

氏 名	く 工 藤 純 一
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 62 年 3 月 25 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項
研 究 科 , 専 攻 の 名 称	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 ( 博 士 課 程 ) 金 属 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	2 次 元 数 学 的 モ デ ル に よ る 高 炉 の 流 動 お よ び 伝 熱 現 象 の 解 析
指 導 教 官	東 北 大 学 教 授 八 木 順 一 郎
論 文 審 査 委 員	東 北 大 学 教 授 八 木 順 一 郎      東 北 大 学 教 授 大 森 康 男 東 北 大 学 教 授 菊 池 淳

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

高炉内の状況は，解体調査や直接内部測定あるいは模型実験などにより明らかにされてきているが，高炉のように大規模で複雑なシステムにおいては，いずれの方法においても同時に進行する多数の現象について十分な測定データを得ることはかなり困難である。一方，数学的モデルによるシミュレーションが発達し，実際に稼働している高炉の内部状態を理論的に予測する試みが行われているが，このような複雑な系には経済的にも時間的にも数値シミュレーションは一つの有効な手段である。従来より，高炉の解析において採用された数値計算法は主として差分法であるが，複雑な炉内構造を具体的に表現したシミュレーションを行うには，差分法ではかなりの困難を伴う。

本研究では複雑な高炉の炉内構造の具体的な表現，炉内の局所的な位置における湧出し，吸い込みの考慮，ならびに計算機の演算速度の向上と記憶容量の軽減を目的として，ガスと固体の流れの解析には有限要素法 2 次要素近似を採用し，熱移動の解析には特性曲線法を採用して，高炉のガス流れと伝熱の同時解析を行う方法の開発を試みた。

### 第 2 章 充填層内の流動の解析法

ガスの流速分布および圧力分布を求める基礎方程式として，Ergun の式をベクトル場に拡張した (1) 式を用いた。

$$-\text{grad } P = \mathbf{G}/a_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $a_0 = 1/(f_1 + f_2 | \mathbf{G} |)$  であり、微小領域内では  $a_0$  の変化が少ないと仮定した。一方、(2)式で表わされる連続の式と(1)式を組み合わせると(3)式のベクトル方程式が得られる。

$$\text{div } \mathbf{G} = Q_{gm} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$-\text{div } (a_0 \text{ grad } P) = Q_{gm} \quad \dots\dots\dots (3)$$

2次元円柱座標系で(3)式に変分原理を適用すると、汎関数として(4)が得られる。

$$X(P(r, z)) = 2\pi \int_A [(a_0/2) \{ (\frac{\partial P}{\partial r})^2 + (\frac{\partial P}{\partial z})^2 \} - Q_{gm} P] r dr dz - \int_s q_{gm} P ds \quad \dots\dots\dots (4)$$

変分原理によると、(4)式の汎関数を最小にすることと、(3)式のベクトル方程式を解くことは等価であるので、有限要素法を用いて  $X$  を最小にする関数を求める。高炉を十分小さい多数の三角形要素の集合と考える。この三角形領域において面積座標  $N_i$  を形状関数とすると、領域内の圧力  $P$  は2次要素近似では(5)式で表わされ、この式を使用すると(4)式は節点圧力  $P_i$  に関する連立1次方程式に変換することができる。

$$P = \sum_{i=1}^3 N_i (2N_i - 1) P_i + 4 (N_1 N_2 P_4 + N_2 N_3 P_5 + N_3 N_1 P_6) \quad \dots\dots\dots (5)$$

(5)式中の  $N_i (i=1 \sim 6)$  は形状関数である。各要素方程式を高炉の全領域にわたって重ね合わせると全体方程式が得られる。全体方程式をガウスの消去法を用いて解くと圧力分布が求められる。また、(5)式を微分して(1)式に代入すると流速分布が得られる。

