S110 骨密度分布を考慮した顎骨のモデル化と臨床問題への応用

Modeling of Jaw Bone Considering Bone Density and Its Clinical Application

○荒平 高章 (九大院) 正 東藤 貢 (九大応研) 佐々木 匡理 (九大歯学)
竹之下 康治 (九大歯学) 正 新川 和夫 (九大応研)

Takaaki ARAHIRA, Graduate School, Kyushu University, Kasuga, Fukuoka
Mitsugu TODO, RIAM, Kyushu University
Masanori SASAKI, Faculty of Dental Science, Kyushu University
Yasuharu TAKENOSHITA, Faculty of Dental Science, Kyushu University
Kazuo ARAKAWA, RIAM, Kyushu University

Keywords: Dental biomechanics, CT-image based modeling, Occlusion, Finite element analysis

1. 緒言

現在、複雑な生体組織の力学状態を近似的に高精度で把握するために、X線 CT や MRI から得られる画像データを用いて、詳細な 3 次元 FEA モデルを作成し数値解析を行う技術が開発され研究が進んでいる。歯科医学の分野においてこれまでに用いられた解析モデルは、下顎単独のモデルや顎骨の部分的なモデル、およびそれらにインプラントを埋入したモデルが多いのが現状である。しかし、実際に起こっているインプラントのゆがみや破損といった問題は、日常生活での食事などに行う噛み締め行動から発生するものであり、その行為は上顎と下顎の双方で行われているものである。したがって、数値解析を行う際にも上・下顎の両方を有する顎骨モデルを構築し、実際の咬合状態を再現することが望ましい。

そこで、本研究では、X 線 CT 画像を元に上・下顎骨の 3D-FEA モデルを作成し、そのモデルを用いて両側噛み締め時の顎骨の力学状態を再現することを目的とした。男性と女性それぞれ 1 名の CT 画像を用いて 3D-FEA モデルを作成し、同じ境界条件の下で顎骨の力学状態の差異について考察した。また、臨床的な応用問題として、本研究では顎骨内に空洞が形成される嚢胞を取り上げ、3D モデルの適用を試みた。

2. 解析方法

顎骨モデルは、生体構造解析ソフトウェア Mechanical Finder を用いて被験者 (23 歳女性および 49 歳男性) の頭部 CT 画像から骨部分を抽出することで構築した (Fig.1(a))。CT のスライス間隔は女性が 1mm 男性が 3mm であり、それぞれのモデル作成に要した CT 画像はおよそ 100 枚と 50 枚である。上顎については、鼻空の中央部より上部を省いている。要素分割の一例として、female model の分割状態を Fig.1(b)に示す。4 節点 4 面体要素を用いており、female model と male model の要素数はそれぞれ 880899 と 681478、節点数はそれぞれ 188230 と 145724 である。顎骨モデルのヤング率については、CT 値より骨密度を推定し、さらに骨密度から Keyak の理論を用いて決定しており、要素ごとにヤング率を設定した¹⁾。

次に、嚢胞を模したモデルを Fig.2 に示す。嚢胞は球状であると仮定し、下顎の左部前方に挿入した。通常、嚢胞には液が満たされるが、本モデルでは、ヤング率は 0.1Pa、ポアソン比は 0.3 とし、嚢胞の直径は 8mm に設定した。

本解析で用いた境界条件を Fig.3 に示す。拘束条件としては、上顎の上部を Z 方向に固定し、関節部となる下顎の一端は 3 軸方向の変位を全て固定し、もう一端は X, Z 方向への変位を固定している。すべての拘束点において、回転に拘束は与えていない。筋力としては、咬筋 (M)、側頭筋 (Ta, Tp)、

内側翼突筋 (Pm)、外側翼突筋 (Pl) の作用を考慮して設定した。

Fig.1 CT-image based jaw bone model.

Fig.2 Jawbone cyst model.

Fig.3 Boundary conditions.

3. 結果と考察

Fig.4 に female model の顎骨中央で切断した面のヤング率分布を示す。表面の皮質骨に当たる部分が高ヤング率 (明るい部分) を、内部にある海綿骨部は低ヤング率 (暗い部分) を示しており、実際の骨構造を反映したヤング率分布が再現されている。また歯列はエナメル質を反映し、高ヤング率を示している。

Fig.5 にミーゼス相当応力分布を示す。前面図で比較すると、female model の方がより高い応力が広範囲に分布してい

Fig.4 Distribution of Young's modulus.

Fig.5 Distribution of the equivalent stress.

ることがわかる。また、顎骨中央部で切断した面より、皮質骨で大きな応力が発生している。Fig.5 に示す A 点と B 点での相当応力を比較したグラフを Fig.6 に示す。A 点は顎の先端部、B 点は鼻空の下部先端をそれぞれ示している。このグラフから、female model の方が著しく高い応力を受けていることが分かる。皮質骨のヤング率が低く、顎骨量も少ない female model の方が male model よりも構造体としての剛性が低いため、同じ境界条件下で発生する応力は高い。

Fig.7 に、嚢胞モデルでの相当応力分布を示す。図は嚢胞中央を通る面で切断した断面である。嚢胞モデルはヤング率が極端に小さいため、それを取り囲んでいる皮質骨に高い応力が作用している。Fig.8 に、嚢胞モデルと正常モデルの相当応力値を比較したグラフを示す。嚢胞モデルの方が高い応力が生じていることが分かる。嚢胞が進行すると、それを取り囲む皮質骨が薄くなり、顎骨骨折の危険性が増大するが、今回の嚢胞モデルで嚢胞を成長させることで、顎骨骨折の予測に利用できる可能性があることが示唆された。

4. 結 言

本研究では、男女別にそれぞれ顎骨の 3D モデルを作成し、咬合状態を再現した境界条件で応力解析を行った。骨密度分布からヤング率分布を推定することで、皮質骨と海綿骨のヤング率の差を再現することができ、実生体構造に近い数値モデルの構築が可能となった。女性の方が皮質骨部のヤング率が低いとともに骨量も少ないため構造体としての顎骨の剛

性は低く、男性よりは変形しやすく、より高い応力が発生することが定量的に確認できた。また、臨床的な応用問題として嚢胞という病的顎骨モデルを再現した。ヤング率の小さい球状モデルで嚢胞を模擬し顎骨に挿入することで、嚢胞周辺での高い応力分布を再現することができた。

本研究で紹介した顎骨モデルの作成法を用いることで、患者別の顎骨モデルの構築が可能となり、インプラント治療や病的顎骨の力学状態の解析など応用範囲は広い。

参考文献

- 1) J.H.Keyak, et al., J. Biomech., 31, 1998, 125-133.

Fig.6 Comparison of the equivalent stress at two points.

Fig.7 Distribution of the equivalent stress in cyst model.

Fig.8 Comparison of the equivalent stress.