

補助事業番号 2024M-456

補助事業名 2024年度 付加製造技術により作製した複雑形状を持つ金属構造体に対する
弾性特性評価法の開発 補助事業

補助事業者名 足立 寛太

1 研究の概要

近年、付加製造技術を用いた金属製品の製造が急速に普及し、従来の加工法では不可能な極めて複雑な形状を持つ金属構造体の本格的な実用化に向けて世界中で研究が進められている。しかし形状の多様性および複雑性に起因して、設計にあたって必須となる弾性特性の評価方法がまだ確立されておらず、設計開発が進まない一因となっている。本事業では、付加製造技術により作製した複雑形状を持つ金属構造体の弾性特性を精密に評価するための基盤技術として、任意の形状を持つ試料に対して全ての弾性定数を高精度に計測可能な手法を確立することを目指す。具体的には、既存の超音波共鳴法に対して、『有限要素法による共鳴周波数の計算』と『ベイズ推定による弾性定数推定』を組み合わせた新たな逆解析の手法を実装し、試料形状に制限がない超音波共鳴法を開発する。本事業では、本手法を複雑形状を持つ金属構造体に対する有効な弾性特性評価法として広く普及させるために、高温・不活性ガス環境下への拡張と弾性定数推定にかかる計算時間の短縮にも取り組む。本事業は、付加製造技術における造形条件と弾性特性の関係の解明を通じて、『部位ごとに異なる弾性異方性を付与した構造物』や『単位格子の軸方向に最大剛性方向を整列させた超高強度格子状構造物』などの斬新な構造材料の創出につながる重要な研究である。

2 研究の目的と背景

3次元の形状データから直接造形が可能な付加製造技術は、従来の加工法では不可能な極めて複雑な形状を持つ金属構造体を作製可能であることから、複雑冷却構造を持つガスタービンエンジンの高温部品やトポロジー最適化による最適構造を持つ航空機エンジン用の軽量部品といった付加価値の高い材料開発への応用が急速に進んでいる。しかし、こうした斬新な構造材料に対しては、形状の多様性および複雑性に起因して設計にあたって必須となる弾性特性の評価方法がまだ確立されておらず、設計開発が進まない一因となっている。

そこで、本事業では、『有限要素法による共鳴周波数の計算』と『ベイズ推定による弾性定数推定』を組み合わせた新たな逆解析の手法を実装し、試料形状に制限がない超音波共鳴法を開発することで、付加製造技術により作製した複雑形状を持つ金属構造体に対して全ての弾性定数を高精度に計測可能な手法を確立することを主目的とする。また、本手法を複雑形状を持つ金属構造体に対する有効な弾性特性評価法として広く普及させるために、高温・不活性ガス環境下への拡張と弾性定数推定にかかる計算時間の短縮にも取り組む。

3 研究内容

(1) 試料形状に制限がない超音波共鳴法の開発

<http://dfm.mech.eng.osaka-u.ac.jp/wp-content/uploads/2025/05/補助事業成果報告HP用.pdf>

初めに、複雑形状を持つ金属構造体の共鳴周波数を計算するための有限要素解析ソフトウェアの選定を行った。候補はAnsys、Abaqus、Comsolの3種類とし、トライアルライセンスなどを利用して各ソフトウェアを吟味した。費用・計算速度・Matlabとの整合性などの観点から本研究ではComsolを使用するとした。次に、申請者が所有する既存の逆解析プログラムを基にして、Comsolにより計算した共鳴周波数を計測値と比較し、これらが十分に一致する各弾性定数の値を最小二乗法により求めることにより、試料の弾性定数を決定するプログラムを構築した。その後、共鳴周波数の値に基づいてベイズ推定により試料の弾性定数推定を行うプログラムを作成し、本プログラムを構築済みの逆解析プログラムに組み込むことにより、超音波共鳴法により複雑形状を持つ金属構造体の弾性定数を計測するための逆解析プログラムを構築した(図1)。本逆解析プログラムを用いて、付加製造技術により作製した多角形状を持つステンレス鋼構造体に超音波共鳴法を適用し、従来の超音波共鳴法(直方体などの規則形状を持つ試験片に対してのみ適用可能)と同程度の精度で不規則形状を持つステンレス鋼構造体の弾性定数を決定可能であることを確認した。また、ベイズ推定を利用することにより、多角形状を持つステンレス鋼構造体の振動モードを正確に同定可能であることを確認した。

本研究で構築した複雑形状を持つ金属構造体に対する逆解析プログラムは従来のプログラムと比較して弾性定数の推定にかかる時間が長いという欠点がある。本研究で用いた有限要素法とベイズ推定は並列計算により計算時間を短縮することができるため、本計算専用の並列計算機を研究室内に構築した。この計算機を用いることで、多角形状を持つ多結晶材料に対しては従来の逆解析プログラムと同程度の計算時間で弾性定数を推定可能であることを確認した。

