

高炉の数学モデルの開発

Development of Mathematical Model of Blast Furnace

松崎 眞 六^{* (1)} 西村 恒 久^{* (2)} 篠竹 昭 彦^{* (3)} 国友 和 也^{* (4)}
 Shinroku MATSUZAKI Tsunehisa NISHIMURA Akihiko SHINOTAKE Kazuya KUNITOMO
 内藤 誠 章^{* (5)} 杉 山 喬^{* (6)}
 Masaaki NAITO Takashi SUGIYAMA

抄 録

新日本製鐵の高炉の数学モデルは、主として塊状帯や融着帯の物質移動、反応、伝熱を推定するモデルを軸に開発が行われてきた。これと並行して、高炉炉頂の装入物分布モデル、羽口レースウェイ部の反応モデル、炉芯、炉床に関するモデルが開発されており、ほぼ高炉全域を網羅している。これらのモデルは、実際の操業の解析や操業設計に活用されている。また最近では離散要素法を用いたモデルや、非定常のモデルも開発しつつある。

Abstract

As for the mathematics model of a blast furnace of Nippon Steel Corp., development has been mainly done centering on the model that estimated material transfer, reaction and heat transfer of lumpy zone or cohesive zone. In parallel with this, a burden distribution model, a reaction model of tuyre and race-way, a model concerning of deadman and of a furnace hearth are developed and approximately cover the whole blast furnace. These models have been used for the analysis and the operation design of actual operation. In addition, we are developing a model with a disintegration element method and a non-steady model recently.

1. 緒 言

新日本製鐵では、古くは宮坂、研野らによる高炉一次元モデル^(1,2)に始まり、高炉の二次元トータルモデル、高炉炉頂の装入物分布予測モデルなどを開発してきた。更には、羽口レースウェイのモデル、炉底のモデルなど、高炉の多岐に渡りさまざまなモデルを開発してきた。これらのモデルを概説俯瞰すると共に、今後の展望についても述べる。

2. 高炉の数学モデルの概要

新日本製鐵の高炉の数学モデルは、主として塊状帯や融着帯の物質移動、反応、伝熱を推定するモデルを軸に開発が行われてきた。これに並行し、高炉炉頂の装入物分布を推定するモデル、羽口レースウェイ部の反応モデル、炉芯や炉床部の熱伝導や湯流れを推定するモデルを開発しており、ほぼ高炉全体をカバーしている。また最近では離散要素法を用いたモデルや、非定常を考慮したモデルも開発しつつある。

2.1 高炉二次元トータルモデル

高炉のトータルモデルは、融着帯形状及び炉内のガス・温度分布の二次元的な情報を得るために開発されてきた。また、融着帯の推

定に関するモデルはこのトータルモデルとは別にさまざまに開発されてきた^(4,9)。

高炉二次元トータルモデルは、杉山らの開発したBRIGHT(Blast furnace realization for the instruction guide by hybrid theory)-model^(10,11)をベースとし、装入物分布モデルなどと統合化を図ってきた^(12,13)。使用原燃料や操業の多様化に伴い顕在化した還元モデルの精度を改善するため、還元反応モデルとして多段還元反応モデル^(14,15)を組み込み、高温性状モデル⁽¹⁶⁾等の改造も行い新たにN-BRIGHT-modelとして、高炉の炉内解析に供されている。N-BRIGHT-modelはオフラインで解析に使用^(17,18)されるだけでなく、プロセスコンピュータに内装されており、オンラインで計算結果が計器室で描画され、操業方針の決定に活用されている(図1)。

1) BRIGHT-model

実操業で操業条件を変更する場合には、融着帯形状や炉内現象がある操業アクションに対しどのように変化するかを予測する必要があるが、高炉のように大規模かつ複雑なシステムでは、ある要因の効果をj知るために実炉で実験を行うことは経済的にも時間的にも大きな負担になる。また、炉内の現象は流動、物質移動、伝熱が同時に複雑に絡み合った結果を反映しており、検出端あるいは基礎実験等によって明らかになった知見から炉内現象を十分理解し、操業に

* (1) 環境・プロセス研究開発センター 製鉄研究開発部 主幹研究員 工博
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2836

* (2) 環境・プロセス研究開発センター 製鉄研究開発部 主任研究員

* (3) 環境・プロセス研究開発センター 製鉄研究開発部 主任研究員 工博

* (4) 環境・プロセス研究開発センター 製鉄研究開発部 主幹研究員 工博

* (5) 環境・プロセス研究開発センター 製鉄研究開発部 部長 工博

* (6) 元新日本製鐵(株) 工博

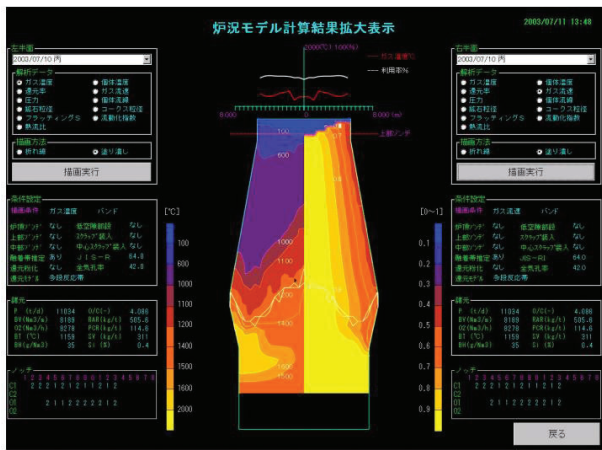


図1 N-BRIGHT MODELの計器室CRT画面

Display of calculation result of N-BRIGHT MODEL at operating room

生かして行くためにはこれらの要因を有機的に結合した理論的な数式モデルが必要となる。したがって、任意の操業条件から高炉内のガス、固体の流れ、温度状態、反応状態を演繹的に推定する二次元の数式モデルを開発した。モデルは図2に示すように、装入物分布モデル、ガス流れモデル、固体流れモデル、化学反応モデル、液流れモデル、伝熱モデルの各サブモデルから成り立っており、最後にこれらを統合したトータルモデルによって融着帯形状が計算される(図3)。

モデルは次のような特徴を持っている。①すべての高炉に適用可能、②流動、反応、伝熱を同時解析した理論モデル、③二次元で炉半径方向の分布を重視、④融着帯形状の理論推定が可能、⑤検出端情報は入力条件としない、しかし取り込みは可能とする、⑥思考実験や現実に試験できない大幅な操業条件の変更が可能、⑦基礎実験の結果を容易に取り込める。

