



## 瞬きに応じた眼の表面温度変化の測定

高田, 暁

---

(Citation)

人間と生活環境, 25(2):85-91

(Issue Date)

2018-11

(Resource Type)

journal article

(Version)

Accepted Manuscript

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90006703>



【原著論文】

## 瞬きに応じた眼の表面温度変化の測定

高田 暁

神戸大学大学院工学研究科建築学専攻

### Measurement of Change in Eye Surface Temperature in Response to Blinking

Satoru Takada

*Department of Architecture, Graduate School of Engineering, Kobe University*

**Abstract:** In this study, the surface temperature of the eye was measured by radiation thermometer and the behavior of blink was recorded by video camera for two subjects. As the results, it was shown that the surface temperature of the eyeball decreased during opening eyes, and that the decrease reached 0.5 to 1.0 °C. In addition, it was found that the time of closing eyes during a blink became longer when the interval of blinking was assigned to 5 or 3 seconds, which was longer than her/his natural blink interval. At the same time, the temperature of upper eyelid during closing eyes was shown to be higher than that of the eyeball, and thus the heat exchange between the eyeball and the eyelid during blink accounts for this. These results can be a basis for the quantitative evaluation of evaporation and accumulation of tears and for clarifying the indoor thermal environmental condition to prevent the sensation of dryness at the eye.

*(Received : April 14, 2018 Accepted : July 9, 2018)*

**Key words :** Measurement, Surface temperature, Eye, Blink, Radiation thermometer

**要旨:** 本研究では、眼の表面温度を放射温度計により非接触で測定し、ビデオ画像として記録された瞬きとの対応関係を検討した。測定は、自然な状態、瞬きを行う時間間隔を5秒あるいは3秒と指定する場合、眼を閉じた場合について、2名の被験者に対して行った。実験の結果、開眼中に眼球表面温度が低下すること、その温度低下は0.5~1.0°Cに達すること、閉眼時の上瞼外側表面温度が開眼時の眼球表面温度より高いこと、したがって、瞬きにより眼球が加温されていることが明らかになった。また、自然な状態より長い時間間隔で瞬きをするように指定した場合、瞬き時に眼を閉じる時間が長くなることを見出され、瞬き時の閉眼時間が、瞬き回数に加えて、眼の状態を把握する指標となり得ることを示唆した。これらの実験結果は、涙の蒸発量や蓄積量を評価し、眼の乾燥感が生じない室内温熱環境条件を明らかにする目的に活用できるものと考えられる。

**キーワード:** 測定、表面温度、眼、瞬き、放射温度計

#### 1. はじめに

冬期の低湿時に室内で眼の乾燥による不快を感じた経験を持つ人が少なからず見受けられる(高田 2013)。これを防止し、快適な室内環境を創出するための条件を明らかにすることが必要である。

眼の乾燥感や不快感は、眼を覆っている涙の状態と密接に関連していると考えられる。涙の量や状態を直接測定することが可能であれば、眼の乾燥感の評価構造を明らかにするのに有利であるが、接触法による測定は非常に難しい。例えば、目尻に細長い濾紙(シルマー試験紙)を挟み涙の量を測定する方法がドライアイの診断等、医療現場で使われている。涙は、油層、水層、ムコイド層(ムチン層)の三層からなり(稲富

1997)、その安定性を測定する方法として、涙液の画像を解析する方法や、眼の表面にフルオレセイン染色を施して涙液が破綻するまでの時間を測定する方法(Break up time: BUT)(堤ら 2005, 五藤 2007)、またその簡易評価法として、瞬きを我慢できる時間を測定する方法(Self-reported BUT)(Wyon et al. 1987)などがある。ただし、これらは経時変化の測定に適した方法とは言えない。一方、涙の蒸発と眼球表面温度の関係は、Tsubota (1998)により指摘されているものの、明確ではない。涙の蒸発性状には、室の温湿度や涙の三層構造の様相だけでなく、眼の温度も影響すると考えられる(Takada et al. 2013)。赤外線カメラや放射温度計による眼の温度測定を行った研究(蒲山

1980, Fujishima et al. 1994, Murphy et al. 1999, Purslow et al. 2007, Absharha et al. 2013) が見られるが、瞬きに応じた眼の表面温度変化に着目した検討はなされていない。

