

浴中ジェットの底叩き現象におよぼす 制御板の効果

伊藤 公久*・徳田 昌則*

Effect of Control Plate on the Knocking Phenomenon of Submerged Gas Jet

Kimihisa ITO and Masanori TOKUDA

Synopsis :

The injection nozzle with control plate was developed in order to stabilize the upward submerged gas jet. The gas hold-up of bath and the volumetric mass transfer coefficient for gas-liquid reaction were enhanced when the control plate was placed near the nozzle, because the injected jet was dispersed into small bubbles at the plate. The knocking frequency of jet decreased as the plate was approached toward the nozzle and became to zero at the critical distance from the nozzle ($L_{crit.}$). $L_{crit.}$ increased with increasing stagnant pressure of jet and slightly decreased with increasing nozzle Mach number. A good relationship was obtained between jet core length and $L_{crit.}$. The effect of control plate on the jet stability was observed in mercury bath as well as in water bath.

Key words : injection ; jet ; nozzle ; core ; control plate.

1. 緒 言

溶融金属中へのガス吹込みは、今や製鉄プロセスにおいて不可欠の技術である。その中でも底吹き技術は、多重管羽口の開発によって広く普及し、従来の上吹きにおける冶金特性の問題点、特に攪拌力や物質供給速度を飛躍的に向上させた。しかし、底吹き法の操業上の問題として、羽口近傍で吹込みガスが膨張し、炉底に衝撃を与えるいわゆる「底叩き」や、ガスが連続相となって浴外に放出される「底抜け」が挙げられている^{1)~6)}。その解決策として、扁平羽口⁷⁾や、螺旋型羽口⁸⁾が考案されているものの、その原理的な裏付けはなされていないのが現状である。底叩きは、浴中における気柱の非定常的な切断が原因であるとされており⁶⁾、吹込みジェットの安定性は、本質的には吹き込まれたガスと浴の液体との相互作用に支配されていると考えられる。筆者らは前報⁹⁾において、浴中ジェットのコア長さを測定し、コア領域は、気液の混合が生じない気相単相領域であることを確認した。このことから、吹き込まれたガスジェットが浴の液体との相互作用によって切断されるのはコア領域よりも下流であることが推察される。従って、コア領域に

おいてジェットの流れを強制的に変化させ、非定常的な切断以前に気液の混合を行うことができれば、切断に伴う底叩き現象の低減が期待できる。

本研究では、底吹きジェットの制御を目的としてノズル上方に制御板を設け、制御板の位置、大きさ、形状が、ジェットの形状および底叩き現象に及ぼす影響について、水モデルと水銀モデルを用いて調査し、考察を加えた。

2. 実験方法

ジェット形状と気泡微細化に及ぼす制御板の効果を調査するための実験として、直径 300 mm ϕ の円筒型アクリル容器の底部中央よりオリフィスを用いて水中へ空気を吹き込み、浴面高さの変化から、平均ガスホールドアップを測定した。大量のガスを吹き込まれた浴は、特に制御板のない場合大きく振動するため、ビデオ撮影した画像の浴面高さを 30 s にわたって平均したものから、ガスホールドアップを求めた。この方法により、制御板によって安定化した浴の場合、20%程度の誤差でガスホールドアップを測定することができた。また、同様の装置を用い、0.07 N の NaOH 水溶液中に CO₂ ガスを吹き

昭和 60 年 10 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 3 月 15 日受付 (Received Mar. 15, 1990)

* 東北大学選鉱製錬研究所 工博 (Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University, 2-1-1 Katahira Aoba-ku Sendai 980)

込み, 浴の pH 変化を連続測定することにより CO₂ 吸収速度を計算し, 気液反応の容量係数: ak を次の (1) 式より求めた.

$$-akt = \ln(C_e - C)/(C_e - C_0) \dots\dots\dots (1)^{10}$$

ここで, a は, 比界面積, k は物質移動係数, C_e, C_0, C は, おのおのの平衡, 初期, および時間 t の時の CO₂ 濃度である.

