

微分位相 X 線マイクロ CT を用いた  
毛髪内空隙に対する充填物質の物性と充填効果の相関解析  
Correlation Analysis of the Material Properties and their Filling Effects on  
Hair Voids using Differential Phase Contrast X-ray Micro-CT Method

武田 基希, 山本 晃大, 木村 拳, 小林 和樹, 鈴田 和之, 伊藤 廉  
Motoki Takeda, Kota Yamamoto, Ken Kimura, Kazuki Kobayashi, Kazuyuki Suzuta, Len Ito

株式会社ミルボン  
Milbon Co. Ltd.

本研究では、毛髪の損傷に伴って生じる毛髪繊維内の空隙を補修するための科学的理論を確立することを目指し、毛髪繊維の密度測定と、X 線マイクロ CT 測定による 3 次元観察を行った。その結果、毛髪繊維に対する成分浸漬処理によって毛髪繊維の密度に有意な差が確認され、また、X 線マイクロ CT 測定では空隙や低密度構造に由来する暗点を確認された。今後、これらの構造の分布や体積の定量解析を進め、毛髪繊維の密度との相関を明らかにする予定である。

キーワード： 毛髪、微分位相 X 線マイクロ CT、空隙

背景と研究目的：

消費者の多くは、髪を美しく見せるためにヘアカラーやパーマ等の種々の美容施術を行っているが、それに伴って毛髪に損傷（ダメージ）が生じることが広く認識されている。毛髪の重要なダメージとして、繊維内部からタンパク質や脂質等が流失すると共に、繊維内部にナノ～マイクロメートルサイズの空隙が形成される現象が挙げられる[1]。このような空隙形成に対して、物質を充填して空隙を補修する試みが数多く行われてきたが[2]、消費者の満足を得られるほどの改善には未だ至っていない。その要因として、空隙充填のための科学的理論が確立されておらず、空隙充填が主に経験則に基づいているためと考えられる。

我々は毛髪繊維の密度を高精度に測定する手法を確立しており、この手法によって測定した毛髪内密度は毛髪繊維全体の空隙率を反映していると考えられる。実際に、特定の加水分解シルク誘導体の溶液に浸漬処理した毛髪は密度が上昇し、BL24XU の屈折コントラスト X 線マイクロ CT 測定によって毛髪繊維内の空隙が減少することを確認している[3]。しかし、BL24XU の X 線マイクロ CT は感度を高めるためにデフォーカスによって空間分解能を犠牲にしているため、毛髪繊維全体の空隙率の定量評価には至っていない。そこで本研究では、BL47XU における高空間分解能の微分位相コントラスト X 線マイクロ CT を活用した[4]。種々物質を毛髪に作用させたときの毛髪内密度の変化と、X 線マイクロ CT 測定によって算出した空隙率の相関解析を行うことで、毛髪内密度による空隙評価の妥当性を検証し、毛髪の空隙対策における科学的指針の確立を目指した。

実験：

同意を得た女性から採取した、化学的な美容処理の履歴がない毛髪繊維 1 本の毛先部分を、10%ドデシル硫酸ナトリウム水溶液で洗浄し、精製水で濯いだ。それを 2 cm の長さで 4 片に切り分け、1 つは何も処理せずコントロールとし、残り 3 つは加水分解シルク誘導体 1%溶液 3 種（成分 A、成分 B、成分 C）のうちから 1 つ選び、それぞれに毛髪サンプルを 1 時間浸漬した。その後、毛髪内密度を 10 回測定した。

これらの毛髪サンプルに対し、BL47XU における結像型の微分位相コントラスト X 線マイクロ CT を用いて測定を行った。試料は全て常温、大気下で測定した。X 線エネルギーは 15 keV、ピクセルサイズは 42.2 nm/pixel であった。

## 結果および考察：

Table 1 それぞれの毛髪サンプルの毛髪内密度を示す。Tukey-Kramer の多重比較検定により毛髪内密度の平均値を比較した結果、成分 A と成分 C、成分 B と成分 C の間で 5% の有意水準で統計的に有意な差が認められた。また、Fig. 1 および Fig. 2 に、X 線マイクロ CT 測定によって得られたそれぞれの毛髪サンプルの断層像の典型例を示す。ノイズ除去のため、断層像にはカーネルサイズ 5 pixel のガウシアンフィルターを適用した。いずれの断層像でも、毛髪内の空隙や低密度構造に由来する暗点が確認された。一方、全ての断層像で毛髪の外周部に存在するキューティクル構造が確認できず、毛髪繊維の欠けや亀裂が確認された。健常毛髪ではこのような構造が通常は確認されないため、今回用いた毛髪サンプルは毛髪の採取前から日々の物理的ストレスによる損傷を受けていたものと考えられる。

