

© 1992 ISIJ

論文

コークス充填層における溶融スラグの静的
ホールドアップの支配因子大楠 洋*・佐々 豊*・富田 幸雄*
田中 勝博*・長谷川守弘*²

Main Factors Affecting Static Holdup of Molten Slag in Coke-packed Bed

Hiroshi OHGUSU, Yutaka SASSA, Yukio TOMITA,
Katuhiro TANAKA and Morihiro HASEGAWA

Synopsis :

Fundamental experiments under high temperature were carried out to clarify the dropping behavior and residual mechanism of molten slag in the lower part of blast furnace.

According to the result of experiment, it was verified that residual phenomenon of molten slag in the coke-packed bed was controlled by capillarity caused by immersion wetting. Static holdup of molten slag was able to be shown by dimensionless empirical formula considering balance between static pressure and that based on immersion work.

Void diameter affected the quantity of slag droplet that residued in graphite funnel, that is to say, the quasi-packed bed, and its residue was present only under critical void diameter. It is estimated that static holdup indicates almost zero under the condition that coke diameter in the deadman is more than about 20 mm.

Key words : static holdup; blast furnace; capillarity; measurement; deadman; fundamental experiment; immersion wetting; molten slag; packed bed.

1. 緒 言

高炉滴下帯での溶銑やスラグ等、融液のホールドアップが増加すると、充填層の見かけの空隙率を減少させ、通気性や炉芯への伝熱に悪影響をおよぼすと考えられている。すなわち、融液のホールドアップはガスの圧力損失や融液の炉内滞留時間を定める際に不可欠な基礎データであり、高炉の生産限界等の操業解析を行うためには、このホールドアップの推定が必要である。

充填層内での液ホールドアップは大別すると、静的ホールドアップと動的ホールドアップに分類できるが、いずれも粒子の充填構造、融液の物性や充填物との濡れ性にその量は依存すると考えられている¹⁾。福武ら¹⁾、あるいは杉山ら²⁾は滴下帯と力学的に相似な条件で冷間模型実験を行い、その結果に基づき、液ホールドアップの推算式を提案している。しかし、これまでの水溶液を用いた冷間模型による研究では物性値(特に、表面張力)

や充填物との濡れ性が溶銑やスラグとは大幅に異なり、溶銑やスラグのホールドアップについて、そのメカニズムは十分に検討されたとはいいがたい。一方、高温条件下での調査では、佐藤ら³⁾が黒鉛製漏斗をコークス充填層と想定し、X線透過装置を備えた電気炉を用いて溶銑の滴下挙動の直線観察を行っている。また、丹羽ら⁴⁾は羽口サンプラーを用いて炉内容物を採取し、溶銑、スラグの静的ホールドアップとコークス調和平均径との関係を調査している。

本研究は、高炉滴下帯でのスラグの滞留メカニズム、すなわち、静的ホールドアップの支配因子を明らかにするため、佐藤ら³⁾と同様の模擬充填層、ならびにコークス充填層に高炉系スラグを滴下できる滴下帯シミュレータでガス流れのない条件での静的ホールドアップの測定を行い、その測定値を別途実測した密度、表面張力や黒鉛との接触角を用いて解析した。また、実炉コークス充填層の通液性を把握するため、静的に融液が滞留する限

平成3年11月8日受付 平成4年4月10日受理 (Received on Nov. 8, 1991; Accepted on Apr. 10, 1992)

* 日新製鋼(株)鉄鋼研究所 (Steel R & D Laboratories, Nisshin Steel Co., Ltd., 11-1 Showa-cho Kure 737)

*² 日新製鋼(株)鉄鋼研究所 工博 (Steel R & D Laboratories, Nisshin Steel Co., Ltd.)

界コークス径について検討を加えた。

2. 実験方法

2.1 模擬充填層によるスラグ融液の滴下実験

Fig. 1 に実験装置の概略を示す。装置は二珪化モリブデン (MoSi₂) 電気炉、模擬充填層としての黒鉛製漏斗、スラグ捕集するつばから構成されている。黒鉛製漏斗は内径 40 mm であり、底部に 122° の傾斜を設けた。

供試スラグは特級試薬の SiO₂, Ca(OH)₂, Al₂O₃, MgO を配合し、黒鉛製つばで溶解後に粉碎したものである。実験パラメーターは、黒鉛製漏斗のスラグ流出孔径(3.0~4.8 mm)およびスラグ塩基度(CaO/SiO₂=0.8, 1.2 の 2 水準)である。Table 1 に供試スラグの化学組成を示す。

