液体の介在を考慮した粒子間接触モデルによる粉体運動解析

鈴木 慧¹⁾・丸岡 伸洋²⁾・大石 義彦³⁾・河合 秀樹³⁾・埜上 洋^{2)*}

Simulation of Powder Motion with Particle Contact Model Including Intervening Liquid

Akira SUZUKI, Nobuhiro MARUOKA, Yoshihiko OISHI, Hideki KAWAI and Hiroshi NOGAMI

Synopsis : The control of packed bed permeability in blast furnace is an important issue to realize highly efficient and stable operation of blast furnace under low carbon condition. The powder accumulation in the packed bed deteriorates the permeability, thus it is necessary to understand the powder behavior in the packed bed. Recently it was revealed that the existence of liquid in the bed had drastic effect on the motion and the accumulation of powder in the bed. In this study a mathematical model to describe the behavior of powder particle under liquid existing condition was developed using discrete element method. The model took into account cohesive force, normal viscous force, shear viscous force and lubrication due to the liquid film. The model was validated by the comparison of the particle trajectories under various liquid properties. The model was applied to the simulation of passing behavior of the powder particles through the opening among three coarse spherical particles, and successfully reproduced the accumulation behavior under wetting condition.

Key words : powder motion; accumulation; liquid; simulation.

1. 緒言

鉄鋼業からの二酸化炭素排出量の削減は急務の課題であり、一貫製鉄所への投入エネルギーの内約7割が投入される¹⁻³⁾ 製鉄プロセスの基幹プロセスである高炉の高効率化はこの課題の解決に対して寄与が大きいものと考えられる。現在の製鉄プロセスの主要な還元材は石炭であり、その使用量が二酸化炭素排出量に直結するため、コークスの反応性制御や炭材・鉬石の近接配置⁴⁻⁷⁾、水素系還元材の利用や燃焼強化⁸⁻¹⁰⁾、水素還元強化^{11,12)}、混合装入^{13,14)}等、高炉で使用する炭素量を低減させる様々な取り組みが進められている。しかし、高炉操業の低炭素化は、プロセスの駆動力である熱および還元ガスの単位生産量あたりの投入量の低下に相当し、操業の不安定化が懸念される。低炭素条件において高炉を高効率かつ安定に操業するためには、高温の還元ガスを滞りなく高炉内を流通させることが必要であり、炉内充填層の通気性の確保が重要であると考えられる。

高炉内には還元ガスとともに未燃微粉炭、微粉コークスや鉬石粉など種々の粉体が流通しているが、これらの粉体が炉内充填層中に蓄積すると装入物の降下に悪影響を及ぼすことが知られている¹⁵⁻¹⁷⁾。このため、充填層内の粉体の運動に関して、数多くの研究が行われてきた。1980年代後

半から90年代前半には、充填層に気体-粉体二相流を導入した際の圧損、粉体滞留量および移動速度の測定から、気流-粉体-充填粒子間の相互作用推定式が提案されており¹⁸⁻²⁴⁾、これを利用した充填層内の粉体の運動の数値解析が試みられている^{21,22,25,26)}。これらの解析では、粉体の滞留量を動的または全滞留量として扱っていた。その後、充填層内への粉体の蓄積状態^{21,27-29)}の測定および蓄積速度の測定に基づく動的および静的粉体滞留量の交換速度の定式化³⁰⁾が行われ、粉体の動的滞留量と静的滞留量を区別した粉体蓄積の数値解析に应用されている³¹⁻³⁴⁾。上述の数値解析では、粉体を仮想的な連続体として扱う手法が適用されてきたが、YuuらおよびUmekageら^{35,36)}は充填層内の粉体運動に対して粒子追跡法の適用を試み、充填層内の粉体の分散や圧力変動等の解析に成功している。Takahashiら³⁷⁾は粉体による充填層空隙の閉塞の起因になると考えられる局所閉塞現象を見出し、その発生について幾何的な検討を行っている。またNatsuiら³⁸⁾およびKikuchiら³⁹⁾は離散要素法による大規模計算により同様の現象を指摘しており、Fukudaら⁴⁰⁾はその発生確率について数値的な検討を加えている。上述のように、充填層内の粉体の流通および蓄積に関して多くの知見が得られているが、その多くは乾燥した充填層が対象となってきた。充填層中の気・固・液三相運動に関しては、Phamら⁴¹⁾が粉体導入時の圧力損失およ

