

クラウンループの先端形状と離脱との関係

——有限要素法シミュレーションによる考察——

横井 由紀子¹⁾ 山木 貴子²⁾ 江花 照夫³⁾
河村 純⁴⁾ 岡藤 範正³⁾ 大須賀 直人¹⁾

要旨：下顎第一乳臼歯が早期に喪失した場合、保険のためにクラウンループが適用されることが多い。ループの先端の形状により、ループが歯肉に食い込むこと、歯から離脱することが報告されている。本研究の目的は、有限要素法を用いたシミュレーションから、異なるループ先端形状（3つの形状、W形状、I形状、U形状）のクラウンループが歯およびクラウンループの動きに及ぼす影響をシミュレートすることであった。

計算方法は以下の通りである：近心方向の力を第二乳臼歯に適用した場合および、近心方向と同時に舌側方向に力を加えた場合、歯とクラウンループの移動について有限要素法を用いてシミュレーションした。

その結果、以下の結論を得た。

1. クラウンループに近心方向の力が負荷されると、第二乳臼歯は近心傾斜する。その結果、クラウンループ先端は歯頸に向かって沈下した。その沈下量は、W形、I形、U形の順に増加した。
2. クラウンループに近心方向と同時に舌側方向に力を負荷すると、U形では、ループ先端が沈下するとともに、舌側方向へ移動した。その結果、ループ先端は乳犬歯から離脱した。
3. W形ループの場合、ループ先端の舌側移動は極めて小さく、乳犬歯からの離脱を防止できることが判明した。

Key words：保険装置、クラウンループ、有限要素法

緒言

小児歯科臨床では、乳歯列期および混合歯列期において乳歯または永久歯が早期に喪失した場合、永久歯の萌出スペースを保持し空隙閉鎖のために発生する不正咬合を防止するために、保険装置が用いられる。

保険装置のなかで、クラウンループは一般に乳臼歯が片側性に1歯早期喪失し、その両側に歯が存在する場合に用いられる標準的装置である^{1,2)}。支台歯に適合させ

た既製乳歯冠にループ状に曲げたワイヤーを鑲着する単純な保険装置であり、製作が容易であることからその使用頻度は高い³⁻⁵⁾。

クラウンループでは、ループ先端が固定されていないため、ループの歯肉への食い込み、先端の乳犬歯からの離脱などの問題が生じる^{2,4)}。クラウンループが離脱すると保険機能が損なわれるため、それを防止することは重要である。クラウンループの離脱は、その形態によるといわれておりループの先端がI形やU形の場合には離脱しやすく、先端をW形にすることによって離脱が防止できると報告されている^{1,2)}。

本研究では、有限要素法⁶⁾を用いて、クラウンループが歯から離脱する過程をシミュレーションし、臨床経験に基づいて推奨されているクラウンループの先端形状が離脱や歯肉への食い込みに与える影響を、力学的な側面から検討した。

方 法

有限要素法モデルを図1に、用いた材料定数を表1に示す。下顎左側第一乳臼歯が喪失した場合を想定し、乳

¹⁾松本歯科大学小児歯科学講座
長野県塩尻市広丘郷原 1780
(主任：大須賀直人教授)

²⁾清水歯科医院
長野県松本市寿豊丘 1180-7
(院長：清水由美)

³⁾松本歯科大学大学院硬組織疾患制御再建学講座
長野県塩尻市広丘郷原 1780
(主任：岡藤範正教授)

⁴⁾河村歯科医院
岐阜県岐阜市早田栄町 4 丁目 21
(院長：河村訓隆)
(2017 年 8 月 14 日 受付)
(2017 年 9 月 22 日 受理)

