



ISSN 1349-1113
JAXA-RR-15-005

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

Hayabusa2分離カメラ用硝材のガンマ線照射試験
Gamma-ray Irradiation Test of Optical Glasses for Hayabusa2/DCAM3-D

2016年2月

March 2016

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

Hayabusa2 分離カメラ用硝材のガンマ線照射試験

石橋 高^{*1}, 小川 和律^{*2}, 白井 慶^{*3}, 和田 浩二^{*1}, 池田 優二^{*4}, 本田 理恵^{*5}, 荒川 政彦^{*2}

Gamma-ray Irradiation Test of Optical Glasses for Hayabusa2/DCAM3-D

Ko Ishibashi^{*1}, Kazunori Ogawa^{*2}, Kei Shirai^{*3}, Koji Wada^{*1}, Yuji Ikeda^{*4}, Rie Honda^{*5},
and Masahiko Arakawa^{*2}

Abstract

Japan's asteroid probe Hayabusa2 equips Deployable Camera 3 (DCAM3) that will observe an impact experiment using Small Carry-on Impactor (SCI) on asteroid 162137 Ryugu (1999 JU3). DCAM3 has two cameras, DCAM3-A (a monitor camera) and DCAM3-D (a scientific camera). DCAM3-D, especially, aims to understand impact phenomena on asteroids through observing the trajectory of SCI and the shape of the ejecta curtain created by the impact. The imaging performance of DCAM3-D might degrade by coloring of the lenses that is due to the radiation of up to 11 krad for a 1-mm aluminum shielding during the 6.5-years cruise of Hayabusa2. Since the two lens materials Ohara Inc. S-TIH6 and S-BAM12 among the five lens materials for the DCAM3-D optics have no data of the optical transmission dependence on the radiation total dose, we conducted gamma-ray irradiation tests for them. Samples were irradiated up to 10 krad. The relative reduction of transmission between 450 to 750 nm that are the wavelength range for DCAM3-D was maximum at 450 nm and less than 3.7% for S-TIH6 and 5.5% for S-BAM12. The reduction is getting less at longer wavelength. These transmission performances were recovered modestly with the time after irradiation. The degradation of the received signal determined by weighted integration with the solar spectrum and the spectral response of the CMOS sensor used in DCAM3-D is 10.4%, which satisfies the allowable degradation of 20% that is required for the observation of SCI with S/N > 5. These results indicate that S-TIH6 and S-BAM12 are applicable for the optical system of DCAM3-D.

Keywords: Hayabusa2, Deployable Camera 3, optical glass, gamma-ray irradiation test

概要

小惑星探査機 Hayabusa2 には弾丸射出装置 (SCI) による小惑星 162137 Ryugu (1999 JU3)への衝突実験を観測するための分離カメラ DCAM3 (Deployable Camera 3) が搭載されている。DCAM3 にはリアルタイムモニタカメラ (アナログ系) の DCAM3-A と理学観測用高解像度カメラ (デジタル系) の DCAM3-D が内蔵され、中でも DCAM3-D は弾丸射出装置の軌跡や小天体上での弾丸衝突に伴い形成されるイジェクタカーテンの形状を高精細画像から取得し、小天体上での衝突現象を明らかにすることを目的としている。DCAM3-D は 6.5 年のミッション期間に最大 11 krad (アルミニウム 1 mm 遮蔽の場合) の放射線暴

* 平成27年12月15日受付 (Received December 15, 2015)

*¹ 千葉工業大学 (Chiba Institute of Technology)

*² 神戸大学 (Kobe University)

*³ 総合研究大学院大学 (The Graduate University for Advanced Studies)

*⁴ フォトコーディング (Photocoding)

*⁵ 高知大学 (Kochi University)

露を受けるが、放射線によるレンズの着色によって性能劣化がおこる可能性がある。光学系に使用している5硝種のうちの2硝種（オハラ社 S-TIH6, S-BAM12）については、放射線トータルドーズ量に対する透過率劣化のデータが無かったため、これを確認する試験を行った。厚さ5 mmの硝材に最大10 kradまでのガンマ線を照射し、透過率を測定したところ、DCAM3-Dの仕様波長範囲（450–750 nm）における照射2日後の透過率の相対減少量は450 nmで最大となり、S-TIH6で3.7%以下、S-BAM12で5.5%以下であった。また、照射後は時間の経過に伴い透過率に多少の回復が見られた。この結果に対し、太陽光スペクトルとDCAM3-Dに用いられているCMOSセンサの分光感度で観測波長範囲に渡って重み付けして求めた光学系全体での観測シグナルの減少率は10.4%であった。これは、観測対象のうち最も暗い弾丸射出装置を $S/N > 5$ で観測するために必要な許容減少量である20%以下を満たす。これらの結果より、S-TIH6とS-BAM12をDCAM3-D光学系に使用可能であることが確認された。

1 背景

日本の小惑星探査 Hayabusa2 では、弾丸射出装置 SCI (Small Carry-on Impactor) ^{1),2)} を用いて小惑星 Ryugu 上に人工的な衝突現象を起こし、そこで発生する放出物 (イジェクタ) の様子を可視光撮像することを計画している ³⁾⁻⁵⁾。衝突実験の際に発生する SCI の残骸や衝突イジェクタが探査機と接触することを避けるために、衝突イベントの撮像は探査機本体から分離された小型カメラ (DCAM3) によって行なう ⁶⁾。図1に Hayabusa2 において想定される DCAM3 による観測イメージを示す。

DCAM3 (Deployable Camera 3) は小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS (Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation of the Sun) ⁷⁾ において衛星から分離されて撮像とデータ通信を行ったカメラ DCAM1, DCAM2 の後継機である。DCAM3 は、従来のリアルタイムモニタカメラ (DCAM3-A, アナログ CMOS カメラ, NTSC 形式) に加えて新たに理学観測用高解像度カメラ (DCAM3-D, デジタル CMOS カメラ) を内蔵しており、約1 km 遠方から衝突の様子を連続撮像し、結果を探査機本体に無線通信で送信する ^{8),9)}。図2に DCAM3 の全体図を示す。このうち DCAM3-D は観測波長域 450–750 nm で最大1 fps のモノクロ

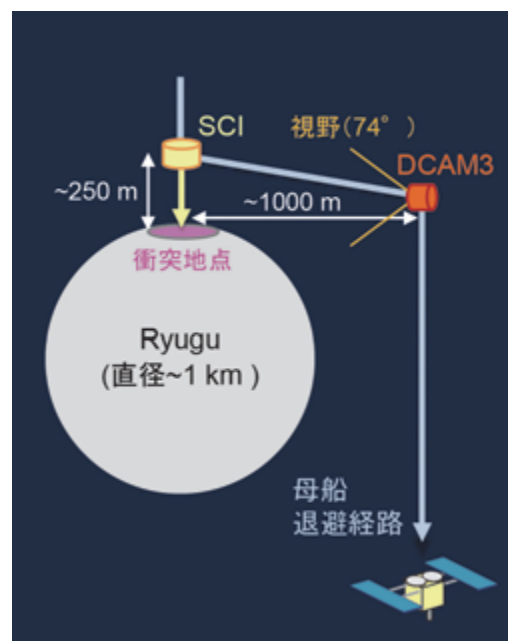


図1. DCAM3 の観測条件. DCAM3 は回避途中の母船から分離され、衝突地点から約1000 mの地点から衝突イベントを観測する。



図2. DCAM3 の全体図。

撮像を行い、小惑星上空に浮かぶ小さな SCI 本体（直径約 300 mm, 高さ約 220 mm の円筒）、衝突時の小惑星表面、飛散するイジェクタを同視野内に入れて高い空間分解能で撮影するため、視野角 74°以上, F 値 1.7 以下, 検出器 2 pixel × 2 pixel 内での ensquared energy が 50%以上と, 広視野でかつ明るく, 高空間分解能の結像透過光学系を有することが特徴である^{8),10)}。

