

# 水晶体混濁を引き起こす赤外放射の照度の閾値と その曝露時間依存性

奥野 勉\*1 小島 正美\*2 石場 義久\*3 ハサノワ ナイリヤ\*4  
山口 さち子\*5

ガラス工業、鉄鋼工業に従事する作業者の間で白内障が多く発生する。高温の物体が発生する強い赤外放射へ曝露するためだと考えられている。ACGIHは、白内障を防止するための赤外放射の許容基準を発表しているが、この許容基準は、適切ではない可能性がある。本研究では、許容基準の基礎となるデータを提出するため、水晶体混濁を引き起こす赤外放射の照度の閾値とその曝露時間依存性を動物実験によって求めた。波長 808 nm または 1550 nm の半導体レーザーのビームを、有色家兎の眼に照射し、その 1 日後以降に細隙灯顕微鏡を用いて水晶体を観察した。曝露時間は、波長 808 nm では 4 秒～6 分、波長 1550 nm では 6 分とした。各波長の各曝露時間について、照度の閾値を求めるため、異なった照度の赤外放射を動物へ照射した。赤外放射の照度が十分高い場合、水晶体の皮質に混濁が現れた。水晶体混濁を引き起こす照度の閾値は、波長 808 nm では、曝露時間が長くなるほど低くなり、特に、曝露時間 1 分以下では、その 0.35 乗に反比例していた。また、曝露時間 6 分における波長 1550 nm の閾値は、波長 808 nm の閾値のほぼ 2 倍であった。ACGIH の許容基準は、照度の TLV が曝露時間の 0.75 乗に反比例するとし、また、波長には依らないとしている。TLV の曝露時間依存性と波長依存性について再検討する必要があると思われる。

**キーワード:** 赤外放射, 白内障, 閾値, 許容基準

## 1 はじめに

ガラス工業、鉄鋼工業に従事する作業者の間で白内障が多く発生することが、古くから知られている<sup>1)</sup>。その原因は、高温の素材および炉が発生する強い赤外放射への曝露だと考えられている。

ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) は、赤外放射から眼の角膜と水晶体を保護するための許容基準を発表している<sup>2)</sup>。しかし、この許容基準は、適切ではない可能性がある。たとえば、許容値である照度の TLV (Threshold Limit Value) は、赤外放射の波長によって変わらないとし、また、曝露時間が 10<sup>3</sup> 秒 (約 17 分) 未満の場合、曝露時間の 0.75 乗に反比例するとしているが、その根拠は不明である。

赤外放射は、波長によって、眼に対する透過性が異なる。IR-A 波長域 (波長 780 nm～1.4 μm) の赤外放射は、眼内に深く侵入し、主として、虹彩および網膜において吸収される。一方、IR-B 波長域 (波長 1.4 μm～3 μm) および IR-C 波長域 (波長 3 μm～1 mm) の赤外放射は、主として、眼の表面の角膜、結膜において吸収される。したがって、IR-A 波長域と IR-B、IR-C 波長域では、白内障を発生させるメカニズムが異なり、したがって、障害性も異なることが考えられる<sup>3)</sup>。

本研究では、IR-A 波長域の赤外放射が水晶体障害を引き起こす場合の照度の閾値とその曝露時間に対する依存性を、動物実験によって調べた。同様に、IR-B 波長域の赤外放射についても、照度の閾値を調べた。

なお、本研究の動物実験の実施は、金沢医科大学動物実験委員会によって承認された。

## 2 方法

半導体レーザー (TK-45W-P および KE-LD-1550、イナオプティック ジャパン) が発生する波長 808 nm および 1550 nm の赤外放射のビームを実験に使用した。レーザービームを、シャッター、レンズ、開口を通して動物に照射した。各動物の照射の前に、パワーメーターのセンサーを動物の眼の位置に置き、ビームのパワーを測定しながら、指定のパワーになるよう半導体レーザーの電流を調節した。動物は、有色家兎 (ダッチ種、体重 1.9～2.2kg、14～15 週令) を合計 94 羽使用した。全身麻酔下で、片眼の虹彩と瞳孔の境界部の上部をねらい、レーザービームを照射した (写真 1, 2)。角膜表面におけるビーム径は、5 mm とした。反対眼は、照射をせず、対照とした。照射直前、直後および 1 日後以降に、細隙

