

高炉出銑中におけるメタル/スラグ排出速度の数値解析

Numerical Analysis on Metal/Slag Drainage Rate Variation During Blast Furnace Tapping

飯 田 正 和^{*1}

Masakazu IIDA

小 倉 一 寛^{*2}

Kazuhiro OGURA

Abstract

To analyze the metal/slag drainage rate variation during blast furnace tapping, a mathematical model for calculating the pressure drop of the coke packed layer as well as the tap hole tube was proposed. The calculated results reproduced the drainage rate variation and tapping time fluctuation of a commercially operated blast furnace. It was found that tapping time is influenced not only by tap hole diameter enlargement but also by coke consumption.

1. 緒言

高炉内で生産された溶融メタルとスラグは炉床側壁に設けられたマッド材で形成されている出銑孔から排出され、この排出は出銑と呼ばれる。出銑時間を延長することで、炉前作業者の負荷が減少し、さらにマッド材原単位の低減を図ることができる。炉内での溶融物の生成速度が一定とすると、出銑時間は排出速度が小さいと長くなる。排出速度は出銑孔径が小さいと低下することから、損耗速度の小さい高耐久性マッド材が要求されている。

しかし、実操業における出銑中の排出速度変化は出銑孔の損耗のみでは説明できないことが測定で示された¹⁾。そのため、実出銑孔でマッド材の材質変更実験を行っても、結果としての出銑指標の違いがマッド材の影響によるものなのか、“炉況”という用語で一括して表現されるその他の要因の影響によるものなのかが評価できなかった。すなわち、出銑指標に与えるマッド材質の影響を正確に評価するには、“炉況”が及ぼした影響をキャンセルする必要がある。本報では、“炉況”の一例と

1. Introduction

Molten iron and slag are drained from the blast furnace (hereinafter referred to as BF) through a tap hole which is made of tap hole mix. The drainage is called “tapping”. Lengthy tapping time is appreciated for alleviation of heavy duty tapping operation as well as reduction in tap hole mix consumption. Assuming that liquid productivity in BF is constant, the tapping time becomes longer when the drainage rate is small. Since a low drainage rate is achieved with small tap hole diameter, highly durable tap hole mix with a low rate of erosion is required.

However, according to the tap hole diameter measurements, it was found that the drainage rate variation during tapping couldn't be explained only by tap hole diameter enlargement¹⁾. Hence, in practical trials of the newly developed tap hole mix, it was difficult to distinguish the influence of tap hole mix with

*1 技術研究所 グループマネージャー Manager, R&D Group, Research Center

*2 技術部 カスタマーサービス室 主任部員 Managing Engineer, Customer Service Section, Technical Dept.

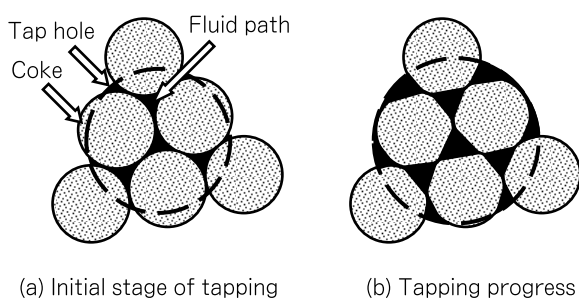


Fig. 1 Schematic illustration of coke consumption during tapping.

して、出銑孔径以外に排出速度に影響を与える要因を検討し、排出速度、出銑時間に関するモデル計算を行った^{2), 3)}。

2. 計算モデル

2. 1 圧力損失モデル

出銑孔径以外に排出速度に影響を与える要因を考えるために、出銑中に出銑孔を正面から見た様子を想定した。想定した状態をFig. 1に示す。出銑中に出銑孔を正面から見て、炉内まで透視できたとすると、炉内は空洞ではなく、コークス粒子の充填構造があり、粒子間から溶融物が流出している様子が観察されるであろう。粘度 μ の溶融物がコークス充填部を通過するときに生じる圧力損失(ΔP_1)は、出銑孔円筒を通過するときに生じる圧力損失(ΔP_2)より大きいと推定される。炉内出銑孔レベルにおいてコークスの消費が生じていることは確認されており⁴⁾、出銑が継続し、通過する溶融物によってコークス粒子が消費されると、コークス粒子の間隔は広くなることで圧力損失(ΔP_1)が低下し、流速(u)が増大することになる。