制御板の底叩き低減効果を調査する実験では, 前報⁹⁾と同様, 水モデルには 250 mm 角の, また水銀モデルには 100 mm 角の亚克力容器を用い, 容器底部中央に設けたノズル (直管型および先細末広型) より水または水銀浴中へ空気を吹き込んだ. 設計マッハ数 1.3, 1.5 の先細末広ノズルのスロート径は 3.0 mm, 出口径はそれぞれ 3.10, 3.25 mm であった. また, 制御板には, 底叩きの測定では長さ 50 mm の丸棒を, その他の測定では厚さ 2 mm の円盤を用いた. ノズルの構造に関しては, すでに前報⁹⁾で報告した. なお, 本論文の図中では, オリフィスは OR-[ノズル径 (mm)], 先細末広型ノズルは CD-[設計マッハ数] の形で表記する. なお, 設計マッハ数 (Mc) はノズルのスロート断面積 (A_0) と出口断面積 (A) の比と, 次の (2) 式によって関係付けられる. ここで x は, ガスの比熱比である.

$$A_0/A = 1/Mc(2/(x+1) + Mc^2(x-1)/(x-1)^{(x-1)/2(x+1)}) \dots\dots\dots (2)^{11}$$

実験方法は Fig. 1 に示すように, ノズル出口横に圧力センサーを設置し, 底叩きに対応する衝撃の頻度を測定した. 圧力センサーには, 固有振動数が 14 kHz と高い, ひずみゲージ式超小型圧力変換器 (許容圧力 0.5 MPa) を用いた. データは, AD コンバーターを用いて 1 ms の間隔で測定し, マイクロコンピューターで処理を行った. Fig. 2 に, 測定結果の一例を示すが, 図の場合, 底叩きによって, センサーに最大 400 kPa 程度

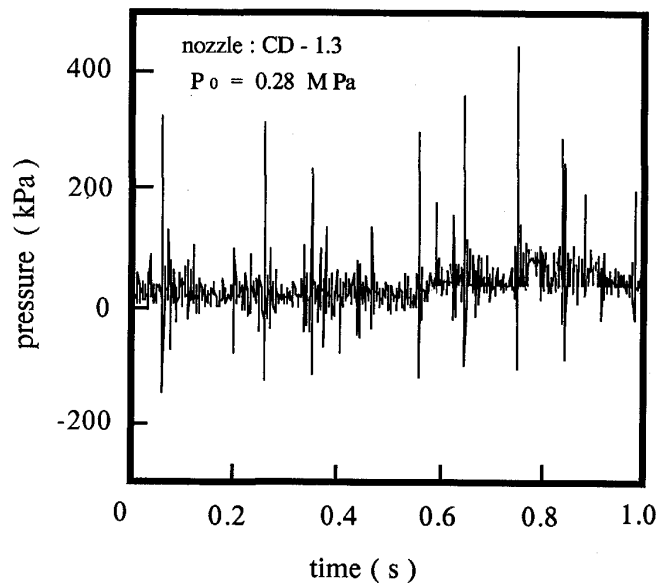


Fig. 2. Variation of pressure near the nozzle by the knocking phenomenon.

の圧力が加わっていることが分かる. さらに, ノズルの直上に制御板を配置し, それらの寸法, 形状, および位置によるジェットの状態変化を観察するとともに, 各因子の底叩き頻度に及ぼす影響を調べた.

3. 実験結果

3.1 気泡微細化の調査

通常底吹きジェットでは, 吹き込まれたガスはまず連続相である気柱を形成し, その後切断されて大気泡となり, 高速で上昇していく. この際, 激しい浴の揺動とスプラッシュが生じる. さらにノズル近傍では底叩きと呼ばれる小爆発が生じ, 破裂音と, ノズルおよび容器底部への衝撃が認められる. 一方, ノズル近傍に制御板を設置した場合には, ジェットは制御板によって直径 1~10 mm の気泡に転化し, ゆるやかに上昇していく. このため, 浴の上方には気泡層が形成され, 浴表面は静かでスプラッシュは全く生じない. また底叩きは消滅し, ジェットは安定化する.

Fig. 3 は, 水中に直径 2 mm のオリフィスを用いて空気を吹き込んだ際の, 浴の平均ガスホールドアップとガス流量の関係を示したものである. 制御板のない通常のジェットのガスホールドアップは高々 0.5% であるのに対して, 直径 10 mm の制御板を用いると, ガス流量の増加に伴い微細気泡が大量に発生して浴内を上昇し, 浴表面に滞留するためガスホールドアップは急激に増大する. 特に制御板をノズルから 5~8 mm の距離に設置した場合には 16% にまで達し, 底叩き現象は消滅した.

