

国際宇宙ステーションを利用した HDTV カメラの放射線影響評価実験

吉川 淳一[†] 村上 敬司[†] 永松 愛子[†]

山崎 順一[‡] 三橋 政次[‡] 横田 明俊*

[†]宇宙航空研究開発機構 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

[‡]日本放送協会 〒150-8001 東京都渋谷区神南 2-2-1

*日揮株式会社 〒220-6001 神奈川県横浜市西区みなとみらい 2-3-1

E-mail: † {yoshikawa.junichi, murakami.keiji, nagamatsu.aiko}@jaxa.jp

‡ {yamazaki.j-gq, mitsuhashi.s-jo}@nhk.or.jp

* yokota.akitoshi@jgc.co.jp

あらまし 宇宙放射線の影響により発生する白傷は HDTV 映像では特に目立つため、HDTV を宇宙で本格的に運用するためには、軌道上で発生する白傷レベルの実験データの蓄積が必要である。宇宙航空研究開発機構(JAXA)では、国際宇宙ステーション ロシアサービスモジュールに HDTV カムコーダを約 4 年 11 ヶ月、HDTV 用 CCD 素子を約 1 年 3 ヶ月搭載し、宇宙放射線が CCD に与える影響を長期間にわたり評価する実験を実施した。回収後、CCD 素子の白傷レベルの評価と、線量計測素子を用いた宇宙放射線粒子の飛跡の特定を行った。CMOS 撮像素子の評価も同様に実施した。また、軌道上で収録した HDTV でビデオテープ及び回収後のカムコーダの映像から白傷数の定量を行った。

また、CCD 素子に対する地上放射線照射試験と比較を行い、地上試験方法の妥当性を検討した。

キーワード 国際宇宙ステーション, ISS, HDTV, CCD, CMOS, 放射線, 白傷

Experiment on space radiation of HDTV utilizing International Space Station

Junichi YOSHIKAWA[†] Keiji MURAKAMI[†] Aiko NAGAMATSU[†]

Junichi YAMAZAKI[‡] Seiji MITSUHASHI[‡] Akitoshi YOKOTA*

[†]JAXA, Japan Aerospace Exploration Agency 2-1-1 Sengen, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8505, Japan

[‡]NHK, Japan Broadcasting Corporation 2-1-1, Jinnan, Shibuya-ku, Tokyo, 150-8001 Japan

*JGC Corporation 2-3-1, Mnato Mirai, Nishi-ku, Yokohama-shi, 220-6001, Japan

E-mail: † {yoshikawa.junichi, murakami.keiji, nagamatsu.aiko}@jaxa.jp

‡ {yamazaki.j-gq, mitsuhashi.s-jo}@nhk.or.jp

* yokota.akitoshi@jgc.co.jp

Abstract Since hot pixels caused by space radiation are unsightly especially for HDTV, it is necessary to extend knowledge of hot pixels on orbit so as to prepare for coming Space HDTV Studio. JAXA had experimented on CCD influence of long-term space irradiation with HDTV Camcorder, HDW-700A onboard over 4 years and CCDs onboard during approximately one and a quarter years. Posterior to retrieval of CCDs, levels of hot pixels were measured and tracking of heavy particles was identified by CR-39, nuclear track detector. The CMOS image sensors were evaluated. Hot pixels of HDCAM Tape were also counted. On-orbit data was compared with results of ground irradiation test.

Keyword International Space Station, ISS, HDTV, CCD, CMOS, radiation, Hot Pixels, White Detects

1. 背景

2006年11月に国際宇宙ステーション(以下、ISS: International Space Station)から世界初の高精細テレビ(以下、HDTV)生中継が実施された[1]。1998年に向井宇宙飛行士がスペースシャトルでHDTV撮影を行って以降、宇宙からの高精細映像は評価が高く、また、ISSで実施されるサイエンス実験では、映像データを取得するものも数多くあり、より高精細の映像を取得する要求が高まっている。

しかしながら、CCDは宇宙放射線の影響により白傷が発生し、特にHDTV画像の品質を低下させることが知られている。宇宙放射線の中でもプロトン(陽子線)が白傷発生の主な原因であり、そのメカニズムについて検証されているが[2]、ISS軌道上の実際の放射線環境において、定量的にCCDへの影響が評価された例はこれまで存在しない。

そこで、長期間にわたるHDTVカメラの放射線影響を評価するために、ISS軌道上にHDTVカムコーダとCCDサンプル並びに比較のためにCMOS撮像素子を搭載する実験を実施した。また、地上放射線照射設備での対照試験[3]の結果との比較を行い、地上試験方法の妥当性を検討した。

