

連続鋳造浸漬ノズル内の気液二相流に関する水モデル実験

笠井 宣文*・井口 学*2

Water-model Experiments on Gas and Liquid Flow in the Continuous Casting Immersion Nozzle

Norifumi KASAI and Manabu IGUCHI

Synopsis : Water-model experiments were carried out to understand the behavior of argon gas introduced into the immersion nozzle from the vicinity of the sliding gate.

The gas was completely lifted up into the tundish when the water flow rate was lower than a certain critical value. On the other hand, it was completely carried deep into the mold when the water flow rate was higher than another critical value.

An estimation method of the two critical values was proposed.

The mean diameter of bubbles for a water flow rate between the two critical values increased with an increase in the distance from the sliding gate. The relationship between the mean diameter and the characteristics of water flow in the nozzle was revealed.

Key words: continuous casting; immersion nozzle; sliding gate; argon gas.

1. 緒言

鋼の連続鋳造（以下CCと略す）において浸漬ノズルの閉塞は安定操業を阻害する要因のひとつであり、現状では浸漬ノズル材質の検討をはじめ種々の研究がなされているが¹⁾、最も効果が認められている方法として、スライディングゲート（以下SGと略す）下固定盤または上ノズルからArガスを吹き込む方法²⁾が知られている。

しかしながら、吹き込まれたArガスの一部はモールド内に持ち込まれるため、微細な気泡が凝固シェルに捕捉された場合には、極低炭素鋼のふくれ疵に代表されるような³⁾製品品質の阻害要因となることが近年知られつつある。

このような背景のもと、タンディッシュ-モールド間においてArガスを吹き込んだ場合の溶鋼流動ならびに気泡挙動について基礎的な現象を明らかにすることが重要となってくると考えられるが、浸漬ノズル内における溶鋼流動現象に関する研究例⁴⁾は少なく不明な点も多い⁵⁻⁸⁾。

本報においては、CCタンディッシュ-モールド間におけるAr気泡ならびに溶鋼の動的挙動を定量的に評価することを目的に、コールドモデル実験を行った結果について報告する。

2. 実験内容

2.1 実験方法

Fig. 1, 2に実験装置の概略を示す。透明アクリル樹脂製の装置はタンディッシュ槽、モールド槽、モールド下部槽、水量調整用水槽の4槽で構成している。

タンディッシュ槽下部に実機の縮尺比1/2で製作したSG

装置はタンディッシュ槽、モールド槽、モールド下部槽、水量調整用水槽の4槽で構成している。

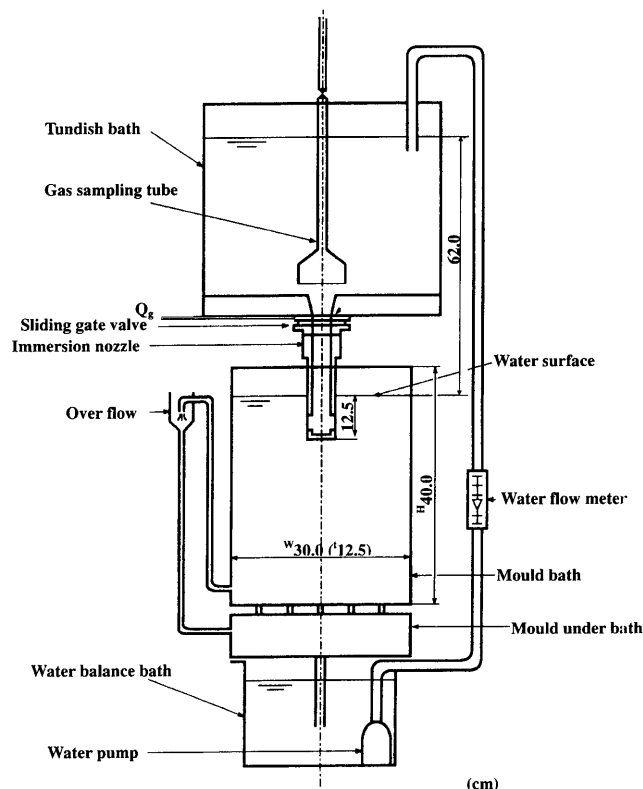


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

平成17年2月9日受付 平成17年3月11日受理 (Received on Feb. 9, 2005; Accepted on Mar. 11, 2005)

* 住友金属工業（株）鋼板・建材カンパニー (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Ind., Ltd., 3 Hikari Kashima 314-0014)

*2 北海道大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Hokkaido University)

