

高炉充填層内の液体・粉体共存流動特性の解明

研究代表者	東北大学	多元物質科学研究所	教授	埜上 洋
共同研究者	東北大学	多元物質科学研究所	助教	丸岡伸洋
	東北大学	大学院工学研究科		昆 竜矢
	室蘭工業大学	大学院工学研究科	教授	河合秀樹

1. 緒 言

鉄鋼業は我が国の CO₂ 排出量の約 15% を排出し、製鉄プロセスはその起因となるエネルギーの約 70% を消費している。製鉄の基幹プロセスである高炉の炭素消費量低減は、社会全体での CO₂ 排出削減に対する寄与が大きい。しかし高炉の低炭素操業は、反応・伝熱面でのプロセス駆動力の低下を意味し、操業変動の吸収能力の低下につながる。このような状況下において高炉を安定かつ高効率に操業するためには、高炉内の通気・通液性を健全に保ち、高炉内容積全体を有効に利用可能な操業設計が必要である。高炉内充填層には、還元ガス、液体（溶銑、スラグ）および微粉（未燃微粉炭、粉コークス粉）が同時流通している。これらが充填層中に過度に滞留すると、高炉の通気・通液を阻害して操業不調へとつながる。充填層中における液体および粉体の運動については、それぞれ独立に研究が進められてきているが、これらが共存して流通する系については、検討が行われていない。本研究では、充填層内で同時に流通する液体と粉体の流動特性をマイクロ視点での実験および数値解析により明らかにし、高炉内部の健全な物流維持に対する指針の提示に資する流動現象の解明を目的とする。

2. 充填層内の液体分散

高炉下部の滴下帯において、充填層中の液体の運動および形態は以下の観点から重要である。まず、液体の供給・生成速度と移動速度により充填層内の液体滞留量が定まるが、液体の滞留は充填層中の空隙体積を低下させ、還元ガスの通気性および分散に影響を及ぼす。次に液体と充填粒子、すなわち溶銑・スラグとコークス粒子の接触形態により両者の間の接触面積が影響を受け、また液体の存在形態と移動速度により滞留時間が定まる。すなわち溶銑・溶滓とコークスの間の伝熱や反応の進行に関連して温度や浸炭量など、溶銑品質や操業安定性に深く関与することになる。従って高炉の低炭素・高効率安定操業を実現するためには、炉下部充填層内の液体の挙動を定量的に把握することが必要である。

本研究では粒子法による流体解析手法の一つである MPS 法¹⁾ に表面張力および濡れを粒子間ポテンシャルにより表現するモデル²⁾ を用いて、充填層内を液体が通過する際の液体の分散、流動および滞留状態の解析を試みた。ここでは直径 80 mm の円筒容器中に球形の充填粒子を約 60 mm の高さまで充填し、初期形状が直径 32 mm の球形の液滴を充填層中央上部から滴下させた際の、液体の充填層通過挙動を解析した。解析では直径 20 ま

たは 14 mm の球形粒子により構成した充填層およびこれらをランダムに混合した粒子の充填層の三種類を対象とし、液体の動粘度を 1.39×10^{-6} から 1.39×10^{-4} m²/s、液体と充填粒子の濡れ角を 30 から 180° の範囲で設定した。なお、表面張力は 7.28×10^{-2} N/m とした。対象とした三種類の充填層の外観および液滴の初期位置を Fig. 1 に示す。

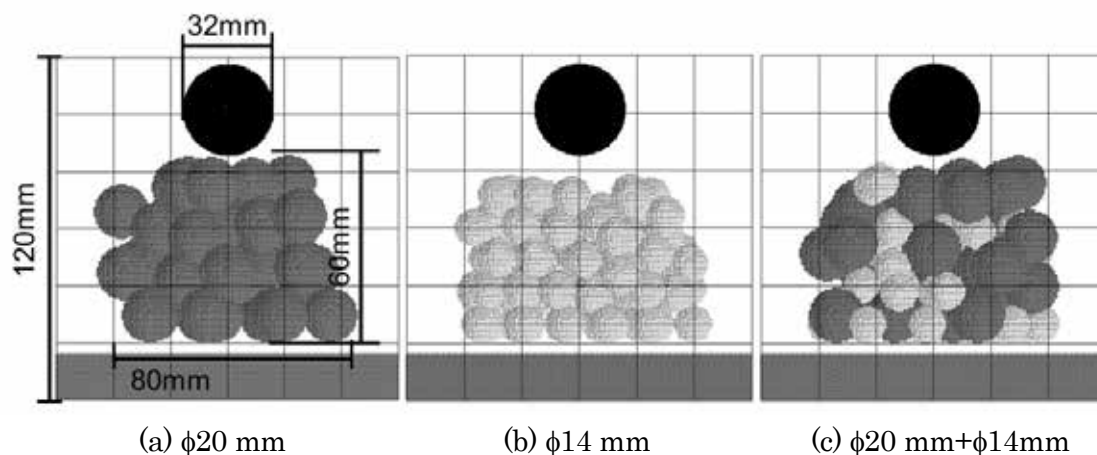


Fig.1 対象充填層の外観と液滴初期位置

液滴の落下開始後 0.1、0.2 および 1.0 s 経過後の、充填層内の液滴の分散状態を Fig. 2 に示す。図には充填層内部の液滴を水平方向に透視して分散状態を示してあり、液体の物性は動粘度 1.39×10^{-6} m²/s、濡れ角 90° である。落下開始後 0.1 s においては、液滴は充填層に到達して、その勢いで充填層内部に進入している。粒径 14 mm の粒子層での分散高さが他の充填層よりも低くなっているが、これは粒子をランダムに配置しているため、粒径 14 mm の充填層では初期液滴位置直下の層表面高さが他の充填層よりも低くなっていたためである。充填層内の液滴存在領域の高さについては構成粒子径の影響を受けていないが、水平方向の広がりについては粒径 14 mm の粒子層の場合が他の充填層よりも大きくなっている。時刻 0.2 s では、いずれの充填層の場合も液体は充填層底部まで達しており、粒径 20 mm および混合充填層の場合には、充填層下部からの液体排出が生じているのに対して、粒径 14 mm の充填層では層底部からの液体排出はごくわずかである。すなわち、粒径 14 mm の充填層内の液体の通過速度は他の充填層よりも遅くなっている。その後、液体は全体として底部へと向かい、層底部から排出され、時刻 1.0 s には液体の流動は終了している。この時点で、液体は充填層内の粒子間の間隙に滞留するとともに、一部は層底部に懸垂した状態で残留している。層内の残留液体については、粒径 20 と 14 mm の場合を比較すると、後者において残留液滴数が多く、前者ではまばらに分布し、混合充填層ではその中間となっているように見える。

