

連続铸造浸漬ノズル-鋳型間における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 Continuous Casting Immersion Nozzle and Mold

Norifumi KASAI and Manabu IGUCHI

Synopsis : Cold model experiments were carried out to understand the behavior of bubbles and liquid flow both in the nozzle and the mold during continuous casting. Distributions of pinholes and inclusions on the surface of a slab were investigated to clarify the effect of Ar gas injection. In the cold model, bubbles were generated at the exits of holes located above the sliding gate.

The mean diameter of bubbles changed in the downward and horizontal directions in the immersion nozzle due to coalescence. In the mold larger bubbles lifted up along the outer wall of the immersion nozzle through the effect of buoyancy forces acting on them, while smaller bubbles were carried in the entire mold by water issuing out of the port. The larger bubbles cause mold powder entrapment. On the other hand, the smaller bubbles are closely associated with pinholes observed in slabs.

Key words: continuous casting; immersion nozzle; sliding gate; pinhole.

1. 緒言

鋼の連続铸造（以下CCと略す）においては、スライディングゲート（以下SGと略す）下固定盤もしくは、タンディッシュ上ノズルからArガスを吹き込むことによって、浸漬ノズル（以下INと略す）の閉塞を防止しており、安定した铸造を維持するうえで重要な要素技術である。

しかしながら、吹き込まれたArガスの一部が凝固シェルに捕捉されることによって、製品品質に悪影響をおよぼす場合があり、タンディッシュから鋳型間におけるArガス起因の気泡の挙動を定量的に把握したうえで、製品品質への影響を知ることが重要なことと考えられる。

前報¹⁾においては、Arガスを吹き込んだ際のIN内における気泡の挙動を把握することを目的に水モデルによるコールドモデル実験を行い、気泡径と流速の関係などに関して、いくつかの知見を得た。本報においては、INにおける浸漬部から鋳型内における気泡挙動とガス吹き込みによる液の動的挙動を定量的に評価するとともに、鋳型への溶鋼供給に対する基礎的な現象を明らかにすることを目的に、コールドモデル実験を行った結果について報告する。

また、これらの基礎実験結果を踏まえたうえで、実機におけるArガス吹き込みの影響を知ることが目的に、鋳片表皮下におけるピンホールならびに、介在物の分布を調査した結果を併せて報告する。

なお本報においては、ピンホールという用語は凝固後、

気泡という用語は溶鋼中または水モデルの水中を対象として区別して使用した。

2. 実験内容

2.1 実験方法

Fig. 1に実験装置を示す。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とINを付設するとともに、鋳型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。

タンディッシュ槽、鋳型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 cm³/min以下に設定した。

鋳型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、INの浸漬深さを12.5 cm一定となるように設定した。

ガスの吹き込みは、SG上固定盤に設けた直径0.5 mmの貫通孔24箇所から一定圧力に設定した空気を一定流量吹き込んだ。

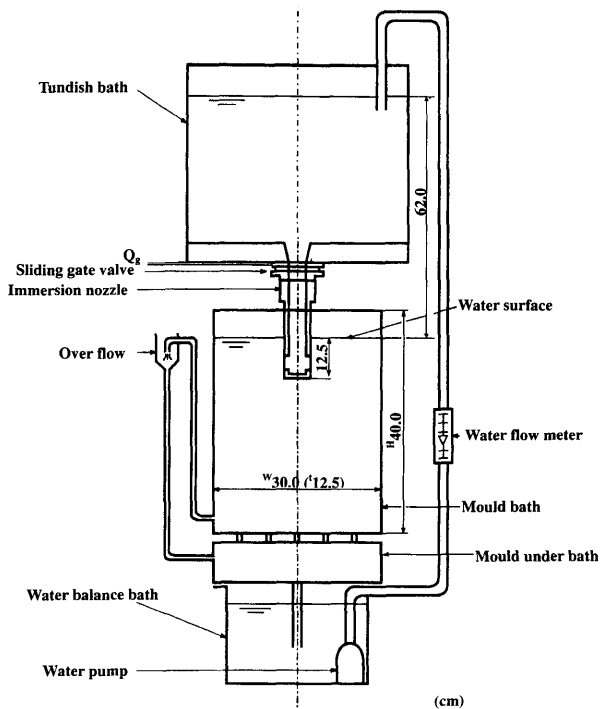


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

Table 1. Experimental conditions for water-model.

Water flow rate (Q_w)	166.7~333.3 (cm^3/s)
Gas flow rate (Q_g)	0~15.0 (cm^3/s)
Injection gas	Air
$Re=u_0d_p/\nu$ (-)	120~480
Mould bath size (cm)	$12.5 \times 30.0 \times 40.0$
Nozzle depth (cm)	12.5

2.2 実験条件

実験条件を Table 1 に示す。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 $0 \sim 15.0 \text{ cm}^3/\text{s}$ の範囲で設定し実験を行った。

本実験における鋳型槽幅はスラブ CC を想定するには狭い部類であるため、主に浸漬ノズル内ならびにノズル近傍の気泡の挙動を解析の対象とした。

また、Fig. 2 に示すように、鋳型槽における吐出噴流と水平方向軸上の流動特性を二次元レーザー Doppler 流速計（以下 LDV と略す）によって測定した²⁾。

IN 内においては、SG 出口中心を原点 O_n として下向きに測定した距離を y_n と定義した。また、水平方向軸ならびに垂直方向軸上の距離は IN 吐出口中央を座標の原点 O_{MD} としてそれぞれ x_{MD} 、 y_{MD} とし、軸方向流速は v_{MD} 、 u_{MD} と定義した。

IN 内ならびに鋳型内における気泡径分布は、カメラで撮影した写真の気泡を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行って求めた。