実験では、スラグ流出孔に黒鉛製ストッパーを装着した黒鉛製漏斗内にあらかじめ 50 g のスラグを入れ、電気炉内で Ar 雰囲気のもと 1500°C まで加熱した。温度が 1500°C に到達した後、ただちにストッパーを抜取ってスラグを滴下させた。黒鉛製漏斗内にスラグが滞留していた場合は、炉冷後、漏斗からそのスラグを取り出して拡大投影機を用いてスラグの寸法と接触角を測定した。

2.2 コークス充填層内での静的ホールドアップの測定

Fig. 2 に滴下帯シミュレータの概略を示す。実験では、二珪化モリブデンを発熱体とする壺型電気炉の均熱帯に、粒径 11~13 mm のコークスを所定層高 (50 mm

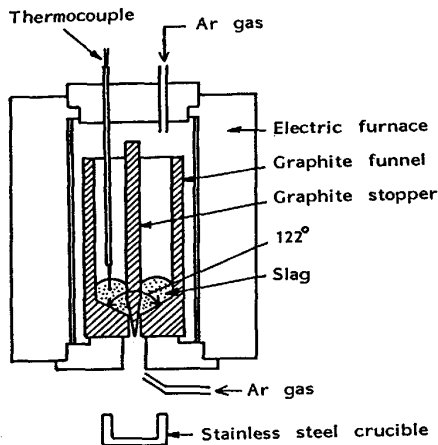


Fig. 1. Experimental apparatus for slag flow in quasi-packed bed.

Table 1. Chemical compositions of slags.

Sample	Chemical compositions (mass %)				CaO/SiO ₂ (—)
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	
A	44.3	36.9	12.8	6.1	1.2
B	35.5	45.8	12.9	5.8	0.8

と 80 mm の 2 水準) まで充填した黒鉛製つば (内径 60 mm×深さ 200 mm, 底部に径 5 mm×13 個のスラグ流出孔) を設け、Ar 雰囲気中で所定温度まで昇温した。所定温度に到達後は、高炉滴下帯におけるスラグの空塔滴下速度と同等の条件¹⁾ ((4.8±0.3)×10⁻⁵ m/s) になるように、るつばの上部からマイクロスクリーフフィーダーにより粒状スラグを連続的に供給した。コークス充填層内を滴下したスラグ融液は、装置下部の荷重計上に置かれたるつばで捕集し、そのスラグの積算重量を連続測定した。

実験時間はスラグ供給開始から 90 min であり、また、供給時間は充填層内でのスラグの滴下が定常に達するまでの時間を考慮して約 13 min とした。

供試スラグは特級試薬の CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO を用い、あらかじめ所定配合して焼成し、0.25~1.0 mm の粒度に粉碎したものである。焼成温度は各スラグ組成での平衡液相線温度の 50~100°C 以下を目安とし、焼

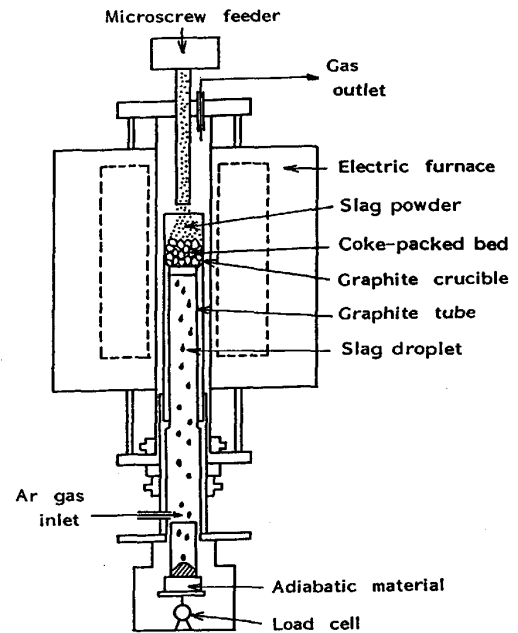


Fig. 2. Experimental apparatus for slag flow in coke-packed bed.

Table 2. Chemical compositions of slags after taking measurements of static holdup.

