

流体中の粒子の挙動について

谷 口 尚 司*

Behavior of Particles in Fluid

Shoji TANIGUCHI

溶鉄中介在物の問題は早急に克服されるべき重要な課題であるが、理論面からの支援が十分ではなく、そのことが問題解決の障害になつていくように感じられる。流体中の粒子挙動については古くから多くの理論的研究があり、介在物の問題に適用できそうなものも少なくない¹⁾。ここでは、それらの研究のいくつかを紙面を借りてご紹介したいと思う。

流体中の粒子の運動は、粒子が球形で十分小さければ層流、乱流の区別なく Basset-Boussinesq-Oseen-Tehe の式で記述できる。この式（以後 BBOT の式と呼ぶ）の導出と応用は Soo²⁾ あるいは HINZE³⁾ の著書に詳しい。BBOT の式は流体に乗って流れる粒子が流体から受けるさまざまな力を LAGRANGE の微分方程式で表したもので、既知の流れ場でこの式を解けば粒子の軌跡が得られることになる⁴⁾⁻⁶⁾。しかし、時々刻々流れの速度と向きが変化する乱流場に BBOT の式をそのまま適用するのはきわめて難しい。乱流場での介在物粒子軌跡の計算は、現状では粒子の定常浮上速度を時間平均流に重畳したり⁷⁾、時間平均流に乱流変動分を確率的に付加した流れ場に重畳する方法⁸⁾ がとられている。一方、乱流場での粒子移動を拡散方程式で記述する方法もエアロゾル等の解析に用いられている。この場合粒子の乱流拡散係数は、流体の速度変動を BBOT の式に代入して求められる粒子の速度変動から算出されている⁹⁾¹⁰⁾。ガス中の微粒子の密度 ρ_p は流体密度 ρ_f の 10^3 倍程度で、粒子と流体との拡散係数の差は無視できないが、溶鉄中の介在物は $\rho_p/\rho_f < 1$ であり、粒子は流体の速度変動に忠実に追従できると考えられる。従つて溶鉄中介在物の移動は粒子の定常浮上速度を考慮した拡散方程式で近似的に表しうるのであろう。TACKE と LUDWIG¹¹⁾ はその方法により $k-\varepsilon$ モデルで記述されたタンディッシュ内の乱流場における介在物の濃度分布を求めている。しかし、流れの向きが急激に変化するような場所、例えばノズル入口などでは流体に加速度が生じ、それによる粒子移動も考慮されねばならないであろう¹²⁾。

溶鉄中介在物が激しい乱流場で互いに衝突・肥大する事実は広く認められている。特に溶鋼の脱酸操作における脱酸生成物の肥大・浮上過程の重要性は坂尾¹³⁾ により詳しく述べられている。流体中の衝突・凝集機構は、FRIEDLANDER の著書¹⁴⁾ にまとめられており、大別すると 1) ブラウン拡散による凝集、2) 浮上または沈降速度の差異による衝突・凝集、3) 速度勾配に基づく衝突・凝集に分けられる。3) の機構を乱流場の渦内部のせん断流に拡張したものが乱流凝集機構である。SAFFMAN と TURNER¹⁵⁾ は粒子径が乱流の最小渦 (KOLMOGOROFF のミクロスケール: $(\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$) より小さい場合の乱流凝集速度式を導出している。彼らは同時に上記 2) の差動凝集も考慮した式を展開しており、これにより両機構による凝集の寄与が定量的に比較できる。DELICHATSIOS と PROBSTEIN¹⁶⁾ は平均自由行程の概念に基づく乱流凝集モデルを提案し、SAFFMAN と TURNER のモデルと類似の結果を得ている。また彼らのモデルには粒子径が最小渦より大きい場合も含まれている。以上のモデルは一对の粒子間の衝突頻度を与えるものであるが、凝集によつて変化する粒子総数および粒子径分布を求めるにはポピュレーションバランスの式が必要である。その式を大別すると粒子径分布として離散形分布を与えるものと連続形分布を与えるものとに分けられる¹⁴⁾。後者の手法では、粒子径分布を平均径と粒子総数とで規格化し、その分布を時間によらず一定（相似分布）と仮定することにより式を解析的に解く試みが為されている。LINDER¹⁷⁾ は脱酸生成物の粒径分布に指数関数を適用し、乱流凝集と STOKES 浮上による粒子数変化を推算している。また、ASEA-SKF や RH 等の実プロセスにおける介在物凝集の解析も積極的に行われている¹⁸⁾¹⁹⁾。

