

ぞれ計算を行った。管長さは管内径の10.25倍になるように設定した。管入り口での軸方向速度は、1.0~3.0 m/s、Sw数0.17~0.67である。連続相の密度と粘度はそれぞれ7200 kg/m³、0.006 kg/m·s、分散相の密度と粒子径はそれぞれ2000~3000 kg/m³、50~800 μmである。粒子の注入位置は、管の入り口と壁からそれぞれ粒子の半径分だけ離れた位置である。粒子の軌跡は、連続相の平均流速を適用し計算を行い、平均軌跡を求めた。

3. 実験方法

介在物を模擬した気泡を用いた水モデル実験の概要を以下に示す。実験装置はオーバーフロータンク、電磁流量計、流量調節弁、測定部、介在物を模擬する気泡を注入する気

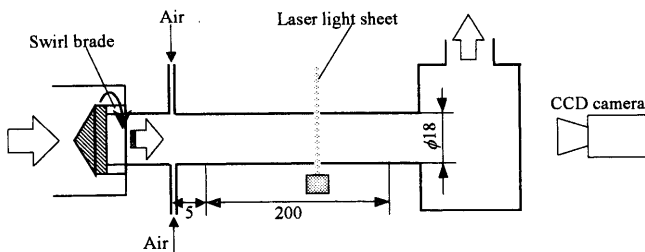


Fig. 1. Schematic diagram of the test section for the water model experiment.

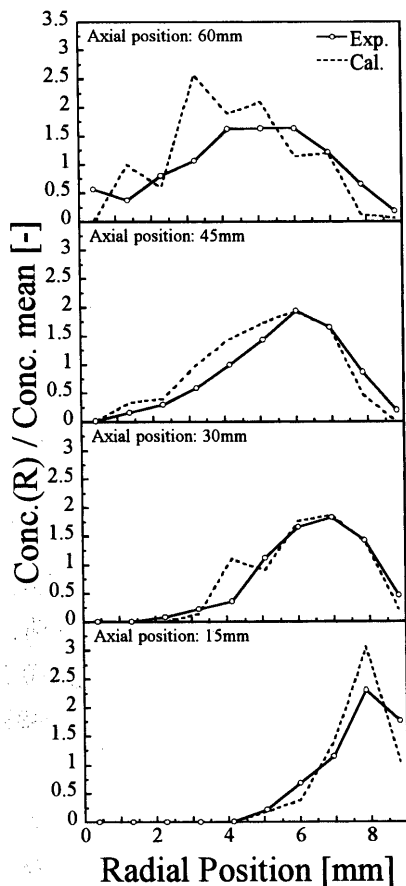


Fig. 2. Numerical and measurement radial distributions of the cross-section at each axial position for bubble existence probability ($w=0.3$ m/s).

泡注入装置、リザーバータンク、水を循環させるポンプで構成されている。測定部の構成は、旋回羽根、気泡注入装置、レーザーライトシートを作る円筒レンズ、CCDカメラ、透明アクリル製のテスト管、観察窓で構成されている (Fig. 1)。テスト管の内径は18 mm、テスト管の軸方向の平均流速は2 m/sである。気泡注入装置においては管壁に、軸対称位置2か所の気泡注入孔を設け、1か所あたり0.27 cm³/sの空気を蠕動ポンプにより定量供給した。レーザーライトシートの位置は5~200 mmの間で変化させ、任意の断面について気泡の濃度分布の測定を行った。気泡はレーザーライトシートを通過すると散乱光を発生する。発生した散乱光を管軸方向からCCDカメラで撮影した。1.6秒間、この画像を捉えつづけて時間平均を取り、気泡の濃度が高い場所が最も輝度が高くなる画像を得た。得られた画像の輝度分布から、気泡の分布に関する等高線図を作成し、各断面におけるテスト管内半径方向の気泡の濃度分布を求めた。

