

個別モデリング手法による筋骨格系の応力解析 - 力学条件設定支援システムの開発 -

Individual Stress Analysis of the Musculoskeletal System

- Development of the Setting Support System for Boundary Conditions -

谷崎 博之(東工大) 正 小関 道彦(東工大)

正 伊能 教夫(東工大) 槇 宏太郎(昭和大)

Hiroyuki TANIZAKI, 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, Stress analysis, Boundary condition, Finite element method, X-ray CT

1. 緒言

X線 CT や MRI などの画像診断機器から得られるマルチスライス画像から、生体組織や器官を対象にして個別の有限要素モデルを作成する研究が盛んに行われている。最近では、計算機の向上と共に非常に多くの要素数(節点数)を持つ有限要素モデルの生成および解析が可能となっている。

骨体形状を忠実に反映した有限要素モデルの生成が可能となった一方で、力学条件の設定は、逆に困難な状況になっている。たとえば、骨体の応力解析を行うためには筋力と拘束点を節点毎に設定する必要がある。特に筋肉は骨体表面に分布しているため、筋付着部位に相当する節点をモデル全体の節点群の中から選び出し、三次元的に筋力方向を設定しなければならない。この作業には通常、多くの労力と時間を必要とする。また、これらの力学条件設定には医師との連携が必要である。以上のことから本研究では、複雑な骨体形状でも力学設定が視覚的かつインタラクティブに行える GUI を備えた力学条件設定支援システムの開発を行った。

2. 力学条件設定支援システム

図1は、有限要素法を用いた生体骨の個別応力解析の流れを示している。

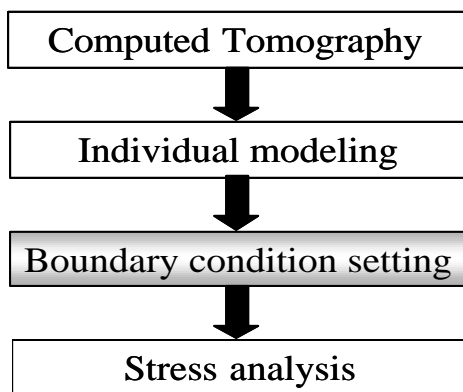


Fig.1 Procedure of individual stress analysis

筆者らはマルチスライス画像から個別有限要素モデルを生成する手法¹⁾を提案しており、骨体形状の正確なモデリングを容易に行うことが可能となっている。しかし、応力解析のための力学条件設定には、一般に汎用のプリポストプロセッサが用いられており、生体内で骨体に加わる複雑な力学状態を的確に設定することが困難だった。例えば、骨体表面の筋付着部位を荷重点として分散設定し、筋の牽引方向を正確に設定するには、煩雑な作業が必要であった。そこで、筋力や外力を容易に設定することが可能な力学条件設定支援システムを開発した。本システムは、以下に述べる特徴を有し、様々な生体骨に適用可能である。

- ・筋力および荷重の作用部位を設定する際、表面にある節点のみから選択するため、容易に設定できる。
- ・筋の起始部分と停止部分を表示することが可能であるため、相対的な位置関係が把握でき、作用方向を正確に設定できる。

今回、形状が複雑で、咀嚼時に様々な筋力および荷重が作用するヒトの下顎骨を対象として、力学条件の設定および応力解析を試みた。解析には汎用有限要素解析プログラム CAEFEM(Concurrent Analysis 社)を用いた。本システムで右咬筋の牽引方向を上顎骨とともに設定している様子を図2に、応力解析により得られた相当応力分布を図3に示す。

