

討 5 高炉下部におけるガスと液体の流れ及び反応に関する 小型モデル実験の有用性

川崎製鉄(株) 技術研究所 福武 剛 田口整司

1. 緒 言

モデル実験に於て、実機と異なる系を用いて、実機に対して有効な定量的関係を得るためには、現象を的確に捕え、単純化のために行なう仮定が実機の現象に対して妥当であることが必要であり、さらに適正なスケールアップの条件を明らかにしておく必要がある。一方、高温における反応を含む現象に関しては、スケールアップの条件を明らかにし、実験に適した系を発見することが困難なため、同一の系を用いた縮小モデルに頼らざるを得ない。この場合には、縮小したことによる評価が問題となり、結果の解釈、実験結果の実機への拡張の限界を正しく評価する必要がある。

本報においては、従来著者らが実施してきたモデル実験のなかから、第1の場合の例として、出鉄時における炉床内のスラグおよびメタルの流れ、および滴下帯における気液向流流れに関するモデル実験を、また、第2の例として、小型燃焼炉によるレースウェイ近傍のメタロイド還元反応の検討を取りあげ、上述の観点から、スケールアップ条件の導き方、単純化のための仮定の重要性、および実験結果の適用限界について議論する。

2. 炉床における液体の出鉄時の流れ

炉床における液体の流れに関する研究は、従来、炉床内に存在するスラグ¹⁾とメタル²⁾の一方に注目する形で行なわれて来た。しかし、出鉄時の炉床内の流れはスラグとメタルの同時流れであり、この場合スラグとメタルの境界面は、上述の2種類の解析で仮定されたように平坦でレベルが一定とはみなせない。また、上述の実験¹⁾に於ては、出鉄は間欠的であり、出滓速度も出滓時間中一定であると仮定している。このような単純化の仮定のもとで得られた結論と、最近報告された炉床の2次元スラグ-メタル^{3),4)}相流の解析結果とを以下に比較し、単純化の影響を検討する。

Fig. 1は1液相および2液相流の排出終了時の液面の形状測定例³⁾を示したもので、スラグ-メタル界面に相当するグリセロール-水銀の界面は排出口水準より下に位置している。この結果、Fig. 2に示すようにグリセロールの残留率は、2液相流の場合の方が1液相流の場合より大きくなる。

実際に操業上問題となるスラグとメタルの残留量の和は、Fig. 1から、1液相の場合と比べてスラグ残留量は増すが、メタルの残留量は減少するため、両者の和で考えると、1液相の場合と2液相の場合との差異は大巾に減少する。比較するべき定量データがないので、定量的な議論は困難であるが、後述べるFig. 4の結果を考えあわせてスラグとメタルの和の残留量で考えるならば、2液相と1液相の結果はほぼ一致すると考えてもよさそうである。

出鉄が連続して行なわれる場合には、合せて排出速度も変化すると仮定するのが現実的である。Fig. 3は、数式モデルによるシミュレーション結果で、他の条件を一定として排出速度条件を変えたときの平均液面水準の変化を示す。排出速度が直線的に増加すると仮定すると、平均液面水準は出鉄開始時

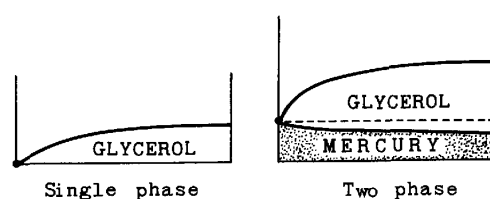


Fig. 1 Shape of interface at the end of drainage³⁾

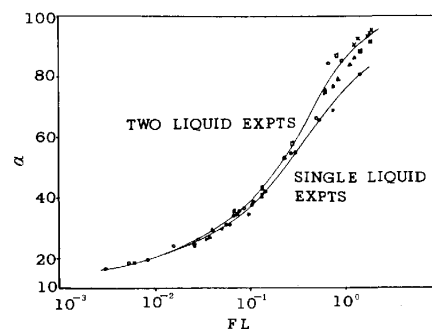


Fig. 2 Residual glycerol ratio α for single liquid and two-liquid drainage experiments.