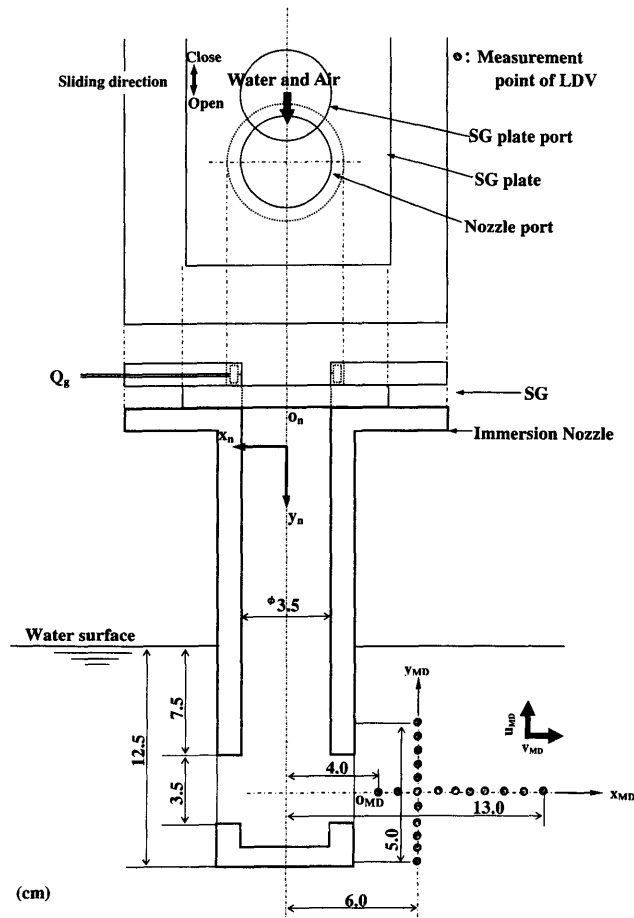


Fig. 2. Measurement positions for mean velocity and turbulence components of water flow in immersion nozzle.

画像は二値化処理を行う前処理として、目視で判別し得る気泡全てについてハンドトレースを行い気泡の境界を明確にしている。これは、二値化処理を行う際に中間トーンの誤判定によってひとつの気泡と判定することを防止するためである。また、複数の気泡が合体して気泡の境界が認められる場合は、別の気泡として区分した。

解析の対象となった気泡数は Q_w ならびに Q_g によって異なるが、約 500 から 1000 個の範囲である。解析の対象範囲に存在する気泡数は、気泡の総体積と前報¹⁾において求めた平均気泡径から約 2800 から 8300 個の範囲と推算されることから、本報における解析対象気泡数は全体の約 11.5 から 18.6% に相当すると考えられ、統計的な解析を行うには十分だと考えられる。

なお、本報における気泡径は、画像解析によって得られた気泡の面積を同一とした円相当径で表している。

3. 結果および考察

3.1 IN 内メニスカス下部における気泡分散挙動

笠井ら³⁾は実機における IN 内壁への Al_2O_3 付着の実態を調査している。その結果、鋳造後の IN 内壁の付着物は、

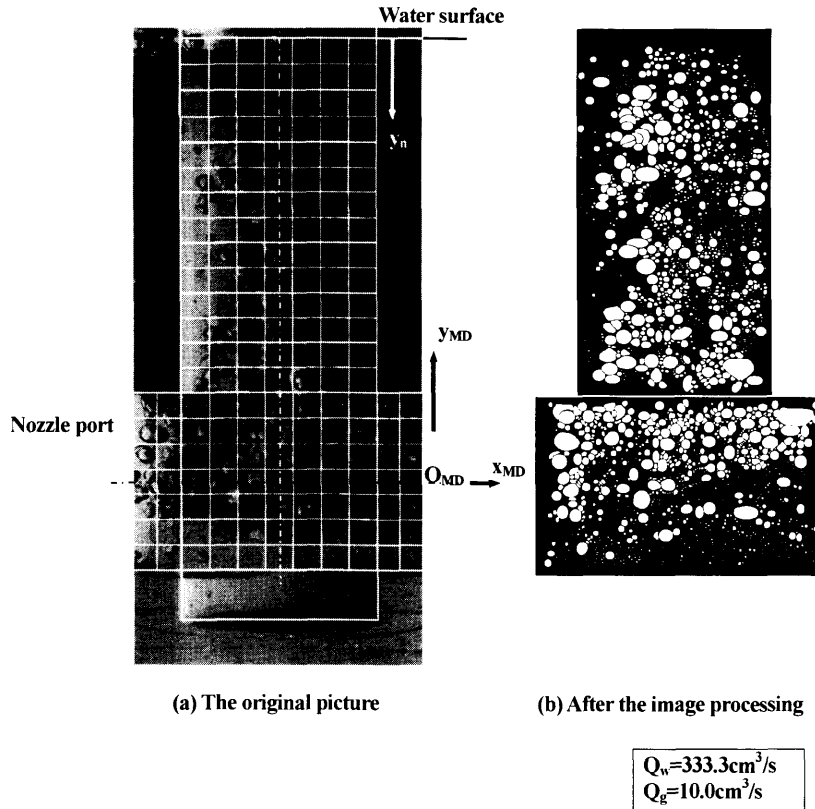


Fig. 3. Images of bubbles in immersion nozzle.