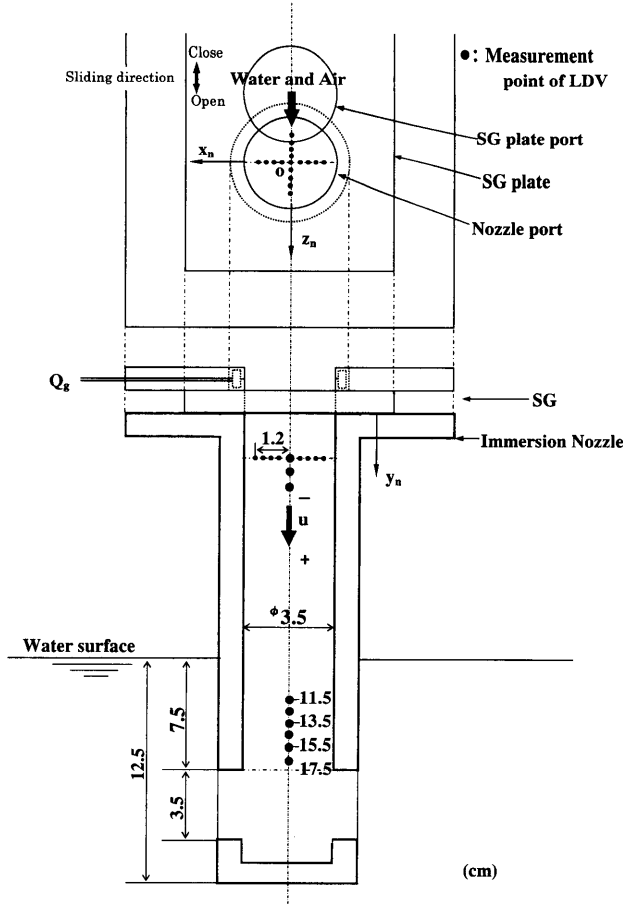


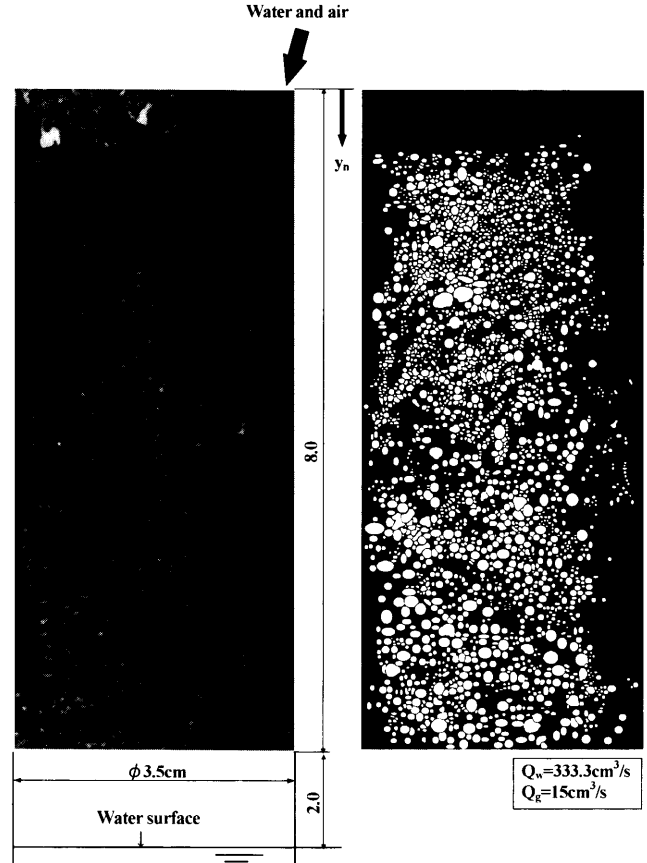
Fig. 2. Measurement positions for mean velocity and turbulence components of water flow in immersion nozzle.

と浸漬ノズルを付設している。SGは上固定盤、スライディングプレート、下固定盤で構成されており、スライディングプレートはモールド槽厚み方向に摺動する。

ガスの吹き込みは、SG上固定盤口周囲に設けた蓄気室全周に等間隔で直径0.5mmの貫通孔を24箇所加工し、一定圧力に設定した空気を一定流量吹き込んだ。

また、タンディッシュ槽にガス捕集器を取り付け、タンディッシュ槽とモールド槽への持ち込みガス流量（以下、 Q_{gTD} 、 Q_{gMD} と略す）の測定を行った。

モールド槽下部に幅方向等間隔で排水弁を5箇所設置し、一定流量の水を水中ポンプで循環させた。モールド槽は奥行き12.5cm、幅30.0cm、深さ40.0cmであり、浸漬ノズルの内径 D は3.5cmである。タンディッシュ槽、モールド槽の水位調整はオーバーフロー方式を採用しているが、タンディッシュ槽の水位は30cmで一定となるようにSG開度を調整し、オーバーフローする水流量は本実験における最低水流量の1%以下にするために、 $100\text{ cm}^3/\text{min}$ 以下に設定した。モールド槽の水位はオーバーフロー管の上下位置と下部排水弁の開度を調整することによって、ノズルの浸漬深さを12.5cm一定となるように設定した。



(a) The original picture (b) After the image processing

Fig. 3. Images of bubbles in immersion nozzle.

