原 著

クリスタルガラス製品の製造に伴って発生するブルーライトの有害性

奥野 勉¹, 上野 哲¹, 小林祐一², 神津 進²¹ 労働安全衛生総合研究所² HOYA 株式会社

抄録：クリスタルガラス製品の製造に伴って発生するブルーライトの有害性：奥野 勉ほか、労働安全衛生総合研究所

目的：ガラス製品を製造する工場では、作業者は、炉、熔融ガラスなどの高温の物体が発生する強い可視光へ曝露される。ブルーライトと呼ばれる短波長の可視光への曝露は、網膜障害（photoretinopathy）を引き起こす可能性がある。本研究の目的は、ガラス製品の製造に伴って発生するブルーライトを定量的に評価することである。**対象と方法：**クリスタルガラス工芸品を製造する工場において、炉の内部の壁と発熱体、および、炉内に置かれたガラス材料の分光放射輝度を測定した。炉は、2基の再加熱炉、3基の溶解炉、1基の竿焼き炉を調べた。測定された分光放射輝度から、ACGIHの許容基準に従って、実効輝度を計算し、これを許容値と比較した。また、それぞれの光源について、分光放射輝度を黒体の分光放射輝度と比較し、その温度を求めた。**結果：**測定された実効輝度は、0.00498–0.708 mW/cm²srの範囲にあった。実効輝度は、1,075–1,516 °Cの温度の範囲において、温度と共に急速に上昇した。それぞれの光源の実効輝度は、同じ温度の黒体の実効輝度とほぼ等しかった。**考察：**炉の内部の壁と発熱体、および、炉内に置かれたガラス材料の実効輝度は、1日の曝露時間が10⁴ sを超える場合の許容値である10 mW/cm²srの十分の一以下であった。したがって、これらの光源を見たとしても、網膜障害の危険性はないと考えられる。ただし、光源の温度が約1,800 °C以上である場合には、実効輝度は、許容値を超えると推定される。このような高温の光源がガラス製品の製造の現場にある場合には、ブルーライトによる網膜障害の危険性があると考えられる。

(産衛誌 2013; 55(3): 85–89)

doi: 10.1539/sangyoeisei.B12011

キーワード：Blue light, Effective radiance, Glass factory, Photoretinopathy

2012年10月4日受付；2013年1月21日受理

J-STAGE 早期公開日：2013年2月22日

連絡先：奥野 勉 〒214-8585 神奈川県川崎市多摩区長尾6-21-1 労働安全衛生総合研究所 (e-mail: okuno@h.jniosh.go.jp)

1. はじめに

一般に、ガラス製品の製造では、ガラスの材料を炉の中に入れ、千数百℃程度まで加熱するが、高温となった炉内および材料からは、強い熱放射が発生する。ガラスの加熱、成形などの工程を手作業で行う作業場では、作業者は、炉に対する材料の出し入れ、炉内の材料の観察などの際に、この熱放射へ曝露される。

ガラス製品の製造の際に発生する熱放射は、實際上、赤外放射と可視光の二つの波長成分から成る。そのうちの赤外放射の成分は、作業者に対して白内障（ガラス工白内障）を引き起こすことが、古くから知られている¹⁾。同様に、可視光の成分についても、作業者に対して眼障害を引き起こす可能性が考えられる。

一般に、可視光のうちの短い波長（約400 nmから約500 nm）の成分は、ブルーライトと呼ばれ、光化学的な作用によって網膜障害（photoretinopathy）を引き起こす危険性がある²⁾。実際、適切な遮光をせずに溶接アーク（文献³⁾の引用文献を参照）または太陽（文献⁴⁾の引用文献を参照）を見た場合に、多くの網膜障害が発生している。ブルーライトによる網膜障害では、通常、視力低下、霧視、暗点などの症状が、曝露の直後または数時間以内に現れる。その後、症状は、数週間の間徐々に改善するが、最終的に残る場合も多い。したがって、患者は、長期間にわたって不都合を強いられる可能性がある。さらに、最近では、ブルーライトは、photoretinopathyの他に、加齢黄斑変性症との関連が推測されている⁵⁾。

ACGIHは、photoretinopathyを防止するための可視光の許容基準を発表している⁶⁾。この許容基準では、可視光の有害性の強さは、基本的に、光源の実効輝度で表されとしている。実効輝度は、次のように定義される。

$$L_B = \sum_{\lambda=305\text{nm}}^{700\text{nm}} L_{\lambda} B(\lambda) \Delta\lambda \quad (1)$$

ここで、 L_B は実効輝度、 λ は波長、 L_{λ} は光源の分光放射輝度、 $B(\lambda)$ はブルーライト障害関数（Fig. 1）、 $\Delta\lambda$

