

# 個体別モデリング手法による下顎骨の応力解析

## Stress Analysis of a Human Mandible by an Individual Modeling Method

伊能 教夫 (東工大)

小関 道彦 (東工大)

谷崎 博之 (東工大)

槇 宏太郎 (昭和大)

Norio INOU, Michihiko KOSEKI, Hiroyuki TANIZAKI: Tokyo Institute of Technology

Koutarou MAKI: Showa University

FAX: 03-5734-2815 E-mail: koseki@mech.titech.ac.jp

The purpose of this study is to examine mechanical characteristics of the human mandible. It has two essential problems to be solved for execution of reliable stress analyses. One is that the mandibular body has a complicated shape. The other one is that the mandibular body receives various masticatory forces under a biting condition. This paper describes an automated modeling method based on X-ray CT images, and the result of the stress analysis performed under a bilateral biting condition. The computational result shows that the mandible can be explained from biomechanical view points.

### 1 緒言

X線CTやMRIから得られる画像データを用いて個体別の有限要素モデルを作成し、応力解析する手法は、非侵襲に骨体に生じる力学状態を探ることが可能なため、医学分野で期待されている技術である。

ここで、個体別の解析において信頼性の高い解析結果を得るためには、骨体形状を正確にモデリングすること、適切な材料定数を設定すること、そして、適切な力学条件を設定することが重要である。

筆者らは、ヒトの下顎骨を対象に、X線CT画像をもとに個体別モデルを作成し、咀嚼時に生じる応力状態を有限要素法を用いて解析している。本稿では、筆者らが提案する個体別モデリング手法について述べ、両側噛みしめ状態について本手法を用いて解析を行ったので報告する。

### 2 応力解析の手順と結果

下顎骨の応力解析は次の5つのステップで行っている。

ステップ1: CT画像から骨体の画像領域の抽出

ステップ2: 個体別有限要素モデルの作成

ステップ3: CT値を基に骨体の物性の設定

ステップ4: 骨体に働く筋力と境界条件の設定

ステップ5: 応力解析と評価

ステップ1では、512×512Pixelで構成されたCT画像から骨体部分を抽出する。ここでは、骨表面の緻密骨と軟組織のCT値に大きな差があることから、閾値を設定することにより、ほぼ自動的に抽出が可能となった。

ステップ2では、次の4つのプロセスにより有限要素モデルを自動生成する<sup>1)</sup>。Fig.1に各プロセスの概念を示す。

- ・CT画像から骨体のボクセルスペースを作成する。
- ・ボクセルスペースに節点群を配置する。
- ・節点群から有限要素を生成する。
- ・骨体の領域外の不要な要素を取り除く。

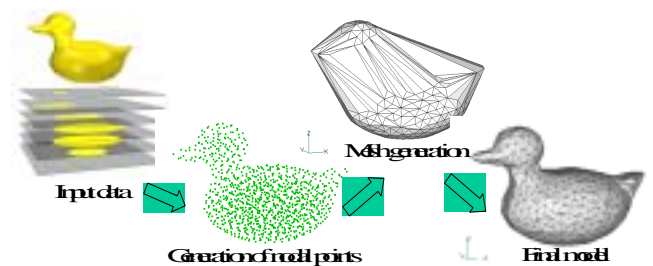


Fig. 1: Modeling processes by use of Delaunay triangulation

ステップ3では、骨体の物性の設定を行う。ここで、骨密度はCT値に比例し、ヤング率は骨密度の3乗に比例するという報告がある<sup>2)</sup>。しかし、X線CT画像を用いる場合、部分体積効果やスライス画像間の補間によってヤング率の値が適切に設定されない場合が考えられる<sup>3)</sup>。そこで、海綿骨に相当するCT値の小さい部分には3乗則を適用し、緻密骨に相当する部分には16GPaになるように設定した。

ステップ4は、骨体に働く筋力と境界条件の設定である。まず、被験者に感圧シートを噛んでもらい、そこから歯列に生じる荷重を測定した。次に、咀嚼筋を構成する咬筋・内側翼突筋・外側翼突筋・側頭筋の4種類の筋肉からの作用を考え、各筋の牽引方向はCT画像の3次元再構築像から割り出し、筋力は断面積に比例すると仮定した。そして、筋力と咬合力からなる関節軸まわりのモーメントがゼロになるよう、次式により筋力を調整した。

$$\sum_i (C_{bi} \times f_{bi}) + A \sum_j (C_{mj} \times R_{mj}) = 0 \quad (1)$$

上式において、 $f_{bi}$  および  $C_{bi}$  は各歯牙における咬合力および荷重点の関節軸からの距離を、 $R_{mj}$  および  $C_{mj}$  は各咀嚼筋の筋力比および筋付着位置を示している。

