

審査の結果の要旨

氏 名 藤 澤 智 光

有限要素法は、解析精度に関して変分原理などによる数学的な裏付けを有する上に、非構造格子に基づいた連続体の離散化が可能であることから複雑な幾何形状への適応性が高く、工学的諸問題における構造解析や流体解析において非常に有用な解析手法である。しかし、その最大の欠点は、メッシュの生成（プリプロセッシング）にあり、有限要素法の解析そのもの（メインプロセッシング）よりも遥かに処理時間を要することも珍しくない。近年は、自動メッシュ生成技術も大きな進歩を遂げてはいるものの、その多くは逐次的な処理を行っており、少数の並列処理が可能なメッシュ生成ソフトウェアでも、本質的には逐次的なアルゴリズムに依存しているため、使用できるプロセッサの個数は十数個のレベルに留まっている。

一方で、強い非線形性を有する流体に対して数値的な解析を行うためには、一般に非常に多くの計算を要する。数値流体力学の産業への応用という観点からは、乱流と流体音響の定量数値シミュレーションへの期待が大きい。この両者の数値計算には、とくに微細な計算格子を要することから計算量は膨大なものとなる。このような大規模な数値計算には、多数のプロセッサを同時に用いて計算を行う並列解析が不可欠のものとなり、実際、現在多くの数値流体解析は、PC クラスタや並列型スーパーコンピュータなどの並列計算機を用いて行われている。

しかしながら、並列環境における数値流体力学では、連立方程式の組み立てや求解の部分のみを並列に処理し、有限差分法、有限体積法、有限要素法といった離散化手法の種別によらず、計算格子の生成に関しては逐次的な処理を行っている場合がほとんどである。したがって、移動境界問題、衝撃波を伴う問題など、頻繁なリメッシングを要する問題を並列計算機で取り扱おうとすると、計算格子の生成の部分が解析全体の深刻なボトルネックとなってしまう。

以上の背景を踏まえ、本論文では、大規模な数値流体力学解析を超並列環境で高い効率で実現するための手法の開発を目的として、とくに、メッシュ生成を各節点の周囲で局所的に行うことによって、プリプロセッシングとメインプロセッシングの両者を節点を単位として、シームレスに並列処理することのできる節点処理型有限要素法が提案されている。また、節点の生成方法について

も検討が加えられており、確率論を応用して並列環境で効率的に節点を生成する手法が提案されている。

本論文は全体で 8 章から構成されている。以下に各章の要旨をまとめる。

第 1 章では序論として、研究の背景、従来の研究と、本研究の目的について述べている。

第 2 章では、本研究で開発した節点処理型有限要素法の基本と特徴について述べている。節点処理型有限要素法とは、有限要素メッシュを各節点の周囲に局所的に生成した上で、有限要素計算を節点を単位として処理することにより、いわば、粒子法的な有限要素解析を実現するものである。すなわち、頻繁なりメッシングを要する計算においても、節点を適切な位置に配置するだけで、品質のよい局所メッシュを生成して、効果的な有限要素解析を実現することができる。また、確率論を応用することによって、局所メッシュの生成に用いる節点を並列に生成する手法について述べている。さらに、二段階負荷分散法によって、並列計算におけるプロセッサ間の通信を削減して、計算の効率を向上させる方法についても述べている。

第 3 章では、節点処理型有限要素法の核となる技術である局所メッシュ生成手法について詳細に述べている。とくに、従来のフリーメッシュ法における局所メッシュ生成手法について検討を加え、複雑形状を取り扱う際の問題点や、メッシュ生成の効率の低下につながる検索円に関する問題を明らかにしている。その上で、最小範囲の節点検索で高速かつロバストに局所メッシュを生成する包装法と多階層型バケットを応用した方法について述べている。

第 4 章では、節点処理型有限要素法を非圧縮性流体解析に適用した例が示されている。非圧縮性流体の数値解析スキームとしてはフラクショナル・ステップ法が用いられている。一般に非圧縮性解析では、方程式を陰的に取り扱う必要があり、プロセッサ間で多くの通信を要するために、並列処理の効率が低下する。そこで、本章では、節点ベースの負荷分散を行った場合の反復解法の並列処理の効率について検討されている。

第 5 章では、節点処理型有限要素法を圧縮性流体解析に適用した例が示されている。圧縮性流体の数値解析スキームとしては、主に二段階 TG 法が用いられている。高速圧縮性流れはしばしば衝撃波を含むが、これを鮮明に捕捉するには計算格子を非常に細かくする必要があるため、計算結果を計算格子にフィードバックさせながら解析を進めるアダプティブ解析を用いることが有用である。しかしながら、従来の計算格子を用いた解析では、計算格子の生成において逐次的な処理を行う場合が多く、並列環境でアダプティブ解析を行うことは困難であった。本研究で開発した手法を用いることで、並列環境においても効果的なアダプティブ有限要素解析が可能となることが示されている。

第 6 章と第 7 章では、節点処理型有限要素法を用いた応用解析事例について述べられている。第 6 章では、頻繁なりメッシングが求められる問題の一つである亀裂進展問題が取り上げられている。第 7 章では、流体解析の応用例として、エアリード楽器の音響解析が取り上げられている。

最後に第 8 章では、本研究で得られた結論をまとめた上で、今後の課題と展望について述べている。

以上を要するに、本論文では、大規模有限要素解析のボトルネックであるプリプロセッシングの部分、すなわち、節点とメッシュの生成について、これを並列環境で処理する方法を検討し、プリプロセッシングとメインプロセッシングの両者を節点を単位としてシームレスに処理する節点処理型有限要素法を提案した上で、PC クラスタおよび並列型スーパーコンピュータ上に実装し、頻繁なりメッシングを要する解析が並列環境において高い効率で実現できることを示したものであり、計算力学および計算機援用工学の発展に寄与するところが大きい。

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。