

学位論文題名

Development of Analytical Method for
Combined Radiation-Convection Heat
Transfer in Arbitrary Shaped Domain

(任意形状系における放射・対流共存伝熱解析法に関する研究)

学位論文内容の要旨

従来放射エネルギーを射出・吸収するような気体を含む系での放射・対流共存伝熱解析については、このような気体中での放射エネルギーの輸送方程式が複雑な微積分方程式となるため、これを各種の解法によって解く際には、各座標軸方向に等間隔に分割して得られる要素を用いて数値解析を行わざるを得なかった。これら等間隔で規則的な要素分割によっても、ある程度の任意形状系の取り扱いが可能であるが、任意の自由曲線あるいは曲面をこれで模擬しようとすると、要素分割の間隔を極端に小さくする必要があり、数値解析に必要な計算時間と記憶容量が大幅に増加し、実質上不可能であった。

本論文では、このような規則分割要素では取り扱いが困難な任意形状をした系における放射・対流共存伝熱解析法の確立を目的とし、この解析に有限要素法で用いられているような任意形状要素の導入を図ったもので、二次元の場合には三角形要素、三次元の場合には四面体要素を用いて、任意形状の系に柔軟に対応しうる放射・対流共存伝熱解析法の開発と、その誤差の検討を行った。以下に各章の要約を示す。

第1章では、緒言として本研究の背景および目的を明らかにし、本研究に関連した従来からの研究についてとりまとめ、本論文の概要を示した。

第2章では、放射伝熱に関する基礎事項をとりまとめて示し、また第3章以降で取り扱うモンテカルロ法による放射熱伝達解析に必要な基礎式を導出した。

第3章では、本論文で提唱する手法を二次元系について定式化し、その妥当性を確認した。

本章では、まず任意形状の系を任意の大きさ・形状の三角形要素で分割し、その中の任意の要素から射出された放射エネルギーの系内での吸収量分布を、モンテカルロ法によって求める際に必要となる幾何学計算について述べた。この部分が従来の手法にない新しく開発した部分で、任意形状系の取り扱いにとって不可欠な部分である。この部分は、要素からの射出エネルギーを分割して多数のエネルギー粒子に保有させ、これら各粒子の軌跡を、上記のような要素分割をした系の中で、放射エネルギー伝搬の物理法則にしたがうように決定することからなる。

次に、精度がすでに確認されている従来の等分割要素による解析との比較を行うため、まっ

すぐなダクト内における放射伝熱解析を従来の長方形要素分割と本研究で実用化した三角形要素分割を用いて行い、本手法が従来の規則的な分割を行う手法と同等の解析精度を有していることを確認した。

モンテカルロ法を用いた解析の計算時間は、解析に使用する全エネルギー粒子数にほぼ比例するので、使用エネルギー粒子数は解析精度を確保できる範囲で少ない方が望ましい。したがって本章では次に、使用する全エネルギー粒子数と要素分割の大きさを変えて、結果の精度と計算時間について調べた。この結果、エネルギー粒子数に関しては、一つの要素から射出するエネルギー粒子数を30000個以上にすれば、壁面熱流束の相対誤差が4%以下程度になり、また気体温度の相対誤差はこれよりはるかに少なくなり、実用上問題ないことが示された。また分割要素サイズに関しては、系全体で射出するエネルギー粒子数が同じであれば、分割要素サイズにかかわらず、壁面熱流束と気体中温度の分布はほぼ等しくなることが示された。

最後に本手法の有用性を示すため、90度円弧状の曲管部の両端に直線状ダクトが接続された二次元曲がりダクトを対象として、壁面熱流束分布（壁温一定条件）、壁面温度分布（断熱壁条件）、内部の気体中温度分布および、このダクトの一方の入り口から入射し、他方の出口に到達する放射エネルギー量等に対するダクトの曲率半径、壁面放射率、気体の吸収係数、内部を流れる気体の流速および流れ方向の影響を調べた。この結果、ダクト長さ4m、ダクト幅600mm、気体の吸収係数 0.2m^{-1} の条件において、以下のことが示された。ダクトの曲率半径を変化させると、壁面熱流束分布と透過放射エネルギー量がその影響を大きく受ける。壁面放射率を変化させると、壁面熱流束分布が影響を大きく受ける。気体の吸収係数を変化させると、断熱壁温度分布と気体温度分布が大きく変化する。また、ダクト内の気体の流速と流れ方向を変化させると、特に流れ方向を逆転させたときに、断熱壁温度分布と気体温度分布が大きく変化する。