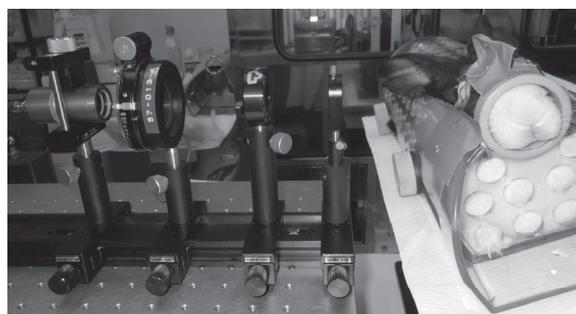


写真1 照射系 (808 nm)

\*1 人間工学・リスク管理研究グループ

\*2 金沢医科大学看護学部医科学

\*3 山本光学株式会社ビジョンケア・光研究所

\*4 金沢医科大学総合医学研究所

\*5 健康障害予防研究グループ

灯顕微鏡を用いて曝露眼と対照眼を観察した。曝露時間

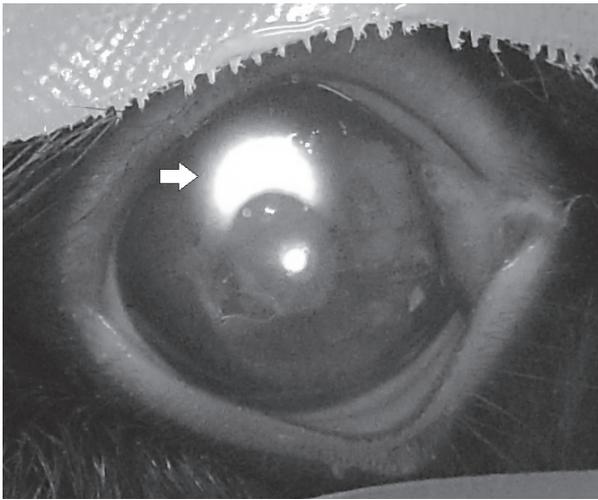


写真2 照射領域 (808 nm)

矢印で示した円形の部分が照射領域である。近赤外域に感度をもつデジタルカメラで撮影した。

は、波長 808 nm では、4 秒、10 秒、30 秒、1 分、3 分、6 分、波長 1550 nm では、6 分とした。各波長の各曝露時間に対して、3~6 種類の異なった照度の赤外放射を、それぞれ 1~6 匹の動物へ照射した。水晶体障害が起きる最低の照度と起きない最高の照度の平均、または、水晶体障害が起きる動物と起きない動物の数がほぼ同じになる照度を閾値とした。

### 3 結果

各波長の各曝露時間について、障害発生の閾値を求めるため、3~6 種類の異なった照度の赤外放射を動物へ照射したが、赤外放射の照度が十分高い場合には、照射 1 日後または 2 日後に、水晶体の皮質に混濁が認められた。波長 808 nm の場合には、水晶体の前面の上方、レーザービームに照射された虹彩の部分の下に、レーザービームの断面の形の混濁が現れた(写真 3)。一方、波長 1550 nm の場合には、水晶体の前面の上方に、境界が鮮明ではない混濁が現れた(写真 4)。

