

乾留初期における コークス炉内炉幅方向水分移動機構

國政 秀行*・近田 司*・西岡 邦彦*・井上 恵三*²

Mechanism of Moisture Transfer across the Oven Width at Early Stage of Carbonization

Hideyuki KUNIMASA, Tsukasa CHIKATA, Kunihiko NISHIOKA and Keizo INOUE

Synopsis : In order to clarify the moisture transfer mechanism, moisture distribution across the oven width at the early stage of carbonization has been investigated using the test coke oven with the upper heating wall. There is a region having a maximum moisture content below 100°C because of moisture condensation. Subsequently, as temperature is elevated close to 100°C, remarkable moisture vaporization has taken place so that the moisture in coal decreases rapidly. However, there remains a little moisture in coal beyond 100°C.

Two dimensional coke oven mathematical model was hence updated by introducing this moisture transfer mechanism.

Key words : carbonization ; coal ; modelling ; moisture transfer ; moisture vaporization ; moisture condensation ; steam flow.

1. 緒言

コークス品質の安定と乾留熱量の低減はコークス製造技術の基本的課題であり、乾留均一化を図ることがコークス炉操業上の最重要項目である。

実炉における乾留偏差を解明する目的で、近年、実コークス炉での乾留途中のコークスケーキの急速冷却による乾留進行状況調査¹⁻⁵⁾が実施された。その結果、装入炭中の水分が、乾留初期に水蒸気として炉外に流出する時のガス流れが乾留偏差に深く関与していることが明らかとなり、改めて乾留初期の水分挙動の重要性が認識された。したがって、この炭中の水蒸気流れを正確に把握することはコークス品質や乾留温度の制御を行う上で非常に重要である。

そこで、従来曖昧にされてきた乾留初期の炭化室内における水分挙動を明確にするため、上面加熱炉を用いて乾留中の炉幅方向位置別の水分分布の測定を実施した。そして、その結果にもとづいて乾留過程の水分移動機構を再構築し、既開発のコークス炉乾留モデル⁶⁾のレベルアップに反映した。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実炉でのガス流れは、コークス炉上部および窯口部を除

いて、ほぼ加熱壁に垂直な炉幅方向への1次元的なガス流れとみなせる。しかし、実炉に比べて炉高が低く、炉長も短い試験炉では、炉中心部でさえ炉上部および窯口部の影響を受け、炉幅方向への1次元的なガス流れを再現することは難しい。そこで、Fig. 1に示す上面からの一方加熱である上面加熱炉を用いて、乾留中の炉幅方向の水分分布を調査した。上面加熱炉では、ガス流れは加熱壁に垂直な方向のみに制約できるため、実炉と同様のガス流れを再現で

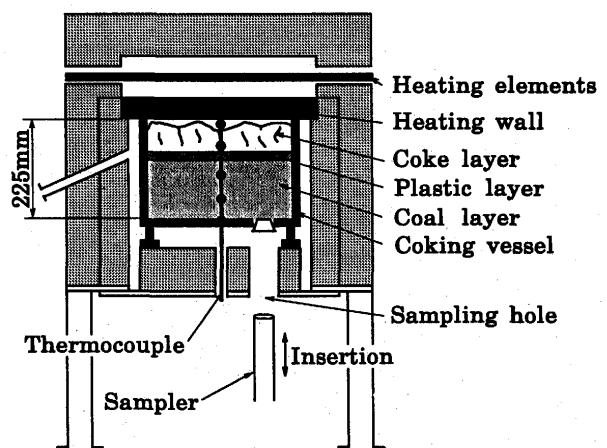


Fig. 1. Experimental apparatus.

平成7年10月31日受付 平成8年1月18日受理 (Received on Oct. 31, 1995; Accepted on Jan. 18, 1996)

* 住友金属工業(株)総合技術研究所 (Corporate Research & Development Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16 Oaza-Sunayama Hasakimachi Kashima-gun Ibaraki-ken 314-02)

* 2 住友金属テクノロジー(株)鹿島事業部 (Kashima Division, Sumitomo Metal Technology, Inc.)

