

氏 名	すぎ 杉	やま 山	たかし 喬
授 与 学 位	工	学	博 士
学位授与年月日	昭和 56 年 4 月 8 日		
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項		
最 終 学 歴	昭和 42 年 3 月 東京理科大学理学部（第二部） 物理学科卒業		
学 位 論 文 題 目	融着充填層のガス流れと伝熱に関する研究		
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 大森 康男	東北大学教授 大谷 正康	
	東北大学教授 只木 楨力	東北大学教授 萬谷 志郎	
	東北大学助教授 八木順一郎		

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

近年、高炉各社は稼動中の高炉をそのまま水で急冷することによって凍結し、解体調査を行うことによって操業中の高炉内状況を明らかにする試みを相次いで行ってきた。その解体調査の特筆すべき成果は高炉内に融着帯と呼ばれる半溶融状態の鉄鉱石の連なりが確認されたことである。融着帯を構成する一連の融着層は大きな通気抵抗を有するため、この付近のガスは融着層間のコークスリットを通して上部へ抜ける。したがって融着帯は高炉の塊状帯へのガスの分散板としての機能を持ち、その形状が高炉全体のガス流れを大きく支配している。その結果、高炉の融着帯形状は高炉の生産性、操炉の安定性、ガスの利用効率さらには炉体の寿命にまで深く関係しひいては鉄鉱石を還元し、溶解するという一連の高炉の主要機能がこの融着帯を中心に進行するといっても過言ではない。これからの高炉操業の課題は、この融着帯を稼動中の高炉内で検知し、あるいは推定し、さらには制御することによって円滑な操業を確保することにある。

最近ではこの高炉の融着帯位置を推定する数式モデルがいくつか提案されているが、これらは融着帯の生成機構に立脚したモデルではなく、簡易推定法の域を出ていない。何よりも重要なことは、鉱石層が軟化、融着、溶け落ちする速度過程は鉱石への伝熱速度によって決められるから、

融着層の生成消滅の機構が伝熱の面から明らかにされなければならないことである。

融着層近傍の伝熱現象は融着層内の局所的なガス流れと密接に関係する。融着層近傍のコークス層と融着層のように通気抵抗が極端に異なった二層が存在する系での伝熱現象を表現するには局所的なガスの質量速度が知られなければならない。また、このガス流れを支配する融着層の空間率や通気抵抗、ひいては融着帯の形状は融着層への伝熱の結果決められるから、ガス流れと伝熱は同時に解析されなければならない。

融着層近傍のガス流れは融着層とコークス層の分布に応じた通気抵抗分布によって決められ、この各位置においてガスの二次元的流れを考慮する必要がある。一方、融着層内の伝熱の様子は融着の割合によって異なるから、これら融着現象と伝熱速度との間の基礎的な検討が必要となる。

以上の観点から、本研究の目的は、従来より個々の問題として取り扱われてきた充填層のガス流れと充填層の伝熱現象を明らかにすることを主眼においた。さらに解析に必要な融着層の通気抵抗の理論的検討、融着層の熱物性の実験的検討、高炉原料の物理性状の実験的検討を行った。解析は単なる定性的な現象把握にとどまらず、得られた結果を実炉の融着帯のシミュレーションに役立つように定量化、数式化した。

第2章 高炉融着帯に関する従来の研究

本論文の背景となる融着帯に関する研究を紹介し、本研究の必要性を記述した。

第3章 融着層におけるガス流れと伝熱に関する数式モデル

本章では融着層近傍のガス流れと伝熱の挙動を基礎的に解明するために、ガスを通し易いアルミナ球充填層の中央部にポリスチレン融着層を設置した円筒形の2重構造の充填層についての数式モデルを開発し、ガス流れと伝熱の同時解析を行った。シミュレーションモデルは流れの関数、圧力、ガス温度、固体温度の4従属変数に関する二階の偏微分方程式によって構成され、S.O.R法を用いて数値計算を行った。その結果、Ergun式の通気抵抗係数が融着層と周囲の層とを比べて f_1 で120倍、 f_2 で30倍を越えると融着層内にガスはほとんど流れ込まなくなる。融着層を加熱する機構はガスの流速分布とよく対応し、融着層の融着率が低い時にはガスが融着層をよく通過するので、主として、粒子流体間の対流伝熱により、急速に加熱されるが、融着率が高くなった場合には融着層内のガス流れは急速に減少し、ガスの主流は通気抵抗の低い周囲のアルミナ層を加熱し、融着層の加熱は融着層とアルミナ層の境界からの熱伝導によってなされる。

