# 太陽放射線被ばく警報システム WASAVIES



```
久保 勇樹
Kubo Yûki
```

## 1 はじめに

2018年,国際連合の専門機関である国際民間航 空機関(ICAO)において,国際民間航空条約第3 附属書「国際航空のための気象業務」の第78次改 訂が行われ,宇宙天気情報の利用が盛り込まれた<sup>1)</sup>。 ICAOでは,主に次の3つの観点から民間航空機の 運航に際し宇宙天気情報の重要性が認識されてい る。第1に航空機と地上管制との短波通信障害の回 避,第2に電子航法に関連した衛星測位誤差の増大 防止,第3に航空機乗務員の宇宙放射線被ばくの低 減である。これを受けて,2019年11月7日,世界 気象機関の査察を経てICAOから指名された機関 (ICAO宇宙天気センターと呼ぶ)による,民間航 空機の運航に特化した宇宙天気情報の配信が開始さ れた。

ICAO 宇宙天気センターでは、宇宙天気情報とし て宇宙放射線被ばくに関する情報を提供することが 決められている。航空機乗務員の宇宙放射線による 被ばくは、国際放射線防護委員会 1990 年勧告<sup>21</sup> に おいて,職業被ばくとして認定されていることから、 民間航空会社では、乗務員の宇宙放射線被ばく管理 を行うことが必要とされている<sup>33</sup>。情報通信研究機 構では、ICAO 宇宙天気センターの一員として宇宙 放射線による被ばくに関する情報を提供するため、 日本原子力研究開発機構、国立極地研究所、広島大 学、茨城工業高等専門学校、名古屋大学と協力し、 太陽放射線被ばく警報システム WASAVIES (<u>Warning</u> <u>System for Aviation Exposure to Solar Energetic Particles</u>)<sup>4)</sup> を開発してきた。

## 2 銀河宇宙線と太陽放射線

宇宙から飛来する宇宙放射線は、太陽系外から定 常的に飛来している銀河宇宙線と、太陽フレア等の 発生時に突発的に太陽から飛来する太陽放射線(太 陽高エネルギー粒子、太陽宇宙線とも呼ばれる)に 大別される。銀河宇宙線も太陽放射線も主成分は陽 子であり、これらは一次宇宙線と呼ばれる。

銀河宇宙線は,keV領域から100 EeV(10<sup>20</sup>eV) 付近まで非常に広範囲に及ぶエネルギースペクトル を持つが,航空機被ばくに寄与する宇宙線のエネル ギーはおおよそ数十 MeV~数百 GeV 程度であるた め,以後はこのエネルギー範囲に絞って話を進める。 地球周辺にやってくる銀河宇宙線流量は,約11年 周期で変動する太陽活動に連動して変化し,太陽活 動極大期には減少,極小期には増加する。つまり, 銀河宇宙線流量は太陽活動と反相関しているという ことになる。一方,銀河宇宙線流量は,数日という 短い時間スケールではほとんど変化しないため,銀 河宇宙線による被ばく線量率は,数日という短い時 間スケールでは変化せず,避けることができない定 常的な被ばくとなる。

一方,太陽放射線流量は,大規模太陽フレア等に



図1 現状の WASAVIES の概念図

伴って突発的に増加し,数時間の時間スケールで減 少する。その流量は,極端な場合には銀河宇宙線の 100-1,000 倍にも達することもある。

航空機高度での被ばく線量率は、一次宇宙線のエ ネルギーに大きく依存することから、そのエネル ギースペクトルを知ることが重要である。地球近傍 で観測される太陽放射線のエネルギースペクトルは 現象毎に、また、時間的にも大きく変化する。太陽 放射線現象開始直後は、エネルギーの高い、つまり 速度の速い太陽放射線しか太陽から地球へ到来でき ないため、この時間帯では、低エネルギー側の放射 線が少ないようなスペクトルを示すが、時間の経過 と共に低エネルギー放射線も地球に到来する様にな り、徐々にスペクトルが変化していく。更に、太陽 放射線現象開始直後に地球近傍で観測される粒子の 速度の方向は、磁力線に沿った方向を向いたものが 多数を占めるビーム状の方向分布をしており、非常 に大きな角度異方性を示す。その後時間が経つにつ れ、太陽から地球への伝搬中に磁場の乱れによって 散乱されることによって様々な方向を向いた粒子が 地球近傍に到来する様になり、粒子の方向分布は 徐々に等方的になっていく。

このように、太陽放射線流量やエネルギースペク トル、角度分布は現象毎に、また、短い時間スケー ルで、大きく変動するため、太陽放射線による被ば く線量率の推定は、短い時間スケールでは一定と考 えて良い銀河宇宙線による被ばく線量率の推定と比 較して、様々な難しさがある。

