

学 位 論 文 題 名

繊維層におけるふく射熱伝達に関する研究

学位論文内容の要旨

繊維物質は、その優れた断熱性能と製造・取り扱いの便利さから幅広い領域で応用されており、繊維層における伝熱特性の正確かつ簡便な評価法が求められていた。繊維層における熱伝達は、繊維と空気層の熱伝導、繊維と繊維の間の接触による熱伝導、自然対流及びふく射による熱伝達からなる。繊維層の多くはその体積割合が比較的低く、ふく射による熱伝達は、室温レベルでも全体の熱伝達の中でかなり大きい割合を占め、温度レベルが高ければ高いほどその割合は大きくなる。したがって、繊維層の伝熱特性を評価するにあたり、ふく射による熱伝達の正確な評価が求められていた。

吸収・放射・散乱性媒体を透過するふく射エネルギーの解析は、媒体における散乱が等方散乱でない限り、散乱による影響を正確に把握することが難しく、特に繊維のような円柱形状の物体における散乱強度は、球状物体と違って入射角と散乱角の関数で表されるため、そのふく射伝熱解析モデルの確立が難しかった。

繊維層におけるふく射熱伝達に関する今までの研究には、実験的に求めた繊維層の吸収率あるいは放射率を用いて熱流束を求める解析モデルと、電磁波理論を用いて求めた繊維一本の光学特性値を用い、2 流束近似に基づいて透過熱流束を求める解析モデルがあった。前者の実験的モデルでは、繊維単体の光学物性値、及びこれらの配向が一定で、繊維層の厚さあるいは繊維の体積密度のみ変化する場合でも繰り返して実験を行い、吸収率あるいは放射率を求める必要があり、また後者の従来の2 流束近似による解析モデルは、繊維層内でのエネルギーの吸収・散乱・自己放射に関するミクロ的な解明は難しく、また実際の値に比べ過小に評価されることが示されている。また、いずれの場合も入射ふく射エネルギーの波長分布が透過に及ぼす影響に関しては、明らかにされていない。

そこで、本研究では繊維層におけるふく射エネルギーの吸収・散乱・自己放射挙動を正確に模擬できるモンテカルロ法を用いた解析モデルを開発するとともに、従来の2 流束モデルを改良して、実際の値に近い結果を簡便に得ることのできる実用解析モデルを確立した。ついで、入射ふく射エネルギーの波長分布が繊維層の伝熱特性に及ぼす影響を明らかにした。また、電磁波理論の適用が難しくなる大サイズパラメータの繊維を有する繊維層に関する解析モデルも提案し、その妥当性を実験的に確認した。

第 1 章は本論文の緒言であり、繊維状物質の応用状況と本研究の目的、従来の研究及び本論文の概要を述べた。

第 2 章では、円柱散乱に関する基礎理論、及び第3, 4, 6章に必要な円柱のふく射特性値の

計算式を導出し、各種パラメータの影響を調べた。単一円柱のふく射特性値すなわち減衰・散乱効率因子、散乱アルベド及び散乱位相関数は、サイズパラメータ、複素屈折率、入射角の関数で表されるが、これらの値はKerker、Van de Hulst の電磁波理論により求めている。また、この計算に必要なベッセル関数の数値計算法を示し、各種パラメータがふく射特性値に及ぼす影響を明らかにした。

繊維層での散乱を独立散乱・連続体近似によってモデル化し、モデル化した繊維の配列分布を用いて、円柱表面で射出されるふく射エネルギーの方向分布の式を導出し、モンテカルロ法による繊維層の光学特性値の解析手法について述べた。

第 3 章では、繊維層を透過するふく射エネルギーの基礎式及びモンテカルロ法による解析手法を述べた。モンテカルロ法の導入により、繊維層の温度分布、繊維層の各断面を通過するふく射エネルギー分布及び壁面熱流束を正確に求めることができ、繊維層の無次元厚さ、繊維材の複素屈折率及び繊維の配向が上記の解析結果に及ぼす影響を明らかにした。壁面からランベルト余弦則に従って射出されたふく射エネルギーは、繊維層透過中も方向別強度分布はほとんど変化しない。

第 4 章では、2 流束近似に基づく実用的な改良解析モデルを提案した。ここではまず従来の 2 流束モデル及びモデルに必要な逆散乱割合の計算法に存在する問題点を指摘した。ついで、Milne-Eddington 近似に基づく改良解析モデルを提案し、モンテカルロ法による計算結果との比較により、その妥当性を確認した。また、この実用解法で壁面熱流束の計算に必要な繊維層の減衰効率因子、散乱アルベド及び逆散乱割合の値を、広い範囲でのサイズパラメータ、複素屈折率及び 2 つの典型的な繊維の配列（繊維が 3 次元空間でランダムな方向に配列 [Case (a)] と繊維が平行平板に平行な面内でランダムな方向に配列 [Case (b)]）に対してグラフ化して示した。これにより、複雑な計算をすることなしに、各種条件の繊維層を透過するふく射エネルギー量の算出が可能となった。

