

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

BepiColombo水星探査計画に向けたMSASI搭載

イメージインテンシファイアの性能評価

小川 源太郎, 村上 豪, 江沢 福紘,
亀田 真吾, 吉川 一郎

2008年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

BepiColombo 水星探査計画に向けた MSASI 搭載 イメージンシファイアの性能評価

小川 源太郎*¹, 村上 豪*¹, 江沢 福紘*¹,
亀田 真吾*², 吉川 一朗*¹

Performance test of Image Intensifier used in the BepiColombo mission

By

Gentaro OGAWA*¹, Go MURAKAMI*¹, Fukuhiro EZAWA*¹,
Shingo KAMEDA*² and Ichiro YOSHIKAWA*¹

Abstract: The Mercury's Sodium Atmosphere Spectral Imager (MSASI) on Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO)/ BepiColombo is under development. MSASI is a high-dispersion spectrometer working in the spectral range around sodium D₂ emission. The detector unit employs an Image Intensifier which has two-stage micro channel plate (MCP).

In this paper, we report the results of performance test for the Image Intensifier. We have focused on the following points.

1. Spectral resolution.
2. Dependency of Dark-Counts on temperature.
3. Radiation tolerance of phosphor (P 46).
4. Tolerance for aging against incident flux.

Keywords: BepiColombo, Image Intensifier, MSASI, Mercury, Exosphere.

概 要

我々は BepiColombo 水星探査計画において計画されている磁気圏探査機 (Mercury Magnetospheric Orbiter: MMO) に搭載する水星大気撮像カメラ (Mercury Sodium Atmosphere Spectral Imager: MSASI) の開発を進めている。水星大気撮像カメラ (MSASI) はファブリペロー干渉計を用いて水星ナトリウム大気が発する D₂ 線を分光しその強度を測る。この装置にはイメージンシファイア (Image Intensifier) という微弱光を増幅する光検出器を用いる。今回我々は、以下の4つの試験を行い、イメージンシファイアの性能を定量的に評価した。

1. 空間分解能の測定試験。
2. 暗電流の温度に対する特性試験。
3. 蛍光面 (P 46) への放射線照射試験。
4. 入射光量に対する劣化試験。

本論文では、その結果を報告する。

* 1 The University of Tokyo

* 2 The Institute of Space and Astronautical Science (ISAS)/JAXA

1. INTRODUCTION

2013年の打ち上げを目指し日欧が協力して推し進めている BepiColombo 水星探査計画は2機の探査機で構成される。表層探査機 (Mercury Planetary Orbiter: MPO) は、水星の表層・内部構造の解明を主な目的とする。一方、磁気圏探査機 (Mercury Magnetospheric Orbiter: MMO) は、水星の磁場・磁気圏構造の解明及びナトリウムを主成分とする希薄大気の大規模構造・変動を観測することを主な目的とし、その搭載機器の一つに水星大気撮像カメラ (Mercury Sodium Atmosphere Spectral Imager: MSASI) がある。これは、ファブリペロー干渉計を用いて水星ナトリウム大気が発する D_2 線を分光しその強度を測る装置である。

1970年代のマリナー10号の探査以来、水星の直接探査は行われていなかったが、地上観測によりナトリウムとカリウム大気が存在が明らかにされ、さらに近年にはカルシウム大気の輝線も発見された[1],[2],[3],[4]。水星大気の放出機構としては、太陽光による光脱離や、太陽風イオンによるスパッタリング、微小隕石衝突による気化、熱脱離などが考えられているがどの放出機構が支配的なのかは未解決の問題である。MSASIによって水星大気の放出過程の解明が期待されている。

本論文では、MSASIに搭載するイメージンシファイアに関する性能試験結果を報告する。

2. MSASI

MMOに搭載するMSASIはファブリペロー干渉計を用いて水星ナトリウム大気が発する D_2 線 (589 nm) を分光し、その光をイメージンシファイアで増光したのち、CMOSイメージセンサで検出する。

