

放射線挙動解析コード PHITS を用いた宇宙線被ばく線量評価

佐藤達彦¹, 永松愛子², 上野遥², 片岡龍峰³, 三宅晶子⁴, 武田和雄⁵, 仁井田浩二⁵

1. 日本原子力研究開発機構 (JAEA)
2. 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
3. 国立極地研究所 (極地研)
4. 茨城工業高等専門学校 (茨城高専)
5. 高度情報科学技術研究機構 (RIST)

1. はじめに

人類は絶えず宇宙線に被ばくしており、その被ばく線量を正確に評価することは、宇宙飛行士や航空機乗務員の健康管理のみならず、国民の放射線被ばくに対する理解促進にも重要となる。そこで我々は、モンテカルロ放射線挙動解析コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) [1]を基本とした宇宙線被ばく線量評価モデルの開発を進めている。

モデルは、銀河宇宙線 (Galactic Cosmic-Ray, GCR) や捕捉放射線など恒常的な被ばく (以下、通常時) と、太陽フレアに伴って放出される太陽高エネルギー粒子 (Solar Energetic Particle, SEP) による突発的な被ばく (以下、突発時) に分けて開発している。それぞれの被ばくの特徴を表1にまとめる。通常時に対しては、これまで豊富なデータが蓄積されており、それらは、一部の例外を除き我々のモデルで精度 20%程度の範囲で再現可能となっている。一方、突発時に対しては、イベント毎に状況が大きく異なり、データもあまり蓄積されていないことからモデルの再現性は十分とは言えず、現在、科研費新学術領域「太陽地球圏環境予測 (PSTEP)」の枠組みでその改良が進められている。本稿では、これまで開発してきた通常時における被ばく線量評価モデルの概要を解説する。

表1 被ばく形態別の宇宙線被ばく線量*とそれに寄与する主な宇宙線の種類

被ばく形態	通常時	突発時
宇宙飛行士 (船外活動中)	約 1 mSv/day GCR・捕捉陽子・捕捉電子 (電子は皮膚と水晶体のみ影響)	最大 数 Sv/イベント SEP ($E > 2$ MeV), 電子 ($E > 1$ MeV)
宇宙飛行士 (ISS 滞在中)	約 0.5 mSv/day GCR・捕捉陽子	最大 数 100 mSv/イベント SEP ($E >$ 数 10 MeV)
航空機搭乗者	約 0.1 mSv/東京・ニューヨーク往復 GCR (主に 2 次中性子)	最大 数 mSv/イベント SEP ($E > 100$ MeV, 主に 2 次粒子)
公衆	約 0.3 mSv/年 GCR (主に 2 次ミューオン)	最大 数 μ Sv/イベント SEP ($E > 500$ MeV, 主に 2 次粒子)

*概算値であり、実際の値は太陽活動や遮へい条件に大きく依存する

2. PHITS の概要

PHITS は、様々な核反応モデルやデータライブラリを用いて任意形状の 3 次元体系内におけるほぼ全ての放射線挙動を解析可能であるため、放射線施設の設計、医学物理計算、放射線防護研究、宇宙線・地球惑星科学など、工学、医学、理学の多様な分野で国内外 2,500 名以上の研究者・技術者に利用されている（図 1 参照）。その入手方法は、年 10 回ほど開催されている PHITS 講習会[2]に参加するか、RIST 原子力コードセンター[3]に依頼する方法がある。図 2 に、PHITS に含まれる物理モデルの一覧を示す。PHITS では、解析する粒子の種類やエネルギーにより最適なモデルやデータベースを選択して計算するように設計されている。

