

博士（工 学） 大 高 円

学 位 論 文 題 名

モンテカルロ法による非灰色ガスの放射解析

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

燃焼ガス中に含まれる水蒸気、二酸化炭素の放射熱伝達に見られる波数選択性は、これらのガスを含む系の放射熱伝達を解析する上で、非常に重要かつ興味深い特性である。また、二酸化炭素による地球の温暖化、酸化窒素・酸化硫黄などによる酸性雨の発生といった世界的な社会問題が取りざたされる昨今、これらのガスの発生を伴う、化石燃料の燃焼を前提とした各種工業機器において、その熱伝達特性の解明は、大変重要な研究課題である。

本論文では、波数選択性を有するガスの放射熱伝達機構の解明を目的とし、燃焼ガス中に多く含まれる水蒸気、二酸化炭素を対象とした高温非灰色ガスの軸対称噴流における放射・対流共存熱伝達解析を行った。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、放射に関する基礎事項をとりまとめて示し、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対し、放射を光子の挙動の集積と考え、放射熱輸送方程式を導出した。また、輸送方程式中にあらわれるガスの単色吸収係数を求めるため、狭域バンドモデルの Elsasser モデルを簡略化し、これに指指数型広域バンドモデルのモデル・パラメータを適用した。これより水蒸気・二酸化炭素の単色吸収係数を求め、これを他の研究による実験値等と比較し、その値の妥当性を確認した。

第3章では、まず本解析中で用いる疑似乱数に対し検定を行い、その統計的な性質が良好であることを確認した。

続いて温度の異なる二つの黒体壁間に配した単一吸収バンドの仮想的な非灰色ガス層に対し、モンテカルロ法による非灰色ガス放射熱伝達解析を行い、Modestによる同条件の厳密解と比較したところ、両者は非常によい一致を示し、本解析手法の妥当性を確認した。

次に、非灰色ガス放射熱伝達の灰色ガスに対する特徴を調べるために、温度の異なる二つの黒体壁にはさまれた一次元のガス層内の放射熱伝達解析を行い、灰色ガスと比較した非灰色ガス層内の放射熱伝達の特徴として以下の知見を得た。

1. 非灰色ガスでは灰色ガスに比べて、壁面近傍のガス温度勾配が大きくなってしまっており、光学厚さの薄い灰色ガスの特徴であった壁面温度と壁面近傍のガス温度のずれが、非灰色ガスにおいては小さくなる。

2. ガス層から低温側の壁面に入射する単色放射熱流束の波数分布は、いくつかの吸収バンドの代表波数（吸収係数が最大となる波数）付近で、M字形の分布を示す。これは、吸収係数が吸収バンドの代表波数を中心に拡がりを持つ高温ガスからの入射を波数方向に吸収係数の鋭い分布を持つ低温壁近傍の低温ガスがさえぎるためと考えられる。

第4章では、モンテカルロ法の短所とされる長い計算時間を短縮するため、二つの方法を提案している。

一つ目の計算時間の短縮方法は、モンテカルロ法によって確率論的に値が決定されるパラメータの一つを、決定論的計算法を用いて規則的に決定するものである。規則的にその値を決定するパラメータとしては、モンテカルロ法を用いた場合、その決定に長い計算時間要した射出波数を選んだ。この決定論的計算法の導入により計算時間は約1/9に短縮された。

また、ガス要素温度の収束計算において、ガス要素温度の修正に加速緩和を導入し、ガス要素における放射エネルギーの自己吸収が増加するにつれ、反復計算時のガス要素温度の修正量減少することに注目し、最適な加速係数の値をガス要素の光学厚さと関係付けて求める方法を示した。本論文で対象とした解析条件では、反復計算の回数が約1/4に減少し、前述の決定論的計算法による効果と合わせ、計算時間は約1/38にまで短縮された。

二つ目として、高並列計算機を用いた並列計算による計算時間の短縮を試みた。並列計算機を利用にあたっては、各エネルギー粒子の追跡処理が独立であることを利用し、事象分割によりプログラムを並列化した。この結果64個のCPUを用いることにより計算時間は約1/63に短縮された。

第5章では、高温非灰色ガス（水蒸気、二酸化炭素、窒素の混合気）の軸対称噴流に対する放射・対流共存熱伝達解析を行い、以下の結果を得た。

1. 全ての解析領域において非灰色ガス噴流の温度は、Planckの平均吸収係数を用いた灰色ガスの温度を下回る。また、噴流周りに射出される放射熱流束は、定性的には同じような形を示すが、定量的に灰色ガスの値は非灰色ガスの値の半分以下となる。これより、高温ガス噴流の放射熱伝達解析においてPlanckの平均吸収係数を用いた場合、放射冷却効果が十分に見積もられないことが分かった。

2. 噴出ガス温度500Kにおいて、放射を考慮した解析は、これを無視した解析の温度より低く、その差は下流に行くに従い少しづつ大きくなり、上流部での放射冷却の効果が積算されていることが示された。

3. 噴出ガス温度を1000, 1500Kと高くすると、放射を考慮した解析では、これを無視した解析に比べ、温度分布が下回っており、その差はノズル直後の上流部において大きく、下流部では小さくなっている。これは高温の上流部において放射冷却効果が強くあらわれ、下流部ではこの上流部からの多量の放射エネルギーを吸収するためである。

