

六面体メッシュ自動生成技術の現状と課題

片 岡 一 朗*

ABSTRACT Hexahedral mesh generation technology is used for creating CAE models of structural, crash and fluid analyses in product design. Generally, the hexahedral mesh model obtains the accurate analysis results in small mesh elements. The number of elements corresponds to the analytical computation time. In order to make the hexahedral mesh models automatically, we developed the 3D-CAD coupled CAE system (CADAS) and automatic hexahedral mesh generation technology. It aims to produce the mesh model from the CAD model directly. As well as the automatic mesh generation technique, the CADAS has CAD shape simplification and cleaning functions to get the accurate analysis result in shorter time. In this paper, we introduce the CADAS system and automatic hexahedral mesh generation technology.

1. はじめに

製造業においては、三次元CAD(Computer Aided Design)を中心として数値解析シミュレーションを中心としたCAE(Computer Aided Engineering)やCAM(Computer Aided Manufacturing)などデジタルエンジニアリングを活用したものづくりや設計環境が整いつつある^{1,2)}。デジタル設計環境下では、製品競争力の強化のため、製品の設計開発のスピードアップが必須となってきた^{3,4)}。これらの状況の下、製品開発におけるCAE活用状況にも変化が出てきている。従来、数値解析シミュレーションは、解析の専門家によって行われ、製品設計の最終段階における性能確認のためや不具合発生時の原因調査に使われることが多かった。近年では、製品設計開発のスピードアップのため、設計者自身が開発設計プロセスの早い段階での性能確認や新設計の事前検討にCAEを適用している。しかしながら、CAEの適用に当たっては、解析ツールの使用方法や解析結果の評価方法など、様々なノウハウを必要とする。設計者のCAE適用を推進するためには、自動メッシャーをはじめとする解析ツールの高度化、及びそれを使いこなすための支援ツールの開発が重要となっている。

我々は、製品開発におけるCAE業務の自動化を目的として、三次元CADのデータから直接解析メッシュを

自動生成できる三次元CAD連携CAEシステムの開発を行っている。本システムの特徴として、自動メッシュ生成技術があり、その中で特に六面体メッシュ自動生成技術の開発に力を入れている。六面体メッシュは、少ない要素数で精度良い解析結果が得られるため、構造解析や流体解析に広く用いられている⁵⁻⁷⁾。ただ、一般に六面体メッシュモデルを作成するためには、前処理として対話的に形状の分割等、モデル編集作業が必要となり、モデル作成時間の軽減が求められている。このため、六面体メッシュ自動生成技術、及び精度よい解析結果を短時間で得られるようにCADデータを解析モデルに変換するための解析モデル化機能の開発を行っている。本稿では、三次元CAD連携CAEシステムとそのコア技術である、六面体メッシュ自動生成技術の概要について説明する。

2. 三次元CAD連携CAEシステム

2.1 システムの概要

設計者のCAE活用推進に当たっては、CADとの連携が必須である。三次元CADで作成した設計データをCAEに利用することで、CAE業務の効率向上を図ることができる。最近、ほとんどのCAEシステムが三次元CADデータを入力として利用できるようになっている。図1に弊社で開発を行っている三次元CAD/CAE連携システムのシステム構成図を示す。本システムは、解析メッシュの自動生成機能と、三次元CADデータに対して効率よく解析計算が行えるモデルに変換するための、解析モデル化機能を備えている。本システムは、ソリッドモデルに対して、四面体メッシュと六面体

Status and Problem of Hexahedral Automatic Mesh Generation Technology. By Ichiro Kataoka (Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.).

