

(論文)

溶鋼中微小介在物の凝集予測技術

Agglomeration Simulation of Small Inclusion Particles in Molten Steel



中岡威博*(工博)

Dr. Takehiro Nakaoka

In the steelmaking process, inclusion particles in molten steel are agglomerated by turbulent collision, and if the enlarged inclusions remain, they would become defects in the solidified steel. A simulation model for predicting the change in inclusion amount and size distribution was developed, using a turbulent agglomeration model that took into consideration effect of particle wettability. Using fluid flow analysis together with this inclusion agglomeration model, the particulars of inclusion behavior in molten steel was clarified.

まえがき = 鉄鋼材料の高清浄化のニーズは年とともに強まっており、溶鋼中に存在する介在物を効果的に除去することが、製鋼プロセスでの重要な課題になっている。数 μm の微小な介在物粒子は単独での除去は困難であるが、凝集して巨大化した場合には浮力差を用いて浮上分離が可能である。しかし、凝集して巨大化した介在物が浮上分離せずに鋳片中に残存すると重大な欠陥となる可能性がある。

一方、介在物を低減するのではなく、鋼中に微細分散させることにより、結晶粒の成長抑制をおこない鋼材の特性向上を図るオキサイドメタラジ-の技術も検討されている。

このような課題に対処するために、溶鋼中の介在物挙動を明らかにして積極的に制御する技術が求められている。介在物の挙動を検討するにおいて、介在物の大きさの変化を問わず粒子同士の凝集体は非常に重要な現象であり、各種の凝集のモデル^{1)~3)}が提案されている。

しかし、介在物粒子の形状および濡れなど粒子表面の性質が凝集速度に及ぼす詳細な影響については明らかにされていないこと、また介在物の粒子径ごとの濃度の時間変化(ポピュレーションバランス)を表すモデルにおいて精度良く予測できない場合⁴⁾があるなど、問題が存在していた。

そこで、表面の性質を考慮した介在物の乱流凝集のモデル化をおこない、溶鋼流動と連成して精度良く介在物の粒子径ごとの濃度分布と時間変化が予測可能なモデルの構築をおこなった。

1. 粒子の凝集モデル

1.1 乱流凝集理論

介在物の凝集体の成長と個数の変化は、介在物の個数濃度の釣合いの変化を表すポピュレーションバランス式

と一対の粒子の衝突の頻度を示す凝集係数の組合わせで表される。

k 個の単位介在物粒子から構成される凝集体の個数濃度 $n_k(\text{m}^{-3})$ の時間変化は、Smoluchowski のポピュレーションバランス式⁵⁾が用いられている。しかし、この式は同 - の個数から構成される凝集体同士の衝突の取扱いに誤りがあったため⁶⁾、次に示す修正した式(1)を用いた。

$$\frac{dn_k}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{i=1, i \neq k}^{i=k-1} (1 + \delta_{ij}) N_{ij} - \sum_{i=1}^{i=k} (1 + \delta_{ik}) N_{ik} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 δ_{ij} は Kronecker のデルタ関数で、 $i = j$ の場合 $\delta_{ij} = 1$ 、 $i \neq j$ の場合 $\delta_{ij} = 0$ である。 N_{ij} は i 個と j 個からなる凝集体の単位時間・単位体積あたりの粒子の衝突回数 ($\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$) である。

製鋼プロセスでは攪拌や熱対流により溶鋼には強い乱れが存在しており、介在物の凝集は乱流凝集が支配的⁷⁾であると考えられている。そこで、次に示す Higashitani らの乱流凝集のモデル⁸⁾を用いて粒子の衝突頻度を表した。

$$N_{ij} = [1.3(a_i + a_j)(\zeta / \nu)^{1/2}]^2 n_i \cdot n_j \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 a は粒子半径(m)、 ζ は粒子を取巻く溶鋼の乱流エネルギー消散速度 (m^2/s^3)、 ν は溶鋼の動粘性係数 (m^2/s) である。 ζ は凝集効率であり、Saffman-Turner のモデル⁹⁾に流体の粘性および粒子間の電子分極に基づく London-van der Waals 力の影響を考慮しており、式(3)で表される。

$$= 0.727 \left[\frac{\mu a_1^3 (\zeta / \nu)^{1/2}}{A_{131}} \right]^{-0.242} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 μ は溶鋼の粘性係数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)、 A_{131} は粒子1が媒介3中に存在する場合の実効 Hamaker 定数(J)、 a_1 は単一粒子の半径(m)である。

