

咀嚼筋の活動状態の推定と個体別応力解析

Estimation of Masticatory Forces of the Human Mandible and Patient Specific Stress Analysis

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

Michihiko KOSEKI and Norio INOU: Tokyo Institute of Technology, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo
Koutarou MAKI: Showa University, Kitasenzoku, Ohta-ku, Tokyo

This study proposes an estimation method of the masticatory forces using an objective function composed of three criteria: efficiency of muscular activities, moment balance between muscular and biting forces, and reaction forces at condyles. Our previous study applied the method to a patient whose jaw had a severe deformity, and showed validity of the method. This paper applies the method to a patient with a symmetrical jaw. The numerical result shows an unrealistic masticatory condition, such as there are non-working muscles. The plausible solution of this problem is discussed.

Keywords : Muscular force, Masticatory system, Estimation method, Finite element analysis, Patient-specific model, Objective function.

1 はじめに

計算バイオメカニクス分野において個体別モデリング技術は、生体の力学状態の解析や運動状態の分析を個体別に行う上で欠くことのできない有用な方法である。筆者らはヒトの下顎骨を対象として、咀嚼時における応力状態を X 線 CT 画像に基づき個体別に解析している。ここで、個体別モデリングの際に必要なとなる下顎骨の形状情報や物性情報については、X 線 CT などの 3 次元医用画像から比較的信頼できる情報を得ることができる。しかし、個体別応力解析の力学条件として必要となる披験者ごとの咀嚼筋力を直接的手段で計測することは困難であるため、何らかの推定手段を用いる必要がある。

そこで筆者らは、目的関数に基づく咀嚼筋力の推定手法について検討しており、前報 [1] では筋力発生の効率や関節反力などを総合的に考慮した筋力の推定手法を提案した。しかし、披験者の顎形状によっては提案した評価指標だけでは不十分な場合があることが見出された。本稿では、新たな披験者の筋力推定結果を述べ、現実的な筋力を推定するための方策について考察する。

2 咀嚼筋の活動状態の推定

ヒトの下顎骨には、咬筋・側頭筋・内側翼突筋・外側翼突筋からなる咀嚼筋が付着しており、咀嚼時にはこれらの筋が総合的に働くことによって咬合力が発揮されると言われている。前報 [1] で提案した咀嚼筋力の推定手法は、以下の 3 つの評価指標を考え、これらを総合的に考慮した式 (1) に表される目的関数を用いて筋力を推定するものである。

- 筋力の 2 乗和
- 前後軸 (y 軸) 周りのモーメント
- 関節反力の 2 乗和

$$I = \sum_{i=1}^m (\alpha f_i^M)^2 + k_1 \left| \sum_{i=1}^b (\mathbf{r}_{yi}^B \times \mathbf{F}_i^B) + \sum_{i=1}^m (\mathbf{r}_{yi}^M \times f_i^M \mathbf{e}_i^M) \right| + k_2 \left(|\mathbf{F}_1^R|^2 + |\mathbf{F}_2^R|^2 \right) \quad (1)$$

ここで第 1 項は、筋活動の効率を考慮したものであり、歯牙荷重と筋力のモーメントバランスの計算によって算出される m 個の筋力 (αf_i^M) の 2 乗和を求めている。

第 2 項は、前後軸 (y 軸) 周りのモーメントが釣合うことを評価しており、 \mathbf{r}_{yi}^B および \mathbf{r}_{yi}^M は歯牙荷重重心を通る前後軸 (y 軸) から歯牙荷重および筋付着部位へのベクトルを示す。 \mathbf{F}_i^B は歯牙荷重ベクトルであり、 \mathbf{e}_i^M は筋肉の走行方向を表す単位ベクトルである。 b 個の歯牙および m 個の筋肉について足し合わせたものでモーメントを算出している。 k_1 は第 2 項に対する重み係数である。

第 3 項では、関節反力が左右ともに大きくないことを考慮している。バランス計算によって算出される左右の関節頭に生じる反力 ($\mathbf{F}_1^R, \mathbf{F}_2^R$) の 2 乗和を用いている。 k_2 は第 3 項に対する重み係数である。

この目的関数を用い、咬筋が最大の筋力を発揮するという条件下で繰り返し計算を施すことによって各咀嚼筋の筋力を推定する。前報において顎変形症患者に本手法を適用したところ、各項の重み係数は $k_1 = 1000.0$ 、 $k_2 = 10.0$ と設定することにより、筋電位計測結果に基づく医師の推定に最も近い結果を算出できることを確認している。

3 左右対象な下顎骨への適用

前報では顎変形症患者の個体別モデルを作成し、上述の目的関数を用いて両側噛み締め時の筋力推定を試み、提案する手法の有用性を確認した。今回は左右差の少ない下顎骨形状を持つ患者について、本手法の適用を試みた。

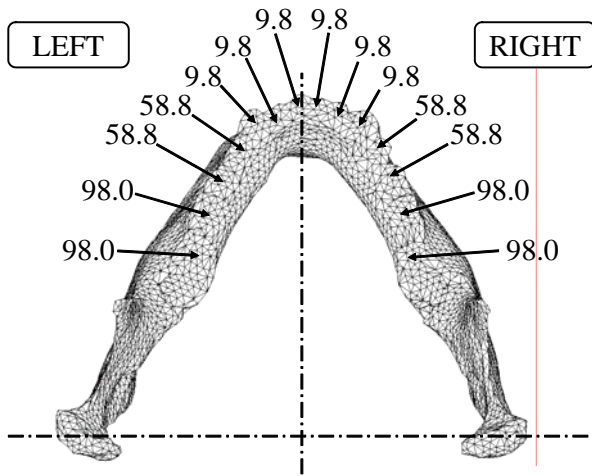


Fig. 1: A patient-specific model and the distribution of biting forces [N].