図3に DCAM3-D の光学系レイアウト図を示す。各硝材は独立しており, 貼り合わせた硝材は用いていない。一般に, カメラのレンズに用いられる光学硝材は放射線の照射によって着色し, 透過率が低下することが知られている¹¹⁾。これはガラス中の分子配列の欠陥部分に, 放射線照射により生じた電離電子や正孔が捕獲されるためであり, これらが光を吸収するために主に短波長域の透過率の顕著な低下が生じる。従って, とりわけ宇宙環境で用いる場合は, 使用する硝材の放射線耐性を明らかにしておくことが必須である。DCAM3-D の光学系 (図3) を構成する 8 枚のレンズのうち 4 枚で使用されている 2 種類の硝材 (オハラ社製 S-TIH6 と S-BAM12) についてはこれまでに放射線耐性の報告例が無かったため, 今回新たにガンマ線照射試験を実施して透過率の劣化を評価した。なお, 軌道上で予想される放射線は高エネルギー太陽プロトンが支配的だが, 硝材の透過率変化の影響はプロトンとガンマ線で, 少なくとも可視波長域においては等価であるとの報告がある

ため¹³⁾, 本試験ではより簡便に試験が可能なガンマ線を用いた。

2 要求条件

DCAM3-D の観測対象のうち, 最も暗いものは SCI であり, SCI を $S/N > 5$ で観測する事が DCAM3-D による理学観測の必須条件である。太陽からの距離 1.4AU において SCI の反射率を 50% (SCI に貼られているベータクロスの反射率) と仮定して太陽光の反射光強度を推定したところ, 放射線による DCAM3-D 光学系の透過率劣化が起こらなければ, $S/N = 6.5$ で観測されると見積もられた⁴⁾。なお, 1.4 AU は衝突実験が行われる可能性のある太陽からの最遠距離 (ノミナルは 1.2-1.35 AU), SCI の反射率 50% は想定される最悪値である。したがって, 光学系全体での観測シグナルの減少率が 20% 以下であれば, $S/N > 5$ を満たし, DCAM3-D による理学目的を達成できる。そこで, 本試験の結果と既存の硝材放射線試験データ¹¹⁾ を用いて, 放射線照射時の光学系全体の観測シグナル低下率の評価を行い, この条件を満たすかどうかの確認を行った。なおこのミニマム条件で衝突放出物 (イジェクタ) は $S/N > 10$ で観測され, イジェクタの形状をとらえるという観測要求を満たすと予想される (ただし, 撮像パラメータは SCI 撮像の場合と異なる)。

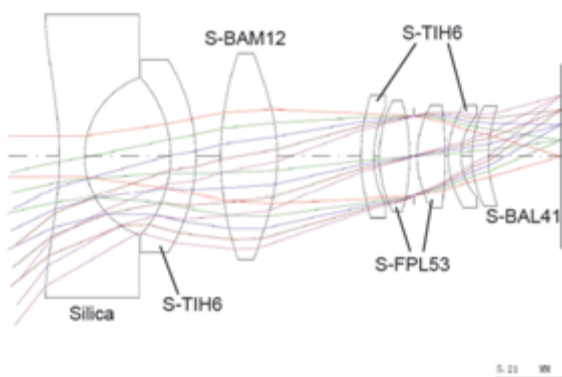


図3. DCAM3-D の光学系レイアウト図。

3 試験内容

表1に DCAM3-D 光学系に含まれる用いる硝材のこれまでの放射線照射実験による透過率減少値を示す。ここでは過去に放射線試験実績の無い 2 種類の硝材であるオハラ社 S-TIH6 と S-BAM12 を各 4 枚ずつ準備した。寸法はいずれも $\phi 25.4 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ である。

表 1. DCAM3-D 光学系に含まれる硝材の放射線照射実績.

硝材	照射量, 試験
Silica	ガンマ線, 1000 krad (西野ほか 1989) など
S-TIH6 (オハラ社)	実績無し
S-BAM12 (オハラ社)	実績無し
S-FPL53 (オハラ社)	ガンマ線, 1000 krad (西野ほか 1989) など
S-BAL41 (オハラ社)	ガンマ線, 1000 krad (西野ほか 1989) など

ガンマ線照射は, 日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所のコバルト 60 照射施設にて行った. Hayabusa2 ミッション期間 6.5 年間の軌道上におけるトータルドーズは, アルミニウム管体による遮蔽の換算値として遮蔽厚ごとに基準が定義されている¹²⁾. 対象硝材の遮蔽は全方位中で鏡筒開口部中心が最も薄く, S-TIH6 は 2 mm (Silica), S-BAM12 では 4 mm (Silica + S-TIH6) である (図 3). 最悪条件として, 対象硝材がこの最薄部の厚みによって球殻遮蔽されると仮定し, 上記遮蔽材のアルミニウムとの放射線透過率の違いを考慮した上でトータルドーズを算出すると, S-TIH6 では 6.6 krad 以下, S-BAM12 では 3.0 krad 以下となる. そこで, それぞれの硝材に 2, 4, 10 krad の照射を行った. 照射量は, 試験当日のコバルト 60 線源の線量率補正值を元に, 線源から各硝材までの距離で調整した. ガンマ線照射後の硝材は, 常に室温の暗所で保管した.

硝材の透過率測定は, ガンマ線照射の 2, 8, 30, 90, 380 日後に行った. 2 日後の測定は, 京都産業大学神山天文台の紫外可視近赤外分光光度計 V-670 (Jasco) を用いて行った. それ以降の測定は, 国立天文台先端技術センターの紫外可視分光光度計 Solid Spec-3700 UV-VIS (島津製作所) を用いて行った. いずれの場合も, 波長範囲 300-1100 nm, サンプリング波長間隔 0.5 mm で測定を行った. 同一測定日における測定精度は約 0.2% である.

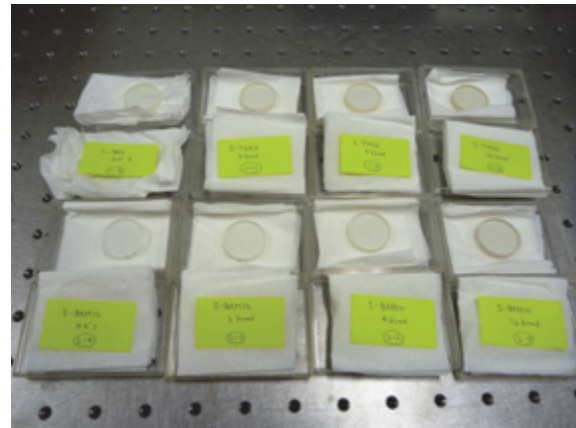


図 4. ガンマ線照射 2 日後の硝材. 上段が S-TIH6, 下段が S-BAM12. 左から照射量 0 krad (未照射), 2 krad, 4 krad, 10 krad.

4 結果

照射 2 日後のサンプルの写真を図 4 に示す. 未照射のものに比べて照射量が増加するほど茶色く変色していることがわかる.