平成30年3月1日受付 平成30年5月8日受理 (Received on Mar. 1, 2018 ; Accepted on May 8, 2018)

1) 東北大学大学院工学研究科金属フロンティア工学専攻 (Department of Metallurgy, Graduate School of Engineering, Tohoku University, 2-1-1 Katahira Sendai 980-8577)

2) 東北大学多元物質科学研究所 (Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University)

3) 室蘭工業大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Muroran Institute of Technology)

* Corresponding author : E-mail : nogami@tohoku.ac.jp

DOI : <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2018-024>

び液体の移動速度変化について報告しているが、その定量評価および定式化は行われていない。Kikuchiら⁴²⁾は灌液充填層内の粉体の運動を直接観察することにより、粉体の運動および蓄積形態に対して液体の存在および液体と充填粒子・粉体の濡れ性が大きな影響を与えることを報告している。

そこで本研究では、液体の滞留する充填層内の粉体の運動および蓄積を推定するための基礎として、離散要素法による粉体粒子の運動解析に対して、粉体と充填粒子間に液体が介在する条件下の粒子間接触モデルを構築し、その妥当性の検証および粉体運動に及ぼす液体の影響の解析を行った。

2. 数学モデル

本研究では、液体の存在する充填層内粉体の挙動を、層内の空隙中を移動する粉体粒子の運動を個別に解析し、充填粒子との衝突挙動に対して粒子間に介在する液体の影響を考慮することで表現することを念頭に、以下のモデルを構成した。

2・1 粒子運動

粉体粒子の運動に対しては離散要素法⁴³⁾を採用した。粉体粒子に関する並進および回転方向の運動方程式はそれぞれ次の2式で表される。

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \sum_j \vec{F}_{n,j} + m_i \vec{g} + \vec{F}_D \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} = \sum_j r_i \vec{F}_{s,j} - \vec{M}_r \quad (2)$$

式中 g , m , r , t , v , I および ω は、それぞれ重力加速度 [m s^{-2}], 粒子質量 [kg], 粒子半径 [m], 時間 [s], 並進速度 [m s^{-1}], 慣性モーメント [kg m^2] および回転速度 [rad s^{-1}] である。また F_n , F_s , F_D および M_r は粒子間法線方向接触力 [N], 粒子間接線方向接触力 [N], 流体抗力 [N] および回転抵抗力 [N m] である。添え字の i および j は着目粒子およびこれと接触した粒子を表し、 N_c は粒子 i と接触している粒子数を表す。尚、二粒子間の中心軸を結んだ線分を法線方向、これと直角な方向を接線方向と定義する。粒子同士が直接接触している場合の粒子間接触力モデルとしてFig.1に示したVoigtモデルを使用した。Voigtモデルは接触力をバネおよびダッシュポットにより表すものであり、接触にともなう接触部の微小な変位を、法線方向および接線方向でそれぞれ u [m] および ϕ [rad] とおけば、それぞれの方向の接触力は

$$F_n = \eta_n \frac{du}{dt} + K_n u = 0 \quad (3)$$

$$F_s = \eta_s r_i \frac{d\phi}{dt} + K_s r_i \phi = 0 \quad (4)$$

と表される。ここで K および η はバネ定数 [N m^{-1}] およびダッシュポットの粘性減衰係数 [kg s^{-1}] である。また、接線方向の接触に対しては摩擦スライダーを設定しており、接線方向の接触力が所定の値を上回っている場合には、滑りが発生するものとして接線方向の接触力として次式の摩擦のみを考慮した。

$$F_s = \mu_f F_n \quad (5)$$

本研究で用いた離散要素法の解析手法では、全ての粒子は球形として取り扱っている。しかし、多くの場合対象とする粒子は完全な球形ではないため、粒子運動に及ぼす粒子形状の影響を粒子の転がり難さとして式(2)中で考慮した。回転抵抗 M_r は、回転抵抗係数および粒子間の接触面の半径を α および r_c とおいて、次式で与えた。

$$M_r = \frac{3}{8} \alpha r_c F_n \quad (6)$$

本研究の範囲内では、粉体粒子は静止気体中を移動するが、その際に粒子速度に応じて粒子が受ける摩擦力は次式で与えた⁴⁴⁾。

$$\vec{F}_D = -C_D \pi r_i^2 \cdot \frac{1}{2} \rho_g |\vec{v}_i| \vec{v}_i \quad (7)$$

