

投稿

2012 年金環日食：太陽光が目に与える生物学的影響

「広帯域非コヒーレント光放射(0.38 μm ~3 μm)に対する曝露限界のガイドライン」の抜粋

大島 修（岡山県立水島工業高等学校）、奥野 勉（労働安全衛生総合研究所・ICNIRP コンサルティングエキスパート）、小島正美（金沢医科大学・前 ICNIRP コンサルティングエキスパート）、篠原秀雄（埼玉県立蕨高等学校）、多気昌生（首都大学東京・ICNIRP コンサルティングエキスパート）、富田晃彦（和歌山大学）、仲野 誠（大分大学）、福江 純（大阪教育大学）、松尾 厚（山口県立山口博物館）、吉田道利（広島大学）

1. 国際非電離放射線防護委員会「広帯域非コヒーレント光放射(0.38 μm ~3 μm)に対する曝露限界のガイドライン」

太陽を裸眼で観察すると、目に対してさまざまな損傷を与える可能性があるので、きわめて危険である。そのために、安全な観察方法が強くアピールされている。では具体的にはどのような危険性があるのだろうか。それを知るために、2009年の皆既日食時に、われわれは、国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）（注）が策定し1997年に発表したガイドラインの論文「広帯域非コヒーレント光放射(0.38 μm ~3 μm)に対する曝露限界のガイドライン」の全文を監修・翻訳した。また天文教育普及研究会のホームページでも掲載し、今回の金環日食に合わせて修正したものをあらたに掲載した。

論文本体はかなり長いものであり（A4版で20頁ほどある）、また専門的な部分も多く含むので、ホームページの完全版を参照してもらうこととし、ここでは、とくに抜粋として、論文の5節で説明してある生物学的な影響の部分を紹介したい。

+++

5. 生物学的影響

5.1 生物組織との相互作用のメカニズム

眼は、自然環境中の光の放射から守られるようなつくりになっており、他にも必要なら人間は保護具を使っている。見つめる時間を0.25秒以下にすることによって忌避反応が、通常は、太陽、アーク灯、溶接のアークといったまぶしいものを見ても、眼を保護する。眼を細めて見たりすれば、さらに眼を保護する効果がある。

このガイドラインで示している波長域での生組織の反応は、熱的なもの及び光化学的なものに起因するものである。眼や皮膚に対する、少なくとも5つの異なる種類の損傷が、可視光及び赤外線の光源によって引き起こされるであろう(図1)。

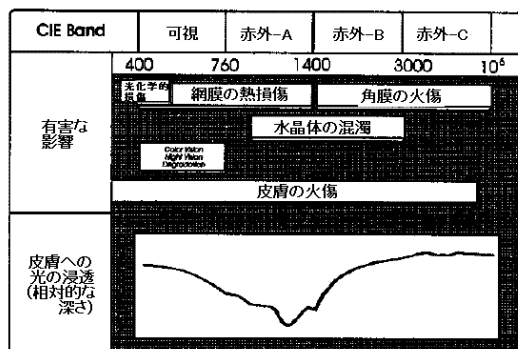


図1 生物学的な悪影響の波長依存性を示す。
(説明は次頁左段の冒頭)

図1 (説明)

影響は重なりあっており、したがってそれぞれ独立に評価しなければならない。おのおのの影響に対して、作用スペクトルがある。相対侵入深さは定性的に示したものであり、よって、深さについての尺度は入れていない。

- (a) 網膜の熱的損傷(380--1400 nm)。
- (b) 青色光による、光化学的な網膜の損傷(主に380--550 nm; 無水晶体眼なら300--550 nm) (Ham *et al.* 1976; Ham 1989)。
- (c) 水晶体の近赤外線による熱的損傷(だいたい800--3000 nm)。
- (d) 皮膚の熱損傷(やけど) (だいたい 380 nm -- 1 mm)、角膜の熱損傷(やけど) (だいたい 1400 nm -- 1 mm)。
- (e) 皮膚の光線過敏性損傷。これは一般的には紫外域(380 nmより短波長)ではるかに顕著であるが、もしかするとある種の投薬の一種の副作用として、波長およそ700 nmにまでその影響は延びているかもしれない。(Fitzpatrick *et al.* 1974; Magnus 1976; Diffey 1982)。