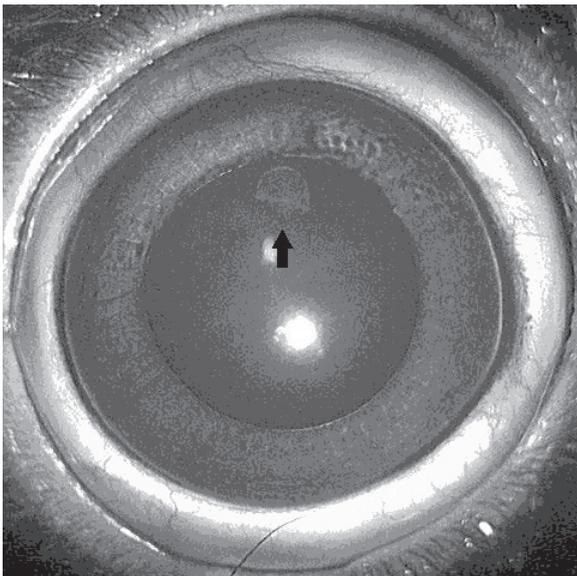


写真3 水晶体混濁 (808 nm)

上は眼の正面からの写真、下は細隙灯顕微鏡による眼内の写真である。矢印は混濁を示す。

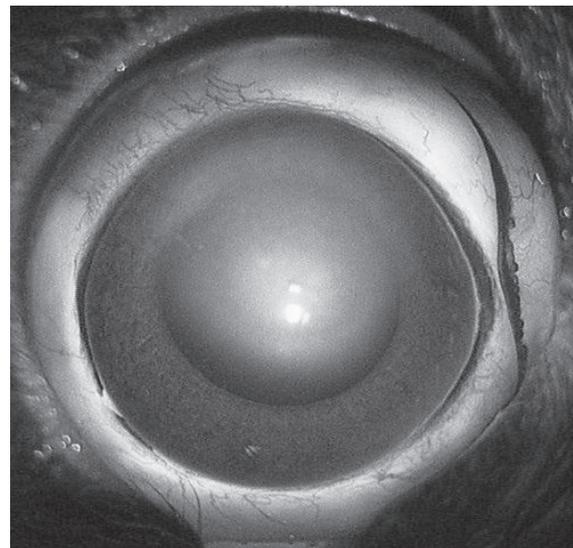


写真4 水晶体混濁 (1550 nm)

