4-4 太陽放射線被ばく警報システム WASAVIES の開発

4-4 Development of WASAVIES: Warning System for Aviation Exposure to Solar Energetic Particles

久保勇樹 佐藤達彦 片岡龍峰 塩田大幸 石井 守 保田浩志 三宅晶子 三好由純 KUBO Yûki, SATO Tatsuhiko, KATAOKA Ryuho, SHIOTA Daiko, ISHII Mamoru, YASUDA Hiroshi, MIYAKE Shoko, and MIYOSHI Yoshizumi

宇宙空間には様々な宇宙線が飛び交っており、その一部は地球の大気中にまで到達し、大気中 での核反応等を経て、航空機乗務員の被ばくを引き起す。特に、巨大な太陽フレアが発生した場 合は、コロナ質量放出(CME)に伴って放出される太陽放射線によりその被ばく線量が急激に増加 する可能性があり、近年、放射線防護上の重要な課題として国際放射線防護委員会(ICRP)や国際 民間航空機関(ICAO)らがいくつかの報告書で指摘している。本報告では、航空機乗務員に対す る宇宙放射線被ばくの管理指針やメカニズムについて簡単に説明するとともに、情報通信研究機 構(NICT)など国内の様々な研究機関が協力して開発した太陽放射線被ばく警報システム WASAVIES(ワサビーズ)の概要とその評価結果について解説する。

Aircrews are exposure to enhanced level of radiation doses due to cosmic-ray exposure. Recently, several international organizations such as International Commission on Radiological Protection (ICRP) and International Civil Aviation Organization (ICAO) published recommendations and advisory reports on this issue. In this paper, the current regulatory rules and fundamental mechanism of the cosmic-ray exposure are briefly summarized. Then, the details of WASAVIES (WAarning System for AVIation Exposure to Solar energetic particles) are explained, which was developed under collaboration between several institutes in Japan, including NICT.

▶ 宇宙放射線被ばく管理の背景

1990年、国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection: ICRP) によって一 つの勧告が発表された。その勧告は、「自然放射線によ る被ばくのうち、職業被ばくとして含める必要性があ るべきものの1つとして、ジェット機の運航がある」 という内容であった[1]。すなわちこれは、ICRPが、航 空機の運航時の航空機乗員の宇宙放射線による被ばく を職業被ばくとして認定したということである。

この勧告を機に欧州では、1996年に航空機搭乗員の 被ばく線量の管理目標値として、年間6mSvというガ イダンスを策定している[2]。日本では、2005年11月 に文部科学省科学技術・学術政策局放射線安全規制検 討会が「航空機乗務員等の宇宙放射線被ばくに関する 検討について」という報告書を取りまとめた[3]。この 報告を受けて、放射線審議会が、2006年4月、航空機 乗務員の宇宙放射線被ばく管理に関するガイドライン を策定し、文部科学省、厚生労働省、国土交通省が合 同で、ガイドラインに沿った処置を講じるようにとの 通達を定期航空協会に行っている[4]。このガイドライ ンの中には、航空機乗務員の宇宙放射線被ばく線量の 管理目標値として、年間5mSvと明記されていること から、国内の航空会社は、この管理目標値を超えない ように対応することが求められている。

2007年、国内航空会社に勤務する運航乗務員、客室 乗務員の宇宙放射線による被ばく線量の評価が実施さ れた[4][5]。それによると、年間実効線量は、平均で運 航乗務員は1.68 mSv、客室乗務員は2.15 mSv、最大で も運航乗務員は3.79 mSv、客室乗務員は4.24 mSv で あり、被ばく線量の管理目標値を下回っていたことが 示された。しかし、2007年は、太陽活動極小期に近づ いている時期であり、この年、太陽放射線による被ば く線量の増加の原因となる大規模な現象は発生してい なかった。仮に、この時期に大規模な太陽放射線現象 が発生していた場合、航空機乗務員の被ばく線量は、 管理目標値の5 mSv に近づくことが容易に想定され、 場合によっては管理目標値を超えることもあり得ると いうことが同時に示されたということでもある。