2.2 実験条件

水流量（以下 Q_w と略す）は $166.7\sim 333.3\text{ cm}^3/\text{s}$ 、ガス流量（以下、 Q_g と略す）は $3\sim 30\text{ cm}^3/\text{s}$ の範囲で設定し、タンディッシュ槽への持ち込みガス流量 Q_{gTD} の測定を行い、モールド槽内に持ち込まれたガス流量 Q_{gMD} を求めた。また、Fig. 2に示すように浸漬ノズル内の流動特性を二次元レーザードップラー流速計（以下LDVと略す）によって測定した⁹⁾。

浸漬ノズル内における気泡径分布と平均気泡径は、カメラで撮影したFig. 3(a)に示す写真の気泡をハンドトレースした後、市販の画像解析用ソフト（粒子解析：住友金属テクノロジー社製）を用いて二値化処理を施し求めた(Fig. 3(b))。

3. 実験結果および考察

3.1 モールド槽内への持ち込みガス量

モールド槽内へ持ち込まれたガス流量 Q_{gMD} の測定結果をFig. 4に示す。吹き込みガス流量 Q_g の増加につれて Q_{gMD} は直線的に増加しており、しかも水流量 Q_w の増加とともに大きくなる。設定水流量ごとに Q_{gMD}/Q_g を求めて整理すると、Fig. 5の通りとなり、 Q_{gMD} は式(1)によって求める

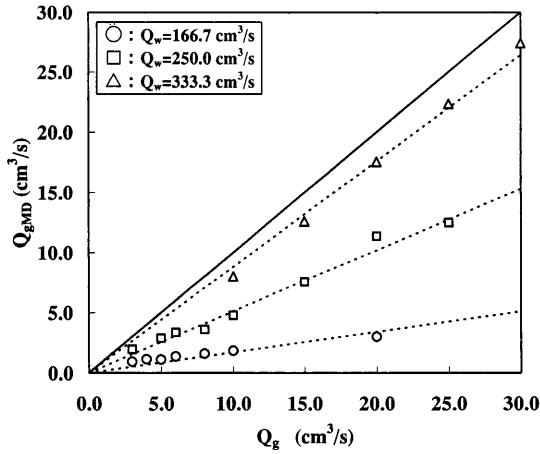


Fig. 4. Flow rate of gas carried deep into the mold.

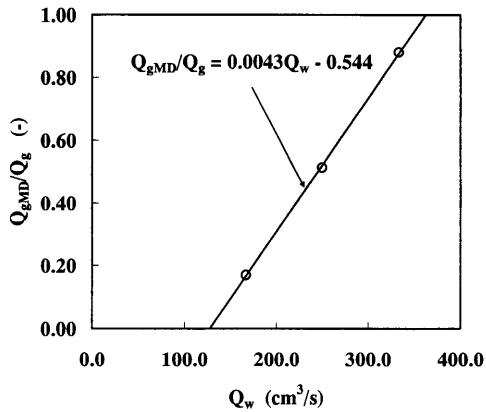


Fig. 5. Relationship between Q_{gMD} and gas flow rate Q_g .

ことができる。

$$Q_{gMD} = Q_g(0.0043Q_w - 0.544) \dots \dots \dots (1)$$

ただし、式(1)の成立範囲は $127 \text{ cm}^3/\text{s} < Q_w \leq 359 \text{ cm}^3/\text{s}$ である。すなわち、 Q_w が $127 \text{ cm}^3/\text{s}$ 以下ではモールド槽内へガスは持ち込まれず、 $359 \text{ cm}^3/\text{s}$ 以上ではタンディッシュ槽内への浮上はない。

以下、これら二つの臨界水流量の推算法について検討を行う。SGよりも下の浸漬ノズル内に存在する気泡の直径 D_b の頻度分布を Fig. 6 に示す。気泡径 D_b は約 0.02 cm から 0.5 cm の範囲に分布している。気泡がすべてモールド槽内へ持ち込まれるには、最も大きな気泡である直径 D_b が 0.5 cm の気泡に働く上向きの力 F_B よりも、流動抵抗 F_D が大きくなければならない。ここで、 F_B と F_D は次式で与えられる。