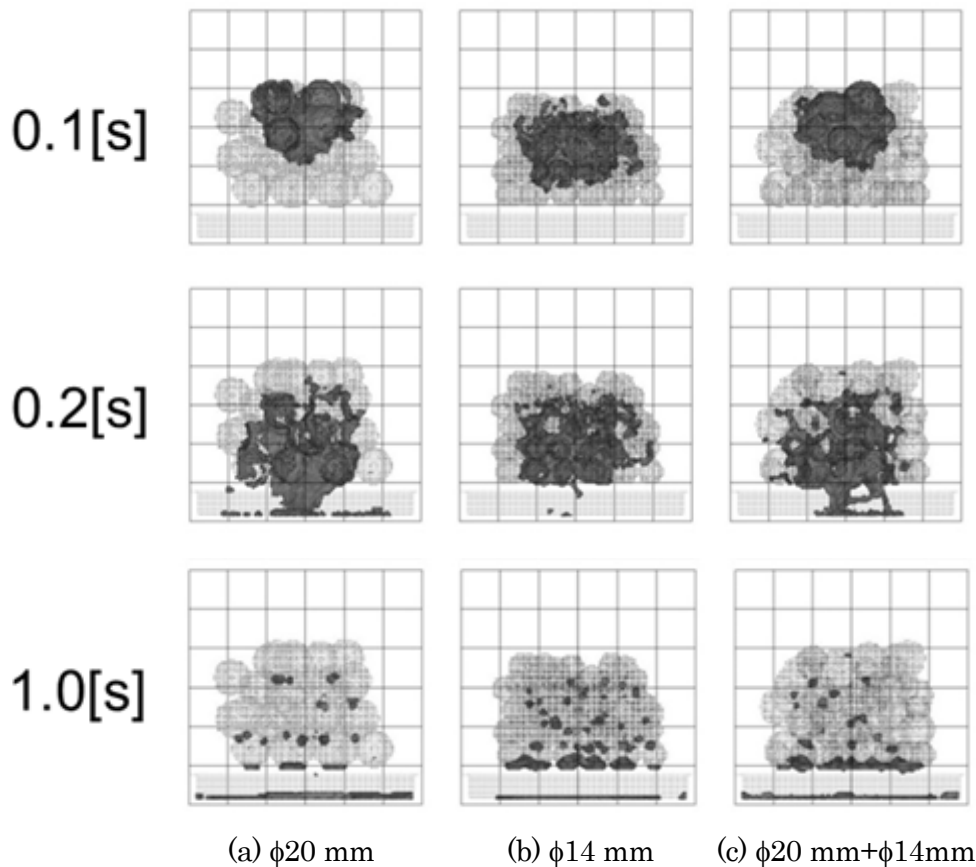


Fig.2 落下液滴の充填層内分散状態変化

これら液体の運動・分散挙動を定量評価するため、数値解析において充填層領域に存在する MPS の流体粒子個数の経時変化を追跡した。Fig. 3 に Fig. 2 と同条件の経時変化を示す。MPS 粒子数は流体の体積と等価であり、層内の液体滞留量の経時変化を表している。落下開始から液体が充填層領域に達すると、層内の液体滞留量は急激に増加する。その後液体が層内部を通過して、層底部からの排出が始まると、層内の滞留量が低下していく。その後、層底からの液体の排出が停止すると、層内の液体滞留量は一定となる。この変化において、滞留量の低下速度は液体の層内移動速度と排出速度に、また残留量は静的滞留量に相当する。三種類の充填層で比較すると、粒径 20 mm の充填層では、液体排出時の滞留量低下の傾きが最も大きく、層内に残留する液体量は最も小さい。これに対して、粒径 14 mm の充填層では、排出時の滞留量低下速度が最も小さく、残留量が最も大きい。さらに粒径 20 と 14 mm の混交充填層は、両者の中間となる。すなわち、Fig. 2 で観察された傾向が定量的に評価可能となる。

充填層の充填構造および液体の物性の異なる条件での解析結果を整理して以下の結果を得た。濡れ性および充填構造が同一の場合、動粘度の増加に合わせて平均滴下速度が減少する。動粘度および充填構造が同一の場合、濡れ角が 90° 以下の条件と比較して濡れ角が

120° 以上の条件において平均滴下速度が大きい傾向が見られた。濡れ角が 90° 以下の場合、充填物が 20 mm の充填物のみで構成される充填層での平均滴下速度が最も大きい。濡れ角 120° 以上の条件では濡れ角によって、最も平均滴下速度の速い充填構造が異なる。これは、濡れ性による抗力が最大となる濡れ角が充填構造によって異なるためであると考えられる。動粘度および充填構造が同一の場合、濡れ角の増加に合わせて静的ホールドアップが減少する。充填構造および濡れ性が同一の場合、動粘度の増加に合わせて静的ホールドアップが増加する。濡れ性および動粘度が同一の場合、充填層の比表面積の増加および充填物を構成する充填物の平均径の低下により静的ホールドアップは増加する。

