

# 放射光を用いた口腔微細構造の平面および立体の X 線位相イメージング観察 Observation of X-ray phase imaging of planar and three-dimensional human oral microstructure using synchrotron radiation.

河野哲朗<sup>1</sup>, 高橋由美子<sup>2</sup>, 平野馨一<sup>3</sup>, 寒河江登志朗<sup>1</sup>, 早川恭史<sup>2</sup>, 岡田裕之<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 日本大学松戸歯学部, 〒271-8587 千葉県松戸市栄町西 2-870-1

<sup>2</sup> 日本大学量子科学研究所, 〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1

<sup>3</sup> 高エネルギー加速器研究機構放射光科学研究施設, 〒305-0801 つくば市大穂 1-1  
Tetsuro KONO<sup>1</sup>, Yumiko TAKAHASHI<sup>2</sup>, Hajime NODA<sup>1</sup>, Keiichi HIRANO<sup>3</sup>, Yasushi HAYAKAWA<sup>2</sup>, Toshiro SAKAE<sup>1</sup>, and Hiroyuki OKADA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nihon University School of Dentistry at Matsudo,  
2-870-1 Sakaecho-Nishi, Matsudo, Chiba, 271-8587, Japan

<sup>2</sup>Nihon University, Institute of Quantum Science, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501, Japan

<sup>3</sup> Photon Factory, 1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801, Japan

## 1 はじめに

現在、医療分野等で広く用いられている吸収コントラスト X 線イメージングは、組織の組成、厚み、および密度の違いに基づいて構造を可視化する。しかし、人体などの生体組織を構成する軽元素は質量吸収係数や密度の差が小さいため、従来の吸収コントラスト法では明瞭な画像を描出することが困難である。一方、X 線位相コントラストイメージング (XPCI) は、X 線が試料を透過する際に生じる微小な位相シフトを検出するため、軽元素の組織に対しても高い感度を有する<sup>1)</sup>。その中でも回折強調法 (Diffraction-Enhanced Imaging: DEI) は、透過 X 線を吸収、屈折、散乱成分に分離して画像化できるため、吸収コントラスト法では得られない物理的特性情報をもたらす<sup>2)</sup>。ヒトの歯は複雑な形態を伴う硬組織からなるが、その内部の微細構造を従来の X 線手法で区別することは難しい。

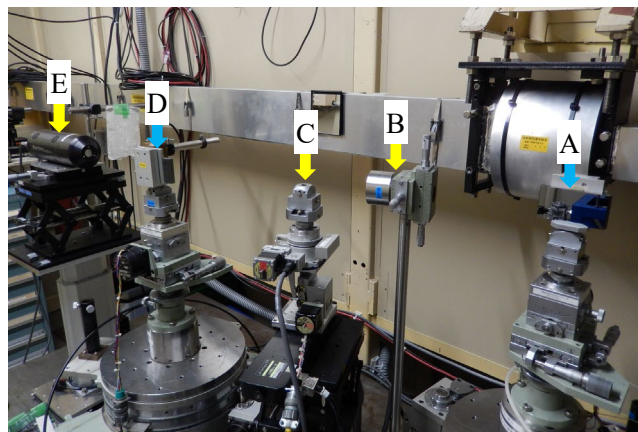
本研究の目的は、放射光を用いた DEI によってヒト歯硬組織 (エナメル質および象牙質) の内部微細構造を可視化し、それらの複雑な構造的特徴を解明することである。

## 2 実験

本研究では、抜去されたヒト上顎中切歯 (3 本) および下顎第三大臼歯 (3 本) を使用した。試料の作製にあたっては、頬舌側の正中を通るようにダイヤモンドソーで縦断し、厚さ約 0.5 mm の未研磨切片を作製した。なお、本実験は日本大学松戸歯学部倫理委員会の承認 (承認番号 EC22-17-015-1) を得て実施した。実験は高エネルギー加速器研究機構フォトンファクトリー (KEK-PF) のビームライン BL-14B にて行った。主な実験条件を Table 1 に示す<sup>4)</sup>。

