



4. 航空機被ばく

4. Aircrew Exposure

佐藤達彦, 久保勇樹¹⁾

SATO Tatsuhiko and KUBO Yûki¹⁾

日本原子力研究開発機構, ¹⁾ 情報通信研究機構

(原稿受付: 2023年12月23日)

宇宙天気災害の一つとして, 巨大な太陽フレアに伴って突発的に発生する高エネルギー陽子による宇宙線被ばくがある。本章では, 航空機乗務員の宇宙線被ばくに焦点を絞って, そのメカニズムや規制の現状を解説するとともに, 近年日本で開発された航空機被ばく警報システム WASAVIES の概要について紹介する。

Keywords:

aircrew exposure, radiological protection, solar particle event, airshower, WASAVIES

4.1 宇宙線被ばく管理の現状

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があるべきものの1つとして, ジェット機の運航が記された」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6 mSv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線被ばく線量の管理目標値として, 年間5 mSv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, 年間実行線量は, 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,

Japan Atomic Energy Agency, IBARAKI 319-1195, Japan

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) において, 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, 宇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の増大防止, そして第3に航空機乗務員の宇宙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(以下, 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 ft - 60,000 ft) において, 宇宙線による被ばく線量率が特定の閾値を超えた場合に, Advisoryと呼ばれる MODERATE (25,000

corresponding author's e-mail: sato.tatsuhiko@jaea.go.jp

-46,000 ftで30 $\mu\text{Sv/h}$ 以上) もしくはSEVERE (25,000 -60,000 ftで80 $\mu\text{Sv/h}$ 以上) のアラートを発出するというものである (2023年12月時点での規定)。そのため、リアルタイムに全世界の宇宙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。

4.2 宇宙線被ばくのメカニズム

4.2.1 地球に飛来する宇宙線の起源とフラックス

宇宙から飛来する宇宙線は、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 (Coronal Mass Ejection) 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 (10^{20} 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 (ドイツ航空宇宙センター, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) 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

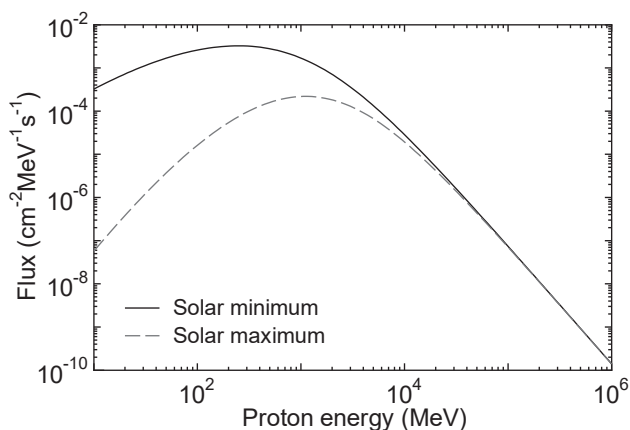


図1 DLR モデル[7]で計算した太陽活動極小・極大期における地球近傍の銀河宇宙線陽子フラックス。

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、現象毎に大きく異なる。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。このべきの違いは航空機の宇宙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

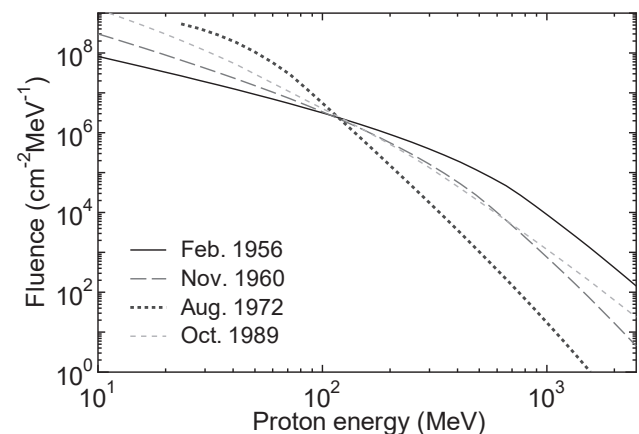


図2 過去に発生した巨大なイベントの地球近傍における太陽放射線フルエンス (Tylka モデル[8]による推定値, 図1と横軸のスケールが異なることに注意)。

さがある。

4.2.2 地球磁気圏・大気圏内の宇宙線の挙動

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、地球磁気圏外では概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。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]。

4.3 航空機被ばく線量評価モデル

4.3.1 従来のモデル

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]。JISCARD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できるソフトウェアに基づいており、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、半導体ソフトウェア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。

4.3.2 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もと、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

