

太陽観察グラスの透過率測定 II *

齋藤泉*^{1,2,3}・大西浩次*^{2,3,4}・安藤享平*^{2,5}・大川拓也*^{2,3,6}・小野智子*^{2,7}
 篠原秀雄*^{2,3,8}・高橋淳*^{2,9}・松尾厚*^{2,3,10}・奥野勉*¹¹

The measurement of the transmittance of the filter for sunlight II

Izumi Saito, Kouji Ohnishi, Kyohei Ando, Takuya Ohkawa, Tomoko Ono,
 Hideo Shinohara, Jun Takahashi, Atsushi Matsuo and Tsutomu Okuno

We measured the transmittance of filters and the substitutes for direct observation of the sun, from 2009 to 2012. In this paper, we report the results of the measurements in detail. This paper gives fundamental data for observing solar eclipses safely.

キーワード：金環日食，2012 年金環日食，日食網膜症，日食メガネ，透過率

1. はじめに

我々は、2009 年 7 月 22 日の皆既日食及び 2012 年 5 月 21 日の金環日食に向けて、市販されている太陽観察グラス及びその代用品として使われる可能性の高いものについて透過率を測定した。その結果の一部については金環日食前にウェブページ等で広く公開してきたが、本論文では、2009 年～2012 年における測定結果について、その詳細を報告する。これらは、将来の日食における基礎的な資料となるだろう。

2. 2012 年金環日食

日食は顕著な天文現象であることから、その観察は理科学習への強い動機付けになり、宇宙における地球・月・太陽の位置や運動を実体験できるという非常に貴重な学習機会である。ところが太陽は極めて明るいため、観察には安全性への対応が不可欠である。眼視での直接あるいは不適切な観察グラスを使用した太陽の観察は、日食網膜症となる危険性が高い。日食網膜症とは、日食性網膜炎とも呼ばれ、太陽を直視あるいはそれに近い状態で見た場合に発症する。その自覚症状としては、霧視（かすんで見える）、中心暗点（視野の中央に暗い点が見える）、視力低下、変視（ゆがんで見える）、頭痛、眼球痛などである¹⁾。

発症機構としては、1980 年代までは、熱障害説²⁾³⁾と光化学障害説⁴⁾があった。現在では、一般的には「光化学反応による網膜視細胞と網膜上皮細胞の障害」と考えられているが、瞳孔径が 7mm のような特別な場合には網膜内の温度が上昇し、熱障害も起こりうる⁵⁾。快晴で太陽高度が高い場合には、太陽をわずか 0.8 秒直視しただけでも、網膜損傷の危険性があると指摘されている⁶⁾。以前は、網膜の熱損傷を防ぐために赤外線の影響の必要性が唱えられていたが、現在では赤外線よりも可視光、特に光化学反応に関係する青色光の影響が大きいと考えられている。

日本には、太陽直視用フィルタに関する規格が存在しないが、欧州規格 (EN1836:2005+A1:2007(E)) では、赤外線透過率は 3%以下であれば良いとされ

*本研究は、国立天文台先端技術センターATC 施設利用 (2008 年 11 月～2012 年 9 月)、および、JSPS 科研費基盤研究 (C) 23501085「児童・生徒一人一人が安全かつ主体的に日食を観測するための教材の開発とその評価」(代表：大西浩次)の助成を受けたものです。

*1 栃木県子ども総合科学館,
 *2 天文教育普及研究会, 日食の安全な観察推進 WG
 *3 日本天文協議会, 2012 年金環日食日本委員会
 *4 長野工業高等専門学校一般科教授,
 *5 郡山市ふれあい科学館,
 *6 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構
 *7 自然科学研究機構 国立天文台,
 *8 埼玉県立草加東高等学校,
 *9 茨城県立水海道第一高等学校,
 *10 山口県立山口博物館,
 *11 労働安全衛生総合研究所

原稿受付 2014 年 5 月 20 日

ている。

2009年の皆既日食の時に、天文教育普及研究会の世界天文年プロジェクト・ワーキンググループの中に「太陽フィルタ測定チーム」が設置された。筆者の多くはこのチームのメンバーとして、世界天文年日本委員会推奨の日食グラスをはじめ複数の太陽観察グラスについて、可視から近赤外域にわたっての透過率を測定し、その安全性を検証してきた⁷⁾。

同チームによって、日食観察後の眼の障害についてもウェブ上で調査を行い、14件の症例を得た¹⁾。これらはいずれも太陽観察グラスの誤った方法での使用や、不適切な代用品の使用により生じた症状であった。

2012年5月21日早朝には、日本国内で日食が起り、九州南部、四国の大部分、本州の紀伊半島から関東付近にかけての日本人口の約3分の2が住む地域が金環帯に入るため、2009年の規模を大きく越え、数千人規模の眼の障害が発生することも危惧された⁸⁾。

本稿では遮光板などの太陽観察用の器具をはじめ、ススのガラス板、感光したカラーフィルム、X線フィルムなどの日食観測において以前使用されていた代用品や2009年の日食の際に目の障害を起こしたフィルタの代用品、さらにお菓子の袋やCDなどの日食観測フィルタの代用として使用されそうなものの安全性をチェックすることが目的である。

3. 透過率の測定

太陽フィルタ測定チームは、2009年の世界天文年後に「日食の安全な観察推進ワーキンググループ」と改称し、2012年の金環日食に向けて安全な日食観察方法の検証のために、市販の太陽観察グラス及びその代用品として使われる可能性の高いものについて透過率の測定を行った。この測定は、国立天文台先端技術センターの施設利用プロジェクトにより、以下のように4年間にわたり実施した。

- (1) 2008年11月～2009年9月
「太陽観測用フィルタの透過性能の測定」
(代表 齋藤泉)
- (2) 2009年10月～2011年9月
「太陽観察用フィルタとその代用品の透過率測定」
(代表 大西浩次)
- (3) 2011年10月～2012年9月 「金環日食に向けた太陽観察用フィルタの透過率測定」
(代表 齋藤泉)

透過率の測定には主に分光光度計SolidSpec-3700(島津製作所)を、補助的に分光光度計UV3100PC(島津製作所)を使用した。またサンプル表面の状態は、顕微鏡MM-40(Nikon)を使用し、観察及び撮影を行った。太陽観察グラスの透過率は可視領域で10万分の1と極めて低いため、測定限界近くとなり、透過率の測定値はS/Nが悪くなり測定値の不定性が大きくなる。そこで2009年の測定では写真撮影用ND400フィルタと比較しながら測定した⁷⁾。

今回は測定器の校正をより厳密に行うために、まず光を通さない厚いサンプルを使って0%補正機能により原点を調整した。また、測定手順確立のための試験測定を行い、測定パラメータを定めた。

測定波長 : 300nm～1400nm,
測定スピード : 超低速,
サンプリングピッチ1.0nm,
スリット幅 : 8nm(可視), 20nm(赤外))

分光光度計SolidSpec-3700の測定できる最小値は 2×10^{-5} (300～780nm)、 8×10^{-5} (780～1400nm)である。しかし、光源、検出器及びグレーチングの切り替え波長付近では、他の波長よりも測定値が1桁以上不安定となることがある。測定機器そのものの影響を除くために、透過率を計算する際にはこれらの測定値を除いた。なお、溶接用遮光プレートなどの規格に用いられている可視域の透過率は、眼の分光感度を考慮した視感透過率である。

