

国際宇宙ステーション「きぼう」船外プラットフォーム搭載宇宙環境計測ミッション装置 (SEDA-AP)

古賀清一* 松本晴久* 木本雄吾* 山田理子* 小原隆博* 渡辺英幸*

遠藤美穂* 佐孝大地* 松枝達夫* 山本常夏** 村木綏**、

*宇宙航空研究開発機構 **甲南大学

1. はじめに

宇宙環境計測ミッション装置 (Space Environment Data Acquisition Equipment - Attached Payload: SEDA-AP) は、国際宇宙ステーション (International Space Station:ISS) 近傍の宇宙環境計測を目的とし、きぼう船外プラットフォーム (Exposed Facility: EF) で最初の実験を行うペイロードの1つである[7]。

宇宙飛行士が長期に滞在するISS周りの宇宙環境は、銀河宇宙線と放射線帯の高エネルギー宇宙放射線 (1次宇宙線) と、それらが大气およびISS構造体と相互作用し生じるアルベド中性子および2次 (ローカル) 中性子、太陽から直接飛来する太陽中性子、プラズマ環境、活性度の高い原子状酸素が約8割を占める中性大气などが特徴的な環境である。さらに、宇宙デブリや、天然のメテオロイド等がある。

宇宙環境が及ぼす影響の中で、特に宇宙放射線は、宇宙機に故障や誤動作をもたらすだけでなく、人体に対しても被曝の影響 (特に陽子、アルファ線、重イオン粒子、中性子など生物効果比の高い放射線) を及ぼすので重要である。宇宙空間のプラズマは、宇宙機構造体が大きな電荷量を持つと帯電・放電現象を引き起こし機器の故障の原因となる、原子状酸素は宇宙機表面を切削・劣化させる。宇宙デブリやメテオロイドは、宇宙機の破壊、故障や障害を及ぼすだけでなく、微小デブリでも船外活動中の宇宙飛行士へのリスク要因になる。

上記の宇宙環境を計測し、ISSや宇宙機の安全・安心を担保するため、SEDA-APには8つの計測装置が搭載されている。その各装置は、名古屋大学・太陽地球環境研究所、理化学研究所、日本原子力研究所 (現在の原子力研究開発機構)・高崎研究所、通信総合研究所 (現在の情報通信研究開発機構) 平磯太陽観測センター、宇宙科学研究所、航空宇宙技術研究所 (現在両者はJAXAに統合)、東北大学の各機関の協力で搭載提案し、共同で開発や試験を実施した。

2. 宇宙環境計測ミッション機器

SEDA-APに搭載されるミッション機器の配置を図1に示す。AOMとMPAC&SEEDは、ISSの進行方向 (ラム方向) に向けて配置してある。

①中性子モニタ (NEM)、②高エネルギー軽粒子モニタ (SDOM)、③重イオン観測装置 (HIT)、④プラズマ計測装置 (PLAM)、⑤原子状酸素モニタ (AOM)、⑥電子部品評価装置 (EDEE)、⑦微小粒子捕獲実験装置 (MPAC)、⑧材料曝露実験装置 (SEED)

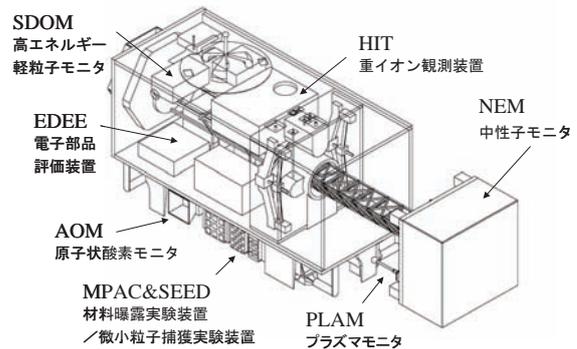


図1 SEDAのミッション機器の配置

3. 各ミッション機器の実験内容および装置概要

3.1. 中性子モニタ (NEM: Neutron Monitor)

宇宙飛行士が受ける宇宙船被曝の約15~20%は中性子と言われている。中性子は、電氣的に中性のため体内奥深くに進入し、造血組織、生殖組織等に被曝の影響を及ぼす。

宇宙ステーションでは、宇宙放射線が厚い船壁や大气を叩いて2次的に発生する中性子と太陽から時々直接飛来する太陽中性子とがある。計測器として、前2者を主な対象とする「ボナー球型 (10MeV以下)」と、後者を主な対象とする「シンチレーションファイバ型 (10-100MeV)」の2種でリアルタイム計測する。

