Relationship between the Sensory Evaluation of Stiffness and Bending Stiffness Distribution Curve of the Fiber Components of a Hair Tress

UEDA Seiko^{a,*}, KUWABARA Satomi^b, JOKO Kyohei^b

^a R&D, Health & Beauty Company, Sunstar Group, 5-30-1, Kamihamuro, Takatsuki, Osaka 569-1044, Japan

^b School of Life Studies, Sugiyama Jogakuen University, 17-3 Hoshigaoka-motomachi, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8662, Japan

Received 27 September 2016; accepted for publication 9 February 2017

Abstract

We performed a sensory evaluation of the stiffness of aged hair and damaged hair, and examined the relationship between the obtained sensory evaluation and the bending stiffness distribution curve of the whole hair tress. We used a mixture of gray and black hair as an aged hair tress, and of bleached and permed hair as damaged hair tresses. The results indicated a difference in sensory evaluation of stiffness between the gray and black hair tresses and a difference in the high-rigidity range (85% – 100%) in the bending stiffness distribution curve. A difference was observed in sensory evaluation of stiffness between the different damaged hair tresses. However, chemical treatments resulted in changes in both the low- and high-rigidity regions in the bending stiffness distribution curve. We attempted to find the area of highest correlation between the distribution curve and the sensory evaluation. The distribution curve was divided into several areas and the stiffness average was calculated for each area. We then calculated the correlation coefficient with the sensory evaluation. The results indicated that the area with the top 10% – 15% stiffness of the distribution curve was most closely correlated to the sensory evaluation.

Key Words : Hair, Sensory evaluation, Bending stiffness, Correlation coefficient,

毛束のハリコシ官能評価と構成毛髪の曲げ剛性分布曲線との関係

上田誓子^{a,*}, 桑原里実^b, 上甲恭平^b

^a サンスターグループ ヘルス&ビューティーカンパニー 研究開発部,

^b 相山女学園大学 生活科学部 生活環境デザイン学科

1. 緒 言

加齢に伴い「毛髪のハリ・コシがなくなってきた」という悩みが生じる [1]. 渡辺らは 35 才から 59 才の女性 351 名を対象にした髪の悩みに関する調査において、「髪にハリ・コシがない」という悩みは「白髪」について多く、33 % の女性が悩んでいることを報告している [2]. 毛髪の「ハリ・コシ感」はその「硬さ」や「柔らかさ」と同様に、太さやクセの程度が異なる様々な毛髪の集合体である毛束の特性によるものと考えられる. その中で「柔らかさ」は、「指を滑らせた時などの滑らかさ」、「指の通りやすさ」や「握ったり、曲

げたりした時の、跳ね返りや抵抗感のなさ」で判断しており、毛束の硬さ・柔らかさには、毛髪の太さ、滑らかさ以外に毛髪の揃い指数も感じる要因となっていることは明らかである [3]. 一方、「ハリ・コシ感」については、毛髪密度や、太さおよび曲げ剛性が関係していると考えられているが [2], もっとも基本的な物性因子の一つには毛髪 1 本の曲げ硬さ (剛性) が挙げられており、古川 [4] は毛髪のハリコシ感を評価する方法として、毛髪コシ感テスター (KES-FB2-S-DC・カトーテック株式会社) に毛髪 50 本を 5 cm 間に等間隔で並行に取り付け、曲げ剛性 B を測定する方法を紹介している. しかしながら曲げ剛性 B が大きければ毛髪がかたくコシがあると解釈さ

* 連絡先: サンスターグループ ヘルス&ビューティーカンパニー 研究開発部 569-1044 大阪府高槻市上土室 5-30-1
E-mail : seiko.ueda@jp.sunstar.com, Tel : +81-72-694-7788, Fax : +81-72-695-0766

れる傾向にあるものの、官能評価で感じられる「ハリ・コシ感」とは必ずしも一致しないことがあるとも報告している。よって、ハリコシ感とより相関性の高い評価方法が求められているといえる。

我々は、これまでに髪の毛の柔らかさ、ハリコシ感の指標となり得る毛束としての曲げ剛性に着目し、前報において毛髪1本1本の曲げ硬さ（剛性）を測定し、曲げ剛性（B）、断面積（S）、断面二次モーメント（I）、ヤング率（E）などの物性値の解析を行い、それぞれの物性値を昇順に並べてプロットした分布曲線を用いることで毛束間の特性の違いを読み取ることができることを報告した[5]。そこで、本研究では毛束の柔らかさ、ハリコシ感に対する官能評価と前報の方法に準じて求めた毛束の曲げ物性分布曲線のひとつである曲げ剛性分布曲線との相関に関する知見を得ることを目的とした。

髪の毛のハリコシ感は、前述のとおり年齢とともに低下することが報告されている[1, 2]。加齢により低下したハリコシ感を評価するためには、同一人物の若年齢時の毛髪と加齢時の毛髪を用いることが理想的であるが、両方の毛髪の入手は非常に困難である。そこで、加齢に伴い白髪が増えることに着目し、白髪の増加が毛髪全体のハリコシ感の低下に何らかの影響を与えているのではないかと考え、同一人物の白髪混合毛束を入手し、黒髪と白髪に分け、同重量の毛束を作成し、ハリコシの官能評価とそれぞれの毛束の曲げ剛性分布曲線との相関関係について検討した。次に、ハリコシ感は日常のヘアケアによる損傷によっても変化することが報告されている[6-9]ことから、日常的に行われているブリーチおよびパーマ処理を施した毛髪についてもハリコシの官能評価と曲げ剛性分布曲線との関係を検討した。また、日常のシャンプー・トリートメント等のヘアケアでの損傷は、主に非ケラチン組織である細胞膜複合体（CMC）やエンドクチクルなどであることが知られている[10]。中でもCMCは弾性的性質をもち、キューティクル細胞やコルテックス細胞同士を接合することで、繊維の物理的、化学的特性に影響を及ぼすことが報告されている[11]。このCMCは、有機溶媒等で容易に改質されることが知られており、Leederらの濃ギ酸処理によってマイクロフィブリル-マトリックスは影響を受けていないが、CMCは変化しているとする羊毛繊維の透過電子顕微鏡（TEM）観察での報告[12]からはじまり、多くの研究者によって確認され、著者の一人も毛髪において同様の現象を観察し報告している[13]。そこでCMCを優先的に改質させたギ酸処理毛髪をCMC損傷モデル毛髪と位置づけ、ギ酸処理毛髪のハリコシの官能評価と曲げ剛性分布曲線との関係についても検討することにした。

