

宇宙総合学研究ユニット NEWS 2020年1月号

宇宙
ユニット



第13回 宇宙ユニットシンポジウム 2/8(土)・2/9(日)に 開催!

2020年2月8日(土)・9日(日)に、京都大学国際科学イノベーション棟にて宇宙ユニットシンポジウムを開催します。「人類は宇宙文明を作れるか」という主題のもと、ポスター交流会、講演会、パネルディスカッションを開催します。また副題「宇宙教育を通じた挑戦」の通り、新たな宇宙時代へ向けたユニットが取り組んできた教育活動とその成果についての報告と議論を行います。2月8日(土)にはJAXA宇宙飛行士による基調講演と、ポスター交流会を行います。ポスター交流会では、宇宙研究開発に関して世代や立場、分野を超えた対話を重視し、全ての来場者が議論・交流する場を設けます。2月9日(日)には各分野の専門家によるシンポジウム講演会とパネルディスカッションを開催します。最新情報は特設ページ(<https://www.ussf.kyoto-u.ac.jp/symposium13.html>)をご覧ください。参加希望の方はこちらのフォーム(<https://forms.gle/RFKJk3EmzBo992w29>)より参加登録をお願いします。他にはない機会であると自負しておりますので、多くの皆様のご参加をお待ちしております。

京都大学宇宙総合学研究ユニット 第13回シンポジウム

人類は宇宙文明を作れるか

— 宇宙教育を通じた挑戦 —

2.8(土) 13:00~17:30
ポスター展示交流会「宇宙研究の広場2020」
高校生、大学生、企業人、一般参加者がポスターを回って交流する場です。
お気軽にお越しください。ポスター発表も募集中です。

●基調講演
JAXA宇宙飛行士「有人宇宙探査時代に向けて」
(手話通訳がつきます)

2.9(日) 10:00~17:30 (親子向けイベントもあります)
シンポジウム講演+パネルディスカッション

●登壇予定者
稲富裕光 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 研究本部長
松井紫朗 京都府立京都大学 養育学 教授
水島 淳 SPACETIDE / 西村あすひ法律事務所
川端裕人 作家

土佐尚子 京都大学 大学院総合生命学 特任教授
Herman Lee 京都大学 大学院理学研究科 講師
寺田昌弘 京都大学 宇宙総合学研究ユニット 特任准教授
土井隆雄 京都大学 宇宙総合学研究ユニット 特任教授

**【会場】国際科学イノベーション棟5階 京都大学吉田キャンパス
ホワイエ&シンポジウムホール 本部構内**

主催○京都大学 宇宙総合学研究ユニット 共催○京都大学 大学院理学研究科 附属天文台
後援○京都府教育委員会、京都市教育委員会、宇宙航空研究開発機構、京都大学 大学院総合生命学
お申し込みはWEBから! <https://www.ussf.kyoto-u.ac.jp/symposium13.html> (画像提供: NASA)
シンポジウムは、文部科学省 宇宙航空科学技術推進機構「有人宇宙探査」のための総合科学研究推進プログラムの活用と関係により実施されるものです。
Unit of Synergetic Studies for Space, Kyoto University

第3回 Moon Village Association 国際シンポジウム 京都セッション開催報告

2019年12月7-8日に第3回 Moon Village Association 国際シンポジウム京都セッションが開催されました。Moon Village Association (MVA) は、2017年に設立された NGO 団体で、月面での人類の活動を盛り上げていくことを目指している団体です。今回は京都大学宇宙総合学研究ユニット・東京理科大学宇宙コロニーセンター・慶応義塾大学の3大学がホストとなり、東京と京都での開催となりました。京都に先駆け、東京では12月4-6日にシンポジウムが開催され、月面への居住に向けた様々な民間企業や国際機関の取り組みが紹介されました。京都セッションでは「宇宙教育とアウトリーチ活動」をテーマとしてかかげました。12月7日はエクスカーション（京都市内バスツアー）とレセプションを行い、関係者との交流を深めました。12月8日は一般公開シンポジウムとして、午前には MVA 活動を京都の一般の方々にご紹介し、JAXA 等の宇宙ミッションの紹介も行われました。午後からはポスターセッションとして、多くの学生（高校生・大学生）や一般の方の月面居住に向けた取り組みをポスター発表してもらい、来場者との議論を深めました。また各大学の宇宙教育プログラムの紹介等も行い、多くの方に国内外の宇宙教育について知っていただく機会を提供できました。京都セッションは、200名近い方々にご来場いただき、大変盛況なシンポジウムとなりました。宇宙ユニットとしては、今後も将来の宇宙ミッションに貢献できる様々なプログラムを提供して、月面居住についても議論を継続していく予定です。（寺田昌弘 記）



第9回宇宙学セミナー開催報告

2019年12月13日（金）に、第9回宇宙学セミナーが開催されました。今回の宇宙学セミナーは、アポロ月面着陸50周年を記念するアメリカ大使館・領事館のセミナーシリーズの一環としての開催でもありました。講演者としてオハイオ州立大学の John Horack 博士をお招きして、「Cooperation, Competition, and Regulation of Space 宇宙開発における協力、競争と規制とは」というタイ



トルでご講演いただきました。Horack 博士はこれまでアメリカ政府・NASA や大学、民間企業で長年宇宙分野の発展に寄与されてきました。オハイオ州における宇宙分野の紹介、これまでの宇宙ミッションの遷移、これからの宇宙分野の発展や民間活用、途上国の参加など様々なお話をご紹介していただき、将来の宇宙分野の発展について考える貴重な機会になりました。京大内外から多くの方にご参加いただき、盛会となりました。（寺田昌弘 記）