$$F_B = \pi D_b^3 (\rho_L - \rho_g) g / 6 \dots \dots \dots (2)$$

$$F_D = C_D (\pi D_b^2 / 4) (\rho_L v_{wm}^2) / 2 \dots \dots \dots (3)$$

$$v_{wm} = 4Q_w / (\pi D^2) \dots \dots \dots (4)$$

ただし、 ρ_L と ρ_g は液体とガスの密度、 g は重力加速度、 C_D

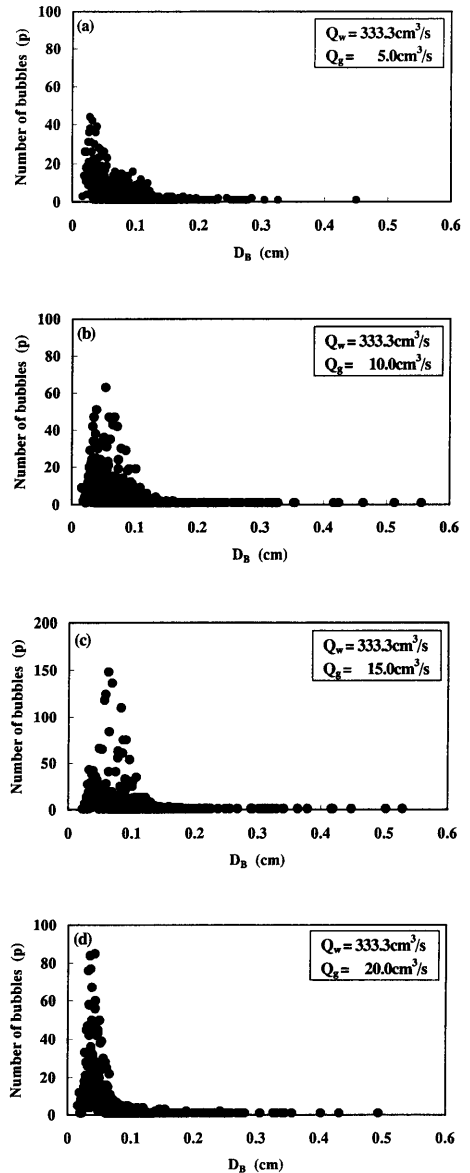


Fig. 6. Histogram of bubble diameter in immersion nozzle.

は抵抗係数、 v_{wm} は浸漬ノズル内の水の断面平均速度である。

気泡の抵抗係数 C_D は、液の汚染の程度によって大きく異なることが知られている¹⁰⁾。本実験装置内の水は長時間に亘って循環させているので、十分汚染されていると考えられる。このような場合には、気泡の表面には汚染物質が蓄積しており、直径が 0.5 cm 程度の気泡はあたかも固体球の如く振舞う。したがって、ここでは抵抗係数 C_D に固体球の値を適用する。抵抗係数 C_D は通常、ストークス領域、アレン領域、ニュートン領域に分けて記述されているので¹¹⁾、本研究でも踏襲する。

$$C_D = 24/Re \quad (2 \geq Re) \dots \dots \dots (5)$$

$$C_D = 10Re^{-1/2} \quad (500 \geq Re > 2) \dots \dots \dots (6)$$

$$C_D = 0.44 \quad (10^5 \geq Re > 500) \dots \dots \dots (7)$$

$$Re = v_{wm} D_B / \nu_L \dots\dots\dots (8)$$

ここでReはレイノルズ数、 ν_L は液体の動粘度である。SGのような複雑な流れ場の気泡の運動は、周囲気泡の後流の影響を強く受ける。ただし、このような気泡の抵抗係数はよく分かっていないので、ここでは便宜的に、単一気泡の抵抗係数を援用した。

3.1.1 ノズル内へ吹き込まれたガスがすべてモールド槽内へ持ち込まれるときの臨界水流量

まず、 $C_D=0.44$ とにおいて $D_B=0.5$ cmの気泡がモールド槽内へ持ち込まれるときの臨界水流量を計算する。式(2)、(3)を等しいとおけば、 $\rho_L \gg \rho_g$ であるから

$$v_{wm} = [4D_B g / (3C_D)]^{1/2} = 38.5 \text{ cm/s} \dots\dots\dots (9)$$

となる。この v_{wm} の値を用いてReを計算すると、 $Re=2160$ となって、ニュートン領域にあることが分かる。したがって、 $C_D=0.44$ と仮定したことは妥当であり、 $v_{wm}=38.5$ cm/sから水流量を求めると

$$Q_w = \pi D^2 v_{wm} / 4 = 370 \text{ cm}^3/\text{s} \dots\dots\dots (10)$$

となって、本実験で得られた $359 \text{ cm}^3/\text{s}$ によく一致する。

3.1.2 ノズル内へ吹き込まれたガスがすべてタンディッシュ槽内へ持ち込まれるときの臨界水流量

すべての気泡がモールド槽内へ到達することなく、タンディッシュ槽内へ持ち込まれる場合の臨界水流量について考える。抵抗係数 C_D がアレン領域の式(6)で表されると仮定し、式(2)、(3)の F_B と F_D が等しいとおけば、

$$v_{wm} = [(D_B / \nu_L)^{1/2} (2gD_B / 15)]^{2/3} \dots\dots\dots (11)$$

が得られるが、この式に $D_B=0.02$ cmを代入することにより $v_{wm}=2.48$ cm/sとなる。このときのレイノルズ数は式(8)から $Re=5.6$ となるので、抵抗係数に対する仮定は正しい。水流量は $Q_w=23.9 \text{ cm}^3/\text{s}$ となるが、本実験での値 $127 \text{ cm}^3/\text{s}$ よりもかなり小さくなっている。