このように、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いる。2011年頃から、国 際連合の専門機関である国際民間航空機関 (International Civil Aviation Organization: ICAO) k2 おいて、航空機運航に際して宇宙天気情報を必須の情 報として利用することが検討され始めた。数年間の議 論を経て、2018年、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、字 宙天気情報の利用が盛り込まれた [6]。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増大の影響の防止、そして第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(以後、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。こ の宇宙放射線被ばくに関する情報は、航空機が飛行す る高度範囲(25,000-60,000 ft)において、宇宙放射線に よる被ばく線量率が特定のしきい値を超えた場合に、 Advisory と呼ばれる MODERATE (25,000-46,000 ft で 30 µSv/h 以上) もしくは SEVERE (25,000-60,000 ft で 80 µSv/h 以上) のアラートを発出するというものであ る(2021年6月時点での規定)。そのため、リアルタイ ムに全世界の宇宙放射線による被ばく線量率を評価で きる被ばく線量評価モデルが必要であり、世界の複数 の国で開発が進んでいる。

2 航空機被ばくメカニズム

2.1 地球に飛来する宇宙放射線の起源とフラックス

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、太陽フレアや CME 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水素の原 子核であり、これらは一次宇宙線と呼ばれる。

銀河宇宙線は、主に銀河系内の超新星残骸衝撃波な どによって加速され、太陽系内にまで伝搬してきてい ると考えられている。そのスペクトルは、keV 領域か ら100 EeV(10²⁰ eV)付近にまで及ぶ非常に広範囲なべ き分布を持っており、そのべき指数はおおよそ 2.7 程 度である。したがって、TeV を超えるエネルギーを持 つ銀河宇宙線のフラックスはそれほど大きくなく、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 百 MeV ~ 数百 GeV 程度である。このエネルギー帯の 銀河宇宙線フラックスは、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し、 極小期には増加する。つまり、銀河宇宙線フラックス は太陽活動と反相関しているということになる。DLR モデル[7]で計算した典型的な太陽極大期及び極小期 における銀河宇宙線フラックスを図1に示す。なお、 数日という短い時間スケールでは銀河宇宙線フラック スはほとんど変化しない。そのため、銀河宇宙線によ る被ばく線量も、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、太陽放射線フラックスは、大規模太陽フレア や CME に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。そのフラックスは、極端な場合に は銀河宇宙線フラックスの100-1.000倍にも達するこ ともある。これらは、主に、太陽フレア、コロナ衝撃 波、惑星間空間衝撃波で加速され、特に航空機被ばく の要因となるような百 MeV 以上のエネルギーを持つ 太陽放射線は、極端に速度が速い惑星間空間衝撃波を 伴う現象を別にすると、主に、太陽フレアやコロナ衝 撃波(つまり太陽近傍)で加速され、惑星間空間中を地 球近傍に伝搬してくる。地球近傍で観測されるこれら の太陽放射線のエネルギースペクトルは、大まかには べき分布となっている。しかし、そのべき指数は、銀 河宇宙線の様に常に同じになっているわけではなく、 現象ごとに大きく異なる。過去に発生した巨大なイベ ントの太陽放射線フルエンス(フラックスの時間積分) 推定値を図2に示す[8]。軟らかい(べき指数が大きい) スペクトルは、相対的に高エネルギー成分が少なく、 逆に硬い(べき指数が小さい)スペクトルは相対的に高 エネルギー成分が多くなる。このべき指数の違いは航