凝集の実験的研究としては水中のラテックス粒子の乱流凝集速度の測定が円管内乱流¹⁶⁾と攪拌槽²⁰⁾を用いて行われ、結果が理論¹⁵⁾¹⁶⁾と対比されている。その結果、実測値は理論値よりも小さく、考慮すべき因子として粒子間隙の流体の粘性による衝突回避効果^{20)~22)}、粒子表

面の電気二重層の重なり合いによる反発効果²²⁾ および粒子間に作用する van der Waals-London の引力²⁰⁾ などがあげられている。

凝集現象と並んで溶鉄系で重要と思われるのは介在物の壁付着現象であろう。乱流からの粒子の壁付着理論としては FRIEDLANDER と JOHNSTONE の停止距離理論¹⁴⁾²³⁾ が有名である。これは粒子が乱流拡散で壁近傍に運ばれ、そこから壁までの距離 (停止距離) は粘性力に抗しながら粒子のもつ運動量を消費するまで飛行すると考える理論で、エアロゾルについては良く当てはまることが知られている²³⁾²⁴⁾。しかし、粒子の運動量が壁から十分離れた乱流本体における変動速度から決定されている点で矛盾を内包している。ROUHIAINEN と STACHIEWICZ⁵⁾ はこの点を指摘し、粒子が壁に付着するメカニズムとして層流底層内で粒子が受ける揚力 (SAFFMAN 力²⁹⁾) を主張した。溶鉄中介在物の壁付着にも停止距離理論と類似の理論が適用されているが²⁵⁾、揚力による壁付着も無視できないように思われる。

揚力理論は SEGRE と SILBERBERG の実験²⁶⁾²⁷⁾ を機に展開した。彼らは液と同密度の微小粒子を分散させた円管内ポアズイユ流中で、粒子が円管の中心軸と壁の中間 (半径が管半径の 60% の位置) に集まることを見だし、その現象が流れ場の慣性効果に基づくものであると推察した²⁷⁾。このように主流と直角方向に粒子に対して揚力が作用するメカニズムとして、RUBINOW と KELLER²⁸⁾ は粒子の回転に伴う揚力 (MAGNUS 力) を考え、SAFFMAN²⁹⁾ は均一なせん断流中の揚力 (SAFFMAN 力) を考えた。両機構とも壁付近のせん断流中で粒子に揚力が作用するのは、粒子が主流に先行する場合 (壁向きの揚力) か主流より遅れる場合 (中心軸向きの揚力) で、粒子が主流と同速度で流れる場合の SEGRE と SILBERBERG の実験や最近の青木らの実験³⁰⁾ を十分説明できるものではない。この現象を解明したのは、慣性効果と壁効果とを同時に考慮した COX と BRENNER の理論³¹⁾ で、ISHII と HASIMOTO³²⁾ はこの理論に基づいた計算値を具体的に示している。揚力理論と BBOT の式とを組み合わせると壁近傍の流れ場の粒子軌跡を計算した研究には ROUHIAINEN と STACHIEWICZ⁵⁾、GANIC と ROSENOW⁶⁾ の研究などがある。いずれにせよこれらの理論は層流の流れ場に限定されており、今後乱流場への展開が期待される。