4. 結果と考察

4.1 旋回流中の気泡の分布

4.1.1 水モデル実験と数値計算の比較

Fig. 2, 3に実験値と計算値の平均気泡濃度の半径方向分

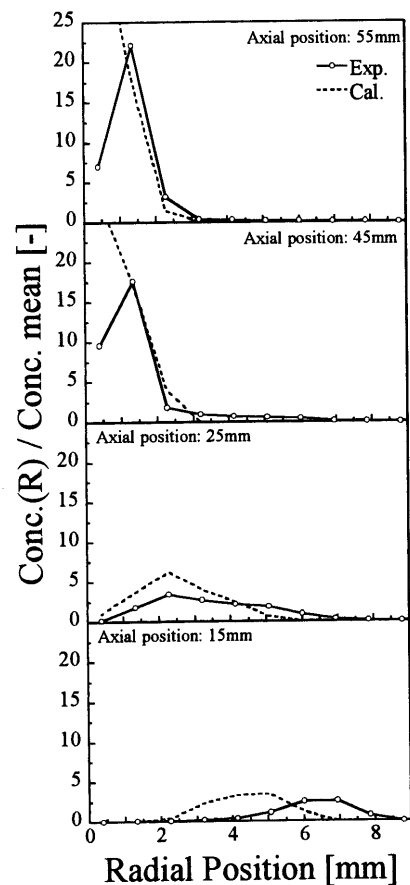


Fig. 3. Numerical and measurement radial distributions of the cross-section at each axial position for bubble existence probability ($w=1.0$ m/s).

布を示す。ここで、Axial positionはFig. 1に示すAir吹込み位置から下流に向う測定点までの距離、またRadial positionはテスト管の管軸よりの距離である。回転速度が1.0 m/sにおいても回転速度が0.3 m/sと同様の傾向を示しているが、下流45 mmですでに濃度のピークが管中心部に集中する。また、濃度のピークが管中心部に達した後では、濃度のピークは回転速度0.3 m/sの場合よりも大きい。計算値は実験値とほぼ同様の結果を示しており、回転が強ければ短い流下距離で管中心部に濃度のピークが移行する結果が得られている。したがって、数値計算は実際の粒子あるいは気泡の挙動をほぼ妥当に表していると考えられる。

4.2 溶鋼中の介在物の軌跡

4.2.1 介在物の軌跡

前項から数値計算結果は大略気泡の挙動を再現していることから、数値計算により旋回流影響下にある介在物の挙動を検討した。供試管内径は40 mm、管入り口境界条件は平均軸流速1 m/s、Swが0.17, 0.33, 0.67の基で検討を行った。2000または3000 kg/m³の密度を有する粒子径400 μmの介在物が管入り口壁面にセットされた時の介在物の軌跡に及ぼす介在物密度とSw数の影響についてFig. 4に示す。介在物は球形と仮定して、いずれの場合も、介在物は徐々に中心部に近づく傾向にあり、気泡による実験と同様の傾向を示している。介在物の軌跡は介在物の密度とSw数に対して変化しており、介在物密度は小さく、Sw数は大きいほうが管中心部に近づいている。介在物密度の変化に対して介在物の軌跡の変化は小さいことがわかる。次にFig. 4と同様な管入り口境界条件で、介在物の軌跡に及ぼす広範囲の介在物直径(50, 100, 200, 400, 600, 800 μm)の影響についてFig. 5に示す。介在物の直径が50 μmでは管壁から徐々に中心部に向かうものの、介在物径が小さくなるほど管壁から管軸に向かう距離は流下距離に比例していることが分かる。介在物の直径が800 μmになると、管内径の5倍程度移動するだけで管中心部に到達している。管内の旋回流場では、管壁から空気を吹き込むと管中心部に気柱が生成される。また、気泡は介在物を捕捉し、溶鋼中から介在物を除去することができる。したがって、大型介在物が管中心部に到達しやすいことを考慮すると、管中心部で大型介在物は捕捉しやすく、大型介在物を効果的に除去することができると思われる。

