

氏名	Kou 高	Heung 興
授与学位	博士（工学）	
学位授与年月日	平成6年3月25日	
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第1項	
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学第二専攻	
学位論文題目	だ円柱状格子板による固体面からのふく射伝熱の制御に関する研究	
指導教官	東北大学教授 増田 英俊	
論文審査委員	東北大学教授 増田 英俊	東北大学教授 相原 利雄
	東北大学教授 新岡 嵩	東北大学教授 齋藤 武雄

論文内容要旨

本研究は伝熱面から射出されたふく射エネルギーが、だ円柱格子によっていかに制御されるかを明らかにしたもので、全編6章よりなる。第1章は序論で本研究の目的と従来の研究が記されている。第2章には用いたふく射伝熱制御法の原理が述べられ、基本形として円柱格子モデルを取り上げ、解析法と計算結果が示されている。第3章と第4章では、一般形としてだ円柱格子を用いた場合が扱われ、制御特性の変化が詳しく述べられている。第5章では実用器の設計に役立つ資料として、外部からの入射を入れた場合の解析法と計算結果が示されている。第6章は結論である。

第1章 序 論

ふく射伝熱は対流伝熱と違った極めて独特ともいえるいくつかの特性を備えている。例えば波長特性とか、反射特性、あるいは遠距離作用といったものである。その一つに挙げられるのが金属表面の鏡面反射の性質である。この性質を利用して、ふく射伝熱の方向制御が可能なることを初めて示したのが Permutter-Howell であり、つづいて Black ら、または Masuda はそのふく射伝熱制御の研究を発展させた。すなわち伝熱面上に V 字形小溝を配列させて、溝側壁の鏡面反射を利用してふく射エネルギー伝達の変えようとした試みであった。ところが、現実にこれを実用化しようとする伝熱面上の小溝配列ということで、かなりの不便が生じる。

本研究は、こういった点の改良をも含めて新たに提案されたふく射伝熱の制御法に関する理論的

な研究である。すなわち、伝熱制御機構を伝熱面から切り離し、制御板としてそれを伝熱面前方に置くことによって伝熱面からのふく射放熱を制御しようという試みである。ここで制御板としてだ(楕)円柱格子が用いられる(図1参照)。

本研究の目的は、(1)だ円柱で構成された格子状制御板によって、伝熱面から射出されるふく射エネルギーの制御がどの程度可能かを解析によって明らかにすること、(2)だ円柱の中心軸間距離、だ円柱断面の長・短軸比、だ円の長軸の傾き角などの幾何学パラメータと、だ円柱表面の半球放射率や鏡面反射率などの物理パラメータによる制御特性の変化を明らかにすることである。

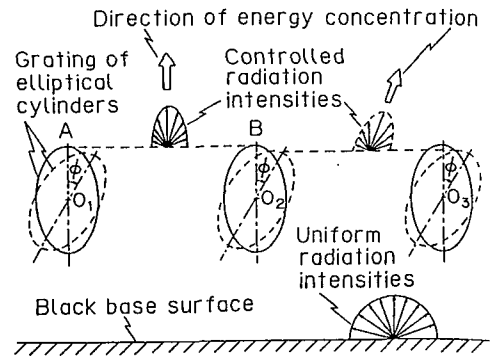


図1 ふく射伝熱制御のだ円柱格子モデル

第2章 円柱状格子板によるふく射伝熱の制御法と数値解析

第2章では、だ円柱状格子によってふく射伝熱制御が可能か否かを調べるため、その一つの極限形であり、かつ最も単純な形状として円柱状格子によるふく射伝熱制御を扱った。

本研究で提案するふく射伝熱制御法の原理は、黒体基板(伝熱面)から発するふく射強度一様のふく射線が、基板の前に置かれた鏡面反射性の強い円柱格子の反射によって一部は格子板に垂直方向の近傍に方向転換され、他の一部は基板に戻される。すなわち基板から乱放射された一様分布のふく射線は、この円柱格子によって格子に垂直方向に強い強度分布をもつふく射線のパターンに変えられるであろう。これが円柱格子によるふく射伝熱制御の原理である。