2) 多段反応帯モデルを取り込んだ N-BRIGHT-model

高炉のトータルモデルの最も重要な構成要素である還元モデルを

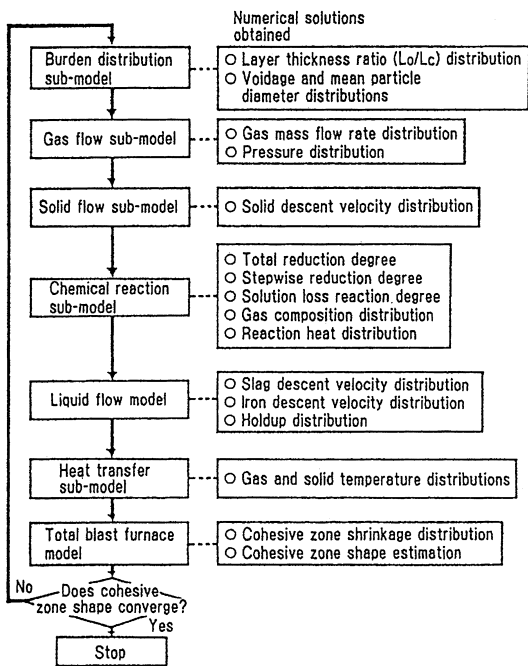


図2 モデルの基本構成
Basic concept of model

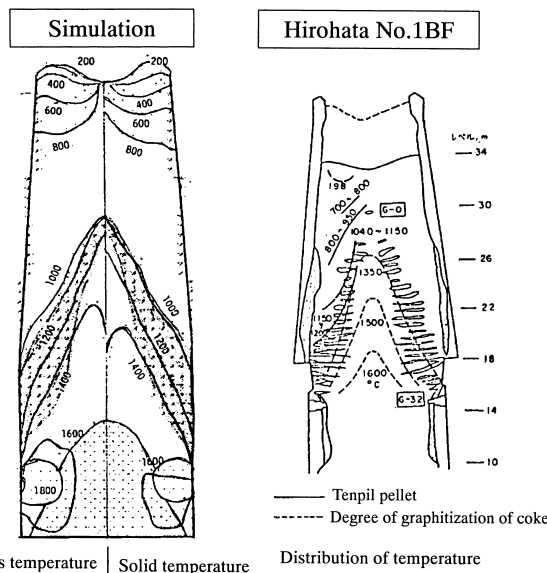


図3 モデル計算結果と解体高炉調査結果との比較

Comparison between model calculation result and dismantling blast furnace finding

大幅に改造したモデルである。従来焼結鉱の還元モデルとしては、解析が容易な一界面モデルあるいは多界面未反応核モデルが用いられてきた。BRIGHT-modelでは3界面未反応核モデルが使用されていたが、焼結鉱の性状差を十分に炉内現象に反映できないため、内藤らによって開発された多段反応帯モデルを取り込んだ。多段反応帯モデルは、ヘマタイト、マグネタイト、ウスタイト、鉄鉱石が未反応核モデルのように明確な境界を持って反応が進むのではなく、共存しながら進むと仮定したモデルである。このモデルを用いることにより、炉内測定結果やBIS炉などの還元実験と良く一致する計算結果が得られるようになった^{19,21)}(図4)。

3) 溶銑中Si推定モデル

従来から溶銑中のSi度を予測する手段として高炉内でスラグ、メタルの平衡²²⁾あるいはFeOとSiの平衡²³⁾が成立するとした平衡論を基礎とした検討がなされてきた。しかし稼働中の高炉の炉内サンプリング結果では、レースウェイ領域では熱力学的平衡は成立していない。従って、移動速度論を基礎にした高炉内Siの予測モデルを構築

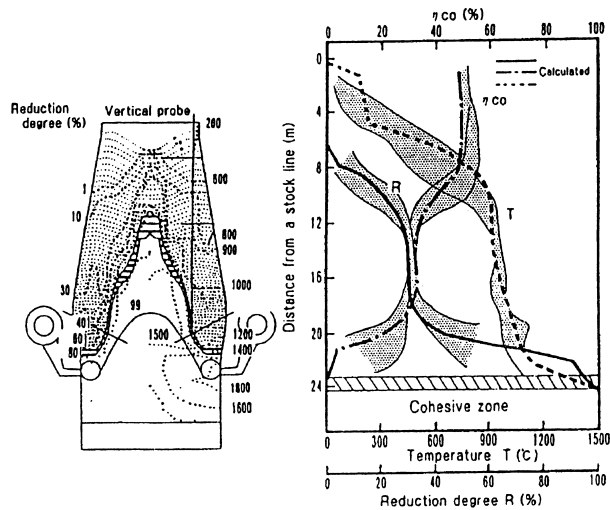


図4 計算結果と実炉測定結果の比較(大分製鐵所第2高炉)
Comparison between analyzed values and values measured with probes in Oita Works No.2 blast furnace

した²⁴⁾。ガス流速などのモデルの初期条件を高炉トータルモデルの計算結果により与える。本モデルの計算結果により、レースウェイの近傍の кокс とスラグからのSiO₂ガスの発生は平衡論ではなく速度論によってなされること、特に кокс からのSiO₂発生速度は溶銑中のSi濃度を左右するもっとも重要な要因である、などのことが説明可能となった(図5)。

4) 還元粉化モデル

高炉内の通気を左右する現象としてシャフト部や炉下部で原燃料の劣化により発生する粉の挙動が挙げられる。BRIGHT-modelでは装入物の境界条件は基本的に炉頂だけで与えるようになっている。しかしながら、たとえば装入された焼結鉱は還元粉化により炉内で粉化するため、炉内での粒子径分布や空隙率分布は高さ方向や半径方向で変化することが知られている。この現象は炉内の通気に大きな影響を与えるため、岩永らの還元粉化推定式²⁵⁾をベースにマトリックス法を導入し、モデル化した。このモデルを導入することにより、焼結鉱の還元粉化指数(RDI)上昇時の還元粉化増加に伴う低温熱保存帯形成のシミュレーションが可能となった²⁶⁾(図6)。