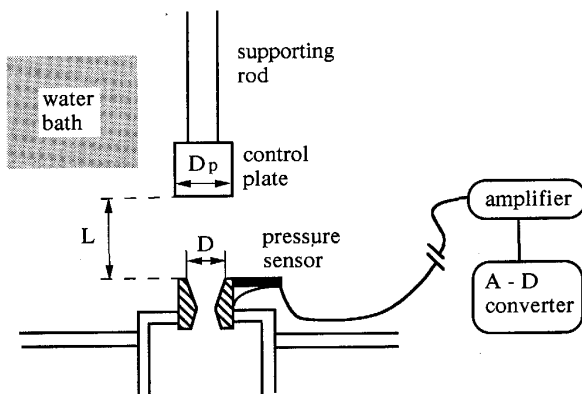


Fig. 1. Schematic drawings of experimental set-up.

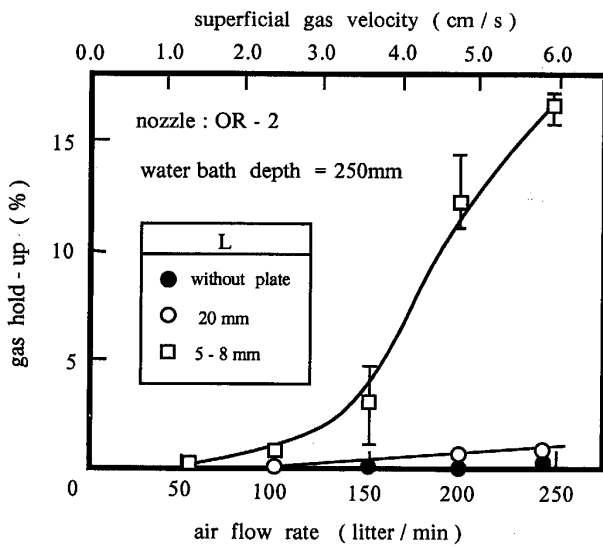


Fig. 3. Effect of control plate on the gas hold-up as a function of gas flow rate.

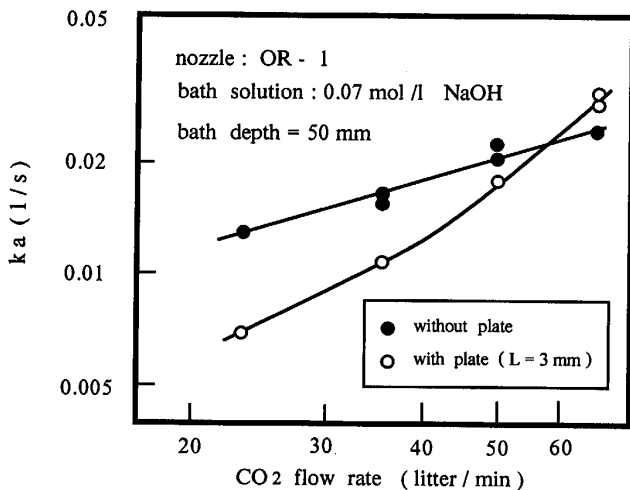


Fig. 4. Effect of control plate on the volumetric mass transfer coefficient as a function of gas flow rate.

しかし、ノズルから 20 mm 離れた位置では制御板の効果はなくなっている。

3.2 気泡微細化のガス吸収反応速度に対する効果

Fig. 4 は、直径 1 mm のオリフィスを用いて、NaOH 水溶液中に CO₂ を吹き込んだ場合の気液反応の容量係数を、ガス流量の関数として表したものである。これらの詳細な結果はすでに別報¹⁰⁾ に報告しており、底流量域では制御板のない方が、制御板を取り付けたものよりも大きな容量係数を示しているが、流量依存性は制御板を用いた場合の方が大きいことを指摘した。Fig. 4 の結果は、別報の結果よりもさらにガス流量の大きい領域を含んでおり、図に示すとおり、ガス流量を増大させる

