

## 学位論文の内容の要旨

論文提出者氏名	豊嶋 悠輔
論文審査担当者	主査 宇尾 基弘 副査 山下 仁大, 塩田 真
論文題目	Load Limit of Mini-Implants with Reduced Abutment Height Based on Fatigue Fracture Resistance: Experimental and Finite Element Study
<p>&lt;緒言&gt;</p> <p>直径 3 mm 以下のいわゆるミニインプラントは、比較的骨吸収が進んだ症例での適用が可能であり、外科的侵襲を低減できるとされている。しかし、インプラント径が疲労強度に大きく影響することは実証されている一方で、義歯に使用したミニインプラントの生存率に関する研究の多くは 1 年前後の短期予後であり、それ以上の長期的な予後報告は見られない。このため、ミニインプラントの長期的な経過における破折に対する安全性は確立していないのが実情である。一方、オーバードンチャーのためのミニインプラントであればアバットメントを低く設定することが可能であり、これによって疲労強度の向上が図れる可能性がある。ミニインプラントの疲労強度は今日まで報告されておらず、特にアバットメントの高径との関連から疲労強度を検討した試みは見られない。本研究の目的は、歯科用ミニインプラントの疲労強度を実験的に評価し、有限要素モデルによる応力解析をあわせて行うことにより、荷重量の限界値について明らかにすることである。</p> <p>&lt;方法&gt;</p> <p>直径が 1.8mm の市販ミニインプラント (c18, MDI, 3M 社製) と、同径でアバットメント部を低くした実験用ミニインプラント (e18) を用いた。両者とも素材は Ti-6Al-4V であり、カラー部からボールアタッチメント中央までの距離は c18 が 5.50 mm であり、e18 は 4.75 mm とした。最初に、それぞれ 5 本の試験片について大気圧下で曲げ試験を行った。曲げ試験はスレッド部を 1.5 mm 露出するように金属筒にレジンを流し込んでインプラントを埋入、固定した。埋入材表面よりボールアタッチメント中央までの距離は c18 が 7.00 mm、e18 が 6.25 mm であった。金属筒を油圧圧縮機に固定し、荷重方向をインプラント長軸に対して垂直に設定し、ボール部中央に対してクロスヘッドスピード 1mm/min で荷重を負荷し、弾性限の荷重量を測定した。</p> <p>疲労試験は ISO14801 を基に実施した。両者ともスレッド部を 3 mm 露出させ、レジンを固定材として用いてスチール製容器に埋入した。それぞれのインプラントに金属半球キャップを被覆し、レジン表面から荷重点までの距離を両者とも 11 mm に設定した。試験片はインプラントの長軸に対して垂直方向から 30 度傾けて、15Hz の正弦周期にて垂直に繰り返し荷重を行った。最初の荷重量は 110N と設定し、<math>5 \times 10^6</math> 回サイクルを終えるか、破折が見られた時点で試験を終了とした。両者とも 5 本の試験片を供し、荷重量は 10 N ずつ増加した。1 本以上の破折を確認した荷重量で終了とし、5 本とも正常であった荷重量で最大の値を疲労限界荷重量とした。</p> <p>次に、両インプラントの三次元有限要素モデルを顕微鏡写真の三次元計測値をもとに構築した。スレッド部の螺旋形態はピッチと幅を忠実に再現した後、鋭縁部を調整し曲げ試験と疲労試験における固定・荷重条件を再現するモデルを製作した。材料定数(ヤング率/ポアソン比)は、インプラント体は 117GPa/0.33、固定用金属装置ならびに半球キャップは 200GPa/0.3、レジンは 15GPa/0.3 とした。すべての材料は等方性線形弾性物質で完全接着とし、メッシュサイズは収束試験から決定し、最小メッシュ径 0.1 mm で要素分割した。曲げ試験モデルは金属外面を固定し、弾性限における荷重量を付与し第一主応力を算出、また疲労試験モデルでは金属底面を固定し、破折が生じなかった最大の荷重量を付与し最大相当応力値 (<math>\sigma_f</math>) を算出した。さらに、e18 の径を 2.1 mm、2.4 mm に変化させたモデルを c18 と e18 に加え、これらを下顎骨に埋入したモデルを製作した。骨モデルは海綿骨周囲の皮質骨の厚みを 2 mm とし、鋭縁部の影響を避けるために骨面を平面とした。インプラントの垂直的位置関係は、4つの骨レベルを想定した。予備解析の結果、骨質がインプラント体のストレスにほとんど影響しなかったため、皮質骨と海綿骨は等方性線形弾性体と想定し、材料定数をそれぞれ 18.6GPa/0.33、10.4GPa/0.33 で一定とした。</p>	

