

瞬目誘発のための眼の乾燥を考慮した 空気圧式眼鏡型デバイスの基礎検討

森 登志樹^{1,a)} 正井 克俊^{2,b)} 崔 赫秦^{2,c)} 中村 優吾^{2,d)} 福嶋 政期^{2,e)} 峯 恒憲^{2,f)} 荒川 豊^{2,g)}

概要：視覚的な集中を要する環境における瞬目の減少はドライアイを引き起こす可能性がある。瞬目を促す手法の中で、空気圧刺激を用いた反射性瞬目誘発デバイスが効果的であるとされている。しかし、眼に空気圧刺激を与えることでかえってドライアイ等の症状を引き起こす懸念がある。そこで本稿では、空気圧刺激を用いた反射性瞬目誘発デバイスによって眼がどの程度乾燥するか調査した。本調査は実験参加者が瞬目を抑制できた最大時間を比較することで評価を行った。その結果、小型の扇風機程度の風量を与えると眼の乾燥に影響を及ぼしたが、本デバイスによる 1 秒間に 1 回の空気圧刺激は眼の乾燥への影響を及ぼさないことがわかった。

1. はじめに

瞬目は眼球への異物侵入を防ぐことや角膜を湿潤を保持すること等の重要な役割がある。我々は一般的に 1 分間で平均 15-25 回ほど瞬目を行っているが [1], VDT (Visual Display Terminals) 作業や読書などの視覚的な集中が必要な作業を行うと瞬目回数が減少する [2][3]。例えば、2m 先の風景画を眺めている場合の 1 分間の平均瞬目回数は 15.5 回であるが、パソコン作業中は 6.5 回、読書中は 5 回であった [3]。瞬目回数が減少すると涙液層が安定せず、ドライアイや充血、細菌の侵入による眼感染症等の症状を引き起こす可能性がある [4][5][6]。特に、ドライアイの有病率は日本人の約 33%、世界では約 11%と推定されており [7][8]、予防や改善を行うことが重要である。そのため、集中時でも一般的な回数と同程度まで瞬目頻度を増加させることが望ましい。

しかし、集中時に意識的に瞬目を促進させることは困難であるため、無意識的に瞬目を促進する手法が数多く提案されてきた [9][10]。近年では、角膜反射という眼の自然な反応を活用し、空気圧刺激による反射性瞬目を誘発するウェアラブルデバイスが提案されており、光や物理タップなど

を用いたデバイスに比べて瞬目誘発率が高いことがわかっている [11]。しかし、このデバイスは眼に空気を吐出するため、その暴露時間によっては風が眼の表面の水分を奪い、かえって眼を乾燥させドライアイ等の症状を引き起こす可能性については考慮されていない。

本研究では、空気圧刺激を用いた反射性瞬目誘発デバイスが眼の乾燥への影響を明らかにするために比較を行う。眼の乾燥に与える影響を調べるにあたり、眼精疲労度や涙の量を計測する手法が考えられるが、どちらも長時間にわたる実験が必要であるため、短時間で眼の乾燥の定量化する手法を検討した。本実験では、空気圧刺激を与えた場合と与えなかった場合に実験参加者が瞬目を抑制できた最大時間（以降、瞬目抑制時間と呼ぶ）を計測し、これを比較する。

2. 関連研究

Nosch らは、実験参加者がコンピュータ使用時に、アニメーションが出現するたびに 2 回連続で瞬目を行うというタスクを 1 週間与えた [13]。その結果、涙液層が安定しドライアイ症状の緩和に成功した。しかし、このシステムは瞬目を意図的に行わなければならない。また、ドライアイ症状の緩和も OSDI アンケートと呼ばれるドライアイ診断で広く用いられるアンケートのスコアを比較したもので、定量的なデータから結論づけられたものではない。Zenner らは、VR などの没入型仮想環境下における瞬目の制御を目的として光、画面内の物体の接近、画面のぼかし、空気圧刺激による反射性瞬目を評価した [12]。その結果、光、画面内の物体の接近、空気圧刺激はベースラインよりも有意に反応時間がはやく、瞬目誘発率も 80%を超えていた。また、集中阻