現在、観察された空隙や低密度構造の分布や体積の定量解析を進めている。今後、これらの結果と毛髪内密度との相関を解析し、毛髪内密度による空隙評価の妥当性を検証する予定である。

Table 1 毛髪内密度測定の結果

サンプル	毛髪内密度 [g/cm <sup>3</sup> ] (平均値±標準誤差)
コントロール	1.289±0.001
成分 A 処理毛	1.286±0.001
成分 B 処理毛	1.286±0.002
成分 C 処理毛	1.292±0.001

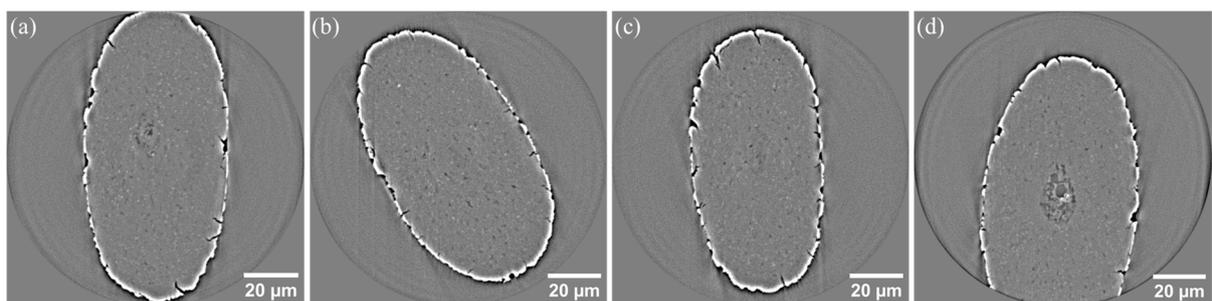


Fig. 1 各毛髪サンプルの X 線 CT による断層像  
(a)コントロール、(b)成分 A 処理毛、(c)成分 B 処理毛、(d)成分 C 処理毛

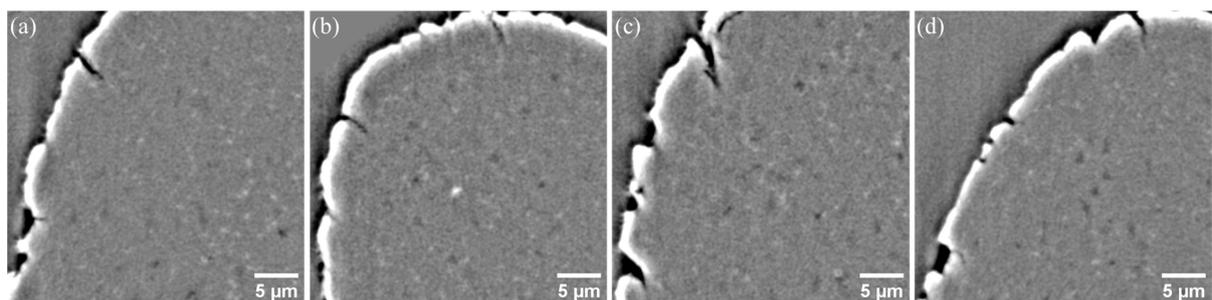


Fig. 2 各毛髪サンプルの X 線 CT による断層像の拡大図  
(a)コントロール、(b)成分 A 処理毛、(c)成分 B 処理毛、(d)成分 C 処理毛

## 参考文献：

- [1] I. J. Kaplin *et al.*, *Cosmet. Toil.*, **97**(8), 22 (1982).
- [2] V. Kaushik *et al.*, *Int. J. Cosmet. Sci.*, **44**, 289 (2022).
- [3] Len Ito *et al.*, *Status Report of Hyogo-Beamline with Research Results*, **5**(6), 20 (2016).
- [4] A. Takeuchi *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **463**, 012034 (2013).