

クワドヘリックスにおける歯の移動メカニクス

ー 有限要素法シミュレーション ー

江花照夫¹, 横井由紀子^{1,2}, 河村純³, 荒井敦^{1,4}, 岡藤範正^{1,4}

¹松本歯科大学大学院硬組織疾患制御再建学講座

²松本歯科大学小児歯科学講座

³河村歯科医院

⁴松本歯科大学歯科矯正学講座

EBAMNA Teruo¹, YOKOI Yukiko^{1,2}, KAWAMURA Jun³, ARAI Atsushi^{1,4} and
OKAFUJI Norimasa^{1,4}

¹ Department of Hard Tissue Research, Matsumoto Dental University Graduate School
of Oral Medicine

² Department of Pediatric Dentistry, Matsumoto Dental University School of Dentistry

³ Kawamura Dental Clinic

⁴ Department of Orthodontics, Matsumoto Dental University School of Dentistry

キーワード:クワドヘリックス, 上顎側方拡大, 有限要素法, メカニクス, 歯の移動シミュレーション

指導：岡藤範正 教授

2019年 2月18日受付

2019年 7月25日受理

連絡先：横井由紀子

松本歯科大学大学院硬組織疾患制御再建学講座

住所 〒399-0781 長野県塩尻市広丘郷原 1780

E-mail:yukiko.yokoi@mdu.ac.jp

抄 録

クワドヘリックスは緩徐拡大装置の代表的な装置であるが、活性化の違いによる歯の移動様式について、不明な点が多い。本研究では、有限要素法シミュレーションを用いて、クワドヘリックスによる4種類の活性化の違いによる歯の移動メカニクスを明らかにすることを目的とした。

有限要素法モデルにおいて、クワドヘリックスは弾性体、歯と歯槽骨は剛体と仮定し、歯は初期動揺と同じ方向に移動すると仮定した。歯根膜の弾性変形によって生じる移動を初期動揺とし、初期動揺の方向に歯槽窩を移動していくことで歯が移動されると定義し、この移動を繰り返すことで経時的な矯正学的歯の移動をシミュレーションした。クワドヘリックスの活性化は、平行または扇状に活性化する2種類とし、それぞれ左右対称に両側を活性化させる場合と片側を活性化する計4種類とし、上顎歯列に装着した後のメカニクスと経時的な歯の移動状態を解析した。

経時的な歯の移動のシミュレーションにおいて、クワドヘリックスを活性化させた形状に応じて、歯列は平行および扇状に拡大された。その際、大臼歯は歯体移動し、犬歯と小臼歯は傾斜移動した。また、クワドヘリックスの片側だけを平行および扇状に拡大して活性化させた場合、活性化側の犬歯と小臼歯は対側と比較して大きく拡大されたが、大臼歯は両側ともに同程度拡大した。これらの結果から、有限要素法シミュレーションによってクワドヘリックスによる歯の移動状態が明らかとなり、さらに活性化の違いによる歯の移動状態およびそのメカニクスが明らかとなった。

Mechanics of tooth movement produced by quad-helix appliance : Finite element simulation

Abstract

The quad-helix is a typical appliance used to slowly expand the maxillary dentition. The patterns of tooth movement produced by various activation types have not been fully understood. This study used the finite element method to examine the mechanics of tooth movement in four types of activation.

In the finite element models, the quad-helix was assumed to be an elastic beam, and the teeth and the alveolar bone were assumed to be rigid bodies. The tooth moved in the same direction as that in the initial movement, which was produced by elastic deformation of the periodontal ligament. By repeating displacement of the alveolar socket, long-term movement of the tooth was simulated. Two types of activation, parallel and fan-shaped, were assumed. In each type, both sides and one-side activations were assumed. In these activations, the force system just after activation and the movement pattern after a sufficient length of time were calculated.

In the long-term movement, the dentition was expanded in parallel or in a fan-shaped depending on the activation shape. The molar moved bodily, and the canine and the premolars tipped buccally. When the quad-helix was activated on one side of the dentition, the canine and the premolars on the activation side were expanded more than those on the opposite side. However, the molars of both sides were expanded by about the same amount.

Based on the simulation results, movement patterns produced by the quad-helix were clarified. In addition, differences in movement pattern due to the activation shapes, and their mechanics, were clarified.

緒 言

上顎歯列弓の狭窄による不正咬合症例では、側方拡大を行うことが多く、急速拡大装置あるいは緩徐拡大装置が用いられる^{1,2)}。急速拡大装置は、正中口蓋縫合を離開させることによって歯槽基底部とともに歯列を拡大し、数キログラムに及ぶ大きな力が必要になる。一方、緩徐拡大装置は、数百グラムの弱い力によって歯を頬側へ移動させることで歯列を拡大する。緩徐拡大装置の代表的な装置であるクワドヘリックスは、W形のスプリングを基本形状とし、その剛性を小さくするために4つのヘリックスが設けてある(図1)。調整方法によって容易に拡大力をコントロールすることができ、さまざまな拡大を行うことができるため、臨床治療に広く用いられている。

図1

クワドヘリックスを用いて歯列を拡大するためには、歯の移動のメカニクスを理解する必要がある。そのため、これまでもクワドヘリックスを力学的観点から検討した研究が行われてきた。Honmeらは、クワドヘリックスを平行及び扇状活性化した場合の矯正力を³⁾、鴨頭らは、クワドヘリックスを平行に活性化した場合と扇状に活性化した場合に、それらの違いが顔面頭蓋に与える影響を比較検討している⁴⁾。さらに、Jonesらは、クワドヘリックスの形状と力学的特性との関係⁵⁾を、Santosらは、2種類のステンレス鋼製のクワドヘリックスによる矯正力⁶⁾を明らかにした。これらの研究によって、クワドヘリックスを装着した直後の力系については明らかになってきた。しかし、その力系によって歯がどのように移動するのか、すなわちクワドヘリックスによる歯の移動のメカニクスについては、これまでほとんど研究が行われていない。また、クワドヘリックスの活性化の違いが歯の移動に与える影響についても不明である。