このような、出銑孔円筒とそれに接続したコークス充填部（以下、コークスフィルターと表記する）のそれぞれにおける圧力損失をFig. 2と式(1)～(5)に示したモデルで計算した。コークスフィルターは粒子径 D のコークスが充填された L_1 の長さからなる空隙率 ε の部分で、圧力損失 ΔP_1 は、3次元的に広がっている炉内での流動を考慮し、Kozeny-Carmanの式（式(1)）を用いて計算

“furnace conditions”, on the changes of tapping indices. In other words, cancellation of the influences of the “furnace conditions” is necessary to evaluate the influences of tap hole mix on tapping indices. In this study, therefore, factors influencing the drainage rate other than tap hole diameter enlargement are hypothesized as an example of furnace conditions and a mathematical model is proposed according to the hypothesis^{2), 3)}.

2. Mathematical Model

2. 1 Drainage rate regulation model

In order to investigate the factors influencing the drainage rate other than tap hole diameter enlargement, a front view of the tapping tap hole is imagined as shown in Fig. 1. As shown in Fig. 1, the coke packed layer should be observable inside the BF through the tap hole and liquid should flow out through the channels around the coke particles. The pressure drop of liquid with the viscosity μ passing through the coke packed layer (ΔP_1) should be larger than that through tap hole tube (ΔP_2). Since the existence of a coke vanishing zone at tap hole level has been confirmed⁴⁾, it is natural to hypothesize that void fraction (ε) of the coke packed layer which is connected with the tap hole increases with tapping time due to coke consumption. Consequently, pressure drop of the coke packed layer (ΔP_1) decreases resulting in the increase in liquid flow rate (u).

The entire pressure drop of the tap hole tube and connecting coke packed layer (hereinafter referred to as coke filter) is calculated by the model shown in Fig. 2 and Eqs. (1) to (5). The coke filter is the part of length L_1 that is filled by coke particles (diameter D) with void fraction ε . Considering the three dimensional flow condition in BF hearth, the pressure drop (ΔP_1) in the coke filter is calculated by Kozeny-

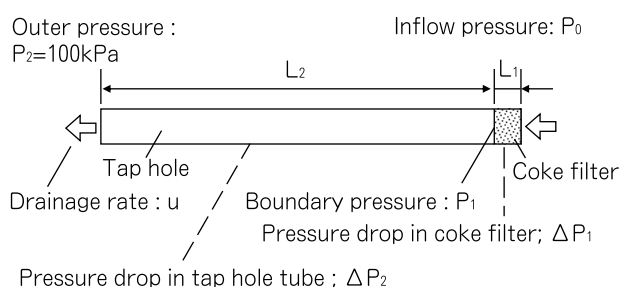


Fig. 2 Schematic diagram of mathematical model of fluid path.

した。直径が d で長さ L_2 からなる出銑孔円筒部の圧力損失 ΔP_2 は、Darcy-Weisbachの式（式（2））で計算した。式（2）の摩擦係数（ f ）の算出にはNikuradseの式（式（3））を用いた。炉内圧力を P_0 、コークスフィルターと出銑孔円筒の境界圧力を P_1 、大気圧を P_2 とすると、出銑孔円筒とコークスフィルターは接続しているので、境界で P_1 と u は等しい値となることから、これらの式の計算が可能となる。計算において、コークスフィルターの厚みは、チューニング計算で適切な値が設定される。

$$\Delta P_1 = \frac{180u \cdot \mu \cdot L_1}{D^2} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta P_2 = f \cdot \frac{L_2}{d} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \dots\dots\dots (2)$$

$$f = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}} \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta P_1 = P_0 - P_1 \dots\dots\dots (4)$$