最近、粒子を含む流れについての詳細なレビューが都田と今野³³⁾ および松本³⁴⁾ によつて行われているので参照されたい。

文 献

1) 谷口尚司, 菊池 淳: 鉄と鋼, 73 (1987), A211

- 2) S. L. SOO: Fluid Dynamics of Multiphase Systems (1967), p. 31 [Blaisdell]
- 3) J. O. HINZE: Turbulence, 2nd ed. (1975), p. 460 [McGraw Hill]
- 4) 峯村吉泰, 村上光清: 日本機械学会論文集, 45 (1979), p. 1834
- 5) P. O. ROUHIAINEN and J. W. STACHIEWICZ: J. Heat Transfer, 92 (1970), p. 169
- 6) E. N. GANIC and W. M. ROSENOW: J. Heat Transfer, 101 (1979), p. 288
- 7) 半明正之, 石川 勝, 小倉康嗣, 松村千史, 宮原 忍, 大久保豊: 鉄と鋼, 73 (1987), A215
- 8) 沢田郁夫, 中村正和, 森 正晃, 米山章史: 鉄と鋼, 73 (1987), A227
- 9) S. L. LEE and F. DURST: Int. J. Multiphase Flow, 8 (1982), p. 125
- 10) 湯 晋一: 化学工学論文集, 6 (1980), p. 70
- 11) K. H. TACKE and J. C. LUDWIG: Steel Research, 58 (1987) p. 262
- 12) F. G. WILSON, M. J. HEESOM, A. NICHOLSON and A. W. HILLS: Ironmaking Steelmaking, 14 (1987), p. 296
- 13) 坂尾 弘: 第 54・55 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1978), p. 1
- 14) S. K. FRIEDLANDER 著, 早川一也, 芳住邦雄訳: エアロゾルの科学 (1983) [産業図書]
- 15) P. G. SAFFMAN and J. S. TURNER: J. Fluid Mech., 1 (1956), p. 16
- 16) M. A. DELICHATSIOS and R. F. PROBSTEIN: J. Colloid Interface Sci., 51 (1975), p. 394
- 17) S. LINDER: Scand. J. Metall., 3 (1974), p. 137
- 18) K. NAKANISHI and J. SZEKELY: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 15 (1975), p. 522
- 19) K. SHIRABE and J. SZEKELY: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 23 (1983), p. 465
- 20) K. HIGASHITANI, K. YAMAUCHI, Y. MATSUNO and G. HOSOKAWA: J. Chem. Eng. Jpn., 16 (1983), p. 299
- 21) C. J. LIN, K. J. LEE and N. F. SATHER: J. Fluid Mech., 43 (1970), p. 35
- 22) M. A. DELICHATSIOS: J. Colloid Interface Sci., 78 (1980), p. 163
- 23) S. K. FRIEDLANDER and H. F. JOHNSTONE: Ind. & Eng. Chem., 49 (1957), p. 1151
- 24) P. G. PAPAVERGOS and A. B. HEDLEY: Chem. Eng. Res. Des., 62 (1984), p. 275
- 25) T. A. ENGH and N. LINDSKOG: Scand. J. Metall., 4 (1975), p. 49
- 26) G. SEGRE and A. SILBERBERG: Nature, 189 (1961), p. 209
- 27) G. SEGRE and A. SILBERBERG: J. Fluid Mech., 14 (1962), p. 115
- 28) S. I. RUBINOW and J. B. KELLER: J. Fluid Mech., 11 (1961), p. 447
- 29) P. G. SAFFMAN: J. Fluid Mech., 22 (1965), p. 385
- 30) 青木 弘, 黒崎晏夫, 安斉 博: 日本機械学会論文集, 44 (1978), p. 2026
- 31) R. G. COX and H. BRENNER: Chem. Eng. Sci., 23 (1968), p. 147
- 32) K. ISHII and H. HASIMOTO: J. Phy. Soc. Jpn., 48 (1980), p. 2144
- 33) 都田昌之, 今野宏卓: 化学工学, 50 (1986), p. 226
- 34) 松本 繁: 化学工学, 50 (1986), p. 231