論文の内容の要旨

論文題目　流体構造連成現象の大規模並列解法

氏名　石原大輔

1. 序論

通常，構造物は何らかの形で流体と接しており，大なり小なり，両者の間には連成が生じる．従って，構造物の複雑化・多様化が急速に進む中，これまであまり省みられなかった流体構造連成現象を高精度に予測し，設計に反映させることが望まれている．本研究においては，非圧縮性粘性流体と有限変形を有する弾性体の連成現象を取り扱う．ここで有限変形を考慮するため，弾性体の幾何学的非線形を考慮する．但し，弾性体の微小歪みを仮定する．流体単独での解析の場合と同様に，流体構造連成解析においても，流体解析に関する高い空間解像度が要求される．

流体構造連成解析法は大きく強連成法，弱連成法，それらの中間的な手法（混合連成法）に分類でき，それぞれ得失を持つ．本研究では，弾性体の有限変形や流体や構造の物性値の設定によらず，性能が安定な強連成法を用いる．強連成法においては，近年，膜の構造座屈を含むような流体構造連成問題に適用されるようになってきたが，その一方で，強連成法の並列化手法やその大規模問題への適用に関する研究はあまり見当たらない．

以上の背景の元に，本研究においては，非圧縮性粘性流体と有限変形を有する弾性体の連成現象において，流体側に要求される解析規模が構造側に要求される解析規模に比して大きく，その結果として，解析規模が大規模化する問題に適した解析手法を構築することを目的とする．

2. 非圧縮性粘性流体と幾何学的非線形性を有する弾性体の連成現象に対する従来的な強連成解法

非圧縮性粘性流体と有限変形を伴う弾性体の連成現象に対する従来的な強連成解法を構築し，大規模解析へ展開する際の鍵となる連立一次方程式の反復解法の適用性を議論するために，この従来的な強連成解法の特徴を代数的な観点から明らかにする．

流体と構造の平衡方程式をそれぞれ有限要素離散化することで得たマトリクス形式の非線形方程式を増分形式で表し，境界面における連続・平衡条件式を用いることで，境界面の自由度をマージし，増分形式の連成系運動方程式を得る．ここで流体の移動境界を取り扱うため，Arbitrary Lagrangian Eulerian(ALE)法を，構造の有限変形を取り扱うため，Total

Lagrangian 法を用いた．構造に関しては Newmark 法で，流体に関しては一般化台形則で，未知変数を加速度増分のみに減じることで，連成系の加速度増分に関する連立方程式を得る．連成系運動方程式の動的解析手法としては，陰解法と陽解法の相互の長所を利用した解法として知られる Predictor-multicorrector algorithm (PMA)を用いる．

以上によって得られた連成系方程式の代数的特徴を一言で述べると，係数行列の非正定値・非対称／対称性，である．非正定値性は流体の非圧縮性条件から生じる．また非対称／対称性は連成系運動方程式の動的解析手法において，移流項の取り扱いが陰的か陽的かに応じて決まる．従来的な解法の特徴は，上述の特徴を有する連成系方程式を直接解くことにある．

3. 多段階強連成解法

大規模解析においては，計算負荷の観点から，反復解法が有利である．従来的な強連成解法では，近年，発展してきた非正定値・非対称／対称性用のソルバーが適用可能である．しかしながら，その話題に関する研究はほとんど見当たらないようである．一方，本研究では，連成系方程式の代数的な性質をより好ましいものに改善する分離型解法のアプローチをとる．まず従来的な強連成解法の代数的な特徴が非圧縮性条件に起因していることに注目し，その処理手法(連成系のための修正流速圧力分離)を提案した．連成系のための修正流速圧力分離は，非圧縮性粘性流体における流速圧力分離を連成系に拡張したもので，

(1) 弾性体内部自由度の縮約(reduction),
(2) 縮約を施した連成系方程式に対する流速圧力分離,

からなる．計算効率の観点から，流体の移流項と粘性項を動的解析手法の中で陽的に取り扱うことで，(1)+(2)から，正定値対称の連成系流体圧力ポアソン方程式を導出した．提案解法では，連成系流体圧力ポアソン方程式による流体圧力増分の求解，流体加速度増分の求解，弾性体内部自由度に関する加速度増分の求解という 3 段階の過程を経る．本研究においては，これを多段階強連成解法と呼ぶ．提案解法の利点は，

- 解くべき連立一次方程式の元数が圧力自由度分に低減されること，
- 連立方程式の流体内部自由度に関する部分が，非圧縮性粘性流体における通常の分離型解法と同じ形の式になること，
- 共役勾配法が利用できること，