メニスカス部を境界にして上部では地金と Al_2O_3 が混在しているのに対して、下部では Al_2O_3 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。

すなわち、メニスカス上部においては、浸漬ノズル耐火物からの抜熱が大きくノズル内において溶鋼流動が滞留する箇所では地金の付着が進行するのに対して、メニスカスより下部では、浸漬ノズル耐火物からの抜熱は小さく、溶鋼流動が滞留する箇所においては溝口らりが指摘している耐火物中の SiO_2 と溶鋼中の Al や Ti などの強脱酸元素との反応で生じる網目状 Al_2O_3 が核となり溶鋼中の Al_2O_3 が堆積するものと考えられる。

一方、Arガス吹き込みの有無によってメニスカスより下部で Al_2O_3 の付着量が大きく異なることについては、溶鋼中の Al_2O_3 の堆積に対して溶鋼流動ならびに Ar ガス気泡の分散挙動が関与しているものと推察される。

そこで、メニスカス下部における IN 内の気泡分散挙動と気泡径分布を求めた。

Fig. 3 に IN 内メニスカス下部における気泡分布の一例を示す。Fig. 3(a) は写真画像と分割区分、Fig. 3(b) は画像処理による二値化画像である。

IN 内メニスカス下部から吐出口上端の間における気泡

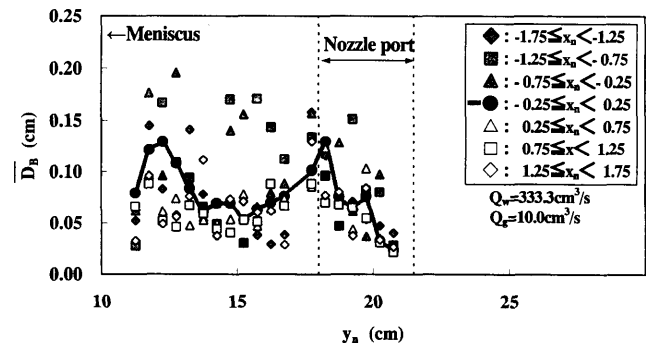


Fig. 4. Longitudinal distributions of mean bubble diameter in immersion nozzle.

の分散挙動を観察すると、小さな気泡は IN 内の水の噴流によって下方へと運ばれるが、噴流の速度や乱れは y_n が大きくなるのにしたがって小さくなるため IN 内において合体し大きくなった気泡は、開口部側の内壁面に移動しながら下方へと移動する。大きくなった気泡は吐出口上端部から鋳型槽へ排出されるのに対して、小さな気泡は吐出口下部から水の噴流に乗った状態のまま鋳型槽へ排出される。

このような気泡の挙動を定量的に知ることを目的に、Fig. 3 に示す画像から y_n 方向（メニスカスから下向きにとっている）における平均気泡径分布を求めた。一例を Fig. 4 に示す。 $x_n = \pm 1.75$ cm の場所には IN の内壁がある。

また、吐出口部における x_n 方向の平均気泡径 (\bar{D}_b) 分布を Fig. 5 に示す。ここで、 $y_n = 17.5$ cm と 21.0 cm のところに吐

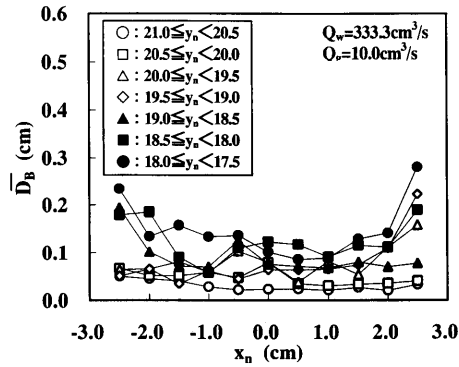


Fig. 5. Radial distributions of \bar{D}_B .

出口の上端部と下端部がある。

Fig. 4の結果より、メニスカス下部から吐出口上端の間では、IN内の x_n が -0.25 cm から 0.25 cm の領域、すなわちINの中心軸近傍における \bar{D}_B が 0.06 cm から 0.13 cm 程度であるのに対して、他の領域では 0.025 cm から 0.25 cm の範囲でばらついている。この傾向は吐出口の上端部においても同様であるが、吐出口の中央部からは下に向かうほど気泡径は小さくなる。これは、合体しながら大きくなって下降してきた気泡が吐出口上端で鑄型槽へと排出され、噴流内に留まった小さい気泡のみが吐出口下部まで持ち込まれるためである。Fig. 5の結果からも、吐出口の上部壁面側に大きな気泡が存在することが分かる。

また、 x_n が -0.25 cm から 0.25 cm 以外の位置において x_n が $-$ 側と $+$ 側の \bar{D}_B を比較すると $-$ 側の方がばらつきは大きい。これは、IN内における噴流のゆらぎによる影響によるものと考えられ、観察を続けていくと x_n 方向で大きな気泡が周期的に $-$ 側と $+$ 側に認められる。

これらの結果は、Fig. 3に示した観察結果をよく表しており、IN内においてメニスカス下部($y_n=10.5\text{ cm}$)から吐出口上端($y_n=17.5\text{ cm}$)の間における壁面では、規則性をもたず常に気泡が接触し吐出口上端壁面において合体して大きくなった気泡が、吐出口上端部に発生する負圧による引込流⁵⁾の影響を受けて停滞することで、溝口ら⁴⁾や尾野ら⁶⁾が提案しているような耐火物と溶鋼の反応を抑制して、 Al_2O_3 の付着、堆積を妨げているものと推察される。

3.2 鑄型槽内における気泡の分散挙動

鑄型槽における気泡の分散挙動を把握することを目的に、Fig. 6に示すINの右側の範囲($y_{MD}=-2.0\sim 8.0\text{ cm}$, $x_{MD}=0\sim 8.0\text{ cm}$)について気泡の大きさを測定した。

前述のように、IN内において合体し大きくなった気泡は、吐出口上端部に集まり鑄型槽へと排出されるが、Fig. 6から分かるように鑄型槽では浮力によりIN外壁に沿って浮上する気泡と、吐出口下部から吐出噴流によって運ばれながら分散する小さな気泡が観察される。

