

## 討11 連続铸造タンディッシュにおける介在物挙動

住友金属工業(株)鹿島製鉄所 ○中島敬治・川崎守夫・丸川雄浄・芳山純一郎

### 1. 緒言

近年、連続铸造プロセスにおける介在物低減法については多くの実験結果が報告され、特にタンディッシュにおいては浴深さの増加、堰および不活性ガス底吹き装置の設置等、介在物浮上促進に関する提案がなされてきている<sup>1),2)</sup>。しかし、実際上問題となるそれらの効果と介在物粒子径、実操業条件(铸造速度など)との対応関係を検討しようとすれば、明らかでない部分があり定性的な知見にとどまっているのが現状である。

そこで本報告では、まずタンディッシュにおける介在物挙動をなるべく忠実に記述できて、しかも解析の容易なモデルとして、組み合わせモデルを導き、その計算結果とポリエチレン粒子を模擬介在物として用いたコールドモデル実験結果を比較し、タンディッシュ形状変更、堰およびガス底吹きによる介在物浮上促進効果について検討した。さらに実機铸造実験によりこれらの検証を行った。

### 2. 理論

タンディッシュ内の流動状態に関し、取鍋注入流の影響がおよぶ領域を一種の慣性支配による対流混合に近い現象であると考え、注入流の影響がおよばない領域を押し出し流れに近い現象であると考え、このような流動状態下における介在物挙動を表わすモデルとして、Fig.1に示すような組み合わせモデルを導いた。またガス底吹き条件下では、混合領域のほかに循環流動領域を考慮するなどして同様の解析を行った。なお、上記の解析においてはつぎの仮定を設けることにした。

- 1) 介在物粒子径はその移動過程で変化しない。
- 2) タンディッシュの深さ方向および幅方向の介在物濃度は均一である。

#### 2.1 タンディッシュにおける粒子浮上性

Fig.1-(a)に示すような一般的な矩形断面構造のタンディッシュにおける介在物挙動について考える。まず混合領域の粒子濃度 $C^{(M)}$ は単位体積あたりの粒子除去速度が粒子濃度に比例すると仮定すれば、次式で表わされる。

$$C^{(M)} = C^{(I)} / (1 + k T^{(M)}) \quad (1)$$

$$\text{ただし } T^{(M)} = V^{(M)} / Q \quad (2)$$

ここで  $k$  は粒子除去速度定数を表わし、後に述べるように攪拌エネルギー密度  $\dot{\epsilon}^{(M)}$  に対する実験式を用いて算出する。つぎにタンディッシュ出側での粒子濃度 $C^{(O)}$ は押し出し流れ領域での物質収支を行うことにより、次式で表わせる。

$$C^{(O)} = C^{(M)} \cdot \exp(-T^{(P)} / t) \quad (3)$$

$$\text{ただし } T^{(P)} = V^{(P)} / Q, \quad t = H / v, \quad V = V^{(M)} + V^{(P)} \quad (4)$$

いま粒子浮上性を表わす尺度として介在物除去効率 $\zeta = 1 - C^{(O)} / C^{(I)}$ を用いることにしよう。(1)式と(3)式を用いてこれを書き改めると介在物除去効率 $\zeta$ はつぎのように表わせる。

$$\zeta = 1 - \exp(-T^{(P)} / t) / (1 + k T^{(M)}) \quad (5)$$

介在物除去効率を(5)式によって推算する場合、 $t$ 、 $k$ 、 $T^{(M)}$ が

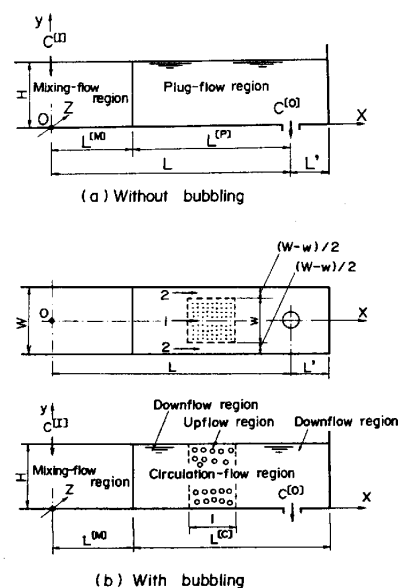


Fig.1. Calculation model of floating out of inclusion in tundish.