また、船壁の影響を避けるため1m伸展し計測する。陽子等の荷電粒子が多い中で、非荷電粒子の中性子を

弁別して計測することは難易度が高く、過去の計測例は少ない。パッシブ型での中性子計測例はあるが、リアルタイムでの中性子エネルギースペクトル計測は日本独自のものである。

(a) ボナー型中性子モニタ (BBND: Bonner Ball type Neutron Detector)

熱中性子 (0.025eV) に極めて感度が高い ^3He ガス封入比例計数管の中性子による出力波高分布が、陽子、光子等その他の放射線による出力波高分布と異なることを利用して、中性子のみを弁別計測する。中性子のエネルギースペクトラムは、複数の含水素減速剤 (ポリエチレン) を用い、それらの厚さによる応答関数の違いから計測する。

仕様 計測エネルギー範囲: 0.025eV (熱中性子) ~ 15MeV

最大計測粒子数: 1×10^4 count/sec

(b) ファイバー型中性子モニタ (FIB: Fiber Type Neutron Detector)

交互に直交して組み立てられたシンチレーションファイバー (16×16本) の各ロットから反跳陽子の飛跡をマルチアノードフォトマルで計測し、その発光量と飛跡方向から中性子のエネルギーと入射方向を推定する。中性子と陽子の弁別は、最外殻層のシンチレータの発光との反同時計数 (荷電粒子は、最外殻層のシンチレータで発光する) をとることにより行う。中性子と光子の弁別は、飛跡の違い (中性子は1本、光子は2本) により行う。[3]

計測エネルギー範囲:

15~100MeV

最大計測イベント数 50 event/sec

3.2. 重イオン観測装置 (HIT: Heavy Ion Telescope) / プラズマ計測装置 (PLAM: Plasma Monitor)

(a) 重イオン観測装置 (HIT)

宇宙機搭載の電子部品の誤動作、永久故障や人体の被曝の原因の1つである重イオン (Li~Fe) の粒子別エネルギー分布を、シリコン半導体検出器で計測する。

2枚の位置検出器 (PSD: Position Sensitive Detector)、及び16枚の半導体検出器に入射した荷電粒子は、入射粒子のエネルギー損失に比例した電位を持つパルスを生成する。HITはこれを利用し、各々の検出器での損失エネルギー、及び検出器内で停止した粒子については全エネルギーを計測する。得られたエネルギーと検出器での損失エネルギーから $\Delta E \times E$ 法により各種重イオンの粒子弁別を行う。

仕様

粒子 ; Li~Fe

Li ; 10~43 MeV/nuc

C ; 16~68 MeV/nuc

O ; 18~81 MeV/nuc

Si ; 25~111 MeV/nuc

Fe ; 34~152 MeV/nuc

(b) プラズマ計測装置 (PLAM)

宇宙機の帯電や放電の原因となる、宇宙空間プラズマの密度と電子温度等をラングミュア・プローブ法で計測する。

仕様 Langmuir probe

High Gain: $-0.2 \mu\text{A} \sim +2 \mu\text{A}$

Low Gain : $-0.04\text{mA} \sim +0.4\text{mA}$

Floating probe

High Gain: $\pm 5\text{V}$

Low Gain : $\pm 100\text{V}$

3.3. 軽粒子モニタ (SDOM: Standard Dose Monitor)

宇宙機器のための宇宙放射線モデルの作成・更新、有人被曝管理支援及び宇宙天気予報の基礎データ等として電子、陽子、 α 粒子のエネルギースペクトルを計測する。

半導体検出器3枚とシンチレータで構成されている。入射粒子のエネルギーは、3枚の半導体検出器及びこれを突き抜けたものは後ろにあるプラスチックシンチレータで計測する。粒子弁別は、各検出器の波高の組み合わせによる $\Delta E \times E$ 法により行う。

粒子	エネルギー範囲	ch
Electron	0.5~21 MeV	7
Proton	1.0~200 MeV	15
Alpha	7.0~200 MeV	6
Heavy Ion	ID only	1

3.4. 原子状酸素モニタ (AOM: Atomic Oxygen Monitor)

原子状酸素は、非常に活性度が高い為、熱制御材や塗料を劣化させ、熱制御に影響を与えるため、宇宙環境モデルの基礎データとして計測を行う。カーボンフィルムが原子状酸素によるエロージョンにより、その厚さが薄くなる。この厚さの変化を抵抗値変化として計測する (アクチノメータ方式)。抵抗の変化と原子状酸素のフルエンスのテーブルを事前に用意しておくことにより原子状酸素のフルエンス (積分フラックス) を計測する [4]。