である．一方，欠点は，

- 境界面自由度に関して，フルマトリクスの逆行列が現れるため，構造解析規模に制限を持つこと，

である．

提案解法の精度検証は次のように行った．提案解法は，狭い流体中で微小振動する剛体の梁を両端が剛性の低い弾性体，それ以外が剛性の高い弾性体として，若干特殊なモデル化をすることで解析した．解析結果を剛体-非圧縮性粘性流体連成問題に対して，その精度が検証された Nomura-Hughes の解法と比較し，高々10%の相違で付加質量係数と付加粘性係数が良く一致することを確認した．

次に，広い流路内で一端を固定された梁がもう一端にステップ荷重を受けて振動する問題に対して，弾性体が有限変形する場合と微小変形する場合とで，連成現象にどのような違いが現れるかを確認した．解析には約 1 万節点の有限要素モデルを用いた．その結果，弾性体が有限変形する場合，微小変形の場合では見られなかった複数の渦が見られ，両者で流れ場の様相がかなり異なることを確認した．

4. 並列強連成解法

本研究においては，データとそれに対する演算が各 Processor Element (PE)に局在化しているため，現在の並列計算機の主流である分散メモリ型並列計算機に適した有限要素法の並列化手法である領域分割法に注目する．領域分割法に基づく並列解法には様々あるが，本研究では，解析手法の構成に大きな変更を必要とせず，計算負荷の観点から大規模解析に有利な領域型並列 CG 法に注目し，これと 3 で提案した多段階強連成法を組み合わせることで，並列強連成解法を提案した．まず流体解析規模が弾性体解析規模よりかなり大きいという仮定を考慮して，弾性体メッシュ領域とそれに接する流体メッシュ領域を領域 S とし，これ以外の流体領域を F とし，さらに領域 F を適当に領域分割する並列計算モデルを立てた．このモデルを多段階強連成法に適用した場合，PE 間通信には，流体内部自由度に関するデータしか現れないため，非常に効率的である．そこで，本研究は，この計算モデルに従い，領域型並列 CG 法と多段階強連成法を組み合わせて，並列強連成解法を提案した．

5 大規模解析への適用性

4 で提案した並列強連成解法の大規模問題への適用性を検討した．4 で示した並列計算モデルに従い，全体モデルの節点数，領域分割数，領域分割のしかたを様々変えた計 7 通りのケースについて，本並列強連成解法の並列化効率が調べられた．ここで計算環境として

PC クラスタを用いた．

並列化効率の測定結果を分析することにより，並列化効率を低下させる主要な要因として，

- 各 PE の計算時間に対する PE 間通信時間の増加，
- 各 PE 間で不均一な計算負荷，

であることが判った．前者に対しては，CG 法におけるマトリクス・ベクトル積に関する PE 間通信と内積に関する PE 間通信に分類して，分析した．その結果，各 PE が担当する解析規模が小さくなると計算時間に対する通信時間の割合が無視できなることがわかった．但し，この通信を部分的に他の計算で覆うことである程度緩和する技法を導入し，その有効性を確認した．また並列計算における同期点の存在から，最も計算の遅い PC に全体の計算時間が同期するが，計測時間からもそれを裏付けた．

上記の分析結果を元に，例えば 10 万節点の有限要素モデルの領域 F を 10 分割した例において，PC クラスタ上で，95%程度の並列化効率を達成することができた．

最後に流体領域の大規模化が流体構造連成現象の解析結果にどのような影響を与えるか調べた．問題設定は 3 と同様である．解析には，約 1 万節点(モデル 1)と約 10 万節点(モデル 2)の有限要素モデルをそれぞれ領域 F の分割数 N=4 と N=10 としたものを用いた．

梁の振動周期は両者でほとんど一致するが，その振動減衰はモデル 2 の方が若干大きいかった．空間解像度の違いにより，モデル 1 よりもモデル 2 の方が梁の先端における渦がよく発達していたことが原因と考えられる．梁の運動によって，流体側に与えられるせん断力は流体の粘性を介して渦を形成するが，逆に流体から梁に対して，粘性力が作用することとなる．

6. 結論

本研究は，非圧縮性粘性流体と有限変形を伴う弾性体の連成現象の解析において，流体側の解析規模が構造側の解析規模に比べて，通常，非常に大きくなる点に注目し，従来の強連成法とは異なるアプローチを通じて，その解決策を見出した．具体的には，

- CG 法の適用が可能な強連成法の分離型解法(多段階強連成解法)を非圧縮性条件の処理手法(連成系のための修正流速圧力分離)に基づき，新たに提案した．
- 多段階強連成法と領域型並列 CG 法と組み合わせて，並列強連成解法を，その効率性に関する評価式と共に提案した．

その結果，流体解析規模の大規模化を伴う非圧縮性粘性流体と有限変形の弾性体の連成現象に対し，非常に効率的な並列解法を開発した．