

氏 名	Wang 王	Jia 家	Bing 兵
授与学位	博士（工学）		
学位授与年月日	平成4年3月27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	コークス充填層型下水汚泥溶融炉のモデル解析と シミュレーション		
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 菊池 淳	東北大学教授 三浦 隆利

論文内容要旨

現代社会においては人為活動の活発化と人口の都市集中化に伴い廃棄物が増大しており、環境保全のため工業的処理が必要となってきている。その一つとして、下水汚泥の処理が注目されている。この下水汚泥を処理するためのプロセスは種々開発されており、一つは、脱水ケーキの形あるいはそれを各種の焼却法により焼却して残る焼却灰の形で埋立地に投棄する方法が、現在下水場で多く採用されている。しかし、埋立地の用地確保が困難になってきている一方、焼却に使用されている石油系の燃料の高騰により、処分費用が増加の傾向にあり、省エネおよび資源利用の観点から他の方法の実用化が進められている。その中に特に有望と思われるプロセスはコークス充填層型汚泥溶融プロセスである。現在、汚泥溶融炉は実機が稼働を開始しているが、種々の解決しなければならない点が残されており、基礎的な研究が必要である。ここでは移動現象論に基づくプロセスモデルの研究を試みた。

汚泥溶融炉充填層の中では高温状態で3相（ガス、固体および融体）の流れ、熱の移動、物質移動、化学反応などの諸現象が複雑に生じており、これら炉内現象を解明し、操業効率を改善するために気・液・固体3相充填層に関する移動現象論的研究ならびに数学的モデルを確立するため充填層内流れと伝熱に関する基礎的研究を行った。冷間充填層模型実験装置を製作し、ガス流れ、固体流れ、液体流れを表現する基礎式の妥当性をそれぞれ検討した。さらに、溶融を伴う充填層内の流れと伝熱の基礎式を検証するため、擬熱間充填層模型実験を行い、モデルの妥当性について調べた。

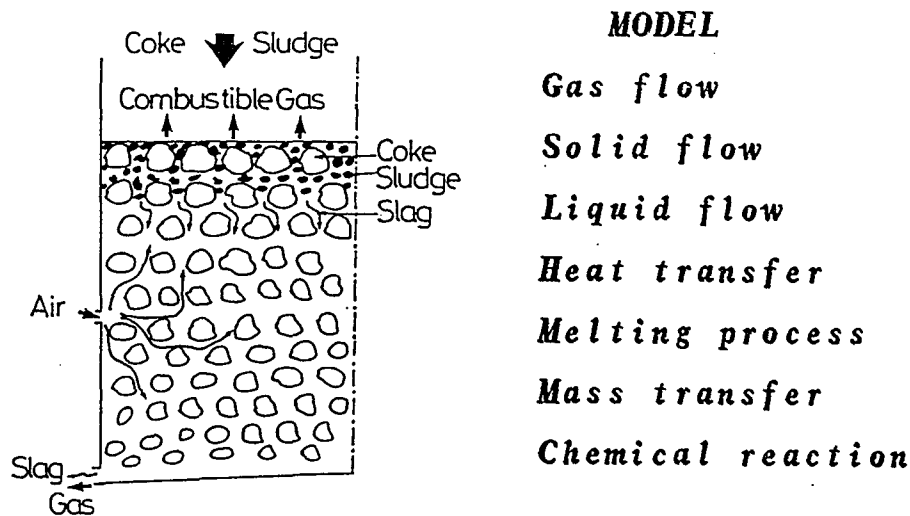


Fig. 1 Total model construction of a sludge melting furnace

これらの冷間および擬熱間模型実験から下水汚泥溶融炉を解析するために必要なガス流れ，固体流れ，液体流れ，伝熱に関する妥当な基礎方程式を定めた。Fig. 1 に示した数学的モデルを用い，汚泥溶融炉充填層内の流動，伝熱，物質移動を同時に解析した。数値解析法には，複雑な形状に対処できる Body-fitted Coordinate (BFC) 法を用い，SIMPLE 差分法を採用した。解析結果から汚泥溶融炉充填層の設計，操業に役立つ指針が得られた。

