

審査の結果の要旨

氏名 篠原 主勲

飛行機、タービン、船、配管などは、日常生活に必要な基幹製品であり、技術革新による代替製品の開発が困難である。そのため我々は今後もこれらの基幹製品を用いる必要がある。数世代にわたって蓄積された技術資料により、製造元企業は安全性・信頼性改善のために乗り越えるべき技術的課題や、社会的ニーズ（社会が要求する付加価値）を明確に把握している。製品開発の優位性を保つため、既存製品の需要の促進と技術的課題の解決がスピーディに要求される。そのため、需要と技術的課題を定量的に数値化し、その数値を最大限に引き出すため、設計仕様が特性、信頼性、低コスト性の三大要因を同時に満たされた合理的な製品開発設計が要求されている。本研究は、流体中に置かれた構造物の抗力低減化を実現する形状最適化を対象とするものである。

形状最適化手法は、遺伝的アルゴリズムに代表されるような確率論的手法と感度解析に基づく決定論的手法とに大別される。確率論的手法は、設計変数の数が増加するにつれて、評価関数の勾配、すなわち感度を求めるために必要な支配方程式の計算回数が増大する。一方、決定論的手法、とくに随伴変数法は、一回の支配方程式群の解析ですべての設計変数に対する感度を求めることができるという特長があり、本研究の対象とする問題の最適化アプローチとして適当である。しかしながら、流体中に置かれた構造物の形状最適化問題に随伴変数法を用いた場合には、評価関数がたびたび収束しないなどの問題点があった。

本研究では、ある時間幅に対して、非定常流れ場でもロバストに最適解に収束可能とする随伴変数法を構築した。そして、有限要素法によるラグランジュ方程式の離散化、メッシュ大変形を許容する重調和方程式、流体の安定化手法、などの要素技術と組み合わせることにより、随伴変数法に基づく形状最適化アルゴリズムを実装し、適用事例を通じてその有効性を示した。

本論文は8個の章から構成されている。第1章では、形状最適化の必要性および形状最適化の分類が述べられている。形状最適化で重要となる感度解析の進展とその適用例が詳細に述べられている。

第2章では、随伴変数法を定式化するために、詳細に変数を定義し、状態方程式、随伴方程式、感度方程式からなる随伴変数法による感度解析の手順が示されている。このとき、従来の定式化では議論されていない、最適化計算の時間幅の条件および随伴方程式の境界条件をラグランジュ関数の停留条件より導出した。

第3章では、支配方程式群の有限要素法による離散化が述べられている。すなわち、原始変数に基づくナビエ・ストークス方程式の分離型解法であるFractional Step法を随伴方程式へ適用し、状態変数、随伴変数を求めたのちに、これらの変数から感度方程式により感度を計算する方法が述べられている。

第4章では、随伴変数法による感度解析から形状を変形するために必要となる形状最適化のいくつかの要素技術が述べられている。形状最適化で問題となる“最適解の探索方法”、“物体の体積の保持”、“メッシュの変形技術”、“物体の表面の平滑化”、“流体解析の安定化”からなる形状最適化で特に重要となった問題点を挙げ、そのひとつひとつに対して解決方法が述べられている。これにより、メッシュ変形の不安定性の要因となる高解像度、流体解析の不安定性要因となる高速流での極めて厳しい計算条件下でもロバストに計算可能としたことが示されている。

第5章では、状態変数、随伴変数、感度が複雑に絡み合う随伴変数のプログラム開発を効率的に進めるために、並列化、線形ソルバー、ファイルI/OなどからなるプログラムライブラリであるHPC-MWを用いることで、随伴変数法によるプログラム開発可能とし、期間を劇的に短縮したことが述べられている。

第6章では、上記のアルゴリズムにより、ストークス流れのもとで円柱形状の最適化計算を実施したところ、従来の最適形状とはほぼ一致し本研究の有効性が確認されたことが述べられている。さらに、その手法を、ナビエ・ストークス方程式を用いたレイノルズ数100、250、1,000の非定常状態に適用したところ、おむすび形状、弾丸形状などに安定に最適形状に収束し、評価関数である表面力を低減化できたことが述べられている。

第7章では、より現実的な状況を想定し、曲がり管に対して随伴変数法による形状最適化手法を適用することで、構造物の表面力を低減する配管形状が構築できることが述べられている。初期形状と比較して曲がり部が丸みを帯びた最適な形状を構築することで評価関数を9%低減していること示されている。

以上より、本研究は、流れ場に置かれた物体の形状最適化問題において、新しい基本原理の確立に寄与し、その原理を用いた大規模流体シミュレーション技術は、工学一般の内部流れ等の科学的データの蓄積等にも寄与するものであり、広くその知見を開示することは技術貢献に値する。

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。