Table 1. Property of the blended coal.

Proximate analysis(d.b.,mass%)			Max. fluidity MF (log ddm)	Total dilatation (%)
Ash	VM	FC		
8.6	26.4	65.0	2.69	70.8

きる。用いた乾留容器は、縦、横400mm、実炉の炉幅に対応する高さが225mmであり、乾留容器からの伝熱による底面からの加熱を避けるために底面に水冷ボックスを、石炭のサンプリングを行うために40mmφのサンプリング孔を底部に設けている。

2・2 実験条件

実験はTable 1 に示す配合炭を装入炭水分3～10mass%の所定値、嵩密度700～800kg/m³(乾燥炭基準)の所定値に調製して乾留容器に充填した。乾留は炉壁温度1140°Cで行った。乾留の進行状況を把握するために乾留容器の中心部で加熱壁面より0, 56, 113, 168, 224mmの位置で乾留中の炭層内温度を測定した。

2・3 測定方法

乾留中の加熱壁に垂直な方向の位置別水分量分布は、乾留容器底面に設けたサンプリング孔に内径27.6mmφの半割可能なパイプを乾留所定時間後に挿入して採取し、半割パイプの片方を取り除いて石炭を10分割した。そしてそれぞれの分割部分の石炭を秤量瓶に移し、107°Cで1時間乾燥し、乾燥前後の質量差より水分量を求めた。

3. 実験結果と考察

3・1 水分量の経時変化

3・1・1 炉幅方向の水分量経時変化

嵩密度730kg/m³、装入炭水分量8 mass%での炉幅方向水分量分布の経時変化例をFig. 2 に示す。図中の破線は装入炭水分を示している。発生水蒸気は加熱壁側に存在する通気抵抗の大きな軟化層に阻まれ、炭中側の通気抵抗の小さい石炭層に移動し凝縮するため、乾留初期は装入炭水分レベルよりも水分値が高くなる部分が存在する。そして、そのピーク位置は時間とともに炭中方向に移動していくのが認められる。最大水分値が炭中部に到達後、すなわち、炭中が100°Cに到達以降は水蒸気は蒸気圧の上昇により加熱壁側へ移動し、系外へ流出していくため、ピーク部分がなだらかになり全体的に水分量が減少していく。

3・1・2 任意位置の水分量経時変化

嵩密度730kg/m³、装入炭水分量8 mass%の例で、加熱面より113mm地点での水分量の経時変化をFig. 3 に示す。この結果、乾留初期は温度上昇とともに水分量は増加するが、当初予想した100°C到達時点ではなく、100°C以下の領域に最大水分値を示す点が存在することが確認された。その後、水分量は減少し始め、100°C近傍で急激に減少するが、一気

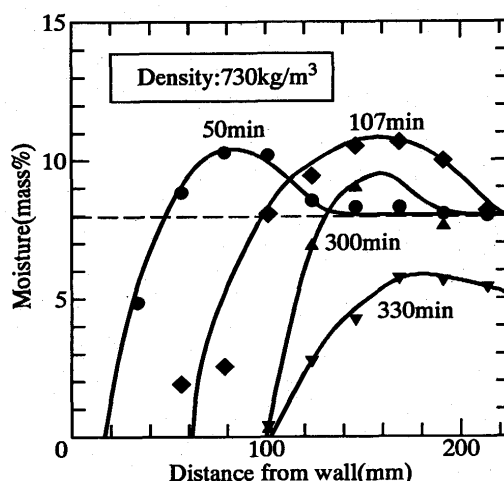


Fig. 2. Change in moisture distribution across the oven width during carbonization.