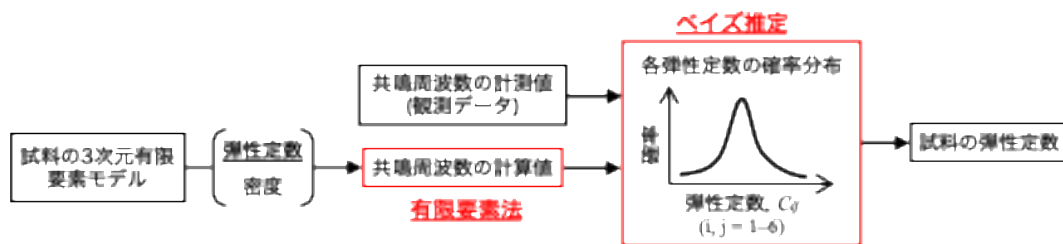


図1 逆解析手法の概略図

(2) 高温・不活性ガス環境下への拡張

<http://dfm.mech.eng.osaka-u.ac.jp/wp-content/uploads/2025/05/補助事業成果報告HP用.pdf>

試料形状に制限がない超音波共鳴法を高温環境下に拡張するために、高温環境下用超音波共鳴法計測装置を構築した。片端に圧電体を取り付けた2つのアルミナ棒で試料を挟み

込む従来の計測装置では、試料の共鳴ピークだけでなくアルミナ棒自体の共鳴ピークも顕著に観測されるため、温度変化に伴いこれらが重なり合い、試料の共鳴ピーク周波数（共鳴周波数）と共鳴ピークの半値幅（内部摩擦）の測定精度が低下する。この問題を解決するために、本研究では片側に棒型探触子を取り付けた二本の石英ガラス針と片端をスポット溶接した熱電対から構成される三点支持体の上に試料を設置する三点支持型の計測装置を構築した。この測定系では石英ガラス針自体の共鳴ピークは大幅に抑制されるだけでなく、試料に保持力が働かないため、理想的な自由振動を励起することができる。従って、従来の計測装置よりも高精度に共鳴周波数と内部摩擦の温度依存性を計測することができる。この三点支持型センサを炉体開閉式の縦型電気管炉と組み合わせることにより、最大1400 Kまで共鳴スペクトルを測定可能な高温環境下用超音波共鳴法計測装置を構築した(図2)。

温度校正および装置の検証を行うために、構築した高温環境下用超音波共鳴法計測装置を用いて人工単結晶水晶に対して室温から880 Kの温度域で共鳴スペクトルを取得した。単結晶水晶は846 Kにて構造相転移に起因する弾性・非弾性異常を示すため、共鳴スペクトルから得られた弾性特性(共鳴周波数の2乗)および非弾性特性(内部摩擦)の温度依存性から弾性・非弾性異常が生じる際の実測温度を決定し、計測装置の温度校正を行った。本装置を用いて計測した弾性特性と非弾性特性の変化挙動は過去に報告されている挙動と概ね一致しており、本装置の有効性を確認した。超音波共鳴法を用いて付加製造技術により作製した複雑形状を持つ金属構造体の弾性特性を精密に評価するためには、多数の共鳴ピークを含む幅広い周波数域の共鳴スペクトルを細かい温度刻みで測定する必要があるため、一連の計測を行うのに多くの時間がかかる。この課題を解決するために、高温環境下における共鳴スペクトルの測定を全自動で行うための計測制御プログラムも構築した。

本事業では本手法を不活性ガス雰囲気下に拡張するには至らなかったため、高温環境下用超音波共鳴法計測装置と開閉式縦型電気炉が一式設置可能な真空チャンバーを作製し、不活性ガスで置換した状態で本手法による弾性定数計測を可能にすることが今後の課題である。



図2 高温環境下用超音波共鳴法計測装置

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

任意の形状を持つ試料に対して全ての弾性定数を高精度に計測可能な手法の確立は、付加製造技術により作製した複雑形状を持つ金属構造体の弾性特性の系統的な評価を可能にする。

これにより、付加製造技術の造形条件と弾性特性の関係を明らかにすることで、『部位ごとに異なる弾性異方性を付与した構造物』や『単位格子の軸方向に最大剛性方向を整列させた超高強度格子状構造物』などの斬新な構造材料の創出につながる。また、本手法の高温環境下への拡張は、付加製造技術により作成した金属構造体を高温部材へ適用するための一助になる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

補助事業者はこれまで超音波共鳴法を用いた機能性材料の弾性・非弾性特性の精密計測に取り組んできた。付加製造技術により作製した複雑形状を持つ金属構造体に対する弾性特性評価法として試料形状に制限がない超音波共鳴法の開発に取り組む本研究は、補助事業者がこれまで専門的に利用してきた超音波共鳴法の汎用性を高めるものであり、補助事業者の今後の研究の発展に大きく寄与するものである。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

1. **足立 寛太**, 高橋 渚叶, 脇 裕之, 試料形状に制限がない超音波共鳴法の開発, 第84回応用物理学会秋季学術講演会, 2023年9月22日
2. 大槻 諒, **足立 寛太**, 黒須 信吾, 脇 裕之, ラティス構造を持つ SUS316L ステンレス鋼積層造形材の強度及び弾性特性, 第84回応用物理学会秋季学術講演会, 2023年9月21日

7 補助事業に係る成果物

- (1)補助事業により作成したもの 2024年度JKA研究補助 成果報告書

<http://dfm.mech.eng.osaka-u.ac.jp/wp-content/uploads/2025/05/補助事業成果報告HP用.pdf>

- (2)(1)以外で当事業において作成したもの

該当なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻(オオサカダイガクダイガクインコウガクケンキュウカキカイコウガクセンコウ)

住 所: 〒565-0871(半角)

大阪府吹田市山田丘2-1

担 当 者 助教 足立寛太(アダチカンタ)

担 当 部 署: 機能材料力学領域(キノウザイリョウリキガクリョウイキ)

E - m a i l: adachi@mech.eng.osaka-u.ac.jp

U R L: <http://dfm.mech.eng.osaka-u.ac.jp>

<http://dfm.mech.eng.osaka-u.ac.jp/index.php/member/adachi/>