

出鉄滓挙動におよぼす各種炉内条件の影響

西岡 浩樹*・前田 敬之*・清水 正賢*

Effect of Various In-furnace Conditions on Blast Furnace Hearth Drainage

Koki NISHIOKA, Takayuki MAEDA and Masakata SHIMIZU

Synopsis : Stable blast furnace operation is required to reduce energy consumption and CO₂ emission in iron and steelmaking industry. For the stable blast furnace operation, precise controlled drainage is one of the important factors. Therefore, in this work, the effect of coke diameter, void fraction, coke diameter distribution, coke free space, impermeable zone, slag viscosity in a blast furnace hearth on drainage rates, gas–slag and slag–iron interfaces shapes and maximum gas–slag interfaces height were examined with a three-dimensional mathematical model.

The results indicate that the conditions of the peripheral region at the taphole level determine the residual slag volume. The packed bed in the region 2.0 m from the taphole has about 50% of contribution to the residual slag volume. The void fraction change has the largest effect on the gas–slag interfaces height. The coke diameter distribution has little effect on the total drainage rate as well as the coke diameter of the uniform packed bed, coke free space, and impermeable zone bellow the taphole level. The taphole conditions dominate the total drainage rate under the terms of the assumed blast furnace conditions. The conditions of the peripheral region in the hearth determine the drainage rate patterns of the iron and slag. The peripheral region's permeability can be predicted from the drainage rate patterns of iron and slag, if precise measurement of the drainage rate patterns can be achieved. A drainage pattern, whether iron drains prior to slag or slag drains prior to iron, is largely affected by a drainage interval.

Key words: iron and slag flow; residual slag volume; numerical simulation; VOF method; blast furnace hearth; ironmaking; coke diameter; void fraction; slag viscosity.

1. 緒言

日本の鉄鋼業は2010年に90年比CO₂発生量10.5%削減を目標としている。目標の達成には低還元材費操業を安定的かつ継続して行う必要があるが、そのためには、現在以上に精密に制御された操業が不可欠である¹⁻⁴⁾。

これまで多くの研究者が炉床における溶鉄・スラグの流動・排出挙動を解明すべく、模型実験や数値解析により研究を進めてきた¹⁻¹¹⁾が、炉内コークス粒径や空隙率分布など解析に必要な情報の入手が非常に困難であることもあり、未だ十分に解明されたとは言い難い。そこで著者らは、炉床における溶鉄・スラグの流動・伝熱挙動を明らかにすることを目的として、出鉄口内圧力損失推定モデルと炉床内流動解析モデルとで構成される3次元非定常流動・伝熱解析モデルを新たに開発した¹²⁾。このモデルにはマッドの損耗速度がパラメータとして組み込まれており、出鉄滓速度の経時変化を始めとする様々な炉内現象を高い精度で予測することが可能である。

そこで本研究では、この数学モデルを用い、出鉄滓速度、気体–スラグ・スラグ–溶鉄界面形状、最大スラグ高さに

およぼすコークス粒径、空隙率、コークス粒径分布、フリースペース、不透過層、スラグ粘性の影響について調査を行った。

2. 数学モデル

2.1 炉床内流動解析モデルの基礎式

コークスフリースペースにおいては、移流項・拡散項・圧力勾配項を考慮した通常のNavier–Stokesの式を基礎式とした。コークス粒子充填層に関しては、移流項・圧力勾配項および充填層の圧力損失項を考慮した。また充填層における圧力損失はKozeny–Carmanの式¹³⁾で評価した。

2.2 界面の追跡

スラグと溶鉄は、局所的に異なる物性値を持つ単一の流体として取り扱った。よって各計算セルに、スラグおよび溶鉄の存在割合に応じた見かけの物性値を設定する必要があるが、これを実現するには各界面の追跡が不可欠となる。本研究では界面の追跡にVOF法^{14,15)}を採用した。通常VOFは流体と気体の判別に使用するが、本研究ではスラグと溶鉄の判別にも使用した。VOF₁が0の領域を気体（計算領

域外)とし、 $0 < \text{VOF}_1 \leq 1$ の領域を計算対象領域とした。さらに、 VOF_2 が0の領域をスラグ、 VOF_2 が1の領域を溶鉄、 $0 < \text{VOF}_2 < 1$ の領域をスラグと溶鉄の界面が存在する領域とした。 VOF_1 、 VOF_2 から各セルに存在するスラグと溶鉄の存在割合を求め、算術平均により各セルの物性値を設定した。VOFの解法にはドナー・アクセプタ法を使用した。ドナー・アクセプタ法はセル内の自由表面の方向を考慮した風上差分とみなすことができる。

2.3 出鉄口内圧力損失推定モデル

出鉄口を直径 D (m)、出鉄口深度 L (m)の円管であると仮定すると、円管の表面粗度 e (m)の影響を含めた際の摩擦係数 $f^{(6)}$ は、次式で表される。

$$f = \frac{0.0626}{\left[\log \left(\frac{e}{3.7D} + \frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}} \right) \right]^2} \dots\dots\dots(1)$$

また、管壁でのせん断力と管入り口(炉内側圧力)と出口(大気圧)の圧力の釣り合いの式

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{\Delta PD}{2f\rho L}} \dots\dots\dots(2)$$

よりトータル排出速度(出鉄速度と出滓速度の合計)を求めることができる。通常の高炉操業においては、トータル排出速度を決定しているのは出鉄口であると考えられる¹²⁾。したがって、トータル排出速度の実測値からこれらのパラメータ(出鉄口直径 D 、出鉄口深度 L 、出鉄口の表面粗さ e)を求めることができる。

2.4 計算方法

基礎式に有限差分法に基づく差分法を3次元円筒座標系のスタガードグリッド上でを行い、VOF法を適用したHSMAC法^{14,15)}により解を求めた。VOFの解法にはドナー・アクセプタ法¹⁵⁾を使用した。以下の手順により、計算を行った。

- 1) 溶鉄を溶鉄表面(スラグ-溶鉄界面)に、スラグをスラグ表面(気体-スラグ界面)にそれぞれ滴下させる。
- 2) 出鉄口に最も近い計算セル内に存在する溶鉄とスラグの存在割合に基づき、出鉄口内に存在する流体の物性値を算術平均で与える。トータル排出速度を式(2)より求める。
- 3) 2)で求めたトータル排出速度を境界条件として、炉床内流動解析モデルにより炉床内の溶鉄・スラグの速度分布を求める¹²⁾。
- 4) 溶鉄・スラグの速度分布に基づき、各界面を移動させる。
- 5) 炉床内流動解析モデルにより得られた出鉄口炉内側圧力を、出鉄口内圧力損失推定モデルの境界条件として

Table 1. Conditions for calculation in Section 3.1-3.6.

