

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 7 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656087

研究課題名（和文）

咀嚼の力学に関わる上肢マルチボディダイナミクスのモデリング

研究課題名（英文）

Modeling of Multibody-dynamics of Superior Members under Occlusion

研究代表者

澁谷 陽二 (SHIBUTANI YOJI)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70206150

研究成果の概要（和文）：咀嚼に関わる力学挙動を理解するため、咬筋と頭蓋の姿勢に関わる僧帽筋の左右両側の筋群について表面筋電位を計測した結果、咀嚼作業側の筋活動が活発であること等がわかった。この筋活動を参照データとして、負荷速度に依存した非線形な構成式を用いたはり要素の有限要素定式化を行った。咀嚼のマルチボディダイナミクスにおいて、通常の準静的な咀嚼過程を対象にした場合には増分形式の定式化で対応でき、従来の実験結果と定性的に合うことを確認した。繰り返しの咀嚼活動に対して、筋肉の自然長が変化し、そのヒステリシスループは定常化されることがわかった。

研究成果の概要（英文）：Surface muscle potentials for occlusal activities in dentistry were measured by the muscle potential instrument. Four kinds of muscles were taken up for measurement in the present work, which are the right-and-left masseter and cowl muscles. The higher activation was observed in the work-side and these reference data were applied to development of an incremental constitutive law of muscle employed in a finite element scheme. For ordinal occlusal activities, this law should be sufficient to describe the time-dependent mechanics without any inertia, and the results newly suggest that natural length of muscle was changed to a cyclic loading and then the hysteresis loop becomes stationary.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：歯科咬合、表面筋電位計測、不正咬合、増分型筋構成式、はりモデル、有限要素解析、筋—骨格系、不定愁訴

1. 研究開始当初の背景

学部教育で力学を受けた経験はないが、日頃の臨床経験から力学のバランスの重要性を認識していた歯科医師数名と一緒に、「骨膜下インプラント研究会」を立ち上げ、10年以上にわたって勉強会を実施してきた。その一連の活動を通じて、種々の歯科医師が主張

する咬合に対する考え方の情報収集を行い、相互比較に基づく基本原理の違いについて議論を重ねた。これらの経緯から、下顎系に生じる咬合力学的バランスの評価とモーメントの消滅を再現できる新たな咬合湾曲面が、理想の咬合曲面として使えるアイデアを生み、新しいコンセプトを持つ咬合器とし

で商品化した。その一連の活動については、下記に報道されている。

- ・ 日刊工業新聞，2002年3月1日「総義歯製作を効率化」
- ・ 神戸新聞，2003年7月27日「歯科治療の拠点設置」
- ・ 日刊産業新聞，2003年8月6日「入れ歯用製図機」
- ・ 日刊工業新聞，2003年8月12日「咬合用コンパス開発」

以上の活動は、口腔内に係る力学的評価とそれの工学的応用を行ったものである。一連の活動の中で、咬合の力学的バランスは口腔内にとどまらないことを臨床歯科医らは経験的に熟知している。いわゆる不定愁訴(原因不明の肩こり、腰痛、頭痛、めまい等)の一因は、その咬合バランスの喪失と言われている。しかしながら、その科学的根拠がないこと、歯科医の個人個人の主観的な主張と判断する市民レベルの認識の間に大きなずれのあることが問題解決に至る大きな障害になっている。そのような背景から、咬合に関わる上肢全体の力学的バランスを工学的に定量化する着想に至った。

2. 研究の目的

噛み合わせの不具合、すなわち不正咬合状態は、単に歯科領域に関する疾患の誘発にとどまらず、医科(整形外科、外科、内科等)疾患の誘発に関連し、さらには咀嚼機能の低下が老人の寝たきりや痴呆に強い相関のあることが言われている。咀嚼という動的な力学作用により、人体内に及ぼす力学的長距離効果の経路を明確にするため、上下顎・頭蓋そして頸椎・胸椎・腰椎といった脊椎を含む上肢全体の筋骨格系をモデル化する。そして、後天的な片噛みや先天的な初期不正咬合、あるいは歯科インプラント埋入による局所的な剛性変化に対する静的な力学場の解析とともに、咀嚼といった動的作用に対するマルチボディダイナミクスを明らかにすることを本研究の目的とする。本申請期間中に、従来より開発してきた個体に応じた歯列の幾何形状を非接触で計測し、歯列、咬合筋系、上顎、下顎、頭蓋を含めた3次元有限要素モデルを構築する咬合解析システム(OASYS)を拡張して、それを支持する頸椎・胸椎・腰椎の脊椎を含む上肢全体にいたるモデリングの構築(動的咬合解析シミュレータ(DOASYS))をめざす。