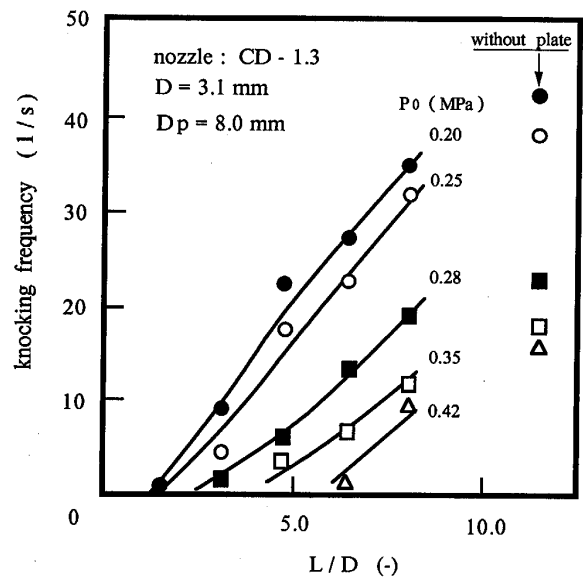


Fig. 5. Relation between the knocking frequency and the position of control plate under various stagnant pressures.

と両者の関係は逆転している。低流量域ではスプラッシュや浴の激しい揺動によって、制御板を用いない通常のジェットの方が気液界面積が大きく、大きな容量係数を示す。しかし、流量が増加すると、制御板を用いないジェットでは、未反応のガスが系外に散逸してゆく割合が増加するため、制御板を用いた場合の方が容量係数が大きくなる。なお、本実験においても、制御板のない場合には激しいスプラッシュと浴の揺動を伴ったが、制御板を用いることにより、いずれも完全に消滅した。

3.3 底叩き現象に及ぼす制御板の効果

Fig. 5 は、設計マッハ数 1.3 の先細末広ノズル（直径 3.1 mm）によって吹き込まれたジェットに、直径 8 mm の平板を制御板として用いた場合の、制御板のノズルからの距離と、よどみ点圧力の底叩き頻度に及ぼす影響を示したものである。よどみ点圧力は蓄気室に接続した圧力計の指示から与えられ、コンプレッサー出口のニードルバルブを調整することにより変化させた。底叩き頻度は、従来から報告されているように、よどみ点圧力の増加にともなって減少している¹⁵⁾。また制御板の位置をノズルに近付けるに従って、いずれのよどみ点圧力の場合も底叩きは減少し、ついには完全に消滅する。底叩きの消滅が起きる臨界位置は、よどみ点圧力が高いほどノズルから遠ざかる。

Fig. 6 は、設計マッハ数 1.5 のノズルについての結果である。設計マッハ数 1.3 の場合と同様の結果が得られたが、同じよどみ点圧力では、設計マッハ数 1.5 のノズルを用いた時の方が底叩き頻度は高くなってい

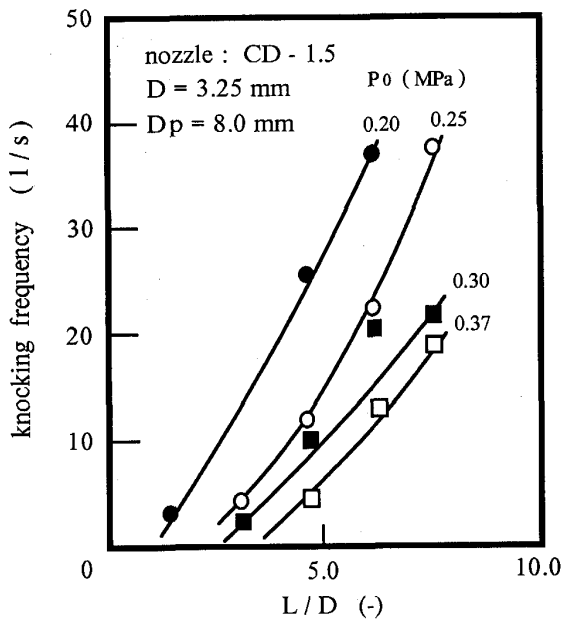


Fig. 6. Relation between the knocking frequency and the position of control plate under various stagnant pressures.

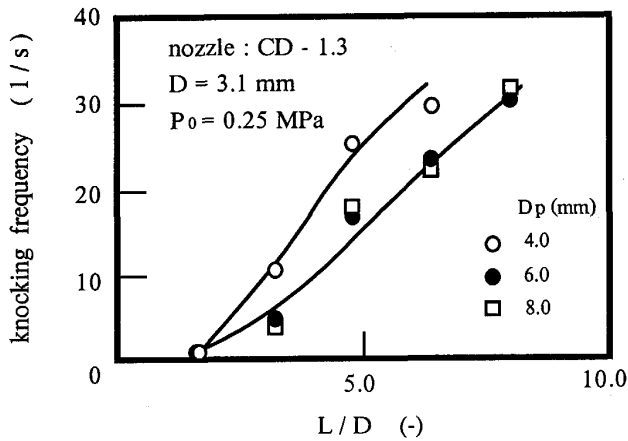


Fig. 7. Effect of plate size on the knocking frequency.

