

# 公衆の宇宙線被ばく線量は 国や地域でどの程度異なるのか？

佐藤 達彦

Sato Tatsuhiko

## 1. はじめに

「私たちは、大地や食物のみならず宇宙から来る放射線にも日常的に被ばくしています。では、その宇宙線は、太陽由来と銀河由来、どちらが多いでしょうか？」この質問を大学の講義や講演会の冒頭でよく投げかけます。そして、ほとんどの場合「太陽由来」という回答が多数派となります。たしかに、太陽は銀河よりも極めて近くにあり、「巨大な太陽フレアが発生して地球の周りに強烈な太陽風が吹き付けた」というようなニュースもよく耳にするので、多くの方がそう答えるのは納得できます。しかし、太陽由来の宇宙線は、数は多いもののエネルギーがそれほど高くないため地磁気や大気によって遮られ、地上まではほとんど届きません。したがって、冒頭の質問の正解は「銀河由来」となります<sup>1</sup>。銀河由来の宇宙線は、数は少ないがエネルギーが高く、地磁気や大気を突き抜けて地上まで到達できるためです。

では、公衆の宇宙線被ばく線量はどの程度で、国や地域によりどのくらい異なるのでしょうか？原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）が2008年に発表したレポート<sup>1)</sup>では、公衆の宇宙線被ばく線量（実効線量）の世界平均値は年間0.38 mSvであり、全自然放射線による被ばく線量の約16%を占めると結論づけています。しかし、この値は代表地域として選んだたった2か所の実測とおおまかな人口分布から単純な仮定に基づいて推定した概算値であり、宇宙線強度の高度・緯度・経度に対する複雑な依存性や詳細な人口分布を考慮して評

価した値ではありません。そこで筆者らの研究グループでは、独自に開発した宇宙線強度計算モデルと様々なデータベースを組み合わせ、公衆の宇宙線被ばく線量の人口平均値や分散を世界230か国<sup>2)</sup>に対して詳細に評価し、その世界平均値を導出しました<sup>2)</sup>。本稿では、宇宙線被ばくの概要を解説するとともに、その評価手法や評価結果を簡単に紹介します。

## 2. 宇宙線被ばくの概要

銀河宇宙線とは、太陽圏外を起源とする高エネルギー放射線の総称で、主に陽子で構成されますが、ヘリウムイオンや鉄イオンなどより重いものも含まれます。そのエネルギーは、最も高いもので $10^{20}$  eV以上にもなりますが、エネルギーが大きくなると強度が急激に減少するため、公衆の宇宙線被ばくに寄与が大きいエネルギー帯は1 GeVから1 TeV程度となります。そのような高エネルギー放射線が発生する加速メカニズムはまだ解明されていませんが、 $10^{15}$  eV程度までは、超新星爆発が有力な候補と考えられています。このような強烈な宇宙線が大量に飛び交っているため、太陽圏外は、例え水や酸素を準備できたとしても人が住める環境ではありません。一方、地球は表1に示す3つのバリアによって護られているため、私たちは宇宙線被ばくを特に気にすることなく生活することができます。以下、その3つのバリアについてそれぞれ解説します。

1つ目のバリアは太陽風です。太陽風とは、太陽フレアなどによって放出されるプラズマ状の粒子で、そのプラズマ粒子が作る磁場には太陽圏に侵入

1 極めて巨大な太陽フレアが発生した場合は太陽由来の宇宙線による被ばく線量が多くなる場合もあります

2 独立していない一部の地域（例えばグリーンランドなど）も国として扱っています



してきた宇宙線を押し戻す効果があります。太陽風は、黒点数が増え太陽が活発になると太陽フレアの発生頻度が高くなり放出される量が多くなります。したがって、宇宙線被ばく線量は時間依存性を持ち、その値は太陽活動度と逆相関します。太陽活動度は約 11 年周期で変動し、太陽活動極大期は、極小期と比べて公衆の宇宙線被ばく線量が 15%ほど低くなります。

