

い な だ た か の ぶ

氏 名 稲 田 隆 信

授 与 学 位 博 士 ( 工 学 )

学 位 授 与 年 月 日 平 成 15 年 3 月 24 日

学 位 授 与 の 根 拠 法 規 学 位 規 則 第 4 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 炉 内 状 態 に 基 づ く 高 炉 の 反 応 器 特 性 に 関 する 研 究

指 導 教 官 東 北 大 学 教 授 八 木 順 一 郎

論 文 審 査 委 員 主 査 東 北 大 学 教 授 八 木 順 一 郎 東 北 大 学 教 授 三 浦 隆 利

東 北 大 学 教 授 谷 口 尚 司

## 論 文 内 容 要 旨

本研究は、現代高炉の操業条件に適合した炉体形状の指針構築を目指して、高炉内状態を操業効率のみならず、操業安定性や炉体保護の面からも議論し得るシミュレーションモデル群を開発、連携させることによって、高炉反応器形状と高炉内状態および操業成績との関係を解析し、その特性を整理、考察した。本論文は以下の4章より構成される。

第1章では、まず、高炉発達の歴史の中で、高炉反応器形状の適正化が最も重要な課題であったことを示し、高炉操業と炉体形状との密接な関係を述べた。次に、高炉の炉体形状設計における既往の知見を整理した。その中で、20世紀半ばの炉体形状設計の考え方が、実績に基づく経験則で構成されていることを示すとともに、当時の設計手法は、もはや現代高炉の炉体形状設計には適用できないことを指摘した。

そして、今日に至る多くの高炉研究においても、炉体形状設計の理論的な考え方が未だ構築されていないことを述べ、本研究の目的と課題解決の方法を示した。すなわち、高炉反応器の形状は、その内部で起こる反応や物流に基づいて最適化すべきであり、適正な炉体形状を把握するためには、原燃料性状をはじめ与えられた操業条件の下で、炉内状態分布を正確に把握できることが前提条件となる。そこで、本研究は、高炉内状態の種々の側面を推定するに必要な数値解析手法の構築し、高炉反応器の形状と高炉内状態および操業成績との関係を解析し、その特性を明らかにすることによって、現代高炉の操業条件に適合した炉体形状の指針構築が目的である。

第2章では、本研究の目的を達するために必要な高炉内状態を多面的に解析するために構築した数学モデル群の内容と機能を述べた。

まず、第2.1節では、高炉の操業成績の評価、および羽口より上方領域の炉内状態を推定するための高炉3次元非定常モデルについて述べた。本モデルは高さ方向、半径方向、および円周方向の炉内状態分布を動的に解析し得る構成を有している。本モデルの数値計算上の誤差は、主要元素に関する総括物質収支に関して±0.5%以内、総括エネルギー収支については±1.5%以内に抑えられており、高炉の諸元予測に問題のない数値計算精度を有している。このことは、種々の高炉の操業成績が±5%以内の誤差で予測できること、さらに炉内状態推定結果が炉内計測データと良好に対応することによって検証された。

そして、円周方向送風偏差を想定した3次元炉内状態分布推定に対する機能検証、さらに、高炉火入れ操業および休風操業のシミュレーションと実績との比較から、非定常な炉内状態変化に対する予測精度も充分であることが検証された。

第2.2節では、従来に例のない高炉内充填層の応力場を推定する数学モデルの開発について述べた。本モデルは高炉内充填層を弾塑性体としてモデル化し、粉粒体の降伏条件として一般的に使用されるMohr-Coulombの式に相当するDrucker-Pragerの降伏条件式を適用している。支配方程式は有限要素法を用いて非定常的に解くようにした。

一方、本モデル化の妥当性を検証するために冷間縮尺模型実験を実施した。実験より知見された炉内充填層から炉壁および底面に加わる応力の特徴は、次の通りである。①応力は固定層状態と移動層状態とで様相を異にする。②固定層状態では、底部垂直応力は半径方向に概ね一様な分布を示すが、③移動層状態では、底部垂直応力の半径方向分布は中心で高い凸型を呈する。④移動層状態では、壁面垂直応力の高さ方向分布はベリーないしボッシュ部でピークを示す。⑤移動層状態で送風を行うと、底部垂直応力および壁面垂直応力のピーク値は共に減少する。

そして、本モデルで上記模型実験のシミュレーションを行い実測値と対比した結果、弾塑性理論に基づく本モデルは、上記①～④に示す特徴を定量的に再現しており、移動層状態のみならず固定層状態にある充填層の応力場を推定するに十分な精度を持つこと、さらに、⑤に示す送風状態下における応力場もガス圧損に相当する浮上力を外力として考慮に入れることによって推定できることが把握された。