5) 粉の移動蓄積モデル

炉内での原燃料の粉化現象は、焼結鉱の還元粉化だけでなく、炉下部での原燃料の劣化でも多量に発生する。特に高微粉炭操業においては、 кокс 比の低下による кокс の劣化、未燃焼の微粉炭の挙動が問題となる。従って炉下部で発生した粉の移動と蓄積現象について模型実験結果を基にモデル化を行った。粉体の移動は、粉体の質量と重力Fanningの式から導出されるガスの加速度等から定式

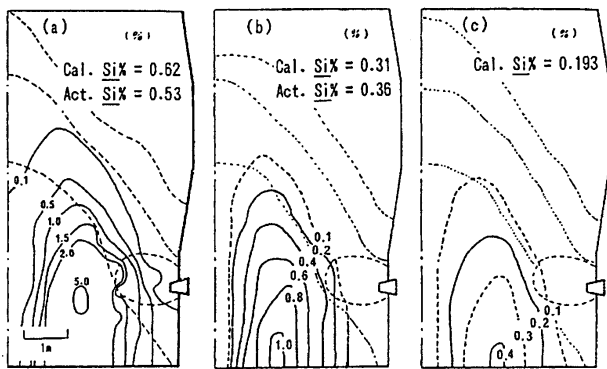


図5 炉下部でのSi分布に及ぼす炉芯空隙率と羽口先温度の影響
Influence of void fraction of deadman and flame temperature at tuyer on Si distribution of lower part of blast furnace

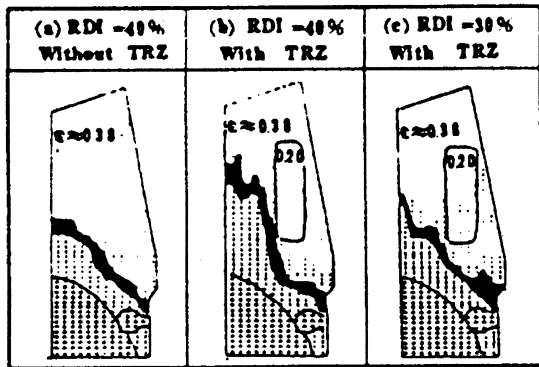


図6 融着帯形状とRDIの関係
Relation between cohesive zone and RDI (TRZ: thermal reserve zone)

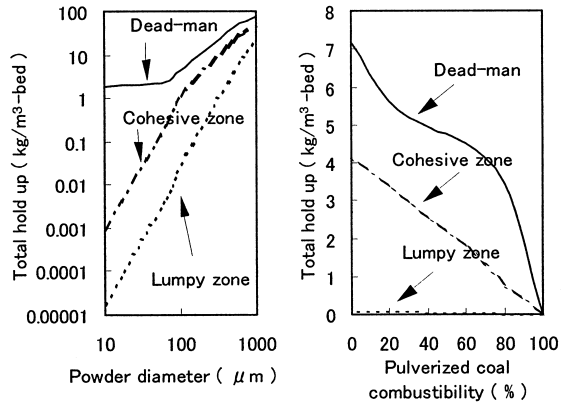


図7 粉の粒子径あるいは微粉炭の燃焼性がトータルホールドアップに及ぼす影響

Effect of powder diameter and pulverized coal combustibility on the total hold up

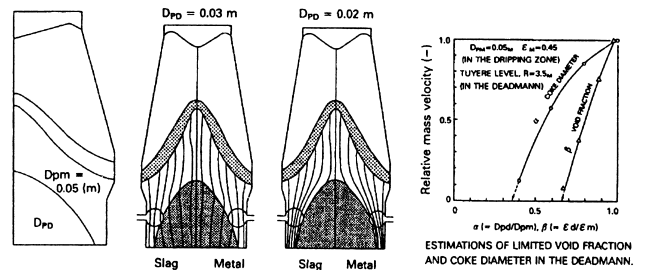


図8 高炉下部のスラグメタル流れに及ぼす кокс 粒子径の影響
Effect of coke diameter on slag and pig iron flow in the lower part of blast furnace

化し、粉体のホールドアップ式は実験結果を無次元数で整理することにより求めた。このモデルを高炉トータルモデルに組み込むことにより、高炉内の粉の蓄積挙動が通気に及ぼす影響が解明可能となった^{27,28)}(図7)。

6) 高炉滴下帯での液流れモデル²⁹⁾

高炉滴下帯での液流れは、ガスの通気性や炉芯での伝熱、FeOの還元反応に大きな影響を及ぼす。これをモデル化するため、模型実験で、液ホールドアップや液滴下量、液流速分布等を定式化した。基本的なモデル構成は二次元軸対称で、液の通液抵抗はDarcy式タイプの粘性抵抗式を用いた。このモデルと後述するスラグ粘性推定モデルを組み合わせることにより、炉芯の通液性に及ぼす伝熱や空隙率の影響が検討可能となった(図8)。

2.2 高炉装入物分布モデル³⁰⁻³²⁾

高炉の装入物分布予測モデルは、1980年代に精力的に開発され、RABIT-model(Radial burden distribution index theoretical model)と呼ばれ、先の高炉トータルモデルの重要な初期条件を与えるモデルとして、高炉操業の設計及び解析に活用されている。

RABIT-modelの特徴は、炉中心部の分布形態に大きく影響を及ぼす炉内でのガス流れ、 кокс 層崩れ、装入物の降下等が装入物分布形態に与える影響について模型実験装置等を用いて検討し、得られた知見を基に定式化され考慮されていることである。本モデルは図9に示すように、装入物の落下・堆積過程、粒度分布計算、 кокс 層崩れの計算、ガス流分布の計算、に大きくわけられ、この中でも堆積形状・粒度分布計算、 кокс 層崩れの計算のステップが重要である(図9、10)。