最低であり、次第に増加して出銑時間の中央で最大となり、以後減少して終了時に元の水準にもどる。出銑開始時の無次元液面高さは液体の流入速度 V_1 と炉床の通液性 K_S の比で説明でき、Fig. 4 の関係が得られる。最大平均液面水準は出銑開始時の液面水準と、出銑中の増加量の和で求められ、前者は V_1/K_S に依存し、後者は排出速度の変化率に依存する。すなわち、連続出銑の場合には排出速度の変化率に関連して、出銑口の強度が重要な因子として新たに加わることとなる。

1 液相という大巾な単純化が、現実の高炉内の状況に半定量的に適用し得るのは、炉床内の流れの大部分がスラグ流に支配されており、この影響を適正に評価したためと考えられる。

3. 滴下帯における流れのスケールアップ

炉床内における液体の流れは、比較的簡単な数式で記述でき、従って支配運動方程式を無次元化することにより、スケールアップの条件を導出した。¹⁾ 一方、滴下帯における流れは、液相が不連続であること、関係する相が多いこと等により、正確な数学的記述が困難であり、液体の流れに作用する力に注目して、これらの力の比を用いてスケールアップの条件を与える無次元数を導出した。⁵⁾

例として静的ホールドアップについて無次元数の導出、実験結果の整理、高炉データとの対比について以下に示す。⁶⁾

静的ホールドアップ h_s は液体の流れに影響されないもので、

重力	$f_g = \rho g d_p^3$
表面力	$f_s = \sigma d_p$
固-液界面力	$f_{si} = \sigma d_p (1 + \cos \theta)$

の3種の力が関係し、これらの比として2つの無次元数

キャピラリー数	$C_p = f_g / f_s = \rho g d_p^2 / \sigma$
無次元界面張力	$N_c = f_{si} / f_s = 1 + \cos \theta$

が定義された。

実験結果は、 C_p/N_c で定義される修正キャピラリー数によ

り Fig. 5 のように整理された。本実験式によれば、 C_{pm} の低下とともに h_s は増加し、次第に最大値 4.9% に達する。すなわち、 h_s の最大値は 4.9% である。

しかし、現実には、これより大きい h_s の測定値がコークス充填層-鉄系で報告されている。⁷⁾ この差異は、実験系とコークス-鉄系の差に基づくものであり、第一にコークス表面の鉄の接触角の不均性が、第二に液体が保持される機構の相異によるものが考えられ、実験条件の設定時更に慎重な配慮が必要であることを示唆している。

実験条件の設定には、上述のスケールアップの考慮とともに、考慮すべき現象についても十分な検討が必要である。著者の一人は、重い液体と軽い充填物の組合せにより、かん液充填層における流動化条件を明らかにし、高炉滴下帯でのコークスの流動化の可能性を示したが、この現象は必ずしも新しく発見されたものではなく、Szekely と Mendrykowski⁸⁾ は水銀-ガラス玉系でフラッキングの実験を行なった際、「層が expand するため金鋼で層を固定した」と述べている。異なった系でシ

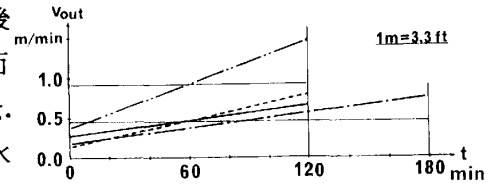


Fig. 3(b) Drainage rate

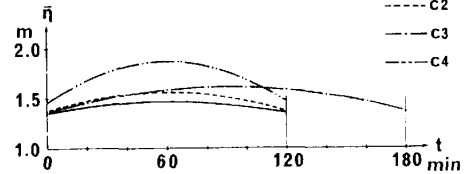


Fig. 3(a) Change of the average liquid surface level

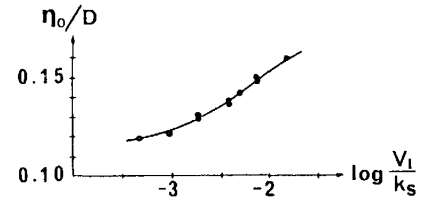


Fig. 4 Relationship between initial liquid surface level, η_0^* , and hearth drainage index, V_1/K_S

