

## 審査の結果の要旨

氏名 南 さつき

流体-構造連成 (Fluid-Structure Interaction; FSI) 解析は近年原子力工学や生体工学など多くの工学分野で研究され、人工物の設計や現象の理解に利用されている。特に、より高精度な解を得るために、様々な並列計算機に適した大規模FSI解析手法の開発が課題となっている。FSI問題の解析手法は、分離型解法と一体型解法の二つに大別され、分離型解法の中でも逐次互い違い法と分離反復型解法に分けられる。分離反復型解法は既存のコードを利用することで効率的に大規模並列解析が実現でき、また多種多様なFSI問題に適用できるという特徴を有する一方で、流体・構造間に強い連成効果を有する問題では数値的不安定になりやすく、安定性に影響を与えるパラメータも多い。また、一体型解法は高精度かつ安定な解法として知られており、連成効果の強い問題に用いられる一方で、効率的な大規模並列解析の実現が困難とされており、問題ごとにコーディングを行う必要もある。このように分離反復型解法、一体型解法のいずれにおいても、大規模FSI解析における安定性、効率性の観点で未だに課題が残っているといえる。

本論文では大規模FSI解析に適した効率的な解法の提案および開発を分離反復型解法と一体型解法の両面から行った。分離反復型解法と一体型解法のそれぞれの特徴を活かすことで、より幅広い問題に対応できる大規模FSI解析ソルバの実現を目的としている。本論文は7つの章から構成される。

第1章は序論であり、大規模FSI解析の必要性について述べている。また、分離反復型解法と一体型解法の現状と課題についてまとめ、本研究の目的を述べている。

第2章では、本研究で考慮するFSI問題の支配方程式とその離散化式について述べている。具体的には、非圧縮粘性流体-大変形構造連成問題およびアコースティック流体-構造連成問題の二つの問題を扱い、前者は分離反復型解法を、後者は一体型解法を適用することを念頭に離散化を行っている。

第3章では、FSI解析手法の主な分類についてまとめ、各手法のメリット・デメリットを述べている。また、分離反復型解法と一体型解法に焦点をあて、既往研究についてサーベイすると同時に、大規模FSI解析を効率的に実施する上でそれぞれの解法が抱える問題点を示すことで、本研究で提案・開発する解法が有するべき特性を明確にしている。

第4章では、大規模汎用FSI解析に適した分離反復型連成アルゴリズムの提案について述べている。具体的には、大規模汎用FSI解析に適した非線形アルゴリズムを数種類選定し、非圧縮粘性流体-大変形構造連成問題において様々な連成パラメータを変化させながら

性能比較を行っている。数値実験の結果、Broyden 法+Backtrack2 直線探索の組み合わせが比較的連成効果の強い問題でも安定・高効率で、連成パラメータの種類に依存しにくい分離反復型解法として提案できたとしている。

第 5 章では、大規模アコースティック FSI 解析に適した一体型解法の開発について述べている。具体的には、balancing領域分割法をアコースティック流体-構造連成問題に適用し、その過程でいくつかの定式化を示している。相互比較の結果から NN (Neumann-Neumann) 前処理に NN-I (incomplete Neumann-Neumann) 前処理、コースグリッド修正に CGC-FULL (full Coarse Grid Correction) を用いた解法が最も良い性能を示し、その解法は流体の付加質量や自由度数によらず高速で安定に収束することが分かった。また、並列環境でコース行列が大規模になるような問題ではコースグリッド修正に CGC-DIAG (Coarse Grid Correction with Diagonal scaling) を用いる解法も有効になる可能性があることが示唆された。

第 6 章では、上記の一体型解法 (NN-I+CGC-FULLおよびNN-I+CGC-DIAG) の、階層型領域分割法に基づく並列化実装について述べている。並列化効率・スピードアップ率などの性能検証を通し、これらの一体型解法は高い並列性を有することが確認された。また、1 千万自由度程度の比較的大規模な問題の解析を通し、計算時間の点においても高速であることが示されている。

第 7 章は結論であり、提案・開発した分離反復型解法および一体型解法のまとめと、大規模 FSI 解析における有効性について述べられている。

以上を要するに、本論文では、従来の分離反復型解法と一体型解法の大規模 FSI 解析における問題点をそれぞれ指摘し、それを解決するための解法を提案・開発している。また、数値実験を通して提案・開発手法の高い安定性および効率性を示すと同時に、大規模連成解析への有用性を議論しており、これらの解法を、数千万～数億自由度を有する原子炉内構造物の丸ごと地震応答問題などといった実用的な問題に適用することも可能であり、システム量子工学における本論文の価値は高いといえる。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。