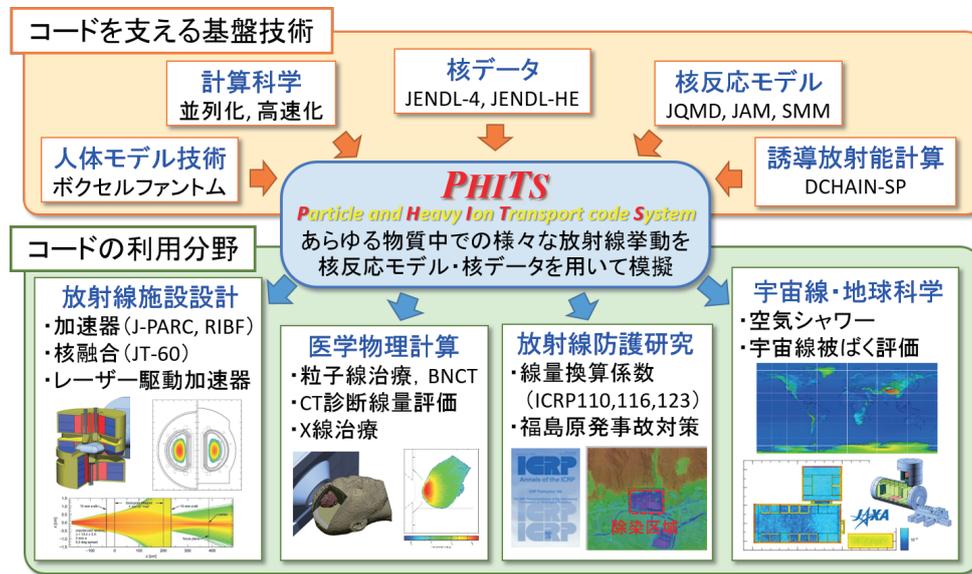


図 1 PHITS コードの概要 (PHITS ホームページより抜粋)

	中性子	陽子・π粒子 (その他の核子)	重イオン	μ粒子	電子・陽電子	光子
高エネルギー	1 TeV		1 TeV/u	1 TeV		1 TeV
↑	核内カスケード模型 JAM 3.0 GeV + 蒸発模型 GEM		量子分子 動力学模型	仮想光子 核反応 JAM/ JQMD + GEM		光核反応 JAM/ JQMD + GEM + JENDL + NRF
	核内カスケード模型 INCL4.6 ^d + 蒸発模型 GEM		JQMD + 蒸発模型 GEM	200 MeV	EGS5	EGS5
	20 MeV		10 MeV/u			
	核データ ライブラリ JENDL-4.0	1 MeV	電離損失 ATIMA		1 keV	1 keV
低エネルギー	10 ⁻⁵ eV	1 keV				

図 2 PHITS に組み込まれた物理モデル

3. PHITS に入力する宇宙線フラックスの計算手法

PHITS を用いてある体系（例えば宇宙ステーションや大気圏）内の宇宙線被ばく線量を計算するためには、その体系の外から入射する宇宙線フラックスを決定する必要がある。その決定方法の流れを図3に示す。ユーザーが指定する必要のあるデータは、宇宙線フラックスを計算したい年月日と Two Line Element 形式で表現した衛星軌道データのみである。

まず、TLE データを捕捉陽子・電子モデル AP9/AE9[4]に入力することにより、指定した条件に対する捕捉放射線フラックスを計算する。次に、TLE データを JAXA オリジナル座標変換プログラムに入力して緯度・経度・高度に変換する。そして、変換した緯度・経度・高度情報を磁気圏内粒子トレースモデル[5]に入力し、その地点から反陽子を様々な方向に放出して磁気圏外に抜けられる割合を計算することにより、磁気圏透過係数が計算できる。その際、磁場モデルとしては Tsyanenko89[6]を利用しているが、今後、より詳細なモデルに更新することを検討している。なお、特定の地点に対して計算したい場合は、直接、緯度・経度・高度を磁気圏内粒子トレースモデルに入力することも可能である。

一方、入力した年月日情報と地上中性子モニタ計数率データベース[7,8]を用いることにより、太陽変調係数（通称 W 値）を決定する。そして、得られた磁気圏透過係数と太陽変調係数をドイツ DLR が開発した銀河宇宙線モデル[9]に入力することにより、指定した条件に対する銀河宇宙線フラックスを計算する。計算した捕捉放射線及び銀河宇宙線フラックスは、次章で解説する PHITS シミュレーションに線源情報として入力される。

