



X線小角散乱を用いた毛髪内微細構造変化の解析

氏名 小林 和樹, 渡邊 紘介, 木村 洋則, 山本 晃大,
小松 寛武, 岸本 愛加, 鈴木 和之
株式会社ミルボン

キーワード：毛髪, X線小角散乱

1. 測定実施日

2024年9月26日 BL8S3 (2シフト)

2025年1月16日 BL8S3 (2シフト)

2. 概要

これまで毛髪の膨潤と乾燥に伴う毛髪構造変化は可逆的と考えられており、このような変化により毛髪ダメージが生じるとは考えられていなかった。しかし、我々のこれまでの研究から、毛髪の膨潤と乾燥を繰り返すこと（乾湿処理）で、毛髪の外観や毛髪強度などの力学特性、毛髪タンパク質の二次構造の変化が確認され、乾湿による毛髪内微細構造への影響が示唆された。そこで本研究では、乾湿によって生じる毛髪ダメージの機構をより詳細に明らかにすべく、あいちシンクロトロン光センターBL8S3においてX線小角散乱を用いて、乾湿処理を行った毛髪の毛髪内微細構造について解析を行った。その結果、乾湿処理に伴い、中間径フィラメント（IF）と中間径フィラメント結合タンパク質（IFAP）から成るIF/IFAPパッキング構造の崩壊が進行することが示された。

3. 背景と研究目的

女性が美しい髪を保ちたいという願望は世界共通に存在している。そして、多くの女性がヘアドライヤーやヘアアイロン、洗髪などの日常の美容習慣や、パーマやヘアカラーなどのケミカル施術を行うことで、髪を美しく整えている。しかし、これらの施術が毛髪ダメージの発生要因となることも広く知られており、このような毛髪へのダメージを補修し、髪的美しさを保つ製品開発が求められている。中でも、毛髪の膨潤と乾燥の繰り返しに伴う毛髪ダメージは、多くの女性がほぼ毎日洗髪を行っているのにも関わらず、そのダメージについては研究報告がない。これは、毛髪の膨潤と乾燥に伴う毛髪構造変化は可逆的と考えられており、このような変化により毛髪ダメージが生じるとは考えられていなかったためである。しかし、乾湿処理毛髪に関する我々のこれまでの研究から、毛髪の膨潤と乾燥を繰り返すことで、毛髪の外観や毛髪強度などの力学特性、毛髪タンパク質の α -helix比の減少が確認され、毛髪コルテックス内における中間径フィラメント（Intermediate Filament: IF）（Fig. 1）の α 結晶におけるIFパッキング構造の変化が示唆された。また、IFの周辺に存在する中間径フィラメント結合タンパク質（Intermediate Filament Associated Protein: IFAP）もIFの α 結晶の安定性に寄与することから、乾湿処理に伴って毛髪コルテックスを構成するIF/IFAP凝集体のパッキング構造が変化すると考えられた。

そこで本研究では、毛髪の膨潤と乾燥の繰り返して生じる毛髪ダメージをより詳細に明らかにすべく、あいちシンクロトロン光センターBL8S3においてX線小角散乱（SAXS）を用いて、乾湿処理に伴う毛髪のIF/IFAPパッキング構造の変化について解析を行った。