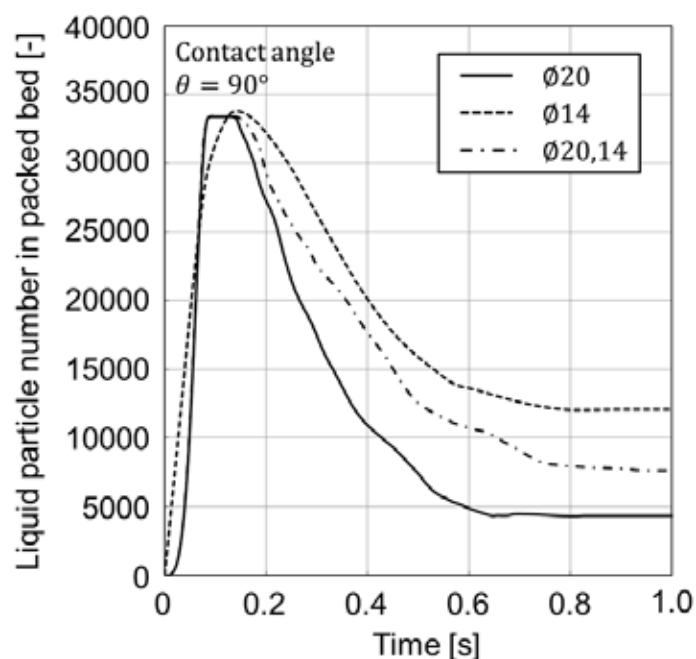


Fig.3 充填層内液体滞留量変化

3. 充填層内の粉体の運動および閉塞形成に関する基礎解析

高炉炉下部充填層内では、還元ガス、溶銑・溶滓とともに、炉内におけるコークス粉および未燃微粉炭チャーなどの微粉が主に還元ガスの流れに同伴されて流通している。これらの微粉の一部は装入物充填層中に蓄積する。蓄積粉は充填層中の空隙率を低下、また層内流路を狭隘化して炉内の通気・通液性を低下させるため、過度の粉体蓄積は、棚吊りやスリップといった操業不調につながる³⁾。流動状態にある微粉と気流の二相流動特性に関する研究は数多いが、粉体蓄積や閉塞の発生に関する報告例は少ない。近年、粉体の蓄積による充填層の閉塞は、層全体で均一に発生するばかりでなく、全体としてはガスが流通しながら局所的に閉塞が生じる状態が発生することが見出され⁴⁾、この局所閉塞が全体の閉塞への起点となっていると推定されている。局所閉塞は、充填層中における狭隘流路

において発生するとの報告がなされている⁵⁾。ここでは、同一形の球形粒子によって形成される充填層中の最も狭い流路を対象として、微粒子のこの流路の通過および閉塞の形成挙動を離散要素法 (DEM) により解析した。

本解析で対象とした粒子オリフィスを Fig. 4 に示す。オリフィス流路は、同一粒径球形粒子を正三角形かつ水平に、また互いに接するように配置した際に、三粒子間に形成される三角形の開口部である。この開口部に対して上部から微粒子を落下させた際の、微粒子のオリフィス通過挙動を対象として解析を行う。解析ではオリフィスを形成する三つの球形粒子の中心により構成される正三角形を鉛直上下方向に投影した正三角柱を解析領域とし、一定高さの水平三角形内のランダムな位置から初期速度零の状態から粒子を落下させた。また粒子の一定の時間間隔で供給した。微粒子は、解析領域内においてオリフィスを構成する球形粒子、他の微粒子および三角柱の側壁と衝突する可能性があり、これらの相互作用を考慮して運動を追跡する必要がある。



Fig.4 粒子オリフィス

本研究では粒子の追跡に DEM を用いた。DEM は不連続な要素の集合体に対して、個々の要素が運動方程式を満足し、かつ要素間の力の伝達が作用・反作用の法則に従うことを条件として要素の集合体の動的挙動を推定する手法である。本研究では全ての微粒子を球形粒子と仮定し、粒子の並進運動および回転運動を以下の運動方程式で表現した。

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

$$\text{回転} \quad I_i \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} = \sum_j \vec{r}_i \vec{F}_{s,j} \quad (2)$$

ここで、 \vec{g} 、 m 、 t 、 \vec{v} 、 I 、 $\vec{\omega}$ および \vec{r} は、それぞれ重力加速度 [m/s²]、粒子質量 [kg]、時間 [s]、並進速度 [m/s]、回転モーメント [kg m²] および回転速度 [rad/s] である。式中の F_n および F_s は粒子-粒子間あるいは粒子-壁間の接触表面に対する垂直および接線方向

の接触力 [N] である。また、添え字の i および j は、着目粒子およびこれに接触する粒子を表す。接触力は Fig. 5 に示す Voigt モデルにより表現した。Voigt モデルは粒子間の接触力を、バネおよびダッシュポットの変形により表しており、粒子間の並進変位および回転変位をそれぞれ u [m] および ϕ [rad] とすると、垂直方向の接触力およびトルクは次式で表される。

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

$$T = \eta_s r^2 \frac{d\phi}{dt} + K_s r^2 \phi = 0 \quad (4)$$

ここで、 K および η はそれぞれバネ定数 [N/m] およびダッシュポットの粘性減衰係数 [kg/s] である。

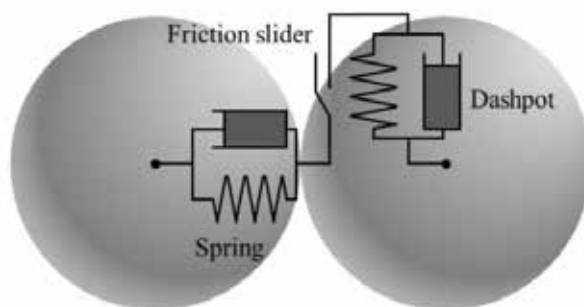


Fig.5 Voigt モデル

DEM 解析により得られた微粒子のオリフィス通過軌跡を Fig. 6 に、また同一条件で得られた粒子の位置および速度の変化を Fig. 7 に示す。微粒子およびオリフィス粒子の粒径はそれぞれ 0.596 および 4.48 mm であり、Fig. 6 中の軌跡上の×印は 4 ms 毎の粒子位置に施している。また Fig. 7 では上向きを正の値として示した。粒子は初期には自由落下により移動するため、粒子の落下速度は線形に増加している。粒子は 0.023 s にオリフィス粒子に衝突して上方に跳ね返っており、右手前のオリフィス粒子方向に移動している。さらに 0.050 s に右奥の粒子に到達する。その後、微粒子は 0.085 s まで複数の衝突を繰り返しながら三つのオリフィス粒子間の間隙方向に移動した後、オリフィスの最狭部を通過してオリフィス下部の空間を落下する。本解析では気体の抵抗は考慮していないため、粒子速度の変化は直線的であり、衝突により速度が急激に変化するため、全体として鋸歯状の速度変化を示す。また図中 0.082 および 0.084 s 付近で、粒子速度は下方向への急激な変化を示しているが、これは後続粒子との衝突により下方向への力が働いたためである。粒子速度は 0.097 から 0.117 s にかけて小刻みな変化を示しているが、これは微粒子がオリフィスの最狭部を通過する期間に相当しており、その際のオリフィス粒子や後続微粒子との衝突によるものである。またこの期間の粒子の移動速度は他の期間と比較して小さく

