

ヒト下顎骨の個体別応力解析のための筋力推定手法の検討

Estimation of Muscular Forces for Patient Specific Analysis of the Human Mandible

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

Keywords : Masticatory forces, Prediction of muscular forces, Stress analysis, Individual modeling, Biomechanics.

1 はじめに

咬合時における下顎骨の応力状態を解析するためには、咀嚼筋が発生する力の方向と大きさを力学条件として有限要素モデルに設定する必要がある。しかし、筋力を直接的な手段で計測することは困難なため、何らかの推定手法を用いる必要がある。筋力推定手法は、腕や足の筋骨格システムの運動状態を解析する手法として多数報告されている [1][2]。しかし、顎骨は長骨とは形状や運動機能が異なり、幾何学的なバランスや関節反力の影響を考慮する必要がある。本稿では、咬合時の筋力状態で考慮すべき 3 つの評価指標を設定し、顎変形症患者の咬合状態について推定を試みたことを報告する。

2 咀嚼筋力の推定

骨体に生じる応力状態を患者毎に解析するためには、数値解析的手法で筋力推定を行った後に推定された筋力を医師がチェックし修正するのが効率的と考えられる。そこで、個体別の力学条件を設定するための支援ツールの一つとして下顎骨の筋力を推定する手法について検討を行った。筋力推定は以下の 5 つのステップで実行される。

- ステップ 1 歯牙荷重および咀嚼筋の方向設定
- ステップ 2 下顎骨のバランス計算
- ステップ 3 顎関節に働く反力の計算
- ステップ 4 目的関数に基づく筋力推定
- ステップ 5 収束解となるまでステップ 3 に戻り実行

ステップ 1 で対象とする咀嚼筋を図 1(a) に示す。歯牙荷重および咀嚼筋の方向は筆者らが開発した力学条件設定支援ツール [3] を用いて設定される。

ステップ 2 では、図 1(b) のような拘束条件を設定し、式 (1) を用いて関節軸 (x 軸) 周りに働くモーメントのバランスを計算する。

$$\sum (C_b^x \times F_b) + \alpha \sum (C_m^x \times f_m e_m) = 0. \quad (1)$$

ここで C_b^x および C_m^x は、関節軸 (x 軸) から歯牙荷重および筋付着部位へのベクトルを示す。 F_b は歯牙荷重ベクトルであり、荷重の大きさは感圧シートを被験者に噛んでもらうことにより求めている。 α は、筋力によるモーメントと歯牙荷重によるモーメントが釣り合うように選ばれる定数である。筋力については、筋肉の活動の度合いを表すスカラー量 f_m に筋肉の走行方向を表す単位ベクトル e_m をかけて筋肉の活動性を表現する。すなわち、実際に作用する筋力ベクトルは $\alpha f_m e_m$ と表される。

ステップ 3 では、式 (2) を用いて左右の関節頭に生じる反力 (F_{r1}, F_{r2}) を計算する。

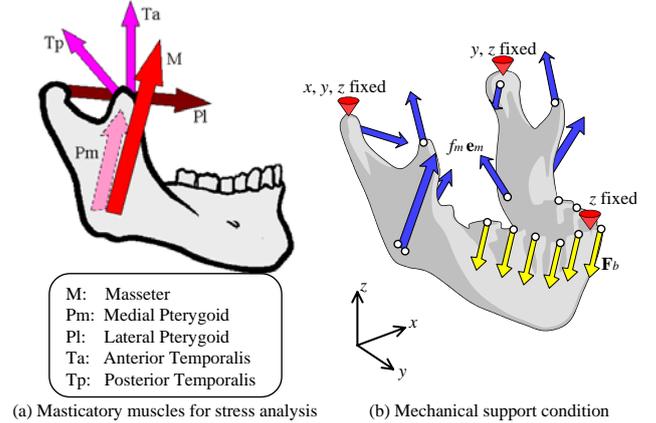


Fig. 1: Mechanical conditions in occlusion.