分光光度計を用いて波長域380～780nmの分光透過率を測定し、次の式(遮光保護具(JIS T8141:2003)からの抜粋)によって計算する。なお、「標準イルミナントA」は、透過率の測定時に使用する標準光源である。

T(λ) : 試験フィルタの分光透過率
V(λ) : 2度視野における明所標準比視感度
Pex : 標準イルミナントAの分光分布
Tv : 視感透過率(%)

$$Tv(\%) = \frac{\int_{380nm}^{780nm} P_{ex} \lambda T(\lambda) v(\lambda) d\lambda}{\int_{380nm}^{780nm} P_{ex} \lambda v(\lambda) d\lambda} \times 100$$

サンプルの測定は2011年10月から開始し、市販品34点と代用品46点、計80点のサンプルについて合計336回の測定を行った。市販品は、遮光板、日食グラス、日食メガネ、太陽観察グラスなど様々な呼び方をしており、本体の素材もガラス製やフィルム状のものなどがある。本体を保持するフレームも紙やプラスチックなどがあり、形状についても眼の周辺部分のみ隠すものから顔全体を隠すものまで種々に渡る。安価なものには紙のフレームが目立った。

また、可視光領域で十分な測定精度を得るために、さらに広いダイナミックレンジを持つ労働安全衛生総合研究所の機器（分光放射輝度計：Spectra Scan PR705（PHOTO RESEARCH,Inc.）、キセノン光源：ASAHI SPECTRA MAX-302（朝日分光株式会社））により、 10^{-8} よりも高い精度で透過率の再測定を行った。本報告において可視域のみ（380～780nm）の透過率（小数点以下5桁の測定値）のグラフ（図1（上）や図2（上）など）は、この機器による測定結果である。

なお、これらの測定全般について、ラルフ・チョウ氏（Ralph Chou）の文献^{9),10),11),12)}なども参考にしたが、特に同一あるいは同様な素材のサンプルの測定結果を比較することにより、その信頼性を確認した。

4. 測定結果

市販の太陽観察ガラスを始め、ススを付着させたガラス板、感光・現像したカラーネガフィルム、X線フィルムなどの代用品となる可能性の高いものについて透過率を測定した。その結果を図1～16に示す。グラフの横軸は測定波長 λ [nm]、縦軸は透過率T[%]を表している。今回の測定は基本的には一回のみの測定である。製品の安全性を系統的に調べるには、同一サンプルの測定位置を変えることや製造日の異なるものを抜き取り、複数回の測定をすることが必要となる。

表1 市販品サンプルの透過率%（波長の単位はnm）

| サンプル | 製品名等 | 380-780 | | 780-1300 | | 販売元、製造 | 備考 |
|------|-------------------------------|---------|--------|-----------------------------|--|--------|-----------------------------------|
| | | 視感透過率 | 近赤外透過率 | | | | |
| 1 | 日食グラス2009 | 0.00024 | 0.067 | (株)ビクセン | | | ソーラープロテック、2回平均 |
| | 日食グラス2012 | 0.00022 | | (株)ビクセン | | | ソーラープロテック |
| 2 | Eclipse Viewer | 0.00009 | 0.028 | (株)誠文堂新光社、月刊天文ガイド2012年5月号付録 | | | CE規格(EU89/686)準拠、ブラックポリマーフィルム |
| 3 | sky&space | 0.00016 | 0.013 | SOBOMEX社製 | | | CEE89/686 |
| 4 | 太陽観察安全グラス | 0.00075 | 0.107 | (株)星の手帖社、(株)日本パール加工 | | | CE規格に準拠 |
| 5 | 遮光板 | 0.00155 | 0.008 | (株)ヤガミ | | | 保護具JIS T8141、遮光度13番、栃木科学館20年間使用 |
| 6 | たいようめがね(遮光板) | 0.00007 | 0.087 | 製品名など表示なし | | | アーテック遮光板solar filterと外見は同じ、レンズPVC |
| | 遮光板solar filter | 0.002 | 0.109 | (株)アーテック | | | 白緑の湾曲したフィルム、レンズPVC |
| 7 | 太陽グラス | 0.00079 | 0.008 | (株)アーテック | | | DIN 遮光度13番、EN169、ゴーグルタイプ |
| 8 | 日食観察安全シート | 0.00005 | 0.008 | (株)ナリカ | | | ポリエチレン、炭素微粒子、PET、JIS遮光度14相当 |
| 9 | 太陽観察専用3倍オペラグラス | 0.00142 | 0.008 | (株)東京企画販売 | | | DIN 遮光度13番、EN169:2003 |
| 10 | カード型太陽日食メガネ | 0.00012 | 0.037 | アイソテック(株)、金環日食観測ノート(株)旬報社 | | | 保護具JIS T8141準拠、EU89/686準拠 |
| 11 | うちわ型太陽日食メガネ | 0.00014 | 0.034 | アイソテック(株) | | | 保護具JIS T8141準拠、EU89/686準拠 |
| 12 | 太陽日食メガネ | 0.00001 | 0.035 | アイソテック(株) | | | 保護具JIS T8141準拠、EU89/686準拠、2回平均 |
| 13 | 日食グラス | 0.00010 | 0.027 | (株)渡辺教具製作所 | | | EEC89/686 |
| 14 | 日食観察プレート | 0.00012 | 0.115 | (株)アストロアーツ、(株)日本パール加工 | | | 塩化ビニル樹脂 |
| | 太陽が見える下敷き | 0.002 | 0.119 | (株)日本パール加工 | | | 塩化ビニル樹脂、7回平均 |
| 15 | 日食グラス | 0.005 | 0.015 | ベネズエラ製 | | | |
| 16 | 遮光板A | 0.003 | 0.259 | (株)大和科学教材研究所 | | | |
| 17 | しゃ光ばんB | 0.002 | 0.218 | (株)大和科学教材研究所 | | | |
| 18 | 太陽観察専用SUNGLASS | 0.003 | 0.067 | (株)ケンコー・トキナー、KSG-02 | | | 耳掛けがあるメガネタイプ、2回平均 |
| | 太陽観察専用SUNGLASS | | | (株)ケンコー・トキナー、KSG-06 | | | アストロソーラーフィルタ、測定なし |
| 19 | solar filter | 0.002 | 0.057 | (株)ビクセン、L字型 | | | 10回平均 |
| 20 | solar eclipse sun spot viewer | 0.002 | 0.022 | 国立天文台(1991年製) | | | |
| 21 | Tdcal LUNA | 0.002 | 0.030 | 製品名表示なし | | | BSI#0086 |
| 22 | 日食観賞用グラス | 0.218 | 7.650 | (株)デメテル | | | 5回平均 |
| 23 | Eclipse Viewer | 0.00045 | | (株)誠文堂新光社、藤井旭の日食観測ガイド付録 | | | 日食メガネ&日食投影器・ムック5月21日金環日食を見よう |
| 24 | 直視用日食メガネ | 0.00024 | | (有)スターゲイズ | | | EN1836:1997に準拠、BSI認証 |
| 25 | 2012年金環日食記念直視用日食めがね | 0.00010 | | (有)スターゲイズ | | | EN1836:1997に準拠、BSI認証 |
| 26 | 日食が観測できる本付録太陽ゴーグル | 0.00006 | | (株)二見書房、ゴーグルフィルム、(株)アーテック | | | |
| 27 | 太陽観察専用ソーラーグラス | 0.00094 | | (株)東京企画販売 | | | DIN EN169:2003 遮光度13 |
| 28 | 金環日食グラス | 0.00052 | | 宝島社 | | | DIN EN169 |
| 29 | カガくる +1号付録 | 0.00037 | | (株)朝日新聞出版、SOBOMEX社製 | | | |