¹ 九州大学 工学部 電気情報工学科
² 九州大学 大学院 システム情報科学研究院
a) mori.toshiki.118@s.kyushu-u.ac.jp
b) masai@ait.kyushu-u.ac.jp
c) choi@ait.kyushu-u.ac.jp
d) y-nakamura@ait.kyushu-u.ac.jp
e) shogo@ait.kyushu-u.ac.jp
f) mine@ait.kyushu-u.ac.jp
g) arakawa@ait.kyushu-u.ac.jp

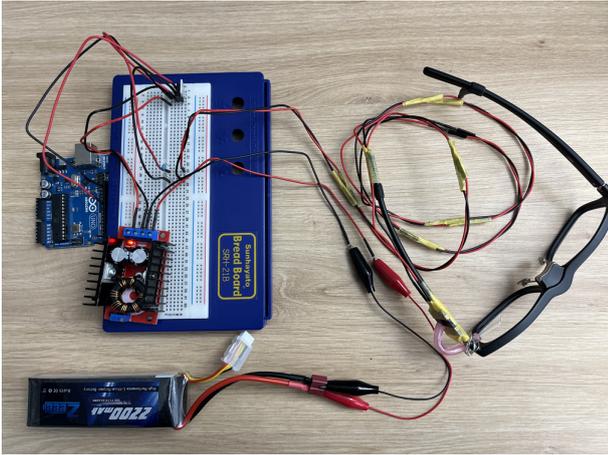


図 1 眼鏡型反射性瞬目誘発デバイス

害度は画面のぼかしが最も高く、空気圧刺激が最も低かった。Dementyev らは、光、物理タップ、空気圧刺激によって反射性瞬目を誘発させるメガネ型デバイス DualBlink を提案した [11]。評価実験の結果、空気圧刺激は反射性瞬目の誘発率が平均 62.4%と最も高く、また実験参加者の集中阻害度が最も低かった。

これらの関連研究から、誘発率が比較的高く集中阻害度が比較的低い空気圧刺激を用いることが瞬目の促進に適していると考えられる。しかし、空気圧刺激の暴露時間によっては、かえって眼を乾燥させ、ドライアイ等の症状を引き起こす可能性がある。したがって、本研究では空気圧刺激による反射性瞬目誘発デバイスを用いて、空気圧刺激を与えた場合と与えなかった場合の瞬目抑制時間を比較して、本デバイスが及ぼす眼の影響について評価する。

3. 空気圧刺激による反射性瞬目誘発デバイス

3.1 デバイスの設計

本研究では VDT 作業や読書などの視覚的な集中時の利用を想定しているため、空気圧刺激による反射性瞬目誘発デバイスを眼鏡型のウェアラブルデバイスとして実装した。本デバイスを図 1 に示す。本デバイスではバッテリー、昇圧モジュール、マイクロコントローラ、オーディオパワーアンプ、エアポンプから構成されている。バッテリーはリチウムイオンポリマー二次電池 (LiPo) を使用しており、出力電圧は 11.1V のものを選んだ。また、この出力電圧を昇圧モジュールによって 20V まで昇圧させた。マイクロコントローラは Arduino UNO を使用してデバイスのオンとオフの制御を行い、1 回につき 100ms の間空気を吐出した。オーディオパワーアンプは LM1875 (Unisonic Technologies) を使用して電圧と信号の制御を行った。エアポンプは小型かつ薄型のマイクロブロー (MZB1001T02, 村田製作所) を使用した。



図 2 眼鏡型反射性瞬目誘発デバイスを装着した様子

3.2 デバイスの実装

また、装着した様子を図 2 に示す。本デバイスでは眼鏡の柄の部分にマイクロブローを固定しており、空気の吐出箇所を細かく調節するためにチューブとノズルを用いた。

4. 第 1 実験

本章では空気圧刺激による反射性瞬目誘発デバイスが及ぼす眼の乾燥への影響について実験を行う。本デバイスは角膜に向けて空気を吐出するため、その暴露時間が長ければ眼の乾燥への影響を及ぼすと予測される。本実験では、眼の乾燥を防ぐための瞬きを意識的に抑制した時間を瞬目抑制時間と定義し、角膜に空気をあてた場合と当てていない場合の瞬目抑制時間を比較することで、眼の乾燥に対する簡易的な調査を行った。実験参加者は 20 代の男性 16 名で、全員裸眼で実験を行った。