$$\Delta P_2 = P_1 - P_2 \dots\dots\dots (5)$$

コークス粒子はメタルに溶解し、また、スラグ中FeOを還元することで細粒化するとした。コークス粒子の体積変化（ dV_{coke} ）はSun⁵⁾と砂原ら⁶⁾が実験と解析で得た1500℃における反応定数を用いて、メタルの飽和カーボン（ $[C]^{\text{sat}}$ ）、メタル中カーボン（ $[C]$ ）、排出溶融物中におけるスラグの体積分率（ $SR_{(V)}$ ）とスラグ中FeOの質量分率（ FeO_{slag} ）から計算した（式（6））。

$$dV_{\text{coke}} = A \cdot \{2.86 \cdot 10^{-5} \cdot ([C]^{\text{sat}} - [C]) \cdot (1 - SR_{(V)}) + 5.68 \cdot 10^{-6} \cdot FeO_{\text{slag}} \cdot SR_{(V)}\} \dots\dots\dots (6)$$

Carman equation (Eq. (1)). The pressure drop in the tap hole tube with diameter d and length L_2 (ΔP_2) is calculated by Darcy-Weisbach equation (Eq. (2)). Friction factor (f) in Eq. (2) is obtained by Nikuradse equation (Eq. (3)). Defining the inflow pressure, boundary pressure, and outer pressure as P_0 , P_1 , and P_2 , respectively, boundary pressure P_1 and flow rate u share identical values since the coke filter and the tap hole tube directly contact each other. Thus, u and P_1 can be obtained by simultaneous equations of Eqs. (1) and (2). Suitable length of coke filter (L_1) is adjusted by tuning calculation.

$$\Delta P_1 = \frac{180u \cdot \mu \cdot L_1}{D^2} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta P_2 = f \cdot \frac{L_2}{d} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \dots\dots\dots (2)$$

$$f = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}} \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta P_1 = P_0 - P_1 \dots\dots\dots (4)$$

$$\Delta P_2 = P_1 - P_2 \dots\dots\dots (5)$$

Depending on the assumption that coke particles are consumed by dissolution into molten metal and reduction of FeO in slag, the volume change of the coke particles (dV_{coke}) can be calculated from the saturated concentration of carbon in metal ($[C]^{\text{sat}}$), carbon concentration in metal ($[C]$), volume fraction of slag in drained liquid ($SR_{(V)}$), and mass fraction of FeO in slag (FeO_{slag}) at 1500℃ by employing the reaction coefficients measured by Sun⁵⁾ and Sunahara et. al⁶⁾ as shown in Eq. (6).

$$dV_{\text{coke}} = A \cdot \{2.86 \cdot 10^{-5} \cdot ([C]^{\text{sat}} - [C]) \cdot (1 - SR_{(V)}) + 5.68 \cdot 10^{-6} \cdot FeO_{\text{slag}} \cdot SR_{(V)}\} \dots\dots\dots (6)$$

The diameter of coke particles and void fraction of coke filter can be calculated under assumption that coke particles are spherical and the number of coke particles are constant during tapping.

ここで、コークスを球と、コークスフィルター内の粒子数は出銑時間の間一定であるとして、コークスフィルター内の粒子径と空隙比を求めた。

2. 2 溶融物中のメタル分率、スラグ表面傾斜

溶融物中のメタル分率は、時間の経過とともに変化する。また、粘性の高いスラグがコークス充填部を通過して出銑孔に集中する際、流速の速い出銑孔付近ではスラグ表面が傾斜することがわかっている^{1), 7)-9)}。これらの影響について、Nouchiら⁹⁾の検討結果を適用して計算した。Nouchiら⁹⁾は高炉からの2液の同時排出に関する冷間モデル実験を行い、炉内メタルレベルと排出溶融物中のメタルの体積分率の間に、また、コークス粒子の充填性状とスラグの表面傾斜の間に一定の関係があることを見出した。Nouchiら⁹⁾の示したモデルをFig. 3と式 (7) ~ (12) に示す。

$$v_s + v_m = v_{\text{total}} \quad (7)$$

$$v_{\text{total}} = a_{\text{tap}} t + v_{\text{total}0} \quad (8)$$

$$v_m / v_{\text{total}} = 1 + z_m / (k_f D_H) \quad (9)$$

$$\varepsilon S (dz_m / dt) = v_{m0} - v_m \quad (10)$$

$$\varepsilon S (dz_s / dt) = v_{s0} + v_{m0} - (v_s + v_m) \quad (11)$$

$$z_s - z_{\text{tap}} = (k_h D_H) \cdot \frac{\mu_s}{\rho_s g d_p^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{v_{\text{total}}}{S} \quad (12)$$