測定されたサンプルの透過率を図 5 および図 6 に示す. それぞれの硝材 S-TIH6 (図 5) と S-BAM12 (図 6) について, ガンマ線照射後 2, 8, 30, 90, 380 日後の透過率を示してある. 各グラフでは, 未照射 (0 krad) および照射量 2, 4, 10 krad の透過率を重ねて描いている. 両硝材とも, およそ 400nm 以下で透過率は急激に減少している. ガンマ線を照射すると, 両硝材とも短波長側 (400-500nm 付近) で透過率の減少が起きているが, 長波長側ではあまり減少してないことがわかる.

ここで, 本来ならば同じ値となるはずのガンマ線未照射試料の測定結果も, 多少ばらついていることが確認された. これは, 2 日後の測定は残りの日とは異なる透過率測定装置で測定を行ったこと, または 8-380 日後は同じ測定装置でも測定日が異なることなどが影響しているのかもしれない. そこで, 以下では 2 日後の未照射試料の測定値で規格化した透過率を用いて議論することにする. すなわち, 8 日後以降のデータの未照射試料の透過率が, 2 日後の未照射試料の透過率と同じになるように, データ全体のスケールングを行う.

S-TIH6 と S-BAM12 の波長ごとのガンマ線照射量依存性を、未照射試料に対する相対透過率（未照射試料の透過率を 100%とする）で、それぞれ図 7 および図 8 に示した。それぞれガンマ線照射後 2, 8, 30, 90, 380 日後の結果を示してある。DCAM3-D の波長域 450–750 nm のうち、450, 500, 550, 600, 650, 700, 750 nm を選択してプロットした。S-TIH6（図 7）と S-BAM12（図 8）のどちらの硝材にお

いても、照射後の日数によらず、照射量が 0-10krad の範囲においては照射量にほぼ比例して透過率が劣化していることがわかる。ただし、S-TIH6 の照射 2 日後の測定において、照射量 4 krad の硝材の測定は他の照射量の硝材の測定結果の傾向から外れており、この測定に関しては何らかの不備があった可能性がある。なお、10 krad までのガンマ線照射では、照射 2 日後の相対透過率の減少は、

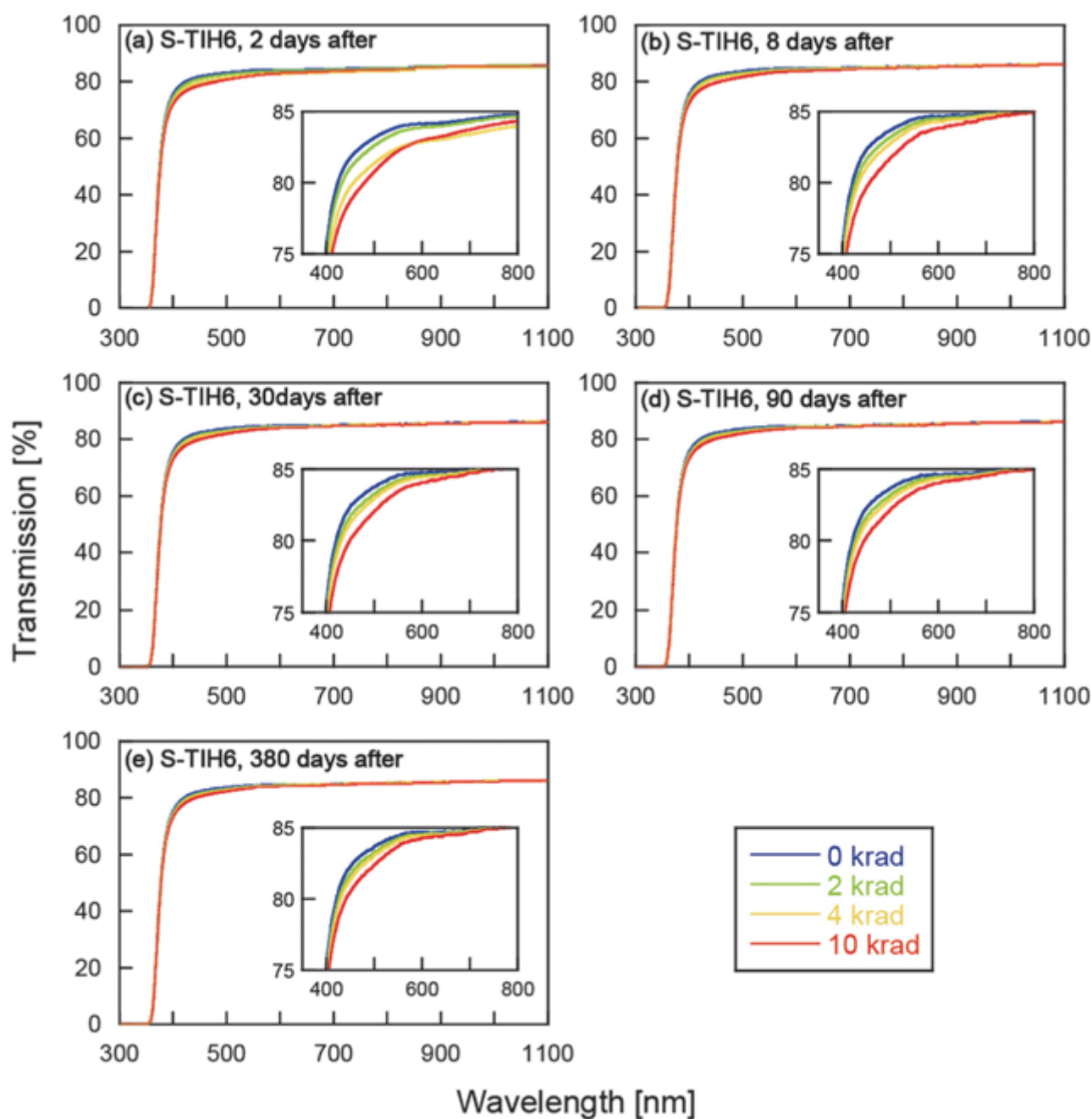


図 5. S-TIH6 の透過率（反射損失を含む）。(a)から(e)の順に、ガンマ線照射後 2, 8, 30, 90, 380 日後の結果。各パネルには、ガンマ線照射量 0, 2, 4, 10 krad の結果を重ねて描いている。

DCAM3-D の観測波長範囲 450–750 nm においては 450 nm で最大となり, S-TIH6 で 3.7%以下, S-MAB 12 で 5.5%以下であることがわかる. さらに, 長波長ほど透過率の減少量は少なくなり, 例えば 600 nm 以上の波長での相対透過率の減少は, S-TIH6 で 1.4%以下, S-MAB 12 で 2.8%以下, さらに 750 nm では, S-TIH6 で 0.7%以下, S-MAB 12 で 1.1%以下である.

