

2

報告番号	※	第 3681号
------	---	---------

# 主論文の要旨

題名

高炉プロセスのモデル化と解析  
に関する冶金反応工学的研究

氏名 桑原 守

# 主論文の要旨

報告番号	※ <sup>乙</sup> 第	号	氏名	桑原 守
<p>コークス高炉が誕生して250年以上を経た今日においても高炉は製鉄プロセスの基幹をなしている。これは、高炉が熱効率と反応効率の両面において非常に優れた反応器であるためであるが、この優れた高炉の機能は当初は経験的に見いだされたものであった。しかし、気体・固体・液体間の多相間反応を一つの反応器で、かつ、不均一な温度場中で行わせることの工学的な意義を解明し、熱および反応効率の限界と鉄鋼需要に対応した操業の弾力性を追求し、また、炉の安定操業の技術を確立するためには高炉プロセスの理論的検討が不可欠である。本論文では、主に反応工学的な理論解析に基づいて高炉内現象を検討するとともに、定常操業下の炉内状況を推定するために開発した数学的モデルの内容および機能について詳述した。各章で得られた結論は下記の通りである。</p> <p>第1章は序論であり、数学的モデルによる高炉の操業解析の重要性および研究の背景を述べ、本研究の目的を示している。</p> <p>第2章では、高炉内ガス流れの特性を数値解析に基づいて検討している。解析に先立ち第2節では、充填層内における圧力損失式について実験的に検討し、圧縮性を考慮した充填層内の圧力損失は、高レイノルズ数領域に至るまでErgun型の式で良好に表現できることを確認し、その際、Ergun式の抵抗係数として <math>k_1 = 145</math>、<math>k_2 = 1.42</math> を得ている。第3節では、鉱石とコークスが交互に層状装入された充填層内のガス流れの基本特性を、多次元系に拡張したErgun型圧損式と連続の式に基づいた数値解析によって検討した。各半径位置で隣接2層の流通抵抗を平均化し、その抵抗が半径方向に連続的に分布するとモデル化した系での解析では、装入条件に対応した層内での抵抗分布、層頂線の傾き、および、傾斜した壁面が流れに及ぼす効果を調べている。層状装入された鉱石層とコークス層によって流通抵抗が不連続的に分布するとした実際の系では、ガスが抵抗の小さい経路を選択的に流通するために、流線のパターンは屈曲した形状となり、質量速度の分布や圧力の分布も顕著に現れるということを見いだしている。ただし、層状装入物の層内において蛇行した流線がたどる平均の半径位置は、隣接二層平均の流通抵抗が半径方向に連続的に分布していると仮定した場合の結果にほぼ一致する。また、流線や質量速度の分布は非圧縮性流れとしての解析によって妥当な評価が得られるが、圧力分布の推算には圧縮性に留意する必要があることを示している。第4節では、実炉内の充填構造を対象にした解析を行い、層頂部、シャフ</p>				

# 主論文の要旨

報告番号	※ <sup>2</sup> 第	号	氏名	桑原 守
<p>ト中間部、炉芯・軟化融着帯回り、および、レースウェイ回りの各領域がガス流れの機能面で果たす役割を検討している。</p> <p>第3章では、鉍石層とコークス層が層状装入されているシャフト内のガス流れを対象にして2つの近似解析を展開している。近似解析(Ⅰ)では、隣接二層平均の質量速度の半径方向分布を操業条件から推算することができる解析解を導出した。近似解析(Ⅱ)では、層状装入のシャフト内を流通するガスの、蛇行する流線の方位角、隣接二層間での流量分布比、各層内における流量の半径方向分布を予知するための代数式モデルを展開した。次に、近似解析(Ⅰ)と(Ⅱ)を組み合わせたモデルに基づいて、隣接二層間での見かけの安息角、充填容積、流通抵抗の差異が、層内の不均一流れに及ぼす効果を評価した。近似解析による計算結果は、連続の式と運動方程式に基づく数値解析結果と数%程度の誤差範囲内で一致した。近似解析の妥当性を検証するために、二次元充填層を用いてガス流線の可視化実験を行った。層状充填したシリカゲル粒子層内の窒素気流中に、トレーサーとして水蒸気を送入することによって可視化したが、観察結果と近似解析との間には良好な一致が認められた。なお、近似解析における計算所要時間は数値解析の場合の1/20以下となり大幅に短縮された。従って、この章で示した近似解析法は、高炉シャフト内における不均一ガス流れと装入条件との関連を検討する際に、簡便モデルとして有用と判断される。</p> <p>第4章では、高炉内装入物運動に関して通風下での冷間模型実験と理論に基づいて、以下の知見を得た。(1) 装入物運動の駆動力を与える高炉羽口先でのコークス燃焼あるいは軟化融着帯での鉍石の容積変化について、ドライアイスの昇華特性を活用して二種類の冷間実験法で模擬した。本法では従来法のような特別な粒子の排出機構やガスの気密機構が不要であり、昇華速度が送風ガスの顕熱で制御できる。(2) すべり線解析に基づいて炉芯形状の推算を行い、実験結果と比較した。理論上は、炉内の応力状態が主動か受働かで炉芯高さは大きく変化するが、実験で観察された不動炉芯は受働応力状態のものと良く一致した。(3) 装入物の速度場は、容積変化を考慮したポテンシャル流の理論によって近似的に表現できる。この理論に基づいて、シャフト内での運動について従来知られていた経験則(放射状流線に沿う均一降下)の他に、軟化融着帯の回りで流線が蛇行する現象も、物質収支を満足する条件下で表現できた。ただし、受働応力状態と</p>				