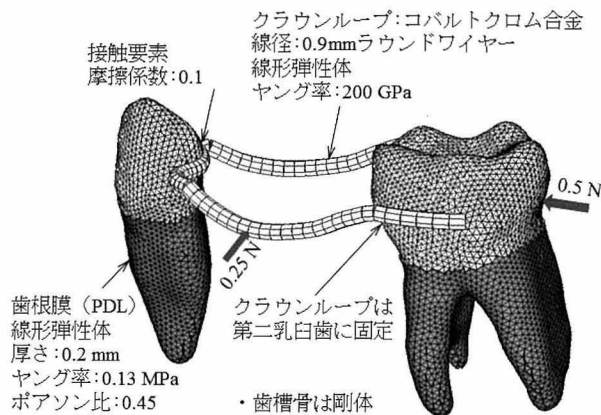


図1 歯とクラウンループの有限要素モデル

表1 計算で使用了材料定数

材料	ヤング率	ポアソン比
歯根膜	0.13 MPa	0.45
クラウンループ	200 GPa	0.3

犬歯および第二乳臼歯とそれに固定されたクラウンループをモデル化した。

患者説明用の乳歯列模型 (i 31D-400D, ニッシン) を歯科用 cone-beam computer tomography (CBCT) (Alphard, 朝日レントゲン) で撮影した。3次元モデル作成ソフトウェア (3D-Doctor, Able Software) と要素分割ソフトウェア (ICEM CFD Ansys Inc.) を用い有限要素法モデルを作成した。歯は剛体と仮定し、歯の表面だけをシェル要素で分割を行い、節点を剛体化した。

歯根には、厚さが 0.2 mm (一定) の歯根膜を付けた。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、ヤング率を 0.13 MPa、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固定し、歯の移動に伴って移動した。歯肉は考慮しなかった⁷⁾。この場合、クラウンループは、歯だけで支持される。

クラウンループは、断面直径 0.9 mm のコバルトクロム合金のラウンドワイヤーで、弾性体と仮定し、ヤング率を 200 GPa、ポアソン比を 0.3 とした。クラウンループは、3次元ビーム要素で分割した。クラウンループの先端形状は、W 形、I 形、U 形の 3 種類にした¹⁾。クラウンループは、第二乳臼歯に完全に固定されているとした。乳犬歯の歯冠表面とクラウンループには、摩擦係数を 0.1 として接触要素を設定した。

まず、第二乳臼歯の歯冠遠心面に、大きさ 0.5 N の近

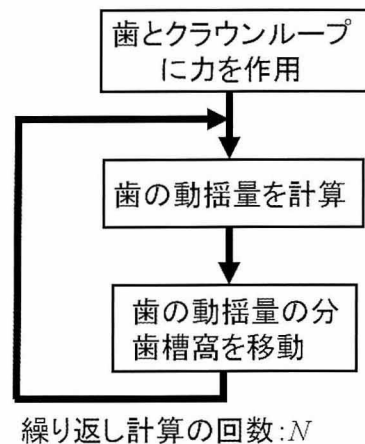


図2 歯の移動のシミュレーション手順

心方向の力を加えた場合を計算した。次に、第二乳臼歯に 0.5 N の近心方向の力とクラウンループに 0.25 N の舌側方向の力を同時に加えた場合を計算した。

力によって生じる乳犬歯と乳臼歯の移動は、歯科矯正移動 (Orthodontic tooth movement) のシミュレーションに用いられている方法⁸⁾と同じ方法を用いて計算した。手順を図2に示す。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 (Initial tooth movement) と同じであると仮定した。はじめに、歯とクラウンループに力を加え、その時の歯の動揺量を計算する。次に、動揺量の分歯槽窩を移動する。この計算を繰り返すと歯が移動していく。繰り返しごとに、歯に作用する力とモーメントが更新される。繰り返し計算の回数 N は、経過時間に相当する。ただし、回数 N を実際の時間に換算することはできない。

この計算において、歯根膜で支持された歯は、サブストラクチャーとしてばね要素で置き換えた。この方法によって、歯と歯根膜の有限要素法モデルは必要なくなった。歯の移動は、ばね要素、クラウンループの有限要素法モデル、それに接触する乳犬歯の歯冠の有限要素法モデルだけを用いて計算することができた。計算には、有限要素法ソフトウェア ANSYS 16 (Ansys Inc.) を用いた。

結 果

歯とクラウンループの移動量は、繰り返し計算の回数 N に伴って増加した。U 形は、 $N=80$ 以上になると、先端が乳犬歯の歯頸より下に移動して計算が続行できなくなった。したがって、 $N=80$ まで計算を行いその時点の移動状態を示した。