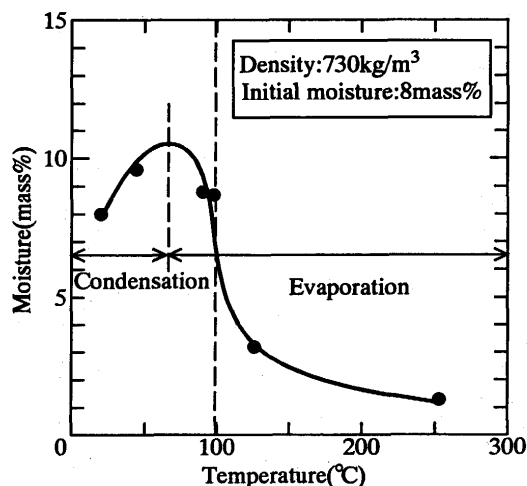


Fig. 3. Relation between temperature and moisture in coal layer.

に蒸発するのではなく、100°C以上になっても水分の存在が確認された。

3・2 装入炭水分量の影響

3・2・1 炉幅方向の水分量への影響

嵩密度730kg/m³で、初期水分量を変更したときの加熱面から56mmの位置が100°Cになったときの炉幅方向水分量分布をFig. 4 に示す。この結果、最大水分値のピーク位置はどの条件でも56mmの位置より炭中側に存在する。そして、装入炭水分量が増加するに伴って最高水分量のピークはよりなだらかになり、ピークの位置が炭中方向に移動していくことが確認された。

3・2・2 石炭層内の伝熱への影響

嵩密度730kg/m³で、装入炭水分量と加熱面から113mmの位置が100°Cに到達するまでの時間との関係をFig. 5 に示す。この結果、装入炭水分量が多いほど100°Cに到達する時間は

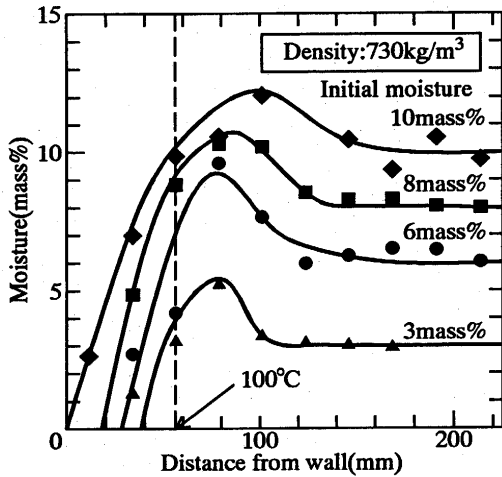


Fig. 4. Effect of moisture of the charged coal on the variations of coal moisture across the coal layer.

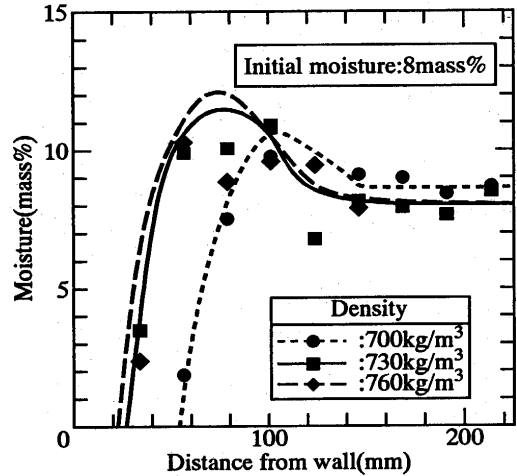


Fig. 6. Effect of the bulk density of charged coal on the variations of coal moisture across the coal layer.

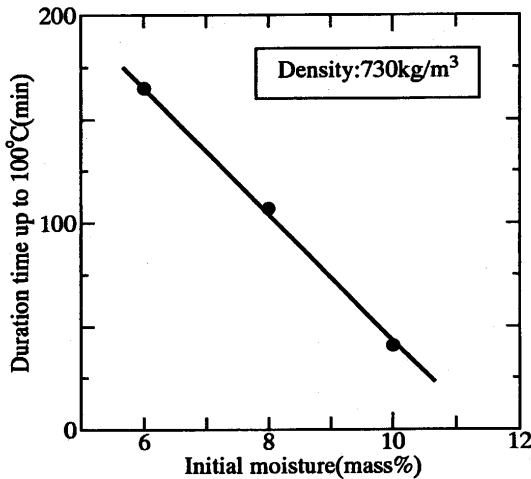


Fig. 5. Relation between the charged coal moisture and its duration time up to 100°C.

