの値を表わしている。

Fig. 3に、特性長さ L_1 、 L_2 と浴深 H_L をノズルの水平間距離 L_H で無次元化して示す。二つの気泡噴流の非干渉型と接近型の境界は浴深 H_L にほとんど依存せず、図中に実線で示した式(4)によって、ほぼ $\pm 40\%$ の偏差で記述することができる。

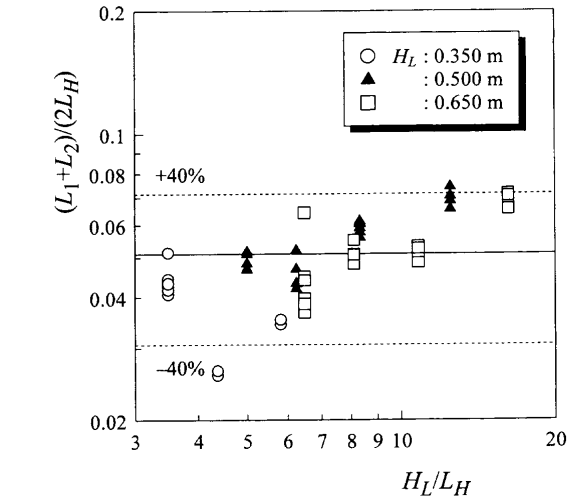


Fig. 3. Boundary between no interaction type and pulling each other type.

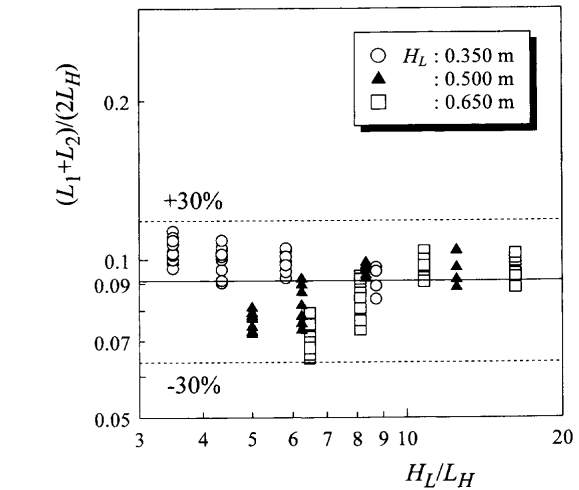


Fig. 4. Boundary between pulling each other type and merging & detachment type.

$$(L_1+L_2)/(2L_H) = 0.051 \dots\dots\dots (4)$$

3.2 接近型と離着型の境界

接近型と離着型の境界を Fig. 4に示す。この境界は実線で示した式(5)によって、 $\pm 30\%$ の偏差で記述することができる。

$$(L_1+L_2)/(2L_H) = 0.091 \dots\dots\dots (5)$$

3.3 離着型と合体型の境界

離着型と合体型の境界を求めた結果を Fig. 5に示す。この境界は、実線で示した式(6)によって $\pm 40\%$ の偏差で記述することができる。

$$(L_1+L_2)/(2L_H) = 0.140 \dots\dots\dots (6)$$

なお本実験条件下では、どの境界も浴深 H_L (厳密には $H_L - H_{nb}$) への依存性はほとんど見られなかった。

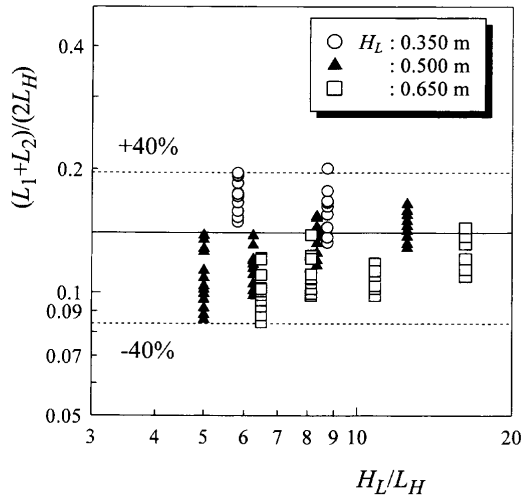


Fig. 5. Boundary between merging & detachment type and merging type.

