

ナノとマクロスケールにおいてコンディショナー成分が キューティクル表面の摩擦特性に及ぼす影響

Effect of conditioner components on frictional properties of cuticle surface
at nano and macro scales

東理大・院（学）*中嶋 昇吾 東理大・院（学）佐藤 魁星 東理大・工（正）佐々木 信也

Shogo Nakajima*, Kaisei Sato*, Shinya Sasaki**

*Graduate School of Tokyo University of Science, **Tokyo University of Science

1. 緒言

より美しく健やかな髪質維持のため、ヘアケア製品の高機能化が求められている。中でも、髪の質感改善において、コンディショナーが果たす役割は大きい。毛髪の表面はキューティクルと呼ばれる組織で覆われており、毛髪表面のキューティクルにコンディショナーが作用することで毛髪の触感が改善される。毛髪の触感は毛髪と人間の指先との接触により評価されるため、毛髪表面の摩擦特性は触感に大きな影響を及ぼす。しかしながら、実際に毛髪を触ることによる官能評価試験では、定量的な評価が困難である。そのため、Bhushan らの先行研究を始めとして、毛髪の摩擦測定により質感を定量的に評価する試みが行われている¹⁾。

毛髪の摩擦特性の評価には、大きく分けて、マクロスケールとナノスケールの手法が存在する。人間の指先の触感に近いスケールでのマクロ摩擦試験は、触感知覚との相関が得られやすいという利点がある。しかしながら、マクロスケールの試験では、毛髪の太さやキューティクル表面の凹凸などの影響を受けるため、コンディショナー成分の吸着等によるキューティクルの表面改質効果を正確に把握することが難しい。一方で、ナノ摩擦評価においては太さや凹凸の影響を受けず、より微視的な領域での表面特性のみを評価可能なため、コンディショナーの作用メカニズムの調査において有用であると考えられている。そのため、毛髪の摩擦特性評価においては触感知覚との相関をマクロ摩擦特性でとりつつ、ナノ摩擦評価を用いた界面でのコンディショナーの作用メカニズム調査といった、両スケールでの摩擦特性評価が重要である。

Bhushan らは、市販コンディショナーを用いた研究において、マクロスケールとナノスケールでコンディショナーが毛髪表面の摩擦特性を変化させることを報告している¹⁾。しかしながら、市販のコンディショナーには複数の成分が含まれており、個々のコンディショナー成分が摩擦特性に与える影響については不明瞭である。また、毛髪は、粘弾性体であると考えられているとともに、毛髪内部にはコンディショナー成分が染み込むことが確認されており²⁾、毛髪の柔軟性に寄与する可能性がある。そのため、毛髪表面の摩擦現象を体系的に理解するためには、粘弾性特性調査を踏まえる必要もある。

本研究では、コンディショナー成分塗布時の毛髪表面の摩擦現象をマクロならびにマクロスケールで体系的に理解するため、コンディショナー塗布前後における毛髪のマクロ・ナノ摩擦特性調査する。また、ナノインデンターを用い、毛髪の粘弾性特性を調査することで、粘弾性が毛髪の摩擦現象に与える影響を考察する。

2. 実験方法

2.1 毛髪サンプルの作製

毛髪サンプルには日本人の毛髪を用い、頭皮から約 2~3 cm 離れた位置の毛髪に対して試験を行った。毛髪は化学的な損傷を受けていない毛髪である。毛髪サンプルの作製は、試験前にラウリン酸ナトリウム 0.1 mass% 添加水溶液中に 10 分間浸漬させた後、10 分間超純水（ミリポア、抵抗率 $\geq 18 \text{ M} \cdot \text{cm}$ の Milli-Q 水）で超音波洗浄することで、付着した油分を取り除いた。洗浄処理後は、ドライヤーを用い、20 cm 程度離した位置から 30 秒間乾燥させた。コンディショナー成分には、セタノールと、オリーブ油を模擬したオレイン酸ナトリウムを使用した。それらコンディショナー成分の 0.06 mass % 添加水溶液を使用した。コンディショナー処理に関しては、洗浄処理した毛髪をコンディショナーに 10 分間浸漬させ、その後超純水に短時間浸し、ドライヤーで同様に乾燥させることで実際の使用環境を模擬した。オレイン酸ナトリウム、および、セタノールを用いてコンディショナー処理された毛髪を、以降、オレイン酸ナトリウム処理とセタノール処理と呼称する。Table 1 にラウリン酸ナトリウムとオレイン酸ナトリウムとセタノールの化学構造式を示す。