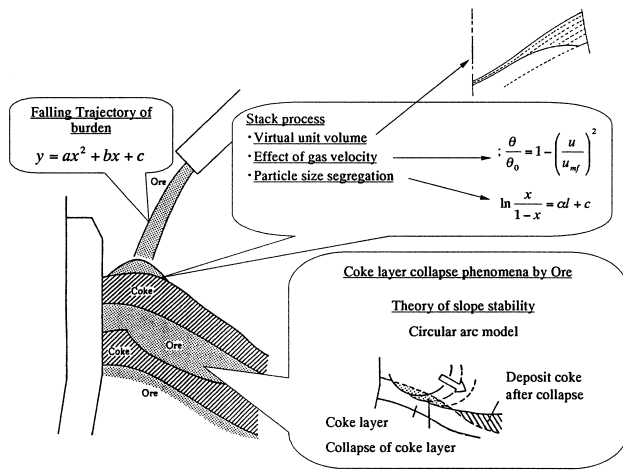


図9 モデルの基本構成
Basic idea of model

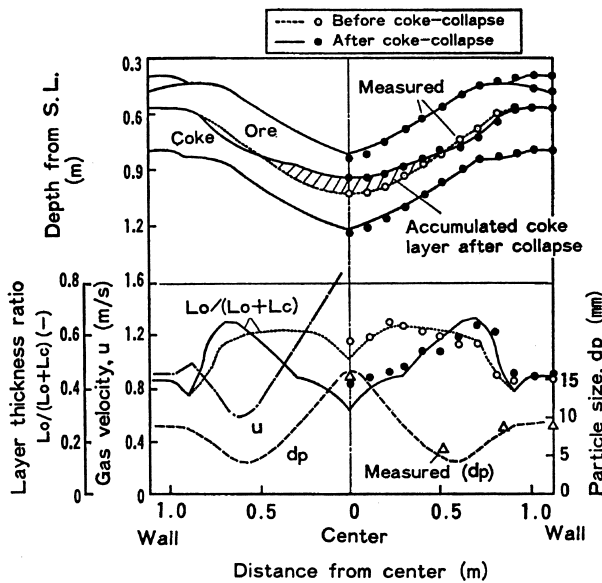


図10 計算結果と模型実験での測定結果の比較
Comparison of calculation result and measurement results by model experiment

RABIT-modelを開発して以降、新たな装入装置の開発、制御方法の開発等に伴い、次に述べるようないくつかのサブモデルを新たに開発し、取り込んでいる。

1) 空隙率推定モデル

粉体堆積層の空隙率は、ガス流れを推定する上で非常に重要であるが、粒度分布を考慮した空隙率の推定式が一田らによって提案された³³⁾。この式は鈴木らの配位数推定モデルに基づいた多成分粒子ランダム充填層を対象として考案された推定式³⁴⁾を、焼結鉱及びコークスに適用したサブモデルである。このモデルを用いることにより粒度構成が変化した場合の空隙率を精度良く推定することが可能となった。

2) 炉壁部の堆積形状推定モデル

装入方法の多様化に伴い、炉壁近傍での堆積形状の推定精度を向上させる必要が生じたため、超音波センサーを用いた精度の高い堆積形状の測定が可能なオフラインの分布試験装置を開発し、実験結果から堆積形状、傾斜角のデータ処理方法を検討するとともに、堆積過程の解明と定量化を行った。これらの実験結果を基に、堆積層

を粉体の連続体と捉え、連続関数で扱うことにより、汎用的かつ精度の良い推定モデルを開発した^{35,36)}(図11)。

3) 排出粒度推定モデル

高炉で使用される原燃料は、炉内に装入される時だけでなく、搬送過程で既に偏析現象を繰り返してきている。従って、炉内半径方向の粒度分布を正確に予測するためには、装入装置から排出される装入物の粒度構成の時系列な変化を定量的に考慮する必要がある。このため、巡回シュートから排出される装入物の粒度構成の時間依存性について模型実験装置を用いて調べ、単位時間に時系列的に排出される装入物の分布として対数正規分布を仮定し、さらに粒度の分散は一定値と仮定することによりモデル化した^{37,38)}(図12)。

4) 反発板式新型シュート

高炉の装入装置は、通常、バルとバルレスが使用されているが、

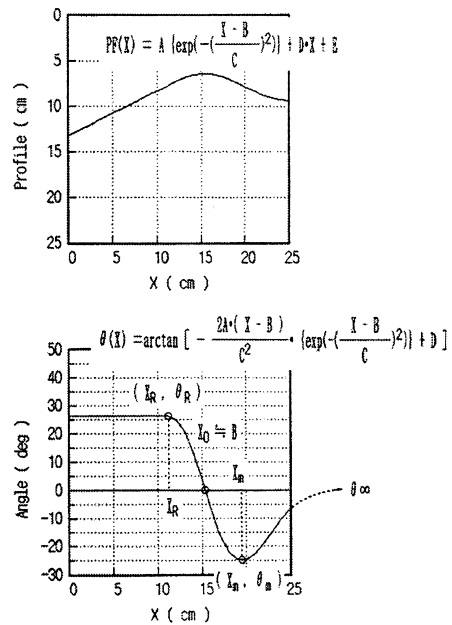


図11 堆積形状、傾斜角分布関数の定義概念
Concept of definition of stack profile and inclination angle distribution function

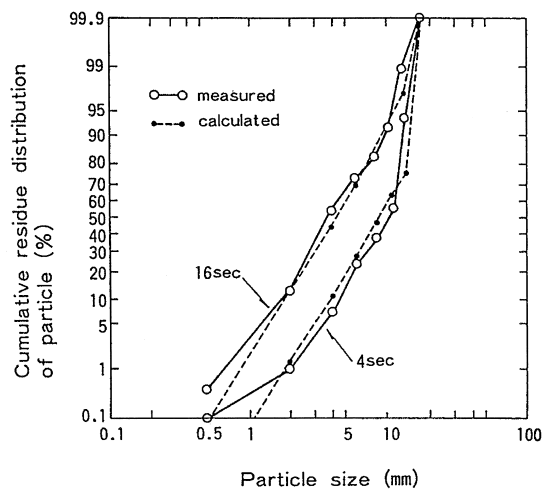


図12 排出装入物の累積粒度分布の時系列変化の計算値と実験値の比較
Comparison between calculation and experimental results of time series change of cumulative residue distribution of particle

新日本製鐵では、従来のベルレス装入装置のシュート先端に反発板を設けることにより、より制御性を向上させた装入装置を開発し、君津製鐵所第2, 3, 4高炉及び北海製鐵第2高炉に導入した。この新たな装入装置についても、対応可能なサブモデルを開発した³⁹⁻⁴²⁾。

5) 二次元離散モデル

通常のコークス、鉱石の層状装入に加え、コークスと鉱石を混合して装入することにより機能改善をはかる技術が開発されている。例えば、焼結鉱に反応性の高い小塊コークスを混入することにより、シャフト効率の改善をはかる、あるいは還元鉄を鉱石に混合することにより、単に熱物質取支上の還元材比の低減にとどまらず、鉱石層の還元溶け落ち性状の改善による更なる還元材比の低減や出銑比の増加が期待される。

