

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 7 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24792155

研究課題名(和文)新規歯科矯正用マイクロインプラントシステムの開発

研究課題名(英文)Development of new orthodontic micro implant system

研究代表者

谷本 安浩(Tanimoto, Yasuhiro)

日本大学・松戸歯学部・准教授

研究者番号：40312045

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は新規な歯科矯正アンカースクリューシステムを開発することであった。まず引抜試験および数値解析の両面からアンカースクリューシステムの破壊メカニズムを明らかにした。またアンカースクリューへの応用を目的としたポリ乳酸(PGA)/ハイドロキシアパタイト(HA)コンポジット体の機械的および生物学的性質の評価を行った。さらにはPGA/HAコンポジット製アンカースクリューの有限要素法を用いた最適構造設計を行った。結果として、PGA/HAコンポジットを用いた新規アンカースクリューシステムの有用性が示された。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to develop a new anchor-screw system for orthodontics. Firstly, the failure mechanism of anchor-screw was clarified by both pull-out experiment and numerical simulation. Next, the mechanical and biological properties of polyglycolic acid (PGA)/hydroxyapatite (HA) composites for anchor-screw application were investigated. In addition to these, the optimum structure design of anchor-screw made from PGA/HA composite was performed by using finite element method. In conclusion, it was indicated that the PGA/HA composite is a promising material for an anchor-screw system.

研究分野：歯科生体材料学

キーワード：アンカースクリュー 歯科矯正 生体吸収性材料 リン酸カルシウム 有限要素法

1. 研究開始当初の背景

チタン製アンカースクリューを用いた歯科矯正治療では、従来の矯正装置のみを使用した矯正治療と比較して、アンカースクリューを様々な位置に埋入することにより、より自由な方向に歯を移動することが可能となった(図1)。しかし歯槽骨へのアンカースクリューの保持はネジの機械的嵌合力のみに頼っているため、治療中に脱落することがあり、その場合は再度アンカースクリューを埋入する処置が必要となる。また矯正治療終了後にはアンカースクリューを歯槽骨から撤去する必要があり、患者への侵襲が存在する。そこで本研究では、アンカースクリュー材料として従来用いられているチタンの代わりにポリグリコール酸(PGA)などの生体吸収性材料とハイドロキシアパタイト(HA)などリン酸カルシウム系材料のコンポジット体をアンカースクリューに適用することを考えた。すなわち優れた骨適合性を有するとともに骨からのアンカースクリュー撤去を不必要とする、患者に低侵襲な新規歯科用アンカースクリューシステムを考案した。

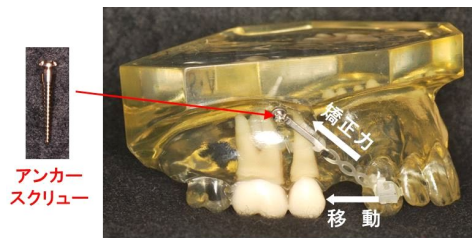


図1 歯科矯正用アンカースクリュー

2. 研究の目的

本研究では、PGAなどの生体吸収性材料と骨伝導性に優れるHAなどのリン酸カルシウム系材料とのコンポジット材料をアンカースクリューへ適用することが目的であった。具体的にはまずアンカースクリューの脱離メカニズムを明らかにした上で、PGA/HAコンポジットを作製し、そのキャラクターゼーションを行う。さらに有限要素法(FEM)を用いた数値解析によりアンカースクリューの最適構造設計を行うことで、PGA/HAコンポジット製アンカースクリューシステムの有用性を明らかにすることが目的であった。

3. 研究の方法

(1) アンカースクリューの脱離メカニズムの解明

従来のチタン製アンカースクリューの脱離メカニズムを明らかにするため、アンカースクリュー/周囲骨モデルを作製し、実験および解析の両面から検討を行った。

引抜試験

模擬骨に埋入したアンカースクリューの側方に一定期間矯正力を負荷後、アンカースクリューを垂直に引抜く際の最大荷重を計測することでアンカースクリューの脱離の原因となる緩みの評価を行った(図2)。

実験に使用した力学的試験用模擬骨はポリウレタンフォーム製であり、皮質骨用シート(40×40×1 mm)と海綿骨用ブロック(40×40×20 mm)を強力両面テープにより接合することで顎骨モデルとした。次にトルクドライバーを用いて、5 Ncmのトルクでアンカースクリューを骨モデルに埋入した。アンカースクリュー/骨モデルをバイスにて固定し、矯正力を想定してアンカースクリュー上部におもり(200、400、600 g)を一週間吊るして側方荷重を負荷した。おもりを外した後、アンカースクリューの垂直方向への引抜試験を行い、最大引抜荷重を測定した(n=3)。