4.1 実験条件

実験では、2 つの空気圧刺激頻度において瞬目抑制時間を計測した。また、筆頭著者が事前に瞬目抑制を試し、その結果を踏まえて実験に 3 つ制限を加えた。まず、実験参加者には空気圧刺激を与える右目の脇を手で押さえてもらい、瞬目を抑制してもらった。これは、本デバイスによって反射的に瞬目することを防ぐためである。次に、瞬目抑制中に涙が流れた場合や白目を剥いた場合はその時点の時間を瞬目抑制時間として記録した。最後に、瞬目抑制時間は 3 分を上限とした。これは、瞬目抑制を 3 分間続けられた場合は眼の乾燥に影響はないと考えたためである。さらに、瞬目抑制が数秒しかできない実験参加者を考慮した結果、実験における空気圧の刺激頻度は以下の 2 つとした。

- *high*: 1 秒に 1 回空気を吐出

- *low*: 3秒に1回空気を吐出

また、ベースラインとしてデバイスの装着なし (以下, *base*) においても瞬目抑制時間を計測した。

4.2 実験手順

実験参加者には実施前に実験概要の説明を行った。その後、各条件につき3回ずつ瞬目抑制を行った。各3回の瞬目抑制後は2分の休憩をとった。3つの条件の順序は、実験参加者ごとに入れ替えて実験を行った。実験中は、本デバイスによる空気圧刺激を与えたときの瞼の動きを観察するため、カメラで映像を記録した。また、実験中の湿度も記録した。実験後は瞬目抑制の辛さについてのアンケート調査を行い、10段階で評価してもらった。

4.3 実験結果

本実験は湿度34%-38%の範囲で行われた。実験のデータはWilcoxonの符号順位検定を行い空気圧刺激の影響を検証した ($\alpha=0.05$)。3つの条件における瞬目抑制時間を図3に示す。瞬目抑制時間の平均値は、*base*が67.85秒、*low*が59.67秒、*high*が55.85秒であった。しかし、*low*、*high*はともに*base*と有意差がなかった。次に、実験後のアンケート結果を図4に示す。実験参加者には瞬目抑制中の辛さを「1: 全く辛くない - 10: 非常に辛い」の10段階で評価してもらった。アンケートのスコアの平均値は*base*が7.14、*low*が7.03、*high*が7.46であった。こちらも全体として有意差は見られなかった。これらの結果から、本デバイスで用いる空気圧刺激は眼の乾燥に影響がないと判断できる。最後に、本デバイスを用いた場合の瞬目誘発率を図5、単位時間あたりの瞬目回数を図6に示す。このとき、瞬目回数は眼を閉じようと瞼を動かした総回数、また、誘発された瞬目回数は空気圧刺激が与えられた直後に眼を閉じようと瞼を動かした回数として実験中の映像から計測され、その回数から瞬目誘発率と単位時間あたりの瞬目回数を計算した。瞬目誘発率の平均値は*high*が35.10%、*low*が50.13%であった。この結果から、本デバイスは反射性瞬目誘発システムとして機能していると判断できる。また、単位時間あたりの瞬目回数の平均値は*high*が0.42回、*low*が0.31回であった。これを1分あたりの瞬目回数に直すと、*high*は25.2回、*low*は18.6回であり、本デバイスはどちらの刺激頻度も一般的な瞬目回数と同程度まで促進できる可能性があることがわかった。

5. 第2実験

前章の実験で反射瞬目誘発デバイスで用いる空気圧刺激は眼の乾燥に影響を及ぼさないことがわかった。そこで、本章ではより多くの風量を与えた場合の眼の乾燥への影響を検証するために、小型の扇風機を用いて前章と同様に瞬目抑制時間を計測した。本実験で計測された瞬目抑制時間は、

