

# 閉空間内流動による熱・物質移動の制御に関する研究

著者	呼 和 涛 力
号	52
学位授与番号	3968
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/37684">http://hdl.handle.net/10097/37684</a>

氏名	く け て る 呼 和 涛 力
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成20年3月25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)化学工学専攻
学位論文題目	閉空間内流動による熱・物質移動の制御に関する研究
指導教官	東北大学教授 三浦 隆利
論文審査委員	主査 東北大学教授 三浦 隆利 東北大学教授 今野 幹男 東北大学教授 阿尻 雅文

## 論文内容要旨

### 第1章 緒論

コークス製造プロセスにおいて高稼働率化、安全性の向上およびコークス炉長寿命化を図ることが緊急に求められているが、コークス押し出し時に抵抗となる炉壁付着カーボンの除去や原料炭の装入過程におけるガス発生量の把握などの問題点についてまだ改善されていない。これらの課題を解決するため、炭化室といった閉空間内における熱・物質移動現象の解明が必要である。まず、炭化室内における壁付着物の除去について、微粉炭とチャー燃焼速度に関しては発電設備の設計上、研究データが多いものの、コークス炉内の揮発分由来の付着カーボンに関してはほとんど研究されていないため、付着カーボンの反応性を明らかにする必要がある。また、カーボン燃焼除去に関する実験的手法や設計手法は経験的であり合理的ではない。そこで、速度論的解析により定式化した付着カーボン酸化反応速度式を用いて炭化室内の熱流動数値解析を行う必要がある。次に、コークス炉炭化室内における石炭装入過程は大規模であり、実験的な検討が非常に困難であるため、数値解析手法の開発が強く要望されている。既往の研究では、石炭装入後の乾留過程における石炭層の熱物性値や熱分解ガスの発生挙動およびコークス炉内の伝熱解析が多くなされているが、石炭を装入する短時間の過程における伝導伝熱、対流伝熱、ふく射伝熱および揮発分放出などを総合的に検討した研究例はほとんど見当たらない。一方、産業経済の高度な発展と生活文化の向上に伴い、人々の暮らしが豊かになるにつれ、身近な日常生活を営む室内空間をより省エネルギーかつ快適ものとする指向が強くなっている。快適な室内空間を整えるため、温度のムラを削減し、受動喫煙を防止し、省エネルギーを達成することを目的とした空調換気システムの設計が重要である。空調機器によって制御された室内閉空間における気流環境、温度環境、換気性能および汚染物質拡散挙動など、複雑な現象をコンピュータで再現する数値解析が有効である。実験は古くから行われており、室内閉空間における流れ場、温度場に関して多くの実測データが得られているものの、データ採取には膨大な時間と労力、コストがかかる。

本研究では、上記の背景のもとに、閉空間内における壁付着物の除去、閉空間内石炭堆積層および

揮発分の発生および閉空間内汚染物質濃度の制御といった課題に着目する。閉空間における付着物の除去について、速度論的解析により定式化した付着カーボン酸化反応速度式を用いて炭化室内の熱流動数値解析を行い、ランスノズルの配置が炉壁温度、燃焼ガス組成およびカーボン除去に及ぼす影響を検討し、カーボン除去効果の向上法を提案する。閉空間内石炭堆積層および揮発分の発生について、コークス炉への石炭装入過程における各現象を総合的に考慮したシミュレーションモデルを構築し、揮発分発生量を推算する。さらに、石炭種の揮発分含有量、粒子径 3 mm 以下の石炭粒子の含有率および石炭装入速度が石炭装入過程における全ガス発生量に及ぼす影響を検討する。閉空間内汚染物質濃度の制御について、新型空調換気システムにおける遊技場内の空気流動、温度および汚染物質濃度を推算可能な数学モデルを開発し、換気効率を検討する。以上により、これらにおける現象の解明を目的として、数学モデルの構築により複雑な現象を再現し、さらに新規開発プロセスのフィージビリティ・スタディに貢献することを目的とする。