FEMを用いた数値解析

前述の引抜試験と同様の条件でアンカースクリューと骨からなる三次元数値解析モデルを作製した(図3)。作製したモデルを用いて汎用有限要素解析ソフトにより数値解析を行った。表1に解析に使用した材料定数を示す。骨モデルの側面を完全固定し、アンカースクリュー上部に矯正力として、100、200、300、400、500、600 gfの荷重を負荷した。各矯正力を負荷した際に発生したアンカースクリューおよび顎骨モデル内のvon-Mises応力の最大値をそれぞれ算出した。

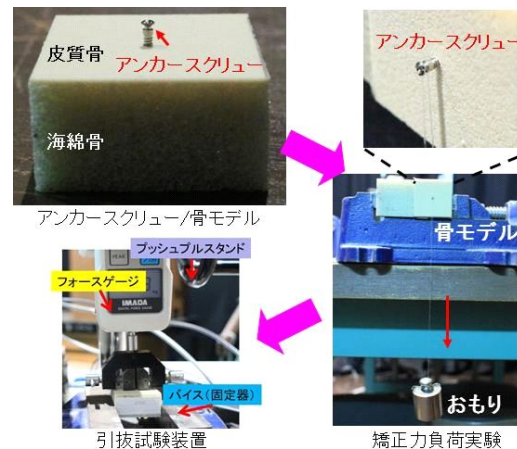


図2 実験モデルと引抜試験の概要

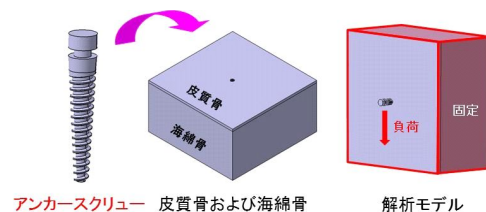


図3 数値解析モデル

表1 解析に使用した材料定数

Material properties	Anchor screw (Titanium)	Cortical bone	Cancellous bone
Young's modulus (GPa)	110	14	0.3
Poisson's ratio (-)	0.3	0.3	0.3
Density (g/cm ³)	4.5	1.8	0.8

(2) アンカースクリューへの応用を目的とした PGA/HA コンポジット体の作製とそのキャラクターゼーション

本研究では、アンカースクリューへの応用を目的として、HA の配合量を変えた場合の PGA/HA コンポジット体を作製し、機械的および生物学的評価を行った。

PGA/HA コンポジット体の作製

PGA を基材として、HA をそれぞれ重量比で 0% (PGA100)、5% (PGA95/HA5)、10% (PGA90/HA10) 配合した、3 種類の PGA/HA コンポジット体を作製した。

PGA/HA コンポジット体の機械的評価

PGA/HA コンポジット体の曲げ特性を評価するために、JIS K7171 に準じて三点曲げ試験を行った。試験体 (85×12×1.8 mm) を三点曲げ治具 (支点間距離 50 mm) に設置し、インストロン万能試験を用いて負荷速度 1 mm/min で曲げ荷重を加えることで三点曲げ試験を行い、曲げ強度および曲げ弾性係数を測定した (n = 10)。

PGA/HA コンポジット体表面の微小特性を明らかにするために、試験体 (10×10×1.8 mm) の表面に Berkovich 圧子押し込み、負荷 - 除荷試験を行うことでダイナミック硬さおよび弾性係数の測定を行った。すなわちダイナミック超微小硬度計を用い、最大荷重 196.10 mN、負荷速度 13.32 mN/sec、荷重保持時間 15 秒の条件で行った (n = 5)。

PGA/HA コンポジット体の生物学的評価

PGA/HA コンポジット体の骨芽細胞の分化に及ぼす影響を明らかにするため、Osteocalcin と Collagen type 1 の遺伝子発現量の検討を行った。本研究ではマウス由来の骨芽細胞様細胞 (MC3T3-E1) を用いた。細胞の培養は、 α -MEM 中で、37 °C、5%CO₂ 条件下で行った。同細胞を 6 well dish に 1.2×10⁴ cell/well に調整・播種し、試験片を入れて、それぞれ 1、4、7、10 日間培養を行った。細胞のみ培養させたものを対照群 (コントロール) とした。その後 Real time PCR にて骨芽細胞分化の指標である Osteocalcin と Collagen type 1 の遺伝子発現量を評価した (n = 6)。

