

ISS 3D-CAD モデル及び PHITS を用いた JEM 船内の被ばく線量評価

○後藤 亜希¹, 島崎 一紀¹, 佐藤 達彦² (¹宇宙航空研究開発機構, ²日本原子力研究開発機構)

Exposure Dose Estimation inside JEM Using ISS 3D-CAD Model and PHITS
Aki GOTO, Kazunori SHIMAZAKI, and Tatsuhiko SATO (JAXA)

Key Words: Space Radiation, Exposure Dose Estimation, PHITS

1. 諸言

14 の宇宙機関から構成されている国際宇宙探査協同グループ (International Space Exploration Coordination Group: ISECG) は、国際宇宙ステーション (ISS) ミッションに次ぐ国際有人探査ミッションとして、月近傍宇宙ステーション (Deep Space Gateway) での長期滞在ミッションや、月面及び火星面探査を検討している^[1]。月近傍及び火星面といった地磁気圏外 (Beyond Low Earth Orbit: BLEO) は、ISS 軌道と比較し、宇宙放射線の線量率が高い環境である^[2]。BLEO 環境での有人長期滞在ミッションでは、一度のミッション参加にて、宇宙飛行士の被ばく線量が現在制定されている被ばく線量制限値^[3]を超過する可能性がある。したがって、宇宙飛行士の放射線被ばくによる健康被害 (確定的影響及び確率的影響) を発生させないためには、BLEO ミッションのための放射線防護技術の確立が不可欠である。

放射線防護技術として、高精度な被ばく線量予測及び算定技術の確立や、有人宇宙船遮蔽設計の最適化などがある。前者について、我々の最終目標は、実際のミッションに適用可能な被ばく線量予測及び算定手法の構築である。現在その手法として、放射線輸送コードを用いた数値シミュレーションを基盤としたシステムを想定している。このような手法を実際のミッションで適用するには、放射線輸送コードや宇宙放射線環境モデルの精度、及び宇宙機形状データの適切な設定について、検証する必要がある。

今回、既存宇宙放射線環境モデルの精度、及び宇宙機形状データの適切な設定について検討するために、放射線輸送計算用 ISS 及び JEM (Japan Experiment Module: ISS「きぼう」日本実験棟) 3D-CAD モデルを作成し、JEM 内部線量を放射線輸送モンテカルロコード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)^[4] を用いて計算した^[5]。宇宙放射線環境モデルの精度は、PHITS を用いた計算値と、受動型積算線量計 (固体飛跡検出器: CR-39 プラスチック及び熱蛍光線量計: TLD-MSO) を用いた JEM 内部のエリアモニタリング実験である Area PADLES (Passive Dosimeter for Lifescience Experiments in Space)^[6]での実測値を比較することで、検証した。また、宇宙機形状データの適切な設定については、ISS 及び JEM 形状モデルを用いた場合の計算結果を比較することで、検討した。

本稿では、ISS 及び JEM 3D-CAD モデルの概要、計算条件、及び計算結果について示す。

2. 本検討

2.1. ISS 及び JEM 3D-CAD モデル

放射線輸送計算用の部分 ISS (以降 ISS 3D-CAD モデルと記す) 及び JEM 3D-CAD モデルを、UG NX 8.0 ソフトウェアにて作成した。ISS 及び JEM モデルの外観を、**図 1** に示す。

ISS モデル (**図 1a**) は、JEM、JEM 近傍のモジュール (Node 1~3, U. S. Lab, Columbus, PMM)、及び他の構造体 (Truss 構造、Cupola、Airlock (Quest)、PMA) を含む。JEM 以外のモジュールや構造体については、単純な形状としている。例えば、Node 1~3 などのモジュールは、単純な円柱としている。JEM は、口述の JEM モデルと同様の形状としている。

JEM モデル (**図 1b**) は、与圧部 (PM)、補給部 (ELM-PS)、曝露部 (ELM-PS)、Node 2 を含む。特に PM 及び ELM-PS については、与圧壁、デブリバンパ、実験及びシステムラック、JEM エアロックなどの形状を可能な限り再現している。

