

目薬成分中のコンタクトレンズ摩擦特性に及ぼす水和層の影響

Effects of hydration layer on frictional properties of contact lens in eye drops

東理大・院（学）*中島 綾花 東理大・院（正）佐藤 魁星 東理大・工（正）佐々木 信也

Ayaka Nakajima*, Kaisei Sato*, Shinya Sasaki**

*Graduate school of Tokyo University of Science, **

Tokyo University of Science

1. 緒言

コンタクトレンズ（Contact Lens：CL）は、眼に装着して視力を矯正する医療機器であるが、眼にとっては異物であるため、使用時の不快感や眼障害を引き起こす場合がある¹⁾。これらの要因の1つとして、CLと眼組織の摩擦が挙げられる。CLを装着した際、CL凸部では眼表面上の5 μm程度の薄い涙液層が不安定になるとともに、瞬きに伴ってCL表面と上瞼の内側間の直接接触による摩擦が生じる²⁾。そのため、CLの安全性および装着時の快適さの向上には、涙液層の安定保持による摩擦低減が重要となる。

先行研究において筆者らは、生理食塩水中における、摩擦試験前後のCLの界面構造を測定した³⁾。その結果、CL表面には親水性の長鎖ポリマーからなる数10 nmの水和層が存在し、摩擦により長鎖ポリマーが水和層厚さが減少することを報告した。また、水和層厚さが小さくなると、CL表面の摩擦係数が増加し、水和層が回復すると摩擦係数が減少したことから水和層厚さの回復がCLの摩擦低減に重要であると考察している。しかしながら、目薬成分であるヒアルロン酸添加生理食塩水中においては、摩擦したCL表面上の水和層厚さの回復をもたらす一方で、生理食塩水よりも摩擦が増加することを報告しており⁴⁾、目薬成分添加時のCLの界面構造と摩擦特性においては未だ不明な点は多い。

本研究の目的は、目薬成分がCL摩擦面上に形成する界面構造と摩擦特性の関係を明らかにすることである。本報では、目薬成分のヒアルロン酸に加え、角膜保護剤として目薬に用いられているコンドロイチン硫酸ナトリウムを添加した溶液中において、高分解能で固液界面構造を直接観察できる周波数変調原子間力顕微鏡（Frequency-modulation atomic force microscope：FM-AFM）を用い、CL上に形成する界面構造を観察し、その界面構造が摩擦特性に及ぼす影響について調査した結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 実験材料

CLにはシリコンハイドロゲル素材である市販のソフトCL（ACUVUE OASYS, ACUVUE, JP）を用いた。また、涙液を模擬するためリン酸緩衝生理食塩水（Phosphate-buffered saline：PBS, Thermo Fisher SCIENTIFIC, USA）を使用し、目薬には0.3 mass%のヒアルロン酸ナトリウム（関東化学, JP）をPBSに添加したヒアルロン酸添加PBS、0.3 mass%のコンドロイチン硫酸ナトリウム（ナカライテスク, JP）を添加したコンドロイチン硫酸添加PBSを用いた。なお、市販のソフトCLは容器内で保存液に浸漬されている。したがって、保存液の影響を除去するため、容器から取り出されたCLサンプルは10分間PBSに浸漬した後、摩擦試験ならびにFM-AFM測定に使用した。

2.2 FM-AFM 測定

CLの界面構造観察には、FM-AFM（SPM-8100FM, SHIMADZU, JP）を使用し、CL表面の深さ方向に対する斥力領域分布を取得した。カンチレバーにはシリコン製カンチレバー（PPP-NCHRAuD, ばね定数: 40-41 N/m, 共振周波数: 303-306 kHz）を使用した。初めに、開封直後の新品のCLに対し、PBS中でFM-AFM測定を行い、その後、溶液をヒアルロン酸添加PBS、コンドロイチン硫酸PBSに替え、目薬添加による水和層への影響を調査した。

2.3 摩擦試験

摩擦試験には、低荷重往復動摩擦試験機（NTR2, Anton Paar, AT）を使用した。相手材は直径3 mmのサファイヤ球とし、CLは専用のホルダーに取り付け摩擦試験を実施した。Table 1に摩擦試験の実験条件を示す。目薬成分を添加した際のCLの摩擦特性を調査するために、PBS中、ヒアルロン酸添加PBS中、コンドロイチン硫酸PBS中でそれぞれ1000 cycleの摩擦試験を実施し、摩擦試験の測定開始時（0～50 cycle）と測定終了時（950～1000 cycle）の平均摩擦係数を比較した。

Table 1 Friction test conditions

Normal load, mN	0.1
Reciprocating amplitude, mm	1.0
Cycle number	1000
Sliding speed, mm/s	0.1
Sampling rate, Hz	100
Hertz's average contact pressure, kPa	13.1
Hertz's contact radius, μm	49.4