以上の理論解析から融着のすすんだ融着層の伝熱は融着層の有効熱伝導率が重要な役割を果たすことを明らかにした。

第4章 融着層におけるガス流れと伝熱に関する実験

本章では第3章と同一の系を実験的に再現し、この充填層に加熱ガスを流通した時の伝熱現象を明らかにした。その結果、融着層の融着率が低い場合には、融着層へもガスが流通し、高さ方向においては下部から上部へ向って温度が上昇し、半径方向には比較的均一な温度分布になるが、

融着率が高くなるにつれてまず周囲のアルミナ層が加熱され、ついで融着層が周囲からの熱伝導によってゆっくり内部に向かって加熱される。

この現象はつぎのことを意味している。すなわち、融着層の加熱は、融着率が低い場合には粒子・流体間の対流伝熱に支配されているが、融着率が増加するにつれて融着層自身の熱伝導が支配的な要因となる。この特徴は数式モデルが示した傾向とよく一致した。

測定した融着層の有効熱伝導率および管壁の総括伝熱係数を数式モデルに適用し、シミュレーション計算を行った。得られた数値解は実測した温度変化と良く一致した。これは数式モデルの妥当性を裏づけている。

第5章 高炉原料の軟化収縮挙動の数式化

本章では高炉の融着層が種々の還元率、温度、原料の種類のもとでどのような収縮率で存在し、その時の物理性状はどのように変化するかを定量的に明らかにした。

予備還元した各種塊成鉄を使って N_2 気流中で軟化収縮試験を行い、さらに得られた各種収縮率における融着試料の物性値を測定した結果以下の知見を得た。

軟化収縮曲線におよぼす還元率の影響は顕著であり、還元率が低い場合には軟化収縮曲線は相対的に低温側に移る。とくに、酸性ペレットは焼結鉄や塩基性ペレットにくらべて低温で軟化収縮する。

軟化収縮にともなって、構成粒子の収縮が顕著に起こる。その結果収縮率 $S_r = 0.5$ 近傍までは充填層（融着層）の収縮が構成粒子の収縮によってのみおこり、層の空間率を減少させる効果はほとんどないことがわかった。また、層の空間率の減少は $S_r = 0.5$ 以上で急激に起こっていることが明らかとなった。

軟化開始温度は還元率の上昇とともに上昇する。還元率が100%に近くなると、原料の相違による軟化開始温度の差は少なくなる。また、酸性ペレットは塩基性ペレットや焼結鉄にくらべて軟化開始温度は低くなっている。

つぎに軟化収縮させた試料の全測定データを用いて軟化収縮曲線を数式化し、ついで融着層の各物性値を定量的に表わすことを試みた。その結果、軟化開始温度は還元率のみの関数として表わし、収縮率は軟化開始温度の差を考慮した無次元温度に関する3次の多項式で表わすことが可能であった。

第6章 融着充填層の通気抵抗

本章では融着充填層の通気抵抗に関する研究を述べた。融着層へ適用可能なガス流れの運動方程式として従来より用いられてきたErgunの圧力損失式の適用性について論じ、さらに還元した塊成鉄を用いた融着充填層の通気抵抗の機構について考察した。

融着しない充填層の通気抵抗はErgun式に従うが、融着した場合には通気抵抗式としてErgun式を直接使用することが困難である。

しかし、実用的にはErgun式中の慣性項の係数1.75を収縮率 S_r の関数として修正すると、

Ergun式を使用することができることがわかった。

圧力損失が粒子表面と流体との摩擦抵抗によって生ずるとする理論では融着充填層の圧力損失を表わすことができない。むしろ融着によりオリフィスのように狭くなった粒子間のすき間を通る流体の収縮，膨張による抵抗として説明される。この場合，最小開口比の問題に帰着する。

収縮の効果を開口比の変化で考慮した場合の融着層の圧力損失式は

$$\frac{\Delta P}{L} = \left(\frac{1}{C_m}\right)^2 \left(\frac{1}{D_p(1-S_r)}\right) \left(\frac{\rho g u^2}{2 g_c}\right)$$

で表わされ，開口比 m は

$$m = 1 - (1 - 0.8 \epsilon_0) \frac{r^3}{1 - S_r}$$

で表わすことができる。

第7章 融着充填層の有効熱伝導率

融着のすすんだ融着層の伝熱は粒子流体間の伝熱から，熱伝導支配の伝熱に移行するから，実際には融着層の高温における有効熱伝導率が求められねばならない。そこで本章では予備還元した塊成鉱からなる融着層の高温における有効熱伝導率を測定した。構成粒子の熱伝導率は酸性ペレット，塩基性ペレットについては還元率が30%近傍，すなわち，平均化学組成でFeOになる附近で最低値をとり，金属鉄の生成とともに再び上昇する。