あらかじめ分っていなければならぬが、つぎにその決定方法について述べる。(5)式は変形してつぎのようにも表わせる。

$$T = t \cdot \log_e \{1/(1-\zeta)\} + t \cdot \log_e \{1/(1+kT^{(M)})\} + T^{(M)} \quad (6)$$

従って実験データを用いてT対 $\log_e \{1/(1-\zeta)\}$ の関係をプロットし、この直線の勾配からtが、さらに切片を $t=0$ に外挿することにより $T^{(M)}$ が近似的に求められる。つづいてこのt、 $T^{(M)}$ および(6)式からkと $\dot{\epsilon}^{(M)}$ の関係が求まる。

2.2 粒子浮上性におよぼす不活性ガス底吹きの影響

ガス底吹き条件下においては、Fig.1-(b)に示すように混合領域のほかにも上昇流領域、下降流領域の2つの領域よりなる循環流動領域を考える。そこで下降流領域は粒子の浮上に関与しないとして前節と同様の解析を行えば、ガス底吹き時の介在物除去効率について次式が得られる。

$$\zeta = 1 - \frac{1-\beta \{1-\exp(-T_P/t_P)\}}{1+kT^{(M)}} \quad (7)$$

ただし  $T_P \equiv V_P(1-\phi_P)/Q$ ,  $t_P \equiv H/v_P$ ,  $\beta \equiv w/W$  (8)

ここでガスホールドアップ $\phi_P$ 、上昇流領域内の粒子の浮上速度 $v_P$ は、上記の循環流動領域に対してBHAVARAJUら<sup>3)</sup>、佐野ら<sup>4)</sup>の手法を適用してエネルギー収支をとることにより求められる。

3. コールドモデル実験

3.1 実験方法

実験は縮尺 $M=1/2.63$ のタンディッシュ模型を用いて、粒度調整したポリエチレン粒子(密度:  $0.925 \text{ g/cm}^3$ )をロングノズルから注入し、一定時間内にタンディッシュノズルから流出した粒子を捕集、秤量することにより行った。実験条件をTable 1に示す。

3.2 介在物挙動の相似

介在物の挙動を模擬するには、流れのパターンを相似するとともに、粒子の運動も相似する必要がある。基本的には前者についてはフルード数を一致させ、後者については前章の解析から $k \cdot T^{(M)}$ および $T^{(P)}/t$ を一致させればよいだろう。

まず混合領域に関しては、幾何学的相似条件とフルード数一致の条件より、 $V_M^{(M)}/V_R^{(M)}=M^3$ ,  $Q_M/Q_R=M^{2.5}$ なる関係があるから、相似条件として次式が得られる。

$$T_M^{(M)}/T_R^{(M)}=M^{0.5} \quad (9)$$

これは浅井ら<sup>5)</sup>の解析によれば、慣性支配による対流混合を考慮した形になっている。なお、この場合kに対する相似は不満足ながら得られず、検討の余地があるように思われる。

Table 1. Experimental condition of tundish cold model.

(a) Without bubbling

Liquid height	H	22.3, 34.9	cm
Distance from pouring stream to nozzle	L	76.4, 118.5, 137.6	cm
Liquid flow rate	Q	15.0~63.1	l/min
Dam type		overflow type dam, double dam reverse double dam, triple dam	
Polyethylene particle diameter( $d_{pM}$ )		210~297, 297~350, 500~590 $\mu\text{m}$	

(b) With bubbling

Liquid height	H	34.9	cm
Distance from pouring stream to nozzle	L	118.5	cm
Ratio of w to W	$\beta \equiv w/W$	0.915	
Liquid flow rate	Q	11.5~66.6	l/min
Gas flow rate	$Q_G$	2.8~50.7	NI/min
Gas chamber volume for perforated plate	$V_C$	1.18	$\text{cm}^3$
Dimensionless parameter	$N_C$	0.56	
Dimensionless parameter	$N_W$	0.24~4.90	
Polyethylene particle diameter( $d_{pM}$ )		210~297	$\mu\text{m}$

Reduced scale of model : 1/2.63

Table 2. Relationship between polyethylen particle diameter and inclusion particle diameter calculated by Eq (12)