2. 実験方法

2.1 実験試料

毛髪試料には、中国人女性の同一人白髪混合毛髪（20 cm）と同一人黒髪（60 cm：共にビューラックス社製）を用いた。白髪混合毛髪は各採取者（A-C）毎に白髪と黒髪に全て分けた後、

それぞれから同一重量（約2.1 g）の白髪毛束と黒髪毛束を作成した。同一人黒髪は根元に近い側から長さ25 cmに切断し、重量約3.2 g、毛髪約5000本の毛束を複数本作成した。作成した毛束は流水で十分に濡らした後、1%ラウリル硫酸ナトリウム水溶液を10 g塗布し、20回櫛通して洗浄した後、流水中で櫛通ししながら十分にすすぎ、55℃の乾燥機で乾燥させた。

2.2 改質モデル毛束の作成方法

2.2.1 ブリーチ処理毛束

ブリーチ処理剤には、ブリーチパウダー4 gを秤取し30%過酸化水素水5 mlを蒸留水で20 mlに希釈した過酸化水素水をブリーチパウダーに加えてよく混ぜ合わせたものを用いた。ブリーチ処理は、白板にラップを敷き、その上に同一人黒髪で作成した毛束を置き、ブリーチ処理剤を流し入れた後ラップを畳み、処理剤を十分に毛束になじませ、室温にて30分間放置した。処理後、水洗し、自然乾燥させた。この操作を1～3回行った毛束を用意した。

2.2.2 パーマ処理毛束

パーマ処理Ⅰ剤（還元処理溶液）には5%チオグリコール酸水溶液を作成し、アンモニア水溶液を用いてpH 9.0に調整したものを、パーマ処理Ⅱ剤（酸化処理溶液）には7.5%ブロム酸水溶液を作成し、リン酸水素二ナトリウム、リン酸二水素ナトリウムを用いてpH 6.0に調整したものをを用いた。パーマ処理は、まず同一人黒髪で作成した毛束を処理Ⅰ剤100 mlに35℃で10分間浸漬させ、その後水洗を2分行い、次に処理Ⅱ剤100 mlに35℃、10分浸漬後、水洗を2分行い、自然乾燥させることで行った。この操作を1～3回行った毛束を用意した。

2.2.3 ブリーチ / パーマ処理毛束

同一人黒髪で作成した毛束を2.2.1に記載のブリーチ処理を行った後、2.2.2記載のパーマ処理を行った。この操作を1～2回繰り返した毛束を用意した。

2.2.4 ギ酸処理毛束

同一人黒髪で作成した毛束を濃ギ酸（98～100%、JIS試薬特級、ナカライテスク製）100 mlに15分間、室温で浸漬した。処理後、流水で十分に水洗した後、55℃の乾燥機で1時間乾燥させた。

2.3 官能評価

2.3.1 白髪と黒髪毛束の官能評価

まず、2.1実験試料に記載した同一人物（A）の黒髪毛束お

よび白髪毛束についてハリコシの官能評価を実施した。評価は通常の室温下 (15℃ – 25℃), 湿度 (60 %RH 以下) で行った。各毛束の色が視認できないように黒色のビニル袋を被せ、ビニル袋の下に手を入れてどちらが柔らかいかを 30 名の女性に回答してもらった。柔らかさに差が無い場合や、わからない場合は、そのように回答してもらった。次にハリコシ感についても同様の方法で、60 名の女性にどちらがハリコシがあるか回答してもらった。さらに、同一人物 (B, C) の白髪毛束と黒髪毛束について、ハリコシ感の差がどの程度かを確認するため同様の方法で、15 名の女性にそれぞれの毛束のハリコシ感の程度を 5 段階 (1:ハリコシ無し⇔5:ハリコシ有り) で回答してもらった。

2.3.2 改質モデル毛束の官能評価

2.2 改質モデル毛束の作成方法に記載した各種改質モデル毛束と未処理毛束の計 10 束のハリコシ感について、20 代～40 代女性 15 名～16 名で官能評価を実施した。一度に評価する毛束数が多いと、官能評価時の集中力が低下する懸念から、1 回当りの評価に用いる毛束は 7 束とし、Table 1 に示すとおり振り分けた。

Table 1 List of hair tresses used for each sensory evaluation tests.

treatment	1st sensory evaluation test	2nd sensory evaluation test
untreated	○	○
single Bleach	○	-
double Bleach	○	-
triple Bleach	○	○
single Perm	-	○
double Perm	-	○
triple Perm	-	○
single Bleach and Perm	○	-
double Bleach and Perm	○	○
Formic acid	○	○

それぞれの毛束群の官能評価は、通常の会議室条件下 (18℃ – 25℃, 湿度 60 %RH 以下) で実施した。温度・湿度の厳密なコントロールができなかったことから、温度および湿度変化による毛束の感触の大幅な変化を避けるため、1 回の官能評価はその日のうちに連続して全員に実施、完了させた。さらに 2 回の官能評価の再現性を確認する目的で未処理毛束、ギ酸処理毛束、ブリーチ 3 回処理毛束、ブリーチ/パーマ処理を 2 回繰り返した毛束を毎回評価に加えた。毛束 7 束にはあらかじめ異なるアルファベットを表記しておき、ハリコシ感を 5 段階 (1. 無し←ハリコシ→5. 有り) で表記した評価用紙に、それぞれの毛束のハリコシ感ごとにアルファベットを記入してもらった。なお、毛髪のハリコシ感については現在のところ明確な定義はないが、多くの女性が認識している感覚であることから、評価時には「自らが思う毛髪のハリコシ感」で評価するよう伝え、個室にて一人ずつ評価させた。

