

学位論文内容の要旨

愛知学院大学

論文提出者

河村 純

論文題目

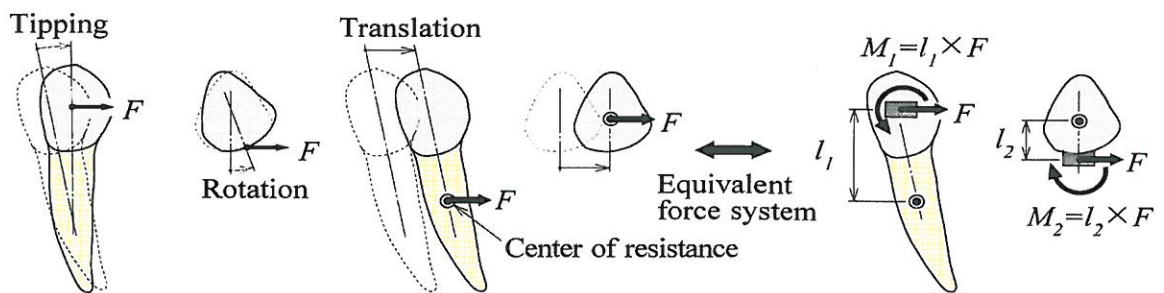
有限要素シミュレーションによる
歯科矯正移動の力学的評価

矯正歯科治療では、所定の位置に正確に歯を移動することが要求される。その場合、矯正装置による歯の移動が予測できれば、治療計画をたてる上で、大変便利である。前もって移動方法の適否が評価でき、最適な矯正方法を選択することができる。

歯の移動状態を予測する最も簡単な方法は、初期動揺時の抵抗中心を用いる方法である。すなわち、図 1A に示すように、歯冠に近遠心方向の力を加えると、歯根の根尖側約 1/3 を支点として歯が傾斜して移動する。このような移動様式を傾斜移動といい、支点を歯の回転中心という。また、図 1B のように、歯根の適切な位置に力を加えると歯を平行に移動することができる。この移動様式を歯体移動という。このときの力の位置を歯の抵抗中心という。いろいろな歯および歯列の抵抗中心の位置は、これまで、多くの実験と計算によって求められている。抵抗中心に力 F を加えた場合の力系は、歯冠に力 F とモーメント M_1 と M_2 を同時に加えた場合と等価である(図 1C)。このときの力とモーメントの比 M_1/F , M_2/F は、ブラケットから抵抗中心までの距離 l_1 , l_2 に等しい。歯の抵抗中心の位置 l_1 , l_2 を用いれば、歯の移動状態が予測できる。すなわち、歯に任意の力 F とモーメント M_1 , M_2 が作用する時、それらのモーメント・力比が $M_1/F=l_1$, $M_2/F=l_2$ の場合、歯は歯体移動する。そうでない場合には、モーメントの方向に歯が傾斜あるいは回転する。

一方、文献では、有限要素法を用いて、初期動揺時だけでなく、長時間

にわたる歯の移動がシミュレーションされた。これらの方法では、歯槽骨の添加・吸収、あるいは歯槽骨の粘弾性によって歯が移動する。また、歯の模型を用いた方法として、タイポドントを用いたシミュレーション、荷重センサーを用いたシミュレーションが行われた。いろいろなシミュレーション方法がある中で、有限要素法を用いた文献では、臨床時の矯正装置、すなわち複数の歯がワイヤーあるいはスプリングで連結された場合について、歯の移動がシミュレーションできる。そのため、本研究でもこ



A. 傾斜と回転

B. 歯体移動

C. 力系の等価

図1 歯の移動状態

れらと同じ方法を用いた。この方法によれば、歯の移動抵抗を同じにして、矯正方法が力学的に評価できる。一方、臨床実験による評価では、歯の大きさや配列の違いによって、歯の移動抵抗が個別に異なり、矯正方法の違いによる歯の移動状態の変化が判別しにくくなることも考えられる。

歯を移動するための代表的な方法の1つは、スプリングによる歯の移動である。この方法では、力が歯に直接作用する。そのため、スライディングメカニクスのような摩擦の問題は生じない。しかし、歯の移動をコン

トロールするためには、歯に適切な力とモーメントを加える必要がある。また、歯の移動に伴う力の低下を小さくするためには、スプリングのばね定数(牽引力/活性化量)を小さくする必要がある。このような目的に沿って、いろいろな形状のスプリングが考案されている。また、スプリングの材料もいろいろな材料が用いられている。これまで、スプリングの力学的な性能は、ばね定数と活性化時の M/F 比によって評価されてきた。しかし、臨床時の矯正では、スプリングは複数の歯に固定される。この場合、力系は力学的に不静定になる。歯の移動に伴って、力系が変化して移動状態が変わる。活性化時の力系から、スプリングの性能を評価することは難しい。

そこで、本研究では、長時間にわたる歯の移動をシミュレーションし、それに基づいてスプリングの性能を力学的に評価した。本研究で評価したのは、ループ形状の異なる圧下スプリング、犬歯牽引用の垂直ループスプリング、前歯列牽引用の T 形ループスプリング、ゴムメタル製の垂直ループおよび圧下スプリングである。

