

学 位 論 文 題 名

モンテカルロ法による三次元任意形状閉空間の
ふく射伝熱解析

学位論文内容の要旨

従来のふく射伝熱解析は一・二次元解析が多く、また例え三次元解析であっても、その内部に物体が存在しない直方体・円筒・球等単純な形状の空間内の解析に止まっていた。これは、複雑な形状をした被加熱物が閉空間内の任意個所に複数個設置されたような、複雑な三次元系を対象としたふく射伝熱の解析法が確立されていなかったためである。

そこで本研究では、まずこれらの複雑な形状の空間を分割し、その各小区分（ゾーン）間のふく射交換係数をモンテカルロ法により求め、このふく射交換係数を用いてゾーン法により系内の温度熱流束等を求めることにした。この解析法の開発に際し、上記の空間分割法とともに、モンテカルロ法による解析の際の精度向上のための対称化演算法の提案を新たに行った。また、この解析法の妥当性の検討とその有用性の実証のため、内部に被加熱物が存在する三次元系として、ふく射冷暖房システムと工業加熱炉の2つの系を対象としてふく射伝熱解析を行い、実験結果との比較を行った。

これら2つの解析対象は、単に複雑な三次元系というだけで採用したものではなく、それぞれ下記のような工業上及び環境上の観点からもその解析が望まれているものである。すなわち、床暖房に代表されるふく射冷暖房システムは、より快適な温熱環境を形成する観点から最近注目されているが、快適さを体感する人体を室内に配置した条件で家具等の影響をも考慮して、人体各部の温冷感を予測できる最適設計法の確立が要望されている。また、二酸化炭素による地球温暖化の促進を緩和できる確実な方法は省エネルギーであるとされており、被加熱物を炉内の所定の場所に置いた条件で火炎や燃焼ガスのふく射性質の分布を考慮にいれて、一層の熱効率向上を目的とした新規な発想に基づく加熱炉の構成について、合理的な性能予測ができる解析技術が望まれている。

本研究は、以上に述べたように、複雑な三次元形状閉空間内でのふく射伝熱の解析法を開発し、その妥当性の実証のため、室内に置かれた家具等の存在を考慮に入れた条件での人体と室内空間とのふく射相互作用の解析、および火炎や燃焼ガスのふく射性質に分布がある加熱炉内に設置さ

れた被加熱物への伝熱解析をすることを研究の目的として論じたものであって、以下の5章より構成されている。

第1章はまえがきであり、室内温熱環境の予測や加熱炉の性能解析に関して、これまで行われた研究の概要と問題点について触れるとともに、本研究の必要性和目的および研究範囲、ならびに本論文の概要について述べている。

第2章では、三次元任意形状閉空間を対象とし、その内部に遮蔽物体が設置されている複雑な系のふく射伝熱解析を行う上で必要なふく射交換係数および閉空間内のエネルギーバランス式の導出について述べている。まず、閉空間を黒体と仮定して、任意個所に設置された物体を表す空間座標とこの物体の各面を示す面指標を用いて、各分割面あるいは空間の小区分（ゾーン）を系統的に指定することを提案し、モンテカルロ法を適用することにより容易に直接交換面積を求めることを示した。モンテカルロ法で算出された直接交換面積は、光子の挙動を確率的に模擬するためのふく射束の数が十分に多くない場合には大きな誤差を生じうるが、各ゾーンにおける相互関係と総和関係を満足させるために、ふく射束が到達するゾーンが固体面の場合はその面積、ガス体の場合はその体積と吸収係数の積を用いて重み付け平均をとる対称化演算を実行することにより、精度が著しく向上することを見出した。直接交換面積から灰色閉空間のふく射交換係数である全交換面積への交換は、各面におけるふく射平衡をとって射度の概念を適用することにより容易に行えることを示した。以上のようにして求められた全交換面積を用いて閉空間内のふく射伝熱の授受を表すことができ、対流伝熱、流れによるエンタルピー輸送、熱発生、熱伝導等を考慮にいったエネルギーバランス式を導き、その解法について説明している。

第3章では、第2章で述べたふく射伝熱解析法の応用として、人体や家具等が置かれた実際の室内空間を対象とした温熱環境の解析について述べている。まず、床暖房が設備された事務所ビルの会議室内に椅座姿勢の人体モデルを配置し、その周りの温熱環境を、外気に接する窓と壁の構造が非断熱仕様の場合と複層ガラスの採用等による断熱仕様の場合について解析した。非断熱仕様の場合は、窓面に近い着席位置ほど冷ふく射のために窓に向き合う人体部位からの放熱量が増加してふく射環境が悪化するが、断熱仕様の場合はこれを大幅に改善できることを定量的に明らかにした。ここでは任意姿勢に対応可能で着衣量と皮膚温度が設定でき、さらに必要に応じて部位ごとに分割可能な人体モデルを提案し、ふく射環境の評価に用いている。ついで、解析法の妥当性を検証するために、天井面を加熱しかつ窓に相当する面を冷却したふく射実験室を作成し、その中に机と椅座姿勢の人体モデルを設置して、各部位の面ふく射温度を測定し解析結果と比べ互いに良く一致することを確認した。