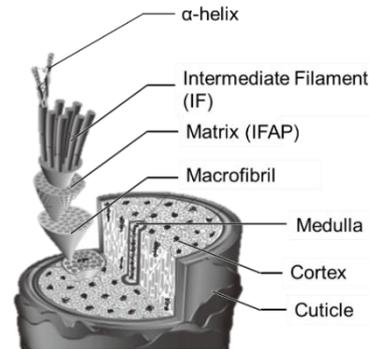


Fig. 1 : 毛髪の階層構造¹⁾

4. 実験内容

化学処理を受けていない日本人女性の黒髪（長さ 15 cm, 0.5 g）を、5.0% (w/v) ポリオキシエチレンラウリルエーテル硫酸ナトリウム水溶液に室温で 60 分間浸漬した。その後、精製水で十分に水洗し風乾することで、未処理毛髪を作製した。続いて、精製水に毛髪を約 30 秒間浸漬させた後、ドライヤーで冷風乾燥する乾湿処理を 365 回繰り返すことにより、乾湿処理毛髪を作製した (Fig. 2)。得られた毛髪を 60 本並行に並べたものを毛髪サンプルとし、その繊維軸に対して X 線を垂直に照射し、2 次元の小角散乱像を測定する。その際の測定条件は、波長 0.92 Å、カメラ長 4 m、露光時間 120 秒に設定し、0.7 - 0.8 nm⁻¹ 付近に出現する IF 由来のピークを測定する。Fig. 3 に典型的な健常毛髪の 2 次元小角散乱像を示す。赤道軸上、面間隔 $d = 90 \text{ \AA}$ に相当する位置付近に IF の配列に由来する散乱ピークが観測される。得られた赤道方向の散乱プロファイルから、Briki らの方法²⁾に従い、Fig. 4 (a) に示す IF 半径、IF 間隔、IFAP 間隔を求めた。また、得られた方位角方向の散乱プロファイルから、Kajiura らの方法³⁾に従い、半値全幅 FWHM の値から IF 配向性を評価した。FWHM は、毛髪繊維軸に対する IF の傾き角度の分散 (Fig. 4 (b)) を反映し、その値が大きい程 IF の繊維軸に対する配向性が低いことを意味する。



Fig. 2 : 乾湿処理毛髪の作成方法

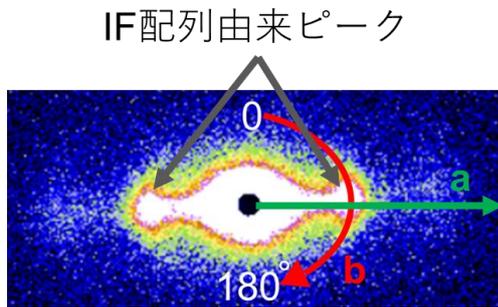


Fig. 3 : 典型的な健常毛髪の 2 次元小角散乱像
a: 赤道軸方向の散乱プロファイル
b: 方位角方向の散乱プロファイル

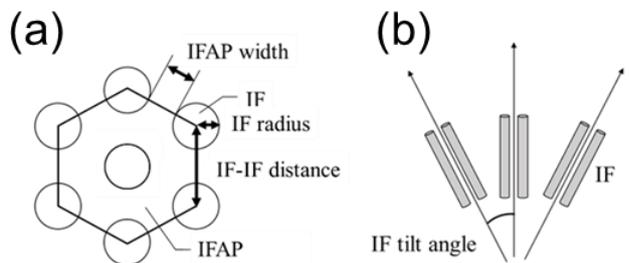


Fig. 4 : IF/IFAP の模式図
(a) 横断面方向の模式図、(b) 縦断面配置の模式図

5. 結果および考察

未処理毛髪および、乾湿処理毛髪の散乱強度プロファイルを上記方法で解析したところ、IF 間隔および、FWHM において有意な差は確認されなかったが、IF 半径は増加し、IFAP 間隔は減少することが確認された (Fig. 5)。また、我々のこれまでの研究から、乾湿処理に伴って毛髪内タンパク質の α -helix 比が減少することも確認されている。従って、IF 半径の増加は α -helix 構造の崩れに起因する IF パッキング構造の変化によって引き起こされ、同時に IFAP にも構造収斂様の変化が生じていることが示唆された。毛髪が膨潤する際に IF/IFAP 間に水が入り込むことで IF が膨潤するが、この時 IFAP は IF の膨潤を抑制する役割を果たしていると考えられている⁴⁾。しかし、膨潤と乾燥を繰り返すうちに IFAP に歪みが蓄積されていき、それに伴って IF の膨潤を抑制する力が弱まり、膨潤した IF が完全な元の状態に戻らなくなった結果、IF 半径が増加し、IF/IFAP パッキング構造が崩れたと考えられる。

