

討11

タンディッシュ浴内ガス吹込みによる介在物の浮上分離

住友金属工業(株) 総合技術研究所 ○中島敬治, 川崎守夫, 笠井宣文
鹿島製鉄所 芳山純一郎, 佐藤 敦

1. 結 言

タンディッシュにおける介在物低減法については従来から多くの実験結果が報告され、大型化、堰またはガス吹込み装置の設置など介在物浮上促進に関する提案が盛んになされてきている。しかし実際上問題となるそれらの効果と介在物の大きさ、操作要因との対応関係を検討しようとするれば、明らかでない部分があり、定性的、経験的な知見を得るにとどまっている。本来、このような検討はタンディッシュ浴内の流動状態とそれに係わる介在物の浮上挙動を総合的に把握した上でなされなければならない。

そこで本報告では上記の観点に立ち、介在物の浮上挙動をできるだけ忠実に表現し、しかも解析の容易なモデルとして組合せモデルを考案し、それによって計算した結果をコールドモデル実験、実機铸造^{1),2)}実験の実験値と比較検討した。その際、操作要因による介在物浮上性の変化を定量的に明らかにした。

2. 直方体型タンディッシュにおける介在物挙動

2.1 理 論

タンディッシュ浴内は一般に様な混合ではなく場所により流動状態が異なる。そこで近似的な取扱いであるが、浴内を乱流粘性支配(あるいは慣性支配)にある混合流れ領域、粘性支配にある押出し流れ領域、その他低液体流量下の特異現象として生ずる停滞領域の3領域に分割することにより浴内の介在物挙動を考慮し、Fig.1に示す組合せモデルを導いた。このモデルに基づき、通常の直方体型タンディッシュにおける介在物の浮上効率について定常状態下で検討する。

まず、混合流れ領域においては介在物が均一に分散しており、完全混合状態にあるとして、この領域における浮上効率 $\eta_s^{(M)}$ を導くと、次式で表される。

$$\eta_s^{(M)} = 1 - C_s^{(I)} / C_s^{(I)} = 1 - 1 / (1 + k_s^{(M)} \cdot T_s^{(M)}) \quad (1)$$

$$\text{ここで、} k_s^{(M)} = (\varepsilon^{(M)} / \rho_L)^{1/3} \cdot (l^{(M)})^{-2/3}, T_s^{(M)} = V^{(M)} / Q_L, \varepsilon^{(M)} = Q_L \rho_L V_L^2 / 2 \cdot V^{(M)} \quad (2)$$

つぎに、押出し流れ領域においては介在物の分散状態の水平方向変化が大きく、垂直方向は完全混合、水平方向は混合なしの状態にあるとして、この領域における浮上効率 $\eta_s^{(P)}$ を導くと、次式で表される。

$$\eta_s^{(P)} = 1 - C_s^{(O)} / C_s^{(I)} = 1 - 1 / (1 + k_s^{(P)} \cdot T_s^{(P)}) \quad (3)$$

$$\text{ここで、} k_s^{(P)} = \{ \exp(T_s^{(P)} / t_s^{(P)}) - 1 \} / T_s^{(P)}, T_s^{(P)} = V^{(P)} / Q_L, t_s^{(P)} = H / u_s^{(P)} \quad (4)$$

ところで低液体流量下では特異現象として浴内に停滞領域が生ずる。この領域の発生による介在物の有効滞留時間の減少量 $T_s^{(S)}$ は、浴深さを代表長さとしたフルード数 $Fr (= v_L^2 / gH)$ を用いて近似的につぎのように表せる。

$$T_s^{(S)} / (T_s^{(M)} + T_s^{(S)}) = \exp(-\beta \cdot Fr) \quad (5)$$

よって停滞領域の影響も考慮した総括的な介在物浮上効率 η_s は次式で表される。

$$\eta_s = 1 - C_s^{(O)} / C_s^{(I)} = 1 - (1 - \eta_s^{(M)}) (1 - \eta_s^{(P)}) \\ = 1 - \exp(-T_s^{(P)} / t_s^{(P)}) / (1 + k_s^{(M)} T_s^{(M)}) \quad (6)$$

$$\text{ここで、} T_s = T_s^{(M)} + T_s^{(P)} + T_s^{(S)} \quad (7)$$

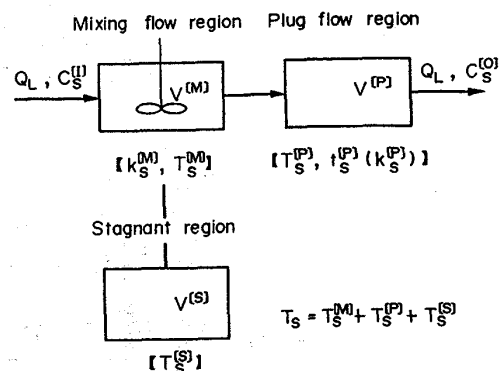


Fig.1 Mathematical model of Inclusion float-out in tundish.
[]: inclusion float-out parameters.

