

スマートフォンを用いた涙液量測定の実験的検証 Feasibility Study on Measurement of Tear Volume using Smartphone

岡崎 善朗† 武長 龍樹† 三宅 琢† 大久保 俊之‡ 巖淵 守†
Yoshiro Okazaki Tatsuki Takenaga Taku Miyake Toshiyuki Okubo Mamoru Iwabuchi

1. はじめに

近年、ディスプレイを長時間見続ける事によりドライアイを発症する人が増えている。ドライアイになると様々な眼症状を引き起こす恐れがあるため、その診断は益々重要になっている。現在、臨床現場においてはシルマー検査、および BUT(Break Up Time)測定などによりドライアイの診断を行っているが、異物の接触や涙液の染色などを必要とするため、目に刺激が加わらない状態で測定するのが困難であった。そこで非侵襲的にドライアイを検出できる、メニスコメトリー法が試みられている[1,2]。この方法は涙液量を反映する涙液メニスカスの曲率半径を測定する事が出来るため、ドライアイの重症度を定量的に評価することができる。

しかし、この装置は診察室という限られた場所でしか使用する事が出来ない。外部環境や心身の状態によっても変動する涙液量を、診察室外においても捉えることができれば、眼科医だけでなく患者にとっても有益な情報が得られる事が期待される。そこで本研究では場所や時間によらず患者自身が簡単に涙液を測定することを目的とし、スマートフォンによる新しい測定手法の可能性を検討した。

2. 方法

2.2 メニスコメトリー法の原理

下眼瞼縁に溜まる涙液メニスカスは、凹面の帯を形成しており、その凹面に水平の格子縞を投影すると、メニスカス前方に小さな反射像が形成される。メニスコメトリー法は、その反射像を拡大撮影し、測定した線の幅を以下の凹面鏡の光学式(1)に当てはめて、涙液メニスカスの曲率半径 r (Tear Meniscus Radius: TMR)を算出する(図1) [3]。

$$r=2W(i/t) \quad (1)$$

ただし W はワーキング長、 i はカメラで撮影するイメージの垂直方向の幅(受光系)、 t は投影するターゲットの垂直方向の幅(投光系)とする。

2.3 本測定システム

従来の受光系を iPhone5s(Apple Inc)の前面カメラとし、投光系を iPad2(Apple Inc)のディスプレイとして構築した。システム外観を図2に示す。iPhone5S を iPad 長辺端に両面テープで固定し、前面カメラに取り付けたマクロレンズ(#32-011, Edmund Optics)の焦点位置(24mm)に被写体を配置した。この状態で iPad2 の画面に白と黒の縞模様動画を流し、被写体表面に反射した模様を動画撮影した。保存した動画(720p, 30fps)は mov ファイルに変換し、ImageJ 1.48にて解析を行った。ワーキング長 W は 35mm、イメージ幅 i は定規の撮影画像から pixels を mm に換算した値(1pixels=0.021mm)を用い、ターゲット幅 t は白線の垂直方向

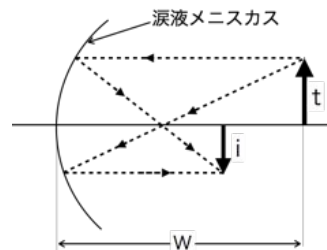


図1 メニスコメトリー法の光路図



図2 測定システムの外観

の幅 1.9-96mm とした。iPhone5S のモニター輝度は 50%、iPad2 の輝度は最大とした。線の移動速度は 33mm/sec、移動方向は上から下とした。

2.4 ガラス管による測定

iPhone5S を始めとするスマートフォンの前面カメラを用いた場合、現状では従来のメニスコメトリー法程高い解像度が得られない。このため測定する線幅を可能な限り大きく取る事で精度を上げる事が出来ると考えられる。しかし線幅が大きすぎると涙液メニスカスの反射面に入りきらず、線幅の変化を捉える事が出来なくなる。このため、本手法においては適切な線幅の設定が重要となる。そこでまず、既知の曲率半径を持つサンプルを測定し、本手法で検出可能な線幅の範囲を調べた。先行研究よりドライアイ患者の TMR は 0.17-0.314mm、健常者は 0.3-0.545mm であるため[1,4]、この値を含む5本の異なる曲率半径を持つガラス細管(0.145-0.595mm, IntraMARK, BLAUBRAND)を軸方向に半分カットし内面を測定した。白線がガラス管の中心に来た時の線幅(pixels)を ImageJ にて測定し、式(1)より曲率半径を算出した。

2.5 被験者による測定

参加に同意を得られた被験者 32 名(男性 22 名,女性 12 名)の測定を行った。被験者の平均年齢±標準偏差は 35±12 歳、コンタクトレンズ着用者及び眼科手術経験がある人は除外した。測定部位は左下眼瞼縁とした。レンズの隣に配置した 24mm 厚のスポンジに左頬を当てて測定部位を固定した。線の動きにより生じる眼球の不随意運動を抑えるため、ディスプレイに設けた固定点を凝視してもらった。また従来法との比較のため男女各 1 名に対し、本手法による測定 10 分後に眼科医により細隙灯顕微鏡(SL130, カールツァイス)を用いてフルオレセイン染色による涙液メニスカス高を測定した。本研究は平成 27 年度東京大学倫理審査専門委員会の承認を得て行われた(審査番号 15-4)。