このような混合装入の効果を最大限に発揮するためには、粒径だけで密度や形状も異なった装入物を、必要な部位に必要な量だけ装入するような装入方法を開発することが重要な課題である。このため、模型実験により混合装入時の偏析特性を検証し、離散要素法を

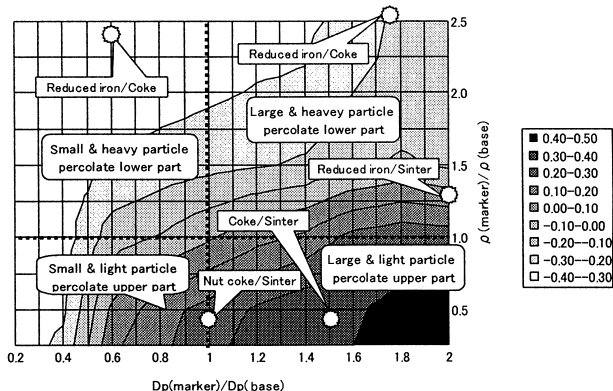


図13 粒子径と密度が偏析に及ぼす影響

Effect of particle diameter ratio and density ratio on segregation index

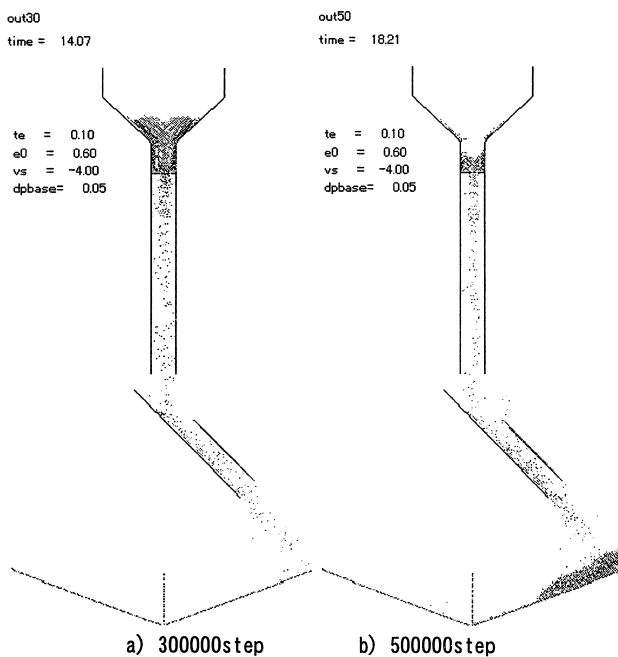


図14 計算例
Example of calculation results

用いたシミュレーションモデルを開発して、粒度及び密度の双方が異なる粒子の混合状態の挙動を解析した⁴³⁾(図13)。

さらに、離散要素法をベルレス装入装置に適用したモデルの検討も行った⁴⁴⁾(図14)。

2.3 羽口レースウェイモデル

羽口レースウェイ部は、高炉の操業を制御する上で重要な部位であり、田村らにより羽口レースウェイ部での微粉炭の燃焼反応を推定する一次元モデルが開発されている⁴⁵⁾。このモデルは、微粉炭の燃焼過程を、熱分解とチャーの燃焼の過程に分け、それぞれの過程に対してモデリングを行っている(図15)。モデルは、羽口の軸上一次元である。

2) 混炭吹込みを考慮したモデル

近年、資源の選択の可能性を高めるためあるいは置換率の向上を目的として、揮発分の異なった石炭を組み合わせる技術が開発されている。しかしながら上述のモデルでは石炭成分は平均値で与えるため、実際の混炭時の燃焼挙動はシミュレーションできない。従って、上述のモデルが微小時間について基礎式を立てていたのに対し、微小距離についての基礎式に書き直し、各々の炭種について燃焼反応を独立に解き、雰囲気ガスについては瞬時に混合するものとして混炭時の挙動のシミュレーションを可能とした⁴⁶⁾(図16)。

3) 二次元レースウェイモデル

レースウェイ内でガスや粉体の流動についての二次元モデルとして、杉山らによりNavier-Stokes式を基本構成式としたモデル⁴⁷⁾や、篠竹ら⁴⁸⁾によりさらに乱流項を考慮したモデルが提案されている。また、ガスの流動とコークスの燃焼を考慮した二次元モデルも提案されている⁴⁹⁾(図17)。

また、数学モデルではないが、模型実験結果から導出したレースウェイの形状を推定する式が提案され^{50,51)}、高炉トータルモデルにも取り込まれている。

4) 炉下部熱バランスモデル⁴⁶⁾

揮発分が低く発熱量の高い微粉炭を使用した場合など、発熱量の効果以上にコークスとの置換率が向上する現象が見られるが、炉下部で実質的に発熱反応に寄与しない水素の挙動を考慮した炉下部発熱量で管理可能となる。炉下部発熱量は次のように定義する。すなわち、溶銑の熱レベルを決める滴下領域である1400℃以上の領域での炭材の有効発熱量を炉下部発熱量、つまり炭材のCOまでの部分燃焼熱、および持ち込み顕熱から炭材由来のCO、H₂、灰分の昇

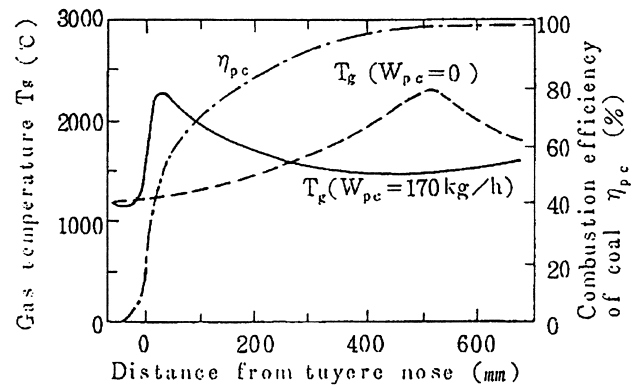


図15 レースウェイ燃焼炉のガス温度と燃焼効率分布の計算結果
Calculation result of axial distribution of gas temperature and combustion efficiency in the raceway combustion furnace