3. 研究の方法

(1) 咀嚼の動的作用に関わる上肢筋系の活動度の測定：

平成23年度では咀嚼筋系に関する筋電図の取得を実施し、平成24年度では咀嚼活動

や頭蓋の姿勢制御に伴って、上肢に付随した筋系の筋電図を計測した。具体的には、基準姿勢における筋活動度から、最長筋、腸筋、棘間筋、回旋筋、多裂筋、半棘筋、椎前筋、斜角筋、腹筋群、僧帽筋、菱形筋、前鋸筋の12種類を取り上げ、表面筋電位の計測可能な部位についてのみ行った。通常、咀嚼時に生じる咬合力は、頭蓋全体で自己平衡した力学系なので、頭蓋以外の領域への力の伝達はほとんどないと予想される。それが本来進化の過程で得られた正常状態と考えられる。頭蓋の重心が前後あるいは左右に偏心している場合や比較的前歯での咬合の場合には、回転に対する抵抗としてのモーメントが生じたり、首の後ろにある後頸筋としての椎前筋や斜角筋は、頭蓋を支持するだけでも筋活動をしている。すなわち、これらを介して胸部や背部への伝達経路が考えられる。したがって、これら従来の解析結果より活性化された経路付近に生じる筋群に着目し、咀嚼の動的状態に対する上肢筋系の活動度に関する計測データを取得した。

(2) 剛体・弾性体混在モデルのマルチボディダイナミクスへの拡張：

咀嚼の動的過程における解析のために、はりに構成される連続体モデルの運動方程式に拡張し、その有限要素定式化を行った。筋-骨格系では、各部位の剛性が著しく異なり、そのため固有モードが大きく変化する特性を用いたアルゴリズムの開発を検討した。その過程で慣性質量マトリクスの取り扱いを考慮する必要があるが、咀嚼の動的過程における慣性力が著しく大きくない場合、準静的な取り扱いをする増分形式の定式化もあわせて検討し、実用的・工学的観点から効率的なシミュレータの開発を行った。

4. 研究成果

(1) 咀嚼に関わる咬合筋系の活動度の測定：

当初の研究計画において予定していた筋電計測システムの仕様をまず検討した。従来の文献から、咀嚼に関わる筋肉のうち計測可能な部位にある筋肉は限られていること。また、実測データをみると個体差が大きく、また咬筋が必ずしも主たる活動筋でないことがわかった。一方、従来より開発してきた咬合力学解析シミュレータを用いて、頭蓋形状と咬合力分布を計測し、歯列・下顎・上顎・頭蓋モデルを個体差に応じて作成した。そして、それらのモデルを用いた片噛み状態の結果と比較した。これらの検討結果から得られた注意点を勘案して、購入した計測システムの仕様(例えば、必要最小限のチャンネル数等)を決定した。また、人体に貼りつける筋

電の計測センサから計測システムを介して増幅された微弱な電圧変化を、別途購入した市販の A/D ボードとパソコンに取り込むためのソフトウェアの開発を行った。

平成 23 年度では咀嚼筋系に関する筋電図の取得を開始し、平成 24 年度では咀嚼活動や頭蓋の姿勢制御に伴って、上肢に付随した筋系の筋電図を計測した(図 1 参照)。具体的には、基準姿勢における筋活動度から、最長筋、腸肋筋、棘間筋、回旋筋、多裂筋、半棘筋、椎前筋、斜角筋、腹肋群、僧帽筋、菱形筋、前鋸筋の 12 種類を取り上げ、表面筋電位の計測可能な部位について検討を行った結果、僧帽筋が計測可能であることがわかった。これに基づき、直接咀嚼に関わる咬筋と頭蓋の姿勢に関わる僧帽筋の左右両側の計 4 種類の筋群について計測を実施した。頭蓋の重心が前後あるいは左右に偏心している場合や比較的前歯での咬合の場合等、不正咬合を生み出す外的要因を考慮して検討した。通常咬合において、咀嚼速度を速めた場合(fast mode)と比較的遅くした場合(slow mode)の左右 2 種類ずつの筋電位を図 2 と 3 に示す。直接計測したデータを、0 点補正や平滑化を施した結果を示している。図 2 の(a)と(b)は左右の咬筋の時間的変化であり、図 3 の(a)と(b)は左右の僧帽筋の時間変化を示している。比較的早く咀嚼する方が線形関係に近いことがわかる。