上は眼の正面からの写真、下は細隙灯顕微鏡による眼内の写真である。矢印は混濁を示す。正面からの写真では、角膜が混濁しているため、水晶体の混濁がはっきりと見えない。

各波長の各曝露時間について、曝露照度を変えた時の水晶体混濁の有無と、その結果から求めた閾値を図1に示す。水晶体混濁を生じさせる赤外放射の照度の閾値は、

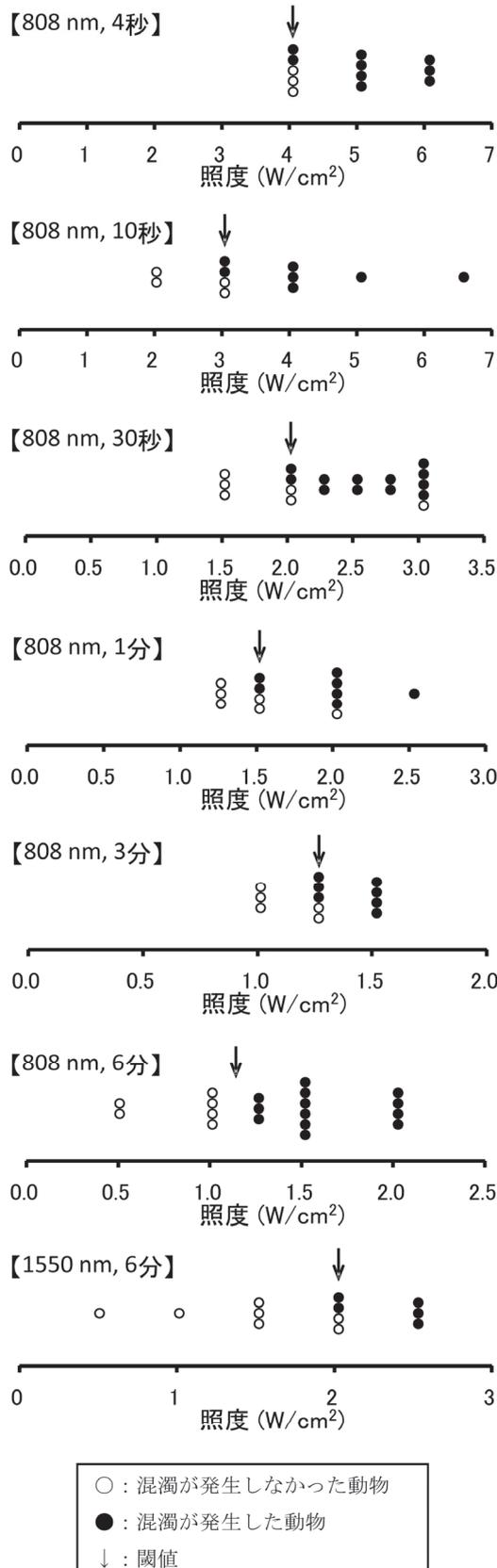


図1 各条件における水晶体混濁の有無と閾値の導出

波長 808 nm の場合には、曝露時間 4 秒、10 秒、30 秒、1 分、3 分、6 分において、それぞれ 4.05、3.04、2.03、1.52、1.27、1.14 W/cm<sup>2</sup>であった(図2)。照射時間が長くなるほど、閾値は低くなるが、曝露時間 1 分以下では、曝露時間の 0.35 乗に反比例していた。波長 1550 nm の場合には、赤外放射の照度の閾値は、曝露時間 6 分において、2.04 W/cm<sup>2</sup>であり、同じ曝露時間における 808 nm の閾値のほぼ 2 倍であった。

#### 4 考察

一般に、赤外放射は、熱作用によって白内障を引き起こすと考えられている<sup>1)</sup>。その場合、赤外放射の照度が低くても、曝露時間が長ければ、その間熱が蓄積し、白内障が発生しやすくなる。そこで、ACGIH の許容基準では、照度の TLV は、次式のように、曝露時間が長くなると、その 0.75 乗に反比例し、低下するとしている(図3)。

$$TLV = 1.8t^{-0.75} \text{ [W/cm}^2\text{]} \quad (1)$$

ここで、 $t$  は曝露時間 (秒) である。

一方、本研究の結果では、波長 808 nm のみの条件であるが、水晶体混濁を発生させる照度の閾値は、次の近似式で表され、曝露時間の 0.35 乗に反比例していた。

