

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月15日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22700461

研究課題名（和文） 歯牙エナメル質の強度診断法

研究課題名（英文） A Method for Diagnosis of Mechanical Strength of Tooth Enamel

研究代表者

藤崎 和弘 (FUJISAKI KAZUHIRO)

北海道大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：90435678

研究成果の概要（和文）：骨や歯を構成する硬組織は結晶構造を持つアパタイトを含み、アパタイト結晶のナノレベルの異方性構造が組織強度に影響を与える。本研究では、この結晶構造に注目し、X線回折など非破壊・非接触的な構造解析技術を利用した歯牙強度評価法を提案した。本手法により、エナメル質内アパタイトの形態や、負荷時に歯牙表面に生じる局所的なひずみ分布を高分解能に検出することが可能になった。本技術は歯牙組織の欠損予測やインプラント適合性評価といった歯科診断への適用が期待される。

研究成果の概要（英文）：The tooth enamel is the hardest and most highly mineralized tissue in the human body. As apatite components in mineralized tissue have crystalline structure, X-ray diffraction can be used to analyze the micro/nano-scale structure. The crystal structure in the tissue is an important factor to determine the strength of macroscopic tooth structure. The X-ray strain measurements were conducted on tooth specimens with intact surfaces under loading. Highly accurate measurements of surfaces of teeth were performed by precise positioning of the X-ray irradiation area. This non-destructive method is expected to use in the dental diagnoses.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学、医用生体工学・生体材料学

キーワード：バイオメカニクス、X線、結晶配向、歯学、生体材料、ひずみ

## 1. 研究開始当初の背景

歯牙はハイドロキシアパタイトを主とするエナメル質と、アパタイト-コラーゲン複合組成からなる象牙質により構成される。歯牙表層に存在するエナメル質は大部分がアパタイトで構成されており、生体内で最も硬く、乾燥や湿潤、口内の化学的環境下におい

ても咀嚼による負荷や摩擦に対して優れた耐性を示す。歯牙表面のう蝕や欠損、その治療によりエナメル質厚やアパタイト含有量が低下すると、歯牙の強度、耐摩耗性、耐食性が失われる。歯の診断においては、このような組織強度の低下を、低侵襲測定法を用いて定量的に評価する必要がある。

現在、歯牙のエナメル質-象牙質構造やインプラント置換形状を数理モデル化し、有限要素法等の応力解析により破壊強度を推定する研究が行われている。また、組織の直接的な強度評価として、圧子押し込みによる微小硬さ試験が行われており、組織の弾性率や硬さに、部位や方向による差（異質性、異方性）があることがわかっている。この性質は組織の微視構造に依存し、エナメル質では、組織を構成する小柱構造やアパタイト結晶形態との関係が指摘されている。我々は歯牙と同様にアパタイトを含有する骨組織において、結晶構造が巨視的な組織強度や異方性弾性特性に大きく関係することを示してきた。アパタイトが大部分を占めるエナメル質においては、この結晶配向が直接的に破壊強度や耐摩耗性、耐食性に関わると推測できる。

## 2. 研究の目的

本研究では歯牙組織内アパタイトの結晶構造に注目し、X線回折など非破壊・非接触的な構造解析技術を利用した歯牙強度評価法を提案する。また、本技術を生体の歯牙表面に適用するための測定系を開発し、組織負荷時の微視的変形特性を、ヒト摘出歯試料を対象とした実験により明らかにする。

## 3. 研究の方法

アパタイト結晶特性と歯牙強度の関係を定量化するためには、結晶構造特性の指針である結晶化度、結晶配向の方向・割合と、弾性率、硬さ、ひずみ特性、耐摩耗性、耐食性といった強度特性との関係を明らかにする必要がある。検討内容として、歯牙試料の結晶構造計測・解析システムの開発、ヒト歯牙エナメル質、象牙質の力学試験、歯牙組織内アパタイト結晶の配向性測定、ひずみ特性測定を行う。これらの結果を基に、*in vivo*測定が可能な測定手法を提案し、その有効性を示す。上記検討内容に関して、各年度の実施項目を下記のように定める。