1.2 凝集に及ぼす濡れの影響

界面活性元素が溶鋼中に含まれている場合や、溶鋼と

*技術開発本部 機械研究所

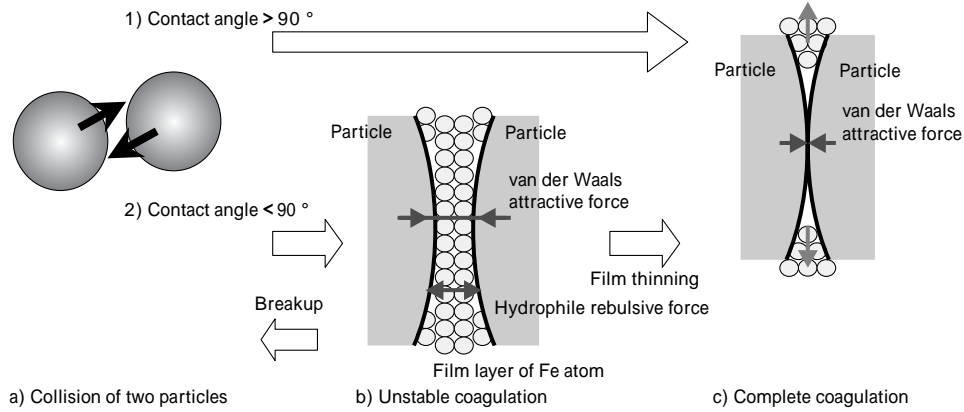


図1 粒子結合過程の説明 (濡れの影響)

Fig. 1 Schematic view of agglomeration of particles (Effect of wettability)

の接触角が小さく濡れの良いスラグ系の介在物では、凝集速度が遅くなることが知られている¹⁰⁾。

この原因として、濡れの良い粒子では介在物粒子が原子レベルで完全な結合に至るまでに、図1に示す鉄原子を挟んだ見かけ上の弱い結合の時間が存在し、その期間での再分裂によると考えられている⁴⁾。そこで、乱流凝集の式(2)に濡れなどの表面性質により凝集速度が遅くなる補正項を加えた式(4)を適用した。

$$= \left(\frac{N_0}{e^{27.34}} \right)^{C_2} \cdot 0.727 \left[\frac{\mu a_1^3 (\xi / \nu)^{1/2}}{A_{131}} \right]^{-0.242} \dots \dots \dots (4)$$

表面性質による補正 Higashitaniの乱流凝集モデル

ここに、 C_2 は粒子の表面の性質を示すパラメータであり、溶鋼との濡れの悪い場合(接触角度 $< 90^\circ$)は凝集の遅れが発生しないため0を、濡れの良いまたは粒子形状が不定形の場合はその程度に応じて-1.0から0.0までの値を適用する。

1.3 区分散化モデル (PSG モデル)

溶鋼中には核生成初期に生じた数 μm 以下の単一粒子から数千個以上の粒子からなる数百 μm 以上の凝集体が存在しており、すべての凝集体について式(1)を用いて計算をおこなうには多大な計算負荷がかかり、実プロセスの評価に用いるのは困難である。そこで、粒子の凝集体を代表径 $a^*_{-1} \sim a^*_M$ を持つ M 個のグループに分割し、グループごとの凝集を考慮する区分散化モデル (Particle-Size-Grouping Model) を開発した¹¹⁾。

グループごとの凝集体の濃度 n^*_k は、隣り合うグループの体積比($R_V = V^*_k / V^*_{k-1}$, $V^*_k = 4/24 (a^*_M)^3$)が一定となるように分割をおこなう。

