

ヒト下顎骨の個別別有限要素モデルを用いた咀嚼筋力推定

Estimation of Masticatory Forces using Patient-Specific Models of Human Mandibles

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

Michihiko KOSEKI and Norio INOU:

Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, JAPAN

Mariko TAKAHASHI and Koutarou MAKI:

Showa University, 2-1-1, Kitasenzoku, Ota-ku, Tokyo, JAPAN

Keywords : Biomechanics, Human mandible, Patient-specific model, X-ray CT.

1 はじめに

生体内で骨体に生じる応力状態を解析するためには、力学条件として筋が発生する力の方向と大きさを推定する必要がある。そのため本研究では、咬合状態にある下顎骨を対象とし、幾何学的なバランスや関節反力の影響を目的関数として繰り返し計算により咀嚼筋力を推定する手法を提案している。これまで筆者らは、左右非対称な被験者の顎骨形状を対象として筋力推定手法の妥当性について検討してきた [1][2]。本稿では、左右対象な下顎骨の中から特徴的な2つの顎形状を選び、提案する手法によりそれぞれの咀嚼筋力を推定したことについて報告する。

2 咀嚼筋力の推定手法

筆者らが提案している咀嚼筋力の推定手法は、式 (1) に表される目的関数を最小にする筋活動 (f_i^M) を最急降下法で求めることにより咀嚼筋力を推定するものである [1]。

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

本目的関数は3つの評価指標の線形和として表され、各項はそれぞれ、筋活動の効率、前後軸廻りのバランス、関節反力の大きさを意味している。そして、各評価指標に対し k_1 と k_2 という係数で重み付けを行っている。これまでの研究では $k_1 = 1000.0$ 、 $k_2 = 10.0$ と設定することにより、顎変形症患者の顎形状において筋電位計測結果に基づく医師の推定筋力と近い値が得られることを確認している。

筋力推定を行う咀嚼筋としては、5種類の筋(咬筋(M)、内側翼突筋(Pm)、外側翼突筋(Pl)、側頭筋前腹(Ta)および側頭筋後腹(Tp))を設定している。このうち、咬筋、側頭筋前腹および側頭筋後腹の積分筋電図を、表面筋電極によって測定した。また、内側翼突筋および外側翼突筋については、筋活動を非侵襲に計測することは非常に困難である。このため、内側翼突筋については左右それぞれの咬筋と同じ活動を行っているものと仮定し、また、

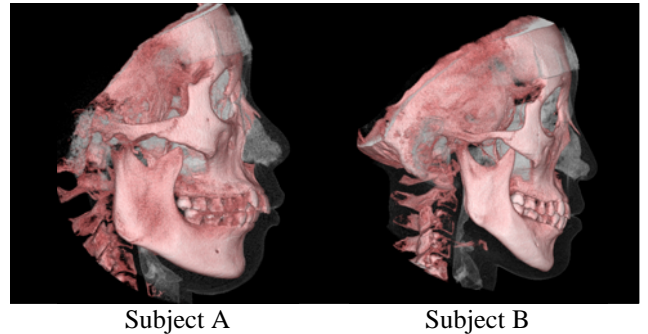


Fig. 1: 3D reconstructed images of two subjects.

外側翼突筋は左右ともに約30N程度の筋力を発生するものとして設定している。また、筋電位計測と同時に、感圧シートを用いて咬合接触部位および咬合力 (F_i^B) の大きさを測定している。

今回は、顔面高の特徴による分類 [3] に従い、後顔面高と前顔面高が同程度の Brachyfacial を有する被験者 A と、後顔面高より前顔面高の方が長い Dolichofacial を有する被験者 B の2名を選出した。各被験者について、歯顎顔面用 X 線 CT 装置 CB MercuRay (日立メディコ社) による3次元構築画像を図1に示す。この骨形状の差異は、頭蓋と下顎骨の咀嚼筋附着部の相対的位置関係に影響するため、筋の牽引方向が異なることを意味している。また、咬合力を主に負担する筋が骨形態の違いによって異なっていることが予想され、結果として顎骨に生じる力学状態にも差異が生じていると考えられる。

3 筋力推定結果と考察

それぞれの顎骨について、筆者らが提案している個別モデリング手法を用いて個別別モデルを作成し、咬合力や筋力方向などの設定を行った。そして、筋電位をそのまま筋活動量として見積った筋力を初期値として、提案する手法により咀嚼筋力の推定を行った。結果を図2に示す。この図において、白色は積分筋電図から見積られる筋力(筋力推定の初期値)であり、薄灰色は重み係数 $k_1 = 1000.0$ 、 $k_2 = 1.0$ として推定した場合、濃灰色は $k_1 = 1000.0$ 、 $k_2 = 10.0$ として推定した場合である。

