高炉における粉体の挙動解析 *

Analysis of Powder Behavior in Blast Furnace

佐 藤 道 貴 **

SATO Michitaka

Abstract Blast furnace involves the complex flow conditions of the upward gas flow and unburnt char/coke fines, and the downward flows of coke and molten iron and slag. Under the recent high rate injection operation of pulverized coal, permeability in the furnace has been prevented due to the accumulation of such fine powder in the lower part. Therefore, it becomes more important to understand the essential flow characteristics of the fine powder in the blast furnace to attain the stable operation. This article discusses the recent development of the analytical method and the numerical modeling of powder behavior, particularly focuses on the combustion behavior of pulverized coal, generation of coke fines and the movement and accumulation of fine powder in the lower part of the blast furnace.

Keywords : Ironmaking, Blast Furnace, Pulverized Coal Injection, Raceway, Unburnt Char, Coke Degradation, Fine Powder, Movement, Accumulation, Packed Bed, Numerical Modeling

1. はじめに

従来、高炉は固気液3相（原燃料、還元ガス、溶融スラグ／溶銑）の移動層として取り扱われてきた。しかし、溶銑コストの低減、コークス炉寿命延長の観点から近年、羽口から微粉炭を吹き込む微粉炭多量吹き込み操業（高 PCI ; Pulverized Coal Injection）が追求されるに従い、固気液3相に加え、「粉」の挙動が注目されるようになった。一つには高炉の燃焼帯であるレースウェイ内で完全に燃焼し切れない微粉炭がチャーとなって高炉内に多量に流入し、高炉下部において圧力損失など通気性への影響が懸念されたこと、二番目にはレースウェイ内でのコークスの燃焼量が減ることによって逆にコークスの滞留時間が増大し、従来以上にコークスの粉化量が増加し、さらに、これが炉下部へ蓄積して通気・通液性を阻害する問題や、風圧変動や炉壁熱負荷が上昇するなどといった問題を誘起したことから、粉の存在が高炉操業にとって無視できなくなったことが挙げられる。

本稿では、以上の流れの紹介と、近年急発展を遂げた高炉内における粉の挙動解析について述べる。

2. 微粉炭の燃焼と未燃チャーの発生挙動

2. 1 微粉炭の基本的な燃焼挙動

高炉内に吹き込まれた微粉炭はブローパイプ／レースウェイ内で急速燃焼し、コークス燃焼による熱源および還元ガス発生機能を代替する。その機構は Fig.1 のように表せる。すなわち、吹き込まれた微粉炭は高温（1200℃程度）・高速（200～230m/s）の熱風中で急速に熱分解後、揮発分が着火・燃焼し、引き続きチャーの燃焼・ガス化反応に移行する。レースウェイ内の最高温度は2000℃以上に達する。近年、指向されている微粉炭多量吹き込み操業では、吹き込み量は溶銑トン当たり 200kg 以上にもなるため、この条件下では、微粉炭を完全燃焼させるに必要な酸素量との関係を示す酸素過剰率は 1.0 を大きく下回る。この空間内における微粉炭の滞留時間は高々数 10ms であることを考えると、燃焼条件としては

* 2000. 10. 25 受付

** NKK総合材料技術研究所 〒721-8510 広島県福山市鋼管町 1
TEL (0849) 45-4148 FAX(0849) 45-3840 E-mail : msato@lab.fukuyama.nkk.co.jp

Fig.1 Combustion and gasification behavior of pulverized coal injected into blast furnace.

極めて過酷であるといえる。完全に燃焼しきれない微粉炭は未燃チャーとしてレースウェイから排出される。上記条件におけるレースウェイ内の燃焼率は60～80%であり、大量の未燃チャーが発生する。

2. 2 微粉炭の流れの実態と制御

前述のように、微粉炭燃焼は極めて限定された空間内における燃焼であるため、微粉炭の燃焼や流れの実態把握に基づいた適切な吹き込み方法により、燃焼率を制御していくことが非常に重要である。

Fig.2 にはブローパイプ内における微粉炭燃焼場を高速度カメラで撮影し、画像解析を行った結果を

Fig.2 Combustion flame of coal particles (Pulverized coal rate: 200kg/t, L: distance from lance) [1].

(a) Flow pattern of pulverized coal

(b) Concentration profile of pulverized coal and oxygen

Fig.3 Oxygen consumption behavior by pulverized coal [1].