る。これは、同じよどみ点圧力では、マッハ数の大きなノズルの方がコア長さが短いこと⁹⁾に対応しているものと思われる。

Fig. 7は、設計マッハ数1.3のノズルを用いてよどみ点圧力0.25 MPaで吹き込まれたジェットの下叩きに及ぼす制御板の大きさの影響を調べた結果である。直径6 mm(ノズル径の約2倍)では、8 mmの場合とほとんど違いがないが、4 mmでは、下叩き頻度が増加する。また2 mmの制御板の場合には、制御板が振動して測定不能となった。

さらに、制御板の形状の影響を調査するため、Fig. 8に示す円錐形の凸型と凹型の加工をした4種類の制御

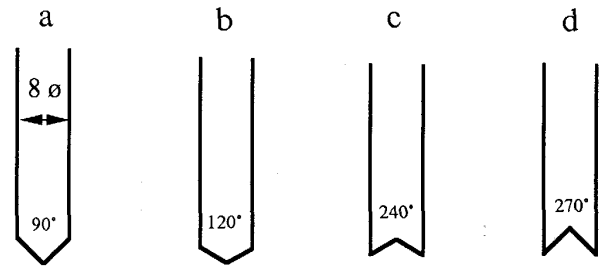


Fig. 8. Illustration of different shapes of control plate.

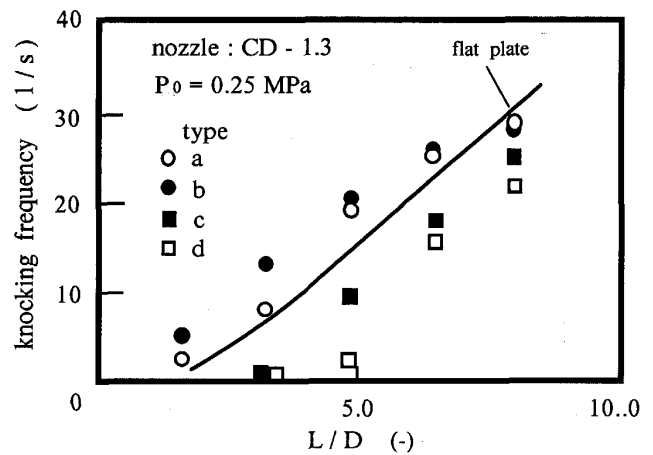


Fig. 9. Effect of plate shape on the knocking frequency.

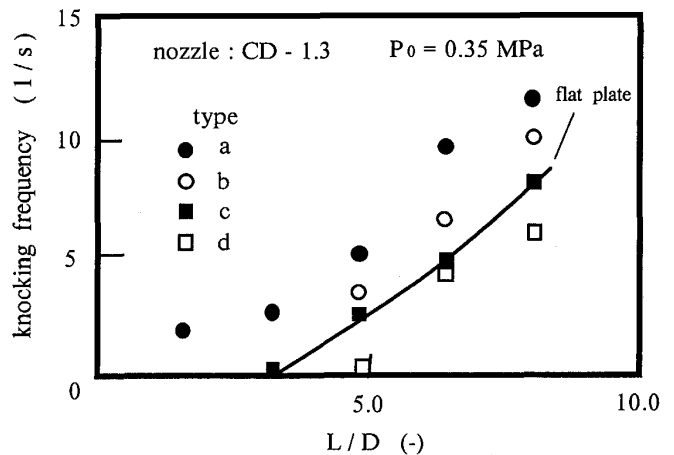


Fig. 10. Effect of plate shape on the knocking frequency.