解析のため、黒体基板とそれと平行な一列円柱(無限長)からなるふく射伝熱系を物理モデルとした。主な仮定は次のとおりである。基板は黒体で一様温度を持つ無限平板である。円柱格子表面は灰色体で放射は乱放射性、反射は鏡面反射と乱反射の両成分からなる($\rho_c = \rho_c^s + \rho_c^d$, ρ_c は反射率, ρ_c^s は鏡面反射率, ρ_c^d は乱反射率)。そしてこの伝熱系の外からの入射ふく射は考えない。

このふく射伝熱系のふく射強度パターンを明らかにするため、円柱格子の自己放射と円柱表面の乱反射および鏡面反射から成る円柱上のふく射強度の基礎方程式を誘導した。更にふく射伝熱問題で、現象をよく理解するためにその物理モデルをある温度条件で分離した場合のふく射強度の基礎方程式を導き、その解法を示した。次に伝熱制御特性を検討するため円柱列に接する仮想面を考え、制御特性を表すいくつかの物理量を定義した。すなわち、ふく射エネルギーパターンを表す見掛けの指向放射率 $e_a(\eta)$ 、伝達ふく射エネルギー量を表す見掛けの半球放射率 $e_{a,h}$ および特定方向へのエネルギー集中度を表す集中角 η_L を定義した。 η_L は格子通過後のふく射エネルギーの90%を包含する角度である。 η は上記の仮想面に垂直方向から計った角度である。

円柱格子と伝熱面基板からなる上記の物理モデルに対して数値解析を行い、次の結果を得た。

(1)円柱格子は格子板の垂直前方方向にふく射エネルギーを集中し、水平方向近傍のエネルギーを

遮断する働きを持つ。(2)見掛けの指向放射率 $\varepsilon_a(\eta)$ の特性を明らかにした。(3)円柱格子は鏡面放射率が強いほどふく射エネルギーの集中が良い。(4)集中角 η_L と見掛けの半球放射率 $\varepsilon_{a,h}$ との関係を明らかにした。

第3章 だ円柱状格子板による伝熱面に垂直方向へのふく射伝熱の制御

前章では、ふく射強度の基礎方程式の誘導とその数値解法など基礎的なことを述べ、円柱格子によるふく射伝熱制御がV字溝と同じく可能なことを立証したが、制御性能はだ円柱格子と比較すると当然劣ると予想される。なぜならば、円柱はだ円柱のだ円の長・短軸 γ_0 を1とした特種形であり、重要な γ_0 の影響が考慮されていないからである。したがって、より一般的な形としてだ円柱格子を使用すれば、次の点で円柱格子と比べて一層優れた制御特性が得られるであろう。

(1)だ円柱の長・短軸比の適切な選択によって、エネルギー集中度を低下させずにふく射伝熱量の増加が期待できる。(2)だ円柱の使用により、幾何学パラメータが増えるため、伝熱量とエネルギー集中度の幅広いコントロールが可能である。(3)だ円柱のだ円の長軸をある角度回転させることにより、エネルギーの方向制御が可能である。

本章では、前章の円柱列をだ円柱列で置き替え、だ円の長軸が基板に垂直な場合を物理モデルとして解析を行った。そして上記の(1)と(2)についてふく射伝熱制御の特徴を明らかにした。幾何学パラメータとして新たにだ円の長・短軸比 γ_0 が加わり、幾何解析は複雑となるが、基礎方程式の解法は同じである。制御特性を表す諸特性も前章のものと同じである。

これまで行ってきた解析では、だ円柱表面のふく射物性として指向性を考慮せずに扱ってきた。しかし実際の金属表面の放射率や反射率は指向性が極めて強いことが知られている。したがって、これまでの計算結果が指向性のある実際の場合とどの程度異なるかを検討しておく必要がある。そこで実際の金属を対象として電磁理論による式で指向放射率と指向放射率を求め、これまで用いてきた半球放射率または半球放射率をそれらで置き替えてすべての計算を行い、比較してみた。その結果、この指向性の影響はほとんどないことを確めた。

本章では幾何学パラメータである無次元だ円柱間距離 ξ_0 、およびだ円の軸比 γ_0 の値によって、ふく射エネルギーの集中度 η_L と見掛けの半球放射率 $\varepsilon_{a,h}$ がどのように変化するか、そして円柱格子に比べてどのような特徴が生じるかを明らかにした。得られた結果は次のとおりである。