4.2.2 z=10Dにおける介在物到達半径位置 (r/R)_{z/D=10}に及ぼす介在物および流れ場の影響

本研究では、管内径、介在物密度、介在物直径、軸方向速度、回転速度を変化させ、それぞれの条件における介在物の軌跡を計算した。一般的に浸漬ノズル長はノズル径Dの10倍以下にある。また、介在物径が小さい程管壁に向かう距離が流下距離に比例することがFig. 5から明らかになっている。以上を考慮して、介在物が中心部に近づくのに影響を受けている因子を定量的にはっきりさせるため、

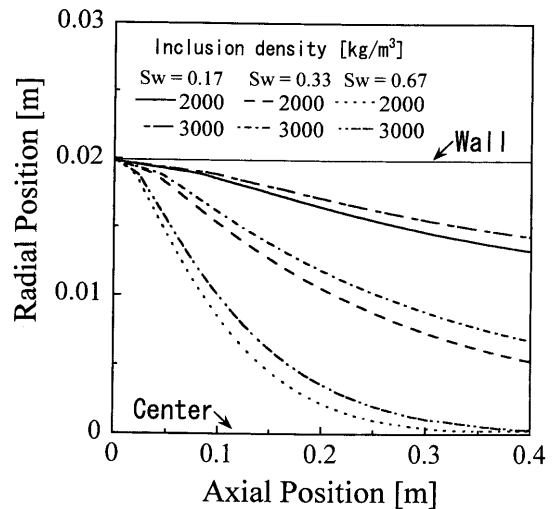


Fig. 4. Calculated effects of the inclusion density and the swirl number on an inclusion trajectory ($D=0.04$ m, $u=1.0$ m/s, $d_p=0.0004$ m).

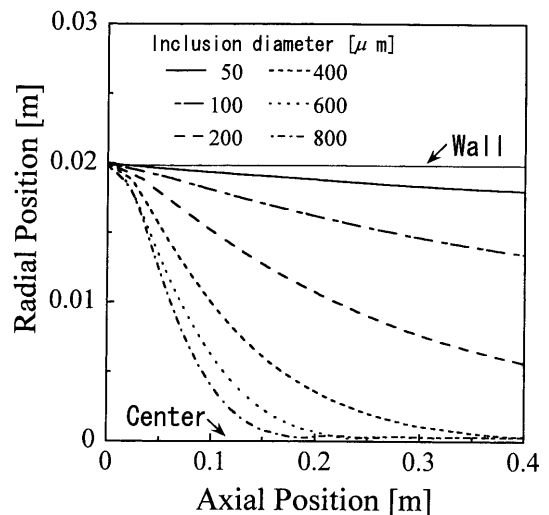


Fig. 5. Calculated effect of the inclusion diameter on an inclusion ($D=0.04$ m, $u=1.0$ m/s, $w=1.0$ m/s, $\rho_p=3000$ kg/m³).

ガス注入口より10D下流 ($z=10D$) を通過する介在物の到達半径位置について、物性値や流動条件の影響について検討した。

以下では、各因子の影響を重回帰分析により定量的に評価することを試みた。介在物の到達半径位置は、介在物物性値と流動条件に対してそれぞれ指数関数で近似することができた。そこで、計算結果を利用して、計算点の重回帰モデル計算から介在物を軸心に集めるための影響の大小を調べた。重回帰モデルを次式に示す。

$$-\ln[-\ln\{(r/R)_{z/D=10}\}] = a_0 + a_1 \cdot \ln(D) + a_2 \cdot \ln(\rho_p) + a_3 \cdot \ln(d_p) + a_4 \cdot \ln(u) + a_5 \cdot \ln(w) \dots \dots (1)$$

式(1)に対して、数値計算で得られた結果(ただし、 $0.1 \leq (r/R)_{z/D=10} \leq 0.9$)を用いて重回帰分析を行った。得られた各係数はTable 1に示す。標準偏回帰係数より介在物