ここで、 v_s 、 v_m 、 v_{s0} 、 v_{m0} 、 $v_{\text{total}0}$ 、 a_{tap} 、 t はそれぞれスラグ排出速度、メタル排出速度、スラグ供給速度、メタル供給速度、初期排出速度、排出加速度、時間、で、 z_m 、 z_s 、 z_{tap} は出銑している出銑孔を基準とした炉内メタルレベル、炉内スラグレ

2. 2 Metal fraction in drained liquid and slag surface inclination

The Metal fraction in draining liquid varies with the tapping progress. In the furnace hearth, the slag surface inclines down towards the tap hole entry point due to pressure drop of high viscosity liquid, i.e. slag, in coke packed layer^{1), 7)-9)}. These factors are necessary to determine the drainage rate variation during tapping and tapping time and can be calculated by the BF tapping operation model proposed by Nouchi et. al⁹⁾. They demonstrated the cold model experiment imitating BF tapping operation and figured out the certain relations between coke particles' packing configuration and slag surface inclination as well as between metal level in the furnace and metal fraction in liquid drainage. The model is shown in Fig. 3 and Eqs. (7) to (12).

$$v_s + v_m = v_{\text{total}} \quad (7)$$

$$v_{\text{total}} = a_{\text{tap}} t + v_{\text{total}0} \quad (8)$$

$$v_m / v_{\text{total}} = 1 + z_m / (k_f D_H) \quad (9)$$

$$\varepsilon S (dz_m / dt) = v_{m0} - v_m \quad (10)$$

$$\varepsilon S (dz_s / dt) = v_{s0} + v_{m0} - (v_s + v_m) \quad (11)$$

$$z_s - z_{\text{tap}} = (k_h D_H) \cdot \frac{\mu_s}{\rho_s g d_p^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{v_{\text{total}}}{S} \quad (12)$$

Where, v_s , v_m , v_{s0} , v_{m0} , $v_{\text{total}0}$, a_{tap} , and t represents the slag drainage rate, metal drainage rate, slag supply rate, metal supply rate, initial drainage rate, drainage rate acceleration, and time, respectively. z_m , z_s , and z_{tap} represents the levels of metal in the furnace, slag in the furnace, and slag at the tap hole position, respectively. d_p , ε , μ_s , ρ_s , D_H , and S represent coke particle diameter, void fraction of coke packed layer, slag viscosity, slag density, hearth diameter, and hearth cross section area, respectively. k_f and k_h are the non dimensional arbitrary constants. This experiment gave the results of $k_f=0.17$ and $k_h=7.0$ ⁹⁾.

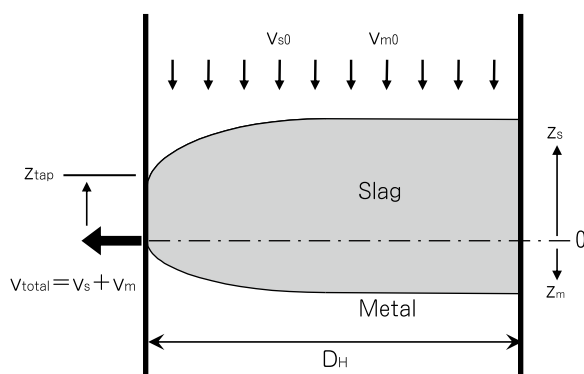


Fig. 3 Schematic illustration of mathematical model for tapping operation.