瞬きにより眼の恒常性が保たれている (五藤 2007) ことから、瞬きは眼の状態の指標の一つである。また、経時変化の測定も可能である。本研究では、瞬きによる眼球温度変化の性状を、被験者実験を通じて明らかにし、眼の乾燥を評価するための基礎的知見を得ることを目的とする。具体的には瞬きの様相を画像として記録し、放射温度計を用いた非接触法により眼球や瞼表面の温度を測定する。本研究では、自然な状態のほか、瞬きのタイミングを指定した場合について実験を行い、瞬きと眼球や瞼の表面温度との関係を検討する。

## 2. 方法

人工気候室 (室温 22℃、相対湿度 40% に設定) 内で、椅座安静状態の被験者について、瞬きの様子と眼表面温度の変化とを測定した。被験者は、健康な女子大学生 2 名とした (表 1)。被験者には実験内容を事前に十分に説明し、承諾を得た上で実験を実施した。被験者から見て右側にビデオカメラ (SONY HDR-XR500V) を設置し、瞬きの様子を撮影し、得られた画像から瞬きのタイミングを記録する。また、被験者の左目の表面温度を放射温度計 (ジャパンセンサー TMH91S) により連続測定する (測定間隔 0.1 秒、放射率 1.0)。開眼時に、眼球周辺の皮膚温の影響を排除し、開眼時に眼球の中心部分の 1cm 直径程度の範囲が測定範囲に収まるよう、放射温度計を眼球から 5cm 離れた位置 (放射温度計のレンズの仕様に応じて決定した) に固定し、実験開始前に調整する。測定範囲が狭いため、被験者の頭部を固定する必要がある。そのため、測定中、被験者は、顎を台に載せ、額を支柱に接触した状態を保った。

**Table 1** Profile of subjects.

|           | Gender | Age | Contact lenses         |
|-----------|--------|-----|------------------------|
| Subject A | female | 22  | Without contact lenses |
| Subject B | female | 22  | With contact lenses    |

以下の 4 つの条件について、順に連続して 1 分間ずつ測定した。

- (1) 自然な状態 (被験者は特に何も意識せず、通常の瞬きをしている状態)
- (2) 瞬き間隔を 5 秒と指定する状態
- (3) 瞬き間隔を 3 秒と指定する状態
- (4) 眼を閉じた状態

瞬き間隔を指定する場合、ストップウォッチを用いて測定者が被験者に瞬きの (眼を閉じる) タイミング

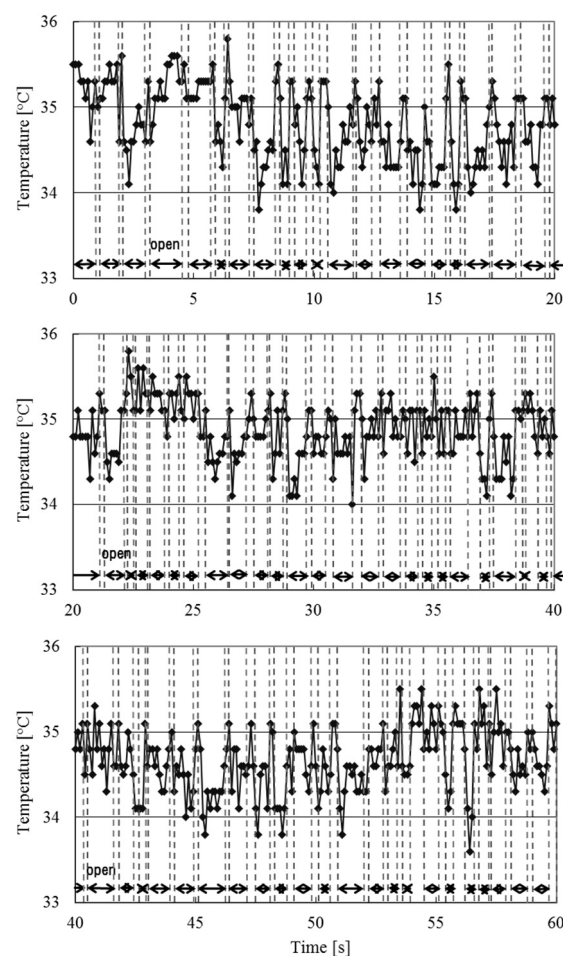
を指示する。各条件の間で 1～3 分間程度の間を取る。自然な状態を測定する場合を除き、測定開始前の数秒間、眼を瞑った状態を保つよう被験者に指示した。