Hearth temperature (K)	1773
Inner volume of blast furnace (m ³)	5000
Hearth diameter (m)	14
Taphole location from bottom (m)	3.0
Quantity of production (tonnes/d)	10,000
Slag ratio (kg/thm)	300
Taphole length (m)	2.5
Taphole surface roughness (mm)	1.0
Initial taphole diameter (mm)	53.0
Expansion rate of taphole diameter (m/s)	1.736×10^{-6}
Gas-Slag interface pressure (Pa)	4.5×10^5
Outflow pressure for taphole (Pa)	1.0×10^5

設定する。

- 6) トータル排出速度に、出鉄口に最も近い計算セル内に存在する溶鉄・スラグの存在割合をそれぞれ乗じ、溶鉄・スラグそれぞれの排出速度を求める。
- 7) 以上の手順を、気体-スラグ界面が出鉄口レベルに達するまで繰り返す。
- 8) 気体-スラグ界面が出鉄口レベルに達したら、その出鉄口を閉じる。もし流動挙動が擬定常に達していない場合は、反対側の出鉄口を開き次のタップに移行する。擬定常に達するまで以上の手順を繰り返す。

2.5 計算条件

溶鉄とスラグの物性値は、組成と温度の関数として与えられる様に設計した¹⁷⁾が、本解析では炉床温度は1773K、スラグ組成は0.3 mass% FeO, 34 mass% SiO₂, 15 mass% Al₂O₃, 42 mass% CaO, 6.5 mass% MgOとした。出鉄口出口側圧力は大気圧(1.0×10^5 Pa)とした。出鉄口炉内側圧力には、炉内流動解析モデルから Δt 毎に得られる値を設定した。出鉄口深度・出鉄口表面粗さは固定し、出鉄口直径のみが時間と共に拡大するとした¹²⁾。出鉄滓挙動におよぼす、溶鉄・スラグの半径方向の滴下分布の影響は軽微であったため、滴下分布は均一とした。なお、スラグ層中を滴下する溶鉄とスラグとの相互作用は考慮していない。計算格子は $15(r) \times 22(z) \times 32(\theta)$ の不等間隔格子を採用し、時間刻み Δt は数値解析が安定的に行える程度の十分小さな値(0.001 s)を設定した。

3.1~3.6において、炉内各種条件の影響を調査するために設定した計算条件をTable 1に示す。内容積5000m³、炉床径14m、炉底から出鉄口までの高さ3.0mの高炉を想定し条件を設定した。出鉄量は10,000 t/d、スラグ比は300 kg/thmとした。溶鉄とスラグは180°対角に設置された出鉄口より交互に排出し、出鉄滓挙動が擬定常状態に達するまで計算を行った。

3.7において、出鉄間隔および出鉄口配置の影響を調査するために、実測値が存在する神戸3高炉を想定して設定した計算条件をTable 2に示す。内容積1845m³、炉床径9.6m、炉底から出鉄口までの高さを1.2mとした。出鉄量は4,150 t/d、スラグ比は227 kg/thmとした。溶鉄とスラグ

Table 2. Conditions for calculation in Section 3.7.

Hearth temperature (K)	1773
Inner volume of blast furnace (m ³)	1845
Hearth diameter (m)	9.6
Taphole location from bottom (m)	1.2
Quantity of production (tonnes/d)	4,150
Slag ratio (kg/thm)	227
Taphole length (m)	2.5
Taphole surface roughness (mm)	1.0
Initial taphole diameter (mm)	41.6
Expansion rate of taphole diameter (m/s)	1.493x10 ⁻⁶
Gas-Slag interface pressure (Pa)	4.1x10 ⁵
Outflow pressure for taphole (Pa)	1.0x10 ⁵

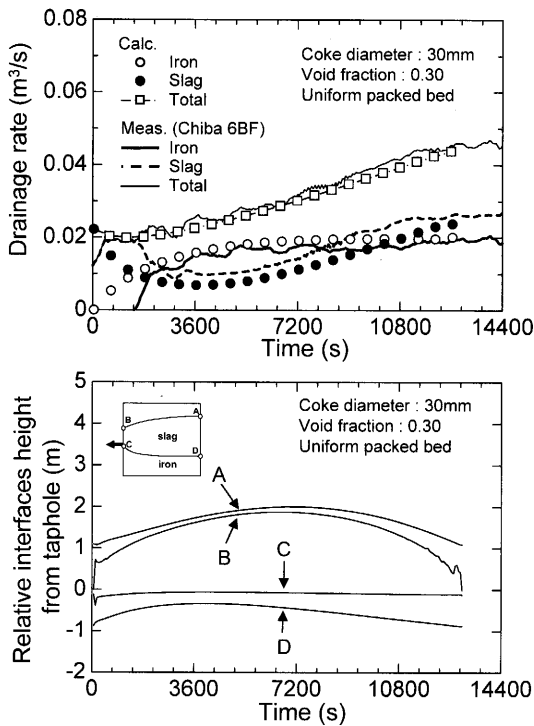


Fig. 1. Temporal variation of iron, slag and total drainage rate and relative interfaces height from taphole under base condition.

は40°の角度で設置された2つの出鉄口より交互に排出し、出鉄滓挙動が擬定常状態に達するまで計算を行った。

3. 結果および考察

各種炉内条件下にて、コークス粒径(15, 20, 30, 40, 60 mm)、空隙率(0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5)、フリースペース高さ(0.0, 1.2, 2.2 m)、不透過層厚さ(0.0, 1.2, 2.2 m)、コークス粒径分布、スラグ粘度(0.27, 0.54, 1.08 Pa·s)、出鉄間隔(0, 600, 1200, 1620, 2400 s)が溶鉄およびスラグの排出速度、残鉄滓量、界面形状の経時変化に与える影響を調査した。ベース条件は、コークス粒径30 mmの均一充填層、空隙率0.3、溶鉄およびスラグの物性値は1773Kの値を使用し、出鉄間隔0sの交互出鉄とした。ベース条件での計算結果を千葉6高炉の測定値とともにFig. 1に示すが、両者の傾向は非常に良く一致している¹²⁾。

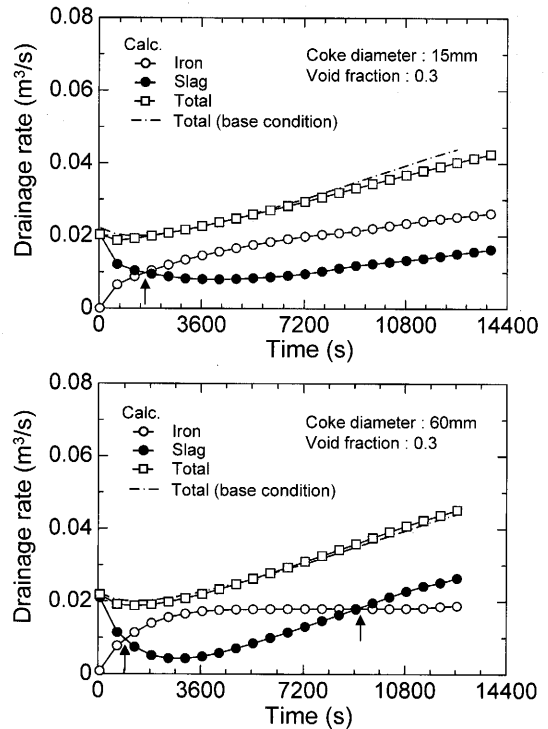


Fig. 2. Effect of coke diameter on temporal variation of iron, slag and total drainage rate. Coke packed bed is uniform.