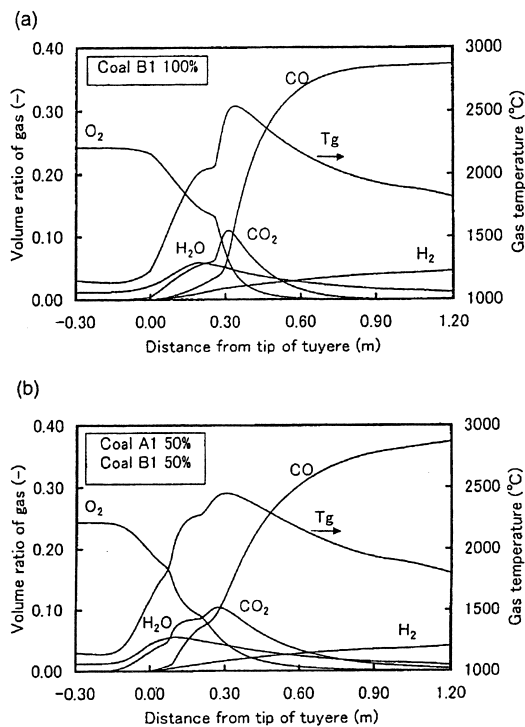


図16 ガス成分と温度の計算結果

Calculation result on the distribution of gas composition and temperature

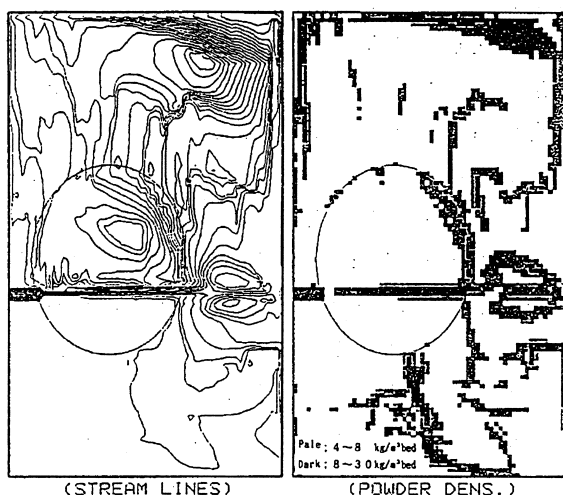


図17 レースウェイでのガス流れの計算結果
Numerical solutions of gas flow at raceway

温に要する熱量を差し引いた熱量と定義した。一般に炉下部発熱量の高い微粉炭は置換率も高く、還元材比低減に効果的である。

このモデルは、一次元レースウェイ燃焼モデルと合わせて、微粉炭の炭種拡大に寄与している。

2.4 炉下部モデル

炭酸ガス抑制を目的とした還元材比の低下要請、経済情勢の変化による高生産操業にくわえ、原料性状の悪化による高温性状の悪化により、高炉の炉下部には大きな負荷がかかっている。高炉操業の安定を図る上で、炉下部の挙動の解明と制御は従来にも増して重要になっている。従って、炉下部についても、炉芯の非定常的な伝熱挙動を推定するモデル、及び炉床部の湯流れを推定するモデルを開発した。これらのモデルは、今後炉上部のモデルと合わせて、総合的なシミュレーションモデルに発展させる必要がある。

1) 炉芯非定常伝熱モデル

炉芯の充填構造、液流れ、ガス流れ、伝熱を考慮した二次元非定常モデルである。反応についてはFeOの直接還元反応のみを考慮した。スラグの粘性については当初溶融時の粘性のみを考慮していたが⁵²⁾、後述するスラグ粘性推定モデルを組み込んで凝固まで考慮したモデルに発展させた⁵³⁾。本モデルを用いることにより、いわゆる生鉄落ちや炉芯不活性等により、通常時より炉下部の特定領域のFeO濃度が急激に増加した時の、温度、通気、通液等の変化が解明可能となった。なお、溶銑の滴下量など、境界条件の一部はN-BRIGHT-modelの計算結果を用いている(図18)。

2) 炉床部湯流れ

炉床部での湯流れを計算するモデル⁵⁴⁾は、計算領域を炉底の湯溜まり部に設定した三次元円筒座標系の定常モデルで、流動と伝熱を考慮している。流体は溶銑のみを考慮し、滓は考慮していない。炉床のフリーゾーンの条件を変えて計算を行い、模型実験と比較し、よく一致することを確認している。このモデルを用いて、実炉のスケールと溶銑の物性値を与え、炉芯の浮沈のほか、炉底の凝固層や炉芯の低透過領域の存在が炉床の溶銑流れと温度分布に及ぼす影響について解析を行った(図19)。

このほか、炉床側壁部の粘稠層～れんがの伝熱モデル解析⁵⁵⁾や、熱応力解析モデル⁵⁶⁾を用いた炉床側壁損耗機構の推定、炉底湯溜ま

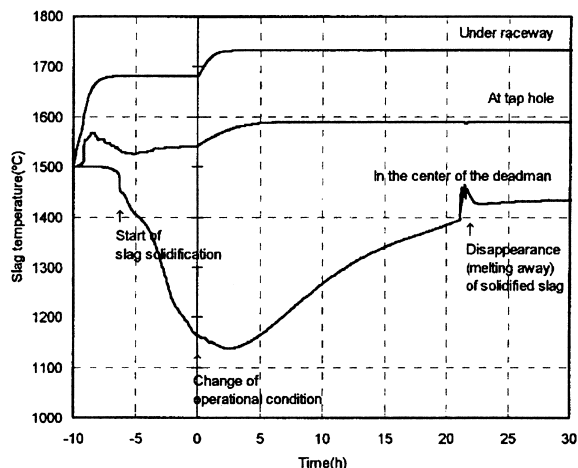


図18 スラグの凝固とその影響を考慮した時のスラグ温度の推移
Transition of the slag temperature under the effect of slag solidification and the counteraction for it

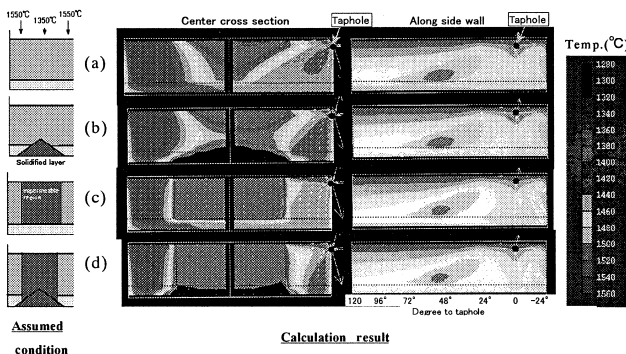


図19 炉底隆起及び低透過領域を設定した場合の湯流れの計算結果
Effect of solidified layer and impermeable region on liquid flow and temperature