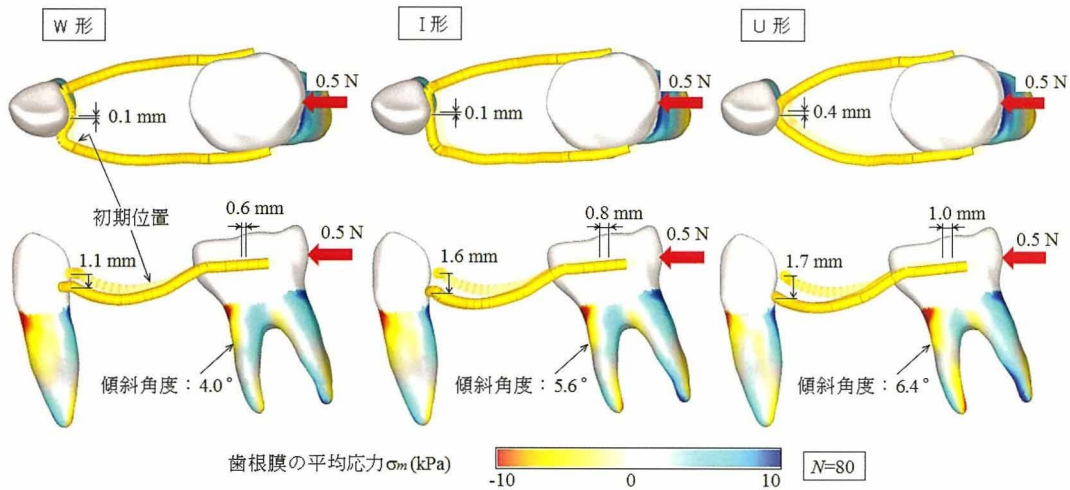


図3 近心方向に力を作用させた時の歯とクラウンループの移動状態

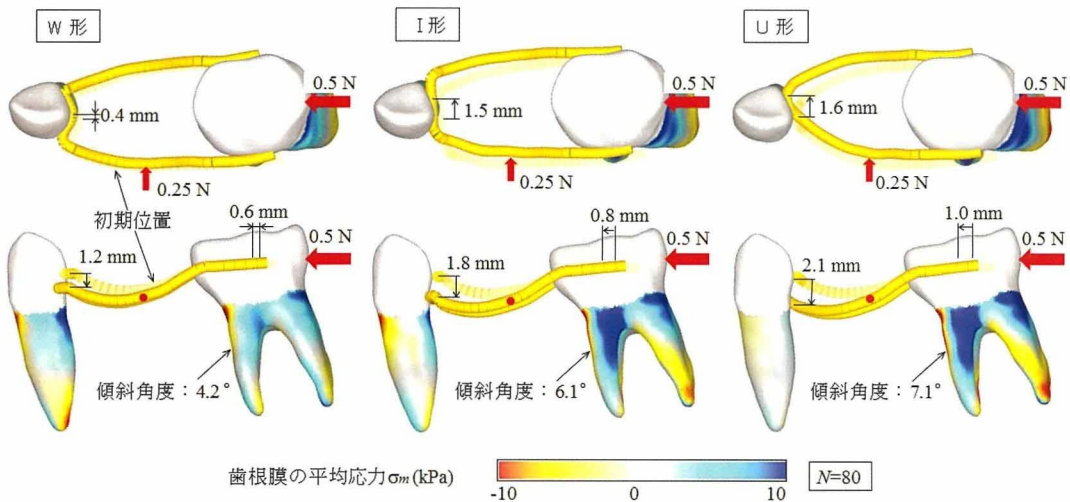


図4 近心方向および舌側方向に力を作用させた時の歯とクラウンループの移動状態

図3は、乳臼歯の近心方向に0.5 Nの力を加えた場合の歯とクラウンループの移動状態である。歯とクラウンループの最初の位置を図中の薄色で示した。すべてのクラウンループで、乳臼歯は、近心へ傾斜した。それに伴って、先端が歯頸に向かって沈下した。乳臼歯の傾斜角度と先端の沈下量は、W形、I形、U形の順に増加した。W形とI形は、先端が舌側方向へほとんど移動しなかった。U形では、先端がわずかに頬側へ移動した。