2.2 低荷重摩擦試験機によるマクロ摩擦特性調査

低荷重摩擦試験機（ナントライボーメータ、Anton Paar, Austria）を用いて、洗浄処理のみ、オレイン酸ナトリウム処理ならびにセタノール処理の毛髪のマクロスケールにおける摩擦特性を調査した。摩擦形式は往復動ボールオノプレート式とし、ボールには直径 2 mm の窒化ケイ素球を用いた。Table 2 に試験条件を示す。

2.3 原子間力顕微鏡(AFM)によるナノ摩擦特性調査

AFM (Nano Navi, Hitachi High-Tech, JP) を用いて、洗浄処理のみ、オレイン酸ナトリウム処理、セタノール処理の毛髪のナノスケールにおける摩擦特性を調査した。カンチレバーには、ピラミッド型 Si 製カンチレバー (SI-DF03, Hitachi High-Tech, JP) を用いた。ナノ摩擦試験では、荷重を 5 nN から 20 nN の範囲で変化させて測定し、荷重と摩擦力の関係から摩擦係数を算出した。Table 3 にカンチレバーの諸特性を示す。

Table 1 Chemical structure of used ingredients

Sodium Laurate	
Sodium Oleate	
Cetanol (1-Hexadecanol)	

Table 2 Experimental conditions of macro friction tests

Normal load, mN	50
Reciprocating amplitude, mm	1.0
Cycle number	15
Sliding speed, mm/s	0.1
Temperature, °C	24

Table 3 Cantilever property

Cantilever	SI-DF-3
Shape	Pyramid
material	Si
Spring constant, N/m	7.99

2.4 ナノインデンターを用いた粘弾性特性調査

ナノインデンター (iMicro, Nanomechanics, US) を用いて洗浄処理のみ、オレイン酸ナトリウム処理ならびにセタノール処理の毛髪の粘弾性を測定した。圧子は直径 54.99 μm のフラットパンチ圧子を用いた。材料はダイヤモンドである。押し込み深さは 1.0 μm、ポアソン比は 0.35、印加する振動の振幅は 50 nm とした。周波数は太田らの研究を参考に 1~15 Hz とした³⁾。また、各毛髪処理サンプルにつき、3 本の毛髪に対して試験を行い、1 本の毛髪の結果は試行回数 5 回の平均とした。

3. 実験結果

3.1 低荷重摩擦試験機によるマクロ摩擦特性調査

Figure 1 にしゅう動回数とマクロスケールにおける摩擦係数の関係を示す。洗浄処理のみと比較してオレイン酸ナトリウム処理とセタノール処理は低摩擦を示した。洗浄処理のみ、オレイン酸ナトリウム処理、セタノール処理のそれぞれの平均摩擦係数は 0.0629, 0.0595, 0.0520 であった。

3.2 AFM による形状像ナノ摩擦特性調査

Figure 2 に、キューティクル表面の 20 μm × 20 μm の 3D 形状像を示す。形状像より、円筒形のキューティクル組織が観察された。このキューティクル表面の段差を含まない箇所において、ナノ摩擦特性を取得した。Figure 3 に、各サンプルの摩擦係数の平均値を示す。洗浄処理のみ、オレイン酸ナトリウム処理、セタノール処理の平均摩擦係数はそれぞれ 0.0275, 0.0208, 0.0178 となった。

2.5 ナノインデンターを用いた粘弾性特性調査

Figure 4, Fig. 5 ならびに Fig. 6 に、洗浄処理のみ、オレイン酸ナトリウム処理ならびにセタノール処理の $\text{Tan}\delta$ と周波数の関係を示す。その結果、周波数が増加するごとに $\text{Tan}\delta$ が増加する傾向が見られた。しかし、それぞれの処理に対する比較では周波数に対する $\text{Tan}\delta$ の増加量の変化は見られなかった。