尚、抵抗係数 C_D は粒子Reynolds数の範囲により次式のようを与えた。

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} & \text{for } Re \leq 1 \\ \frac{24}{\sqrt{Re}} & \text{for } 1 < Re \leq 2975 \\ 0.44 & \text{for } 2975 < Re \end{cases} \quad (8)$$

2・2 接触点に液体の介在する接触力モデル

本研究では将来的に液体の滞留する充填層中の粉体運動への応用を目指して液体の介在する接触力モデルを開発した。灌液充填層中の粉体の蓄積挙動は、充填粒子・粉体粒

Fig. 1. Voigt Model.

子と液体の濡れ性、すなわち液体の存在形態により大きく変化することが報告されている⁴²⁾が、ここでは、液体と充填粒子間の濡れ性が良く、液体が充填粒子表面に膜状に存在する場合について、接触力のモデル化を行った。表面に液膜が存在する充填粒子に粉体粒子が接近し、両者間の距離が液膜厚さよりも小さくなった場合、粉体粒子の軌跡は液膜から受ける力により変化する。

まず粉体粒子が液膜に達した際には着水による衝撃力を受ける。さらに粉体粒子が充填粒子に近づく過程で、粉体は液膜内の液体を排除しながら進む必要があり、排除に伴う流体の粘性力を抵抗として受ける。粉体粒子が充填粒子表面に対して平行な方向の速度成分を持つ場合には、液膜内に速度差が形成され、これに伴う粘性抵抗が発生する。粉体粒子が充填粒子と接触した場合でも微視的に見れば接触面内に液体が残留して粒子間の摩擦力を低減する。その後、粉体粒子が液膜から離脱する際には粉体粒子は液膜からの付着力を受ける。粉体粒子が充填粒子表面上で回転運動を行う際には、液の巻き上げや巻き込みが生じて力を発生する。これら以外にも、粉体粒子、充填粒子および液膜の相対運動の形態により様々な力が発生するものと考えられる。本研究では、これらの力のうち、粒子の運動に及ぼす影響が大きく、また現象の定量化・定式化が明確であると考えられる粒子間の液架橋形成による付着力、粘性抵抗力および固体接触時の潤滑による接線方向接触力の低減についてモデル化を行い、離散要素解析に取り入れた。

2・2・1 液架橋付着力

近接する2粒子間に介在液体により液架橋が形成されると、液架橋内部の負圧および表面張力により、法線方向(2粒子の中心を結ぶ軸方向)に液架橋付着力が作用する⁴⁵⁾。二粒子間に形成された液架橋の模式図をFig.2に示す。形成された液架橋は、二粒子間を結ぶ直線を中心とした回転体であり、側面の気液界面の形状は粒子に接する半径 r_1 [m]の円弧で近似し、架橋最狭部の半径を r_2 [m]とする。これら二つの半径は粒子間の距離の関数として与えられ、液体の表面張力を γ [N m⁻¹]とすると、液架橋による付着力は次式で与えられる⁴⁶⁾。

$$F_L = \pi r_2^2 \gamma \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + 2\pi r_2 \gamma \quad (9)$$

Fig. 2. Schematic diagram of liquid bridge and cohesive force.

この付着力は粒子間距離が解析条件の一つとして設定した液膜厚さ以下となった条件で並進運動の運動方程式(1)式に粒子間の引力として付加して評価した。

2・2・2 粘性抵抗

相対運動する二粒子間に液体が介在すると、液体内部の速度場の形成に伴って液体内に発生した粘性力が粒子に作用する。粒子の相対運動および発生する粘性力の模式図をFig.3に示す。二粒子が相対速度 v_n で接近する際、粒子間の液相の流動に伴って内部に発生する粘性力の合力は粒子の法線方向の運動を妨げる向きに作用し、粒子運動に対する法線方向の抵抗力となる。ここではAdams and Perchardによる2弾性球面の接触における弾性流体力学モデル⁴⁷⁾を適用し、法線方向の抵抗力は次式で与えられる。

$$F_{vn} = -6\pi\eta R v_n \frac{R}{H} \quad (10)$$

式中、 η , R および H はそれぞれ液相の粘度 [Pa s], 粒子半径 [m] および粒子間距離 [m] である。

2粒子が液架橋を介した状態で互いに接線方向の速度 v_t で相対運動するとき、液体中の速度差が生じて接線方向の運動を妨げる向きに粘性力が発生する。接線方向の粘性抵抗力はGoldmanら⁴⁸⁾が示した球面-平面間の抵抗式をLianら⁴⁹⁾が2球面間の液架橋力に修正した次式により推定した。

$$\vec{F}_{vt} = -6\pi\eta R \vec{v}_t \left(\frac{8}{15} \ln \frac{R}{H} + 0.9588 \right) \quad (11)$$

Fig. 3. Schematic diagram of relative motion and viscous force between two particles with liquid.