MSASIの空間分解能は水星半径の1/64 (38 km) であり、これまで行われてきた地上観測と比較するとこの空間分解能は10倍以上になる。また、水星周回軌道上からの撮像のため、地上観測で問題となる大気のゆらぎの影響がなく鮮明な画像データの取得が期待できる。さらに、MSASIによる撮像を想定し、MMOの軌道・太陽活動度・ナトリウム大気のみを考慮することで D_2 線の強度分布を計算した結果、放出機構によってそれぞれ特徴的な大気分布がMSASIで撮像できることが予想されている[5]。MSASIによる観測で、水星大気の支配的な放出機構が解明されるであろう。

3. IMAGE INTENSIFIER

イメージンシファイアの構造を図1に示す。イメージンシファイアは、光子を電子に変換する光電面、電子数を増幅するマイクロチャンネルプレート (MCP)、そして電子を再び光子に変換する蛍光面からなる。

光電面から出た電子は、光電面とMCP入力面 (MCP-in) の間の電圧により加速されMCPに入射する。MCPの各チャンネルに入射した光電子が内壁に衝突して二次電子を放出する。生成された二次電子は電場によって加速され、内壁に衝突し、新たな二次電子を生成する。この過程を繰り返すことによってMCP出力面 (MCP-out) からは多数の電子が放出され

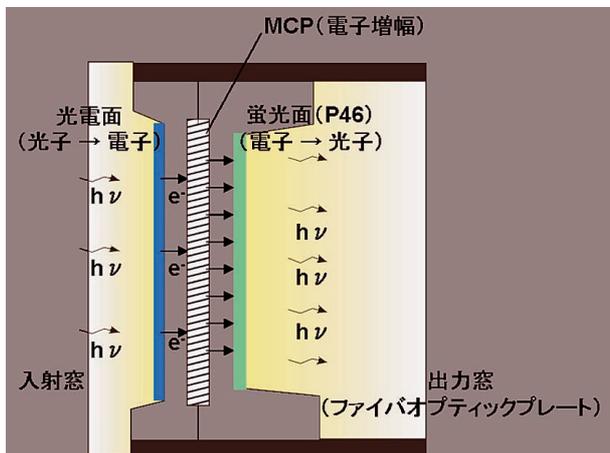


図1 イメージンシファイア構造図。イメージンシファイアは、光子を電子に変換する光電面、電子数を増幅するマイクロチャンネルプレート (MCP)、電子を再び光子に変換する蛍光面からなる。

表1 MSASIで必要とされるイメージンシファイアの仕様。

最高ゲイン	3.2×10^6
空間分解能	$60 \mu\text{m}$ 以下
入射窓	ホウ珪酸ガラス
光電面	GaAsP (量子効率 @589 nm : 50% 以上)
M C P	2段 (電子倍増率: 2×10^5)
蛍光面	P46 (最高発光波長: 530 nm)
出力窓	ファイバオプティックプレート

る。その結果、蛍光面では光電面への入力に対して約一万倍（MCP 一段の場合）に増強された出力が得られる。MSASI で必要とされるイメージンシファイアの仕様を表1に示す。光電面に用いられる GaAsP は 589 nm における量子効率が 50 % 以上である。また、蛍光面 P 46 は、撮像間隔（2 ms）に対して残光時間（1 μ s）が十分短い。

4. 空間分解能の測定試験

4.1 実験

イメージンシファイアの空間分解能の測定を行った。測定機器の配置図を図2に示す。まず He-Ne レーザーとレンズ（焦点距離 = 50 mm）を用いてイメージンシファイアの光電面上に直径 19 μ m 以下の輝点を作り、蛍光面上で出力されたときの輝点の広がりを CCD カメラで計測した。

4.2 結果

テストターゲットをイメージンシファイアの蛍光面の位置に置き、CCD カメラの倍率を確認した（図3）。テストターゲットの間隔 62.5 μ m は 97 pix に対応していた。つまり 1 pix あたり 0.644 μ m であるから CCD カメラの倍率は 10 倍である（画素サイズは 6.45 μ m）。テストターゲットの画像から CCD カメラの空間分解能を確認したところ、7 μ m から 15 μ m であることが解った（図4）。