ここで, 反射損失を考慮して各硝材の波長ごとの吸収係数を求めておく. 透過率測定試験において測定されるのは硝材の裏表両面での反射損失を含む透過率で,

$$T(\lambda, x) = (1 - R(\lambda))^2 \exp(-\alpha x) \quad (1)$$

で表される. ここで, λ は波長, x は硝材の厚さ, α は吸収係数である. $R(\lambda)$ は表面における反射率で, 硝材の屈折率 $n(\lambda)$ を用いて,

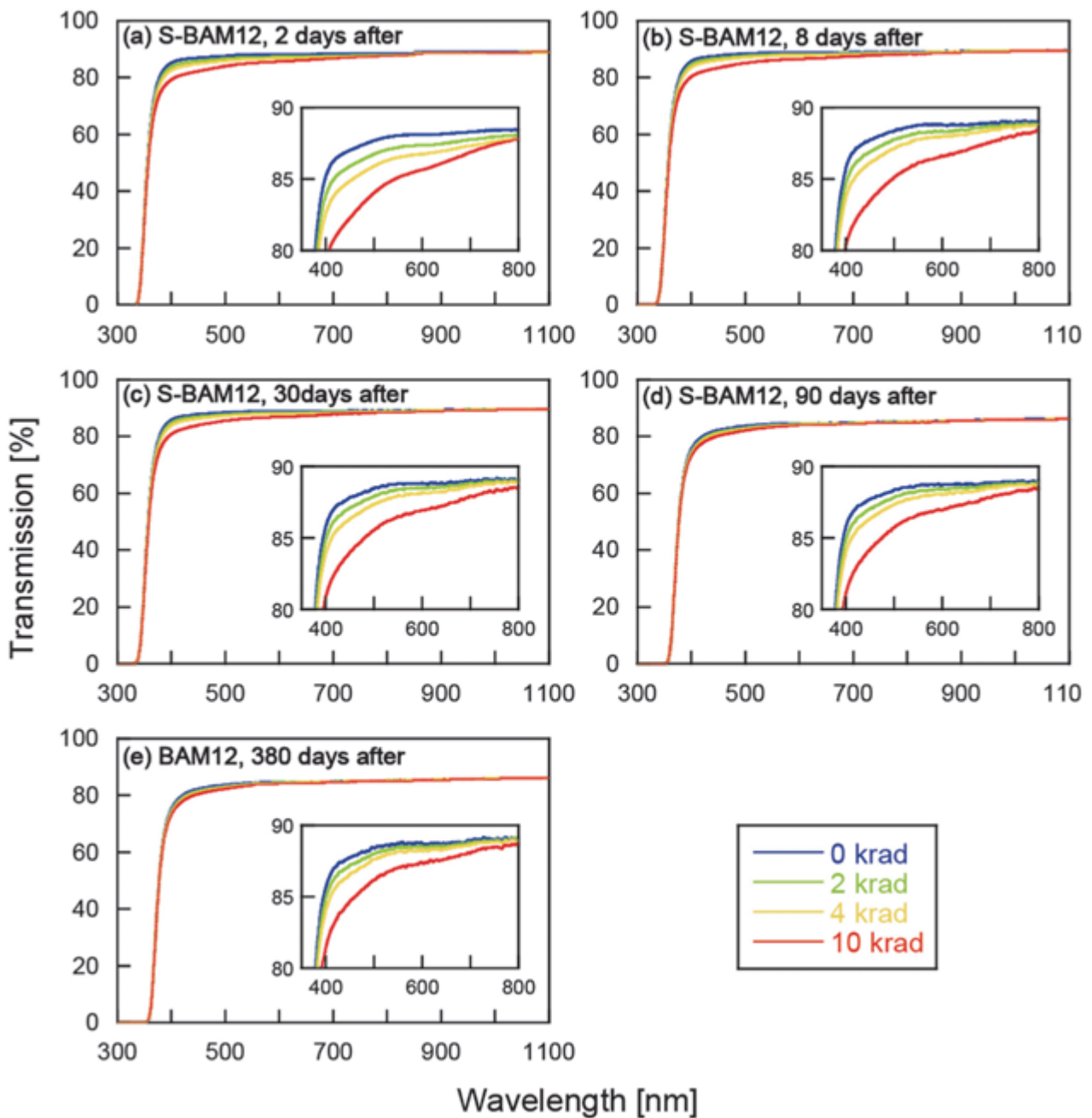


図 6. S-BAM12 の透過率 (反射損失を含む). (a)から(e)の順に, ガンマ線照射後 2, 8, 30, 90, 380 日後の結果. 各パネルには, ガンマ線照射量 0, 2, 4, 10 krad の結果を重ねて描いている.

$$R(\lambda) = \left(\frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda) + 1} \right)^2 \quad (2)$$

である. 未照射試料の平均透過率と式 (1) より求めた, 各硝材の波長 450-750 nm における 50 nm 刻みの吸収係数を表 2 に示す.

次に, ガンマ線照射後の透過率の時間変化につ

いて考える. 一般的に, ガラスへの放射線照射後, 時間の経過に伴い透過率がある程度まで回復するアニーリング効果が知られている. 透過率の回復には, 数日のタイムスケールの短期的回復と, 数十から数百日のタイムスケールの長期的回復の 2 つのモードがある¹⁴⁾. 放射線照射により正孔と電

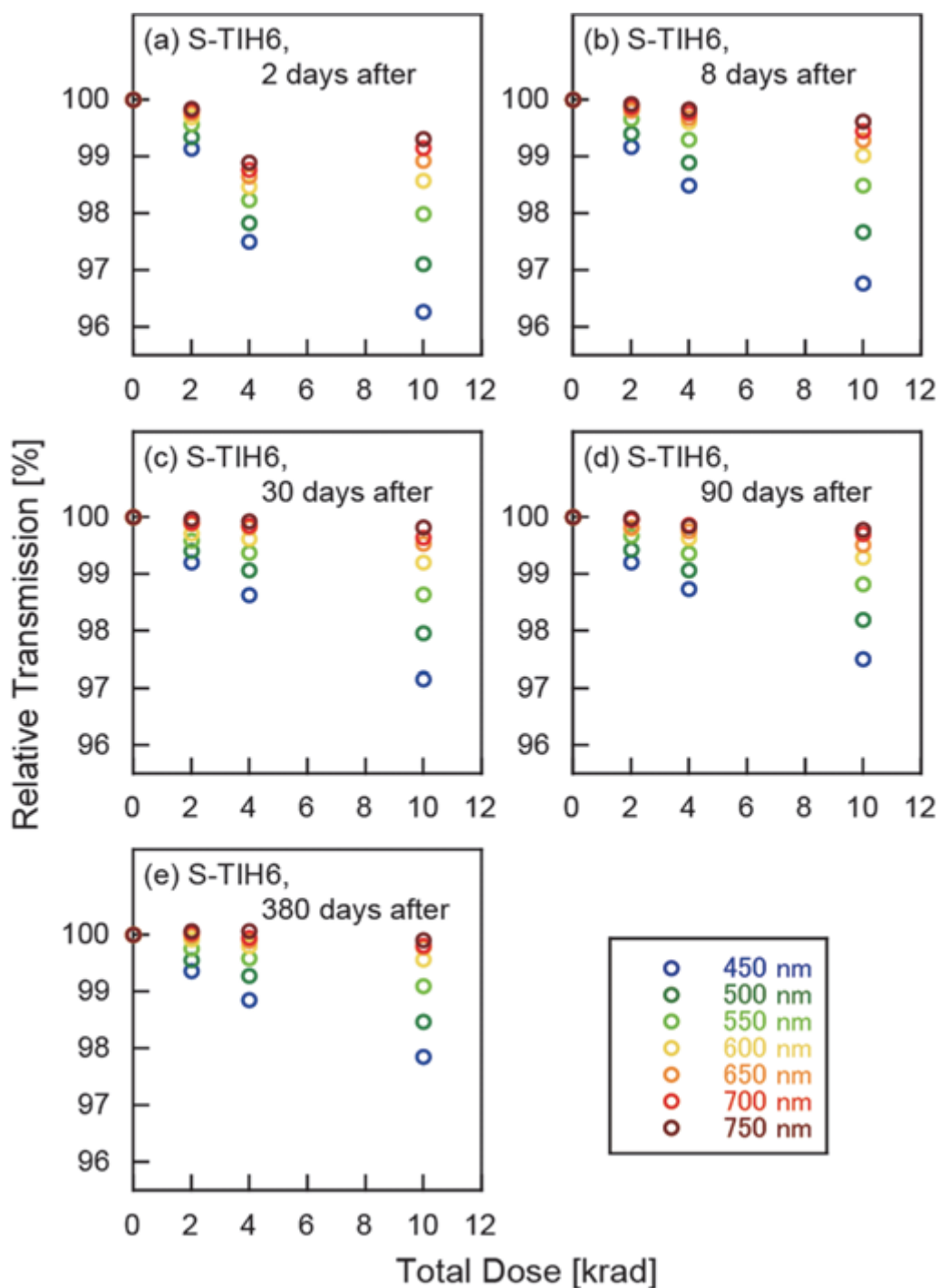


図 7. S-TIH6 の透過率のガンマ線照射量依存性. (a)から(e)の順に, ガンマ線照射後 2, 8, 30, 90, 380 日後の結果. 450-750 nm について 50 nm ごとに, 未照射硝材の値に対する相対透過率をプロットしている.