式中の定数項は近接時の流体潤滑を考慮した補正項である。

粘性抵抗力については、液架橋付着力と同様、粒子間距離が解析条件の一つとして設定した液膜厚さ以下となった条件で並進運動の運動方程式 (1) 式に付加して評価するが法線方向の粘性力については、接触していた粒子同士が遠ざかる際には、粒子間の空隙の増加分を薄く押し広げられた液膜が吸い寄せられて埋めるよりも、周囲の空気の巻き込みが発生することも予想されるため、接近時のみ評価を行った。

2・2・3 潤滑

二粒子が直接接してその接触面に滑りが生じているときの摩擦力は (5) 式により与えられるが、接触面に液体が残留すると潤滑の効果により摩擦力が低減される。本研究では2粒子の接触面が双方の粒子が直接接触する部分と、液体を内包したマイクロプール部分から構成されるとした混合潤滑モデル⁵⁰⁾を用いた。2粒子間の接触部の模式図をFig.4に示す。液体が介在する際の接触面で発生する摩擦力は、固体同士が接触する部分の摩擦力とマイクロプールに発生する粘性力の合力として表される。

$$F_L = F_d + F_f \quad (12)$$

固体同士の接触による摩擦力は、マイクロプール部分が法線方向荷重を負担する割合を L [–] とおいて、次式で表される。

$$F_d = \mu_f (1-L) F_n \quad (13)$$

式中のマイクロプールの加重負担割合 L は、単にマイクロプール部分と接触部分の面積比だけで決まるものではなく、粒子間の接触部が垂直荷重によって変形した場合、マイクロプール自体の変形によって内包される液体に静水圧の変化が生じるため、粒子間にかかる全荷重のうちマイクロプール部分と接触部分がそれぞれ負担する荷重の割合は粒子間の荷重によって変化する。実際の粒子衝突過程の加重負担割合はマイクロプール形状、大きさ、固体物性、荷重など多数の因子が重畳して動的に変化するものと考えられるが、本研究では一定値 (0.9 [–]) を用いた。一方、マイクロプール部分に発生する粘性剪断力はマイクロプール部分の流体厚さ

Fig. 4. Microscopic view of friction forces with lubrication.

を h [m], 接触面内のマイクロプール面積を A_L [m²] とおけば

$$F_f = A_L \eta \frac{v_L}{h} \quad (14)$$

で与えられる。マイクロプールの面積 A_L [m²] および深さはDEMにより算出される粒子接触部分の面積からGreenwoodら^{51,52)}が提唱した方法により表面粗さから求めた実接触面積を差し引いて与えた。

液体が介在し、接触面の滑りが発生する条件では、乾燥条件の摩擦力を与える (5) 式を (12) 式で置き換えて評価した。

3. 実験

前節に示した、介在液相を考慮した粒子間接触モデルの妥当性の検証を目的に、液膜を有する固体表面に衝突する粒子運動の軌跡の測定を行った。衝突時の粒子と表面の幾何関係の同定を容易とし、また液膜を安定かつ正確に形成させるため、本実験では、表面に液膜を形成させた水平平板に対して球形粒子を衝突させる条件を設定した。実験装置の模式図をFig.5に示す。装置は浅い水槽、粒子射出装置および高速度カメラから成る。水槽を水平に設置した後、底部に所定量の液体を注入し、充分な時間静置することで底面上に平滑かつ均一な液膜を形成した。この水槽の底面に対して、球形粒子を所定の高さから所定の角度および速度で打ち出し、平板と衝突・反発しながら移動する粒子の運動を、水槽の側方から高速度カメラで撮影して粒子の軌跡を測定した。

本実験では粒子として粒径6.0 mm、密度3330 kg m⁻³のプラスチック球を用い、初期高さ50 mmの位置から水平から45°下向きに初速約2.0 m s⁻¹で射出した。水槽はアクリル製で長さ600 mm×幅100 mm×深さ10 mmである。液膜は厚み1.2 mmとし、液膜を形成する液体として物性値が既知の5種類のシリコンオイルを用いた。シリコンオイルの物性値をTable 1に示す。動粘度は1.0から10,000 mm²s⁻¹、表面張力は16.9から21.3 mN m⁻¹の範囲であり、プラスチック球とシリコンオイルは良く濡れる系となっている。

Fig. 5. Schematic diagram of experimental apparatus.