	Polyethylen particle diameter ( $d_{pM}$ ) ( $\mu\text{m}$ )	Inclusion particle diameter ( $d_{iM}$ ) ( $\mu\text{m}$ )	Shape factor K (-)
Particle A	210 ~ 297	105 ~ 149	0.62
Particle B	297 ~ 350	136 ~ 161	0.66
Particle C	500 ~ 590	236 ~ 278	0.60

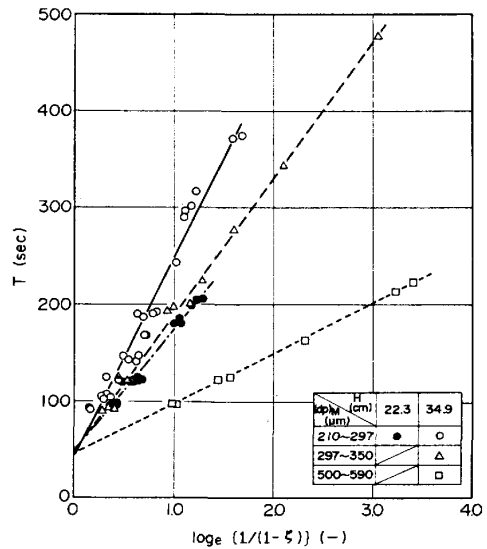


Fig. 2. Relationship between T and  $\log_e \{1/(1-\zeta)\}$ .

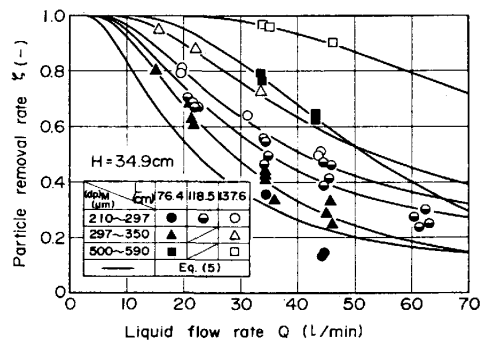


Fig. 3. Influence of liquid flow rate Q, particle diameter ( $d_{pM}$ ) and position of particle addition L on particle removal rate  $\zeta$ .

つぎに押し出し流れ領域について考えてみる。 $T^{(P)}/t$ を一致させるためには、(10)式が満足されなければならない。

$$\frac{(T^{(P)}/t)_M}{(T^{(P)}/t)_R} = \frac{H_R}{H_M} \cdot \frac{v_M}{v_R} \cdot \frac{V_M^{(P)}}{V_R^{(P)}} \cdot \frac{Q_R}{Q_M} = 1 \quad (10)$$

したがって先ほどと同様にして上式を整理すると、相似条件として次式が得られる。

$$v_M/v_R = M^{0.5} \quad (11)$$

一方、粒子の浮上速度  $v$  はストークスの法則に従うから、(11)式から介在物相当粒子径は(12)式で表わせる。Table 2に本実験で用いたポリエチレン粒子について計算した介在物相当粒子径を示す。

$$(d_s)_M/(d_s)_R = M^{0.25} \{(\rho - \rho_s)_R \cdot \mu_M\} / \{(\rho - \rho_s)_M \cdot \mu_R\}^{0.5} \quad (12)$$

### 3.3 コールドモデル実験結果に基づく検討

まず一般的な矩形断面構造のタンディッシュの実験値を用いて、先の組み合わせモデルによる介在物除去効率の推算法の妥当性を検討してみよう。Fig. 2は上記の実験結果についてT対  $\log_e \{1/(1-\zeta)\}$  の関係をプロットした例で、前章で述べた方法によってこの図から  $t$ ,  $T^{(M)}$ ,  $k$  を求めた。得られた  $k$  (sec<sup>-1</sup>) と  $\dot{\epsilon}^{(M)}$  (w/m<sup>3</sup>) の関係を示すと次式のようにになる。

$$k = 1.01 \times 10^{-3} + 7.81 \times 10^{-5} \cdot \dot{\epsilon}^{(M)} \quad (13)$$

そこでこの  $t$ ,  $T^{(M)}$  と(13)式を用いて、(5)式から組み合わせモデルによる介在物除去効率  $\zeta$  の理論値を算出した。Fig. 3, 4は組み合わせモデルによる理論値と実験値の介在物除去効率  $\zeta$  を流量  $Q$  に対して描いて比較したものである。組み合わせモデルによる理論値は全般に実験値とよく一致しており、今回の解析方法の妥当性がうかがえる。なお以後の計算においては(13)式を  $k$  の評価式として用