次に、MCP in と MCP out の間に 1.4 kV と 1.6 kV の電圧を印加し、輝点の広がりを測定した（試験①）。半値幅は 38.7 μ m と 47.7 μ m であった。さらに、入射光量を 100 倍に増やして MCP in と MCP out の間に 1.0 kV と 1.2 kV と 1.4 kV の電圧を印加したときの輝点の広がりを測定した（試験②）。半値幅は 42.5 μ m と 53.5 μ m と 70.2 μ m であった。これらの結果からレンズ収差を除いたものをイメージンシファイアの空間分解能とした。測定結果を図5、6と表2に示す。

半値幅はゲインだけに依存しているのではなく、光量にも依存することがわかった。ゲインが高くなると空間分解能は低くなる。また、ゲインが同じ（1.4 kV）でも光量が多くなる（100 倍）と空間分解能は 2 倍低くなっている。

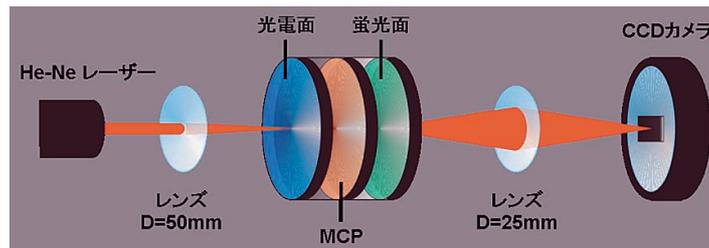


図2 装置の配置図。光電面上に輝点を作り、蛍光面上での出力の広がりを計測した。

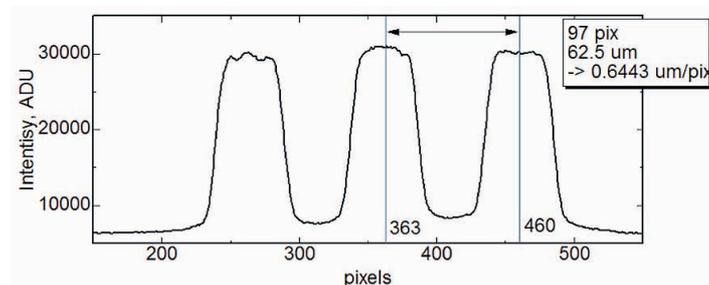


図3 イメージンシファイア蛍光面にテストターゲットを置き、CCD カメラの倍率を確認した。1 pix あたり 0.644 μ m であるから CCD カメラの倍率は 10 倍である（画素サイズは 6.45 μ m）。

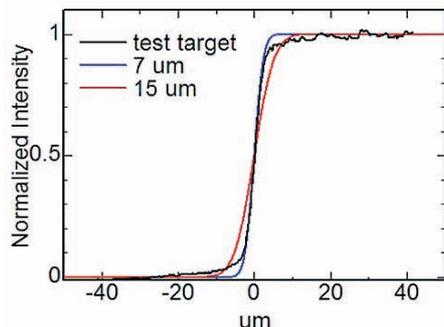


図4 テストターゲットの画像から CCD カメラの空間分解能を確認したところ、 $7\ \mu\text{m}$ から $15\ \mu\text{m}$ であることが解かった。

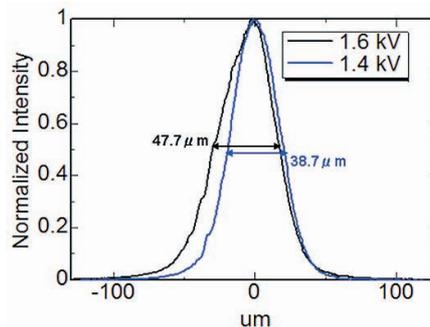


図5 試験①：MCP in と MCP out の間に $1.4\ \text{kV}$ と $1.6\ \text{kV}$ の電圧を印加したときの輝点の広がり。

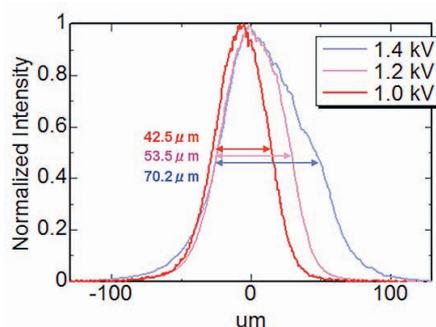


図6 試験②：MCP in と MCP out の間に $1.0\ \text{kV}$ と $1.2\ \text{kV}$ と $1.4\ \text{kV}$ の電圧を印加したときの輝点の広がり。試験①の100倍の光量を入射した。