2. 宇宙実験計画

2.1. 目的

- 本実験の目的は以下の通りである：
- i) ISS船内での放射線線量とCCDサンプルに発生する白傷との関係を定量的に把握する
 - ii) ISS船内に飛来する荷電粒子の貫通飛跡とCCDの白傷との関係を把握する(対象は重粒子のみ)
 - iii) ISS船内に保管したHDTVカメラ映像の白傷の経年変化を把握する
 - iv) ISS飛行後のCCDと、地上照射試験後のCCDを比較する
 - v) CMOS撮像素子のISS船内保管の影響評価

2.2. 実験方法

Table 1の日程で供試体をISS船内に搭載し、回収した。搭載場所は線量計測素子ともにロシアサービスモジュール(ズヴェズダ)である(Fig.1)。ISSの飛行高度は地上約400km、傾斜角は51.6°である。

Table 1 Launch and Retrieve of CCD Samples

Event	Date	Period	Spacecraft
Launch	21-Aug-2001	0days	Progress (5P)
1st CCD Retrieve	31-Oct-2001	71days	Soyuz TM-32 (2S)
2nd CCD Retrieve	05-May-2002	257days	Soyuz TM-33 (3S)
3rd CCD Retrieve	10-Nov-2002	446days	Soyuz TM-34 (4S)
HDW-700A Retrieve	17-Jul-2006	1791days	Space Shuttle (STS-121)

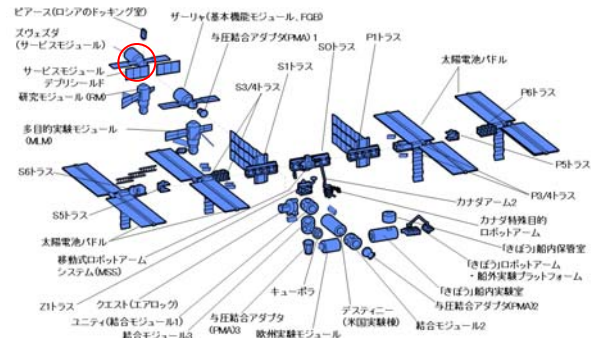


Fig.1 ISS Modules (Sample Location)

2.3. 供試体

1) CCD サンプルホルダ

CCD サンプルホルダは Table 2 に示す機器から構成されている。ISSには3個のCCD サンプルホルダが搭載され、3個はコントロール(比較対象用)としてロシア国内に保管された。軌道上から回収したサンプルとコントロール用サンプルは、回収ごとに日本に輸送し、回収から1~2ヶ月以内に計測を行った。3枚のCCD及びCOMSは上下3枚ずつの飛跡検出用CR-39に挟まれている。熱蛍光線量計測素子(TLD: Thermo-Luminescent Dosimeter)は線量計測用CR-39に挟まれ、サンプルホルダの側面に設置されている。CCD サンプルホルダの外観を Fig.2 に示す。

2) HDTV カムコーダ

HDTVカムコーダはSony製HDW-700Aである(Fig.3)。ISS搭載のために市販品から以下のような改修を行った：1)電磁適合性対策として、シールド強化 2)オフガス対策として、有機材料の一部取外し・交換。

Table 2 Components of A Sample Holder

Sample Name	Parts Number	Manufacturer	Qty	Remark
CCD	ICS230AS ES02	Sony	3	2.2M Pixels 2/3inch FIT
CMOS	PB-1024	Photobit	1	1040Hx1040V
TLD	TLD-MSO-S	Kasei Optonics	10	
CR-39	TD-1	Nagase	3	for Dosimeter
	TNF-1	Nagase	3	for Dosimeter
	TD-1	Nagase	8	for Tracking
	BARYOTRAK	Nagase	16	for Tracking

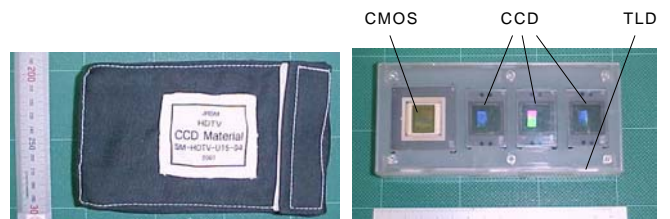


Fig.2 Sample Holder (Soft Case and Holder)



Fig.3 HDCAM Camcorder HDW-700A

3. 実験結果

3.1. 放射線計測

TLDは10keV/μm以下の線エネルギー付与(LET: Linear Energy Transfer)の粒子線、γ線及び中性子線に良好な感度を示す。高LET粒子線による吸収線量は、飛跡検出器であるCR-39の飛跡から得られる情報を元にLET分布が導出され、そのLETから算出される。軌道面上における積算線量測定の結果をTable 3に示す[4]。

