

# 美しく見える髪の毛の構造

長瀬 忍・四分一 敬

## Beautiful Hair Appearance and Hair Structure

Shinobu NAGASE and Satoshi SHIBUICHI

Relationship between beautiful hair appearance and hair structure is summarized in this article. The hair appearance is varied depending on hair color, shape and optical properties of hair fiber and of the fiber bundle. The structural conditions for the beautiful hair appearance were determined, based on the comparative observations of microstructure and macroscopic appearance. The following conditions were obtained; 1) well-ordered fiber alignment to optimize reflection from each fiber, 2) well-ordered surface structure to lead sharp reflection from the surface of fiber, 3) pore-less structure in the internal hair fiber to minimize internal scattering and to maximize the reflection from the back surface of fiber, and 4) appropriate cross-sectional shape to lead brilliant shine, especially for blond hair.

**Key words:** hair, structure, luster, color, light scattering, shape

哺乳類の体表を覆う毛髪は、物理的な衝撃の緩和や有害なUVの遮蔽など、さまざまな外的環境から身体を保護する機能があるといわれている。その一方で、異性に個々の存在をアピールするなど、生存する上で必要な外観を表す役割もあると思われる。現代社会に生きるわれわれ人間にとっては、毛髪の実在意義は生死を左右するほどには大きくないと思われる。しかしながら、見た目の印象で対人関係が左右される場合も多々あり、見た目の印象の中で毛髪(頭髪)の外観が占める割合は少なくはないと考えられる。

毛髪の外観を決める因子として、毛髪繊維の形・色・光学的な特性が挙げられる。また、われわれの頭部には直径50~100  $\mu\text{m}$ の毛髪が約10万本存在するため、毛髪の外観には繊維集合体としての光学特性も反映されている。髪色が見え方に及ぼす影響の例として、暗い色の黒髪と明るい色の茶髪、さらに欧米人の金髪の写真を図1(520ページ)に示す。これらは、見え方はそれぞれ異なっているが、いずれも美しいと評価されたものである。本稿では、このような髪色別に美しく見える毛髪と構造との関係について、最近の知見も含めて簡単に解説する。

## 1. 毛髪 の 構造

毛髪の基本構造を図2に示す。毛髪はおもに、表面を覆ううろこ状のキューティクル、内部のほとんどを占める繊維状のコルテックス、さらに毛髪中心部に存在するメデュラからなる。これらの組織は、種々のダメージを受けることにより、その構造が変化する。これらの構造変化は毛髪繊維の光学特性に影響を及ぼし、その結果、毛髪外観の変化として人に認知される。以下、これらの組織構造について詳しく説明する。

### 1.1 キューティクル

毛髪表面に存在するキューティクルは、厚さ約500 nmの板状の細胞が5~10枚重なった構造である。キューティクルの層構造には方向性があり、図2に示すように、1枚1枚のキューティクル細胞が少しずつずれて配置し、屋根瓦のように根元から毛先に向けて広がる方向に傾斜している。この傾斜角度はおおむね2~3度である。毛髪の最表層に位置するキューティクルは、日常の洗髪や乾燥、ブラッシングなどの物理的な刺激を断続的に受けているため、徐々に構造が損傷し、最外層から順次剥がれ落ちる。

### 1.2 コルテックス

キューティクルの内側にはコルテックス細胞が存在す

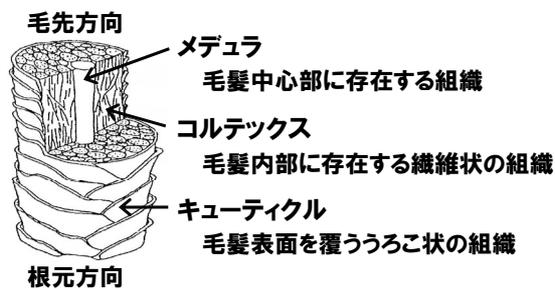


図2 毛髪の構造。

る。コルテックス細胞は太さ約 $6\mu\text{m}$ 、長さ約 $100\mu\text{m}$ の、繊維状の細長い細胞である。コルテックス細胞内部には、直径 $100\sim 400\text{nm}$ のマクロフィブリルとよばれる繊維状の組織や、直径約 $500\text{nm}$ の球状のメラニン色素顆粒が存在する。元の髪色は、このメラニン色素顆粒のタイプと量で決まる。ブリーチやヘアカラー処理では酸化剤によりメラニン色素顆粒が部分的に破壊されるため、過剰に行くと空洞が発生し、光の散乱源となる。また、これらの化学処理はコルテックス細胞内部の他の組織にも損傷を引き起こし、微細な空孔を発生させるため、見え方に影響を及ぼす。