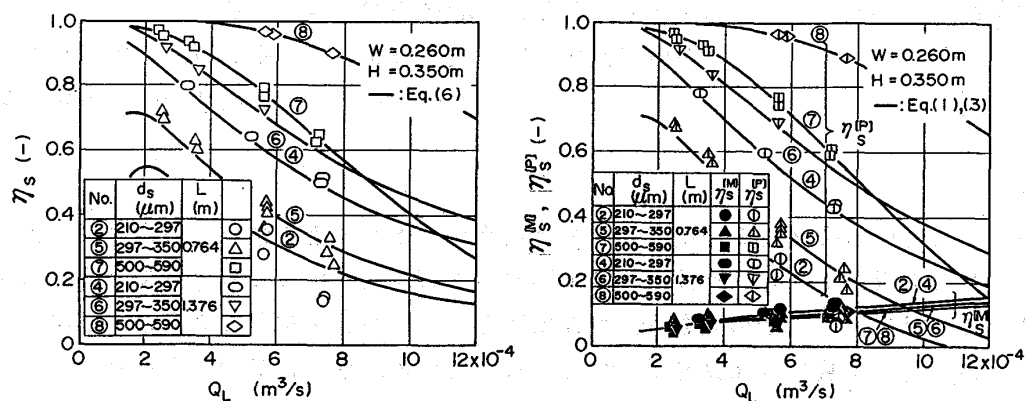


Fig.2. Influence of particle diameter d_s on variation of η_s , η_s^M , η_s^P with Q_L .

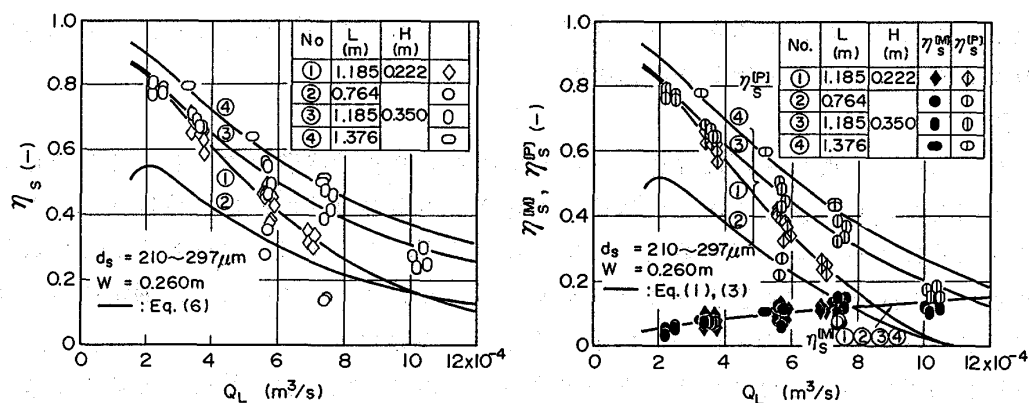


Fig.3. Influence of tundish dimensions L, H on variation of η_s , η_s^M , η_s^P with Q_L .

