

称号及び氏名 博士（工学） 赤井 富一

学位授与の日付 2006年7月20日

論文名 「非定常温度場における不均質材料の熱応力問題に関する
理論的研究」

論文審査委員 主査 教授 谷川 義信
副査 教授 杉村 延広
副査 教授 三村 耕司
副査 助教授 大多尾 義弘

論文要旨

傾斜機能材料（FGM：Functionally Graded Material）とは、材料を構成する要素（金属、セラミックス、プラスチック、繊維、空孔など）の組成を連続的にかつ使用環境に合わせて適切に傾斜化し、熱膨張や熱伝導を最適制御することによって得られる“機能が連続的に変化する材料”であり、不均質材料の代表的な具体例であるといえる。

現在、われわれの周囲には種々の環境問題が顕在化し、省エネルギー技術、代替エネルギーの開発等が今後一層重要な課題となる。傾斜機能材料は、これらの課題に対して必要な材料の機能を向上させるためのひとつの解決策と考えられる。構造強度の観点から熱応力緩和機能に注目すると、傾斜機能材料の重要な応用分野の一つとして、高温耐熱用機材をはじめとして、宇宙往還機の宇宙への上昇時、及び大気圏再突入時の空力加熱を防御するための熱防御材としての応用が挙げられる。傾斜機能材料の特徴を活かして将来の宇宙往還機に用いることが可能になれば、上記の熱応力問題は解決し、計り知れないメリットとなる。このような熱応力緩和形傾斜機能材料は、高温側でセラミックの体積分率を、低温側で金属の体積分率を高め、耐熱性と強度を併せ持たせるようにその組成を連続的に制御する技術により作り出される不均質材料である。しかしまだ完全な実用化という観点からは程遠い状態であるといえる。一方、このような傾斜機能材料では、意図的に不均質性を導入し使用条件に合致した材料特性を作り出すことができるため、材料設計が可能な材料であるという大きな特徴を有している。そのために設計・製作段階でこれらの材料において発生する熱応力を正確に解析することが極めて重要であり、この問題に対してひとつの解決法を提示することが本研究の目的の一つである。

さて、現在までに、熱応力・熱変形問題の研究は数多く成されて来ている。一次元解析から三次元解析、異方性解析、不均質性解析、非弾性解析、物性の温度依存性を考慮した解析等へと進んできた。一方、コンピュータの発達により、差分法、有限要素法、境界要素法などの数値解析法に関する研究も数多く見受けられるが、解析的方法によって、設計初期の段階で、基本的な構

造モデルにおけるさまざまな条件での定性的及び定量的傾向を容易に明らかにすることができるため、熱応力解析の基本的な取扱いである解析的方法による研究は、現在も盛んに行なわれ、発展中であるといえる。

一般に、熱応力解析において、傾斜機能材料のように熱的及び力学的材料特性に不均質性を導入した場合、基礎方程式系が非線形となり、その解析的処理が極めて困難となる。そのため、不均質特性をメインテーマとした熱応力問題の解析的研究は極めて少ない。また、実際に使用する場合を考えてみると、加熱状態から定常状態に移るまでには過渡的な状態が必ず存在し、加熱条件によっては定常状態に至るまでの過渡的な状態において熱応力が最大になる場合が多く、定常解析のみならず非定常解析を行ない、熱応力・熱変形における非定常効果を検討することが必要である。