*(株)日立製作所 機械研究所

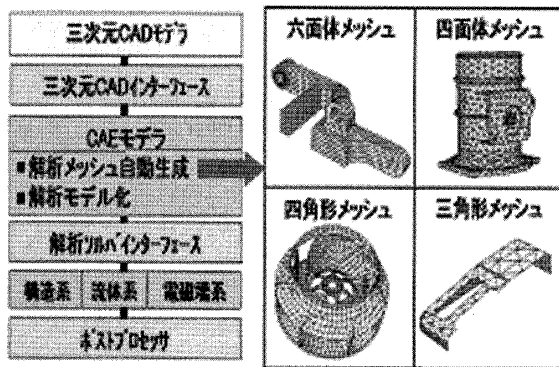


図1 三次元CAD連携CAEシステム

メッシュ、シェルモデルに関しては、四角形メッシュと三角形メッシュを自動生成できる。以下、設計者のCAE利用のキーとなる自動メッシュ生成技術と解析モデル化技術について説明する。

2.2 自動メッシュ生成技術

ソリッドモデルに対するメッシュ生成について説明する。設計者が強度解析などのCAEを行う際には、メッシュの自動生成に主眼が置かれるため、ソリッドモデルに関しては四面体メッシュを用いることが多い。一方物理現象を詳細に把握するためのCAEにおいては、解析する物理現象や使用するソルバの特性に応じて、四面体メッシュと六面体メッシュを使い分けている。六面体メッシュは、少ない要素数で精度よい解析が行えるという利点があり、大規模流体解析や精度の要求される接触、大変形などの非線形解析に広く利用されている。しかしながら、六面体メッシュの自動生成に関して、研究は数多くなされているが、確立された手法はない^{8~12)}。

著者らは、写像法をベースとした六面体メッシュ自動生成手法の開発を行っている¹³⁾。写像法は、解析対象の形状モデルを認識モデルと呼ぶ近似形状に変換し、認識モデルを直交格子に分割後、この格子を形状モデルに写像し六面体メッシュを生成する手法である。ここで形状モデルを認識モデルに変換する技術を、形状認識技術と呼ぶ。形状認識技術により、メッシュ生成の前処理として行う手作業(ブロック分割作業)を低減できる。

本メッシュ生成過程において、写像モデルの形状は、生成されるメッシュのパターンと粗密を規定する。そこで写像モデルの形状を対話的に変更することにより、ユーザのニーズに合わせて自由に解析メッシュのパターンやメッシュ数をコントロールできる対話型メッシュ制御機能を搭載している。図2に本技術により作

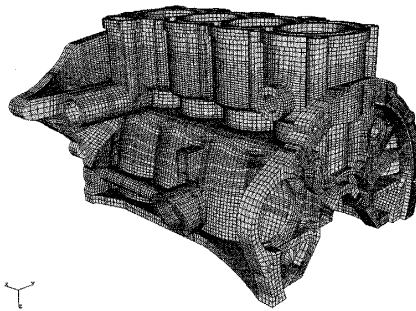


図2 エンジンブロックの六面体メッシュ

成したエンジンブロックモデルの六面体メッシュを示す。要素数は59052、節点数は87632節点である。

2.3 解析モデル化機能

前記のように三次元CADとCAD/CAE連携システムの普及により、設計者のCAE活用が容易に行えるようになってきている。しかし三次元CADのデータそのままCAEに利用する場合、次のような問題点がある。

- (1) 製品形状を詳細表現しているため、小さな穴形状やフィレットを含んでいる。小さな形状が存在すると、解析メッシュ数の増大につながり、解析時間の増大を招く。
- (2) 設計者の意図しない微小な形状の存在により歪んだメッシュが生成され、解析結果に悪影響を及ぼす。これが解析結果評価の妨げとなる。

従来、これらの問題点を解消するために、設計者は三次元CADで解析上重要でない部位の穴やフィレットを抑制する、微小形状のチェックを行い、微小な形状を対話的に編集するといった作業を行っていた。これらの形状編集作業をここでは、解析モデル化作業と呼ぶ。近年では、設計者の作業の負担を軽減するため、解析モデル化作業を自動または半自動で行う解析モデル化機能を有するCAEシステムも増えてきている。以下に解析モデル化機能の例を示す。

(1) 形状クリーニング機能¹⁴⁾

設計者が入力した寸法以下の微小形状を自動的に検索し、形状から削除する機能である。幅の狭い面(ナローフェース)の存在によりアスペクト比が悪いメッシュが生成された場合、形状クリーニング機能により、微小エッジを削除する。