以下に本論文の内容を要約する。

第 1 章 緒 論

従来の研究をまとめ，本研究の目的と論文の構成について説明する。

第 2 章 充填層におけるガス流れ

汚泥溶融炉充填層におけるガス流れの基礎式を確認するため，ガス流れの基礎研究を行った。充填層内ガス流れには移流項を含む多次元化した Ergun 式を適用し，充填層の上部に多段ガス導入口を有するフリーボードが存在する場合のガス流れを検討するため，フリーボードには乱流 $k-\epsilon$ 2 方程式モデルを適用した。2，3 次元直交座標系および円柱座標系におけるガス流れの数学的モデルを開発した。さらに，複雑な形状を有する下水汚泥溶融炉内の流動現象を解析するため，有限差分法に基づく SIMPLE 法を拡張し，一般曲線座標系による 2 次元および 3 次元ガス流れの数学的モデルを構築した。この BFC 法は任意な形状を有する物理的な空間を直交差分格子で表された計算領域に変換する方法である。この方法を用いると Fig. 2 に示す写像平面（計算平面）上の正方格子点は実平面上の曲線座標格子に 1 対 1 に対応付けられるように格子を生成させることができ，任意形状の物体の外周に沿った格子点を発生させることができる。差分法に BFC 法を適用すると直交座標系あるいは円柱座標系で表される複雑な形状の領域を取り扱う場合の困難さを取り除くこ

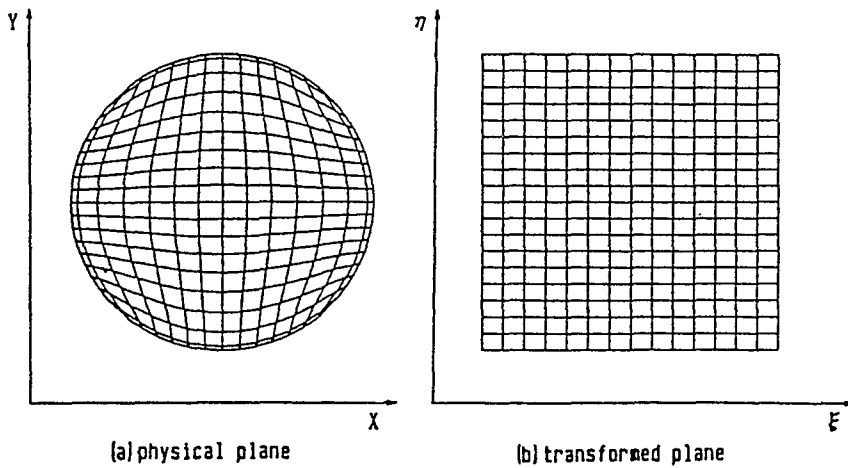


Fig. 2 Schematic diagram of grid transformation

とができる。この一般曲線座標系によるモデルを使って汚泥溶融炉充填層とフリーボード内のガス流れの解析を行った。一方、数学的モデルを検証するため、2、3次元冷間模型実験を行った。

結果として①充填層におけるガス流れの基礎式について移流項の効果を明確にし、充填層内でガスの流線が急激に変化する部分ではErgun式に移流項を加える必要がある。②フリーボードを考慮する場合、充填層の層頂で境界条件として通常よく使用される等圧条件は成立しない場合がある。③ガス流れに関する2、3次元充填層実験から得られた層内圧力と層頂ガス流速分布は数値計算により得られた計算値と良い一致を示したので、数値解析の妥当性が検証された。④汚泥溶融炉のように複雑な形状を有する装置内のガス流れの計算に一般曲線座標系を適用し、差分法による数値解析法を使用することが有効である。⑤汚泥溶融炉内ガス流れに関する2次元の解析結果は3次元の結果と比べ基本的なガス流れ特性は類似しているが、円周方向流れを無視したことにより、ガス導入口付近の流れ状態に相違が見られる。3次元解析が重要であることを示した。

第3章 充填層における粒子の運動

充填層型下水汚泥溶融炉ではコークスの燃焼とソリューション・ロス反応、汚泥の熱分解と溶融などによる固体粒子の降下挙動を解明するため、従来提案された固体流れの基礎式の汚泥溶融炉への適用性を検討した。2次元冷間移動層実験装置を製作し、基礎的なモデル検証実験を行い、計算値と実験値を比較した。その結果、汚泥溶融炉の解析にはポテンシャル流れは不適當であり、kinematicモデルがより妥当であることがわかった。