いることにする。そこで、これらの値を用いて粒子径、流量、タンディッシュ形状、堰およびガス底吹きの影響について理論的にあるいは実験結果より論ずることにする。

Fig. 3は介在物除去効率  $\zeta$  に対する粒子径  $d_p$ , タンディッシュ長さ  $L$ , 流量  $Q$  の影響についてまとめたものである。粒子径が大きいほど、タンディッシュ長さが長いほど、また流量が少ないほど介在物除去効率は大きくなっており、こ

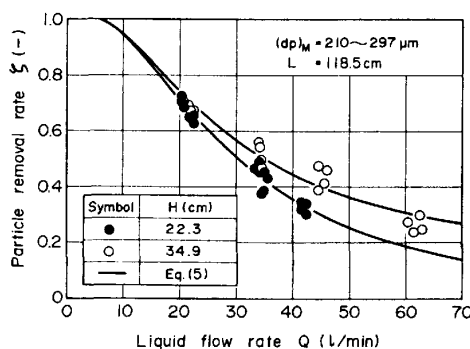


Fig. 4. Influence of liquid height H on relationship between particle removal rate  $\zeta$  and liquid flow rate  $Q$ .

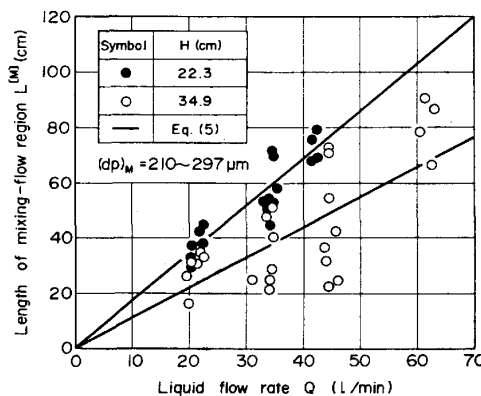


Fig. 6. Influence of liquid height H on relationship between length of mixing-flow region  $L^{(M)}$  and liquid flow rate  $Q$ .

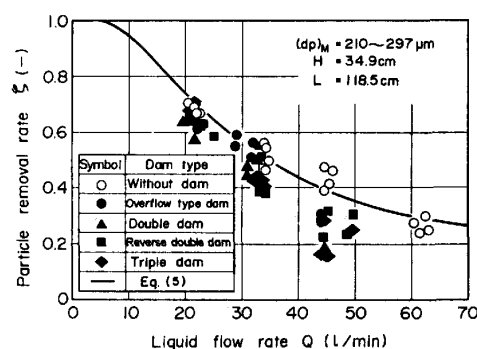


Fig. 5. Influence of dams on relationship between particle removal rate  $\zeta$  and liquid flow rate  $Q$ .

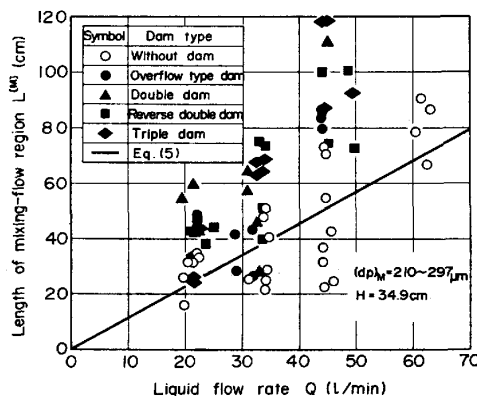


Fig. 7. Influence of dams on relationship between length of mixing-flow region  $L^{(M)}$  and liquid flow rate  $Q$ .

