

討 8 タンディッシュメタラジーにおける移動速度論の役割

東北大学工学部 ○ 谷口尚司, 菊池 淳

1. タンディッシュ内移動現象

連続鋳造におけるタンディッシュには溶鋼の分配、貯槽、介在物の分離、合金添加および溶鋼温度の制御など重要な役割が課せられている。これらの役割を果たすためには、タンディッシュ内溶鋼の流動現象をはじめとする各種移動現象を十分に把握し、制御する必要がある。この観点から本報ではタンディッシュ内移動現象に関する既往の研究を概観し解析法の現状を概説するとともに、関連する基礎的移動現象の解析例を紹介することを目的とした。

従来のタンディッシュ内移動現象に関する研究はその大半が介在物の分離除去に関連して行なわれている。流れに関する研究は、水モデル実験と流動の数値解析とに分類できる。前者の研究では、相似条件としてフルード数¹⁾²⁾またはフルード数とレイノルズ数³⁾を実機と合致させ、フローパタンの観察、排出濃度曲線の解析、模擬介在物粒子の浮上分離特性の検討などが、タンディッシュ内流れ制御（ダム、堰、バブリング等）と関連して検討されている。しかし流れ制御の効果については十分な説明が得られているとは言えない²⁾。一方、流動の数値解析は近年盛んに行なわれており^{4)~6)}、その主流は $k-\epsilon$ モデルによる三次元解析である^{6)~8)}。これにより、タンディッシュ内の時間平均の流速分布が求められ、それが介在物粒子の浮上軌跡の計算に利用されている⁴⁾⁶⁾。また、熱移動を考慮した計算も行なわれ⁹⁾¹⁰⁾、自然対流が介在物浮上に有効なことが指摘されている⁹⁾。従来から乱流が介在物粒子の凝集、肥大や壁への付着に寄与することが知られているが¹⁰⁾¹¹⁾、計算で求めた乱流特性値（ k 、 ϵ 、 ν_t 等）をタンディッシュ内介在物挙動の解析に利用した例はない。介在物の固体壁への付着挙動を利用したフィルターの基礎研究も多く行なわれているが¹²⁾、移動速度論的観点からの解析は遅れている。また、タンディッシュに加熱装置を付置して温度制御を行なうことにより、非定常部の介在物の問題が解決されつつあるが¹³⁾、そのメカニズムには不明の点も残されている。

2. 流動解析

2.1 流れの基礎式（ $k-\epsilon$ モデル）

流速と圧力について時間平均量（ u_i , p ）と変動量（ u_i' , p' ）とに分け、 $U_i = u_i + u_i'$, $P = p + p'$ のように表す。これを非圧縮流体の連続の式とナビエ・ストークスの式に代入し時間平均後、勾配拡散モデル（Boussinesq近似）を適用すれば（1）、（2）式を得る。

$$\sum_j \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{D u_i}{D t} = \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \mu_t) (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i \quad (2)$$

乱流粘性係数 μ_t を2つの変数 k （乱流運動エネルギー）と ϵ （乱流エネルギー散逸率）で記述する。

$$\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \epsilon \quad (3) \quad \text{ここに、} k = \frac{1}{2} \sum_i \overline{u_i' u_i'}, \quad \epsilon = \frac{\mu}{\rho} \sum_i \sum_j (\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i}) \frac{\partial u_i'}{\partial x_j}$$

k 方程式、 ϵ 方程式は（4）、（5）式で与えられる。

$$\rho \frac{D k}{D t} = \mu_t \sum_i \sum_j (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \sum_i \frac{\partial}{\partial x_i} [(\frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu) \frac{\partial k}{\partial x_i}] \quad (4)$$

$$\rho \frac{D \epsilon}{D t} = C_1 \mu_t \frac{\epsilon}{k} \sum_i \sum_j (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} + \sum_i \frac{\partial}{\partial x_i} [(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} + \mu) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}] \quad (5)$$

以上の式に含まれる定数には次の値が用いられる。

$$C_\mu = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

以上、（1）～（5）式が（ u_i , p , μ_t , k , ϵ ）を未知変数とする流れの基礎式である。

$$11.7 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right)^2 (\tau_1 - \tau_2)^2 \frac{(v\epsilon)^{1/2}}{R^2} = 44 (d_{p1} - d_{p2})^2 \epsilon^{1/2} \quad (9)$$

これより②項と③項とが同じオーダーになる条件はたとえば $\epsilon = 5 \text{ cm}^2/\text{s}^3$ で $|d_{p1} - d_{p2}| = 0.10 \text{ cm}$, $\epsilon = 2000 \text{ cm}^2/\text{s}^3$ では $|d_{p1} - d_{p2}| = 0.023 \text{ cm}$ となり、2つの粒子の寸法差が極めて大きい場合を除き、②項は③項に比して無視できることになる。