り部～炉底底盤れんがの非定常伝熱モデル解析⁵⁷⁾などを行なっている。

3) 炉熱モデル

炉下部に関しては、数学モデルのカテゴリーには入らないが、実操業で熱管理に使用されている管理指標をいくつか開発している。たとえばNSi, NMn⁵⁸⁾は、各々溶銑中Siと溶銑中Mn濃度の平衡値と分析値との比で定義した指標で、炉下部の熱的裕度をあらわしている。また炉床のレベルを判断する指標としては推定スラグ温度^{59,60)}を用いている。この指標は、Mn-C-O平衡を仮定しスラグとメタルの分析値から計算したもので、炉床のスラグ浴の温度を現していると考えられる。

2.5 高炉スラグ粘性モデル

高炉スラグの粘性は、高炉操業にとって非常に重要な要素となる。融着帯での軟化収縮や通気性、さらにはレースウエイや炉芯での通気性はスラグの粘性によるところが大きく、またスラグの粘性そのものが滓化時の成分変化や温度によって左右される。スラグ粘度は、成分、温度だけでなく、コークス粉や、固相の晶出により大きく低下することが知られているがこのような影響を考慮したモデルは少ない。従って、固相の析出による粘性の上昇を考慮した推定式の開発を試みた。

新日本製鐵では、高炉系のスラグの粘性推定式として、杉山、中川らが開発した実験回帰式を用いてきた⁶¹⁾。この式はスラグ温度が融点よりある程度高い領域では実験結果と整合性があるが、スラグ温度が融点より低下し固相が析出した状態になると実態との乖離が大きくなる。仮に固相率を求めることができれば融点より温度が低下した場合の粘性もより精度良く求めることが期待できる。従って、状態図を理論的に計算するモデルであるSOLGASMIX^{62,63)}を用いてスラグの固相率を計算し、固相が生成した時のスラグ懸濁時の粘性推定には森らの関係式⁶⁴⁾を適用することにより、固相析出時のスラグの粘性を計算するモデルを開発した^{65,66)}(図20)。

2.6 高炉可視化システム⁶⁷⁻⁷⁰⁾

本システムは、数学モデルとは対極に位置し、高炉の数多くのセンサーデータを用いて、高炉の状態をありのままに描画するシステムである。今後、このシステムによる描画結果と物理モデルの計算結果をリアルタイムで比較することにより、理論値と実際の乖離の状況を明確にし、炉況異常の早期発見に活用する予定である。

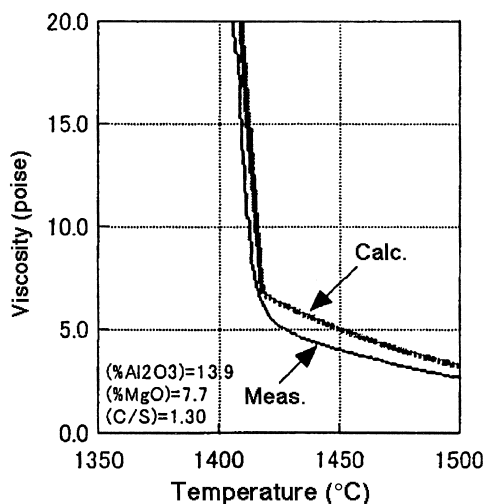


図20 スラグ粘度の実測結果と計算結果の比較
Comparison of slag viscosity between measured and calculated one