示す[1]。図より、微粉炭燃焼は粒子が集合状態で燃焼する、いわゆる群燃焼であること、また、径方向に徐々に拡散するものの、その拡散速度は非常に遅いことが分かる。このため粒子群内部では急速に周囲の酸素を消費し (Fig.3)、かつ粒子の燃焼場同士が干渉するため、酸素不足となり燃焼速度が減速する。従って、初期の吹き込み条件が微粉炭の流れ場および燃焼挙動に大きく影響する。よって、微粉炭流れを早く均一化させ、微粉炭存在域の酸素濃度を高く保つ吹き込み方法が高 PCI にとって重要である。この観点から、ランスを複数化し、微粉炭の起点を増すことにより燃焼性改善を意図したダブルランス [1]、さらに微粉炭主流同士の干渉を防止するために2本のランスを非対称に配置した偏芯ダブルランス [2]が開発され、実際の高炉で実用化されている。また、微粉炭の噴出直後の分散性向上を図るため、ランス先端をスリット状にするなど、先端構造を各種工夫した検討例[3]も見られる。さらに、肉厚ランスを使用すると、ランス下流部にランス自身により乱流エネルギーが発生するので、微粉炭の分散と燃焼率上昇が達成できたとの報告もある[4]。いずれの場合

合も微粉炭と酸素の接触効率をいかに高めることができるかが基本的に重要となっている。

2. 3 微粉炭の流れと燃焼挙動解析

高炉のブローパイプ／レースウェイ部は、高温、高流速の過酷な環境にあるため、直接、ガス、ダストを採取して燃焼評価を行うことは容易ではない。このような領域における複雑な現象を解明し、適切な吹き込み条件を決定するための手段として、シミュレーションモデルは有効と思われる。従来、燃焼挙動の解析には微粉炭の均一分散を仮定した1次元モデルが多用されてきたが、近年では現象を精緻にモデル化した2次元モデルが多く開発されている。

埴上らは2次元燃焼場で精緻なモデルを構築し、ブローパイプおよびレースウェイ内での基礎的な燃焼挙動を検討している[5]。Fig.4 は温度分布へおよび炭種の影響を示すが、微粉炭の半径方向への拡散は小さく、半径方向で不均一な燃焼場を形成することを示唆している。佐藤らは微粉炭吹き込み方法を検討することを目的に、軸非対称2次元モデルを開発し、ランス本数、配置の影響を解析している[2]。武田らは乱流モデルと充填層内粒子分散の確率モデルを組み合わせた粉体の流動と分散モデルを開発し[6]、ランス形状が粉体の流動特性におよぼす影響等を解析している[4]。杉山は粒子の運動方程式中の充填粒子と粉体間の相互作用力を摩擦力と考えた解析により、粉体の運動方程式を導出し、微粉炭の流れとレースウェイ内のホールドアップ量の推算を試みている[7]。

このように、実現象に合ったモデル開発によって、微粉炭の流れの挙動や燃焼挙動に対する理解が深まると同時に、より効率的な燃焼を達成する上での新

Fig.4 Effect of coal rank on temperature distribution in blow pipe [5].

しい知見も得られており、工業的な意義も大きい。

3. 炉下部充填層における微粉の挙動

3. 1 高炉における粉の存在と通気性の関係

微粉炭吹き込み量の増加に伴い、高炉下部へのコークス粉蓄積による通気性悪化が指摘されている[8]-[10]。Fig.5 は一例として休風時にコークスサンブラーにより羽口レベルの炉内から採取された全コークスに占める-5mm のコークス粉率と微粉炭吹き込み量の関係を示す[9]。微粉炭吹き込みに伴い、炉芯粉率は上昇する傾向にある。この粉率と炉下部通気抵抗は正の相関にあることから、コークス粉の発生、蓄積が炉下部の通気性を阻害していると考えられる。一方、未燃チャーについては当初、炉芯や融着帯下部への蓄積による通気障害が問題になると考えられていたが、休風中に炉芯から採取されたコークス中に存在する未燃チャーの絶対量は少ないこと[10, 11]、未燃チャーは多孔質であるためコークス粉に比べて反応速度が速く、融着帯以上の領域では速やかに反応・消失する可能性が高いこと[12, 13]、PCI が 250kg/t 相当の操業でも炉頂から排出される未燃チャー量は僅かである[10]ことなどから、チャーは炉内ではほぼ完全に消費されていると見られる。このため、最近ではコークス粉が通気性悪化の主要因と考えられ、その由来および発生のメカニズムを特定することが重要な技術課題となっている。

Fig.5 Effect of pulverized coal rate (PCR) on coke fine ratio in deadman at tuyere level [9].