衝突による2グループの凝集は、新たに生成した凝集体の直径によって適切なグループに分類することで表す。この分類の時点で、粒子の体積の収支が釣合うように補正を行う。これらの過程を示すグループ化されたポピュレーションバランス式を式(5)で表す。

$$\frac{dn^*_k}{dt} = \sum_{i=l_{k-1}}^{k-1} i_{i,k-1} N^*_{i,k-1} + \sum_{j=1}^{l_{k-1}} i_{i,k} N^*_{i,k} - \sum_{i=l_k}^{M-1} (1 + i_k) N^*_{i,k} \dots \dots (5)$$

ここに、 N^*_{ij} は*i*番目と*j*番目の凝集体グループの単位時間・単位体積あたりの粒子の衝突回数 ($\text{m}^{-3} \text{s}^{-1}$) であり、以下の式(6)で表される。

$$N^*_{ij} = [1.3(a^*_i + a^*_j)(\xi / \nu)^{1/2}] n^*_i n^*_j \dots \dots \dots (6)$$

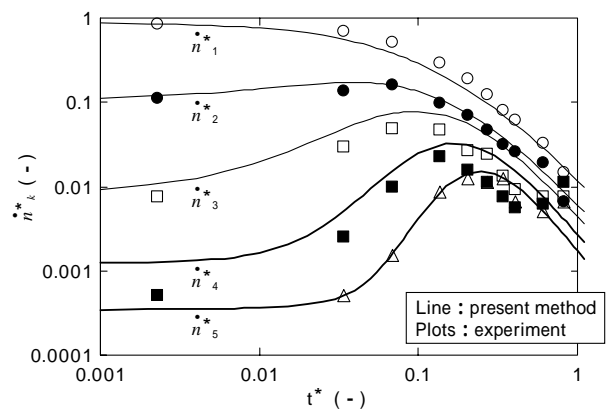


図2 凝集予測モデルと水モデル実験の凝集曲線比較

Fig. 2 Comparison of agglomeration curves for each size group calculated by present method with water model experiment

また、 $i_{i,k-1}$ は粒子の体積補正係数であり、グループの代表体積を用いて $i_{i,k-1} = (V^*_i + V^*_{k-1})V^*_{k-1} = V^*_i / V^*_k$ と表される。また $i_{i,k-1}$ は臨界粒子サイズで $R_V < 3.51$ の場合 $k-1$, $R_V < 2.08$ の場合 $k-2$ である。

今回開発した、凝集による介在物粒径分布の変化の予測モデルと水モデルによる凝集実験結果の比較を、図2に示す。水モデルではプロペラを用いた攪拌層を用い、溶鋼中の介在物を模擬した粒子を用いて実施した¹²⁾。

図2において、縦軸は初期介在物の総濃度 N_0 で規格化した各グループの介在物の個数濃度 $\dot{n}^*_k (= n^*_k / N_0)$ 、横軸は無次元化した時間 $t^* (= 1.3 a_1^3 (\xi / \nu)^{1/2} N_0 t)$ である。

水モデル実験と予測モデルの凝集曲線はよく一致しており、本モデルが介在物凝集の予測に適用可能であることを示している。

2. 凝集予測モデルの適用例

2.1 スラグ系とアルミナ系介在物の比較

今回開発した凝集による介在物粒径分布の予測モデルを、溶鋼処理から搬送中における取鍋内のアルミナなどの脱酸系とスラグ系の凝集分離挙動の比較に用いた例を示す。

いずれの介在物も溶鋼処理開始時に単一の粒子径 $2\mu\text{m}$ で同一の体積濃度で生成し、取鍋内では均一に拡散しており、取鍋界面から介在物粒子径に応じた終末浮上速度

