

|          |   |                  |
|----------|---|------------------|
| 氏名       | ユ<br>余  | ニ<br>寧           |
| 学位(専攻分野) | 博 士 (エネルギー科学)   |                  |
| 学位記番号    | エネ博第 104 号  |                  |
| 学位授与の日付  | 平成 16 年 11 月 24 日   |                  |
| 学位授与の要件  | 学位規則第 4 条第 1 項該当  |                  |
| 研究科・専攻   | エネルギー科学研究科 エネルギー変換科学専攻  |                  |
| 学位論文題目   | A Study on Thermo-mechanical Simulation Based on Non-Fourier's Heat Conduction<br>(非フーリエ熱伝導則に基づく熱・力学シミュレーションに関する研究) |                  |
| 論文調査委員   | (主査)<br>教授 星出敏彦   | 教授 松本英治 助教授 今谷勝次 |

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、従来の熱伝導法則とは異なる非フーリエの熱伝導則に基づく材料の熱・力学的挙動に関する解析手法の提案とそれを用いた数値解析結果を論じた結果をまとめたもので、6章からなっている。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的を論じている。まず、熱伝導現象における温度の伝ばに関する非フーリエの熱伝導則が提案された歴史的経緯を述べ、熱伝導現象での緩和時間と対比させることによって実際の現象での熱・力学的応答を論じている。さらに実用化への観点から、非フーリエの熱伝導則が支配的になる時間的/空間的領域やそれに関わる材料プロセスを述べ、応力・ひずみ場および組織変化を考慮した数値解析手法の確立の必要性を説いている。

第2章は、本論文で用いた基礎理論をまとめたものである。まず熱伝導方程式について論じ、従来のフーリエ熱伝導則が放物型の微分方程式をなすのに対して、非フーリエの熱伝導モデルを導入することによって双曲型の微分方程式になり、したがって有限な速度で温度が伝ばすることを示している。次に、力学量の各種保存法則を述べた後で、熱弾性体の基礎式さらに熱弾塑性体に関する基礎式を導いている。ここでも、従来のフーリエ熱伝導則による基礎式の導出と非フーリエの熱伝導則を対比して論じるとともに、新たに考慮しなければならない緩和時間に関わる項について議論している。さらに有限要素法を用いた数値解析手法の定式化を行ない、2階の時間導関数を含む方程式を安定して取り扱えるニューマークβ法による解析アルゴリズムを提案している。

第3章から第5章までは、第2章で導出した基礎式および解析手法に関して検討を加えたものであり、非フーリエの熱伝導則の特徴と従来の熱伝導法則との相違について議論するとともに、提案した数値解析手法の妥当性を検討している。それぞれ、第3章は熱伝導方程式、第4章は熱弾性問題としての連成解析、さらに第5章は熱弾塑性解析である。

第3章では、非フーリエの熱伝導則の特徴を検証する観点から、力学場と連成させずに熱伝導方程式単独での解析結果を検討している。まず微分方程式の無次元化を行なって2次元での解析手法を簡単に述べている。従来のフーリエの熱伝導則による結果では温度の伝ば速度は無限大となるのに対して、非フーリエの熱伝導則に基づく解析結果では有限な伝ば速度になるとともに、波動の特徴である温度波の反射が観察されることを示している。また緩和時間が小さいときには、温度場は減衰挙動が支配的になり、従来のフーリエ熱伝導則の結果に漸近することを示している。さらに、解析で用いたニューマークβ法が安定な数値解を構成することを確認し、第4章以降での解の安定性に関する指針を得ている。

第4章は、熱弾性体の力学場と非フーリエ熱伝導方程式の連成問題を解析し、特に温度の変化による力学場への影響について検討している。従来の放物型の熱伝導方程式とは異なり断熱境界での温度波の反射によって応力が誘起され、熱衝撃問題でも応力波の伝ばが著しく異なることを示している。また入力した熱流束パルスの周期を大きくすることによって、数値解は従来の熱弾性解析結果に漸近することを示している。さらに応力波の応答に関する緩和時間の影響を数値的に検討し、温度波の速度と応力波の速度の相関による相互作用が力学的応答に大きな影響を与えることを明らかにしている。

第5章では、熱弾塑性体における非フーリエ熱伝導方程式の効果を検討したものである。実際の解析では、大きな影響を

及ぼさないと考えられる範囲で簡略化した基礎式を扱い、非フーリエの熱伝導則によって生じるいくつかの項は無視して解析している。ここでは、媒体中の温度波によって降伏応力を超える応力が発生し得ることを示し、温度波の反射などの効果によって従来のフーリエの熱伝導則の場合よりも一般には大きな応力を生じることを示している。

第6章では得られた一連の成果をまとめて結論とするとともに、組織との連成効果など今後の課題と応用について言及している。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、従来のフーリエの熱伝導則では温度が無限大の伝ば速度をとる矛盾を解決し熱伝導における緩和現象を考慮に入れるため、まず緩和時間を用いた非フーリエの熱伝導則から熱伝導方程式を導き、さらに導出した熱伝導方程式に有限要素法を適用することによって、温度-応力連成問題を数値解析的に検討したものであり、得られた主な成果は以下のとおりである。

1. 従来の研究では1次元での厳密解に関する議論がほとんどであったが、本論文では実用的な境界値問題への適用を指向して有限要素法による定式化を行なっている。また非フーリエの熱伝導則に基づく熱伝導方程式が双曲型をなすことに着目して、時間の離散化に対してニューマーク $\beta$ 法を適用し、これによって安定な数値解析が可能になったことを示している。
2. 温度波の伝ばや断熱境界上での反射などを解析的に検討し、従来のフーリエの熱伝導則との比較検討を行なうことによって、非フーリエの熱伝導モデルの特性を解明している。さらに、本モデルに特有のパラメーターである緩和時間の取り方によって、従来の熱伝導則にも漸近する様々なモデルが記述できることを明らかにしている。
3. 応力あるいはひずみ場との連成解析を行なうことによって、温度と応力の相互作用を記述することに成功している。さらに温度波の速度と応力波の速度の相関によって応力の応答に大きな影響を与えることを明らかにするとともに、熱弾塑性挙動についても検討し、非フーリエの熱伝導における熱応力および塑性変形がフーリエの熱伝導の場合に比べて大きくなることを示している。

このように、本論文は従来から用いられているフーリエの熱伝導法則には従わないような極限状態における材料の熱・力学的挙動を合理的に把握するための理論的枠組みを検討し、数値解析手法の構築を試みたものであり、構築した解析手法は、今後、微視的なモデルとの結合や組織変化の導入による各種材料プロセッシング技術への応用などに加えて、急激な温度変化を伴うような実用的な問題への展開が可能であると考えられ、学術上、実用上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成16年10月27日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。