4-1 市販の太陽観察グラスの透過率

図1～図5は、市販の太陽観察グラスの透過率のグラフである。サンプルの情報については、表1にまとめた。日本には太陽観察グラスの規格が無いので欧州標準化委員会(CEN)の規格(EN1836:2005+A1:2007(E))を参考にし、可視域の視感透過率0.003%以下、近赤外の透過率3%以下¹³⁾を安全性の目安と考えた。

サンプル1は、2009年に製作販売されたものだが、2012年に販売されたものもこれと同一のようである。サンプル2とサンプル23は、ブラックポリマーを使用した製品で、同様の製品と思われるが、測定値には数倍の違いがみられた。この製品は他にも同出版社の本の付録として使用されている。サンプル3とサンプル29は、フランスの同一会社の製品であるが、透過率には数倍の違いがみられた。サンプル4とサンプル14は、塩化ビニル樹脂を使用しており、太陽を見ることを考慮して作成された黒色の下敷きを製作販売している会社のものを使用した製品であるが、透過率には数倍の違いがみられた。

図1のサンプル1と4は、可視域の長波長帯で透過率が0.003%を超えているところもあるが、可視全域での視感透過率はそれぞれ0.00024%と0.00075%である。図2のサンプル5と図5のサンプル23の視感透過率もそれぞれ0.00155%、0.00045%であり、これらの日食観察グラスは可視域から近赤外域にかけて、安全なレベルと言える。サンプル5はJIS遮光度13の表示性能をほぼ満たし、サンプル7と9はドイツ規格DIN遮光度13の溶接用遮光グラスを組み込んだもので、表示どおりの透過率を示した。サンプル6は製品名などの表示が無いが、レンズにPVCを使用しているアーテック社の製品とサイズや形状が全く同じであり同様の製品と思われる。サンプル8は、表示より遮光度が高い遮光度16の透過率を示した。サンプル10～12の三種は、同一会社の製品であるが、サンプル12は他の2つより視感透過率が1桁低いことから、2種類の性能があると考えられる。サンプル13は、サンプル10や11と同様の透過率を示した。サンプル15は製造年が不明の外国製の日食観察グラスであるが、図4のように全体的に透過率が高く、視感透過率0.005%と目安よりやや高めの数値を示した。サンプル16と17は形状が異なるが同一会社の製品であり、同様の透過率を示した。サンプル18はメガネタイプのものであり、次節で紹介する太陽観察フィルタシートを利用した同社の製品とは異なる。

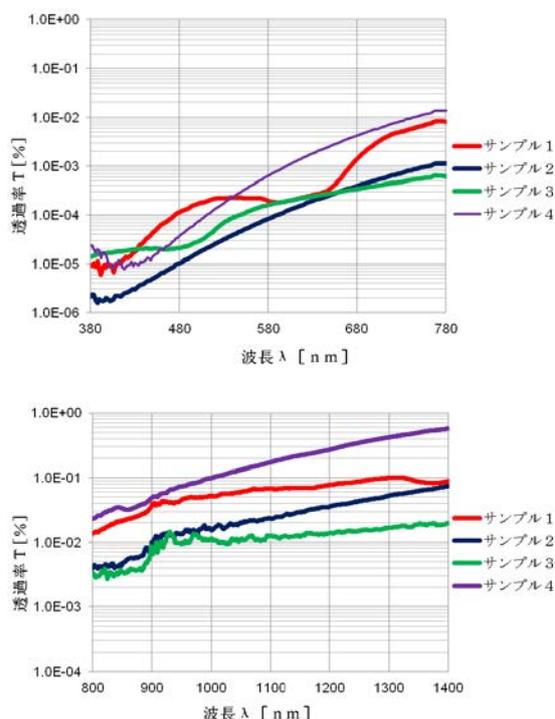


図1 太陽観察グラスの透過率 1
可視域 (上), 近赤外域 (下)

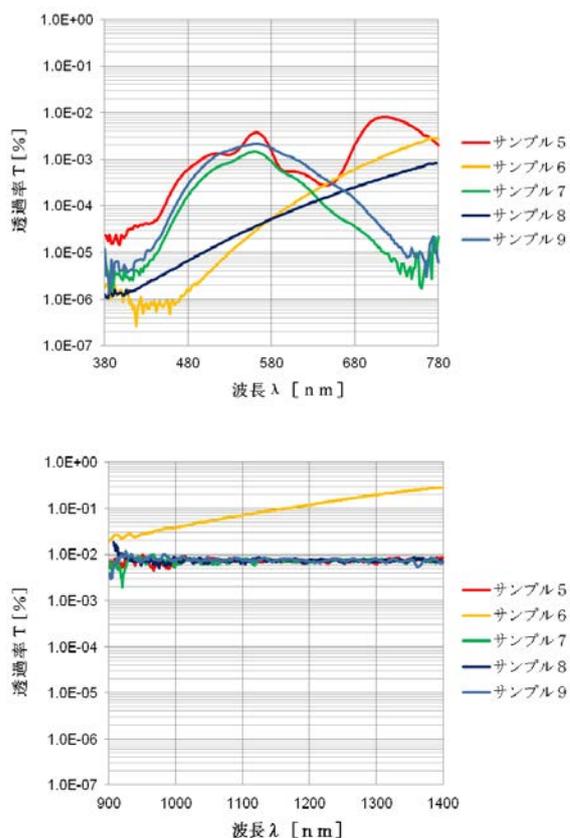


図2 太陽観察グラスの透過率 2
可視域 (上), 近赤外域 (下)

サンプル 19 はサンプル 1 と同一会社の製品であるが、L 字型をしており 2009 年以前から発売されていたもので異なる材質と思われる。サンプル 20 は、1991 年に国立天文台で販売したものである。サンプル 21 は、紙のフレームのメガネタイプのものであり、製品名などの表示は無い。

サンプル 22 は、金環日食の 11 日前にウェブ上での販売が確認された中国製の太陽観察グラスで、視感透過率 0.2%、近赤外透過率 8% と非常に透過率が高く、危険性の高い製品である。図 4 の他の製品と比べて 1~2 桁ほど高い透過率を示している。本測定と国民生活センターでの測定結果が一致したため、消費者庁の指導により日食前に販売中止、製品回収に至った製品である¹⁴⁾。

サンプル 24 と 25 は同一会社の製品で、2009 年と 2012 年にそれぞれ発売された紙フレームのメガネタイプのものであるが、透過率には数倍の違いがみられた。サンプル 26 は、図 2 (上) のサンプル 6 とグラフの形も非常に似ており、視感透過率もほぼ一致していることから、同様のフィルムが使われていると考えられる。サンプル 27 は、DIN 規格遮光度 13 を組み込んだ製品であり、可視光は表示どおりの透過率である。サンプル 28 は、製品そのものには遮光度 13 の表示は無いが、DIN 規格遮光度 13 の透過率を示した。