鑄型槽内において浮上する気泡径を知るために、Fig. 6に示した気泡の測定範囲における気泡径分布を調査した。

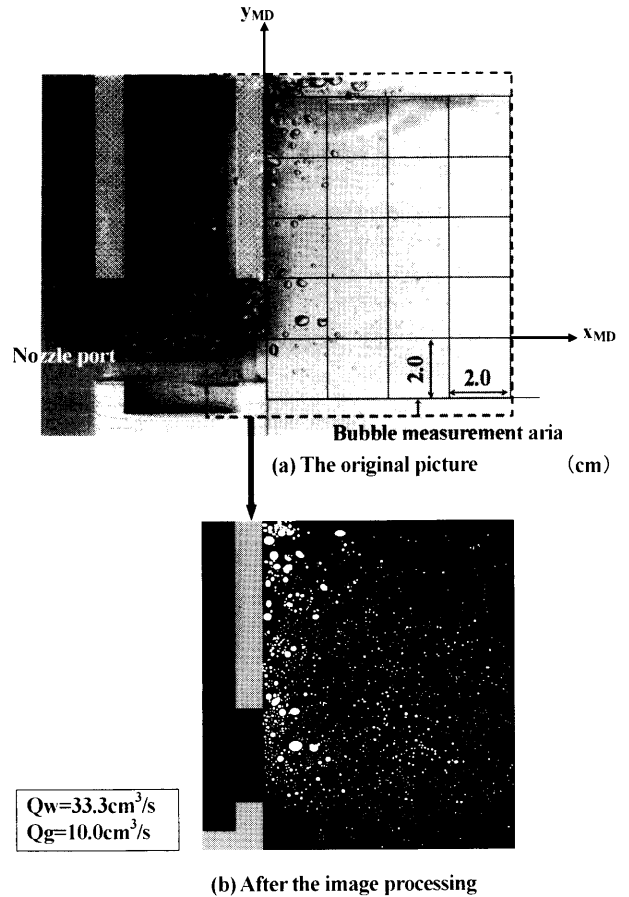


Fig. 6. Dispersion behavior of air bubbles in the mold bath.

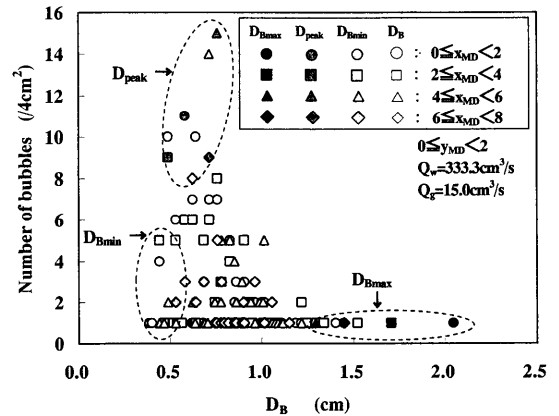


Fig. 7. An example of air bubble diameter distribution in the mold bath.

結果の一例として、 $Q_w=333.3\text{ cm}^3/\text{s}$, $Q_g=15.0\text{ cm}^3/\text{s}$, $0\text{ cm} \leq y_{MD} < 2.0\text{ cm}$ における気泡径分布をFig. 7に示す。 x_{MD} の違いによる気泡径分布の違いを見ると、最小気泡径(D_{Bmin})と気泡個数が最も多い最頻気泡径(D_{Bpeak})はいずれの領域においても差は認められないが、最大気泡径(D_{Bmax})は x_{MD} が大きいほど小さくなる事が分かる。

そこで、 x_{MD} とこれら気泡の大きさを表すパラメータ \bar{D}_B , D_{Bpeak} , D_{Bmax} , D_{Bmin} の関係をFig. 8(a)から(d)に整理した。

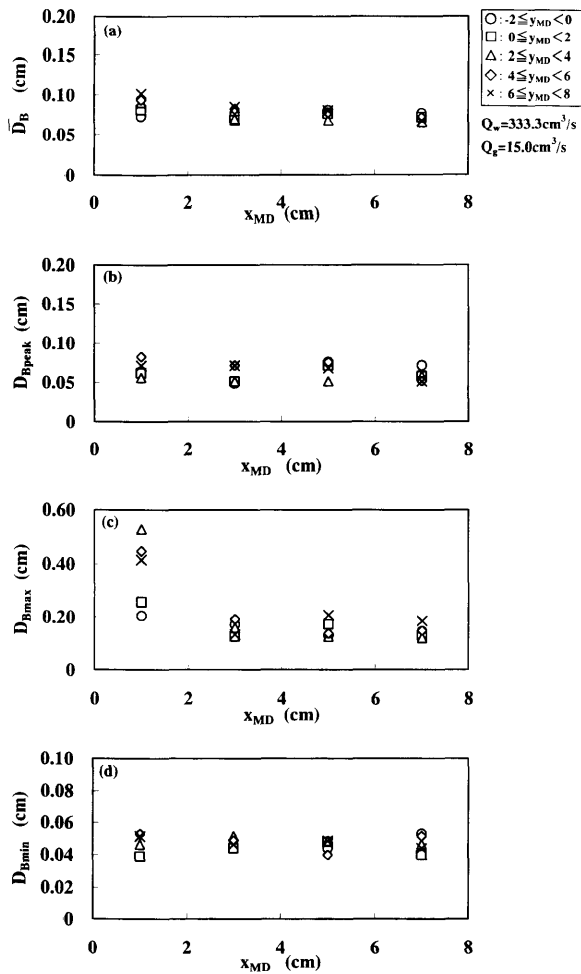


Fig. 8. Relation between x_{MD} and diameter of air bubble.

