

学 位 論 文 題 名

圧迫側歯根膜に生じる変性組織と応力分布との関連

学位論文内容の要旨

緒言

矯正歯科治療における歯の移動は、歯根膜の変性組織の出現とその修復、歯槽骨の吸収と添加といった組織変化のもとに生じることがよく知られている。しかし、このような生体反応のメカニズムについてはいまだに不明な点が多く、矯正力の適用は術者の経験に基づいて行われている。したがって、歯の移動が速やかで歯根吸収などの為害性の少ない矯正力を確実に達成するためには、矯正力と組織変化との関連について詳細に解明することが必要である。

そこで、今回矯正力を加えた際に歯周組織に生じる応力の定量化を行う目的から、ネコ上顎犬歯の移動実験において生体と等価性の高い有限要素解析を行う方法を確立し、圧迫側歯根膜の変性組織の出現と応力分布との関連について検討した。

材料ならびに方法

1. 歯の移動実験

実験材料として健康な成ネコ 2 匹(個体 A, B)の上顎犬歯を用い、実験歯である上顎右側犬歯にクコースド・コイル・スプリングを用いて、固定源である第三前臼歯から遠心方向に牽引した。なお、荷重の大きさは 100g、実験期間は 4 日間とした。

2. 組織切片作製法および三次元再構築法

実験期間終了後、Bouin 固定液による灌流固定を行い、ついで、上顎犬歯を周囲の歯槽骨とともに切り出し、通法に従いセロイジン・ブロックを作製した。ついで、ブロックの薄切面が力の作用方向と平行になるように歯根を横断し、厚さ 30 μ m で連続薄切した。得られた切片に H-E 染色を施したのち、光学顕微鏡にて歯根膜に見られる変性組織の出現部位を観察し、歯根、歯槽壁、変性組織の分布領域をディジタイザーを用いてコンピュータに入力した。ついで、三次元画像解析ソフトにより、三次元再構築を行った。

3. 有限要素解析法

染色を施した組織切片の中から、各個体の歯頸部および根尖部それぞれにおいて、変性組織が最も広く分布しているものを選択し、計 4 枚の組織切片を抽出した。そしてこれらの組織切片をもとに二次元有限要素モデルを構築した。また荷重方向は、組織切片から牽引側の歯根膜の伸展方向を観察し、これを参考に設定した。さらに荷重の大きさは、ネコの上顎犬歯を簡略化した三次元有限要素モデルを構築し、このモデルの歯冠に

100gの荷重をかけた解析を行い、これから各横断面にかかる荷重を算出することにより求めた。

以上の有限要素解析において歯、歯槽骨、歯髓腔および骨髓腔の物性定数については、過去に報告された値を参考に決定した。

結果および考察

1.組織学的知見

光学顕微鏡像において、歯頸部では個体 A、B とも同様に、歯根が横断面の楕円の長軸方向からやや舌側よりの遠心方向に変位して観察された。歯根表面ならびに歯根膜に面する歯槽壁は全周にわたってほぼ平滑であり、圧迫側ではやや舌側よりに歯根膜変性組織が広範に確認された。一方、根尖部では、両個体とも歯根はほぼ近心方向に変位していた。歯根表面ならびに歯槽壁は歯頸部とは様相が異なり両個体とも著しい凹凸が認められた。圧迫側となる近心根尖部では、個体 A では頬側よりに 1ヶ所、個体 B では 2ヶ所に狭い領域で変性組織が確認された。この様な部位は歯根と歯槽壁の距離が特に近接している部分であった。

三次元再構築像においては両個体とも遠心側歯頸部付近には歯根全長の 1/4~1/5 にわたって頬舌方向に幅の広い広範な変性組織がやや舌側よりに分布しているのが観察され、根尖側では根尖付近に個体 A では 1ヶ所の、個体 B では 2ヶ所の変性組織が歯根の長軸方向に細長い長円形の狭い領域として観察された。

光学顕微鏡像の所見から、どの変性組織も無細胞帯と内変性帯との識別は困難であり、すべてが内変性帯の様相を呈していた。さらに、どの組織切片上でも破骨細胞の出現が全くみられなかったことをふまえると、両個体とも組織反応という点では、金子や高橋の報告した 4 日間例に比べてわずかに遅いものと考えられた。しかしながら、変性組織の三次元的な分布は金子の報告した 4 日間例に類似しており、変性組織の分布領域が重要となる本実験の目的を達すものであった。