固体の流れに関しては、ポテンシャル流れで表わされると仮定して、ガス流れと同様の手法で計算した。

### 第3章 高炉のガス流れと固体流れに関する数値解析結果

融着帯の構造を変化させた場合、炉の半径方向に粒度分布がある場合、および両者を組み合わせた場合の計算結果によると、ガスの流速分布は充填構造により異なるが、基本的には羽口から炉の中心方向へ流入したガス流れが融着帯により強制的に炉壁方向に曲げられたのちシャフト部をジグザグに上昇して層頂に達するパターンを示している。これは融着帯が炉内でガスの分配器の役割を果たしていることを意味する。炉径方向の等圧線の分布は融着帯付近を除くとほぼ水平であるのに対し、等流速線の分布はシャフト部では粒度分布に強く影響され、さらに融着帯の位置で激しく変化しており、炉内構造が流速分布に顕著な影響を与えることがわかった。半径方向に粒度分布をつけた場合と、均一粒度の場合を比べると、炉の中心部に大粒子を、炉壁側に小粒子を分布させた場合、同一充填構造においてもシャフト部で強い中心流になっており、等流速線分布は強い不均一性を示している。また、実操業では通常生じないが、V型融着帯構造を与えた場合の計算結果は操業時に生じる逆V型融着帯の場合に比べ、シャフト部で極端な中心流を示した。これらの計算結果から空

間率の分布と粒度の分布ならびに融着帯の形状がガス流れを制御する上で重要な因子であることがわかった。なお、1次要素近似と2次要素近似は基本的には同様のパターンを示すが、2次要素近似が1次要素近似よりもほぼ1桁高い数値計算精度を示した。この他に、実操業で行われている粒度別装入の場合のシミュレーションも行った。一例として、逆V型融着帯構造で粒度分布があり、湧出し、吸い込みを考慮した場合のガス流れの解析結果をFig.1～Fig.2に示す。

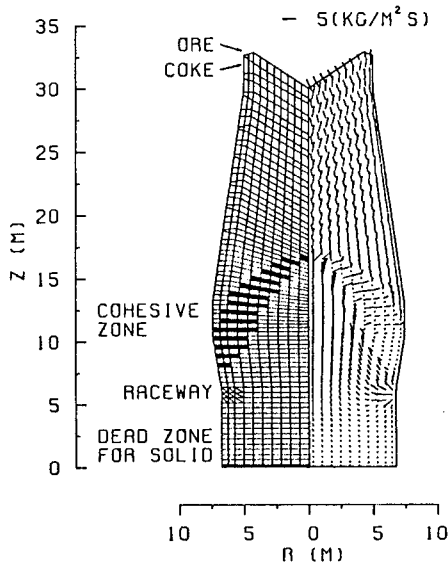


FIG.1 LAYERED STRUCTURE AND COMPUTED GAS FLOW VECTOR.

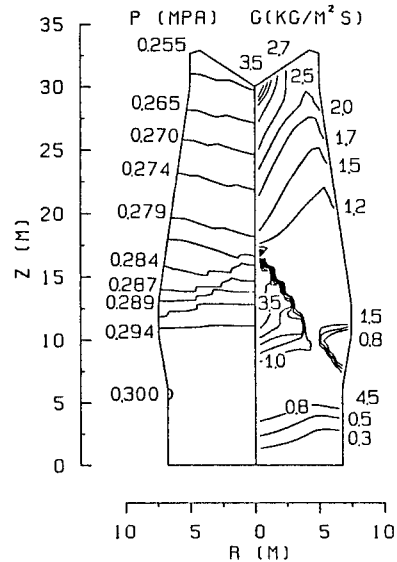


FIG.2 ISOBARS AND CONTOUR LINES OF AVERAGED MASS VELOCITY OF GAS.

#### 第4章 向流移動層における熱移動の2次元解析法

高炉内における熱的狀態を推定するためには、ガスと固体の温度分布を同時に求めなければならない。高炉内においては熱伝導による熱移動量は対流伝熱による熱移動量に比較して十分小さいので、熱伝導項を無視し、ガスと固体に関する熱収支をとり、ベクトル形で表わすと、定常状態では(6)、(7)式ようになる。

$$\nabla(C_g G_g T_g) + A h_p (T_g - T_s) - Q_g = 0 \quad \text{..... (6)}$$

$$\nabla(C_s G_s T_s) + A h_p (T_s - T_g) - Q_s = 0 \quad \text{..... (7)}$$

ただし、 $A = 6(1 - \epsilon_b) / \phi d_p$  である。

いま、(6)式のガスに関する熱収支式を2次元円柱座標系を用いて書き直すと(8)式となる。

$$(C_g + T_g \frac{\partial C_g}{\partial T_g})(G_{gr} \frac{\partial T_g}{\partial r} + G_{gz} \frac{\partial T_g}{\partial z}) + A h_p (T_g - T_s) - Q_g = 0 \quad \text{..... (8)}$$

