

アドバンシングフロント法に基づくソリッドメッシュの自動生成手法の開発と検証方法の考察

Development of a Method of Automatic Generating Solid Mesh using Advancing Front Method and Consideration of a way to verify that Calculation Results are Correct

藤井みゆき¹⁾

Miyuki FUJII

1) 博(工) 神奈川工科大学 (〒243-0292 神奈川県厚木市下荻野1030)

A method for automatically generating solid mesh using as an analysis model for CAE has been developed. Solid mesh generated by the method consists of mainly of hexahedral elements and partially pentahedral and tetrahedral elements. Topological data was generated and added from shape data such as curves and surfaces from CAD data. Parametric surfaces converted from trimmed surfaces are used Surface division. In order to check validity of generated solid mesh using this method, cross-section of solid mesh and plane is calculated and interference between solid elements in solid mesh is checked.

Key Words : FEM, Solid Mesh, Shell Mesh, IGES Format

1. はじめに

3次元構造物のCADデータを利用し熱・構造などの力学現象の解析やシミュレーションをおこない、その計算結果を元のCADデータに即座に反映させるCAEの技術は、品質向上やコストダウン、開発期間の短縮に役立っている[1]。解析計算に使用する解析形状(有限要素法に基づくシェルメッシュやソリッドメッシュ)は解析結果の精度やシミュレーション結果を左右し、製品の品質にも影響が及ぶ[2]ため、より高精度の計算結果を得られる解析形状を自動生成するさまざまな手法が開発されている。3次元構造物のCADデータからアドバンシングフロント法を利用して6面体を主体に一部に4面体と5面体を併用したソリッドメッシュを自動生成する手法[3]もその一つである。6面体ソリッド要素で構成されるソリッドメッシュの一部に4面体と5面体を併用することで、従来の6面体ソリッドメッシュよりも確実かつ柔軟にソリッド分割できることが期待される。本報告では、この手法によって生成されるソリッドメッシュがソリッド要素どうしの干渉や空隙がなく正しく作られているか可視化による検証方法として、ソリッドメッシュの断面形状の計算とソリッド要素どうしの接続を調べる方法を考察した。また、ソリッドメッシュの生成過程の再検討をおこなった。CADデータ(IGESファイル)から幾何情報を取得し、シェルメッシュの生成に必要なデータに変換するための位相情報を構築・曲面データの変換についても説明する。

2. CADデータからの解析形状の生成

(1) ソリッドメッシュの自動生成手法

本報告のソリッドメッシュの自動生成手法における処

理の流れを図1に示す。

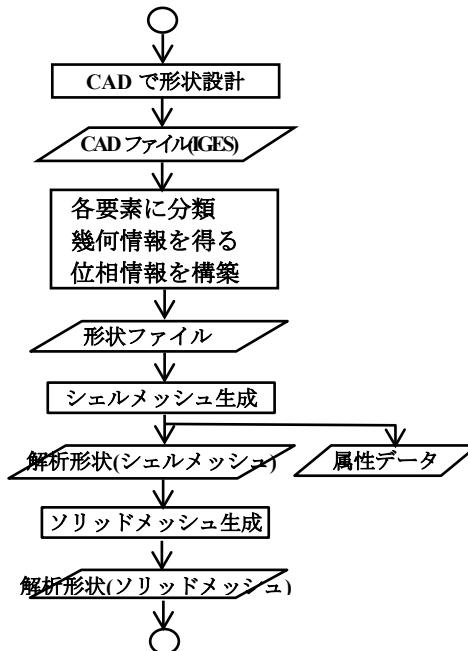


図1 ソリッドメッシュ自動生成の処理の流れ

(2) IGESファイルからのCADデータの読み込み

IGESとはANSIが策定した異なるCAD間でデータを交換する際に使用する中間ファイル・フォーマットの一つで、自動車産業を中心に実質的な世界標準となっている[4]。ここではIGES内のディレクトリセッションに定義されている円や直線・トリム曲面などのエンティティを要素別に分類し、パラメータセッションから該当するエン