Table 1. Multiple linear regression analysis for Eq. (1) ($R^2=0.9919$).

	a0	ln(D)	ln(ρ_p)	ln(d_p)	ln(u)	ln(w)
Partial regression coefficient	-14.30	0.872	0.490	-1.44	1.10	-1.71
Standard partial regression coefficient		0.474	0.098	-1.28	0.592	-1.42

Table 2. Multiple linear regression analysis for Eq. (2) ($R^2=0.9917$).

	a0	ln(ρ_p/ρ_L)	ln(Re _{pw})	ln(Re _{pu})	ln(Re _w)
Partial regression coefficient	-0.496	0.491	-2.567	1.122	0.855
Standard partial regression coefficient		0.0984	-2.122	1.093	0.889

の到達半径位置に及ぼす影響は、旋回速度、介在物直径、軸方向速度、管内径、介在物密度の順で大きいと推定できる。特に介在物密度は、他の変数と比べて非常に小さく、本計算条件の範囲内では介在物密度による差はそれほど重要ではないと考えられる。また、介在物を管中心部において捕捉するには、軸方向速度は小さく、旋回速度は大きい条件で行う必要がある。

4.2.3 z=10Dにおける介在物到達半径位置の予測式

式(1)の重回帰分析の結果より、介在物の到達半径位置は管内径、介在物密度、介在物直径、軸方向速度、旋回速度の関数で表される。そこで、介在物の到達半径位置を無次元密度 ρ_p/ρ_L 、管内流れ場に関するレイノルズ数 Re_u 、 Re_w 、粒子に関するレイノルズ数 Re_{pu} 、 Re_{pw} の関数として検討した。そして、変数減少法から ρ_p/ρ_L 、 Re_{pu} 、 Re_{pw} 、 Re_w を重回帰モデルの説明変数として採用し、介在物の到達半径位置の予測式を無次元数の関数として求めた。予測式を求めるための重回帰モデルを次式に示す。

$$-\ln[-\ln\{(r/R)_{z/D=10}\}] = b_0 + b_1 \cdot \ln(\rho_p/\rho_L) + b_2 \cdot \ln(Re_{pu}) + b_3 \cdot \ln(Re_{pw}) + b_4 \cdot \ln(Re_w) \dots (2)$$

式(2)に対して、数値計算で得られた結果 (ただし、 $0.1 \leq (r/R)_{z/D=10} \leq 0.9$) を用いて重回帰分析を行った。得られた各係数を Table 2 に示す。得られた係数を用いて式(2)を整理し、次式を得る。

$$(r/R)_{z/D=10} = \exp \{-1.642(\rho_p/\rho_L)^{-0.491} \times (Re_{pw}^{2.567}/Re_{pu}^{1.122})Re_{pw}^{-0.855}\} \dots (3)$$

式(3)と数値計算によって得られた介在物の到達半径位置を Fig. 6 に示す。介在物の直径が大きくなるとややばらつく傾向にあるが、式(3)は本計算条件範囲内において、 $z=10D$ における介在物の到達半径位置を十分に予測可能であるといえる。Fig. 5 において小さい介在物径程管壁から中心部に向かう距離が流下距離にほぼ比例している範囲では、他の位置、例えば $z=5D$ におけ小介在物の到達半径位置を式(3)からそこそこに推定できる。一方、 $100 \mu m$ 以上の介在物径の場合、Fig. 5 の非線形性から $z=5D$ の位置における重回帰の係数は式(3)の重回帰の係数と比較する

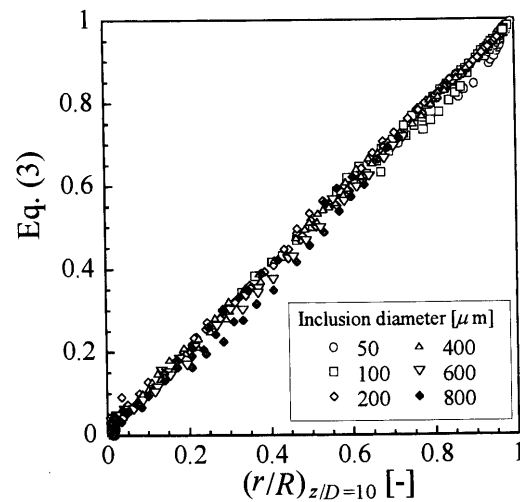


Fig. 6. Comparison between the empirical equation and the numerical calculated results.