尚、以下、使用したシリコンオイルの種類は [cs] 単位の動粘度の値で区別する。

4. 結果と考察

4・1 モデルの検証

液膜のない乾燥条件および1 csの液膜を有する平板に衝突する粒子の軌跡の数値解析結果と測定結果の比較をFig.6に示す。乾燥条件と1 cs条件の粒子軌跡を比較すると、一度目の衝突後の跳ね返り高さに大きな違いは見られないが、1 cs条件では二度目の衝突までの水平方向の移動距離が大きくなっており、二度目の衝突後の跳ね返り高さが乾燥条件よりも低くなっている。数値解析の結果は、乾燥条件および1 csの条件下でいずれも測定結果を良好に再現している。乾燥条件および1 cs条件での一回目の衝突時の水平方向粒子速度の変化をFig.7に示す。尚、実験における打ち出し速度には変動があるため、図中の水平方向速度の変化は乾燥条件の打ち出し速度および水槽底面への設置時間に合わせて示してある。粒子は水平方向距離0.0305 s付近で水槽の底面と衝突している。乾燥条件では衝突前後で水平方向速度が約2.08から1.36 m s^{-1} まで0.62 m s^{-1} 程度低下しているのに対して、1 csの条件では水平方向速度の低下は0.13 m s^{-1} 程度である。この速度低下の大部分は粒子と水槽底面の衝突時の摩擦によるものであり、液膜が存在する条件では潤滑の効果により摩擦力が低減することにより速度の低下幅が小さくなったものと考えられる。液膜の存在する1 csの条件では、粒子は約0.0298 sに液膜と

接触し、ここから水槽底面と接触するまでの間に僅かに速度低下が生じており、底面との衝突後も同様に液膜から離脱する0.0310 s付近まで速度低下が見られる。この緩やかな速度低下は液膜内の剪断方向の粘性力によるものである。潤滑と剪断方向粘性力は、衝突後の粒子の水平方向速度に対して相反する効果となるが、本条件下では潤滑の効果により水平方向速度が維持されるため、液膜の存在する条件で一度目の衝突後の飛翔距離が大きくなったものと考えられる。

10 csの条件下での粒子軌跡をFig.8に示す。本条件下では、解析結果は実験結果と比較して跳ね返り高さおよび衝突後の飛翔距離共に若干大きく見積もっている。これは本研究で提案するモデルにおいて、衝突後に槽底面から粒子が離脱する際の法線方向の粘性力を考慮していないこと、また実際の衝突においては粒子離脱時には、粒子と槽底面の距離が液膜厚を超えても、粒子による液体の巻き上げにより粒子は抗力を受ける事が考えられるが、本モデルでは考慮されておらず、粒子の離脱速度を若干大きく見積もったためであると考えられる。図には示さないが100 csの条件も同様の傾向を示しており、粒子離脱時の抵抗の評価が本モデルの課題の一つであると考えられる。

Table 1. Physical properties of silicone oils (25°C).

	1 cs	10 cs	100 cs	1000 cs	10000 cs
Kinematic viscosity [mm^2s^{-1}]	1.0	10	100	1000	10000
Density [kgm^{-3}]	816	935	962	967	972
Viscosity [mPas]	0.816	9.32	96.2	967	9720
Surface tension [mNm^{-1}]	16.9	20.1	20.9	21.2	21.3

Fig. 7. Variations of horizontal velocity with collision under dry and 1 cs conditions.

Fig. 6. Comparisons of measured and calculated particle trajectories under dry and 1 cs conditions.

Fig. 8. Comparison of measured and calculated particle trajectories under 10 cs condition.