表2 イメージインテンシファイアの空間分解能。

①	$1.6\ \text{kV}$	$44.1 \pm 3.1\ \mu\text{m}$
	$1.4\ \text{kV}$	$34.0 \pm 4.0\ \mu\text{m}$
②	$1.4\ \text{kV}$	$67.8 \pm 2.0\ \mu\text{m}$
	$1.2\ \text{kV}$	$50.3 \pm 2.7\ \mu\text{m}$
	$1.0\ \text{kV}$	$38.3 \pm 3.6\ \mu\text{m}$

5. 暗電流の温度に対する特性試験

5.1 実験

イメージインテンシファイアの暗電流は環境温度により変わることが知られている。MSASIの環境温度は -10°C から $+50^{\circ}\text{C}$ まで変化する。そこで、環境温度に対するイメージインテンシファイアの暗電流の変化を調べるための試験を行った。

環境温度 20°C 、 35°C と 50°C におけるイメージインテンシファイアの暗電流を印加電圧 $1400\ \text{V}$ 、 $1600\ \text{V}$ と $1800\ \text{V}$ ごとに計測した。計測は、暗電流による蛍光面への出力を CCD カメラで撮影するという方法をとった。 $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 35^{\circ}\text{C} \rightarrow 50^{\circ}\text{C}$ の昇温時と $50^{\circ}\text{C} \rightarrow 35^{\circ}\text{C} \rightarrow 20^{\circ}\text{C}$ の降温時にそれぞれ計測を行い、環境温度の調整時には約1時間かけて温度を安定させた。

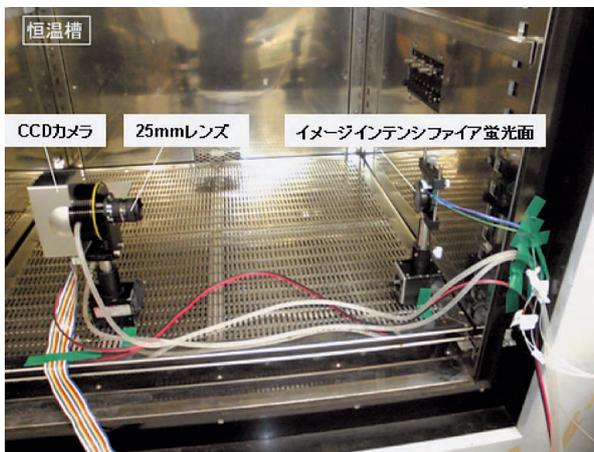


図7 装置の配置。恒温槽内に CCD カメラ (25 mm レンズ付) と、光電面に遮光を行ったイメージインテンシファイアを設置し、蛍光面にピントを合わせた。暗電流による蛍光面出力を CCD カメラで撮影した。

5.2 暗電流の温度変化

試験結果を表3および図8に示す。どの印加電圧でも暗電流は $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 35^{\circ}\text{C}$ で9倍、 $35^{\circ}\text{C} \rightarrow 50^{\circ}\text{C}$ で6倍程度に増えている。また、昇温時よりも降温時の方が20～30%ほど暗電流が多いが、傾きはほとんど一致している。

5.3 暗電流とゲインとの比較

印加電圧と暗電流の関係をイメージインテンシファイアのルミナスゲイン (浜松ホトニクス(株)測定値) と比較した。 $1400\ \text{V}$ での CCD のカウント数を1とした場合の相対値を表4に示す。 $1600\ \text{V}$ では暗電流とゲインの相対値は $0.98 \sim 1.2$ 倍ほど異なるが、 $1800\ \text{V}$ では $1.3 \sim 1.7$ 倍も異なる。これより、暗電流とゲインは

必ずしも一致しないことが解った。

5.4 温度・印加電圧による暗電流の見え方の違い

図9に各温度・印加電圧におけるイメージインテンシファイアの暗電流による発光の画像を示す。イメージインテンシファイアの暗電流は温度に大きく依存し、50°Cでは20°Cに比べ60倍近く増加する。

表3 各温度・印加電圧におけるイメージインテンシファイアの暗電流 [cps/cm²].