仕様

計測範囲：

$3 \times 10^{17} \sim 3 \times 10^{21}$ atoms/cm²

分解能: 3×10^{17} atoms/cm²

3.5. 電子部品評価装置(EDEE: Electric Device Evaluation Equipment)

JEM(きぼう)で使用される電子部品の中で、システム上重要と考えられるもので且つ放射線の感受性がある電子部品に関して、軌道上におけるシングルイベント現象の発生の有無をモニタする。この計測結果は、JEMシステムに異常があった場合の原因究明に資するとともに、地上評価試験結果等より予測される発生確率との比較を行い、放射線特性の予測方法の向上に資する。シングルイベント現象の発生は、記憶データの一時的な反転及び電源電流の急増をモニタすることにより検出する。

仕様：被測定デバイス（Memory(1MSRAM)、Micro-Processor Unit (V70-MPU)、Power MOSFET)

3.6. 微小粒子捕獲実験装置／材料曝露実験装置 (MPAC&SEED: Micro-Particles Capturer and Space Environment Exposure Device)

(a) 微小粒子捕獲実験装置 (MPAC)

JEMに飛来する、ミクロンサイズからミリサイズのメテオロイド及びスペースデブリ（「コズミックダスト」ともいう）のサイズ、材質、飛来速度、飛来方向、衝突頻度等の分布を調査し、宇宙環境モデルの最新化に資すると共に、有人宇宙システムや、人工衛星に使用する部品、材料の耐ダスト性評価技術等の向上に資する。シリカエアロジェルによる捕獲材を用いて、ダストを捕獲し、捕獲材に残された衝突孔から衝突エネルギー、ダストの飛来方向、組成分析を行う。また、金プレートに残された衝突痕から、衝突頻度・衝突エネルギー等を評価分析する。

(b) 材料曝露実験装置 (SEED)

宇宙用材料の耐宇宙環境性評価の一環として、実宇宙環境曝露による特性変化を調査し、耐宇宙環境性評価技術の向上に資すると共に、実宇宙環境曝露データの蓄積、人工衛星等のプロジェクトへの反映を行う。サンプルホルダを用いて宇宙用材料を宇宙環境に曝露し、回収された材料の特性変化等の評価を行う。SEED搭載試料選定については、有識者による搭載試料選定チームにより、搭載する試料の最終選定を行った。

MPAC&SEEDは、軌道交換ユニット(ORU: Orbital Replacement Unit)化を計り、宇宙船外活動 (EVA: Extra-vehicular Activity) にて回収出来る設計としてい

る。

4. 先行実験 (プリカーサ実験) 結果

(1) ボナー球型中性子モニタ (BBND)

BBNDは、NASAの依頼により、平成10年にスペースシャトル (STS-89) 内において、平成13年3月～12月 (約8カ月間) に宇宙ステーション (ISS) 米国実験棟内に於いて、BBND (EM) で計測を行い、解析手法の確立など本装置のデータ活用に有用な成果が得られている[1][2]。

(2) 材料曝露及び微小粒子捕獲実験

材料曝露及び微小粒子捕獲実験は、平成13年10月から3式の同一装置をロシアモジュールの外壁に装着し、約10か月、28か月、46ヶ月間曝露してから、それぞれソユーズで回収した。メテオロイドがISSの船壁に高速衝突した時、船壁から2次的に発生する ejecta 等の発見などの成果が得られている[5][6]。

5. SEDA-APの打ち上げと初期評価

SEDA-APは、2009年7月にSTS-127 (2J/A) で実験装置を打ち上げ、船外実験プラットフォームへの取付けを行った後、同年8月4日より地上からの遠隔操作により、バス機器 (電気系/通信系) や各ミッション機器の機能確認を順番に行った。取得データを解析した結果、バス機器および各ミッション機器が正常に機能していることを確認し、2009年9月17日から8つのミッション機器による宇宙環境計測を本格的に開始した。

6. SEDAのミッション機器の初期データ評価

初期機能確認時に解析したデータや、その後約半年間継続して観測した初期データの一部を紹介する。宇宙環境データは、モデル等の作成に必要な長期間の観測データの取得、および太陽フレアの発生等による急激な変動データの計測が主体となる。