Fig.9に10000 csの条件での粒子軌跡を示す。液膜を形成する液体の粘度が非常に大きな本条件下では、射出された粒子は一回目の衝突時に跳ね返ることなく槽底面上に停止した。図示していないが1000 csの条件でも粒子の反発は見られず、粒子は衝突後に槽底面上を約62 mm程度まで転がって停止した。モデルはこれらの状況を良好に再現している。Fig.10に1000 csの条件下における槽底面と粒子底部の間の距離（以下粒子高さと呼ぶ）、液膜の付着力および法線方向の粘性力の水平方向距離に対する変化を示す。水平方向位置に対する粒子高さの変化は粒子軌跡に対応し、図中では左から右下がりの実線で示されている。液膜の存在しない乾燥条件では粒子が槽底面に接触するまでほぼ直線状の変化を示すのに対して、本条件では粒子高さ液膜と接触する1.2 mm以下になると液膜内に発生する垂直方向の粘性力により垂直方向下向きの速度が低下するため、水平方向位置56.4 mm付近から粒子高さの減少は緩やかになり、軌跡は図中上方向に偏倚する。粒子は同時に水平方向の粘性剪断力を受けて水平方向の速度が低下して、57.2 mm付近で液膜上に浮いた状態でほぼ停止する。その後、粒子は重力により動粘度の大きな液膜内を沈降する。この際、粒子の水平方向速度は既にほぼ零となっているた

Fig. 9. Comparison of measured and calculated particle trajectories under 10000 cs condition.

Fig. 10. Variations of particle height, cohesive force and normal viscous force under 10000 cs condition.

め、粒子高さの変化の曲線は、図中で垂直方向の変化として現れている。

この粒子運動において発生している垂直方向の粘性力は粒子速度の低下に伴って低下し、粒子運動が停滞すると更に低下する。付着力はほぼ一定で推移するが、沈降が始まると若干増加する。本条件においては、粘性力は付着力より6桁程度大きな値となっており、液膜に接触した後の粒子の運動に対しては液膜内に発生する粘性力が支配的であると考えられる。即ち、本実験条件下で一度目の衝突後に粒子の跳ね返りが生じないのは、液膜上で付着力により粒子の液膜からの離脱が抑制されたためではなく、衝突時に発生する液膜の粘性抵抗による粒子の運動エネルギーの散逸が主な原因となっているものと考えられる。

4・2 粉体粒子群の運動と蓄積

以上の結果より、本研究で提案した液相の介在を考慮した粒子間接触モデルおよびこれを用いた離散要素解析により、液膜が生成した固体表面と衝突しながら運動する粉体粒子の挙動の推定が可能になったものと考えられる。そこで、本解析法を、互いに接する3個の粗粒子の間に形成された空間の粉体粒子群の通過挙動の解析に適用した。粗粒子の粒径は10.0 mmであり、互いに接して正三角形に水平に配置した。この3個の粒子の間に形成される三角形の開口部に対して上方から粒径0.5 mmの350個の粉体粒子を同時に落下させ、粉体粒子の運動を追跡した。粗粒子上に液膜を形成する液体は粘度1.0 mPa s、液膜厚さは0.1 mmとした。落下する粒子は7層に配列し、最下層の高さは、粗粒子の最高部と同じ高さに設定した。落下後0.05から0.50 sの間の落下粒子群の挙動を乾燥条件と比較してFig.11に示す。落下後0.05 sには粒子は粗粒子間の空隙内に落下しているが、流路が狭くなっており、粗粒子上に滞留している。時刻0.10から0.20 sと進むと、乾燥条件では粗粒子上に滞留していた粒子は粗粒子間の空隙を順次通過して下方に落下するため、粗粒子上の粒子は減少していく。その後0.50 sまで時間が進むと、粗粒子上に残留している粒子は隣接して互いに接する粗粒子の接触部分の上部に挟まれた形で捕捉された僅かの粒子のみとなっている。これに対して、液膜の存在する条件では、落下粒子が粗粒子上に達した時点で、粗粒子と接触した落下粒子が粘性力および付着力により粗粒子表面上に落下粒子が捕捉されている。これらの粒子の存在により粗粒子上に滞留した落下粒子の粗粒子間の空隙からの落下が抑制されるとともに、粗粒子間の空隙が実質的に狭くなることにより落下粒子による空隙の閉塞が発生し、0.50 s経過後には多数の落下粒子が3個の粗粒子上に残留している。即ち、充填層内に濡れ性の良い液体が存在する場合には、充填粒子上に存在する液膜による粒子の付着および粘性力による粒子運動の停滞および停滞した粒子による粗粒子間の空隙の狭隘下により粗粒子間の空隙の閉塞が生じるものと考えられる。

Fig. 11. Passing behaviors of powder particles through dry and wet beds.