なっており、オリフィス部分への粒子の滞留を意味している。図示した解析領域を微粒子が自由落下で通過するのに必要な時間は 0.043 s であるのに対して、微粒子の落下間隔は 0.059 s であり、オリフィスが存在しなければ微粒子同士の衝突は生じない。オリフィスとの衝突により領域内の滞在時間が長くなり、例示した粒子の領域内の滞在時間は 0.143 s であった。

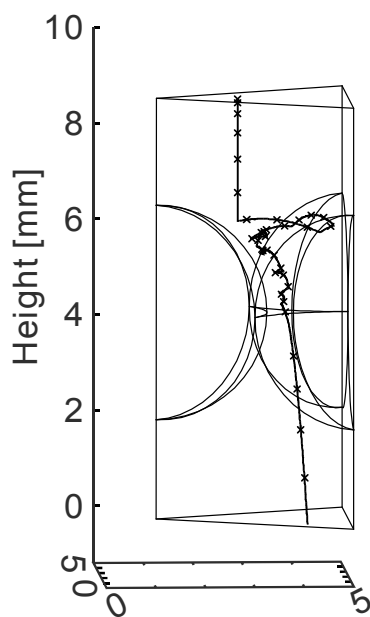


Fig.6 微粒子の軌跡の解析結果の一例

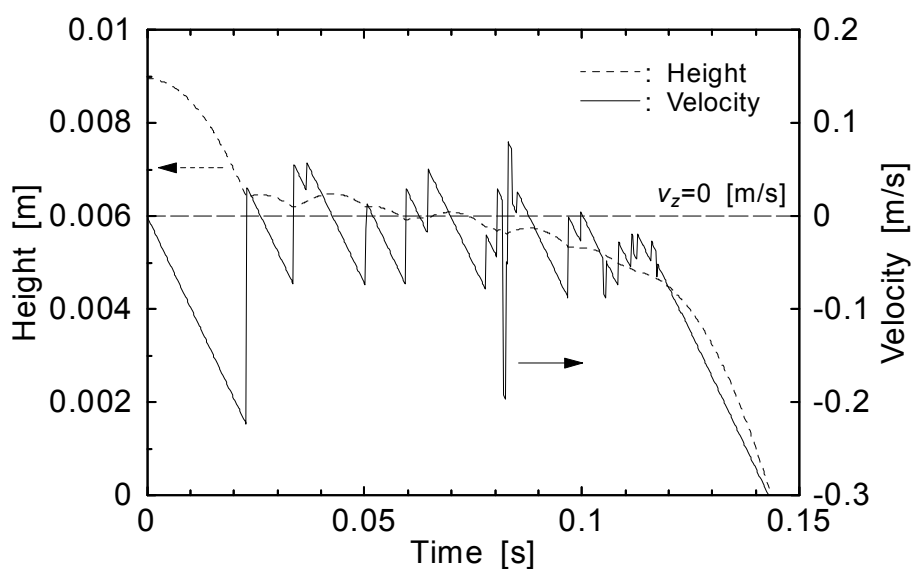


Fig.7 粒子位置および速度変化

Fig. 8 に微粉粒子がオリフィスを通るのに要した時間の分布を示す。通過時間は、粒子が初期位置（オリフィス最狭部からオリフィス粒子径の高さ）から落下してオリフィスを通り、さらにオリフィス最狭部から球形粒子径分だけ落下するまでの時間で定義した。オリフィスの開口面積割合は解析領域の水平断面積（正三角形）に対して約 9.3%であり、初期水平面内でランダムな位置から落下する微粉粒子の大部分は通過時に他の物体と衝突し、自由落下粒子の 2 から 3 倍程度の通過時間となっている粒子の割合が多い。この通過時間領域の粉体粒子の他の物体との接触回数は 10 から 15 回程度のものが多かった。

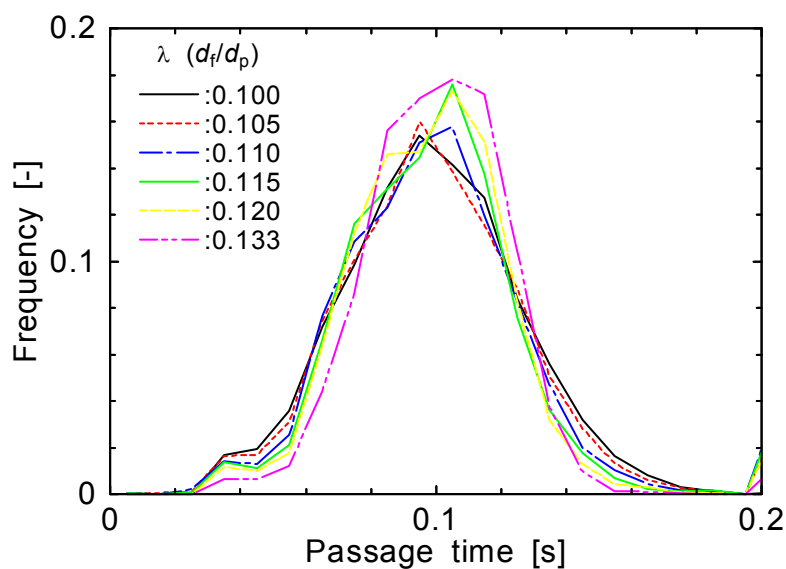


Fig.8 微粒子のオリフィス通過時間分布

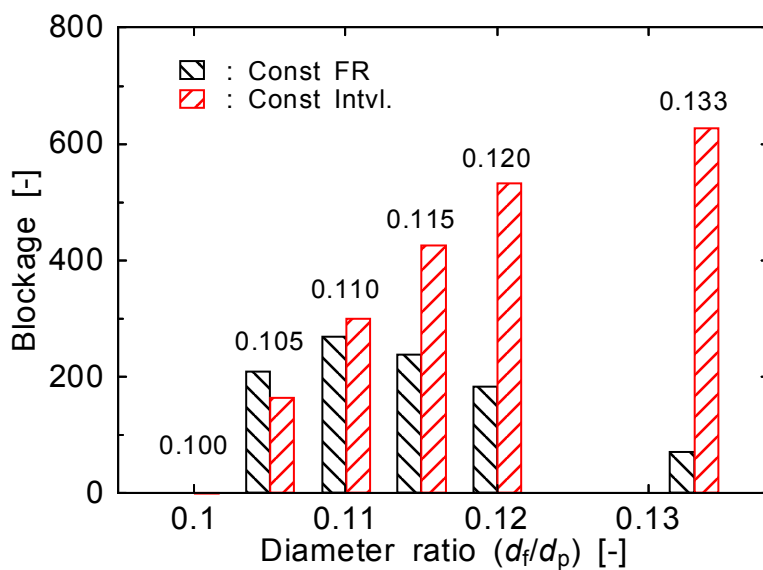


Fig.9 閉塞頻度 (10 万粒子あたり)