ベル，出銑孔位置におけるスラグレベルである。また d_p ， ε ， μ_s ， ρ_s はコークス粒子径，コークス充填層空隙比，スラグ粘度，スラグ密度，で， D_H ， S は炉床径，炉床断面積である。 k_f と k_h はそれぞれ無次元定数で，実験により $k_f=0.17$ ， $k_h=7.0$ が得られている⁹⁾。

3. 計算結果と考察

式(7)，(8)で示された排出速度変化を，式(1)，(2)から計算される u で与えるモデルを用いて，A高炉（連続的交互出銑操作を行っている炉内容積4500m³以上の国内の高炉）における連続的交互出銑操作をシミュレーションする計算を差分法で行い，測定値と比較した。

Table 1に計算に用いたデータを，Fig. 4，5にA高炉のPeriod (A)，(B)における排出速度変化の測定値と計算結果を示す。Period (A)は比較の出銑時間の長い操作を行っていた時期で，Period

In this study, the drainage rate variation indicated in Eqs. (7) and (8) were obtained by flow rate (u) calculated by Eqs. (1) and (2).

3. Calculation Results and Discussion

By using the model described in the previous section, tapping operations of BF A were simulated. BF A is a 4500m³ class BF in Japan where typical consecutive alternate tapping is carried out, at periods (A) and (B). Longer tapping time tended to be achieved at period (A) than period (B). For both periods, the same tap hole mix was applied.

The calculating conditions are shown in Table 1. Figs. 4 and 5 show the comparisons of drainage rate variations between calculated results and observed condition. Most of the data are quoted by values shown by Nouchi et. al⁹⁾. Tap hole diameter enlargement rate (k_{TH}) refers to the measured value shown by Nishioka et. al¹⁾.

The viscosity of the drainage liquid is thought to vary in accordance with its metal fraction, but despite this, a mean value of metal and slag viscosity is used as a fixed value of drained liquid viscosity (μ) due to no availability of measured data. In spite of the general prospect that drainage liquid viscosity tends to lower with an increase in metal fraction, no remarkable misfit is observed between calculation and actual data even at the 60 to 120 minutes tapping time span in Fig. 4, where the highest metal fraction is expected. This indicates little effect of liquid viscosity on the drainage rate. As for the drainage liquid density, the value is changed subject to metal fraction.

Density of the liquid (ρ) is changes with metal fraction. Coke filter thickness (L_1) is optimized so as to fit the observed initial drainage rate (0.02m³·s⁻¹) as indicated in Fig. 6. Tap hole length (L_2) is presumed to be constant. Coke

Table 1 Calculating conditions

Period		(A)	(B)
Production/t·d ⁻¹	Prod	10,000	10,000
Hearth diameter/m	D_{TH}	15	15
Slag ratio/-	Sr	0.3	0.3
Coke diameter/m	d_p	0.024	0.024
Void fraction/-	ε	0.3	0.3
Mass transfer coefficient of coke dissolving in Metal/m·s ⁻¹	k_m	2.86×10^{-5}	2.86×10^{-5}
Carbon saturation degree of metal/mass%	$[C]^{sat} - [C]$	0.15	0.40
Overall reaction rate constant of FeO reduced by coke/m·s ⁻¹	k	5.68×10^{-6}	5.68×10^{-6}
FeO fraction in slag/mass%	FeO_{slag}	0.30	0.30
Slag density/kg·m ⁻³	ρ_s	2800	2800
Metal density/kg·m ⁻³	ρ_m	6700	6700
Slag viscosity/Pa·s	μ_s	0.435	0.435
Metal viscosity/Pa·s	μ_m	0.006	0.006
Inflow pressure/kPa	P_0	350	350
Outer pressure/kPa	P_2	100	100
Length of coke filter/m	L_1	0.024	0.024
Tap hole length/m	L_2	3.5	3.5
Initial tap hole diameter/m	d_{TH0}	0.060	0.060
Tap hole diameter enlargement rate/m·s ⁻¹	k_{TH}	5.6×10^{-7}	5.6×10^{-7}