本研究では、上顎歯列にクワドヘリックスを装着した場合について、長時間にわたる歯の移動を有限要素法によってシミュレーションし、クワドヘリックスの活性化の違いにおける歯の移動メカニクスについて検討した。

材料ならびに方法

シミュレーションに用いたクワドヘリックスと歯列を図 1 に示す。クワドヘリックスは、断面直径が 0.9 mm のステンレス鋼製ラウンドワイヤーで作製されたものとし、4 つのヘリックスの外径は 3.7 mm とした。歯列モデルとして、歯科実習用の模型(i21D-400C, (株)ニッシン, 京都)を用いた。クワドヘリックスは、大白歯バンドに ST ロック⁷⁾で固定されているものとした。

クワドヘリックスと歯の有限要素法モデルを図 2 に示す。モデルの作製およびシミュレーションには、有限要素法ソフトウェア(ANSYS 11.0, Ansys Inc., USA)を用いた。犬歯から第一大臼歯がクワドヘリックスによって拡大されるものとし、シミュレーションにはこの歯種だけを用いた。歯の有限要素法モデルは、文献 7 の方法に従って作製した。図 1 の歯列モデルを歯科用 CBCT (Alphard, 朝日レントゲン工業(株), 京都)で撮影し、3次元モデル作成ソフトウェア(3D-Doctor, Able Software Corp, USA)と要素分割ソフトウェア(ICEM CFD, Ansys Inc., USA)を用いて、有限要素法モデルを作成した。歯は剛体と仮定し、その表面をシェル要素で分割した。歯根表面には、厚さが 0.2mm(一定)の歯根膜があると仮定した。歯根膜は、3次元ソリッド要素で分割した。歯根膜は線形弾性体と仮定し、そのヤング率を 0.13MPa, ポアソン比を 0.45 とした⁸⁾。歯槽骨は剛体と仮定した。歯槽窩に一致する歯根膜外表面の節点を剛体化し、それらを歯の移動に伴って移動した。クワドヘリックスは、線形弾性体として、3次元ビーム要素で分割し、そのヤング率を 200 GPa とした。クワドヘリックスは ST ロックによって大白歯に完全に固定されていると仮定した。そのため、クワドヘリックスと大白歯の歯冠を剛体ビームで連結し、歯冠表面とクワドヘリックスには、摩擦係数を 0.15 とし、接触要素を設定した。

図 2

クワドヘリックスを活性化する方法は、平行または扇状に広げて活性化する方法の 2 種類とし、それぞれ左右対称に両側を活性化させる場合と、右側のみ片側だけ活性化させる場合の計 4 種類（両側を平行に活性化、両側を扇状に活性化、片側を平行に活性化、片側を扇状に活性化）とした。

クワドヘリックスを歯列に装着し、最初に活性化直後の力系を解析し、その後経時的な矯正学的歯の移動についてもシミュレーションした。その計算手順を図 3 に示す。歯の移動のシミュレーションは、過去の報告と同様の方法を

図 3

用い⁹⁾、歯の移動方向は、歯根膜の弾性変形によって生じる初期動揺の方向と同じであると仮定した。クワドヘリックスが活性化された後、歯の初期動揺量が計算され、初期動揺量の分だけ歯槽窩が移動することで、歯が移動されると定義し、この移動を繰り返すことで、経時的な矯正学的歯の移動をシミュレーションした。なお、繰り返し計算ごとに、歯に作用する力系を更新した。

結 果

表 1 に、 $N=1000$ で繰り返し計算した場合の経時的な歯の移動における傾斜角度を示す。大臼歯では、頬側傾斜角度が 2° 以下であり、ほぼ歯体移動をしていた。しかし犬歯と小臼歯では、頬側傾斜角度が 10° 程度であり、大臼歯と比較して、傾斜移動量が大きかった。

図 4

図 4 に、両側を平行に活性化した時のクワドヘリックスのモーメントおよび曲げ応力を示す。左右のアームを平行に片側 1.9mm 、両側で 3.8mm 広げて活性化させたクワドヘリックスを歯列に装着した場合、ST ロックから作用する力とモーメントは、舌側方向に 2.7N 、 $10\text{N}\cdot\text{mm}$ と $20\text{N}\cdot\text{mm}$ であった。大臼歯には、これらと大きさが同じで反対方向の力とモーメントが作用した。応力は正中とヘリックスで大きくなった。その大きさは最大 400MPa 程度であり、矯正用ステンレス鋼ワイヤーの降伏応力(約 1500MPa)¹⁰⁾の半分以下であることから、クワドヘリックスが弾性範囲にあることが確認できた。今回計算したほかの条件においても、曲げ応力が最大となる位置は同じであり、その大きさは降伏応力の半分以下であった。

図 5

図 5 に、両側を平行に広げて活性化(両側で 3.8mm 拡大)したクワドヘリックスを装着した場合の繰り返し計算の回数 $N=1000$ における歯の移動状態と歯根膜の応力分布を示す。この時点(繰り返し計算後)において、クワドヘリックスの形状は活性化した装着前の形状となり、大臼歯は頬側方向に歯体移動した。そのため、大臼歯の歯根では、頬側全体が圧縮応力になり舌側全体が引張応力となった。それら応力の大きさは 1kPa 程度であった。犬歯と小臼歯は傾斜移動し、歯根中央やや上を中心にして回転し、根尖が舌側へ、歯冠が頬側へ移動した。それに応じて、頬側の根尖付近で約 1kPa の引張応力が生じ、歯頸付近で約 1kPa の圧縮応力が生じた。このような歯の移動状態および応力分布は、繰り返し計算の回数が少ない場合、歯の移動中も同じであった。また、ほかの活性化条件でも同