歯を移動するもう 1 つの代表的な方法は、スライディングメカニクスである。この方法では、歯列に固定したアーチワイヤーをガイドとして、歯を移動させる。歯体移動が容易に実現できる。しかし、ブラケットがアーチワイヤーを滑る際、摩擦が生じ、歯の移動を妨げる。そのため、歯に作用する力が不確定になる。通常のスライディングメカニクスでは、臼歯列を固定源にして犬歯あるいは前歯列が遠心に牽引される。このとき、

臼歯列も近心に移動する。この場合については、摩擦の影響も含めて、歯の移動がシミュレーションされた。一方、最近では、臼歯列の移動を防ぐため、顎骨に植立した歯科矯正用アンカースクリュー(以下アンカースクリュー)を固定源として、前歯列を牽引することが行われている。この場合、アンカースクリューの位置によって力の方向が変わり、歯の移動状態が変化する。初期動揺時については、実験および有限要素法によって歯の移動が検討されている。しかし、スプリングの場合と同様に、スライディングメカニクスでも、歯の移動に伴って力系が変化する。初期動揺から矯正移動を正確に評価することは難しい。そこで、本研究では、歯科矯正用アンカースクリュースライディングメカニクスについて、長時間にわたる歯の移動をシミュレーションし、この移動方法を力学的に評価した。

第1章の序論では、歯の移動の予測方法と本研究の目的について述べた。

第2章では、3つの形状のチタンモリブデン合金製(TMA)圧下スプリングについて、歯の移動をシミュレーションした。その結果、圧下スプリングの形状に係わらず、どのスプリング形状を用いても、歯をほとんど傾斜させずに圧下・挺出できることがわかった。また、一回の活性化で小臼歯を最も圧下することのできるのは、大きなレクタングュラーループに22°の面外曲げを付与したスプリングであることを示した。

第3章では、犬歯牽引用のTMA製スプリングの性能を評価した。犬歯と固定歯の長時間にわたる移動をシミュレーションしスプリングに付与され

たゲートルベンド、アンチローテーションベンド、ティップバックベンドの効果を調べた。その結果、犬歯の移動は定常ではなく、最初傾斜と回転し、その後整直した。ゲートルベンドとアンチローテーションベンドの大きさが適切な場合、時間が経過した後、犬歯の傾斜角と回転角が同時に0となり、歯体移動できた。固定歯の傾斜を防ぎ、犬歯を歯体移動させる最適な3つの曲げ角度の組み合わせを決定することができた。

第4章では、TMA製T形スプリングを用いて前歯列と臼歯列を一括して牽引する場合をシミュレーションした。そして、ループの位置、トランスパラタルアーチ、臼歯列の歯数の影響を調べた。ループの位置を犬歯と第2小臼歯の中央にすると、犬歯が歯体移動した時点で、臼歯列が傾斜移動した。ループ位置を近心にすると、前歯列と臼歯列を同時に歯体移動できた。また、トランスパラタルアーチは臼歯列の回転を防ぐのに効果があった。さらに、臼歯列に第2大臼歯を加えた場合、臼歯列と前歯列の移動量の比率が約2/3に減少した。

第5章では、ゴムメタル、TMA、ステンレス製の牽引スプリングと圧下スプリングによる歯の移動状態をシミュレーションし、それらを比較することで、スプリングの材質(ヤング率)の影響を調べた。活性化時の牽引力が同じになる状態で比較した場合、ゴムメタル製の牽引スプリングでは、1回の活性化によって空隙閉鎖できる量が最も大きくなったが、空隙閉鎖には最も時間がかかった。歯の高低差が同じ場合、ゴムメタル製の圧下スプ

リングでは、最も短い時間でレベリングが完了できた。これらの結果は、ゴムメタルの弾性係数が低いために生じた。

第6章では、アンカースクリューを固定源とするスライディングメカニックスによって、前歯列を遠心へ牽引する場合をシミュレーションした。その結果、矯正力の作用方向と歯列の移動状態の関係を明らかにすることができた。すなわち、パワーアームが長くなるほど、歯列全体の回転が減少した。臼歯列によって前歯列の回転が拘束された。高位置のアンカースクリューでは、歯列がほぼ歯体移動した。矯正力の垂直成分によって歯列全体が圧下あるいは挺出した。

本研究では、スプリングの形状やワイヤーの材質などの条件を変えた場合について、歯の移動状態の変化を定量的に、図示することができた。それぞれの章で示したように、有限要素法による歯の移動シミュレーションは、矯正方法の評価において力学的に十分妥当で有効と考えられる。本研究の結果は、歯科矯正学における新しい知見であるだけでなく、臨床治療においても有用である。しかし、シミュレーションには、いろいろな仮定が用いられており、それらが成り立つ範囲でのみ、シミュレーションの結果は正しい。精度の高い歯の移動状態をシミュレーションするためには、臨床時の歯の移動状態と比較して、必要な要素を検証することが必要である。

なお、本研究の方法では、歯科用CTの画像からシミュレーションモデル

(論文内容の要旨)

No. 7

愛知学院大学

を作成した。この方法を用いれば、個々の矯正治療の患者に対して、有限要素法モデルを作成し、歯の移動をシミュレーションすることができる。これが実現できれば、矯正治療においてより有用である。これは、今後の課題である。

平成 26年 6 月 11日