子のペアが生じるが、放射線照射終了後にこれらが反応して消滅する。短期的回復は主に正孔同士の反応や正孔と電子の反応、長期的回復は正孔と電子の反応によると考えられている¹⁵⁾。透過率は時間の経過に伴い一定値に収束する¹⁶⁾。先行研究において透過率の時間変化の解析には吸収係数が

用いられているため¹⁴⁾⁻¹⁸⁾、本論文においても吸収係数を用いて議論する。図 9a および図 9b にそれぞれ S-TIH6 と S-MAB 12 の吸収係数のガンマ線照射後の時間変化をプロットした。ここでは、DCAM3-D の波長範囲 450–750 nm のうち、最も透過率の変化が大きかった 450 nm のデータを用い

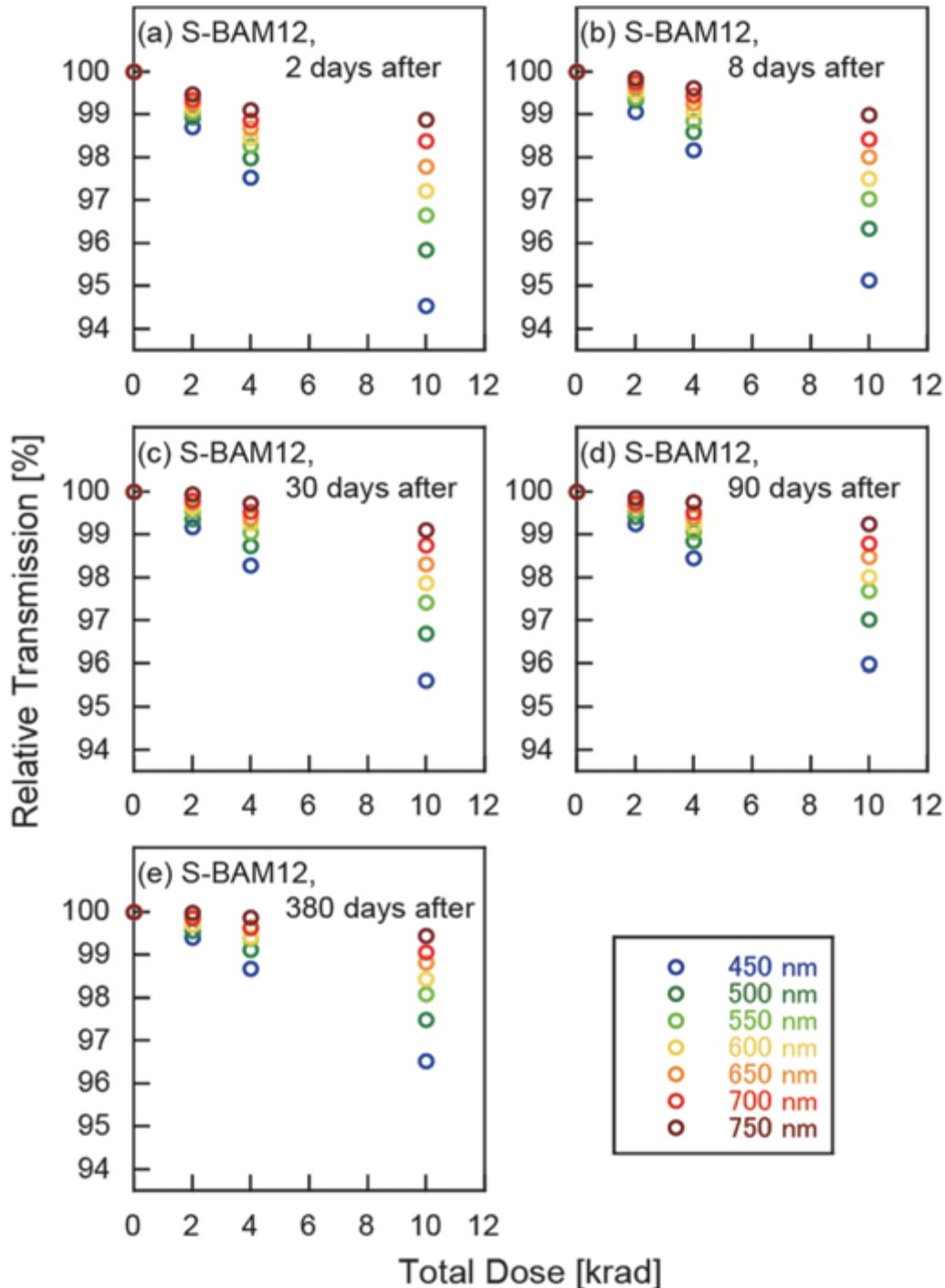


図 8. S-BAM12 の透過率のガンマ線照射量依存性. (a)から(e)の順に、ガンマ線照射後 2, 8, 30, 90, 380 日後の結果. 450–750 nm について 50 nm ごとに、未照射硝材の値に対する相対透過率をプロットしている。

表 2. 吸収係数 (cm^{-1}).