図3において、歯根膜の平均応力を色の分布で示した。赤が圧縮応力であり、青が引張応力である。乳犬歯と第二乳臼歯の歯根近心面では、歯頸付近が圧縮応力となり、歯根付近では引張応力となった。この応力分布は、両方の歯が近心傾斜したことを示す。

図4は、0.5 Nの近心方向の力と同時に、0.25 Nの舌側方向の力が作用した場合である。W形は、舌側方向の力がない場合に比べて、移動量の増加がわずかであった。I形とU形では、先端が舌側方向へ移動した。それに伴って、乳臼歯が歯軸回りに回転して、乳臼歯遠心根の根尖付近に圧縮応力が生じた。U形は、先端のほとんどの領域が乳犬歯の遠心面から離脱した。第二乳臼歯の遠心移動量と傾斜角度が大きくなった。離脱に伴い、乳犬歯に加わる力が減少し、歯根膜の応力が小さくなった。

なお、ここに計算結果は示さないが、近心方向に加える力をより大きくした場合、クラウンループと歯の移動量は、力に比例して増加したが、移動状態は同じであっ

た。クラウンループと歯冠の摩擦については、摩擦がない場合と摩擦係数が0.2の場合も計算したが、移動状態に変化は見られなかった。

考 察

先端形状の影響

近心方向の力が作用した場合、乳臼歯が近心へ傾斜して、クラウンループの先端が歯頸へ向かって沈下した。沈下量は、W形では最も小さく、I形とU形ではほぼ同じであった。U形では、歯肉に接触した場合、接触圧力が大きくなり、歯肉によりくい込みやすくなることが考えられる。したがって、W形、I形、U形の順に歯肉へくい込みやすくなるといえる。

このように近心方向の力だけが加わった場合には、いずれの形態においても先端は沈下したが、頬舌方向への移動は小さく、先端が乳犬歯から離脱することはなかった。一方、クラウンループに近心方向と同時に舌側方向への力を加わると、いずれの形態においても舌側方向への移動が生じた。この結果から、ループに頬舌方向の力が作用した場合にはループ先端が離脱しやすい傾向が観察された。特にU形の場合、乳犬歯の遠心面歯肉へ沈下するとともに、舌側方向へ滑って移動し乳犬歯から離脱した。I形は、離脱までには至らなかったが、舌側方向へ移動した。W形では、先端の舌側移動は非常に小さく、離脱しなかった。

図3および図4からわかるように、力が直接作用した乳臼歯だけでなく、乳犬歯の歯根にも応力が生じた。クラウンループを介して乳犬歯に力が作用したためである。この力によって保隙が行われた。この力すなわち乳犬歯の歯根応力が減少するほど、クラウンループが離脱しやすくなり、保隙機能が失われた。この傾向は、図4を見るとよくわかる。先端がW形、I形、U形の順に、乳犬歯の歯根応力が減少した。その結果、乳臼歯の近心傾斜が増加して、先端の沈下量が増加した。一方、乳臼歯では、乳犬歯に力が作用した分、歯根に加わる力が減少し、応力もやや減少した。

これまで、クラウンループを臨床で使用した場合、生じる不快事項や実態調査は多く報告されている^{4,9-14)}。ループの離脱と歯肉へのくい込みも、不快事項の1つである。そこでは、第一大臼歯が萌出を開始して、第二乳臼歯に強い近心方向の力が加わると、ループの先端が乳犬歯遠心面から外れ、沈下して歯肉にくい込むことがあるとされている。この現象は、今回のシミュレーションの結果と一致する。すなわち、臨床時のクラウンループの離脱過程が有限要素法によって再現できたといえる。