## 3. 結果

実験中、人工気候室内の気温は 22.4～22.9℃、相対湿度は 37～40%、風速は 0.15m/s 前後であった。

### 3.1 自然な状態の場合

被験者 A、B の眼の表面温度の時系列をそれぞれ図 1、図 2 に、開眼・閉眼時の様子を写真 1 に示す。開眼時は眼球表面温度、閉眼時は上瞼の表面温度が測定されており、瞼の開閉時はその中間的な温度が測定されているものと考えられる。ビデオ画像と温度の測定値を照合すると、眼を閉じたタイミングで測定値が最も高く、開眼後に下がる。測定値を 1 分間の平均値で見ると、被験者 A の方が被験者 B に比べ 0.5℃ 高かった。また、1 分間の最大値と最低値の差は、被験者 A の方が小さかった。ビデオ画像から数えた瞬き回数は、被験者 A が 68 回/min、被験者 B が 31 回/min であった。瞬きに要する時間 (眼を完全には開けていない時間) は被験者 A で 0.24 秒、被験者 B で 0.15 秒 (1 分間の平均値) であった。



**Figure 1** Surface temp. of eye (Subject A, Natural state).

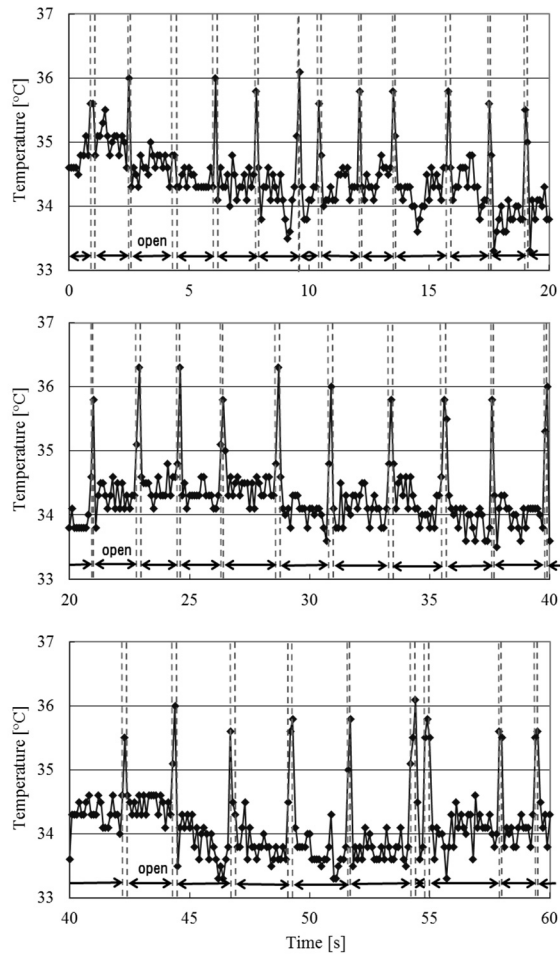


Figure 2 Surface temp. of eye (Subject B, Natural state).



Subject A

Subject B

Picture 1 Appearance of eye during experiment (when opening/closing eye).

### 3.2 瞬き間隔を5秒と指定した場合

被験者 A、B の眼の表面温度の時系列をそれぞれ図3、図4に示す。眼が閉じ始める時刻を瞬きの開始、閉じた眼が完全に開く時刻を瞬きの終了と定義する。図中には、ビデオ画像から判断した「眼が完全に開いている時間帯」を矢印で示している。被験者 A、B とも、眼を開けている間に、 $0.5 \sim 1.0^{\circ}\text{C}$  程度温度が低下し、瞬きの後、元の温度に戻る。瞬きに要する時間は被験者 A で 0.74 秒、被験者 B で 0.36 秒 (1 分間の平均値) であった。両被験者とも、自然な状態と比べて長い時間の開眼を指定されており、指示を守りつつ、瞬き時に眼を長く閉じるという代償的対応をしていたものと考えられる。被験者 A は指定されるタイミングより早い段階で眼を閉じたい状況であったことが、実験後のヒアリングで明らかとなっている。