皮膚ガンが、紫外線を含まない光源によって誘発される危険性は大きくないと考えられている (IARC 1992; UNEP/WHO/IRPA 1994)。

5.2 光化学的相互作用のメカニズムの特徴

光化学的損傷の閾値は、曝露量率と曝露時間の積である。これは相反則の原理に従っている(光生物学での、Bunsen-Roscoe法則)。したがって、例えば青色光による網膜の損傷(光網膜炎)は、短い時間に非常に強い光を見るか、それほど強い光でなくても長時間見るかのどちらでも起こる。相反則性によって、これらの影響と、熱損傷(以下参照)とを区別することができる。網膜の光化学的損傷では、水晶体が完全な眼(有水晶体眼)ではだいたい

440 nmで作用スペクトルのピークになる。

5.3 熱的な相互作用のメカニズムの特徴

光化学損傷と違い、熱的損傷では照射と曝露時間の相反性は成り立たない。熱的損傷は、照射された組織からの熱伝導に強く関係している。わずかの時間でも強い曝露であれば、組織が凝固する。曝露がたいしたことなくても、曝露したところから熱が周囲の組織へ伝わっていく。動物実験における角膜や網膜の急性熱的損傷の閾値は、人間の眼の閃光による事故データを基にしている。ふつう、やけどには少なくとも摂氏45度の温度が必要である。

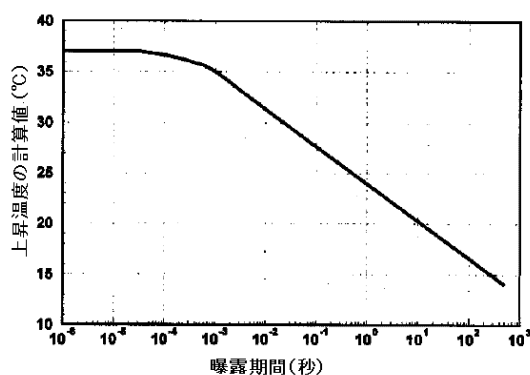


図2 網膜に50 μ mの大きさの像を落とした時、網膜がやけどをしてしまうことになる(像を落とした場所での)上昇温度の最大値を計算し、光の照射時間の関数として示した図 (Priebe and Welch 1978; Allen and Polhamus 1989)。大きい像の時ほど冷えにくくなるので、その場合はもっと低い温度でもやけどを起こすことになる。しかし、ふるまいの概略は変わらない。

図2に示したように、より短い曝露時間では、やけどが起こすにはより高い温度が必要となる(Priebe and Welch 1978; Allen and Polhamus 1989)。その温度になるための照射は、周囲の組織の温度と、曝露を受けた場所

の面積に依存する。接触を受けた場所が狭いと冷えやすくなるため、強い照射がないとやけどにならない。狭い面積ではこのように素早く冷却されるため、照射後に上昇温度が持続する時間にも制限がつき、曝露した組織がどのような温度変化をたどるかという重要な問題も変わってくることになる。したがって、ある照射時間に対して単一の臨界温度というものはないことになる。すなわち、眼や皮膚の曝露を定義するには、曝露面積を特定しないといけないということである。

5.4 網膜の損傷

明るい光源を見たことによって網膜に生じる主たる損傷は光網膜炎であり、例えば太陽を見つめることによって生じる、暗点を伴った日光網膜炎がそれにあたる。日光網膜炎は、以前は「日食盲」と呼ばれており、「網膜の熱的損傷」と関係しているとされていた。近年、光網膜炎は可視光の中で波長が短い光、すなわち紫色や青色光に網膜がさらされることによって生じる光化学的な反応の結果であることが明らかになってきた(Ham et al. 1976)。そして、現在では光網膜炎は「青色光による網膜の損傷」と呼ばれている(Sliney and Wolbarsht 1980)。キセノンアークのフラッシュランプや、原子力光、あるいはレーザーのような極めて高い輝度をもつ光源だけが、網膜に熱による損傷を生じさせる(Byrnes et al. 1956)。しかし、溶接アークによって生じる光網膜炎でさえ「熱」や「赤外線」によるものであると誤って考えられていた(Naidoff and Sliney 1974; Brittain 1988; Garcia and Wiegand 1989; Fich et al. 1992)。実験室での研究によると、低いレベルの光に長時間さらされることによる光化学的な障害は、色素が存在する網膜上皮や脈絡膜によって 380 -- 520 nm の範囲の短波長の光が吸収される