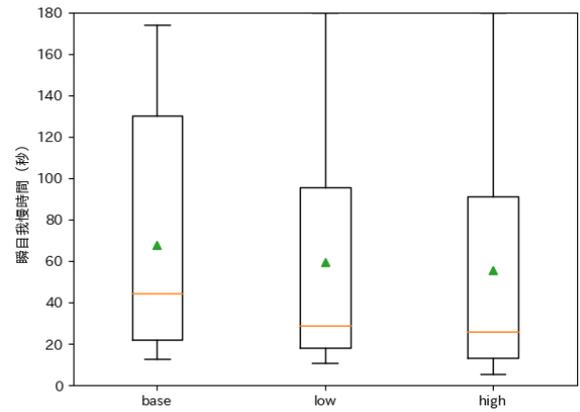


図3 反射性瞬目誘発デバイス使用時の瞬目抑制時間

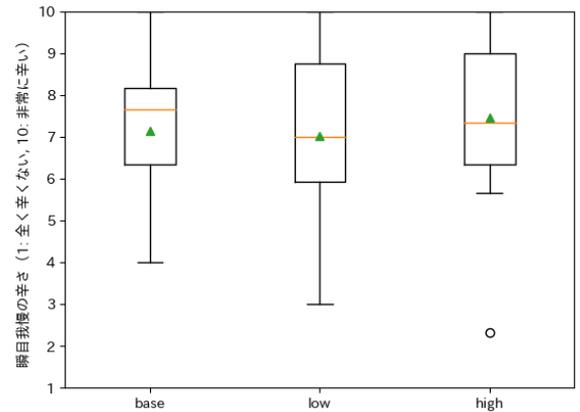


図4 反射性瞬目誘発デバイス使用時のアンケート結果

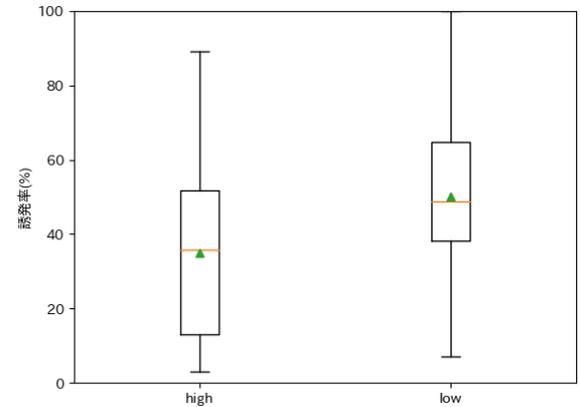


図5 反射性瞬目デバイス使用時の誘発率

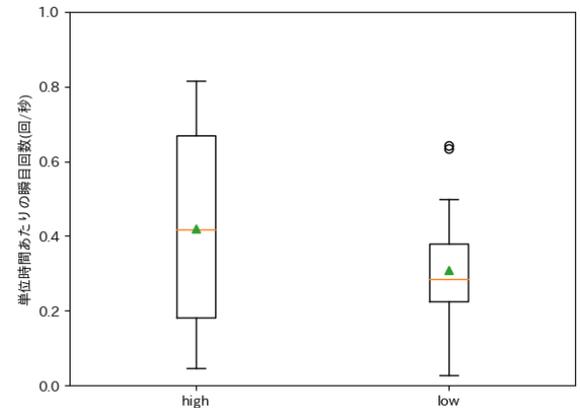


図6 反射性瞬目デバイス使用時の単位時間あたりの瞬目回数

前章の実験の *base* と比較し、その評価を行なった。実験参加者は前章の実験にも参加した男性 8 名で、全員裸眼で実験を行った。

5.1 実験条件

本実験では、小型の扇風機（KCF-SDC151T-W、アイリスオーヤマ）を用いて、以下 2 つの風量の条件で瞬目抑制をさせた。

- *fan (weak)* : 10 段階の風量調整のうち 3
- *fan (medium)* : 10 段階の風量調整のうち 5

小型の扇風機は実験参加者の眼から 15cm 離れたところで、本デバイスで空気を吐出するノズルと同方向から送風された。瞬目抑制における制限は前章の実験と同じとした。

5.2 実験手順

第 1 実験と同様、実験参加者には実施前に実験の流れの説明を行った。その後、各条件につき 3 回ずつ瞬目抑制を行った。各 3 回の瞬目抑制後は 2 分の休憩をとった。2 つの条件の順序は、実験参加者ごとに入れ替えて実験を行った。実験中は、カメラで映像を記録した。また、実験中の湿度も記録した。実験後は瞬目抑制の辛さについてのアンケート調査を行い、10 段階で評価してもらった。