骨モデルを用いたシミュレーションでは骨下部 1/3 の外面を固定し、荷重位置をボール部頂上とし、インプラント長軸に対して 60°傾け、頬側から舌側方向に向けて 100 N の荷重を付与した。ストレス分布は頬側面中央部を垂直的に表示し、最大相当応力 ( $\sigma_{100}$ ) を求め、予測限界荷重量 ( $F_{limit}$ ) を下記計算式を用いて算出した。

$$F_{limit} = 100 * \sigma_f / \sigma_{100}$$

#### <結果>

c18 と e18 の弾性限における荷重量の平均はそれぞれ 57.3±11.1 N, 71.2±6.5 N であった。曲げ試験を再現した有限要素解析にて算出された主応力の平均はそれぞれ、1339 MPa(最小 1081 MPa, 最大 1609 MPa), 1352 MPa (最小 1232 MPa, 最大 1480 MPa) となった。疲労試験では 150N 荷重でそれぞれ破折がみられたため、両者とも限界荷重量は 140N と判定された。最大相当応力はスレッド頸部付近に集中し、最大値は 140 N 荷重時 c18, e18 それぞれで 1387 MPa, 1376 MPa であった。骨埋入モデルのうち、インプラントテーパ部およびスレッド上縁レベルまで骨に埋入されたモデルでは、高いストレス領域はスレッド最上位部を含む比較的大きな面積に分布する結果となった一方、骨縁が低下してスレッド部が露出したモデルでは、高いストレス領域がスレッド部に集中した。限界荷重量はインプラント径が大きくなるほど増大し、また骨レベルが減少するにつれて減少した。c18 に対する e18 の限界荷重量は、スレッドが骨から 1.0 mm 露出したレベルで 113%、テーパ部まで骨に埋入されたレベルで 156%となった。

#### <考察>

e18 は c18 と比較し、曲げ試験における降伏点の荷重量は平均して高い値であった。これは e18 の着力点が低かったことによる一方、最大応力値は両者で同等であった。この結果は、両者とも同じチタン合金で強度も同等であることから理にかなっている。また、この最大応力値はチタン合金の耐力とほぼ一致していることから、本研究のモデルによる算出応力値の妥当性が確認された。

曲げ試験を再現したモデルから算出された最大相当応力は、Ti-6Al-4V 合金の降伏強さとされている 900 MPa から 1200 MPa よりもやや高い値を示した。この理由として、破折の開始点は必ずしも最大応力の部位ではなく、それに近い表面欠陥がある部位から起こったことが考えられる。一方、疲労破折は一回で破折する荷重よりも低い荷重で起こると考えるのが一般的であるが、本研究の最大応力値は曲げ試験と疲労試験で大きな違いがなかった。この理由として、初期の繰り返し荷重によって残留応力が発生してクラック部の引っ張り応力が緩和された可能性が挙げられる。これに加えてひずみ硬化が生じたことにより、降伏に対する抵抗が高まったと考えられる。しかし、力学モデルでは実験で疲労限界を示した荷重量を一回の荷重と想定して最大応力を算出しており、残留応力については計算上考慮していないため、金属の耐力に近い高い応力が算出されたと考えられる。いずれにしても、本研究では最大応力値を各種モデルの疲労限界を予測するための相対的な参照値として用いており、上記の傾向は研究の結果に重大な影響を及ぼさないと判断された。

骨埋入モデルにおいてアバットメントの高さ、スレッド露出、インプラント径はそれぞれ予測限界荷重量に明確な影響を示した。いずれの骨レベルにおいても予測限界荷重量の値は、e18 は c18 と比較して約 1.5 倍となったが、これはアバットメントの高さの違いによるものと考えられる。本研究の結果から疲労強度を考慮すると、より低いアンカーシステムの設計の有意性が示唆された。またインプラント径が増大することで予測限界荷重量の値が増大したことは、通常径のインプラントの疲労試験を行った先行研究の結果とも一致し、改めてインプラント径が疲労強度に大きく影響することが確認された。さらにスレッドが骨外に露出する場合は応力の集中がスレッド部だけに見られる結果となったことから、埋入時の骨レベルが疲労強度に対しても影響することが明確となった。この結果から、インプラント埋入後の周囲歯槽骨吸収により潜在的に破折のリスクが大きくなることが予測された。今後、長期的な臨床予後の結果と併せ、歯科用ミニインプラントの適切な選択と埋入方法を確立しなければならない。

#### <結論>

疲労試験と力学モデルによる数値解析を行うことにより、オーバーデンチャー用ミニインプラントの限界荷重量が予測された。アバットメント高径が市販のミニインプラントよりも 0.75 mm 低く設定されることにより限界荷重量は高く、骨レベルが最も高いときにおいて 156%であった。限界荷重量はインプラント径の増加で上昇、骨レベルの低下により減少し、スレッドが骨から 1.0 mm 露出した場合の限界荷重量は、骨レベルが最も高いときの約 34%であった。