(3) PGA/HA コンポジット製アンカースクリューの最適構造設計

PGA/HA コンポジット材料を素材としたアンカースクリューの開発を目的として、PGA/HA コンポジット製アンカースクリューに関する最適構造設計を行った。アンカースクリュー/骨モデルについては、前述の数値解析モデルを用い、アンカースクリューにおけるテーパ角度とネジ間距離 (ピッチ) を変えた場合 (基準モデルのテーパ角度およびピッチはそれぞれ 3.33° および 0.5 mm) について、FEM を用いた構造解析を行った (図 4)。なお解析に使用した PGA/HA コンポジット (PGA95/HA5) の材料定数は、弾性係数 8.3 GPa、ポアソン比 0.35、密度 1.6 g/cm³ とした。また負荷荷重は 200 gf とした。

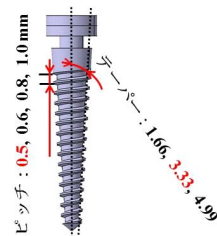


図 4 アンカースクリューの最適構造解析モデル

テーパ角度の影響

アンカースクリューのテーパ角度を基準モデル (3.33°) から 1/2 倍 (1.66°)、1.5 倍 (4.99°) に変化させた場合について、数値解析を行った。

ピッチの影響

アンカースクリューのピッチを基準モデル (0.5 mm) から 0.6、0.8、1.0 mm に変化させた場合について、数値解析を行った。

4. 研究成果

(1) アンカースクリューのバイオメカニクスに関する実験および解析結果

引抜試験により得られた最大引抜荷重と負荷した矯正力との関係を図 5 に示す。矯正力が大きくなるにつれて最大引抜荷重値は減少した。また引抜試験と同様の条件で行った数値解析により得られたアンカースクリューおよび骨内に発生した最大応力値と負荷した矯正力との関係を図 6 に示す。矯正力が大きくなるにつれてアンカースクリューおよび骨内に発生する最大応力値は大きくなる結果となった。またすべての矯正力においてアンカースクリューと皮質骨の接触箇

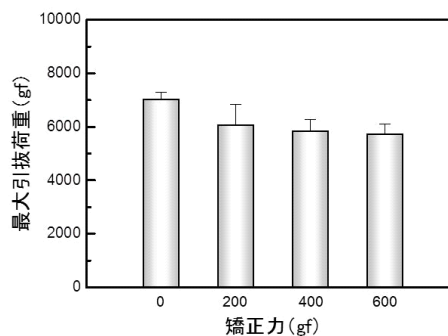


図 5 引抜試験の結果

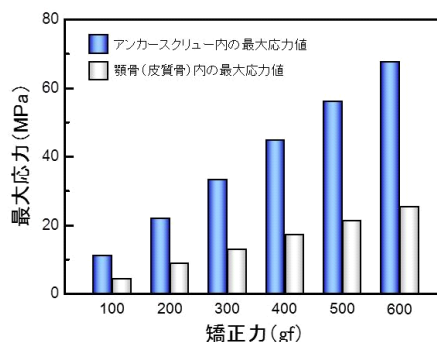


図 6 数値解析の結果

所に最大応力が発生することが確認できた。

以上の実験および解析の結果から、歯科矯正治療時にアンカースクリューに矯正力が負荷される際、矯正力の増加はアンカースクリューの動揺に繋がるということが分かった。またアンカースクリュー/皮質骨界面に応力集中が起こるため、皮質骨における固定度が重要であることが分かった。そのため矯正治療において、無理に強い矯正力を加えるとアンカースクリュー/皮質骨界面に応力集中が発生することで、アンカースクリューが緩み、顎骨からの脱離の原因となるものと考えられる。

(2) PGA/HA コンポジット体の機械的および生物学的性質

表2に三点曲げ試験の結果を示す。曲げ強度および曲げ弾性係数については、PGA95/HA5がPGA100にくらべて有意に高い値を示した($p < 0.05$)。表3にダイナミック硬さ試験により得られたダイナミック硬さおよび弾性係数の結果を示す。ダイナミック硬さおよび弾性係数についてはPGA95/HA5とPGA90/HA10はPGA100にくらべて有意に高い値を示した($p < 0.05$)。このことからHAの配合によりPGAの機械的強度は向上することが確認できた。さらにはPGA95/HA5が最も大きな機械的性質を示したため、PGAに対して5%HAの添加が機械的性質の向上に最適であることが分かった。一方、PGA/HAコンポジットは従来のアンカースクリューの素材であるチタンと比較して、曲げ特性および表面微小特性ともに低い値を示した。実際の矯正治療期間中にはアンカースクリューに持続的な曲げモーメントが負荷されるために、アンカースクリュー素材の曲げ特性は非常に重要である。PGA/HAコンポジットはチタンに比べて低い曲げ特性を示したが、一般的に報告されているヒト皮質骨の曲げ特性とは近似しており、PGA/HAコンポジットに曲げモーメントが負荷される際、骨と協調して変形するものと推察され、骨の破壊が