アスペクト比は、最大要素辺長さ／最小要素辺長さで定義されるメッシュ品質の指標であり、小さいほうが一般的に品質よいメッシュである。本機能により微小エッジを削除し、アスペクト比の高い要素を軽減する。

(2) 形状簡略化機能¹⁵⁾

設計者が入力した寸法値以下の、小さな穴やフィレットを自動的に削除する機能。図3は、磁気ディスクの部品の振動解析に形状簡略化機能を適用した事例である。小さな穴やフィレットの削除により、解析メッシュ数の低減、解析計算も含めた解析作業時間を890分から325分へ短縮した。

3. 六面体メッシュ自動生成技術

3.1 六面体メッシュ生成技術の現状

先に述べたように、六面体メッシュ自動生成技術では、形状モデルから認識モデル・写像モデルを作成し、写像モデルから六面体メッシュを作成するが、現状では形状モデルの位相情報より、認識モデルが作成できず、六面体メッシュが生成不可となる場合がある。この理由としては、形状モデルの面・稜線の情報のみでは、どのような認識モデルを作成すればよいか分からず認識不可となる場合が挙げられる。この課題を解決する方法として、特徴形状抽出型六面体メッシュ生成技術、テンプレート型六面体メッシュ生成技術を開発している。次節では、これらの機能について説明する。

3.2 特徴形状抽出型六面体メッシュ生成技術

図4は、六面体メッシュ生成プロセスを示している。三次元CAD連携CAEシステム上で六面体メッシュの自動生成率を上げるための、新技術を開発している¹⁶⁾。形状モデルが持つ面・稜線の情報から、認識モデルを作成しようとする、稜線のx, y, z軸方向割当てが定まらず、認識モデル作成不可となることがある。そのため、六面体メッシュモデルを生成するために、形状モデルから形状面上に三角形メッシュを作成し、三角形メッシュ要素辺を特徴形状線として抽出した後、認識モデルを作成する。メッシュ要素辺を特徴形状線として用意することにより、認識モデルを作成するための情報が増え、認識モデル自動生成率の向上に繋がる。

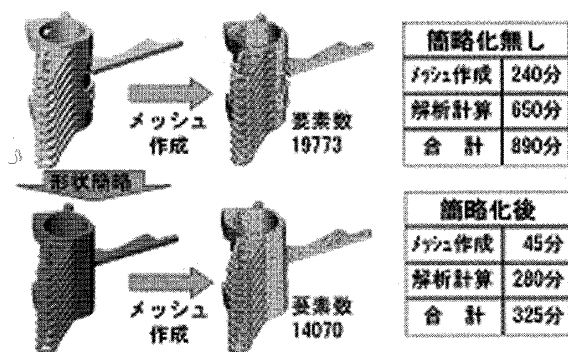


図3 磁気ディスク部品への形状簡略化機能適用事例

続いて、認識モデルから写像モデルを生成し、その後六面体メッシュモデルを生成する。三角形メッシュモデルから認識モデルへの作成では、三角形メッシュ面グループがx, y, z軸それぞれと成す角度から、認識モデルの面をx, y, zいずれの軸に属すればよいか計算する。認識モデルに対して要素分割を行い、写像モデルを作成した後、形状モデルへ写像し、六面体メッシュモデルを生成する。

本アルゴリズムを以下に示す。

STEP1: 解析対象の形状モデル(図4(a))に対し、表面に三角形メッシュを生成した三角形メッシュモデル(図4(b))を生成する。

STEP2: 三角形メッシュモデルの表面を構成する三角形メッシュの境界線から、認識モデルの生成に必要な線(特徴線)を抽出した特徴形状モデル(図4(c))を生成する。また特徴線で区切られる三角形群を特徴面、特徴線の交点を特徴点と呼ぶ。