$$\text{閾値} = 6.6t^{-0.35} \text{ [W/cm}^2\text{]} \quad (2)$$

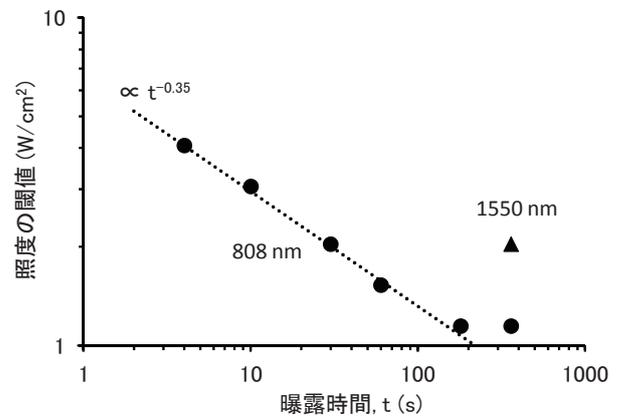


図2 照度の閾値

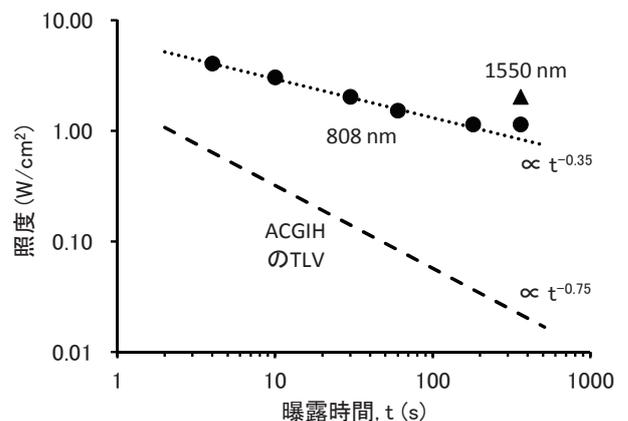


図3 本研究の結果と ACGIH の TLV との比較

すなわち、本研究の結果と TLV では、曝露時間依存性が異なっていた。

また、赤外放射は、波長によって、眼内において吸収される分布が異なり、障害性も異なると考えられる<sup>3)</sup>。実際、本研究の結果では、曝露時間 6 分における波長 1550 nm の閾値は、波長 808 nm の閾値のほぼ 2 倍であった。しかし、ACGIH の許容基準では、照度の TLV は、波長によって変わらないとしており、本研究の結果と整合していない。

今後、TLV の曝露依存性と波長依存性について再検討する必要があると思われる。

赤外放射による白内障の発生のメカニズムについては、19 世紀の始めから議論が行われている<sup>1)</sup>が、本研究の結果は、その観点からも興味深いと考えられる。IR-A 波長域である波長 808 nm を照射した場合には、水晶体の前面の上方、レーザービームに照射された虹彩の部分の下に、レーザービームの断面の形の混濁が現れた(写真 3)。これは、Goldmann 理論<sup>4)</sup>によって、混濁が発生したことを示している。すなわち、赤外放射が、虹彩において吸収されて熱に変わり、この熱が、虹彩の直下の水晶体の前面に伝わり、障害を引き起こしたと考えられる。一方、IR-B 波長域である波長 1550 nm を照射した場合には、水晶体の前面に、境界が鮮明ではない混濁が現れた(写真 4)。これは、赤外放射が、角膜において吸収されて熱に変わり、この熱が、房水中を広がりながら、水晶体の前面に伝わり、障害を引き起こしたと考えられる。この結果は、熱的モデルに基づいた数値計算<sup>3)</sup>の結果と一致する。

本研究の結果を赤外放射の許容基準の基礎データとして用いる際には、ヒトとウサギの違いについて考慮する必要がある。一般に、赤外放射による白内障の発生は、水晶体の温度が約 42℃以上に上昇し、そのタンパク質が変性するためだとされている<sup>5)</sup>が、この点については、

ヒトとウサギの間に大きな違いはないと考えられる。一方、ヒトとウサギでは、眼の全体および各構造の大きさや形状が異なるため、赤外放射の眼内における吸収、それによる熱の発生、その後の熱の移動の様子が異なると推測される。そこで、今後は、本研究の結果と合致するようなウサギの眼の数値計算モデルを開発し、その大きさと形状を変えることによって、ヒトの眼のモデルを開発することが望まれる。この数値計算モデルを使用することによって、ヒトの場合の照度の閾値を求めることができる。

## 5 結論

水晶体混濁を引き起こす照度の閾値は、波長 808 nm において、曝露時間が長くなるほど低くなった。特に、曝露時間 1 分以下では、その 0.35 乗に反比例していた。

波長 1550 nm と波長 808 nm では、水晶体混濁を引き起こす照度の閾値が異なっていた。曝露時間 6 分において、前者の波長の場合の閾値は、後者の場合の約 2 倍であった。

## 参 考 文 献

- 1) Sliney DH, Wolbarsht M. Safety with lasers and other optical sources. New York: Plenum Press; 1980.
- 2) ACGIH. Light and near infrared radiation. TLVs and BEIs, Cincinnati: ACGIH; 2013: CD-ROM.
- 3) Okuno T. Thermal effect of visible and infra-red radiation (i.r.-A, i.r.-B and i.r.-C) on the eye: A study of infra-red cataract based on a model. Ann. Occup. Hyg. 1994; 38: 351-359.
- 4) Goldmann H. Genesis of heat cataract. Arch. Ophthalmol. 1933; 9: 314-316.
- 5) Wolbarsht ML. Damage to the lens from infrared. Proc. SPIE 1980; 229: 121-142.