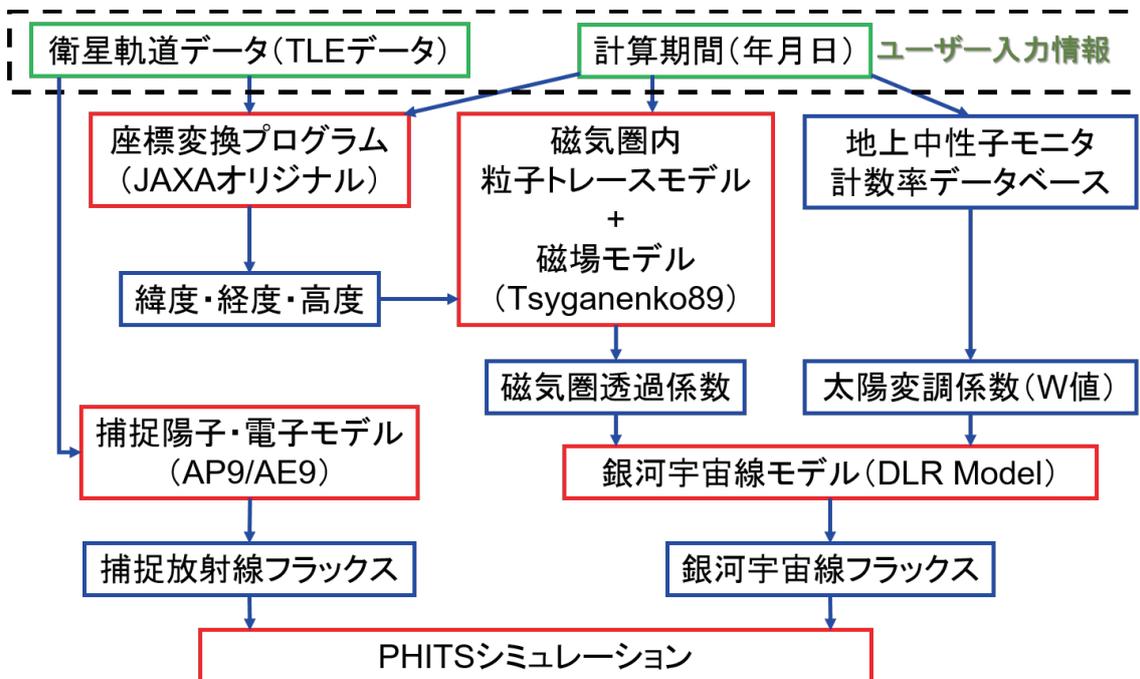


図3 PHITS に入力する宇宙線フラックスの決定方法（通常時）

4. PHITS シミュレーション

PHITS で被ばく線量を計算するには、ある場所における付与エネルギーを直接計算する手法[t-deposit]と、その場所における放射線フルエンスを計算して線量換算係数を乗じる手法[t-track]がある。前者は物質の吸収線量を推定し、後者は、人体の被ばく線量を推定する手法があり、本稿では後者を解説する。線量換算係数は、国際放射線防護委員会（ICRP）から発行される刊行物[10,11]にまとめられており、その評価にも PHITS が利用された[12,13]。

図4に PHITS と線量換算係数を使った宇宙線被ばく線量評価方法の流れを示す。まず、前章で決定した宇宙線フラックスを線源情報として PHITS に入力し、大気及び地球内での宇宙線挙動を解析することにより大気圏内の宇宙線フラックスを計算した。その際、様々な場所や時間に対する計算を実施し、それらを磁気カットオフリジディティ (R_c)、 W 値、及び高度の関数として計算した。そして、その結果を数学モデル化することにより、緯度・経度・高度・年月日を入力すればその条件に対する宇宙線フラックスを瞬時に出力可能なモデル PARMA[14,15]を開発し、それを簡便に利用可能な Excel ファイル EXPACS[16]を公開した。さらに、その結果に線量換算係数を組み合わせることにより、航空機乗務員や公衆の宇宙線被ばく線量を簡便に評価可能とした。

また、国際宇宙ステーション（ISS）を模擬した仮想体系（仮想 ISS モデル）を JAXA が中心となって開発し、それを PHITS に組み込むことにより、ISS 内での様々な場所における宇宙線フラックスを計算した。そして、その結果と線量換算係数を組み合わせることにより、宇宙飛行士の被ばく線量を評価可能とした。

