

称号及び氏名 博士（工学） 河村 隆介

学位授与の日付 2007年2月28日

論文名

Study on Mathematical Analysis of Thermoelasticity and Optimization
of Material Composition for Inhomogeneous Elastic Medium

(不均質弾性体の熱弾性数理解析と材料組成最適化に関する研究)

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

論文要旨

工業製品や機械、構造物を設計し、製作するためには、それらが使用される状況を想定して、その変形や内部の力の状態、材料、性能、機能等を予め検討することが必要である。工業製品や機械、構造物の強度を担う材料では、まず、外力や温度変化といった負荷に対して、破壊や不都合な変形を起こさないことが要求される。また、機械要素の材料に塑性変形が生じると、使用目的を達成できなくなることが多いため、ほとんどの構造材料は弾性域で使用される。そこで、外力や温度変化を受ける弾性体の力学的挙動がしばしば調べられる。物体の力学的挙動を調べる方法には、大別して、実験、理論および計算の三つがある。この内、理論と計算の方法では、未知の現象を解明するため、現象の本質を捉えて問題設定を理想化し、微分方程式や積分方程式で記述された数学モデルとして表現する。特に、理論的方法では現象の支配方程式を解くために、数学の諸解法を駆使して厳密解が求められる。弾性体の力学的挙動を調べる理論的方法である弾性学や熱弾性学は、外力や温度変化を受ける弾性体中の変位、ひずみや応力の状態を詳細に明らかにする学問である。弾性学や熱弾性学は、等方性で均質な材料特性を持つ弾性体を始めとして、今日までに種々の理論が展開され、その解析方法が開発され、体系化されてきた。近年、人間はその活動可能な環境や領域の拡大を志向して、従来の等方性均質の材料特性の枠組みを越えた複合材料や傾斜機能材料等の新素材を開発した。複合材料は繊維の配向によって材料特性

が方向性を持つ異方性材料であり、繊維と母材の組み合わせや繊維の配向の操作によって使用目的に合わせた材料設計ができる。また、傾斜機能材料とは一つの材料の中で組成や機能が連続的あるいは段階的に変化する不均質材料であり、所望の機能を発現させるために組成と物性の空間分布が予め設計された後に作られる。複合材料や傾斜機能材料は、材料に不均質性や異方性を付与することによって、材料に高度な性能や機能を発揮させて、材料の高度活用という観点から大変有望視されている。一方、異方性や不均質性を持つ弾性体は、従来の等方性均質の弾性体には見られない力学的挙動を示す。このような先端複合材料の力学的挙動を解明するためのモデル化やその力学的挙動は未解明の部分が多く、その研究が必要に迫られている。

上述の背景を鑑みて、本論文では材料の不均質性や異方性の構成関係を組み込んだ線形熱弾性体モデルの熱弾性理論を展開し、外力や温度変化による不均質体の力学的挙動を解明する数理解析法の開発を第一の目的とした。また、近年のコンピュータ演算の高速化とともに、数理計画法やニューラルネットワーク、遺伝的アルゴリズム等といったソフトコンピューティングと呼ばれる最適化手法が開発されてきた。不均質体の熱弾性数理解析法をこのような最適化手法と有機的に結びつけると、使用目的に合わせた材料設計や所望の機能を発現する材料設計ができるという複合材料や傾斜機能材料の利点を最大限に活用できる。そこで、不均質体の熱弾性数理解析法と種々の最適化手法を併用して、力学的強度と機能性といった多様な設計目標を達成する機能性不均質構造材料の材料組成最適化の方法を開発することを第二の目的とした。