しかしながら、この議論はSGよりも下に持ち込まれた気泡がすべてタンディッシュ槽内へ再浮上することに着目していることになり、妥当ではない。吹き込まれたガスがすべてタンディッシュ槽内へ浮上する場合には、24個の貫通孔の出口近傍における気泡が浮上していると考えほうがよい。ただし、このような複雑な流れ場における気泡の直径に関する情報はないので、便宜的に24個の貫通孔で生成する気泡の直径に着目する。すなわち、流れの影響を受けるノズルから生成する気泡の直径に関する実験式を援用して気泡径を近似的に計算する¹²⁾。

$$D_B = 0.966 D_{B0} [(g d_{ni})^{1/2} / v_{wm}]^{1/9} \dots\dots\dots (12)$$

$$D_{B0} = [6Q_g / (1.06\pi)]^{1/3} [\sigma / (\rho_L g^3)]^{1/12} (\rho_L / \rho_g)^{1/15} \times [d_{ni} / (Q_g / g)]^{1/6} \dots\dots\dots (13)$$

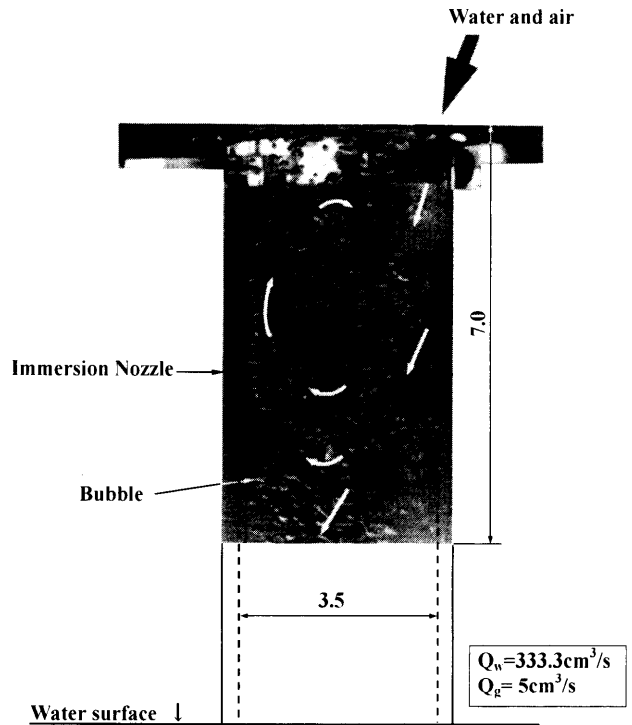


Fig. 7. Flow pattern in immersion nozzle.

ここで d_{ni} はノズル内径、 σ は表面張力である。

本実験条件下で最も小さな気泡が生成するのはガス流量が最も小さい $Q_g=3 \text{ cm}^3/\text{s}$ の場合であるから、これをガス吹き込み用の孔の個数である24で除した値 $Q_g=0.125 \text{ cm}^3/\text{s}$ を式(13)に代入して D_{B0} を計算すると 0.198 cmとなる。これを式(12)に代入して、さらに式(11)を用いれば $v_{wm}=21.0$ cm/sが、また式(12)から $D_B=0.69$ cmが得られる。このとき $Re=398$ となって、 C_D にアレン領域の式(6)を用いて導かれた式(11)に着目したことは適切である。これより水流量は $Q_w=202 \text{ cm}^3/\text{s}$ となるが、本実験で観察された値 $127 \text{ cm}^3/\text{s}$ よりも1.5倍ほど大きい。式(12)の偏差は $\pm 20\%$ であるから、この式の適用が正しければ、ここで求めた臨界水流量は実測値の $127 \text{ cm}^3/\text{s}$ と同程度の偏差で一致するはずであるが、相違はかなり大きい。

以上の議論から、SG近傍のガス吹き込み貫通孔で生成した気泡の径と浸漬ノズル内の気泡径分布が分かれば、2種類の臨界水流量がほぼ予測出来ることが分かったが、現在のところ、このような複雑な乱流場における気泡径分布を正確に求めることは難しく、SGのような複雑な流れ場への式(12)の適用性も含めて更なる検討を要す。

3.2 ノズル内の気泡分散状況と液の動的挙動

ノズル内の気泡分散状況の一例をFig. 7に示す。気泡は、SG開口部で生成した噴流から離脱し、開口部の反対側において合体、浮上しながら循環する。一方、噴流に乗って下方へ向かった気泡の一部は噴流から分離して浮上するが、多くの気泡はそのまま噴流に乗って、ノズル下方の吐出口へと運ばれる。

