

# 有限要素解析用多重解像度メッシュモデリングに関する研究 — 三角形メッシュの適応的解像度制御 —

北海道大学 ○伊達 宏昭, 金井 理, 岸浪 建史  
日立製作所 機械研究所 西垣 一朗

## 要 旨

本論文では, CAE における様々な解析目的に適した解析用メッシュの効率的生成を目的とした, FEM 用多重解像度三角形メッシュに対する適応的解像度制御手法を提案する. この手法により, 形状特徴やユーザ指示に依存した局所部分の解像度変更によるメッシュの粗密付け, 並びに粗密を保持したメッシュの要素数管理が可能となる.

## 1 はじめに

製品形状のソリッドモデルの頑強な高品質メッシュ生成法が有限要素解析を用いた CAE の効率化に要求されるが, 複雑形状の解析用メッシュ生成には未だその処理の安定性, 並びに, メッシュ性質制御性に課題が残っている. 本研究では, これらの課題を解決するために, 現状の FEM メッシュャで比較的安定して生成可能な高密度三角形メッシュの解像度制御に基づく, FEM 用メッシュ生成法を提案してきた<sup>1)</sup>. この手法は, 入力の高密度三角形メッシュに対し, 品質を考慮した反復的な低解像度化処理を行い, メッシュ品質と形状近似誤差が規定され, かつ, 要素数管理がなされた解析用メッシュを生成するものである. しかしながら, 高精度で効率的な解析に要求されるメッシュの局所的な粗密管理は実現されていなかった.

そこで本報では, より様々な解析目的に適した解析用三角形メッシュ生成を目的とした, 適応的解像度制御手法を提案する. これは, メッシュの頂点階層を用いた局所解像度制御手法に基づく, 形状複雑さやユーザ指定による局所的なメッシュの粗密付けが可能な粗密生成型解像度制御手法, ならびに, 粗密を保持し全体の要素数を管理可能な粗密保存型解像度制御手法からなり, メッシュ粗密の容易な制御を可能とする.

## 2 FEM 用多重解像度メッシュと CAE システム

既提案の FEM 用多重解像度メッシュ生成法<sup>1)</sup>では, 2 頂点を 1 頂点に統合するエッジコラプス(EC)を繰り返し適用することで高密度メッシュの低解像度化を行っている. この低解像度化処理では, 形状近似誤差, 要素形状品質・要素サイズを規定することにより, それらと要素数が管理された三角形メッシュを得る事ができる.

図 1 に FEM 用多重解像度メッシュを用いた CAE システムと処理の流れを示す. このシステムでは, まず, CAE プリプロセッサを用いて, 入力ソリッドモデルに対する解析条件の設定, 並びに, 高密度三角形メッシュ生成を行う. 次に, 高密度メッシュの低解像度化による多重解像度メッシュ生成を行い, 要求する性質を持つ解析用メッシュを得る. 最後に, 得られた解析用三角形メッシュから必要に応じて四面体メッシュを生成し, 解析を実施する.

提案する適応的解像度制御は, 図 2 に示すように, 高密度メッシュの低解像度化の後に位置付けられる. ユーザは, 任意解像度のメッシュに対し, 粗密付け方法とその程度を指定することにより, 局所的な粗密のついたメッシュを得ることができる. また, 生成した粗密を保持したまま全体の解像度を変更する事ができ, メッシュの要素数管理が可能となる.