本論文は6章から成り、各章の概要を以下に記す。

第1章では序論として、研究の背景、目的および本論文の研究内容の概要を述べている。

第2章ではまず、傾斜機能材料等の不均質材料の宇宙航空分野への応用を想定し、非定常加熱を受ける不均質薄肉はりの熱座屈、座屈後問題および非線形熱曲げ問題の熱弾性数理解析法を開発している。材料特性が一方向に連続的に変化する不均質体を、各層で材料特性が段階的に変化する多層体としてモデル化を行った後、フォン・カルマンの有限変形理論に基づいて定式化されたはりの熱弾性ポテンシャルエネルギーを、修正パウエル法を用いて変位について最小化する方法を開発している。数値計算を行い、傾斜機能材料からなる薄肉はりの熱座屈開始温度と温度-たわみ平衡経路に及ぼす材料不均質性の効果や、非線形熱曲げ挙動に及ぼす材料不均質性と境界面での熱伝達条件の効果を明らかにした。更に、長手方向の一様張力と移動熱源による非一様加熱を同時に受ける薄板に生じる熱座屈挙動を調べるため、フォン・カルマンの大たわみ板理論に基づいた熱弾性数理解析法を開発し、連続焼鈍炉内の冷間圧延薄板に生じる非一様な応力場の評価を行い、シーガルと呼ばれるホットバックルの発生機構を考察している。数値計算を行い、長手方向の一様張力、板のアスペクト比と板厚、熱源の移動速度と面積が熱座屈開始温度や座屈後挙動に及ぼす効果を明らかにした。

第3章ではまず、異方性材料特性を持つ層の任意の斜交積層からなる多層層状異方性積層板の非定常熱伝導、熱曲げおよび非定常熱応力問題の数理解析法を開発している。各層の異方性主軸と全体座標軸が一致せず、定式化が困難なアングルプライ積層板の三次元非定常温度解を、汎関数法、ラプラス変換および変数分離法を用いて導出した。これによって、非定常状態での温度変化に及ぼす熱的材料特性の異方性の影響の評価が可能になった。また、単純支持アングルプライ積層板の古典積層理論に基づく熱応力と熱変形を、レイリーリッツ法を用いて導出し、具体例として、2層アングルプライ積層板の温度変化および熱変形、熱応力に及ぼす配向角の効果を考察している。次に、積層板の高次せん断変形理論に基づき、単純支持アングルプライ積層板の熱応力と熱変形に関する理論解を導出して

いる。これによって、積層板の層間はく離の要因と考えられる面外せん断応力を評価している。最後に、面内方向に直交異方性を持ち、かつ面外方向には板厚座標のべき乗の形の材料不均質性を持つ直交異方性不均質長方形板の熱弾性数理解析法について検討している。全周単純支持、一对辺単純支持・他對辺固定および全周固定の三種の境界条件に対して、長方形板の熱変形および熱応力を導出し、長方形板の温度変化と熱弾性挙動に及ぼす材料特性の直交異方性および材料不均質性の効果を評価している。

第4章では、非定常加熱を受ける不均質体の熱弾性数理解析法と最適化手法を併用して、高温環境下での熱応力緩和を目的とする不均質体の材料組成最適化問題を取り扱っている。まず、半径方向に傾斜組成を持つ中空円筒をとりあげ、内外両境界から一様加熱が作用する非定常問題を想定し、遺伝的アルゴリズムを用いて、最大応力比の逆数として定義された適応度関数を最大化する最適材料組成を探索した。各層の体積分率を半径座標のべき乗で与え、その指数を設計変数とした場合と、各層の体積分率を独立な設計変数とした場合を比較し、後者がより優れた材料組成を与えることを示した。次に、板厚方向に傾斜組成を持つ平板と半径方向に傾斜組成を持つ中空円筒をとりあげ、両境界面から一様加熱が作用する非定常問題を想定し、ニューラルネットワークを用いて最適材料組成の探索を行った。すなわち、材料組成パラメータ、加熱側と放熱側の媒体温度およびこれらの温度落差を入力信号とし、出力信号が物体内の最大応力比となる階層型ニューラルネットワークを誤差逆伝ば則によって学習させた。構築した階層型ニューラルネットワークを用いると、学習に用いた温度条件だけでなく、未学習の条件においても、非線形計画法による組成分布とほぼ同じ結果が求められることを示した。