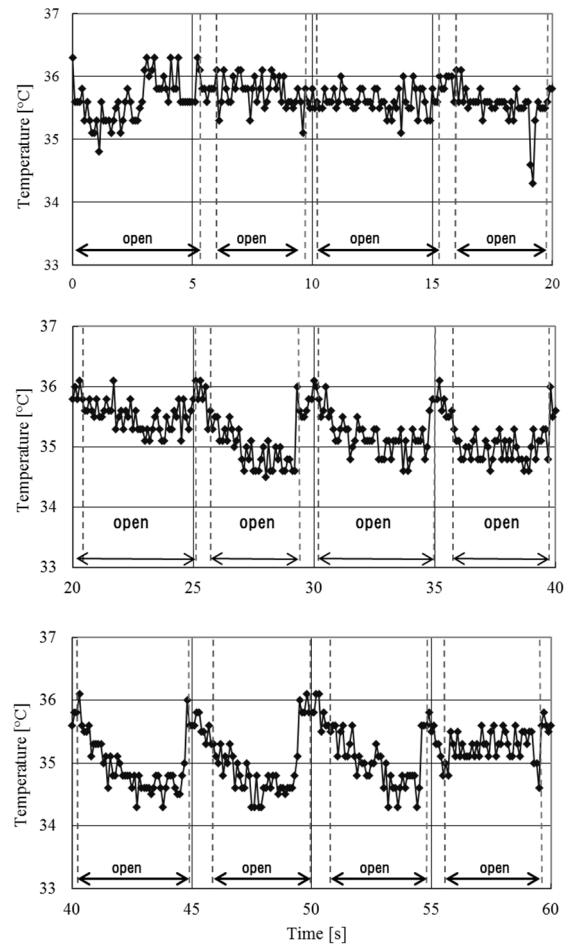
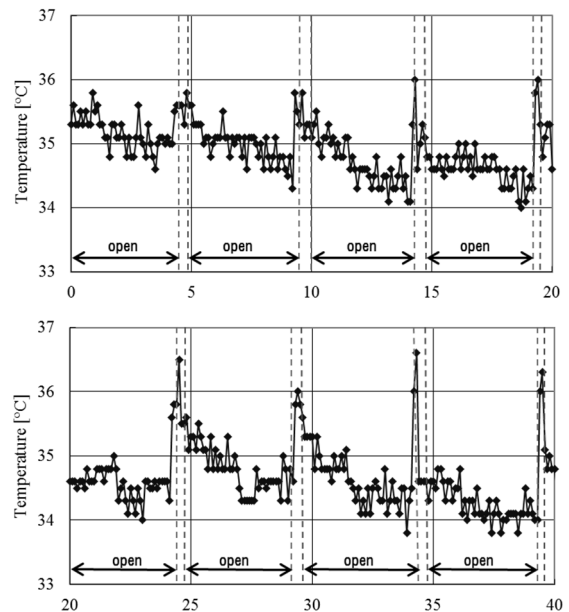


Figure 3 Surface temp. of eye (Subject A, Interval of blinking designated to 5 s, Arrows show the period when the eyes are fully open).



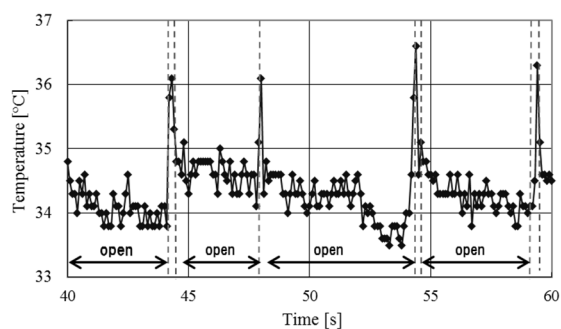


Figure 4 Surface temp. of eye (Subject B, Interval of blinking designated to 5 s).

### 3.3 瞬き間隔を3秒と指定した場合

図5、図6に示すように、被験者A、Bとも、眼を開けている間の温度低下が、瞬き間隔5秒の場合ほど、明確でないものの、眼を開けている間に温度の低下が見られることが多い。瞬きに要する時間は被験者Aで0.42秒、被験者Bで0.22秒（1分間の平均値）であった。両被験者とも、瞬きの際に眼を閉じている時間が、瞬き間隔5秒の場合よりも短縮された。