	20°C		35°C		50°C	
	昇温	降温	昇温	降温	昇温	降温
1400 V	3.01×10^4	3.55×10^4	2.58×10^5	3.46×10^5	1.53×10^6	2.18×10^6
1600 V	4.31×10^5	5.03×10^5	3.88×10^6	5.17×10^6	2.67×10^7	3.33×10^7
1800 V	2.75×10^6	3.09×10^6	2.52×10^7	3.24×10^7	1.84×10^8	2.16×10^8

表4 暗電流とゲインの比較. 1400 VにおけるそれぞれのCCDのカウント数を1としたときのゲインと暗電流の相対値を表す。

	1400 V	1600 V	1800 V
ゲイン	1.00	14.65	69.77
20°Cでの暗電流	1.00	14.34	91.50
35°Cでの暗電流	1.00	15.03	97.55
50°Cでの暗電流	1.00	17.52	120.35

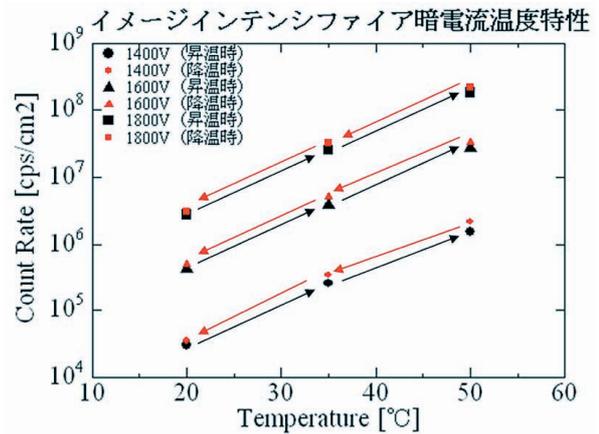


図8 各印加電圧におけるイメージインテンシファイアの暗電流の温度変化. 横軸は温度を, 縦軸は CCD のカウント数を表す。

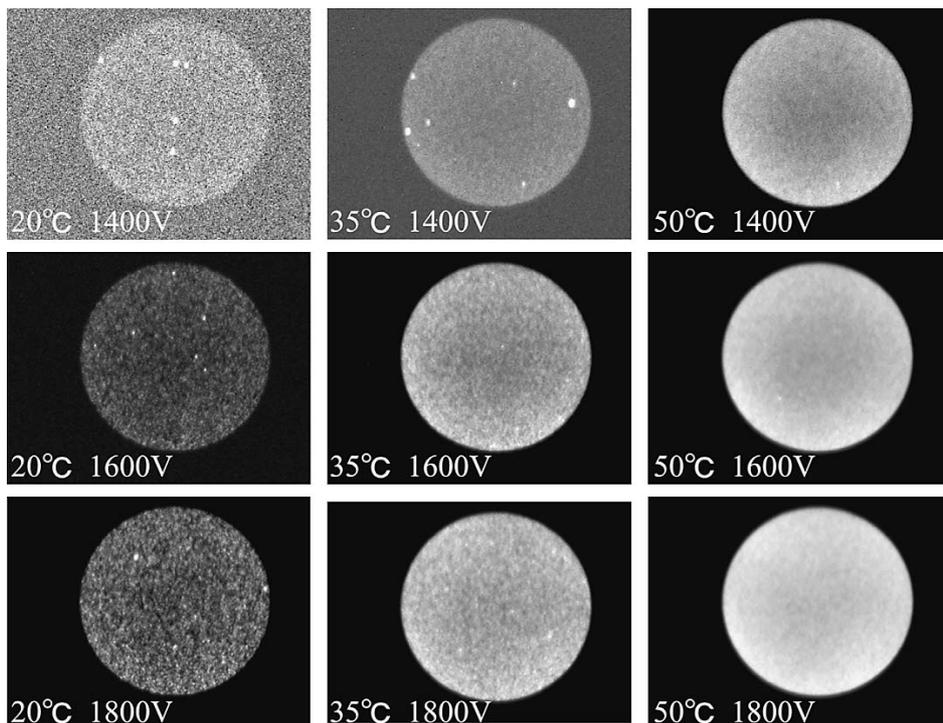


図9 各温度・印加電圧におけるイメージインテンシファイアの暗電流による発光の画像。

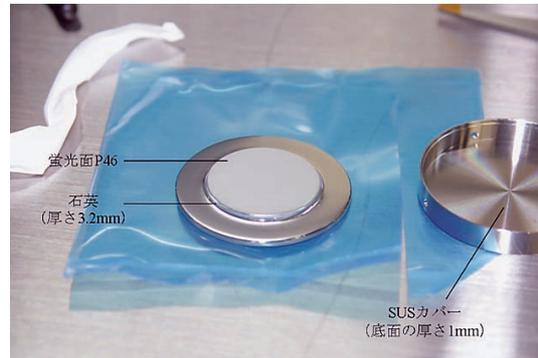


図10 サンプル①. 初期状態からステンレスカバー取外したところ. 蛍光面P46は石英窓に取り付けられている.

表5 被照射サンプル.

①	初期状態から SUS カバー取外し：70 krad 照射
②	初期状態+前面にガラス (厚さ 11.3 mm)：70 krad 照射
③	初期状態：70 krad 照射
④	初期状態：40 krad 照射
⑤	初期状態：未照射
初期状態：石英窓 (厚さ 3.2mm)+蛍光面 P46+SUS304 カバー (底面の厚さ 1mm)	

今回の試験結果では暗電流の起源を同定することはできなかった. 今後, 高速撮像による再試験を行い, 局所的な暗電流と連続的な暗電流の分離を試みる.