板を作成した。

Fig. 9は、設計マッハ数1.3のノズルで、よどみ点圧力0.25 MPaの場合の結果である。図中実線は、平板を用いたときの結果を示している。凸型から凹型に変化するにつれて、下叩き頻度は減少している。しかし、凹型の制御板の場合、気柱がノズル下方に向かって成長し、平板の時に見られた気泡の微細化は起こらず、直径50

mm 程度の比較的大きな気泡が生成した。

Fig. 10 は、同様のノズルで、よどみ点圧力を 0.35 MPa に増大させたときの結果である。Fig. 9 に比べて、a と b の差が顕著になり、平板と c との相違がなくなっている。

4. 考 察

Fig. 5 および Fig. 6 の各曲線を、底叩き頻度が 0 になるまで外挿した L/D の位置は、それ以内に制御板を設置した場合、底叩きが消滅することを意味している。Fig. 11 は、このようにして求めた設計マッハ数が 1.3 および 1.5 のノズルで底叩きが消滅する制御板の臨界位置 ($L_{crit.}$) と、前報で報告したコア長さ (L_{core})⁹⁾ との関係を示したものである。コア領域と底叩きの消滅位置は共によどみ点圧力の上昇により、ノズル上方に移行しており、両者の間には密接な対応関係が存在する。よどみ点圧力が低い場合は、底叩きを消滅させるためには、コア長さの 2 分の 1 まで制御板を接近させる必要があるが、圧力を高くするとコア長さに相当する位置で十分であることが読み取れる。ノズルの設計マッハ数の効果は、この範囲ではあまり顕著ではないが、設計マッハ数の低い方がコアが長く、同じよどみ点圧力では、制御板をより上方に設置しても底叩き頻度の低減が図れる。

水銀浴を用いた実験では、底叩きの衝撃によって圧力センサーが破壊され、水モデルにおいて用いた方法による底叩き頻度の測定は困難であったため、制御板をノズルに接近させながら底叩きによる衝撃音を数え、60 s

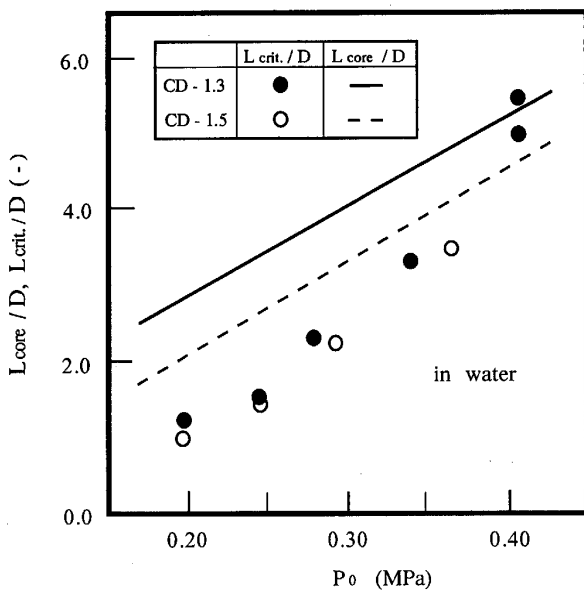


Fig. 11. Comparisons of critical plate position ($L_{crit.}$) with jet core length (L_{core}) in water.

に 1 回も衝撃音の発生しなかった時の制御板の位置を底叩き消滅位置とみなした。Fig. 12 は、直径 2 mm のオリフィスにより吹き込まれたジェットに直径 8 mm の制御板を用いた場合の底叩き消滅の臨界位置とよどみ点圧力との関係を示している。よどみ点圧力の増加とともに、消滅位置はノズルから遠ざかっている。ノズルから光を放射し、ジェット中での通過光が水銀の侵入によってさえぎられる位置を測定することによって求めた。水銀浴中空気ジェットのコア長さ⁹⁾が、Fig. 12 中に併記してある。底叩き消滅位置とコア長さの間には、水モデルの結果と同様、密接な関係が存在し、よどみ点圧力の増加と共に、その位置は、コア長さの約 50%~80% にあることが分かる。

制御板によるジェット流れの変化を Fig. 13 に模式的に示す。通常のジェットでは、気柱の切断はコアの上方で非定常的に生じ⁶⁾、切断時に生じた衝撃波によって底叩きが起きると考えられる。一方、制御板がコア内に存在する場合には、ガスジェットは制御板によってその流れを変化させられる。この際、ジェットの持つ運動エネルギーは周囲液体との混合に消費され、その結果多数の