ティティに定義されている端点や制御点の座標値、座標変換マトリクスなどといったパラメータ値を読み込む。

(3) トリム曲面の変換と位相情報の生成

IGES内で部品形状の表面として定義されているトリム曲面は曲面どうしの接続状況や隣接関係の情報が定義されていないため、トリム曲面の輪郭として定義されている境界曲線を用いて位相情報(topology)を作成する(図2)。

IGESにおけるトリム曲面は以下の3つの要素で構成されている。

- 1) トリムされる曲面の曲面式
- 2) 境界曲線(外周)の曲線またはループ
- 3) 内周の数とその分の曲線

このうち2)の境界曲線は、外周の形状に沿った複数の曲線とそれらの交点にあたる端点で構成されている。この端点と端点で区切られた曲線を位相要素の稜線(辺)、端点を頂点として定義する。隣り合ったトリム曲面との交線はこの稜線と一致する。これをトリム曲面の数だけ繰り返し、位相情報を構築していく。また、3)内周の曲線も2)と同様に稜線と頂点を生成するが、穴ループとして定義するため、2)の稜線とは逆向きに定義する。この過程で生成した位相情報は曲面式や境界曲線の曲線式とともに「形状ファイル」として保存する。

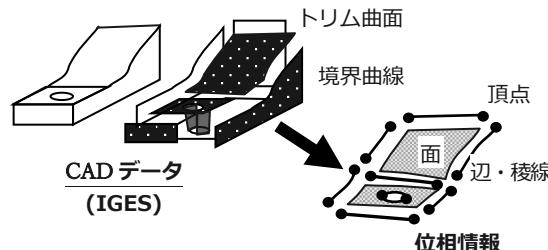


図2 位相情報の作成

(4) 曲面の分割

トリム曲面ごとに曲面分割をおこなうことでシェルメッシュを生成する。分割方法は曲面の種類(平面・ベジエ曲面・NURBS曲面など)と境界曲線の個数に応じて写像法とアドバンシングフロント法を使い分ける(図3)。分割要素は4角形パッチを基本とするが、事前の設定により解析