6. 蛍光面 (P46) への放射線照射試験

6.1 実験

蛍光面 (P46) は電子線などを吸収して, その物質特有の波長の光を放出する. P46 の残光時間 ($1\ \mu\text{s}$) は撮像間隔 (2 ms) に対して十分短い. 初期状態では, この P46 は石英窓に取り付けられていて, ステンレスカバー (SUS 304) で保護されている (図10).

観測期間中に考えられるイメージインテンシファイアの劣化は, 放射線と入射光による劣化の2種類ある. そこで, まず蛍光面の放射線による劣化を定量的に見積もるために, イメージインテンシファイアの蛍光面に放射線を照射して変化を観察した. 本試験は, 日本原子力研究開発機構 高崎量子応用研究所 コバルト 60 照射施設 に於いて, 平成 19 年 11 月 30 日に行った. 試験に用いたサンプルを表5に示す.

放射線源はコバルト 60 (1 MeV). 照射レートは 20 krad/hour である. サンプルは放射線源から 115 cm, 高さ 22.5 cm の位置に置いた. サンプルは全て窒素パージのまま放射線を照射した.

6.2 結果

サンプル②は, 前面に置いたガラスが黒色化したが, 目視ではどのサンプルの蛍光面にも明らかな変化はなかった.

浜松ホトニクス(株)の協力で, 放射線試験をかけたサンプルに 6 kV の電子線を当てて蛍光面の輝度を測定した. 結果を表6に示す. 蛍光面の劣化はないと結論する.

表6 放射線照射結果。放射線試験にかけたサンプルを、電子線照射によって蛍光面の輝度を測定した。浜松ホトニクス(株)に於ける測定結果。

① SUS カバーなし	70 krad	30.7 nit
② 前面にガラス	70 krad	29.1 nit
③ そのまま	70 krad	29.6 nit
④ そのまま	40 krad	29.7 nit
⑤ 未照射		30.6 nit



図11 被照射サンプル。放射線源はコバルト60 (1 MeV)。照射レートは20 krad/hour。サンプルは放射線源から115 cm, 高さ22.5 cmの位置に置いた。

