

学 位 論 文 題 名

灰色壁に囲まれた非灰色ガスのふく射伝熱高速解析手法の開発

学位論文内容の要旨

燃焼加熱炉、ガスタービン、ジェットエンジンの燃焼器等、ふく射性ガスが重要な役割を果たす機器の設計を行う際には、これらのガスの非灰色性を適切に取り扱う必要がある。非灰色ガスを対象とするふく射伝熱解析では、従来 weighted-sum-of-gray-gases モデル、K-distribution 法、ゾーン法、モンテカルロ法等が用いられてきた。前の 2 法は計算時間が短いものの系内での非灰色ガスの吸収スペクトルは一樣であるという条件を必要とすることから、これらの手法による非灰色ガスふく射伝熱解析には限界がある。したがって、より適切に実際の非灰色ガスを扱う解析手法が望まれており、有力な手段としてモンテカルロ法の非灰色ガスへの拡張や光線放射モデルによるふく射要素法などが挙げられる。このうち非灰色媒体に適用したモンテカルロ法の解析手法では、解析系の幾何学的形状や熱物性に対して柔軟な対応ができるものの、解析精度を向上させるためにはふく射エネルギーを模擬する粒子数を増加させる必要があることから、計算時間が長くなる。特に非灰色ガスに適用する場合には、多くの単色波長域に分割し、それぞれについて灰色ガスと同様な計算を行うことから、長い解析時間を要することになる。

この問題に対して、工藤らのグループでは、READ 法を取り入れた非灰色ガスのモンテカルロ計算について、放射する各エネルギー粒子に波数割り当てする際に乱数を用いない決定論的計算法を導入すること、加えて、反復計算を伴うガス温度分布の収束計算に過緩和を導入することなどによって、従来のモンテカルロ法に比べて 38～49 倍の高速化を図っている。近年、パーソナルコンピュータの処理速度やメモリ容量が大幅に向上しており、モンテカルロ法を取り入れたふく射伝熱解析手法にとっても追い風となっているが、非灰色系での複雑な三次元系での問題について実用的な解析を行おうとすると、一層の時間短縮が必要である。このような背景の下、本研究ではモンテカルロ法による非灰色ガスのふく射伝熱解析について、モンテカルロ法の特長である幾何学的形状や熱物性に対する柔軟性を損なうこと無しに、これらを高速で演算することが可能なアルゴリズムの提案を行うことを目的にしている。

本研究は、非灰色ふく射伝熱問題について容易に取り扱うことができ、しかも短時間でその解を得ることができるような高速解析手法の開発に関するものである。ふく射伝熱が支配的である焼却炉や燃焼炉では、燃焼ガスや火炎といった熱源と炉構造の間に適切な伝熱設計を要し、数値シミュレーションによる事前検討が容易に行えると設計の効率は飛躍的に向上する。

非灰色ガスのふく射伝熱解析コードを設計実務に適用させるための主な条件としては、

- ①系の幾何学的形状の取り扱いに柔軟性がある
- ②解析時間が短く、精度が良い
- ③解析に要するコンピュータメモリの量が少ない

などが挙げられる。勿論、このほかにも化学反応や対流による熱的な影響を容易に追加できることや、系の要素分割が最適にしかも効率的にできることなども挙げられるが、上記の 3 条件が達成されるなら比較的容易に拡張され得る。したがって、本研究では常に上記の基本的な 3 条件を満たすような非灰色ガス系におけるふく射伝熱の高速解析手法を開発するものである。

なお、以上について論文の構成を以下の5章として述べた。

第1章は序論であり、非灰色ガスを対象としたふく射伝熱解析の背景、本研究の目的、そして本論文の構成を述べている。

第2章では、従来の代表的な解析手法として特にゾーン法とモンテカルロ法について取り上げ、その概要について述べている。この2つの方法は、次章以降に述べる非灰色ガスのふく射伝熱高速解析手法の開発に取り入れられている。

第3章では、黒体壁に囲まれた非灰色ガス系のふく射伝熱解析に適用する高速アルゴリズム（以下、高速 READ 法と称することとする）について述べている。この方法では、あらかじめモンテカルロ計算を用いて系の幾何学的情報を計算しておき、この情報と系内のガス温度分布に依存する吸収係数分布から、系内を格子分割した各要素間のふく射エネルギー交換係数 (READ 値) を求め、これを用いてエネルギーバランス式を解き、ガスの温度分布と壁面熱流束分布を求めており、分割したガス要素それぞれの温度に対応した単色吸収係数分布を温度分布の収束計算の過程で毎回更新しながら収束するまで繰り返し計算を行う。

第4章では、ゾーン法の考え方を利用して、上記の黒体壁に囲まれた系に限定される高速 READ 法を、灰色壁に囲まれた非灰色ガスのふく射伝熱問題に拡張する手法について述べている。

第5章では、高速 READ 法によっていくつかの系や条件について実際に解析を行い、演算時間、解析精度、さらにコンピュータメモリ量などについての結果と評価を論じている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 工 藤 一 彦
副 査 教 授 菱 沼 孝 夫
副 査 教 授 伊 藤 献 一
副 査 教 授 熊 田 俊 明

