

## 走査型 X 線微分位相顕微鏡を用いた光損傷毛髪を観察 Observation of Photo-damaged Hair Using Differential Phase Scanning X-ray Microscopy

井上 敬文<sup>a</sup>, 河合 朋充<sup>a</sup>, 藤森 健<sup>a</sup>, 竹原 孝二<sup>a</sup>,  
竹内 晃久<sup>b</sup>, 上杉 健太郎<sup>b</sup>, 鈴木 芳生<sup>b</sup>  
Takafumi Inoue<sup>a</sup>, Tomomitsu Kawai<sup>a</sup>, Takeshi Fujimori<sup>a</sup>, Kouji Takehara<sup>a</sup>,  
Akihisa Takeuchi<sup>b</sup>, Kentaro Uesugi<sup>b</sup>, Yoshio Suzuki<sup>b</sup>

<sup>a</sup>(株)カネボウ化粧品, <sup>b</sup>(公財)高輝度光科学研究センター  
<sup>a</sup>Kanebo Cosmetics Inc., <sup>b</sup>JASRI

走査型 X 線微分位相顕微鏡により、毛髪の内外部微細構造を観察し擬似太陽光照射による変化の検出を試みた。通常の日本人がひと夏に受ける日光に相当する光照射(40 MJ/m<sup>2</sup>)で、パーマ処理毛髪ではコルテックスやキューティクルでの空隙率の低下が認められた。また、メラニン量が低下する傾向が認められた。一方、未処理毛髪やブリーチ処理毛髪では有意な変化は観察されなかった。

**キーワード：** 毛髪、光損傷、X 線 CT、マイクロ CT、位相 CT、走査型 CT

### 背景と研究目的：

通常の X 線を用いたマイクロ CT では、前処理などを施さないインタクトな状態で毛髪内部構造の観察を行うには感度が低く、詳細な観察は困難であった。われわれは走査型 X 線微分位相顕微鏡を用いた CT 観察で高い感度で毛髪内部の構造観察を実施できることを見出し、パーマ処理やブリーチ処理で生じる毛髪内部の構造変化を報告している[1]。一方、光照射により毛髪の形態が変化することは UV 照射による毛髪表面の構造変化が報告されているが[2]、毛髪内部微細構造の形態変化に関する知見は得られていない。本課題では走査型 X 線微分位相顕微鏡を用いて擬似太陽光照射毛髪を観察し、光照射により引き起こされる毛髪内部の微細構造の変化を把握することを目的とした。特にパーマやブリーチなどの化学処理を施した毛髪と未処理の毛髪で、光照射に対する応答がどのように異なるのかを調べた。

### 実験：

毛髪試料は、東洋人女性由来のものを使用し、従来の報告と同一の方法[1]でパーマ処理、ブリーチ処理を実施した。未処理毛髪、パーマ処理毛髪、ブリーチ処理毛髪に対してキセノンランプを光源とするウェザーメーター(スガ試験機、XL75)を用いて擬似太陽を照射した。照射量は、10 MJ/m<sup>2</sup>、20 MJ/m<sup>2</sup>、40 MJ/m<sup>2</sup>で、未照射対照はアルミホイルで遮蔽し照射毛髪と同一環境で処理を実施した。

毛髪内部構造は走査型 X 線微分位相顕微鏡を用いた CT で観察したが[3]、本研究では BL20XU にて 8 keV のマイクロビーム X 線を用いた室温で測定した。毛髪試料の二次元屈折率差分布の再構成演算は、hann フィルターを用いた平行ビーム照射近似における Convolution Back Projection 法に基づき、ビームラインで提供されているソフトウェアを用いた。本研究では毛髪を大気中で測定しており自由電子近似が成立し、得られた屈折率差は電子密度に比例する。また、生体試料である毛髪の形状変化を議論する上では、毛髪の電子密度分布が概ね質量密度分布に対応すると解釈して差し支えないと考えられる。

空隙率は測定した任意の該当部分の全面積に対する空隙面積の比率である。空隙(低密度領域)あるいはメラニン顆粒(高密度領域)の面積は得られた再構成画像をフリー画像解析ソフト Image J を用いて 8 bit に変換後、2 値化することで測定した。2 値化の閾値は平均値から標準偏差の 2 倍の上下値(Mean±2σ)とした。通常 3σ が閾値とされるが、本研究においては再構成画像の目視でのイメ

ージとよく一致する  $2\sigma$  を採用した。

### 結果：

毛髪の内蔵構造はこれまでと同様の形態[1]として観察された(図 1)。キューティクルは細胞が角化して形成したスケールが重なり合った構造体で毛髪の外層に存在するが、キューティクル部位の空隙は、重なり合ったスケールが部分的に剥離したような形態として捉えられた。コルテックスはケラチン繊維が規則的に充填された構造体であるが、毛髪コルテックス部位の空隙は直径がミクロンあるいはサブミクロンサイズの円柱の横断面として観察された。また、コルテックス部位にはメラニン顆粒がサブミクロンサイズの高密度のシグナルとして捉えられた。毛髪中心部位は大きな空隙を含む構造体であるメデュラが観察された。