No.	Chemical compositions (mass %)					CaO/SiO ₂ (—)
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	S	
1	39.0	42.0	14.0	5.7	0.038	0.93
2	33.9	43.1	14.6	5.8	0.039	0.79
3	39.0	42.0	14.0	5.7	0.038	0.93
4	40.8	39.8	13.7	6.4	0.088	1.03
5	42.1	38.1	13.3	6.5	0.027	1.10
6	44.0	36.0	13.5	6.5	0.031	1.22
7	39.0	42.0	14.0	5.7	0.038	0.93
8	42.9	37.5	13.1	6.9	0.017	1.14

成状況を観察しながら温度を設定した。Table 2 はホールドアップ実験での供試スラグの化学組成を示す。

るつば底部の滴下孔等、充填層以外の部分に滞留するスラグの影響を除くため、充填層高を2水準変えた実験を行い、(1)式を用いて静的ホールドアップ (h_s) を算出した。なお、本研究で得られた h_s とは Shulman⁵⁾ の定義した、スラグの供給を止めて放置した後に充填層内に滞留している融液の容積百分率である。

$$h_s = 100 (W'_{80} - W'_{50}) / (\rho \cdot V_{30}) \dots\dots\dots (1)^{5)}$$

記号の説明は以下に用いるものを含め、文末に一括した。

充填層の空隙率 (ϵ) は実験ごとに実測のコークス層高、コークス粒子重量とコークスのみかけ密度から計算により求めた。 ϵ は 0.45 ± 0.01 であった。

2.3 スラグの密度、表面張力および黒鉛との接触角の測定

測定は静滴法によった。スラグ試料 0.4~0.5 g を水平な黒鉛基盤上に置き、電気炉内を排気して精製 Ar ガスに置換後、Ar ガスを流しながら 1450~1550°C に昇温してスラグ液滴の写真撮影を 5 min 間隔で 240 min

行った。この液滴形状をもとに、Bashforth-Adams の数表⁶⁾を用いて接触角、密度および表面張力を算出した。本測定に供したスラグ試料は上述の静的ホールドアップ測定実験でコークス充填層内を滴下後、炉下部のるつばで捕集したものである (Table 2)。

なお、報告例^{7)~10)}の多い CaO-SiO₂-Al₂O₃ 系スラグについて表面張力の測定を行い、本測定値の妥当性を事前に確認した。

3. 実験結果

3.1 模擬充填層のスラグ流出孔径と滞留スラグ量との関係

Fig. 3 は黒鉛製漏斗のスラグ流出孔径と黒鉛製漏斗内の滞留スラグ重量、あるいは滞留スラグ高さとの関係を示す。初期スラグ量が 50 g (スラグ液面高さ 22 mm) の場合、孔径 3.2 mm 前後までは全くスラグの滴下はないが、それ以上の孔径になると滴下し始めた。いったん滴下すると、漏斗内には 1~4 g とわずかなスラグしか滞留せず、さらに孔径 3.8 mm 以上ではスラグ融液の全量が滴下した。なお、スラグ塩基度 (CaO/SiO₂) が 1.2 と 0.8 のスラグの滴下状況には有意な差は認められなかった。

漏斗内に滞留したスラグは、CaO/SiO₂ = 1.2, 0.8 のいずれも黒鉛と濡れず、黒鉛表面の細孔の上に粒状の形で残るものが大部分であった。

3.2 コークス充填層内の静的ホールドアップとスラグの滞留状況

Fig. 4 に測定結果の一例を示す。この例を含め測定結果より(1)式を用いて算出した静的ホールドアップ (h_s) とスラグ塩基度 (CaO/SiO₂) の関係を Fig. 5 に示す。 h_s は高塩基度側で高い値を示す傾向がみられた。また、CaO/SiO₂ = 0.93 において、温度が 1500°C と 1550°C の条件では h_s はほぼ同じ値を示し、1450°C ではこれらに比べて大きな値を示した。

Photo. 1 には、ホールドアップ実験後、除冷した際

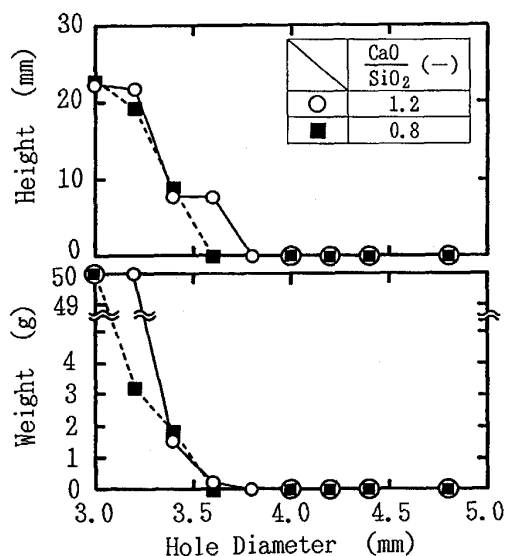


Fig. 3. Effect of hole diameter on dropping behavior of molten slags.

