

〔学位論文要旨〕 松本歯学 47 : 136~138, 2021

クワドヘリックスにおける歯の移動メカニクス —有限要素法シミュレーション—

江花 照夫

松本歯科大学 大学院歯学独立研究科 硬組織疾患制御再建学講座
(主指導教員：岡藤 範正 教授)

松本歯科大学大学院歯学独立研究科博士（歯学）学位申請論文

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

TERUO EBANA

*Department of Hard Tissue Research, Graduate School of Oral Medicine,
Matsumoto Dental University
(Chief Academic Advisor : Professor Norimasa Okafuji)*

The thesis submitted to the Graduate School of Oral Medicine,
Matsumoto Dental University, for the degree Ph.D. (in Dentistry)

【目的】

矯正治療に昔から多く使われているクワドヘリックスは上顎歯列弓の拡大みならず，正中口蓋縫合の拡大も行えると考えられている。今回の研究では，有限要素法を用いてクワドヘリックス装置の作用により歯の移動する過程をシミュレーションし側方拡大の様子を力学的側面から検討した。

【材料と方法】

クワドヘリックスを上顎歯列に装着した場合，歯の移動を有限要素法によってシミュレーションした。シミュレーションには，クワドヘリックスと歯列を使い，クワドヘリックスは，断面直径が0.9mmのステンレス鋼製ラウンドワイヤーで作製し，4つのヘリックスの外径は3.7mmとした。歯列モデルは，歯科実習用模型（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ロックで固定した。

クワドヘリックスと歯の有限要素法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，歯列モデルを歯科用CBCT（Alphard，朝日レントゲン工業株式会社，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，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。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200GPa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として接触要素を設定した。

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と片側のみに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。尚、繰返し計算ごとに歯に作用する力系を更新した。

【結果】

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は、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、10N・mmと20N・mmであった。大白歯には、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）の半分以下によりクワドヘリックスが弾性範囲にあることが確認できた。今回計算した他の条件においても降伏応力の半分以下であった。

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、大白歯は頬側方向に歯体移動した。犬歯と小白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。これは、繰返し計算の回数が少ない場合や他の活性化条件でも歯の移動中も同じであった。

$N=1000$ で繰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し、大白歯では、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、犬歯と小白歯では頬側傾斜角度が 10° 程度であり、大白歯と比較して傾斜移動量が大きい。

大白歯は、4種類全ての活性化において遠心へ 3.9° 傾斜した。両側を平行に活性化した場合は平行に両側を扇形に活性化した場合も歯列は扇状に拡大した。どちらの場合も大白歯は、ほぼ歯体移動し、犬歯と小白歯は歯冠が頬側に傾斜移動した。

【考察】

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、大白歯は歯体移動し、犬歯と小白歯は傾斜移動し、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。

また、今回の研究で大白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方が顕著に認められた。大白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、結果的に大白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白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、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、大白歯の作用する力は左右で非対称となったが、大白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

はあるが、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、大白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。