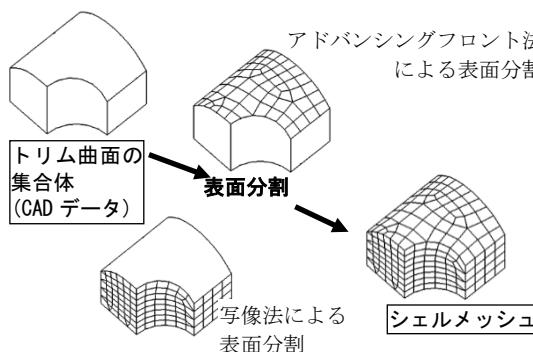


図3 シェルメッシュの生成

計算の用途に応じて3角形パッチのみ、3角形と4角形のパッチが混合したものも生成可能で、部分的に再分割も実施する。これを曲面の数だけ繰り返すと、シェルメッシュ

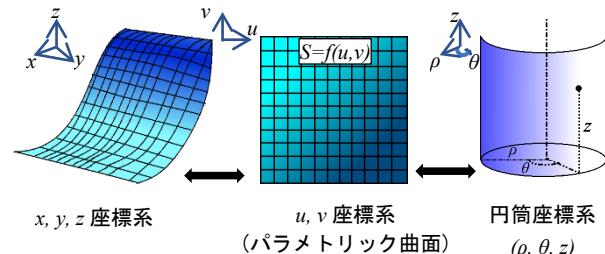


図4 座標系の変換

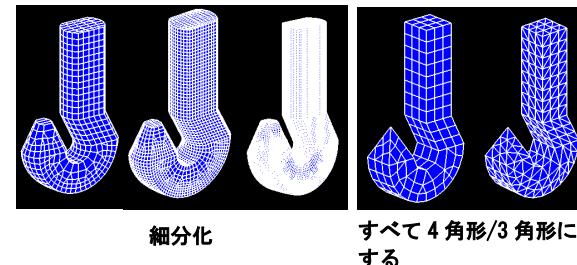


図5 シェルメッシュ再分割の適用例

が生成される。

分割点を求めるることは自由曲面を含む曲面の交点を計算することに他ならず、計算コストが必要となる。ここで3次元空間内の自由曲面を含む曲面を2つの媒介変数 u, v を用いてパラメトリック曲面 $S=f(u, v)$ とし、円柱面を円筒座標系 (ρ, θ, z) と表現すると、図4のように曲面 $f(u, v)$ は、 u, v パラメータ空間内における長方形形状の平面として表現できる[5]。これにより曲面は平面のように扱え、分割点の位置計算の高速化が期待できる。これまで説明した方法で生成したシェルメッシュを用途に応じて細分化・すべてのパッチを4角形または3角形に再分割したものを図5に示す。生成したシェルメッシュは「シェルメッシュファイル」として保存すると同時に、パッチを構成する各頂点(節点)と属している位相要素との関係性(図6では元のCADデータの稜線を分割してできた節点はその稜

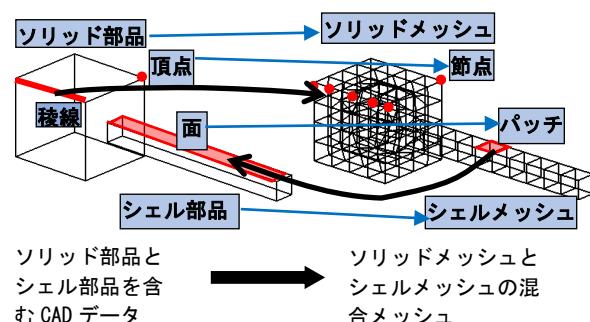


図6 属性情報の付加

線を共有する2つの面上に乗っている)を「属性ファイル」に記述する。このデータは、複数のシェルメッシュやソリッドメッシュで構成される解析形状の結合点や解析計算の際の加重点や拘束点を指定する際に利用する。

(5) ソリッドメッシュの生成

本手法ではソリッドメッシュの生成は、図7のように前述の方法で生成したシェルメッシュの内側にソリッド要素を充填することにより実現する[3]。

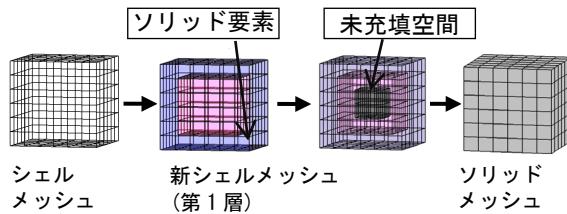


図7 ソリッドメッシュの生成過程

3. ソリッドメッシュの検証方法に関する考察

生成したソリッドメッシュが適切か検証をおこなう機能は現在のところ自動化できていないが、3次元モデルビューワなどのソフトウェアを使用して可視化することにより明らかな不具合を目視することは可能である。本報告ではソリッドメッシュの断面形状を計算し可視化する方法とソリッドメッシュを構成するソリッド要素の面(パッチ)の接続状況を追跡することにより検証をおこなう。

(1) ソリッドメッシュの断面形状の計算

ソリッドメッシュを任意の平面で切断し、その断面を可視化することでソリッドメッシュ内部の空隙やソリッド要素どうしの干渉を観察することが可能である。ソリッドメッシュを切断する平面P(法線ベクトル \mathbf{P}_N 、P上の3次元座標値を \mathbf{P}_c)とし、ソリッドメッシュを構成する任意のソリッド要素Eに含まれる節点を \mathbf{N}_n ($n < 0 <= k$; k はEの節点