じであった。

大臼歯は、4種類すべての活性化において遠心傾斜した。それらのうち、最も大きい遠心傾斜量を認めた両側扇状に活性化した場合について、舌側から見た大臼歯の傾斜移動の状態を図6に示す。クワドヘリックスの近心端が下方へ移動し、それに伴って大臼歯が遠心へ 3.9° 傾斜した。

図7~10に、各活性時における装着直後の力系（歯に作用する力とモーメント）と $N=1000$ で繰り返し計算した場合の経時的な歯の移動状態および移動量を示す（数値は活性化時における装着直後の歯に作用する力（赤矢印）とモーメント（青矢印）および繰り返し計算における経時的な歯の移動量（黒色矢印間）とした）。活性化時、大臼歯には $1\sim 3\text{ N}$ の力と $10\sim 20\text{ N}\cdot\text{mm}$ のモーメントが作用したが、小臼歯はクワドヘリックスと接触せず、力が作用しなかった。繰り返し計算のシミュレーションによる経時的な歯の移動に伴い、すべての歯がクワドヘリックスと接触し、クワドヘリックスはほとんど装着前の活性化した状態の形状となり、歯列は拡大した。経時的な歯の移動のシミュレーションにおいて、両側を平行に活性化した場合では歯列は平行に拡大し、両側を扇形に活性化した場合では歯列は扇状に拡大した。どちらの場合も大臼歯はほぼ歯体移動し、犬歯と小臼歯は歯冠が頬側に傾斜移動した。また、犬歯の頬側移動に伴い、犬歯と側切歯の間に空隙が生じた。一方、右側のみ活性化した片側を平行に活性化した場合、右側の歯列はほぼ平行に拡大された。頬側への拡大量は、活性化量 3.0 mm の半分程度であり、犬歯で 1.8 mm 、大臼歯で 1.3 mm であった。一方、大臼歯の移動量は両側共に 1.5 mm と 1.3 mm であり、ほぼ同じであった。右側のみ片側の扇状に活性化した場合、主に右側の歯列が扇状に拡大した。頬側への拡大量は 2.7 mm であり、活性化量 4.1 mm より小さかった。大臼歯に作用した力は左側 1.33 N 、右側 0.88 N であり、右側より左側のほうが大きかった。しかし、大臼歯の移動量は左側 0.6 mm と右側 0.2 mm で同程度であり、右側犬歯の移動量である 2.7 mm に比べて非常に小さかった。

図7

図8

図9

図10

考 察

I. 歯の移動状態

有限要素法による歯の移動シミュレーションにおいて、活性化したクワドヘリックスを上顎第一大臼歯に装着した場合、すべての活性化の条件においてほぼ装着前の活性時の形状となり、歯列が拡大された。クワドヘリックスを左右対称に広げた両側を平行に活性化もしくは扇状に活性化した場合では、歯列が左右対称に平行あるいは扇状に拡大し、クワドヘリックスのアームは、ほとんど弾性変形せずに、歯を目標の位置まで移動させた。その際、大臼歯は歯体移動し、犬歯と小臼歯は傾斜移動し、また、犬歯と側切歯の間に空隙が生じながら拡大していた。

大臼歯は、クワドヘリックスに固定され回転が拘束される。クワドヘリックス装着時において頬側傾斜を防ぐモーメントの大きさは頬側方向の力の10倍程度であり、このような十分なモーメント・力(M/F)比が生じたため、歯体移動したと考えられた。一方、クワドヘリックスにより大臼歯を歯体移動させるために、リングトルクを与えることが提案されている¹¹⁾。今回のシミュレーションでは大臼歯は歯体移動したためその必要はなかったが、大臼歯が平行に拡大されるようにアームを活性化するためには、活性化した状態のSTロックの固定ピンがそれを挿入する大臼歯バンドのチューブと平行になっている必要がある。これは、クワドヘリックスの作製時と装着時において注意すべきことだと考えられる。

犬歯と小臼歯では、歯根中央のやや根尖方向の部位を中心にして頬側傾斜した。犬歯と小臼歯は、クワドヘリックスに固定されずアームと接触するだけであり、回転を拘束するようなモーメントが作用しないため、傾斜移動が生じたと考えられた。なお、クワドヘリックスによる歯の移動状態を矯正歯科臨床において測定した篠田らは¹²⁾、小臼歯の根尖が舌側へ移動し、歯冠が頬側へ移動し、また、大臼歯は根尖と歯冠が頬側へ移動したことを報告しており、これらの移動状態は、今回のシミュレーション結果とおおむね一致していた。しかし、大臼歯の根尖の移動量は歯冠の移動量の約1/2であり、大臼歯の頬側傾斜が認められているが、本研究のシミュレーション結果では大臼歯がほとんど傾斜せずに頬側へ歯体移動していた。これらの相違については、今後、検討する必要がある。

また、大臼歯はやや遠心傾斜し、これは平行に活性化した場合よりも扇状に活性化した場合のほうが顕著に認められた。大臼歯が遠心傾斜する原因は、歯列の拡大に伴って犬歯が頬側傾斜すると、咬頭舌側面の傾斜が緩やかになり、クワドヘリックスのアーム近心端が犬歯の尖頭へ向かって滑るため、結果的に大臼歯を遠心傾斜させる力が作用するためだと考えられた。クワドヘリックスを平行よりも扇状に活性化したほうが犬歯の頬側傾斜移動が大きいことから、扇状に活性化した場合に大臼歯の遠心傾斜が大きいことが示唆された。