### (1)2010 年度

- ①歯牙用結晶構造計測・解析システム開発
- ②ヒト歯牙エナメル質・象牙質の力学試験
- ③歯牙組織アパタイト結晶の配向性測定

### (2)2011 年度

- ①歯牙組織の破壊強度の測定
- ②組織の耐摩耗性・耐食性評価試験
- ③アパタイト構造特性と強度の関係
- ④*in vivo*測定法の検討

## 4. 研究成果

本研究プロジェクトにおいては歯牙組織のマクロな構造と強度、そして、ミクロな構

造との関係について調査した。特にこの成果の中で、臨床応用に関わる重要項目である歯牙エナメル質の(1)ミクロ構造の測定手法と(2)この構造特性の定量化、(3)力学特性について詳細に報告する。

### (1)結晶構造測定方法

歯牙組織にX線を照射すると、組織内アパタイトの結晶構造に由来した回折X線が発生する。図1にX線回折経路を示す。一定波長のX線を照射した場合、回折X線の経路は、

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

で表される Bragg 則に従う。ここで、 $d$ は結晶内の原子の配置の規則性によって表現される格子面の間隔である。また、 $\theta$ は Bragg 角と呼ばれ、X線照射軸と回折X線発生方向とのなす角を  $2\theta$  とする角度である。 $\lambda$ は照射するX線の波長、 $n$ は回折の次数 ( $n=1, 2, \dots$ ) である。結晶には間隔の異なる複数の格子面が存在するため、回折X線はそれぞれの格子面間隔に対応した Bragg 角方向に生じる。結晶が負荷や熱などにより変形すると、この格子面の間隔が変わることから、結晶レベルの変形量を回折X線の発生方向から測定できる (X線回折法による結晶ひずみ測定)。

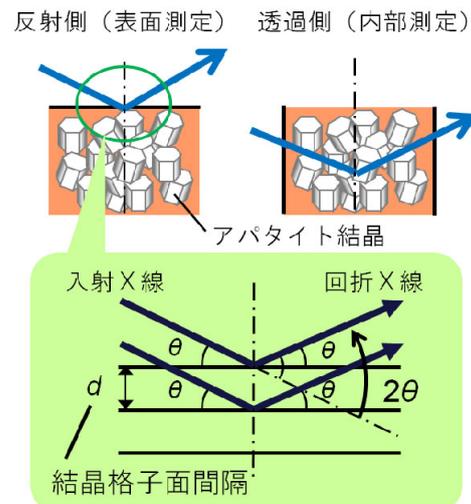


図1 X線回折の原理

図2にヒト摘出歯にX線を照射した際の回折X線強度の分布パターンの一例を示す。結晶内の原子配置には特定の規則性があり、原子間隔が統計的に多くなる方向に強い回折X線が生じる。X線照射領域中に多数の結晶が無配向に存在する場合、回折X線は  $2\theta$  を半頂角とする円錐面状に分布する。これをX線入射軸に対して垂直に置かれた2次元検出器で検出すると回折X線パターンはリング状になる (デバイ環)。このリング上の回折X線の強度 (輝度) 分布は格子面の存在頻度に依存するため、多数の結晶が特定の方向

に向いていると、局所的にX線の検出強度が高くなる。本研究ではリング上の強度分布から配向の主方向を定め、その広がりを配向度という指針で定量的に示した（〔雑誌論文〕①参照）。

図3にX線回折測定装置の一例として、ひずみ測定用の機器構成を示す。ひずみ測定では高精度な試料表面とX線照射位置の調整が必要である。そこで、測定時の負荷による変位や、人体測定時を想定した位置ずれ補正のため、非接触距離センサであるレーザ変位計を設置し、X線測定時の照射部位置誤差を $5\mu\text{m}$ 以下に抑えた。この位置決め精度の改善により、本測定条件におけるひずみ測定誤差は0.005%ひずみ以下となった。