ISS 及び JEM モデルデータ (.stp 形式) を PHITS のインプットファイル形式に変換するため、中国科学院原子力安全研究所が開発した SuperMC (Super Monte Carlo Program for Nuclear and Radiation Simulation)^[7]ソフトウェアを使用した。SuperMC にて変換した ISS 及び JEM の形状データについて、各々の構造体の組成及び密度データを導入した。JEM 以外のモジュール及び構造体については、Al からなるものとした。JEM は Al 合金 (A2219、A6061、A7075) または Al からなるものとし、内部空間は空気とした。モデル上での質量が実物と可能な限り同じになるよう、各構造体の密度を調整した。

ISS モデル中の JEM 及び JEM モデルの内部には、17 個の仮想的な PADLES 線量計 (縦: 15 cm x 横: 15 cm x 厚さ: 4 mm) を設置した。仮想線量計の設置位置は、実際の Area PADLES 線量計の設置位置と同様である (**図 2**)^[6]。仮想線量計は CR-39 プラスチック (C₁₂H₁₈O₇) からなるものとし、その厚さは Area PADLES 線量計と同程度である。

以上の通り作成した ISS 及び JEM 形状モデル (組成及び密度情報含む) について、仮想線量計中心位置から 4π 方向に対する平均遮蔽厚及び遮蔽厚分

布を、PHITS を用いた Ray-tracing にて算出した。計算結果について、3.1 及び 3.2 項にて言及する。

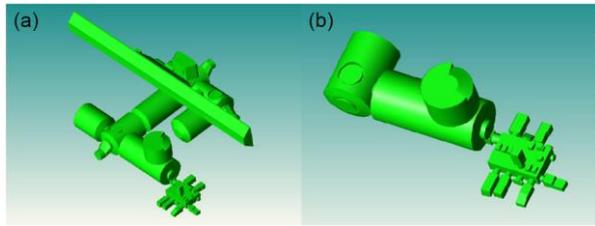


図 1 (a) ISS 及び (b) JEM 3D-CAD モデルの外観

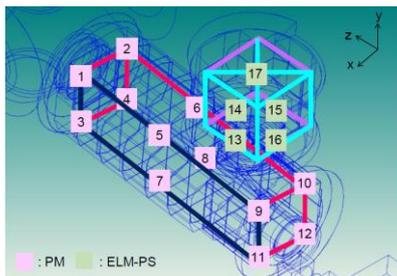


図 2 JEM 内部における仮想 PADLES 線量計の設置位置 (計 17 箇所)

2.2. 宇宙放射線環境モデル

捕捉陽子線モデルとして AP8^[8]、銀河宇宙線 (GCR) モデルとして Matthiä^[9]モデルを使用した。捕捉電子線は ISS 及び JEM 壁面に遮断され、JEM 内部の線量に寄与しないため、入射粒子として導入していない。宇宙放射線スペクトルは、過去の検討と同様の方法^[10]にて算出した。計算フローを図 3 に示す。

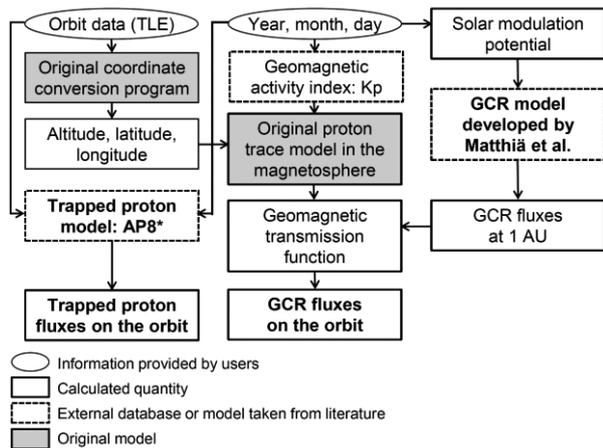


図 3 宇宙放射線スペクトルの計算フロー (*AP8: 東西効果は、0.5 または 0 とした)

宇宙放射線スペクトルの算出に必要な ISS 軌道及び期間として、Area PADLES #14 及び #15 のデータ^[11]を使用した。Area PADLES #14 及び #15 における線量計測期間を、表 1 に示す。また、これら期間