## 第 2 章 コークス炉炭化室における付着カーボンの酸化反応速度の定式化

コークス炉壁に付着したカーボン除去を解析するための基礎的知見を得ることを目的として、コークス炉炭化室炉壁から採取した付着カーボンを対象に熱重量分析器を用いて空気雰囲気、異なる昇温速度において重量変化を測定し、炭素を含有する材料と反応性を比較するとともに付着カーボン燃焼反応速度の定式化を行った。炉壁付着カーボンの反応性は空隙率、結晶構造および真密度などの因子により、チャーおよびコークスなどの石炭由来の燃料より低く、炭化が進んだ黒鉛材料より高いことが分かった。また、付着カーボンの定式化において、Friedman 法により活性化エネルギーが反応率によらず一定であり、酸化反応が単一の反応機構で進行することが確認された。実験母曲線法により、反応機構モデルは核形成-成長型モデルであると仮定して定式化を行い、反応率および反応速度について、実験値と定式化した式を比較したところ良好に一致した。

## 第 3 章 コークス炉付着カーボンの燃焼除去に関する数値解析

コークス製造プロセスにおいて、稼働率向上を図ったコークス炉炭化室内付着カーボン燃焼について、流動、伝熱および燃焼反応などを考慮した数学モデルを構築し、ランス法による炉壁付着カーボン燃焼除去効果について検討を行った。その結果、ランスを挿入し、強制的に空気を吹込むランス法において、炉内流動挙動を把握した。カーボン燃焼反応について、表面化学反応と酸素の境膜内拡散の二つの過程に律速されるとした総括反応と仮定し、表面化学反応速度に第 2 章の定式化の結果を、酸素の境膜内拡散速度に Eddy-Cell モデルを用いて燃焼反応速度を推算した。これにより、付着カーボンの燃焼過程について正確な反応速度を見積もることができると考えられる。また、ランスノズル配置の変更によって炉壁付着カーボンに対する除去効果が異なる。したがって、ランスノズルの配置および燃焼空気の導入方向・速度の最適化により炉壁の目的領域の付着カーボンの燃焼除去に対する制御が可能であることが示された。

## 第 4 章 コークス炉石炭装入過程における発生ガス量に関する数値解析

コークス炉石炭装入過程におけるガスリーク防止を目的として、石炭を装入する過程における揮発分発生量を予測可能な、石炭層、落下石炭群および浮遊石炭粒子相を総合的に考慮したシミュレーション

ョンモデルを構築した。具体的には、まずコークス炉に石炭を装入した場合に石炭層の高さが上昇するが、これを石炭充填層の計算格子数を増加させる形でモデル化し、石炭層内三次元非定常伝導伝熱解析を行った。石炭装入速度を一定とし、終了後の高さを炉高の 9/10、石炭装入開始から終了までに要する時間を 90 秒、タイムステップを 0.1 秒と仮定した。次に、Six-Flux 法を用いて落下する石炭群の表面へのふく射伝熱解析を行うことで、石炭群の表面へのふく射熱流束を算出した。これにより、浮遊石炭粒子のエネルギー収支式を用いて粒子の温度を算出し揮発分発生量を推算する。計算の結果、石炭装入が終了するまで、石炭層からのガス発生量の占める割合が石炭層、落下石炭群および浮遊石炭粒子の中で最大である。また、石炭装入が終了するまで、Tar(C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)の発生速度が一番大きく、それ以外のガス種の発生速度は小さい。最後に、石炭種の揮発分含有量、装入炭の粒子径 3 mm 以下の石炭粒子の含有率および石炭装入速度を変化させたケーススタディを行うことで、これらが石炭装入過程における全ガス発生量に及ぼす影響を検討した。石炭装入過程において、石炭種の揮発分含有量および装入炭の粒子径 3 mm 以下の石炭粒子の含有率が全ガス発生量に及ぼす影響が非常に大きい。さらに石炭装入速度が大きい場合、装炭過程における全ガス発生量が小さくなるため、装炭速度を大きくすることにより、揮発分発生量を抑制し、リークガス量を最小化できることを解析的に示した。

## 第 5 章 空調換気システムに関する数値解析

閉空間内の汚染物質濃度の制御について、遊技場閉空間内の空調換気システムにおける数値解析を行い、室内の空気流動、温度分布および汚染物質の拡散過程を検討できるシミュレーション法を構築した。解析条件として、外気(OA)、エアコン(AC)、還気(RA)、給気(RA)および排気(EA)など考慮し、エアコンの物質および熱収支を満足する境界条件を設定することにより吹出し口の気流速度および温度を算出するとともに、気流分布、室内の温度分布および汚染物質濃度分布を求めた。さらに温度分布に対する浮力の影響および還気/給気(RA/SA)風量が汚染物質の拡散過程に及ぼす影響を検討した。数値解析の結果により、空調換気システムを導入した遊技場空間の空気流動挙動を把握した。また、エアコンの熱負荷を 2 kW とした温度の解析により、エアコンの吹出し口の温度が約 290 K となり、遊技ゾーンの空間温度は約 24 °C となることが分かった。還気/給気(RA/SA)の風量が大きい場合、汚染物質の発生位置における CO 濃度が小さくなる一方、通路における CO 濃度が全体に低下した。