図1 DLRモデル[7]で計算した太陽活動極小・極大期における地球近傍の 銀河宇宙線陽子フラックス

空機の宇宙放射線被ばくにとって重要となる。また、 太陽放射線スペクトルは、時間的にも大きく変化する。 太陽放射線現象開始直後は、エネルギーの高い放射線 しか太陽から地球へ到来しないため、この時間帯では、 エネルギースペクトルはきれいなべき分布を示さず、 低エネルギー側のフラックスが少ないようなスペクト ルを示す。時間の経過とともに、低エネルギー放射線 も地球に到来する様になり、徐々にべき分布に近づい ていく。さらに、太陽放射線は、太陽から地球へ伝搬 する際に、惑星間空間磁場の乱れによってピッチ角散 乱を受けながら地球に到来する。そのため、太陽放射 線現象開始直後は伝搬中にほとんど散乱を受けていな い粒子が届くことになり、粒子のピッチ角は0度に近 いものが多数を占め、非常に大きなピッチ角分布異方 性を示す。その後時間が経つにつれ、粒子のピッチ角 分布は徐々に等方的になっていく。このように、太陽 放射線フラックスやエネルギースペクトル、角度分布 は現象ごとに、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。

2.2 地球磁気圏・大気圏内での宇宙放射線挙動

銀河宇宙線や太陽放射線などの一次宇宙線は、惑星 間空間を伝搬し、やがて地球近傍に到達すると、地球 磁気圏内を伝搬し地球の大気上層に到達する。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 よってフラックスが異なってしまう。例えば、北極や 南極などの高緯度地域では一般的にフラックスが大き くなり、逆に赤道付近の低緯度ではフラックスが小さ



図 2 過去に発生した巨大なイベントの地球近傍における太陽放射線フルエンス (Tylka モデル [8] による推定値、図1と横軸のスケールが異なることに注意)

くなる。このように、一次宇宙線のフラックス分布は、 地球磁気圏外ではおおむね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。

磁気圏内を通過し大気上層に到達した一次宇宙線が 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線などを発生 させる。これらを二次宇宙線と呼び、この二次宇宙線 が航空機などの被ばく線量率の増加を引き起こす。モ ンテカルロ法を用いた放射線挙動解析コード PHITS[9]を用いて計算した空気シャワーの例を図3に 示す。太陽放射線の到来による空気シャワーによって 生成された中性子の増加は、地上に設置された中性子 モニターで容易に観測され、これを Ground Level Enhancement (GLE) と呼び、航空機高度での被ばく線 量増加のシグナルとして用いられることが多く、その ため、中性子モニターのデータから自動的にGLEを検 出し、アラートを発するシステムなども開発されてい る [10][11]。

3 航空機被ばく線量評価モデル

3.1 従来モデル

地上から航空機高度での被ばく線量の大部分は中性 子が担っているため、地上での被ばく線量は、地上に 設置されている中性子モニターによる観測を用いて推 定することも不可能ではない。一方で、航空機高度で の被ばく線量については、中性子モニターが航空機に 搭載されているわけではないため、航空機高度での中 性子の観測を基にした被ばく線量の推定は困難である。 そのため、航空機高度での被ばく線量は、数値計算を 基に推定されることになり、世界各国で銀河宇宙線及 び太陽放射線による被ばく線量評価モデルが開発され ている。例えば米国では、NASA によって開発が進め られている NAIRAS[12] や、米国連邦航空局が開発し ている CARI-7 ベースモデル [13] などがある。また欧 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[14] や、フランス・パ リ天文台が開発している SiGLE[15] などがある。

日本では、任意の航路に対して銀河宇宙線による被 ばく線量を計算可能なプログラム JISCARD (Japanese Internet System for Calculation of Aviation Route Doses) が放射線医学総合研究所で開発され、航空機乗 務員の被ばく線量管理に活用されている [16]。JIS-CARD は、PARMA (PHITS-based Analytical Radiation Model in the Atmosphere) [17] と呼ばれる、大気 中での二次宇宙線のスペクトルなどを計算することが 出来るソフトウエアに基づいており、これを用いるこ とで大気圏内任意地点における宇宙線被ばく線量率を 推定している。PARMAは、図3に示すようなPHITS コードを用いて実施した空気シャワーシミュレーショ ン結果に基づいて構築されており、被ばく線量評価の みならず、半導体ソフトエラー発生率や年代測定のた めの宇宙線起因核種収率の推定など、幅広い分野で応 用されている。しかし、太陽放射線による被ばく線量 を推定可能な国産のシステムは存在せず、その開発が 望まれていた。