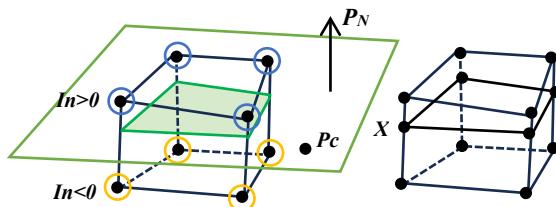


図8 ソリッド要素と平面との切断面

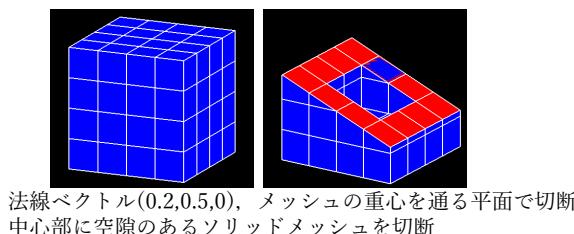


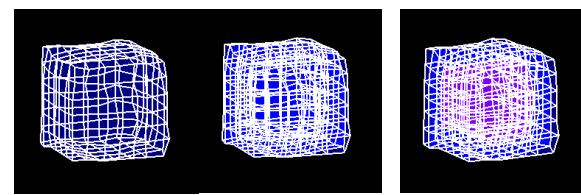
図9 ソリッドメッシュの断面形状

数)とする。E内のすべての節点における \mathbf{P}_N とベクトル $\mathbf{P}_c\mathbf{N}_n$ との内積 I_n の符号が一致しない場合、Eは平面Pによって切断されている(図8)。さらにソリッド要素Eを構成する面に含まれる辺の両端点の節点においても同様に内積 I_n の符号が一致しない場合はその辺上に平面Pとの交点Xが存在する。また内積 $I_n = 0$ の場合はソリッド要素の面は平面P上に存在する。切断面の前後(内積 I_n の符号が正か負か)のどちらかを指定することにより、ソリッドメッシュの断面形状が表示することができる。図9は法線ベクトル(0.2,0.5,0)、ソリッドメッシュの重心を通る平面でソリッドメッシュを切断した際の断面形状を示したものである。ソリッドメッシュは中心部に空隙のあるものを利用した。

(2) ソリッド要素どうしの干渉チェック

ソリッド要素どうしの干渉やソリッドメッシュ内部の空隙は、ソリッドメッシュに含まれる任意のソリッド要素を構成する面(パッチ)と共有するソリッド要素の有無を検出することでおこなう。隣接するソリッド要素が見つからないというのは、(a)ソリッドメッシュの表面(b)空隙があるかソリッド要素どうしが干渉している(c)隣接するソリッド要素は存在するが接続している面の形状が異なるのいずれかである。(a)は元のシェルメッシュの表面と一致するため除外できる。(b)や(c)が検出されることでソリッドメッシュの正当性が確認できる。

図10は1の入力シェルメッシュから生成したソリッドメッシュの干渉を調べたものである。実験のため2のソリッドメッシュの中央部分のソリッド要素は削除してある。ソリッド要素どうしの干渉チェックをおこなった結果、空隙の箇所が検出された。



1 入力シェルメッシュ
2 ソリッドメッシュ(中空)
1と2の差分を彩色

図10 ソリッド要素どうしの干渉チェック

4. おわりに

本報告では、提案するソリッドメッシュの自動生成手法について、CADデータから読み込んだ曲線や曲面などの形状データからシェルメッシュやソリッドメッシュの生成に必要な位相情報を追加し、曲面分割をおこなう過程について詳細を示した。また、生成したソリッドメッシュがソリッド要素どうしの干渉や空隙がなく正しく作られているか検証するため、断面形状をもとめる方法とソリッド要素どうしの接続状況を調べる方法について述べた。

今後の研究として、複雑で大規模なソリッドメッシュの生成に適用することで本手法の堅牢度を高めることを目標とする。

参考文献

- [1] 武藤一夫: 進化し続けるトヨタのデジタル生産システムのすべて, 技術評論社, pp.12-19, 2007.
- [2] 泉聰志ら: 理論と実務がつながる実践有限要素法シミュレーション, pp.59, 森北出版, 2011.
- [3] 藤井みゆき:アドバンシングフロント法による4面体と5面体を併用した6面体ソリッドメッシュの自動生成手法---CAEソフトウェアへの適用 (第2報)---, 第29回計算工学講演会(CD-ROM), C-04-03, 2024.
- [4] IGESデータの基礎知識: 株式会社C&Gシステムズ, https://www.cgsys.co.jp/g/rf/product/glossary/images/IGI_G.pdf
- [5] 小林昭七:曲線と曲面の微分幾何(改訂版), pp47~62, 豊華房, 2013.