学 位 論 文 題 名

灰色壁に囲まれた非灰色ガスのふく射伝熱高速解析手法の開発

燃焼加熱炉、ガスタービン、ジェットエンジンの燃焼器等、ふく射性ガスが重要な役割を果たす機器の設計を行う際には、これらのガスの非灰色性を適切に取り扱う必要がある。非灰色ガスを対象とするふく射伝熱解析では、従来 weighted-sum-of-gray-gases モデル、K-distribution 法、ゾーン法、モンテカルロ法等が用いられてきた。前の 2 法は計算時間が短いものの系内での非灰色ガスの吸収スペクトルは一樣であるという条件を必要とすることから、これらの手法による非灰色ガスふく射伝熱解析には限界がある。したがって、より適切に実際の非灰色ガスを扱う解析手法が望まれており、有力な手段としてモンテカルロ法の非灰色ガスへの拡張や光線放射モデルによるふく射要素法などが挙げられる。このうち非灰色媒体に適用したモンテカルロ法の解析手法では、解析系の幾何学的形状や熱物性に対して柔軟な対応ができるものの、解析精度を向上させるためにはふく射エネルギーを模擬する粒子数を増加させる必要があることから、計算時間が長くなる。特に非灰色ガスに適用する場合には、多くの単色波長域に分割し、それぞれについて灰色ガスと同様な計算を行うことから、長い解析時間を要することになる。

この問題に対して、工藤らのグループでは、READ 法を取り入れた非灰色ガスのモンテカルロ計算について、放射する各エネルギー粒子に波数割り当てする際に乱数を用いない決定論的計算法を導入すること、加えて、反復計算を伴うガス温度分布の収束計算に過緩和を導入することなどによって、従来のモンテカルロ法に比べて 38～49 倍の高速化を図っている。近年、パーソナルコンピュータの処理速度やメモリ容量が大幅に向上しており、モンテカルロ法を取り入れたふく射伝熱解析手法にとっても追い風となっているが、非灰色系での複雑な三次元系での問題について実用的な解析を行おうとすると、一層の時間短縮が必要である。

このような背景の下、本研究ではモンテカルロ法による非灰色ガスのふく射伝熱解析について、モンテカルロ法の特長である幾何学的形状や熱物性に対する柔軟性を損なうこと無しに、これらを高速で演算することが可能なアルゴリズムの提案を行うことを目的にしている。

本研究は、非灰色ふく射伝熱問題について容易に取り扱うことができ、しかも短時間でその解を得ることができるような高速解析手法の開発に関するものである。ふく射伝熱が支配的である焼却炉や燃焼炉では、燃焼ガスや火炎といった熱源と炉構造の間に適切な伝熱設計を要し、数値シミュレーションによる事前検討が容易に行えると設計の効率は飛躍的に向上する。

非灰色ガスのふく射伝熱解析コードを設計実務に適用させるための主な条件としては、

- ①系の幾何学的形状の取り扱いに柔軟性がある
- ②解析時間が短く、精度が良い
- ③解析に要するコンピュータメモリの量が少ない

などが挙げられる。勿論、このほかにも化学反応や対流による熱的な影響を容易に追加できることや、系の要素分割が最適にしかも効率的にできることなども挙げられるが、上記の3条件が達成されるなら比較的容易に拡張され得る。したがって、本研究では常に上記の基本的な3条件を満たすような非灰色ガス系におけるふく射伝熱の高速解析手法を開発するものである。

第1章は序論であり、非灰色ガスを対象としたふく射伝熱解析の背景、本研究の目的、そして本論文の構成を述べている。

第2章では、従来の代表的な解析手法として特にゾーン法とモンテカルロ法について取り上げ、その概要について述べている。この2つの方法は、次章以降に述べる非灰色ガスのふく射伝熱高速解析手法の開発に取り入れられている。

第3章では、黒体壁に囲まれた非灰色ガス系のふく射伝熱解析に適用する高速アルゴリズム(以下、高速 READ 法と称することとする)について述べている。この方法では、あらかじめモンテカルロ計算を用いて系の幾何学的情報を計算しておき、この情報と系内のガス温度分布に依存する吸収係数分布から、系内を格子分割した各要素間のふく射エネルギー交換係数(READ 値)を求め、これを用いてエネルギーバランス式を解き、ガスの温度分布と壁面熱流束分布を求めており、分割したガス要素それぞれの温度に対応した単色吸収係数分布を温度分布の収束計算の過程で毎回更新しながら収束するまで繰り返し計算を行う。

第4章では、ゾーン法の考え方を利用して、上記の黒体壁に囲まれた系に限定される高速 READ 法を、灰色壁に囲まれた非灰色ガスのふく射伝熱問題に拡張する手法について述べている。

第5章では、高速 READ 法によっていくつかの系や条件について実際に解析を行い、演算時間、解析精度、さらにコンピュータメモリ量などについての結果と評価を論じている。

これを要するに著者は、灰色壁に囲まれた非灰色ガス系におけるふく射伝熱解析において、系内の温度分布に依存しない幾何学的情報のみをモンテカルロ法で求めるアルゴリズムを開発することで、解の精度を保ったまま、計算時間を大幅に短縮することに成功し、熱工学上有益な多くの新知見を得たものであり、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、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。