4-2 太陽観察フィルタシート

BAADER AstroSolar Film の透過率及び劣化

太陽観察フィルタシートの透過率を図 6・7 及び表 2 に示す。2012 年 2 月に別なルートで購入した新品 1 と新品 2 を開封直後に測定し、約 17% の透過率の違いが見られたが、これを濃度 D であらわすと 5.0 及び 5.1 となり、眼視用の性能 D5 相当を満たしている。ほかにも D3.8 の撮影用があるが、新品 3 だけが撮影用である。この製品は、高い遮光性能を持つ非常に薄いシートで、ハサミでも簡単に切れるなど加工がしやすく、自作の太陽観察グラスや、望遠鏡・双眼鏡の対物側につける減光フィルタなどに広く使われている。なお、濃度 D と透過率 T には $D = -\log_{10}T$ が成り立つ。

(1) 2 年間常温保存及びラミネート熱加工の影響

このシートは、表面のキズや破れなどを防ぐ目的でラミネート熱加工されることも多いが、販売メーカーは加工による性能を保証していない。そこで、この熱加工や常温保存での劣化について調べるため、

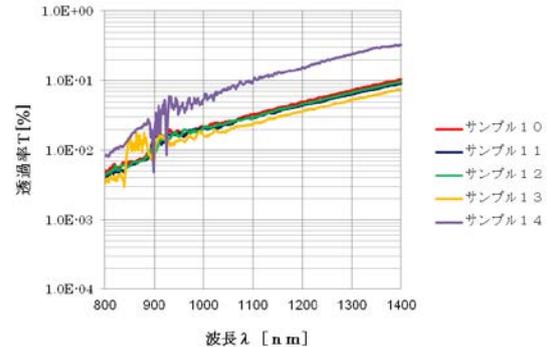
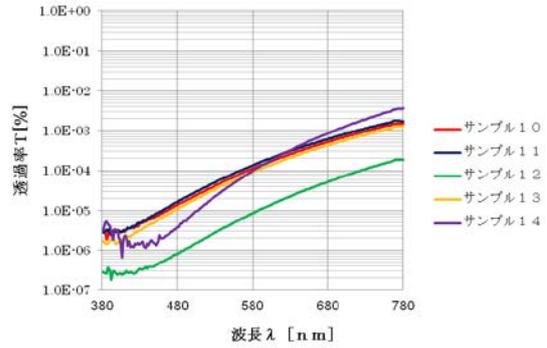


図 3 太陽観察ガラスの透過率 3
可視域 (上), 近赤外域 (下)

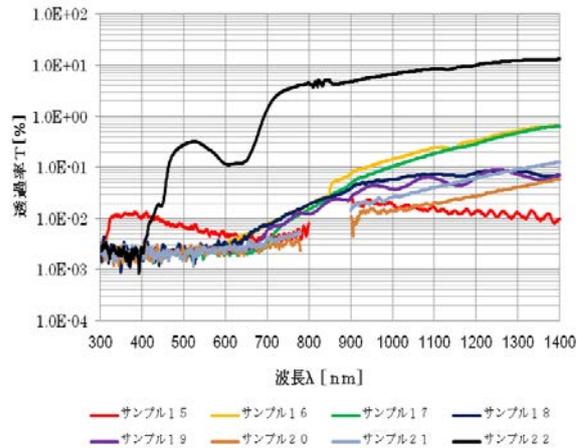


図 4 太陽観察ガラスの透過率 4
(測定精度の良くない 800nm~900nm 帯のデータを除く)

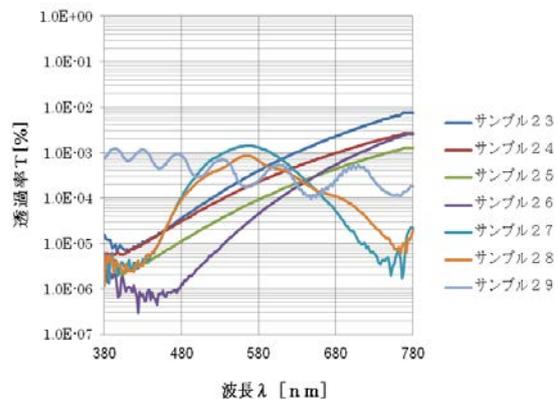


図 5 太陽観察ガラスの透過率 5 可視域

表2 太陽観察フィルタシートの透過率% (波長の単位は nm)

| サンプル | 製品名等 | 380-780 視感透過率 | 780-1300 近赤外透過率 | 販売元、製造 | 備考 |
|------|------------------|------------------|--------------------|--------|-------------------|
| 30 | Astro Solar Film | 0.00096 | 0.021 | BAADER | 2年間常温保存ラミネート熱加工なし |
| 31 | Astro Solar Film | 0.00137 | 0.028 | BAADER | 2年間常温保存ラミネート熱加工あり |
| 32 | Astro Solar Film | 0.00064 | | BAADER | 新品1 |
| 33 | Astro Solar Film | 0.00054 | | BAADER | 新品2 |
| 34 | Astro Solar Film | 0.01375 | | BAADER | 新品3(撮影用) |
| 35 | Astro Solar Film | 0.00380 | | BAADER | 風雨2回使用 |
| 36 | Astro Solar Film | 0.00231 | | BAADER | 風雨1回使用 |
| 37 | Astro Solar Film | 0.00125 | | BAADER | 未使用(3.5年間紙箱保存) |

「新品 (ラミネート熱加工なし)」「常温で2年間クリアファイルに保存した製品」「常温で2年間クリアファイルに保存した後にラミネート熱加工した製品」の3種のサンプルについて透過率を測定した。

「常温でクリアファイルに2年間保存したサンプル」は、「新品」と比べて透過率が52%増加していた。また、「常温で2年間保存した後に熱加工したサンプル」は、「2年間保存しただけのサンプル」に比べて透過率が37%増加していた。

これらは限られたサンプルや加工及び保存環境による数回のみ測定であるが、透過率の増加があることから、常温での2年間の保存やラミネート熱加工による劣化の可能性が示された。(表2の可視光の透過率は、平均透過率ではなく視感透過率を示す。)

(2) 潮風や風雨の影響

図7は、実際の海上で潮風や風雨にさらされたサンプルと保存期間の異なる未使用品の透過率である。風雨にさらされたサンプルについては測定位置を変えながら複数測定したが、透過率のバラつきは大きく、最も濃度の低いものはD4.3となり、新品の約5倍もの透過率であった。その劣化は激しく、光を当てると肉眼でも濃淡のムラが容易に確認できた。

4-3 写真撮影用NDフィルタの透過率

写真撮影用減光フィルタ (ND) の透過率を図8~10に示す。ND8 (8分の1に減光) は波長によらずほぼ様な透過率を示す。

ND400は可視光をほぼ400分の1に減光しているが、近赤外では急激に透過率が上昇するので、長時間撮影のためにファインダーを覗いていると、眼の熱障害を起こす危険性が高い^{15),16)}。