第4章では、本論文で提唱する手法を三次元系に適用し、その妥当性を確認した。

本章では、まず任意形状の系を任意の大きさ・形状の四面体要素で分割し、その中の任意の要素から射出された放射エネルギーの系内での吸収量分布を、モンテカルロ法によって求める際に必要となる幾何学計算について述べた。

次に、精度がすでに確認されている従来の等分割要素による解析との比較を行うため、直方体の系内での放射伝熱解析を行い、本手法の解析精度を確認した。また、本手法の最適な計算条件を調べるため、使用する全エネルギー粒子数と要素分割の大きさを変えて、結果の精度と計算時間について調べた。この結果、エネルギー粒子数に関しては二次元の場合と同様、一つの要素から射出するエネルギー粒子数を30000個以上にすれば、実用上問題ないことが示された。また分割要素サイズに関しても二次元の場合と同様、系全体で射出するエネルギー粒子数が同じであれば、分割要素サイズにかかわらず、壁面熱流束と気体中温度の分布はほぼ等しくなることが示された。したがって要素分割の細かさは、必要とする解の解像度に応じて決定すれば良く、解析精度をあげる目的で細かい要素分割をする必要のないことが示された。

最後に本手法の有用性を示すため、90度円弧状の曲管部の両端に直線状ダクトが接続された三次元の曲がりダクトを対象として、このダクトの一方の入り口から入射し、他方の出口に到達する放射エネルギーに対する壁面放射率の影響を調べ、二次元解析と同様の結果を得た。また、同じ断面形状を示す二次元ダクトと三次元ダクトに対する解析を行い、ダクト内部の気体と壁面の温度分布に大きな違いはないが、ダクトを透過する放射エネルギー量に有意な差が見られることが示された。

第5章では、結論として本研究の結果をとりまとめた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 工 藤 一 彦
副 査 教 授 伊 藤 献 一
副 査 教 授 福 迫 尚 一 郎
副 査 教 授 粥 川 尚 之

学位論文題名

Development of Analytical Method for Combined Radiation-Convection Heat Transfer in Arbitrary Shaped Domain

(任意形状系における放射・対流共存伝熱解析法に関する研究)

自由曲面で囲まれた系における放射・対流共存伝熱解析については、従来使用されてきた規則分割要素では取り扱いが困難であった。

本論文は、このような任意形状をした系における放射・対流共存伝熱解析法の確立を目的とし、この解析に有限要素法で用いられているような任意形状要素の導入を図ったもので、二次元の場合には三角形要素、三次元の場合には四面体要素を用いて、任意形状の系に柔軟に対応しうる放射・対流共存伝熱解析法の開発と、その誤差の検討を行ったものである。

本論文では提唱する手法を二次元および三次元の系について定式化し、その妥当性を確認している。このためにまず任意形状の系を任意の大きさ・形状の三角形あるいは四面体要素で分割し、その中の任意の要素から射出された放射エネルギーの系内での吸収量分布を、モンテカルロ法によって求める際に必要となる幾何学計算について述べている。この部分が従来の手法にない新しく開発した部分で、任意形状系の取り扱いにとって不可欠な部分である。この部分は、要素からの射出エネルギーを分割して多数のエネルギー粒子に保有させ、これら各粒子の軌跡を、上記のような要素分割をした系の中で、放射エネルギー伝搬の物理法則にしたがうように決定することからなる。

次に、精度がすでに確認されている従来の等分割要素による解析との比較を行い、本手法が従来の規則的な分割を行う手法と同等の解析精度を有していることを確認している。

さらに使用する全エネルギー粒子数と要素分割の大きさを変えて、結果の精度と計算時間について調べ、各要素からの射出エネルギー粒子数が30000個以上であれば十分であることを示している。

また、90度円弧状の曲管部の両端に直線状ダクトが接続された二次元および三次元曲がりダクトを対象として、ダクトの曲率半径、壁面放射率、内部の気体の吸収係数および流速等のパラメータがこのダクトの放射エネルギー透過特性におよぼす影響を調べ、本手法の有用性を示している。

これを要するに著者は、三角形要素、あるいは四面体要素を用いた、任意形状の系に柔軟に対応しうる放射・対流共存伝熱解析法を開発し、その妥当性の検討を行い、この手法の実用化をはかり、熱工学上有益な多くの知見を得ており、熱工学の進歩に寄与するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。