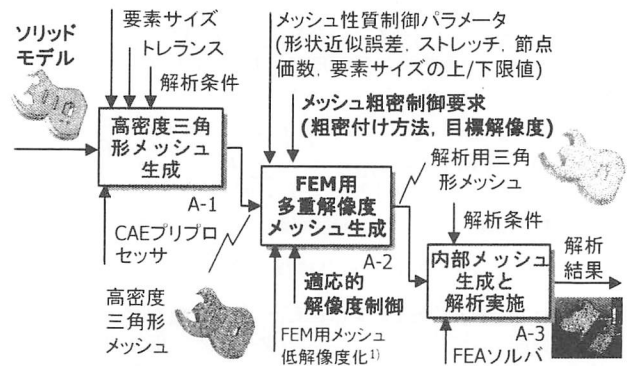


図1 FEM用多重解像度メッシュ生成とCAE

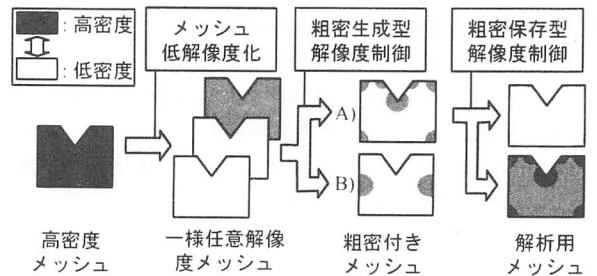


図2 適応的解像度制御を用いた解析用メッシュ生成

## 3 局所解像度制御手法

メッシュモデルの効率の良い局所解像度制御を実現するために, 頂点階層や有向グラフに基づくデータ構造が提案されている<sup>2)</sup>. 本研究でも, EC に基づく頂点階層を用いたデータ構造を利用する. 頂点階層の表現には, 図 3 に示す, EC 前後で対応する頂点を親子とする二分木を用いる. また, 各頂点が現在のメッシュ上にあるか否かを表す属性 *front* をもつ.

FEM 用多重解像度メッシュでは, 任意解像度のメッシュの三角形要素はその形状品質が規定されている. そこで, 解像度制御時における高価な計算を避けるため, 局所解像度制御の過程で現れる三角形要素を, 初期の低解像度化処理で得られたもののみとする. このため, 各頂点は, EC 適応時の隣接頂点集合への参照情報 *vstar* を持つ. また, 適応的解像度制御の効率化のために, EC 適用時に頂点に接続する要素サイズの平均値 *e\_size* を各頂点に割り当てる. ここで, 要素サイズは, 三角形要素の最長辺長さである.

1 段階の高解像度化処理は頂点分割(VS)であり, これは, 二分木において *front* を子へ移動する処理となる. VS はその頂点の *vstar* の *front* が全て真の場合に適用する. もし,

適用できないならば *vstar* の各々の頂点から木を上を辿り、*vstar* の頂点がすべて *front* に含まれるまで順次 VS を適用しながら *vstar* の *front* 情報を修正する。また、低解像度化のための EC も同様に、統合する 2 頂点の *vstar* を木を辿って復元し、*front* 情報を修正することにより行える。

## 4 FEM 用適応的解像度制御

### 4.1 解像度の管理基準

目標とする解像度は、要素サイズに対する閾値  $\tau_s$  で規定する。この値は、現在のメッシュの頂点に対して指定する。高解像度化処理は、 $\tau_s$  が与えられた頂点  $i$  に接続する要素の平均サイズ  $e\_size(i)$  が  $\tau_s$  より大きい場合に行う。結果として指定した  $\tau_s$  以下の要素が局所的に生成される。また、 $\tau_s$  を用いて、ある要素に対するサイズ比で解像度を指定することもできる。ある要素に対するサイズ比を定めたとき、その要素のサイズと指定したサイズ比を用いて  $\tau_s$  を算出し、これを解像度制御に用いる。

### 4.2 粗密生成型解像度制御

#### A) 曲率依存制御

形状の曲率に従ってメッシュを高解像度化する。このために、まず、最初の低解像度化の段階で、入力高密度メッシュの各頂点において主曲率を評価し<sup>3)</sup>、主曲率のうち大きい方の値を  $\kappa_i$  として保存する。次に、メッシュ低解像度化のための EC においては新たに生成される頂点へ、統合される 2 頂点の持つ  $\kappa_i$  の大きい方の値を継承し、保存しておく。適応的解像度制御では、 $\kappa_i$  に応じた  $\tau_s$  を設定することにより、全ての解像度の頂点で  $\tau_s$  が設定され、高解像度化がなされる。

#### B) 部分指定制御

ユーザの注目部分のみを高解像度化する。これは、ユーザのピックや要素 ID などを選択したメッシュ要素に含まれる頂点に対して  $\tau_s$  を設定することにより行われる。この際に  $\tau_s$  は、局所的な解像度変更の過程で継承されなければならない。本手法では、高解像度化の指示が与えられた部分の空間的な位置を保存するために、 $\tau_s$  は、1 段階の VS の後に、最初に  $\tau_s$  が指定された頂点位置に最も近い頂点にのみ継承する。

