

論文の内容の要旨

論文題目： 分離反復型解法に基づく大規模並列流体構造連成解析

氏名 片岡 俊二

1. 序論

流体-構造連成現象は重要な構造物の破損や性能低下につながるため、数ある連成現象の中でも工学上重要な現象と考えられる。このためこれまでの数多くの研究が行われ、工学的に重要な構造物に対してはそのメカニズムはある程度明らかにされている。しかしながら複雑で大規模な構造物の連成現象を実験的アプローチだけで把握することには限界がある。また昆虫や鳥の羽ばたき現象などに代表される自然現象においては、流体-構造連成の効果が様々な場面で有効に活用されていると考えられているが、充分定量的には把握されていない。このような連成現象を把握し、人工物の設計に反映させていくためには実験や理論に加えて、数値シミュレーションの活用が期待されている。

連成現象の解法は、その支配方程式の解き方として大きく一体型解法と分離型解法に分けることができる。一体型解析手法が比較的強い連成の効果を安定的に解析できると知られているが、特に大規模な構造問題を扱う場合などに効率的な前処理プログラムを新規に開発しなければならない。一方で分離型解法に時刻内反復を行い各時刻ステップでの平衡解を求める分離反復型の連成解法を適用することで、一体型解法と同等の精度の解析を実施しかつ、大規模構造解析の既存の資産を活用した解析が可能である。

このように分離反復型解法に基づく連成解析手法は様々な問題への適用が期待されてきたが、既存の並列解析コードを最大限に活用することを前提とした分離反復型連成解析のためのプラットフォーム開発とその実問題への適用はこれまで行われてこなかった。本研究では分離反復型の連成解法に着目し、既存の大規模並列ソルバを活用することを念頭に置いた並列連成解析プラットフォームの構築とその応用を目的とする。

2. 流体-構造連成方程式の分離型解法

本研究で取り扱う音響流体-構造連成解析および非圧縮性粘性流体-構造連成解析の二つの方程式系について、その基礎方程式および連成界面の条件から連成の方程式を導出した。ここで、連成界面上の自由度における残差を定義することで連成方程式を非線形方程式の

形に書き表すことで分離反復型アルゴリズムの適用が可能な形に表した。

3. 連成解析システムの開発

分離の連成解析において精度のよい連成解析を行うためのアルゴリズムは様々なものが提案されている。本研究では並列環境下で良好な収束性を示すアルゴリズムとして準ニュートン法の一つである **Broyden** 法を適用する。また、連成現象の非線形性に起因する解の発散を抑制し解析のロバスト性を高めるための **Back track** アルゴリズムを適用する。本手法を並列連成解析向けに開発された **ADVENTURE Coupler** に実装することで、既存の並列解析コードと組み合わせ、様々な連成解析を実現するためのプラットフォームを示した。

4. 音響流体-構造連成解析

原子炉燃料集合体や熱交換機などの棒あるいは管群の地震時の応答は構造物の安全性を担保するために非常に重要であり、液中に設置された場合の液体の応答に対する液体を定量的に把握するため、3次元の連成解析による評価手法の構築が期待されてきた。この現象を定量的に解析するために、本研究で開発されたプラットフォームを元に構造領域に **ADVENTURE_Solid**, 流体領域に **ADVENTURE_Thermal** を採用した分離反復型連成解析システムを構築した。

本システムを、音響流体-構造連成問題に適用しその精度の検証と並列環境での効率を検証した。まず、液中におかれた棒のステップ応答の問題に対して液体の密度をパラメータに解析を行い、一般的に収束を得ることが困難であるといわれる付加質量の大きな解析ケースを含めたすべてのケースで安定にかつ一体型解法と同様の応答が得られることを確認した。次に、棒の数を増加させることで、解析自由度および流体-構造連成界面上の自由度を増加させた場合の並列環境下での計算時間と、大規模問題において並列数を増加させた場合の計算時間を調べた結果、開発されたシステムは各コードの並列環境下における性能を十分に発揮し効率的に解析を実施できていることが確認された。

本解析コードを **BWR** 型原子炉燃料集合体の模擬実験モデルに対して適用した。結果、本システムの適用によって大規模な棒群をもつ実験結果を再現できるとともに、実験では把握しきれなかった **BWR** 型原子炉燃料集合体の挙動について新しい知見を得ることができた。

5. 非圧縮性粘性流体-構造連成解析の羽ばたき飛行への適用

昆虫の羽ばたき飛行現象とそこでの流体-構造連成の効果解明は **MAV (Micro Air Vehicle)** への応用が期待される流体-構造連成現象である。本システムの羽ばたき飛行への適用性を示すため、構造領域に **ADVENTURE_Solid**, 流体領域に **ALE** 法に基づく定式化

を採用し、領域の大変形を伴う流れ場を解析するための疑似弾性体メッシュスムージング機能を備えた **Front Flow / Blue** の四面体要素版の改良版を用いて、分離反復型連成解析システムを構築した。

本システムの妥当性を確認するため、円筒内に設置された円柱の振動問題の解析を行い、解析解および **Nomura** らの数値解析結果とよく一致することが確認された。また、流体-構造連成のベンチマークとして取り上げられることの多い **Fin** 付角柱まわり流れの解析を行い、過去の数値解析結果と同等の結果が得られることを確認した。これにより流体-構造連成の影響を表す指標として重要な付加質量および付加減衰を適切に評価できていることが確認できた。

最後に本システムを 3 次元の羽ばたき問題の解析に適用し、弾性翼の羽ばたき現象の解析に本解析システムが適用可能なことを示した。剛体翼結果との比較を行い、翼の弾性変形がその揚力および抗力に与える影響を確認することができた。

6. 結論

大規模な流体-構造連成解析の実現とその応用を目的とし、**ADVENTURE_Coupler** に分離反復型解法を実装し、既存の大規模並列ソルバを用いた連成解析プラットフォームを構築した。本プラットフォームを音響流体-構造連成問題に適用し、並列計算時の性能検証を行った。次に、大規模な音響流体-構造連成解析の例題として、原子炉圧力容器内燃料集合体の大規模な連成解析を行い、その応答に関して新たな知見を得た。同プラットフォームを非圧縮性粘性流体-構造連成問題に適用し精度の検証を行った。流体領域の大きな変動を伴う人工飛翔体の羽ばたき飛行の解析が本プラットフォームを用いて安定的に解析可能であることを示した。

以上より、幅広い連成現象を捉えることのできる汎用的な **FSI** 解析の手法・枠組みを構築し分離反復法に基づく連成解析の性能評価と実現象への応用を達成した。