における ISS の平均高度及び太陽活動度 (F10.7)^[12] を図 4 に示す。

表 1 Area PADLES #14 及び #15 の線量計測期間

	Launch		Return		Period [days]
	Day	Flight	Day	Flight	
#14	2015/3/28	Soyuz TMA -16M	2015/9/12	Soyuz TMA -16 M	169
#15	2015/9/2	Soyuz TMA -18 M	2016/3/2	Soyuz TMA -18M	183

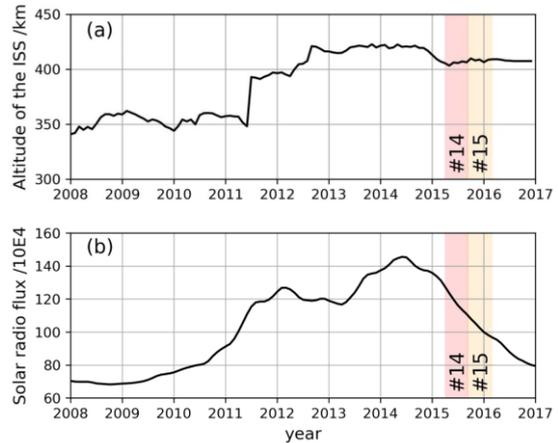


図 4 Area PADLES #14 及び #15 期間における (a) ISS の平均高度、(b) 太陽活動度 (F10.7)^[12]

捕捉陽子線の東西効果は、0.5 (考慮あり) 及び 0 (考慮なし) の 2 通りとした。東西効果は、ISS の進行方向 (+ X 方向) よりもその逆方向 (- X 方向) の方が、入射捕捉陽子数が大きくなるような偏りを指す。東西効果の導入は、西向き捕捉陽子が多い南大西洋異常帯 (SAA) を、ISS が通過することの考慮となる。なお、東西効果 0.5 は、ISS の進行方向から 0.25、逆方向から 0.75 の確率で捕捉陽子が入射することを意味する。

線源粒子は陽子 (H) から Ni までの原子核 (Z: 1 ~ 27) とし、エネルギーは 1 MeV/u ~ 1 TeV/u とした。以上のように算出した宇宙放射線スペクトルの例を、図 5 に示す。

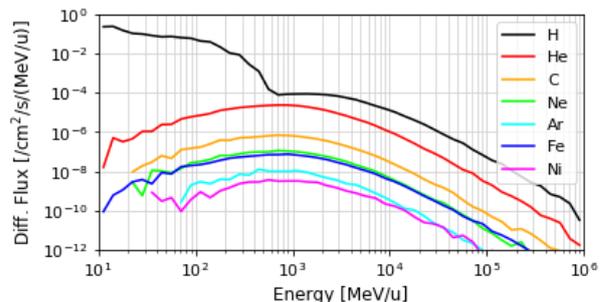


図 5 宇宙放射線スペクトル例 (Area PADLES #14 期間; H、He、C、Ne、Ar、Fe、Ni 核のスペクトルのみ記述)

2.3. PHITS

PHITS は、物質中における粒子の輸送や崩壊を、核反応モデルや核データライブラリを用いて模擬する、3-D モンテカルロ計算コードである^[4]。本稿における計算では、PHITS Ver. 3.03 を使用した。20 MeV 以下の中性子輸送については、Event generator mode Ver. 2 を使用した。

2.4. 計算機

放射線輸送計算は、JAXA スーパーコンピュータシステム (JSS2) 宙プレポストシステム (SORA-PP; 富士通 RX350 S8)^[13]を使用した並列計算にて実施した。並列化方法は、メモリ分散型 (MPI) とした。使用 CPU コア数は 120 (12 コア x 10 ノード) とし、使用メモリは 1 ノードあたり 50 GB とした。

2.5. 線量計算

図 3 に示す計算フローにて算出した宇宙放射線スペクトルを ISS 及び JEM 形状データに対して照射した際の、仮想線量計における吸収線量 (D) 及び線量当量 (DE) を、PHITS を用いたモンテカルロシミュレーションにより算出した。線量当量は、吸収線量に対し ICRP Publication 60^[14]にて定義された放射線加重係数 $Q(L)$ を乗じたものである。モンテカルロシミュレーションにおけるヒストリ数は、線量計算結果の統計誤差 (相対誤差; 標準偏差/平均値) が 10% 未満となるよう調整した。