$$F_{r1} + F_{r2} + \sum F_b + \sum \alpha f_m e_m = 0. \quad (2)$$

ステップ 4 では筋力群の活動状態を評価するための目的関数を設定し、これを最小化する筋力を求める。これまでに筆者らは、ほぼ左右対象な顎骨形状での両側噛み締めについて、筋力の n 乗和を評価値として筋力推定を行い、 $n = 2$ の時に医師の推定に比較的近い結果が得られることを確認している [4]。本研究では、以下の 3 つの評価指標を考え、これらを総合的に考慮することにより顎変形症患者の咬合状態推定を試みた。

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

これらの評価指標を同時に満たす目的関数として、それぞれの線形和からなる式 (3) を設定した。

$$I = \sum (\alpha f_m)^2 + k_1 \left| \sum (C_b^y \times F_b) + \sum (C_m^y \times f_m e_m) \right| + k_2 \left(|F_{r1}|^2 + |F_{r2}|^2 \right). \quad (3)$$

ここで、 k_1 および k_2 はそれぞれの評価指標に対する重み係数である。 k_1 は歯牙荷重重心を通る前後軸 (y 軸) 周りのモーメントの重み係数であり、これは繰り返し計算によってゼロに収束することから $k_1 = 1000.0$ とした。また、 k_2 は関節反力の 2 乗和についての重み係数であり、 $k_2 = 10.0$ とした。

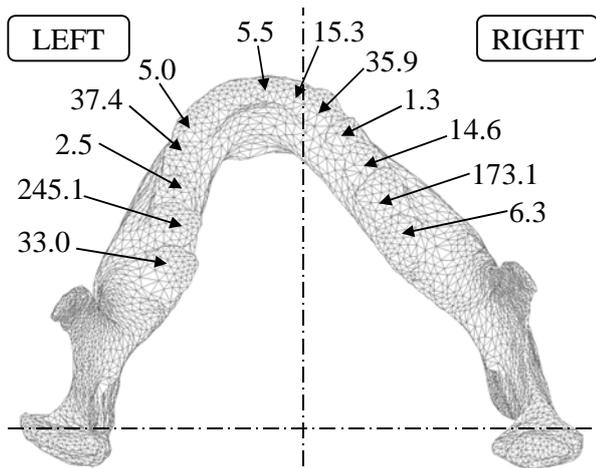


Fig. 2: A patient-specific model and the distribution of biting forces [N].

3 計算結果

顎変形症患者の個別モデルを作成し、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た。X線CT画像から構築した下顎骨の個別モデルを咬合面から見た状態を図2に示す。この患者の顎形状は左方に大きく偏っており、感圧シートにより計測された歯牙荷重についても図中に示すように偏りが見られる。

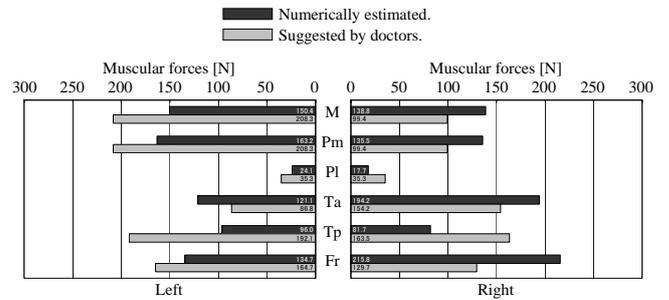
歯牙荷重の測定と同時に、咬筋(M)、側頭筋前腹(Ta)および側頭筋後腹(Tp)の表面筋電位を測定した。筋電位の測定が困難な内側翼突筋(Pm)および外側翼突筋(Pl)については活動状態を医師に推定してもらい、全咀嚼筋の活動比を定めた。そして、医師による推定筋力比を初期値として繰り返し計算を行い、各筋力は初期値の50%と150%を限界値とし、それ以上は変化させないものとした。

