論文内容の要旨

論文題目　重合 ALE メッシュによる流体･構造連成有限要素解析に関する研究

氏名　　澤 田 有 弘

本論文は流体・構造連成問題を有限要素法によって解析する際の問題点を明瞭にし，既存の連成面追跡型 ALE 有限要素法（単一 ALE メッシュ法）による流体・構造連成解析手法を重合メッシュ化することによって改良しようとするものである．具体的には重合メッシュによって解析領域全体と弾性体が存在する領域を取り囲む局所的な領域とを分離し，それによって幾何学的な適用能力を大いに向上させた流体・構造連成解析手法を提案している．その際，流体・構造連成問題の本質的な要素と数値解析の困難さとを共に含む現象として旗のはためき問題を主要な解析対象及び研究対象とし，最終的に本格的な旗のはためき問題の数値解析が行える手法にまで成長させることを目的としている．

本論文の構成は第 1 章にて全体に対する緒言を記述し，次の第 2 章で提案手法の基礎となる連成面追跡型 ALE 有限要素法による流体・構造連成解析手法を記述している．第 3 章では二次元版の旗のはためき問題を従来型の単一メッシュ法による解析結果，及び本現象に対する詳細な力学的研究結果が示されている．次の第 4 章にて本論文で提案する重合メッシュによる流体・構造連成解析手法を記述し，最後の第 5 章に本研究に対する決言が示されている．以後各章に対する概要を示す．

まず第 1 章の全体緒言は三部構成となっており，初めの 1.1 節にて本研究の背景と目的が記述されている．次の 1.2 節では既存の代表的な流体・構造連成解析手法やその周辺理論を紹介し，それらに対する筆者の考察が示されている．同時に提案手法の有効性やそれに至る経緯が示されている．そして最後の 1.3 節にて本論文の構成を示している．

第 2 章の流体・構造連成解析の基礎式は五部構成となっており，本章にて連成面追跡型 ALE 有

限要素法による流体・構造連成解析手法を記述している．まず始めの 2.1 節ではテンソル解析による連続体力学の基礎を記述し，特に連成面追跡型 ALE 法の基礎となる Lagrange 法，Euler 法，及び ALE（arbitrary Lagrangian-Eulerian）法の定式化と，連続体に対する Cauchy の運動法則から有限要素離散化時の基礎となる仮想仕事式の導入がなされている．次の 2.2 節では原始変数を流速と圧力とした混合法による非圧縮性 Newton 流体の定式化，及びその有限要素離散化手法と数値安定化手法が記述されている．本研究では流体要素には速度と圧力に同次補間を採用する六面体 Q1Q1 要素を用いており，その数値安定化手法としては SUPG/PSPG/LSIC 法を採用している．次の 2.3 節においては total Lagrange 法による弾性体の幾何学的非線形解析手法，及び本研究で主要な解析対象となる旗のような薄肉構造物を離散化する四節点 MITC シェル要素の定式化が示されている．この四節点 MITC シェル要素は薄肉構造物の解析で問題となるロッキング問題を，面内歪成分を定次した補間関数によって再補間することにより解決した要素となっている．さらに有限回転を考慮した定式化も示され，これにより大回転に対する収束性が大幅に改善されている．次の 2.4 節では，流体と構造を一つの平衡方程式系として定式化する強連成定式化，およびその強連成解法が示されている．この強連成方程式は流体と弾性体の節点配置をその連成面において一致させることによって導かれ，強連成解法はその方程式を陰的な Newmark-β法によるアルゴリズムで解くことで実現される．最後の 2.5 節では，連成面追跡型 ALE 有限要素法で必要となる流体領域の ALE メッシュの制御法が記述されている．この本研究で用いるメッシュ制御法は，まず連成面における変位を境界条件として ALE メッシュへ与えることで流体メッシュを移動させる弾性体制御法，と取り扱う問題の性質を生かした幾何学的な制御法を採用している．