(B) は比較的出銑時間が短かった時期であり、マッド材は同材質を使用していた。

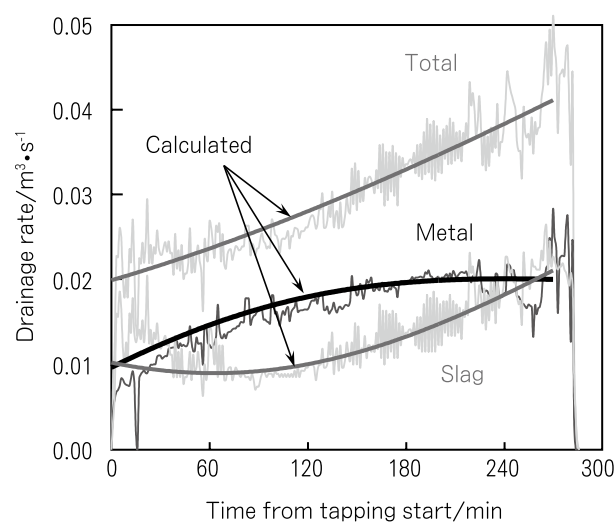
計算に用いたデータはNouchiら⁹⁾によって示された値を用いた。出銑孔径拡大速度 (k_{TH}) はNishiokaら¹⁾によって実測された値を用いた。液体の粘度 (μ) は、メタルとスラグの平均値を用い、不変とした。液体の粘度はメタルとスラグの比によって変化すると考えられるが、その測定された例はない。一般的には、メタル量が増えると粘度が低くなり、結果として排出速度が増大すると推定されるが、Fig. 4において、最もメタル比が高くなる出銑開始後60～120分における排出速度が大きいとはいえない。これより、液体の粘度変化は、排出速度に重大な影響を与えるほど大きくないと考えた。

液体の密度 (ρ) はメタル比に応じて与えた。コークスフィルターの厚み (L_i) は計算される初期排出速度がFig. 4, 5に示されている初期排出速度、 $0.02\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ に合うようにフィッティングした (Fig. 6)。 $[C]^{\text{sat}} - [C]$ は試行錯誤的に仮定した。深度は一定であるとした。コークスフィルター中のコークス粒子径と空隙率は、出銑開始時にコー

particle diameter and void fraction in the coke filter are assumed to be identical to those of the coke packed layer at tapping start. At each time step in the simulative calculation, u and P_i were obtained by Newton method. The effect of the initial conditions disappears after a few taps, the cyclic quasi-steady state of the alternative tapping has been adopted as the calculated results.

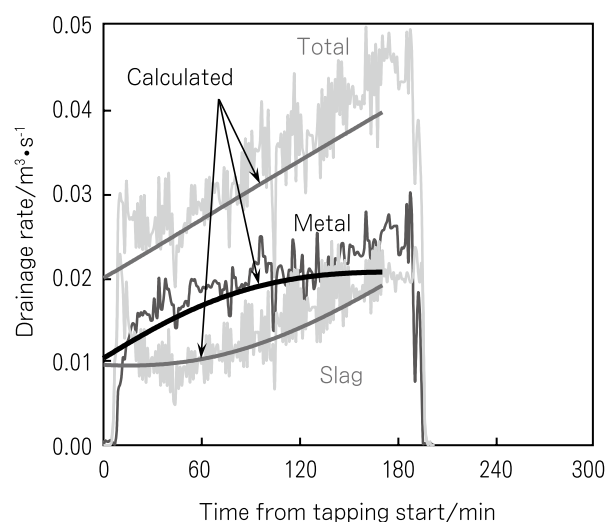
Although only the carbon saturation degree of metal ($[C]^{\text{sat}} - [C]$) is adjusted by referring to the tapped value of each period, both calculations reproduce the practical data well. Since the tap hole diameter enlargement rates for both calculations are assumed to be identical, it was concluded that the increase in void fraction in the coke filter due to coke consumption influenced the calculated results.

According to the conclusion, the influence of FeO fraction in slag on tapping time was evaluated. The daily average tapping time of BF B, a 4500m^3 class BF in Japan where consecutive



Values	Tapped	For Calculation
C in metal/mass%	4.51	$[C]^{\text{sat}} - [C] = 0.15$
FeO in slag/mass%	0.28	0.30

Fig. 4 Typical drainage rate variation during tapping at Blast Furnace A in the period (A).