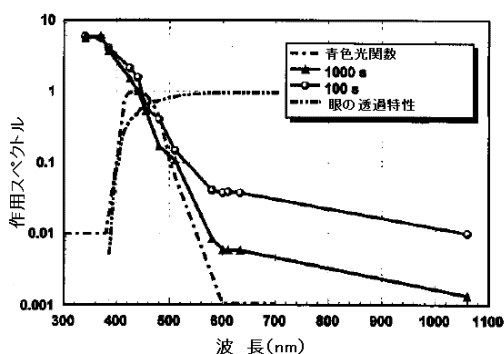


図3 水晶体なしのアカゲザルの、青色光による光網膜炎の作用スペクトル(Ham and Mueller 1989)と、眼の水晶体によるスペクトル吸収を考慮したときの $B\lambda$ を示す。標準的作用スペクトル $B\lambda$ は実曲線で示してあり、熱の影響のないときの限界を表す。一番右側、630 nmと1060 nmの2点は、熱照射の平坦部を示している。予想されるように、この平坦部は、曝露時間が100秒から1000秒になって網膜照度がほぼ定数になるときに、放射曝露にして約10倍の差を示すであろう。630 nmから1060 nmにかけての、網膜の熱的危険性のスペクトル依存性は、実際には直線ではない。それは、網膜の反射率のスペクトル変化、色素上皮細胞による吸収、水晶体による吸収などのために変化する。

ことと関係している(Ham et al. 1978)。しかしながら、網膜で少し(2--3 度程度)温度が上昇すると、光化学的な反応過程との相互作用が起こるようである。そのため、二次的ではあるが、広範囲の波長帯をメラニンが吸収することもある程度の役割を果たしているであろう。体温の上昇は光化学的な網膜の損傷の閾値をおよそ20%低くする効果がある(Ham 1989)。しかし、この閾値に安全係数5以上を適用すれば、この効果は無視できる。可視光の中で短い波長の光は、網膜の老化を早めることが示唆されている(Marshall 1983; Young 1988)。しかし、2 -- 3 時間以上の長

時間曝露によって光化学的な損傷を生じさせるような作用スペクトルが1つ以上存在することは明らかである(Noell 1980; Sperling 1986; Mainster 1987; Kremers and van Norren 1988; Sliney 1988)。光網膜症の曝露限界を得るにあたって(図3)、本委員会は、Ham(1989)による急性光網膜症の作用スペクトルは青色光による損傷を判定するのに最も適切であると決定した。強い光源を見つめる継続時間は、忌避反応が生じる時間(0.20秒以下)とほぼ同じと考えられるが(Gerathwohl and strughold 1953)、意図的に視線を固定したような特別な場合にはかなり長くなる。無意識に眼球を動かしたり(このことにより光のエネルギーがずっと広い領域に広がる)、頭を動かしたりする動作により、長時間の曝露によって生じる可能性がある障害は、効果的に減らすことができる(Fender 1964; Yarbus 1977)。時間平均した像の面積と網膜照射に対する眼球運動の効果は図4に示されている。

波長域 380 -- 1400 nm の範囲においては、急性網膜損傷を引き起こすメカニズムは、網膜上の像の大きさの関数として(すなわち、最小のスポットサイズのビーム内観察の場合と、広がった光源の場合の両方に対して)よく理解されている。障害を生じるメカニズム間にはっきりした境界が存在するわけではないが、波長領域と曝露時間に応じて、あるメカニズムが主要となってくる。数秒以下の非レーザー光源では生じないため、このガイ短時間の曝露では、閾値におけるダメージは熱的損傷によるものである。超短波長レーザーのパルスによって組織に生じる機械的な破壊は、今考えてドラインの中では考慮の範囲外である。熱よりも光化学的な効果が上回るのは、曝露時間が10秒以上ならば、およそ 600 -- 700 nm 以下の波長域だけである。光化学的效果が検出されない近赤外波長では、曝露時

間が10秒以上になると、熱の影響が上回る。外に広がる熱流のため、網膜の損傷閾値は網膜上の像の大きさに強く依存するようになる。眼球運動によっても(約0.1秒から10秒を超えるような曝露時間では)、光化学的な網膜損傷のスポットサイズ依存性が生じる(Fender 1964; Naidoff and Sliney 1974; Yarbus 1977; Sliney 1988, 1989)。

5.5 皮膚の損傷

可視光による皮膚の光線過敏性損傷は、血清ビリルビンや殺虫剤のフェノチアジンといった内因性、外因性光増感剤が共に存在することの結果かもしれない。可視光によってこの効果が生じる可能性は、紫外線によるよりもずっと小さいが、食物や薬物に含まれる、ある光増感性分子の摂取によってそうしたこと(可視光による皮膚損傷)が起こりうる(Fitzpatrick et al. 1974; Magnus 1976; Diffey 1982)。例えばポルフィリン症の作用スペクトルはしばしば、およそ400 nmと500 nmに第二にピークを持っている(Diffey 1982)。