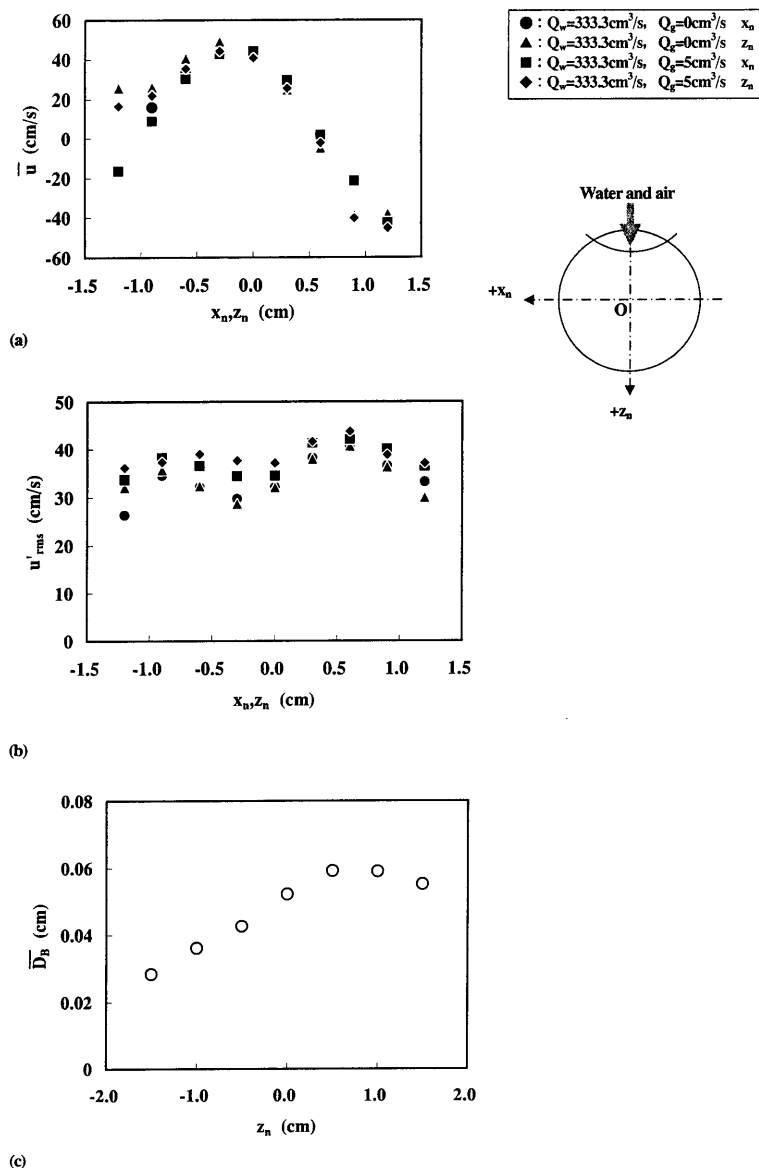


Fig. 8. Radial distributions of \bar{u} , u'_{rms} , and \bar{D}_B .

以下に、SG直下からノズル吐出口近傍の気泡径と液の流動特性の測定を行った結果について述べる。

3.2.1 SG下固定盤直下の流動特性

Fig. 8(a)~(c)に $Q_w = 333.3\text{cm}^3/\text{s}$, $Q_g = 5\text{cm}^3/\text{s}$ 時のSG直下1.25cmの断面における x_n , z_n 軸上での下向き (y_n 方向) 時間平均速度 \bar{u} と乱れの rms 値 u'_{rms} の分布ならびに、 z_n 軸上の平均気泡径分布を $Q_g = 0\text{cm}^3/\text{s}$ の場合と比較して示す。 y_n 軸方向の時間平均速度 \bar{u} は、 z_n 方向の分布を見ると、SG開口部近傍から z_n が 0.5cm までの範囲で下向き (\bar{u} は正) であるのに対して、 z_n が 0.5cm からノズル壁面までの範囲では上向きとなる。これは、Fig. 7を見ても分かるように、SG開口部がノズルの壁面 ($z_n = -1.75\text{cm}$) 近傍にあることで噴流はノズル内において中心側へと向かうため、SGの開口部の反対側では反転流が発生することによる。

Fig. 8(b)において、 x_n , z_n 軸上の u'_{rms} は、空気を吹き込むことにより、水単相の場合と比較して10%程度大きく

なっている。これは、気泡の存在によって、乱れの生成が強くなったためと考えられる。また、 u'_{rms} の分布に着目すると、 x_n , z_n 軸上で2つのピークを有していることが分かる。これは、Fig. 7の観察結果からも分かるように、ノズル内において発生する反転流の影響によるものである。

Fig. 8(c)に示すように、平均気泡径 \bar{D}_B は、SG開口部直下で最も小さく、ノズルの中心に向かっていくにしたがい大きくなるが、SG開口部の反対側 ($+z_n$ 側) において反転流が存在する領域ではほぼ一定の大きさとなる。これは、SG開口部直下では噴流のせん断力によって気泡は分裂して小さくなるが、ノズル内の z_n の大きい領域においては気泡が合体をしながら反転流に乗って浮上してくることによるものと考えられる。