2.4 毛髪の曲げ剛性測定方法

各毛束を構成する毛髪の曲げ剛性の測定は、前報 [5] で報告した一本曲げ試験機 (KES-FB2-SH・カトーテック株式会社) を用いて行った。試験機に毛髪の測定部を取り付け、曲げ応力を曲率 (K) $-2.5 \sim +2.5 (\text{cm}^{-1})$ の範囲で $0.4 (\text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$ の変化速度で計測し、得られた曲げ応力-曲率曲線での $K: 0.5 \sim 1.5 \text{ cm}^{-1}$ および $-0.5 \sim -1.5 \text{ cm}^{-1}$ 間における曲線の傾斜の平均を曲げ剛性 B 値として算出した。

2.4.1 白髪と黒髪の曲げ剛性測定方法

同一人物 (A) の白髪と黒髪の毛束からそれぞれ 50 本の毛髪について、1 本につき 3 箇所 (根元より 5 cm, 10 cm, 15 cm の地点) の曲げ剛性 B 値を測定した。さらに、別人物 (E-J) から入手した白髪と黒髪についても、それぞれ 100 本の毛髪について、毛髪 1 本につき 1 箇所ずつ、毛髪の中心の曲げ剛性 B 値を測定した。

2.4.2 改質モデル毛束の曲げ剛性測定方法

各種改質モデル毛束からそれぞれ 200 本の毛髪について、毛髪 1 本につき 1 箇所ずつ、毛髪の中心の曲げ剛性 B 値を測定した。

3. 結果と考察

3.1 ハリコシ感に及ぼす白髪の影響

3.1.1 白髪・黒髪毛束のハリコシ官能評価

Fig. 1 に同一人物 (A) の白髪毛束と黒髪毛束のハリコシの官能評価結果を示す。「どちらが柔らかいか」との問いに対して 30 名中 60 % の女性が白髪毛束の方が柔らかいと評価した。一方、「どちらがハリコシがあるか」との問いに対しては 60 名中 56 % の女性が黒髪毛束の方がハリコシがあると評価した。よって、一部の女性で「(ハリコシがなにか) わからない」との回答があったものの、ハリコシの感覚は 93 %

Fig. 1 Sensory evaluation about softness and stiffness of person A's gray hair and black hair tress.

の女性が認識できる感覚であり、その評価結果は「柔らかさ」の評価結果とほぼ逆の結果となることがわかった。

3.1.2 毛束構成毛髪の曲げ剛性分布曲線

次に、同一人物 (A) の白髪と黒髪毛束からそれぞれ毛髪を 50 本ずつ抜き出し、1 本につき 3 箇所測定して得られた計 150 本の曲げ剛性 B 値を低値より高値にかけて昇順で並べた「曲げ剛性分布曲線」を Fig. 2 に示した。

Fig. 2 Bending stiffness distribution curves of person A's black hair and gray hair.

Fig. 2 において曲げ剛性が低値の領域（サンプル No.137 までは、全体の 86.3 % の毛髪：低剛性域）では、白髪の方が黒髪よりわずかに高い値を示すが、曲げ剛性が高値の領域（サンプル No.137 以上、全体の 13.3 % の毛髪：高剛性域）では、明らかに黒髪の方が高い曲げ剛性値を示し、白髪の曲げ剛性値と明らかに差が認められる。

緒言で述べたように、毛束のハリコシ感が毛束を構成する毛髪の曲げ剛性に左右されるのであれば、これらの分布曲線の違いが反映しているはずであり、官能評価では白髪の方がハリコシがない、と評価する声が多かったことは、高剛性域における黒髪と白髪の曲げ剛性値の差が影響を与えていると考えられる。つまり、全体の 13.3 % に過ぎない高剛性域の毛髪が毛束全体のハリコシ感に強く影響を与えており、剛性値の低い大半の毛髪はハリコシ感には影響を与えていないことが示唆される。

そこで、この点を確認することを目的として、剛性値の高い毛髪の含有率を変化させた毛束試料を作製し、その官能評価を行った。

3.2 高剛性毛髪含有率とハリコシの官能評価との関係

3.2.1 基準となる同一人毛髪の曲げ剛性分布曲線の作成

高剛性毛髪の含有率を変化させた毛束試料を作製するために、同一人物の黒髪で作成した毛束を複数本用意した。これ

らの毛束に対して、高剛性域の毛髪を段階的に混入し、毛束全体のハリコシ感に変化が生じるかを確認することにした。このとき、その毛束における高剛性値を把握するため、毛束試料から 200 本の曲げ剛性 B 値を毛髪 1 本につき 1 箇所ずつ測定し、曲げ剛性分布曲線を得た。この分布曲線に、3.1.2 で設定した高剛性域である上位 13.3 % を当て、曲げ剛性値が 174 番目の毛髪の曲げ剛性 B 値を確認したところ 0.0139 であった。よって曲げ剛性 B 値が 0.0140 以上が、この黒髪毛束試料の高剛性毛髪であると設定した。

3.2.2 高剛性毛髪の含有率の操作と官能評価

曲げ剛性 B 値が 0.0140 以上である高剛性毛髪を 500 本用意し、毛束試料の毛髪 500 本と入れ替えることで、高剛性毛髪を約 10 % 増加した毛束を作成した。この毛束と、未処理毛束と一対でハリコシの官能評価を 20 代～40 代の女性 15 名で実施した。その結果、Fig. 3 に示したように、高剛性毛髪を 10 % 増加させた毛束では、有意にハリコシの官能評価が高かった。さらに、高剛性毛髪の混入数をそれぞれ 250 本、150 本と混入させて、高剛性毛髪の混入率をそれぞれ約 5 %、約 3 % 増加させた毛束を同様に作成し、未処理毛束と官能試験を実施した。その結果、高剛性毛髪の混入割合に応じて毛束のハリコシが増加する傾向が見られた。よって、毛束全体のハリコシ感には曲げ剛性 B 値が高い毛髪の剛性値が強く影響しているものと考えられた。

Fig. 3 Sensory evaluation of hair tresses some of which added high stiffness hairs.