STEP3: 特徴形状モデルに基づき、認識モデル(図4(d))を生成する。

STEP4: 認識モデルを格子に分割した写像モデル(図4(e))を生成する。

STEP5: 写像モデルの格子点をバウンダリフィット法で形状モデルに写像し、六面体メッシュ(図4(f))を生成する。

認識モデル作成において、三角形メッシュ面の割当方向を調整することにより、認識モデルの形状を修正して、歪みの少ないメッシュモデルを生成させる。図5は、三角形メッシュ面グループの方向割当処理イメージを示したものである。三角形メッシュ面グループに対して、面グループの割当方向をx, y, z軸いずれかに割り当て認識モデル作成する。

本手法を機械構造部品へ適用した結果を図6に示す。形状分割作業を省略し、自動的に六面体メッシュを生成することが可能となった。メッシュ生成時間は、3分

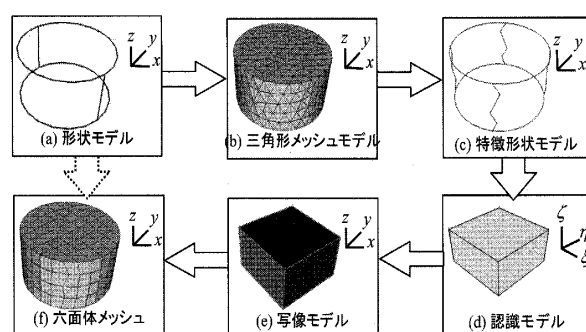


図4 六面体メッシュ自動生成技術の処理プロセス

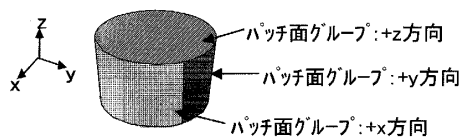


図5 三角形パッチ面方向割当処理

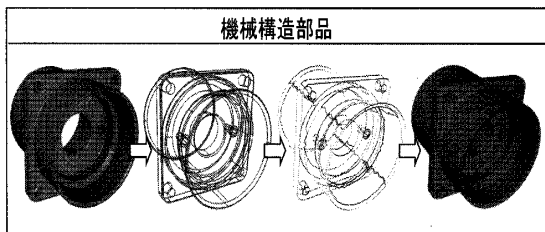


図6 機械構造部品への特徴形状抽出機能適用事例

である。

3.3 パラメータ解析向けテンプレート技術

六面体メッシュ自動生成技術では、実製品モデルのような形状が複雑なモデルに対して、メッシュ生成不可となる場合がある。メッシュ生成不可時には、従来は形状を分割する、等のノウハウが必要な対話的処理を行っていた。このため、最終的に生成されるメッシュの質も作業者の熟練度によって大きく異なるという問題があった。

そのため、既作成のメッシュを雛型(テンプレート)として用いることにより、テンプレートと同様のメッシュ数、メッシュ並びを有するメッシュを自動生成する技術を開発している¹⁵⁾。しかし、テンプレートの適用範囲はCADモデル形状のトポロジーが大幅に変化しないような寸法変更に限られ、トポロジーが変化するとテンプレートを用いることができない。そのため、著者らは三角形メッシュを用いてテンプレートと同様、熟練者が作成するような品質の良いメッシュを自動生成可能なメッシュベーステンプレート技術を開発した¹⁸⁾。

図7は、テンプレート六面体自動メッシュ生成技術の処理手順を示したものである。ハッチングで示す処理は、従来のテンプレート六面体メッシュ自動生成技術からの変更点である。以下、変更部位を中心に各処理詳細を説明する。