3. 結果

3.1 ガラス管の測定

iPad2 で表示した線幅と iPhone5S で撮影したガラス内管に映る線幅との関係を図3に示す。表示線幅の増大に従い

†東京大学先端科学技術研究センター

‡立川相互病院眼科

ガラス管内側の線幅が大きくなるが、一定の太さを超えると飽和する。これは表示線幅がガラス凹部反射面の最大幅を越えたためと考えられる。曲率半径 0.145mm においては iPad の線幅が 38.5mm 以上で飽和することから、このガラス管で差異を検出できる最大の線幅は 38.5mm であると考えた。曲率半径が小さい時、線幅が大きいくほど検出感度が上がるため、本検討では表示線幅を 38.5mm と設定した。なお曲率半径 0.32mm の線幅が他の挙動と異なるのは、ガラスを半分カットした際に生じたガラス粉が内側に付着し画像アーチファクトが生じたためと考えられる。表示線幅 38.5mm において各サイズのガラス管から測定した値を式(1)に当てはめて算出した曲率半径と、実際のガラス管の曲率半径との相関係数を調べた結果、 $R^2=0.98$ と高い相関が得られた。

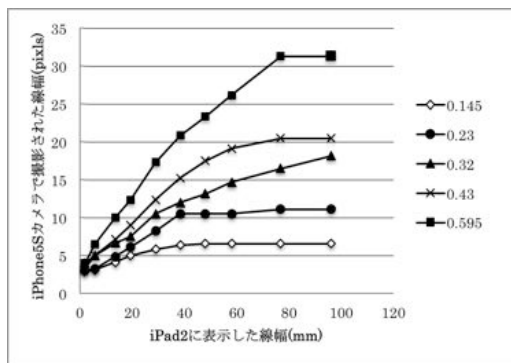


図3 異なるサイズのガラス管における iPad 表示線幅に対する測定結果



図4 本手法により得られた画像の例

3.2. 人の目への適用

iPhone5S により得られた下眼瞼縁の拡大画像の一例を図4に示す。涙液メニスカスに映る白線が画面下から上に動く中で、涙液表面の中央部に来たタイミングを凹部中央部とみなし、その時の白線の左端の線幅を測定した。測定値を理論式に当てはめた結果、被験者の TMR の平均値は 0.281mm、(SD 0.081, range 0.154~0.528mm; n=32) であった。年齢及び性別による TMR の違いは見られなかった。次に本手法により TMR を測定した男性(39 歳、TMR=0.263mm(SD 0.001))、女性(30 歳、TMR=0.328mm(SD 0.013))の涙液メニスカス高を測定した結果、男性 0.13mm(SD 0.046)、女性 0.28mm(SD 0.076)であった。更に、点眼前後の涙液量の変化を測定できるか調べるために、人工涙液(ソフトサンティア, 参天製薬)を1滴点眼し、その後5分間測定を行った結果を図5に示す(男性 39

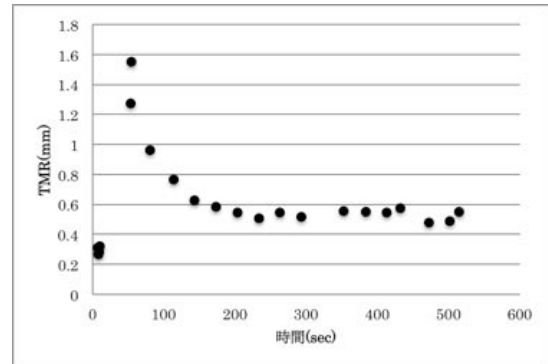


図5 点眼前後の TMR の挙動

歳)。点眼直後に約 1.6mm まで増大した TMR は約 230 秒後に 0.5mm まで低下し、その後ほぼ一定となった。

3. 考察

本手法は従来法と違い、涙液メニスカス上で動く線を解析する。線を動かす第一の利点として、線が涙液表面の凹部中央部に来るタイミングを簡便に判別できる点が挙げられる。凹面に反射する白線の線幅は、白線が凹部中央に近づくにつれ大きくなり中央部で最大値を取ると考えられる。線幅を時系列でプロットしその最大値を測定すれば自動的に凹部中央部の線幅を測定できる。次の利点として、涙液メニスカスと角結膜との輪郭線が明瞭になる点が挙げられる。角膜表面は凸面、涙液メニスカス表面は凹面形状をしているため、線の移動方向が逆向きとなる。このため、各面が接する輪郭線において白線が集合(もしくは離散)する様子が明瞭に観察できる。その結果、従来法では難しかった凹部上端の位置が明確となり、涙液メニスカス高さも容易に測定できるようになる可能性がある。更に、白線を複数回測定することにより単回に比べて精度が向上するという利点もある。ただしデバイスの位置決めが難しい等の測定上の課題もあり、今後改良が必要である。

4. まとめ

本研究では、メニスコメトリ法をスマートフォンに応用する事で簡便に涙液メニスカスの曲率半径を測定できる可能性を示した。本検討では投光系を iPad2 のディスプレイ、受光系を iPhone5S の前面カメラとしたが、今後は投光系と受光系を同じスマートフォンに搭載し、様々な環境下での涙液量の変化を調べる予定である。

参考文献

- [1] Yokoi N, Bron A, Tiffany J, Brown N, Hsuan J, Fowler C. Reflective meniscometry: a non-invasive method to measure tear meniscus curvature. Br J Ophthalmol 1999;83: 92-7
- [2] Bandlitz S, Purslow S, Murphy PJ, Pult H, Bron A. A New Portable Digital Meniscometer. Optometry and Vision Science 2014; 91: e1-8.
- [3] 横井則彦「メニスコメトリーとビデオメニスコメトリー」新しい眼科 vol.17, No.1, 2000
- [4] Mainstone JC, Bruce AS, Golding TR. Tear meniscus measurement in the diagnosis of dry eye. Curr Eye Res 1996;15: 653-61.