

博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏名 藤田 瑛
学位 博士 (歯学)
学位記番号 新大院博 (歯) 第428号
学位授与の日付 平成31年3月25日
学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当
博士論文名 有限要素解析を用いた顎偏位伴う骨格性下顎前突症の内応力解析

論文審査委員 主査 教授 林 孝文
副査 教授 齋藤 功
副査 教授 小林 正治

博士論文の要旨

水平方向への骨格的不調和である顎偏位は、その成因について様々な観点から解明が試みられているものの未だ不明な点が多い。今回、顎偏位を引き起こす生体力学的な背景を明らかにするため、三次元有限要素解析を用いて、顎偏位が顕著である骨格性下顎前突症の生体力学的な分析を行うこととした。

対象は、新潟大学歯学総合病院矯正歯科にて顎偏位をともなう骨格性下顎前突症と診断された顎変形症のうち、正面頭部エックス線規格写真にて正中基準線よりオトガイ点 (Me) が5mm以上の側方偏位を認め、片側性交叉咬合を有する5例 (男性2名、女性3名、平均年齢18歳8か月) とした。外科的矯正治療の治療計画立案時に撮影したCT画像をモデリングソフトウェア Simpleware™ にインポートし、三次元モデルを作成した。三次元モデルは、上方洞下縁を含み、後方部は大後頭孔前縁部、左右側および下方は全ての構造物が含まれる領域とした。歯根拠は、非線形弾性材料である超弾性体 Mooney-Rivlin モデルを採用し作成した。モデルは全て4面体要素メッシュモデルとし、有限要素解析ソフトウェア Autodesk Simulation Mechanical™ へインポートした。解析条件の設定では、均質な線形弾性材料とし、骨、歯、関節円板は過去の文献による物性値を参考にヤング率、ポアソン比を決定し、拘束条件は、モデル最上縁部をおよび後方部を完全拘束とした。咀嚼筋を解剖学的な起始停止部間のベクトルとして荷重した。解析手法は非線形弾性解析とし、得られた解析結果から、左右の応力分布の不均衡を算出するために、上顎骨非偏位側、上顎骨偏位側、下顎骨非偏位側、下顎骨偏位側の4つの領域を設定した。各領域に属する節点のフォンミーゼス応力 (N/mm^2) について、 $1.0N/mm^2$ 以上の応力が発生した接点の各領域全体の節点数に対する比率を算出した。上顎領域の左右側、下顎領域の左右側の比率の平均について、Mann-Whitney のU検定を用いて統計学的に比較検討した。

その結果、症例1では、上顎領域において非偏位側と比較して偏位側の梨状孔側縁から頬骨上顎縫合部にかけて応力の集中が認められた。下顎領域でも、非偏位側と比較し偏位側の下顎骨体部から顎角部にかけて左右で不均一な応力分布を認めた。症例2では、上顎領域においては左右で著しい不均一な分布は認めなかったが、下顎領域では、非偏位側と比較して下顎骨体部に左右で不均一な応力分布が観察された。症例3では、上顎領域において非偏位側と比較して偏位側の犬歯窩部で応力の集中が認められ、下顎領域では、非偏位よりも偏位側の下顎骨体部の応力集中が大きい傾向が認められた。症例4および症例5では、他の症例と比較し、偏位側、非偏位側での著しい応力分布の不均衡は認められなかった。 $1.0N/mm^2$ 以上の応力が認められた節点数の割合については、上顎領域、下顎領域ともに偏位側と非偏位側の比率に有意差は認められず、モデルを構成する節点全体で見ると偏位側、非偏位側間の顎骨内応力分布に著しい差異は観察されなかった。

以上のように、成長期以降の顎偏位を伴う骨格性下顎前突症について、有限要素解析により顎骨内応力解析を行った結果、成長変化後の顎顔面骨格形態においては、著しい顎骨内応力分布の左右差を認めなかった。このことは、成長変化後の顎顔面骨格形態においては、不均一な顎骨内応力分布に対し力学的に釣り合いのとれた形態となっている可能性が示唆された。

審査結果の要旨

顎変形症患者は増加傾向にあり、近年では下顎前突症や上顎前突症、骨格性開咬といった前後的、垂直的な顎顔面形態の不調和に加え、水平的な不調和、すなわち顎偏位や顔面非対称が増加傾向にあるとされている。顎偏位の成立には顎顔面におけるバイオメカニクスの不調和が関与している可能性が高いが、顎偏位を引き起こす物理的要因を生体力学的な観点から解明したものはみられない。そこで今回、顎偏位を引き起こす生体力学的な背景を明らかにするため、三次元有限要素解析を用いて、顎偏位が顕著である骨格性下顎前突症の生体力学的な分析が行われた。

