

CAE プロセスを刷新する自動六面体メッシュ生成技術の開発

1. 背景

CAE (Computer Aided Engineering) は、計算機による物理シミュレーションによって、製品の設計と性能評価を行う技術であり、設計プロセスの基幹技術として重要な役割を担っている。本プロジェクトでは、CAE におけるシミュレーション技術の一つである、有限要素法に着目する。有限要素法では、図 1 に示すように、CAD で作成された解析モデルを小領域（有限要素）に分割し、現象の支配方程式を解くことで、解析領域全体の挙動を計算することができる。この有限要素の集合はメッシュと呼ばれ、解析時間と精度に大きく影響を与えることが知られている。

近年、シミュレーションの解析精度を高めるために CAD モデルが精緻化し、手作業によるメッシュ生成は困難になってきている。メッシュ生成する方法は、四面体要素による自動生成が主流となっているが、これは一般に、四面体は任意の空間を充填できることが知られているためである[1]。



図 1 CAD モデルと有限要素の概略図

有限要素には、その形状等によって様々な種類があるが、本プロジェクトでは、六面体要素と四面体要素に注目する。有限要素解析は問題規模が同じとき、六面体で構成したメッシュの方が、解析精度が高いことが知られている。また、コンクリートの破壊をモデル化するなどの特殊な場合は、そのモデル化が六面体要素にしか対応していない場合もあり、そのニーズは大きい。

有限要素の解析精度を向上させる方法として、要素の辺上に新たな節点を配置し、有限要素の変形をより詳細に表現可能にする方法がある。例えば、図 2 に示すように、四面体要素の変形が、新たな節点によって 2 次関数で表現される要素は、四面体 2 次要素とよばれる。一般に四面体 2 次要素は、四面体 1 次要素に比べ、解析精度が向上するが、節点数が増えて計算コストが高くなる[2]。

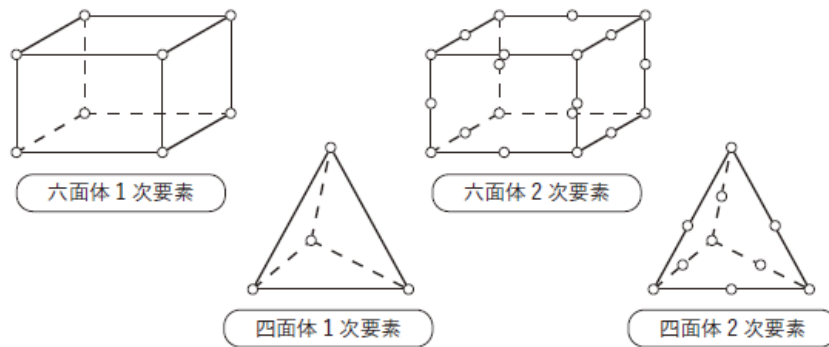


図2 四面体と六面体における1次要素と2次要素

このように、有限要素法による物理シミュレーションを精度良く、低いコストで実現するには、六面体要素による自動メッシュ生成技術が不可欠となっている。

しかし、既存の自動六面体メッシュ生成技術では、複雑なモデル形状に対し、品質のよい六面体メッシュを自動生成することはできず、メッシュ生成時に大きな歪みが生じることが指摘されている。そのため、メッシュ生成の一部分を人間による手作業、具体的には、複雑なモデルデータを予め十分単純な構造に切り分けたもの（サブドメイン分割）を使うことで、六面体メッシュの自動生成を可能にしているのが現状である。

図3に、簡易形状におけるサブドメイン分割の具体例を示す。この例では、リング形状のCADモデルに対し、自動六面体メッシュ生成を行う。サブドメイン分割を行わない場合、自動で六面体メッシュを生成できるものの、六面体要素の局所的な方向が不揃いで、半径方向や周方向に規則的に節点が配置されていないことから、工学的に許容できないメッシュとなっている。そのため、あらかじめ手作業でサブドメイン分割を行うことで、品質の高い六面体メッシュを生成する。

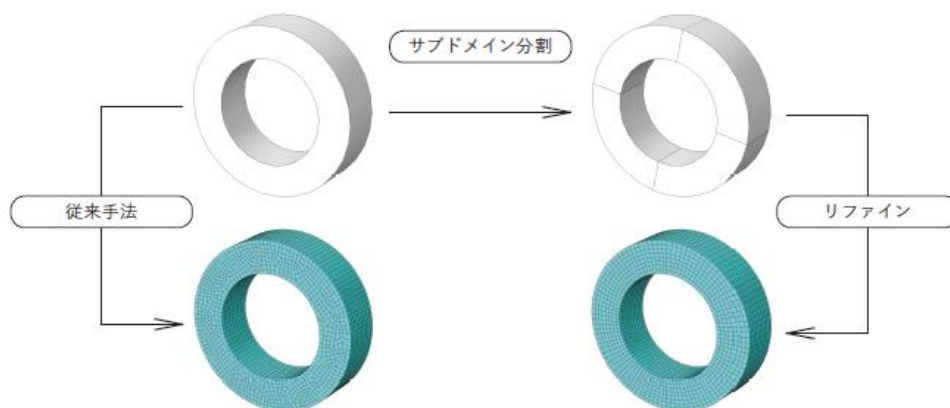


図3 サブドメイン分割の具体例

2. 目的

サブドメイン分割の例で示したように、六面体メッシュの自動生成は現在でも、一部分を人間が手作業で担うため、メッシュ生成に関わる作業時間は、解析プロセスに

費やす作業時間全体の 80%程度を占めることが報告されている。この報告からも、メッシュが自動生成できる四面体要素を利用するよりも、解析精度や解析コストの低い六面体要素が、実際の開発現場では積極的に利用されていることが示唆される。

