

## 毛髪構造ダメージの階層別評価とヘアケア製品開発への応用

美研創新株式会社 研究開発部

曾 海峰／林 嫻婷／中村 美佐／楊 建中

### 1. はじめに

毛髪は、人の印象や外見に大きく影響する要素であり、色調・質感・スタイルの違いは自己表現の一環として重視されている。中でも、アジア人に多く見られる黒く太い直毛は、欧米人に比べて髪色や形状のバリエーションが限定されやすく、美容意識の多様化に伴い、明るい髪色や立体感のあるスタイルへの関心が高まっている。

こうした傾向を背景に、ブリーチやカラーリング、パーマ、縮毛矯正といった高強度な化学処理の実施頻度は年々増加しており、それに伴い毛髪のダメージも複雑化・多様化している。損傷の進行度や損傷様式に応じた適切な補修戦略の構築に加えて、その効果を科学的かつ定量的に示す評価技術の重要性は一層高まっている。

毛髪ダメージに関する評価技術はすでに多数存在しているものの、その多くは局所的な変化に着目したものであり、毛髪全体の「構造状態」に基づいて整理・体系化された評価枠組みは、いまだ十分に確立されていない。そのため、製剤開発や有効性検証といった実務への応用は限定的であるのが現状である。

本稿では、毛髪の構造をF-layer (脂質膜)、毛小皮 (キューティクル)、細胞膜複合体 (CMC)、毛皮質 (コルテックス) といった階層に分け、そ

れぞれに対応したすでに報告されている評価手法を整理・体系化する。さらに、それらの技術が滑らかさ・光沢・切れ毛抑制といった感覚的性能とどのように関係しているかを明らかにし、ヘアケア製品の設計及び効果検証への応用可能性について検討する。

### 2. 毛髪の構造基盤と階層的ダメージの発生

#### 2.1. 毛髪の多層構造と毛髪化学結合

毛髪は角化タンパク質を主成分とする複合構造体であり、分子レベルからマクロ構造に至るまで階層的に組織されている。まず、右巻きの $\alpha$ -ヘリックスが左巻きのコイルドコイル構造を形成し、これらが束ねられて中間径フィラメント (keratin intermediate filament: KIF) を構成する。KIFはさらに集束してマクロフィブリルを形成し、ケラチン関連タンパク質 (keratin-associated proteins: KAP) との複合体を経て、毛皮質や毛小皮といった高次構造単位へと組織化される。このようなKIF-KAPネットワークは、毛髪の力学的強度や熱安定性の基盤をなしている<sup>1)</sup>。

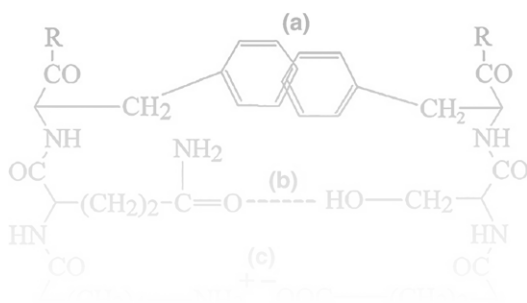
とりわけ毛皮質においては、KIFとKAPが複合的に架橋し、応力伝達と変形抵抗の両立を担っている。また、毛髪表面のF-layerに存在する疎水性脂質や、CMC内部の $\delta$ -レイヤーは、水分調

節や保湿性において重要な役割を果たす。

これらの階層構造は、「毛髪化学結合 (hair chemical bonds)」によって三次元的に連結されており、毛髪における構造的強度と動的応答性の両立を可能にしている。ここでいう毛髪化学結合とは、Breakspearらの報告によれば、毛髪内にはジスルフィド結合、水素結合、イオン結合、疎水性相互作用などの代表的な分子間結合が存在し、それらが構造安定性及び機能性に深く関与している。図1は、同報告に掲載された図を引用したものである<sup>2)</sup>。これらの化学結合は、機能的特徴に応じて以下のように分類される：

- 共有結合：(d) ジスルフィド結合 (disulfide bond)、(e) イソペプチド橋 (isopeptide bond)
- 非共有結合：(b) 水素結合 (hydrogen bond)、(c) 塩橋 (ionic bond)、(a) 疎水性相互作用 (hydrophobic interaction) など

これらの毛髪化学結合は、毛髪を構成する各構



造階層に広く分布しており、構造の「骨格形成」と「柔軟性維持」の両面から安定性を支えている。中でも、ジスルフィド結合などの強固な共有結合は、ケラチンネットワークの立体構造を維持する基盤となり、一方で非共有結合は、温度や湿度といった外的環境の変化に応答して可逆的な構造調整を可能にする。このような毛髪化学結合のネットワークが破綻すると、構造階層ごとの安定性が損なわれ、滑らかさ・光沢・強度といった毛髪の感知性能が著しく低下し、損傷の顕在化を引き起こす。

## 2.2. 構造階層ごとのダメージ発生様式

毛髪は、F-layer、毛小皮、CMC、毛皮質といった多層構造によって構成されており、それぞれの構造階層は固有の機能と強度を有している。毛髪ダメージは、外的ストレスの種類や強度に応じて、これらの構造階層に段階的かつ連鎖的に波及する傾向がある。代表的な損傷経路は以下のとおりである：

- F-layer：18-MEA（18-メチルエイコサン酸）が酢酸エステル結合を介してタンパク質表面に結合し、毛髪表面に撥水性と滑沢性を付与している。しかし、洗浄・アルカリ処理・酸化剤などにより容易に除去される。これにより毛髪表面が親水化し、摩擦係数の上昇や感触の劣化が引き起こされる<sup>3) 4)</sup>。
- 毛小皮：ブラッシングや乾湿サイクルによる

これ以降の閲覧を希望の場合は、本誌をご購読ください。