3. 結果と考察

3.1. 仮想線量計からの平均遮蔽厚

ISS 及び JEM 形状モデル 組成及び密度情報を含む) について、Ray-tracing にて算出した仮想 PADLES 線量計の中心位置からの平均遮蔽厚を図 6 に示す。ISS 及び JEM モデルの平均遮蔽厚は、各々 29 ~ 72、24 ~ 62 g/cm² であり、いずれの線量計設置位置からの遮蔽厚についても、ISS モデルの方が JEM モデルよりも大きかった (図 6a)。PM 内部の Node 2 付近 (仮想線量計 No. 1 ~ 4) の平均遮蔽厚が大きく、PM 内部の EF 付近 (仮想線量計 No. 9 ~ 12) 及び ELM-PS (仮想線量計 No. 14 ~ 17) は平均遮蔽厚が小さい傾向にあった。

また、JEM モデルの平均遮蔽厚は ISS モデルの 84 ~ 92% であり、特に PM 内部 (仮想線量計 No. 1 ~ 12) では、+X 方向側 (仮想線量計 No. 1, 3, 5, 7, 9, 11) の方が -X 方向側 (仮想線量計 No. 2, 4, 6, 8, 10, 12) よりも ISS モデルと JEM モデルの平均遮蔽厚の差が小さいことが分かった (図 6b)。これは、JEM に対して -X 方向側にのみ JEM 以外のモジュールや構造体が存在し (図 1a)、JEM 内部でも -X 方向側の方がこれらによる遮蔽影響が大きくなるためと考える。

3.2. 仮想線量計からの遮蔽厚分布

ISS 及び JEM 形状モデル (組成及び密度情報を含む) について、仮想 PADLES 線量計中心位置からの遮蔽厚分布を Ray-tracing にて算出した。ISS 形状

モデルの遮蔽厚分布の代表例を図 7a に示す。いずれの仮想線量計設置位置についても、最頻値は 10 ~ 20 g/cm² であったが、それ以上の遮蔽厚のデータも存在した。また、平均遮蔽厚の大きい傾向にあった PM 内部の Node 2 付近 (仮想線量計 No. 1) は、小さい傾向にあった箇所 (仮想線量計 No. 7, 13) と比較し、50 g/cm² 以上の確率が高いことが分かった。