(1)だ円柱の軸比 γ_0 を1より大きくすると、 $\gamma_0 \leq 7$ の範囲で γ_0 の増加と共に見掛けの指向放射率 $\varepsilon_a(\eta)$ の角度分布が大きく変わり、エネルギーの集中がよくなる。(2)だ円柱の放射率 ε_c と反射率比 ρ_c^s / ρ_c の $\varepsilon_a(\eta)$ への影響は円柱の場合とほぼ同じである。(3)エネルギーの集中角 η_L と見掛けの半球放射率 $\varepsilon_{a,h}$ に及ぼす幾何学パラメータ γ_0 、 ξ_0 などの影響を詳しく明らかにした。(4) η_L と $\varepsilon_{a,h}$ の関係を明らかにし、特にふく射伝熱制御に有効と思われる範囲は $\xi_0 = 3.0 \sim 5.0$ 、 $\gamma_0 = 2.0 \sim 7.0$ であることを示した。

第4章 傾斜だ円柱状格子板による伝熱面からのふく射伝熱の制御

第3章まで行ってきたふく射伝熱制御は、伝熱面基板に垂直方向へのエネルギー集中を図ったも

のであったが、伝熱制御としては希望する方向に伝達方向を変え得るということが重要な要素の一つである。したがって本章では、制御性のある最も一般的な物理モデルとして傾斜だ円柱格子モデルを扱う。すなわち各だ円柱の中心軸の配列方法などは第3章の場合と同じであるが、異なるのは各だ円柱のだ円の長軸を回転可能とすることである。そして各だ円の長軸をすべて同じ回転角 ϕ だけ傾けただ円柱列と黒体基板から成るふく射伝熱系を考える。このようにだ円柱格子のだ円の長軸を任意の傾斜角 ϕ だけ傾けることによって、ふく射強度は ϕ に応じてある方向に強い分布形をもち、ふく射伝熱の方向は大きく変えられるであろう。これが本章の物理モデルの特徴である。

前章とこのふく射伝熱系の違うところは、だ円柱表面のふく射強度が非対称となり、二つのだ円柱に対するふく射強度の基礎方程式を連立させて解くことである。ふく射エネルギーの集中方向 η_0 を求め、その方向を中心として左右に集中角 η_L と η_R を新しく定義した。

前章まで行ってきた物理および幾何学パラメータに、更に傾斜角 ϕ をパラメータとして加え、数値計算を行った。得られた結果は次のとおりである。

(1) 見掛けの指向放射率 $\varepsilon_a(\eta)$ の角度分布曲線の ϕ による変化は、 $\phi < 50^\circ$ の範囲で ϕ の増加と共に曲線のピークは η の大きな方向に移動し、そして曲線形全体は縮小していく。(2) エネルギー集中方向の角度 η_0 は $\phi < 50^\circ$ の範囲で ϕ の増加と共にほぼ直線的に増加する。(3) エネルギーの平均集中角 $\Delta \eta_L [= (|\eta_L| + |\eta_R|)/2]$ は ϕ による変化が比較的少ない。(4) 見掛けの半球放射率 $\varepsilon_{a,h}$ が ϕ 、および τ_0 の増加と共に減少し、また ξ_0 の増加と共に増加していく関係を明らかにした。(5) $\varepsilon_{a,h}$ と η_0 の関係、および $\varepsilon_{a,h}$ と平均集中角 $\Delta \eta_L$ の関係を図示した。

第5章 格子板によるふく射伝熱制御に及ぼす周囲外界からの入射ふく射

前章までは、物理モデルをできるだけ単純化して周囲外界からの入射ふく射はないとして解析してきた。

第5章では、本伝熱制御系が実際に利用される場合を考えて、この入射を考慮して解析を行った。前章の物理モデルと違うところは、一様なふく射強度をもつ温度 T_∞ の周囲壁（周囲外界）が新たに加えられたことである。前章の基礎方程式の解を有効に利用するため、この物理モデルを次の二つに分離した。

- (I) 温度 T_w をもつ基板と温度 T_c をもつ円柱列、および温度零の周囲壁からなる伝熱系。
- (II) 温度零の基板とだ円柱列、および温度 T_∞ の周囲壁からなる伝熱系。