第4章では、第2章で述べたふく射伝熱解析法の応用として、火炎や燃焼ガスなどのふく射性ガスが存在する加熱炉の伝熱解析について述べている。伝熱計算を行う際に必要となる速度分布と熱発生量分布は、別途流体計算により求めることとした。まず炉内のガス温度を一定と仮定した流体計算から開始し、引き続き行われるふく射を含む伝熱計算の解として得られる温度分布を次のステップの入力値とした。流体計算と伝熱計算を同時に満足する収束解を得るのに必要な繰り返し数は数回で十分であった。炉床上0.1mに被加熱物としての鋼材を設置した加熱炉を対象として伝熱解析を行い、被加熱物への伝熱量は鋼材の表面が鋼材自身が火炎を遮蔽する裏面に比べて10倍程度となり、熱流束分布は表面では火炎温度との、裏面では炉床表面温度との相関が認められた。ついで、連続式加熱炉に適用し、炉内温度分布、鋼材ビレットの昇温特性を実操業時に測定するとともに、操業時と同じ条件で解析を行い、実測値と解析値との一致は実用上十分であることを確かめ、本研究による解析法の妥当性を検証することができた。

第5章は結論であり、本研究において得られた結果を総括して述べている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	谷口	博
副査	教授	伊藤	猷一
副査	教授	石黒	亮二
副査	教授	三好	克彦
副査	教授	落藤	澄
副査	助教授	工藤	一彦

本研究はモンテカルロ法を用いて複雑な形状をした三次元閉空間内でのふく射伝熱を精度良く解析する方法を開発し、この解析法の妥当性の検討とその有用性の実証のため、内部に被加熱物が存在する三次元系として、ふく射冷暖房システムと工業加熱炉の2つの系を対象としてふく射伝熱解析を行い、実験結果との比較を行ったものであり、以下の5章より構成されている。

第1章はまえがきであり、室内温熱環境の予測や加熱炉の性能解析に関して、これまで行われた研究の概要と問題点について触れるとともに、本研究の必要性和目的および研究範囲、ならびに本論文の概要について述べている。

第2章では、三次元任意形状閉空間を対象とし、その内部に遮蔽物体が設置されている複雑な系のふく射伝熱解析を行う上で必要な、ふく射交換係数および閉空間内のエネルギーバランス式の導出について述べている。まず閉空間を黒体と仮定し、任意個所に設置された物体を表す空間座標とこの物体の各面を示す面指標を用い、各分割面あるいは空間の小区分（ゾーン）を系統的に指定することを提案している。つぎにモンテカルロ法による確率的な誤差は、各ゾーンの相互関係と総和関係を満たすような対称化演算により大きく減少し、精度が著しく向上することを示している。また直接交換面積から灰色閉空間のふく射交換係数である全交換面積への変換は、各面でのふく射平衡をとった射度の概念の適用により容易に行えることを示している。以上のようにして求められた全交換面積を用いると、閉空間内のふく射伝熱の授受を表すことができ、これに対流伝熱、流れによるエンタルピー輸送、熱発生、熱伝導等の項を加えることによりエネルギーバランス式を導出し、その解放について説明している。

第3章では、第2章で述べたふく射伝熱解析法の応用として、人体や家具が置かれた実際の室内空間を対象とした温熱環境の解析について述べている。まず、床暖房が設備された事務所ビルの会議室内に椅座姿勢の人体モデルを配置し、その周りの温熱環境を、外気に接する窓と壁の構造が非断熱仕様の場合と複層ガラス等による断熱仕様の場合について解析している。ここでは任意姿勢に対応可能で着衣量と皮膚温度が設定でき、さらに必要に応じて部位ごとに分割可能な人体モデルを提案し、ふく射環境の評価に用いている。ついで、解析法の妥当性を検証するために、天井面を加熱しかつ窓に相当する面を冷却したふく射実験室を作成し、その中に机と椅座姿勢の人体モデルを設置して、各部位の面ふく射温度を測定し解析結果と比べ互いに良く一致することを確かめている。

第4章では、第2章で述べたふく射伝熱解析法の応用として、火炎や燃焼ガスなどのふく射性ガスが存在する加熱炉の伝熱解析について述べている。伝熱計算を行う際に必要となる速度分布と熱発生量分布は別途流体計算により求めることとしている。解析はまず炉内のガス温度を一定と仮定した流体計算から始め、続いて行われるふく射を含む伝熱計算の解として得られる温度分布を次のステップの入力値とし、これを繰り返すことにより行っている。下記の解析の結果、流体計算と伝熱計算を同時に満足する収束解を得るのに必要な繰り返し数は数回で十分であることを示している。解析では炉床上0.1mに被加熱物としての鋼材を設置した加熱炉を対象とし、被加熱物への伝熱量は鋼材の表面が鋼材自身が火炎を遮蔽する裏面を比べて10倍程度となり、熱流束分布は表面では火炎温度との、裏面では炉床表面温度との相関が認められることを示している。ついで連続式加熱炉にこの解析法を適用し、操業時と同じ条件で解析を行い、炉内温度分布と鋼材ピレットの昇温特性が実測値と実用上十分な精度で一致していることを確認し、本研究による、

解析法の妥当性を検証している。

第5章は結論であり，本研究において得られた結果を総括して述べている。

これを要するに，著者は，複雑な三次元形状空間のふく射伝熱解析を行うための効果的な方法に関し熱工学上有益な多くの知見を得，さらに居室内の温熱環境や加熱炉の伝熱解析を実際的な条件で実施可能な実用的解析法を開発しており，建築環境工学および伝熱工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。