短くなった。すなわち、Fig. 4の結果と併せ、装入炭水分量が多いほど、石炭層内への伝熱速度が速くなるのは、水蒸気が熱移動のキャリアーとして働くためと考えられる。

3・3 装入炭嵩密度の影響

装入炭水分量 8 mass%で嵩密度を変えたときの乾留75分後の水分量分布をFig. 6に示す。嵩密度の違いによって水分量分布の形状自体には大きな変化は見られず、水分移動は嵩密度の影響を受けないと考えられる。嵩密度が低いほど水分量分布のピークが炭中方向に移動しているのは嵩密度低下による伝熱速度の上昇のためと考えられる。

4. 水分移動機構

4・1 水分移動機構の概念

実験で得られた水分移動現象の知見から、コークス炉に

おける水分移動機構は次の3領域に分けると理解し易い。

(1)凝縮支配期間(恒率乾燥期間に至るまでの期間)：炭層内温度が70°C付近までは、加熱壁側で蒸発した水分は炭中側の低温部に移動し凝縮する。厳密に言えば、この温度領域までは蒸発量を上回って凝縮する凝縮支配領域となっているため、水分量が増加し70°C付近に水分量のピークが存在する。次に炭層内温度が70°Cを越えた温度域から100°Cまでの間、水分凝縮量より蒸発量が上回り、凝縮支配から蒸発支配に変わり、水分量は減少し始める。

(2)恒率乾燥期間：水分は入熱量分だけ蒸発し、炭層内温度が100°Cで保持される。

(3)減率乾燥期間：水分は炭層内温度が100°Cで完全に蒸発し水分量0に到達するのではなく、石炭の吸着等により100°C以上の領域においても保持される。

4・2 水分移動の数学的取り扱い方

従来、乾留中の石炭層内における水分移動は、常圧における水の沸点である100°Cを基準に整理されてきた⁸⁻¹¹⁾。すなわち、水分の蒸発は100°Cまでは全く起こらず、100°Cに到達した時点で入熱分に相当する水分が蒸発し始め、水分が完全に蒸発しきってから100°C以上に温度が上昇する。水分の凝縮は、100°C以下なら全ての水蒸気は凝縮し、凝縮潜熱分だけ温度が上昇する。温度が100°C以上の場合、凝縮は起こらないとして取り扱われてきた。

したがって、水分蒸発速度に関する数学的取り扱いは下式で示される。

しかし、4・1の水分移動機構にもとづけば、Fig. 7に示すコークス炉内の石炭の昇温過程を前記した3つの領域にわけ、以下のように整理する事が妥当である。

4・2・1 蒸発の取り扱い

(1)領域 I (凝縮支配期間)： $T_1 \leq 100^\circ\text{C}$

水分蒸発速度は任意位置の温度で規定される飽和水蒸気

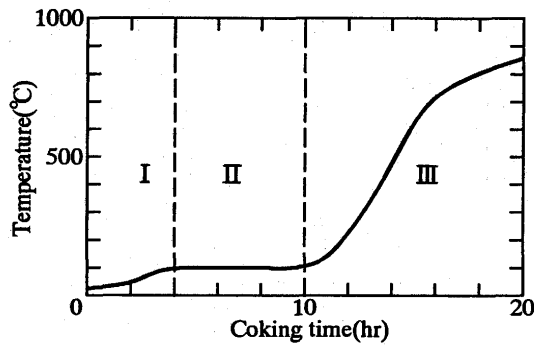
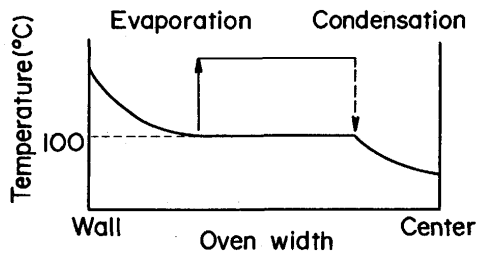


Fig. 7. Change in temperature at the oven center during carbonization.