皮膚の熱的損傷は、非レーザー源で起こることはまれであり、熱源の大きさと皮膚の初期温度(網膜は摂氏37度だが、皮膚は普通摂氏22--25度)に強く依存している。痛み反応時間(1秒以下)で熱的損傷を引き起こすためには、大変強い照射が必要である。典型的な作業現場を考えると、全身の熱ストレスによって光学放射への曝露時間は限定されがちで、結果的に皮膚の熱的損傷の閾値を超えないようになっている。したがって、非常に強い照射がパルスの、あるいは非常に短い時間当たるとだけ皮膚への熱的損傷を引き起こされる。

(注) 国際非電離放射線防護委員会

(ICNIRP) とは、WHO世界保健機関)の協力機関の1つで、1992年にIRPA(国際放射線

防護学会) から独立した学術組織。様々な種類の非電離放射線に関する影響を中立的な立場から科学的に調査し、国際指針の作成や防護についての活動をしている。

大島 修

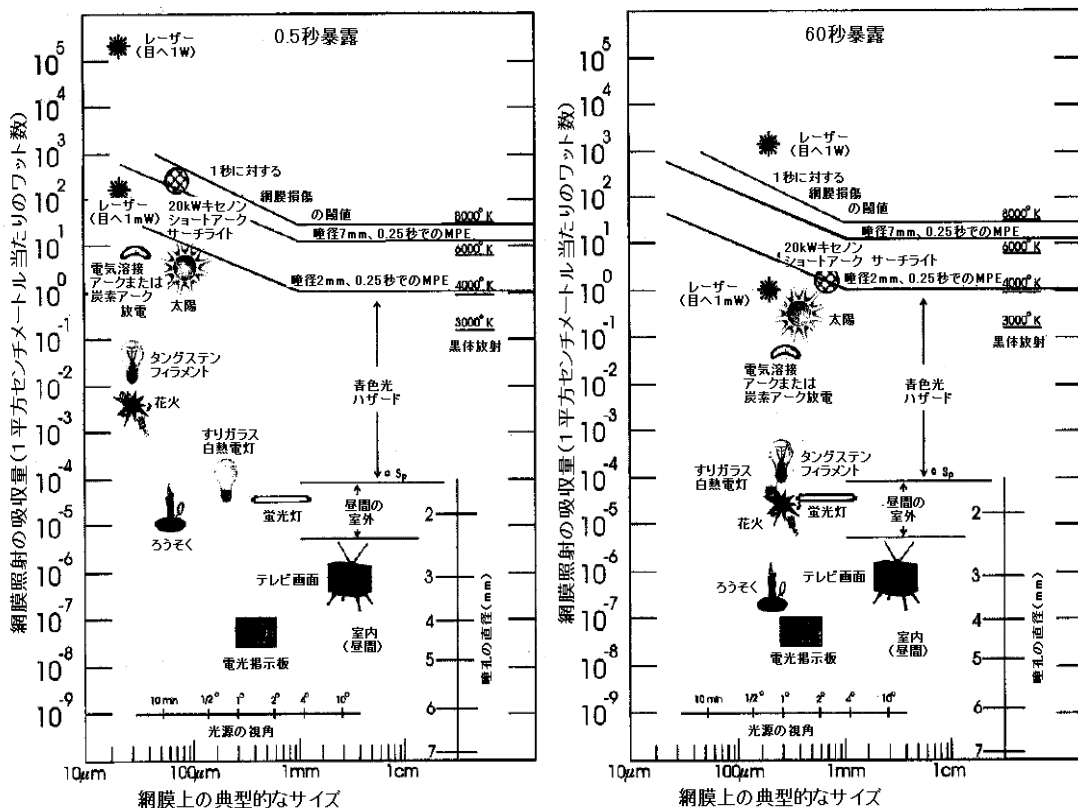


図4 いくつかの特徴的な光源による相対的な網膜照度を、左パネルは実像サイズの関数として、右パネルは眼球の動きから得られる平均照度として示した。眼球の動きは、非常に小さいイメージサイズに対しては網膜照度を小さい側に移動させる(Slinery and Wolbarsht 1980 から採用)。曝露時間 0.25 秒(忌避反応時間)についての左のパネルでは、像によって影響を受ける網膜の面積は、実際の光学的像と通常は同じサイズである。しかし、60 秒曝露については、眼球の運動が小さい像(だいたい 200 -- 300 μm 以下)の光学的エネルギーを分散させ、その結果、右側のパネルに示すように像照度を平均化してしまう。

【編集部からのお詫び】

本原稿は『天文教育』2012年3月号「特集：2012年5月金環日食に向けて」掲載用にご投稿いただきましたが、編集部の手違いで本号への掲載となってしまいました。関係者の皆様にご迷惑をおかけしたことをお詫び申し上げます。