### 1.3 メデュラ

毛髪の中心部にはメデュラとよばれる組織が存在することが多い。メデュラはしばしば多孔質化して光の散乱源となる。メデュラが多孔質化していない場合でも、ブリーチなどの化学処理や、ドライヤーやヘアアイロンなどの加熱処理によって、多孔質化が進行し光を散乱するようになる。

## 2. 髪色ごとの毛髪の見え方と毛髪構造

毛髪の見え方には毛髪繊維の形・色・光学的な特性が反映されるが、この章では、図1に示したような髪色ごとに

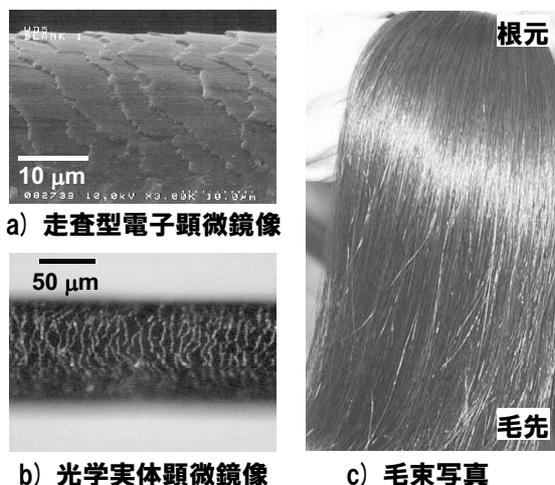


図3 キューティクル構造が整った毛髪の顕微鏡像と見え方。

毛髪の見え方と毛髪構造との関係について述べる。

### 2.1 暗い色の毛髪（黒髪）

日本人の黒髪のように髪色が濃い場合、毛髪内部に入射した可視光はそのほとんどがメラニン色素顆粒に吸収される。それゆえ、毛髪の見え方にかかわるおもな成分は、毛髪表面の反射光である。毛髪表面の反射光は、毛髪表面に存在するキューティクルの状態を大きく反映する。キューティクルの構造が乱れると、表面構造の乱れに起因して正反射光が低下するとともに拡散光が増加し、結果として毛髪の艶感が低下する<sup>1)</sup>。

キューティクル構造の乱れがほとんどない毛髪（黒髪）の、走査型電子顕微鏡像と光学実体顕微鏡像、また毛束の写真を図3に示す。この毛髪の場合、毛髪表面のキューティクルが整っているため（図3a）、光学実体顕微鏡で見るとキューティクルのエッジのみで弱い散乱光が観察される（図3b）。この毛髪の毛束を見ると、毛髪表面の正反射光に起因するハイライトが比較的シャープで、艶感が高い様子が観察される（図3c）。

これに対して、ダメージを受けてキューティクル構造が乱れた毛髪の場合（図4a）、光学実体顕微鏡で見ると、構造が乱れたキューティクルのエッジ近傍に比較的強い散乱光が観察され、全体的に明るくなっていることがわかる（図4b）。この毛髪の毛束は、キューティクルの乱れに起因する拡散光が増加するため、正反射光のハイライトがやや弱くブロードに広がり、艶感が低下する様子が観察される（図4c）。