3.1 コークス粒径の影響 (均一充填)

コークス粒径を15 mm, 60 mmとした際の出鉄滓速度の経時変化をFig. 2に示す。ベース条件を設定した際のトータル排出速度を一点鎖線にて示しているが、コークス粒径が15 mmの場合でもその差は最大8.38%であり、60 mmの場合ではわずか4.96%である。従って、トータル排出速度に与えるコークス粒径の影響は非常に小さいと言える。炉内コークス粒径が均一である場合、溶鉄とスラグの排出速度の交点(図中に矢印で示された位置)はコークス粒径の増大に伴い短時間側へと移動している。これはコークス粒径の増大に伴い炉内の通液抵抗が低下し相対的に重力の影響が強くなるため、スラグ-溶鉄界面の傾斜を維持出来なくなり、出鉄初期により多くの溶鉄が排出されるためである。これに対応して出鉄後期ではスラグの排出量が増加する。

コークス粒径を15 mm, 60 mmとした際のスラグ・溶鉄表面高さの経時変化をFig. 3に示す。出鉄中のスラグ表面の最高点(A)は、出鉄時間の約1/2すなわち出鉄開始後約7200 sで最大値を示した。出鉄口近傍の溶鉄表面高さ(C)は、常に出鉄口と同じレベルを維持しているが、溶鉄表面の平均高さは出鉄口より低く、出鉄口レベル以下に存在する溶鉄が排出されているとされる過去の報告と一致する。コークス粒径が60 mmから15 mmへと低下することにより、出鉄開始から約7200 s後のスラグ表面の最高点(A)は約1.4 m上昇し、最下点(B)も約1.0 m上昇する。これに対して溶鉄表面の最下点(D)は、約1.0 m下降している。従っ

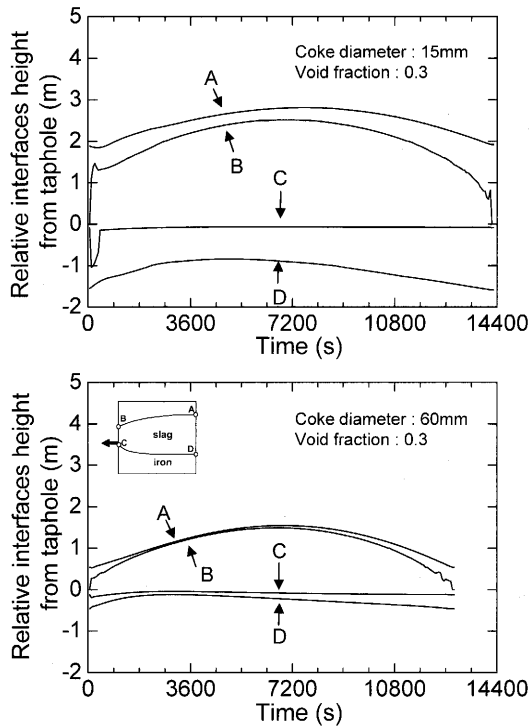


Fig. 3. Effect of coke diameter on gas-slag and slag-iron interfaces height.

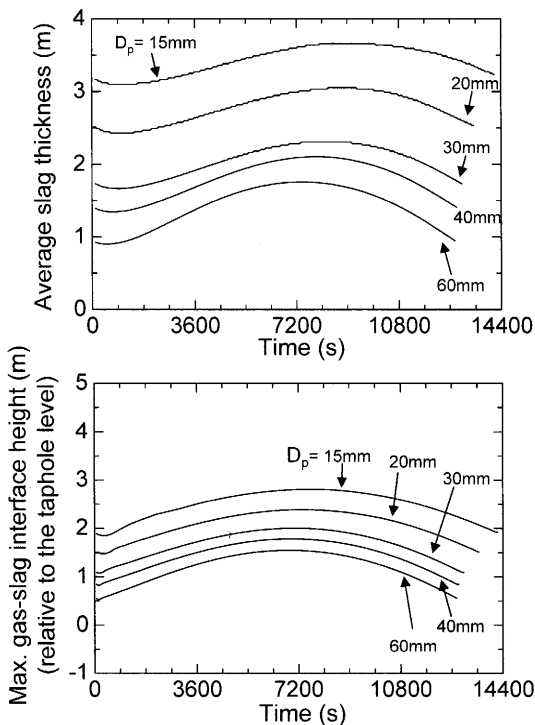


Fig. 4. Effect of coke diameter on average thickness of slag, and maximum gas-slag interface height.

で、コークス粒径が60mmから15mmへ低下することにより、スラグ層は上下両方向に拡大し、最大スラグ厚みは約2.4mの増加となる。

溶銑・スラグの平均厚み、スラグ表面の最大高さへのコークス粒径の影響をFig. 4に示す。コークス粒径の増大

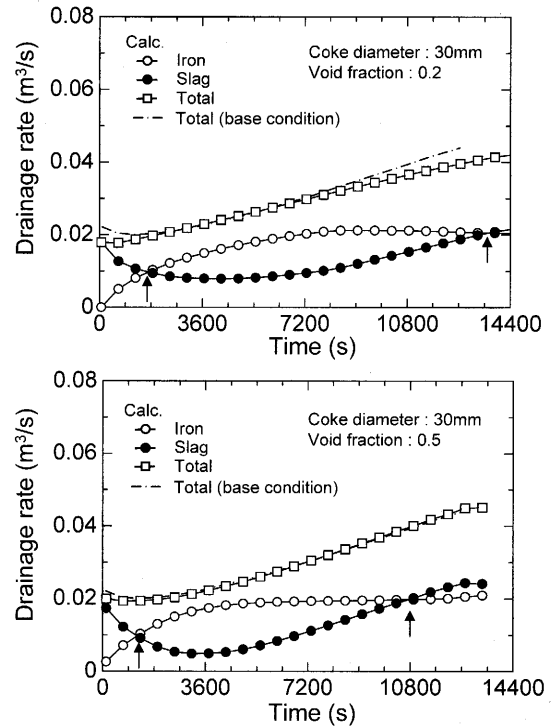


Fig. 5. Effect of void fraction on temporal variation of iron, slag and total drainage rate. Coke packed bed is uniform.

