

# X線CT画像に基づく個別別有限要素モデリング (骨体の形態を考慮した要素分割手法の考察)

## Individual Finite Element Model Based on the X-ray CT Data (Study of meshing algorithm considering form of a bone)

上西 雅也 (東工大)      正 小関 道彦 (東工大)  
正 伊能 教夫 (東工大)      榎 宏太郎 (昭和)

Masaya JONISHI, Michihiko KOSEKI, Norio INOU  
Tokyo Institute of Technology, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo  
Koutarou MAKI, Department of Orthodontics, Showa University, Ohta-ku, Tokyo

**Key Words:** Individual Modeling, Finite Element Method, X-ray CT, Automated mesh generation, Delaunay triangulation

### 1. 緒言

骨体の力学的特徴を非侵襲状態で数値計算によって把握することが可能となれば骨体の診断・治療に役立つ情報が提供できる。そのため、個別別有限要素モデルの生成手法に関する研究が活発に行われている。筆者らはX線CT画像をもとに、骨体全体をほぼ等しい要素サイズでモデリングする手法を開発した<sup>1)</sup>。これにより有限要素モデルをほぼ自動的に生成することが可能となった。ただし、現状のモデリング手法では骨体表面の曲率が高い箇所や骨体が薄い箇所も同じ要素サイズとなり、形状表現が粗くなる傾向がある。このような部分では応力が集中する可能性があるため、要素サイズを小さくした分割が望ましい。

そこで、骨体の形状に応じて要素サイズを制御するモデリング手法に関して考察を行ったので報告する。

### 2. 形状に応じた要素サイズの制御手法

要素サイズはNURBSを代表とする補間式で物体を表現して制御することも可能であるが、この方法を離散データであるCT画像に適用することは困難である。そこで、節点を配置する際に形状を考慮する手法を考案した。まず、筆者らが提案する個別別モデリング手法の流れを以下に示す(図1参照)。

CT画像群からボクセルスペースを生成する。

ボクセルスペースの有効領域内に節点を配置する。

の節点群に対し、デラウニー分割法を用いて四面体要素に分割する。

不要要素を除去する。

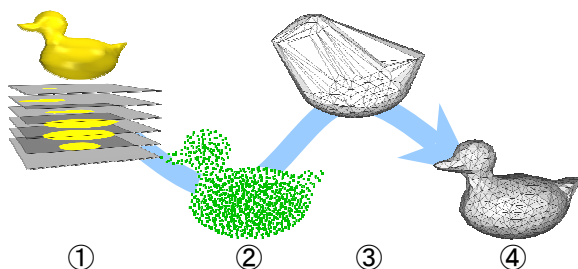


Fig 1 Modeling process

形状に応じた要素サイズの制御は手順の中で以下のように行う。

注目するボクセルの周辺  $n \times n \times n$  の空間にモデリングを行うべき物体(骨体)が存在するボクセル数  $N_v$  を算出する。

基準値を  $n^3/2$  とし、基準値と  $N_v$  との差を形状因子  $V_s$  として、次式で算出する。

$$V_s = |n^3/2 - N_v|$$

形状因子  $V_s$  が大きい箇所には節点を密に、 $V_s$  が小さい箇所には節点を疎に配置する。

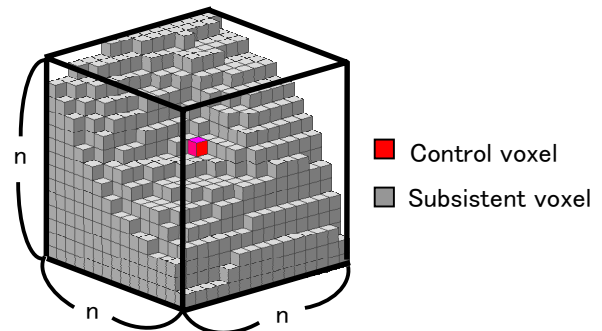


Fig 2 Exemplification of form factor for size control

モデリングの際、要素サイズの制御は上記の流れに従い3次元のボクセル空間で行うが、ここでは簡単のため図3(a)に示す2次元の場合を例にして説明する。

まず、 $n \times n$  の範囲を探索すると物体の存在するボクセルが149となる。また、2次元での基準値は  $n^2/2$  であり、この場合は144.5である。そのため形状因子  $V_s$  は  $|149 - 144.5| = 4.5$  となる。こうした操作をすべての輪郭ボクセルで行い、算出された形状因子  $V_s$  をもとに節点を配置することによって要素サイズを制御する。同様に計算した図3(b)(c)(d)のモデリングを行うべきボクセル数と形状因子との関係を表1に示す。

図3(b)(c)は曲率が高く(d)は薄いので、これらは力学条件によっては応力が集中する可能性がある。それに対し(a)は厚みが十分にあり曲率も小さいため、極端

に応力が大きくなる可能性は低い．表 1 に示す通り，(b) ~ (d) では形状因子が大きく(a)は小さい．そこで，形状因子が大きい箇所は節点を密に配置することで要素サイズを小さくし，形状因子が小さい箇所は節点を疎に配置することで要素サイズを大きくする．この手法を用いることで形態に応じた要素サイズの制御が可能となる．