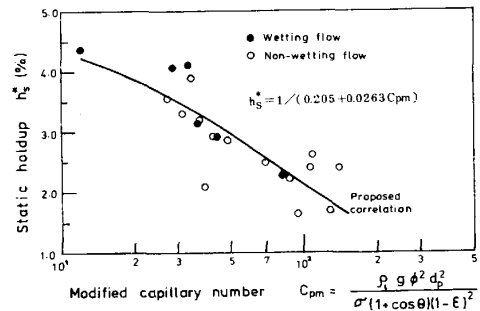


Fig. 5 Correlation for static holdup h_s^*

ミュレーション実験を行なう場合、巾広く起りうる現象を推察するとともに、実験事実を注意深く考察することが重要である。

4. 炉下部におけるメタロイド還元反応経路の検討⁹⁾

炉下部高温域で生ずるメタロイドの還元反応については、反応速度の実験的研究や高炉の解体調査など多くの研究が行なわれた。その結果、炉床湯溜りにおけるスラグ-メタル間の反応のみならず、滴下帯を流下するメタル、スラグとガス相との気-液相間反応も重要な役割を担う事がわかってきた。そこで個々のメタロイド成分について、メタルへの全反応移行量に占める気-液相反応の寄与割合を大略として把握することが、今後の溶銑成分制御の方法を検討するために必要と考えられた。モデル実験を行なうに当り、次の方針を立てた。

- (1) 気相内への揮発物質の存在量を実高炉と等しくするため、コークスを高温空気で燃やしてガスを発生させ、これと流下メタルとの向流反応を行なわせる燃焼炉模型とする。
- (2) 燃焼帯および滴下帯でのガス温度や固体温度およびガスの酸素ポテンシャルを高炉内の条件に出来るだけ近づける。
- (3) 炉床湯溜り部でのスラグ-メタル反応を行なわず、滴下帯内の反応状態を急速にイナートクウェンチするため、熱容量の小さい小型炉とする。
- (4) 流下メタルの温度や浸炭量が実炉と同じになるよう鉍石は予備還元したものを装入し、軟化溶融過程からスタートする。

以上の目的から、Fig. 6に示す熱風炉つき小型燃焼炉を作成した。炉の標準使用条件はTable 1のように設定した。

4.1. 実験方法

送風開始後15~20分で炉内高温領域(1000℃以上)の温度、ガス成分分布はほぼ定常状態に達し、Fig.7のような分布を得る。予備還元した鉍石試料は、羽口上250mmの炉内観察孔の位置に試料層下面がくるように装入する。定常状態に達した時、この位置の温度はおよそ1400℃となる。観察孔から試料が溶け落ちたのを確認後(通常20~30分)、送風を常温のN₂に切り替え、炉内を冷却する。冷却後炉上部より炉内サンプリングしながら内容物を排出する。採取試料は顕微鏡観察や成分分析に供した。また、実験中にガスおよびガス中ダストを所定の位置から採取し、同様な分析を行なった。

装入した鉍石試料はそれぞれ予備還元率が0, 70, 100%の焼結鉍と塊鉍石で、1回の実験で装入した量は1~1.5kgである。燃焼炭材は灰分が5, 10, 15%のコークスと0.1%のグラファイト粒子のうち一つを実験目的に応じて用いた。