Table 3 Summary of the Absorbed-Dose Rates

Sample	Period (days)	TLD (mGy)	CR-39 (mGy)	Total (mGy)
1st Retrieve	71	17.92	1.80	19.72
2nd Retrieve	257	55.19	4.68	59.87
3rd Retrieve	446	76.47	7.65	84.12

高LET粒子成分の寄与は全体の10%程度であり、多くの吸収線量は10keV/μm以下の放射線によるものと考えられる。

3.2. CCDサンプルへの放射線飛跡

飛跡検出器CR-39上に残された貫通痕(Si核以上の重粒子線が対象)の解析結果から、CCD上の白傷との相関を求めた。貫通痕の解析の模式図をFig.4に示す。片側のスタックのみから推定される飛跡から予測したCCD上の白傷と実際に検出された白傷との相関は全白傷に対して3%以下で、相関は高くないといえる。一方、CCDを挟み込んだ上下のスタックを貫通した飛跡、すなわちCCDを貫通した飛跡と実際の白傷との相関は1%程度であった。

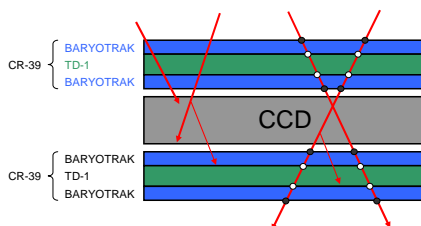


Fig.4 Schematic of Tracking Method

第1回収品のCCDサンプルの解析結果をFig.5に示す。

重粒子の貫通と相関のとれた白傷数は3個であり、同CCDの全白傷数176個に比して多くなく、また、この3個の白傷の電圧出力も突出していないため、重粒子は白傷発生的主要原因ではないものと判断する。

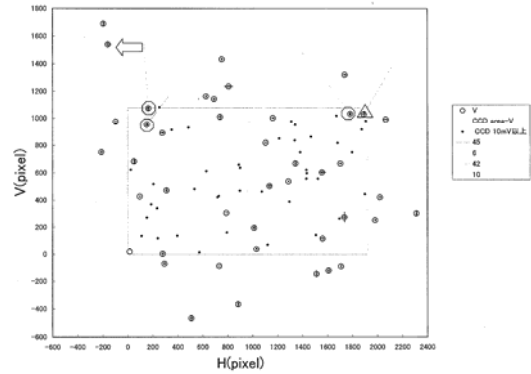


Fig.5 Tracking of 1st Retrieve Sample

3.3. CCDサンプルの白傷

CCDサンプルはピクセルごとの電圧出力を計測し、検出限界以上の計測値をアドレス(座標)ごとに求めた。各CCDの出力電圧値を度数分布表(横軸対数)として、Fig.6に示す。

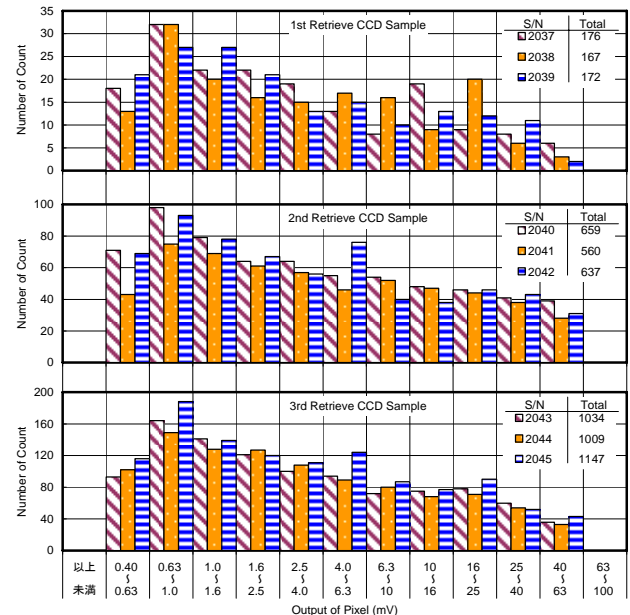


Fig.6 Histogram of Hot Pixels

回収時期にかかわらず、ほぼ相似の電圧出力の分布であり、出力が50mVを超えるものはなかった。Fig.7から、対象期間内においては経過日数と白傷数(0.6mVを超えるピクセルを白傷とみなした)は正比例関係であることが判明した。