4. 噴流から外部に射出される単色放射エネルギーの波数分布の解析結果より、この放射は、高温の噴出ガスの吸収バンドからのスペクトル的に鋭いピークを有する放射と、ノズル出口断面からの黒体放射の和であらわされることが示された。この結果、噴出ガス温度が増加すると、Wienの変位則に従って高波数側に変位するノズル出口断面からの黒体放射のピーク波数が、噴流の外部に射出される単色放射エネルギーの波数分布にも表れていることが確認された。

第6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 谷口 博
副査 教授 木谷 勝
副査 教授 福迫 尚一郎
副査 教授 三好 克彦
副査 助教授 工藤 一彦

学位論文題名

モンテカルロ法による非灰色ガスの放射解析

燃焼ガス中に含まれる水蒸気、二酸化炭素の放射熱伝達に見られる波数選択性は、これらのガスを含む系の放射熱伝達を解析する上で、非常に重要なかつ興味深い特性である。

本論文では、波数選択性を有するガスの放射熱伝達機構の解明を目的とし、燃焼ガス中に多く含まれる水蒸気、二酸化炭素を対象とした高温非灰色ガスの軸対称噴流における放射・対流共存熱伝達解析を行っている。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ている。

第2章では、輸送方程式中にあらわれるガスの単色吸収係数を求めるため、狭域バンドモデルの Elsasser モデルを簡略化し、これに指数型広域バンドモデルのモデル・パラメータを適用し、これより水蒸気・二酸化炭素の単色吸収係数を求め、これを他の研究による実験値等と比較し、その値の妥当性を確認している。

第3章では、まず本解析中で用いる疑似乱数に対し検定を行い、その統計的な性質が良好であることを確認している。続いて温度の異なる二つの黒体壁間に配した単一吸収バンドの仮想的な非灰色ガス層に対し、モンテカルロ法による非灰色ガス放射熱伝達解析を行い、Modest による同条件の厳密解と比較し、両者が非常によい一致を示すことから本解析手法の妥当性を確認している。次に、温度の異なる二つの黒体壁にはさまれた一次元のガス層内の放射熱伝達解析を行い、灰色ガスと比較した非灰色ガス層内の放射熱伝達の特徴を調べている。

第4章では、モンテカルロ法の短所とされる長い計算時間を短縮するため、二つの方法を提案している。

一つ目の方法は、モンテカルロ法によって確率論的に値が決定されるパラメータの一つを、決定論的計算法を用いて規則的に決定するもので、その導入により計算時間を約 1/9 に短縮している。

また、ガス要素温度の収束計算において、ガス要素温度の修正に加速緩和を導入し、最適な加速係数の値をガス要素の光学厚さと関係付けて求める方法を示している。本論文で対象とした解析条件では、反復計算の回数が約 1/4 に減少し、前述の決定論的計算法による効果と合わせ、計算時間を約 1/38 にまで短縮している。

二つ目として、高並列計算機を用いた並列計算による計算時間の短縮を試みている。並列計算機を利用にあたっては、各エネルギー粒子の追跡処理が独立であることを利用し、事象分割によりプログラムを並列化している。この結果 64 個の C P U を用いることにより計算時間を約 1/63 に短縮している。

第 5 章では、高温非灰色ガス（水蒸気、二酸化炭素、窒素の混合気）の軸対称噴流に対する放射・対流共存熱伝達解析を行い、以下の結果を得ている。

1. 全ての解析領域において非灰色ガス噴流の温度は、P l a n c k の平均吸収係数を用いた灰色ガスの温度を下回る。また、噴流周りに射出される放射熱流束は、定性的には同じような形を示すが、定量的に灰色ガスの値は非灰色ガスの値の半分以下となる。これより、高温ガス噴流の放射熱伝達解析において P l a n c k の平均吸収係数を用いた場合、放射冷却効果が十分に見積もられないことが分かった。
2. 噴出ガス温度 500 Kにおいて、放射を考慮した解析は、これを無視した解析の温度より低く、その差は下流に行くに従い少しづつ大きくなり、上流部での放射冷却の効果が積算されていることが示された。
3. 噴出ガス温度を 1000, 1500 Kと高くすると、放射を考慮した解析では、これを無視した解析に比べ、温度分布が下回っており、その差はノズル直後の上流部において大きく、下流部では小さくなっている。これは高温の上流部において放射冷却効果が強くあらわれ、下流部ではこの上流部からの多量の放射エネルギーを吸収するためである。
4. 噴流から外部に射出される単色放射エネルギーの波数分布の解析結果より、この放射は、高温の噴出ガスの吸収バンドからのスペクトル的に鋭いピークを有する放射と、ノズル出口断面からの黒体放射の和であらわされることが示された。この結果、噴出ガス温度が増加すると、W i e n の変位則に従って高波数側に変位するノズル出口断面からの黒体放射のピーク波数が、噴流の外部に射出される単色放射エネルギーの波数分布にも表れていることが確認された。

第 6 章では、結論として本研究の結果をとりまとめている。

これを要するに著者は、多次元の非灰色放射伝熱解析を新たに実用化し、これを用いて高温ガス噴流がその周囲に射出する放射エネルギーの強度とスペクトルの分布を求め、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。