3.3 白髪毛のハリコシ

我々は、白髪がつねに黒髪よりもハリコシが低いことが加齢による毛髪のハリコシの低下の原因であるのかを確認するため、別の人物 (B, C) の白髪混合毛髪より白髪と黒髪の毛束を作成し、ハリコシの官能評価を実施した (Fig. 4)。さらに、別の人物 6 名 (E-J) の白髪と黒髪 100 本ずつの曲げ剛性値が

ら曲げ剛性分布曲線を作成した (Fig. 5). まず, Fig. 4 に示すように, 人物 B では逆に白髪の方がハリコシが高かったことから, 白髪は必ずしも黒髪よりもハリコシが低下しているわけではないことを確認した. 同様に, Fig. 5 に示した E-J の白髪と黒髪の曲げ剛性分布曲線においても, 白髪と黒髪の曲線が完全に重なっている毛髪も見られ, 高剛性域において白髪の曲線が必ずしも黒髪より低いというわけではなかった.

以上のように, 加齢とともに増加する白髪とハリコシの低下との間に何らかの関係があるか, との仮説のもとに同一人物の白髪毛束と黒髪毛束間の官能評価およびそれぞれの曲げ剛性分布曲線の比較を行ったが, 白髪が必ずしもハリコシ感を決定する要因ではないと結論できた. しかしながら, 3.2.2 項で示したように, 高剛性の毛髪を 10 % 混入させると, 官能評価では有意にハリコシがあると評価されたことから, 毛束を構成する曲げ剛性値の高い毛髪がハリコシ感に影響をおよぼしていることは十分に考えられる.

Fig. 4 Sensory evaluation of each person's gray hair and black hair tresses.

Fig. 5 Bending stiffness distribution curves of each person's black hair and gray hair.

3.4 同一人黒髪毛束の各種改質処理

我々は次に、様々な化学処理によって改質させた毛髪ハリコシ感と、それらの改質毛束に含まれる高剛性毛髪との間にも同様の関係がみられるかについて検討するため、2.2 改質モデル毛束の作成方法で記した各種改質処理を実施した。ここで、ブリーチ処理およびパーマ処理を1回、2回、および3回繰り返した毛束をそれぞれB1、B2、B3およびP1、P2、P3と、ブリーチ処理後にパーマ処理を1回および2回繰り返した毛束をそれぞれBP1、BP2と略記した。さらに、濃ギ酸処理を施した毛束を formic acid と略記した。

3.4.1 改質処理毛束のハリコシの官能評価

各種改質処理毛束と未処理毛束の計10束をTable1に示したとおり2回に振り分け、20代～40代女性15名～16名でハリコシの官能評価を実施した結果をFig. 6に示す。まず、官能評価1回目と2回目で共通する改質処理毛束の未処理毛束に対するハリコシの官能評価はほぼ同様の傾向を示していたことから、エラーバーは大きいものの2回の官能評価の再現性は高いものと考えられた。そこで、これらの結果を比較すると、改質処理によるハリコシ感への影響において最もハリコシが低下した改質処理毛束は、濃ギ酸処理毛束 (Formic acid) であり、ブリーチ処理毛束 (B2) およびパーマ処理毛束 (P1) は未処理毛束に対してハリコシがやや高いとみなせるのに対して、ブリーチ処理毛束 (B1, B3)、パーマ処理毛束 (P2, P3) および、ブリーチとパーマを繰り返した毛髪 (BP1, BP2) では、未処理毛束とほぼ同等でありハリコシは変化しないと評価された。

ここで得られた官能評価結果については、一般に温度・湿度などの環境変化は毛髪の手触り感に影響を与えることが知られており、評価におよぼす試験環境の影響を考慮する必要がある。河野ら [14] はブリーチ、ブラッシングおよびパーマの繰り返し処理により損傷させた毛髪に各種のトリートメ

ント剤を塗布した毛束を用意し、温度・湿度などの環境を変化させた条件で毛髪の物理特性の測定と官能評価を行い、それらの相関性を確認した。その結果、低温・低湿状態 (15℃, 30%RH) および標準状態 (20℃, 64%RH) では毛髪のやわらかさと曲げ剛性B値との間に高い負の相関が得られたが、高温・高湿状態 (30℃, 80%RH) では相関が得られなかったことから、トリートメント効果などの微細な差を比較検討する際は、標準状態または低温・低湿環境下で実施するのが良いとしている。今回我々が実施した官能評価は、低温・低湿状態から標準状態で実施したことから、エラーバーは大きかったものの微細な感覚の差が再現されているものと考えられる。

そこで、得られた改質処理効果と官能評価との関係について考察を試みた。まずCMCが優先的に改質されたと考えられる濃ギ酸処理毛束のハリコシが低下すると評価されたことは興味深いことである。このことは、毛束のハリコシ感に対して構成毛髪の内部構造変化に基づく物理特性変化が関与していることを示しており、その構造変化において毛髪全体のわずか数%しか占めていないCMCの構造変化の寄与が大きいことを示すものである。一方、パーマやブリーチ処理も繊維内部構造にさまざまな影響をおよぼしている。パーマおよびブリーチ処理の本質は酸化・還元反応であり、毛髪構成たんぱく質への反応が化学構造変化を引き起こし、その変化が高次 (凝集) 構造の変化をもたらしている。これらのことは古くから検討され多くの研究者によりその成果が報告されている [15]。既に述べたが濃ギ酸処理毛髪では、主にCMC構成成分の抽出とそれに伴う構造の乱れがTEMにより観察されている。同様に、パーマやブリーチ処理毛髪の内部構造もTEM観察やラマン分光分析により調べられている。その結果、一般に使用されているパーマ剤であるチオグリコール酸により20分から40分間処理することにより、1) キューティクル細胞の膨潤 [16]、2) コルテックス細胞でのマクロフィブリル間マトリックスの弛緩 [17]、3) 中間径フィラメントタンパク質 (IF) とフィラメント結合タンパク質 (IFAP) との規則構造の乱れ [18]、4) CMC およびその周辺組織の構造弛緩 [18] などが観察されることが報告されている。また、通常のブリーチ処理毛髪について、最近、査型X線微分位相顕微鏡を用いて観察した結果が報告され、ブリーチ処理によりキューティクル細胞内の層状の密度分布が消失することが示された [19]。また、名和 [20] は原子間力顕微鏡 (AFM) ハーモニックスモードのブリーチ毛髪の断面の弾性率変化を調べ、ブリーチ処理によってコルテックス細胞の弾性率が高くなること、その主たる組織成分はIFAPであることを報告している。