第 5 章では、大サイズパラメータ（繊維の径が入射波長より遥かに大きい場合）を有する繊維層におけるふく射エネルギー透過特性解析をモンテカルロ法により行い、その妥当性を He-Ne レーザをニッケル繊維シートに通した実験により確認した。本章では幾何学的散乱の概念を用いて、円柱表面での散乱を鏡面反射（あるいは乱反射）と Fraunhofer 回折とし、モンテカルロ法によって解析する手法を開発した。また、この手法を用いて繊維表面の反射率、繊維の配向分布及び直径分布がふく射エネルギーの透過に及ぼす影響を明らかにした。

第 6 章では、ふく射エネルギーの透過に及ぼす入射波長分布の影響に関して述べた。固体壁面から射出される波長分布を有するふく射エネルギーに関し、代表波長による解析と実際の波長分布を考慮した場合の誤差に関して、グラスファイバ層とニッケル繊維層に対して改良 2 流束モデルによる有効熱伝導率の計算式を用いて解析を行い、入射波長分布が壁面熱流束に及ぼす影響を明らかにした。グラスファイバについては、波長変化によりふく射特性値が大きく変化するため、入射ふく射の波長分布のピーク波長を代表波長として用いた解析は波長分布を正しく考慮した解析と異なる結果を示すが、ニッケル繊維層については、かなり近いことが示された。

第 7 章は、本論文の結言であり、本研究より得られた結果をとりまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 工 藤 一 彦

副 査 教 授 伊 藤 猷 一

副 査 教 授 福 迫 尚一郎

学 位 論 文 題 名

繊維層におけるふく射熱伝達に関する研究

繊維物質は、その優れた断熱性能と製造・取り扱いの便利さから幅広い領域で応用されており、繊維層における伝熱特性の正確かつ簡便な評価法が求められていたが、ふく射による熱伝達が室温レベルでも全体の熱伝達の中でかなり大きい割合を占め、また温度レベルが高いほどその割合は大きくなるため、ふく射による熱伝達の正確な評価が求められていた。

そこで本研究では、繊維層におけるふく射エネルギーの透過特性を正確に模擬できる解析モデルの開発と、実際の値に近い結果を簡便に得ることのできる実用解析モデルの確立を目的として解析を行い、その妥当性を実験的に確認した。

本研究で得られた結論をまとめると以下ようになる。

1. Kerker、Van de Hulst の電磁波理論により求めた単一円柱のふく射特性値を用い、独立散乱・連続体近似を仮定すると、モデル化した繊維の配列分布に対して、円柱表面で放射されるふく射エネルギーの方向分布の式が導出されることを利用して、モンテカルロ法による繊維層のふく射透過特性の解析手法を開発した。
2. 上記モンテカルロ法による解析手法により、繊維層の温度分布、繊維層の各断面を通過するふく射エネルギー方向分布及び壁面熱流束を求め、繊維層の無次元厚さ、繊維材の複素屈折率及び繊維の配向が上記の解析結果に及ぼす影響を明らかにした。
3. Milne-Eddington 近似に基づく改良2流束解析モデルを提案し、モンテカルロ法による計算結果との比較により、その妥当性を確認した。また、この実用解法で壁面熱流束の計算に必要な各種のパラメータは、グラフ化して示した。これにより、複雑な計算をすることなしに、各種条件の繊維層を透過するふく射エネルギー量の算出が可能となった。
4. 大サイズパラメータの繊維層におけるふく射エネルギー透過特性解析をモンテカルロ法により行い、その妥当性をHe-Neレーザをニッケル繊維シートに通した実験により確認した。
5. ふく射エネルギーの透過に及ぼす入射波長分布の影響に関して調べ、グラスファイバについては、波長変化によりふく射特性値が大きく変化するため、入射ふく射の波長分布のピーク波長を代表波長として用いた解析は、波長分布を正しく考慮した解析と異なる結果を示すが、ニッケル繊維層については、かなり近いことが示された。

これを要するに著者は、繊維層におけるふく射エネルギーの透過特性を正確に評価できるモンテカルロ法を用いた解析モデルを開発するとともに、従来の2流束モデルを改良して、実際の値に近い結果を簡便に得ることのできる実用解析モデルを確立することにより、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。