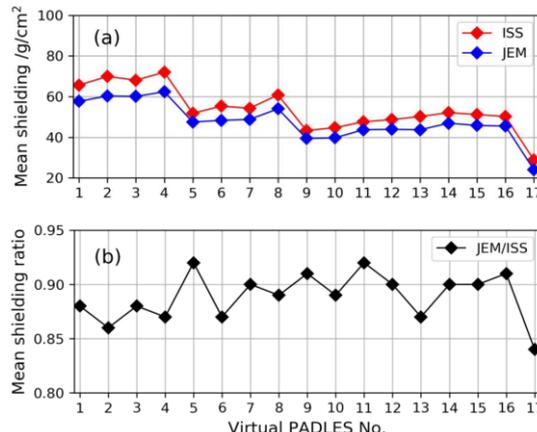


図 6 (a) 仮想 PADLES 線量計 (計 17 箇所) 中心位置からの平均遮蔽厚計算結果、(b) ISS モデルに対する JEM モデルの平均遮蔽厚比

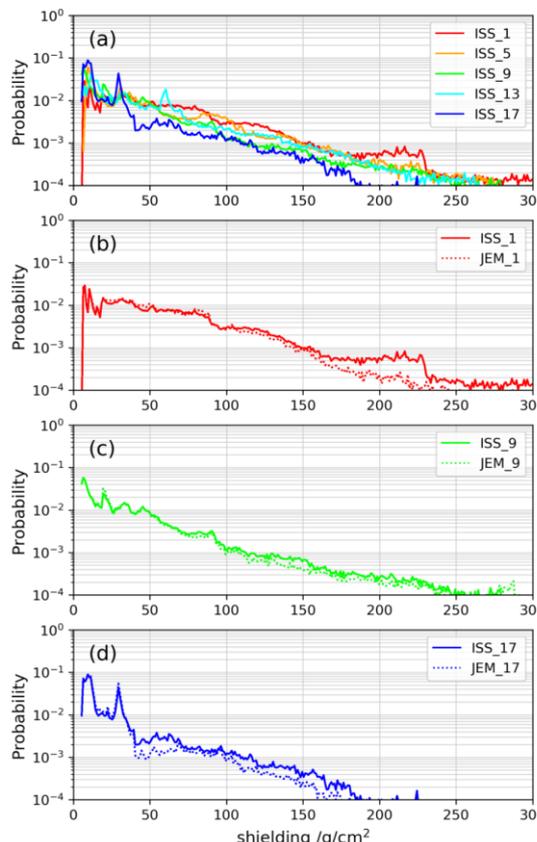


図 7 仮想 PADLES 線量計中心位置からの遮蔽分布計算結果 (a) ISS モデル (PADLES No. 1, 5, 9, 13, 17)、(b) ~ (d) ISS (実線) 及び JEM (波線) モデル (PADLES No. 1, 9, 17)

ISS 及び JEM 形状モデルについて、遮蔽厚分布の比較を図 7b-d に示す。いずれの仮想線量計設置位置についても、ISS と JEM 形状モデルの遮蔽厚分布の傾向は近いものの、ISS 形状モデルの方が $\sim 50 \text{ g/cm}^2$ 以上の確率が高いことが分かった。 $\sim 50 \text{ g/cm}^2$ 以上での遮蔽厚分布の差異が、両形状モデルの平均遮蔽厚の差異 (図 6) に寄与したと考えられる。

3.3. 線量計算結果

図 8 に仮想 PADLES 線量計における吸収線量 (D) 及び線量当量 (DE) の計算値と実測値を示す。図 9 に仮想線量計における D 及び DE の実測値に対する計算値の比 (C/E) を示す。Area PADLES #14 と #15 のいずれについても、東西効果の考慮の有無や形状モデルの差異 (ISS または JEM) に関わらず、大部分の仮想線量計設置位置について D 及び DE の計算値は実測値と各々 $\sim 20\%$ 、 $\sim 30\%$ 以内で一致した。この結果より、PHITS、AP8 及び Matthia モデル、今回作成した形状モデルの組合せは、被ばく線量評価の上で十分な精度を持つと言える。

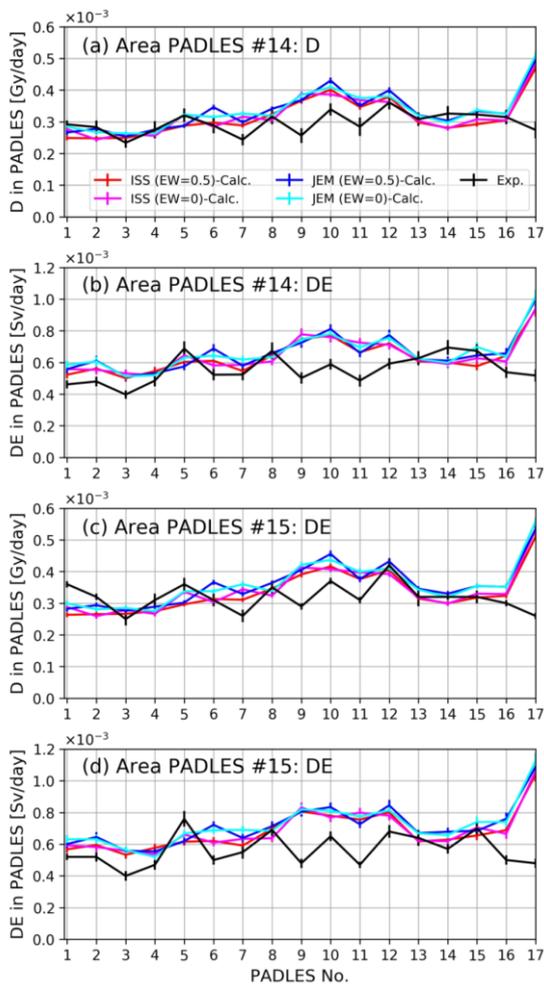


図 8 仮想 PADLES 線量計における吸収線量 (D) 及び線量当量 (DE) の計算 (Calc.) 及び実測 (Exp.) 値 (EW:東西効果; 計算値のエラーバーは、モンテカルロシミュレーションにおける統計誤差 (標準偏差) であり、実測値のエラーバーは複数の系統的誤差を考慮した統計誤差である^[6])