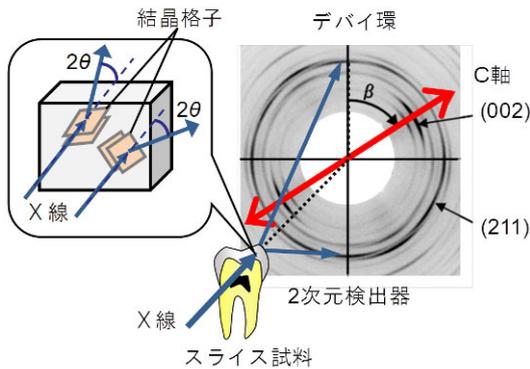


図2 エナメル質からの回折X線パターン（透過側回折系）

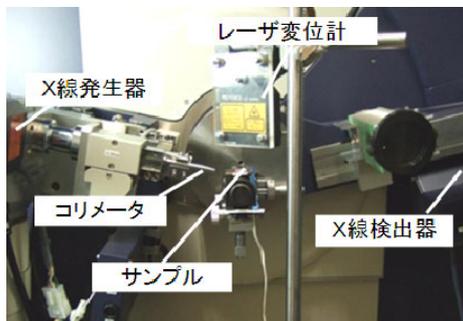


図3 歯牙試料表面のひずみ測定システムの外観（反射側回折系）

(2) エナメル質の微視構造特性

図4に歯牙組織断面の組織写真を示す。外層にエナメル質があり、内部に象牙質を有する。この断面に平行な薄片を作成し、エナメル質組織内部のアパタイトの結晶配向を測定した（図2参照）。図中の矢印は六方晶アパタイト結晶構造の基準軸であるc軸がどの方向に向いているかを示したものである。この結晶配向を定量的なパラメータで表現するため、歯軸（嚙合方向）からのなす角、歯牙表面法線とのなす角、および配向方向に対する分布割合（配向度）を計算した。図5に各パラメータの分布を示す。この結果から、

エナメル質内のアパタイトは、象牙質境界から歯牙表面に向かって配向をしていることが確認できる。

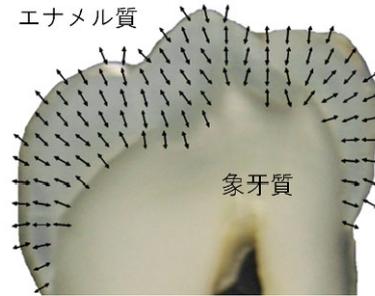


図4 エナメル質内アパタイトの配向特性（矢印が六方晶c軸の主配向方向を示す）

これを歯表面にて検出するため、X線回折による極点測定を実施した。図6に測定結果の一例（極点図）を示す。どの結果も歯牙表面の法線方向に強い強度分布を示しており、アパタイトc軸が常に表面に向かって配向していることが確認できた。一方、象牙質ではアパタイト組成の減少に起因する回折X線強度の低下が起こり、エナメル質ほど明確な配向特性も示さない。したがって、歯牙表面のアパタイト配向方向と配向度を検出することで、エナメル質の欠損・磨滅の有無や、う蝕による損失の程度を定量的に判断することが可能となる。

