

学 位 論 文 題 名

Development of Method to Estimate the
Complex Index of Refraction of Dielectric Aerosols

(酸化物絶縁体エアロゾルの複素屈折率評価手法に関する研究)

学位論文内容の要旨

現在日本で開発中の高速増殖炉では、液体ナトリウムが冷却材として使用されている。液体ナトリウムは、伝熱性能が良い優秀な冷却材であるが、漏洩して空気に触れると発火する。したがってこのタイプの炉の開発に当たっては、周辺機器や建屋へのナトリウム火災の影響評価のための、熱・物質伝達特性評価法の開発が重要である。ナトリウム火災では、多量の酸化ナトリウムエアロゾルが白煙状に放出され、火炎を覆っているため、火炎から周囲への熱伝達を評価するには、ナトリウム火災から放射され、このエアロゾル層を透過するふく射エネルギー量の評価が重要となる。

酸化ナトリウムエアロゾル層でのふく射の散乱・透過特性の評価のためには、エアロゾル粒径と個数濃度の分布のほかに、その複素屈折率の正確な評価が必要となる。酸化ナトリウムエアロゾル層でのふく射の散乱・透過特性に関しては、これまでにマクロ的な透過率が実験的に求められているが、酸化ナトリウムの複素屈折率の値は不明であった。エアロゾルの複素屈折率の評価法に関しては、これまで、複素屈折率を仮定したふく射透過解析の結果と、実験による透過率測定結果の比較より複素屈折率を求める手法が各種提案されてきたが、解析において、いずれも散乱を無視、あるいは多重散乱を無視していたため、多重散乱が重要となる高濃度のエアロゾル層における正確な評価は困難であった。

本研究ではこの問題点の解消のため、多重散乱を考慮した非灰色ふく射透過解析を行い、粒径分布を有するエアロゾルが均一に分布する層でのふく射の正確な透過率を求めるプログラムをモンテカルロ法を利用して作成した。次にこのプログラムを利用して、エアロゾルの複素屈折率の値を広範囲に変えて、ふく射源の反対側の壁面上でのエアロゾル層の透過率分布を計算した。これに対応する実験としては、黒体炉からのふく射をエアロゾル層に入射させ、反対側の壁面でのその透過率の分布を測定した。最後に、この実験の結果と一番一致する透過率分布解析結果に対応した複素屈折率が、実験に使用したエアロゾルの複素屈折率であるとした。実験では、酸化ナトリウムを使用するのは危険であるため、今回は同じ酸化物絶縁体であり、光学的に同様な特性

を示すと予想され、かつその複素屈折率が既知である酸化マグネシウムのエアロゾルを使用した。

本論文は8章から構成されている。

第1章は序論である。ここでは、エアロゾルの複素屈折率を評価する従来の手法をまとめている。また、研究の目的と概要を述べている。

第2章では微小粒子の散乱に関する Mie の理論と酸化物絶縁体の光学物性について述べている。Mie 散乱理論からは、本解析で使用する微小粒子の散乱・吸収効率因子と、散乱位相関数の式を求めている。また酸化物絶縁体は、可視域および近赤外域でほぼ透明であり、この範囲では屈折率 n は一定、また吸収指数 k はほぼ0であることを述べている。

第3章では、READ 法を利用したモンテカルロ法によるエアロゾル層でのふく射透過解析手法について述べている。

第4章では、酸化マグネシウムエアロゾルの複素屈折率を評価する全体手法について述べている。解析では、エアロゾルの複素屈折率を仮定し、実験に対応した粒径と個数濃度が与えられて、エアロゾル層での黒体炉からのふく射の透過率を求めた。実数部 n と虚数部 k を広範囲に変化させた複素屈折率に対応して求められた透過率解析結果は、その n と k を横軸・縦軸とした $n-k$ 面上に等透過率曲線群として表した。これと対応する実験で求められ透過率の値と等しい値を有する $n-k$ 面上の透過率曲線に対応する n と k の組み合わせが、実験で使用した酸化マグネシウムの複素屈折率の候補となる。エアロゾル層を囲む壁面上の各所でこのような実験値と一致する $n-k$ 面上での透過率曲線を求め、全ての透過率曲線が通過する $n-k$ 面上の点として求められた n と k の値が、実際の複素屈折率の実数部と虚数部の値である、ということで評価した。

第5章は、酸化マグネシウムエアロゾルを使用した透過率実験について述べている。ここでは、マグネシウムリボンの燃焼により酸化マグネシウムエアロゾルを発生させた。その粒径は、発生したエアロゾルの一部をガラス板上に取り顕微鏡で測定した。透過率測定は断面が 0.075×0.175 m、高さが 0.32 m の測定ダクトにこのエアロゾルを通して行った。エアロゾル濃度は、一定時間このダクトを通過したエアロゾル質量をダクト出口に設置したグラスファイバ製フィルタで捕集し、その質量測定することで行った。ふく射の透過率分布は、サーモパイル式の放射計をダクトの黒体炉と反対側の壁面を移動させて測定した。

第6章では、第4章と5章に述べた解析と実験の結果の比較より、酸化マグネシウムエアロゾルの複素屈折率を評価した。求められた酸化マグネシウムの複素屈折率は文献値と良い一致を示し、本手法による酸化物絶縁体の複素屈折率評価法の妥当性を示した。