に伴い、スラグ層の厚みおよびスラグ表面の最大高さはいずれも低下する。コークス粒径の低下は、通液性の低下、出鉄口入り口圧力の低下を引き起こし、その結果としてトータル排出速度の低下すなわち出鉄滓時間の増加をもたらす。

3.2 空隙率の影響

出鉄滓速度に与える空隙率の影響をFig. 5に示す。ベース条件を設定した際のトータル排出速度を一点鎖線にて示しているが、空隙率が0.2の場合でもその差は最大9.88%であり、0.5の場合ではわずか2.01%である。従って、トータル排出速度に与える空隙率の影響は、コークス粒径の場合と同様、非常に小さいと言える。出鉄滓速度に関しては、空隙率の増加に伴い、出鉄滓速度の2つの交点が短時間側へと移行している。この傾向は、コークス粒径の影響を調査した際に確認された現象と同じであり、空隙率の増加に伴い炉内の通液抵抗が低下し、相対的に重力の影響が大きくなるためである。

気体-スラグおよびスラグ-溶銑界面高さの経時変化に与える空隙率の影響をFig. 6に、平均溶銑・スラグ厚み、最大スラグ表面高さへの影響をFig. 7に示す。空隙率の増加は、スラグ層厚みおよび最大スラグ表面高さの低下を引き起こす。スラグ表面高さにおよぼす空隙率の影響はコークス粒径の影響より大きい。これは、コークス粒径の増大は通液抵抗の低下のみをもたらすが、空隙率の増加は通液抵抗の低下と単位体積あたりに収容可能なスラグ量の増加を同時にもたらすためである。空隙率を0.2から0.5へ増加

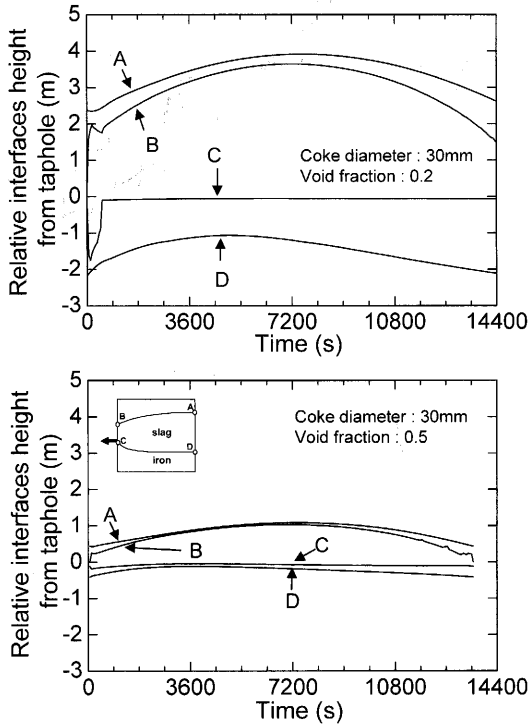


Fig. 6. Effect of void fraction on gas-slag and slag-iron interface height.

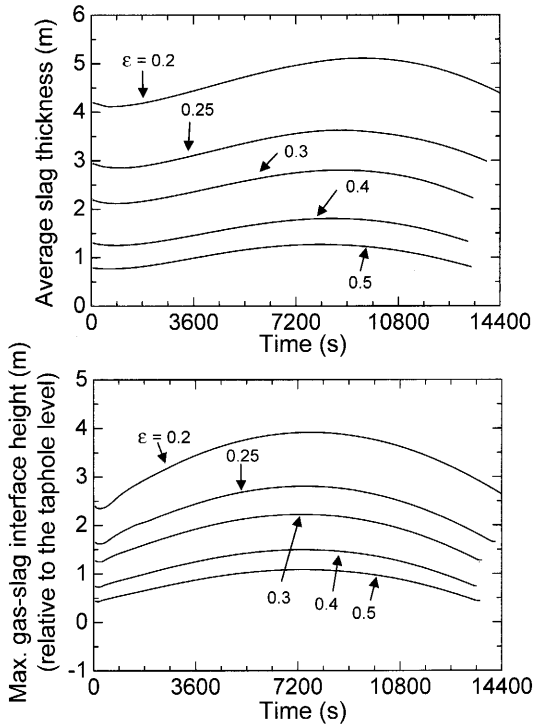


Fig. 7. Effect of void fraction on average thickness of slag and maximum gas-slag interface height.

させることにより、平均スラグ厚みは3.0-4.0m減少し、最大スラグ表面高さは約3.0m低下する。

3.3 フリースペースの影響

フリースペースを炉底から2.2mの領域に設定した際の出鉄滓速度の経時変化をFig. 8に、気体-スラグ界面およ

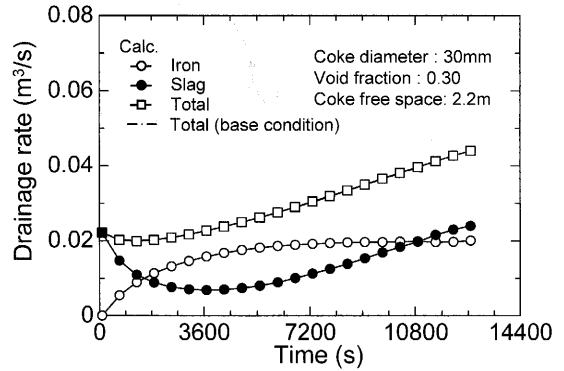


Fig. 8. Effect of coke free space on temporal variation of iron, slag and total drainage rate.

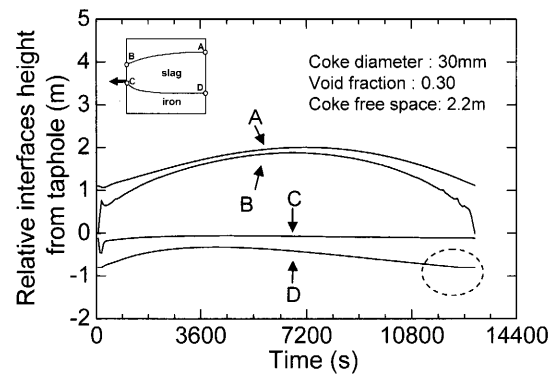


Fig. 9. Effect of coke free space on gas-slag and iron-slag interface height.

びスラグ-溶銑界面高さの経時変化をFig. 9に示す。Fig. 1, 8および9を比較すると、12000sを超えた辺りで溶銑表面の最下点 (Fig. 9のLine D) が一定レベル(-0.8m)以下に低下していないことを除けば、明確な差異は確認されない。これは、溶銑表面の最下点がコークスフリースペースに到達してしまい、フリースペースでは通液抵抗が小さいために重力の影響が顕著になり界面が勾配を維持できないためである。したがって、Zulliらの報告⁵⁾にもあるように、出鉄口レベル以下のフリースペースは出鉄滓挙動にほとんど影響を与えないといえる。

3.4 不透過層の影響

不透過層を炉底から(1) 1.2m, (2) 2.2mの領域に設定した際の出鉄滓速度の経時変化をFig.10に、気体-スラグ界面およびスラグ-溶銑界面高さの経時変化をFig.11に示す。これらの条件は、それぞれ炉底深さが出鉄口から1.8m, 0.8mの浅い高炉を想定した場合と考えることも出来る。Fig. 1, 10 および11を比較すると、フリースペースを設定した場合と同様、12000sを超えた辺りで溶銑表面の最下点 (Fig.11のLine D) が一定レベル(-0.8m)以下に低下していないことを除けば、明確な差異は確認されない。これは、スラグ-溶銑界面の最下点不透過層に到達してしまっただけである。したがって、フリースペースと同様、出鉄口レベル以下の不透過層は出鉄滓挙動にほとんど影響