また、今回のシミュレーションによって、クラウンループの先端は、U形、I形よりも、W形は、離脱しにくく、歯肉へくい込みにくいことがわかった。これは、従来から推奨されている設計指針^{1,2,15-17)}と同じである。これまで、不快事項の発現を防止するためには、ループの先端は軽く乳犬歯を抱くように面接触させるのがよいとされている⁴⁾。したがって、これまでのクラウンループの設計指針に対して、力学的な根拠を与えることができた。

今回の結果で示されたように、クラウンループが機能する限り、必ず乳犬歯と乳臼歯に力が作用する。歯に影響を与えないで、保隙することは力学的に不可能である。臨床治療においては、離脱しにくさと歯に与える影響の両方を勘案して、適切なクラウンループを選択することが必要である。

計算条件について

今回のシミュレーションでは、第二乳臼歯に近心方向の力とクラウンループに舌側方向の力が作用すると仮定した。これは、以下の理由による。第一乳臼歯が喪失すると、第二乳臼歯の近心傾斜が生じる。第一乳臼歯から作用していた力がなくなるためである。第二乳臼歯には、近心方向の力が作用しており、その力によって第二乳臼歯が近心傾斜したと考えられる。あるいは、第一大臼歯の萌出過程で、第二乳臼歯に近心方向の力が加わることも考えられる⁴⁾。したがって、第二乳臼歯の歯冠遠心面に近心方向の力を加えた場合を計算した。一方、クラウンループは、頬の内側から舌側方向の力を受けることも考えられる。そのような力は、ループ先端を乳犬歯から離脱させる誘因になることを想定して、第二乳臼歯に近心方向の力を加えると同時にクラウンループに舌側方向の力を加えた。

第二乳臼歯とクラウンループに作用する力の大きさは、それらの実測値が検索できなかったので、歯科矯正で用いられている弱い力(Light force)に相当する0.5 Nと0.25 Nとした。実際の臨床時において、これらより大きい力や小さい力が作用していることは十分予想される。そこで、有限要素法シミュレーションにおける力の大きさの影響について以下に検討する。このシミュレーション方法では、1回の繰返し計算で生じる歯の移動量は力の大きさに比例する。舌側方向の力と近心方向の力を同じ比率で変えた場合、移動量は変化するが、それらの比すなわち移動方向は変化しない。そのため、クラウンループ先端の離脱状態に変化が生じない。今回のU形、I形、W形の順に離脱しにくいという結果は、力の大きさによらず成立する。

なお、近心方向の力に対して舌側方向の力が大きくなった場合には、離脱過程がより顕著に現れることが予想される。頬側方向の力が作用する場合には、クラウンループの先端が頬側方向へ移動し、U形のクラウンループでは、先端が頬側へ離脱することが予想される。

クラウンループと乳犬歯の摩擦係数は0.1としたが、これも実測値ではない。摩擦係数を0.2に変えてシミュレーションを行い、その影響も確認した。この程度の摩擦は、クラウンループの移動に対してほとんど影響しないことが確認できた。

クラウンループから作用する力によって、乳犬歯も近心へ移動した。実際の歯列において、乳側切歯がある場合には、乳犬歯の近心移動が拘束されることが考えられる。

今回の有限要素法モデルでは、クラウンループと歯肉の接触は考慮できなかった。これは、歯肉の力学的特性が実測されておらず、モデル化できないためである。歯肉によって、クラウンループの舌側方向への移動が拘束されるような場合では、離脱しにくくなることが予想される。たとえば、クラウンループの頬側と舌側が歯肉の両側を挟むような形状になっている場合³⁾、クラウンループの舌側方向への移動が拘束される。歯肉を考慮したシミュレーションは、今後の課題と考えている。

なお、今回の研究では、クラウンループの離脱過程を明らかにすることを主な目的として、先端形状の影響だけについて検討した。しかし、先端から乳臼歯の固定部までの形態も離脱に影響することが予想されることから、さらなる検討が必要である。

さらに、歯には咬合力も作用する。咬合力は、今回の計算で用いた力に比べてかなり大きい、持続して作用する力ではない。歯科矯正時の歯の移動では、このような一時的な力は、歯の経時的な移動の主な原因にはならないとされている。クラウンループを装着した歯に咬合力のような大きな力が作用する場合については、別に検討する必要がある。なおこの場合には、今回のシミュレーションで用いた歯根膜が線形弾性体であるという仮定は成立しない。