5.3 実験結果

本実験は湿度 36%-38%の間で行われた。2 つの条件と、前章の実験で実験参加者が行った *base* の瞬目抑制時間を図 7 に示す。瞬目抑制時間の平均値は、*base* が 85.16 秒、*fan (weak)* が 63.53 秒、*fan (medium)* が 40.86 秒であった。*base* と *fan (weak)* は有意差が出なかったが、*base* と *fan (medium)* は有意差が出た ($p < .05$)。また、実験後のアンケート結果を図 8 に示す。アンケートのスコアの平均値は *base* が 7.5、*fan (weak)* が 8.04、*fan (medium)* が 8.96 であった。全体としては有意差は見られなかったが、*fan (medium)* よりも *base* のほうがより辛いスコアをつけた実験参加者は 1 人しかおらず、その他全ての実験参加者が 8 点以上のスコアをつけていた。これらの結果から、小型の扇風機が与える風は眼の乾燥に影響を及ぼすことがわかった。

6. 制約事項, 議論

本実験は、空気圧刺激を与えながら瞬目抑制を 3 分間続けられた場合は眼の乾燥に影響はないと考え、瞬目抑制時間の上限を 3 分としているが、その根拠は主観的に決定しており、データによる裏付けが必要である。また、空気圧刺激を用いた反射性瞬目誘発デバイスおよび小型の扇風機の風量や風圧についての定量化は行われなかったため、眼の乾燥に影響する風量や風圧の閾値に関する将来的な調査が必要である。

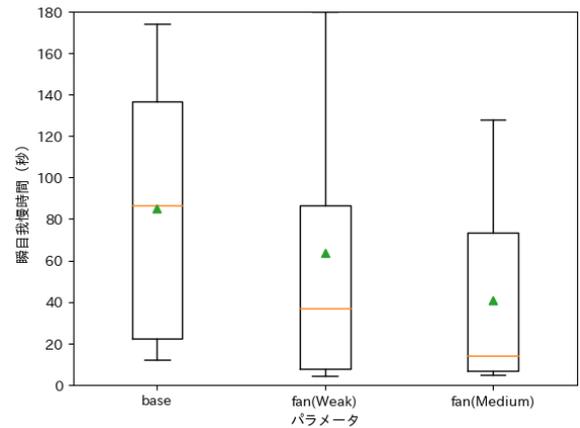


図 7 小型の扇風機使用時の瞬目抑制時間

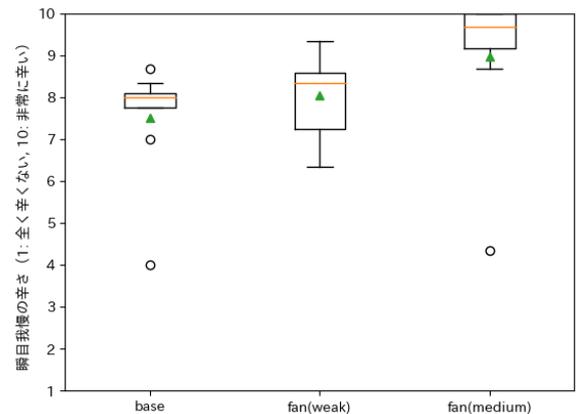


図 8 小型の扇風機使用時のアンケート結果

7. まとめ

本研究では空気圧刺激による反射的瞬目誘発デバイスが及ぼす眼の乾燥への影響について、第 1 実験で 3 種類の刺激頻度 (*base*: 空気圧刺激を行わない, *high*: 1 秒に 1 回空気圧刺激を行う, *low*: 3 秒に 1 回空気圧刺激を行う) による瞬目抑制時間の比較から簡易的に評価した。その結果、*high*, *low* はともに *base* と有意差がなかった。また、第 2 実験で小型の扇風機の風を 2 つの風量 (*fan (weak)*, *fan (medium)*) による瞬目抑制時間の計測した。その結果、*fan (medium)* は *base* と有意差が見られた。これらの結果から、小型の扇風機の風量は眼の乾燥に影響を及ぼす可能性があるが、本デバイスは 1 秒に 1 回の空気圧刺激を与えても眼の乾燥に影響を及ぼさないことがわかった。また、実験中の動画から誘発率や単位時間あたりの瞬目回数を計算した結果、本デバイスは一般的な瞬目回数と同程度まで促進できる可能性があることがわかった。今後はパソコン作業や読書等の視覚的な集中を要する環境下において、本デバイスが一般的な瞬目回数と同程度まで促進できるのか、また、その結果ドライアイ等の症状を改善できるのかを調査したい。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省による Society 5.0 実現