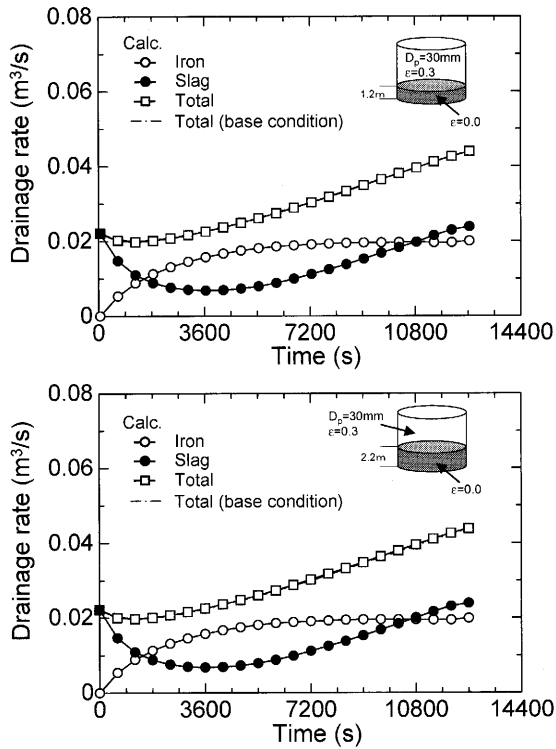


Fig. 10. Effect of impermeable zone on temporal variation of iron, slag and total drainage rate.

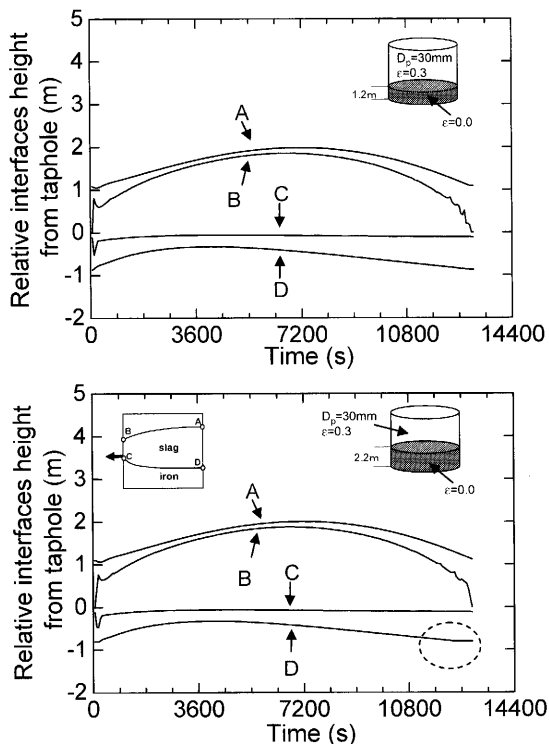


Fig. 11. Effect of impermeable zone on gas-slag and iron-slag interfaces height.

を与えないといえる。

3.5 コークス粒径分布の影響

出銑滓速度の経時変化におよぼすコークス粒径分布の影響を調査するためにFig.12に示すCase (1)~(4)の4条件を

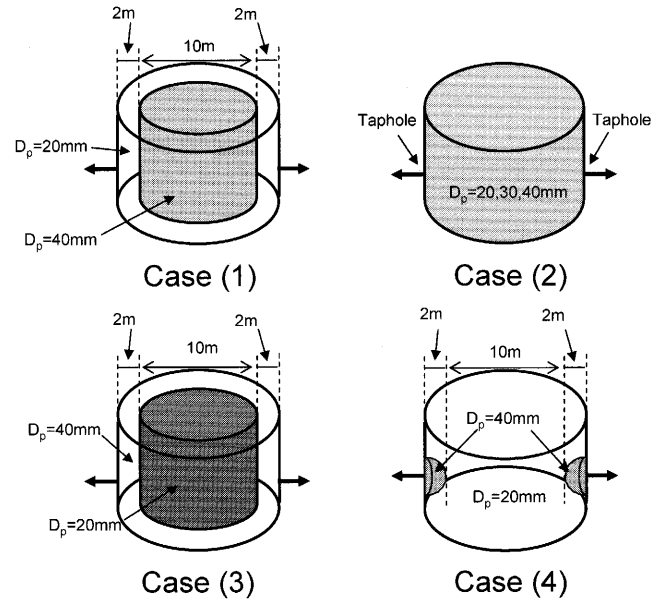


Fig. 12. Schematic drawing of coke diameter distribution for calculations.

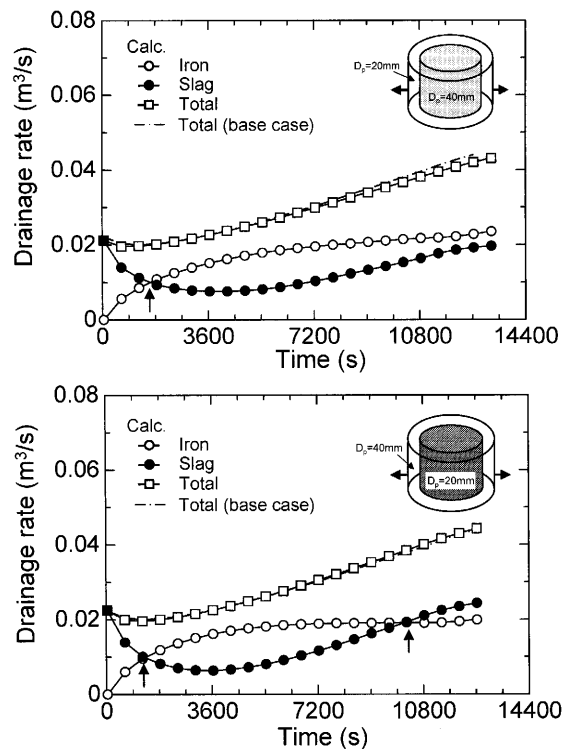


Fig. 13. Effect of packed bed structure on temporal variation of iron, slag and total drainage rate.

設定した。周辺領域と中心領域の体積割合は1:1となるように設定した。炉内コークス粒径が均一である場合、溶銑とスラグの排出速度の交点はコークス粒径の増大に伴い短時間側へと移動していた。炉内コークス粒径が分布を持つ場合、出銑滓速度パターンは、周辺領域のコークス粒径に大きく依存し、周辺部のコークス粒径の増大に伴い、溶銑とスラグの排出速度の交点は短時間側へ移動する(Fig.13)。各界面の経時変化に与えるコークス粒径分布の影響を

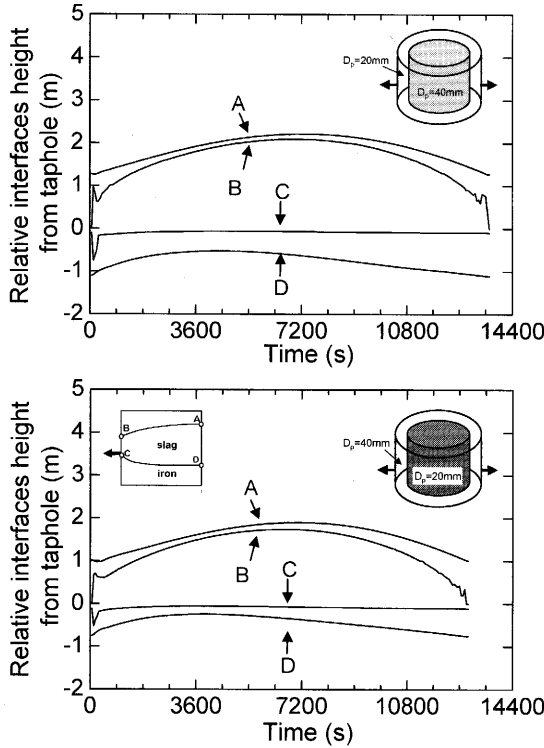


Fig. 14. Effect of packed bed structure on gas-slag and iron-slag interfaces height.