歯の移動シミュレーションの検討

本研究における歯の移動のシミュレーションで、用いた仮定のうち、重要なものについて検討する。

歯に力が作用すると、歯根膜が弾性変形して、歯が動揺する。これが歯の初期動揺である。力が持続して作用すると、歯槽骨が添加・吸収して歯が移動する。これが矯正移動である。今回のシミュレーションでは、初期動揺と同じ方向に矯正移動すると仮定した。この仮定は、

臨床時の経験と矛盾しない。たとえば、歯に力だけを加えると、歯は傾斜し回転する。力と同時にモーメントを加えると、歯が平行に移動する。これらの移動状態は、初期動揺でも矯正移動でも同じである。また、矯正移動の移動状態は、初期動揺の移動状態から予測できるという動物実験もある¹⁸⁾。

歯の移動量は、歯根膜を線形弾性体と仮定して計算された。しかし、実際の歯根膜は、非線形弾性体であることはよく知られている。歯根膜を線形弾性体として計算した歯根膜の応力は、非線形弾性の場合とは異なっている。しかし、このようなシミュレーションにおいて、歯の移動状態は、歯根膜が線形弾性体でも非線形弾性体の場合でも、あまり違いがないことが確認されている¹⁹⁾。

歯と歯槽骨のヤング率は10 GPa以上であり、歯根膜のヤング率(0.13 MPa)に比べて非常に大きい。この場合、歯と歯槽骨の変形は歯根膜の変形に比べて非常に小さくなる²⁰⁾。そのため、歯と歯槽骨を剛体と仮定した。

結 論

乳臼歯に近心方向の力が作用した場合、歯とクラウンループの移動を有限要素法によってシミュレーションし、次の結果が得られた。

1. 近心方向の力が加わると、乳臼歯が近心傾斜して、クラウンループの先端は、歯頸へ向かって沈下した。この傾向は、先端がW形、I形、U形の順に大きくなった。
2. 近心方向の力と同時に、舌側方向の力がクラウンループに作用すると、U形では、先端が舌側へ移動して、乳犬歯から離脱した。
3. W形では、沈下および先端の舌側移動が起らず、乳犬歯からの離脱を防ぐことができる形態である。

本研究では、クラウンループ先端の離脱について検討したが、クラウンループの選択に当たっては、クラウンループが歯に与える影響など他の要素も考慮して決める必要がある。

文末ではありますが、本研究に多大なご指導ならびにご協力をいただきました元名古屋工業大学准教授小島之夫先生、元愛知学院大学歯学部教授福井壽男先生に感謝の意を表します。

本文に関する著者の利益相反：なし

文 献

- 1) 町田幸雄：クラウンループの保隙装置の臨床、歯界展望, 54: 549-565, 1979.