クワドヘリックスを片側のみ非対称に活性化させた場合には、活性化時の力系から歯列の移動状態を予測することは難しいといわれている。結果より、片側を平行および扇状に活性化したどちらの場合でも、大臼歯の作用する力は左右で非対称となったが、大臼歯は両側ともに近遠心方向にはほとんど移動しなかった。また、片側に平行もしくは扇状に活性化した場合、頬側への拡大量に違いはあるものの、活性化側だけでなく反対側の歯列も拡大されており、犬歯の移動量は活性化側よりも小さかったが、大臼歯の移動量は活性化側と反対側は同程度であった。これらの結果から、クワドヘリックスの片側の活性化による非対称の歯の移動状態を、今回のシミュレーションによってはじめて明らかにすることができた。

II. クワドヘリックスの活性化量

クワドヘリックスが弾性領域にある場合、装着直後の力は活性化量にほぼ比例する。本研究では、両側で 3.8mm の対称平行拡大の場合、クワドヘリックスを活性化して装着した直後に生じる応力の大きさは 400 MPa 程度であった。一方、ステンレス鋼の降伏応力は、約 1500 MPa である¹⁰⁾。したがって、両側で 3.8mm の対称平行拡大の活性化量ではクワドヘリックスは弾性領域にあり、拡大量を 2 倍にしたとしてもクワドヘリックスは弾性領域内にある。この場合、装着直後の力が 2 倍になるが、 M/F 比は変わらないので、歯の移動状態は変化しない。クワドヘリックスの材質を変えた場合、ヤング率の変化に応じて、力と変形の比例定数、すなわちクワドヘリックスの剛性 (ばね定数) が変わることになる。しかし、 M/F 比は変化しないため、異なる材質のクワドヘリックスでも歯の移動状態は変化しないと考えられる。なお、クワドヘリックスが弾性領域にある場合は、複数の活性化状態を重ね合わせることが可能である。たとえば、対称平行拡大と対称扇状拡大を同時に行う場合、歯に作用する力と移動状態は、図 7 と

図 8 を合算したものであると考えられた。

Ⅲ. シミュレーション方法

今回のシミュレーションで用いられた方法とその適用限界について考察する。今回のシミュレーション方法の特徴は、初期動揺と同じ方向に歯が移動すると仮定し、この移動を繰り返し (N=1000) 計算する度に力系が計算し直され、それに基づいて歯の移動を予測していくことである^{8,9)}。最近では、同じ方法によって、クラウンループの歯からの離脱¹³⁾、アンカースクリューを用いたスライディングメカニクス¹⁴⁾、マウスピース型矯正装置における歯の移動¹⁵⁾がシミュレーションされている。本研究では、クワドヘリックスによる経時的な歯の移動状態を、同様の方法によるシミュレーションによって初めて明らかにした。なお、このシミュレーション方法では、繰り返し計算ごとに、初期動揺の分、歯が移動していくが、それに要する実際の時間は分かっていない。そのため、繰り返し計算の回数 N を実際の時間に換算することはできなかった。

われわれは、歯の初期動揺を計算する際、歯根膜を線形弾性体と仮定した。しかし、実際の歯根膜は非線形弾性体である。過去の文献では、歯根膜を非線形弾性体とした場合と線形弾性体と仮定した場合には、歯の移動のシミュレーションに大きな違いはないと報告されている⁸⁾。また、歯根膜を非線形弾性体として歯の初期動揺を計算した報告では、歯根膜が線形弾性体の場合と比べて、歯根膜の応力分布は変化するが、歯の移動を示す回転中心の位置はほとんど変化しないといわれている¹⁶⁾。本研究の目的は、歯の移動状態をシミュレーションすることであったため、歯根膜を線形弾性体と仮定した。また、歯根膜を線形弾性体としたことにより、歯根膜で支持された歯を一つの要素で置き換えることができ計算時間をかなり短縮できることも、今回のシミュレーションには歯根膜を線形弾性体とした要因の一つであった。

このシミュレーションでは、歯槽骨を剛体と仮定しそれを有限要素法モデルに含めなかった。顎骨のヤング率 (約 15 GPa) は、歯根膜のヤング率 (0.13 MPa) に比べて非常に大きく、歯槽骨の変形は、歯根膜に比べて無視できる程度の変形量であった。したがって、歯槽骨を有限要素法モデルに加えてシミュレーションを行っても歯の移動結果に影響を及ぼさないことから、計算時間の短縮のために今回は歯槽骨を有限要素法モデルから排除した。なお、クワドヘリックスと歯冠の間の摩擦を考慮し、摩擦係数を 0.15 にした。摩擦係数の実測結果が不明で

あったため、矯正用ワイヤーとブラケットの摩擦係数¹⁷⁾を用いた。さらに、摩擦係数を変えてシミュレーションを行ったところ、歯の移動状態が変わることはなかったことから、摩擦は、歯の移動に対してほとんど影響しないと考えられる。

有限要素法モデルによるシミュレーションは、クワドヘリックスによる経時的な歯の移動状態が予測でき、また、活性化の違いによる歯の移動を明らかにしたことから、矯正歯科臨床に有効であることが示唆された。

結 論

有限要素法を用いて、クワドヘリックスによる歯の移動状態を力学的にシミュレーションしたところ、すべてのシミュレーションにおいて、クワドヘリックスを活性化させたときの形状に応じて歯列は平行および扇状に拡大され、大白歯はほぼ歯体移動し、犬歯と小臼歯は傾斜移動した。また、クワドヘリックスの片側だけを広げて平行もしくは扇状に活性化させた場合、活性側の犬歯と小臼歯の拡大量は対側と比較して大きかったが、大白歯は両側ともに同じ程度拡大した。