2つ目のバリアは地磁気です。地球は南北を軸とする巨大な磁石であり、エネルギーがそれほど高くない宇宙線は、その磁場により大きく曲げられるため宇宙空間へと跳ね返されます。特に、磁力線が地面と水平方向に走る赤道付近では、地球に向かって鉛直に侵入してきた宇宙線が大気に到達するまでには数多くの磁力線を横切る必要があるため、10 GeV以下のほとんどの宇宙線が跳ね返されます。一方、磁力線が地面と垂直方向に走る極域では、鉛直に侵入してきた宇宙線が磁力線に沿って大気圏まで簡単に到達できてしまうため、低エネルギーの宇宙線も流れ込んできます。したがって、地磁気バリア効果の大きさは鉛直に侵入してきた宇宙線の曲がり具合 (Cut-off rigidity) で表すことができ、その値は、極域で低く赤道付近で高くなります。ただし、実際の地磁気は極めて複雑な構造を持つため、cut-off rigidity は緯度・経度に複雑に依存します。この効果により、極域海面での宇宙線被ばく線量は赤道付近の 1.3 倍ほどになり、その比は標高が高くなるに従って 3 倍程度まで大きくなります。

3つ目のバリアは大気です。これまでに解説した2つのバリアは、磁場の影響をほとんど受けない 100 GeV 以上の宇宙線に対してはほぼ無力であるため、大気が、そのような高エネルギー宇宙線から私たちを護る最後の砦となります。大気は、水換算で約 10 m (~1,000 g/cm<sup>2</sup>) と極めて厚く、どのような放射線に対しても有効な遮蔽体だからです。大気に入射した宇宙線は、大気構成元素である窒素や酸素と核反応を引き起こし、陽子・中性子・パイオン、ミューオン、光子・電子・陽電子など様々な 2 次宇宙線を発生させます。発生した 2 次宇宙線は、更なる核反応などを起こしながら徐々に減衰していき、地表面まで届くのは高エネルギーミューオンや中性子など全体のわずか一部です。したがって、宇宙線被ばく線量は、標高が高くなるほど急激に上昇し、

表 1 私たちを宇宙線被ばくから護る 3 つのバリア

バリアの種類	バリアの強さを表す指標	バリアに起因する依存性	被ばく線量の変動幅 (最大値 / 最小値)
太陽風	太陽活動度	時間依存性	1.15 倍程度
地磁気	鉛直に侵入してきた宇宙線の曲がり具合 (Cut-off rigidity)	緯度・経度依存性	1.3 ~ 3 倍 (標高に依存)
大気	大気圧	高度依存性	20 倍程度

標高 5,000 m 付近では 0 m と比較して約 20 倍となります。

### 3. 公衆の宇宙線被ばく線量評価手法

このような複雑な依存性を考慮して公衆の宇宙線被ばく線量を評価するためには、UNSCEAR が用いたような実験値ベースの経験モデルでは不十分であり、大規模な数値シミュレーションが必要となります。そこで、まず筆者らは、原子力機構が中心となって開発しているモンテカルロ放射線輸送計算コード PHITS<sup>5)</sup> と原子力機構のスーパーコンピュータを用いて大気圏内の宇宙線挙動を詳細に再現し、様々な条件に対する宇宙線強度及び被ばく線量を包括的に計算しました。そして、その結果の大気圧、cut-off rigidity、及び太陽活動度に対する依存性を解析し、高度、緯度・経度、及び年月日を指定すれば、その条件に対する宇宙線強度や被ばく線量を瞬時に導出することが可能な数学モデル PARMA を開発しました<sup>3,4)</sup>。更に、その計算精度を様々な実測との比較により実証し、精緻な公衆の宇宙線被ばく線量評価を可能としました。なお、PARMA は最も信頼性の高い大気圏内の宇宙線強度計算モデルとして、航空会社による乗務員の宇宙線被ばく線量評価<sup>6)</sup> や、地球惑星科学で重要となる宇宙線による放射性核種生成量<sup>7)</sup> の推定など、様々な目的に使われています。また、PARMA やその応用ソフトウェア EXPACS はホームページ<sup>8)</sup> 上で一般公開されており、特に EXPACS は単なる Excel シートでインストールやコンパイルなどは不要なため、誰でも簡単に知りたい場所の宇宙線強度や被ばく線量を計算することができます。