化研究拠点支援事業 (グラント番号: JPMXP0518071489)
による支援のもと実施されている。

参考文献

- [1] A. R. Bentivoglio, S. B. Bressman, E. Cassetta, D. Carretta, P. Tonali, and A. Albanese: *Analysis of Blink Rate Patterns in Normal Subjects, Movement Disorders*, Vol.12, No. 6, pp. 1028–1034 (2004)
- [2] N. FreudenthalerHartmut, H. Neuf, G. Kadner and T. Schlote: *Characteristics of spontaneous eyeblink activity during video display terminal use in healthy volunteers*, Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, Vol. 241, No. 11, pp. 914–920 (2003)
- [3] M. Arigilés, G. Cardona, Elisabet P. Cabré and M. Rodríguez: *Blink Rate and Incomplete Blinks in Six Different Controlled Hard-Copy and Electronic Reading Conditions*, The Association for Research in Vision and Ophthalmology (2015).
- [4] F. J. Holly and M. A. Lemp: *Tear physiology and dry eyes*, Survey of ophthalmology, pp. 69–87 (1977).
- [5] T. Kojima, R. Ishida, M. Dogru, E. Goto, Y. Takano, Y. Matsumoto, M. Kaido, Y. Ohashi, and K. Tsubota: *A new noninvasive tear stability analysis system for the assessment of dry eyes*, Investigative ophthalmology & visual science, pp. 1369-1374 (2004)
- [6] A. M. Griff and E. Hersh: *How Many Times Do You Blink a Day?*, Healthline, <https://www.healthline.com/health/how-many-times-do-you-blink-a-day> (2020)
- [7] S. Shimmura, J. Shimazaki, K. Tsubota: *Results of a Population-Based Questionnaire on the Symptoms and Lifestyles Associated with Dry Eye*, Cornea, pp. 408–411 (1999)
- [8] A. Oganov, G. Yazdanpanah, S. Jabbehdari, A. Belamkar, S. Pflugfelder: *Dry eye disease and blinking behaviors: A narrative review of methodologies for measuring blink dynamics and inducing blink response*, The Ocular Surface, Vol. 29, pp. 166-174 (2023)
- [9] D. L. Miura, R. M. Hazarbassanov, C. K. N. Yamasato, F. B. e Silva, C. J. Godinho, and J. Á. P. Gomes: *Effect of a Light-Emitting Timer Device on the Blink Rate of Non-Dry Eye Individuals and Dry Eye Patients*, British Journal of Ophthalmology, Vol. 97, No. 8, pp. 965–967 (2013)
- [10] T. Crnovrsanin, Y. Wang, and K. Ma: *Stimulating a Blink: Reduction of Eye Fatigue with Visual Stimulus*, Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 2055–2064 (2014).
- [11] A. Dementyev and C. Holz: *DualBlink: A Wearable Device to Continuously Detect, Track, and Actuate Blinking for Alleviating Dry Eyes and Computer Vision Syndrome*, Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, Vol. 1, No. 1, pp. 1:1-1:19 (2017)
- [12] A. Zenner, K. Ullmann, O. Ariza, F. Steinicke and A. Krüger: *Induce a Blink of the Eye: Evaluating Techniques for Triggering Eye Blinks in Virtual Reality*, Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, No. 256, pp. 1-12 (2023)
- [13] D. S. Nosch, C. Foppa, M. Tóth, and R. E. Joos: *Blink Animation Software to Improve Blinking and Dry Eye Symptoms*, Optometry and Vision Science, Vol. 92, No. 9, pp. e310–e315 (2015).