初期の半年間は、偶然にも約100-200年ぶりに起きた太陽活動が最小の極小期(黒点数がゼロの状態が長く続く Deep Minimum)の期間であり、そのため大型太陽フレアの陽子イベントが全くなかった。しかし、2010年になり、小型太陽フレアの発生が始まったので、今後の太陽活動極大期にむけての太陽フレア粒子イベント観測が期待できる。一方で、逆にこの期間に増加したのは銀河宇宙線である。磁気圏外にある米国NASAのACE衛星の観測によると、宇宙時代が始まって以来の最大の増加 (Feイオンで約19%) が観測された (NASA発表2009年9月29日)。磁気圏内のISS軌道でも、この変化について重点的に長期間の変動をモニ

タする予定である。

6.1. 中性子(低エネルギー)データ(ボナー球型 BBND(10MeV以下))

初期機能確認試験中に得られた低エネルギー中性子データ(S1 カウント値)を図2に示す。観測日は2009年10月1日のデータである。

フレアが発生していないため、下記の分布は、放射線帯粒子および銀河宇宙線により生じた中性子を計測している。

今後、これらのS1～S6の6個のカウント値から、エネルギースペクトル、線量等量を算出し、静穏時及び太陽フレア時の中性子スペクトル解析を行う予定である。

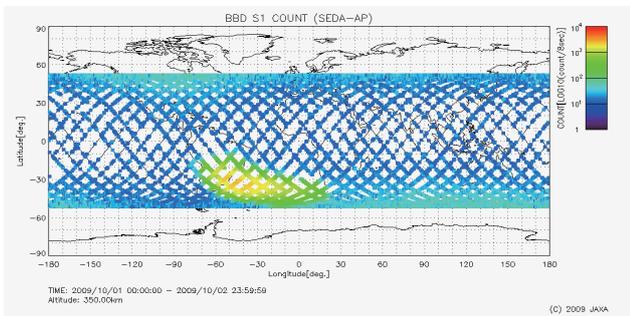


図2 BBNDのS1(最小エネルギー) カウントデータ

6.2. 中性子(高エネルギー)データ(ファイバー型 FIB(10MeV-100MeV))

観測データの一部を図3に示す。図3は、最外殻のシンチレーション・ファイバが光った時は計測しないモードで、荷電粒子を排除して、中性子だけ(ガンマ線も含む)を計測するモードでとらえた中性子の飛跡データである。この飛跡の長さ(1マスが10MeV)から、エネルギーを算出することができる。

太陽フレア発生時の中性子データ解析を行い、太陽フレア時の粒子加速機構の解明やISS軌道への中性子の影響について研究を行う予定である。

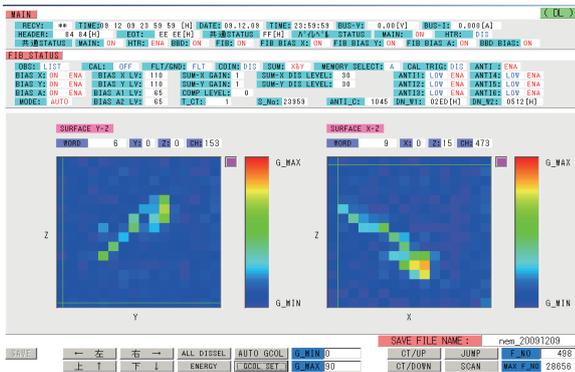


図3 ファイバー型中性子計測装置のデータ

6.3. 重イオン観測装置(HIT)

HITで計測した初期データの1部を図4に示す。同一のHITがADEOS(みどり)に搭載され、9か月間の観測結果、異常宇宙線が観測できた。異常宇宙線(ACR: Anomalous Cosmic Ray)は、米国のSampex衛星に次いで世界で2番目の観測であった。今回のISS/SEDAでは、3年以上計測できるので、さらに多くの統計データによる詳細な分布構造の解析が期待でき、ACRの研究に大きな寄与が期待できる。

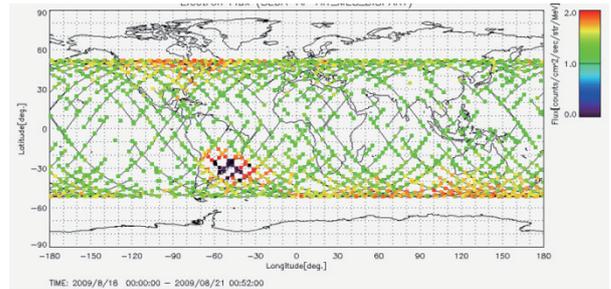


図4 HITで計測した全粒子の空間分布

6.4. プラズマ計測装置(PLAM)