以上のような毛髪表面の正反射光・拡散光の変化は、変角光度計（ゴニオフォトメーター）を用いて測定することができる。変角光度計では光反射強度の角度依存性が測定

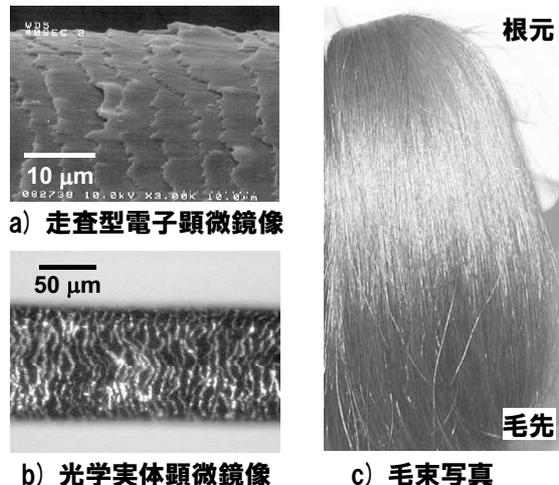
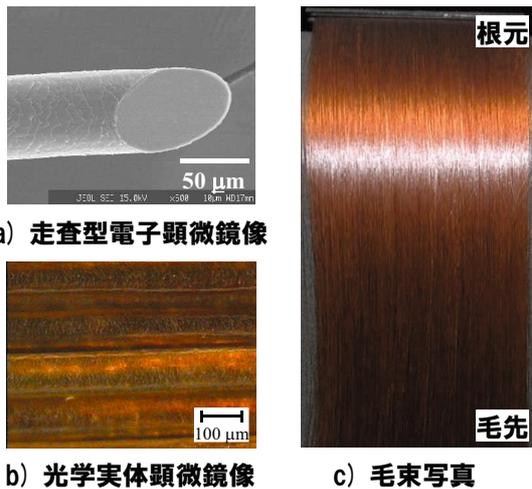


図4 キューティクル構造が乱れた毛髪の顕微鏡像と見え方。

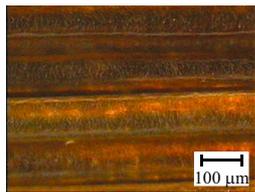


a) 暗い色の黒髪      b) 明るい色の茶髪      c) 欧米人の金髪

図1 美しい毛髪の見え方の例.



a) 走査型電子顕微鏡像

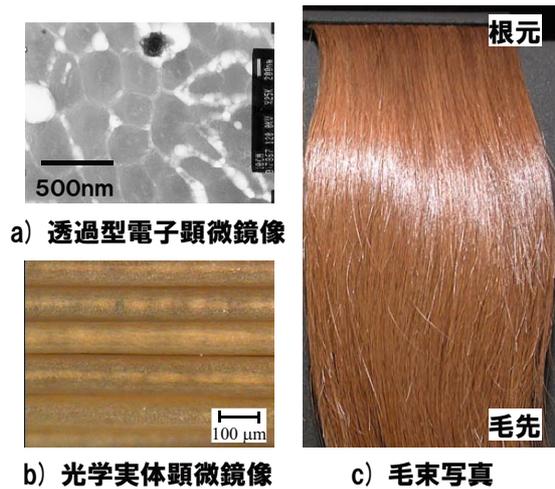


b) 光学実体顕微鏡像

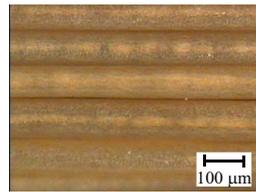


c) 毛束写真

図5 内部に光散乱源がない毛髪の顕微鏡像と見え方.



a) 透過型電子顕微鏡像

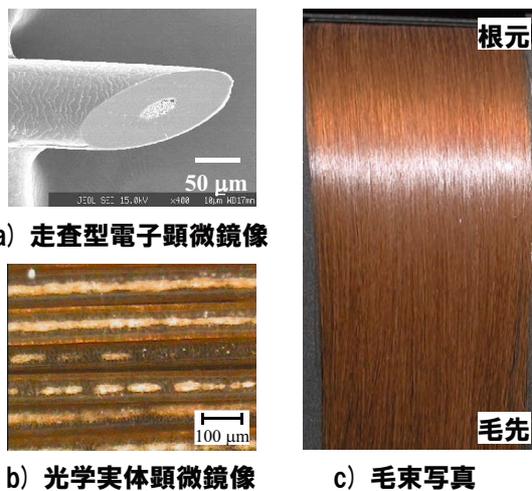


b) 光学実体顕微鏡像

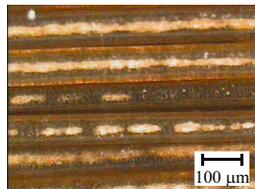


c) 毛束写真

図7 コルテックスに微細空孔が発生した毛髪の顕微鏡像と見え方.