以上の知見に基づけば、本実験で使用したパーマやブリーチ処理毛髪は、CMCの構造が弛緩しているだけでなく、コルテックス細胞内のマクロフィブリル間マトリックスやIF/IFAP間の凝集構造も乱れていると考えられるものの、処理回数にもよるが、コルテックス細胞層の弾性率は低くなっていないと考えられる。よって、ブリーチ処理毛束 (B2) やパーマ処理毛束 (P1) でハリコシが強く感じられたのは、コルテッ

Fig. 6 Sensory evaluation of untreated hair tress and chemical damaged hair tresses.

B1: single Bleach, B2: double Bleach, B3: triple Bleach

P1: single Perm, P2: double Perm, P3: triple Perm

BP1: single Bleach and Perm, BP2: double Bleach and Perm

クス細胞の弾性率向上が関係し、さらなる処理でハリコシ感が弱くなったのは、CMC等の非ケラチン組織成分の損傷に伴う内部歪応力の低下によるものと推察される。これは、ハリコシを感じる触覚が作用反作用の法則に支配され、触ることによって毛束を構成する毛髪の形状を変形させ、その変形の仕方や様子の情報を反作用力として受け取り感じていると考えられていることに基づく。すなわち、すべての被験者が同じ方法で毛束を変形させている訳ではないが、少なくとも毛束を曲げるような変形は含まれており、その際の外力（作用力）に対して個々の繊維内部で発生する歪応力（反作用力）を感じ取っていると考えられる。したがって、毛束のハリコシとして感じ取る情報の一部には間違いなく毛束あるいは毛髪の曲げ応力が含まれていると考えられたことから、同様に各改質毛束の曲げ剛性分布曲線を求め、ハリコシ感との関係を検討することにした。

3.4.2 改質処理毛束の曲げ剛性分布曲線

Fig. 7は、改質処理毛束からそれぞれ毛髪200本を無作為に採取し、毛髪1本につき1箇所ずつ、毛髪の間中部分を測定し、未処理毛束の曲げ剛性分布曲線と共に示したものである。図から明らかなように、それぞれの改質処理毛束は様々

な曲げ剛性分布曲線を示したが、ブリーチ/パーマ2回処理毛束（BP2）を除き、いずれの処理によっても低剛性域および中剛性域の値が未処理毛束のそれより高くなり、高剛性域の値が変わらないか、低くなった。これらの結果は、白髪と黒髪で得られた分布曲線とは明らかに異なっている。単純に構成毛髪の曲げ剛性値の違いがハリコシ感に反映しているのであれば、ブリーチ/パーマ2回処理毛束（BP2）では、明らかに処理毛束の方が曲げ柔らかい毛髪が多くなっており、曲げ柔らかくなっていると考えられるが、実際のハリコシの官能評価では未処理と変わらないと判定されている。このことから、少なくとも低剛性および中剛性域の分布の差違はハリコシ感にはほとんど影響をおよぼしていないとすることができる。さらに、前述したハリコシ感が構成毛髪の曲げ剛性分布曲線での高剛性域の分布に関係しているとの考えを支持しているように捉えることができる。

しかしながら、これまでの議論は曲げ剛性値から得られる情報とハリコシ感との間に何らかの関係があるとする前提に基づいた議論であり、定性的な議論にとどまっている。そこで上述したようにハリコシ感として感じ取る情報の一部が曲げ剛性分布曲線の中に含まれるとして、改質処理毛束での官能評価と曲げ剛性分布曲線に含まれる情報との関係をより定量的に解析するため相関因子の検出を行うことにした。

Fig. 7 Bending stiffness distribution curves of untreated hair and each chemical damaged hair.

3.4.3 曲げ剛性分布曲線の各領域の平均値と官能評価との相関算出

我々は改質処理毛束の曲げ剛性分布曲線がある領域に区切り、その中に含まれる値の平均値を求め、その値と官能評価との相関について検討することにした。まず、各改質処理毛束の曲げ剛性分布曲線を曲げ剛性 B 値の低い方から 10 本ずつ 20 の区分に細分割し、それぞれの区分毎の平均値を算出した。続いて、求めた平均値と各改質処理毛束で実施した官能評価 1 回目および 2 回目との相関関係を、IBM SPSS Statistics Ver.23 を用いて Pearson の相関係数を算出し Table 2 に示した。その結果、曲げ剛性値の低い側では各官能評価と低い負の相関関係であり、曲げ剛性が中程度では弱～中程度の正の相関関係となり、曲げ剛性値が非常に高い区分では高い正の相関関係が認められた。最も各官能評価との相関が高いのは、曲げ剛性分布曲線の上位 91 % - 95 % の区分の平均値であり、相関係数は 0.7 以上で有意傾向以上であった。その次に相関が高い区分は、官能評価 1 回目と 2 回目で異なり、官能評価 1 回目では上位 96 % - 100 % の区分の曲げ剛性平均値と、官能評価 2 回目では上位 86 % - 90 % の区分の曲げ剛性平均値との間に比較的高い相関が見られた。

次に、曲げ剛性分布曲線の剛性値の上位から 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %, 35 %, 40 %, および 100 % を評価区分として設定し、その平均値と官能評価との相関係数を同様に算出した (Table 3)。その結果、官能評価 1 回目では曲げ剛性分布曲線の上位 15 % (86 % - 100 %) の平均値が最も官能評価と高い相関を示し、Table 2 で示した 10 本ずつ設定した区分の平均値よりも高い相関係数が得られた。官能評価 2 回目では、上位 40 % (61 % - 100 %) まで高い相関を示したが、最も相関が高かったのは Table 2 で示した 91 % - 95 % の

Table 2 Correlation coefficient between the bending stiffness average of “each 5% section” and each sensory evaluation average.