S-TIH6, 2 日後					S-BAM12, 2 日後				
λ [nm]	0 krad	2 krad	4 krad	10 krad	λ [nm]	0 krad	2 krad	4 krad	10 krad
450	0.036	0.053	0.087	0.112	450	0.027	0.053	0.077	0.140
500	0.013	0.026	0.057	0.072	500	0.017	0.038	0.057	0.101
550	0.003	0.012	0.038	0.044	550	0.011	0.030	0.046	0.079
600	0.002	0.009	0.033	0.031	600	0.012	0.029	0.043	0.068
650	0.005	0.009	0.032	0.026	650	0.012	0.027	0.039	0.057
700	0.003	0.007	0.027	0.02	700	0.011	0.024	0.033	0.043
750	0	0.003	0.022	0.014	750	0.009	0.020	0.027	0.032
S-TIH6, 30 日後					S-BAM12, 30 日後				
λ [nm]	0 krad	2 krad	4 krad	10 krad	λ [nm]	0 krad	2 krad	4 krad	10 krad
450	0.036	0.052	0.064	0.094	450	0.027	0.044	0.062	0.117
500	0.013	0.025	0.032	0.055	500	0.017	0.029	0.042	0.084
550	0.003	0.011	0.015	0.030	550	0.011	0.020	0.030	0.064
600	0.002	0.008	0.010	0.018	600	0.012	0.019	0.027	0.055
650	0.005	0.007	0.008	0.014	650	0.012	0.018	0.025	0.046
700	0.003	0.005	0.006	0.010	700	0.011	0.015	0.020	0.036
750	0.000	0.001	0.001	0.004	750	0.009	0.011	0.015	0.027
S-TIH6, 90 日後					S-BAM12, 90 日後				
λ [nm]	0 krad	2 krad	4 krad	10 krad	λ [nm]	0 krad	2 krad	4 krad	10 krad
450	0.036	0.052	0.061	0.087	450	0.027	0.042	0.058	0.109
500	0.013	0.025	0.032	0.050	500	0.017	0.028	0.040	0.077
550	0.003	0.009	0.016	0.026	550	0.011	0.020	0.030	0.058
600	0.002	0.006	0.010	0.017	600	0.012	0.018	0.027	0.052
650	0.005	0.009	0.010	0.015	650	0.012	0.019	0.024	0.043
700	0.003	0.004	0.006	0.009	700	0.011	0.016	0.020	0.035
750	0.000	0.001	0.003	0.004	750	0.009	0.012	0.014	0.024
S-TIH6, 380 日後					S-BAM12, 380 日後				
λ [nm]	0 krad	2 krad	4 krad	10 krad	λ [nm]	0 krad	2 krad	4 krad	10 krad
450	0.036	0.049	0.059	0.080	450	0.027	0.039	0.054	0.098
500	0.013	0.022	0.028	0.044	500	0.017	0.025	0.034	0.067
550	0.003	0.008	0.011	0.021	550	0.011	0.017	0.024	0.050
600	0.002	0.004	0.007	0.011	600	0.012	0.018	0.023	0.043
650	0.005	0.005	0.007	0.009	650	0.012	0.015	0.019	0.036
700	0.003	0.002	0.004	0.006	700	0.011	0.014	0.018	0.030
750	0.000	0.000	0.000	0.002	750	0.009	0.009	0.012	0.020

ている. S-TIH6 の 4 krad 照射の 2 日後のデータ点 (図 9a) が, 他のデータ点の傾向から大きく外れているのは, 前述の通り, S-TIH6 の 2 日後の 4 krad 照射試料の測定になんらかの不備があったためだと考えられる.

ガンマ線照射後の透過率の時間変化の傾向を定量的につかむために, 得られた図のフィッティン

グを行った. 本試験では, 短期的回復が起こったと考えられる照射後数日の期間内では 2 日後にしか測定を行わなかったため, 短期的回復についての議論を行うことは難しい. したがって, 8 日目以降のデータを用いて長期的回復のみを考慮することにした. 短期的回復は, 2 次反応, 長期的回復は 1 次反応であると言われている¹⁵⁾. 本実験の

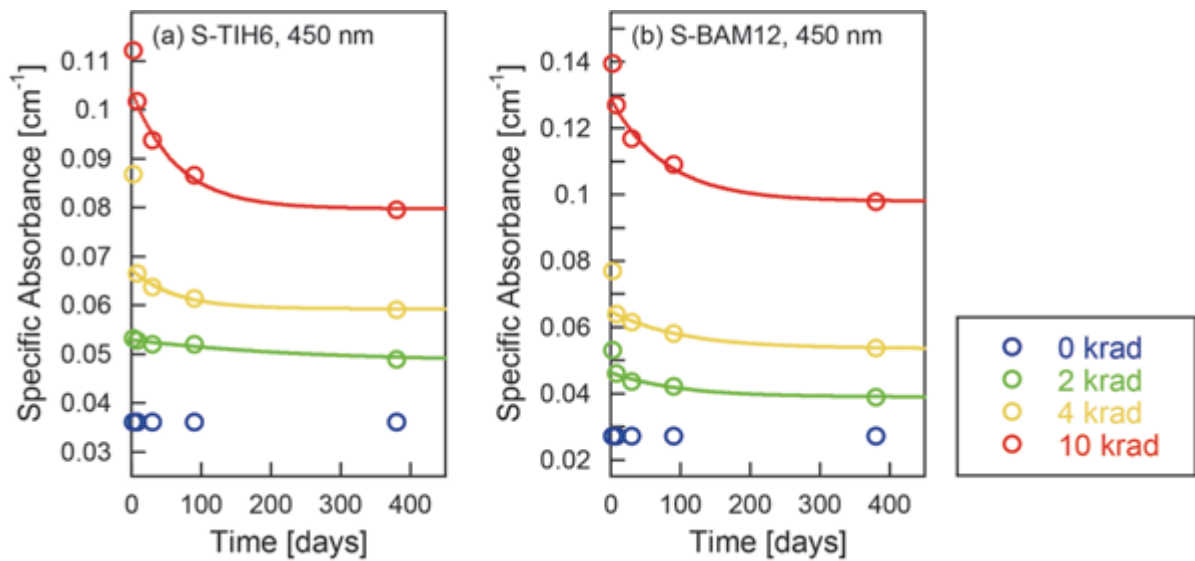


図9. (a) S-TIH6 および(b) S-BAM12 のガンマ線照射後の透過率の回復. 変化の大きい450 nmでの透過率をプロットしている. フィッティングは8, 30, 90, 380日後のデータに対して行った.

結果は1次反応速度式,

$$\alpha(t) = \alpha_{\infty} + A \exp(-kt) \quad (3)$$

でうまくフィッティングできる (図 9a および図 9b). ここで, α_{∞} と A は係数, k は速度定数である. 照射後長時間経過後には吸収係数は一定値 α_{∞} に回復する. 回復後の吸収係数 α_{∞} , それを5 mmの硝材における透過率に戻したものを, 相対的透過率減少量 (未照射試料に対する相対値), および回復の半減期を表3にまとめた. 吸収係数の回

復のタイムスケールは, S-TIH6では40–90日程度, S-BAM12では55–70日程度である. 照射量が多いほど回復後の相対的透過率は大きく減少するが, 照射量が10 krad以下の場合, 厚さ5 mmの硝材の450 nmにおける相対的透過率減少量は, 常温において最終的にS-TIH6では照射2日後の3.7%以下から2.2%以下へ, S-MAB 12では5.5%以下から3.5%以下へと回復する.

表3. 450 nmにおける透過率の回復.

	トータル ドーズ (krad)	回復後の 吸収係数 (cm ⁻¹) *1	回復後の 透過率 (%) *2	相対的透過 率減少量 (%) *3	透過率回復 の半減期 (日) *4
S-TIH6	0	0.036	82.7	0.0	-
	2	0.049	82.2	0.6	88
	4	0.059	81.7	1.1	43
	10	0.080	80.9	2.2	45
S-BAM12	0	0.027	87.4	0.0	-
	2	0.039	86.9	0.6	66
	4	0.054	86.3	1.3	70
	10	0.098	84.4	3.5	54

*1 α_{∞} .

*2 α_{∞} を5 mmの硝材における透過率に戻したものの.

*3 回復後の透過率から求めた, 未照射試料に対する相対透過率の減少量.

*4 $\ln 2/k$.