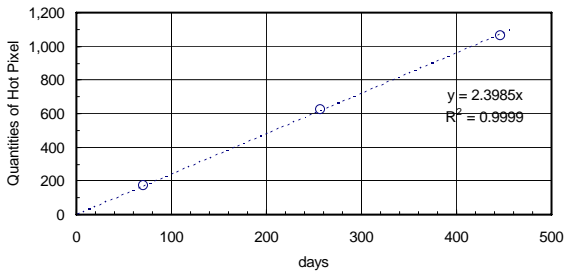


Fig.7 Hot Pixels counted by CCD Voltages

3.4. 取得映像の白傷

ISS 船内では、宇宙飛行士が HDTV カムコーダ HDW-700A に発生する白傷数をモニタリングする目的で、黒映像を撮影した。その録画テープを回収し、黒映像を NHK と芙蓉ビデオエージェンシーが共同開発した「白傷補正装置」で計測し、一定レベル以上の輝度成分を持つピクセルを白傷としてカウントした。Figure-8 に測定結果を示す。なお、Figure-8 中 1,791 日目のデータのみ、地上に回収した HDTV カムコーダの映像出力を測定した結果である。

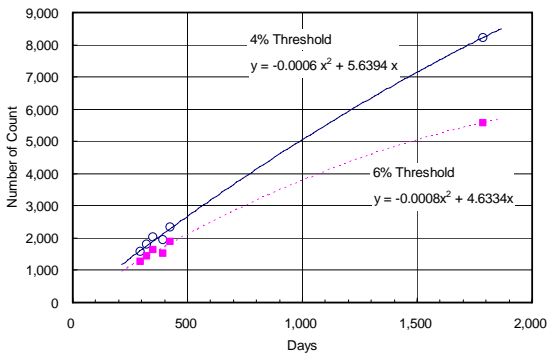


Figure-8 Hot Pixels counted by Pixel Correction System

Figure-8 では、正比例に対してわずかに減少する傾向が見られた。これは、長期間保管によるアニーリングの効果と考えられ、経験式として、白傷数 $y = -Ax^2 + Bx$ が得られた。ここで、 A はアニーリング係数、 B は 1 日当たりの白傷発生個数である。

なお、CMOS 撮像素子の黒映像による輝度ヒストグラムは、飛行品と地上品で変化は見られなかった。

4. 地上対照実験

4.1. 実験条件

宇宙実験と同一の CCD サンプルの地上照射試験を放射線医学総合研究所にて実施した。線種は陽子、He、C、Si 等で、照射面において 100MeV となるよう調整し、ビームと垂直に正対させ設置し、照射した[3]。

4.2. 宇宙実験との比較

TLD による吸収線量を元に、陽子照射地上試験と宇宙実験の各 CCD サンプルの白傷個数を比較した結果を Figure-9 に示す。

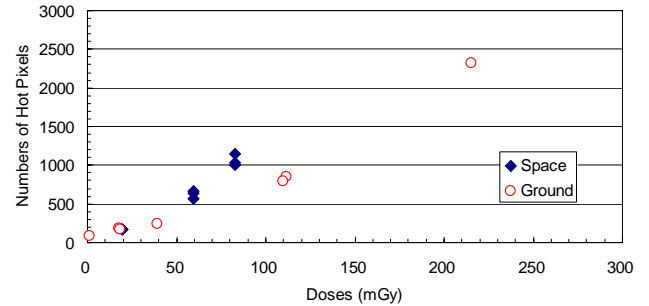


Figure-9 Comparison between Space and Ground

この図から地上試験の吸収線量あたりの白傷発生数は、宇宙実験の約半分程度であることが判明した。実際の宇宙環境では放射線が等方的にサンプルに当たるため、正対させた場合に比べて様々な条件で通過するためと考えられる。

5. 今後の展開

長期間の運用では HD カメラ映像の白傷増加により、画質が劣化することは避けられない。CCD ブロックの軌道上交換は困難であり、カメラ毎の交換となるが、限られた打上げ重量を考慮して、小型民生 HD カムコーダをより頻繁に打上げるか、あるいは、特に船外用 HD カメラとして CMOS カメラの搭載を検討している。

謝辞

本実験の実施にあたり、CCD の提供ならびに白傷レベルの測定に関してご協力いただいたソニー(株)の方々にお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 三橋, 山崎, 白石, 中江, 村上, 吉川: “国際宇宙ステーションからのハイビジョン生中継”, 放送技術 Vol.60 No.2, pp 137-141 (Feb. 2007)
- [2] Hopkinson, Dale, Marshall: “Proton Effects in Charge-Coupled Devices”, IEEE Transaction on Nuclear Science, Vol.43, No.2, pp 614-627 (April 1999)
- [3] 山内, 山崎, 渡辺, 三橋, 安藤, 横田, 久保山, 油谷, 鈴木, 岩田, 村上: “ハイビジョン用 CCD に対する宇宙放射線の影響”, ITE Technical Report Vol.25, No.75, pp.27-32 (Nov.2001)
- [4] Nagamatsu, et al.: “Development of the space radiation dosimetry system ‘PADLES’”, Radiation Detectors and Their Uses, 2006-7, pp26-36 (2006)