従来の解析結果より、筋活動が活性化された経路付近に着目し、チューイングガムを用いた咀嚼の動的状態に対する上肢筋系の活動度に関する計測データを取得した結果、作業側の筋活動が活発であるがわかった。

(2)時間依存の有限要素モデルの構築：

剛性の著しく異なる領域から構成される上肢全体系を有限要素法で解析する場合、剛

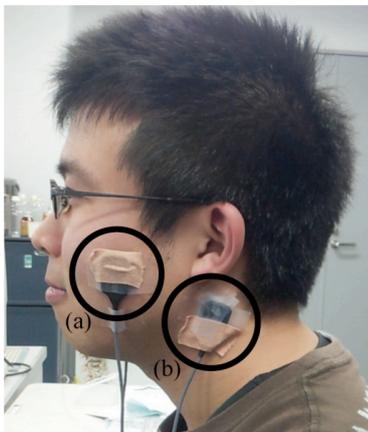
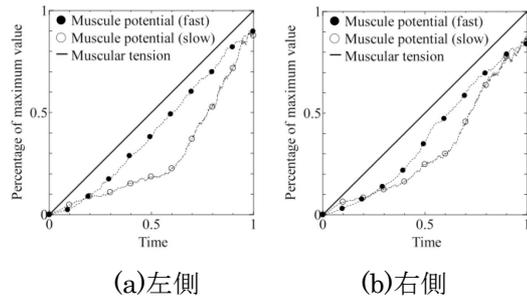
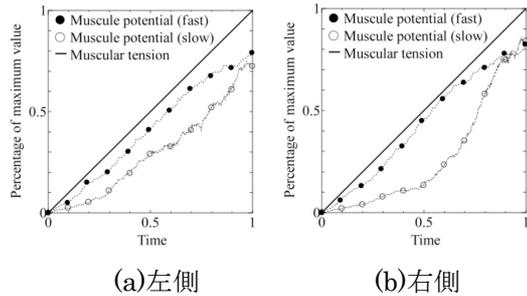


図 1 表面筋電位計測センサーの設置状況



(a)左側 (b)右側
図 2 咬筋の筋電位計測結果の一例



(a)左側 (b)右側
図 3 僧帽筋の筋電位計測結果の一例

体に近い領域では変形が生じず、動的な特性においては特性時間が大きく異なる。したがって、すべて一律な手法で解析することは効率的でない。従来より Craig-Bampton 法という手法が広く利用されているが、2 段階の解析を要すること、線形弾性問題以外への適用が困難であること、といった短所が言われている。まず上下顎、頭蓋、頸椎・胸椎・腰椎の脊椎を含む上肢筋骨格系の解析モデルへの適用を検討するため、上記の手法を既存のモデルに組み込んだ(図 4 参照)。そして、モデル計算により制限事項に関する改良すべき点の検討を行った結果、筋の増分型構成式を提案し、慣性力を考慮しない時間応答解析が咀嚼活動において最適と判断した。したがって、咀嚼の時間応答の解析を行うために、増分形式の構成式を提案し、負荷速度に依存した非線形な構成式をはりで構成される連続体モデルに導入し、その有限要素定式化を行った。咀嚼のマルチボディダイナミクスにおいて、動的過程における慣性力が著しく大きくない場合(咀嚼活動の多くの場合が対応する)、準静的な過程に対する増分型非線形構成式の適用で十分であり、筋活動の負荷速度に応じた従来の実験結果と定性的に合うことを確認した。繰り返しの咀嚼に伴い、咬筋等の筋肉の自然長が変化することにより、そのヒステリシスループは定常化されることがわかった(図 5 参照)。すなわち、筋肉は、初期配置の変化によりひずみエネルギーの散逸の低減をしていると言える。