最近の $k-\epsilon$ モデルによる計算⁹⁾では、タンディッシュ内の ϵ は $1000 \text{ cm}^2/\text{s}^3$ 程度で、これよりタンディッシュ内の粒子の凝集プロセスには乱流による粒子間の衝突(③項)が大きく寄与していることが示唆される。

(3) 壁への衝突・付着

フィルター、堰、ノズルなどの固体壁表面には介在物が付着する。この現象の解析には、化学工学の分野で集積されている乱流からの微粒子の壁面付着に関する諸式が利用できる。粒子の壁への付着速度 $W (\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ は、粒子のブラウン拡散と乱流拡散とにより(10)式で表されている。

$$W = (D_B + D_t) \frac{dC}{dy} \quad (10)$$

ここに y は壁からの垂直方向距離、 C は粒子濃度 (g/cm^3) である。今、粒子付着速度 V_d (=粒子付着の物質移動係数) を $V_d = W/C$ (cm/s) と定義する。ところで壁付近の乱流は壁に近づくにつれて乱流域、緩衝層、粘性底層へと変化し、各領域で乱流拡散係数 D_t の大きさが異なる。

FriedlanderとJohnstone¹⁷⁾は、粒子が乱流から与えられた運動量 $m_p v_{p0}$ を粘性抵抗で消費し、停止するまでの距離

(stopping distance), $S = m_p v_{p0} / 3\pi\mu d_p$ を考え、壁から S の距離に運ばれた粒子は無条件で壁に付着すると考えた。 v_{p0} が乱流変動速度 (r.m.s) に等しいとすれば、その値は実験より $V_{p0} = 0.9 u_{av} \sqrt{f/2}$ と与えられる。ここに f は管内摩擦係数で管レイノルズ数から算出される。Friedlanderらは $y = S$ で $C = 0$ とし、 y によって変化する D_t を考慮して(10)式を積分することにより V_d の理論式を導いた。この式を実測値と比較して Fig. 2 に示した。

図は $V_d^+ (= V_d / \sqrt{f/2} u_{av})$ と無次元粒子緩和時間 $\tau_p^+ (= S \sqrt{f/2} u_{av} / 0.9 v)$ との関係で示されている。図には最近提案された実験式も合わせて示した。

理論式を用いて溶鋼中介在物の付着速度を推算してみる。計算条件は文献⁹⁾を参照し、タンディッシュ巾 65 cm 、溶鋼高さ 75 cm 、ノズル径 5.4 cm 、ノズル内溶鋼速度 $767 \text{ cm}/\text{s}$ とする。 V_d の計算値を Table 1 に示した。表より介在物はタンディッシュよりノズル内で付着しやすく、また粒子径の大きいもの程付着しやすいことがわかる。しかしながら V_d の値はかなり小さく、介在物の付着機構がFriedlanderらの機構のみであるとは考えにくい。

ところで、速度勾配 dU/dy の中を流れの向きに移動する粒子は回転し、揚力を受ける(Magnus効果)。

Saffmanは層流境界層内における球形微小粒子に働く揚力の式を理論的に導出した。¹⁴⁾

$$f_L (\text{cm}/\text{s}^2) = -K \frac{\rho v^{1/2} (U_p - U)}{d_p \rho_p} \left| \frac{dU}{dy} \right|^{1/2} \quad (11)$$

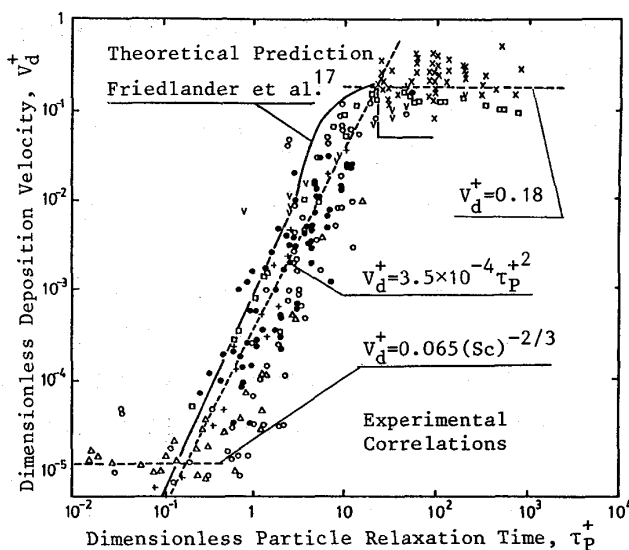


Fig. 2. Theoretical and experimental correlations on particle deposition velocity.

Table 1. Predicted mass-transfer coefficient for particle adhesion to wall.