3.2.2 ノズル内における流動特性と気泡径分布

SG直下から浸漬ノズル吐出口上端までのノズル内の平均気泡径分布を Fig. 9に示す。また、ノズルの中心軸上

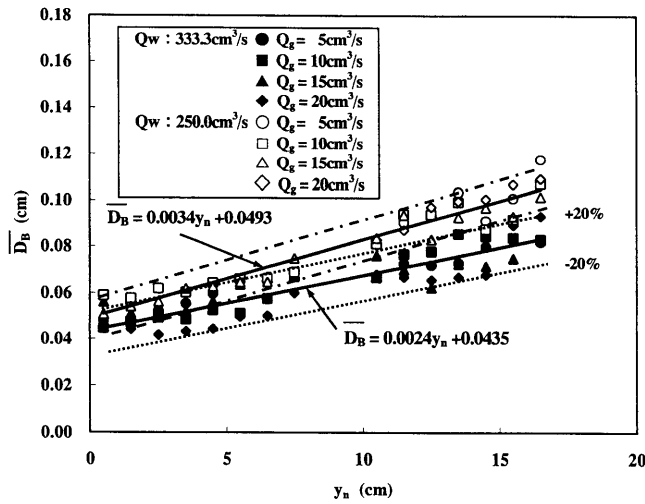


Fig. 9. Longitudinal distributions of mean bubble diameter in immersion nozzle.

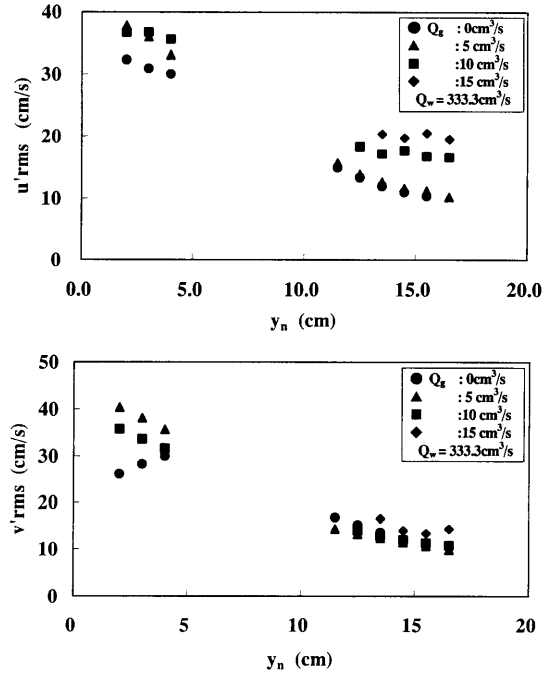


Fig. 11. Longitudinal distributions of turbulence components in immersion nozzle.

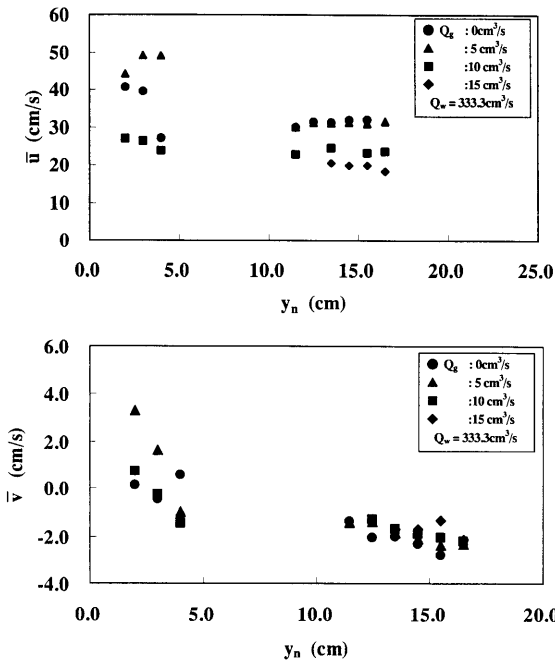


Fig. 10. Longitudinal distributions of mean velocity components in immersion nozzle.

($x_n = z_n = 0$ cm)における平均速度 \bar{u} , \bar{v} を Fig.10(a), (b)に、乱れの rms 値 u'_{rms} ならびに v'_{rms} を Fig.11(a), (b)に示す。平均気泡径 \bar{D}_B は浸漬ノズル吐出口に近いほど大きくなり、水流量 $Q_w = 333.3$ cm³/s の場合、それぞれの D_B はガス流量 Q_g の値に関わらず(14)式により整理できる。

$$\bar{D}_B = 0.0024y_n + 0.0435 \quad (\text{cm}) \quad \dots\dots\dots(14)$$

ただし、前述のように y_n は SG 開口部から垂直下向きにとった距離 (cm) である。

水流量 $Q_w = 250.0$ cm³/s の場合にも同じ傾向が見られ、 $Q_w = 333.3$ cm³/s の場合と同様に、(15)式により整理できる。

$$\bar{D}_B = 0.0034y_n + 0.0493 \quad (\text{cm}) \quad \dots\dots\dots(15)$$

しかしながら、 $Q_w = 250.0$ cm³/s の場合には、噴流の乱流せん断応力が $Q_w = 333.3$ cm³/s の場合よりも小さいので、平均気泡径は逆に大きくなっている。一方、 \bar{u} , \bar{v} , u'_{rms} ならびに v'_{rms} はノズル吐出口に近いほど小さくなる。