4. 考察

柿澤らは、毛髪を模擬した表面で感応評価と摩擦係数の関係を調査しており、摩擦係数の上昇は触感の悪化に繋がることを報告している⁴⁾。今回、オレイン酸ナトリウム処理とセタノール処理によって、マクロスケールならびにナノスケールで摩擦係数が減少することを確認した。そのため、オレイン酸ナトリウムとセタノール処理は毛髪の触感改善に良好な特性を持つものと推察される。また、ナノスケールにおいて摩擦低減効果が確認されたことから、オレイン酸ナトリウム処理ならびにセタノール処理は、キューティクル表面における摩擦を減少させる効果があるものと考えられる。以上のように、両スケールでコンディショナー処理により摩擦係数が低減したが、摩擦係数の絶対値はマクロスケールの方が大きかった。これは、ヒステリシス摩擦が大きいためだと考えられる。ナノ摩擦試験は微小荷重領域の摩擦試験であるため、接触界面の凝着の影響を強く受けていると考えられる。一方で、マクロスケールでは荷重が大きく、変形によるヒステリシス摩擦を大きく受けると考えられる。Figure 4, Fig. 5 ならびに Fig. 6 より、すべての処理の毛髪表面において同程度の粘弾性特性を示すとともに、 $\text{Tan}\delta$ の値は 0.25 から 0.4 であり、大きい値を示している。このことから、毛髪上においてはヒステリシス摩擦が大きく、その値は、各毛髪処理によらず同程度であると考えられる。そのため、マクロスケールにおいて、ナノスケールよりも大幅に毛髪上の摩擦が増加したものと考えられる。また、マクロスケールならびにナノスケールでの摩擦特性の違いは、各コンディショナー処理による凝着摩擦の低減であると考えられる。

5. 結言

低荷重摩擦試験機、AFM ならびにナノインデンターにより、オレイン酸ナトリウムならびにセタノール処理前後ににおける毛髪の摩擦特性と粘弾性を調査し、以下の知見を得た。

- (1) マクロスケールとナノスケールの摩擦試験結果より、オレイン酸ナトリウム処理とセタノール処理した毛髪は洗浄処理のみの毛髪と比較して低い摩擦係数を示すことが確認された。この結果より、コンディショナー成分であるオレイン酸ナトリウム処理とセタノール処理は、毛髪の摩擦特性を改善し、良好な触感を付与しているものと

考えられる。

- (2) マクロスケールにおける摩擦係数は、ナノスケールのものよりも大きな値を示した。これは、ナノインデンテーション試験により測定された粘弾性特性が毛髪によらず大きな値を示していたことから、ヒステリシス摩擦による影響だと考えられる。

文献

- 1) C. L. Torre & B. Bhushan: Investigation of scale effects and directionality dependence on friction and adhesion of human hair using AFM and macroscale friction test apparatus, Ultramicroscopy, 106 (2006) 720–734.
- 2) 伊藤・渡邊・前田・有路・吉田・鈴田：放射光赤外顕微鏡による毛髪内部へ浸透する油溶性成分の可視化、薬剤学, 78, 1 (2018) 25-27.
- 3) 太田・福増・西村・中村：毛髪の粘弾性的性質に及ぼす水の影響、纖維学会誌, 52, 1 (1996) 43-48.
- 4) 柿澤：毛髪表面の特徴と触感認識の関係、トライボロジスト, 59, 8 (2014) 471-476.