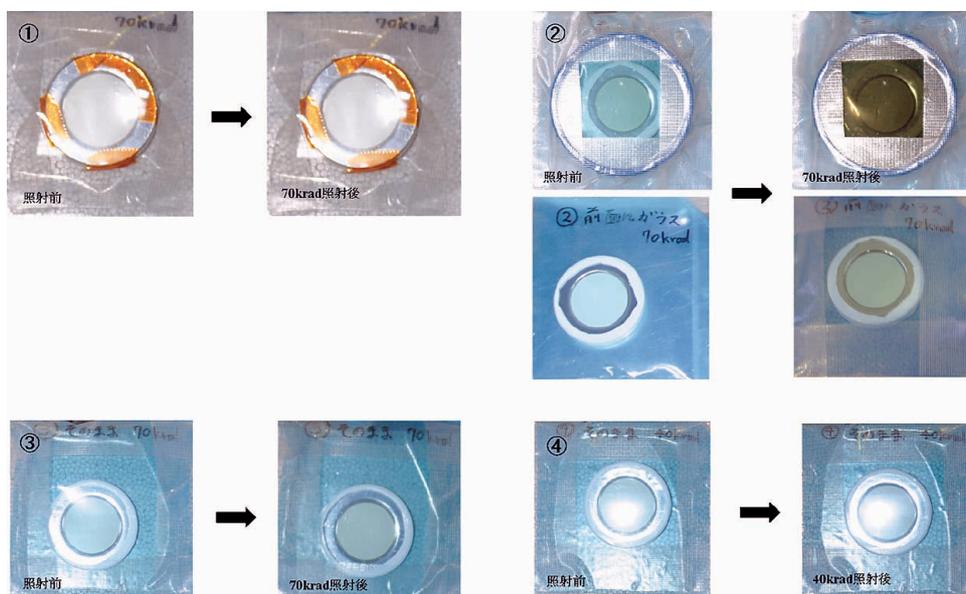


図12 放射線照射前と照射後。目視では明らかな変化はなかった。しかし、サンプル②は前面に置いたガラスが黒色化した。

7. 入射光量に対する劣化試験

7.1 実験

イメージインテンシファイアは入射光によって劣化する。そこで、観測期間中の光劣化によるイメージインテンシファイアのゲインの低下を定量的に見積もるために、耐久試験を行った。

観測期間中、MSASIには10 MRの光が入射する。また、MSASIの観測期間は地球時間にして1年である。1軌道中に観測する時間は1軌道にかかる時間の3分の1であり、そのうち1スピン中に観測する時間は1スピンにかかる時間の8分の1である。よって、MSASIが水星を観測する総時間は365時間である。

本試験ではレーザーダイオード(650 nm)の光をNDフィルターで減光して10 MRの光をイメージインテンシファイアに入射させた。そして、イメージインテンシファイア蛍光面をCCDカメラで撮影した。なお、測定時間はMSASIが水星を観測する総時間(365時間)以上行った。

7.2 結果

測定は730時間行った。試験結果を図14に示す。730時間終了時点で、ゲインは40%低下した。MSASIの総観測時間である365時間経過時点でも35%の低下が確認された。