	1st sensory evaluation test		2nd sensory evaluation test	
	Pearson product-moment correlation coefficient	P value	Pearson product-moment correlation coefficient	P value
section (1%-5%)	-.381	.399	-.119	.799
section (6%-10%)	-.202	.664	.246	.596
section (11%-15%)	-.076	.871	.260	.574
section (16%-20%)	.007	.988	.328	.472
section (21%-25%)	.023	.962	.399	.375
section (26%-30%)	.077	.870	.429	.337
section (31%-35%)	.091	.847	.439	.325
section (36%-40%)	.140	.764	.499	.254
section (41%-45%)	.217	.640	.559	.192
section (46%-50%)	.306	.504	.633	.127
section (51%-55%)	.339	.458	.700	.080
section (56%-60%)	.390	.387	.740	.057
section (61%-65%)	.466	.292	.743	.056
section (66%-70%)	.504	.249	.761*	.047
section (71%-75%)	.515	.237	.762*	.046
section (76%-80%)	.597	.157	.781*	.038
section (81%-85%)	.603	.152	.741	.057
section (86%-90%)	.675	.096	.781*	.038
section (91%-95%)	.706	.076	.866*	.012
section (96%-100%)	.678	.094	.667	.101

*: P < 0.05

区分であった。したがって、Table 2, Table 3 の結果を合わせると、毛束のハリコシ感の客観的な評価方法としては、毛束から無作為に選出した毛髪で曲げ剛性分布曲線を求め、その上位 10 % - 15 % までの曲げ剛性分布曲線の平均値を用いる方法が最も適していると考えられた。

Table 3 Pearson product-moment correlation coefficient between the bending stiffness average of each “up to 100% section” and each sensory evaluation average.

	1st sensory evaluation test		2nd sensory evaluation test	
	Pearson product-moment correlation coefficient	P value	Pearson product-moment correlation coefficient	P value
section (1%-100%)	.376	.406	.694	.083
section (61%-100%)	.664	.104	.824	.023
section (66%-100%)	.671	.099	.823	.023
section (71%-100%)	.679	.093	.813	.026
section (76%-100%)	.701	.079	.816	.025
section (81%-100%)	.712	.073	.814	.026
section (86%-100%)	.718	.069	.807	.028
section (91%-100%)	.709	.074	.803	.030
section (96%-100%)	.678	.094	.667	.101

以上のように、改質処理毛束の曲げ剛性分布曲線がある領域に区切り、その中に含まれる値の平均値を求め、その値と官能評価との相関について統計的に解析した結果、曲げ剛性分布曲線の高剛性域 10 % - 15 % に含まれるそれぞれの剛性値の平均値とハリコシの官能評価との間に高い相関が得られたことから、少なくとも毛束のハリコシ感を感じ取る情報の一つとして曲げ剛性分布曲線の高剛性域 10 % - 15 % に含まれる毛髪の曲げ剛性値（曲げ硬さ）が関与していることが明らかとなった。

3.4.4 毛髪のサンプリング数と曲げ剛性平均値の算出区分の検討

最後に、曲げ剛性分布曲線を描く場合、測定する毛髪のサンプリング数で官能評価との相関が変化する可能性が考えられたため、どの程度のサンプリング数で相関値がどの程度変化するかを確認することにした。確認は、すでに測定済みの 200 本のデータをそれぞれ 100 本ずつおよび 50 本ずつで測定したと仮定し、200 本測定した場合のデータと比較することにより行った。100 本ずつに分ける方法として、測定した 200 本のデータを測定順に並べ、奇数回に測定した 100 本と、偶数回に測定した 100 本に分けた。50 本ずつに分ける方法として、200 本のデータを測定した順に並べ、4 で割って余り 1 - 4 となる回に測定した 50 本ずつに分けた。それぞれ分けた毛髪の本数毎に曲げ剛性分布曲線を作成し、上位から 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 % の区分で平均値を算出し、官能評価 1 回目と算出した相関係数を Table 4 に、2 回目と算出した相関係数を Table 5 に示した。これらの相関係数を Table 2 および Table 3 に示した 200 本のデータと比較した。

Table 4 の官能評価 1 回目と各領域の曲げ剛性値の平均との相関係数より、測定本数を 100 本に減らしても相関係数は上

Table 4 Pearson product-moment correlation coefficient between the first sensory evaluation test and the bending stiffness average of each number hair's each section.

	top 5% ave.	top 10% ave.	top 15% ave.	top 20% ave.	top 25% ave.	top 30% ave.	all ave.
200 hairs (1-200)	.678	.709	.718	.712	.701	.679	.376
100 hairs (odd)	.746	.752	.738	.744	.745	.734	.257
100 hairs (even)	.631	.720	.725	.686	.651	.619	.451
50 hairs (÷4 remainder 1)		.855*		.707		.607	.204
50 hairs (÷4 remainder 2)		.739		.715		.659	.498
50 hairs (÷4 remainder 3)		.617		.687		.743	.306
50 hairs (÷4 remainder 0)		.637		.557		.514	.365

*: P < 0.05

Table 5 Pearson product-moment correlation coefficient between the second sensory evaluation test and the bending stiffness average of each number hair's each section.

	top 5% ave.	top 10% ave.	top 15% ave.	top 20% ave.	top 25% ave.	top 30% ave.	all ave.
200 hairs (1-200)	.667	.803*	.807*	.814*	.816*	.813*	.694
100 hairs (odd)	.710	.902**	.951**	.949**	.929**	.902**	.607
100 hairs (even)	.622	.700	.710	.706	.708	.712	.728
50 hairs (÷4 remainder 1)		.839*		.809*		.744	.559
50 hairs (÷4 remainder 2)		.601		.633		.662	.735
50 hairs (÷4 remainder 3)		.735		.862*		.898**	.646
50 hairs (÷4 remainder 0)		.740		.685		.703	.686