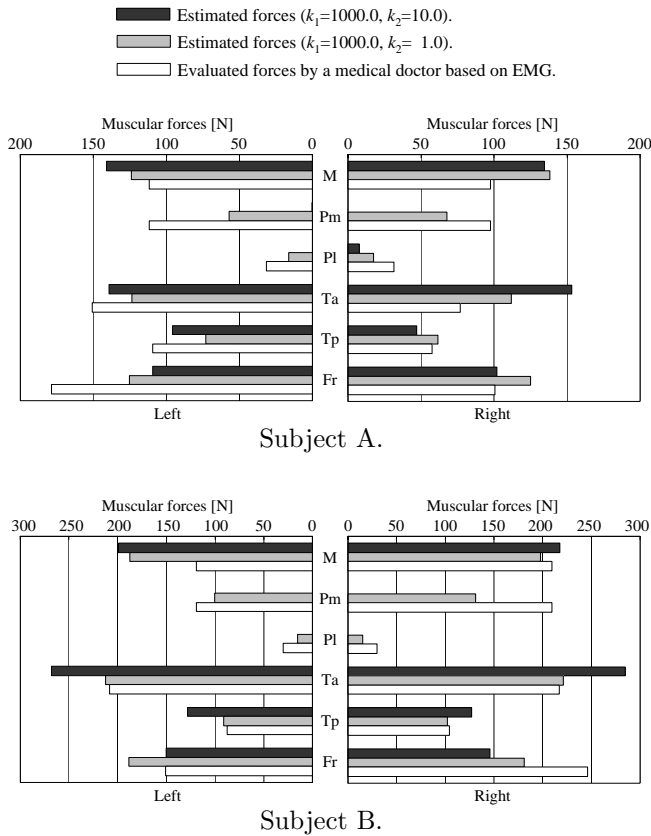


Fig. 2: Estimated muscular forces and calculated reaction forces at condyles.

3.1 筋電位に基づく筋力設定について

積分筋電図から見積られる筋力 (白色) では、両被験者ともに左右差が現れている。すなわち被験者 A については、左側の側頭筋 (Ta および Tp) による筋力が右側の 2 倍近い値を示している。また、被験者 B については右側の咬筋 (M) による筋力が左側の 2 倍程度となっており、それに伴い今回の条件設定では内側翼突筋 (Pm) も同じ状態となっている。このため、バランス計算によって求められる下顎頭反力 (Fr) もまた両者ともに左右非対称となっている。

しかし、今回の 2 名の被験者の顎骨形状はほぼ左右対象であり、感圧シートによって測定した咬合力もほぼ左右対象であるため、非対称な筋活動は不自然に感じられる。このような結果となった理由としてまず、咬合力測定に感圧シートを用いていることの影響が考えられる。これは、感圧シートは咬合によって圧力が加わった全ての履歴を記録しているのに対し、積分筋電図はある微小な時間の筋電位から求めるため、正確に対応していない可能性がある。このため、咬合力と筋電位を関連付けるためには、正確な咬合力をリアルタイムに測定できる手法が求められる。また、表面電極の貼付に左右差があったことも十分に予想され、厳密に測定するためには慎重な作業が必要であることを示唆している。

3.2 提案手法による推定筋力について

提案する手法で推定した筋力 (濃灰色および薄灰色) ではほぼ左右対象な分布を示している。これは、目的関数

において筋活動の効率性を考慮していること (第 1 項) と、左右のバランスを考慮していること (第 2 項) が深く影響しており、これらの結果は顎骨形状および咬合力の対称性から妥当と感じられる。

このうち、薄灰色で示した $k_1 = 1000.0$, $k_2 = 1.0$ として推定した場合には、筋電位を測定した咬筋および側頭筋については、白色で示した筋力の左右の平均値に近い値を示している。また、内側翼突筋も十分に筋力を発生しているという結果となっている。

一方、濃灰色で示した $k_1 = 1000.0$, $k_2 = 10.0$ の場合には、下顎頭反力の大きさに対する考慮 (第 3 項) の重み k_2 が大きいいため、反力は最も小さい値を示している。しかし、いずれの被験者の場合にも咬筋と側頭筋だけで牽引している結果となってしまっている。下顎を上方に牽引する方向にある内側翼突筋が咬合時に活動していないとは考えにくく、 $k_2 = 10.0$ は大きすぎるようである。

3.3 個体差について

いずれの結果でも、被験者 B の筋力は被験者 A に比べて全体が大きくなっている。これは、測定により得られた被験者 B の咬合力が被験者 A に比べて大きかったためであり、咬合力とバランスする筋力を算出する上で妥当である。

また、今回の結果のうち最も妥当と感じられる $k_1 = 1000.0$, $k_2 = 1.0$ として推定した場合 (薄灰色) について比較を行うと、被験者 B は被験者 A に比べて側頭筋が咬筋に比べて活発に活動している。また、被験者 B では側頭筋前腹が後腹の 2 倍ほど活動しているのに対し、被験者 A ではそれほど差が大きい。この筋活動分布は各被験者の筋突起の形状と関連していると考えられる。すなわち、被験者 B のように筋突起の幅が狭いと、上方成分 (側頭筋前腹) の牽引が強くなるとの予想を裏付けるものである。

4 まとめ

提案する筋力推定手法は、力学的に妥当な咀嚼筋力を推定することを目指している。今回、左右対象な下顎骨形状を対象とする筋力推定結果から、3 つの評価指標の重み付けが重要であり、さらに個体数を増やして調整することが必要であることがわかった。また、筋力の推定を適切に行うためには、咬合力や筋電位の測定を高精度に行う新たな手法の開発が求められる。今後、推定された筋力を力学条件として設定することにより個体別の応力解析を行い、噛み締めによって顎顔面に生じる力学状態と顎骨の形態の相関について検討したい。

参考文献

- [1] 小関道彦・伊能教夫・榎宏太郎: 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; 第 17 回計算力学講演会講演論文集, [04-40], (2004), 61-62.
- [2] 小関道彦・伊能教夫・榎宏太郎: 顎骨形状および咬合状態を考慮した目的関数に基づく咀嚼筋力の推定手法; 第 18 回計算力学講演会講演論文集, [05-2], (2005), 219-220.
- [3] V.Sassouni, A classification of skeletal facial types. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **55**, (1969), 109-123.