今回は目的関数の k_1 と k_2 の値を変更することにより、それぞれの評価指標が筋力推定に与える影響について考察を行った。図3に筋力推定結果を示す。医師が推定した筋力比から計算される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。

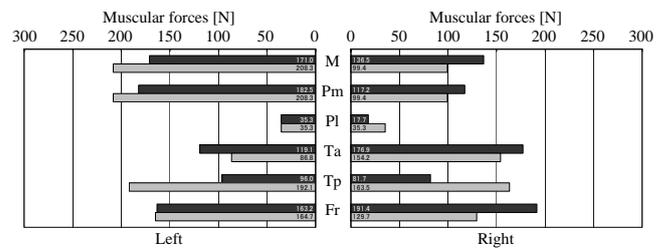
図3(a)は、 $k_1 = 0.0$, $k_2 = 0.0$ を設定し、従来の推定手法と同様に咀嚼筋力の2乗和だけを考慮して推定したものである。形状・歯牙荷重ともに左右差が大きいにも関わらず、筋力にはあまり左右差が見られない。また、咬合力の小さい右側の関節頭に大きい反力が生じている。

図3(b)は、 $k_1 = 1000.0$, $k_2 = 0.0$ として筋力の2乗和に加え、歯牙荷重重心を通る前後軸のモーメントバランスを考慮したものである。左右のバランスを考慮することにより、咬筋・内側翼突筋の筋力の左右差が明確になっており、この評価指標の効果が伺える。しかし側頭筋については、筋電位が左右とも前腹よりも後腹に強く現れているのに対し、推定結果では前腹の方が強い筋力を示しており、筋電位データとの対応関係が見られない。

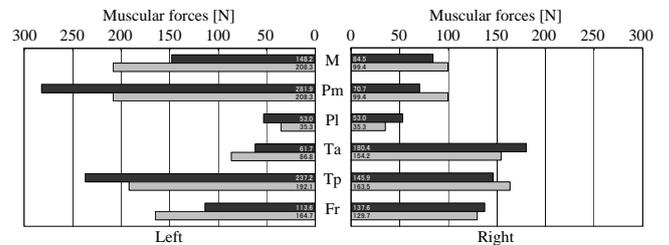
図3(c)は、 $k_1 = 1000.0$, $k_2 = 10.0$ を設定し、関節反力をも考慮したものである。関節反力を考慮することにより反力が小さくなるだけでなく、側頭筋後腹の筋力が強くなっている。また、筋力全体の左右差も明確になり、医師の推定筋力に最も近い。



(a) $k_1 = 0.0, k_2 = 0.0$ (conventional method)



(b) $k_1 = 1000.0, k_2 = 0.0$



(c) $k_1 = 1000.0, k_2 = 10.0$

Fig. 3: Estimated muscular forces and calculated reaction forces at condyles.

4 まとめ

側頭筋後腹の活動は、筋力と歯牙荷重のバランスだけを考慮した場合には推定できなかったのに対し、関節での反力を考慮することにより筋電位に則した筋力を推定することができた。これは、咬合状態における筋力発生には筋活動の効率性のみでなく、モーメントバランスや関節反力の低減が重要な因子であることを示唆している。今後、それぞれの評価指標に対する重み係数が推定結果に与える影響についてさらに検討し、多数の個別モデルについて解析することにより統計的に筋力設定の妥当性を評価したい。

参考文献

- [1] R.D.Crowninshield: Use of optimization techniques to predict muscle forces, *Trans. ASME*, **100**, (1978), 88–92
- [2] 吉成哲・但野茂・鷓飼隆良: 前腕回旋運動時に作用する筋力の数値解析, *機論 C*, **63**–607, (1997), 700–706
- [3] 谷崎博之・小関道彦・伊能教夫・榎宏太郎: 個別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), 第15回計算力学講演会講演論文集, [02–02], (2002), 31–32
- [4] 小関道彦・谷崎博之・伊能教夫・榎宏太郎: 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11回顎顔面バイオメカニクス学会大会抄録集, (2003), 41–42