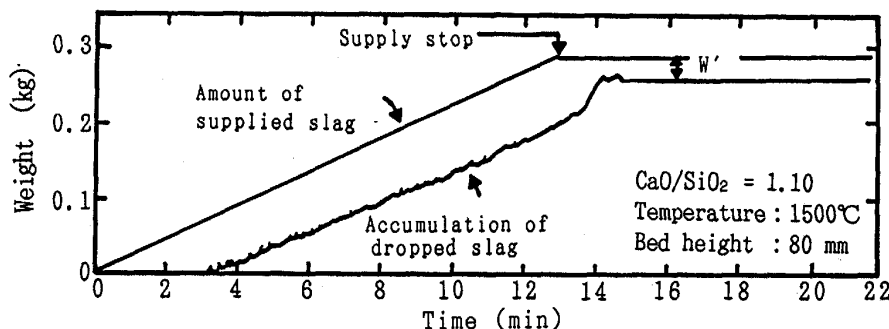


Fig. 4. An example of experimental result.

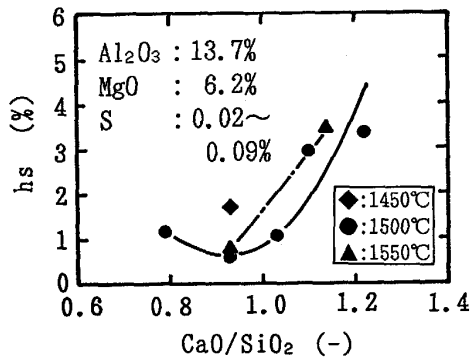
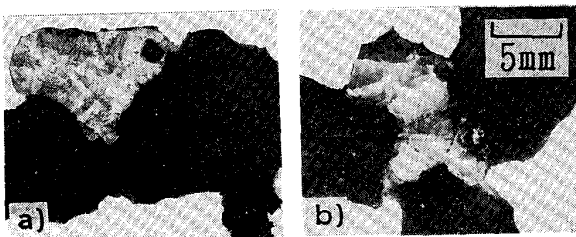


Fig. 5. Effect of slag basicity (CaO/SiO₂) on static holdup (h_s).



a) CaO/SiO₂=1.10 b) CaO/SiO₂=0.79

Experimental temperature : 1500°C

Photo. 1. Residual states of slag droplet in coke-packed bed.

のコークス充填層へのスラグの滞留状況を示した。a) および b) は、それぞれスラグの塩基度が 1.10 および 0.79 の結果である。両者には、コークスへのスラグの濡れ状況、ならびにコークス粒子間でのスラグの滞留状況に相違点が認められる。すなわち、CaO/SiO₂ = 1.10 のスラグ a) はコークスに濡れずに粒状となってコークス粒子間に保持された状態で滞留し、一方、CaO/SiO₂ = 0.79 のスラグ b) はコークスに濡れており、コークス粒子の間隙に浸透する様相を呈していた。

3.3 ホールドアップ実験スラグの物性値測定結果

Fig. 6 は、実験で用いたスラグの物性値を静滴法に基づき黒鉛基盤上で測定した結果を示す。一部の測定例を除くと、測定温度に達してから 120 min 以降、接触角の変化は小さくほぼ定常状態になったので、図中では接触角を 120 min 以降の平均値で示した。

一般に、高炉スラグの塩基度は 1.2 程度であるが、その組成におけるスラグと黒鉛の接触角は 140~160° であり、ほとんど黒鉛に濡れなかった。

4. 考 察

4.1 静的ホールドアップに関する従来研究結果との比較

一般に、液体を固体に接触させると濡れの現象が起こ

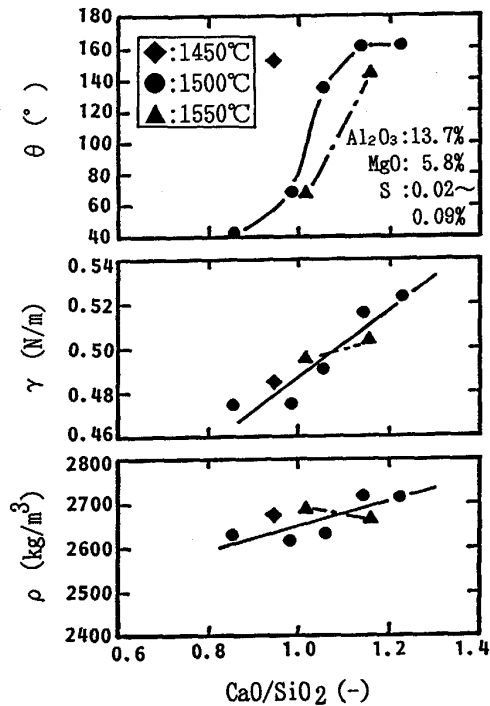


Fig. 6. Effect of slag basicity (CaO/SiO₂) on density (ρ), surface tension (γ) and contact angle (θ) of slags.