Values	Tapped	For Calculation
C in metal/mass%	4.27	$[C]^{\text{sat}} - [C] = 0.40$
FeO in slag/mass%	0.32	0.30

Fig. 5 Typical drainage rate variation during tapping at Blast Furnace A in the period (B).

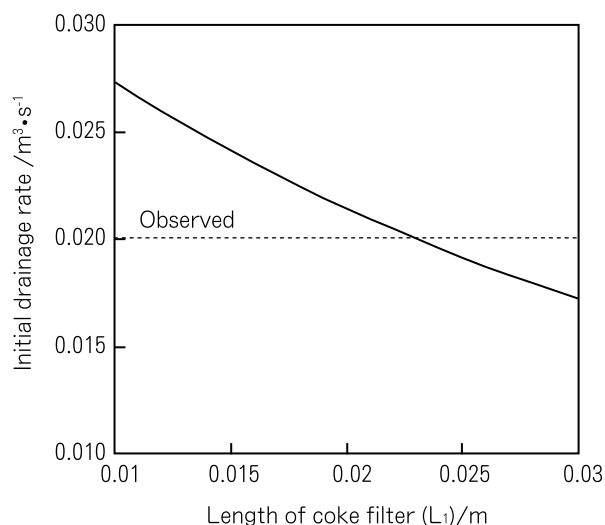
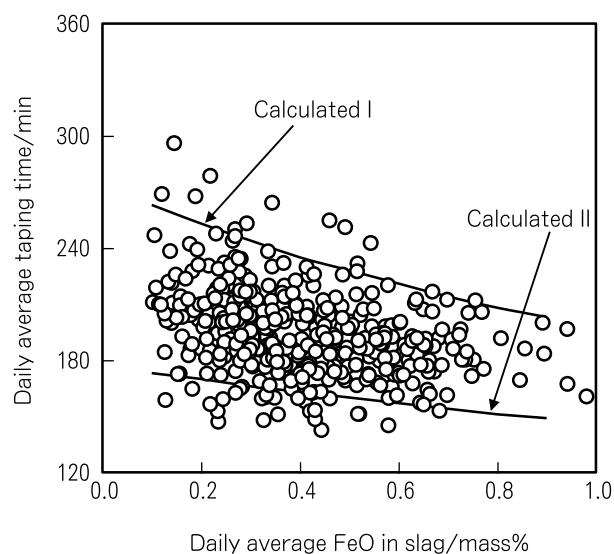


Fig. 6 Calculated initial drainage rate as a function of coke filter length.

クス充填層と同じ値をとるとした。計算のそれぞれのステップにおいて、 u と P_2 はNewton法で与えた。初期条件の影響は数tapで解消し、周期的な定常状態が算出された。計算は、メタル中Cの不飽和度 ($[C]^{\text{sat}} - [C]$) のみそれぞれの時期のC量の差に合わせた調整を行ったが、計算結果は測定値をよく再現した。Fig. 4, 5において、出銑孔径拡大速度は測定データ¹⁾を元に同じ値を用いているため、計算結果に影響したのはコークスフィルター内のコークスの細粒化速度とそれに起因するコークスフィルターの空隙比の上昇速度である。

これに基づき、スラグ中FeOが出銑時間に与える影響を計算で評価した。Fig. 7にB高炉（連続的交互出銑操作を行っている炉内容積4500m³以上の国内の高炉）における日平均出銑時間とFeOの関係を示す。計算は、データ採取時のB高炉の代表的な操業諸元（ほぼTable 1と同じ）を用いて、出銑孔径拡大速度一定の条件でメタルCの不飽和度とスラグ中FeOのみを調整して行ったが、実測値とよい対応が得られた。

このように、コークス充填層の存在とコークスの消費速度を考慮した圧力損失モデルを適用することで、出銑孔耐火物損耗のみでは説明困難な排出速度や出銑時間の変動を説明できた。これよ



Calculated I : $[C]^{\text{sat}} - [C] = 0.10 \text{ mass\%}$
 Calculated II : $[C]^{\text{sat}} - [C] = 0.40 \text{ mass\%}$

Fig. 7 Comparisons of tapping time dependencies on FeO fraction in slag at BF "B" between calculation and observed.

alternate tapping is carried out, as a function of the daily average FeO fraction in drained slag is shown in Fig. 7. Theoretical curves, obtained by model calculation using typical operating conditions of BF B (almost identical with Table 1) with adjustment of the degree of carbon saturation in the metal and FeO fraction in the slag, agree with the measured value.