PLAMのFloating電位の計測データの一部を図5に示す。このデータは、2009年12月9日の1日間のISS電位で、図のひと山が、1周分の約90分に相当する。電位は、ゼロから約-28Vまで周回ごとに電位の変動が計測できている。NASAの電位測定データと比較して、変動幅範囲などは、ほぼ一致していることを確認した。今後は、他の2か所の計測点とのデータ交換をして、人類初の巨大建造物の帯電構造を解明する予定である。

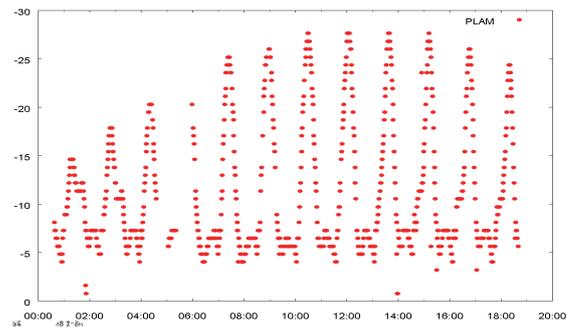


図5 PLAMで計測したJEM曝露部の帯電電位(1日分)

6.5. 高エネルギー軽粒子モニタ(SDOM)

SDOMで計測した初期データとして、電子のフラックスをISS軌道上の世界地図上にマップした分布図を図6に示す。得られたデータは、従来の放射線帯モデル(AP8/AE8)と比較し、妥当な分布、フラックスが得られている。

今後、太陽フレア時の計測データ解析により、フレア時に発生した荷電粒子がどの程度ISS軌道まで飛

来するかを明らかにし、宇宙飛行士の有人被爆管理の支援を行う予定である。また、ISS高度(約400km)の放射線データは、計測データが少なく、継続的なデータ蓄積により、放射線帯モデルへの貢献が期待される。

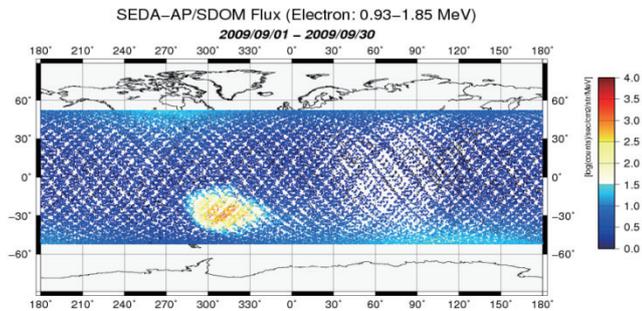


図6 SDOMで計測した電子(0.93-1.85MeV)分布

6.6. 原子状酸素モニタ(AOM)の初期データ

図7に詳細校正前の計測データの一例(AOMのフラックス)を示す。現在、詳細校正データを取得中で、終了後、原子状酸素モデルとの比較、長期データ取得による季節変化等を調べる予定である。

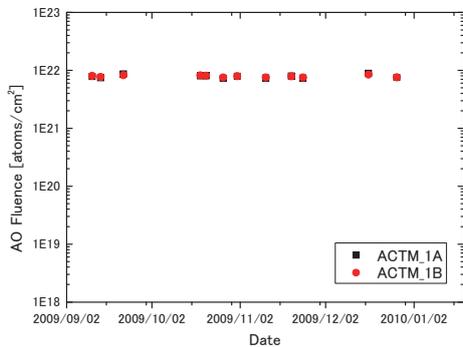


図7 AOMの計測例

6.7. 電子部品評価装置(EDEE)の初期データ

シングルイベントの計測結果を以下に示す。計測期間(2009/8/15~2009/10/23)のデータである。以下の略号はSEUは、シングルイベント(Single Event Upset)、SELは、ラッチアップ(Single Event Latchup)、SEBは、バーンアウト(Single Event Burnout)である。

- V70-MPU SEU/SEL: 観測されなかった
- 1M SRAM SEU: 5回のSEU観測/512Kメモリ領域
- 同上 SEL: 観測されなかった
- PowerMOSFET(@175V) SEB: 観測されなかった

6.8. 微小粒子捕獲実験装置/材料曝露実験装置(MPAC&SEED)