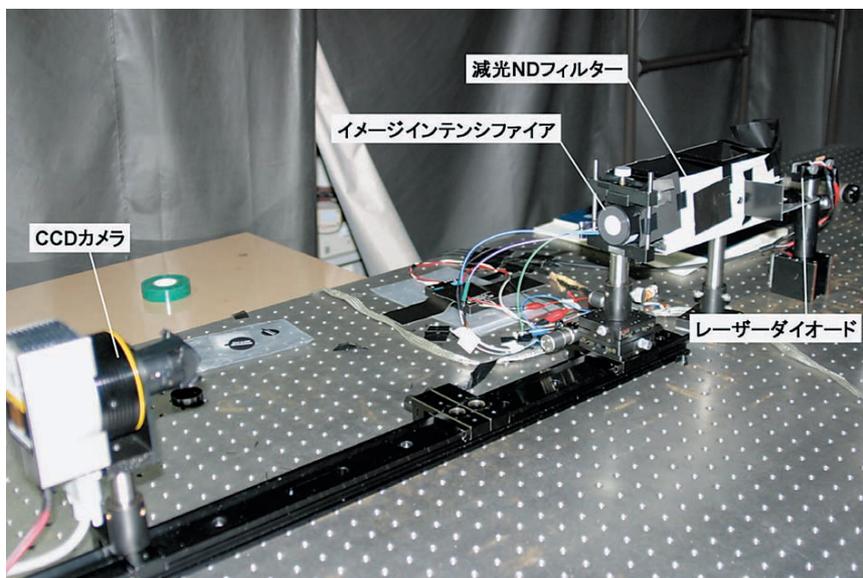


図13 光劣化試験装置配置図

レーザーダイオード (650 nm) の光を ND フィルターで減光し、イメージインテンシファイアに入射させる。そして、イメージインテンシファイア蛍光面を CCD カメラでモニターした。

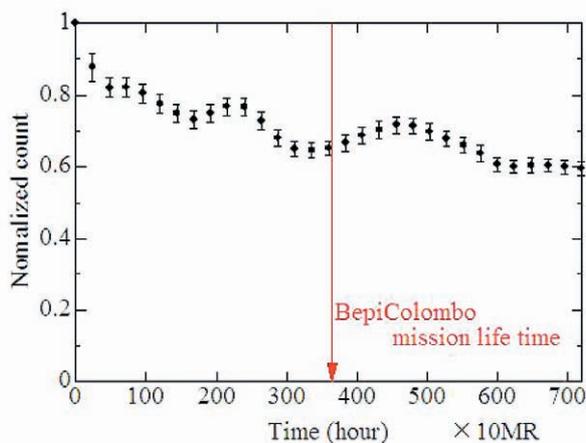


図14 イメージインランシファイアの劣化試験結果。横軸は入射光量、縦軸は CCD の相対カウント数を表す。

8. ま と め

以上の実験結果からわかったことを以下に挙げる。

- (1) イメージインテンシファイアの空間分解能はゲインだけに依存しているのではなく、入射光量にも依存する。
- (2) 暗電流の環境温度依存性が確認された。
- (3) 局所的な暗電流と連続的な暗電流がある。
- (4) 放射線によるイメージインテンシファイア蛍光面の劣化はない。
- (5) MSASI の総観測時間である 365 時間の時点で、入射光によるゲインの低下は 35% ほどであった。

参 考 文 献

- [1] Broadfoot, A. L., S. Kumar, M. J. Belton, M. B. McElroy, "Mercury's atmosphere from Mariner 10: Preliminary results", Science, 185, 166-169, 1974.

- [2] Potter, A., and T. Morgan, “Discovery of sodium in the atmosphere of Mercury”, *Science*, 229, 651–653, 1985.
- [3] Potter, A., and T. Morgan, “Potassium in the Atmosphere of Mercury”, *Icarus*, 67, 336-340, 1986.
- [4] Bida, T. A., R. M. Killen, and T. Morgan, “Discovery of calcium in Mercury’s atmosphere”, *Nature*, 404, 159-161, 2000.
- [5] 彦坂 健太郎, 亀田 真吾, 野澤 宏大, 吉岡 和夫, 山崎 敦, 吉川 一郎, 笠羽 康正, “水星大気の生成メカニズムに関する研究～MMO搭載機器MSASIでの観測に向けて～”, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, 2006.
- [6] Yoshikawa, I., S. Kameda, K. Matsuura, K. Hikosaka, G. Murakami, K. Yoshioka, H. Nozawa, D. Rees, S. Okano, H. Misawa, A. Yamazaki, O. Korablev, “Observation of Mercury’s sodium exosphere by MSASI in the BepiColombo mission”, *Planetary and Space Science*, 55, 2007, 1622–1633.
- [7] Nozawa, H., I. Yoshikawa, S. Kameda, H. Misawa, S. Okano, M. Taguchi, A. Yamazaki, Y. Kasaba, K. Takamizawa, O. Korablev, “Mercury Sodium Atmosphere Spectral Imager (MSASI)”, JAXA Research and Development Report, 2005.

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-07-018

発行 平成 20 年 2 月 29 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

URL : <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 (株) 東京プレス

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

TEL : 029-868-2079 FAX : 029-868-2956

© 2008 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。



本書は再生紙を使用しております。