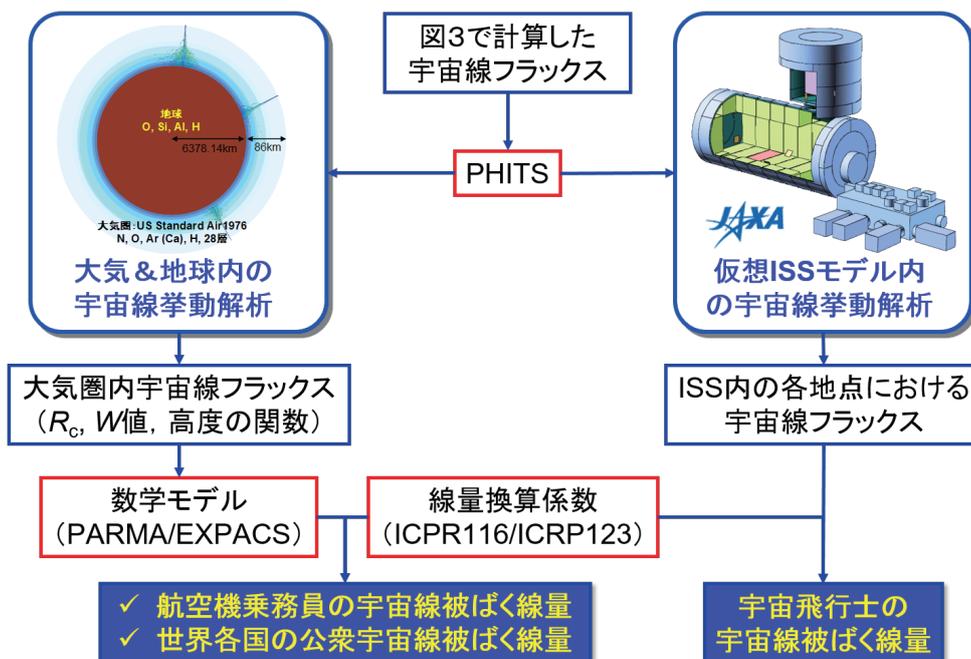


図4 PHITS と線量換算係数を使った宇宙線被ばく線量評価方法の流れ

5. 計算結果

本章では、これまでに発表した宇宙線被ばく線量計算結果をいくつか紹介する。古い計算結果も含まれており、必ずしも図3, 4に示した最新の手法で計算していない場合もある点、ご了承ください。

図5に、開発した PARMA モデルと全世界標高データ GTOPO30[17]を使って計算した地表面における宇宙線被ばく線量地図[18]を示す。図より、標高の高い地域や極域で高くなることが分かる。この地図に世界の人口分布で重み付けして平均した公衆の宇宙線被ばく線量は 0.32mSv/年 で、従来、国連科学委員会 (UNSCEAR) が推定していた値よりも約 16% 低いことが分かった。表2に、保田ら[19]が PARMA モデルと日本の航空会社の乗務員フライトスケジュールを組み合わせて評価した 2007 年度の年間宇宙線被ばく線量を示す。表より、評価した宇宙線被ばく線量は、最高値でもその管理目標値 (年間 5 mSv) を下回っていることが分かる。客室乗務員の方がパイロットよりも被ばく線量が高いのは、客室乗務員の方が年間の搭乗回数が多い傾向にあるためと考えられる。なお、PARMA に基づく大気圏内の宇宙線被ばく線量計算モデルは、様々な条件に対して測定した結果を精度約 10% の範囲内で再現できることが分かっている[14]。

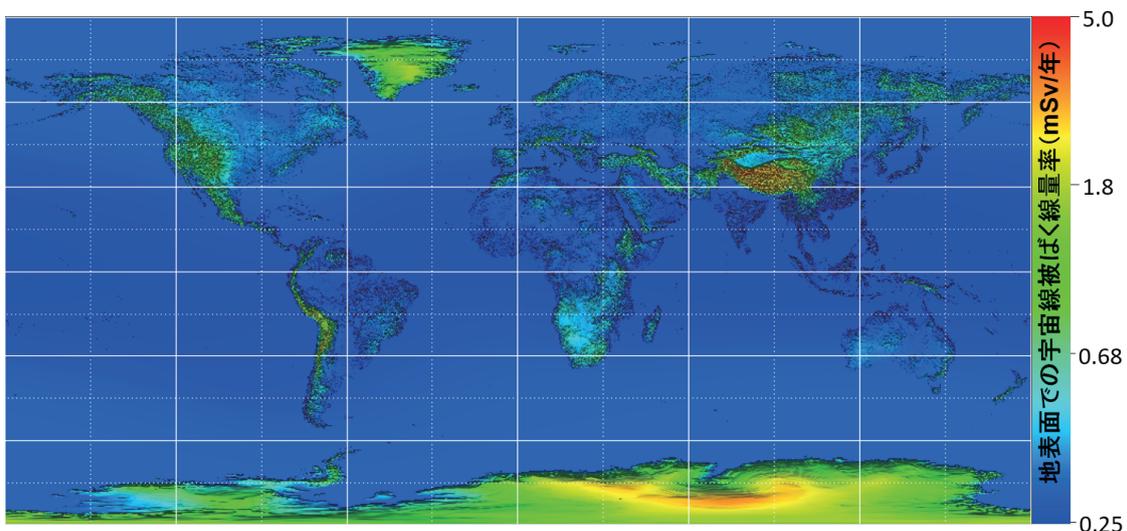


図5 PARMA モデルを使って計算した地表面における宇宙線被ばく線量地図

表2 PARMA モデルと日本の航空会社の乗務員フライトスケジュールを組み合わせて評価した 2007 年度の年間宇宙線被ばく線量[19]