両側噛みしめ状態について、感圧シートから得られた歯列に加わる荷重と、算出した筋力を Fig.2 に示す。

次に、境界条件として二つの関節部および切歯部に拘

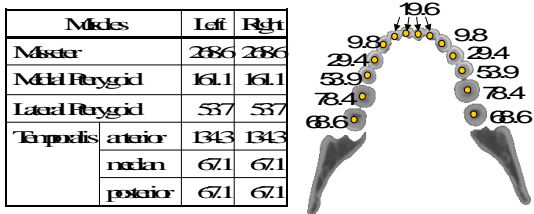


Fig. 2: Bilateral biting conditions

束点を設定した。ここで、関節部に与えた拘束点は両関節頭を結んだ関節軸方向に移動可能とし、また、切歯部にはZ方向の拘束を与えた (Fig.3 参照)。

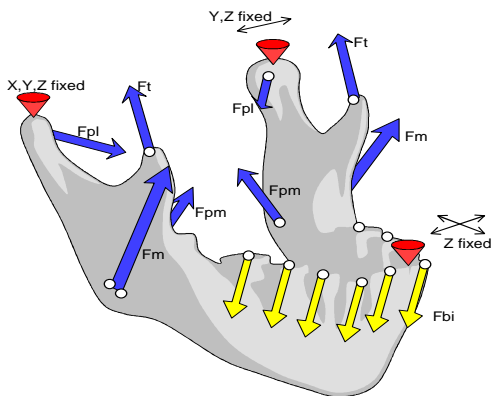


Fig. 3: Force balance and boundary condition of mandible

筋力は各筋の付着位置に相当する箇所に分散荷重として与えた。また、拘束を与えた関節頭の1節点に応力が集中するのをさけるため、関節頭に加わる反力を計算して求め、近接の節点に分散荷重として与えた。Fig.4 に荷重状態を示す。

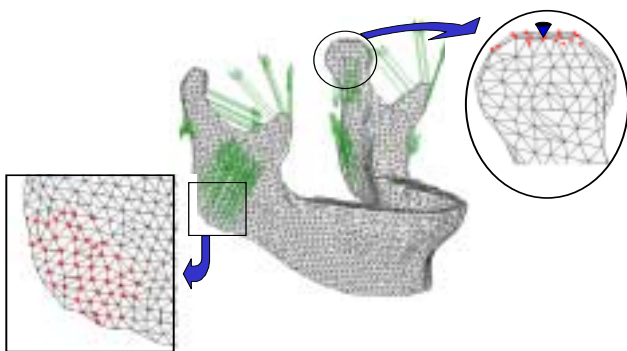


Fig. 4: Distribution of the muscular forces and reaction forces on the condyles

ステップ5において、ここまで述べてきた両側噛みしめ状態での力学条件で応力解析を行った。解析には Concurrent Analysis 社の CAEFEM を用いた。相当応力分布を Fig.5 に示す。

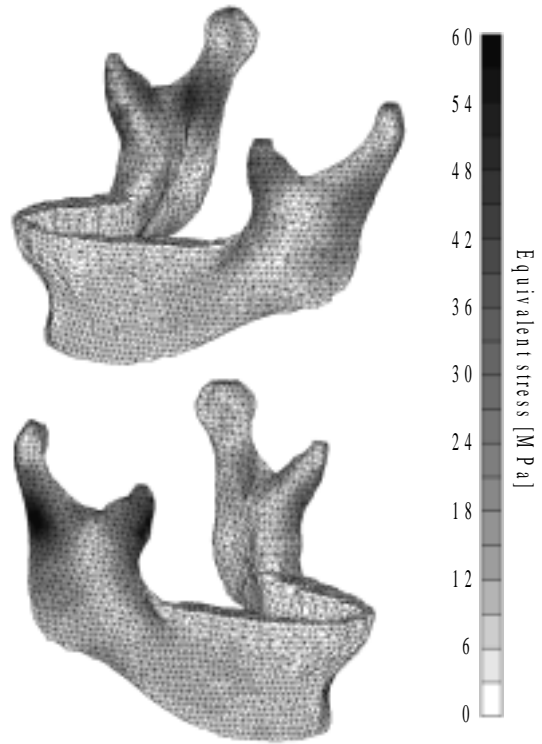


Fig. 5: Stress distributions for bilateral biting conditions

応力分布については、関節付け根付近に最大応力が見られ、また、下顎骨の側面に応力の高い部分が帯状に現れている。これは、被験者の骨密度が高い部分と定性的に一致しており、骨体が力学環境に適応していることが伺える。また、関節部には 200N 程度の反力が生じているが、荷重を分散したことにより、応力集中は見られなかった。

### 3 結言

X線 CT 画像をもとに個別の解析モデルを作成する手法を開発した。そして、ヒト下顎骨を対象として、作成したモデルを用いて両側噛みしめ時の咬合状態について応力解析を行った。現状の解析では、筋力の設定を筋断面積からの比例計算によって行っているが、咀嚼物を前歯で噛み千切る場合は、筋の使い方が大きく異なると考えられる。今後、様々な咬合状態について解析を行い、骨体に働く力学状態について考察したい。

謝辞：本研究は文部科学省科学研究費補助金基盤研究 B (11558105) の補助を得て遂行している。

### 参考文献

- (1) 伊能, 鈴木, 宇治橋, 横: X線 CT データに基づく骨体の応力解析 (Delaunay Triangulation を利用した個別モデリング), 第 11 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集 (No.99-3), pp.294-295, 1999
- (2) D.R.Carter and W.C.Hayes: Bone Compressive Strength: The Influence of Density and Strain Rate, Science, 194, pp.1174-1976, 1976
- (3) 伊能, 小関, 岩崎, 横: X線 CT 画像に基づく個別有限要素モデリング (骨体のヤング率の算出), 平成 13 年度材料力学部門講演会講演論文集 (No.01-16), pp.39-40, 2001