4.2. 結果と考察

気相中の揮発物質(極微粒のダスト)の量はFig.8に示すように炭材中灰分含有量と密接な関連があり、た

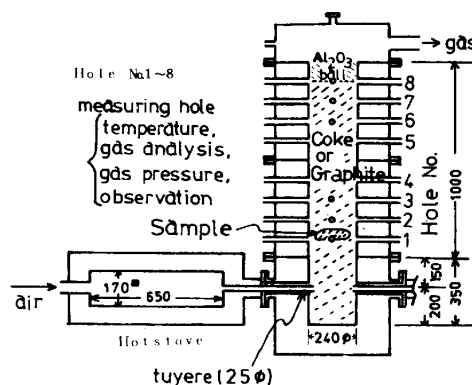


Fig.6 Schematic representation of model furnace.

Table 1 Furnace characteristics.

Blast pressure	0.1kg/cm ²
Wind rate	1.0Nm ³ /min
Blast temperature	800℃(900℃ max)
Tuyere dia.	25mm
Blast velocity	67m/sec
Flame temperature	2150℃

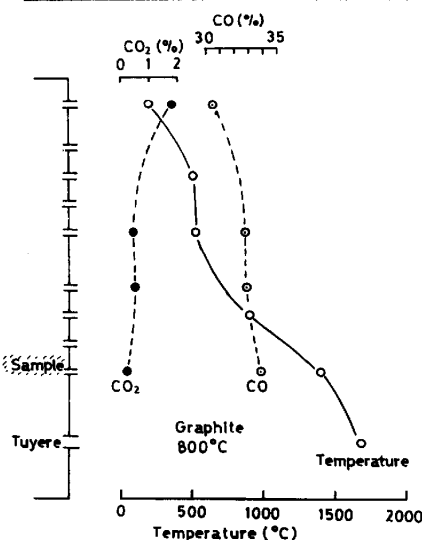


Fig.7 An example of distribution of gas temperature and composition.

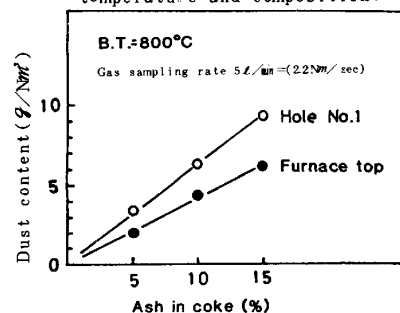


Fig.8 Relation between ash in coke and dust content in furnace gas.

たとえば 10% 灰分のコークスでは、そのうち約半分の 3 g/Nm^3 が SiO_2 であった (No. 1 の孔レベル)。高炉内からのダスト採取分析結果から¹⁰⁾、 1300°C 前後のガス中 SiO_2 量を推定すると数 g/Nm^3 となり、オーダーとしてほぼ等しい。したがって、目的 (1) はほぼ達せられていると考えられる。ただし、当然ながらアルカリ、亜鉛などの炉内循環物質は本実験炉ではきわめて少ない。

メタル中の各成分の滴下時の変化を炭材としてコークス、グラファイトを使用した場合について、それぞれ Fig.9 に示した。Si と Ti は炭材中に含まれる各々の含有量に応じて、コークスの場合に高く、グラファイトではわずかな移行量しか認められない。コークスの場合には高炉出銑 Si, Ti とほぼ等しい濃度レベルに達している。一方、S も炭材中の含有量によって明確に差があるが、コークスの場合出銑 S に対して 1 桁高い濃度を示している。その脱硫には炉床湯溜りでのスラゲーメタル反応が最終的に大きく影響していると推察される。これらに対して、炭材中にほとんど含まれない Mn の場合は、メタル中への移行量は炭材によらず、鉍石中に含まれる Mn 含有濃度に依存する。しかし、滴下時の Mn 移行量は出銑 Mn に比べて低く、スラゲーメタル反応による寄与割合が大きいことを示唆していると思われる。