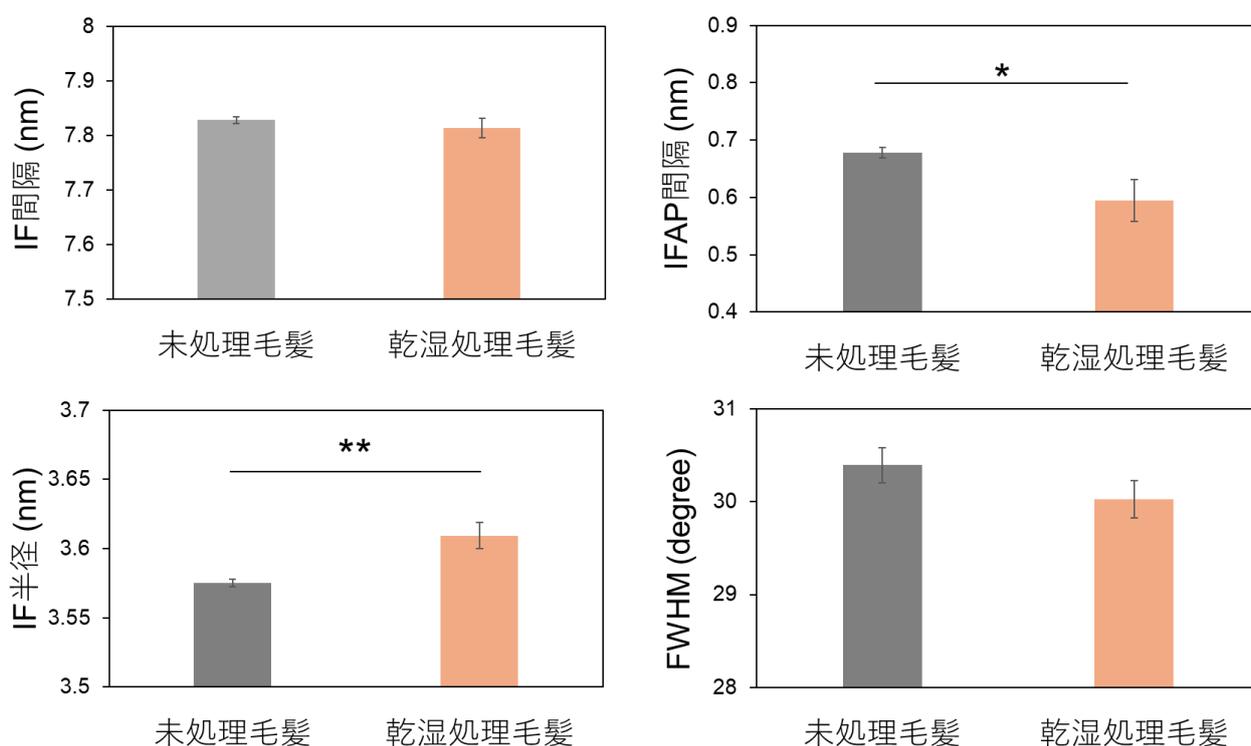


Fig. 5 : IF/IFAP の構造パラメーター、未処理: $N = 24$, 乾湿処理: $N = 30$, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

6. 今後の課題

本研究では、毛髪の膨潤と乾燥の繰り返しのに伴い、IF/IFAP パッキング構造の崩壊が進行することが示された。今回得られた結果を踏まえて、乾湿処理に伴って生じた毛髪ダメージの効果的な補修技術の確立に向けて、来期以降さらに検討を進めていく予定である。

7. 参考文献

1. 新井幸三, 毛髪ケラチン繊維の力学物性を制御する階層構造, *J. Soc. Cosmet. Chem. Jpn.*, 49(1), 2015: 2-15.
2. F. Briki et al., Organization of microfibrils in keratin fibers studied by X-ray scattering: Modelling using the paracrystal concept. *Biochem. Biophys. Acta*, **1429**, 1998: 57-68.
3. Y. Kajiura et al., Structural analysis of human hair single fibres by scanning microbeam SAXS, *J. Struct. Biol.*, **155**, 2006: 438-444.
4. D. S. Fudge, J. M. Gosline, *Proc. Royal Soc. London.*, **B271**, 2004: 291-299.