は和をとる際の波長の刻み幅である。可視光の有害性の強さは、その波長によって異なるが、ブルーライト障害関数は、その波長依存性を表している。ACGIHは、可視光の許容値として、1日の曝露時間が 10^4 s (約2.8時間) 未満の場合には、実効輝度の曝露時間内の積分値を $100 \text{ J/cm}^2\text{sr}$ 以下に、また、1日の曝露時間が 10^4 s を超える場合には、実効輝度を $0.01 \text{ W/cm}^2\text{sr}$ ($10 \text{ mW/cm}^2\text{sr}$) 以下にすべきだとしている。

ガラス製品の製造に伴って発生するブルーライトを調べ、その障害性について検討することが望まれる。しかし、そのような調査は、これまで行われていない。本研究では、クリスタルガラス製品の製造の現場において、ACGIHの許容基準に従い、ガラス炉の内壁、炉内にあるガラス材料などの実効輝度を測定、評価した。

II. 対象と方法

調査場所は、クリスタルガラス製品を製造する東京都内の事業所の工場である。この工場では、置物、灰皿などの工芸品を製造しており、ガラスの加熱、成形などの工程を手作業で行っている。

工場内には、大小2基の再加熱炉、3基の同種の溶解炉 (A, B, Cの記号で区別される) および1基の竿焼き炉がある (Table 1)。再加熱炉は、成形などの工程において、吹き竿の一端につけたガラスの材料を加熱する際に使用する。再加熱炉には、複数の火口がある。溶解炉は、ガラスの原料を調合、溶解する際に使用する。竿焼き炉は、成形などの工程の前に、吹き竿をあらかじめ暖めておく際に使用する。再加熱炉と溶解炉は電気炉、竿焼き炉はガス炉である。

6基のガラス炉の合計7つの火口の内側から発生する可視光を測定した。炉内における測定対象物は、内壁、内壁に固定された線状の発熱体 (火口から見える場合) (Fig. 2)、ガラス材料 (炉内にある場合) である (Table 1)。

測定機は、分光放射輝度計 (PR-705, Photo Research Inc.) を使用した。この測定機は、円形の測定視野をもち、その視野内の平均の分光放射輝度を、波長範囲 380 nm

Fig. 1. Blue light hazard function.

–780 nm, 2 nm 間隔で測定することができる。感度の較正は、本調査で使用する前に製造会社に依頼し、行った。

測定の際、分光放射輝度計は、火口からほぼ水平方向に約 1.5 m–4 m 離れた、作業を妨げない位置に固定した。測定視野の直径は、 0.125° に設定した。分光放射輝度計の向きは、そのファインダーをのぞき、測定視野を表すマークが測定対象物の内側に入るように調節した (Fig. 2)。

同じ測定対象物であっても、その表面上の位置によって、分光放射輝度が異なる可能性がある。そこで、測定対象物ごとに、異なった位置において 3–5 回の測定を行い、結果を平均した。

測定した分光放射輝度から、式 (1) に従って実効輝度を計算した。その際、紫外域の波長である 305 nm–380 nm の項は除外した。ガラス製品の製造の際に発生する熱放射は、實際上、紫外放射の成分を含まないので、これによって実効輝度を過小評価することはないと考えられる。

また、測定した分光放射輝度を、黒体の分光放射輝度と比較することによって、測定箇所を求めた。黒体の分光放射輝度は、プランクの放射則に従って、次のように表される。

Table 1. Objects to be measured

Furnace	Temperature*	Measured spots
Large reheating furnace, Opening 2	1,271 °C	Inner wall, Heating element
Small reheating furnace, Opening 3	1,269 °C	Inner wall, Heating element
Small reheating furnace, Opening 4	1,270 °C	Inner wall, Heating element
Melting furnace A	1,191 °C	Inner wall, Heating element, Molten glass
Melting furnace B	1,416 °C	Inner wall, Heating element, Molten glass
Melting furnace C	1,144 °C	Inner wall, Heating element
Furnace for preheating blowpipes	940 °C	Inner wall

*Measured by the built-in thermometer.