Conventional model



Present model

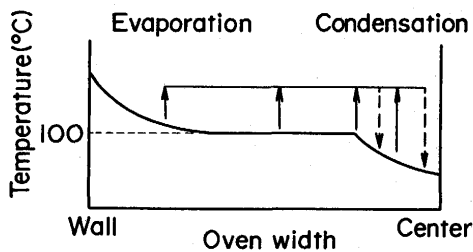


Fig. 8. Mechanism of moisture transfer in coal layer across the oven width.

圧¹²⁾と実際に算出される任意位置の水蒸気圧の差を推進力とする。

(2) 領域II (恒率乾燥期間) : $T_1 > 100^\circ\text{C}$, $W \geq W_c$ 。

水分蒸発速度は任意位置の温度が 100°C を越え、かつ含水率が限界含水率より高ければ 100°C を維持するようにする。

(3) 領域III (減率乾燥期間) : $T_1 > 100^\circ\text{C}$, $W < W_c$ 。

水分蒸発速度は任意位置の温度が 100°C を越え、かつ含水率が限界含水率より低ければ含水率と限界含水率の比に比例するようにする。

ここで領域II, IIIにおける限界含水率は実験結果より 100°C の位置がほぼ装入炭水分量になっているため装入炭水分量として取り扱う。また平衡含水率は0とした。

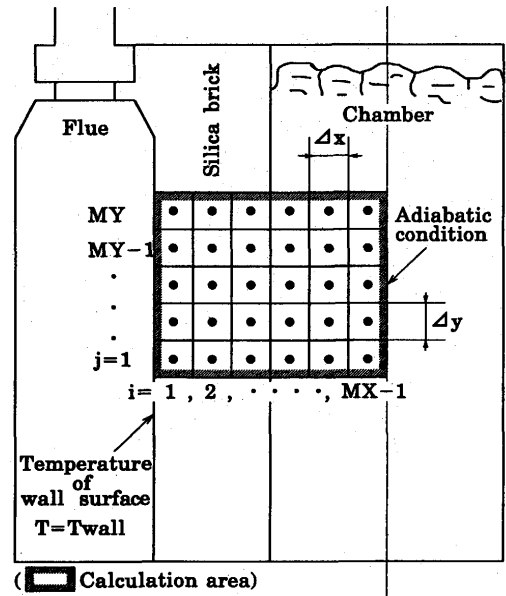


Fig. 9. Two dimensional simulation model of the coke oven.

f: Flow resistance
G: Gas velocity

P: Calculated point

(p : Pressure
Ts: Solid temp.
Tg: Gas temp.)

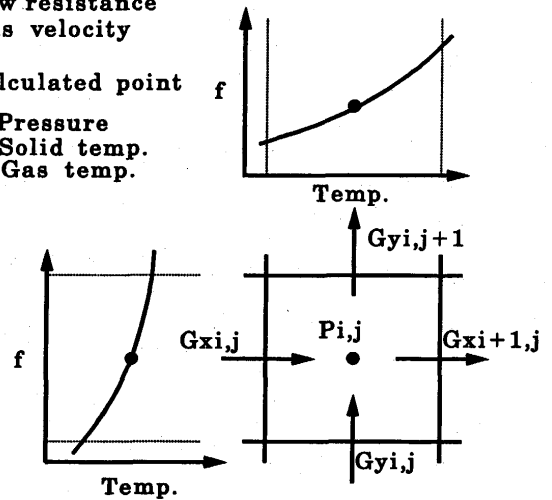


Fig. 10. Staggered grid.