銀河宇宙線や太陽放射線等の一次宇宙線は荷電粒

子であるため,地球の磁気圏内を伝搬する際に磁場 の影響を受け伝搬軌道が変化する。それにより,地 球大気上層に到達した際には,緯度,経度によって 流量が異なってしまう。例えば,北極や南極等の高 緯度地域では一般的に流量が大きくなり,逆に赤道 付近の低緯度では流量が小さくなる。このように, 一次宇宙線の流量分布は,仮に地球磁気圏外では一 様であったとしても,地球大気上層では緯度,経度 依存性が大きく現れる。

更に,一次宇宙線が地球大気に飛び込むと,大気 を構成する様々な原子,分子と衝突して,空気シャ ワーと呼ばれる核反応の連鎖を起こし,大量の中性 子やμ粒子,γ線等を発生させる。これらを二次宇 宙線と呼び,この二次宇宙線が航空機等の被ばく線 量率の増加を引き起こす。

### 3 太陽放射線被ばく警報システム WASAVIES

1節で述べたように、航空機乗務員の宇宙放射線 被ばく管理という観点から. 常に航空機高度での被 ばく線量を知る必要がある。しかしながら、日本で は通常、航空機に放射線量計は搭載されていないた め、航空機高度での宇宙放射線被ばく線量を計測す ることは困難である。そのため、数値計算を基に推 定することになり、航空機高度での被ばく線量率を 推定する数値モデルが必要である。宇宙放射線によ る被ばく線量率を推定する数値モデルは、世界各国 で開発されている。米国では NASA によって開発 が進められている NAIRAS<sup>5)</sup> や、米国連邦航空局が 開発している CARI-7 ベースモデル<sup>®</sup>等,欧州では, オーストリア・サイベルスドルフ研究所によって開 発されている AVIDOS<sup>7)</sup> や、フランス・パリ天文台 が開発している SiGLE<sup>®</sup> 等がある。日本では、 WASAVIES<sup>4)</sup>が開発されている。

WASAVIES は、定常的に起こっている銀河宇宙 線による被ばく線量率に加えて、太陽放射線の突発 的な増加をリアルタイムに検出し、それをトリガと して地表から高度 100 km までの地球上のあらゆる 場所における太陽放射線による被ばく線量率を、太 陽フレア発生直後からリアルタイムに推定すること ができるシステムである。

前述の, 欧米で開発されている被ばく線量率を推 定する数値モデルの多くは, 地上の中性子モニタか



米国の気象衛星 GOES による高エネルギー粒子の どちらかの観測データを航空機高度まで外挿するこ とで被ばく線量率を推定している。また,前述した 太陽放射線エネルギースペクトルの時間変化等も考 慮されていない。一方で,WASAVIES はこれらの システムとは異なり,地上の中性子モニタで太陽放 射線量の増加を検出した直後に GOES の観測デー タも用いて,その間を数値シミュレーションによっ て内挿することで,地表から高度 100 km までの地 球上のあらゆる場所での被ばく線量率を推定してい る。

人工衛星高度と地上の間を内挿するために,3つ の数値シミュレーションが用いられている。1番目 は、太陽放射線の現象毎の変動及び時間発展を計算 するものであり、太陽物理学の専門家によって開発 されたコード<sup>9)</sup>である。これは太陽放射線被ばくの 計算時にのみ用いられる。2番目は、地球磁気圏内 の伝搬による、地球大気上層での太陽放射線流量の 緯度、経度依存性を計算するものであり、超高層大 気物理学の専門家によって開発されたコード<sup>10)</sup>で ある。3番目は、地球大気に突入した太陽放射線が 大気中で空気シャワー反応を起こして二次宇宙線を 生成、それによる被ばく線量率を計算するものであ り、原子核工学の専門家によって開発されたコード<sup>11)</sup> である。2,3番目のコードは、太陽放射線に限ら ず銀河宇宙線による被ばく線量率の計算時にも用い られる。これら3つの数値シミュレーションを1つ に統合することで、太陽から放出された太陽放射線 が地上に到来する間に起こる様々な過程を再現し、 太陽放射線による被ばく線量率を高い精度で推定し ている。このように WASAVIES は、異なる分野を 専門とする研究者の協力によって実現した、異分野 融合システムである。図1に現状の WASAVIES の 概念図を示す。