図1はX線CT画像から構築した下顎骨の個別別モデルを咬合面から見た状態であり、力学条件として設定した歯列に加わる荷重の大きさを図示している。

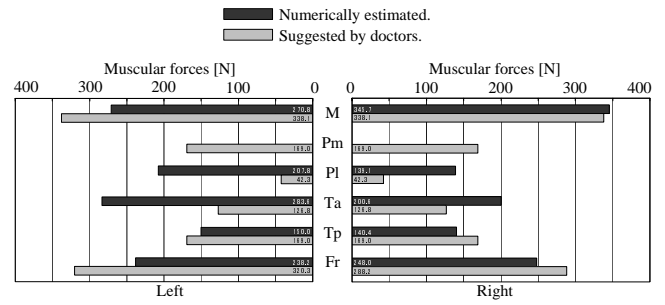
通常、応力解析の力学条件には、被験者に感圧シートを噛んでもらうことにより測定した歯牙荷重を用いている。また、咬筋および側頭筋の筋電位を測定し、その結果に基づいて歯科医師が各咀嚼筋の活動状態を推定している。しかし今回は簡単のため、筋電位や歯牙荷重の測定は行っていない。このため、図1に示す歯牙荷重の大きさは歯科医師の経験的知見により定めたものである。

このモデルについて、提案手法に基づいて筋力の推定を行った。結果を図2(a)に示す。この図では、医師が推定した筋力を薄灰色で示し、目的関数に基づく推定結果を濃灰色で表示している。各グラフは上から順に咬筋(M)、内側翼突筋(Pm)、外側翼突筋(Pl)、側頭筋前腹(Ta)、側頭筋後腹(Tp)および下顎頭反力(Fr)となっている。

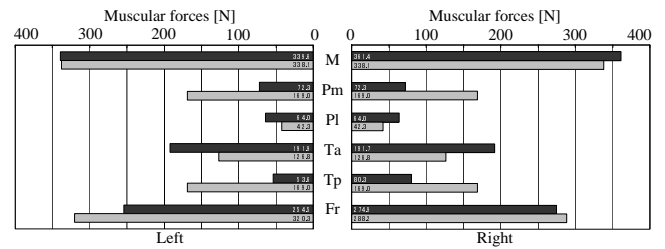
提案する手法によって推定された筋力は、あまり現実的でない結果となっている。すなわち、咬合力の大半を咬筋と側頭筋前腹だけで発生しており、内側翼突筋が全く働いていない。内側翼突筋は咬筋と同様に下顎を上方に持ち上げる方向に牽引する筋であり、その筋肉量も大きいので、このような状態は不自然である。また、咬合力にあまり関与しないとされる外側翼突筋が非常に大きな筋力を発生していることも考えにくい。

そこで、内側翼突筋が必ず筋力を発揮するように、左右どちらかの咬筋が発揮する最大の筋力に対してある程度の比率以上の力を内側翼突筋が発生しているものとして推定を試みた。図2(b)は最大筋力に対する比率を20%としたもの、図2(c)は50%とした場合の結果である。

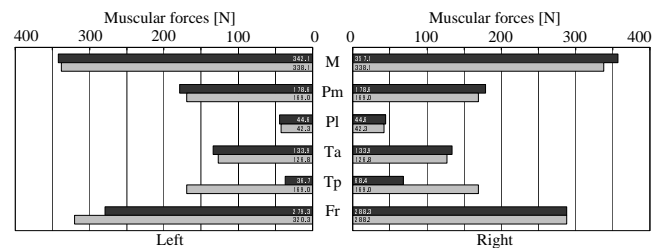
いずれの推定についても、両側の内側翼突筋が限界値の筋力を発生している。そして、内側翼突筋が活動することにより、側頭筋や外側翼突筋の活動が弱くなっている。内側翼突筋の筋活動を最大の筋力の50%と制限すると(図2(c))、側頭筋後腹を除けば医師の推定結果に非常



(a) Original estimation method.



(b) Activity of medial pterygoid is 20% of maximum muscular forces.



(c) Activity of medial pterygoid is 50% of maximum muscular forces.

Fig. 2: Estimated muscular forces and calculated reaction forces at condyles.

に近づいている。ただし今回のシミュレーションの場合、歯牙荷重測定・筋電位測定を行っていないため、この推定値に近づくことが手法の有効性を示しているわけではないことに注意が必要である。

4 まとめ

今回のシミュレーションにより、(1)式に示した目的関数の設定では被験者の顎形状によって筋が活動していない状態を推定してしまう場合があることがわかった。本稿では筋力に下限値を設けることによって、医師の推定に近い結果を算出する方法について考察したが、提案する推定手法に新たな評価指標を追加することが必要であると考えている。具体的には、咀嚼筋は左右それぞれでバランスを取るように筋が活動していると考えており、それを評価指標として目的関数に導入することである。

参考文献

- [1] 小関道彦・伊能教夫・横宏太郎: ヒト下顎骨の個別別応力解析のための筋力推定手法の検討; 第17回計算力学講演会講演論文集, [04-40], (2004), 61-62