これらの傾向は理論的に推測される傾向と一致する。

つぎに浴深さの影響についてしらべてみると、Fig. 4に示すように流量が増すにつれて、浴深さが浅い方が介在物除去効率は低くなるという傾向が見られる。またFig. 5に示すように堰を設置した場合も同様に、流量の増加にともない介在物除去効率は低くなっている。Fig. 6, 7に、これらの場合の混合領域長さ $L^{(M)}$ を(5)式を変形することにより求め、流量 $Q$ に対して図示した。図から明らかなように、浴深さを浅くしたり、堰設置による介在物除去効率の低下は介在物除去速度の遅い混合領域が広がることにより説明できると思われる。

Fig. 8は3とおりの流量下においてガス底吹き実験を行った結果をまとめたものである。ガス空塔速度 $U_{GP}$ の増加にともなって介在物除去効率は高くなる傾向が見られるが、一部に浮上したポリエチレン粒子の巻き込みによる低下も見られる。これは循環流動領域内の下降流速度に依存するようである。さてFig. 8についても粒子の巻き込み時を除けば、理論値と実験値はかなりよく一致しており、ガス底吹き時の解析結果も十分満足なものであると思われる。

#### 4. 実機鑄造実験

前章の考察から、介在物除去効率は組み合わせモデルによる式でかなりよく表わせることがわかり、またタンディッシュ形状変更、堰およびガス底吹きによる介在物浮上促進効果についての知見も得られた。そこで、実機鑄造実験によりそれらの検証を行った。結果の一部をFig. 9, 10に示す。Fig. 9はタンディッシュ長さの影響についてまとめたものであり、(5)式を変形して得られる次式は実験値とかなりよく一致している。

$$N|_{L=361.9} / N|_{L=200.9} = \exp \{ -(T|_{L=361.9} - T|_{L=200.9}) / t \} \quad (14)$$

Fig.10は $\beta = 0.684$ なる条件下で行った不活性ガス底吹き実験の結果についてまとめたものであり、ガス底吹きによる介在物除去効率の向上も実機鑄造実験により確認された。

#### 5. 結 言

連続鑄造タンディッシュにおける介在物挙動について、その介在物浮上性とそれにおよぼすタンディッシュ形状、堰およびガス底吹きの影響に関して解析を進め、コールドモデル実験、実機鑄造実験によりそれらの検証を行った。

#### 文 献

- 1) 垣生ら：鉄と鋼，62(1976)，P. 1803
- 2) 石川ら：鉄と鋼，66(1980)，S. 866
- 3) BHAVARAJUら：AICHE J.，24(1978)，P. 454
- 4) 佐野ら：鉄と鋼，68(1982)，P. 2452
- 5) 浅井ら：鉄と鋼，68(1982)，P. 426

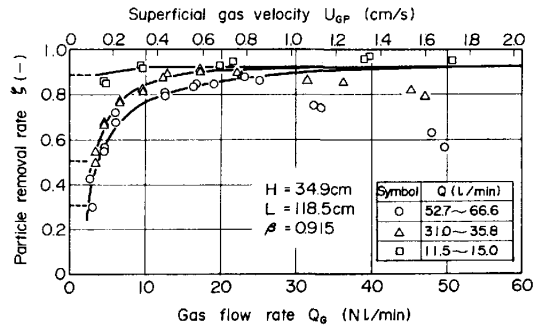


Fig. 8. Influence of gas flow rate  $Q_G$  and superficial gas velocity  $U_{GP}$  on particle removal rate  $\xi$ .  
 - - - : Eq. (5) without tundish bubbling  
 — : Eq. (7) with tundish bubbling

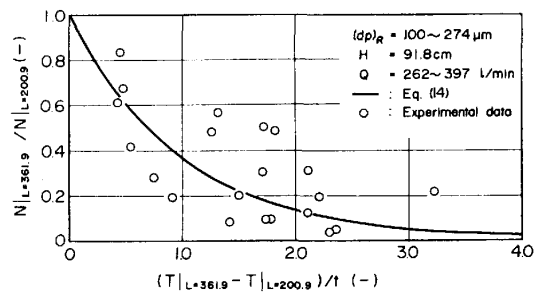


Fig. 9. Influence of distance from pouring stream to nozzle  $L$  on amount of inclusions flowed into mold.

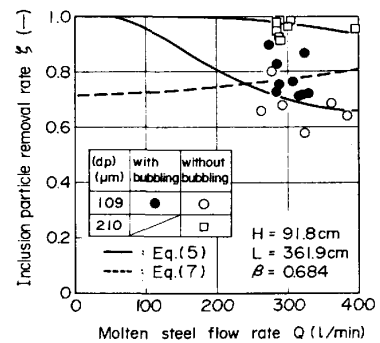


Fig.10 Effect of tundish bubbling on inclusion particle removal rate  $\xi$ .