なお、PM 内部の EF 付近 (仮想線量計 No. 9 ~ 11) 及び ELM-PS 内部の天頂部 (仮想線量計 No. 17) は、計算値が過大評価する傾向にあった。その要因の一つとして、特に後者 (仮想線量計 No. 17) については、形状モデルと実物の遮蔽環境の齟齬が考えられる。実際の、ELM-PS 内部の天頂部には、多数の貨物が保管されているが、今回作成した形状モデルは貨物の存在を考慮していない。したがって、形状モデルの仮想線量計 No. 17 位置は、遮蔽環境を過小評価している可能性が高く、このことが線量計算値の過大評価に影響したものと考えられる。

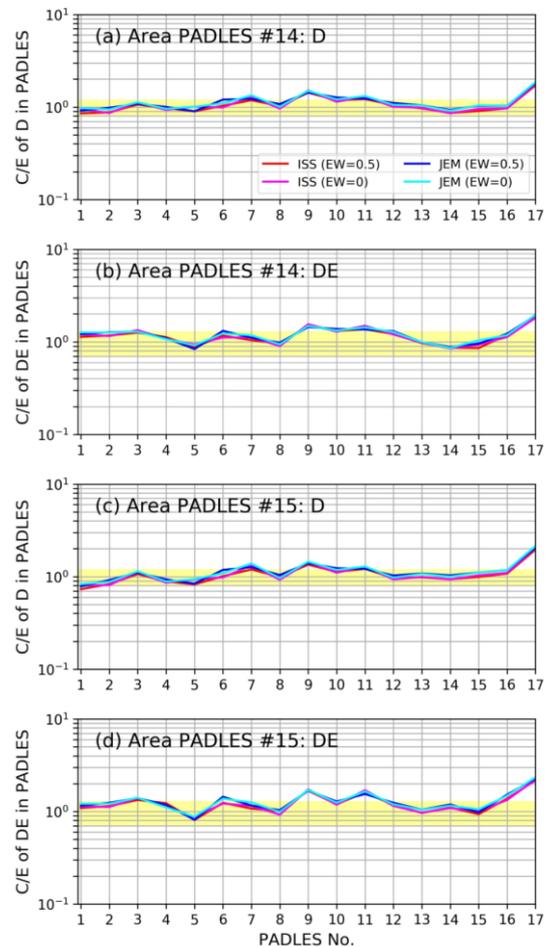


図 9 仮想 PADLES 線量計における吸収線量及び線量当量の実測値に対する計算値 (C/E): (a), (b) Area PADLES #14, (c), (d): Area PADLES #15

仮想線量計における D 及び DE の実測値に対する計算値 (C/E) の平均値及び標準偏差 (17箇所における) を表 2 に示す。東西効果の導入有無が線量計算結果に与える影響はわずかであることが分かった。線量予測精度向上の手法として、捕捉陽子線の異方性の考慮は、それほど重要ではないと言える。また、ISS と JEM 形状モデルの差異が、線量計算精度に与える影響も小さいことが分かった。なお ISS と JEM モデルの平均遮蔽厚の差が大きい、すなわち、JEM 内部の遮蔽環境をより再現していると考え

られる -X 側の仮想線量計 (No. 2, 4, 6, 8, 10, 12) のみを抽出しても、ISS と JEM 形状モデルの差異が、線量計算精度に与える影響は小さかった。

以上より、被ばく線量を精度よく計算するには、宇宙船形状データについて、遮蔽厚分布の頻度の高いデータ (今回の場合、 $\sim 50 \text{ g/cm}^2$ 未満のデータ) を可能な限り実物に合わせる事が重要と言える。そして、線量計測点近傍の形状データ (今回の場合 JEM 内部) を可能な限り再現すれば、計測点から離れた箇所の形状を考慮しなくても、ある程度精度の高い計算が可能と言える。モンテカルロシミュレーションの計算時間効率を考慮すると、計測点近傍の遮蔽環境を再現した上でコンパクト化した形状データを用いることが、短時間で高精度な被ばく線量計算を実現するものと考えられる。