5 議論

厚さ 5 mm の硝材へのガンマ線照射の、未照射時に対する 2 日後の相対的透過率減少量は、DCAM3-D の波長範囲である 450–750 nm においては 450 nm で最大となり、トータルドーズ 10 krad 以下では、前述のとおり S-TIH6 では 3.7%、S-MAB 12 では 5.5% であり、長波長ほどその減少量は少ない。(図 7 および図 8)。

以下では、実際の DCAM3-D 光学系としての透過率について考える。S-TIH6 と S-BAM12 については今回の試験で得られたデータを、その他の硝材については既存放射線試験のデータを使用して、放射線照射による光学系全体の透過率の劣化について議論する。なお、silica は、放射線照射による透過率の劣化は起こらないことが知られているため¹¹⁾、以下の透過率劣化の議論では省略する。

DCAM3-D に用いられている各硝材の最大光路長は、S-TIH6、S-BAM12、S-FPL53、S-BAL41 に対してそれぞれ約 5 mm、2.4 mm、4.8 mm、1.5 mm であり、含まれる反射面数はそれぞれ 6、2、4、2 である(図 3)。放射線照射量は、どの硝材に対しても敢えて過剰見積もりとなる 10 krad と仮定する。S-TIH6 と S-BAM12 の該当厚さにおける透過率は、本試験でガンマ線照射後 2 日に測定した厚さ 5 mm の硝材の測定値を用いて計算した。厚さ 5 mm の硝材(反射面数 2)の反射損失を含む透過率を $T_{5\text{mm}}$ とすると、総光路長 d mm の硝材(反射面数 n)の反射損失を含む透過率 T_d は、

$$T_d(\lambda, d) = (1 - R(\lambda))^n \times \left\{ \frac{T_{5\text{mm}}}{(1 - R(\lambda))^2} \right\}^{\frac{d}{5[\text{mm}]}} \quad (4)$$

となる。

西野ほか(1998)¹¹⁾のデータから求めた厚さ 5 mm の硝材 S-FPL53 と S-BAL41 のガンマ線 10 krad 照射時の透過率を、表 4 にまとめた。DCAM3-D 光学系全体の透過率変化は、これらを用いて計算した、DCAM3-D 光学系全体の 10 krad の放射線照

射時の未照射時に対する相対透過率の波長依存性を図 10 に示す。(西野ほかでは、測定は 300–1000 nm で行っているが、数値としては 350–700 nm の間の 50 nm 刻みのデータしか載せられていない。そこで、750 nm に関しては 700 nm での値と同じとした。長波長ほど透過率は高くなる傾向にあるので、これは透過率の過少見積もりをすることに

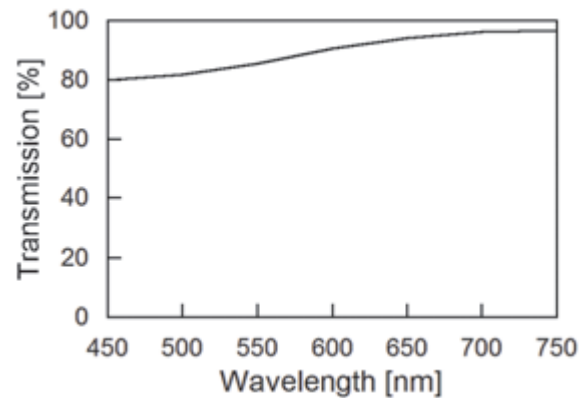


図 10. DCAM3-D 光学系全体での、放射線未照射時に対する 10 krad 照射時の相対透過率の波長依存性。

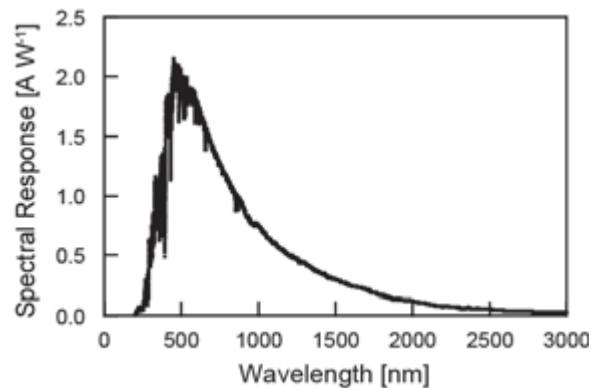


図 11. 太陽光スペクトル。

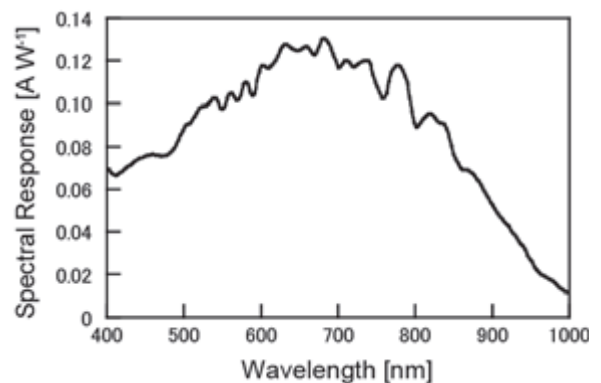


図 12. CMOS の感度特性。

表 4. 厚さ 5 mm の硝材 S-BAL41 と S-FPL53 のガンマ線照射前後での透過率 (%) *.

λ [nm]	S-BAL41		S-FPL53	
	0 krad	10 krad	0 krad	10 krad
350	87.26	75.16	90.84	80.58
400	89.80	81.68	92.63	80.69
450	90.11	84.34	92.69	80.33
500	90.34	85.51	92.92	80.80
550	90.43	86.16	93.26	83.70
600	90.49	86.48	93.39	88.15
650	90.43	86.84	93.52	90.98
700	90.54	87.89	93.53	92.30

*西野ほか (1989)¹¹⁾ のデータを用いて算出.

なり, つまりシビアな評価をすることになる.)

次に, 太陽光スペクトル (図 11) と DCAM3-D に用いられている CMOS の分光感度 (図 12) を考慮した重み付けをしてから波長積分することで, 該当厚さおよび境界面数を持つ各硝材の実効的な透過率を求める. なお, SCI に貼られているベータクロスおよび C 型小惑星の可視波長域における反射率はほぼ一定なので, それらによる反射光のスペクトル形状は太陽光スペクトルと同一であると仮定している. 観測波長範囲 450–750 nm における各硝材 S-TIH6, S-BAM12, S-FPL53, S-BAL41 の透過率は, 未照射の場合はそれぞれ 59.3%, 88.3%, 87.3%, 90.4%, 10 krad 照射の場合はそれぞれ 58.3%, 87.0%, 81.7%, 89.2%となる. したがって, 光量の減少率は, S-TIH6 が 1.8%, S-BAM12 が 1.4%, S-FPL53 が 6.5%, S-BAL41 が 1.3%となり, 光学系全体での観測シグナルの減少率は, 10.4%となる. これは, 背景で述べた, 光学系全体での観測シグナルの許容減少量である 20%以下を十分に満たす. (なお, 上記の議論では反射防止膜は考慮せずに反射損失を計算しているが, 実際の DCAM3-D 光学系の各レンズには反射防止膜が実装されており, 透過率の絶対値はそれぞれ上記のものよりも高い値となる. 反射防止膜には, 宇宙実績があり, これまでに透過率低下が報告されていないものを用いている.)

また, 図 9a および図 9b で見たように, 透過率は長期的にも緩やかに回復する. DCAM3-D 光学系の軌道上の温度は太陽距離や探査機の姿勢により異なるが, 平均的には概ね常温として差し支えない. 従って実際に Hayabusa2 が衝突実験を行なう時の実質的な透過率の減少は, 今回のトータルドーズ試験における照射直後の値よりも小さな値となる. 地球近傍の放射線帯の通過直後や大規模な太陽フレアの発生直後など特に強い放射線を受ける時期を除けば, 観測時の透過率は近似的には本試験により求めた回復後の透過率に近いものになると期待される. さらに, 上記の値はトータルドーズが 10 krad の場合であり, 過剰見積もりとなっている. これらより, 硝材 S-TIH6 と S-BAM12 を DCAM3-D の光学系のレンズに使用することには問題がないと結論づけられる.