a) 走査型電子顕微鏡像

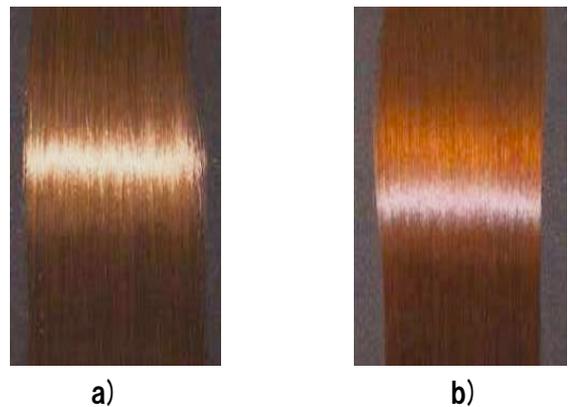


b) 光学実体顕微鏡像



c) 毛束写真

図6 メデュラが多孔質化した毛髪の顕微鏡像と見え方.



a)

b)

図8 キューティクルの構造と表面・背面正反射光の見え方. a) キューティクルがない毛髪(ナイロン毛), b) 整ったキューティクルが存在する毛髪.

されるため、表面のキューティクル構造の乱れに伴って、表面正反射光に対応するピーク強度が低下するとともに、ピークがブロードになる様子が観測される。

## 2.2 明るい色の毛髪(茶髪)

ブリーチなどで人工的に明るくしたいいわゆる「茶髪」の場合、毛髪内部のメラニン色素顆粒が部分的に破壊されて

いるため、毛髪内部に入射した可視光の一部は毛髪内部を透過・反射・拡散して、再び毛髪外に出てくる。このように毛髪内部を通過して出てくる可視光は、毛髪内部に残ったメラニン色素顆粒やヘアカラーの染料により波長成分の一部が吸収されるため、その波長構成に応じた髪色が認知される。さらに、毛髪内部の光の反射・拡散挙動は毛髪の構造変化に応じて変わるため、目に見える艶感や質感も毛髪の構造変化に応じて変化する<sup>2,3)</sup>。

図5に、毛髪内部に光を散乱する構造がほとんどないブリーチ直後の茶髪、走査型電子顕微鏡像と光学実体顕微鏡像、また、毛束の写真を示す。この毛髪の場合、毛髪内部に光散乱源となる微細な空孔がほとんどないため(図5a)、毛髪が透明な様子が観察される(図5b)。この毛髪の毛束は表面正反射光の白色のハイライトに加え、その上方に毛髪内部を透過して毛髪の反対側の表面(背面)で正反射した光の着色したハイライトも明瞭に観察される(図5c)。それ以外の部分は、表面と内部の拡散光がほとんどないため、暗く見えている。その結果、正反射光の部分とそれ以外の部分とのコントラストが高く、艶感が高く感じられる。

ブリーチやヘアカラー、さらに日常の洗髪・乾燥・ブラッシングの繰り返しなどによってダメージを受けると、毛髪内部に微細な空孔が発生するため、内部での散乱光が観察されるようになる。毛髪中心部のメデュラが多孔質化した茶髪の場合(図6a)、多孔質化したメデュラ部分に明るい散乱光が観察される(図6b)。この毛髪の毛束を観察すると(図6c)、表面正反射光の白色のハイライトは明瞭に観察されるものの、その上方の背面正反射光の着色したハイライトはやや不明瞭になっている。またハイライト以外の部分でも散乱光が観察されるため、全体的に髪色が明るく見える。そのため、図5の毛髪と比べるとやや艶感に劣る。