るが、充填層内における液の滞留現象もこの濡れによって生じたものと考えられる。濡れには (i) 浸漬濡れ、(ii) 付着濡れと (iii) 拡張濡れの 3 種類があり、それぞれに対応する表面自由エネルギーの変化量として、浸漬仕事 (W_I)、付着仕事 (W_A) と拡張仕事 (W_S) が定義されている¹¹⁾。

$$W_I = \gamma \cos \theta \dots\dots\dots (2)^{11)}$$

$$W_A = \gamma (1 + \cos \theta) \dots\dots\dots (3)^{11)}$$

$$W_S = \gamma (\cos \theta - 1) \dots\dots\dots (4)^{11)}$$

高炉滴下帯での静的ホールドアップ (h_s) に関して、福武ら¹⁾は融液の滞留が付着濡れによるものと考え、滴下液に作用する重力と固液界面での付着仕事との力の釣り合いより、液の h_s を (5) 式の修正キャピラリー数 (C_{p_m}) で整理している。

$$C_{p_m} = \rho g \{d_p \phi / (1 - \epsilon)\}^2 / \{\gamma (1 + \cos \theta)\} \dots\dots (5)^{11)}$$

2.2 の実験で得られた h_s の測定値を、同実験に用いたスラグの物性値を (6) 式に代入して算出した C_{p_m} で整理した。その結果を Fig. 7 に示す。同図には福武らの冷間模型実験 ($\gamma = 0.024 \sim 0.089$ N/m, $\theta = 0 \sim 114^\circ$) の結果¹⁾を併せて示す。スラグ融液では C_{p_m} の増加とともに h_s が増大し、福武らの結果と逆の傾向を示した。すなわち、本結果については付着仕事小さいほど充填層内のスラグ滞留量が大きくなり、その傾向は福武

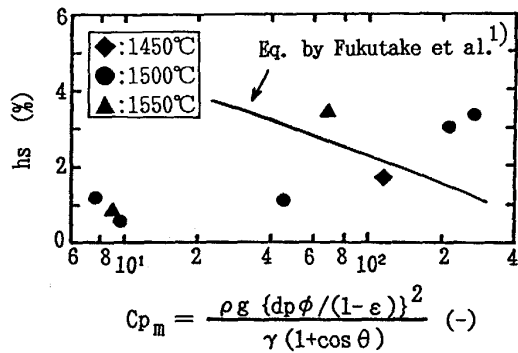


Fig. 7. Relationship between static holdup (h_s) and modified capillary number (C_{pm}).

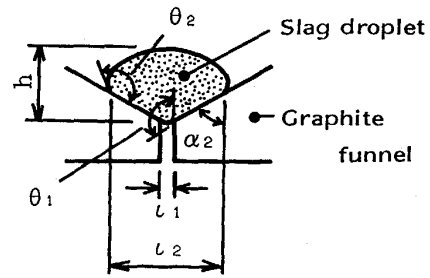


Fig. 8. State of slag droplet in graphite funnel.

らのモデルでは説明できない。

4.2 静的ホールドアップのメカニズム

コークス充填層内のスラグの滞留状況 (Photo. 1) によれば、前述したように、スラグがコークスと濡れない場合は粒状となってコークス粒子の間隙上に滞留し、一方、濡れる場合には間隙内に浸透する様相を呈していた。よく知られた同様の現象に、液が毛細管の壁を濡らして管内を上昇し、外部の液面より高くなったり、あるいは液が管壁と濡れないために下降して外部の液面より低くなる現象がある。浸漬濡れに相当するこの現象は、毛管現象と呼ばれており、濡れる場合と濡れない場合における解析上の取扱いは同じである¹²⁾。したがって、スラグの滞留は付着濡れではなく、浸漬濡れによって生じるものと考えられる。この考えの妥当性を検証するため、黒鉛製漏斗を模擬充填層としたスラグ滴下実験において得られたデータをもとに以下の検討を試みた。

浸漬濡れの概念では、スラグが黒鉛と濡れない場合、そのスラグは自発的には細孔内に侵入しないと考えられるが、孔径を大きくしたり、あるいは外部から圧力を受けるとスラグを細孔内に流入させることができる。2.1 における実験の場合、黒鉛製漏斗内のスラグ上面で受ける圧力はスラグの静水圧とスラグ-黒鉛界面の浸漬仕事に伴う圧力の和として生じたものである。したがって、漏斗からのスラグの流出が停止し、Fig. 8 に示すような形状で漏斗内に滞留したスラグに作用する圧力の釣合いから、(6)式が成立するものと考えられる。

$$\rho g h - \frac{\gamma \cos \theta_2 \cos \alpha_2}{l_2/4} = - \frac{\gamma \cos \theta_1}{l_1/4} \dots \dots \dots (6)$$