## 第 6 章 結論

本論文の総括であり、本研究で得られた結論を示した。本論文は閉空間内流動による熱・物質移動を検討し、制御に関する指針となるデータを得ており、化学プロセス開発技術の高度化ならびに産業界の発展に寄与することが望まれる。

# 論文審査結果の要旨

コークス製造プロセスにおいて高稼働率化、安全性の向上およびコークス炉長寿命化を図ることが緊急に求められている。これらの課題を解決するため、炭化室といった閉空間内における熱・物質移動現象の解明が必要である。一方、快適な室内空間を整えるため、温度のムラを低減し、受動喫煙を防止し、省エネルギーを達成することを目的とした空調換気システムの設計が重要である。本論文は、閉空間内における壁付着物の除去、閉空間内石炭堆積層および揮発分の発生、閉空間内汚染物質濃度の制御といった課題に着目して解析を行っている。これらにおける現象の解明を目的として、数学モデルの構築により複雑な現象を再現し、さらに一連の熱・物質移動解析によって得られた知見をもとにプロセス制御に関する指針を提案している。

本論文は、この研究成果についてまとめたもので全文6章よりなる。

第1章は緒論であり、本研究の背景、研究目的、構成およびこれまでに閉空間内流動の解析に用いられる数学モデルの概要について述べている。

第2章では、コークス炉炭化室炉壁から採取した付着カーボンを対象に熱重量分析器を用いて空気雰囲気、異なる昇温速度において重量変化を測定し、炭素を含有する材料と反応性を比較するとともに付着カーボン燃焼反応速度の定式化を行っている。これにより、付着カーボンの反応性を明らかにし、コークス炉壁に付着したカーボンの燃焼除去を解析的に検討するための指針を得た。

第3章では、稼働率向上を図ったコークス炉炭化室内付着カーボン燃焼について、流動、伝熱および燃焼反応などを考慮した数学モデルを構築し、ランス法による炉壁付着カーボン燃焼除去効果について検討を行っている。カーボン燃焼反応について、表面化学反応速度を第2章の定式化の結果を、酸素の拡散速度を Eddy-Cell モデルで推算することにより付着カーボンの燃焼過程について正確な反応速度を見積もることができた。さらに、解析により得られた知見をもとにランスノズルの配置および燃焼空気の導入方向・速度の最適化により炉壁の目的領域の付着カーボンの燃焼除去に対する制御が可能であることを示すなど重要な解析法を提案した。

第4章では、コークス炉に石炭を装入する過程における揮発分発生量を予測可能な、石炭充填層、落下石炭群および浮遊石炭粒子相を総合的に考慮したシミュレーションモデルを構築し、数値解析を行っている。石炭装入過程をモデル化し、形成される石炭層の伝熱解析を行い、石炭層内温度分布を求めることで、石炭から発生する揮発分発生量を推算している。石炭装入過程において、ケーススタディを行った結果、石炭種の揮発分含有量および粒子径 3 mm 以下の石炭粒子の含有率が全ガス発生量に及ぼす影響が大きい。さらに、石炭装入速度を大きくすることにより、揮発分発生量を抑制し、リークガス量を最小化できることを解析的に示した。

第5章では、遊技場空調換気システムにおける数値解析を行い、室内の空気流動、温度分布および汚染物質濃度に関する数値解析を行っている。解析条件として、外気(OA)、エアコン(AC)、還気(RA)、給気(SA)および排気(EA)を考慮し、還気/給気(RA/SA)の風量が汚染物質の拡散過程に及ぼす影響を検討している。その結果、空調機器によって制御された室内空間における気流環境、温度環境、換気性能および汚染物質拡散挙動の把握を可能とし、受動喫煙を防止し、快適な環境を整える空調換気システムの設計のための有用な指針を明白にした。

第6章は結論であり、研究全体の総括を行っている。

以上本論文は、閉空間内流動による熱・物質移動を検討し、プロセス制御に関する指針となるデータを得ており、化学プロセス開発技術の高度化ならびに産業界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。