ダメージの程度が激しい場合には、毛髪内部のコルテックス部にも微細な空孔が発生し、散乱光が観察されるようになる。図7aは、コルテックス部に微細な空孔が発生した茶髪の横断面の透過型電子顕微鏡像である。図中、最も黒く見えているのは部分的に破壊されたメラニン色素顆粒であり、灰色の部分はコルテックス細胞内部の繊維状のマクロフィブリルである。メラニン色素顆粒が部分的に破壊され、可視光の波長と同程度の数百ナノメートルオーダーの空孔が観察され、またマクロフィブリルの周辺に微細な空孔が並んで発生している様子も観察される。この毛髪の実体顕微鏡像を見ると、毛髪中心部の多孔質化したメデュラだけでなく、コルテックス部分でも散乱光が観察され、

毛髪全体が濁ったように見える(図7b)。この毛髪の毛束の場合、表面正反射光のハイライトは観察できるが、背面正反射光の着色したハイライトはほとんど観察されない(図7c)。これは毛髪内部に多くの光散乱源が存在するためである。それに対応してハイライト以外の部分の髪色がより明るく観察されるため、図5、6の毛髪に比べコントラストが低く、艶感に劣る。

以上のように、毛髪の色が明るくなると毛髪内部における構造変化を反映して見え方が大きく異なってくるが、毛髪表面のキューティクルも見え方に少なからぬ影響を与える<sup>3)</sup>。表面と背面の正反射光が別々に観察されることを上述したが、これはキューティクルの表面構造が傾斜しているためである。毛髪がダメージを受けると表面のキューティクルが徐々に剥がれ落ち、ダメージが激しい場合にはキューティクルが全くない毛髪も観察されるようになる。傾斜した表面構造を有するキューティクルがなくなってしまうと、表面と背面の正反射光がほぼ同じ位置に重なって見えるようになるため、ハイライトの光がやや色を帯びて観察され、金属的あるいは人工的な光沢感を示す(図8a)。一方、整ったキューティクルが存在する場合、キューティクルの傾斜した構造に依存して、表面と背面の正反射光が分離されて観察されるため、やや立体的な印象あるいは透明感に近い印象を受ける(図8b)。

このようなキューティクルの傾斜した構造の光学的な見え方への影響は、単純な幾何学計算により見積もることができる。ここでは詳細は省くが、毛髪のような半透明な円柱状の物体の場合、円柱の直径(毛髪:約100 $\mu\text{m}$ )に比べて円柱を観察する距離(人が頭髪を観察する距離:10~100cm)が3~4桁程度大きくなると、表面正反射光と背面正反射光の視角差はほぼゼロになり判別不可能になる。しかし毛髪のように表面が2~3度傾斜している場合、表面正反射光と背面正反射光の視角差はおおむね2度以上に保たれる。それゆえ、毛髪が適度に着色している場合、表面正反射光と背面正反射光は図8bのようにクリアに分離して観察される。このようなキューティクルの傾斜構造の影響について、詳しくは文献3を参照されたい。

以上のように、明るい色の茶髪の場合、その見え方には表面正反射光、表面拡散光に加え、毛髪内部を透過した背面正反射光や内部散乱光も大きく影響する。それゆえ毛髪表面のキューティクル構造に加え、内部のコルテックスやメデュラの構造変化が、見た目の艶感や質感を左右する。

これらの光学的な変化は、変角分光光度計(スペクトロゴニオフォトメーター)を用いて測定することができる。

この場合、毛髪表面における光散乱に加え、毛髪内部における光散乱と色素量の変化に対応して、各波長の表面正反射光・背面正反射光に対応するピーク強度の変化が観測される。また、キューティクルの傾斜構造の影響は、表面正反射光・背面正反射光のピーク位置の変化として観測される。詳しくは文献2, 3を参照されたい。

### 2.3 欧米人の金髪

ここまで、おもに日本人の毛髪を想定した黒髪と明るい色の茶髪の見え方と毛髪構造との関係を解説した。一方、欧米人の金髪の場合、上記の構造因子に加えて毛髪の断面形状も見え方に大きく影響する。日本人など東アジア人の毛髪の断面形状は真円に近いことが多いのに対し、欧米人の毛髪は断面形状が扁平であることが多い。このような断面形状の違いに起因して、毛髪内部を透過し反射・拡散する光の挙動も異なる<sup>4)</sup>。