\bar{D}_B , D_{Bpeak} , D_{Bmin} は x_{MD} の領域の違いによる差は認められないが、 D_{Bmax} は $0 \text{ cm} \leq x_{MD} < 2.0 \text{ cm}$ の領域において他の領域と比較して大きく、最大 0.56 cm 程度であり他の領域の約 2 倍である。

3.3 铸型槽内における流速分布

前述した結果より、铸型槽に排出される気泡はIN近傍において浮上する大きな気泡群とINの出口で生成される噴流とともに運ばれて分散する小さな気泡に分類することができるが、铸型槽内における流動がこれらの気泡の挙動に対してどのような影響を与えるかを知ることは実機における铸片内の欠陥を防止するうえで重要なことと考える。

そこで、铸型槽内の流動特性について、LDVによる測定を行った。

Fig. 9 に $x_{MD}=3 \text{ cm}$ における吐出噴流の流速分布を示す。水平方向の流速 \bar{v}_{MD} は、ノズル吐出口下部において Q_w が大きくなるにしたがって大きくなる。一方、垂直方向の流速 \bar{u}_{MD} は、 \bar{v}_{MD} 同様 Q_w が大きくなるのにしたがって大きくなるが、 \bar{v}_{MD} とは異なり、 Q_g が大きくなると小さくなる。これらの結果はガスの存在によって吐出口内の水の通水路が狭められることと、後述するように気泡の浮力が噴流に与える影響の違いによるものと推察される。

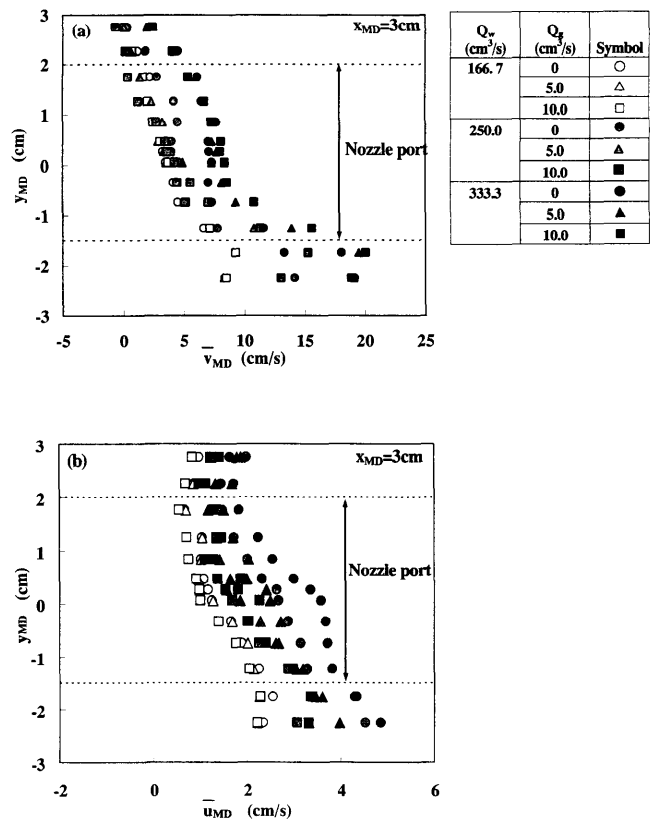


Fig. 9. Measurement results of v_{MD} and u_{MD} in the y_{MD} direction.

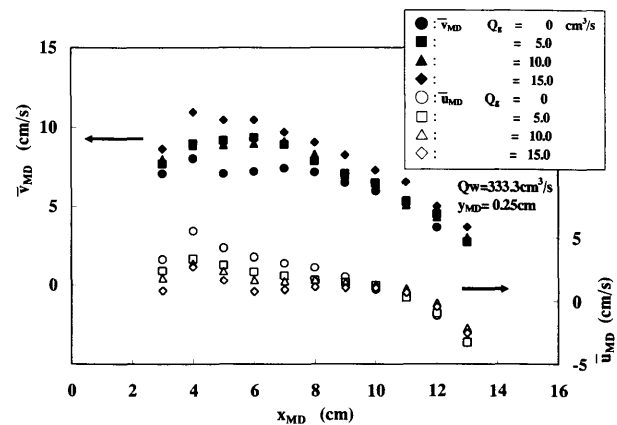


Fig. 10. Measurement results of v_{MD} and u_{MD} in the x_{MD} direction.

$Q_w=333.3 \text{ cm}^3/\text{s}$ における吐出口中央部 ($y_{MD}=0.25 \text{ cm}$) の水平方向流速分布を Fig.10 に示す。Fig. 9 に示した吐出噴流の流速分布と同様に、 Q_g が大きくなるにしたがって \bar{v}_{MD} は大きくなり、 \bar{u}_{MD} は小さくなる傾向が認められる。この結果は、矩形水槽にあらかじめ混合された気液二相流を内径 1 cm のノズルから水平方向に吹き込む実験⁷⁾ において行った水平方向における軸上流速分布測定の結果とは全く逆であった。

両者の結果の違いは、前者の実験では吹き込まれた空気のはほぼ全量が噴流内に存在し、気泡の浮力が噴流に対して

影響を与えているのに対して、本実験では前述したようにIN内において合体して大きくなった気泡が吐出口上端から鑄型槽に排出されると同時に浮上分離してしまうため、噴流に与える気泡の浮力の影響が小さくなることが考えられる。

さらに、前者の実験ではノズル径が1cmと比較的小さいため、物理的な水平軸と噴流の中心軸がほぼ一致しているのに対して、本実験ではFig. 9(a)の結果からも分かるように、INから鑄型槽内への噴流は吐出口の下端にずれていることが影響しているものと考えられる。

3.4 気泡分散挙動に与える噴流の影響

Fig. 7からFig.10の結果より、浸漬ノズル吐出口から鑄型槽へと排出される気泡の分散挙動は以下のとおりと推察される。

浸漬ノズル内で合体した気泡は吐出口上端に集し、吐出噴流の影響を受けずに鑄型槽へ排出されると同時に浮上する。

一方、吐出噴流から分離しきれない微細な気泡は吐出噴流とともに鑄型槽へと排出されるが、鑄型槽内において噴流速度は x_{MD} が大きくなるにしたがい減衰することによって、噴流内から浮上分離する。