## 論文審査の要旨および担当者

報告番号	甲第 4795 号	豊嶋 悠輔
論文審査担当者	主査 宇尾 基弘 副査 山下 仁大, 塩田 真	
<p>(論文審査の要旨)</p> <p>直径 3 mm 以下のいわゆるミニインプラントは、主に下顎前歯部の単独補綴やオーバーデンチャーの支台として使用されている。1つの大きな利点として比較的骨吸収が進んだ症例での適用が可能であり、外科的侵襲を低減できることが挙げられる。ミニインプラントはその直径が通常径のインプラントと比較して顕著に細いため、当初から破折が懸案事項とされてきた。ミニインプラントについての先行研究ではそのほとんどが3年程度の短期臨床予後の報告であり、長期使用に関する報告が少ないだけでなく、ミニインプラントの疲労強度については疲労試験の結果も含め報告されていない。また、オーバーデンチャーの支台として考えた際に、アタッチメントの高径は非常に重要な事案であるが、ミニインプラントにおけるアバットメントの高径と疲労強度の関係についての報告も存在していない。さらに埋入後の骨吸収によるスレッドの露出と疲労強度の関係についても検討されていない。アバットメント部の高径を低くすることで骨へのストレスの軽減が期待できるだけでなく、義歯内面のレジンの厚みをとることができるため、その影響を明らかにすることは臨床上極めて重要であるといえる。</p> <p>豊嶋は、これまで報告されていないミニインプラントの疲労強度を明らかにし、さらに疲労破壊を招く応力値を有限要素モデルから推定し、実験を行っていない新デザインのミニインプラントの疲労強度を予測するという新しい手法を試みた。すなわち、今回の研究では力学試験を行って得られた結果と、同等の有限要素モデルを作製したうえで代入して得られた応力値を基準と定義することで、さまざまな条件を変化させて口腔内環境下での荷重を想定し、疲労強度と限界荷重量の予測を試みている。実験とモデル解析を組み合わせ、さらにシミュレーションを行うという新規性のある手法を用いている。</p> <p>本研究ではアバットメントの高径が疲労強度に及ぼす影響と、インプラントの幅径ならびに骨レベルが荷重量に及ぼす影響を予測することを目的としている。そのため、直径が 1.8mm の市販ミニインプラント(以下 c18)と、同じチタン合金で作製されアバットメント部を 0.75mm 低く設定した実験用ミニインプラント(以下 e18)を比較して力学試験ならびに有限要素解析を行った。</p> <p>実験は、1) 曲げ試験と同有限要素解析、2) 疲労試験と同有限要素解析、3) 骨モデルを用いてのシミュレーション解析の順に行った。</p> <p>曲げ試験の結果と、同等の有限要素モデルの解析結果から、今回作製したミニインプラントのモデルの妥当性を確認し以降の解析を行っている。疲労試験は ISO14801 に基づいている。通常径のインプラントの先行研究においてもこの基準を用いており、適切な評価方法である。</p> <p>骨モデルにおけるシミュレーション解析は、疲労試験の結果を基準として解析を行っているが、今回の方法の新規性は、力学試験で実際に行っていないモデルや種々の条件を変化させても、同様に疲労強度について予測できることである。以上からの点からも、本研究は得られた結果に対する検討も適切に行われ、十分な情報と知識を背景に、周到な準備のもと計画、遂行されたことが窺われる。</p> <p>本研究で得られた主な結果は以下の通りである。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 曲げ試験の結果から力学モデルから算出される最大応力の精度が妥当であることが示された。</li> <li>2. アンカーの高さを低下させると疲労強度は増大した。</li> <li>3. スレッドが露出しない骨レベルでは広い範囲に応力分布を認めたが、スレッドが露出するレベルにおいては、主にスレッドのネック部に高い応力の集中がみられた。</li> </ol>		

4. スレッドが骨から 1.0 mm 露出した場合の限界荷重量は、テーパ部まで骨に埋入された場合の約 34%であった。

疲労強度を考慮すると、より低いアンカーシステムの設計の有意性が示唆された。またインプラント径が大きいと予測限界荷重量の値が増大したことは、通常径のインプラントの疲労試験を行った先行研究の結果とも一致し、改めてインプラント径が疲労強度に大きく影響することが確認された。さらにスレッドが骨外に露出する場合は応力の集中がスレッド部だけに見られる結果となったことから、埋入時の骨レベルが疲労強度に対しても影響することが明確となった。これらの結果は、単に支持点—作用点間距離の関係式だけからでは求めることができない。

本研究において 1 つの予測算出法を提言したことは、さまざまな材質や形状のインプラントに対して即座に疲労強度と、骨質などのシミュレーションを併用した荷重限界量が予測できるという意味で、臨床的意義が大きい。

また今後、長期的な臨床予後の結果と併せ、歯科用ミニインプラントの適切な選択と補綴方法の確立につながると提言している。本研究は綿密な研究計画をもとに実施され、適切な解析により妥当性の高い結果を導いており、研究計画から考察に至るまで高く評価できる。

以上の成果は今後の歯科医学の発展に寄与するところが大きく、よって、本論文は博士（歯学）の学位を申請するに十分値するものと認められた。