本研究の要旨は、第 77 回日本矯正歯科学会(2018 年 10 月、横浜)においてポスター発表した。

謝辞：有限要素法の計算にご協力いただいた元名古屋工業大学小島之夫先生ならび愛知学院大学福井壽男先生に対して深く感謝いたします。

著者全員利益相反なし。

文 献

- 1) プロフィット・ウイリアム R. プロフィットの現代歯科矯正学(作田 守監修,高田健治訳). 第1版.東京:クインテッセンス出版,1989:439-441.
- 2) 赤木秀瑛, 大村周平, 田井規能.第II章 2 クワドヘリックス, 関崎和夫, 里見優編著,町田幸雄 (監修). これでわかる! 各種矯正装置の特徴と使い方 顎顔面歯列の成長発育を利用した咬合誘導.東京:ヒョーロン・パブリッシャーズ,2017:46-53.
- 3) Honme Y, Motoyoshi M, Shinohara A, *et al.* Efficient palatal expansion with a quadohelix appliance: an invitro study using an experimental dental arch model. *Eur J Orthod* 2012;34:442-446.
- 4) 鴨頭和利, 秦 俊二, 市川和弘.Quad・helix 装置による顔面頭蓋の変形様相 – ストレンゲージ法による –.日矯歯誌 1983;42:442-453.
- 5) Jones SP, Waters NE. The quadhelix maxillary expansion appliance: Part II: Clinical characteristics. *Eur J Orthod* 1989;11:195-199.
- 6) Santos RL, Pithon MM. Mechanical evaluation of quad-helix appliance made of low-nickel stainless steel wire. *Dental Press J Orthod* 2013;35:35-38.
- 7) 増田 豊, 野坂糧史.舌側弧線装置の製作法.東京:医歯薬出版,1978:7-8.
- 8) Kojima Y, Fukui H. Numerical simulation of canine retraction with T-loop spring based on the updated moment-to-force ratio. *Eur J Orthod* 2012;34:10-18.
- 9) 河村 純, 小島之夫, 福井壽男.T 形スプリングを用いた歯列の一括移動におけるループ位置,トランスパラタルアーチ,臼歯列の歯数の影響 – 有限要素法による解析 –.日歯理工誌 2013;32:293-299.
- 10) Krishnan V, Kumar KJ. Mechanical properties and surface characteristics of three archwire alloys. *Angle Orthod* 2004;74:825-831.
- 11) 末石研二,海老原 環.第7章 第一大臼歯の遠心移動,側方移動,クワドヘリックス Quad helix appliance,バイヘリックス Bi-helix appliance.東京歯科大学歯科矯正学教室編集,山口秀晴監修.知ってほしい歯科矯正治療の基本.東京:わかば出版,2007:162-167.
- 12) 篠田充巨, 横田順子, 八木教之, 高橋雅一, 武内豊.上顎側方拡大装置の作用機序についての研究.北海矯正誌 1985;13:1-9.

- 13) 横井由紀子, 山木貴子, 江花照夫, 他. クラウンループの先端形状と離脱との関係ー有限要素法シミュレーションによる考察ー. 小児歯誌 2017;55:451-457.
- 14) Kawamura J, Tamaya N. A finite element analysis of the effects of archwire size on orthodontic tooth movement in extraction space closure with miniscrew sliding mechanics. Progress in Orthod 2019;20:1-6, doi.org/10.1186/s40510-018-0255-8.
- 15) Yokoi Y, Arai A, Kawamura J, et al. Effects of attachment of plastic aligner in closing of diastema of maxillary dentition by finite element method. J Healthcare Engineering 2019, 2019, Article ID 1075097:1-6, doi.org/10.1155/2019/1075097.
- 16) Toms SR, Eberhardt AW. A nonlinear finite element analysis of the periodontal ligament under orthodontic tooth loading. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2003 Jun;123(6):657-665.
- 17) Kusy RP, Whitley JQ, Prewitt MJ. Comparison of the frictional coefficients for selected archwire-bracket combinations in the dry and wet states. Angle Orthod 1991;61:293-302.

図表のタイトル説明文

図 1 上顎歯列に装着したクワドヘリックス（両側を平行に活性化した場合）

図 2 有限要素法モデル

図 3 歯の移動をシミュレーションする繰返し計算の方法

図 4 両側を平行に活性化した場合のクワドヘリックス装着直後の曲げ応力

図 5 両側を平行に活性化した場合の歯の移動状態と歯根膜の応力分布

図 6 舌側から見た歯の移動状態（両側を扇状に活性化した場合）

図 7 両側を平行に活性化（両側合計 3.8mm 拡大）した場合の歯の移動状態。
（数値は活性時における装着直後の歯に作用する力（赤矢印）とモーメント（青矢印）および繰返し計算における経時的な歯の移動量（黒矢印間））

図 8 両側を扇状に活性化（両側合計 5.8mm 拡大）した場合の歯の移動状態。
（数値は活性時における装着直後の歯に作用する力（赤矢印）とモーメント（青矢印）および繰返し計算における経時的な歯の移動量（黒矢印間））

図 9 片側を平行に活性化（片側 3.0mm 拡大）した場合の歯の移動状態。
（数値は活性時における装着直後の歯に作用する力（赤矢印）とモーメント（青矢印）および繰返し計算における経時的な歯の移動量（黒矢印間））

図 10 片側を扇状に活性化（片側 4.4mm 拡大）した場合の歯の移動状態。
（数値は活性時における装着直後の歯に作用する力（赤矢印）とモーメント（青矢印）および繰返し計算における経時的な歯の移動量（黒矢印間））