融着層の有効熱伝導率は低温域ではあまり収縮率の影響を受けない。これは粒子同士の接触面積が融着によってさほど増大しなかったことを意味している。また有効熱伝導率におよぼす粒子の特性の影響は基本的には構成粒子の熱伝導率，すなわち，還元率によって反映され，粒子径，原料の違いは顕著には反映されない。融着層の有効熱伝導率に最も大きな効果をもたらす因子は温度であり適用式の検討を行った結果，Kunii & Smithの理論式の輻射伝熱項に収縮の効果を加味することで本実験を説明することができた。

第8章 高炉操業への本研究結果の適用方法

最後につきの手順で本研究結果を実高炉における融着層のシミュレーションに用いることができる。

- | | |
|---------------------------|-------------------|
| (1) 原料，還元率，温度を指定条件として与える。 | (5) 融着層の通気抵抗の計算 |
| (2) 軟化開始温度の推定 | (6) 融着層の有効熱伝導率の計算 |
| (3) 収縮率の推定 | (7) 融着層近傍のガス流れの計算 |
| (4) 融着層の諸物性値の推定 | (8) 融着層の伝熱の計算 |

第9章 結 論

本章では以上に述べた本研究における主要な結果を要約した。

審査結果の要旨

一連の高炉解体調査によって融着帯の存在が確認され、融着帯が塊状帯へのガスの分散板としての機能を有し、高炉の生産性、安定性およびガス利用率と深い関係にあることが知られている。従来、融着帯の形状と位置の推定モデルが種々提案されているが、これらはいずれも簡易推定法の域を出ていない。本論文は融着帯の形成機構に立脚した推定モデルを確立するため、融着帯近傍のガス流れ、伝熱現象ならびに融着層の通気抵抗および物性の変化などについて理論的および実験的研究を行った成果をまとめたもので全編9章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、高炉融着帯に関する従来の研究を概括し、本研究の目的と意義について述べている。

第3章では、高炉融着層近傍に類似させて擬融着層とその周囲の擬コークス層の2重構造充填層におけるガス流れと伝熱の同時解析を目的とする数学的モデルをたて、その数値解析を行った結果について述べている。融着層と周囲層との通気抵抗比の変化によるガスの不均一流れの状況ならびに擬鉍石融着層の融着率の増加による対流伝熱支配より熱伝導支配への移行が定量的に明らかにされている。

第4章では、第3章において想定した系を放射伝熱の無視しうる低温のモデル実験により具現させ、独立に測定した融着層の有効熱伝導度と管壁の総括伝熱係数を用いて得た系の温度分布の計算値がその実験値と良い一致を示すことを明らかにしている。これは著者の数学的モデルの妥当性を裏付けるものである。

第5章では、鉍石融着層の通気抵抗および熱物性の定量化に必要な軟化収縮性の評価とその数式化について述べている。各種塊成鉍の軟化収縮率の温度依存性は、塊成鉍の種類、還元率および温度を指定することにより数式化できることを明らかにしている。これは実用上有益な知見である。

第6章では、融着充填層の通気抵抗の機構と通気抵抗指数の定量化について新しい理論を提唱し、鉍石融着充填層のガス圧力損失の実測によりその妥当性を立証した結果について述べている。すなわち、融着充填層の通気抵抗は流路断面積の変化による流体の圧縮、膨張により生ずるとする理論モデルにより定量的に記述できることを示している。

第7章では、種々の還元率に調製した各種塊成鉍の融着層を作成し、その高温における有効熱伝導度の測定結果とその推算式について述べている。すなわち、有効熱伝導度に影響をおよぼす主要な因子として、温度、還元率、鉍石の種類および融着層の収縮率などを指摘しており、適用式としてKuniiとSmithの理論式の放射伝熱項に収縮の効果を付加することにより実験値を精度よく表現している。

第8章では、第3章より第7章までの成果にもとづき実用高炉における融着層近傍のガス流れと伝熱のシミュレーションを行う方法と手順を提案している。

第9章は結論である。

以上要するに、本論文は高炉融着帯を推定し、制御するために必要な融着層近傍のガス流れ、伝熱機構および融着層の物性を基礎的に解明し、その高炉への適用方法につき提案したもので、金属工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。