3. 2 炉下部におけるコークスの粉化挙動

高炉の炉頂から投入されたコークスは還元剤としての役割の他に、通気性を確保するためのスペーサーとしての重要な機能を有する。しかし、降下の過程で加重や剪断摩擦等、様々な物理的粉化作用を受けることに加え、1000℃以上の領域では、ガス化反応 ($C+CO_2=2CO$) やアルカリ金属のアタックなどによる化学的劣化を受ける。さらに最終的には2000℃以上のレースウェイに侵入、急激に加熱されると共に、羽口先の高速の熱風による旋回作用を受けるため、相当量の粉を発生することになる。微粉炭多量吹き込み時には、レースウェイ内でのコークス燃焼量の減少による滞留時間増により、さらに粉化が促進される。特にこのレースウェイ内の粉化現象に関しては、近年注目され、数多くの研究がなされている。

Fig.6 はレースウェイ内粉化量におよぼす微粉炭吹き込み量の影響を示す。微粉炭吹き込み量増大に伴ってコークスの粉化量は著しく増加する[14]。この原因として、山口らは酸化による劣化層の消滅がなく、 CO_2 によるガス化反応が多いためとしている[15]。佐藤らは Fig.7 に示すように、羽口先コークス燃焼挙動の理論解析を行い、羽口先酸化帯における劣化層の除去速度とガス化帯でコークス表面に形成される劣化層の生成速度との差が粉化量に関係すると仮定して粉化モデルを構築し、微粉炭吹き込み時のコークスの粉化量増大を良好に説明している[16]。山岡らは粒子群に加えられる衝撃エネルギーと破壊抵抗エネルギーを考慮した解析により、微粉炭吹き込み時には滞留時間増大に伴う粉化の進行を介して、レースウェイ深度が深くなったことが粉化速度の増大を引き起こしたと結論付けている[17]。近森らは離散要素法により摩砕粉化量の定量化を試み、モデ

Fig.6 Effect of pulverized coal rate on combustion rate and coke fine ratio [14].

ル実験結果と良好な一致を見ている[18]。

レースウェイ内の粉化は一つの要因で決まるものではなく、上述の効果が複合的に作用しているものと思われる。今後は、これらを総合化することによって、レースウェイ内における粉発生速度の定量化が望まれる。

Fig.7 Change in calculated carbon consumption rate along tuyere axis [16].

3. 3 炉下部におけるコークス粉の移動蓄積挙動

3. 3. 1 基礎実験

微粉炭多量吹き込み時に発生する未燃チャーあるいはレースウェイ内で粉化したコークス粉はガスと共に高炉下部を移動する (Fig.8) [19]。微粉は充填層内を固気二相流として移動しつつ反応・消失すると考えられるが、消費できない部分は炉内に蓄積していくことになる。この移動・蓄積挙動は充填層の状況やガス流速、微粉の粒径や量によって大きく変化する。粉の蓄積量が異常に大きくなれば通気抵抗が増大し、高炉の安定操業を大きく妨げる要因になるので、近年、蓄積箇所の同定や制御方法を含めた基礎検討が盛んに行われている。

レースウェイからの微粉発生を模擬したコールドモデル実験によると、羽口から吹き込まれた微粉は炉芯表層部とボッシュ部の炉壁近傍に堆積し易く、これによって、炉芯表層温度が低下すると共に、通気抵抗も大きくなる[20]。炉芯 (細粒) と滴下帯 (粗粒) の2層を模擬した並列固気二相流実験により、

Fig.8 Powder movement and accumulation in lower part of blast furnace [19].