第7章では、本手法の各種パラメータに対する感度解析を行い、エアロゾル濃度と、ふく射の透過方向が一番結果に影響を与えることを示した。この結果、エアロゾル濃度を上げると、複素屈折率評価の感度が上昇することがわかった。

第8章は本研究における結言を述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 工 藤 一 彦

副 査 教 授 池 川 昌 弘

副 査 教 授 杉 山 憲一郎

学 位 論 文 題 名

Development of Method to Estimate the Complex Index of Refraction of Dielectric Aerosols

(酸化物絶縁体エアロゾルの複素屈折率評価手法に関する研究)

ナトリウム冷却高速増殖では、炉冷却材の液体ナトリウムが漏洩して空気に触れると発火するので、ナトリウム火災の影響評価が重要である。ナトリウム火災では、白煙状の酸化ナトリウムエアロゾルが多量に放出されて火炎を覆うので、これを透過するふく射エネルギー量の評価が重要となり、そのためには、その複素屈折率の正確な評価が必要となる。エアロゾルの複素屈折率評価法に関しては、これまで、複素屈折率を仮定したふく射透過解析の結果と、実験による透過率測定結果の比較より複素屈折率を求める手法が各種提案されてきたが、解析において、いずれも散乱を無視、あるいは多重散乱を無視していたので、多重散乱が重要となる高濃度のエアロゾル層における正確な評価は困難であった。

本研究では、酸化ナトリウムエアロゾルの複素屈折率の正確な評価法の開発を目的としている。このためまず、エアロゾル層中での多重散乱を考慮した非灰色ふく射透過解析を行えるプログラムをモンテカルロ法を利用して作成している。次にこのプログラムを利用して、エアロゾルの複素屈折率の値を広範囲に変えて、ふく射源の反対側の壁面上でのエアロゾル層の透過率分布を計算している。これに対応する実験としては、黒体炉からのふく射をエアロゾル層に入射させ、反対側の壁面でのその透過率の分布を測定している。最後に、この実験の結果と一番一致する透過率分布解析結果に対応した複素屈折率が、実験に使用したエアロゾルの複素屈折率であるとして、複素屈折率を求めている。実験で酸化ナトリウムを使用するのは危険であるので、今回は同じ酸化マグネシウムであり、光学的に同様な特性を示すと予想され、かつその複素屈折率が既知である酸化マグネシウムのエアロゾルを使用している。

本論文は8章から構成されている。

第1章は序論である。ここでは、エアロゾルの複素屈折率を評価する従来の手法をまとめている。また、研究の目的と概要を述べている。

第2章では微小粒子の散乱に関するMieの理論と酸化物絶縁体の光学物性について述べている。Mie散乱理論からは、本解析で使用する微小粒子の散乱・吸収効率因子と、散乱位相関数の式を求めている。また酸化物絶縁体は、可視域および近赤外域でほぼ透明であり、この範囲では屈折率 n は一定、また吸収指数 k はほぼ0であることを述べている。

第3章では、READ法を利用したモンテカルロ法によるエアロゾル層でのふく射透過解析手法について述べている。

第4章では、酸化マグネシウムエアロゾルの複素屈折率を評価する全体手法について述べている。解析では、エアロゾルの複素屈折率を仮定し、実験に対応したエアロゾル層の透過率を求めている。実数部 n と虚数部 k を広範囲に変化させた複素屈折率に対応して求められた透過率解析結果は、その n と k を横軸・縦軸とした $n-k$ 面上に等透過率曲線群として表している。これと対応する実験で求められ透過率の値と等しい値を有する $n-k$ 面上の透過率曲線に対応する n と k の組み合わせが、実験で使った酸化マグネシウムの複素屈折率の候補となる。エアロゾル層を囲む壁面上の各所でこのような実験値と一致する $n-k$ 面上での透過率曲線を求め、全ての透過率曲線が通過する $n-k$ 面上の点として求められた n と k の値が、実際の複素屈折率の実数部と虚数部の値である、ということで評価している。

第5章は、酸化マグネシウムエアロゾルを使用した透過率実験について述べている。ここでは、マグネシウムリボンの燃焼により酸化マグネシウムエアロゾルを発生させ、これを断面が 0.075×0.175 m、高さが 0.32 m の測定ダクトに通し、これを通しての黒体炉からのふく射の透過を測定して透過率を求めている。

第6章では、第4章と5章に述べた解析と実験の結果の比較より、酸化マグネシウムエアロゾルの複素屈折率を評価している。求められた酸化マグネシウムの複素屈折率は文献値と良い一致を示し、本手法による酸化物絶縁体の複素屈折率評価法の妥当性を示している。

第7章では、本手法の各種パラメータに対する感度解析を行い、エアロゾル濃度と、ふく射の透過方向が一番結果に影響を与えることを示している。この結果、エアロゾル濃度を上げると、複素屈折率評価の感度が上昇することが示されている。

第8章では、本研究で得られた成果をまとめている。

これを要するに著者は、ナトリウム火災時に多量に発生する酸化ナトリウムエアロゾル中での伝熱解析に必須の、酸化物絶縁体エアロゾルの複素屈折率を、実験と解析を併用して評価する方法を開発し、酸化マグネシウムエアロゾルを用いた実験でその妥当性を証明しており、熱・原子力工学上有益な多くの新知見を得たものであり、熱・原子力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。