この PARMA を用いて実施した全世界における公



衆の宇宙線被ばく線量評価の流れを図1に示します。まず、PARMAと世界標高データベースGTOPO30<sup>3</sup>を組み合わせ、地表面での宇宙線被ばく線量率マップ(図2)を作成しました。次に、計算した地表面での被ばく線量率を世界人口データベースGPWv3<sup>4</sup>に収録されたその土地の人口で重み付けし、建屋による遮蔽効果や屋内外滞在時間比を考慮して、各地域の人口加重宇宙線被ばく線量率を導出しました。そして、その結果を各国で集計することにより、世界230か国における公衆の宇宙線被ばく線量の人口平均値や分散を評価しました。また、全世界で集計することにより、1人あたりの年間宇宙線被ばく線量の世界平均値を導出しました。

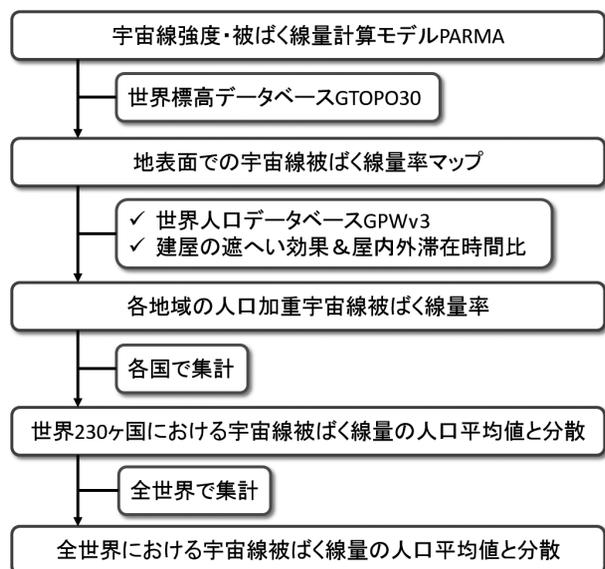


図1 PARMAを用いて実施した全世界における公衆の宇宙線被ばく線量評価の流れ

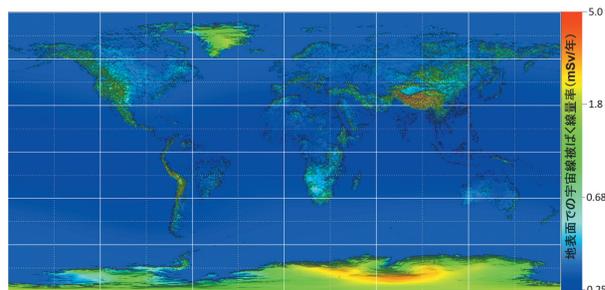


図2 地表面での宇宙線被ばく線量率マップ  
標高の高いチベット高原や、極地で比較的標高の高いグリーンランドや南極で特に高くなります

3 Global digital elevation model (GTOPO30)  
4 Gridded population of the world, version 3 (GPWv3)

#### 4. 公衆の宇宙線被ばく線量評価結果

表2に、人口が1億人以上の国における公衆の年間宇宙線被ばく線量の人口平均値、及びその最小/最大値を示します。なお、本稿で示す被ばく線量はすべてICRP2007年勧告<sup>9)</sup>に基づく実効線量で、太陽活動中間期における値を表します。表より、宇宙線被ばく線量は、アメリカやロシアなど比較的緯度の高い国で高く、バングラデシュ、インド、ナイジェリアなど赤道付近の国で低くなるのが分かります。これは、前述のように、宇宙線が地磁気の構造により極地方に集中して流れ込み、赤道付近にはあまり降り注がないことに起因します。また、同じような緯度でも、バングラデシュのように標高の低い土地に人口が集中している国は、大気による遮蔽効果が大きいため、被ばく線量が低くなります。日本の人口平均値は230か国中153番目となる0.27 mSv/年で、その最小及び最大値は0.24 mSv/年(沖縄県波照間島)及び0.86 mSv/年(富士山頂付近)でした。人口平均値が世界で最も高い国はボリビアで、その値は0.81 mSv/年にもなります。これは、ボリビアの人口の大部分が、首都ラパス(標高3,593 m)など極めて標高の高い土地に集中しているためです。一方、人口平均値が世界で最も低いのはシンガポールで、その値は0.23 mSv/年でした。これは、シンガポールが赤道付近に位置し、国土全体の標高が低いためです。計算したすべての国における宇宙線被ばく線量の人口平均値及びその最小・

表2 人口が1億人以上(2000年時点)の国における公衆の年間宇宙線被ばく線量の人口平均値、及びその最小/最大値

国名	人口(2000年時点)	人口平均値	最小値*	最大値*
全世界	6,033,968,093	0.32	0.23	6.1
中国	1,253,492,596	0.31	0.24	5.0
インド	1,008,934,399	0.27	0.23	5.5
米国	283,200,526	0.33	0.25	4.9
インドネシア	212,056,274	0.26	0.23	1.5