粉の侵入、蓄積挙動を調査した実験によると、ホールドアップは粒子径が小さい炉芯側に多く、ガス流速が低下するほど増加する[19]。また、粉の蓄積などにより炉芯コークスの平均粒径が小さくなった場合には、羽ロー炉芯間の通気抵抗が増大し[21]、炉芯内コークスの温度も低下する[8]などの現象が報告されている。

以上のように、粉の蓄積に起因した通気性悪化や炉芯内温度の低下など、近年は炉下部に課題が集中している。しかし、炉下部の状況を計測により直接あるいは常時把握することは困難であることから、現状ではシミュレーションにより気・固・粉体の流動や反応に与える各種因子を推定することが有効な手段となっている。以下では発生粉の移動・蓄積挙動に関し、最近、精力的に行われている数値解析の事例について紹介する。

3. 3. 2 微粉の運動方程式、ホールドアップモデル化

柴田らはガラスビーズを充填した充填層に粉体を吹き込んだ時のガス流速と圧力損失とホールドアップを測定し、この結果をもとに粉体と充填粒子の相互作用に着目して以下の基礎式を示している[22]。

<ガス相>

$$\text{連続の式: } \operatorname{div}(\varepsilon_g \rho_g \vec{u}_g) = 0 \quad (1)$$

運動方程式:

$$\operatorname{div}(\varepsilon_g \rho_g \vec{u}_g \vec{u}_g) = -\varepsilon_g \operatorname{grad} P_g + (\vec{F}_g^s + \vec{F}_g^f) \quad (2)$$

<粉体>

$$\text{連続の式: } \operatorname{div}(\varepsilon_f \rho_f \vec{u}_f) = 0 \quad (3)$$

$$\text{運動方程式: } \operatorname{div}(\varepsilon_f \rho_f \vec{u}_f \vec{u}_f) = \vec{F}_f^g + \vec{F}_f^s \quad (4)$$

ここで、ガスと充填粒子の相互作用力 $\vec{F}_g^s$ としては Ergun タイプの流体抵抗式を用い、粉とガスの相互作用力 $\vec{F}_f^g$ として抵抗係数 C_D および Richardson-Zaki の空間率関数を用いて表現している。充填粒子、粉体間の相互作用 $\vec{F}_f^s$ は Fanning 型の流通抵抗式で近似し、補正項として付加圧力項 F_k を導入した。本充填層内固気 2 層流モデルを用い、未燃チャーの滞留量におよぼす融着帯形状の影響を検討し、Fig.9 の結果を得ている。

Fig.9 Distribution of powder hold-up around the cohesive zone [22].

山岡は $\vec{F}_g^s$ と $\vec{F}_f^g$ として Ergun タイプの流体抵抗式、 $\vec{F}_f^s$ としては、粉が静止した充填粒子へ衝突すること起因する運動量の変化と考えた充填層内固気 2 相流モデルを開発し、充填構造やガス流速によって粉が滞留しやすい位置を解析している (Fig.10) [23]。高谷らは、高炉モデルに本固気 2 相流モデルを取り入れ、コークス粉の運動について解析を行い、炉芯部とボッシュ部側壁がコークス粉の滞留しやすい領域であることを示した[24]。永見らも、チャーのガス化反応を付与した固気 2 相流モデルにより、未燃チャーの滞留挙動を解析し、未燃チャーの滞留量は融着帯下端および炉頂付近で高い傾向にあることを

Fig.10 Effect of gas flow and packed bed conditions on distribution of powder hold-up in shaft [23].

示している[25].

杉山は充填粒子、粉体間の相互作用力 F_f^s を摩擦力と考えた解析により、粉体の運動方程式を導出している。また、充填層の状況やガス流速、微粉の粒径や量などの影響を定量的に解析し、充填層内におけるホールドアップを表わす実験式を提案している。そして、この式と高炉トータルモデルによって計算したガス流速分布、充填粒子径の分布、ガス物性値の分布と結合し、高炉内ホールドアップ分布を推定している[19]。この結果、粉の高濃度滞留域はガス流速の小さい融着帯根部、レースウェイ下部から炉芯にかけて存在すること、粉の滞留におよぼす粒径の影響は顕著であり、粒径が 1mm 程度のコークス粉は大部分が滞留することを明らかにした。

これらのモデルでは、粉体を連続体として扱い、滞留する粉体は動的滞留量が支配的と仮定しているが、実際の観察によると、粉体は衝突と飛散を繰り返して運動している現象も認められている。草壁ら