同様にして固体の熱収支式から(9)式が得られる。

$$(C_s + T_s \frac{\partial C_s}{\partial T_s})(G_{sr} \frac{\partial T_s}{\partial r} + G_{sz} \frac{\partial T_s}{\partial z}) + Ah_p(T_s - T_g) - Q_s = 0 \quad (9)$$

ガスの熱収支式に注目すると、(8)式は(10)式のように変形できる。

$$G_{gr} \frac{\partial T_g}{\partial r} + G_{gz} \frac{\partial T_g}{\partial z} = \frac{-Ah_p(T_g - T_s) + Q_g}{C_g + T_g(\partial C_g / \partial T_g)} \quad (10)$$

ここで、(10)式を $T_g$ の全微分形(11)式と連立させる。

$$dr \frac{\partial T_g}{\partial r} + dz \frac{\partial T_g}{\partial z} = dT_g \quad (11)$$

特性曲線は $T_g$ の導関数が不定になる軌跡であるから、(12)式のように係数行列式を0とおくことにより求められる。

$$\begin{vmatrix} G_{gr} & G_{gz} \\ dr & dz \end{vmatrix} = 0 \quad (12)$$

(10)～(12)式から次の2つの常微分方程式を得る。

$$dT_g = \frac{-Ah_p(T_g - T_s) + Q_g}{\{C_g + T_g(\partial C_g / \partial T_g)\} G_{gr}} dr \quad (13)$$

$$dT_g = \frac{-Ah_p(T_g - T_s) + Q_g}{\{C_g + T_g(\partial C_g / \partial T_g)\} G_{gz}} dz \quad (14)$$

したがって、(12)式で表わされる特性曲線に沿って、(13)、(14)式を積分することによって、伝熱方程式(8)式の解が得られる。固体の熱収支についても同様に扱った。

## 第5章 高炉における流動と伝熱の同時解析結果

ガス流れと伝熱の同時解析にも前述のガス流れ計算と同じ炉内構造を使用した。実操業に近い層構造を考え、鉱石、コークスともに中心部に大粒子が装入され、周辺に近くなるにしたがって粒度が小さくなり、装入時には、層頂での装入物面のピークが炉壁から約20%内側になるような操業を行った場合のシミュレーション計算を行った結果、融着帯の上部ではガスの等質量速度線が、装入物面のピークに対応して、炉壁付近で大きく変化した。温度分布は、中心側でやや高く、炉壁側にゆくにしたがって低くなった。融着帯近傍では、ガスの流速分布および温度分布は融着帯の形状に沿っており、不均一な分布を示している。したがって、層構造の不均一性の影響がガス流れのみならず温度分布にも顕著な影響を与えていることがわかった。この同時解析によると、ガス流れは充填構造に支配され、温度分布はガスと固体の流速分布、すなわち熱流比によって基本的に支配されている状態を示している。これは、高炉操業の熱的安定性を保つ上で空間率および粒子径の半径方向分布、ならびに融着帯構造が重要であることを意味している。さらに、本研究の特徴として、実操業で行われている粒度別操業に対する層構造、湧出し、吸い込みを具体的に高炉内に位置付けて、高炉特有の不均一性を表現できたことは、有限要素法の長所であるといえる。一例として、Fig.3～Fig.4に湧出し、吸い込みがある場合のガスと固体の流線および炉内の温度分布を示す。