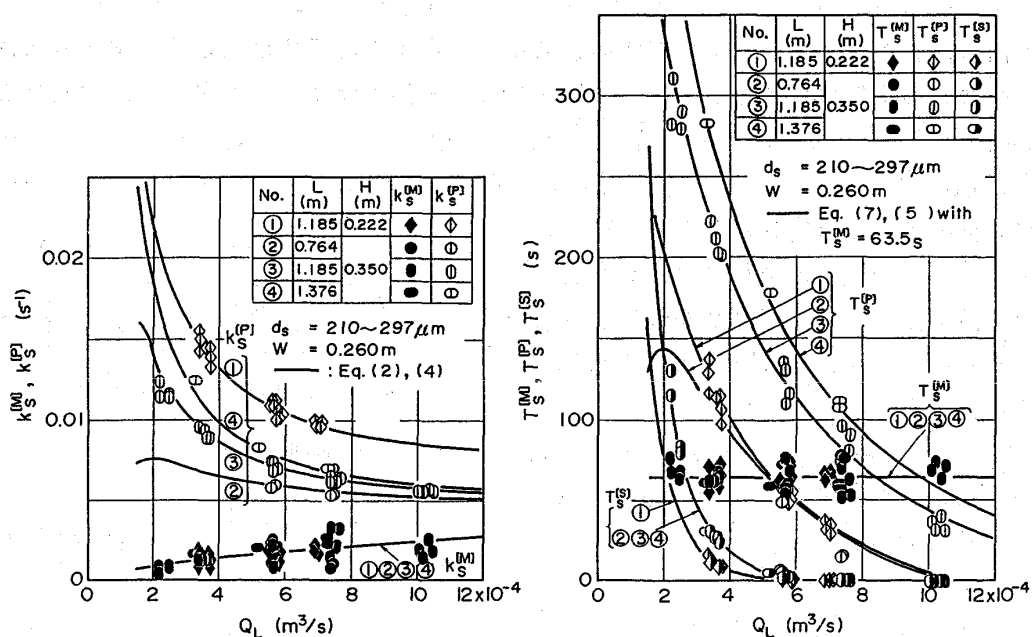


Fig.4 Influence of tundish dimensions L, H on variation of k_s^M , k_s^P , T_s^M , T_s^P , T_s^S with Q_L .

2.2 コールドモデル実験結果とその検討

(6)式から求めた総括的な浮上効率の計算値は Fig. 2, 3 に示すようにコールドモデル実験（模倣介在物：ポリエチレン粒子，模倣溶鋼：エタノール水溶液）の実験値にかなりよく一致しており，先の組合せモデルの妥当性については問題ないと考えられる。そこでこのモデルに基づき粒子の大きさ，操作要因の浮上効率におよぼす影響について，粒子浮上パラメーターの変化に主眼をおきながら検討を進める。

Fig. 2~4 は，浮上効率 $\eta_s, \eta_s^{(M)}, \eta_s^{(P)}$ および粒子浮上パラメーター $k_s^{(M)}, k_s^{(P)}, T_s^{(M)}, T_s^{(P)}, T_s^{(S)}$ が，粒子の大きさ，操作要因の値によってどのように変化するかを示したものである。本実験の範囲内では粒子の大きさによって $T_s^{(M)}, T_s^{(P)}, T_s^{(S)}$ の値があまり変化しないこと (Table 1 参照) を考慮に入れて，Fig. 2 を見れば， $k_s^{(P)}$ だけが粒子の大きさによる浮上速度 $u_s^{(P)}$ の違いから大きく変化し， $\eta_s, \eta_s^{(P)}$ に顕著な影響を与えることがわかる。そこで操作要因として液体流量 Q_L ，模型タンディッシュ浴の長さ L ，深さ H の三つを取り上げ，これらの η_s におよぼす影響を粒子径 d_s を 210~297 μm において検討することにする。その結果を Fig. 3, 4 に示す。まず η_s の液体流量 Q_L による変化について見ると，ほかの操作要因に関係なく Q_L の増加とともに η_s はかなり減少する。これは $k_s^{(M)}$ の影響も無視できないが， $k_s^{(P)}, T_s^{(P)}$ の急激な減少によると理解できる。また浴の長さ L ，深さ H については，その増加とともに前者については $k_s^{(P)}, T_s^{(P)}$ ，後者については $T_s^{(P)}$ が増加し，その結果として η_s が増加することもわかった。ただし浴深さ H については，粒子浮上パラメーターの相対的な影響度の差から Q_L の値が大きい場合にその効果が生起するようである。これらの図から各要因が浮上効率，粒子浮上パラメーターの理論値，実験値に影響する程度を読みとってまとめると，Table 1 のように整理される。また図には示さなかったが，実機鑄造実験においても各要因の値の大小による浮上効率の変化は(6)式による予測とよく一致した。