また、有限要素解析は、そのアプリケーションさえあれば、どんなユーザーでも利用可能な解析ツールとしての側面も併せ持つため、解析精度に関する専門的知識がないと、誤った計算を実施したまま設計を進めることになりかねない。物理シミュレーションは非常に有用な技術であるため、CAD / CAE / CAM の利用者は年々増加しており、今後さらに普及することが想定される。従って、設計開発ソフトとして高い精度で計算できる機能は重要であり、フェイルセーフの観点からも、解析精度の低い四面体要素を使用せず、六面体要素で解析可能になることが、今後の開発プロセスをより一層加速させるために必要であると考える。

これまで様々な六面体メッシュの自動生成技術が提案されたが、複雑な解析モデルに対し、高い品質の六面体メッシュを生成することは不可能であった。我々のヒアリング調査によると、大手自動車メーカーや国立研究所などにおいて、六面体自動生成技術は長年にわたって研究が続けられてきたが、未だ結実していない問題であるとのことである。

そこで、本プロジェクトでは、CAE において最も重要な技術の一つであるメッシュ生成に対し、任意の 3D 形状データから六面体メッシュを自動で生成するソフトウェアを開発する。

3. 製品・サービスの内容

これまで、六面体メッシュの生成は、人間が手作業でモデルデータを修正し、十分単純な構造に切り分けることによって、可能にしてきた。本プロジェクトでは、高い品質の六面体メッシュを生成するために、これまで手作業で行われてきたサブドメイン分割を、広義の人工知能に置き換える手法を提案した。図 4 にメッシュ生成例として二次元の円環領域にしたものを示す。

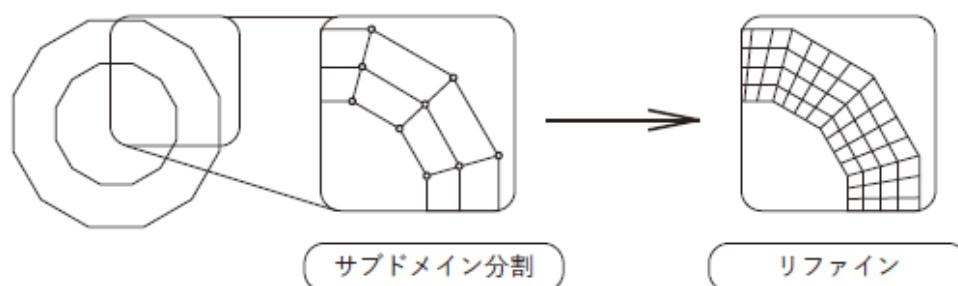


図 4 開発手法によるメッシング

4. 新規性・優位性

背景で述べたように、既存の六面体メッシュ自動生成技術は工学的に許容される品質が得られないこと、その解決に様々な研究機関で長年にわたる研究がされてきたが結実していないことが、本プロジェクトの新規性及び優位性である。また、四面体要

素の自動メッシュ生成ツールと比較すると、ユーザーは自動のためにやむを得ず四面体要素を使用している現状があり、手動メッシングと比較すると、圧倒的な人件費及び時間に関するコストがかかる現状がある。これらの事情に鑑みて、工学的に満足のできる六面体メッシュ自動生成技術の優位性は大きい。

5. 事業普及（または活用）の見通し

メッシュ生成タスクを請け負うことにより、開発手法の有用性を確認するとともに、メッシャーの改善点が早期発見できる。本業務は製品のテストの側面をもち、一定の成果が得られた後は、同様のニーズをメッシャーの販売とコンサルティングによりカバーする。本プロジェクトの範囲では、ターゲット企業を選定し、メッシング請負のための個別営業を行った。今後の見通しとして、大手 CAE ソフトウェアへの機能バンドル、メッシャー・CAE スイートの販売及びコンサルティングを実施していくこととする。

6. 期待される波及効果

現在、国内外の高い技術力をもつ企業であっても、メッシュ生成には専属の技術者が従事しているのが現状である。本プロジェクトで開発したソフトウェアによって、物理シミュレーションの多くの作業時間を占めるメッシュ生成技術が自動化されれば、人手による作業は削減され、技術者は本質的な業務に集中できる。

品質の高い六面体メッシュを自動生成できれば、機械学習アルゴリズムと組み合わせ、形状最適化やパラメータ最適化が可能になり、また、多ケースの解析により解の正当性が担保できるなど、これまでメッシュ生成がボトルネックになっていた周辺技術を向上させることで、産業界全体の効率化が大きく加速すると考えられる。

7. 未踏イノベータ名（所属）

菅野朋典 （株式会社プルーツス）

堀江正信 （株式会社科学計算総合研究所、株式会社プルーツス）

井原遊 （株式会社科学計算総合研究所、東京大学、株式会社プルーツス）

森田直樹 （東京大学）

（参考文献）

[1] W. F. David、Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi polytopes、The computer journal、No. 2、pp. 167-172 (1981).

[2] R. Navarro and F. Javier、Paving the path towards automatic hexahedral mesh generation、Universitat Politècnica de Catalunya (2009).