Fig. 9 は、実験での濡れ周辺断面の直径 (l_1, l_2)、スラグ-黒鉛界面での接触角 (θ_1, θ_2) およびスラグと接した位置での黒鉛の傾斜角 (α_2) の実測値を(6)式に代入して算出した滞留スラグ高さ (h_{cal}) と滞留スラグ高さの実測値 (h_{obs}) の関係を示す。 h_{obs} と h_{cal} はよく一致

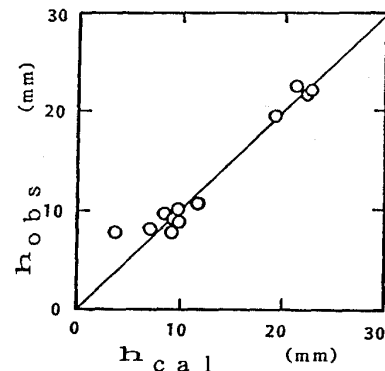


Fig. 9. Comparison of experimental values (h_{obs}) with calculated values (h_{cal}) by Eq. (6).



(a) Case of non-wet state (b) Case of wet state

Fig. 10. Model on capillarity for static holdup of slag droplets in coke-packed bed.

している。同結果から、上述した浸漬濡れに基づくスラグの滞留メカニズムの仮説が妥当であったものと考えられる。

以上の予備検討の結果から、コークス充填層内におけるスラグ融液の滞留メカニズムは Fig. 10 に示したモデルに従うものと考えられる。スラグと接する充填粒子表面の形状が鼓のように中央がくびれた軸対称面であると仮定すると、(6)式と同様、粒子間に保持された融液に作用する静水圧と表面張力により生じた鉛直成分の力に基づく圧力との釣合いは、(7)式で示される。

$$\rho gh = -\frac{\gamma \cos \theta_1 \cos \alpha_1}{l_1/4} + \frac{\gamma \cos \theta_2 \cos \alpha_2}{l_2/4} \dots\dots(7)$$

しかしながら、本モデルを用いるに当たっては、①スラグがコークスと接した位置での傾き (α_1, α_2) は一定ではない、②黒鉛製漏斗内に滞留したスラグ-黒鉛界面の接触角 (θ_1, θ_2) をそれぞれ測定した結果より明らかになったが、両者は異なった値を示しており、水平基盤上で測定して得られる接触角 (θ) と異なる可能性がある、等の問題がある。 θ_1 と θ_2 に相違が生じた原因は、接触角の履歴現象 (hysteresis)¹¹⁾ に関係していると思われる。

本研究ならびに冷間模型実験¹⁾の結果を併せて検討すると、 h_s はほとんど濡れない系 ($\theta > 90^\circ$ であり、 $W_I \ll 0$) とよく濡れる系 ($\theta < 90^\circ$ であり、 $W_I \gg 0$) の両極端の条件で高い値となり、 $\theta \approx 90^\circ$ 前後 ($W_I \approx 0$) に極小値を示す傾向があった。なお、(7)式右辺の第1項と第2項の相互関係が明確でなく、極度に濡れない系と濡れる系の滞留状態が全く同じであるかについては明らかにできなかった。

ここでは、便宜的に水平基盤上で測定した接触角を用いるとともに、上述したような h_s と W_I の関係を反映するために(8)式に示すように式の分母には絶対値をとった新たな修正キャピラリー数 (Cp_m^*) を定義して h_s を整理した。

$$Cp_m^* = \rho g \{d_p \phi \varepsilon / (1 - \varepsilon)\}^2 / |\gamma \cos \theta| \dots\dots(8)$$

この式の中で系の代表長さとして、充填層内水力学等価平均直径 $d_h (= (2/3)d_p \phi \varepsilon / (1 - \varepsilon))$ ¹³⁾ の比例定数を省略したものを採用した。本実験に用いたコークスの形状係数 (ϕ) は、一田ら¹⁴⁾が実測して得た均一径コークスの形状係数と空隙率の関係式をもとに $\phi = 0.7$ とした。Fig. 11 に、本研究データを福武らのデータ¹⁾と併せて整理した結果を示す。同図によれば、 h_s と Cp_m^* の関係は水などの溶液とスラグでは絶対値に違いがあるが、両者とも同じ傾向を示しており、 h_s は Cp_m^* で整理できたといえる。本研究の実験条件の範囲内では、以下の