# 主論文の要旨

報告番号	乙 ※第	号	氏名	桑原 守
<p>なるシャフト下端から下方で、壁と不動炉芯間のホッパー状の領域では、粘性流による解析の方が精度の高い速度場が得られる。</p> <p>第5章では、炉頂から鉱石とコークスが交互に水平に層状装入されている高炉操業を対象にして、その定常特性を把握するために、非定常伝熱式、総括熱収支式、総括物質収支式、および、圧力損失式から構成された炉頂・溶融帯間の簡便な数学的モデルを提出している。また、高炉モデルに使用するための各反応速度について検討し、鉱石の還元速度式としては、一次反応式の適用を試みている。その結果、種々の鉱石および焼結鉱の還元過程が、ほぼ一次反応式で表わされることがわかった。次に、このモデルを使って稼働中の高炉の炉内状況を解析し、従来の実測値に近い計算結果を得ている。また、計算結果に基づいて、層状装入高炉に特有な各種プロセス変数の軸方向あるいは時間に関する振動現象について述べ、この振動が各層における反応の種類の違いと伝熱および流動状態の大きな差異に起因し、振動の幅はシャフトの上部およびシャフト底部より下方で大きいことを示した。なお、この数学的モデルは、電算機による計算所要時間が極めて短かく、炉頂ゾンデあるいはシャフトゾンデの観測情報を活用して高炉の炉頂・溶融帯間の炉況解析を行う際に有用なモデルと考えられる。</p> <p>第6章では、第5章で示した水平な装入物層を設定した層状装入モデルを拡張して、新たに炉頂・溶融帯間にわたるプロセス変数の半径方向分布を考慮した層状装入の数学的モデルを提出している。そのモデルを使用して、わが国で稼働していた大型高炉の炉内状況について数値計算を行ない、温度、ガス組成、ガスの線速度、および鉱石の還元率のような各種プロセス変数や鉱石の軟化溶融帯が半径方向でかなり顕著に変化していることを定量的に示した。炉内状況の解析結果は、従来のプローブを用いた調査結果や解体調査の結果に類似しているものと判断された。この数学的モデルによれば、操業条件と炉頂あるいはシャフト部における測定可能な情報に基づいて、実働高炉内の半径方向分布を考慮した炉内状況を比較的短時間で計算することができる。</p> <p>第7章では、高炉羽口先におけるコークス燃焼の反応モデルを展開している。羽口先燃焼帯は炉内で必要とされる還元ガスと熱の主要な供給源であるばかりでなく、炉頂と共に操業のアクションを加え得る限られた領域でもあり、炉内における装入物の降下を駆動する重要な役割を果たしている。作成したモデルは熱と</p>				

# 主論文の要旨

報告番号	※ <sup>2</sup> 第	号	氏名	桑原 守
<p>物質の微分収支に基づいており、燃焼帯の回りにおける不均一ガス流れを考慮している。このモデルを使用し、従来、燃焼帯のガス組成が測定されている実用高炉について解析を行った結果、実測値と計算値は良く一致した。数値解析結果から次のことが明らかとなった。(1) 燃焼帯の反応では、各反応抵抗を考慮する必要があり、通常、境界内拡散律速とみなすことはできない。(2) コークスの消費は、主に、燃焼帯中間部の比較的狭い領域で起こる。(3) 酸素富化送風や増湿送風を行う場合には、最高のガス温度の位置およびコークスの消費速度が最大となる位置は、ともに羽口に近づく。(4) 燃焼帯内のコークス粒子径が減少すると、コークスの消費速度が最大となる位置が羽口側へ近づく。本モデルは、所要の計算時間が短く(大型計算機で一計算例につき約1s)、羽口先燃焼状況の診断モデルとして、また、燃焼帯を組み込んだ高炉プロセスモデルの構成要素として活用できる。</p> <p>第8章では、定常操業下の高炉の炉内状況を、プロセス変数の軸および半径方向分布を考慮して解析するための総合二次元モデルを提出している。この数学的モデルは、ガスおよび装入物の運動、伝導項も考慮したガスと装入物の伝熱、および、拡散項も考慮した物質収支といった各移動過程を記述する偏微分方程式群と、一連の化学反応速度式で構成されている。本モデルの数値解析は差分法によって行ったが、大規模システムの解を安定かつ高速に得るための解法の留意点を示した。滴下帯におけるSi移行反応に関しては、Si-O-C系熱力学の考察結果に基づいて新しい機構を提案している。すなわち、炉内のSiOガスの分圧は、SiCの生成開始温度以下ではSiO<sub>2</sub>-C平衡により、また、その温度以上ではSiC-C平衡によって規定されるとし、発生したSiOガスは溶銑中の飽和炭素によって速度論的に還元されると考えている。なお、従来、高炉の解体調査結果に基づいて推定されている滴下帯内Si分布の実績値はこの機構によって説明可能である。総合二次元モデルの適用例として、微粉炭吹込み操業時の大型高炉の炉内状況を解析し、プロセス変数の分布特性およびオールコークス操業時との差異について検討している。本モデルは、プロセス変数に関する各種の検出端情報は特に必要とせず、送風条件と装入条件だけに基づいて高炉の炉内状況を解析できるため、融着帯形状を含めた炉内状況の推定モデルとして実用上も有用になると推察される。</p> <p>第9章は、結論であり、本論文で得られた成果を要約して示している。</p>				