図8のND400+ND8は、ND400とND8を重ねたもので、同様にND400+ND8+ND8は、ND400と2枚のND8、計3枚を重ねたものである。

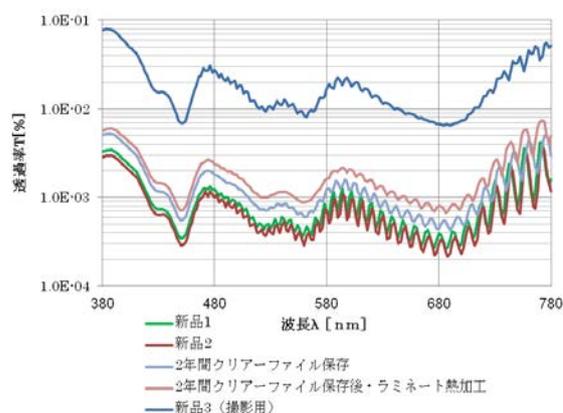


図6 太陽観察フィルタシートの透過率 1

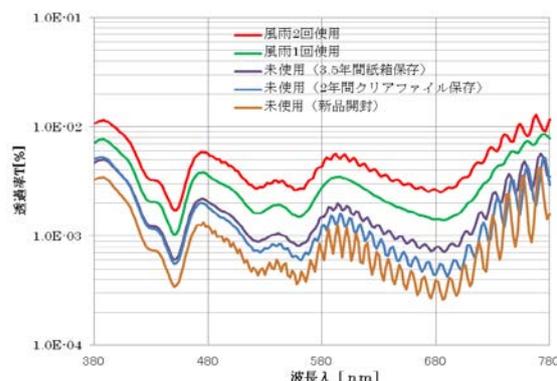


図7 太陽観察フィルタシートの透過率 2

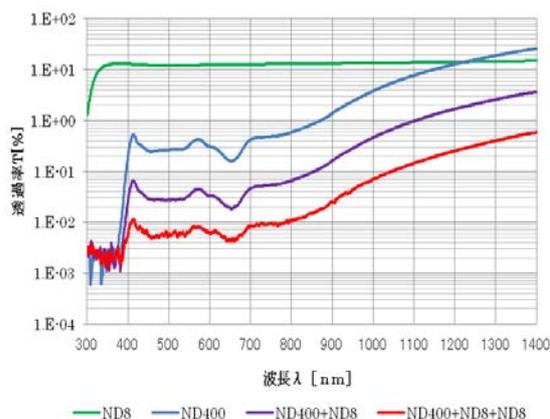


図8 NDフィルタの透過率 1

太陽観察ガラスの透過率測定Ⅱ

表3 代用品の透過率% (波長の単位は nm)

| サンプル | 製品名等 | 380-780 視感透過率 | 780-1300 近赤外透過率 | 販売元、製造 | 備考 |
|------|---------------------|------------------|--------------------|-------------|------------------------------------|
| 38 | ND8 | 12.57621 | 13.945 | kenko | 写真撮影用NDフィルタ PRO ND8(W) PRO1Digital |
| 39 | ND400 | 0.31812 | 8.950 | kenko | 写真撮影用NDフィルタ ND400 PROFESSIONAL |
| 40 | ND400+ND8 | 0.03364 | 1.164 | kenko | 写真撮影用NDフィルタ ND8とND400の2枚重ね |
| 41 | ND400+ND8+ND8 | 0.00656 | 0.175 | kenko | 写真撮影用NDフィルタ ND82枚とND400の3枚重ね |
| 43 | ND8+ND8 | 1.57712 | | kenko | 写真撮影用NDフィルタ ND8 2枚 |
| 44 | ND8+ND8+ND8 | 0.22051 | | kenko | 写真撮影用NDフィルタ ND8 3枚 |
| 45 | ND8+ND8+ND8+ND8 | 0.02611 | | kenko | 写真撮影用NDフィルタ ND8 4枚 |
| 47 | ND400+ND400 | 0.00079 | | kenko | 写真撮影用NDフィルタ ND400 2枚 |
| 48 | ND400+ND400+ND8 | 0.00009 | | kenko | 写真撮影用NDフィルタ ND400 2枚+ND8 1枚 |
| 49 | ND400+ND400+ND8+ND8 | 0.00001 | | kenko | 写真撮影用NDフィルタ ND400 2枚+ND8 2枚 |
| 50 | ND10000 | 0.00761 | 0.065 | kenko | 写真撮影用NDフィルタ ND10000 1枚 |
| 51 | ND10000+ND8 | 0.00095 | | kenko | 写真撮影用NDフィルタ ND10000 1枚+ND8 1枚 |
| 52 | ND100000-1 | 0.00111 | | MarumiD5 | 写真撮影用NDフィルタ ND100000 |
| 53 | ND100000-2 | 0.00081 | | SightronD5 | 写真撮影用NDフィルタ ND100000 |
| 54 | ND10000 | 0.00918 | | SightronD4 | 写真撮影用NDフィルタ ND10000 |
| 55 | CD-R1 | 0.127 | 0.136 | SONY CD-R | CD-R |
| 56 | CD-R2 | 0.181 | 0.194 | SONY CD-R | CD-R サンプル55の測定位置をずらす |
| 57 | CD-R3 | 0.114 | 0.121 | SONY CD-R | CD-R サンプル56の測定位置をずらす |
| 58 | CD-ROM | 0.144 | 0.162 | (株)筆まめ | CD-ROM(筆まめ) |
| 59 | ススガラス薄い | 16.698 | 39.448 | | 溶接用カバークラスにロウソクの薄いス |
| 60 | ススガラス中間 | 1.373 | 13.429 | | 溶接用カバークラスにロウソクの中間の濃さのス |
| 61 | ススガラス濃い | 0.003 | 0.310 | | 溶接用カバークラスにロウソクの濃いス |
| 62 | 溶接用遮光プレート#11 | 0.00603 | 0.008 | 理研化学(株) | 遮光度11 近赤外900-1300 |
| 63 | 溶接用遮光プレート#12 | 0.00177 | 0.008 | 理研化学(株) | 遮光度12 近赤外900-1300 |
| 64 | 溶接用遮光プレート#13 | 0.00094 | 0.008 | 理研化学(株) | 遮光度13 近赤外900-1300 |
| 65 | 溶接用遮光プレート#14 | 0.00029 | 0.008 | 理研化学(株) | 遮光度14 近赤外900-1300 |
| | 溶接用遮光プレート#11 | 0.00393 | 0.008 | 山本光学(株) | 遮光度11 近赤外920-1300 |
| | 溶接用遮光プレート#13 | 0.00036 | 0.008 | 理研 | 遮光度13 近赤外920-1300 |
| | 溶接用遮光プレート#14 | 0.00032 | 0.008 | 理研 | 遮光度14 近赤外920-1300 |
| | 溶接用素ガラス | 89.326 | 84.057 | 山本光学(株) | 溶接用カバークラス |
| 66 | 一般のサングラス1 | 13.236 | 48.597 | | |
| 67 | 一般のサングラス2 | 7.913 | 52.217 | | |
| 68 | カラーネガフィルム | 0.36820 | | 富士フィルム(株) | ISO800 |
| 69 | モノクロネガフィルム | 0.00003 | | コダック(株) | PLUSX(2枚重ね) |
| | モノクロネガフィルム | 0.00009 | | メーカー等不明 | |
| 70 | X線フィルムA | 0.00502 | 0.009 | | X線フィルムUR1 |
| 71 | X線フィルムB | 0.00531 | 0.014 | | X線フィルムHRS30 |
| | X線フィルム | 0.003 | 0.008 | メーカー等不明 | |
| 72 | リスフィルム | 0.00104 | 0.008 | | 印刷用リスフィルム |
| 73 | 下敷き(赤) | 26.400 | 89.600 | クツワ(株) | 暗記用下敷き(赤色)、PVC |
| 74 | 下敷き(緑) | 38.300 | 83.700 | クツワ(株) | 暗記用下敷き(緑色)、PVC |
| 75 | お菓子の袋1 | 0.054 | 0.483 | 江崎グリコ(株) | pockyh袋 |
| | お菓子の袋2 | 0.054 | 0.189 | (株)湖池屋 | コイケヤ袋 |
| | お菓子の袋3 | 0.003 | 0.054 | ヤマザキナビスコ(株) | OREO袋 |
| | お菓子の袋4 | 0.002 | 0.019 | カルビー(株) | カルビー袋 |
| 76 | 映画3Dメガネ | 33.883 | 89.973 | | 偏光メガネ |
| 77 | おもちゃのメガネ | 0.003 | 0.622 | | ガチャポンメガネ |
| | 金箔ラミネート | 0.356 | 0.040 | | 金箔ラミネート熱加工(2枚重ね) |
| | 下敷き(黒) | 0.00012 | | | |
| | 下敷き(黒) | 0.002 | 0.084 | | |
| | 下敷き(黒) | 0.002 | 0.008 | (株)西敬 | イカリボンM339黒 |
| | 下敷き(黒) | 0.002 | 0.008 | (株)西敬 | イカリボンM340黒 |
| | 下敷き(黒) | 0.002 | 0.008 | | |
| | 下敷き(黒) | 0.00007 | | | |
| | ポリ袋黒 | 0.00618 | | | ゴミ袋 |