表2 PGA/HA コンポジットの曲げ特性

Material	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (GPa)
PGA100	176.1 ± 4.9 ^a	7.8 ± 0.2 ^a
PGA95/HA5	179.1 ± 6.6 ^b	8.3 ± 0.4 ^{a,b}
PGA90/HA10	167.1 ± 7.2 ^{a,b}	7.8 ± 0.5 ^b

Mean values with same superscripts are significantly different from each other ($p < 0.05$).

表3 PGA/HA コンポジットの表面微小特性

Material	Dynamic hardness (-)	Elastic modulus (GPa)
PGA100	28.4 ± 2.5 ^{a,b}	7.5 ± 0.5 ^{a,b}
PGA95/HA5	35.8 ± 3.9 ^a	8.3 ± 0.4 ^a
PGA90/HA10	32.9 ± 1.7 ^b	8.2 ± 0.2 ^b

Mean values with same superscripts are significantly different from each other ($p < 0.05$).

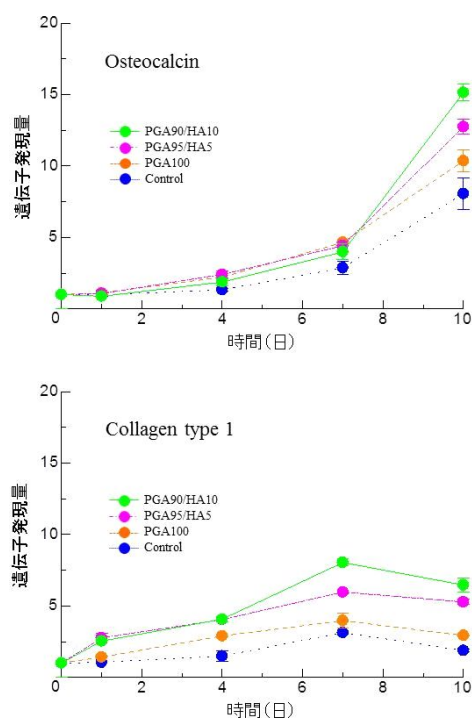


図7 細胞試験の結果

起こりづらいつと考えられる。一方、アンカースクリューの表面硬さに起因する機械的摩擦はアンカースクリュー埋入時のトルクに大きな影響を及ぼすため、ダイナミック硬さについては今後改良する必要があると考えられる。

図7にMC3T3-E1を用いた細胞試験により得られたOsteocalcinおよびCollagen type 1の結果を示す。Osteocalcinの遺伝子発現量は10日まで経時依存的およびHAの濃度依存的に増加した。またCollagen type 1の遺伝子発現量は7日にピークに達し、経時的、濃度依存的に増加した。以上によりPGA/HAコンポジット体のHA配合量の増加により、骨芽細胞の分化が促進されることが示唆された。

(3) PGA/HA コンポジット製アンカースクリューの最適構造設計

図8にアンカースクリューのテーパ角度と最大応力値の関係を示す。テーパ角度が大きくなるにつれてアンカースクリューおよび骨内に発生する最大応力値は増加した。これはテーパ角度が大きくなると、骨との接触面積が減少し、応力が増加したものと考えられる。図9にアンカースクリューのピッチと最大応力値の関係を示す。ピッチが大きくなるにつれてアンカースクリュー内に発生する最大応力値は増加した。これはピッチが大きくなると、アンカースクリューの接触面積が小さくなるため、応力が増加したものと考えられる。一方、骨内に発生する最大応力値は減少する傾向を示した。これはピッチが大きいとねじ山の数が少なくなり、ねじ山一つ当たりの表面積が大きくなり、皮質骨にかかる応力が分散しやすくなったためと考えられる。

