	領域代表者	東京大学・大学院工学系研究科・准教授 山田 崇恭（やまだ たかゆき） 研究者番号:30598222
	研究領域情報	領域番号：23B201 研究期間：2023年度～2025年度 キーワード：形状設計、トポロジー最適化、偏微分方程式、数理モデル

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

本領域は、機械工学分野と数学分野の研究者の有機的な連携に基づいて、最先端の数学を駆使した形状設計に対する新しい学理「形状設計数学」を提唱する。具体的には、機械工学分野に関する形状設計問題に対して、「ボトムアップ方式」、「トップダウン方式」、「ミドル・アップダウン方式」による形状設計モデリング手法を、数学と力学に立脚して開発することを研究の目的とする。これにより、数学を基軸とした形状設計モデリングの体系基盤を構築する。

このような学理が構築できれば、形状の幾何学的特徴と各力学的特性の関係性に対する定量的評価が可能となるため、力学と数学に立脚しながら、真に革新的な機械製品やデバイスの形状設計が実現する。これにより、機械工学を中心とするものづくり関連分野に大きな変革をもたらす。

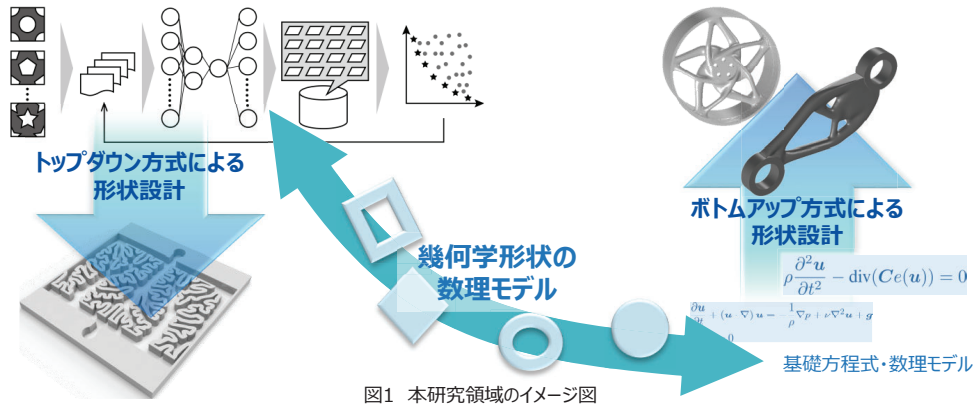


図1 本研究領域のイメージ図

●研究の位置づけ

機械工学分野は、流体力学、熱力学、材料力学及び機械力学を基盤としたものづくりに関する学問分野である。新しい付加価値や機能を持つ機械製品の設計には、力学を基盤とする形状設計モデリングが必要不可欠であるが、特定の力学的特性のみに注目した設計には限界がある。例えば、ミクロスケールの力学的特長を最大限に活用したデバイス形状設計には、均質化形状設計モデリングが必要である。また、力学的見地から本質的に意味のある設計形状パラメータの明確化がなければ、真に理想とする形状設計は不可能である。

他方、昨今の計算機性能の飛躍的向上に伴い、数値解析や機械学習を利用したデジタル設計技術が注目を集めている。しかしながら、各力学分野において、解析手法や設計法の研究が行われているものの、ミクロ形状設計からマルチフィジクス形状設計までを包含した体系的な形状設計モデリングに関する研究は、ほとんど行われていない。また、各力学分野は、共通する数理構造を有しているものの、それらを体系的に整理し、機械工学における形状設計問題の統一かつ体系的な数理的基盤構築には至っていない。そのため、各力学分野と数学の知が有機的に連携した形状設計モデリング手法の体系化が行われておらず、真に革新的な機械製品を創成するための設計論の確立には至っていない。

●領域の目的

本領域では、機械工学に関する形状設計問題に対して、数学を基軸とする形状設計モデリングの体系化を目指す。具体的には、線形近似が成立する設計問題と、非線形性が支配的な設計問題に大別する。前者に対しては、漸近解析を始めとする解析的手段に基づくボトムアップ方式の形状設計モデリング手法、後者に対しては、情報幾何学に基づくデータ駆動によるトップダウン方式の形状設計モデリング手法を開発する。また、設計問題毎に真に有用な幾何学的特徴を持つ設計形状パラメータを同定し、幾何学的特徴を基軸とする両モデリング手法の有機的な連携を可能とする手法（ミドル・アップダウン方式）を開発する。これらの手法により、各力学的特性に対するモデルと幾何学的特徴量の関係性の定量的評価を可能とする「力学－幾何学統合型の形状設計の数理」を構築する。

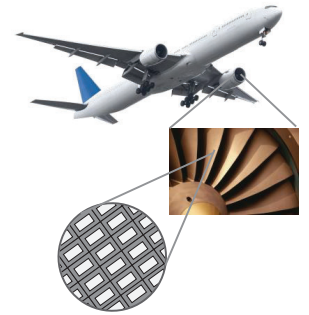


図2 様々なスケールの形状設計問題

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●A01：ボトムアップ方式

線形近似が可能な設計問題に対して、数理解析的手段を駆使した形状設計モデリング手法を開発する。具体的には、これまでに基盤構築を行ってきたスカラー楕円型方程式に対する漸近展開法やトポロジー導関数を始めとする発展的感度解析法の方法論を出発点として、ベクトル楕円型方程式及び時間発展問題への拡張を行う。さらには、曲がった形状における均質化法と、A02班と連携しながら、機械学習への応用を念頭においた離散ラプラシアンランダム行列理論の観点を用いた曲がった形状の漸近解析を行う。また、A03班と連携し、幾何学的特徴に対する偏微分方程式と連成する形状設計問題に対する数理基盤構築し、幾何学と解析学を基軸とした一元的に設計評価が可能な設計数理モデル系を構築する。

●A02：トップダウン方式

数理解析的手段が困難な非線形現象が支配的な設計問題に対し、情報幾何学を駆使したデータ駆動型の形状設計モデリング手法を開発する。さらには、機械学習に基づく生成モデルと、高設計自由度の最適探索法の方法論の有機的な統合により、設計解空間上において網羅的な探索を可能とし、複雑な形状設計問題であっても所望の設計解を間接的に導き出すことを可能とする。また、A03班と連携し、幾何学特徴量を基底とする形状設計問題とのマルチフィジクス形状設計問題として定式化を行い、A01班による数理解析的手段による形状設計問題との有機的な連携を可能とする。そして、非線形性が強い流体構造設計問題を対象としたケーススタディを通じた形状設計モデリング手法の有効性と妥当性の検証を行うと共に、A03班及びA01班と融合した形状設計モデリングの構築と比較検証を行う。

●A03：ミドルアップダウン方式

形状設計解の幾何学的特徴を包括的な評価を可能とする数理モデルを構築すると共に、各形状設計問題及びその生産までをシームレスに繋ぐ包括型形状設計モデリング手法を開発する。具体的には、幾何学と解析学を基軸にして一元的に評価可能な数理モデル系を構築し、A01班及びA02班で構築する各モデルに対して、本質的に有用な設計変数の設定方法を開発する。さらには、生産工程まで考慮した設計モデリングとするために、幾何学的条件に基づいて、各形状設計モデルを数理的に統合する手法を、空間に対する偏微分方程式を用いて定式化を行う。そして、ケーススタディを通じた検証では、A02班と連携しつつ、主に設計から生産までのモデリング手法としての有効性の検証を担当する。