本解析における微粒子の軌跡の追跡により、複数の微粒子がオリフィス開口部に同時に到達し、これらが開口上部に捕捉されると後続粒子がオリフィス上部に堆積して閉塞が生じることが明らかになった。Fig. 9に落下させる微粉粒子 10 万個あたりのオリフィスの閉塞回数を示す。微粉粒子の質量流量を一定とした場合には、微粉径の球形粒子径に対する比を大きくしていくと、閉塞回数に極大値が生じている。一方、微粉粒子径の供給間隔を一定とした場合には閉塞回数は、粒径比の増加とともに閉塞回数が増加する傾向が見られた。以上より、充填層中の粉体の運動および閉塞形成に関する基礎的な挙動が定量的に評価可能になったものと考えられる。

4. 液体の介在が粉体運動および蓄積に及ぼす影響

4.1 実験的検討

上述のように、高炉下部滴下帯においては、コークス充填層中を気体（還元ガス）、液体（溶銑・溶滓）および粉体（微粉コークス・未燃チャー）が同時に流通している。粉体粒子は体積が小さく運動時の運動量も小さいため、その運動過程において液体の表面と接触すると、液体の表面張力や粘性により、容易に捕捉されてしまうことが予測される。そこで、充填層内の粉体の運動・蓄積に液体の存在がどの様に影響するのかを確認するため、濡れ性の異なる灌液充填層中での粉体の挙動の観察を行った。実験では円筒形容器の中に直径 10 mm のアルミナ球を充填し、その後上部から分散器を通して微細なアルミナ球を供給して、容器側面から粒子の運動および層内の蓄積挙動の観察を行った。乾燥条件に加えて灌液充填層条件では充填粒子と液体、粉体粒子と液体の濡れ性の高低により四種の組み合わせを設定した。なお、灌液条件では予め所定量の液体を充填層中に分散させた後に微粉を供給した。

観察例として Fig. 10 に (a) 乾燥状態、(b) 充填粒子・粉体粒子ともに高濡れ性および (c) 低濡れ性の充填粒子と高濡れ性の粉体粒子の条件における、粉体供給停止後の充填層内の粉体（粒径 0.3 mm）の存在状態を示す。乾燥状態では、粉体粒子の付着は観察されず、充填粒子と壁あるいは充填粒子間の間隙に少量の粒子が挟まれて残留している。これに対して充填粒子の濡れ性に拘わらず、灌液状態での粉体の滞留量は増加している。しかし、層内の液体および粉体の存在量状態は両者で大きく異なっている。濡れ性の高い充填粒子では、予め層内に分散させた液体は、充填粒子の表面を膜状に覆う形で分布しているのに対して、濡れ性の低い充填粒子の場合には、液体は充填粒子間の間隙に液滴状の形態で分布していた。濡れ性の良い充填層内では、表面の液膜を介して粉体は充填粒子にまぶしたような形態で付着している。また粉体粒子の濡れ性も高く、液体が隣り合う粉体粒子間に毛管力で吸い上げられ、または充填粒子とは逆側の粉体粒子表面まで達して、粉体粒子は複数層に重なって付着している。一方、濡れ性の低い充填粒子の場合、滴状に存在する液体の表面に粉体が捕捉され、さらに一部は液体の内部にまで取り込まれている。粉体供給開始時には充填層内で静止していた液滴の一部は、粉体を取り込むことで見かけ密度の増加

および粉体の衝突による衝撃により流下を開始する。この液体と粉体の混合物は、流下の途中でも粉体を取り込み、内部の粉体粒子の摩擦により見かけ粘度が上昇し、最終的には層内で停止する。その形態は液滴状あるいは紐状に連なった形状となる。結果として、濡れ性の低い充填層では、充填粒子の表面には微粉は付着せず、乾燥条件と同様に粒子間の間隙に少量の粉体が存在することになるが、微粉滞留量のほとんどは粒子間の液体に取り込まれた形で、不均一に分布する。

これらの観察から、充填層内の液体の存在する灌液充填層中では、液体と充填粒子および液体と粉体粒子の間の濡れ性により、充填層中の粉体の蓄積状態が大きく変化することが示された。



Fig.10 充填層の濡れ性による粉体蓄積状態の相違

4.2 介在液相の影響を考慮した粉体流動解析

前項に示したように、充填層における粉体の運動・蓄積は、層内に存在する液体の影響を強く受ける。そこで、前節に示した DEM による粉体運動解析法に、粒子同士の接触力評価時に粒子間に介在する液相の影響を取り込むことで、粉体運動に及ぼす液体の影響を表現することを試みた。

乾燥状態の粒子が表面に液膜の付着した表面に衝突し反発して離脱する際には、表面張力による粒子の付着・保持、液滴内部への粒子取り込み、潤滑による接触時の滑り、粘性による抵抗（法線・接線方向）、液相巻き上げによる回転抵抗、液膜排除による抵抗など種々の現象により粒子と表面間に力が働くものと考えられる。これらの中で、本研究では液架橋による法線方向の付着力⁶⁾、粒子が表面の法線および接線方向に相対運動する際に介在する液体の粘性による抵抗力⁷⁾、さらに粒子と表面が直接接触する際には接触面に残留した液体による潤滑（接線方向接触力の低減）⁸⁾を考慮した。それぞれの力の作用の模式図を