とかなり異なってくると推定される。

5. 結言

数値計算と水モデル実験により管内流れに旋回を付与することにおける気泡の挙動について検討を行った。水モデル実験と数値計算のいずれの場合においても、気泡は管中心部へ集中する傾向が観察された。数値計算と水モデル実験は比較的整合性があることが確認され、数値計算結果は妥当なものであると考えられた。

数値計算により溶鋼中の介在物について旋回付与の効果と旋回強さ、介在物直径などの旋回の効果に対する影響の検討をした。管内の流れに旋回を付与することにより、介在物が管中心部に集まっていくことが確認された。特に、大型介在物は流下距離が短くても、管中心部に到達することが確認され、中心部において気泡と大型介在物が付着し除去できることが期待された。また、小さい介在物では、管中心部に到達はしないものの、徐々に管壁から離れる傾向が見られ、介在物が壁面に付着防止に旋回流が寄与していると考えられた。

旋回流中の介在物の半径到達位置に及ぼす影響は、旋回

速度，介在物直径，軸方向速度，管内径，介在物密度の順に強くなることが確認された。効果的に介在物を除去するには旋回速度をできるだけ大きくし，軸方向速度を小さくするほうが望ましいことを明確にした。また，介在物の密度はほかの条件に比べて影響が小さいことが定量的に示された。

管壁近傍では， $z=10D$ を通過する旋回流中の介在物の到達半径位置は，無次元数を用いて式(3)で予測できる可能性があることを示した。介在物径が $100\mu\text{m}$ 以下の場合には $z=10D$ 以下の位置での介在物の到達半径位置を(3)を用いて推定できることが分かった。

記号

D	: Nozzle diameter [m]
d_p	: Inclusion diameter [m]
R	: Radius of a nozzle [m]
$Re_{pu} = \rho_L u d_p / \mu_L$: Axial Reynolds number for an inclusion [-]
$Re_{pw} = \rho_L w d_p / \mu_L$: Swirl Reynolds number for an inclusion [-]

$Re_u = \rho_L u D / \mu_L$: Axial Reynolds number for a nozzle [-]
$Re_w = \rho_L w D / 2\mu_L$: Swirl Reynolds number for a nozzle [-]
r	: Radial position in the cylindrical coordinates [m]
$Sw = 2w/3u$: Swirl number [-]
u	: Inlet axial velocity [m/s]
w	: Inlet swirl velocity [m/s]
z	: Axial position in the cylindrical coordinates [m]
μ_L	: Viscosity of a continuous phase [kg/m·s]
ρ_L	: Density of a continuous phase [kg/m ³]
ρ_p	: Density of a dispersed phase [kg/m ³]

文 献

- 1) 内田峯夫，野々部和男，原田貴文，原茂太，丸川雄浄，横谷真一郎：精錬・凝固プロセスの高効率化への革新的技術提案，日本鉄鋼協会，東京，(2002)，61.
- 2) Y.Tsukaguchi, K.Nonobe, S.Yokoya, S.Takagi, S.Hara and K.Marukawa: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 165.
- 3) Y.Tsukaguchi, T.Watanabe, S.Yokoya, S.Hara, K.Marukawa and K.Nonobe: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 839.
- 4) S.Kosaka, M.Yoshihara, H.Hayashi, K.Iwata, Y.Tsukaguchi and S.Yokoya: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 946.
- 5) S.Yokoya, S.Takagi, M.Iguchi, Y.Asako and S.Hara: *ISIJ Int.*, **38** (1998), 1086.