Fig.14に示す。Case (3)からCase (1)へと充填構造が変化した場合、最大スラグ表面高さは0.5m上昇し、そのときの溶銑表面の最下点は0.2m下方へ移動しており、スラグ厚みの増加は正味0.7mとなった。

Fig.15に示すように、溶銑とスラグの平均厚みは、ほぼ周辺部分のコークス粒径で決定されている。従って、出銑末期において残滓量を減少させるには、炉床周辺部のコークス粒径を可能な限り大きく保つことが重要である。これに対して、中心部分のコークス粒径は、残滓量に関してはさほど影響を与えないことがわかる。以上の結果より、周辺部分のコークス粒径が、出銑滓速度パターンおよび残滓量の両者を決定していることがわかった。

出銑口から半径2.0mの領域に直径40mmのコークスを配置しその他の領域に直径20mmのコークスを配置した条件の結果は、20mmのコークスを均一に配置した条件と40mmのコークスを均一に配置した条件の中間値を示している。体積割合にして4%程度の領域が、残銑滓量の低減に対しておよそ50%の寄与であることがわかる。従って、出銑口近傍の充填構造が何らかの形で制御できるのであれば、残滓量の大幅な低減が実現されると思われる。

3.6 スラグ粘度の影響

低還元材比操業においては、炉熱レベルを維持することは非常に困難であると予想される。炉下部温度の低下はスラグ粘度の上昇を引き起こす。そこで出銑滓速度へのスラグ粘度の影響を調査した。結果をFig.16に示す。スラグ粘度0.27, 0.54, 1.08 Pa·sはそれぞれ、スラグの動粘性係数

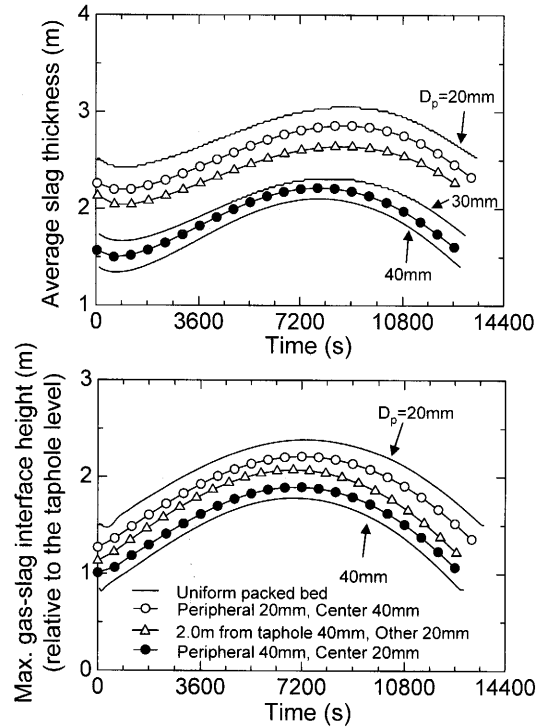


Fig. 15. Effect of packed bed structure on average thickness of slag and maximum gas-slag interface height.

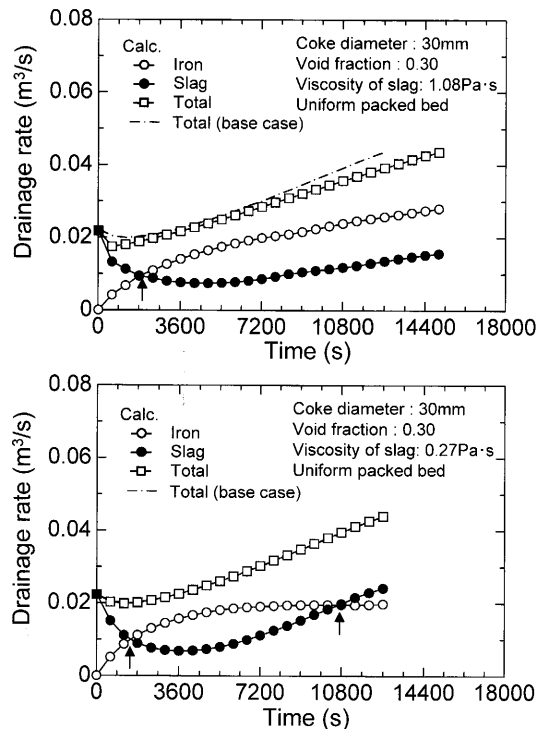


Fig. 16. Effect of slag viscosity on temporal variation of iron, slag and total drainage rate. Coke packed bed is uniform.

10×10^{-5} , 20×10^{-5} , $40 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ に対応している。スラグの粘度が $1.08 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ とベース条件の4倍になった場合でもトータル排出速度の低下は最大でもわずか10.5%であった。出銑滓速度に関しては、スラグ粘性の低下に伴い両者

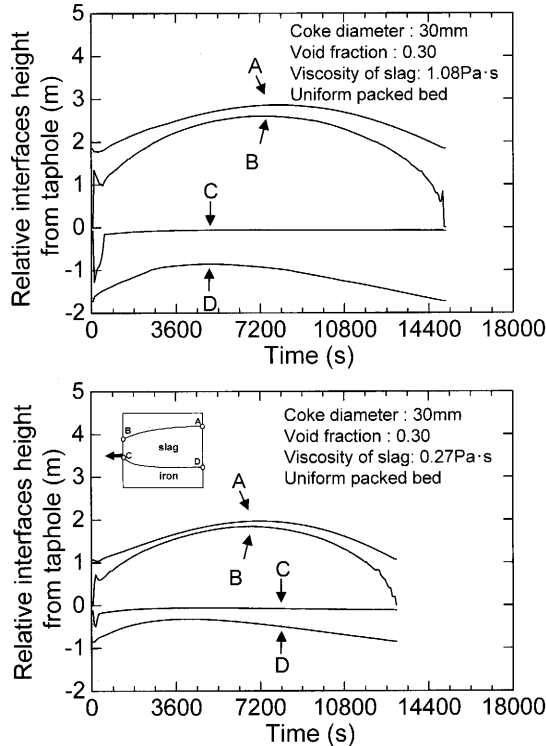


Fig. 17. Effect of slag viscosity on gas-slag and iron-slag interfaces height.