(1) 特徴稜線の抽出

三角形メッシュモデルの表面を構成する三角形メッシュの境界線から、認識モデルの生成に必要な線(特徴稜線)を抽出した特徴形状モデルを生成する。

(2) 形状の対応付け

三角形メッシュから抽出した特徴形状とテンプレ

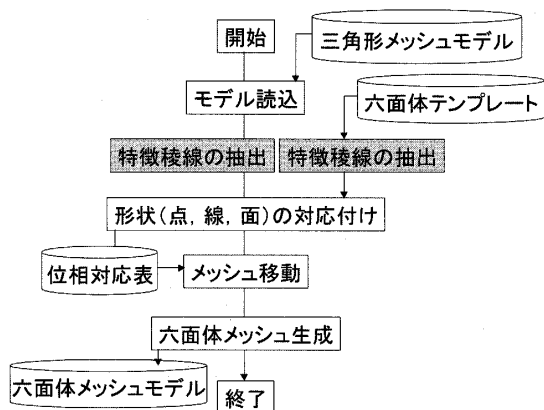


図7 テンプレート型メッシュ生成フローチャート

トから抽出した特徴形状の形状要素(点・線・面)の対応付けを実施する。基準となる点(x, y, z座標が最小となる点)を三角形メッシュとテンプレートの両モデルで検索し、両モデルの基準点より同一順番に検索される点と点、線と線、面と面を準じ対応付け、最後に境界が等しい面を対応付ける。形状の対応関係を三角形メッシュとテンプレートそれぞれの点・線・面番号で位相対応表に保存することで、テンプレートにあるどの節点を三角形メッシュモデルへ移動させればよいかを決定する。

(3) メッシュ移動

位相対応表を用いて、テンプレートのメッシュを構成する節点を三角形メッシュモデルの点・線・面上に移動させる。テンプレートのメッシュ要素は、位相対応表の点・線・面・ボリュームの順番で三角形メッシュモデルへ移動させる。線上に節点を配置する際、テンプレートで線上に乗っている節点の配置間隔の比と同じように三角形メッシュモデルの特徴稜線上にマッピングする。線上の点を配置したあと、線に近い節点から順番に面上の節点を三角形メッシュモデル上に配置する。線に近い点から線形補間を行い、続いて面上節点の移動量・移動方向を求め、全ての面上節点の位置を計算する。最後にボリューム内の節点の移動量・移動方向を計算する面上節点の移動と同様に行う。線上節点・面上節点に近い点から移動量・移動方向を求めていく。

コネクティングロッドモデルの構造解析用六面体メッシュ生成に開発技術を適用し、効果を検証した。

図8は、コネクティングロッドの三角形メッシュモデル(a)に対して、テンプレート(b)を用いて、六面体メッシュ(c)を生成した一例である。

三角形メッシュモデル(図8(a))は、テンプレートの

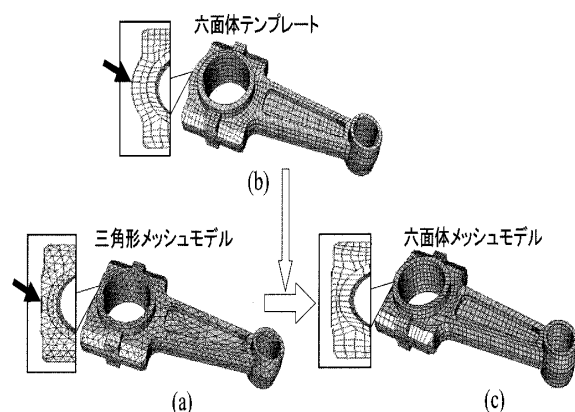


図8 コネクティングロッドモデルへのテンプレート適用例

突起部が削除されたモデルであり，拡大図で表示した部分の形状が異なる．コネクティングロッドの三角形メッシュモデルを入力とし，テンプレートの六面体メッシュを移動させることで，三角形メッシュモデルに対しても六面体メッシュを自動的に生成できた．生成したメッシュは，変更部位以外についてテンプレート六面体メッシュと同様の品質（要素内角150度以上の要素：7%，ストレッチ0.4以下の要素：4%）を有することを確認した．