4.2.2 凝縮の取り扱い

水蒸気の凝縮は、任意位置の温度が 100°C 以下でその時の水蒸気圧が飽和水蒸気圧より高ければ、蒸発の領域Iと同じ考えで凝縮する。ただし、従来の考え方と同様に凝縮潜熱によって温度が 100°C 以上になる場合はそれ以上の凝縮は起こらず水蒸気の状態が存在するとして扱う。

従来および今回の知見による水分移動機構を模式的に示すとFig. 8になる。

5. モデルによる水分移動機構の評価

前記水分蒸発速度に関する新たな知見を取り込んで、炉

幅方向のガス流れおよび伝熱をシミュレーションモデル⁶⁾によって評価した。

5.1 シミュレーションモデルの概要

本モデルはFig. 9に示すように、燃焼室から炭化室の炉幅方向・炉高方向のガス流れおよび伝熱をFig.10に示すスタックガード格子を用いて計算するものである。このセルの中心で圧力(p), 固体温度(Ts), ガス温度(Tg), 水およびVMのガス相および固体相での濃度の定義をし、境界上で質量流速Gx, Gyを与え、圧力差に応じた流れ計算を行う。ただし、VM発生速度および通気抵抗はセル内をx方向y方向とも10分割し、内挿した点での温度に基づいて計算し、その値の平均値をもってそのセル全体での代表値とした。

5.2 乾留初期の伝熱性評価

5.2.1 炉幅方向水分量分布

上面加熱炉での実験結果との比較をFig.11に示す。従来の計算に比べ、最大水分値より加熱壁側では実測値

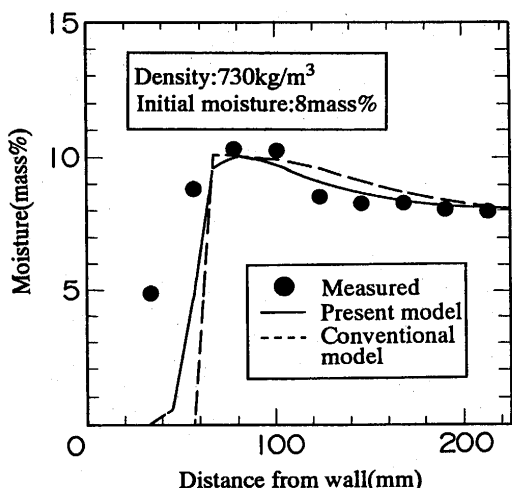


Fig. 11. Calculated moisture distribution in coal layer.

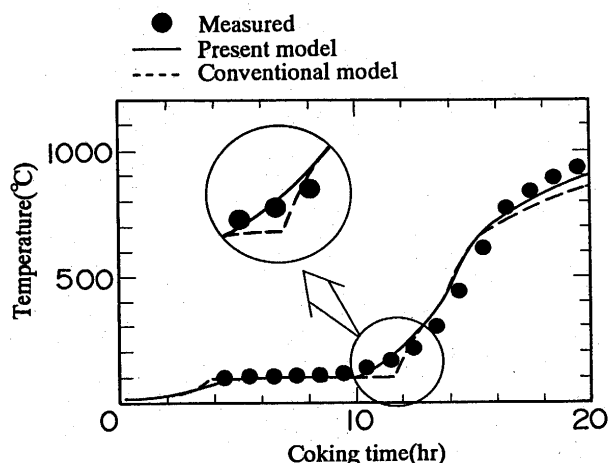


Fig. 12. Calculated temperature at the oven center.