以上の結果から、ノズル内における気泡の大きさは、液の流動の影響を強く受け、液の平均速度や乱れが吐出口に近づくにつれて小さくなることによって気泡の合体が起りやすくなり、 \bar{D}_B が大きくなったと推察される。

3.2.3 浸漬ノズル閉塞におよぼす気泡分散の影響

笠井ら¹³⁾は実機における浸漬ノズル内壁への Al₂O₃ 付着の実態を調査して鋳造後の浸漬ノズル内壁の付着物は、メニスカスを境界にして上部では地金と Al₂O₃ が混在しているのに対して、下部では Al₂O₃ が主体となっており、閉塞が進んでいることを報告している。このことは、浸漬ノズル内の流動が溶鋼-Ar ガスの気液二相流であると考えた場合、メニスカスの上部と下部では浸漬ノズル耐火物からの抜熱の違いによって説明することができる。しかしながら、Ar ガス吹き込みの有無によって Al₂O₃ の付着量が大きく異なることについては、液体の時間平均速度や乱れの rms 値が大きく作用していることを、この事実は示唆しているものと考えるが、詳細については今後の課題としたい。

4. 結論

- (1) SG 近傍から吹き込まれた空気は、水流量がある

臨界値よりも小さいときにはすべてタンディッシュ槽内へ浮上した。また、水流量が別の臨界値よりも大きいときには、すべてがモールド槽内へ持ち込まれた。これら二つの臨界値の推定法を示した。

(2) 水流量が上記二つの臨界値の間にあるとき、SGよりも下側の領域の平均気泡径は、SGから吐出口へ向かうにつれて大きくなった。これは、水の流れの時間平均速度や乱れのrms値が小さくなって気泡の合体が起こりやすくなったことに起因していると考えられる。

(3) Al_2O_3 のノズル内壁への付着は液体の時間平均速度や乱れのrms値が大きき作用していることが示唆された。

記号

C_D	: 抵抗係数
D	: 浸漬ノズルの内径
D_B	: 気泡径
\bar{D}_B	: 平均気泡径
F_B, F_D	: 気泡に働く上向きの力と流動抵抗
g	: 重力加速度
Q_g, Q_w	: ガス流量と水流量
Q_{gTD}, Q_{gMD}	: タンディッシュ槽とモールド槽へ持ち込まれるガス流量
Re	: レイノルズ数
\bar{u}, \bar{v}	: 液体の時間平均速度
u'_{rms}, v'_{rms}	: 乱れのrms値
v_{wm}	: ノズル内液体の断面平均速度

y_n	: スライディングゲートから下向きに計った距離
ρ_g, ρ_L	: ガスと液体の密度
ν_L	: 液体の動粘度
d_{ni}	: ガス吹き込み孔の直径

文 献

- 1) R.Tsujino, S.Tanaka, A.Imamura, H.Takahashi and S.Mizoguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 765.
- 2) N.Wakafuji, T.Saitou, Y.Kita, M.Kimura and T.Ishikura: *CAMP-ISIJ*, **1** (1988), 1270.
- 3) M.Sato, M.Yoshida, H.Take, H.Yamazaki and T.Bessho: *CAMP-ISIJ*, **5** (1992), 1252.
- 4) S.Yokoya, Y.Asako, S.Hara and J.Szekely: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 754.
- 5) S.Taniguchi and A.Kikuchi: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 527.
- 6) Jpn. Soc. Prom. Sci., 19th Committee: Recent Development in Studies of Non-metallic Inclusions in Steel, Jpn. Soc. Prom. Sci., Tokyo, (1994)."
- 7) ISIJ: Fluid Flow in Continuous Casting Mold and Behavior of Non-metallic Inclusions, ISIJ, Tokyo, (2003).
- 8) L.Zhang and B.G.Thomas: *ISIJ Int.*, **43** (2003), No. 3, 271.
- 9) M.Iguchi, T.Kondoh and T.Uemura: *Int. J. Multiphase Flow*, **20** (1994), 753.
- 10) A.Tomiyama, I.Kataoka and T.Sakaguchi: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., B*, **61** (1995), 2357.
- 11) Jpn. Soc. Multiphase Flow: Handbook of Multiphase Flow, Asakura Book Co. Ltd., Tokyo, (1989).
- 12) M.Iguchi, Y.Terauchi and S.Yokoya: *Metall. Mater. Trans. B*, **29B** (1998), 1219.
- 13) N.Kasai, M.Kawasaki, Y.Hayashi and K.Kawai: *Refractories (Taik-abutu)*, **11** (1991), No. 1, 22.