2.有限要素解析

歯に矯正力を加えた際の歯周組織の応力分布を有限要素法を用いて解析した報告は、これまでに多数なされているが、モデルの構築、歯根膜の物性定数の設定という点において応力分布と組織変化との関連を詳細に検討するには問題があった。

そこで今回、組織切片をもとにした詳細なモデルの構築、さらに物性定数のなかで解析に最も重要な歯根膜のヤング率については、本学工学部との共同実験により歯—歯根膜—歯槽骨の試験片を圧縮試験下で直接測定した値を用いることにより、生体と極めて等価性の高い有限要素解析を行うことが可能となった。

二次元有限要素モデルを用いた実験結果から、歯頸部では全体として力の作用線に近い歯根膜に高い応力値が存在し周辺に向かってゆるやかに減衰する応力分布を示し、さらに応力値の高い領域に一致して変性組織が広く分布していた。一方、根尖部では力の作用線と離れた歯根膜の狭窄した位置で局所的に高い応力値が認められ、その領域に変性組織が存在していた。これは根尖部では歯頸部に比べて歯根表面ならびに歯槽壁が凹

凸にとむ不規則な形態

を呈しているため、力の作用線に近い圧迫の中央部に応力値の高い部位が存在するのではなく、むしろ歯根膜の幅が狭い部位に局所的に応力値が高い部位が存在したものと考えられる。

また、圧迫側歯根膜に生じた応力には圧縮応力のピークが存在し、どの変性領域内においてもピークが含まれており、その値は-70kPa以上であった。また、根尖部では-35kPa程度の低い値のピークも存在していたが、これらの部位では変性組織の出現は認められなかった。このことから、変性組織は、ある一定の値の大きさを越えた応力分布のピークの存在下で出現するものと考えられる。この値については、今回の実験から少なくとも-35kPaを越えたところにあると考えられるが、いずれにしても近藤の報告した毛細血管圧-7.8kPaに比べるとかなり大きな値である。これは、歯根膜のコラーゲン線維を介して毛細血管が圧迫され血流が停止するには、毛細血管圧に拮抗するというよりも、コラーゲン線維をまず十分に圧縮するために高い応力が必要であることを示すものと考えられる。さらに、変性組織と正常歯根膜との境界の応力値は、歯頸部では-60~-70kPaの範囲の値を示し、ほぼ一定の値であったが、根尖部では-35kPa~-100kPa程度の範囲で多様な値を示していた。これについては、歯頸部と根尖部での歯根膜のコラーゲン線維の配列の違いによるものと考えられる。一般に、歯頸部ではコラーゲン線維の走行は一定の方向性があり、その配列は規則的であるのに対して、根尖部では線維の走行は多様でその配列も不規則である。そのため、根尖部では歯根膜に生じた応力が同一の値であったとしても、部位によりコラーゲン線維の圧縮の様相は異なり、さらには毛細血管の圧迫の程度にも差が生じることが考えられる。

今後は、組織反応がさらに進行した状態に関しても研究を進め、変性組織の存在下での歯根膜の物性定数の測定実験を行い、応力分布と破骨細胞の出現や変性組織の修復との関連についても検討を加えていく所存である。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 中 村 進 治

副 査 教 授 脇 田 稔

副 査 教 授 吉 田 重 光

学 位 論 文 題 名

圧迫側歯根膜に生じる変性組織と応力分布との関連

審査はいずれの担当者も口頭試問により提出論文の内容とそれに関連した学問分野について行った。

生体に加わる様々な力の解析には有限要素法が広く用いられている。歯科矯正学の分野でも本法を用いて歯に矯正力を加えた際の歯周組織の応力分布を解析した報告が数多くみられる。しかし、これらの報告において有限要素モデルは簡略的に構築されており、また物性定数についても歯の変位により歯根膜が圧縮され、そのヤング率が経時的に変化することが容易に推察されるがこのような力学的性質の検討も十分に行われていない。本学歯科矯正学講座ではこれまでに生体システム工学講座との協同研究により、組織切片をもとにした精密な有限要素モデルの構築ならびに圧縮試験下での歯根膜の弾性特性の測定法の開発を行ってきた。申請者はこのような研究を基礎としてネコ上顎犬歯の移動実験において生体と等価性の高い有限要素解析を行い、圧迫側歯根膜の変性組織の出現と応力分布との関連性について検討を行っている。