5. 結論

本研究では、灌液充填層内の粉体の運動および蓄積特性を推定することを目的として、離散要素法の粒子間接触モデルに液膜の存在による付着力、粘性力および潤滑の影響を考慮した解析法を開発して、その妥当性を検証した。また本解析法を液膜を有する平板への粒子衝突および充填層を模擬した粗粒子群の粉体通過に及ぼす液体の存在の影響について解析を行った結果、液体の架橋付着力のみならず、粘性抵抗力および潤滑により衝突後の粒子軌跡が影響を受けること、また液膜による粒子付着過程において粘性抵抗による粒子運動の減衰が重要な役割を果たすことを見出した。これらのことから高炉下部のような気・固・液三相充填層内における粉体の流動・蓄積特性の評価において液体存在の影響が重要であることが示唆される。

謝辞

本研究の一部は公益財団法人JFE21世紀財団2014年度技術研究助成、公益財団法人鉄鋼環境基金第24回鉄鋼研究振興助成および「物質・デバイス領域共同研究拠点」における「人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミック・アライアンス」の共同研究プログラムの助成により行われたものです。

文 献

- 1) T.Ariyama and M.Sato: *ISIJ Int.*, **46**(2006), 1736.
- 2) K.Higuchi, S.Nomura, K.Kunitomo, H.Yokoyama and M.Naito: *Tetsu-to-Hagané*, **98**(2012), 517.
- 3) D.Gielen and Y.Moriguchi: *Energy Policy*, **30**(2002), 849.
- 4) S.Nomura, H.Kitaguchi, K.Yamaguchi and M.Naito: *ISIJ Int.*, **47**(2007), 245.
- 5) H.Fujimoto and M.Sato: *J. Jpn. Inst. Energy*, **89**(2010), 1, 21.