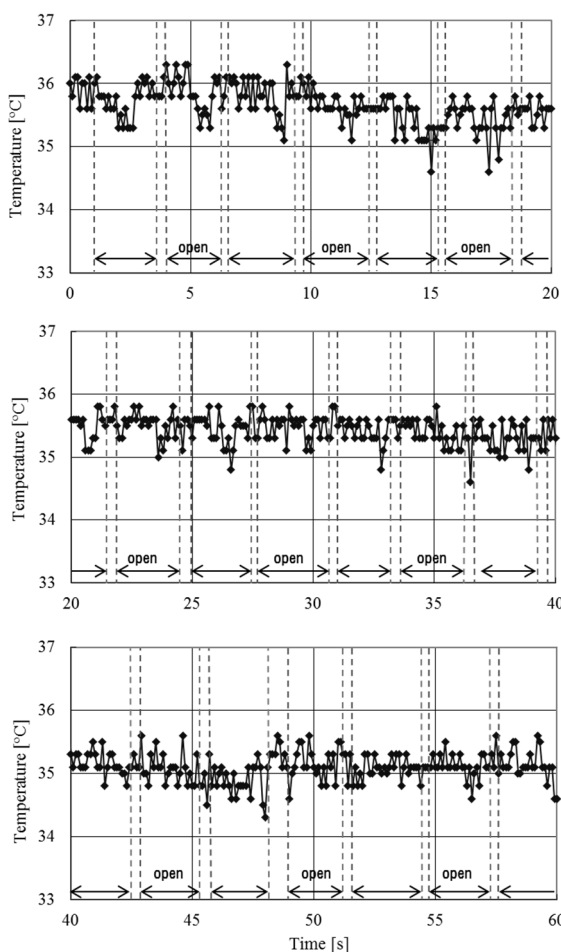


Figure 5 Surface temp. of eye (Subject A, Interval of blinking designated to 3 s).

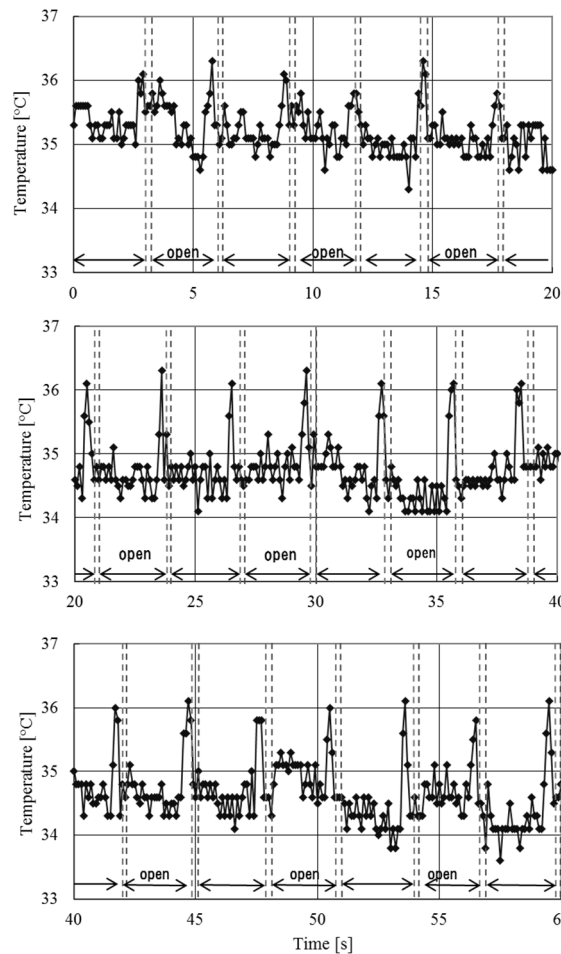


Figure 6 Surface temp. of eye (Subject B, Interval of blinking designated to 3 s).

### 3.4 眼を閉じた状態（上瞼の表面温度測定）

眼を閉じた状態での表面温度の測定値は上瞼の表面温度である。図7、図8に示すように、被験者A、Bともに、眼が開いている時と比べると高い温度を示しており、変動幅も小さい。図9に各実験の1分間の温度測定値の平均値と最高・最低値を示す。瞬きのある場合（眼の開閉のある場合）の最高値に比べると、眼を閉じた状態での上瞼の表面温度はやや低い。眼を閉じた状態を保つと、上瞼の温度が低下するものと考えられる。つまり、開眼時には、瞬きにより眼を閉じている間に、上瞼と眼球の間で熱交換が生じ、瞬きにより眼が加温されていると考えられる。

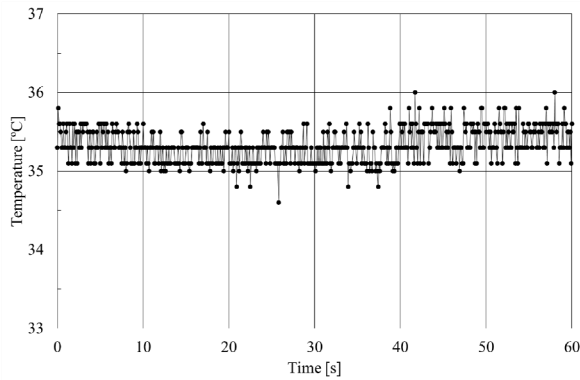


Figure 7 Surface temp. of eye (Subject A, with eyes closed).