材料ならびに方法

実験材料として健康な成ネコ 2 匹（個体 A、B）の上顎犬歯を用い、実験歯である上顎右側犬歯にクローズド・コイル・スプリングを用いて、固定源である第三前臼歯から遠心方向に牽引した。なお、荷重の大きさは 100g、実験期間は 4 日間とした。

実験期間終了後、組織切片を作製し、光学顕微鏡にて歯根膜に見られる変性組織の出現部位を観察し、歯根、歯槽壁、変性組織の分布領域をディジタイザを用いてコンピュータに入力した。ついで、三次元画像解析ソフトにより、三次元再構築を行った。

また、染色を施した組織切片の中から、各個体の歯頸部および根尖部それぞれにおいて、変性組織が最も広く分布しているものを選択し、計 4 枚の組織切片を抽出した。そしてこれらの組織切片をもとに二次元有限要素モデルを構築した。また荷重方向は、組織切片から牽引側の歯根膜の伸展方向を観察し、これを参考に設定した。さらに荷重の大きさは、ネコの上顎犬歯を簡略化した三次元有限要素モデルを構築し、このモデルの歯冠に 100g の荷重をかけた解析を行い、これから各横断面にかかる荷重を算出することにより求めた。

以上の有限要素解析において歯、歯槽骨、歯髓腔および骨髓腔については、過去に報告

された値を参考に決定し、歯根膜のヤング率については、歯-歯根膜-歯槽骨からなる試験片を用いて圧縮試験下において測定した値である 10MPa を用い、ポアソン比については丹根の値を用いた。

結果および考察

二次元有限要素モデルを用いた実験結果から、歯頸部では全体として力の作用線に近い歯根膜に高い応力値が存在し周辺に向かってゆるやかに減衰する応力分布を示し、さらに応力値の高い領域に一致して変性組織が広く分布していた。一方、根尖部では力の作用線と離れた歯根膜の狭窄した位置で局所的に高い応力値が認められ、その領域に変性組織が存在していた。これは根尖部では歯頸部に比べて歯根表面ならびに歯槽壁が凹凸にとむ不規則な形態を呈しているため、力の作用線に近い圧迫の中央部に応力値の高い部位が存在するのではなく、むしろ歯根膜の幅が狭い部位に局所的に応力値が高い部位が存在したものと考えられる。

また、圧迫側歯根膜に生じた応力には圧縮応力のピークが存在し、どの変性領域内においてもピークが含まれており、その値は70kPa 以上であった。また、根尖部では35kPa 程度の低い値のピークも存在していたが、これらの部位では変性組織の出現は認められなかった。このことから、変性組織は、ある一定の値の大きさを越えた応力分布のピークの存在下で出現するものと考えられる。この値については、今回の実験から少なくとも35kPa を越えたところにあると考えられるが、いずれにしる近藤の報告した毛細血管圧7.8kPa に比べるとかなり大きな値である。これは、歯根膜のコラーゲン線維を介して毛細血管が圧迫され血流が停止するには、毛細血管圧に拮抗するというよりも、コラーゲン線維をまず十分に圧縮するために高い応力が必要であることを示すものと考えられる。さらに、変性組織と正常歯根膜との境界の応力値は、歯頸部では60～70kPa の範囲の値を示し、ほぼ一定の値であったが、根尖部では35kPa～100kPa 程度の範囲で多様な値を示していた。これについては、歯頸部と根尖部での歯根膜のコラーゲン線維の配列の違いによるものと考えられる。一般に、歯頸部ではコラーゲン線維の走行は一定の方向性があり、その配列は規則的であるのに対して、根尖部では線維の走行は多様でその配列も不規則である。そのため、根尖部では歯根膜に生じた応力が同一の値であったとしても、部位によりコラーゲン線維の圧縮の様相は異なり、さらには毛細血管の圧迫の程度にも差が生じることが考えられる。

以上のように本論文は歯に矯正力を加えた際、圧迫側歯根膜に変性組織の出現する圧縮応力値についての様々な知見を得た点、今後の歯科矯正学の発展に資すること大である。よって申請者は博士（歯学）の学位を授与される資格をもつものと認めた。