- 6) T.Yamamoto, T.Sato, H.Fujimoto, T.Anyashiki, K.Fukada, M.Sato, K.Takeda and T.Ariyama: *Tetsu-to-Hagané*, **97**(2011), 501.
- 7) A.Kasai, M.Naito, Y.Matsui and Y.Yamagata: *Tetsu-to-Hagané*, **89**(2003), 1212.
- 8) T.Sato and M.Sato: *J. Jpn. Inst. Energy*, **89**(2010), 1, 14.
- 9) J.A.Castro, H.Nogami and J.Yagi: *ISIJ Int.*, **42**(2002), 1203.
- 10) K.Nozaawa, A.Kasai, Y.Matsui, S.Kitayama, S.Kitano and K.Shibata: *ISIJ Int.*, **51**(2011), 1336.
- 11) H.Nogami, Y.Kashiwaya and D.Yamada: *ISIJ Int.*, **52**(2012), 1523.
- 12) H.Ueno, S.Endo, S.Tonomura and N.Ishiwata: *J. Jpn. Inst. Energy*, **94**(2015), 1277.
- 13) S.Watakabe, K.Takeda, H.Nishimura, S.Goto, N.Nishimura, T.Uchida and M.Kiguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **92**(2006), 901.
- 14) S.Natsui, R.Shibasaki, T.Kon, S.Ueda, R.Inoue and T.Ariyama: *ISIJ Int.*, **53**(2013), 1770.
- 15) M.Sasaki and Y.Hida: *Tetsu-to-Hagané*, **68**(1982), 563.
- 16) H.Takahashi, H.Kawai, M.Kobayashi and T.Fukui: *ISIJ Int.*, **45**(2005), 1386.
- 17) K.Kodama, A.Shigemi, K.Ono and T.Horio: *Tetsu-to-Hagané*, **51**(1965), 2203.
- 18) H.Yamaoka: *Tetsu-to-Hagané*, **72**(1986), 403.
- 19) K.Shibata, M.Shimizu, S.Inaba, R.Takahashi and J.Yagi: *Tetsu-to-Hagané*, **77**(1991), 236.
- 20) K.Kusakabe, K.Yamaki, S.Morooka and H.Matsuyama: *Tetsu-to-Hagané*, **77**(1991), 1407.
- 21) H.Yamaoka: *Tetsu-to-Hagané*, **77**(1991), 1663.
- 22) K.Shibata, M.Shimizu, S.Inaba, R.Takahashi and J.Yagi: *Tetsu-to-Hagané*, **77**(1991), 1267.
- 23) K.Kusakabe, K.Yamaki and S.Morooka: *Tetsu-to-Hagané*, **77**(1991), 1413.
- 24) N.Hidaka, T.Matsumoto, K.Kusakabe and S.Morooka: *J. Chem. Eng. Jpn.*, **32**(1999), 197.
- 25) J.Chen, T.Akiyama, H.Nogami and J.Yagi: *ISIJ Int.*, **34**(1994), 133.
- 26) H.Nogami, P.R.Austin, J.Yagi and K.Yamaguchi: *ISIJ Int.*, **44**(2004), 500.
- 27) M.Ichida, T.Nakayama, K.Tamura, H.Shiota, K.Araki and Y.Sugisaki: *Tetsu-to-Hagané*, **78**(1992), 1132.
- 28) A.Kasai, H.Iwakiri, T.Kamijo and M.Shimizu: *Tetsu-to-Hagané*, **83**(1997), 551.
- 29) X.F.Dong, D.Pinson, S.J.Zhang, A.B.Yu and P.Zulli: *Powder Technol.*, **149**(2004), 1.
- 30) N.Hidaka, T.Matsumoto, K.Kusakabe and S.Morooka: *J. Chem. Eng. Jpn.*, **51**(2000), 152.
- 31) X.F.Dong, S.J.Zhang, D.Pinson, A.B.Yu and P.Zulli: *Powder Technol.*, **149**(2004), 10.
- 32) S.Pintowantoro, H.Nogami and J.Yagi: *ISIJ Int.*, **44**(2004), 304.
- 33) H.Nogami, S.Pintowantoro and J.Yagi: *ISIJ Int.*, **45**(2005), 1489.
- 34) X.F.Dong, D.Pinson, S.J.Zhang, A.B.Yu and P.Zulli: *Appl. Math. Model.*, **30**(2006), 1293.
- 35) S.Yuu, T.Umekage and T.Miyahara: *ISIJ Int.*, **45**(2005), 1406.
- 36) T.Umekage, S.Yuu and M.Kadowaki: *ISIJ Int.*, **45**(2005), 1416.
- 37) H.Takahashi, H.Kawai, T.Kondo and M.Sugawara: *ISIJ Int.*, **51**(2011), 1608.
- 38) S.Natsui, S.Ueda, H.Nogami, J.Kano, R.Inoue and T.Ariyama: *Chem. Eng. Sci.*, **71**(2011), 274.
- 39) S.Kikuchi, T.Kon, S.Ueda, S.Natsui, R.Inoue and T.Ariyama: *ISIJ Int.*, **55**(2015), 1313.
- 40) M.Fukuda, J.Suzuki, H.Kawai and H.Nogami: *ISIJ Int.*, **55**(2015), 1291.
- 41) T.S.Pham, D.Pinson, A.B.Yu and P.Zulli: *Chem. Eng. Sci.*, **54**(1999), 5339.
- 42) S.Kikuchi, S.Ueda, T.Kon, R.Inoue, S.Natsui and H.Nogami: *ISIJ Int.*, **54**(2014), 1244.
- 43) P.A.Cundall and O.D.L.Strack: *Geotechnique*, **29**(1979), 47.
- 44) 谷口尚司, 八木順一郎: 材料工学のための移動現象論, 東北大出版会, 仙台, (2001).
- 45) R.A.Fisher: *J. Agric. Sci.*, **16**(1926), 492.
- 46) Y.Muguruma, T.Tanaka and Y.Tsuji: *Powder Technol.*, **109**(2000), 49.
- 47) M.J.Adams and V.Perchard: *Int. Chem. Eng. Symp.*, **92**(1985), 147.
- 48) A.J.Goldman, R.G.Cox and H.Brenner: *Chem. Eng. Sci.*, **22**(1967), 637.
- 49) G.Lian, C.Thornton and M.J.Adams: *Chem. Eng. Sci.*, **53**(1998), 3381.
- 50) N.Soda: *J. Jpn. Soc. Lubr. Eng.*, **24**(1979), 44.
- 51) J.Greenwood and J.Williamson: *Proc. R. Soc. Lond. A*, **295**(1966), 300.
- 52) Y.Takahashi, M.Hibi and H.Iemura: *J. Appl. Mech.*, **8**(2005), 701.