第 3 章は連成面追跡型 ALE 有限要素法による二次元の旗のはためき問題の流体・構造連成解析となっており，第 2 章で記述した連成面追跡型 ALE 有限要素法によって二次元版の旗のはためき問題（以後，細糸のはためき問題と記述する）を解析した結果，及びその力学現象に対する研究成果が示されている．本問題は流体・構造連成問題の本質と数値解析の困難さとを共に含む問題であり，その力学現象も極めて奥の深いものとなっている．具体的には数年前まで本問題は常にはためくものと考えられていたが，近年の研究によって細糸がはためかない場合とはためく場合，及びどちらの状態も取れる状況が条件に応じて生じることが報告されており，それに関する詳細な記述は 3.1 節の緒言に示した．本研究ではこの問題に対して数値解析による現象解明を試み，細糸の質量密度，細糸の弾性係数，及び流体の流速，流体の粘性係数の影響を詳細に調査している．これは 3.3 節にてまとめられている．なお 3.2 節は本解析で導入される仮定を記述している．本研究の数値実験の結果，細糸と流体との共振状態が三安定状態の分岐に対して主要な影響を及ぼすことが明らかとなり，細糸がはためけなくなる臨界的な質量密度が存在することも確かめられている．これらは 3.4 節の結言にてまとめられている．さらに 3.5 節では補足的考察として，細糸の固有振動モードとはためきの安定状態の関係が示され，本問題は流れ場と細糸の共振状態が特に重要な役割を果たしていることが示されている．

次の第 4 章は重合 ALE メッシュによる流体・シェル連成問題の数値解法となっており，六部構成で提案手法が記述されている．まず始めの 4.1 節の緒言で既存の連成解析手法の問題点が述べられ，4.2 節にて簡単に流体・構造連成解析において最も重要となる強連成型の平衡方程式が示されている．次の 4.3 節において標準的な重合メッシュ法として境界条件をローカルメッシュとグローバルメッシュとで授受し合う方法を記述し，次に本研究の提案手法である IB 法をローカ

ルメッシュからグローバルメッシュへの重合処理に用いる重合メッシュ法 (OIB 法)を記述している．それと同時に以後の比較解析に用いる，標準的な IB（immersed boundary）法をシェル要素によって離散化する場合の方法を記述している．次の 4.4 節においては，三つの検証用問題にて上記の解析手法を比較した結果が示されている．具体的には風船が膨らむような問題を簡略化した二次元問題の解析と，紙が舞い落ちる問題の二次元解析，及び第 3 章で単一メッシュ法にて解析した二次元版の旗のはためき問題の解析となっている．この比較解析によって標準的な境界条件を授受し合う重合メッシュ法を流体・構造連成問題に適用する際に問題となる点を明確にし，提案手法である OIB 法の有効性を示している．その結果，最終的に本格的な三次元のはためき問題のシミュレーションに成功し，その解析結果を 4.5 節に示している．最後の 4.6 節は本章の結言となっている．

最後の第 5 章は本研究の全体的な結言であり，本研究の概要及び研究成果，さらに今後の課題が示されている．具体的にはまず第 3 章の研究成果がそれにあたり，二次元版の旗のはためき問題の力学現象を詳細に研究し，三安定状態が出現する場合及びそのメカニズムを調べたことである．それと同じに本解析は今後，各種提案されている流体・構造連成手法及び今後提案される手法に対して確かな標準問題となるものと考えられる．次に第 4 章にて提案した IB 型の重合メッシュ法は，従来の単一メッシュ法の計算の安定性と精度を備えつつ，従来法では解析が不可能であったような大変形問題及び幾何学的に複雑な流体・構造連成問題に対して，大きくその適用度を向上させることに成功している．その結果本格的な三次元のはためき問題のシミュレーションを成功するに至った．今後の課題としては，より極限的な大変形も取り扱えるように本手法を改良することがある．これは本重合メッシュ法のローカルメッシュの厚みをさらに薄くすることで可能である．しかしながらこれは同時に計算の安定性の低下を招くため，さらに研究を深める必要がある．