*: P < 0.05 **: P < 0.01

位 10 %, 上位 15 % で高く, 200 本測定した場合と同等の高い相関係数が得られた。しかし 50 本の場合は相関係数が 0.7 以下に低下する場合も見られた。なお, 50 本の場合はデータ数が少ないため, 上位 5 %, 15 % は設定できなかった。官能評価 2 回目と各領域の曲げ剛性値の平均との相関係数を示した Table 5 においても, 測定本数を 100 本に減らすとやや相関係数はばらつくものの, 200 本測定した場合と同等の高い相関係数が得られた。50 本の場合は, 一部で低い相関係数となった。

以上のように, 測定毛髪本数が 100 本以上であれば得られた曲げ剛性分布曲線の高剛性域 (上位 15 % 以上) の平均剛性値と官能評価との間に高い相関係数が得られたことから, 数種の毛束間のハリコシ感の比較において, それぞれの毛束より採取した毛髪 100 本以上の曲げ剛性値より求めた曲げ剛性分布曲線の高剛性域の平均剛性値を比較することによって, ハリコシ感の差を予想できるものと考えられた。

3.4.5 毛束のハリコシ感覚特性と構成毛髪の曲げ剛性特性との関係

毛束のハリコシ感は, 毛束に触れた際に加える作用力に応じた変形に対する毛束全体で発生する反作用力を, 指腹に内包された複数の皮膚感覚受容器が反応することによって得られる硬さ・柔らかさの感覚によるものである。この場合の反作用力は, 主に毛束構成毛髪個々で発生する歪応力と構成毛髪間の摩擦抵抗力によるものである。したがって, 本実験での曲げ剛性分布曲線は毛束変形時に生じる毛髪間の摩擦抵抗

力の影響が含まれない毛束の曲げ応力を示したものとなり, 毛束を構成する毛髪の曲げ剛性がハリコシ感を知覚する因子であることを示すものである。しかし, トリートメント処理をした毛束の「やわらかさ」と曲げ剛性 B 値との関係を検討した河野ら [14] は, トリートメント処理により「やわらかさ」の評価が良くなり, B 値との間に負の相関が得られたことを報告している。この場合の毛束の曲げ剛性 B 値は, 2 cm の幅に 200 本毛髪を並べた試料を曲げた場合の曲げ剛性 B 値であり, 個々の構成毛髪の曲げ剛性のみを評価しているのではなく, 毛髪間相互作用力および毛髪表面特性としての「なめらかさ, さらさら」感等の影響が優勢となったためと考えられる。このことを考え合わせると, 毛髪間の摩擦抵抗力等の毛髪表面特性で発生する反作用力がある限られた範囲内にある場合に, 個々の毛髪の曲げ剛性がハリコシ感に影響をおよぼし, 毛束のハリコシ感の違いが知覚されると考えられる。したがって, 今回の実験結果は, 構成毛髪の曲げ剛性が知覚に影響をおよぼした例の一つであると言える。

今回は, 毛束のハリコシ感が毛束構成毛髪の中で高剛性域の毛髪の曲げ剛性値に影響されていたが, このことは, 羊毛製品の「ちくちく感」に関する研究 [21, 22] や対象物の力学特性と硬さ知覚との関係に着目した研究報告 [23, 24] から, 次のように考えることができる。羊毛製品の「ちくちく感」に関するこれまでの研究 [21] としては, 「ちくちく感」は皮膚の痛覚受容器が活性化して生じるが, この刺激が布に 5 % 以上混入する直径 30 μm 以上の繊維によるものであり, 皮膚接触面が 5 cm^2 以上であること, などであった。その後, 「ちくちく感」は羊毛繊維に限定されるものでなく他の繊維素材でも起こり得るものであり, 皮膚に触れる布の繊維直径が 32 μm 以上の割合が 5.2 % 以上では, 大人はほぼ全員が「不快」と評価すると報告されている [22]。このことは, 太い繊維はヤング率が同じであれば曲げ剛性は高くなることから, ある一定以上の剛性値を呈する繊維が 5.2 % 以上含まれると皮膚の痛覚受容器が活性化すると言い換えることができる。すなわち, ちくちく感においては閾値が存在し, ある一定値以上の刺激となった場合に知覚されることを示唆している。

また, 高瀬ら [23] は, ヤング率の異なる弾性物体の提示刺激と硬さ感覚特性におよぼす指腹の変形との関係について検討を行い, 対象物の硬さに応じた指腹自体の変形の違いが硬さ感覚に影響をおよぼしており, 硬く感じるほどその変形度合いが高いことを示した。また, 別に上層と下層で硬さの異なる弾性対象物を人差し指で押し込む際の硬さ感覚を心理物理学的手法に評価した結果, 下層の硬さ (ヤング率) によらず, 指先が直接触れる上層の硬さ (ヤング率) が優位であること, さらに, 上層の硬さがある限られた範囲内にある場合には, 指先が直接触れない下層の硬さの違いが硬さ感覚特性に影響をおよぼし, わずかな硬さの違いを知覚しやすくなる可能性を見いだしている [24]。これらの知見に基づけば, 毛束を指先で触り感触を確かめる際, わずかな曲げ硬さの違いが指腹の変形を誘い一定以上の変形において感覚受容器が活性化されると考えることができる。さらに, 2 層からなる

弾性対象物モデルをさまざまな曲げ剛性を有する毛髪の集合体である毛束に当てはめると、毛束は低・中曲げ剛性層と高曲げ剛性層からなる弾性対象物と捉えることができ、下層としての役割を果たす低・中剛性層の硬さの違いが硬さ感覚特性に影響をおよぼし、高剛性層のわずかな剛性の違いが知覚されやすくなったと考えることができる。