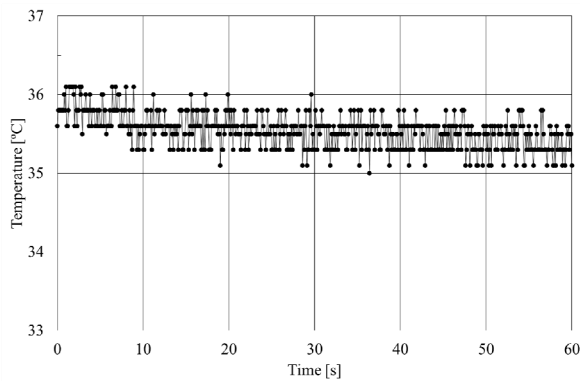


Figure 8 Surface temp. of eye (Subject B, with eyes closed).

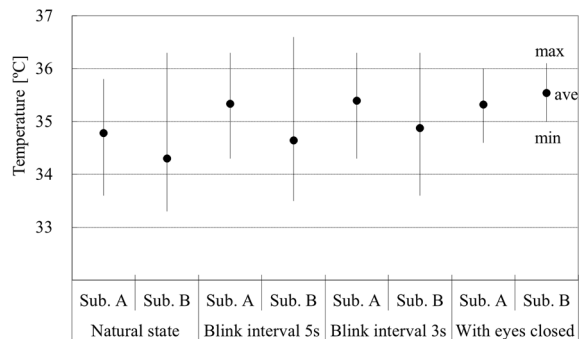


Figure 9 Surface temp. of eye (Subjects A and B, comparison of averaged value with maximum/minimum values between experimental cases).

#### 4. 考察

##### 4.1 瞬き回数と瞬き時の閉眼時間

図 10 に瞬き回数と瞬きに要する時間（瞬き中に眼を閉じている時間）の関係を示す。瞬き間隔を指定した場合、いずれの被験者についても、瞬きに要する時間が増えている。自然な状態よりも、今回指定した瞬き間隔（3 秒、5 秒）は短かったため、被験者は 1 回の瞬き中に眼を閉じる時間を延ばすことで、対処したものと考えられる。

瞬き回数の変動は、眼の状態の指標として用いられ

ることが多い。今回の実験で、瞬き間隔を被験者の自然なペースでなく、より長い開眼時間を指定した場合に、瞬きの際に眼を閉じる時間が長くなるという代償的反応は、眼の状態の新たな指標となり得ると考えられる。

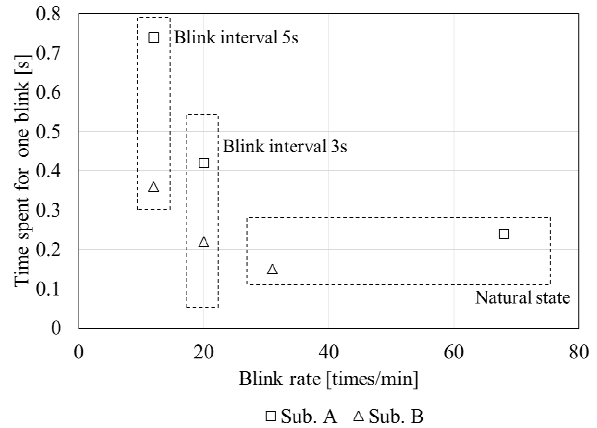


Figure 10 Time spent for one blinking (Subjects A and B, comparison between experimental cases).