(I) は前章の物理モデルそのものである。この二つのモデルにふく射強度の基礎方程式を立て、その解を求める。得られた解を加え合わせれば元（分離する前）のモデルの基礎式の解となる。以上について数値計算を行い、次の結果を得た。

(1) 温度比 $\tau_\infty (= T_\infty / T_w)$ が 0.4 以下では、見掛けの指向放射率に対する外界からの入射に起因する指向放射率の割合は微小である。しかし τ_∞ が 0.6 以上ではその割合は徐々に増大する。(2) エネルギーの集中方向 η_0 と平均集中角 $\Delta \eta_L$ は τ_∞ が 0.6 以下では τ_∞ 値による変化は共に微小である。(3) 外界からの入射に起因する見掛けの半球放射率の変化量は τ_∞ が 0.4 以下では微小であるが、0.4 以上では徐々に増大していく。

第6章 結 論

だ円柱状格子による伝熱面基板からのふく射伝熱制御の特性を明らかにするために、種々の数値解析を行い、以下の結果を得た。

第2章では、円柱格子を物理モデルの対象とし、V字溝と同様に円柱格子は伝熱面に垂直前方向へのふく射伝熱制御が可能なることを立証し、諸制御特性を明らかにした。

第3章では、だ円柱格子の長軸が伝熱面基板に垂直なモデルを扱い、本制御法が優れた制御特性を有することを示した。

第4章では、傾斜だ円柱格子について解析を行い、エネルギー伝達の中心方向は傾斜角とほぼ直線関係で変化することを明らかにした。

第5章では、外界からの入射ふく射を考慮した場合の解析法を示し、そのときの諸制御特性を明らかにした。

審査結果の要旨

高度で、かつ機能的な熱機器の設計という観点から伝熱制御技術へのニーズが高まっているが、ふく射特性を利用した伝熱制御法もユニークな方法として注目されてきた。その中で、ふく射伝熱の方向制御の一技法としてV字溝配列による方法が従来研究対象とされてきた。このV字溝による制御法に代えて、新たな着想としてだ円柱格子を用いた伝熱制御法を本研究で提案している。すなわち本論文はだ円柱状格子による伝熱面基板からのふく射伝熱制御の特性を明らかにしたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論である。第2章は、だ円柱格子の一極限形として円柱格子を取り上げ、それと黒体伝熱面基板からなるふく射伝熱系に対して数値解析を行っている。円柱格子通過後のエネルギーの空間分布を表す諸見掛けの放射率とエネルギー集中度を表す集中角を定義し、計算結果から円柱格子は格子面に垂直方向にふく射エネルギーを集中し、平行方向のエネルギーを遮断する働きをもっていることを明らかにしている。

第3章ではだ円柱格子を扱い、だ円柱のだ円の長軸が伝熱面基板に垂直な場合について数値計算を行っている。集中角と諸見掛けの放射率に及ぼすだ円柱間距離とだ円の長短軸比の影響を明らかにし、だ円柱格子が対称形V字溝よりもエネルギー集中などの制御性に優れていることを示した。

第4章では、だ円の長軸をある角度傾けた傾斜だ円柱格子に対して解析を行った。格子状制御板を通過するふく射エネルギーの伝達方向は、だ円柱の傾斜角に対してほぼ直線関係で変化すること、またその場合の集中角と諸見掛けの放射率を諸パラメータとの関連で明らかにした。さらに、ふく射伝熱制御で重要な集中角と見掛けの半球放射率との関係を諸パラメータの有用な値に対して線図で表し、本制御系の設計に有益な資料を提供している。

第2章～第4章までは周囲外界からの入射を無視した、だ円柱格子本来の伝熱制御特性を明らかにしているが、第5章では本制御系を実機に応用する場合の設計資料として、この入射を考慮した場合の解析法とその計算結果を示している。周囲外界と伝熱面基板との温度比をパラメータとして、そのある範囲では入射を考慮した計算が必要なことを示した。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、だ円柱格子によって伝熱面からのふく射エネルギーをどの方向に、どの集中度で、かつどのエネルギー量で制御できるかを明らかにしたもので、伝熱工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。