3.2 WASAVIES の概要

このような背景から、太陽放射線による被ばく線量 を評価する国産システムとして、情報通信研究機構、 日本原子力研究開発機構、国立極地研究所など複数の 機関の協力の下、WASAVIES (Warning System for Aviation Exposure to Solar Energetic Particles)が開 発された [18][19]。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を PARMA モデ ルで計算するのみならず、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を、太陽フレア発生直後 からリアルタイムに推定するシステムである。

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ーか 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 中性子モニター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、三つの 数値シミュレーションが用いられている。1番目は、太 陽放射線の現象ごとの変動及び時間発展を計算するも の[20]、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フラックスの緯度、経度依存性 を計算するものであり[21]、これらは太陽放射線被ば くの計算時にのみ用いられる。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 計算するものである[22]。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。以下にそれぞれのシミュレーションに ついて簡単に説明する。

- 1 太陽近傍から放出された太陽放射線の惑星間空間の伝搬を記述する、focused transport 方程式を解くことで、地球近傍でのエネルギースペクトル、フラックス及びそのピッチ角異方性の時間発展を再現する。
- 2 太陽放射線が、変動する地球磁気圏内を地球大 気上層部まで伝搬することによって現れる、太 陽放射線フラックスの緯度、経度依存性を、太 陽放射線の軌道を追跡することで再現する。
- 3 PHITSコードを用いて、太陽放射線が地球大気 内で起こす核反応(空気シャワー)を再現するこ とで二次宇宙線のフラックスを計算するととも



に、ICRP 2007 年勧告 [23] に基づいた被ばく線 量を計算する。

WASAVIES はこれらの数値シミュレーションを一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することで、物理現象を基にした太陽放射線による被ばく線量率の推定ができるモデルである。

🕨 WASAVIES による推定被ばく線量

図4は、2005年1月20日に発生したX7.1フレアに 伴うGLE (GLE69)時の、WASAVIES により推定され た一般的な航空機高度(高度12km = 39,370ft)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 のが良くわかる。この時の高度12kmでの最大被ばく 線量率は、南極上空付近でおおよそ460 μ Sv/h程度と 推測される。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4 μ Sv/hの115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 が出来る。図5に一つの例として、東京(NRT) – ニューヨーク(JFK)の航空路に沿った、2005年1月 20日6時55分UTCでの被ばく線量率を示す。この時 刻にアラスカ上空40,000 ft(=12.2 km)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 がわかる。

この GLE69 時に、仮に WASAVIES を基に ICAO の Radiation Advisory を発信したとした時の、6 時 55 分 UTC、高度 40,000 ft での ICAO Radiation Advisory map を 図 6 に示す。オレンジで示した部分は MODERATE、赤で示した部分が SEVERE の領域に



図 4 WASAVIES で推定した GLE69 ピーク時における高度 12 km での被 ばく線量率マップ

なり、両極域に SEREVE の領域が広がっているのが わかる。

図7は、2017年9月10日に発生した、X8.2フレア に伴うGLE(GLE72)時の、高度12kmでの被ばく線 量率マップである[19]。両極域で若干の被ばく線量率 の増加がみられるものの、GLE69と比較すると、被ば く線量率の増加は極めて少ないことがわかる。この違 いの原因の一つとして、GLE72時には、直前に頻発し たCMEが地球に到来したことによるフォーブッシュ 減少により、バックグラウンドの銀河宇宙線のフラッ クスが減少していたことが考えられる。しかしながら、



図 5 WASAVIES で推定した GLE69 ピーク時における東京 (NRT) - ニュー ヨーク (JFK) 航空路での被ばく線量率マップ



図 6 WASAVIES で推定した、GLE69 ピーク時の高度 40,000 ft における ICAO Radiation Advisory マップ。ICAO Radiation Advisory は緯 度 30 度×経度 15 度のグリッドで評価される。



