

審査の結果の要旨

氏名 金子 栄樹

橋梁や航空機翼のフラッタ現象に代表される流体構造連成 (Fluid-Structure Interaction: FSI) 現象は、構造物の振動を誘起し、疲労寿命に影響を及ぼすだけでなく破壊的な状況に導くこともあるため、FSI 現象の制御は長年の工学における重要課題のひとつである。従来、FSI 現象の制御問題は、揚力面理論に基づく低自由度の空力弾性モデルを用いて取り組まれてきた。しかし、この方法はポテンシャル流れ、微小変形、調和振動など多くの仮定のもとに成立しているため、構造物の大変形や、境界層や渦の剥離といった粘性に起因する効果などの多様な非線形性を考慮できないという課題があった。これに対して、大規模自由度問題を対象として、流体及び構造共に詳細モデルを用いる詳細 FSI 解析に制御システムを統合した高精度の流体構造制御連成 (Fluid-Structure-Control Interaction: FSCI) 解析を行うことにより、複雑形状や様々な非線形性の考慮が可能になると考えられる。このアプローチは、計算コストの増大を招くものの、近年の計算機性能の向上や並列計算技術の進歩を鑑みれば、その実現可能性は高まってきていると考えられる。そこで本論文では上述した方針に基づく高精度 FSCI 解析手法を新たに開発し、さらに、センサやアクチュエータのダイナミクスと宿主構造物の相互作用を考慮できる高精度 FSCI 解析手法も開発した。そして開発した FSCI 解析手法を、従来の手法では扱えないような複雑な FSI 現象の制御問題に適用し、その有効性を示した。本論文は7つの章から構成される。

第1章では、本研究の背景、目的及び論文の構成について述べている。

第2章では、分離反復型 FSI 解析をベースに、まずアクチュエータ、センサのダイナミクスを考慮しない FSCI 解析手法を構築した。ここでは、制御ルーチンを陽的並びに陰的に扱う場合の2種の解析手法を提示した上で、1自由度の構造制御連成問題の安定性解析を行うことにより、それぞれの特徴を明らかにするとともに、陰的手法が精度的に優れることを示した。

第3章では、前章で開発された FSCI 解析手法を、古典的なフラッタ制御問題に適用し、その性能検証を行った。揚力面理論に基づく低自由度モデルをベー

スに根軌跡法によって導出された制御則を、本 FSCI 解析手法に基づく詳細シミュレーションによって検討し、期待される制御効果を示すか調査した。その結果、フラッタの振動モードの一致、及び制御によるフラッタ限界速度の改善に関して定量的な一致も確認され、本解析手法の妥当性が示された。

第4章では、ホストストラクチャとセンサ、アクチュエータのダイナミクスの相互作用が無視できない場合を想定し、具体的な素子として圧電素子を選び、その有限要素モデルの定式化、及びそれをアクチュエータとセンサとして用いる際の境界条件の設定方法について説明している。さらに FSI 解析にこの有限要素モデルを統合し、圧電素子モデルが統合された FSCI 解析システムを開発した。

第5章では、前章で開発された解析手法を複数の数値解析例適用し、その妥当性を示した。これらの解析により、流体と構造物の相互作用が正確に考慮できていること、センサ、アクチュエータのモデリングが妥当であること、さらにフィードバック制御系が正しく機能していることが示された。

第6章では、本 FSCI 解析手法の有効性を示すために、複雑な非線形性が関係する制御問題としてエネルギーハーベスタのためにある程度の振動を許容したリミットサイクル振動の制御問題に適用した。まず、圧電エネルギーハーベスタモデルの考慮とアクチュエータの消費電力量の算出のために、第4章で開発された FSCI 手法に回路システムを陰的に組み込んだ。次に、数値解析例を通じて、減衰や電力といった制御システムの詳細な定量評価が、開発した FSCI 解析手法により可能である、ことを示した。

第7章では結論が述べられている。

以上を要するに、本研究では、はじめに、FSCI 問題に対して従来用いられてきた簡易数理モデルでは、より複雑化する現実の FSCI 現象を捉ええることができず、よって扱うことのできる制御問題に大きな制約がある、という問題提起を行った上で、その課題解決のために大規模自由度を用いた詳細 FSCI 解析手法を構築し、丁寧な妥当性の検証を行うとともに、有用性を実証した。さらに、流体、ホスト構造物、圧電素子、制御、そして回路といった様々コンポーネントが相互作用する複雑系を扱っており、多分野横断のマルチフィジクスシミュレーション研究という点においても、システム創成学分野の研究として価値が高い。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。