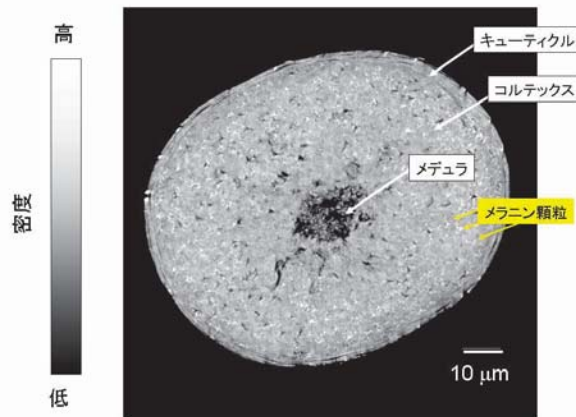


図 1. 毛髪内蔵構造の観察例(パーマ処理、疑似太陽光未照射毛髪)

未照射毛髪および疑似太陽光照射毛髪を観察した再構成画像を目視で比較したところ、疑似太陽光照射でコルテックスに存在する空隙のサイズが変化した可能性が示唆された。この変化を定量的にとらえるため、毛髪コルテックス空隙率を求めた。また、別の構造変化の可能性を検出するため、キューティクルの空隙率およびメラニン顆粒の面積比率を求めた。コルテックス部位の空隙率は、疑似太陽光未照射の状態のパーマ処理と未処理毛髪を比較すると、パーマ処理毛髪空隙率が高くなっていた (図 2)。これは以前調べた結果[1]に合致しており、今回の実験でも毛髪構造変化の傾向は把握できたものと考えられる。

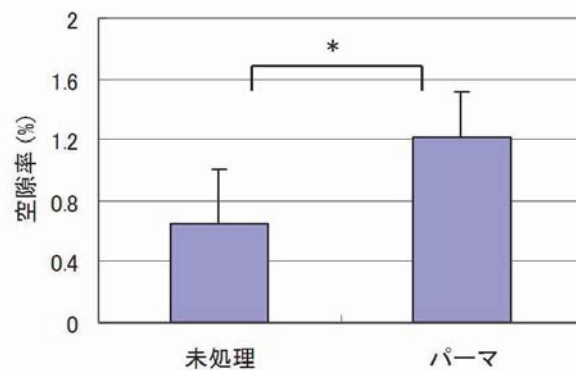


図 2. 未照射毛髪コルテックスの空隙率

平均値 ± 標準偏差、未処理(n=6)、パーマ処理(n=8)、\*:  $P < 0.05$  t 検定。

図 3 には dose の異なる疑似太陽光を照射した毛髪でのコルテックス部位での空隙率の変化を示した。毛髪試料は同一個人由来のものを用いているが、個々の毛髪繊維(ファイバー)間で空隙率がかなり異なっていた。パーマ処理毛髪では疑似太陽光照射により空隙率が低下したが、未処理毛髪やブリーチ毛髪では空隙率の変化は観察されなかった。通常の日本人がひと夏に受ける日光に

相当する光照射(40 MJ/m<sup>2</sup>)群と未照射群を比較すると t 検定で有意な差異が認められた(p<0.01)。この結果は擬似太陽光照射による構造変化がパーマ処理毛髪で生じやすいことを示している。尚、10 MJ/m<sup>2</sup>の試料数が少ない理由は光照射による変化が予測より少ないことが実験中の再構成画像から推定され、他の dose での測定を行ったためである。

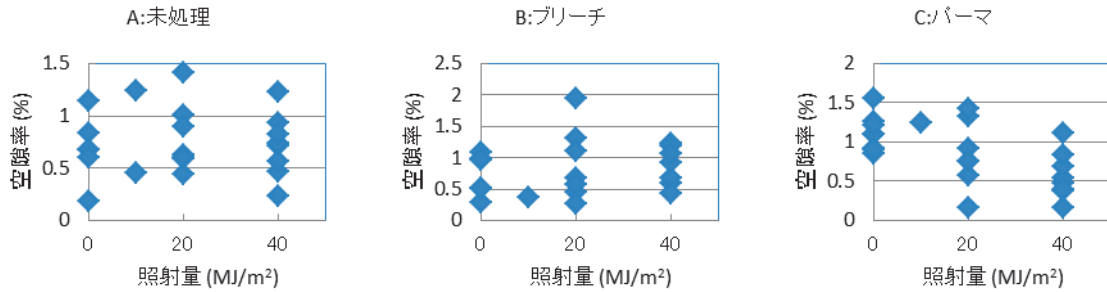


図 3. コルテックスでの空隙率の変化。測定した毛髪試料ごとにプロットした。

メラニン顆粒の面積比率に対する擬似太陽光の影響を比較した(図 4)。毛髪では、メラニン顆粒はキューティクルやメデュラではほとんど見られず、主にコルテックスに存在する。コルテックス空隙率の低下と同様にパーマ処理毛髪でメラニン顆粒比率の低下傾向が観察された(未照射群と 40 MJ/m<sup>2</sup>照射群、t 検定、p<0.1)。尚、メラニンはブリーチ処理でかなり分解するためブリーチ処理毛髪での解析は本来のメラニン顆粒を必ずしもとらえていない可能性がある。