3.4 六面体メッシュ生成技術の課題

六面体メッシュ生成技術の自動生成率の向上，生成した六面体メッシュの品質制御が今後取り組むべき課題である．自動生成率については，現在六面体メッシュモデルの生成前に形状モデルから特徴形状を部分的に分割した後，六面体メッシュモデルを作成し最後に接合する手法の自動化の開発・検討を行っている．メッシュ生成前処理として，ボリウム分割，モデルの姿勢制御を行う技術，表面パッチ面割当方向修正技術を開発中である¹⁹⁾．また，生成したメッシュの品質制御についても，形状分割技術，リファイン技術について開発を進めている．

4. まとめ

本稿では，製品設計開発における自動メッシュ生成技術適用への取り組みとして，三次元CAD/CAE連携システムの機能，及び六面体メッシュ自動生成技術を紹介し，現状と課題について説明した．六面体メッシュを含む，自動メッシュに代表されるCAE技術の高度化，及び支援技術の確立が，設計者のCAE活用必須であると考え．今後とも，CAE技術の向上，またCAEツールの有効活用に向けた支援技術の完成度向上を図り，社内外へのものづくりに貢献していきたい．

参考文献

- 1) 明石，石倉：自動車プレス分野におけるデジタルエンジニアリング，第19回設計シンポジウム講演論文集，48-54（2001）
- 2) 工藤：自動車産業におけるシミュレーション技術，計算工学，2-3，27/34（1997）
- 3) 千葉，西垣：解析技術の高度化とCAEへの展開，設計工学，31-6，25/30（1996）
- 4) 西垣，針谷，小野寺：CAEシステムにおける解析メッシュ自動生成技術，シミュレーション，18-2，22/28（1999）
- 5) 高橋，清水，森山，山下，千葉：形状認識を用いた3次元自動要素分割システムの開発，機械学会論文集（A），59-560，279/285（1993）
- 6) 程，篠田，萩原：六面体自動生成の原理と双対輪体の自己交差解消方法の提案，シミュレーション，23-3，68/76（2004）
- 7) エゴロワ，篠田，曲，萩原：六面体メッシュ生成のための四辺形メッシュ自動生成システムの構築（第1報，アルゴリズムの提案），日本機械学会論文集C編，69-683，1776/1783（2003）
- 8) T. Blacker: The Cooper Tool, 5th INT. MESHING ROUNDTABLE, 13/30（1996）
- 9) Y. B. Shin and H. Sakurai: Automated Hexahedral Mesh Generation by Swept Volume Decomposition and Recomposition, 5th INT. MESHING ROUNDTABLE, 273/280（1996）
- 10) R. Schneiders, R. Schindler and F. Weiler: Octree-based Generation of Hexahedral Element Meshes, 5th INT. MESHING ROUNDTABLE, 205/215（1996）
- 11) N. A. Calvo and S. R. Idelsohn: All-hexahedral element meshing: Generation of the dual mesh by recurrent subdivision, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 182, 371/378（2000）
- 12) R. Taghavi: Automatic Block Decomposition Using Fuzzy Logic Analysis, Proc. of 9th International Meshing Roundtable, Sandia National Laboratories, 187/192（2000）
- 13) 滝澤，青山，西垣，山下：形状制御が可能な六面体メッシュ自動生成システム，機械学会論文集（A），62-603，28/34（1993）
- 14) 小野寺，西垣：CAD-CAE連携のための形状クリーニング技術，日本機械学会第13回計算力学講演会論文集，273/274（2000）
- 15) 小野寺：CAD-CAE連携による形状簡略化技術，日本機械学会第12回計算力学講演会論文集，469/470（1999）
- 16) 針谷，西垣，廣：特徴線抽出技術を用いた六面体メッシュ自動生成システムの開発，機械学会論文集（A），71-701（2005）
- 17) 針谷，西垣：テンプレートを用いたパラメータサーベイ解析用メッシュ生成技術，日本シミュレーション学会大会，第21回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス発表論文集，89/92（2002）
- 18) 片岡，針谷，廣：テンプレートを用いた六面体メッシュ自動生成技術の開発，日本応用数理学会年会講演論文集（2005）
- 19) 片岡，針谷，西垣，廣：六面体メッシュ自動生成率向上技術の開発，日本応用数理学会年会講演論文集（2006）