その上で、実高炉の応力場の特徴を推定した。その結果、①炉下部中心近傍に強い鉛直応力場が形成され、最大応力値は約240kPaに達すること、②融着帯には最大値で概ね100kPa程度の鉛直応力が作用している推定され、現在の荷重収縮特性評価に用いられている応力条件  $1 \text{ kgf/cm}^2 (=98\text{kPa})$  は実炉条件に見合った妥当な値であること、③炉内は概ね主動状態(鉛直応力 > 水平応力)にあるが、下部炉壁近傍は受働状態にあること、④シャフト下部からボッシュ上部にかけて弾性状態の領域が存在するが、シャフト上部および炉芯をも含めた炉下部は塑性状態にあることを示した。

さらに、過去に例のない実高炉における応力場計測を高炉の充填・火入れ時に実施した。羽口レベルの半径方向に配置した計測端の鉛直方向応力値は、充填が進行すると共に増加し、炉中心部が多少高い概ね平坦な分布を示すが、火入れ後荷下がりが生ずると、炉中心部の応力は急激に増加する挙動が捉えられた。この挙動は模型実験結果とも合致しており、併せて、同過程をシミュレートしたモデル推定値が実測データ推移を良好に再現できていることも確認し、本モデル構成の妥当性および推定精度が実用に耐えることを示した。

第2.3節では、高炉炉底部の溶銑流動・伝熱および耐火物損耗を非定常的に推定する数学モデルについて述べた。本モデルの特徴は、流動・伝熱解析から得られる温度分布を基に炉底耐火物の溶損判定を行い、残存耐火物形状を逐次更新することによって、炉底耐火物の熱平衡浸食形状を推定する点にある。炉内容積および炉底耐火物配材の相異なる高炉の炉底解体調査結果を用いてモデル推定精度を検証した結果、炉底耐火物の浸食形状を良好に再現できていること、実用に足る精度を有することを確認した。

そして、ケーススタディーを行って炉底耐火物損耗に影響を及ぼす因子を調べ、出銑量、コークフリー層の存在形態や炉底コークス充填層の通液性、さらに、炉底耐火物の熱伝導度は考慮すべき因子であることを示した。

さらに、本モデルを用いて、実炉におけるトレーサー応答試験データに基づき炉底状態推定と炉底熱負荷との関連を解析した。その結果、炉底内には溶銑通液性の著しく悪い層が存在し得ること、そして、この層の存在と炉底熱負荷とは密接な関連があることを示した。

第3章では、これら高炉内状態推定モデルを連携させることで、本研究の主題である高炉炉体形状の操業に及ぼす影響を評価した。

第3.1節では、まず、最近30年に亘るわが国高炉の炉体形状の特徴を炉内容積に関して整理した。これに見られる特徴は、①炉内容積の拡大に伴って炉内径は単調に増加しているが、炉高(羽口～層頂)は、2000m<sup>3</sup>付近までは炉内容積の増加と連動しているものの、2000m<sup>3</sup>を越えると炉高の増加は飽和しており、炉高に占めるシャフト、ポツシュの比率もほぼ一定値で目立った変化は見られない。②炉内容積の拡大に伴って炉内径の変化は炉床径、炉腹径に比較して炉口径の拡大率が小さく、シャフト角も減少傾向を示す。③羽口から出鉄口間距離も炉内容積の拡大に伴って単調に増加する。このような傾向に関して、各炉データは強い相関性を示し、一本の曲線で近似できる。

これを前提に置き、最近の代表的な高炉操業条件を与えて、高炉炉容積の影響を操業効率、ガス抜け安定性、さらに炉底浸食の観点からの評価した。評価の手順は、次の通りである。

①操業条件と炉体形状を高炉3次元モデルに入力し、羽口より上部の炉内状態と操業成績(出鉄量、燃料比、炉内圧損など)を評価する。そして、ガス静圧分布と炉内充填物の嵩密度分布は充填層内応力推定モデルの入力データとして、また、溶鉄の生成量と温度の半径方向分布は炉底溶鉄流れ・レンガ浸食モデルの境界条件データとなる。②充填層内応力推定モデルで炉内充填層の応力場が計算され、ガス静圧分布データを組み合わせることで、ガス抜け危険度の尺度が計算される。また、羽口レベルでの鉛直応力の半径方向分布データから計算される炉底部溶鉄層へのコークス層の沈下レベルは、炉底溶鉄流れ・レンガ浸食モデルの入力データとなる。③最後に、溶鉄流れ・レンガ浸食モデルは上記入力データを基に、炉底煉瓦の熱平衡浸食形状を計算する。そして、高炉炉容積の影響に関し、以下の知見を得た。