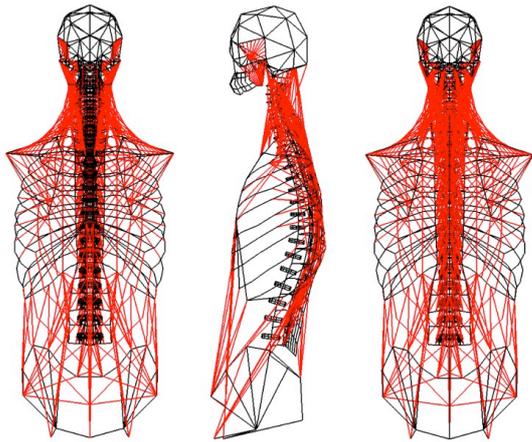
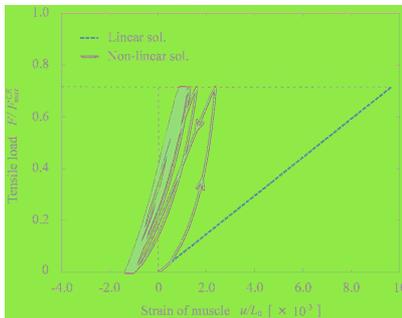
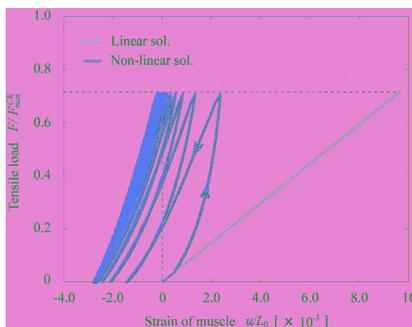


図4 上肢筋—骨格系有限要素モデル



(a)モデル1



(b)モデル2

図5 荷重制御での筋の繰り返し応答例

この構成式モデルを歯列を含めた頭蓋モデル(図6参照)に導入し、不正咬合における筋活動の時間応答を解析した。その結果の一例を図7に示す。従来の筋肉の非線形性を考慮しない構成式を用いた場合との比較から、緩和効果により荷重分担が分散されていることが新たにわかった。したがって、筋速度に依存性を考慮した新たな増分型の非線形構成式により、より現実的な咀嚼活動の力学的挙動を得ることができた。

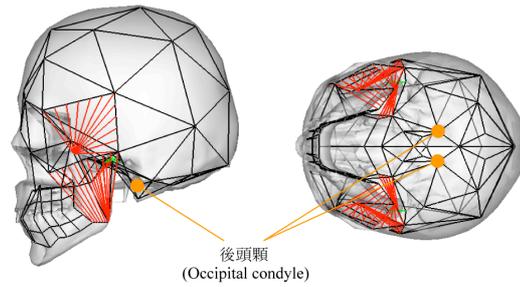


図6 頭蓋モデルにおける咀嚼筋系

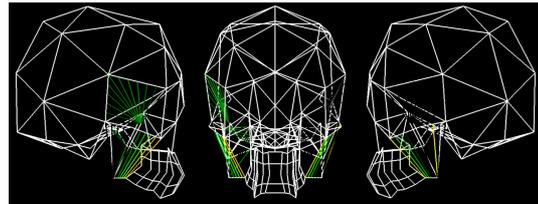


図7 不正咬合における解析結果の一例

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

①日原啓太, 澁谷陽二, 歯形: 力学場を介した歯と体全体のつながり, 日本機械学会論文集A編, 査読無, 78巻, (2012), 137-141.

〔学会発表〕(計3件)

①日原啓太, 澁谷陽二, 筋の非線形構成式を用いた咬合状態における頭蓋系力学場の有限要素解析, 日本機械学会関西支部第88期定時総会講演会, 2013-3, 大阪工業大学.

②日原啓太, 澁谷陽二, 増分形式の筋構成式を用いた歯科咬合力学場の非線形有限要素解析, 日本機械学会第25回バイオエンジニアリング講演会, 2013-1, 産総研.

③澁谷陽二, 不正咬合に基づく頭部・頸部・胸背部の筋骨格系の力学場の解析, 日本機械学会第24回バイオエンジニアリング講演会, 2012-8, 大阪大学.

〔その他〕

ホームページ

<http://www.comec.mech.eng.osaka-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

澁谷 陽二 (SHIBUTANI YOJI)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 70206150

(2) 研究協力者

日原 啓太 (HIHARA KEITA)

大阪大学・大学院博士前期課程学生