表 2 仮想 PADLES 線量計における吸収線量及び線量当量の実測値に対する計算値 (C/E) の平均値及び標準偏差 (Area PADLES #14及び #15)

	East west	ISS model	JEM model	
#14	D	0.5	1.07±0.22	1.13±0.22
		0	1.09±0.25	1.14±0.24
	DE	0.5	1.17±0.24	1.21±0.26
		0	1.18±0.26	1.22±0.26
#15	D	0.5	1.07±0.28	1.14±0.28
		0	1.09±0.30	1.15±0.31
	DE	0.5	1.24±0.33	1.30±0.33
		0	1.25±0.34	1.31±0.35

4. 纏め

BLEO 環境における有人長期滞在ミッションに適用可能な宇宙放射線被ばく線量予測及び算定手法の確率に向け、放射線解析用 ISS 及び JEM 3D-CAD モデルを作成し、PHITS 及び既存宇宙放射線環境モデルを用いて、JEM 内部の線量評価を行った。PHITS、AP8 及び Matthia モデル、今回作成した ISS 及び JEM 形状モデルの組合せでは、D 及び DE が実測値と各々 $\sim 20\%$ 、 $\sim 30\%$ 以内で一致し、被ばく線量評価の上で十分な精度を有する線量計算が可能であることが分かった。また、捕捉陽子線モデルの異方性の考慮や、JEM 以外のモジュール及び構造体の存在は、線量計算精度の向上に大きく影響しないことも分かった。後者を考慮すると、計測点近傍の遮蔽環境を再現した上でコンパクト化した形状データを用いることが、短時間かつ高精度な被ばく線量評価の上で重要と考える。今後、期間網羅的な検証や、捕捉陽子線モデル AP9 を用いた検証、アクティブ線量計での実測値との比較などを通して、宇宙放射線環境モデルの精度に関する詳細検討を行う計画である。

5. 謝辞

ISS 及び JEM 3D-CAD モデル作成の上で支援いただきました、JAXA 池田直美主幹研究開発員、榎田大輔研究開発員、早稲田真平研究開発員、株式会社 IHI エスキューブ伊藤賢司氏に感謝いたします。

6. 参考文献

- 1) ISECG, The Global Exploration Roadmap (3rd edition), 2018.
- 2) Zeitlin, C. et al., Measurements of Energetic Particle Radiation in Transit to Mars on the Mars Science Laboratory, Science 340, 1080-1084, 2013.
- 3) JAXA 国際宇宙ステーション搭乗宇宙飛行士放射線被ばく管理規程 (2013 年改正) .
- 4) Sato, T. et al., Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol. 55, 684-690, 2018.
- 5) Goto, A. et al., 42nd COSPAR Scientific Assembly, F2.2-0005-18, 2018.
- 6) Nagamatsu, A. et al., Area radiation monitoring on ISS Increments 17 to 22 using PADLES in the Japanese Experiment Module Kibo, Radiat. Meas. 59, 84-93, 2013.
- 7) Wu, Y., et al., CAD-based Monte Carlo program for integrated simulation of nuclear system SuperMC, Ann. Nucl. Energy, 82, 161-168, 2015.
- 8) Sawyer, D. M., et al. AP-8 trapped proton environment for solar maximum and solar minimum, NSSDC/WDC-A-R/S-76-06, 1976.
- 9) Matthia, D., et al., A ready-to-use galactic cosmic ray model, Adv. Space Res. 51, 329-338, 2013.
- 10) Sato, T., et al. Comparison of cosmic-ray environments on earth, moon, mars and in space craft using PHITS, Radiat. Prot. Dosim., 1-4, 2017.
- 11) JAXA ISS 宇宙放射線環境計測データベース: <http://iss.jaxa.jp/spacerad/index.html>
- 12) JAXA 宇宙環境計測情報システム (Space Environment & Effects System: SEES): http://seesweb.s.tkscl.in-jaxa/Japanese/Top/top_jaxa_j.shtml
- 13) JAXA スーパーコンピュータシステム (JAXA Supercomputer System Generation 2: JSS2): <https://www.jss.jaxa.jp/>
- 14) ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21, 1-3, 1991.