第5章では、高温環境下での熱応力緩和と遮熱性向上を目的とする不均質体の材料組成多目的最適化問題を取り扱っている。まず、板厚方向に傾斜組成を持つ円板をとりあげ、上下境界面で一様加熱が作用する場合の非定常問題を想定し、修正パウエル法を用いて、最大応力比と最大熱流束比の重みつき総和を最小化する材料組成を探索し、最大応力比と最大熱流束比と間のトレードオフ関係を明らかにしている。次に、板厚方向に傾斜組成を持つ円板および半径方向に傾斜組成を持つ中空円筒をとりあげ、両境界面から一様加熱が作用する非定常問題を想定し、多目的遺伝的アルゴリズムを用いて、最大応力比と熱通過率比から定義された適応度関数を最大化するパレート最適な材料組成の解集合を探索した。数値計算を行い、熱応力緩和と遮熱性改善の目的が同時にどの程度達成できるかを考察した。最後に、半径方向に傾斜組成を持つ中空球をとりあげ、内外境界面で一様加熱が作用する場合の非定常問題を想定し、設計変数としてセラミックと軽金属の体積分率に加えて気孔を導入し、体積分率とともに気孔率も変化させて、遮熱性の改善と熱応力の低減を目的とした多目的最適化問題を検討している。ランキング法に基づく実数コード遺伝的アルゴリズムを用いて、最大応力比と熱通過率比の二つの目的関数を最小化する材料組成のパレートフロンティアを探索し、気孔の導入は遮熱性改善とともに熱応力緩和に有効であることを明らかにした。

第6章では各章で述べた内容を概括し、得られた結果を総括している。本論文では材料不均質性や材料異方性の構成関係を組み込んだ線形熱弾性体の熱弾性理論を展開して、種々の熱弾性数理解析法を開発し、不均質材料や異方性材料の熱弾性挙動を明らかにした。更に、不均質体の熱弾性数理解析法を種々の最適化手法と有機的に結びつけて、材料の組成傾斜による不均質性を適切に与えることによって、等方性均質体では実現できない材料の力学特性や機能性を不均質体において発揮させることが可能であることを具体的に示した。したがって、本論文は傾斜機能化による材料の高度活用に対する不均質体の熱弾性数理解析法の確立に大きな寄与をなすものであるといえる。

審査結果の要旨

本論文は、複合材料や傾斜機能材料に見られるように、均質等方性材料では発現し得ない未知の新しい機能を秘めた先進材料に対する種々の熱弾性数理解析法の開発を目的として行った一連の研究成果をまとめたものであり、次のような諸成果を得ている。

- 1) 不均質材料の熱座屈・座屈後挙動および非線形熱曲げ問題に対する数理解析法を開発し、確立している。まず、不均質材料特性を多層層状均質体モデルで近似し、不均質薄肉はり解析モデルとして取り上げている。非線形計画法を用いて解析を行い、熱座屈開始温度、温度-たわみ平衡経路および非線形曲げ挙動に及ぼす不均質材料特性の影響を明らかにしている。
- 2) 異方性積層材料および異方性不均質材料に対する熱弾性数理解析法を開発し、確立している。まず、斜交積層板の三次元非定常温度場を、汎関数法を用いて導出し、更に高次せん断変形理論を導入して、層間剥離の原因となる面外せん断応力を評価している。また、面内直交異方性と面外方向に関する不均質性を併せ持つ平板の熱弾性曲げ問題を取り扱い、これらの諸問題に対して、材料異方性および不均質性が温度分布、変位および応力分布に及ぼす影響について定量的評価を行っている。
- 3) 熱応力緩和のための不均質材料の材料組成最適化問題に対する数理解析法を開発し、確立している。まず、不均質材料特性を多層層状均質体モデルで置き換え、中空円筒や平板を解析モデルとして取り上げている。さらに遺伝的アルゴリズムやニューラルネットワーク法等のソフトコンピューティング手法を用いて最適化計算を行い、非定常加熱条件下での熱応力緩和のための最適材料組成を求めている。
- 4) 熱応力緩和と遮熱性向上という不均質材料の多目的最適化問題に対する数理解析法を開発し、確立している。多層層状均質体モデルを用いて、円板や中空円筒および中空球を解析モデルとして取り上げ、修正パウエル法等の非線形計画法や遺伝的アルゴリズムを用いて、種々の解析モデルに対するパレート最適解（最適材料組成）を得ている。

これらの諸成果は、不均質材料並びに異方性材料の材料設計問題に対して多くの知見を与えているのみならず、不均質構造材料の強度評価、強度設計の方法にも寄与するところ大である。

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。