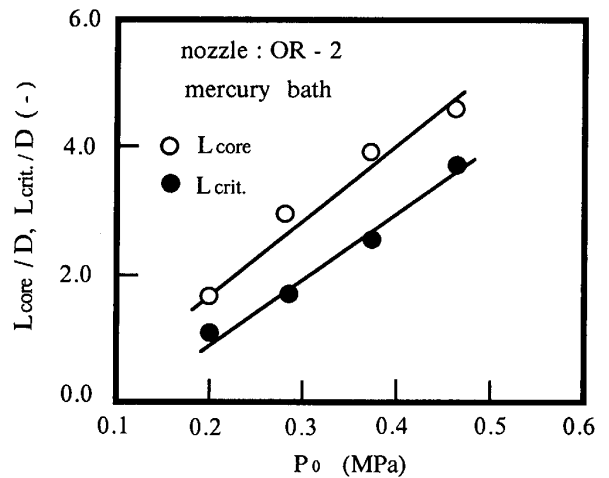


Fig. 12. Comparisons of critical plate position ($L_{crit.}$) with jet core length (L_{core}) in mercury.

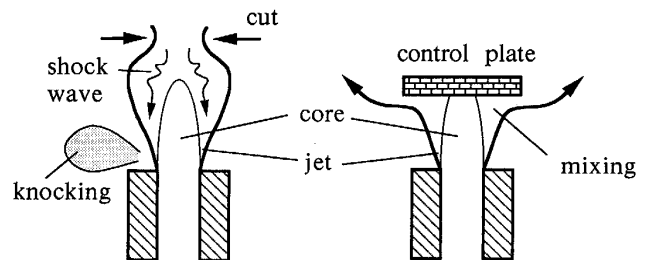


Fig. 13. Schematic drawing of the change of jet flow by control plate.

微細気泡が生成するものと考えられる。

コア領域は膨張セルの連続したものと考えることができ、初期の膨張領域に着目する限り、熱の影響は余り考慮する必要はないと仮定すると、水および水銀浴において測定したコア長さ⁹⁾の測定結果を溶鉄浴の場合に適用することができる。周囲流体の圧力の影響が明確ではないため定量的な議論はできないが、同じ流量のガスを吹き込む場合、設計マッハ数とその直径が小さいノズルの方がコアが長くなり、ノズルから遠いところで制御板の効果が認められると思われる。

5. 結 言

水および水銀浴を用いて浴中底吹きジェットの特性に及ぼす制御板の効果について調査を行い、以下の効果を得た。

1) 制御板を用いることにより、ジェットを微細な気泡に転化させることが可能であり、気液反応容量係数の増大を図り、スプラッシュや、浴の揺動を解消することができる。

2) 制御板をノズルに近付けるに従って、底叩き頻度は減少し、ついには完全に消滅する。

3) 底叩き消滅時の制御板のノズルからの距離は、よど

み点圧力の増加と共に増大し、コア長さとのよい対応を示した。

4) 制御板をコア内部に設置することで、定常的な気液混合が促進され、底吹きジェットは安定化する。

なお、本研究の経費の一部は昭和 59 年度科学研究費補助金、奨励研究 (A) によったことを付記し、謝意を表する。

文 献

- 1) 石橋政衛, 白石雅光, 山本里見, 島田道彦: 鉄と鋼, **61** (1975), S111
- 2) 加藤嘉英, 野崎 努, 鈴木健一郎, 中西恭二, 永井 潤: 鉄と鋼, **65** (1979), A137
- 3) 石橋政衛, 山本里見: 鉄と鋼, **65** (1979), A133
- 4) 甲斐幹, 大河平和男, 樋口満雄, 平居正純: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 1964
- 5) 小沢泰久, 森 一美: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 90
- 6) 池田隆果, 多賀雅之, 青木健郎, 増田誠一: 鉄と鋼, **65** (1979), A141
- 7) 青木健郎, 増田誠一, 鳩野哲夫, 多賀雅之: 鉄と鋼, **65** (1980), S822
- 8) 岸本康夫, 加藤嘉英, 仲村秀夫, 藤井徹也, 垣生泰弘: 鉄と鋼, **71** (1985), S1048
- 9) 伊藤公久, 徳田昌則: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 2124
- 10) 伊藤公久, ワヤンスラナタ, 徳田昌則: 東北大学選鉱製錬研究所彙報, **42** (1986), p. 113
- 11) 生井武文, 松尾一泰: 圧縮性流体の力学 (1977) [理工学社]