すなわち、鑄型槽内において浮上分離する気泡の限界径は吐出噴流速度によって影響を受けるものと考えられる。

そこで、Fig. 8に示した気泡径分布のうち、 x_{MD} 方向の \bar{v}_{MD} を測定した領域に存在する3種類の気泡径と x_{MD} との関係を整理した。Fig.11に結果を示すが、 D_{Bmax} に着目するとIN吐出口近傍の \bar{v}_{MD} が大きい領域では、気泡径が0.4cmを越えるものも認められ、 x_{MD} が大きくなり吐出噴流の流速が小さくなるにしたがって気泡は浮上分離しやすくなることで、残存する気泡の大きさは小さくなる事が分かる。

本実験から得られた気泡の分散挙動を実機において鑄造中の鑄型内上面観察結果と比較すると、浸漬ノズル周辺ではしばしば局所的にガスが吹き上げる現象が認められるが、本実験結果からこの現象の原因を定性的に説明することができる。すなわち、 x_{MD} が0から2cmの領域の D_{Bmax} は他の x_{MD} の領域に比べて大きく、鑄型内において浮上分離しやすい。また、噴流軸上で x_{MD} が6から8cmの領域において浮上しない D_{Bmax} は約0.2cm程度であり、浮上しない限界を示している。この結果は笠井ら⁸⁾が報告しているスラブ内に残存しているピンホールの大きさとほぼ一致している。

一方、 x_{MD} と \bar{v}_{MD} の関係をFig.12に示すが、 $\bar{D}_B, D_{Bmax}, D_{Bmin}$ は Q_g にかかわらず、式(1)から式(3)によって整理することができ、鑄型槽内における気泡径は水平方向の吐出噴流速度によって整理することが可能である。

$$\bar{D}_B = 0.0038\bar{v}_{MD} + 0.044 \dots\dots\dots(1)$$

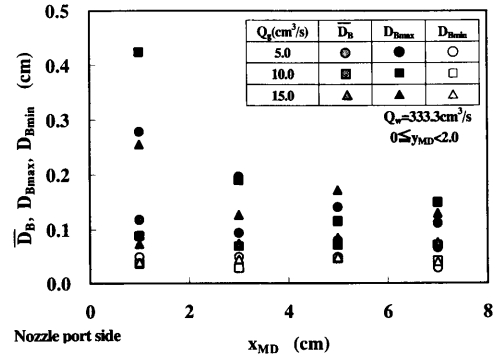


Fig. 11. Distributions of \bar{D}_B, D_{Bmax} and D_{Bmin} in the x_{MD} direction.

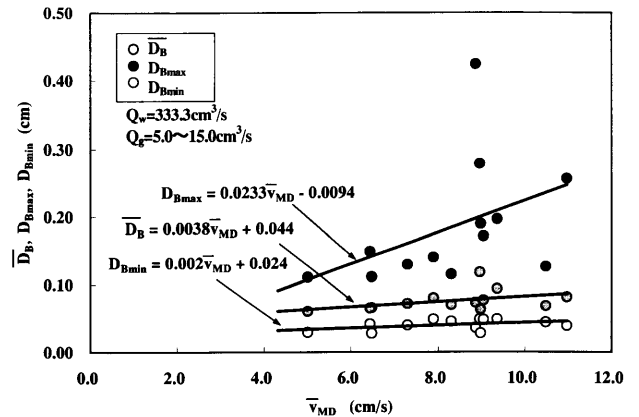


Fig. 12. Change in $\bar{D}_B, D_{Bmax}, D_{Bmin}$ in the x_{MD} direction.

Table 2. Casting conditions.

Caster	Kashima No.3CCM
Mold size	27×140~160 (cm)
Casting speed	1.75~1.95 (m/min)
Q_{Ar}	10~13 (l/min)
$Q_{Ar}/(Q_{Ar}+Q_M)$	0.0152~0.0178
Steel grade	Low Carbon steel (%C):0.040~0.050

$$D_{Bmax} = 0.0233v_{MD} + 0.094 \dots\dots\dots(2)$$

$$D_{Bmin} = 0.0020v_{MD} + 0.024 \dots\dots\dots(3)$$

3.5 実機スラブにおけるArガス吹き込みの影響

前述した水モデル実験結果より、IN吐出口から鑄型内に吹き込まれるArガスは、IN外壁に沿って上昇する気泡群と吐出噴流に乗って鑄型幅方向に分散する微小な気泡に大別されるが、これらの気泡の挙動が実機スラブの品質に与える影響を知ることを目的に、CCスラブの表皮直下における清浄性を調査した。

Table 2に鑄造条件の概略を示す。スラブ表皮直下欠陥探傷実験に用いたスラブは鹿島製鉄所第3連鑄機で鑄造された低炭40K鋼である。

清浄性評価試験は、高周波超音波Cスコープ探傷装置⁹⁾

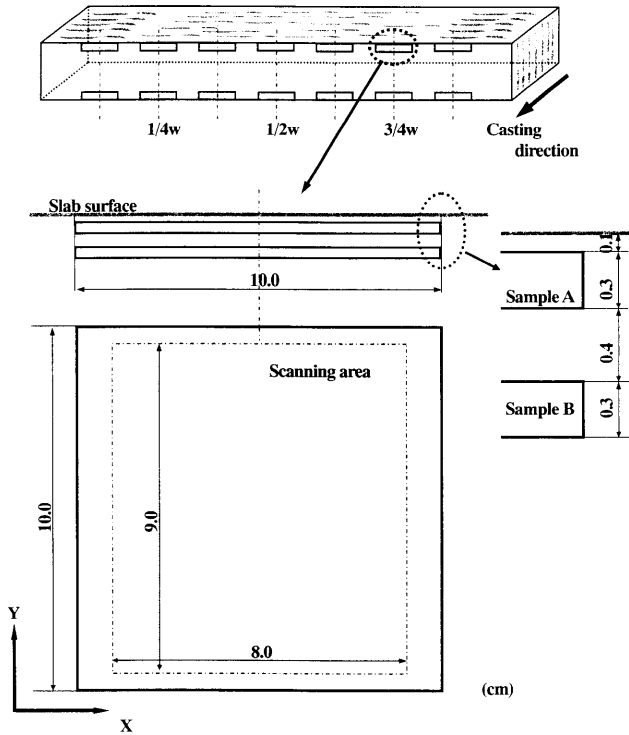


Fig. 13. Sampling positions on slab and scanning area for the high frequency supersonic flow search method.