は粒子の運動モデルとして、充填粒子間を移動と停止を繰り返す「衝突モデル」を提案している (Fig.11)[26]。また、微粉の供給流量と動的ホールドアップの収支から求めた上昇速度は、この衝突モデルによる上昇速度の計算結果と良く一致することから、層内を上昇運動する微粉の動的ホールドアップ H_d と、充填粒子間に捕獲・堆積した静的ホールドアップ H_s とは区別する必要性を指摘している[27]。樋高らは、これら H_d と H_s を区別した測定および定式化を行い、 H_s は充填物の空間率、表面粗さなどに大きく依存することを明らかにした[27]。

Chen らは、横に送風口のある固定層を対象に、静的ホールドアップによる充填層空隙率の変化を考慮する定常 2 次元モデルを作成し、充填層内で滞留し易い位置の予測計算を行っている[28]。さらに、粉の充填層への堆積と脱離速度を考慮した非定常 2 次元モデルにより、各位置における圧力と滞留量の測定値を合理的に説明している[29]。

有山らは粉体の移動・滞留挙動の直接観察を行い、粉体はガス流に伴って充填粒子間を飛翔する部分と充填物上に一時的に堆積・停止する部分から構成され、この停滞部の粉体は下方から供給される粉体によって順次更新されることを明らかとした[30]。また、トレーサー粒子の滞留時間分布から特定の粒子の平均的な上昇速度を求めた結果、前述の衝突モデルから予測される値よりかなり遅いことが判明し、充填粒子に衝突後、再飛散するまでの停滞時間を考慮する必要性を示した。さらに停滞時間を付加した粒子運動モデルを構築し、平均上昇速度の実測値を

Fig.11 Flow model of fines on coarse particles [26].

精度良く表現できることを示している。

以上のように、種々の粉の運動モデルが提案され、それぞれ特徴を有する。今後は、コークス粉または未燃チャーの反応速度を付加した速度式によって、粉の蓄積と消費の両面から通気性に及ぼす影響を定量評価していくことが課題となろう。

4. 4流体モデルの開発および高炉内の流動・伝熱同時解析

高炉内の諸現象は4流体（固、気、液、粉）が複雑な流動、伝熱を伴いながら相互に関与し合っている。八木ら[31, 32]はこれら4相をそれぞれ流体として扱い、各流体間の相互作用および質量交換を考慮する4流体総合モデルを開発し、4相の同時流動・伝熱解析を可能としている。Fig. 12に計算結果の一例として各流体の濃度分布を示す[31]。さらに本モデルは、非定常モデルに拡張され[32]、経時変化の推算も可能となっていることから、操業条件や原料料品質変更時の粉の非定常蓄積などの現象把握に有効活用されることが期待される。

5. おわりに

高炉は高温高压の化学反応器であり、従来より炉内の計測が難しかったことから、長い間ブラックボックスとして扱われ、炉内の動的な現象は数学モデル解析による推定の域を出なかった。しかし、近年、稼働中高炉の羽口部からプローブを挿入し、高炉下

部を直接観察する技術が実用化され、ガス、コークス粒子、微粉、液滴のダイナミックな挙動を目の当たりにすることが可能となった[33]。同時に、微粉炭吹き込みに伴う気液粉の挙動の変化、充填層自身の構造変化に関する知見も得られつつあり、通気性悪化の原因を推定するための有益な情報となっている[9]。

安定的かつ経済的な微粉炭多量吹き込み操作を達成するためには、従来にも増して炉下部を適切に制御することの重要性が高まっている。そのためには、上述のような炉下部情報に加え、本稿で述べたような各種要素モデルによって、炉下部での粉の挙動を十分に理解することが必須と思われる。今後、高炉内を直接計測する技術のさらなる進展と解析モデルの高度化によって、高炉内部の現象についての理解がさらに深まることを期待したい。

Nomenclature

- $\vec{F}_j$: interaction force between j and i phase
 $(j=g, f, i=g, f, s, i \neq j)$ [$\text{N/m}^3\text{-bed}$]
 $\vec{u}_g, \vec{u}_f$: superficial velocity of gas and powder [m/s]
 P_g : gas pressure (Pa)
 ε_i : volume fraction of ' i 'th phase in packed bed
 $(i=g, f)$ [$\text{m}^3/\text{m}^3\text{-bed}$]
 ρ_i : density of ' i 'th phase ($i=g, f$) [kg/m^3]

Fig. 12 Distribution of volume fraction of four phases in blast furnace [31].