との差はあるものの、炭中側の水分量分布は、ほぼシミュレートできることが確認された。この加熱壁側での差は蒸発速度を決める関数Fを正確に評価し切れていないためと認識している。

5.2.2 炭中昇温曲線

実操業での計算値と実測値との比較をFig.12に示す。

図中の丸印に注目して見れば理解される通り、従来のシミュレーションモデルによる計算では100°Cからの温度の立ち上がり急であるのに対して、実測値は緩慢な温度上昇傾向となっている。しかし、今回の水分蒸発速度の評価式の導入で100°Cからの炭層内への伝熱速度の影響を正確にシミュレートできるようになっており、評価式の妥当性が確認された。

6. 結言

(1) コークス品質や乾留速度に影響を与える乾留初期の炭化室内水分移動状況について上面加熱炉を用いた実験により、石炭の昇温過程を下記の3段階に分けて評価すべきと考えられた。

- ①凝縮支配期間：この領域に最大水分値を示す点が存在し、水分が凝縮支配から蒸発支配へと移動する。
- ②恒率乾燥期間：この領域では入熱量に見合った水分が蒸発するが、ある水分値からは石炭の昇温にも使われる。
- ③減率乾燥期間：ある割合にしたがって水分が蒸発しながら、石炭の昇温は進行する。

(2) 上記知見をもとに水分の蒸発速度を炭層内温度が100°C以下では、計算セルの温度で規定される飽和水蒸気圧と実際に算出されるセルの水蒸気圧の差を推進力として求め、100°C以上では限界含水率を初期装入炭水分量で規定して求めることにより、実際のコークス炉内での水分量分布および昇温曲線をうまく表すことができることを確認した。

記号

- a_p : 比表面積 (1/m)
- C_p : 石炭の比熱 (J/kg · K)
- D_p : 石炭の粒子径 (m)
- H_{H_2O} : 水の蒸発潜熱 (J/kg)
- k_g : 物質移動係数 (kg/m² · s · Pa)¹³⁾
- $p_{H_2O}^s$: 飽和水蒸気圧 (Pa)
- p_{H_2O} : 水蒸気圧 (Pa)
- Γ_{H_2O} : 蒸発速度 (kg/m³ · s)
- T_i : セル中の温度 (°C)
- W : 含水率 (mass%)
- W_c : 限界含水率 (mass%)
- W_e : 平衡含水率 (mass%)
- ϵ : 空隙率 (-)
- ρ : 石炭の密度 (kg/m³)
- ϕ : 形状係数 (-)
- Δt : ステップ時間 (s)

文献

- (1) W.Rohde, D.Habermehl and V.Kolitz: Ironmaking Confer-

- ence Proceedings, **47** (1988), 135.
- 2) 鈴木 豊, 福永正起, 横溝正彦, 赤坂里志, 野田正弘, 中川美男: 材料とプロセス, **2** (1989), 38.
 - 3) 鈴木 豊, 福永正起, 横溝正彦, 赤坂里志, 野田正弘, 中川美男: コークスサーキュラー, **39** (1990), 179.
 - 4) 西村 勝, 上村信夫, 中西敦彦, 山本邦男: 第88回コークス特別会(研究発表要旨集), (1990), 35.
 - 5) 山本邦男, 中西敦彦, 西村 勝, 上村信夫: コークスサーキュラー, **40** (1991), 34.
 - 6) 三浦 潔, 井上恵三, 高谷幸司, 西岡邦彦: 鉄と鋼, **77** (1991), 1243.
 - 7) 化学工学便覧(改訂四版), 化学工学協会編, 丸善, 東京, (1978), 696.
 - 8) B. Atkinson and D. Merrick: Fuel, **62** (1983), 553.
 - 9) K. Nishioka, S. Yoshida and M. Hariki: Trans. ISIJ, **23** (1983), 482.
 - 10) G.C. Laurier, P.J. Readyhough and G.R. Sullivan: Fuel, **65** (1986), 1190.
 - 11) V.R. Voller, M. Cross and D. Merrick: Fuel, **62** (1983), 562.
 - 12) C. Antoine: Compt. Rend., **107** (1888), 681, 788.
 - 13) F. Yoshida, D. Ramaswami and O.A. Hougen: AIChE J., **8** (1962), 5.