可視域について、より高精度で測定した結果が図9である。ND8については1～4枚、ND400については2枚重ねた。これらの測定結果よりNDフィルタを重ねると、その掛け算の値の減光となることが確認できた。

図10はND10000（1万分の1に減光）と、メーカーが異なる2種のND100000（10万分の1に減光）の透過率である。3種類とも可視の全測定域にわたってほぼ一様な透過率を示しており、表示通りの性能を示すことが確認できた。

4-4 以前の太陽観測用に使用された代用品の透過率

(1) 溶接用遮光プレート（レンズ）の透過率

溶接用遮光プレート（レンズ）の透過率（遮光度11～14番）を図11に示す。これらは、表3のサンプル6 2～6 5に相当する。遮光度番号は濃さを示し、数が大きいほど透過率が低い。遮光度11は視感透過率0.00603%（可視域）であり、安全の目安（視感透過率0.003%以下）より透過率が高く太陽観察にはあまり適さない。しかし、遮光度12～14は、代用品として最有力候補であり、市販の太陽観察グラスの中には、同様のプレートを組み込んでいるものも見受けられた。（サンプル5・7・9・27・28）

日本には太陽観察グラスの規格が存在しないため、透過率については溶接用遮光プレートなどの規格で代用され、遮光度13が使われることが多いようである。遮光度12から14の視感透過率はそれぞれ0.00177%、0.00094%、0.00029%となり、各遮光度番号の規格どおりの透過率を示した。

ここで測定した遮光プレートのサンプルは、遮光度11～13は同一メーカー製であるが、遮光度14はこれと別のメーカーである。遮光度12の透過率のグラフ形状だけが他の3種と異なっている理由は不明であるが、素材や製造工程などが違っているのかもしれない。

なお、規格を満たす遮光プレートにパッケージデザインが良く似ているが、表示されている遮光度番号の規格を満たさない紛らわしい外観の製品も見つかったので注意を要する。

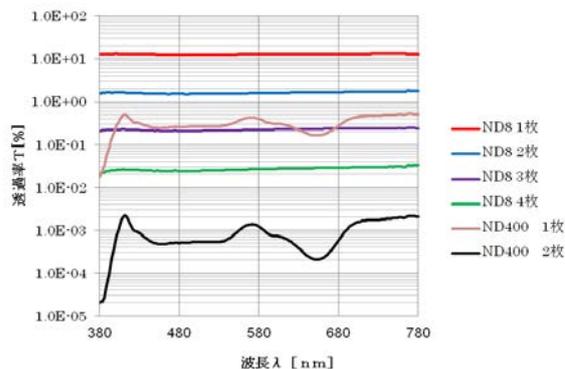


図9 NDフィルタの透過率 2

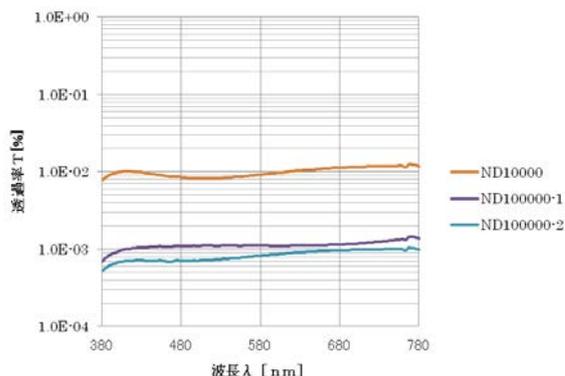


図10 NDフィルタの透過率 3

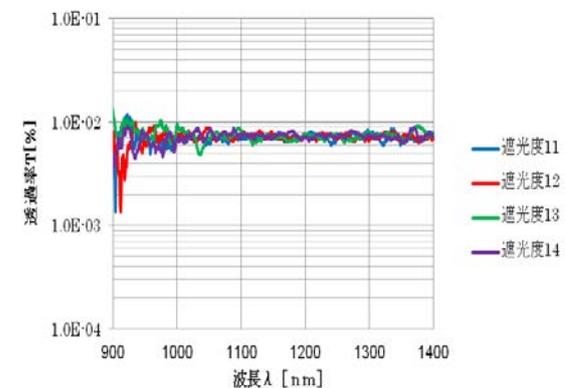
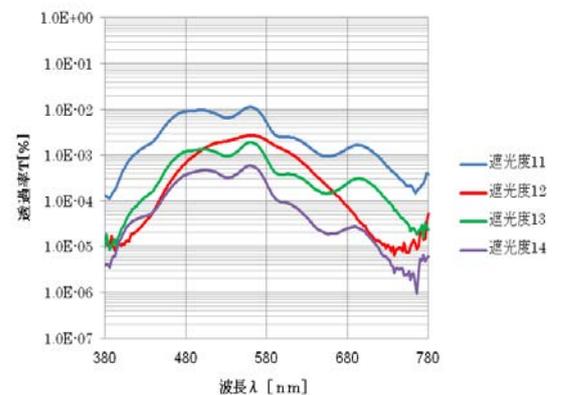


図11 溶接用遮光プレート（レンズ）の透過率
可視域（上）、近赤外域（下）

(2) ススガラスの透過率

3種類の濃さのスス（とても眩しくて太陽が観察できない「非常に薄いスス」、太陽が全く見えない「非常に濃いスス」及びその中間の濃さ「中間の濃さのスス」）をつけたガラス板についての透過率を図 12 に示す。「非常に濃いスス」のガラス板は、太陽が全く見えない濃さで、300~600nm 帯では 0.001%~0.003%の測定値が得られているが、これは見かけ上のもので、実際は測定限界 0.002%以下の値と考えられる（ススガラスについては可視域の高精度の測定は行っていない）。適切な濃さにしかも均一にススを付着させることは非常に困難であり、特に眼に見えない赤外線について透過率 3%以下に抑えるようにススの濃さを調整することは、ほとんど不可能と思われる。また、付着させた面にほんの僅かに触れるだけでも、簡単にススが落ちてしまう危険性もある。なお、「非常に薄いスス」、「中間の濃さのスス」については、短波長側の 300nm に近づくにつれ透過率が急激に低下しているが、これはガラスが紫外線を吸収する特性を示している。