Figs. 11 から 14 に示す。

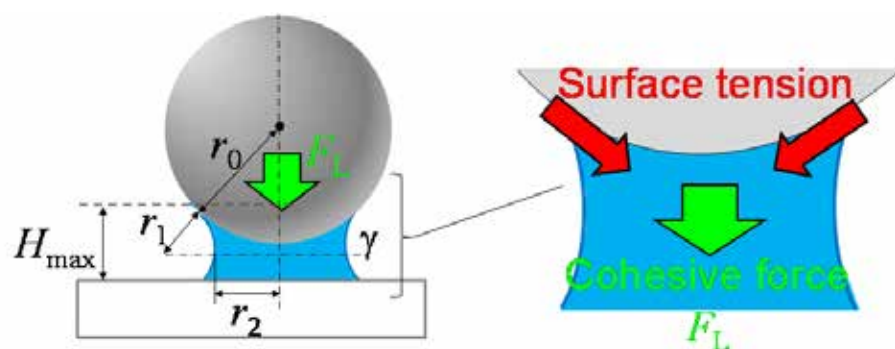


Fig.11 液架橋付着力

Fig. 11 のように球形粒子と基板の間に液架橋が形成されると、液体の表面張力により粒子が基板方向に引き寄せられ、付着力として働く。粒子半径を r_0 、の液架橋の半径を r_2 、形成された液架橋の側面の曲率が r_1 である場合、付着力 F_L は次式で表される。

$$F_L = \pi r_2^2 \gamma \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + 2\pi r_2 \gamma \quad (5)$$

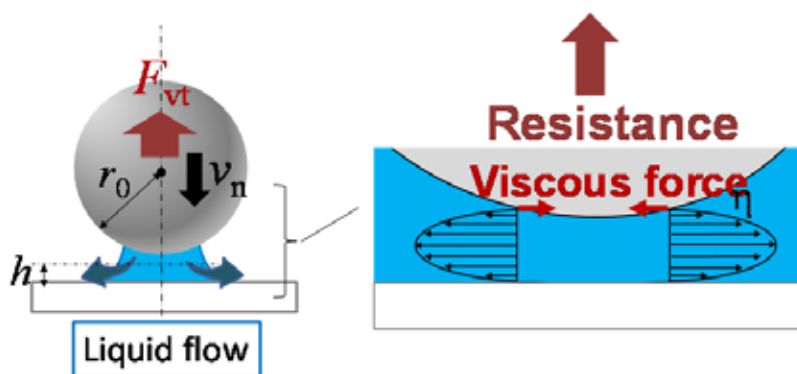


Fig.12 法線方向粘性抵抗力

粒子が基板との間に液架橋を保持したまま基板の方向に移動した場合、Fig. 12 に示すように粒子と基板の間の空間が狭まり、ここに存在した液体は周囲へと押し出される。この際に発生する粘性力に見合う分だけ粒子の基板方向への運動に対する抵抗力となる。この抵抗力 F_n は粒子の基板方向への移動速度を v_n 、粒子と基板の間隙を h また液体の粘度を η とすると次式で与えられる。

$$F_{vn} = 6\pi\eta r_0 v_n \frac{r_0}{h} \quad (6)$$

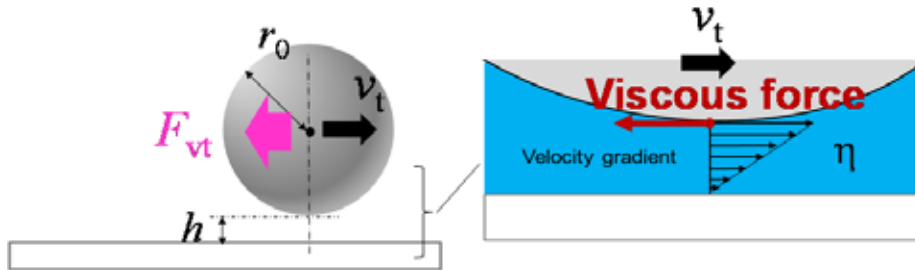


Fig.13 接線方向粘性抵抗力

粒子が基板との液架橋を保持したまま基板と平行な方向に移動する場合、液膜内に速度分布が形成され、これに従った粘性抵抗力が発生する。この抵抗力 F_{vt} は粒子の移動速度を v_t とすると次式で表される。

$$F_{vt} = 6\pi\eta r_0 v_t \left(\frac{8}{15} \ln \frac{r_0}{h} + 0.9588 \right) \quad (7)$$

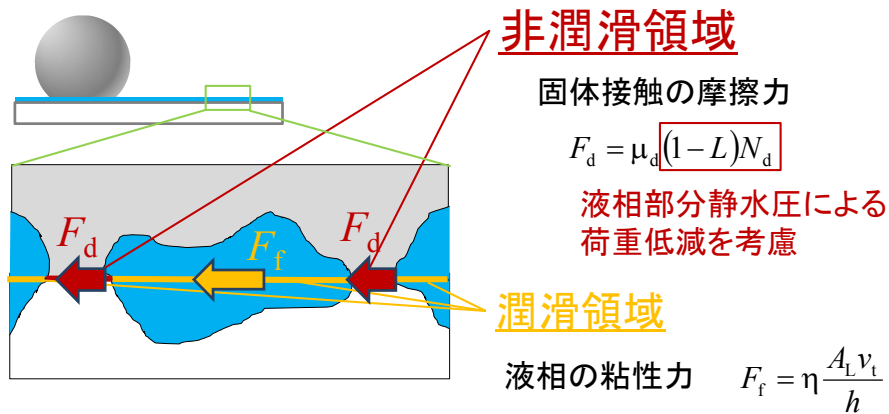
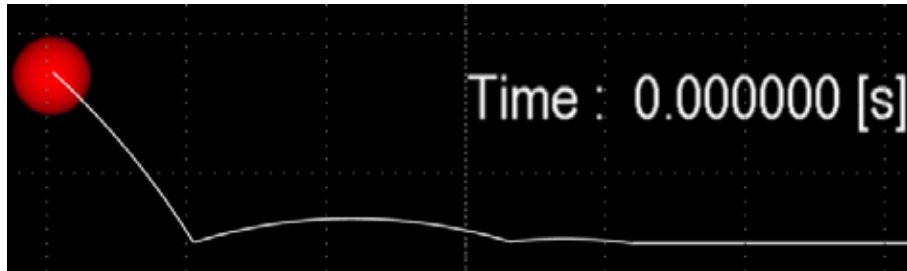