3. ガス吹込み下の介在物挙動

3.1 理 論

前章で述べたように，通常条件下ではタンディッシュ浴は3領域に近似的に分割できる。このうち取鍋からの注入流の影響がおよばない押し流れ領域に着目し，その浮上効率を向上させるため，タンディッシュ底の多孔板ガス分散器から低ガス空塔速度でガスを吹込む場合について検討する。この場合，この領域には水平方向の押し流れだけでなく，ガス吹込みによる垂直方向の循環流れが新たに生じる。そこでこの領域を循環流れ領域と呼ぶことにする。よって取鍋注入流は混合流れ領域，停滞領域を生ぜしめ，またガス吹込みによって生ずる循環流れ領域がこのほかの領域のみに生起するものと考え，このような流動状態下の介在物の浮上挙動を Fig. 5 に示す組合せモデルに基づいて解析する。

混合流れ領域，停滞領域についての考え方は前章と同じであるため省略する。循環流れ領域における介在物浮上性については，ガス

Table 1. Influence of operational factors on particle float-out parameters and particle removal efficiency.

Operational factors	Particle float-out parameters					Particle removal efficiency		
	$k_s^{(M)}$	$k_s^{(P)}$	$T_s^{(M)}$	$T_s^{(P)}$	$T_s^{(S)}$	$\eta_s^{(M)}$	$\eta_s^{(P)}$	η_s
d_s	+	++	-	+	-	-	++	++
Q_L	+	--	*	--	--	+	--	--
L	*	++	*	++	*	*	++	++
H	*	--	*	++	++	*	+	+

+, ++: Increase, -, --: Decrease, *: No. change.

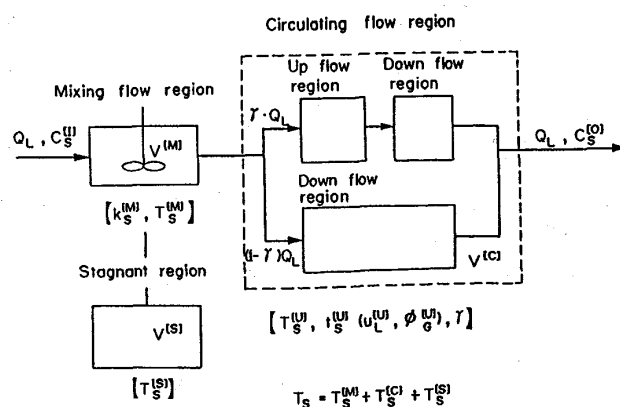


Fig. 5 Mathematical model of inclusion float-out in tundish during bubbling. []: inclusion float-out parameters.

吹込みが上昇流れ域のみの介在物浮上を促進するものとして検討する。この領域における介在物の移動過程には上昇流れ域を通過する場合、通過しない場合の2とおりの場合が起こることになるため、この上昇流れ域を通過する割合を γ とすれば、浮上効率 $\eta_s^{(G)}$ は次式で表せる。

$$\eta_s^{(G)} = 1 - C_s^{(O)} / C_s^{(M)} = \gamma \cdot \{ 1 - \exp(-T_s^{(U)} / t_s^{(U)}) \} \quad (8)$$

$$\text{ここで, } T_s^{(U)} = V^{(U)} (1 - \phi_G^{(U)}) / \gamma \cdot Q_L, \quad t_s^{(U)} = H / u_L^{(U)} \quad (9)$$

よってガス吹込み下の総括的な介在物浮上効率 η_s は、つぎのように導かれる。

$$\eta_s = 1 - C_s^{(O)} / C_s^{(I)} = 1 - [1 - \gamma \cdot \{ 1 - \exp(-T_s^{(U)} / t_s^{(U)}) \}] / (1 + k_s^{(M)} \cdot T_s^{(M)}) \quad (10)$$

$$\text{ここで, } T_s = T_s^{(M)} + T_s^{(G)} + T_s^{(S)} \quad (11)$$

3.2 コールドモデル実験結果、実機鋳造実験結果とその検討

(10)式から求めた総括的な浮上効率の計算値はFig.6,7に示すように実験値にかなりよく一致している。また操作要因として液体流量 Q_L 、ガス空塔速度 $u_G^{(U)}$ の2つを取り上げると、一般に $u_G^{(U)}$ の増加とともに η_s はかなり増加し、その傾向は Q_L が増すほど強くなることわかる。これは $\eta_s^{(M)}$ の影響も無視できないが、 $\eta_s^{(G)}$ の増加が Q_L が増すほど顕著に現われることに起因している。