$d_p / \mu\text{m}$	Tundish Re=35,300	Nozzle Re=580,000
1	$V_d = 3.2 \times 10^{-11}$	1.5×10^{-4}
10	3.2×10^{-9}	1.5×10^{-2}
50	8.0×10^{-8}	0.56

(11) 式より粒子速度が流体速度より大きい場合には、壁の向きに速度勾配の1/2乗に比例する揚力が生ずる。この式をタンディッシュ内の介在物付着現象の解析に適用した例はいまだなく、今後の研究が望まれる。

(4) 気泡による介在物の捕捉

気泡への介在物の付着原理はストークス衝突のそれと同様であるが、特に気泡の場合には気泡周囲の流線を考慮した検討が行なわれている¹⁹⁾。しかしながら従来の解析は静止液体中の上昇気泡に関するもので、タンディッシュ内におけるように乱流で流れている溶鋼中を気泡流が横切る場合の解析は見当たらない。

4. タンディッシュ内の基礎的移動現象

基礎的移動現象のうちで特に重要と思われる気泡分散流の挙動について触れる。気泡分散流の解析法は種々提案されているが、本章では著者らの気泡分散モデル²⁰⁾を紹介する。本モデルの基礎式は(12)～(14)式で与えられる。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r) + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

$$u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = \nu_t \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \sigma g \quad (13)$$

$$u_r \frac{\partial \sigma}{\partial r} + (u_z + w) \frac{\partial \sigma}{\partial z} = D_t \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \sigma}{\partial r} \right) \quad (14)$$

$\nu_t = D_t$ として(12)～(14)式を解きその解と気泡率分布の実測値とを対比することによって ν_t を求めた。その結果を種々の実験系で比較してFig. 3に示した。図より ν_t は実験系の相違によらずほぼ1つの関係で表されている。本章で求められた ν_t と介在物の捕捉との関係は今後検討されるべき項目と考えられる。

文献

1) Y. Sahai and R. Abuja: Ironmaking and Steelmaking

13 (1986) p. 241

2) H. Nakajima et al.: 5th IISC, Steelmaking

Proceedings, Vol. 69, Washington, DC 1986, p. 705

3) D. J. Harris, J. D. Young: Steelmaking Proceedings,

Vol. 65, Pittsburgh, 1982, p. 3

4) 中田他: 鉄と鋼, 69(1983), S212

5) T. DebRoy and J. A. Sychterz: Metall. Trans. B, 16B

(1985), p. 497

6) 森他: 鉄と鋼, 71(1985), S260

7) K. Y. M. Lai et al.: Metall. Trans. B, 17B(1986), p. 449

8) Y. He and Y. Sahai: 5th IISC, Steelmaking Proceedings, Vol. 69, Washington, DC 1986, p. 745

9) J. Szekely and N. El-Kaddah: ibid. p. 761

10) U. Lindborg and K. Torssell: Trans. Met. Soc. AIME, 242(1968), p. 94

11) T. A. Engh and N. Lindskog: Scand. J. Metallurgy, 4(1975), p. 49

12) 杉谷、市橋: 学振製鋼19委討論会資料 1985年10月24日

13) 吉井他: 鉄と鋼, 71(1985), p. 1474

14) S. L. Soo: Fluid Dynamics of Multiple Systems, (1967), (Blainsdell)

15) 松本: 化学工学, 50(1986), p. 231

16) P. G. Saffman and J. S. Turner: J. Fluid Mech., 1(1956), p. 16

17) S. K. Friedlander and H. F. Johnstone: Ind. Eng. Chem. 49(1957), p. 1151

18) P. G. Saffman: J. Fluid Mech., 22(1965), p. 385

19) A. G. Szekely: Metall. Trans. B, 7B(1976), p. 259

20) A. Kikuchi et al.: 5th IISC, Process Technology Proceedings, Vol. 6, Washington, DC 1986, p. 369

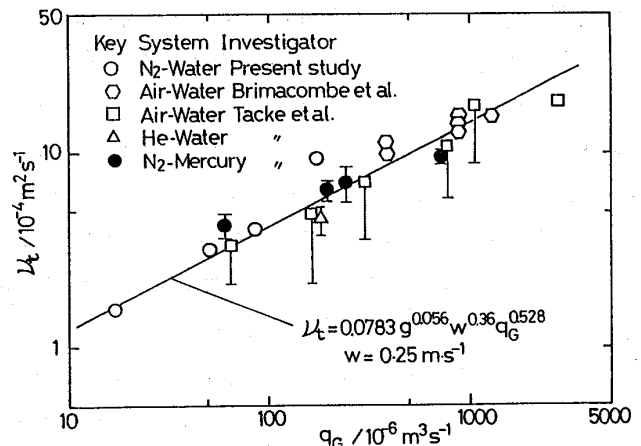


Fig. 3. Turbulent diffusivity in bubble-dispersion zone.