Fig.14 混合潤滑

粒子と基板が接触した際に、この接触面に液体が存在すると、潤滑の効果により摩擦接触力が低減される。固体表面の微小な凹凸内に取り込まれた液体は、静水圧により粒子－基板間の垂直方向荷重を低減するとともに、ミクロプール部分は固体摩擦が液相粘性力に置換される。ここでは静水圧を直接求めるのではなく、垂直荷重の低減率 L を用いた。液体の潤滑が作用する場合の粒子－基板間の剪断方向接触力は次式で表される。

$$F_s = F_d + F_f = \mu_d(1-L)N_d + \eta \frac{A_L v_t}{h} \quad (8)$$

これらの液体の介在による力は、粒子の運動方程式 ((1) および (2) 式) に外力項として導入することで評価した。



(a) 乾燥状態



(b) $\gamma : 0.1 \text{ N/m}$, $\eta : 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$



(c) $\gamma : 0.1 \text{ N/m}$, $\eta : 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$

Fig.15 液膜の存在する基板に衝突する粒子の軌跡

表面に液膜の存在する水平基盤に対して、45度の射出角で粒子を射出した際の粒子の軌跡を上述の接触力モデルと取り込んだDEMにより解析した結果を Fig. 15 に示す。液体の存在しない乾燥状態では、粒子は二度反発した後転がって移動するが、表面張力 0.1 N/m、粘度 0.1 Pa.s の液体が存在する場合には、粒子の反発は一度となり、跳ね返ったときの到達高さおよびこの際の空中での粒子の移動距離は小さくなり、またその後粒子が転がる際の速度も乾燥状態と比べて小さくなる。また液体の粘度を 10 Pa.s まで大きくすると、粒子の反発は見られず、初回の接触時にその場で粒子が基板上に捕捉されている。これは主に粒子接触時の粘性抵抗により粒子の持つ運動エネルギーが散逸するためである。このよ

うに液体の存在は粒子の運動に大きな影響を及ぼすことを解析上で表現することが可能になった。

第3節と同様に正三角形配置した三つの球形粒子間の開口部に複数の微粒子を同時に落下させ、粒子群のオリフィス通過挙動を液体の影響を考慮したDEMにより解析した。Fig. 16に微粒子運動を連続画像により示す。オリフィスを構成する粗粒子径は10 mm、微粒子径は0.5 mm、液体の表面張力および粘度はそれぞれ1.0 N/m および10.0 Pa.sである。微粒子はオリフィス開口部の上部に立方配列にて400個配置し、これらを同時に落下させた。乾燥条件ではオリフィス上に落下した微粒子は、0.05 sでは一旦オリフィス上に滞留するが、その後オリフィス開口部およびオリフィスの外側から順次下方に落下し、0.10 から0.2 sにかけてオリフィス上の微粒子数は減少する。0.4 s後には粒子の運動は終了しており、この時点では隣接粒子の接触部上部に少量の粒子が残留するのみとなっていた。これに対して、オリフィス粒子表面に液膜の存在する条件においては、液膜の影響によりオリフィス粒子と接触する微粒子がオリフィス粒子上に捕捉されている。この微粒子の捕捉は0.05 sの時点で既に生じており、0.10 sと0.40 sを比較すると、オリフィス粒子表面上でほとんど移動の生じていない微粒子が多数観察される。また微粒子の捕捉によりオリフィス開口部が狭隘化し、また微粒層の凹凸はその表層での粒子の移動に対する抵抗となるため、微粒子によるオリフィス開口部の閉塞が生じて、乾燥条件ではわずかな粒子しか残留していなかった0.40 sでも多数の粒子がオリフィス上に残留している。本解析は三個の粗粒子により形成されるオリフィスという単純系を対象としたものであるが、実際の充填層中に実際に存在して微粒子の通過抵抗が最も大きく、閉塞の起点となる構造であり、今後液体の存在する充填層中の粉体の運動および閉塞形成を定量的に論じる上で基礎となる情報を提供するものである。