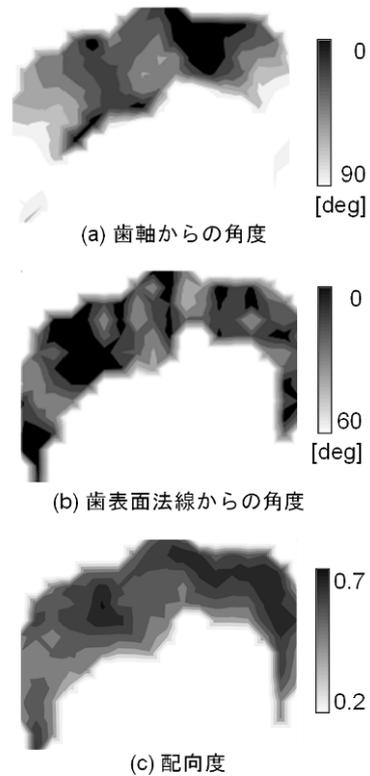


図5 エナメル質内アパタイトのc軸配向を示すパラメータ

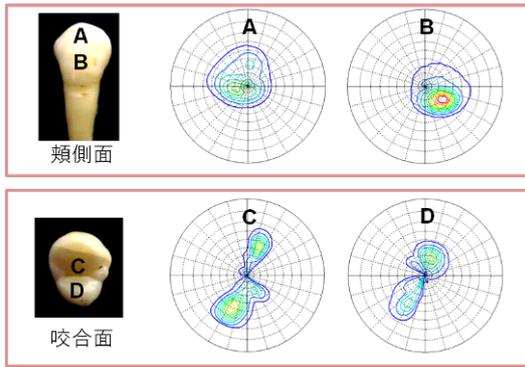


図6 ヒト臼歯表面のc軸配向極点図

### (3) 結晶ひずみ測定

歯牙構造の負荷-変形特性を調査するため、ヒト摘出歯に対する負荷試験を実施し、負荷時の歯牙表面におけるアパタイト結晶ひずみを測定した。実験には臼歯ならびに切歯を利用し、均一な負荷を実現するため、歯冠部と歯根部を平行になるように切除した。この試験片を専用の負荷装置に搭載し、圧縮負荷を加えた状態でX線照射を行った。X線の照射径を1mmとしており、照射位置を移動することで表面上のひずみ分布が測定できる。歯軸方向に圧縮負荷を加え、歯牙表面のひずみをひずみゲージで検出した。表面ひずみが0.2%となった際の、結晶ひずみ測定結果の一例を図7に示す。本測定系では歯軸圧縮に対して垂直方向に変化するひずみを測定可能である。したがって、通常の単純圧縮状態であれば、負荷ひずみに対してポアソン比分の変形を測定する事になる。本結果は同一の歯軸圧縮条件であっても、表面には場所によって異なる大きさの変形が起こっている事を示唆している。このようなひずみの変化は局所的な応力集中が発生している事を示しており、負荷が過大となる場所が歯牙組織の破壊起点となる可能性が高い。

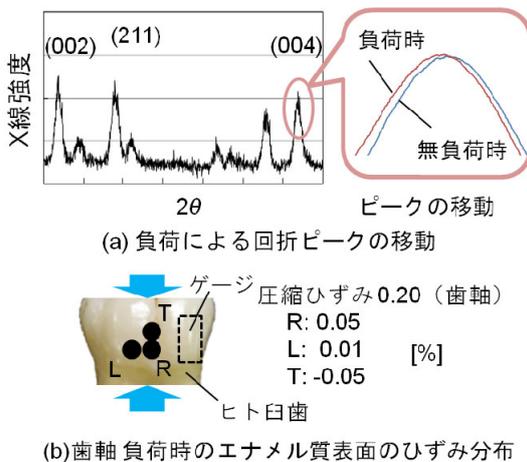


図7 負荷時のX線回折ピークの変化とエナメル質表面のひずみ測定例

### (4) 本技術の応用

本研究ではアパタイト含有試料に対するX線回折法の高精度化と臨床応用のための測定系について検討してきた。この技術を活用し、X線回折法によるアパタイトひずみの3軸測定法、チタン製インプラント材料表面の応力測定法を提案した ([学会発表] ②および③参照)。

### (5) まとめ

本研究を通して、歯牙組織微視構造の非破壊測定手法の提案を行い、本手法のヒト摘出歯への適用を試みた。そして、アパタイト結晶形態の定量的評価と、破壊リスクの予測に有効な歯牙表面のひずみ分布の実測に成功した。本手法により、歯表面に発生した欠損や摩耗、微視構造異常の高分解能観測が実現し、*in vivo*での歯牙組織強度特性診断の可能性を示した。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

① K. Fujisaki, M. Todoh, A. Niida, R. Shibuya, S. Kitami, S. Tadano, Orientation and Deformation of Mineral Crystals in Tooth Surfaces, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, Vol. 10, 176-182, 2012, 査読有

[学会発表] (計4件)

① K. Fujisaki, M. Todoh, S. Tadano, Orientation and Deformation of Apatite Crystals in Tooth Enamel, The First ETH-Japan Workshop on Science and Computing, 2012. 3. 14, Ramada ホテル・エンゲルベルク・スイス

② 藤崎和弘、但野茂、皮膚組織下のチタンプレートでの応力測定、日本機械学会第23回バイオエンジニアリング講演会、2011. 1. 9、熊本大学・熊本

③ 藤崎和弘、川島圭太、但野茂、X線IPによる皮質骨組織内HA p結晶の3軸ひずみ測定、第21回バイオフィロンティア講演会、2010. 11. 13、ITビジネスプラザ武蔵・金沢

④ 藤崎和弘、東藤正浩、但野茂、エナメル質表面におけるアパタイトの結晶配向と変形特性、第18回顎顔面バイオメカニクス学会大会、2010. 9. 19、産業振興センター・札幌

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

藤崎 和弘 (FUJISAKI KAZUHIRO)  
北海道大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号：90435678