Fig. 2. Opening of a reheating furnace. Black circles schematically represent measured spots on inner wall (A) and heating element (B).

$$L_{B\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1 \right)} \quad (2)$$

ここで、 λ は波長、 T は黒体の絶対温度、 $L_{B\lambda}(T)$ は黒体の分光放射輝度、 h はプランク定数、 c は光速、 k はボルツマン定数である。なお、絶対温度と摂氏温度の間には、次の関係がある。

$$T = t + 273.15$$

ここで、 t は摂氏温度である。

現実の熱放射源の分光放射輝度は、近似的に次のように表される。

$$L_{\lambda}(T) = \varepsilon L_{B\lambda}(T) \quad (3)$$

ここで、 T と ε は、それぞれ、熱放射源の絶対温度と放射率である。絶対温度と放射率をパラメータとし、最小自乗法を用いて、式(3)を測定データにフィッティングさせた。そのときのパラメータの値を測定箇所の温度と放射率とした。

III. 結 果

分光放射輝度の測定データの例を Fig. 3 に示す。それぞれの測定箇所について、分光放射輝度の測定データから実効輝度を計算した。式(3)は、フィッティングによって、測定データによく一致させることができた

Fig. 3. Spectral radiances of the inner wall, heating element and molten glass for Melting furnace A. Bold dashed lines: measured data, fine solid lines: Equation (3) best fit to the data.

(Fig. 3). そのときのパラメータの値として、測定箇所の温度と放射率の値を得た。結果を Table 2 にまとめる。

得られた実効輝度は、 $0.00498\text{--}0.708\text{ mW/cm}^2\text{sr}$ の範囲にあり、1日の曝露時間が 10^4 s を超える場合の許容値である $10\text{ mW/cm}^2\text{sr}$ の十分の一以下であった。したがって、今回調査した現場の条件では、ブルーライトによる網膜障害の危険性はないと考えられる。

測定によって得られた実効輝度と温度の関係を Fig. 4 に示す。実効輝度は、実質的に、測定箇所の種類にはよらず、温度によって決まり、温度が上昇すると、急速に高くなった。測定によって得られた実効輝度は、(1)式と(2)式から計算される黒体の実効輝度 (Fig. 4 の実線) とほぼ一致した。

IV. 考 察

本研究で調査したガラス製品の製造の現場では、光源の実効輝度は、すべて、長期曝露に対する許容値である $10\text{ mW/cm}^2\text{sr}$ よりも低かった。しかし、実効輝度は、光源の温度とともに急速に上昇する (Fig. 4) ため、温度がもっと高い場合には、実効輝度が許容値を超えることが考えられる。今回測定した光源の実効輝度は、黒体の実効輝度とほぼ一致しているが、光源の温度がもっと高い場合にもこれが成り立つとすれば、光源の温度が約 $1,800\text{ }^\circ\text{C}$ を超えると、実効輝度が許容値の $10\text{ mW/cm}^2\text{sr}$ を超えると推定される (Fig. 4)。

ガラス製品の製造では、はじめに、ガラスの原料を溶解することによってガラスの材料を製造し、次に、この材料を加工することによって製品を製造するが、原料の溶解の際に最も高い温度が必要となる。通常、ガラスの原料は、最高 $1,500\text{--}1,600\text{ }^\circ\text{C}$ の温度で溶解するため⁷⁾、今回の調査対象を含む多くのガラス製品の製造の現場では、光源の温度が $1,800\text{ }^\circ\text{C}$ を超えることはない

Table 2. Results

Furnace	Object	Number of measurements	Effective radiance* (mW/cm ² sr)	Temperature* (°C)	Emissivity*
Large reheating furnace, Opening 2	Inner wall	5	0.165 ± 0.021	1,359 ± 13	0.951 ± 0.021
	Heating element	5	0.698 ± 0.030	1,516 ± 5	0.700 ± 0.006
Small reheating furnace, Opening 3	Inner wall	4	0.116 ± 0.022	1,321 ± 21	0.912 ± 0.019
	Heating element	4	0.327 ± 0.014	1,425 ± 2	0.788 ± 0.020
Small reheating furnace, Opening 4	Inner wall	5	0.0938 ± 0.0115	1,306 ± 13	0.938 ± 0.033
	Heating element	5	0.380 ± 0.011	1,444 ± 3	0.761 ± 0.011
Melting furnace A	Inner wall	4	0.0316 ± 0.0026	1,207 ± 9	0.967 ± 0.025
	Heating element	4	0.0615 ± 0.0060	1,270 ± 9	0.846 ± 0.002
	Molten glass	5	0.0156 ± 0.0010	1,165 ± 8	0.925 ± 0.027
Melting furnace B	Inner wall	4	0.471 ± 0.017	1,449 ± 4	0.934 ± 0.033
	Heating element	4	0.708 ± 0.154	1,502 ± 5	0.843 ± 0.143
	Molten glass	5	0.273 ± 0.005	1,400 ± 3	0.900 ± 0.007
Melting furnace C	Inner wall	5	0.0193 ± 0.0020	1,170 ± 6	0.940 ± 0.007
	Heating element	4	0.0437 ± 0.0029	1,243 ± 5	0.841 ± 0.002
Furnace for preheating blowpipes	Inner wall	3	0.00498 ± 0.00226	1,075 ± 62	0.703 ± 0.267

*Mean ± standard deviation.