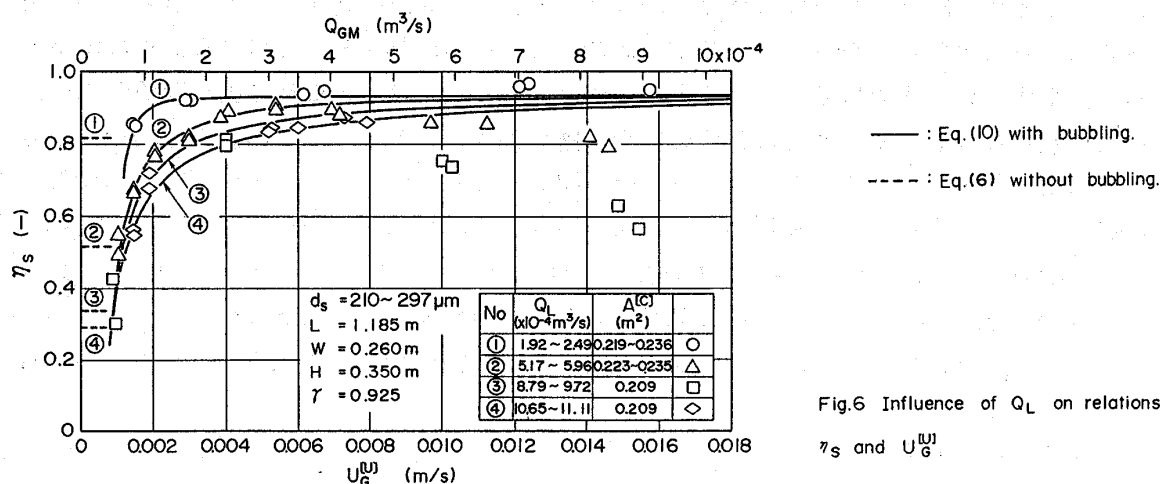


Fig.6 Influence of Q_L on relationship between η_s and $U_G^{(U)}$.

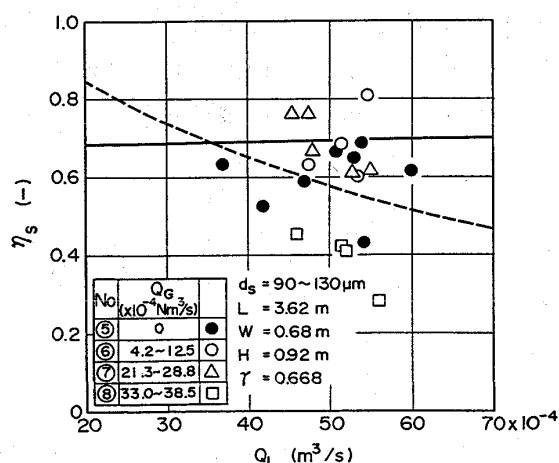


Fig.7 Influence of Q_G , Q_L on η_s in actual operation.

—: Eq. (10) with bubbling. ----: Eq. (6) without bubbling.

〔文献〕1) 中島敬治, 川崎守夫: 鉄と鋼, 73(1987), p.852

2) 中島敬治, 川崎守夫: 鉄と鋼, 73(1987), p.860

4. 結 言

タンディッシュにおける介在物の浮上挙動の解析モデルを作り、介在物の浮上性と操作要因の関係について検討を行った。浴の長さ、深さの増加など、いわゆる大型化は介在物の浮上性向上に有効であるが、溶鋼流量の増加とともにその浮上性は低下する。したがって高溶鋼流量時の浮上性向上には、ガス吹込みが有効であると判断された。

(記号) $C_i^{(j)}$: 流入時, 流出時, i 領域における粒子濃度 (kg/m^3)

$k_i^{(j)}$: i 領域における粒子分離速度定数 ($1/s$)

$T_s, T_s^{(i)}$: タンディッシュ浴, i 領域における滞留時間 (s)

$t_i^{(j)}$: i 領域における粒子浮上時間 $= H / u_i^{(j)}$ (s)

$u_i^{(j)}$: i 領域における j の垂直方向速度 (m/s)

$l^{(i)}, V^{(i)}$: i 領域における代表長さ (m), 体積 (m^3)

$e^{(M)}$: 混合流れ領域内の平均局所エネルギー消散速度 (W/m^3)

上添字 $i = C, I, M, P, O, S, U$ それぞれ循環流れ領域, 流入時, 混合流れ領域, 押出し流れ領域, 流出時, 停滞領域, 上昇流れ域に関する量
下添字 $j = G, L, S$: それぞれガス, 液体, 粒子に関する量