の交点は短時間側へと移動している。したがって出鉄滓速度パターンにはスラグ粘度の影響も含まれていることがわかる。しかし、低還元材比操作を行わない通常の操作時には炉熱は維持されており、スラグ粘度は十分に低く保たれている。よって低還元材比操作を行わない通常の操作時には、十分な精度で出鉄滓速度が計測できれば、その速度パターンから炉周辺領域の充填構造が推定できると考えられる。ベース条件でのトータル排出速度も示しているが、各条件におけるトータル排出速度のベース条件からのずれは10%以内であり、主として出鉄口の条件（出鉄口直径、出鉄口深度など）が出鉄滓速度を決定していることもわかる。

スラグ粘度の上昇により、最大スラグ高さは著しく上昇する。スラグ粘度が4倍になると、最大スラグ高さは0.9m上昇し、スラグ-溶鉄界面の最下点は0.5下方へ移動する。特に出鉄末期においては、スラグ-溶鉄界面の最下点（Fig.17中の線D）は1.0m炉底方向へ移動している。スラグ粘度の上昇に伴い出鉄滓時間が長時間側へ移行している。これは、スラグ粘度の上昇は炉内および出鉄口内の圧力損失の上昇を引き起こし、出鉄滓速度が低下したためである。

スラグ粘度の上昇に伴い、スラグ層の厚みが増加する。気体-スラグ界面位置は、重力と充填層内を流れるスラグに対する抗力との釣り合いで決まっている。スラグ粘度の上昇は充填層を通過するスラグの通液抵抗を上昇させるため、出鉄初期において溶鉄が優先的に排出される。残され

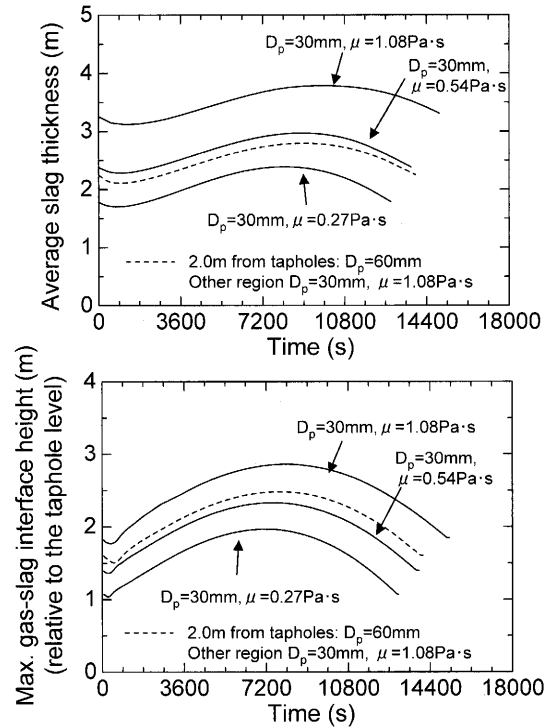


Fig. 18. Effect of viscosity and packed bed structure on average thickness of slag and maximum gas-slag interface height.

たスラグが出鉄末期に排出されることになるため、気体-スラグ界面の勾配が大きくなる。コークス粒径とスラグ粘度は残鉄滓量に対してそれぞれ逆方向の効果を示す。直径30mmのコークスを均一に配置しスラグ粘度を変化させた際の結果と、スラグ粘度が1.08 Pa·sで出鉄口から2.0mの領域に60mmのコークス粒子、その他の領域に30mmのコークス粒子を配置した際の最大スラグ高さの経時変化をFig.18に示す。出鉄口周辺領域のコークス粒子径を2.0倍することは、スラグ粘度を1/2にするのとほぼ同等の効果があることがわかる。

3.7 出鉄口の配置と出鉄間隔の影響

出鉄口の配置および出鉄間隔が出鉄滓挙動に与える影響をFig.19および20に示す。出鉄間隔を実操作と同じ1620sに設定した場合の出鉄滓速度の計算結果は測定結果と非常に良く一致している。出鉄間隔を0, 600, 1200, 1620, 2400sと変化させると、出鉄初期における出鉄速度が上昇し、出鉄滓挙動が、スラグ先行型から溶鉄先行型へと変化していく。出鉄間隔が0sの場合は、出鉄開始時の平均スラグ-溶鉄界面が出鉄口レベルより下方に位置するため、前節までに述べた条件と同様スラグ先行型の出鉄滓挙動となる。しかしながら、出鉄間隔の増加に伴い、出鉄開始時の平均スラグ-溶鉄界面レベルは次第に上昇し、ある値を境に出鉄口レベルより上方に位置するようになる。従って、溶鉄先行型、スラグ先行型いずれの出鉄になるかは、出鉄間隔に大きく依存することがわかる。

気体-スラグ、スラグ-溶鉄界面形状に着目すると、出

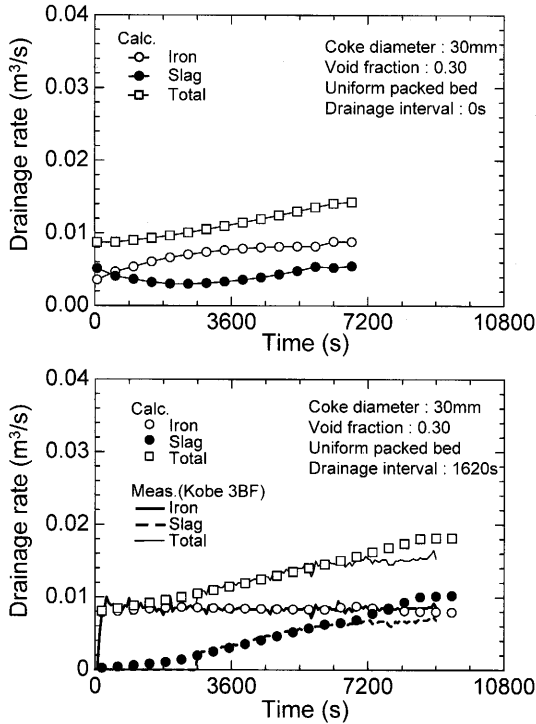


Fig. 19. Effect of drainage interval on temporal variation of iron, slag and total drainage rate.

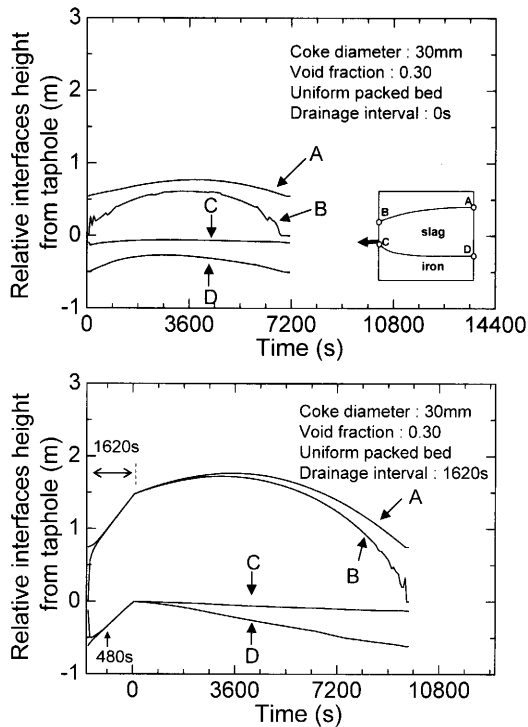


Fig. 20. Effect of drainage interval on gas-slag and iron-slag interface height.