参考文献

- [1] 有山達郎、佐藤道貴、山川裕一、山田善郎、鈴木 実、鉄と鋼、80、288-293(1994).
- [2] 佐藤道貴、村井亮太、有山達郎、牧 章、下村昭夫、森 候寿、鉄と鋼、84、37-42(1998).
- [3] M.Picard, J.P.Bolsigner, A.Succurro, J.L.Eymond and G.Valdan, Rev. Metall. Cah. Inf. Tech., 22-28(2000).
- [4] T.Uchiyama, N.Ishiwata, K.Takeda and H.Itaya, Iron&steelmaking, 23, No.12, 61-65(1996).
- [5] 埜上洋、三浦隆利、古川武、鉄と鋼、78、1222-1229(1992).
- [6] 武田幹治、鉄と鋼、82、492 - 497(1996).
- [7] T.Sugiyama, S.Matsuzaki and T.Nakagawa, Proc. 6th Int. Iron Steel Congr, 19, 414-421(1990).
- [8] 一田守政、国友和也、藤原保彦、神山久朗、森實好文、CAMP-ISIJ、6、860-863(1993).
- [9] 佐藤道貴、村井亮太、有山達郎、下村昭夫、大河内 敏、森 候寿、CAMP-ISIJ、12、628-631(1999).
- [10] A.Maki, A.Sakai, N.Takagaki, K.Mori, T.Ariyama, M.Sato and R.Murai, ISIJ Int., 36, 650-657(1996).
- [11] 佐藤和明、稲田隆信、須山真一、CAMP-ISIJ、6、856-859(1993).
- [12] 稲葉晋一、八木順一郎、鉄と鋼、78、1187-1197(1992).
- [13] 岩永祐治、鉄と鋼、77、71-78(1991).
- [14] 武田幹治、石渡夏生、CAMP-ISIJ、10、123(1997).
- [15] 山口一良、鶴野建夫、山本哲也、上野浩光、今野乃光、松崎真六、鉄と鋼、82、641-646(1996).
- [16] 佐藤道貴、村井亮太、有山達郎、牧 章、下村昭夫、森 候寿、鉄と鋼、85、717-723(1999).
- [17] 山岡秀行、中野 薫、CAMP-ISIJ、10、10-13(2000).
- [18] 近森一博、北村祐一郎、小川正芳、青木秀之、三浦隆利、鉄と鋼、86、73-78(2000).
- [19] 杉山 喬、鉄と鋼、82、29-34(1996).
- [20] 一田守政、田村健二、中山岳志、汐田晴是、荒木恭一、杉崎与一、鉄と鋼、78、1132-1139(1992).
- [21] 富田幸雄、小谷 茂、高島光一、田中勝博、布村征司郎、日新製鋼技報、75、11-18(1997).
- [22] 柴田耕一朗、清水正賢、稲葉晋一、高橋礼二郎、八木順一、鉄と鋼、77、1267-1273(1991).
- [23] 山岡秀行、鉄と鋼、72、2194-2201(1986).
- [24] 高谷幸司、山岡秀行、岩永祐治、鉄と鋼、73、A1-A4(1987).
- [25] 永見晋太郎、村井達典、下田良雄、小松周作、稲田隆信、CAMP-ISIJ、6、26-29(1993).
- [26] 草壁克己、山木健之、諸岡成治、松山久義、鉄と鋼、77、1407-1412(1991).
- [27] N.Hidaka, T.Matsumoto, K.Kusakabe and S.Morooka, Korean J. Chem., Eng., 16, 852-855(1999).
- [28] J.Chen, T.Akiyama, H.Nogami and J.Yagi, ISIJ Int., 34, 133-139(1994).
- [29] J.Chen, H.Nogami, T.Akiyama, R.Takahashi and J.Yagi, Proc 1st Int. Congr. Sci. Technol. Ironmaking, Sendai, 577-582(1994).
- [30] 有山達郎、佐藤道貴、浅川幸彦、化学工学論文集、22、171-176(1996).
- [31] 日本鉄鋼協会生産技術部門製鉄部会 4 流体の移動現象研究会：高炉内における 4 流体の流動と伝熱（4 流体の移動現象研究会報告書）、204-224(1996).
- [32] J.A.de Castro, H.Nogami and J.Yagi, ISIJ Int., 40, 637-646(2000).
- [33] 松浦正博、佐藤道貴、有山達郎、光藤浩之、若井 造、石井邦彦、築地秀明、CAMP-ISIJ、6、852-855(1993).