	平均値 (mSv)	最高値 (mSv)
パイロット	1.68	3.79
客室乗務員	2.15	4.24

表3に、高度約380kmを周回するスペースシャトル内に滞在する宇宙飛行士の臓器吸収線量と線量当量の測定値[20]と計算値[21]の比較を示す。なお、測定値は、実際の宇宙飛行士ではなく数多くの検出器を埋め込んだ人体模型（ファントム）内での計測値であり、計算値は、図4に示した仮想ISSモデルではなく簡易的な宇宙機モデルを用いて導出した値である。表より、計算は実験を精度20%程度の範囲内で再現できることが分かる。ただし、宇宙機内の被ばく線量は、高度によって大幅に変動する捕捉陽子フラックスに大きく依存し、高い高度ではモデル計算の再現性が下がることが分かっている。今後、より精度よく宇宙飛行士の被ばく線量を評価するためには、より精度の高い捕捉放射線モデルの開発が望まれる。

表3 高度約380kmを周回するスペースシャトル内に滞在する宇宙飛行士の臓器吸収線量と線量当量の測定値[20]と計算値[21]

臓器名	吸収線量 (mGy/day)		線量当量 (mSv/day)	
	測定値	計算値	測定値	計算値
皮膚	0.22 ± 0.017	0.278	0.46 ± 0.005	0.544
肺	0.21 ± 0.032	0.197	0.45 ± 0.078	0.394
胃	0.24 ± 0.031	0.183	0.44 ± 0.096	0.362
骨髄	0.18 ± 0.010	0.191	0.35 ± 0.041	0.380
実効線量当量			0.41 ± 0.022	0.397

6. まとめ

PHITSを用いた宇宙線被ばく線量評価方法について解説した。これまでの研究により、銀河宇宙線による被ばく線量はモデル計算で精度良く評価可能となった。しかし、捕捉放射線に関しては、衛星軌道によっては測定値を再現できない場合があり、太陽高エネルギー粒子（SEP）被ばくに関しては、イベント毎に状況が大きく異なるためモデル計算の精度はまだ十分とは言えない。今後、測定データの蓄積や物理モデルの改良により、より高い精度で宇宙線被ばく線量を評価可能な計算手法を構築したいと考えている。一方、構築した手法を用いて、宇宙線被ばく線量を評価するのみならず積極的に低減する方策の提案を目指した応用研究がJAXAを中心として開始されている。宇宙放射線防護研究は、これまで我が国ではあまり実施されてこなかった研究分野であり、本稿が、宇宙放射線防護に関する新たな応用研究の発展に繋がれば幸いである。

参考文献

- [1]. T. Sato et al. J. Nucl. Sci. Technol. 50, 913-923 (2013).
- [2]. <http://phits.jaea.go.jp/Schej.html>
- [3]. <http://www.rist.or.jp/nucis/>

- [4]. G. P. Ginet et al., Space Sci. Rev. 179, 579-615 (2013).
- [5]. R. Kataoka et al., Space Weather 12, 380-386 (2014).
- [6]. <http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/modeling.html>
- [7]. http://neutronm.bartol.udel.edu/~pyle/bri_table.html
- [8]. <http://cosmicrays.oulu.fi/>
- [9]. D. Matthiä et al., Adv. Space Res. 51, 329-338 (2013).
- [10]. ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40 (2010).
- [11]. ICRP Publication 123, Ann. ICRP 42 (2013).
- [12]. T. Sato et al., Phys. Med. Biol. 54, 1997-2014 (2009).
- [13]. T. Sato et al., Phys. Med. Biol., 55, 2235-2246 (2010).
- [14]. T. Sato, PLOS ONE, 10, e0144679 (2015).
- [15]. T. Sato, PLOS ONE, 11, e0160390 (2016).
- [16]. <http://phits.jaea.go.jp/expacs/jpn.html>
- [17]. <https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>
- [18]. T. Sato, Sci. Rep. 6, 33932 (2016).
- [19]. 保田浩志, Isotope News 663, 8-12 (2009).
- [20]. H. Yasuda, J. Radiat. Res. 50, 89-96 (2009).
- [21]. T. Sato et al., Radiat. Environ. Biophys. 50, 115-123 (2010).