第4章 充填層における気液向流流れのシミュレーション

汚泥溶融炉充填層における溶融スラグの流動現象を解明するため、確率モデルと連続体モデルを組み合わせた液流れの新しい解析方法を提案した。すなわち、充填層内のガス流れの基礎式として、多次元化したErgun式を用い、液流れについては、ガス流れとの相互作用を考慮した確率モデルに

より融体の流動領域を求め、この領域内では連続体モデルにより融体の流れ場を解析する方法である。この解析法を検証するため、冷間2次元充填層模型実験装置を製作し、気液向流流れの基礎実験を行った。実験値を2次元数値解析の結果と比較することによりその妥当性を検討した。その結果、①充填層内液体流量が小さい場合、従来よく行われた不連続に分布している液体を連続体と仮定することは妥当であるとはいえないことがわかった。②確率モデルによって液体の流れ領域を定め、この領域内で連続体モデルを使い液体の流れ場を解析する方法の妥当性が証明された。③従来の方法では求められなかった液体のドライゾーンも求めることができるようにし、充填層内のガスと液体の流れをより精度よく推算できる数学的モデルを開発した。

第5章 溶融を伴う気・液・固体の3相共存充填層における流れと伝熱

汚泥の溶融、滴下を伴う充填層内の流れと伝熱現象を解明するため、パラフィンを使った擬熱間充填層液流れ模型実験を行い、層内の温度、圧力分布の測定を行うとともに、易融性固体の溶融、滴下挙動、3相間の伝熱などを考慮した数学的モデルを開発した。ガス流れには移流項を考慮した多次元Ergun式を適用し、液体流れには、上述した確率モデルおよび連続体モデルを併用した解析法を適用した。一般曲線座標系を用い、充填層内の気・液体の流動および層内の温度分布の数値解析を行った。モデルにより、充填層ガス導入口付近における融体のドライゾーンの形状を推定した。層内ガス流れは温度分布に強く影響することがわかった。得られた実験結果と数学的モデルによる計算値はよく一致したのでこの数学的モデルにより汚泥溶融炉の特性を解析することが可能であると判断した。