を用いた。

Fig.13にサンプルの採取位置を示す。探傷用サンプルは図示したスラブサンプルの上下両面任意の幅位置から全部で14箇所切り出し、8.0cm×9.0cmの範囲を対象として100μmの欠陥を探傷可能な条件で行った。

探傷後ニューラルネットワークによる疵弁別機能を用いてピンホールと介在物に弁別した。Fig.14に探傷画像と欠陥分布の一例を示すが、Fig.14(b)に示すように、ピンホールと介在物は混在しており、ニューラルネットワークによる疵判別機能だけでは、パウダー起因による介在物もしくは二次酸化物かの判別は不可能である。そこで、二重指数関数による介在物種類の特定¹⁰⁾を行い、パウダー巻き込みに起因する球状介在物と気泡起因のピンホールを対象として解析に供した。

Fig.15にスラブ幅方向における球状介在物ならびにピンホールの個数分布を示す。球状介在物の個数分布は幅が140cm以上のスラブにおいて、3/8w位置から5/8w位置の間に集積する傾向が認められるが、スラブ幅の違いによる介在物個数の有意差は認められない。また、ピンホールの場合はいずれのスラブ幅においても幅中央部近傍と比較して、1/4w位置もしくは3/4w位置の外側に多く認められる。

さらに、今回調査したスラブの幅中央部における溶融パウダー起因の介在物とピンホールの個数分布について、Arガス流量との関係を調査した。ここで、Arガス流量はスラブ幅、鋳造速度を考慮して、式(4)で求められる体積

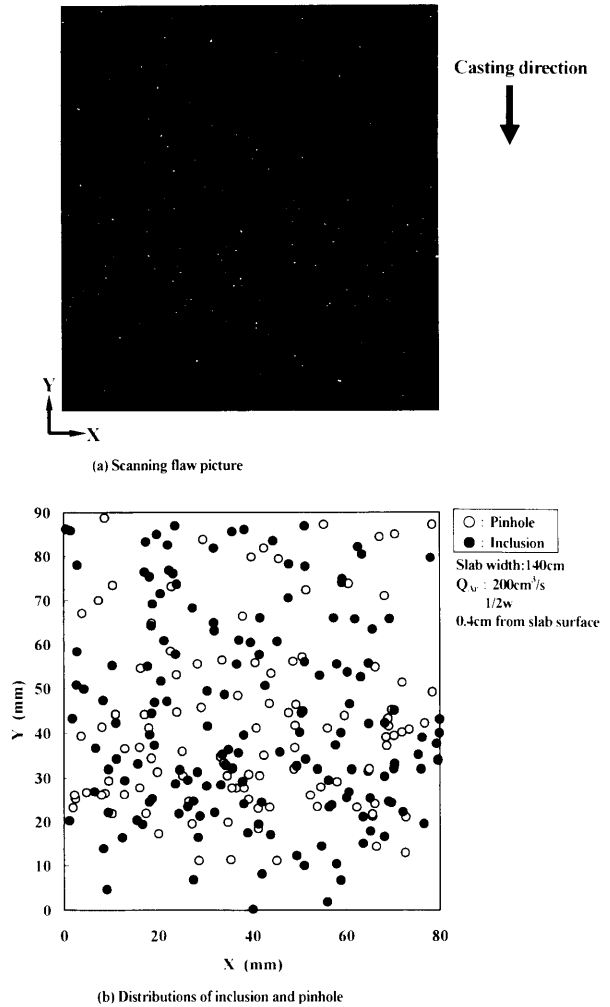


Fig. 14. Scanning flaw picture and distributions of inclusion and pin hole.

比を用いた。

$$V_{Ar} = Q_{Ar} / (Q_{Ar} + Q_{Al}) \dots \dots \dots (4)$$

ただし、 V_{Ar} : Arガス流量体積比、 Q_{Ar} : Arガス流量、 Q_{Al} : 溶銅流量。

結果をFig.16に示すが、若干のばらつきは認められるものの、 V_{Ar} が大きくなることで球状介在物は増加しピンホールは減少することが分かる。

これらの結果はSG上固定盤から吹き込まれたArガスが介在物または、ピンホールの幅方向分布に何かしらの影響を与えていることを示唆している。

すなわち、Fig. 6に示した観察結果から浸漬ノズル近傍においては比較的大きな気泡が鋳型内において浮上することで、井口ら¹¹⁾が水モデル実験によって確認しているように、メニスカスのパウダー相を抜ける際に、溶融部を溶銅中に巻き込んでいるものと推察される。

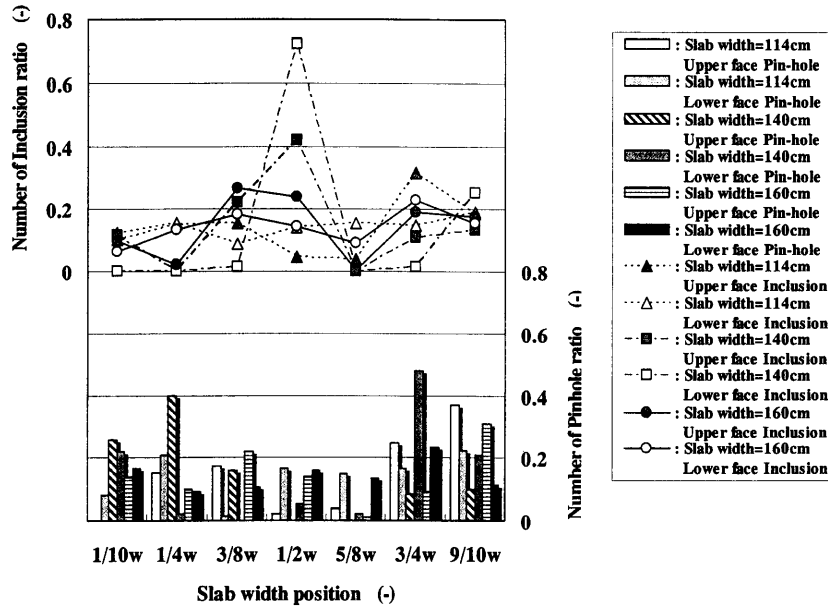


Fig. 15. Distributions of pinhole and inclusions in the slab width direction.