3. 結 言

新日本製鐵では長年、高炉の数学モデルを開発し、実際の操業の解析や操業方針の決定、更には操業の安定、還元材比の低減に寄与している。

今後は、数あるモデルの統合化と統合可視化が課題である。また、モデルの非定常化、二次元化、固体粒子挙動の離散モデル化も合わせて今後検討すべき課題である。

参考文献

- 1) 宮坂尚親, 須賀田正泰, 原行明, 近藤真一: 鉄と鋼. 58(1), 18(1972)
- 2) 研野雄二, 須賀田正泰, 山口一良: 鉄と鋼. 65(10), 1544(1979)
- 3) 田村健二, 林洋一, 松井正昭, 彼島秀雄, 山本崇夫: 鉄と鋼. 68(15), 2887(1982)
- 4) 研野雄二, 須賀田正泰, 中村展, 山口一良, 安倍勲: 鉄と鋼. S500(1978)
- 5) 安田一美, 木村洋, 中野宣邦, 森下紀夫: 鉄と鋼. S533(1978)
- 6) 研野雄二, 須賀田正泰, 山口一良: 鉄と鋼. 65, S51(1979)
- 7) 加瀬正司, 須賀田正泰, 山口一良: 鉄と鋼. 66, 1928(1980)
- 8) 入田俊幸, 磯山正, 阿部哲也, 長谷川順三, 奥野嘉雄: 鉄と鋼. 68, S107(1982)
- 9) 芦村敏克, 森下紀夫, 井上義弘, 樋口宗之, 馬場昌喜, 金森健, 和栗真次郎: 鉄と鋼. 80, 457(1994)
- 10) 杉山喬: 第94回西山記念講座. 1983-11, 日本鉄鋼協会
- 11) 杉山喬, 須賀田正泰: 製鉄研究. (325), 34(1987)
- 12) 杉山喬, 鈴木信邦, 松崎眞六: 鉄と鋼. 73, S824(1987)
- 13) 杉山喬, 林洋一, 須賀田正泰, 芝池秀治, 鈴木信邦: CAMP-ISIJ. 1, 22(1988)
- 14) 近江宗一, 内藤誠章, 碓井建夫: 鉄と鋼. 68, 581(1982)
- 15) 近江宗一, 内藤誠章, 碓井建夫: 鉄と鋼. 69, 363(1983)
- 16) 葛西直樹, 内藤誠章, 山口一良, 林洋一: CAMP-ISIJ. 1, 52(1988)
- 17) 杉山喬, 内藤誠章, 松崎眞六, 熊岡尚, 中山岳志: CAMP-ISIJ. 7, 46(1994)
- 18) 内藤誠章, 杉山喬, 藤原豊, 圃中朝夫, 芦村敏克: CAMP-ISIJ. 4, 166(1991)
- 19) 内藤誠章, 村山武昭, 碓井建夫: 鉄と鋼. 80(8), 581(1994).
- 20) Naito, M., Yamaguchi, K., Sugiyama, T., Inoue, Y.: 10th PTD Conference Proc. AIME, 1992, p.55
- 21) Naito, M., Nishimura, T.: ASIA Steel International Conference-20000, 2000, p.268
- 22) 田村健二, 斧勝也, 西田信直: 鉄と鋼. 67, 2635(1981)
- 23) 九島行正, 内藤誠章, 柴田清, 佐藤裕二, 吉田均: 鉄と鋼. 75, 128(1989)
- 24) 杉山喬, 松崎眞六, 佐藤裕二: 鉄と鋼. 78(7), 1140(1993)
- 25) 若永裕治: 鉄と鋼. 68, 740(1982)
- 26) 高田司, 相馬英明, 杉崎与一, 内藤誠章, 山口一良, 林洋一: CAMP-ISIJ. 1, 49(1988)
- 27) 杉山喬: 鉄と鋼. 82 (1), 29(1996)
- 28) Matsuzaki, S., Ichida, M., Sugiyama, T., Yamaguchi, K., Deno, T., Matsunaga, S.: La Revue de Metallurgie-CIT. (3), 359(1998)
- 29) 杉山喬, 中川朝之, 芝池秀治, 小田豊: 鉄と鋼. 73(15), 2044(1987)
- 30) 奥野嘉雄, 国友和也, 入田俊幸, 松崎眞六: 鉄と鋼. 72, 783(1986)
- 31) 奥野嘉雄, 松崎眞六, 国友和也, 磯山正, 草野祥昌: 鉄と鋼. 73, 91(1987)
- 32) Okuno, Y., Kunitomo, K., Matsuzaki, S., Matsui, M., Suzawa, A.: Proceedings of the 44th Ironmaking Conference. ISS, Warrendale, PA, 1985, p.543
- 33) 一田守政, 磯崎洋一, 田村健二: 鉄と鋼. 77, 1561(1991)
- 34) 鈴木道隆, 八木章, 渡辺球夫, 大島敏男: 化学工学論文集. 10, 721(1984)
- 35) 松崎眞六, 杉山喬: CAMP-ISIJ. 4, 1033(1991)
- 36) 松崎眞六, 杉山喬: ISIJ Int. 43(5), 620(2003)
- 37) Matsuzaki, S., Sugiyama, T., Okuno, Y.: CAMSE90, 1990-8
- 38) 松崎眞六, 奥野嘉雄: 鉄と鋼. 73, S4(1987)
- 39) 一田守政, 松崎眞六, 田中毅, 小泉文夫: 鉄と鋼. 87, 342(2001)
- 40) Matui, A., Kakiuchi, K., Akagi, K., Matsuzaki, S., Ootsuka, H.: 334-1998 ICSTI/ Ironmaking Conference Proceedings
- 41) 松崎眞六, 大塚一, 柿内一元, 熊岡尚: CAMP-ISIJ. 10, 881(1997)
- 42) 石原一弥, 熊岡尚, 柿内一元, 上野浩光, 赤木一志, 松崎眞六, 矢動丸成行: CAMP-ISIJ. 10, 882(1997)
- 43) 松崎眞六, 田口善弘: 鉄と鋼. 88, 823(2002)

- 44) 松崎眞六, 田口善弘: CAMP-ISIJ. 13, 138(2000)
- 45) 田村健二, 上野浩光, 山口一良, 須賀田正泰, 天野繁, 山口一成: 鉄と鋼. 77(6), 775 (1991)
- 46) 国友和也, 折本隆, 西村恒久, 内藤誠章, 八木順一郎: 鉄と鋼. 90(4), 190(2004)
- 47) 杉山喬: CAMP-ISIJ. 2, 65(1989)
- 48) 篠竹昭彦, 杉山喬, 長谷川健: CAMP-ISIJ. 5, 1143(1992)
- 49) 杉山喬: CAMP-ISIJ. 3, 1043(1990)
- 50) 中村正和, 杉山喬, 鷗野建夫, 原行明, 近藤真一: 鉄と鋼. 63(1), 28(1977)
- 51) 田村健二, 一田守政, 脇元博文, 斧勝也, 林洋一: 鉄と鋼. 73(15), 1980(1987)
- 52) 沈宗斌, 西岡浩樹, 西村恒久, 内藤誠章, 清水正賢: 鉄と鋼. 87(5), 380(2001)
- 53) Nishimura, T., Naito, M., Nishioka, K., Shimizu, M.: International BF Lower Zone Symposium. Wollongong, 2002, 5-1
- 54) 篠竹昭彦, 一田守政, 大塚一, 杉崎与一: 鉄と鋼. 87(5), 386(2001)
- 55) Shinotake, A., Ootsuka, H., Sasaki, N., Ichida, M.: La Revue de Metallurgie-CIT. 101 (3), 203(2004)
- 56) 篠竹昭彦, 大塚一, 菊池歴: CAMP-ISIJ. 15(1), 120(2002)
- 57) 篠竹昭彦, 宮脇雅敏: CAMP-ISIJ. 18(1), 100(2005)
- 58) 折本隆, 内藤誠章, 高尾正義, 阿南邦義, 井上義弘: CAMP-ISIJ. 11(1), 213(2002)
- 59) 折本隆, 内藤誠章, 田中毅: CAMP-ISIJ. 10(1), 233(1997)
- 60) 折本隆, 国友和也, 磯部誠, 塩田哲也: CAMP-ISIJ. 18(1), 96(2005)
- 61) 杉山喬, 中川朝之, 芝池秀治, 小田豊: 鉄と鋼. 73, 2044(1987)
- 62) Eriksson, G.: *Chemica Scripta*. 8, 100(1975)
- 63) Gaye, H., Lehman, J., Matsumiya, T., Yamada, W.: Proc. of 4th Int. Conf. on Molten Slags and Fluxes. ISIJ, 1992, p.103
- 64) 森芳郎, 乙竹直: 化学工学. 20, 488(1956)
- 65) 折本隆, 松崎眞六, 西村恒久: CAMP-ISIJ. 14, 902(2001)
- 66) 西村恒久, 折本隆, 松崎眞六: CAMP-ISIJ. 17, 138(2004)
- 67) Ito, M., Matsuzaki S.: CAMP-ISIJ. 15, 927(2002)
- 68) Matsuzaki, S., Ito, M.: CAMP-ISIJ. 15, 928(2002)
- 69) Ito, M., Matsuzaki, S.: CAMP-ISIJ. 16, 300(2003)
- 70) Ito, M., Matsuzaki, S., Kakiuchi, K., Isobe, M.: *Shinnittetsu Giho*. (379), 33(2003)