- 2) 町田幸雄：クラウンループ保隙装置の作り方, DENT DIAMOND*79, 1: 86, 1979.
- 3) 毛利元治, 池田孝雄, 大森郁朗：本学小児歯科外来における半固定保隙装置装着例についての実態調査, 小児歯誌, 14: 205-213, 1976.
- 4) 真柳秀昭：少数歯早期喪失に対する保隙, 歯ジャーナル, 1: 459-468, 1980.
- 5) 太田増美：保隙装置（特に保険適応になったクラウンループ）の使い方, 日歯評, 増刊, 2015: 65, 2015.
- 6) 嘉藤幹夫, 永井利明, 稗田豊治：有限要素法による保隙装置の応力解析－とくに, クラウンディスタルシュエについて－, 小児歯誌, 30: 956-963, 1992.
- 7) 河村 純, 小島之夫, 福井壽男：数値シミュレーションを用いた矯正用スプリングの性能評価, 日歯理工誌, 31: 251-257, 2012.
- 8) 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, 白歯列の歯数の影響－有限要素法による解析－, 日歯理工誌, 32: 293-299, 2013.
- 9) 齋藤 峻, 新里正武, 青山庸子, 真柳秀昭, 五十嵐公英, 南雲雅子, 神山紀久男：クラウン・ループ保隙装置装着の実態について, 小児歯誌, 14: 257, 1976 (抄).
- 10) 吉田定宏, 田村康夫：保隙装置の問題点, 歯ジャーナル, 11: 485-496, 1980.
- 11) 柳原正恵, 梅澤理絵子, 鎌田未幾, 酒井睦子, 山田かしは, 山下 登, 井上美津子, 佐々竜二：本学小児歯科外来における保隙装置についての実態調査, 昭和歯誌, 17: 34-40, 1997.
- 12) 町田幸雄：永久歯口腔内萌出まで観察した固定制保隙装置, 小児歯誌, 42: 206, 2004 (抄).
- 13) I. S. Sasa, A. A. Hasan, M. A. Qudeimat: Longevity of Band and Loop Space Maintainers: Using Glass Ionomer Cement: A Prospective Study, Eur Arch Paediatr Dent. 10: 6-10, 2009.
- 14) M. A. Oudeimat, I. S. Sasa: Clinical success and longevity of band and loop compared to crown and loop space maintainers, Eur Arch Paediatr Dent. 16: 391-396, 2015.
- 15) 細矢由美子：下顎第一乳臼歯抜歯後における思想部の形態変化と成長発育について, 歯科学報, 76: 1771-1807, 1976.
- 16) Proffit WR: Contemporary Orthodontics, C. V. Mosby Co., St. Louis, 1986, pp 418-420.
- 17) 町田幸雄：乳歯抜歯後における歯槽部の成長発育とその臨床応用, 小児歯誌, 27: 587-594, 1989.
- 18) Soenen PL, Dermaut LR, Verbeeck RM: Initial tooth displacement in vivo as a predictor of long-term displacement, Europ J Orthod, 21: 405-411, 1999.
- 19) Kojima Y, Fukui H: Numerical simulation of canine retraction with T-loop spring based on the updated moment-to-force ratio, Europ J Orthod, 34: 10-18, 2012.
- 20) 小島之夫, 高野 信, 福井壽男, 水谷紀輔, 長谷川二郎：初期動揺時における歯根膜応力の簡単な計算法, 日歯理工誌, 18: 210-216, 1999.

Relationship Between Crown Loop Shape and Detachment using Simulation with Finite Element Method

Yukiko Yokoi¹⁾, Takako Yamaki²⁾, Teruo Ebana³⁾, Jun Kawamura⁴⁾
Norimasa Okafuji³⁾ and Naoto Osuga¹⁾

¹⁾*Department of Pediatric Dentistry, Matsumoto Dental University School of Dentistry*

²⁾*Shimizu Dental Clinic*

³⁾*Department of Hard Tissue Research, Matsumoto Dental University Graduate School
of Oral Medicine*

⁴⁾*Kawamura Dental Clinic*

(Director : Prof. Naoto Osuga)

When the mandibular first milk molar teeth are lost at an early stage, crown loops are often applied for space maintenance. However, depending on the shape of the tip of the crown loop, it has been reported to cut into the gingiva or detach from the tooth in some cases. In the present study, we simulated the influence of crown loops on tooth and crown loop movement using a finite element method for simulation with 3 different loop tip shapes (W-, I-, U-shape). The experimental methods were as follows. When force was applied to the second milk molar teeth in a mesial direction, another force was simultaneously applied in a lingual direction with the crown loop. The following results were obtained.

1. When a force in a mesial direction was applied to the crown loop, the second milk molar teeth inclined in a mesial direction. As a result, the tip of the crown loop was distracted towards the distal cervical gingiva. The amount of distraction was increased in the order of W-, I-, and U-shape.
2. When a force was applied to the crown loop in a lingual direction simultaneously with that in a mesial direction, the tip of the loop sank and moved in a lingual manner in the U-shape group. As a result, the tip of the loop became detached from the milk canine tooth.
3. With the same forces were applied as in section 2 above to the W-shaped loop, lingual movement was extremely limited and it was possible to prevent detachment from the milk canine tooth.

Key words : Space maintenance, Crown loop, Finite element method