表 1 繰返し計算（ $N=1000$ ）における経時的な歯の傾斜移動量

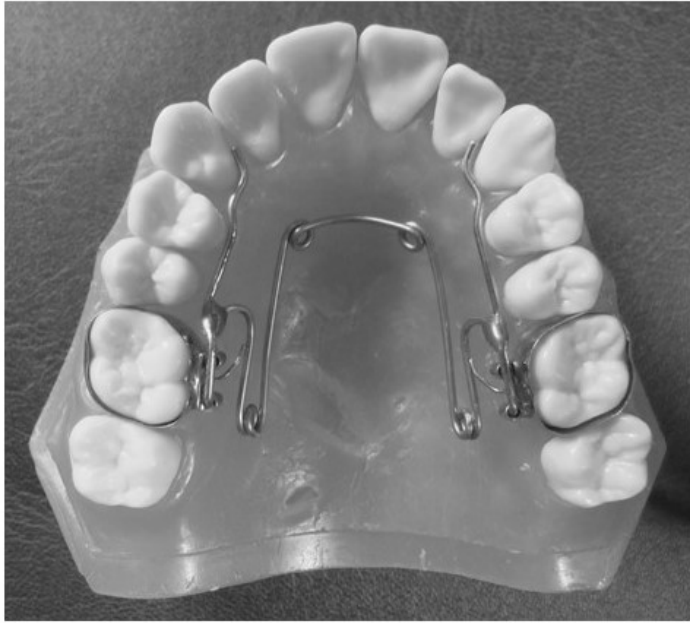


図1 上顎歯列に装着したクワドヘリックス

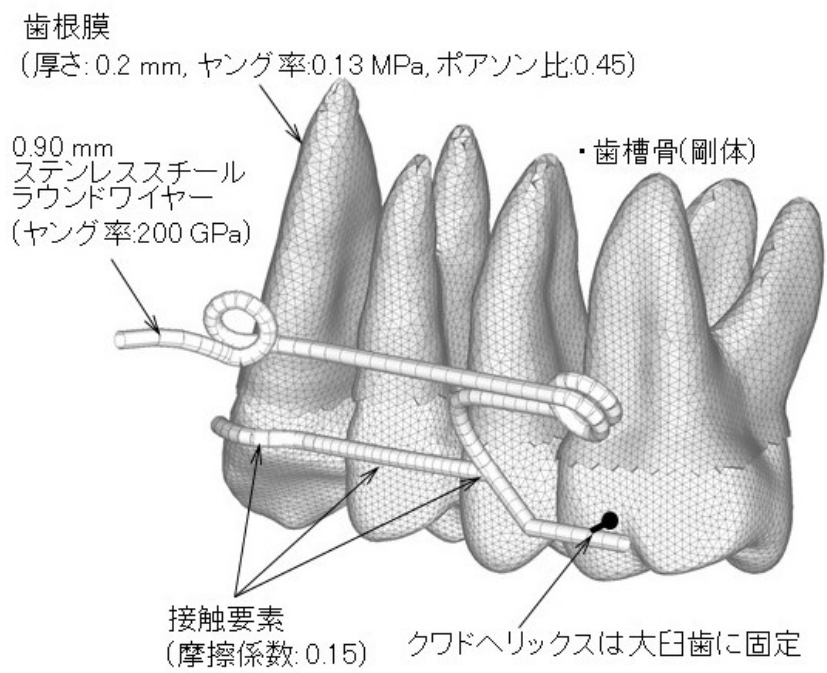


図2 有限要素法モデル

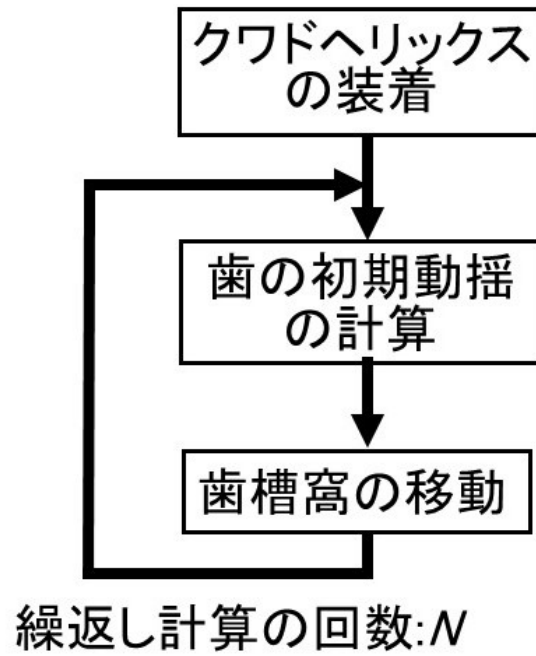


図3 歯の移動をシミュレーションする繰返し計算の方法

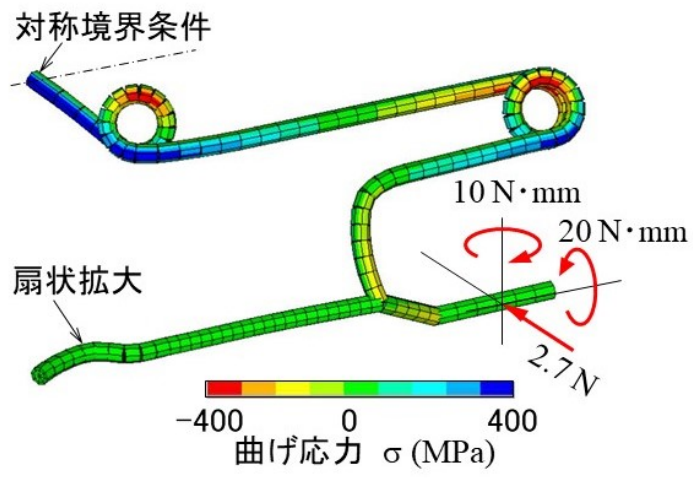


図4 両側を平行に活性化した場合のクワドヘリックス装着直後の曲げ応力

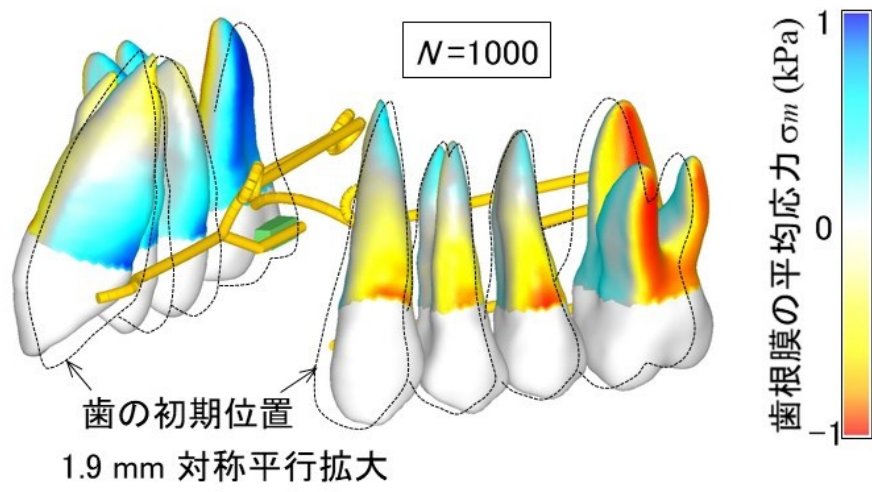


図5 両側を平行に活性化した場合の歯の移動状態と歯根膜の応力分布