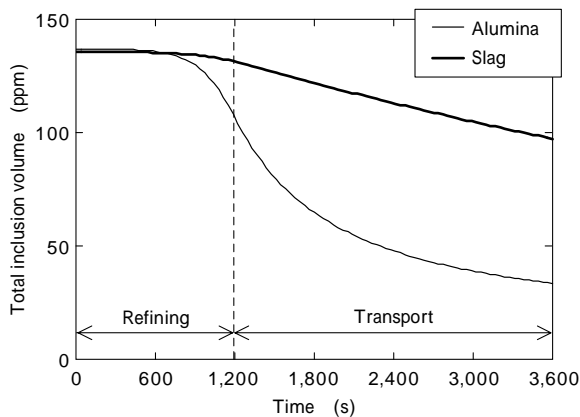


図3 取鍋内の介在物総濃度の変化比較

Fig. 3 Comparison of total inclusion concentration changes in ladle

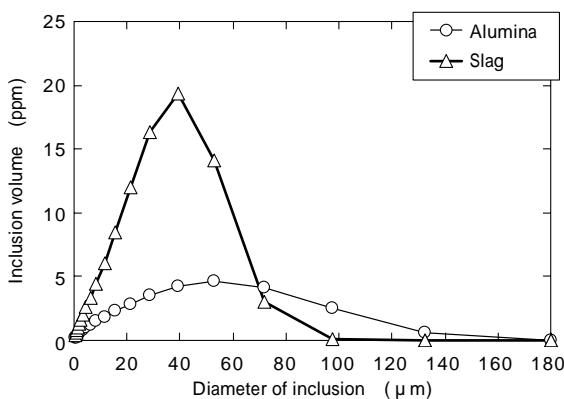


図4 処理開始から60分後の介在物の粒径分布比較

Fig. 4 Size distribution of inclusion particle at 60 min after refining start

で浮上分離をおこなうとした。乱流凝集に用いる取鍋溶鋼の乱流エネルギー消散速度は、溶鋼攪拌時と搬送時のそれぞれの条件で流動解析より求めた値を用いた。

20分間の攪拌とその後に40分間静置した条件での各介在物の総個数濃度の変化を図3に、最終状態での各介在物の粒径分布を図4に示す。

アルミナ系介在物は凝集速度が早いいため巨大化して攪拌終了後の静置の間に多くが浮上分離すること、スラグ系の介在物は濡れが良いため凝集が進行せず浮上分離がほとんど起こらないなど、実機の傾向と合致している。

また静置後の介在物の総量はスラグ系と比較してアルミナ系が少ないが、70 μm以上の大型アルミナ系の介在物は凝集による生成量が浮上分離する量よりも多いため、スラグ系よりも増加している。

攪拌初期のアルミナ系介在物の分離は、脱酸速度モデルで表される指数関数的な減少と異なる傾向を示す。これは、生成される介在物径が分布を持つこと、取鍋内で介在物が初期に不均一に分散しているなどが考えられ、今後の検討課題である。

2.2 タンディッシュ内の介在物挙動

連続铸造装置でのタンディッシュは連続処理系であるため、均一に攪拌される精錬装置とは異なり介在物の濃度と粒子径が場所によって大きく変化する。

そこでタンディッシュ内での介在物濃度の変化を確認するため、流動解析と連成させたシミュレーションを実

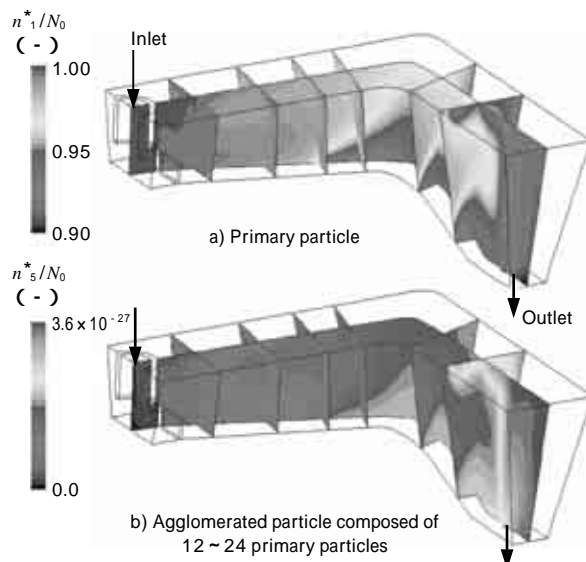


図5 3CC タンディッシュ内の介在物個数分布(初期濃度で規格化)
Fig. 5 Distribution of number of inclusions in 3CC tundish
(Normalized by initial concentration)