Fig. 4. Effective radiance as a function of temperature.

と考えられる。しかし、特殊なガラス製品の製造では、光源の温度が1,800℃を超え、ブルーライトが問題となる可能性がある。たとえば、石英ガラス製品を製造する場合に、材料を融解するため、その温度を1,800℃以上に上げる必要がある⁸⁾。このような作業現場では、遮光めがねを着用する、曝露時間を制限するなどの対策を行うべきだと考えられる。

本研究は、ACGIHの許容基準⁶⁾に基づき、ガラス製品の製造の現場では、ブルーライトによるphotoretinopathyの危険性がないことを示した。一方、ブルーライトは、photoretinopathyの他に、加齢黄斑変性症のリスク要因であるとも考えられている⁵⁾。しかし、加齢黄斑変性症に関しては、有害性の波長依存性や閾

値などのハザードのデータがないため、許容基準が確立されておらず、今回の測定データからその危険性について述べることはできない。加齢黄斑変性症に関するブルーライトのハザードの研究が望まれる。

文 献

- 1) Pitts DG, Cameron LL, Jose JG, et al. Optical radiation and cataract. In: Waxler M, Hitchins VM, eds. Optical radiation and visual health. Boca Raton (FL): CRC Press, 1986; 5–41.
- 2) Ham WT Jr, Mueller HA. The photopathology and nature of the blue light and near-UV retinal lesions produced by lasers and other optical sources. In: Wolbarsht ML, ed. Laser applications in medicine and biology, Volume 4. New York: Plenum Press, 1989: 191–246.
- 3) Okuno T, Ojima J, Saito H. Blue-light hazard from CO₂ arc welding of mild steel. Ann Occup Hyg 2010; 54: 293–8. [Medline] [CrossRef]
- 4) Okuno T. Hazards of solar blue light. Appl Opt 2008; 47: 2988–92. [Medline] [CrossRef]
- 5) Algrever PV, Marshall J, Seregard S. Age-related maculopathy and the impact of blue light hazard. Acta Ophthalmol Scand 2006; 84: 4–15. [Medline] [CrossRef]
- 6) ACGIH Light and near-infrared radiation. In: ACGIH. TLVs and BEIs. Cincinnati (OH): ACGIH, 2012: 140–7.
- 7) 伊藤節郎. 工業用ガラスの製造. 作花済夫, 由水常雄, 伊藤節郎, ほか編. ガラスの百科事典. 東京: 朝倉書店, 2007: 404–5.
- 8) 長倉三郎, 井口洋夫, 江沢 洋, ほか編. 岩波理化学辞典第5版. 東京: 岩波書店, 2010: 266.

Blue Light Hazards Associated with Crystal Glassware Production

Tsutomu OKUNO¹, Satoru UENO¹, Yuuichi KOBAYASHI² and Susumu KOZU²

¹National Institute of Occupational Safety and Health, 6-21-1 Nagao, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa 214-8585, Japan

²Hoya Corporation, Japan

Abstract: Objectives: In factories for glassware production, workers are exposed to intense visible light emitted from hot objects such as furnaces and molten glass. High exposure to short-wavelength visible light, called blue light, can cause photoretinopathy. The objective of this study was to quantify the blue-light hazards associated with glassware production. **Methods:** Spectral radiances of walls and heating elements inside furnaces were measured, as well as those of molten glass placed inside furnaces in a factory producing crystal glass crafts. The factory had two reheating furnaces, three melting furnaces, and a furnace for preheating blowpipes. The effective radiances of the inner furnace walls, the heating elements, and the molten glass were calculated from the measured spectral radiances and compared with the threshold limit value (TLV) in accordance with ACGIH guidelines. The temperature of each light source was determined by comparing the measured spectral radiance with that of a black body. **Results:** The measured effective radiances were in the range of 0.00498–0.708 mW/cm²sr and increased steeply with increasing light source temperatures in the range of 1,075–1,516 °C. The effective radiance of each light source was nearly equal to the effective radiance of the black body at the same temperature. **Conclusions:** The effective radiances of walls, heating elements, and molten glass inside the furnaces are lower than one tenth of the TLV for exposure durations longer than 10⁴ s per day. Thus, it is not hazardous to view these light sources. However, the effective radiance at a higher light source temperature of approximately 1,800 °C will exceed the TLV. In this case, hot objects in a workplace for glassware production may present blue light hazards.

(*San Ei Shi* 2013; 55: 85–89)