X 線エネルギーは 20 keV に設定し、非対称シリコン (Si)220 反射 (非対称因子  $b = 0.076$ ) をコリメー

ター結晶として用い、試料を透過した X 線を対称 Si(220)アナライザー結晶で回折させた。検出器には、実効画素サイズが  $6.45 \mu\text{m}$  の X 線 CCD カメラを使用した。露光時間を 1 sec/step とし、 $5.6 \times 10^{-6} \text{ deg/step} \times 1400 \text{ steps}$  の範囲で測定を行った。光学系を Fig.1 に示す。取得したデータに対し、Pagot ら<sup>4)</sup>の手法を用いて、「吸収像」「屈折角像」「超小角散乱 (USAX) 像」の 3 種類の画像を抽出した。



A: Collimator crystal  
B: Slit  
C: Sample stage  
D: Analyzer crystal  
E: Detector (X-ray CCD camera)

Fig.1 Overview of optics system installed in KEK-PF, BL-14B.

The optical system for photography. The sample is set on the yellow arrow (C). The blue arrows are perfect crystals with the collimator crystal (A) on the right and the analyzer crystal (D) on the left.

Table 1 KEK-PF BL-14B における主な実験条件

項目	実験条件
X線エネルギー	20 keV ( $\lambda = 0.62 \text{ \AA}$ )
コリメーター結晶	非対称 Si(220)結晶, 非対称因子 (b) = 0.076
アナライザー結晶	対称 Si(220)結晶, ブラッグ角 ( $\theta_B$ ) = 9.3°
検出器	X線 CCD カメラ, 実効画素 サイズ 6.45 $\mu\text{m} \times 6.45 \mu\text{m}$

### 3 結果および考察

抽出した 3 種類の画像「吸収像」「屈折角像」「USAX 像」を用いて、前歯部と臼歯部のそれぞれについて画像評価と考察を行った。

#### [1] 前歯部の知見

吸収像 (図 2(A)) では、エナメル質と象牙質の識別は可能であったが、内部の微細構造は確認できなかった。一方、屈折角像 (図 2(B)) では、エナメル・象牙質境が明瞭に可視化され、エナメル質と象牙質の密度差が正確に捉えられていた。また、頬側歯頸部における象牙細管の走行や、原生象牙質と第二象牙質の境界、髄腔周囲の球間象牙質と思われる斑状の低石灰化構造が観察された。USAX 像 (図 2(C)) では、エナメル質内にレッチウス条 (成長線) に一致する線状構造が描出された。さらに、歯頸部付近の象牙質において、象牙細管の一次湾曲が明確に観察された。

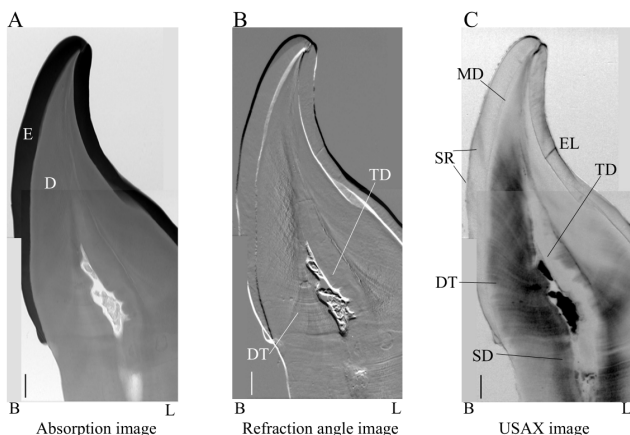


Fig.2 DEI reconstruction of the human anterior teeth.

The imaging conditions were E = 20 keV, Exposure time 1 sec/step, and a measurement range of  $5.6 \times 10^{-6}$  deg/step  $\times$  1400 steps. From left to right in the figure: absorption image, refraction angle image, and USAX image. At the bottom of each image, “L” indicates the lingual side and “B” indicates the buccal side. (A) Absorption image, (B) Refraction angle image, tubules, (C) USAX image, E: enamel, D: Dentin, DT: Dentin tubules, EL: Enamel lamella, MD: Mantle dentin. SD: Secondary dentin, SR: Striae of Retzius