鉍石の予備還元率を高くしたり (Fig.10)、送風温度を高めると、Si と Ti のメタルへの移行量は増大する。前者の効果は滴下メタルの浸炭を早め、メタルの酸素ポテンシャルが下ること、後者では浸炭量を増す (Fig.11) と同時に、コークスからの SiO_2 揮発量も増すことが寄与している。実操業データにおいても溶銑中 Si と Ti の濃度は強い正相関を示す。これは反応移行経路がほぼ同じであることに由来すると考えられる。ただし、Ti の場合には TiN として微粒子状でガス相に入り、メタルと接触し吸収される経路が有力である。

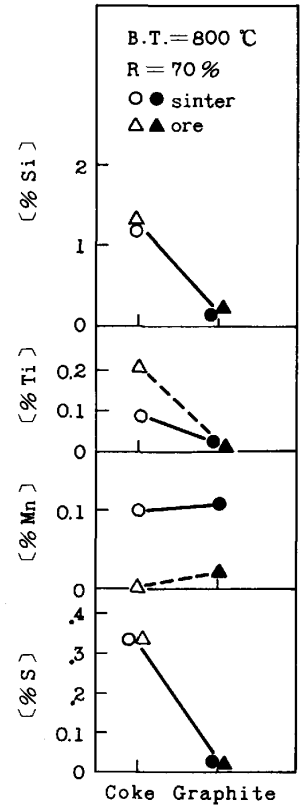


Fig.9 Effect of carbon materials on Si, Ti, Mn, S content in metal.

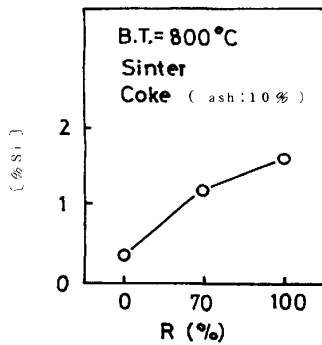


Fig.10 Effect of pre-reduction degree on Si content in metal.

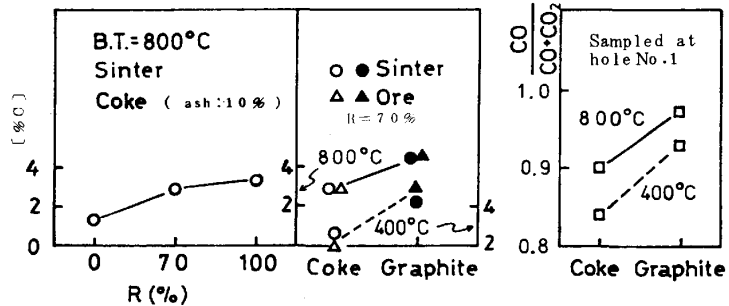


Fig.11 Effect of pre-reduction degree and carbon materials on Carbon content in metal.

5. 結 言

当社で行なったモデル実験のうち、(1) 単純化した系での現象の定量化、と (2) 縮小モデルによる炉内現象の把握、の例について述べた。いずれに於ても、高炉操業に有益なデータを得ている。

- 文献 1). 福武ほか; 鉄と鋼, 60(1979), P.607
- 2). 原ほか; 学振 54 委資料, No.1457('78), 1485('79)
- 3). W. Pinzewski et al; 日豪シンポジウム, (1983), P.105
- 4). T. Fukutake et al; Ironmaking Proceedings, (1983), P.567
- 5). 江守ほか; 「模型実験の理論と応用」, 技報堂, (1973)
- 6). 福武ほか; 鉄と鋼, 66(1980), P.1937
- 7). 高田ほか; 鉄と鋼, 70(1984), A25
- 8). J. Szekely et al; Chem. Eng. Sci., 27(1982), P.959
- 9). 岡部ほか; 学振 54 委資料, No. 1563('81)
- 10). 田口ほか; 鉄と鋼, 68(1982), P.2346