そこで、本研究は傾斜機能材料に代表される不均質材料の非定常熱応力・熱変形問題を解析的に取り扱ったものである。まず均質材料からなる層状材料モデルによる解析手法を用いて、その極限值を求めることにより不均質平板の温度分布の解析解、およびその温度変化による熱応力分布を求めた。次に不均質中空円筒が三次元的な加熱あるいは移動熱源による加熱を受ける場合を想定し、不均質中空円筒に生じる温度変化及び熱応力分布を解析的手法により求めた。その後、これらの解析結果を利用して、不均質平板と不均質中空円筒の熱応力緩和のための材料組成最適化問題について検討した。また、以上の様な不均質材料を均質材料から成る層状複合材料で近似する方法とは全く異なった方法として、熱的および力学的不均質材料特性を平板や薄肉円筒の厚さ方向の座標変数の任意の冪関数として近似する手法を用いて、不均質長方形板の熱応力・熱変形問題に関する理論解析を行なった。さらに近年、圧電形傾斜機能材料と名づけられ厚さ方向に連続的に変化する材料定数をもつ新しい圧電材料が開発されている。この材料がアクチュエーターとして利用される場合には大きな変位を発現し、しかも生じる応力を減少することが可能であるといわれている。そこで、不均質材料特性を厚さ方向の座標変数の冪関数として表す方法により、圧電形傾斜機能材料からなる円筒パネルの定常圧電熱弾性問題について検討した。

本論文は、6章から成っており、各章の概要は次のとおりである。

第1章では、序論として本研究の背景と意義について述べるとともに、本論文の内容の概要について述べている。

第2章では、不均質特性を有する平板の一次元非定常熱伝導・熱応力問題について論じている。加熱条件として片面が温度指定、残りの面が完全冷却状態の場合及び任意の熱伝達条件を考慮した場合について検討している。解析にあたっては、均質材料から成る多層層状モデルを用いた解析手法を導入し、さらに層数が十分多くなった極限を考慮して、不均質平板に対する温度解を求めたものである。得られた不均質平板に対する解は、任意に変化し得る材料定数すなわち熱物性値の積分形と両境界面上での熱伝達率を含んだ形で表示されており、この温度解を用いて外部からの力学的拘束がない場合を想定し不均質平板に生じる熱応力成分を定式化している。数値計算を実行し熱応力緩和形傾斜機能材料の材料強度の評価においては、定常熱応力だけの評価では不十分であり、非定常状態での熱応力分布についても考慮し検討する必要があることを明らかにしている。従って発生する熱応力を最小化するための材料組成の最適化問題についても非定常状態を考慮しなければならないことを明らかにしている。さらに、材料特性の温度依存性を考慮した非定常熱伝導・熱応力問題についても理論解析及び数値計算を実行し、温度および熱応力分布の評価においては、材料特性の温度依存性が最も重要な因子のひとつであることを示している。

第3章では、不均質材料特性を有する中空円筒の三次元非定常熱伝導・熱応力問題について論じている。加熱条件として、円筒の内外両表面より局部的な加熱の作用を受ける場合、回転熱源により加熱を受ける場合および軸方向に移動する熱源により加熱を受ける場合の三種類について考慮している。中空円筒は、不均質な熱的および力学的特性を持つと仮定し、非定常熱伝導および熱応力問題を、均質材料から成る多層層状複合材料の理論を用いて近似的に解析している。なおこのような三次元非定常問題に対し、熱伝導問題では、フーリエ・コサイン変換とラプラス変換を用いて温度解を求め、さらに熱弾性場については、熱弾性変位ポテンシャル、Michell の関

数、Boussinesq の関数を用いる手法を適用し、解析解の導出に成功している。異種材料からなる二層複合円筒に対する結果と比較検討を行い、局部的な加熱の作用を受ける不均質円筒では、材料特性を適切に与えることにより局部的に生じる大きな熱応力分布を緩和させることが可能であることを明らかにしている。

第4章では、不均質特性を有する材料の非定常温度場における材料組成最適化問題を取扱っている。第2章で導いた一様加熱を受ける不均質平板の非定常温度解及び第3章で導いた中空円筒の外側表面より一様な非定常加熱を受ける不均質中空円筒の非定常温度解を用いて、加熱初期から定常状態に至るまでの全時間領域に対して不均質平板および不均質中空円筒に生じる非定常熱応力を最小化するための材料組成の最適化問題について検討している。2種類の傾斜機能材料を想定し、非線形計画法に基づく最小値探索を行い最適値を求めている。また、傾斜機能材料の使用環境として、著しい温度差が与えられるため、物性値の温度依存性を考慮した場合の数値計算法についても新しい手法を提案している。平板の場合、物性値の温度依存性の考慮の有無および与える温度落差により、得られる最適材料組成に大きな違いの生じることが定量的に認められた。一方、中空円筒の最適材料組成に関しては、定常状態での放熱境界側での引張応力により決定されるということを明らかにしている。