実験式を得た。

$$h_s = 9.96 (Cp_m^*)^{-1.38} \dots\dots(9)$$

この推定式と実験値の相関係数は 0.86 である。

h_s に関して杉山らの研究²⁾では、液の粘度の効果を考慮するために修正ガリレイ数 (Ga_m)¹⁾ を含んだ推算式を提示した。本研究では、 h_s と Ga_m の相関がほとんど認められなかったため、 h_s におよぼす液粘度の影響は考慮しなかった。

4.3 融液の静的ホールドアップにおよぼすコークス充填層の空隙径の影響

丹羽ら⁴⁾の高炉での h_s の測定結果では、コークスの調和平均径 (d_{pa}) が 20 mm を超えるとスラグの h_s は零になっている。厳密に言えば、 h_s は 0.1~0.2% 程度の値を示すが、これは、高炉内に充填されたコークスの凹凸部にスラグのプールが形成される等の理由によると考えられる。一方、模擬充填層でのスラグの滴下実験結果 (Fig. 3) では、いったん細孔内に流路が形成されると孔径 3.8 mm 以上では、同層内に滞留するスラグ量は零となった。両者の結果から、浸漬濡れによってコークス層内に融液が滞留するには、スラグ組成が同一の場合、いいかえると、 γ が一定の場合に同層の空隙径がある値以下であることが前提になるものと推察される。すなわち、その限界値以上では、コークスと濡れない融液は空隙より流れ落ちるのみで h_s は零に近い値を示し、他方、限界値以下では浸漬仕事による力で層内に融液が滞留するものと考えられる。次に、その限界空隙径に対応するコークス径を以下に検討する。

浸漬濡れの概念に従うと、代表長さは液の単位断面当たりの濡れ長さと同じ濡れ長さを持つ円筒の直径である。充填層の空隙径は、それを構成する粒子径や形状とその配列状態に依存するため、この複雑な層の空隙径として、解析目的に沿って物理的意味のある代表径が選択されており¹⁾、この場合、水力学等価平均直径 (d_h)¹³⁾ を用いることが望ましいと考えられる。ただし、充填層

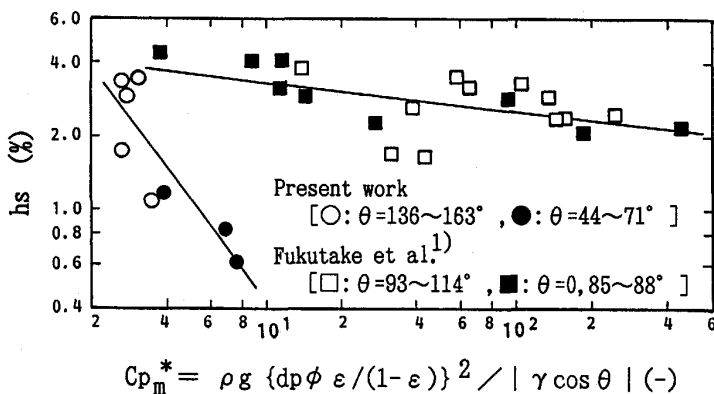


Fig. 11. Relationship between static holdup (h_s) and modified capillary number (Cp_m^*).

内での液の滞留は、液の流路となる空隙内で最もくびれた部分、すなわち、流路の最小断面部の直径 (d_i) に影響を受け、充填層内での流路の径を平均化した値に相当する d_h では正しく評価できないと推察される。そこで、以後の解析は次の仮定を設ける。すなわち、均一な直径の球から成る単純立方格子と最密格子の ϵ 、ならびに、その配列に基づく充填層内における流路の d_i をもとに、 d_i と d_h の関係には、これらの充填条件の中間をとり、(12)式が成立すると仮定する。

$$\text{単純立方充填層} ; d_i/d_h = (\sqrt{2} - 1)/0.606 \dots (10)$$

$$\text{最密充填層} ; d_i/d_h = \{(2/3)\sqrt{3} - 1\}/0.234 \dots (11)$$

(10)式と(11)式の定数を平均すると、

$$d_i \doteq 0.67d_h \dots (12)$$

また、模擬充填層の細孔径は高炉充填層内の d_i に対応すると仮定する。

高炉の炉芯コークス層で $\phi = 0.65$, $\epsilon = 0.40$ の場合、(12)式に代入すると $d_p \doteq d_i/0.194$ であるから、模擬充填層の実験結果より、スラグがコークス層内で滞留し得る限界コークス径は約 20 mm と見積もられる。その値は、丹羽ら⁴⁾の結果とほぼ一致している。また、スラグの接触角¹⁵⁾¹⁶⁾が 120° 一定と仮定し、炉芯コークスの d_{pa} が 20 mm とすると、(9)式から得られるスラグの h_s の推算値は 0.6% と小さい値になる。