①炉内圧損は炉内容積を拡大に伴って増加傾向を示す。これは、大型化に伴ってシャフト角が減少するために、炉上部ガス流速が大型高炉ほど増加することが主に原因している。②大型高炉ほど、炉下部において原料に作用する力学的負荷が増大する。③熱損失原単位は炉内容積の増加に対して減少し、大型高炉の方が熱効率的な面で有利であるが、燃料比を指標にするとその効果は大きくない。④大型高炉ほど炉内圧損は大きくなる一方、シャフト角が減少するために周辺部充填層の鉛直応力が低下し、周辺部ガス抜け律速で評価される出鉄比上限は低下する。さらに、⑤大型高炉ほど底部、側壁損耗が大きくなるため、損耗抑制のための操業面および耐火物配材への配慮が必要で、特に側壁保護は重要である。

第3.2節では、高炉の炉内容積を3000m<sup>3</sup>に固定して、微粉炭比200kg/pt、出鉄比2.2t/d/m<sup>3</sup>の操業を前提に置いて、炉体形状と操業指標との関連を評価した。

その結果、①炉内圧損は、炉上部形状パラメータによって整理することができ、炉口径/炉床径比にして0.8～0.7の範囲に最小値が存在するが、これには炉上部ガス流速の変化の影響が大きく作用している。②燃料比は、炉腹部を含む炉下部容積を十分に確保した炉体形状を選択することで、低くすることができる。また、③炉内応力分布に対する装入物分布パターンの影響は、炉体形状の影響に比較して2次的である。④炉上部炉壁近傍の鉛直応力はシャフト角の低下と共に減少するため、炉上部炉壁近傍でのガス抜けを回避する観点から、シャフト角は望ましくは80°以上、少なくとも78°以上は必要である。さらに、⑤ポツシュ角、ポツシュ長さは底部荷重を介してコークスの炉床沈下レベルに影響を及ぼし、沈下レベルが不適當な場合には、炉底部の損耗を助長する危険がある。などの知見を得た。

第4章では、本研究を総括している。

# 論文審査結果の要旨

本研究は、現代高炉の操業条件に適合した炉体形状の指針構築を目指して、高炉内状態を操業効率のみならず、操業安定性や炉体保護の面からも評価可能なシミュレーションモデル群を開発し、それらを連携させることによって、高炉の反応器形状と炉内状態および操業成績との関係を解析し、その特性を明らかにしたもので全編4章よりなる。

第1章では、高炉炉体形状設計における既往の知見を整理するとともに、本研究の目的と解決すべき課題について述べている。

第2章では、本研究の目的を達成するために必要な高炉内状態を推定する数学モデル群の内容と機能を述べている。すなわち、羽口より上方領域の炉内状態を推定するため開発した3次元非定常モデルの構成を概説するとともに、円周方向偏差を伴う炉内状態の推定や火入れ操業のシミュレーションによりモデルの有用性を示している。弾塑性理論に基づき開発した高炉内充填層の応力場を推定する数学モデルについて、冷間縮尺模型実験および実高炉における応力場、ならびに、移動層状態と固定層状態における充填層内応力場の推定を行い十分な予測精度を持つことを検証するとともに、送風状態下における応力場も推定可能であることを示している。また、高炉炉底部の溶銑流動・伝熱および耐火物損耗を推定するため開発した炉床の数学モデルについて、実高炉炉底解体調査結果を用いて推定精度を検証し、十分な精度を有することを示した。

第3章では、第2章で述べた3種の高炉内状態推定モデルを連携させ、炉体形状の操業に及ぼす影響を評価した。すなわち、高炉の炉体形状の特徴を炉内容積に関して整理し、炉容積の影響を操業効率、操業安定性、炉底浸食の観点から評価した結果、全圧損は炉容積の拡大に伴って増加傾向を示すこと、大型高炉ほどガス抜けに対する安定性が低下すること、また、大型高炉ほど炉底部の側壁損耗が大きくなることを見出している。

高炉の炉内容積を固定して炉体形状と操業指標との関連を解析した結果、全圧損を最小にする炉口径／炉床径比が存在すること、炉腹径を充分に取った炉体形状の方が燃料比を低くできること、炉上部炉壁近傍でのガス吹き抜けを回避する観点から、シャフト角には望ましい範囲が存在すること、さらに、ボッシュ角、ボッシュ長さはコークスの炉床沈下レベルに影響を及ぼすことなどを定量的に明らかにした。

第4章は結論であり、研究全体の総括を行っている。

以上要するに本論文は、高炉の炉内状態を記述する3種の数学的モデルの開発、および、これらモデルを使用して反応器特性を評価することによって、高炉の性能および寿命を改善するために必要な反応器形状設計に関する有益な指針を得たもので、金属工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。