第6章 数学的モデルによる汚泥溶融炉内の流動、伝熱、反応現象の数値解析

汚泥溶融炉充填層の中では高温状態で気・液・固体3相の流動、熱移動、物質移動、化学反応な

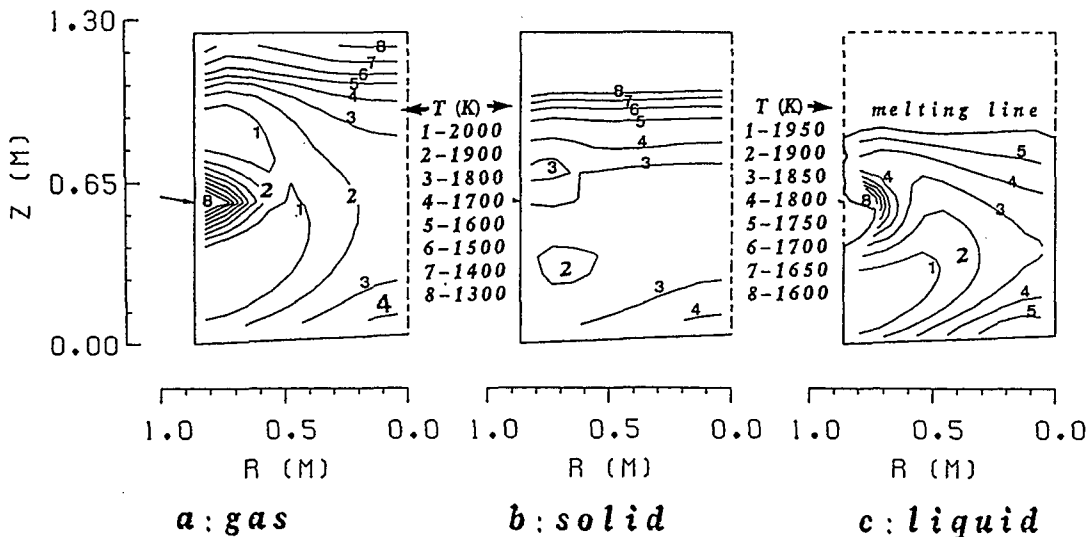


Fig. 3 Predicted isotherms of gas, solid and liquid in a sludge melting furnace

どの諸現象が複雑に伴っており、複雑な炉内現象を解明するため、第5章で述べた流れと伝熱のモデルに汚泥溶融炉充填層における反応、溶融、物質移動モデルを組み込み、一般曲線座標系による汚泥溶融炉充填層の2次元トータル数学的モデルを開発した。複雑な炉内現象については、例えば、ガスの流れ、反応や溶融による固体粒子の降下速度、溶融スラグの滴下速度、3相の温度、ガス濃度、反応速度などの変数分布を求めた。Fig. 3 に示した解析結果の一例から数学的モデルは炉内の複雑な現象を解明し実用性の高いものであることを示した。

第7章 結 論

本研究では、下水汚泥溶融炉の最適操業条件に関する情報を得るため、汚泥溶融炉充填層内の流動、伝熱、反応を同時解析できる数学的モデルを開発した。一方、冷間および擬熱間充填層模型実験装置を作製し、実験による数学的モデルの妥当性について検討した結果、数学的モデルは炉内現象をかなりの精度で表現できることを確認した。このことから、本研究における数学的モデルは実操業における操作条件の検討並びに新しいプロセスの設計に有用であると結論できる。複雑な形状を持つ装置内の現象を解明するため、一般曲線座標系による数学的モデルを開発し、汚泥溶融炉内の流動、伝熱、反応の同時解析を行った。今後、実プロセスへの数学的モデルの活用が期待されている。

審査結果の要旨

下水汚泥の溶融処理は減容化率が大きく無害化できるので汚泥を問題無く廃棄できるようにするのみならず路盤材としての利用も可能にする。本研究はコークス充填層型の汚泥溶融炉の炉内状況を解析し、操業の最適化を図るため、ガス流れ、固体の降下、伝熱および固体の溶融を伴う液体流れ等について模型実験を行うとともに、性能評価を可能にする数学的モデルを開発したものであり、全編7章より成る。

第1章は緒論であり、従来の研究をまとめ、本論文の目的と構成を述べている。

第2章では下水汚泥溶融炉のガス流れ特性を検討するため、充填層内ガス流れには移流項を含む多次元化した Ergun 式、充填層の上部にあるフリーボード内のガス流れには乱流 $k-\epsilon$ 2 方程式モデルを適用し、2次元および3次元の数値解析を行っている。一方、2、3次元冷間模型実験を行い、得られた圧力分布と充填層出口における流速分布を計算値と比較し、よい一致を得ている。

第3章では充填層における固体流れについて、2次元冷間実験装置を作製し固体の降下挙動を測定している。その結果に基づくと、キネマティックモデルは実測値をよく説明でき、ポテンシャル流れより適切であることを見いだしている。

第4章では充填層内における液体流れの新しい解析法を提案している。すなわち、2次元冷間模型実験の結果に基づき、確率モデルにより液体の流れ領域を定め、この領域内で連続体モデルにより液体の流れ場を求める方法は実測データをよく説明できることを示している。

第5章では汚泥溶融炉充填層内における溶融、滴下を伴う流れと伝熱現象を解明するため、擬熱間充填層実験装置を作製し、易融性固体を使った実験を行い、層内温度分布および圧力分布の測定を行っている。また、溶融、流動、伝熱現象を考慮した数学的モデルを作成し、モデルによる計算結果は実験結果とよく一致することを示している。

第6章では2次元一般曲線座標系による汚泥溶融炉充填層の総合的な数学的モデルを作成し、ガスの流れ、反応と溶融による固体粒子の降下挙動、溶融スラグの滴下挙動、3相の温度分布、ガス濃度分布、反応速度などの変数の分布を推算している。これらは、汚泥溶融炉充填層の設計、高効率操業の確立のため有用な指針になっている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、汚泥溶融炉充填層における流動、伝熱、反応現象を同時に解析できる数学的モデルならびに数値解析法を提案したものであり、実操業の最適化ならびにプロセス設計に有用な情報を提供するものであり、金属工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。