図7 WASAVIES で推定した GLE72 ピーク時における高度 12 km での被 ばく線量率マップ

太陽放射線による被ばく線量率だけを比較しても、 GLE69とGLE72では100倍以上の違いがみられる。フ レアの規模は、どちらのイベントもX7-8程度と同じ ような規模で、フレアの発生位置もどちらも太陽面西 半球の経度約 60-90度であるにもかかわらず、被ばく 線量率に大きな違いが出るのは、前述した太陽放射線 のエネルギースペクトルが大きく違う、すなわち GLE69の方が相対的に高エネルギー成分が多い、こと が大きな理由の一つであると考えられる。なぜこの様 に現象ごとに大きくエネルギースペクトルが異なるの かについては、太陽放射線の加速・輸送のメカニズム に密接に関連していると考えられているが、まだ、明 確な答えは得られていない。

5 まとめ

宇宙放射線による被ばくという問題は、様々な物理 過程が複合したテーマであり、一つの分野だけで議論 できる問題ではない。太陽フレアや CME に伴って起 こる太陽放射線の加速や輸送といった太陽物理的な問 題、太陽放射線が地球磁気圏内をどのように伝搬する かといった地球電磁気的な問題、地球大気中での核反 応や空気シャワーといった原子核物理的な問題、放射 線が人体に入射した際に各臓器・組織がどの程度被ば くし、どのような健康影響が起こり得るのかといった 放射線生物学、放射線防護の問題など、広範囲な分野 に関連した広い知識が要求される。そういう意味で、 宇宙放射線による被ばくは非常に学際的な研究テーマ であり、WASAVIES は、宇宙天気、太陽物理、超高 層大気、原子核物理、放射線防護など様々な分野の研 究者が連携して達成した異分野融合研究の成功例と言 える。WASAVIES は、現在、NICT の宇宙天気情報 サービスの一環として運営されており[24]、ICAOが 定めるしきい値以上の線量上昇が検出された際は、そ の情報が即時に航空関連各機関に提供され、被ばく線 量が高い航路を避けたり運航高度を下げたりするなど、 世界中の民間航空機の運航に必須の情報として利用さ れる予定である。

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を予測する 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得るだけの予測 精度には達しておらず、予測精度向上が課題とされて いる。これを実現するためには、例えば太陽放射線の 加速・輸送などの過程をさらに解明していくことが必 要であり、このような研究を、宇宙天気予報の研究と して推し進めていきたい。

謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金 (26106006, 15 H05813, 15 H05815, 16 H01180, 17 K05671)の助成 を受け実施した。