対象は、新潟大学医歯学総合病院矯正歯科にて顎偏位をともなう骨格性下顎前突症と診断された顎変形症のうち、片側性交叉咬合を有する5例であった。外科的矯正治療の治療計画立案時に撮影したCT画像をモデリングソフトウェア Simpleware™ にインポートし、三次元モデルが作成された。三次元モデルは、上方は眼窩下縁を含み、後方は大後頭孔前縁部、左右側および下方は全ての構造物が含まれる領域とされた。モデルは全て4面体要素メッシュモデルとし、有限要素解析ソフトウェア Autodesk Simulation Mechanical™ へインポートされた。拘束条件は、モデル最上縁部をおよび後方部を完全拘束とされた。荷重条件として、CT画像から4つの咀嚼筋の長軸方向に直行する断面積を計測し、その比率から推測した各咀嚼筋の筋力を解剖学的な起始停止部間のベクトルとされた。解析手法は非線形弾性解析とし、得られた解析結果から、左右の応力分布の不均衡を算出するために、上顎骨非偏位側、上顎骨偏位側、下顎骨非偏位側、下顎骨偏位側の4つの領域が設定された。各領域に属する節点のフォンミーゼス応力 (N/mm²) について、1.0N/mm² 以上の応力が発生した節点の各領域全体の節点数に対する比率を算出した。上顎領域の左右側、下顎領域の左右側の比率の平均について、Mann-Whitney のU検定を用いて統計学的な比較検証が行われた。

その結果、1.0N/mm² 以上の応力が認められた節点数の割合については、上顎領域、下顎領域ともに偏位側と非偏位側の比率に有意差認められず、モデルを構成する節点全体で見ると偏位側、非偏位側間の顎骨内応力分布に著しい差異は観察されなかった。今回対象とした症例は成長がほぼ終了しており、顎顔面骨格形態が咀嚼筋の筋力に対してすでに適応変化した形態、すなわち不均衡な筋力に対して力学的に釣り合いのとれた形態となっている可能性が示唆された。

本研究結果では、解析を行った5例について顎偏位をともなう骨格性下顎前突症における偏位側、非偏位側の顎骨内応力分布に左右差認められなかった。顎顔面骨格は三次元的な構造体であるため、実際の形態変化には顎骨表面ではなく顎骨内部の応力分布が硬組織形態の決定に大きく影響していると考えられ、作成したモデルにおいては統計学的な差認めず、結果として応力の不均衡は少ないと判断された。また、今回作成したモデルがすでに成長が終了した状態でのCT画像を元に作成されていることも要因の一つと考えられた。顎骨の形態変化が著しい成長期において、咀嚼筋の左右差による不均一な顎骨内応力が認められた場合、生体組織がそれに対する適応変化として顎骨内応力の不均衡を緩和するような形態に変化し、結果として顎偏位が成立したことが推察された。

本研究は、顔面非対称・顎偏位を引き起こす生体力学的な背景を明らかにするために、三次元有限要素解析を用いて、顎偏位をともなう骨格性下顎前突症例の生体力学的な分析を行ったものである。その結果、歯根膜を超弾性材料として再現できる Mooney-Rivlin モデルを用いて詳細な設定を行うことによって、顎骨内応力を視覚化できる手法として有限要素解析は有用と考えられた。また、顎偏位を伴った症例であったにもかかわらず、上顎骨、下顎骨における偏位側、非偏位側の顎骨内応力分布に不均衡は認められなかったが、これは、成長変化後の顎顔面骨格形態においては、不均一な顎骨内応力分布に対し力学的に釣り合いのとれた形態となっている可能性が考えられた。

以上のように、本論文は、三次元有限要素解析を用いて、顎偏位をともなう骨格性下顎前突症例の生体力学的な分析を行ったものであり、歯根膜超弾性材料モデルを用いて詳細な設定を行うことによって、顎骨内応力を視覚化できる有限要素解析の有用性を示したもので、顔面非対称・顎偏位を引き起こす生体力学的な要因の解明が期待され、顎偏位の増悪の抑制などの顎偏位を防ぐ治療法の確立や、顎矯正手術の術後管理、術後機能訓練などへの応用・展開が予想されることから臨床面において非常に有意義なものと思われる。

よって、本論文に学位論文としての価値を認める。