#### [2] 臼歯部の知見

前歯部と同様に、吸収像 (図 4(A)) では微細構造の判別は困難であったが、空間分解能の恩恵により舌側歯根のセメント質の一部が識別可能であった。屈折角像 (図 4(B)) では、エナメル質内の亀裂構造や、エナメル・象牙質境直上のエナメル叢と思われる低石灰化領域に加え、歯冠部象牙質全体に広がる球間象牙質を示す斑状の陥凹が観察された。USAX 像 (図 4(C)) では、屈折角像では不明瞭であった亀裂やエナメル叢がより明確に捉えられた。また、象牙質内で象牙細管が放射状に伸びる様子が観察され、外套象牙質に相当する領域は周囲よりも散乱強度が低い均質な構造として示された。

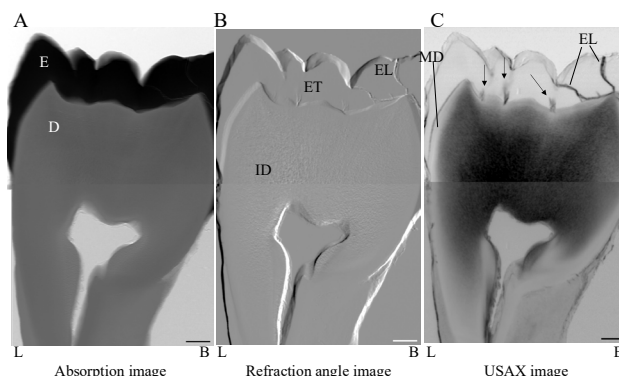


Fig.3 DEI reconstruction of the human molar teeth.

The imaging conditions were E = 20 keV, Exposure time 1 sec/step, and a measurement range of  $5.6 \times 10^{-6}$  deg/step  $\times$  1400 steps. From left to right in the figure: absorption image, refraction angle image, and USAX image. At the bottom of each image, “L” indicates the lingual side and “B” indicates the buccal side. (A) Absorption image, (B) Refraction angle image, (C) USAX image, E: enamel, D: Dentin, EL: Enamel lamella, ET: Enamel tuft, MD: Mantle dentin. ID: Interglobular dentin. In Figure (C), arrow indicate the

#### [3] 試料の形状や厚みが画像に与える影響

DEI は微小な差異を高感度で検出できる反面、試料のわずかな形状や厚みの違いが結果に影響を及ぼす。本実験においても、前歯部で可視化された一部の微細構造が臼歯部では不明瞭であるなど、試料の形態による描出に差異が認められた。明瞭な画像を得るためには、試料とその周囲の媒質との密度関係を適切に保つ必要があり、試料ごとに最適な条件を実験的に見出すことが重要であると考えられる。

### 4 まとめ

放射光を用いた回折強調法 (DEI) により、ヒト歯牙硬組織のイメージングを行った。その結果、従来の吸収像では判別が困難であったエナメル・象牙質境、象牙細管、レッチウス条、エナメル叢、球間象牙質などの内部微細構造を非造影で明瞭に可視化することができた。本手法は、ヒト歯牙硬組織の微

細構造解析に対して極めて有効かつ有益なアプローチであることが示された。

### 謝辞

本実験は、フォトンファクトリー共同利用実験課題（課題番号：2022G064, 2024G007）の承認を受けて実施された。また、本研究の一部は京都大学エネルギー理工学研究所 ゼロエミッションエネルギー研究拠点 共同利用・共同研究（課題番号：2024C-02, 2025C-02, 2026C-02）の支援を受けて行われたものである。

### 参考文献

- 1) Momose A, Fukuda J: Phase-contrast radiographs of non-stained rat cerebellar specimen. *Med Phys* 22: 375-379, 1995
- 2) Chapman D, Thomlinson W, Johnston R E, Washburn D, Pisano E, Gmür N, Zhong Z, Menk R, Arfelli, F, Sayers D: Diffraction enhanced x-ray imaging. *Phys Med Biol*, 42: 2015–2025, 1997.
- 3) Kono T, Sakae T, Takahashi Y, Sakai T, Nogami K, Hayakawa K, Takamura S, Togashi Y, Ogawa T, Tanaka T, Hayakawa Y, Okada H: Diffraction-Enhanced Imaging of Human Tooth Using Highly Spatial Coherent Parametric X-ray Generated by a Small LINAC System, *Int J Oral-Med Sci*, 21(1-2): 23-31, 2022.
- 4) Pagot E, Cloetens P, Fiedler S, Bravin A, Coan P, Baruchel J, Härtwig J, Thomlinson W: A method to extract quantitative information in analyzer-based x-ray phase contrast imaging. *Appl. Phys. Lett.*, 82, 3421-3423, 2003.