【参考文献】

- 1 International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication, 60, Annals of the ICRP, vol.21, 1–3, 1991.
- 2 European Commission, Radiation Protection, no.85, 1996-01, EC, Luxembourg, 1996.
- 3 放射線安全規制検討会, "航空機乗務員等の宇宙線被ばくに関する検討に ついて," 2005, https://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/ giji/_icsFiles/afieldfile/2009/05/21/20051214_02 a_1.pdf
- 4 保田浩志, "日本における航空機乗務員の被ばく管理," Isotope News, no.663, pp.8–12, 2009.
- 5 H. Yasuda, T. Sato, H. Yonehara, et.al., "Management of Cosmic Radiation Exposure for Aircraft Crew in Japan," Radiat. Prot. Dosim., vol.146, pp.123–125, 2011.
- 6 International Civil Aviation Organization, Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation, Twentieth Edition, 3–5, 2018.
- 7 D. Matthiä, T. Berger, A.I. Mrigakshi et al., "A ready-to-use galactic cosmic ray model," Adv. Space Res., vol.51, pp.329–38, 2013.
- 8 A.J. Tylka and W.F. Dietrich. "A new and comprehensive analysis of proton spectra in ground-level enhanced (GLE) solar particle events," The 31st International Cosmic Ray Conference. Poland: Universal Academy Press, 2009.
- 9 T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto et al., "Features of particle and heavy ion transport code system PHITS Version 3.02," J Nucl. Sci. Technol., vol.55, pp.684–90, 2018.
- 10 T. Kuwabara, J.W. Bieber, J. Clem et al., "Development of a ground level enhancement alarm system based upon neutron monitors," Space Weather, vol.4, S10001, 2006.
- 11 G. Souvatzoglou, A. Papaioannou, H. Mavromichalaki et.al., "Optimizing the real-time ground level enhancement alert system based on neutron monitor measurements: Introducing GLE Alert Plus," Space Weather, vol.12, pp.633–49, 2014.
- 12 C.J. Mertens, M.M. Meier, S. Brown et al., "NAIRAS aircraft radiation model development, dose climatology, and initial validation," Space Weather, vol.11, pp.603–35, 2013.
- 13 K. Copeland, "MIRA 2017: A CARI-7 Based Solar Radiation Alert System," Federal Aviation Administration Technical report, DOT/FAA/AM-18/6, 2018.
- 14 M. Latocha, P. Beck, and S. Rollet, "AVIDOS a Software Package for European Accredited Aviation Dosimetry," Radiat. Prot. Dosim., vol.136, pp.286–290, 2009.
- 15 P. Lantos, N. Fuller, and J.F. Bottollier-Depois, "Methods for estimating radiation doses received by commercial aircrew," Aviat. Space Envir. Md., vol.74, pp.746–752, 2003.
- 16 Japanese Internet System for Calculation of Aviation Route Doses, JISCARD. http://www.jiscard.jp/
- 17 T. Sato, "Analytical Model for Estimating Terrestrial Cosmic Ray Fluxes Nearly Anytime and Anywhere in the World: Extension of PARMA/EX-PACS," PLOS ONE 10, e0144679, 2015.
- 18 T. Sato, R. Kataoka D. Shiota, et al., "Real-Time and Automatic Analysis Program for WASAVIES: Warning System for Aviation Exposure to Solar Energetic Particles," Space Weather, vol.16, pp.924–936, 2018.
- 19 R. Kataoka, T. Sato, S. Miyake, et al., "Radiation dose nowcast during the ground level enhancement on 10–11 September 2017," Space Weather. vol.16, pp.917–923, 2018.
- 20 Y. Kubo, R. Kataoka, and T. Sato, "Interplanetary particle transport simulation for warning system for aviation exposure to solar energetic particles," Earth Planets and Space, vol.67, 117, 2015.
- 21 R. Kataoka, T. Sato, Y. Kubo, et al., "Radiation dose forecast of WASAV-IES during ground-level enhancement," Space Weather, vol.12, pp.380– 386, 2014.
- 22 T. Sato, R. Kataoka, H. Yasuda, et al., "Air Shower Simulation for WASAVIES: Warning System for Aviation Exposure to Solar Energetic

Particles," Radiat. Prot. Dosim., vol.161, pp.274-278, 2014.

- 23 International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication, 103, Annals of the ICRP, vol.37, 2007.
- 24 https://wasavies.nict.go.jp/



久保勇樹 (くぼ ゆうき) 電磁波研究所

電磁波伝搬研究センター 宇宙環境研究室 研究マネージャー/ 宇宙天気予報グループ グループリーダー 博士 (学術) 太陽物理学、予報評価技術



佐藤達彦 (さとう たつひこ) 日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター 研究主席 博士(工学) 放射線物理、放射線生物



片岡龍峰 (かたおか りゅうほう) 国立極地研究所 宙空圏研究グループ 准教授 博士 (理学)



塩田大幸 (しおた だいこう) 電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター 宇宙環境研究室 主任研究員 博士(理学) 太陽物理学、太陽圏物理学



石井 守 (いしい まもる) 電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター 研究センター長 博士 (理学) 超高層物理学、大気光学・電波観測



保田浩志 (やすだ ひろし) 広島大学 原爆放射線医科学研究所 教授 博士 (工学) 放射線計測、放射線防護、健康リスク評価



三宅晶子 (みやけ しょうこ)

茨城工業高等専門学校 国際創造工学科 准教授 博士 (理学) 宇宙線物理学

三好由純 (みよし よしずみ)

名古屋大学 宇宙地球環境研究所 統合データサイエンスセンター センター長・教授 博士(理学) 宇宙空間物理学、地球惑星磁気圏物理学