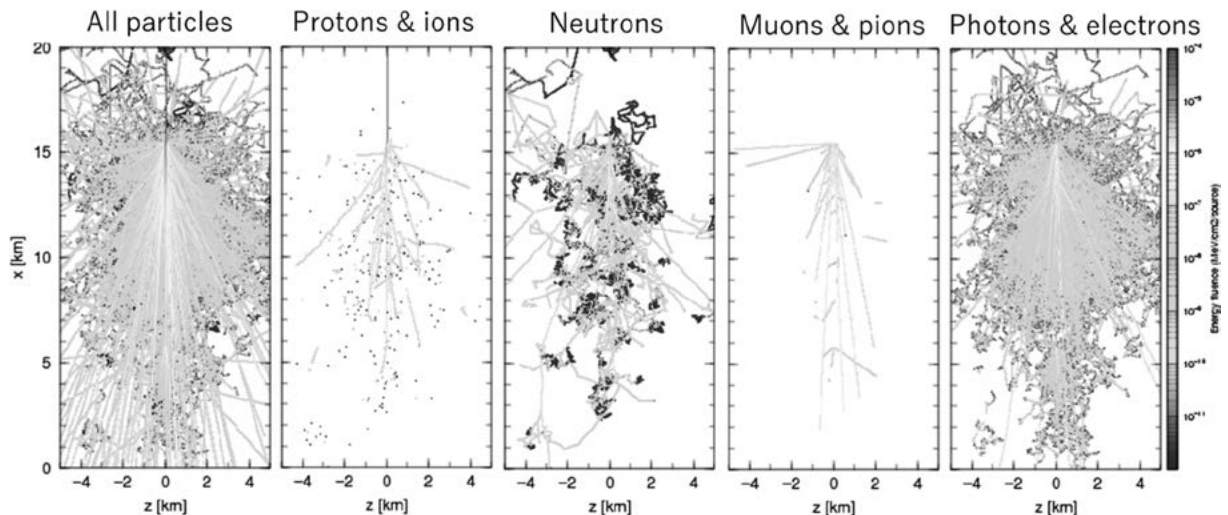


図3 1つの宇宙線(100 GeV/nの炭素イオン)が引き起こす空気シャワー(エネルギーフルエンス)をシミュレーションした例。

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、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、これは太陽放射線被ばくの計算時にのみ用いられる[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]、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]。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。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。

4.3.3 WASAVIESによる被ばく線量の推定

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12 km = 39,370 ft）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。

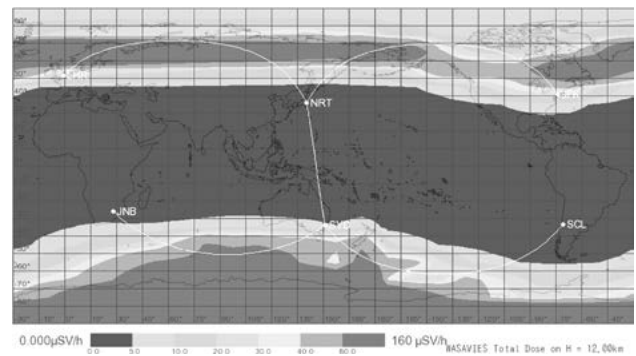


図4 WASAVIESで推定したGLE69ピーク時における高度12 kmでの被ばく線量率マップ。

この時の高度12 kmでの最大被ばく線量率は、南極上空付近でおよそ460 μSv/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12 kmでの銀河宇宙線のみによる被ばく線量率）である約4 μSv/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できる。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の領域になり、両極域にSEVEREの領域が広がっているのがわかる。

4.4 まとめ

宇宙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、放射線が人体に照射した際にどの程度被ばくする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、情報通信研究機構の宇宙天気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ICAO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