3. 実験結果

3.1 FM-AFM 測定

Figure 1に摩擦試験前のCLに対し、ヒアルロン酸PBS中で測定

した CL 表面の深さ方向に対する斥力領域分布を示す。画像の色の濃さは周波数シフト Δf の変化量に対応しており、負 ($\Delta f < 0$) にシフトすると引力の相互作用が働き、正 ($\Delta f > 0$) にシフトすると斥力の相互作用が働く。したがって、分子の密度分布が小さい領域では、カンチレバーは試料から受ける斥力の相互作用が小さくなるため、共振周波数シフト Δf は小さくなり、一方で分子密度が大きい領域では試料とカンチレバーに働く斥力の相互作用が大きくなるため、共振周波数シフト Δf は大きくなる。そのため、画像の色の濃淡は固液界面における密度分布を可視化しているとみなすことができる。PBS 溶液中における CL 表面の斥力領域は、34 nm 程度 (Fig. 1 (a)) であったのに対し、その後溶液をヒアルロン酸 PBS に替えると、斥力領域は 40 nm 程度 (Fig. 1 (b)) となった。また、Figure 2 に摩擦試験前の CL に対し、コンドロイチン硫酸 PBS 中で測定した斥力領域分布を示す。PBS 溶液中における CL 表面の斥力領域は、80 nm 程度 (Fig. 2 (a)) であったのに対し、その後溶液をコンドロイチン硫酸 PBS に替えると、斥力領域は 57 nm 程度 (Fig. 2 (b)) となった。このことから、添加する目薬成分により CL 表面の水和層厚さが変化することがわかった。

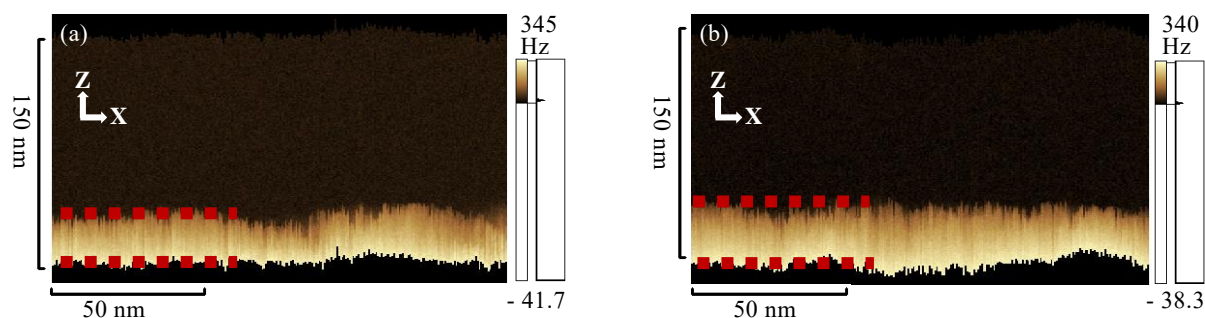


Fig. 1 Z-X measurement of the soft contact lens surface in PBS with 0.3 mass% hyaluronic acid (a) before the 1000 cycle friction test, (b) after the 1000 cycle friction test

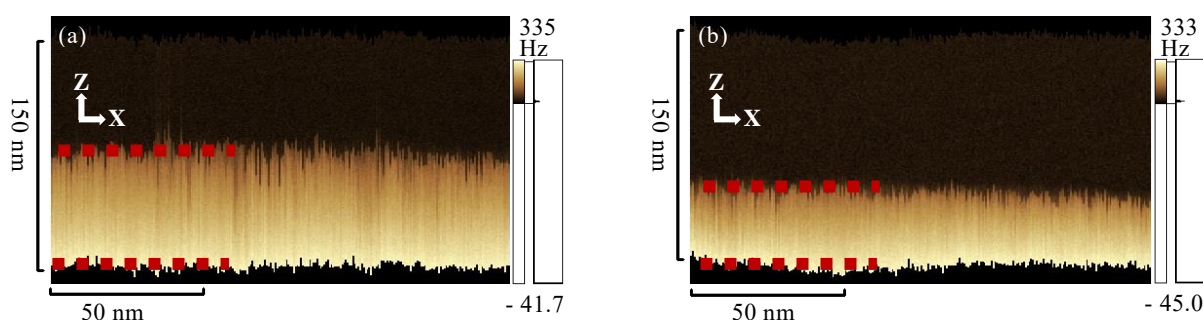


Fig. 2 Z-X measurement of the soft contact lens surface in PBS with 0.3 mass% chondroitin sulfate (a) before the 1000 cycle friction test, (b) after the 1000 cycle friction test

3.2 摩擦試験

Figure 3 に PBS 中の CL 表面における摩擦試験結果を示す。いずれの溶液中においても、しゅう動回数の増加に伴い摩擦係数が増加する傾向が確認されており、CL 上の微小摩耗の影響し摩擦が増加したものと推察される。コンドロイチン硫酸 PBS 中と PBS 中の摩擦係数を比較すると、測定開始時 (0 ~ 50 cycle) と測定終了時 (950 ~ 1000 cycle) の平均摩擦係数ともに大きな差は確認されなかった。一方で、ヒアルロン酸 PBS 中と PBS 中の摩擦係数を比較すると、先行研究でも確認されているように、ヒアルロン酸 PBS 中の測定開始時 (0 ~ 50 cycle) と測定終了時 (950 ~ 1000 cycle) の平均摩擦係数は、0.015 ほど増加することが確認された。