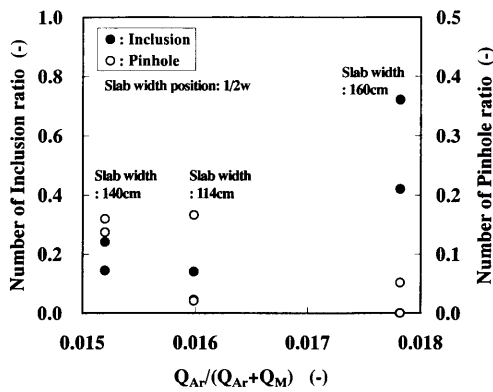


Fig. 16. Number of inclusion ratio and number of pin hole ratio as functions of $Q_{Ar}/(Q_{Ar}+Q_M)$.

4. 結言

INにおける浸漬部から鋳型内における気泡挙動とArガス吹き込みによる液の動的挙動を定量的に評価することと、スラブ品質への影響を把握することを目的に、コールドモデル実験とスラブ表皮下における介在物ならびにピンホールの分布調査を行った結果、以下の結論を得た。

(1) 水モデル実験において、SG上固定盤から吹き込まれた気泡はIN内メニスカス下部から吐出口上端の間において、中心部近傍では噴流内に留まった小さな気泡が観察され、壁面近傍では合体しながら大きくなって下降してきた気泡が観察された。また、この傾向は吐出口上端部においても同様であった。

(2) IN内メニスカス下部から吐出口上端部の間における壁面では規則性を持たず常に気泡が接触し、吐出口上端壁面において合体して大きくなった気泡が停滞することで、耐火物と溶鋼の反応を抑制しているものと推察され

る。

(3) 鋳型槽内においては、IN外壁に沿って浮上する大きな気泡と吐出噴流によって運ばれながら分散する小さな気泡が観察された。

(4) 鋳型槽内において浮上分離する気泡の限界径は吐出噴流速度の影響を受ける。本実験において噴流軸上において浮上しない気泡の限界径は約0.2cm程度であったが、この結果はスラブ内に残存するピンホールの大きさとほぼ一致する。

(5) スラブ表皮下における介在物ならびにピンホールの分布を調査した結果、幅中央部近傍では溶融パウダーの巻き込み起因の球状介在物が他の位置と比較して多く、ピンホールは1/4幅もしくは3/4幅位置の外側に多く認められた。この結果は、IN近傍で浮上する大きな気泡がパウダー相を抜ける際に溶融部を溶鋼中に巻き込んでいるものと推察される。

記号

- D_B : 気泡径
- \bar{D}_B : 平均気泡径
- D_{Bmin} : 最小気泡径
- D_{Bpeak} : 最頻気泡径
- D_{Bmax} : 最大気泡径
- Q_g, Q_w : ガス流量と水流量
- Re : レイノルズ数
- ν_L : 液体の動粘度
- u_0 : 浸漬ノズル出口における水の流速
- d_n : 浸漬ノズルの内径
- \bar{u}, \bar{v} : 液体の時間平均速度
- x_n : 浸漬ノズル中心からの水平方向距離
- y_n : スライディングゲートから下向きに計った距離
- O_n : 浸漬ノズル内座標軸原点
- O_{MD} : 鋳型槽内座標軸原点
- x_{MD} : 鋳型槽内における浸漬ノズル吐出口中心からの水平方向距離

y_{AD} : 鋳型槽内における浸漬ノズル吐出口中心からの垂直方向距離
 X, Y : 高周波超音波Cスコープ探傷幅と長さの位置
 V_{Ar} : Arガス流量体積比
 Q_{Ar} : Arガス流量
 Q_M : 溶鋼流量

文 献

- 1) N.Kasai and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **91** (2005), 6.
- 2) M.Iguchi, T.Kondoh and T.Uemura: *Int. J. Multiphase Flow*, **20** (1994), 753.
- 3) N.Kasai, M.Kawasaki, Y.Hayashi and K.Kawai: *Refractories*, **11** (1991), No. 1, 22.
- 4) Y.Fukuda, S.Mizoguchi and Y.Uejima, H.Kajioka: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1986), S280.
- 5) A.Imamura, A.Kusano and N.Moritama: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 3.
- 6) I.Ono, K.Matsumoto and Y.Endo: *Refractories*, **26** (1974), 4.
- 7) M.Iguchi and N.Kasai: *Metall. Mater. Trans. B*, **31B** (2000), B453.
- 8) N.Kasai, Y.Watanabe, T.Kajihara and M.Toyota: *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 24.
- 9) H.Ookubo, R.Murayama, A.Nakanishi, N.Kasai and H.Narita: J. JSNDI 平成9年度春季講演大会概要集, (1997), 220.
- 10) N.Kasai, T.Nishi and H.Ookubo: *Tetsu-to-Hagané*, **91** (2005), 537.
- 11) M.Iguchi, Y.Sumida, R.Okada and Z.Morita: *ISIJ Int.*, **34** (1994), No. 2, 164.