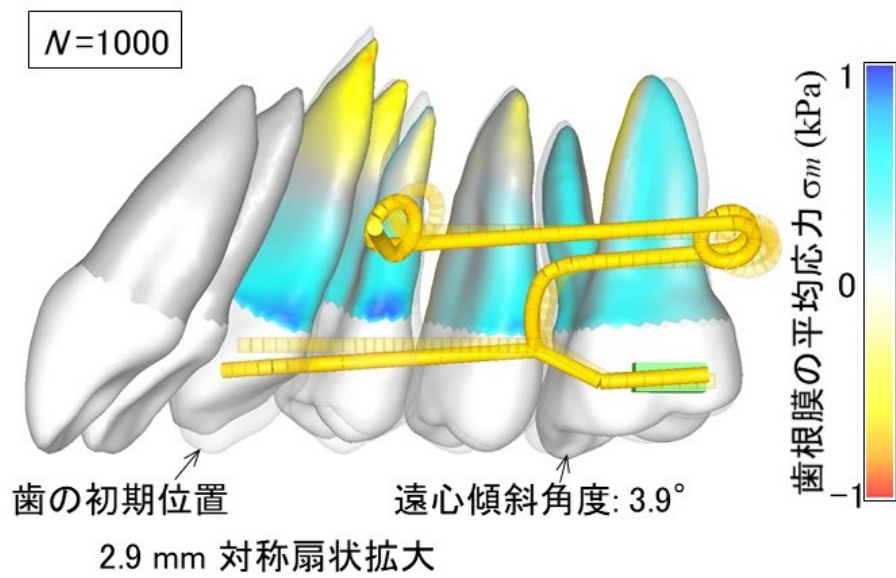


図6 舌側から見た歯の移動状態（両側を扇状に活性化した場合）

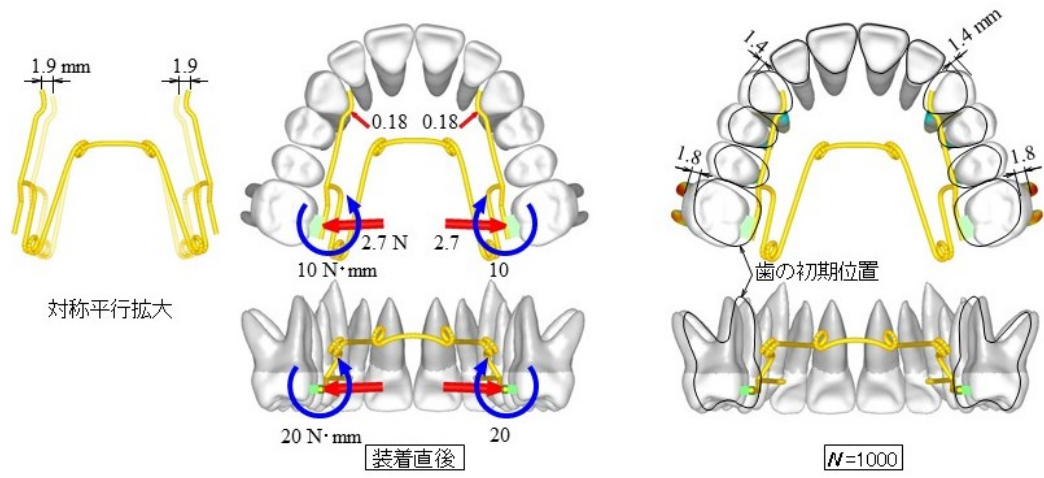


図7 両側を平行に活性化（両側合計 3.8mm 拡大）した場合の歯の移動状態

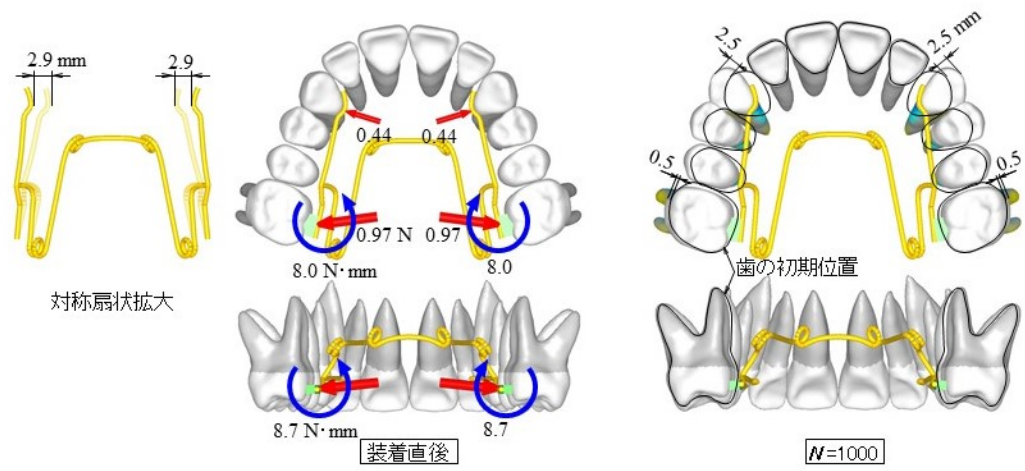


図8 両側を扇状に活性化（両側合計 5.8mm 拡大）した場合の歯の移動状態

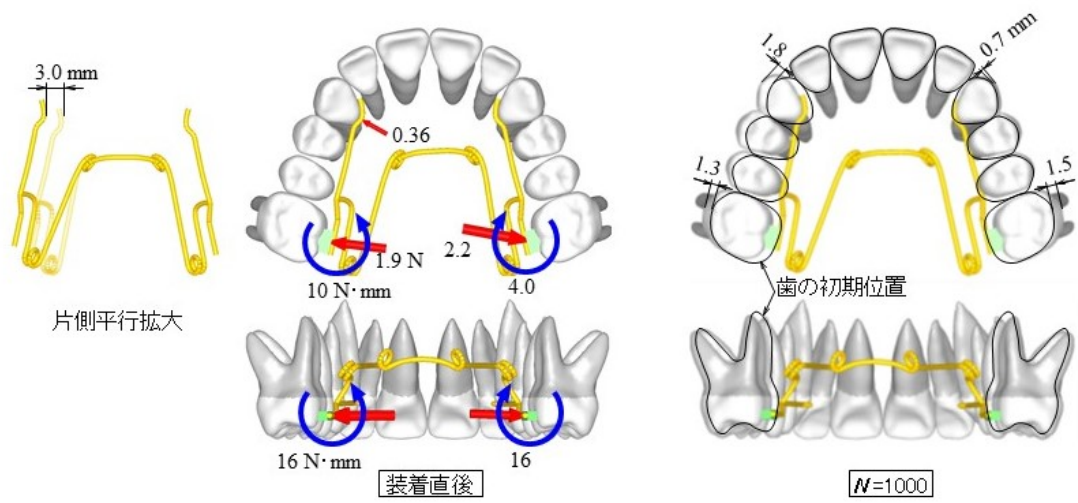


図9 片側を平行に活性化（片側3.0mm拡大）した場合の歯の移動状態

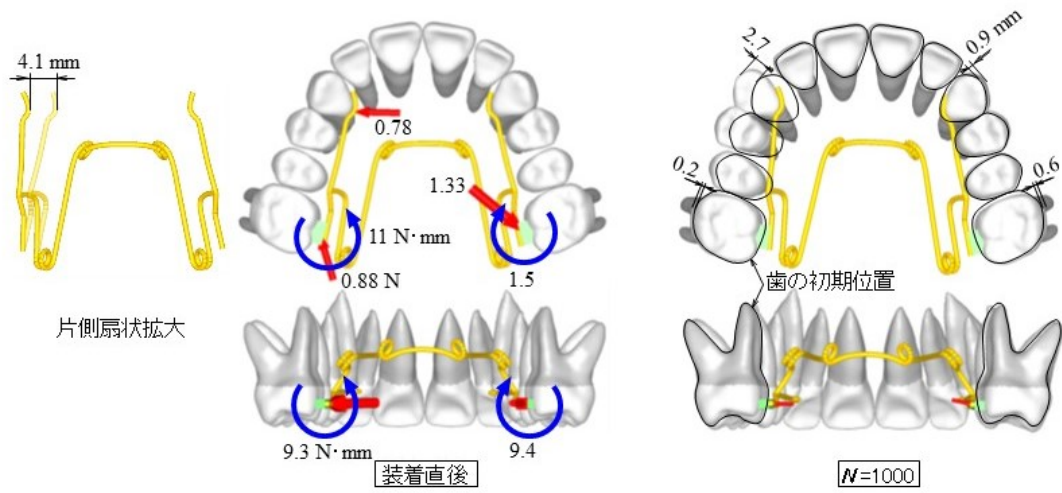


図 1 0 片側を扇状に活性化（片側4.4mm拡大）した場合の歯の移動状態

表 繰返し計算 (N=1000) における経時的な歯の傾斜移動量

活性化の種類	頬側傾斜角度(度)								遠心傾斜角度(度)	
	犬歯		第一小臼歯		第二小臼歯		第一大臼歯		第一大臼歯	
	右側	左側	右側	左側	右側	左側	右側	左側	右側	左側
両側を平行に活性化	8.0		9.2		8.1		-0.2		1.0	
両側を扇状に活性化	12.6		12.7		6.0		-1.7		3.9	
片側(右側)を平行に活性化	9.0	3.8	9.2	3.1	6.3	2.2	-0.6	-0.1	1.1	1.0
片側(右側)を扇状に活性化	13.4	4.7	12.6	3.8	4.8	0	-1.8	-0.7	3.3	3.2

負(-)は舌側傾斜を表す。