### 4.3 粗密保存型解像度制御

解析用メッシュの要素数管理を可能とするために、4.2 節の方法で生成したメッシュの粗密を保持したまま、全体の要素数を変更する。このために、まず、*front* が真の頂点の  $e\_size$  を  $S_v$  とし、これを子頂点へは直接、親頂点へは子頂点对の値の平均値を割り当て、この規則に従って全ての頂点に  $S_v$  を割り当てる。次に木に含まれる全ての頂点  $i$  に対して  $S(i) = e\_size(i) / S_v$  を算出する。 $S(i)$  がメッシュ上の頂点で一定値に保たれている事は、解像度変更の最初の段階のメッシュの粗密を維持していることと等しい。よって、低解像度化では現在のメッシュ上の頂点で親の頂点の  $S(i)$  が最も小さな頂点対へ EC を、高解像度化では子の  $S(i)$  が最も大きな頂点へ VS を適用することで粗密を保持した解像度制御がなされる。

## 5 提案手法の適用結果

図 4(a) の高密度三角形メッシュに対し、一様な低解像度化<sup>1)</sup>を行ったメッシュを同図(b)、4.2 節 A) 及び B) の手法を適用した結果のメッシュを同図(c)(d)に示す。結果より、形状の

曲率、指定部分に従って粗密が付けられたメッシュが得られている事が分かる。また、それぞれの図中の括弧内の数値は、それぞれ、メッシュ内のストレッチの最小値、並びに三角形要素数を表す。ストレッチは正三角形で 1、形状が歪むに連れて 0 に近づく要素形状品質の評価指標である<sup>1)</sup>。結果より、適応的解像度制御の結果得られるメッシュのストレッチが、最初に指定した値 0.2 を保証していることが分かる。

## 6 おわりに

本研究では、FEM 用メッシュの効率的生成のための、FEM 用多重解像度メッシュの頂点階層表現を用いた適応的解像度制御手法を提案した。適用結果より、既提案の FEM 用多重解像度メッシュ生成法<sup>1)</sup>の特徴を受け継ぎ、注目部分を高精度に解析できる粗密のついた、より解析目的に適したメッシュが生成できる事がわかった。しかしながら、本手法で得られるメッシュの解像度の上限が入力高密度メッシュの解像度であるといった制約があり、より柔軟な粗密制御の為に、頂点挿入と三角形分割に基づく更なる高解像度化を導入することが課題として挙げられる。

### [参考文献]

- 1) 伊達他, 有限要素解析用多重解像度メッシュモデリングに関する研究, 2003 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, p.20, 2003.
- 2) 例えば, Leila De Florian et al., A multi-resolution topological representation for non-manifold meshes, Computer-Aided Design 26(2), pp. 141-159, 2004.
- 3) Pierre Alliez et al., Anisotropic Polygonal Remeshing, ACM Trans. on Graphics, 22, 3, 2003.

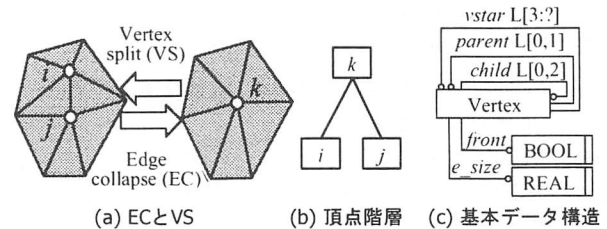


図3 頂点階層の表現

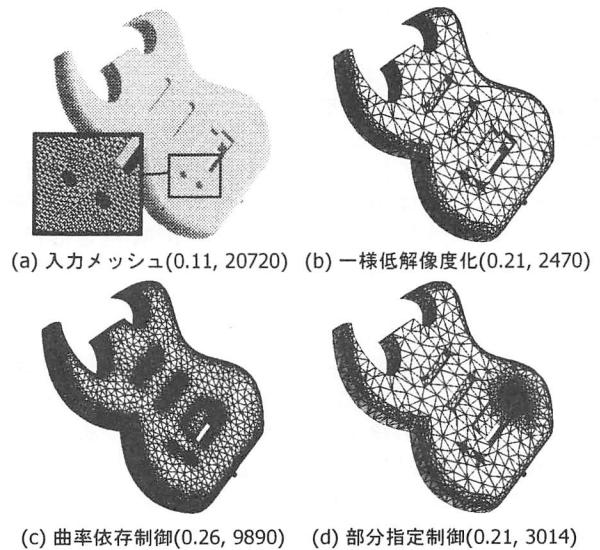


図4 適応的解像度制御手法の適用結果 (括弧内の数値は左から、ストレッチの最小値、三角形要素数を表す)

1) 2003