6 まとめ

透過率の放射線トータルドーズ依存性のデータが無い 2 種類の硝材 S-TIH6 と S-BAM12 のガンマ線トータルドーズ試験を行った. Hayabusa2 の放射線条件より算出した各硝材を用いたレンズへのトータルドーズは, S-TIH6 では 6.6 krad 以下 S-BAM12 では 3.0 krad 以下であるため, 準備した厚さ 5 mm の硝材サンプルに対して最大 10 krad のガンマ線照射を行った. DCAM3-D の観測波長範囲である 450–750 nm における照射 2 日後の相対的な透過率の低下は, 最も透過率の減少が大きい 450nm でも, S-TIH6 で 3.7%以下, S-MAB 12 で 5.5%以下であり, 長波長ほど減少は少なかった. 太陽光スペクトルと CMOS センサの分光感度で観測波長範囲に渡って重み付けした, 光学系全体での観測シグナルの減少率は 10.4%であると見積もられた. アニーリングによる硝材透過率の回復も考慮すると, これらは DCAM3-D の観測に必要な要求である, 光学系全体でのシグナル減少量が 20%以

下という条件を十分に満たしている。これらの結果より、硝材 S-TIH6 と S-BAM12 は DCAM3-D 光学系に使用し、理学目的を達成可能であることを確認した。

謝辞

本試験を行うにあたり、明星電気株式会社の岩本慎也氏にはガンマ線照射試験の準備および測定にご協力いただいた事に感謝する。また、国立天文台先端技術センターの三ツ井健司氏には透過率測定にご支援いただいた事に感謝する。宇宙航空研究開発機構の飯島祐一博士には理学観測用カメラの発案から設計製作に至るまで多大なるご尽力を頂いたことを感謝する。宇宙航空研究開発機構の高島健准教授には査読において大変有益なコメントをいただいた事に感謝する。

参考文献

- 1) 佐伯 孝尚, 今村 裕志, 澤田 弘崇, 早川 雅彦, 白井 慶, 荒川 政彦, 門野 敏彦, 高木 靖彦, 和田 浩二, はやぶさ 2 衝突装置について, 宇宙科学技術連合講演会講演集, Vol.56, JSASS-2012-4522, 2012
- 2) Saiki, T., Imamura, H., Arakawa, M., Wada, K., Takagi, Y., Hayakawa, M., Shirai, K., Yano, H., and Okamoto, C., Small Carry-on Impactor (SCI) for Hayabusa2 Impact Experiment, submitted
- 3) 荒川 政彦, 和田 浩二, はやぶさ SCI/DCAM3 チーム, 火の鳥「はやぶさ」未来編 その3 ~ SCI/DCAM3 と衝突の科学~, 日本惑星科学会誌 Vol.22 (2013), pp.152-158
- 4) Arakawa, M., Wada, K., Saiki, T., Kadono, T., Takagi, Y., Shirai, K., Okamoto, C., Yano, H., Hayakawa, M., Nakazawa, S., Hirata, N., Kobayashi, M., Michel, P., Jutzi, M., Imamura, H., Ogawa, K., Sakatani, N., Iijima, Y., Honda, R., Ishibashi, K., Hayakawa, H., and Sawada, H., Science objective of Small Carry-on Impactor (SCI) and Deployable Camera 3 Digital (DCAM3-D): Observation of an ejecta curtain and a crater formed on the surface of Ryugu by an artificial high-velocity impact, submitted
- 5) Sawada, H., Ogawa, K., Shirai, K., Kimura, S., Hiromori, Y., Mimasu, Y., and DCAM3 Development Team, Deployable Camera (DCAM3) System for Observation of Hayabusa2 Impact Experiment, submitted
- 6) 澤田 弘崇, 佐伯 孝尚, 今村 裕志, 小川 和律, 白井 慶, 本田 理恵, 荒川 政彦, はやぶさ 2 搭載分離カメラによる衝突実験観測ミッションについて, 宇宙科学技術連合講演会講演集, Vol.56, JSASS-2012-4523, 2012
- 7) Sawada, H., Shirasawa, Y., Mori, O., Okuizumi, N., Miyazaki, Y., Matsunaga, S., Furuya, H., Sakamoto, H., Natori, M., Tsuda, Y., On-orbit Result and Analysis of Sail Deployment of World's First Solar Power Sail IKAROS, The Journal of Space Technology and Science, Vol.27, No.1, Special Issue on IKAROS (2013), p.1_54-1_68
- 8) Ogawa, K., Arakawa, M., Sawada, H., Iijima, Y., Wada, K., Honda, R., Shirai, K., Ishibashi, K., Sakatani, N., Kadono, T., Nakazawa, S., Kobayashi, M., and Hayakawa, H., Development of Hayabusa2 Deployable Camera (DCAM3) for Observation of Impact Simulation on Asteroid, Proc. European Planet. Sci. Cong., Vol.8 (2013), EPSC2013-733
- 9) Ogawa, K., Shirai, K., Sawada, H., Arakawa, M., Honda, R., Wada, K., Ishibashi, K., Iijima, Y., Sakatani, N., Nakazawa, S., and Hayakawa, H., System configuration and operation plan of Hayabusa2 DCAM3-D for scientific observation in SCI impact experiment, submitted
- 10) Ishibashi, K., Shirai, K., Ogawa, K., Wada, K., Honda, R., Arakawa, M., Sakatani, N., and Ikeda, Y., Performance of Hayabusa2 DCAM3-D camera for short-range imaging of SCI and ejecta curtain generated from the artificial impact crater formed on asteroid Ryugu, submitted
- 11) 西野 洋平, 末松 芳法, 常田 佐久, 一本 潔, 木

- 挽 俊彦, 武山 芸英, 次期太陽観測衛星用光学ガラスの放射線耐性試験, 国立天文台報, Vol. 3 (1998), pp.145-150
- 12) はやぶさ 2 搭載機器の耐環境性設計基準書, 宇宙航空研究開発機構, 2011
- 13) 三澤 浩昭, 吉川 一朗, 高島 健, 本田 理恵, 内堀 幸夫, 北村 尚, 武山 芸英, BepiColombo/MMO 搭載カメラ用光学ガラスの放射線耐性試験, 宇宙科学研究所報告, Vol.120 (2002), pp.1-10
- 14) Bensimon, Y., Deroide, B., Dijoux, F., and Martineau, M., Nature and thermal stability of paramagnetic defects in natural clay: a study by electron spin resonance, J. Phys. Chem. Solids, Vol.61 (2000), pp.623-1632
- 15) Sheng, J., Kadono, K., and Yazawa, T., Fading behavior of X-ray induced color centers in soda-lime silicate glass, Appl. Rad. Isotopes, Vol.57 (2002), pp.813-817
- 16) Fuochi, P., Corda, U., Lavallo, M., Kovács, A., Baranyai, M., Mejri, A., Farah, K., Dosimetric properties of gammaand electron-irradiated commercial window glasses, Nukleonika Vol.54 (2009), pp.39-43
- 17) Farah, K., Kovács, A., Mejri, A., Ouada, H.B., Effect of post-irradiation thermal treatments on the stability of gamma-irradiated glass dosimeter, Rad. Phys. Chem., Vol.76 (2007), pp.1523-1526
- 18) Mejri, A., Farah, K., Eleuch, H., Ouada, H.B., Application of commercial glass in gamma radiation processing, Rad. Meas., Vol.43 (2008), pp.1372-1376