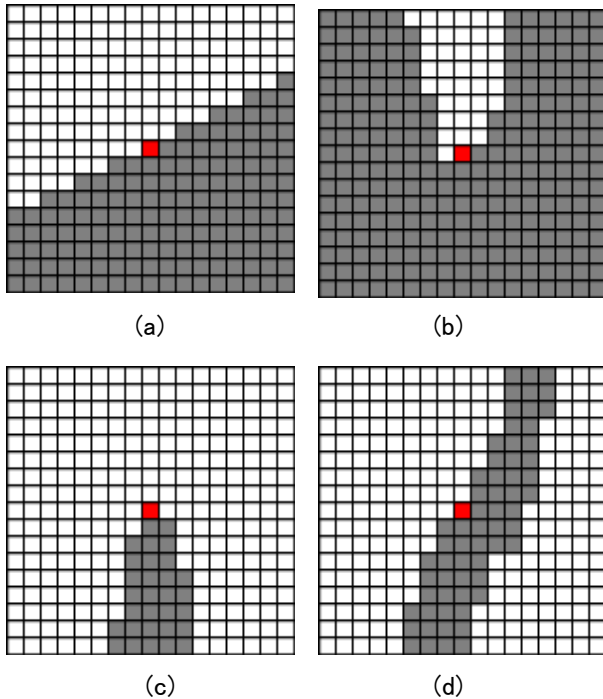


Fig 3 Examples of partial shape around control voxel

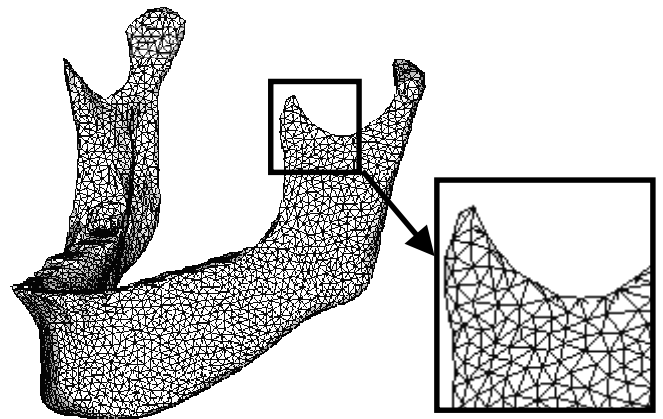
Table 1 Subsistent voxels and form factor

	(a)	(b)	(c)	(d)
Subsistent voxels	149	252	31	53
Form factor	4.5	107.5	113.5	91.5

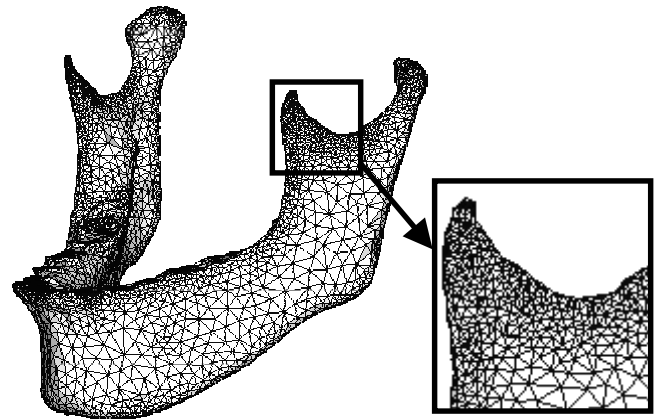
### 3. 骨体への適用

本手法をヒト下顎骨に適用し，モデリングを試みた．図 4 (a) は従来の手法であり，骨体全体を等しい要素サイズでモデリングを行った．(b) は最大要素サイズと最小要素サイズの比を 10:1 に設定し，形状因子に応じて要素サイズを制御した．要素サイズが急激に変化すると形の悪い要素が生成される恐れがあるので，輪郭線上にあるボクセルから算出された形状因子  $V_s$  をモデリングを行う対象物体内部にまで反映させて，要素サイズを制御した．これによって要素サイズをモデル全域にわたって滑らかに変化させることが可能となった．

図 4 において拡大図を示した筋突起部分は曲率が高く，薄い箇所であるため(b)のモデルは(a)のモデルと比較して要素サイズが小さくなっている．一方，オトガイ部分は曲率が低く，十分に厚いため，(b)のモデルは(a)のモデルと比べて大きな要素サイズでモデリングされている．



(a) without controlling mesh size



(b) with controlling mesh size

Fig 4 Finite element models of human mandible

Table 2 Number of nodes and elements

	(a)	(b)
Number of nodes	10,646	9,962
Number of elements	53,083	44,529

### 4. 結言

形状に応じて要素サイズを制御するモデリング手法を提案した．そして，ヒト下顎骨を対象としてモデリングを行い，要素サイズを制御したモデルと従来手法のモデルとを比較した．

応力は形状だけではなく，骨密度にも依存するため，今後は骨密度に応じた要素サイズの制御手法についても考察し，形状に応じた要素サイズの制御手法との統合を行いたいと考えている．そして，モデリング時に要素サイズを制御することの有効性について応力解析を行って検討する予定である．

### 参考文献

- 1) 伊能教夫，鈴木知，榎宏太郎，宇治橋貞治：X 線 CT データに基づく骨体の自動モデリング手法(デラウニー分割を利用した有限要素モデルの生成)；日本機械学会論文集 C 編，Vol.68，No.669，pp.1481-1486，2002