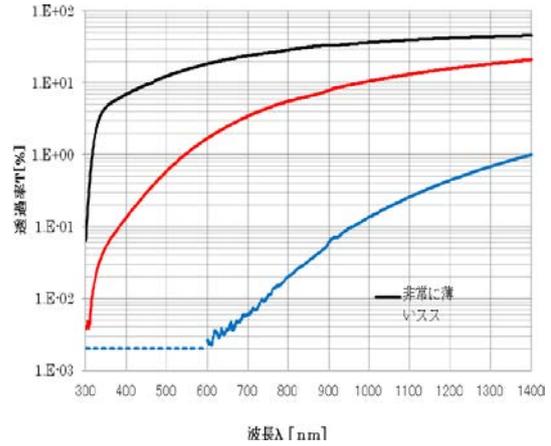


図 12 ロウソクのススをつけたガラス板の透過率

(3) 一般のサングラス及び

感光・現像したカラーネガフィルムの透過率

太陽観察用ではない一般のサングラス及び感光・現像したカラーネガフィルムの透過率を図 13 に示す。2種類のサングラスは、可視域では 10%程度、近赤外域では 50%程度の透過率を示している。カラーネガフィルムは、可視域は 0.4%程度、近赤外域は 80%もの透過率がある。これらは、いずれも減光が不十分であり大変危険なことが確認できた。

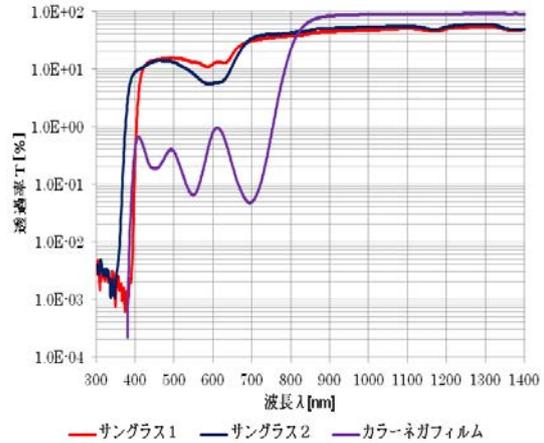


図 13 一般のサングラスと感光したカラーネガフィルムの透過率

(4) X線フィルム、印刷用リスフィルム、モノクロネガフィルムの透過率

図 14 に X 線フィルムなどの透過率を示す。感光・現像した X 線フィルムは、遮光用として天文ファンなどに使われてきたが、撮影装置のデジタル化にもなって入手しづらくなっている。今回測定した 2 種類の X 線フィルムは、視感透過率（可視域）が 0.0050%及び 0.0053%となり、目安（0.003%）よりやや高い透過率である。

印刷用リスフィルムは、視感透過率 0.00104%とほぼ安全圏内である。また、ここで測定したモノクロネガフィルムは、感光・現像した同じフィルムを 2 枚重ねたものである。この視感透過率は 0.00003%となり遮光が十分で太陽観測に使用できそうであるが、フィルムの現像ムラなども考慮すると、市販の製品のような安全性は得られないだろう。

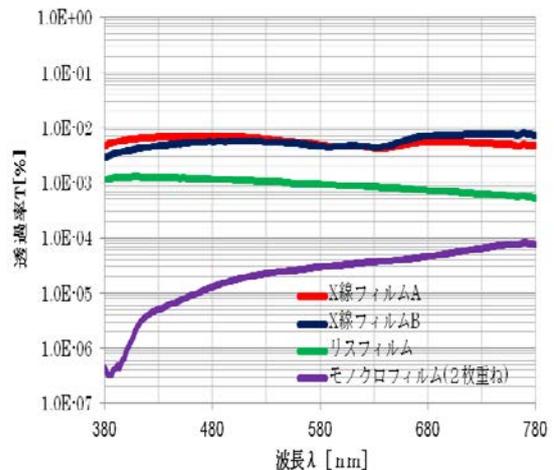


図 14 X線フィルム、印刷用リスフィルム、モノクロネガフィルム(2枚重ね)の透過率

4-5 その他の代用品の透過率

(1) CD-R, CD-ROM の透過率

CD-R および CD-ROM の透過率を図 15 に示す。これらは、サンプルによるばらつきが大きい、いずれも視感透過率で 0.1% 程度の高い透過率を示し、大変危険であることがわかった。CD-R 1～CD-R 3 は、同じサンプルの測定位置を少しずらしながら 3 回測定したもので、溝との位置関係により透過率も変化している。

(2) 下敷きやお菓子の袋などの透過率

下敷きやお菓子の袋の透過率を図 16 に示す。暗記用に使われる半透明の赤や緑の下敷きは、視感透過率がそれぞれ 26% 及び 38% と非常に高く、太陽観察には大変危険である。太陽を見ることを前提に作られた黒い下敷きには、視感透過率 0.00007% で遮光度 15 に相当する安全性の高いものもあったが、これは太陽観察グラスに分類すべきであろう。

3D 映画が見られる偏光グラスも視感透過率 34%、近赤外透過率 90% とサングラス同様に透過率が非常に高く、大変危険である。

また、銀色のお菓子の袋の視感透過率も 0.05% と高く、太陽観察には減光が不十分である。特に、文字などをプリントしている部分は中身のお菓子が確認できるなど透過率が非常に高く、危険であることが確認できた。表 3 のお菓子の袋 3・4 の透過率は低いが、1 回のみの測定であるため市販品のような安全性は得られないだろう。

5. まとめ

2012 年の金環日食に備え、遮光板などの太陽観察用の市販品をはじめ、ススのガラス板、感光したカラーフィルム、X線フィルムなどの日食観測において以前使用されていた代用品や 2009 年の日食の際に目の障害を起こしたフィルタの代用品、さらにお菓子の袋や CD などの日食観測フィルタの代用として使用されそうなサンプルの透過率を測定した。

太陽観察グラスなどの市販品は、ほとんどが安全圏内の製品であった。また、今までに使用された代用品では、感光したカラーフィルムなど危険性の高いものもあった。さらに、Web 上で話題となり代用品として使われそうなサンプルについても測定し、その危険性などを確かめることが出来た。

その結果の一部については、天文教育普及研究会の会誌¹⁷⁾やウェブページ¹⁸⁾¹⁹⁾などを通して金環日

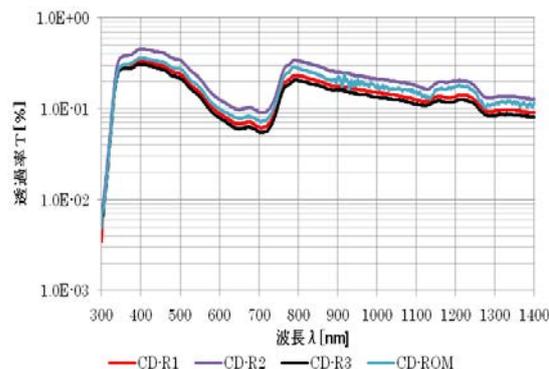


図 15 CD-R と CD-ROM の透過率

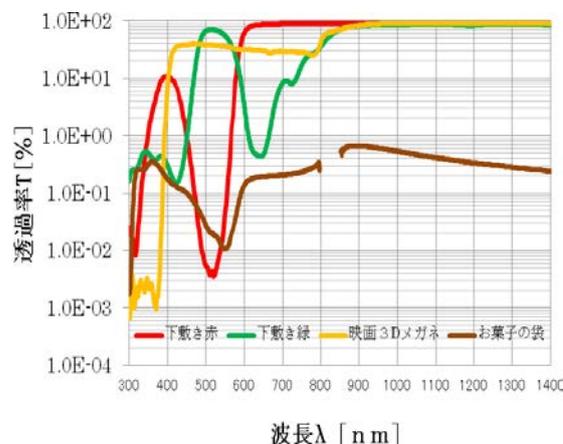


図 16 下敷き、お菓子の袋、映画用 3D メガネの透過率 (お菓子の袋は、測定精度の良くない 800nm～850nm 帯のデータを除く。)