### 成果

本課題および関連する放射光イメージング研究に関して、以下の特筆すべき成果（論文採択、および主要な学会・シンポジウムでの発表）が得られた。

#### 【原著論文】

1. **Tetsuro Kono**, Yumiko Takahashi, Takeshi Sakai, Hajime Noda, Takashi Tayama, Arata Watanabe, Toshikazu Uchiyama, Toshiro Sakae, Yasushi Hayakawa, Hiroyuki Okada: Visualization of Internal Microstructures in Human Dental Hard Tissues by Synchrotron Radiation-based Diffraction-enhanced Imaging, *International Journal of Oral-Medical Sciences*, 25(1), accept, 2026.5.
2. Yuuya Togashi, **Tetsuro Kono**, Yumiko Takahashi: Three-dimensional Imaging of Tongue Granulation Tissue Using Synchrotron-based Phase-contrast Techniques, *International Journal of Oral-Medical Sciences*, 23(4), 163-172, 2025.3.
3. Yukie Takamura, **Tetsuro Kono**, Yumiko Takahashi: Observation of Granulation Tissue of Tongue Using Synchrotron Radiation, *International Journal of Oral-Medical Sciences*, 22(4), 157-164, 2024.4.

#### 【主要な学会・シンポジウム発表】

1. 高橋由美子, 早川恭史, **河野哲朗**: 放射光 X 線位相コントラストイメージングの歯科標本への応用, 2025 年度 日本大学電子線利用研究施設ユーザーズミーティング, 千葉県船橋市, 2026.3.
2. 高橋由美子, 早川恭史, **河野哲朗**, 田山隆史, 寒河江登志朗, 岡田裕之: 硬組織の X 線位相コントラストイメージング, 第 39 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 宮城県仙台市, 2026.1.
3. **河野哲朗**, 富樫侑也, 高橋由美子, 早川恭史, 寒河江登志朗, 岡田裕之: X 線位相コントラスト法による唾石の観察, 2024 年度量子ビームサイエンスフェスタ・第 16 回 MLF シンポジウム・第 42 回 PF シンポジウム, 茨城県つくば市, 2025.3.
4. 高橋由美子, 早川恭史, **河野哲朗**, 富樫侑也, 寒河江登志朗, 岡田裕之: X 線位相コントラストイメージングの歯科標本への応用, 第 38 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 茨城県つくば市, 2025.1.
5. **河野哲朗**, 高橋由美子, 富樫侑也, 渡辺新, 玉村亮, 早川恭史, 寒河江登志朗, 岡田裕之: 高エネルギー単色光を用いたヒト歯の DEI 観察, 第 32 回硬組織再生生物学会学術大会・総会, 大阪府高槻市, 2024.8.
6. **河野哲朗**, 高橋由美子, 境武志, 渡辺新, 玉村亮, 早川恭史, 寒河江登志朗, 岡田裕之: 放射光を利用した X 線位相コントラストイメージングによる歯の微細構造の観察, 第 129 回日本解剖学会・総会, 沖縄県沖縄市, 2024.3.
7. 高橋由美子, **河野哲朗**, 高村幸恵, 富樫侑也, 早川恭史, 寒河江登志朗, 岡田裕之: X 線位相コントラストイメージングの歯科標本への応用, 第 59 回 X 線分析討論会, 東京都世田谷区, 2023.10.
8. 富樫侑也, **河野哲朗**, 高橋由美子, 野田一, 渡辺新, 玉村亮, 早川恭史, 寒河江登志朗, 岡田裕之: 放射光を用いた歯の平面イメージング観察, 第 31 回硬組織再生生物学会学術大会・総会, 新潟県新潟市, 2023.9.

\* kono.tetsuro@nihon-u.ac.jp