ブラジル	170,401,328	0.31	0.25	0.72
ロシア	145,489,933	0.32	0.27	2.4
パキスタン	141,256,130	0.31	0.24	4.5
バングラデシュ	137,439,020	0.24	0.24	0.29
日本	127,094,637	0.27	0.24	0.86
ナイジェリア	113,861,481	0.27	0.25	0.48

\* 最小/最大値は、その国に住む個人の被ばく線量の最小/最大値を表します

最大値は、論文<sup>2)</sup>に付録の電子データとしてまとめられていますので、興味のある方はそちらをご参照ください。

本研究により導出した1人あたりの年間宇宙線被ばく線量の世界平均値は0.32 mSvであり、UNSCEARの評価値より約16%低いことが分かりました。また、全人口の99%が年間0.23 mSvから0.70 mSvの範囲内の宇宙線被ばくを受けており、これらの数値は、太陽活動の変動により約15%変化することを明らかにしました。UNSCEARによる評価値との差は、主に、本研究の方がより精度の高い宇宙線強度計算モデルと、より精緻な人口分布データベースを利用したことにより起因すると考えられます。

## 5. まとめ

本研究により、自然放射線の4成分（宇宙・大地・食物・吸入）のうち、従来は概算しかできなかった宇宙からの寄与を詳細に把握することが初めて可能となりました。自然放射線による被ばく線量は、放射線影響の評価において最も重要な基礎データの1つであり、UNSCEARでは、その世界人口平均値を最新の科学的知見に基づいて定期的に見直していま

す。また日本国内では、日本保健物理学会が中心となって国民の自然放射線被ばく線量調査を実施しており、本成果は、それら見直しや調査に多大に貢献すると思われます。本稿が読者や国民の自然放射線被ばくに対する理解の一助となれば幸いです。

## 参考文献

- 1) The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, *UNSCEAR 2008 Report.*, Vol I: Sources (2008)
- 2) T. Sato, *Sci. Rep.*, **6**, 33932 (2016)
- 3) T. Sato, *PLOS ONE.*, **10**, e0144679 (2015)
- 4) T. Sato, *PLOS ONE.*, **11**, e0160390 (2016)
- 5) T. Sato., *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **50**, 913-923 (2013)
- 6) 保田浩志, *Isotope News.*, **624**, 9-12 (2006)
- 7) Lifton., *et al.*, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **386**, 149-160 (2013)
- 8) <http://phits.jaea.go.jp/expacs/jpn.html>
- 9) International Commission on Radiological Protection. *ICRP Publication.*, **103** (2007)

(日本原子力研究開発機構  
原子力基礎工学研究センター  
放射線挙動解析研究グループ)