図9に、欧米人の金髪のように断面形状が扁平な場合の、光の透過・反射挙動を示す。この場合、毛髪断面の真円率（短径/長径）は、欧米人の平均的な値0.7である。図中には、扁平な毛髪中を透過する光の光路を模式的に表した図と、アクリル製の楕円円柱に光を照射したときに観察される光の様子を示す。扁平な断面形状の毛髪にある角度から光を照射すると、毛髪内部に入った光の一部は毛髪内部で全反射し、別の角度から毛髪外に出てくる。また、他の一部は断面形状に基づくレンズ効果で部分的に集光される。健全な金髪の場合、毛髪断面形状が扁平なことに加

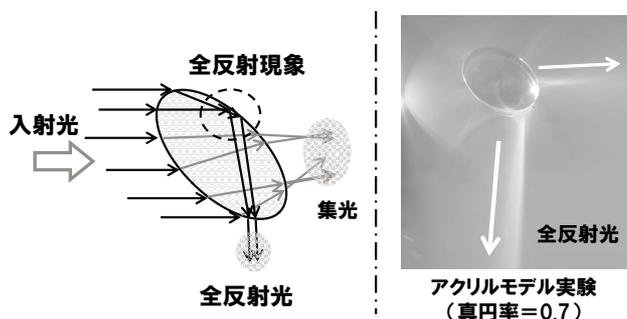


図9 扁平な毛髪内部の光の透過・反射現象。

え、メラニン色素顆粒の量が少なくまた毛髪内部に光散乱源がほとんどないため、毛髪内部を通過する光の強度も大きく、このような光学現象が金髪に特有な輝きとして認知される(図1c)。

### 3. 毛髪の見え方の加齢変化

ここまで、髪色ごとに毛髪繊維の構造と見え方との関係を解説してきた。しかし、毛束の見え方には毛髪の繊維集合体としての光学特性も反映されている。ここでは、毛髪の見え方の加齢変化を例として、毛髪の見え方と毛髪形状との関係について解説する<sup>5)</sup>。

毛髪に加齢現象としてよく知られているのは、白髪の増加と薄毛の進行である。一方で、多くの人々に認知されている加齢現象として「年を取ると髪に艶がなくなる」ことが挙げられる。図10に、各年代の日本人女性の頭髪の見