##### 4.2 放射温度計の放射率の設定

今回、放射温度計で温度を測定したのは、眼球の表面と瞼である。眼球表面には涙が存在している。したがって、開眼時の眼の表面の放射物性は水または油に近いと考えられる。水の長波放射率は 0.95～0.98（日本機械学会 1986）、皮膚の長波放射率は 0.98（中山 1981）とされていることから考えると、ほぼ完全黒体として考えてよいと思われる。赤外線カメラまたは放射温度計により眼球表面温度の測定を行った既往研究（蒲山 1980, Fujishima et al. 1994, Murphy et al. 1999, Purslow et al. 2007, Absharha et al. 2013）において、放射率の設定についての詳しい議論は見られない。本論文では、瞬きと瞬きの間における開眼時の、眼球表面温度変化の特性を捉えること、さらには、瞼の開閉に伴い、温度の測定対象が眼球、瞼の両方にわたりそれらを区別して扱うことを主眼に置いて、短い間隔での測定が可能な機種種の放射温度計を選定し、温度の絶対値の厳密さよりも、温度の大小関係を短い周期で捉えることを重視した。温度の絶対値に関しては、より厳密な議論の余地がある。

##### 4.3 瞬き回数の個人差

瞬き回数は被験者によって異なる（高田ら 2011）。今回の被験者 2 名の自然な状態での瞬き回数は、高田ら（2011）が測定した 100 名の若年男女の平均値 18.6 回/min（標準偏差 12.6）と比べるとやや多く、瞬き回数を指定した実験では、いずれの被験者についても、自然な状態での瞬き回数より少ない回数を指定したことになる。本論文では、瞬きに応じた眼の温度変化の性状を測定しており、通常時の瞬き

回数によらない性質を対象としている。

今回の被験者 A の方が被験者 B より瞬き回数が多く、瞬きの際に眼を閉じる時間も長い（図 10）。被験者 A の方が、上瞼と眼球の熱交換時間が長くなっており、そのことが、測定中の眼の表面温度の最大値（上瞼の外側表面の値）と最小値（眼球の表面温度）の差を小さくしている（図 9）と類推される。

#### 4.4 眼の温度測定から乾燥の評価への展開

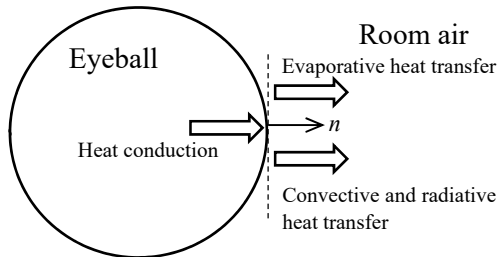
本研究では、瞬き時の眼球表面の温度に関する実験について述べた。今回の測定データのうち開眼時のものは、涙の蒸発面の温度であり、涙の蒸発性状が関与して決まる量である。間接的ではあるが、この温度情報をもとに、蒸発量を推定する枠組みの構築が考えられる。

眼の表面では、眼球内部から表面への熱伝導（(1)式の左辺）と、眼球表面から外部への対流・放射熱伝達（(1)式の右辺第 1 項）、表面での蒸発熱損失（(1)式の右辺第 2 項）の熱収支が成立していると考えられる。概念図を図 11 に示す。

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_s = \alpha(\theta_s - \theta_{op}) + r\alpha'(P_s - P_a) \quad (1)$$

**記号**  $n$  : 法線方向の座標[m]（眼球表面の外向き法線  
の方向を正とした座標）、 $P$  : 水蒸気圧[Pa]、 $r$  : 水の相  
変化熱[J/kg]、 $\alpha$  : 総合熱伝達率[W/m<sup>2</sup>/K]、 $\alpha'$  : 湿気伝  
達率[kg/m<sup>2</sup>/s/Pa]、 $\theta$  : 温度[°C]、 $\lambda$  : 眼球の熱伝導率  
[W/m/K]

**添え字**  $a$  : 室空気、 $op$  : operative ( $\theta_{op}$  : 作用温度[°C])、  
 $s$  : 眼球表面



**Figure 11** Conceptual diagram of heat balance at the outer surface of eyeball

著者らは、眼球の奥の温度を、体温調節モデルなどを用いて別途決定することが可能であると仮定した場合に、(1)式を境界条件として、眼球についての熱伝導方程式を解くことで、表面の蒸発性状を推定するというモデルを提案し、眼に風が当たり乾燥が促進される場合の実験結果を説明することを試みている（伊藤ら 2015）。ただし、本論文で述べた、瞬きにより眼球表面が加温される影響や、瞬きに応じた涙層の性状の変化は考慮していない。

本論文で示した実験は、中程度の温湿度条件かつ静穏気流条件で行われたことから、眼球表面温度が、瞬きと瞬きの間（開眼時）に低下しても、1 分間程度の平均値で見れば、ほぼ一定に保たれている。比較的強い風が当たる場合や、極度に湿度が低い場合など、涙の蒸発量が多い条件下で、眼球表面での蒸発性状を説明する場合に、本論文で示したような瞬きによる影響（瞼により加温される、涙の油層が整えられる）を考慮することが今後の課題である。