銑間隔が1620sの場合は、両界面は出銑口閉塞後480sで水平になっている。したがって、出銑間隔が480s以上であれば、出銑口の配置は出銑滓挙動にはなんら影響を与えないことがわかる。

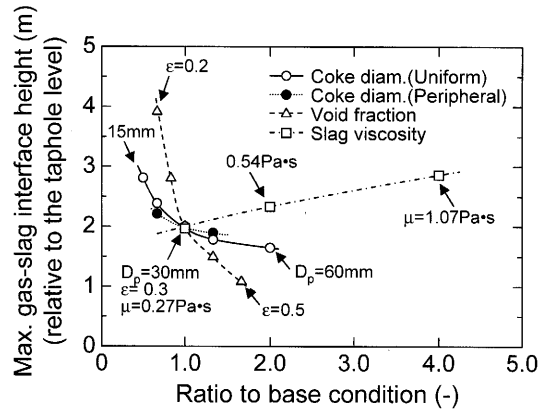


Fig. 21. Effect of various in-furnace conditions on the maximum gas-slag interface height relative to the taphole level.

3.8 各種炉内条件の最大スラグ高さへの影響

各種炉内条件の最大スラグ高さへの影響を Fig.21 に示す。出銑口レベル以下のコークスフリースペース・不透過層の最大スラグ高さへの影響は軽微であったため、図中には示していない。

コークス粒径および空隙率の増加は最大スラグレベルを低下させる。これに対して、スラグ粘度の増加は、最大スラグレベルを上昇させる。これは、各界面形状は充填層中の流通抵抗と重力とのバランスで決定されるが、Kozeny-Carman式で表されているように、通液抵抗は流体の粘度に比例し、コークス粒径の2乗と $\epsilon/(1-\epsilon)$ の2乗に反比例するためである。

コークス粒径に関しては、周辺部分の粒径を大きく保つことが重要であり、中心部分の粒径は最大スラグ高さには殆ど影響しない。コークス粒径・空隙率の増加に伴い最大スラグ高さは低下するが、空隙率の変化がより大きな影響を与える。これは、コークス粒径の増大は通液抵抗の低下をもたらすが、空隙率の増加は通液抵抗の低下に加えて単位体積あたりに収容可能なスラグ量の増加をもたらすためである。

4. 結言

高炉炉床を対象とした3次元非定常数学モデルを用い、出銑滓速度、気体-スラグ・スラグ-溶銑界面形状、最大スラグ高さにおよぼすコークス粒径、空隙率、コークス粒径分布、フリースペース、不透過層、スラグ粘性の影響について調査を行い、以下の知見を得た。

- (1) 出銑口レベル以上の領域が残滓量を決定している。出銑口から半径2.0mの領域(体積割合で約4%)が残滓量の約50%を決定している。
- (2) コークス粒径の増大、空隙率の増加は最大スラグ表面高さを低下させる。これに対して、スラグ粘度の上昇は最大スラグ表面高さを上昇させる。スラグ表面高さには、

空隙率の増加が最も大きな影響を与える。

(3) トータル排出速度におよぼすコークス粒径分布の影響は、コークス粒径、出鉄口レベル以下のフリースペース・不透過層と同様、軽微である。また空隙率、スラグ粘度の影響も、本研究で設定した条件の範囲に置いては、最大でも11%程度であり、大きくはない。

(4) 炉床周辺領域の充填構造が出鉄滓速度パターンを決定している。周辺領域の通液抵抗が低下すると、出鉄速度と出滓速度の交点は短時間側へ移行する。よって低還元材比操業を行わない通常の操業時には、十分な精度で出鉄滓速度が計測できれば、その速度パターンから炉周辺領域の充填構造が推定できると考えられる。

(5) 出鉄間隔の増加に伴い、出鉄初期における出鉄速度が上昇する。また出鉄の形態もスラグ専攻型から溶鉄先行型へと移行する。溶鉄とスラグのどちらが先に出てくるかは、出鉄間隔に大きく依存する。

本研究に必要な実高炉の寸法、操業データなどをご提供頂いた、JFE スチール株式会社、株式会社神戸製鋼所に深く御礼申し上げます。

記 号

D : 出鉄口直径 (m)
 D_p : コークス粒径 (m)
 e : 出鉄口内壁の表面粗さ (m)
 F : 体積力 (N/m^3)
 f : 摩擦係数 (-)

L : 出鉄口深度 (m)
 ΔP : 出鉄口両端の圧力差 (Pa)
 Re : レイノルズ数 (-)
 \bar{u} : 速度 (m/s)

ギリシャ文字
 ε : 空隙率 (-)
 μ : 粘度 ($Pa \cdot s$)

文 献

- 1) T.Fukutake and K.Okabe: *Tetsu-to-Hagané*, **60** (1974), 607.
- 2) T.Fukutake and K.Okabe: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **16** (1974), 309.
- 3) T.Fukutake and K.Okabe: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **16** (1976), 317.
- 4) W.B.U.Tanzil, P.Zulli, J.M.Burgess and W.V.Pinczewski: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **24** (1984), 197.
- 5) P.Zulli, F.Tanzil, Q.He, B.Wright, I.Bean and R.Nightingale: Proc. 4th Int. Cong. on Science and Technology of Ironmaking, Steel Inst. VDEh, Düsseldorf, (2003), 482.
- 6) S.Watakabe, K.Takeda, Y.Sawa and T.Kawai: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 301.
- 7) J.Torrkulla and H.Saxén: *ISIJ Int.*, **41** (2000), 438.
- 8) H.Takahashi and H.Wakai: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 373.
- 9) A.Shinotake, M.Ichida, H.Ootsuka and Y.Sugizaki: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 388.
- 10) J.Brännbacka and H.Saxén: *ISIJ Int.*, **41** (2001), 1131.
- 11) T.Nouchi, M.Yasui and K.Takeda: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 175.
- 12) K.Nishioka, T.Maeda and M.Shimizu: *ISIJ Int.*, **45** (2005), 669.
- 13) P.Carman: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **15** (1937), 150.
- 14) C.Hirt, B.Nichols and N.Romero: Los Alamos Scientific Laboratory Report, LA-5852, (1975)
- 15) C.Hirt and B.Nichols: *J. Comp. Phys.*, **39** (1981), 201.
- 16) R.B.Bird, W.E.Stewart and E.N.Lightfoot: *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, New York, (1960), 183.
- 17) T.Iida, H.Sakai, Y.Kita and K.Shigeno: *ISIJ Int.*, **40** (2000), S110.