MPAC&SEEDは、STS-131ミッション期間中にEVAでISS船内へ回収された。同フライトは山崎宇宙飛行士が搭乗したフライトでもある。回収したMPAC&SEEDサンプルは同フライトによって地上へ帰還した。射場での簡易的な点検後、日本への発送を行い、平成22年5月26日につくば宇宙センターに到着した。現在解析準備を行っているところである。

7. データ公開状況

宇宙飛行士の被爆管理や、部品等の放射線等による誤動作に直接関係する高エネルギー軽粒子モニタ(SDOM)に関して、SEES(Space Environments & Effects System: <http://sees.tksc.jaxa.jp>)にて、準リアルタイムプロットの公開を開始した。

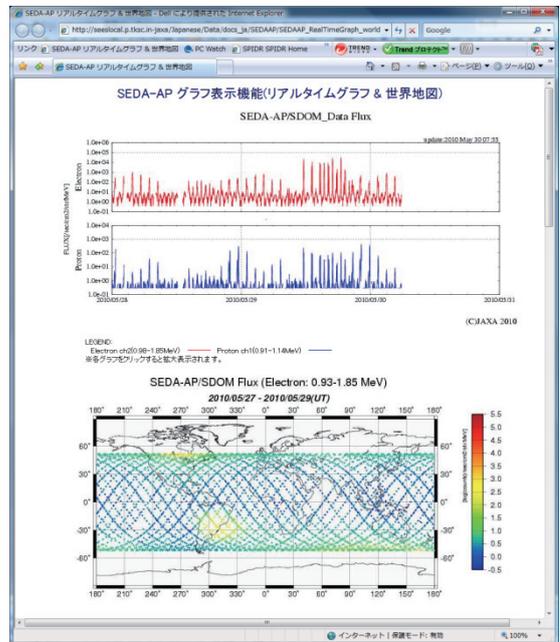


図8 SDOMデータ公開画面

図8は、上2つのグラフが、電子(0.98~1.85MeV)、陽子(0.91~1.14MeV)の準リアルタイムグラフ(3日間)を示している。また、下のグラフは、直前の3日間のデータを世界マップに投影した図を示している。

8. まとめ

宇宙環境計測装置(SEDA-AP)は、軌道上での初期チェックアウトの完了を2009年9月17日にJAXA機構内審査会で確認し、定常的な観測体制に入った。今後、日本人宇宙飛行士の長期滞在する宇宙環境、すなわち中性子をはじめとする放射線環境、プラズマ環境ときぼうの静電電位、原子状酸素の環境、微小宇宙ゴミやダストの環境、それらの環境が宇宙用部品・材料

に及ぼす影響を3年間計測し続ける予定である。

また、得られた宇宙環境計測データは、宇宙工学、科学研究の両分野等にわたる広いユーザ等に公開し、JAXAの宇宙環境公開Web(SEES)を通じて利用される予定である。

文 献

- [1]Matsumoto, H., T. Goka, K. Koga, S. Iwai, T. Uehara, O. Sato, and S. Takagi, Real-time measurement of low-energy-range neutron spectra on board the space shuttle STS-89 (S/MM-8), Radiation Measurements, 33, 321, 2001.
- [2]Koshiishi, H., H. Matsumoto, A. Chishiki, T. Goka, T. Omodaka, Evaluation of neutron radiation environment inside the International Space Station based on the Bonner Ball Neutron Detector experiments, Radiation Measurements, 42, 1510-1520, 2007.
- [3]Koga, K., T. Goka, H. Matsumoto, Y. Muraki, K. Masuda, and Y. Matsubara, Development of the fiber neutron monitor for the energy range 15-100 MeV on the International Space Station (ISS), Radiation Measurements, 33, 297, 2001.
- [4]Galica, G. E.et.al, "Atomic Oxygen Monitor Based On Carbon Actinometers," Proceedings of the 10th International Symposium on "Materials in a Space Environment" (ISMSE) and 8th International Space Conference on "Protection of Materials and Structures from the Space Environment" (ICPMSE), June 2006 (SP-616, September 2006)
- [5] Kimoto Y., et al,"Space Environment Effects on Materials at Different Positions and Operational Periods of ISS", Proceeding of The 8th International Space Conference on "Protection of Materials and Structures from the Space Environment" (ICPMSE) May 2008
- [6]Proc. of International Symposium on "SM/MPAC&SEED Experiment", Japan,2008, JAXA-SP-08-015E, 2009.
- [7] 五家建夫、「きぼう曝露部搭載宇宙環境計測装置 (SEDA-AP)の開発と初期データ」、平成21年度宇宙環境利用の展望 第4章、JAROS、平成21年度発行