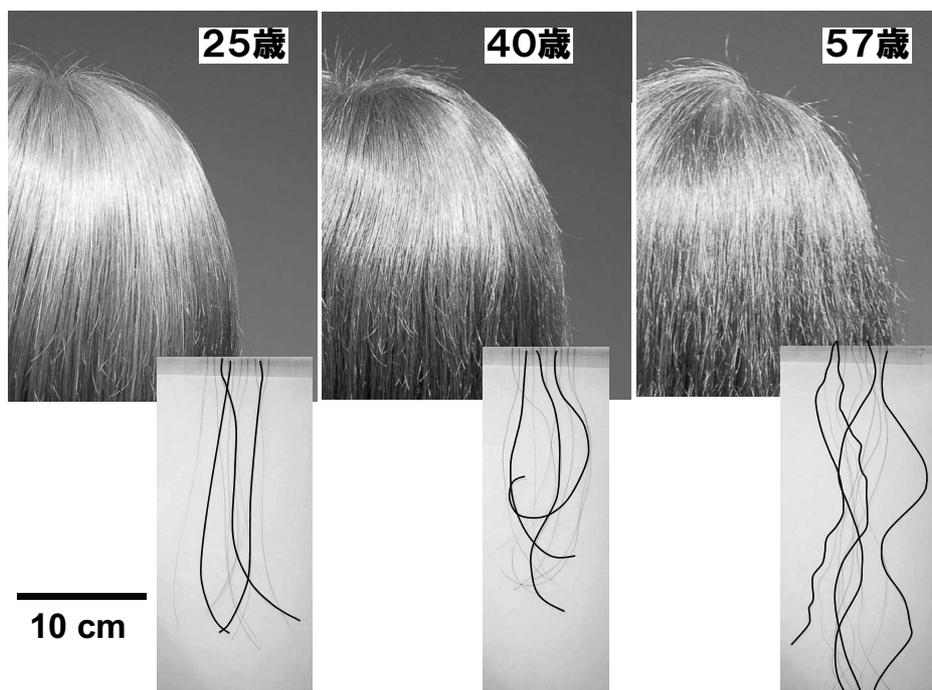


図10 各年代の毛髪外観と毛髪形状の比較(代表例)。

え方の代表例を示す。図中にはそれぞれの毛髪の形状も示した。艶があると評価された25歳女性の場合、毛髪が比較的真っすぐで束が揃っているため、表面正反射のハイライトがシャープに観察される。これに対して、40歳、57歳と年齢を経るに従って、うねった形の毛髪が増加し毛束の揃いが低下するため、毛髪1本1本の正反射光が毛束のさまざまな部位に観察され、結果として艶感に劣って見える。この図は代表例を示しているが、10歳代～60歳代の日本人女性230名の見た目の艶と毛髪形状との関係を調べた結果、加齢に伴う艶の低下は、カール半径の小さなうねった毛髪が増加することによる毛束の揃いの低下が主原因であることが示唆された。すなわち、毛髪の形の変化に起因して繊維集合体の束の構造（揃い）が乱れ、その結果、艶感が低下したと考えられる。

ここまで、髪色に応じて見え方に影響する構造因子が異なること、また毛髪繊維の光学特性に加え、繊維集合体としての光学特性も見え方に影響することを簡単に解説した。以上のことから、美しく見える髪を構造的な条件をまとめる。

- (1) 繊維集合体としての毛束が揃っていること：毛束の揃いが乱れていると、艶感にかかわる正反射光が毛束中のさまざまな部位で観察されるため、結果として艶感に劣る。
- (2) 毛髪表面のキューティクル構造が整っていること：キューティクル構造が乱れると、表面拡散光が増加し表面正反射光の強度が低下するため、艶感が低下する。

- (3) 毛髪内部のコルテックスやメデュラの構造が整っていること：茶髪や金髪などの明るい色の毛髪の場合、毛髪内部のメデュラやコルテックスの構造が損傷して微細空孔が発生すると、毛髪内部を通過する光を散乱するため艶感や質感に劣る見え方を示す。
- (4) 毛髪断面形状が適切であること：欧米人の金髪の場合、その扁平な断面形状に基づいて毛髪内部に入射した光の一部が全反射するため、毛髪全体が光り輝くように観察される。

## 文 献

- 1) M. Okamoto, R. Yakawa, A. Mamada, S. Inoue, S. Nagase, S. Shibuichi, E. Kariya and N. Satoh: "Influence of internal structures of hair fiber on hair appearance. III: Generation of light-scattering factors in hair cuticles and the influence on hair shine," *J. Cosmet. Sci.*, **54** (2003) 353-366.
- 2) S. Nagase, S. Shibuichi, K. Ando, E. Kariya and N. Satoh: "Influence of internal structures of hair fiber on hair appearance. I: Light scattering from the porous structure of the medulla of human hair," *J. Cosmet. Sci.*, **53** (2002) 89-100.
- 3) S. Nagase, N. Satoh and K. Nakamura: "Influence of internal structures of hair fiber on hair appearance. II: Consideration of the visual perception mechanism of hair appearance," *J. Cosmet. Sci.*, **53** (2002) 387-402.
- 4) S. Iwai, H. Sato, S. Shibuichi and N. Satoh: "Novel mechanism for hair shine with special optical enhancement effect on blonde hair," *J. Cosmet. Sci.*, **60** (2009) 323-336.
- 5) S. Nagase, Y. Kajjura, A. Mamada, H. Abe, S. Shibuichi, N. Satoh, T. Itou, Y. Shinohara and Y. Amemiya: "Changes in structure and geometric properties of human hair by aging," *J. Cosmet. Sci.*, **60** (2009) 637-648.

(2010年6月12日受理)