以上のことを総合すると、今回得られたハリコシ感が高剛性域（上位 15 %）の毛髪の平均剛性値と高い相関があったということは、「ハリコシ感を感じるには、ある一定値以上の刺激を与える毛髪がある一定以上含まれる必要があり、それが曲げ剛性において高剛性域の毛髪である。そして、そのわずかな剛性値（刺激）の違いが中・低剛性値の毛髪が存在によってより鋭敏に知覚された」ことによると推察することができる。

4. 結 言

髪の毛のハリコシ感が加齢や化学的ダメージによって変化することから、加齢の指標の一つである白髪や、ブリーチやパーマおよび濃ギ酸による化学処理が、髪の毛のハリコシ感にどのように影響をおよぼすかについて官能評価を実施するとともに、それぞれの毛束を構成している毛髪の曲げ剛性分布曲線との関係を明らかにすることを目的として、検討を行った。その結果、白髪毛束と黒髪毛束の官能評価では、両者間でハリコシ感に差異が認められるが、個人によりその相対関係は異なることから、白髪が加齢によるハリコシ感の低下の原因であるとは言えないことがわかった。その一方で、毛束間にハリコシ感の差があるとき、曲げ剛性分布曲線での高剛性域の分布の違いがあることが見出された。さらに、日常の化学処理であるブリーチ処理、パーマ処理、ブリーチ/パーマ処理のハリコシ感におよぼす影響では、処理回数によって異なっているものの、ハリコシ感は未処理毛束と同等かやや強くなる傾向が認められることがわかった。一方、細胞膜複合体が主に改質されている濃ギ酸処理毛束では有意にハリコシ感が低下することがわかった。これらの結果を踏まえ、それぞれの曲げ剛性分布曲線を精査した結果、ブリーチ/パーマ 2 回処理毛束を除き、いずれの処理毛束も低剛性域および中剛性域の分布が有意に高くなり、高剛性域での分布は処理により異なった。そこで、ハリコシ感として感じ取る情報の一部が曲げ剛性分布曲線の中に含まれるものとして、改質処理毛束での官能評価と曲げ剛性分布曲線に含まれる情報との関係をより定量的に解析した。解析は曲げ剛性分布曲線のある領域に区切り剛性値の平均値を求め、官能評価との相関を Pearson の相関係数より判定した。その結果、分布曲線の剛性値上位 10 % ~ 15 % が最も高い相関を示すことが見いだされた。このことから、髪の毛のハリコシ感は単純に曲げ硬さのみで判断しているのではないであろうが、対象とする毛束より 100 本以上の毛髪を任意に選び、曲げ剛性分布曲線の上位 15 % の剛性値の平均値を用いることで、多様な髪の毛のハリコシ感を客観的に評価できるものと考えられた。

謝 辞

本検討中の官能評価と曲げ剛性の相関係数の算出および、必要本数の算出に際して用いた統計学的な考察に関しましては、大阪大学大学院基礎工学研究科の狩野 裕教授に御監修いただきました。この場を借りて、深く感謝の意を表します。

References

- [1] Kaname K, Moriwaki K (2010) J Jpn Hair Sci Assoc, **2**, 14-18
- [2] Watanabe S, Yokomaku A (1999) FREGRANCE J, **9**, 36-41
- [3] Fukuhara M (2010) FREGRANCE J, **6**, 59-64
- [4] Furukawa T (2014) “Kannou hyouka katuyou nouhou · kankaku no teiryoku · suuchika syuhou” p474, Gijyutsu Jyohou Kyokai, Tokyo
- [5] Kuwabara S, Mori M, Ueda S, Joko K (2015) J Text Eng, **4**, 41-47
- [6] Soma T, Iwabuchi T (2009) J Jpn Hair Sci Assoc, **2**, 28-33
- [7] Miyazawa K, Kaneda I, Iizuka N, Yanaki T, Uemura M (2003) J Soc Cosmet Chem Jpn, **4**, 301-308
- [8] Sidney B, H, Nigel J.P.W (2001) J Cos Sci, **5**, 330-331
- [9] Iwata H (1993) FREGRANCE J, **6**, 63-72
- [10] J. G. Gould, R. Sneath (1985) J Soc Cosmet Chem, **36**, 53-59
- [11] Arai K, (2003) “Saishin no mouhatsu kagaku”, p72, Fureguransu Ja-nal Sha, Tokyo
- [12] J. D. Leeder, D. G. Bishop, L.N.Jones (1983) Text Res J, **53**, 402-407
- [13] Amaya M, Sawada M, Yoshida H, Joko K (2013) Sen'i Gakkaishi, **69**, 132-140
- [14] Kono H, Suganuma K, Furukawa T (1999) J Soc Cosmet Chem Jpn, **33**, 4, 377-385
- [15] C. R. Robbins (2012) “Chemical and Physical Behavior of Human Hair” 5th Edition, Springer, Heidelberg
- [16] Takizawa T, Takizawa T, Arai S, Osumi M, Saito T (1998), Anat Rec, **251**, 406-413
- [17] Kuzuhara A (2007) Biopolym, **85**, 274-283
- [18] Ogawa S, Takeda Y, Kaneyama K, Komoto T (2008) Sen'i Gakkaishi, **64** 352-357.
- [19] Inoue T, Takehara K, Kizawa K, Fujimori T, Takeuchi A, Uesugi K, Suzuki Y (2012) J Soc Cosmet Chem Jpn, **46**, 101-106
- [20] Nawa T (2013) Doctor thesis, Tohoku University
- [21] R. K. Garnsworthy, R. L. Gully, P. Kenins, R. J. Mayfield, R. A. Westernman (1988) J Neurophysiol, **59**, 1083-1097
- [22] G. R. S. Naylor, D. G. Phillips, C. J. Veitch, M. Dolling, and D. J. Marland (1997) Text Res J, **67**, 288-295
- [23] Takase S, Doi K, Fujimoto H (2009) T JSKE, **8**, 1105-1111
- [24] Takase S (2009) Ningen Kagaku Kenkyu, **22**, (Supplement), 77