施した。最初にタンディッシュ内の流動計算をおこない、得られた溶鋼速度分布(u_i)および v_i の値より介在物の輸送、拡散および凝集の解析を実施した。これらを組合わせたモデルを式(7)に表す¹³⁾。

$$\frac{\partial n_{i,k}^*}{\partial t} + \frac{(u_i - v_i)n_{i,k}^*}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_i \frac{\partial n_{i,k}^*}{\partial x_i} \right) + \sum_{i=i_{k-1}}^{k-1} n_{i,k-1}^* N_{i,k-1}^* + \sum_{i=1}^{i_{k-1}} n_{i,k}^* N_{i,k}^* - \sum_{i=i_k}^{M-1} (1 + n_{i,k}^*) N_{i,k}^* \dots (7)$$

ここに、 D_i は介在物の乱流拡散値、 v_i は介在物の終末浮上速度を表す。

これらの介在物挙動モデルを用いて、当社加古川3号連続機タンディッシュの解析をおこなった結果を図5に示す。介在物は注入部(図Inlet)から単一粒子で流入する条件で計算をおこなった。

図5より、介在物はタンディッシュ内での移流中に凝集が進行し、流出部(図Outlet)に近づくに従って、単一粒子が減少して凝集体の個数濃度が増加している。の大きいInlet近傍だけでなく、タンディッシュ全域で凝集が進行しており、さらに深さ方向でも介在物濃度が異なる。

これらの傾向はタンディッシュ内の介在物挙動の検討結果³⁾と一致しており、このモデルを用いることで詳細な介在物挙動の検討が可能となる。

むすび=介在物粒子の濡れによる乱流凝集への影響を考慮した介在物の粒径予測モデルを開発することにより、製鋼プロセスでの介在物の成長、分離挙動の時間変化を明らかにすることが可能となった。

溶鋼中の介在物の挙動は凝集だけではなく、核生成や気泡による付着分離、スラグ界面への付着と巻き込み、耐火物の脱落、異なる種類の介在物の凝集など、さまざまな現象が存在するため、今後はそれらの現象を明らかにしてモデルに組み込んでいく。また実機の介在物計測データを用いることによりモデルの精度向上を計る。

最後に、本研究における粒子の凝集モデルは、著者の
東北大学留学中での研究成果であり、ご指導いただいた
東北大学環境科学研究科の谷口尚司教授に謝意を表しま
す。

参 考 文 献

- 1) T. Murai et al. : Tetsu-to-Hagane, 84 (1998) p.13.
- 2) K. Fuchigami et al. : Tetsu-to-Hagane, 85 (1999) p.16.
- 3) H. Tozawa et al. : ISIJ Int., 39 (1999) p.426.
- 4) T. Nakaoka: " Coagulation of Inclusion Particles in Liquid Metal
and Attachment to Bubble Surface " (2003) Ph. D. Thesis,
Tohoku University.
- 5) M. Smoluchowski : Z. Phys. Chem., 92 (1917) p.127.
- 6) T. Nakaoka et al. : Proc. of 2nd Int. Congr. on the Sci. & Tech.
of Steelmaking, ICS2001, Swansea, UK, Apr.2001, (2001) p.77.
- 7) S. Taniguchi et al. : Tetsu-to-Hagane, 78 (1992) p.527.
- 8) K. Higashitani et al. : J.Chem. Eng. Jpn., 16 (1983) p.299.
- 9) P. G. Saffman et al. : J. Fluid Mech., 1 (1956) p.16.
- 10) P. Kozakevitch: Mem. Etud. Sci. Rev. Metall., 68(1971) p.636.
- 11) T. Nakaoka et al. : ISIJ Int., 41 (2001) p.1103.
- 12) T. Nakaoka et al. : CAMP-ISIJ, 14 (2001) p.94.
- 13) T. Nakaoka et al. : CAMP-ISIJ, 14 (2001) p.774.