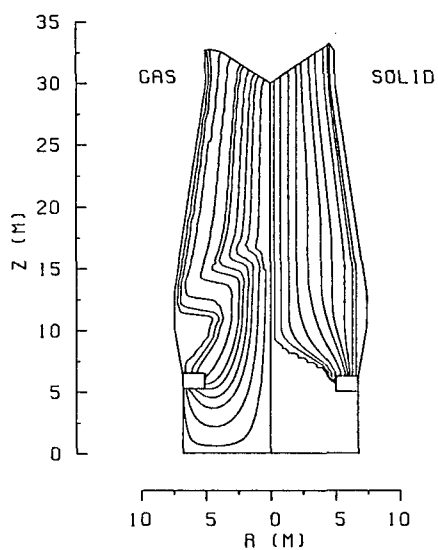


FIG.3 STREAM LINES OF GAS AND SOLID.

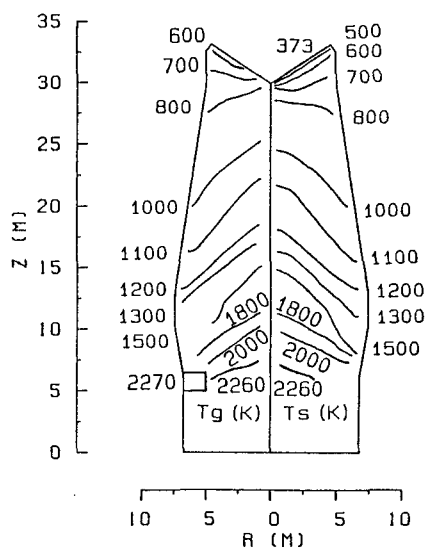


FIG.4 ISOTHERMAL LINES OF GAS AND SOLID.

## 第 6 章 結 論

この章では，本研究で開発した数値解析法およびそれを使用して行った高炉のシミュレーション結果について総括した。

## 審 査 結 果 の 要 旨

高炉のプロセスモデルは目的に応じていくつか提案され、高炉内現象の解析や操業改善に使用されてきた。しかし、これらのモデルは高炉の複雑な炉内構造を適確には表現できず、また、数値計算法も確立されていない状況であり、開発が進められている。本論文は、高炉内の流動および伝熱現象を定式化し、高炉内構造を表現できる数学的モデル、ならびに数値計算法を開発すると共に、モデルを使って高炉内現象を検討したものであり、全編6章よりなる。

第1章は緒論であり、従来の研究を概括し、本研究の意義と目的を述べている。

第2章では充填層内のガスと固体の流れが定式化されている。すなわち、ガスの運動の方程式にはErgunの式を、固体の運動の方程式にはポテンシャル流れの式を採用し、連続の式と組み合わせで導出される2階の偏微分方程式を有限要素法2次要素近似に基づき離散化している。得られた連立1次方程式を解くことにより、ガスの圧力と流速の分布、ならびに固体の流速分布が求められる。

第3章には種々の条件下でガスの圧力と流速分布を推定した結果を示している。計算結果から、ガスの圧力と流速分布は鉍石およびコークスの層状構造、融着層やレースウェイの存在等、不均一な充填層構造に強く支配されていることを明らかにしている。また、粒度別装入時のガス流れのシミュレーション計算も行い圧力損失の面から粒度別装入の利点を定量的に説明している。

第4章には向流移動層の対流熱移動を表わす基礎微分方程式に特性曲線法を適用し、ガスと固体の2次元的な温度分布を推算するための数値計算法が示されている。この方法は、化学反応や溶融等によって流量が変化する場合にも適用できる点が特徴である。

第5章では第2、4章で述べた解析法に基づき流動と伝熱の同時解析を行い、融着層の形状や層構造を変化させたケースについて、ガスと固体の流速および温度分布を推算した結果から、ガス流れは温度分布にはあまり影響されず、主として、充填構造に支配されているが、温度分布はガスと固体の流速分布に強く影響されており、流れと熱流比の不均一性が不均一温度分布の主要因であることを明らかにした。これは炉内のガス流れと熱的状态の基本的特性であり、有用な知見である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、高炉の複雑な炉内構造を適確に表現できる2次元数学的モデルならびに数値計算法を開発し、充填構造が流動、伝熱現象に及ぼす基本的特徴を明らかにしたものであり、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。