図2は、2005年1月20日に発生した大規模太陽 フレア時の、WASAVIESにより推定された一般的 な航空機高度(高度12km)での全世界の被ばく線 量率マップである。最も被ばく線量率が高かったと 推定される、6時55分UTCのマップを示す。極域 での被ばく線量率が非常に大きくなっているのが良 く分かる。この時の高度12kmでの最大被ばく線量 率は、南極上空付近で約720 $\mu$ Sv/h程度と推測され ている。これは、大規模太陽フレア発生前の同一高 度、同一地点での被ばく線量率(すなわち高度 12kmでの銀河宇宙線のみによる被ばく線量率)で ある約6 $\mu$ Sv/hの120倍にも上る線量率である。

被ばく線量率マップ上に描かれている5本の白曲 線は、代表的な航空路を示している。WASAVIES



図3 東京(NRT)-ロンドン(LHR)の航空路に沿った被ばく線量率分布

では、これらの航空路に沿った被ばく線量率も計算 することができる。図3に1つの例として、東京 (NRT) - ロンドン (LHR)の航空路に沿った、前 述の日時での被ばく線量率を示す。仮に、この時刻 にシベリア上空12kmを飛行していた場合、 80 μSv/hを超える線量率で被ばくしていたことが分 かる。

一方で,航空機高度での太陽放射線による被ばく 線量率の大きな増加が起こっているときであって も,地上で生活している人々にとっては,被ばく線 量率の増加は非常に小さいことも同時に示されてい る。前述の日時での地上での被ばく線量率は,太陽 フレア発生前の地上での被ばく線量率とほぼ同じか らせいぜい4倍程度と WASAVIES では推定されて いる。

## 4 今後の展望

宇宙放射線による航空機乗務員の被ばく線量の増加という問題は、近年、航空業界で重要な問題として活発に議論されており、被ばく線量率推定モデルの更なる発展が大いに期待されている。

日本では、2006年4月に文部科学省の放射線審 議会が策定したガイドラインにおいて、航空機乗務 に伴って起こる宇宙放射線による被ばくの管理目標 値として,年間 5 mSv と設定されている。保田の 調査<sup>3)</sup>によれば,2007 年度の 1 年間での日本の航 空会社の乗務員の宇宙放射線被ばく線量は,管理目 標値の 5 mSv を下回っていたが,2007 年度は太陽 放射線現象が発生していなかったため,仮に大規模 太陽フレア発生した場合には,航空機乗務員の被ば く線量の更なる増加が懸念される。

前述の宇宙放射線による被ばく線量率推定モデル は、ほとんどが現在の被ばく線量率を推定する現況 モデルであるが、放射線防護の基本的な考え方であ る ALARA の原則 (as low as reasonably achievable: 合理的に達成可能な限り低く)を考えると、被ばく 線量率の現況推定だけでなく、被ばく線量率の予測 ができることが望ましいと言える。実は WASAVIES は、太陽放射線の増加を地上で検出した直後から、 数時間先までの被ばく線量率の予測することが原理 的には可能である。しかしながら、この被ばく線量 率の予測はまだ実運用に耐えうるだけの予測精度に は達しておらず、予測精度向上が必要とされている。 これが実現すると、「今どうなっているか」の警報 だけでなく、「今後どう推移していくか」の情報を 含んだ警報を発信できるようになり、被ばく線量の 低減に資することが期待される。

現状の WASAVIES は、任意の航空路に沿った被 ばく線量率を推定することはできないが、これがで きる方が望ましいことは明らかである。

これらの2つの大きな課題に取り組んでいくこと が今後の WASAVIES の進むべき方向であると考え ている。

WASAVIES の詳細については、ウェブサイトを 参照いただきたい。https://wasavies.nict.go.jp/

#### 参考文献

- International Civil Aviation Organization, Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation, Twentieth Edition, 3-5 (2018)
- 2) International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication, 60 (1991)
- 3) 保田浩志, Isotope News, 663, 8-12 (2009)
- Sato, T., et al., Space Weather, 16 (2018), https://doi. org/10.1029/2018SW001873

- 5) Mertens, C. J., et al., Space Weather, 11, 603-635 (2013)
- 6) Copeland, K., Federal Aviation Administration Technical report, DOT/FAA/AM-18/6 (2018)
- Latocha, M., *et al.*, 2016 16th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), Bremen, pp. 1-4. (2016)
- Lantos, P., Radiation Protection Dosimetry, 118, 363-374 (2006)
- Kubo, Y., et al., Earth, Planets, and Space, 67, 117-129 (2015)
- 10) Kataoka, R., et al., Space Weather, 12, 380-386 (2014)
- 11) Sato, T., et al., Radiation Protection Dosimetry, 161, 274-278 (2014)

((国研)情報通信研究機構 電磁波研究所 宇宙環境研 究室)