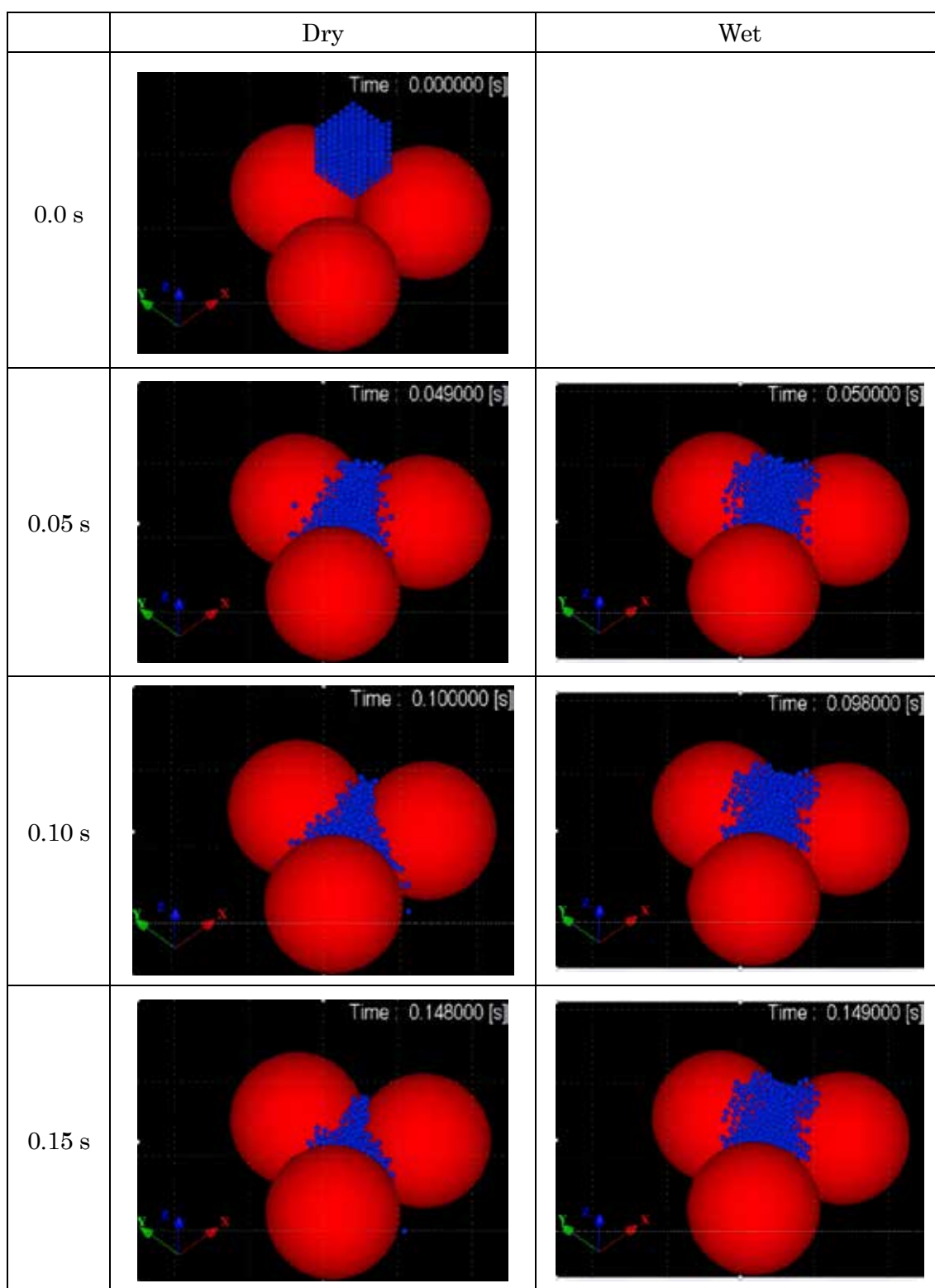


Fig.16 微粒子群の粒子オリフィス通過挙動に及ぼす介在液体の影響

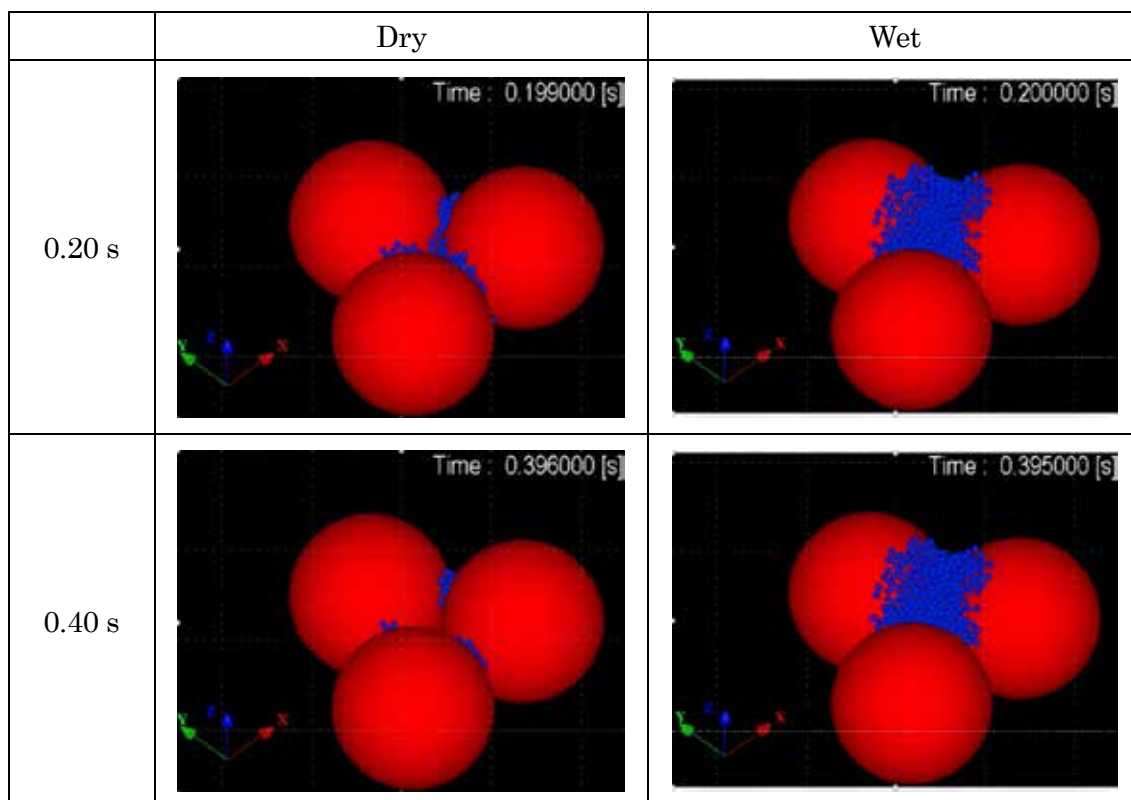


Fig.16 微粒子群の粒子オリフィス通過挙動に及ぼす介在液体の影響（続き）

5. 結 言

本研究では、高炉の低炭素安定操業を実現のために不可欠である高炉充填層内の通気・通液性の維持・向上と密接な関係を持つと考えられる液体および微粉の運動に関して、これらの共存下での流動特性の解明に取り組んだ。その結果として、まず、粒子法に分類される運動解析法により個々の流動・分散特性を定量評価することが可能になった。次に充填層中の粉体運動に及ぼす液体存在の影響の一端を実験的に明らかにし、さらに粒子運動への介在液相の影響を取り入れた解析法を開発し、液体・粉体共存時の流動と閉塞発生についてその機構のいくつかを解明するとともに定量評価を可能とした。今後これらの成果に基づいて、より実高炉に近い条件での評価・予測法への展開が図られれば、実炉の炉内状況予測や操業設計法の開発につながるものと考えられる。

謝 辞

本研究は、公益財団法人 JFE21 世紀財団より技術研究助成（2014 年度）の支援を受けて遂行されました。記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) S. Koshizuka and Y. Oka: Nuclear Science and Engineering, **123** (1996), 421.
- 2) S. Natsui, R. Soda, T. Kon, S. Ueda, J. Kano, R. Inoue and T. Ariyama: Mater. Trans., **53** (2012), 662.
- 3) H. Takahashi, H. Kawai, M. Kobayashi and T. Fukui: Tetsu-to-Hagané, **92** (2006), 996.
- 4) H. Takahashi, H. Kawai, T. Kondo and M. Sugawara: ISIJ Int., **51** (2011), 1608.
- 5) S. Natsui, S. Ueda, H. Nogami, J. Kano, R. Inoue and T. Ariyama: Chem. Eng. Sci., **71** (2012), 274.
- 6) Y. Muguruma, T. tanaka and Y. Tsuji: Powder Technol., **109** (2000), 49.
- 7) G. Lian, C. Thornton and M. J. Adams: Chem. Eng. Sci., **53** (1998), 3381.
- 8) K. Kuwagi, Takano and M. Horio: Powder Technol., **113** (2000), 287.