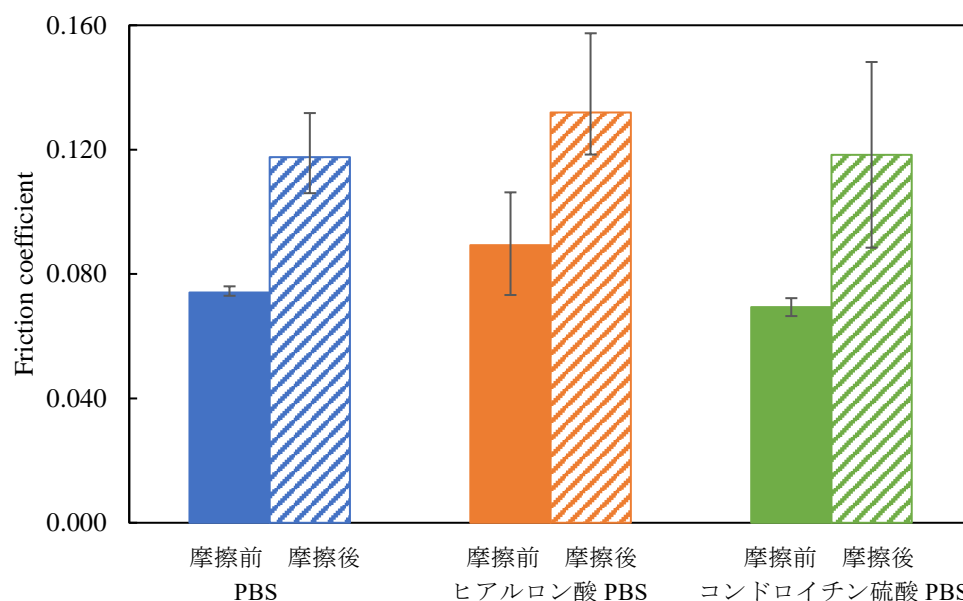


Fig. 3 Average friction coefficient of the soft contact lens surface (n = 3)

4. 考察

開封直後の新しい CL に対して、目薬成分の添加による水和層変化を調査したが、ヒアルロン酸 PBS 中では PBS 中の時の水和層厚さと同程度、コンドロイチン硫酸 PBS 中では PBS 中の時に比べ、水和層厚さが減少した。このことから、目薬成分の添加は、開封直後の新しい CL 表面の水和層厚さ増加に有効な結果を示さないことが分かった。

また、摩擦試験においては、ヒアルロン酸は先行研究と同様に、PBS 中に対して摩擦係数の増加が確認されたが、一方で、コンドロイチン硫酸添加では PBS 中と同程度の摩擦係数が得られた。このことから、今回の実験で設定している境界潤滑条件における摩擦の観点では、ヒアルロン酸よりもコンドロイチン硫酸の方が目薬の添加剤として優れていると考えられる。しかし、摩擦後の CL 表面の摩耗状態や水和層調査は未実施であり、目薬成分が CL 着用時の快適性に及ぼす影響については、さらなる調査が必要である。

5. 結言

目薬成分添加が、CL 摩擦面に分布する界面構造ならびに摩擦に及ぼす影響を調査するため、摩擦試験ならびに FM-AFM 観察より、CL 摩擦面の摩擦特性ならびに斥力領域層の観察を試みた結果、以下の知見を得た。

- (1) FM-AFM 観察より、開封直後の新しい CL 表面では、目薬添加剤であるヒアルロン酸およびコンドロイチン硫酸による水和層厚さの増加は確認されなかった。
- (2) 摩擦試験より、先行研究と同様にヒアルロン酸添加 PBS 中では、PBS 中に比べ CL 表面の摩擦係数が増加した。一方で、コンドロイチン硫酸添加 PBS 中での摩擦係数は、PBS 中と同程度であり、ヒアルロン酸よりも良好な摩擦特性を示した。

文献

- 1) 伊藤・河合・安田・宮前：SFG 分光法を用いたソフトコンタクトレンズ材料/水界面の構造解析，高分子論文集，69，1 (2012) 27.
- 2) 丸山：コンタクトレンズ装用による目のトライボロジー，トライボロジスト，60，8 (2015) 506-507.
- 3) 中島・佐藤・渡部・佐々木：FM-AFM を用いた水和層観察によるコンタクトレンズ表面の潤滑メカニズムの提案，トライボロジスト，67，8 (2022) 581-588.
- 4) 中島・佐藤・佐藤・渡部・佐々木：目薬成分がコンタクトレンズの水和層厚さと摩擦特性に及ぼす影響，トライボロジー会議 2021 秋 松江 予稿集 (2021)