以上の結果より、炉芯コークスの d_{pa} 20 mm を境に、上述したようにコークス層内でのスラグの滞留挙動は異なるものと考えられる。

5. 結 言

高炉滴下帯での融液の静的ホールドアップのメカニズム、並びに静的に融液が滞留し得るコークスの限界粒径を明らかにする為、高炉系スラグを対象に模擬充填層や滴下帯シミュレータで実験を行い、その結果を実測した表面張力等の物性値を用いて解析し、以下の知見を得た。

(1) コークス層内でスラグ融液が静的に滞留する場合、その静的ホールドアップは、浸漬濡れによりスラグに作用する力に支配されるものと考えられた。

(2) 静的ホールドアップは融液に作用する静水圧と浸漬仕事による圧力の釣合いを考慮した無次元数 (Cp_m^*) で整理できた。

(3) 浸漬仕事によりスラグがコークス層内に静的に滞留するには、コークス層の空隙径が限界値以下であることが前提になり、それ以上の空隙径になると、コークスに濡れないスラグの静的ホールドアップはほぼ零になるものと考えられた。その空隙径に対応するコークスの調和平均径は約 20 mm であると推定された。

記 号

- Cp_m : 福武らの提案した修正キャピラリー数 (—)
 Cp_m^* : 本研究で提案した修正キャピラリー数 (—)
 d_h : 充填層内水力学等価平均直径(m) $= (2/3)d_p\phi\epsilon/(1-\epsilon)$
 d_i : 流路の最小断面部の直径 (m)
 d_p : 粒子径 (m)
 d_{pa} : 粒子の調和平均径 (m)
 g : 重力加速度 (m/s^2)
 Ga_m : 修正ガリレイ数 (—)
 h : スラグの高さ (m)
 h_s : 液の静的ホールドアップ (%)
 ι : 濡れ周辺断面の直径 (m)
 V_{30} : 充填層高 30 mm の空塔容積 (m^3)
 W'_{80}, W'_{50} : 充填層高 80 mm および 50 mm においてそれぞれスラグの供給を止めた後、充填層内に滞留していたスラグの質量 (kg)
 W_A : 付着仕事 (N/m)
 W_I : 浸漬仕事 (N/m)
 W_S : 拡張仕事 (N/m)
 α : 液が固体と接した位置における固体表面の傾斜角度 ($^\circ$)
 γ : 液の表面張力 (N/m)
 ϵ : 充填層の空隙率 (—)
 θ : 固液界面での接触角 ($^\circ$)
 ρ : 液の密度 (kg/m^3)
 θ : 粒子の形状係数 (—)
添え字 1 は下部に位置するスラグ-黒鉛界面、2 は上部に位置するスラグ-黒鉛界面を示す。

文 献

- 1) 福武 剛, 岡部狭児: 学振 54委-No. 1443 (昭和 54 年 2 月)
- 2) 杉山 喬, 中川朝之, 芝家秀治, 小田 豊: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 2044
- 3) 佐藤暁彦, 鈴木政則, 佐藤修治, 石井邦宜: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 1056
- 4) 丹羽康夫, 炭竈隆志, 牧 章, 長野誠規, 酒井 敦, 桜井雅昭: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 337
- 5) H. L. Shulman, C. F. Ullrich, N. Walls and A. Z. Proul: AIChE J., **1** (1955), p. 259
- 6) 加藤 誠: 高温におけるスラグおよびメタルの物性測定 (1987), p. 337 [コンパス社]
- 7) 荻野和巳, 末滝哲郎, 築田凌一, 足立 彰: 鉄と鋼, **52** (1966), p. 1427
- 8) R. E. Boni and G. Derge: J. Met., **8** (1956), p. 59
- 9) 向井楠宏, 石川友美: 日本金属学会誌, **45** (1981), p. 147
- 10) 小野清雄, 郡司好喜, 荒木 透: 日本金属学会誌, **33** (1969), p. 299
- 11) 坂尾 弘, 向井楠宏: 鉄と鋼, **63** (1977), p. 513
- 12) 渡辺信淳, 渡辺 昌, 玉井康勝: 表面および界面 (1981), p. 3 [共立出版]
- 13) 柴田耕一郎, 清水正賢, 稲葉晉一, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, **77** (1991), p. 236
- 14) 一田守政, 磯崎洋一, 田村健二: 鉄と鋼, **77** (1991), p. 1561
- 15) 佐藤暁彦, 柏谷悦章, 石井邦宜: 材料とプロセス, **3** (1990), p. 1034
- 16) H. Towers: Trans. Brit. Ceram. Soc., **53** (1954), p. 180