眼の乾燥を評価するには、涙の蓄積量を直接評価することが明快であるが、連続測定が容易でないため、涙の蓄積量の予測モデルを構築することが有効であると考えられる。本論文で得られた瞬きに応じた眼の温度変動の知見は、涙の蓄積量を把握する体系、さらには、眼の乾燥を防止するための室内環境調整方法を構築する際に、活用可能であると思われる。

## 5. まとめ

眼の乾燥感が生じないような室内温熱環境条件を明らかにするための基礎的知見を得ることを目的として、2 名の被験者に対して、眼の表面温度を放射温度計により非接触で連続測定し、同時にビデオ画像で瞬きの様子を記録するという実験を行った。自然な状態、瞬きを行う時間間隔を指定する場合、眼を閉じた場合について実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 開眼中に眼球表面温度が低下する。
- (2) 瞬きをする時間間隔を自然な状態より長くするように指定した場合、その温度低下は 0.5～1.0°C に達する。
- (3) 閉眼時の上瞼外側表面温度が開眼時の眼球表面温度より高い。したがって、瞬きにより、上瞼と眼球との間で熱交換がなされ、眼球が加温されている。
- (4) 自然な状態と比べて長い時間、眼を開ける場合、瞬きの際に眼を閉じる時間が長くなる。
- (5) 眼の状態の指標として瞬き回数がよく用いられるが、瞬き時の閉眼時間という別の指標があり得ることを示唆した。

**謝辞** 本研究を遂行するにあたり、神戸大学卒論生・岩坪成美さんの協力を得た。また、本研究の一部は、JSPS 科研費 JP22656124, JP25289195 の助成を受けた。記して謝意を表する。

## 6. 文献

Abusharha, A.A., Pearce, E.I. 2013: The effect of low humidity on the human tear film, *Cornea* 32 (4), 429/434.

Fujishima, H., Toda, I., Yagi, Y., Tsubota, K. 1994: (4), 384/392.

Quantitative evaluation of postsurgical inflammation by infrared radiation thermometer and laser flare-cell meter, *Journal of Cataract and Refractive Surgery* 20, 451/454.

五藤智子, 2007: 涙液の安定性からみたドライアイ, *Frontiers in Dry Eye* 2 (2), 127/132.

伊藤好崇ら, 2015: 眼の乾燥感に与える温熱環境の影響に関する研究 眼球表面温度の測定と予測モデルの検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(6), 129/132.

稲富勉, 1997: ムコイド層の最新知見, あたらしい眼科 14 (11), 1637/1645.

蒲山俊夫, 1980: 眼科サーモグラフィの研究 第2報 正常者角膜面における温度分析, 日眼会誌 84 (5), 375/382.

Murphy, P.J., Morgan, P.B., Patel, S. and Marshall, J. 1999: Corneal surface temperature change as the mode of stimulation of the non-contact corneal aesthesiometer, *Cornea* 18 (3), 333/342.

Purslow, C., Wolffsohn, J. 2007: The relation between physical properties of the anterior eye and ocular surface temperature, *Optometry and Vision Science* 84 (3), 197/201.

高田暁ら, 2011: 皮膚および眼球表面からの蒸発量予測のための基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, 119/120.

高田暁, 2013: 乾燥感と室内温熱環境条件に関する基礎的研究, 日本建築学会環境系論文集 78 (693), 835/840.

Takada, S et al., 2013: Modeling of moisture evaporation from the skin, eyes and airway to evaluate sensations of dryness in low-humidity environments, *Journal of Building Physics* 36 (4), 422/437.

Tsubota, K., 1998: Tear dynamics and dry eye, *Progress in Retinal and Eye Research* 17 (4), 565/596.

堤仁美ら, 2005: 超低湿度環境における在室者の健康性・快適性・知的生産性に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 945/948.

中山昭雄編, 1981: 温熱生理学, 理工学社, 37/38.

日本機械学会, 1986: 伝熱工学資料改訂第4版, 丸善, 184/186.

Wyon, N.M., Wyon, D.P. 1987: Measurement of acute response to draught in the eye, *Acta Ophthalmologica* 65

---

#### <連絡先>

著者名 高田 暁

住所 神戸市灘区六甲台町 1-1

所属 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻

E-mail アドレス satoruta@kobe-u.ac.jp