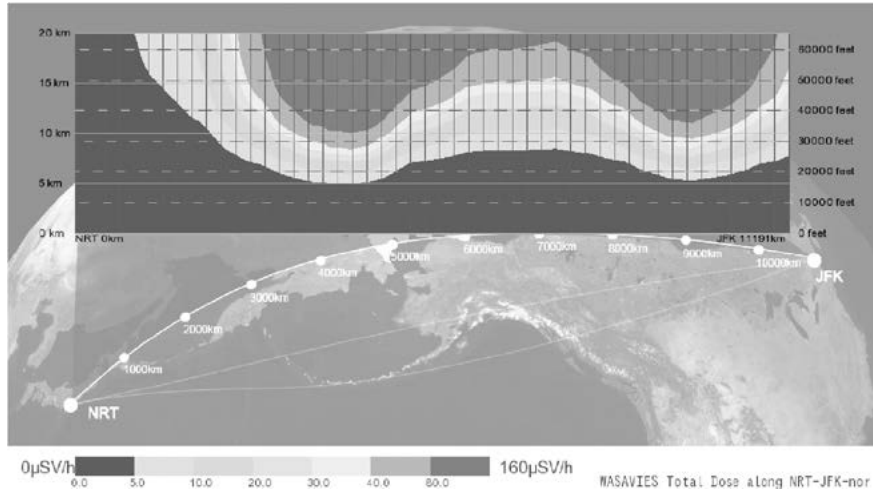


図5 WASAVIES で推定した GLE69ピーク時における東京 (NRT) - ニューヨーク (JFK) 航空路での被ばく線量率マップ。

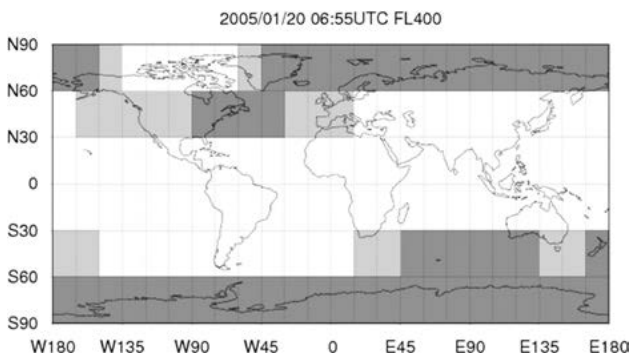


図6 WASAVIES で推定した, GLE69ピーク時の高度40,000ft における ICAO Radiation Advisory マップ. ICAO Radiation Advisory は緯度30度×経度15度のグリッドで評価される。

界中の民間航空機の運航に必須の情報として利用されている。

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う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進めていくことが必要である。

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), [Online] Available: https://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/giji/_icsFiles/afidfile/2009/05/21/20051214_02a_1.pdf
 [4] 保田浩志 : Isotope News **663**, 8 (2009).
 [5] H. Yasuda *et al.*, Radiat Prot Dosim **146**, 123 (2011).
 [6] International Civil Aviation Organization, Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation, Twentieth Edition, 3-5 (2018).
 [7] D. Matthiä *et al.*, Adv Space Res. **51**, 329 (2013).
 [8] A.J. Tylka and W.F. Dietrich. The 31st International Cosmic Ray Conference. Poland: Universal Academy Press (2009).
 [9] T. Sato *et al.*, J Nucl Sci Technol **55**, 684 (2018).
 [10] T. Kuwabara *et al.*, Space Weather **4**, S10001 (2006).
 [11] G. Souvatzoglou *et al.*, Space Weather **12**, 633 (2014).
 [12] C.J. Mertens *et al.*, Space Weather **11**, 603 (2013).
 [13] K. Copeland, Federal Aviation Administration Technical report, DOT/FAA/AM-18/6 (2018).
 [14] M. Latocha, Radiat Prot Dosim **136**, 286 (2009).
 [15] P. Lantos *et al.*, Aviat Space Envir Md. **74**, 746 (2003).
 [16] Japanese Internet System for Calculation of Aviation Route Doses, JISCARD. [Online] . Available: <http://www.jiscard.jp/>
 [17] T. Sato, PLOS ONE **10**, e0144679 (2015).
 [18] T. Sato *et al.*, Space Weather. **16**, 924 (2018).
 [19] R. Kataoka *et al.*, Space Weather. **16**, 917 (2018).
 [20] Y. Kubo *et al.*, Earth Planets Space. **67**, 117 (2015).
 [21] R. Kataoka *et al.*, Space Weather **12**, 380 (2014).
 [22] T. Sato *et al.*, Radiat Prot Dosim. **161**, 274 (2014).
 [23] International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication, 103, Annals of the ICRP, Vol.37 (2007).
 [24] [Online]. Available: <https://wasavies.nict.go.jp/>



さとう たつ ひこ
佐藤 達彦

日本原子力研究開発機構 研究フェロー、
大阪大学 核物理研究センター 特任教授
(クロスポイントメント)。主な研究分野
は、放射線挙動解析コードPHITSの開発
とその宇宙線、放射線生物応用研究。PHITSは、世界76カ
国で約1万人の研究者や技術者に利用されており、更なる普
及をめざして世界中を旅しています。



くぼ ゆう き
久保 勇樹

国立研究開発法人情報通信研究機構電磁波
研究所電磁波伝搬研究センター宇宙環境研
究室宇宙天気予報グループ・グループリー
ダー。東京大学大学院理学系研究科天文学
専攻修士課程修了。博士(学術)。主な研究分野は、太陽放
射線などの太陽活動に関する宇宙天気予報および統計的予報
評価法。日本で唯一の宇宙天気予報現業機関で、宇宙天気予
報業務の取り纏めを行っている。