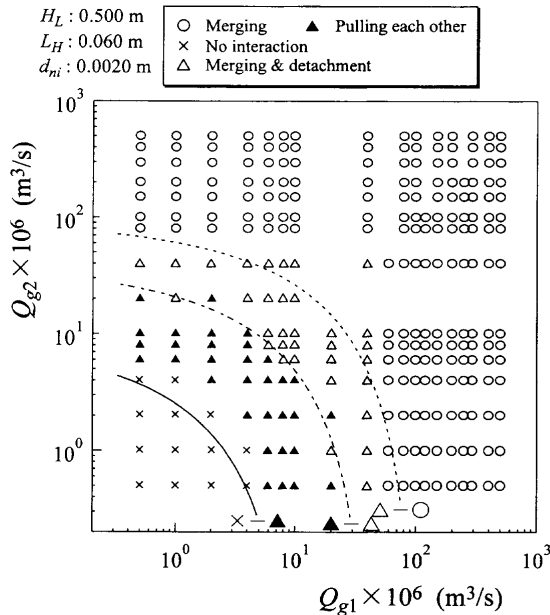


Fig. 6. Flow regime map for $H_L=0.500$ m, $L_H=0.060$ m and $d_{ni}=0.0020$ m.

3.4 二つの気泡噴流の干渉マップ

Fig. 6に代表例として浴深 $H_L=0.500$ m, ノズルの水平間距離 $L_H=0.060$ m, ノズル内径 $d_{ni}=0.0020$ mにおける干渉マップを示す。図中の実線, 一点鎖線, 破線はそれぞれ前項で求めた境界線, 式(4)~(6)を表わしているが, それぞれの境界を比較的よく近似している。ここには示していないが, 他のすべての条件下における各干渉パターンの境界も式(4)~(6)によって近似できた。ノズル内径の影響がないのは, $b_\alpha(z_{50})$ がノズル内径の影響を受けず, しかも本実験が浮力領域が浴内の大部分を占める条件下で行われ

たことによる。

3.5 実機への適用性

水と熔融金属は密度や表面張力が大きく異なる。しかし, 二つの気泡噴流の干渉パターンの境界線を求めるために, 本実験で着目した半値幅 $b_\alpha(z_{50})$ は, 水モデルの場合では式(1)で, 溶鋼の場合には

$$b_\alpha(z_{50})=0.26(\rho_L/\rho_g)^{0.07}(Q_g^2/g)^{1/5} \dots\dots\dots (7)$$

と表わされる¹¹⁾。式(7)に溶鋼の密度 ρ_L とアルゴンガスの密度 ρ_g を代入すると,

$$b_\alpha(z_{50})=0.46(Q_g^2/g)^{1/5} \dots\dots\dots (8)$$

となる。式(8)は式(1)よりも約10%大きいだけである。また, ここには示していないが, z_{50} の値も水モデルの場合とほとんど差がない。このことから, 本実験で行われた水モデル実験の結果は溶鋼中においても適用できると考えられる。ただし, 今回の実験では吹込みガスの温度の影響を考慮していないので, 実機においては気泡と溶鋼の熱伝達による補正を行う必要がある^{12,13)}。

4. 結言

二つの気泡噴流の干渉パターンについて水モデル実験を行い, 非干渉型, 接近型, 離着型, 合体型の4種類のタイプに分類した。それぞれのタイプの境界は式(4), (5), (6)で与えられる。また, 本水モデル実験の結果が溶鋼中で生成する気泡噴流の干渉パターンの予測に適用できる可能性を示した。

文 献

- 1) A.Shimizu: *Yuatsu-to-Kuukiatsu*, **14** (1983), 488.
- 2) E.Tanaka: *Bull. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **13** (1970), 272.
- 3) K.Murai, M.Taga and K.Akagawa: *Bull. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **19** (1976), 958.
- 4) H.Elbanna and S.Gahin: *AIAA J.*, **21** (1983), 986.
- 5) M.Iguchi, K.Takahashi and H.Kiuchi: *ISIJ Int.*, **39** (1999), 1311.
- 6) K.Sasaki and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 432.
- 7) S.Joo and R.I.L.Guthrie: *Metall. Trans. B*, **23B** (1992), 765.
- 8) Y.Ozawa, Y.Matsui, K.Mori and M.Sano: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), 1543.
- 9) M.Iguchi, T.Kondoh and K.Nakajima: *Metall. Mater. Trans. B*, **28B** (1997), 605.
- 10) M.Iguchi, H.Kawabata, T.Iwasaki, K.Nozaawa and Z.Morita: *Tetsu-to-Hagané*, **76** (1990), 840.
- 11) M.Iguchi, H.Kawabata, K.Nakajima and Z.Morita: *Metall. Mater. Trans. B*, **26B** (1995), 67.
- 12) M.Iguchi, H.Tokunaga, H.Tatemichi and Z.Morita: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 415.
- 13) H.Tokunaga, M.Iguchi and H.Tatemichi: *Metall. Mater. Trans. B*, **30B** (1999), 61.