食前に広く公開し、2012 年天文教育普及研究会年会¹⁵⁾ 及び日本天文学会 2012 年秋季年会¹⁶⁾にて報告を行なっている。我々の「日食の安全な観察」のための活動全般については、天文教育普及研究会の会誌²⁰⁾を参照されたい。

なお、同じ製品の中でも個体差がある可能性もあるので、本研究の結果から、特定の製品の使用が常に安全である、または、危険であるということはいえない。

サンプル 22 は、太陽観察専用をうたった市販の日食観察グラスであるが、以前から Web 上で販売されていたが、金環日食の 11 日前に発見された。可視光の透過率が 20% という表示の製品だったため、販売メーカーに問い合わせるとともに消費者庁に危険性を訴えた。消費者庁から依頼を受けた国民生活センターが測定を行ったが、この測定にアドバイスするとともに、依頼され送られてきた測定値から視感透過率を求めた。我々も別なサンプルを入手

し、透過率の測定及び視感透過率の計算を行い、可視から近赤外にわたり危険性の高い製品であることを確認した。これと国民生活センターの結果が一致したことが決定打となり、消費者庁の指導により日食直前に販売中止・製品回収に至った¹⁴⁾。我々の測定により、多くの市販品について危険性を日食前にチェックできたことが、今回の測定による成果のひとつである。

本稿が、太陽観察の基礎資料として活用され、安全に太陽観察が行われることを願っている。また、日本に太陽観察グラスの規格があれば危険性の高い商品にもっと迅速に対応できたと考えられる²¹⁾。その体制が整備されることをあわせて願いたい。

謝 辞

本研究は、国立天文台先端技術センターATC 施設利用（2008年11月～2012年9月）、および、JSPS 科研費基盤研究（C）23501085「児童・生徒一人一人が安全かつ主体的に日食を観測するための教材の開発とその評価」（代表：大西浩次）の助成を受けたものです。

最後に、測定に関する様々なサポートをいただいた三ツ井健司氏をはじめとする国立天文台先端技術センターの方々、また、サンプルを提供していただいた多くの方々に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 尾花明, 高橋淳, 大西浩次, 篠原秀雄, 松尾厚, 齋藤泉, 大川拓也, 小野智子:“2009年皆既日食による眼障害の発生状況”, 日本眼科学会雑誌, 115(7): 589-594(2011)
- 2) Penner,R.and Mcnair,J.N. : “Eclipse blindness. Repotr of an epidemic in the military population of Hawaii”, Am.J.Ophthalmol.,61:0452(1966)
- 3) Macfaul,P.A.:“Visual prognosis after solar retinopathy”, Br. J. Ophthalmol.,53: 534 (1969)
- 4) Ham, W.T. and Mueeller, H.A.:“Retinal sensitivity to damage from short wavelength light”, Nature,260:153(1976)
- 5) 国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) : Guidelines on Limits of Exposure to Broad-Band Incoherent Optical Radiation (0.38 to 3μm). Health Physics 73 (3): 539-554; 1997
- 6) Okuno. T.:“Hazards of solar blue light”, Applied Optics,47(16):2988(2008.6)
- 7) 大西浩次, 高橋淳, 篠原秀雄, 松尾厚, 齋藤泉, 大川拓也, 小野智子:“太陽観察用各種フィルタ類およびその代用品の透過率測定”(2009). <http://tenkyo.net/iya/eclipse/glass1.pdf>
- 8) 齋藤泉, 海部宣男, 大西浩次, 大川拓也, 大越治, 佐藤幹哉, 篠原秀雄, 塩田和生, 塚田健, 松尾厚, 三島和久, 森友和, 山田陽志郎:“2012年金環日食の日本での見え方と人口分布”, 日本天文学会 2012年春季年会予稿集, Y25a, 330(2012).
- 9) Chou, B. R.: “Safe Solar Filters”, Sky&Tel., August, 119-121 (1981)
- 10) Chou, B. R.:“Solar Filter Safety”, Sky&Tel., February, 36-40 (1998)
- 11) Chou, B. R.: “Observing the Eclipse - Eye Safety and Solar Eclipses”. <http://umbra.nascom.nasa.gov/eclipse/010621/text/eye-safety.html>
- 12) Chou, B. R.: “Solar Filters Time for an International Standard”. <http://www.mreclipse.com/Special/filters.html>
- 13) 松尾厚, 安藤享平, 大川拓也, 大西浩次, 小野智子, 齋藤泉, 篠原秀雄, 高橋淳:“日食を安全に観察するため～遮光フィルタの規格など～”, 天文教育, 3月号, 11-14 (2012)
- 14) 消費者庁:“日食観察グラスの使用についての注意喚起 (製品の確認結果)”, (2012) http://www.caa.go.jp/safety/pdf/120518kouhyou_2_1.pdf
- 15) 齋藤泉, 安藤享平, 大川拓也, 大西浩次, 小野智子, 篠原秀雄, 高橋淳, 松尾厚: “日食の安全な観察推進 WG について”, 第26回天文教育研究会集録, 92-97(2012)
- 16) 齋藤泉, 大西浩次, 大川拓也, 篠原秀雄, 松尾厚, 安藤享平, 小野智子, 高橋淳, 海部宣男, 飯塚礼子, 大越治, 阪本成一, 佐藤幹哉, 塩田和生, 塚田健, 船越浩海, 洞口俊博, 三島和久,

森友和, 山田陽志郎:

“日食観察グラスの安全性について”, 日本天文学会 2012 年秋季年会予稿集, Y24a, 317(2012)

- 17) 齋藤泉, 安藤享平, 大川拓也, 大西浩次, 小野智子, 篠原秀雄, 高橋淳, 松尾厚:

“日食を安全に観察するため～透過率測定の間
間報告～”, 天文教育, 3月号, 15-19 (2012)

- 18) 齋藤泉, 安藤享平, 大川拓也, 大西浩次, 小野智子, 篠原秀雄, 高橋淳, 松尾厚:

“太陽観察における代用品の透過率測定結果つ
いて (中間報告 1)”, (2012)

<http://tenkyo.net/iva/eclipse/glass2.pdf>

- 19) 齋藤泉, 安藤享平, 大川拓也, 大西浩次, 小野

智子, 篠原秀雄, 高橋淳, 松尾厚:

“太陽観察における代用品の透過率測定結果つ
いて (中間報告 2)”, (2012)

<http://tenkyo.net/iva/eclipse/glass3.pdf>

- 20) 齋藤泉, 安藤享平, 大川拓也, 大西浩次, 小野智子, 篠原秀雄, 高橋淳, 松尾厚, 奥野勉:

“日食の安全な観察を目指して～日食の安全な
観察推進WGの活動～”, 天文教育, 7月号,
22-29 (2013)

- 21) 縣秀彦: “金環日食(2012年5月21日)への取り
組みとその成果についての考察”,
日本サイエンスコミュニケーション協会誌
Vol.1 No.1, 68-75 (2012)