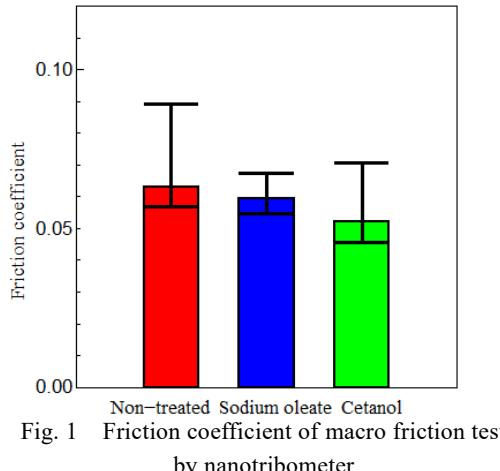


Fig. 1 Friction coefficient of macro friction test by nanotribometer

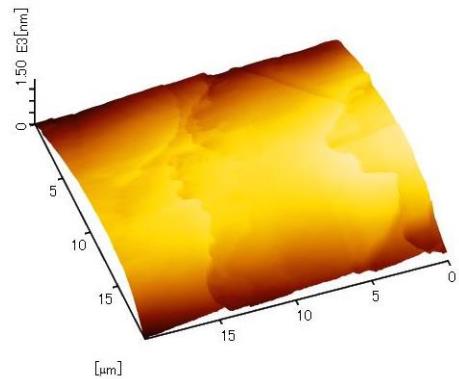


Fig. 2 Topographic image of washed hair surface by AFM

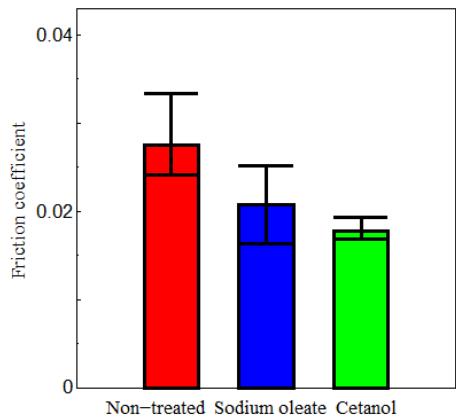


Fig. 3 Friction coefficient of nano friction test by AFM

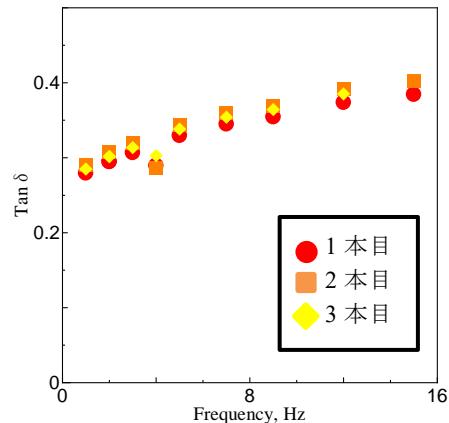


Fig. 4 Viscoelasticity measurement by indenter (Non-treated)

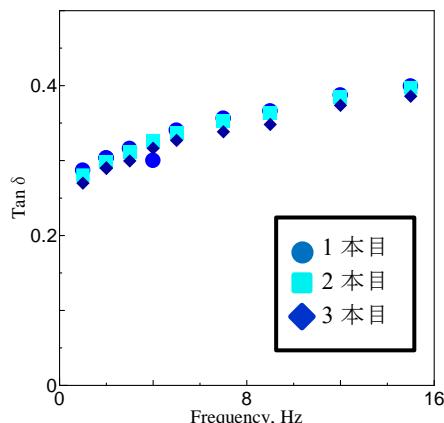


Fig. 5 Viscoelasticity measurement by indenter (Sodium oleate)

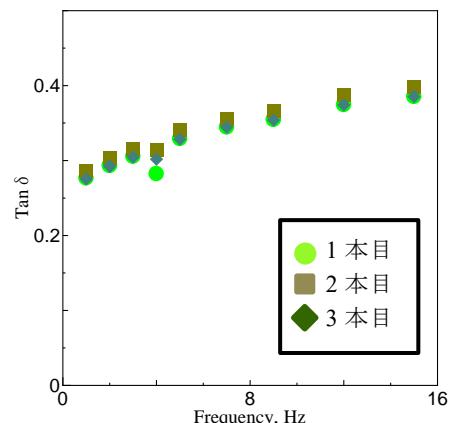


Fig. 6 Viscoelasticity measurement by indenter (Cetanol)