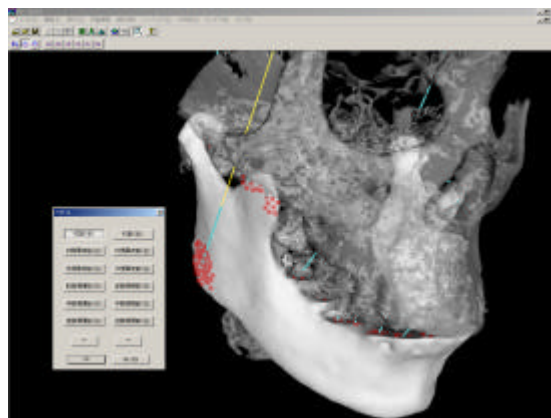


Fig.2 Setting support system for boundary condition

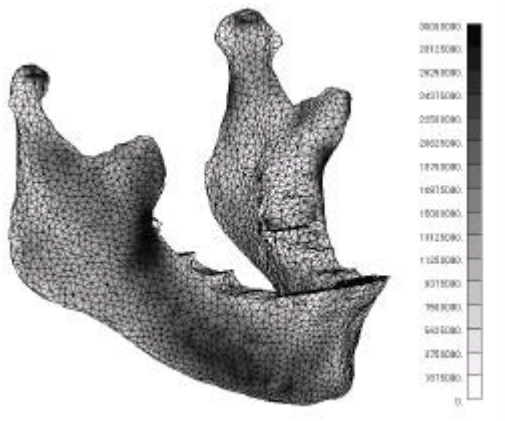


Fig.3 Stress distribution under a biting condition

従来、咀嚼時の下顎骨の力学条件を設定するには数十時間を要していたが、本システムを用いることによって設定に要する時間を数十分に短縮することができた。また、設定内容の変更が即時に可能であるため、咀嚼時の様々な力学状態をそれぞれ解析することが容易になった。

ここで、各咀嚼筋力は正確に測定することが困難であるので、筋力を適切に推定する作業が必要である。そのため、筋肉群は協調的に筋活動を調整し、全体として適切な状態を保っているという考えに基づき、以下に述べる筋力の推定手法を組み込むことを計画している。

3. 評価指標に基づく筋力の推定

筋力の推定手法は次の4つのステップで構成される。

ステップ1：歯牙荷重および筋力方向の設定

ステップ2：下顎骨のバランス計算

ステップ3：下顎頭における反力の算出

ステップ4：評価指標に基づく各筋力の推定

ステップ1では、歯牙荷重および咀嚼筋力の作用部位と方向を、上下顎骨の形状データをもとに決定する。

ステップ2では、各咀嚼筋の活動割合を設定し、その時の下顎骨のバランスを計算することによって歯牙荷重と釣り合う筋力を算出する。ここでは、顎関節軸回りで発生する、筋力によるモーメントと歯牙荷重によるモーメントが噛みしめ時には釣り合うことを利用し、次式を用いてバランス計算を行う。

$$\sum(C_b \times F_b) + a \sum(C_m \times f_m) = 0 \quad (1)$$

ここで C_b, C_m は関節軸から歯牙荷重および筋付着部位へのベクトル、 F_b は歯牙荷重ベクトルであり、筋の活動割合を表す f_m に比例定数 a を積算することによって筋力を算出する。

ステップ3では、下顎骨に作用する全荷重がつりあうことに基づき、次式を満たす両下顎頭の反力 (F_{r1}, F_{r2}) を算出する。

$$F_{r1} + F_{r2} + \sum F_b + \sum af_m = 0 \quad (2)$$

ステップ4では、生体の効率的な活動を考慮した評価指標を設定し、ステップ2以降を各咀嚼筋の活動割合を変化させて繰り返し計算を行うことによって、評価指標に基づく筋力を推定する。

評価指標として次の2つを設定し、医師の経験的知識により各咀嚼筋の活動割合を決定した場合（従来手法）との下顎頭反力の比較を行った。

Index 1：下顎頭における反力を最小とするもの

Index 2：筋力の2乗和を最小とするもの

各指標および従来手法により決定された筋力の大きさおよび両下顎頭反力の平均値を表1に示す。

Table 1 Masticatory forces and calculated temporomandibular joint force(TMJF)

forces [N]	Index 1	Index 2	Previous Method
Masseter	264.3	178.8	172.0
Medial pteygoid	0.0	91.9	86.0
Lateral pteygoid	0.0	25.5	64.5
Temporalis	125.6	163.4	266.9
TMJF	161.3	178.5	210.2

従来手法と比較するといずれの場合も、下顎頭反力が減少している。これは、咀嚼筋力の総和が減少しても歯牙荷重とバランスがとれる筋の活動割合が存在することを示している。Index 1では、噛みしめ時に内側翼突筋および外側翼突筋が活動しておらず、適切な咀嚼状態とは考えにくい。Index 2では、各咀嚼筋力は分散するが、この結果ではIndex 1と同等の下顎頭反力が得られている。今後、計算で得られる応力分布とCT画像から得られる骨密度分布を比較しながら評価指標について、さらに考察を行っていきたい。

4. 結言

本研究ではまず、複雑な骨体形状でも容易に力学条件の設定が可能な支援システムを開発した。本システムを用いて、有限要素解析が行えることを確認し、作業時間の短縮を実現した。そして、筋の活動割合を変化させ、評価指標による筋力の推定手法を検討した。

今後、本システムに筋力の推定手法を組み込み、多数の個体別モデルについて解析を行うことによって、統計的に筋力設定の妥当性を検討する予定である。

参考文献

1) 伊能, 鈴木, 榎, 宇治橋: 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