第5章では、不均質材料特性を冪関数で表す方法を用いて、不均質材料からなる長方形平板と圧電形傾斜機能材料からなる円筒パネルの熱応力問題を取扱っている。不均質長方形平板に対して一様あるいは非一様な加熱を受ける場合の温度分布の解を求め、さらに、単純支持条件のもとでたわみと熱応力成分を解析し、数値計算を行なうことにより不均質平板の曲げ変形挙動を明らかにしている。さらに非一様加熱を受ける圧電形傾斜機能円筒パネルの定常圧電熱弾性問題を取扱っている。二次元定常温度変化に対する温度解と平面応力状態のもとで単純支持された円筒パネルの圧電熱弾性応答を解析的に求めている。さらに数値計算を遂行し、パネル厚さの方向に熱伝導率、線膨張係数、集電定数、弾性スティフネス定数、圧電係数、誘電率に不均質性を与えることにより、発生する温度分布、電位を変化させることができるとともに、生じる熱応力成分を緩和させることが可能であることを明らかにしている。

第6章では、結論として、本研究によって得られた主要な結果を総括して述べている。

審査結果の要旨

本論文は、超高温環境下での使用を目的として、現在、積極的に開発が進められている熱応力緩和型傾斜機能材料を解析対象として取り上げ、このような不均質材料の熱弾性挙動を解析的方法により研究したものであり、以下のような成果を得ている。

- 1) 板厚方向に不均質な材料特性を有する平板に対して、各層が均質材料からなる多層層状材料モデルに置き換え、周囲媒体から一様加熱を受ける不均質平板の非定常温度解および熱応力解を導いている。さらに仮想的な層状材料の層数を無限大へと極限操作を行うことにより、熱物性定数が任意に変化する不均質平板の非定常温度および熱応力の解析解を見出している。次に、熱物性値などの材料定数の温度依存性を考慮した場合の温度分布を数値的に導出する方法を提案し、得られた数値計算結果より、物性値の温度依存性が熱弾性挙動に大きな影響を及ぼすことを示している。
- 2) 板厚方向に不均質材料特性を有する中空円筒に対して、多層層状円筒モデルを用いて、局部的な部分加熱が作用する場合の三次元非定常温度分布、および熱応力・熱変形に対する解析解を導出している。さらに、局部熱源が円周方向あるいは軸方向に一定速度で移動する場合の温度分布ならびに熱弾性応答を求めている。数値計算を実行し、得られた結果より、円筒の厚さ、熱源の移動速度等が、熱弾性挙動に大きな影響を及ぼすことを見出している。
- 3) 上述の不均質平板および不均質円筒が一様加熱を受ける場合を想定し、これらの平板ならびに円筒に生じる非定常熱応力を緩和させるための材料組成最適化問題を、非線形計画法

を用いて解析し、その最適値を求めている。種々の材料物性の温度依存性を考慮した場合の最適化問題を取り扱い、材料物性の温度依存性、温度落差の大きさ、想定する温度域等の変化が、最適材料組成に大きな影響を及ぼすことを見出している。

以上の他にも、本論文では多くの新しい知見を得ており、これらの諸成果は、超高温環境に対する熱応力緩和型傾斜機能材料の材料設計に対して多くの知見を与えているのみならず、種々の不均質構造材料の強度評価の方法に寄与するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うに必要な能力と学識を有することを示したものである。

本委員会は、本論文の審査ならびに学力確認試験の結果から、博士（工学）の学位を、授与することを適当と認める。