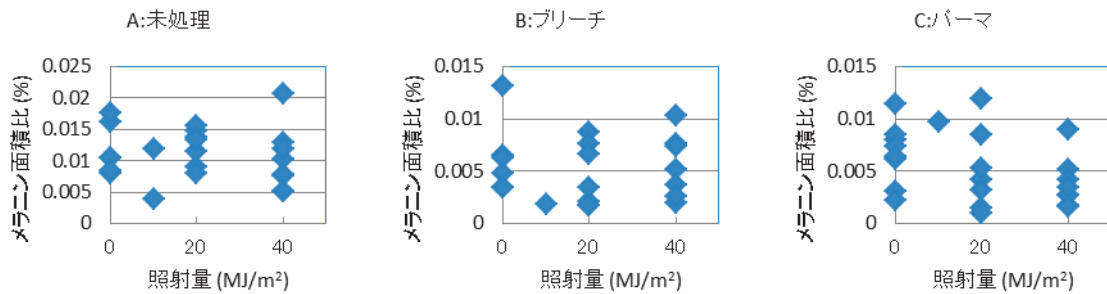


図 4. メラニン顆粒の面積比率の変化。測定した毛髪試料ごとにプロットした。

キューティクルの空隙率を調べた結果を図 5 に示す。キューティクルの空隙率の変化はコルテックスと同様にパーマ処理毛髪では空隙率が低下していた(未照射群と 40 MJ/m<sup>2</sup>照射群、t 検定、p<0.05)。

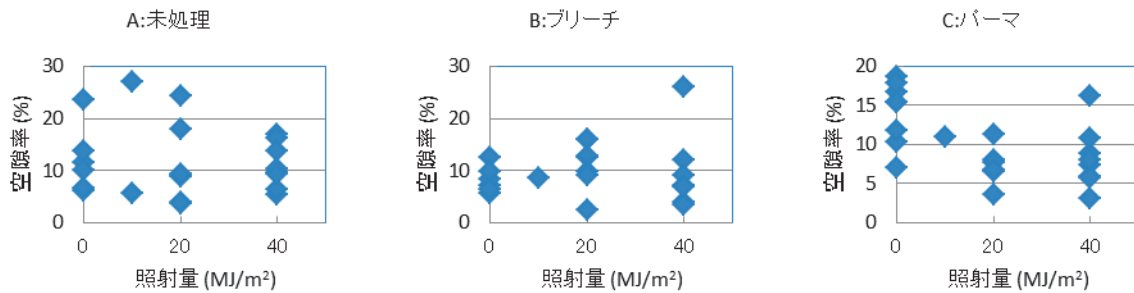


図 5. キューティクルの空隙率の変化。測定した毛髪試料ごとにプロットした。

### 考察：

光照射により毛髪の形態が変化することは UV 照射による毛髪表面の構造変化が報告されているが[2]、毛髪内部微細構造の形態変化に関する知見は得られていない。本課題では、走査型 X 線微分位相顕微鏡を用いて擬似太陽光照射毛髪を観察し、光照射により引き起こされる毛髪内部の微細構造を観察した。その結果、パーマ処理毛髪ではコルテックスやキューティクルの空隙率の低下が認められた。また、メラニン量が低下する傾向が認められた。この結果は毛髪表面だけでなく毛髪内部においても毛髪構造が変化していることを示すもので、光照射による毛髪損傷の新たな特徴を提示したことになる。

ブリーチ毛髪や未処理毛髪では、パーマ処理毛髪で見られた変化が認められなかった。この結果は毛髪の状態で光照射による損傷の程度が異なることを示している。どのような状態の毛髪が、どのような変化を受けやすいのかを明らかにしていくことが、今後の課題となる。また、産業利用の観点からは、本研究で見出した毛髪の構造変化と消費者が感じる毛髪の日焼けの関連を考察するとともに、光損傷を防止・抑制する手法や損傷を回復する手法の開発に取り組みたい。

### 参考文献：

- [1] 井上敬文 他、日本化粧品技術者会誌、**46**, 101-107, (2012).
- [2] Montiero V. F. et al., *J. Cosmet. Sci.*, **54**, 271-281, (2003).
- [3] Takeuchi A. et al., *AIP Conf. Proc.*, **1266**, 42-46, (2010).