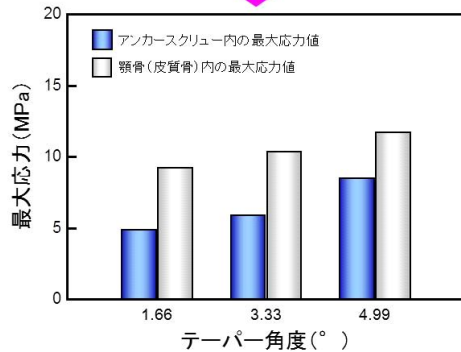
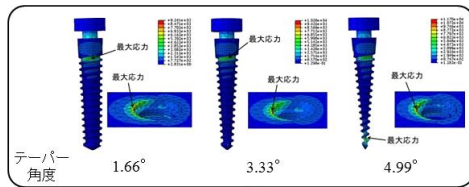


図8 テーパー角度が最大応力値に及ぼす影響

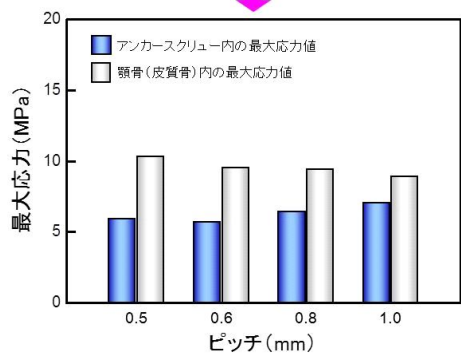
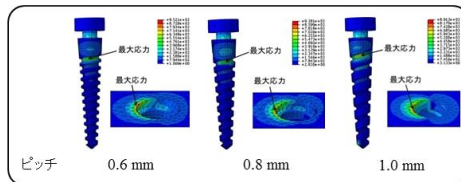


図9 ピッチが最大応力値に及ぼす影響

以上の結果、アンカースクリュー/骨モデルを作製し、引抜試験による実験およびFEMを用いた数値解析から、アンカースクリューの脱離メカニズムを明らかにすることができた。またアンカースクリューの新素材としてPGA/HAコンポジットを作製し、PGAにHAを配合することでPGA単体に比べて、機械的および生物学的性質を向上させることができた。さらにFEMによるPGA/HAコンポジット製アンカースクリューの構造解析を行うことで、PGA/HAコンポジットを用いた新規歯科矯正用アンカースクリューシステムの有用性について、材料開発および最適構造設計の両面から明らかにした。今後は実際に作製した新規アンカースクリュー(図10)を対象としたin-vivo試験を行い、さらに研究を推し進める予定である。



図10 PGA製アンカースクリュー

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 7件)

加藤勇輝、荻原知良、青木義男、谷本安造、歯科矯正用アンカースクリューの構造特性及び脱離メカニズムに関する研究、第58回日本大学理工学部学術講演会、2014年12月6日、日本大学理工学部駿河台校舎(東京都・千代田区)

谷本安造、「基礎研究から見える未来」メタルフリー素材の矯正歯科領域への応用、第73回日本矯正歯科学会大会、2014年10月21日、幕張メッセ(千葉県・千葉市)

高橋桃子、山口大、谷本安造、八尾恵梨子、葛西一貴、歯科矯正用アンカースクリューへの応用を目的としたPGA/HAコンポジット体の機械的評価、第64回日本歯科理工学会、2014年10月5日、アステールプラザ(広島県・広島市)

八尾恵梨子、山口大、谷本安造、高橋桃子、葛西一貴、歯科矯正用アンカースクリューへの応用を目的としたPGA/HAコンポジット体の生物学的評価、第64回日本歯科理工学会、2014年10月4日、アステールプラザ(広島県・広島市)

谷本安造、高橋桃子、山口大、八尾恵梨子、西山典宏、葛西一貴、PGAを用いた歯科矯正用アンカースクリューの開発、第35回日本バイオマテリアル学会大会、2013年11月25日、タワーホール船堀(東京都・江戸川区)

田中孝哲、加藤勇輝、青木義男、田畑昭久、谷本安造、歯列矯正用アンカースクリューの最適形状に関する基礎研究、日本機械学会第24回バイオフロンティア講演会、2013年11月2日、同志社大学室町キャンパス(京都府・京都市)

高橋桃子、山口大、谷本安造、井波俊博、八尾恵梨子、葛西一貴、歯科矯正用アンカースクリューへの応用を目的とした生体吸収性ポリマーの生物学的評価、第72回日本矯正歯科学会大会、2013年10月9日、キッセイ文化ホール(長野県・松本市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

谷本安造(TANIMOTO YASUHIRO)

日本大学・松戸歯学部・准教授

研究者番号：40312045