As described above, variations in drainage rate or tapping time, which are difficult to explain only by tap hole diameter enlargement, can be reproduced with a drainage rate regulation model consisting of tap hole tube and coke packed layer whose void fraction increases due to coke consumption. Thus, it is reasonable to assume that deviations in drainage rate and tapping time are attributable not only to tap hole diameter enlargement but also to coke consumption.

If the influence of "furnace conditions" on tapping time can be canceled to some extent by taking into account the carbon saturation of

り、高炉からの排出速度や出銑時間の変動には、出銑孔径拡大のみでなく、コークスの消費が影響を与えていると考えられる。

マッド材質の出銑時間への影響を評価する場合、本報で示したモデルに基づいてメタルのカーボン不飽和度やスラグ中FeO量を考慮、“炉況”の一部をキャンセルすれば、材質の影響をより高い精度で評価でき、適切な材質対応を短期間で行うことが可能になると考えられる。

4. 結言

高炉からの溶融物の排出について、出銑孔径の拡大とともに、出銑孔炉内側におけるコークスの消費を考慮した圧力損失モデルを提案し、排出速度の計算を行った。計算結果は実測値とよく一致し、排出速度や出銑時間にコークス充填層における圧力損失も影響していると考えられた。

実出銑孔でマッド材の材質変更実験を行った場合、今回の計算結果を考慮、“炉況”の一部をキャンセルして結果を解析することで、マッド材質が出銑時間に与えた影響を、より高い精度で評価することが可能となった。このような解析により、材質対応を効率よく行うことができると考えられる。

metal and FeO fraction in slag by the proposed model, it becomes possible to evaluate the influence of the tap hole mix property on tapping time with high accuracy. As a result, appropriate application of tap hole mix corresponding to a certain “furnace conditions” is possible.

4. Conclusion

The liquid drainage rate from the blast furnace and tapping time were calculated by a mathematical model consisting of a tap hole tube of which the diameter enlarges due to corrosion, and the adjacent coke packed layer in which coke particles are consumed. Good agreement between calculated results and the observed data presumes drainage rate and tapping time dependency on pressure drop in the coke packed layer as well as on pressure drop in tap hole tube.

Taking the analyzed results into account, some extent of the contributions of “furnace conditions” on tapping time can be canceled. Therefore, in the case of field trials of the newly developed tap hole mix, the influence of tap hole mix can be evaluated with high accuracy. As a result, through correspondence, production of a tap hole mix suitable for a certain “furnace conditions” would become possible.

References

- 1) K. Nishioka, T. Maeda and M. Shimizu : ISIJ Int. 45 [5] 669 (2005).
- 2) M. Iida, K. Ogura, and T. Hakone : ISIJ Int. 48 [4] 412 (2008).
- 3) M. Iida, K. Ogura, and T. Hakone : ISIJ Int. 49 [8] 1123 (2009).
- 4) Y. Kushima, Y. Arino, J. Ohno, M. Nakamura, and G. Tachimori : Tetsu-to-Hagane, 71 S65 (1985).
- 5) H. Sun : ISIJ Int., 45 [10] 1482 (2005).
- 6) K. Sunahara, T. Inada, and Y. Iwanaga : Tetsu-to-Hagane 78 [7] 1156 (1992).
- 7) T. Fukutake and K. Okabe : Tetsu-to-Hagane, 60 [6] 607 (1974).
- 8) W. B. U. Tanzil, P. Zulli, J. M. Burgess and W. V. Pinczewski : Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 24 , 197 (1984).
- 9) T. Nouchi, T. Sato, K. Takeda and T. Ariyama : ISIJ Int., 45 [10] 1515 (2005).