第 10 回宇宙学セミナー開催報告

2019 年 12 月 20 日、第 10 回宇宙学セミナーが総合生存学館 201 講義室で開催されました。「人類の生存を脅かす宇宙規模災害 Disasters from Space - スーパーフレア」と題して、柴田一成教授（京都大学大学院理学研究科附属天文台）が講演されました。太陽活動に伴うフレアから放たれる莫大なレベルの放射線は、地球の磁気圏によって防御されますが、大規模なフレアが発生した場合は人工衛星や通信システム、発電所の制御システムを破壊する可能性が高い点で、我々の生活基盤が致命的に破壊される危険性があります。様々な議論はあるものの、そうした太陽のスーパーフレアは数千年に 1 度起こる可能性が近年指摘されており、黒点観察を続けることと、宇宙天気予報の研究開発の重要性を説かれました。セミナーの最後には学生との質疑応答が盛んに行われました。（田島知之 記）

第 11 回宇宙学セミナー開催報告

2019 年 12 月 24 日（火）に、第 11 回宇宙学セミナーが開催されました。今回はポートランド州立大学の Mark Weislogel 博士にお越しいただき、「Large Capillary Fluidic Phenomena in Space: Giant Drops, Bubbles, Flows, and Their Critical Role in Plumbing aboard Spacecraft 宇宙における巨大毛管流動現象：巨大液胞、気泡、流れと宇宙船の配管系におけるそれらの影響」という題名でご講演いただきました。Weislogel 博士は流体力学をご専門としており、これまでスペースシャトルや国際宇宙ステーションで数多くの流体力学研究を実施してこられました。このご経験を分かりやすくご説明いただきました。特に Space Coffee Cup を 3D プリンターで作製され、実際に宇宙で宇宙飛行士がこのカップを使用しています。大変興味深い取り組みで、講演後は多くの方から質問があり、有益な議論ができました。

（寺田昌弘 記）



大学院分野横断型講義「有人宇宙学」のご案内

大学院生・学部生(聴講可)を対象として、大学院分野横断型講義「有人宇宙学」を水曜日 5 限 (16:30～18:00) に総合生存学館大講義室(2F)にて開講します。本講義では、人類が宇宙における持続可能な社会基盤を構築するために何が必要なのか、自然科学的・人文社会科学的に解説します。理工系ばかりでなく人文社会系学生が、宇宙における持続的社会的構築という命題の中に、自分の研究分野との接点を見つけ、自分の研究の新たな意義と新しい方向性を見出すことをめざします。今後の講義予定は以下のとおり。

【第13回】1月8日 有人宇宙学演習3 (土井隆雄)

【第14回】1月15日 宇宙居住学 (稲富裕光)

【第15回】1月29日 有人宇宙学演習4 / フィードバック (土井・山敷・田口)

大学院分野横断型講義「宇宙学」のご案内

大学院生・学部生(聴講可)を対象として、大学院分野横断型講義「宇宙学」を木曜日 1 限 (8:45～10:15) に総合生存学館大講義室(2F)にて開講します。本講義では自然科学が明らかにしてきた宇宙の歴史と現在の姿、そして人類生存圏の拡大の営みとしての宇宙開発の現状とそこから生じつつある人文社会学的な問題群を概説し、人類の生存に関わるようなリスクにどう向き合ったよのかについて議論を行います。今後の講義予定は以下のとおり。

【第13回】1月9日 宇宙災害 (山敷庸亮)

【第14回】未定 地球環境 (山形俊男(宇宙ユニット特任教授))

【第15回】1月30日 まとめと振り返り Reflection and discussion (山敷・(磯部)・(浅井))

今後の宇宙学セミナー・関連イベントなど

日時	内容	場所
3月5日(木) 15:00-16:30	第12回 宇宙学セミナー タイトル:「宇宙医学」(仮題) 講演者: 中里龍生氏(藤岡外科内科クリニック)	TBA 一般対象
3月9日(月) 15:00-16:30	第13回 宇宙学セミナー タイトル: はやぶさ2の挑戦 ～未踏小惑星リュウグウへの往復探査～ Challenges of Hayabusa2 -Round-trip Mission to Unexplored Asteroid "Ryugu" 講演者: 津田雄一教授(JAXA 宇宙科学研究所 はやぶさ2 プロジェクトマネージャー)	理学研究科セミナー ハウス 一般対象

※宇宙学セミナーの詳細は随時 Web ページ (<http://www.uss.kyoto-u.ac.jp/seminar.html>) で公開いたします。

生命が居住可能な系外惑星へのスーパーフレアの影響を算出 —ハビタブル惑星でも致命的な被ばくを受ける可能性—

山敷 庸亮 教授
(総合生存学館(思修館))

概要

2019 年のノーベル物理学賞には、太陽系外惑星の第一発見者であるミシェルマイヨールとディディエルクエロツがノミネートされましたが、存在が確認された太陽系外惑星の数はもう 4208 個(EXOKyoto, 2020.1.1)にもなりました。これらの惑星のうち、液体の水が存在する可能性のある領域(ハビタブルゾーン)に存在する地球サイズの惑星は 44 個にもなりました。さて、これらの惑星が本当に高等生物が存在しうる「ハビタブル」な惑星なのか? 京都大学総合生存学館(思修館)で宇宙ユニット副ユニット長の山敷庸亮 教授(筆頭著者)、国立天文台ハワイ観測所岡山分室 前原裕之 助教、アメリカ航空宇宙局ゴダード宇宙飛行センター(NASA/GSFC)Vladimir Airapetian 博士・コロラド大学ボルダー校 野津湧太博士(日本学術振興会海外特別研究員)、日本原子力研究開発機構(JAEA) 佐藤達彦 研究主幹、ライデン大学ライデン天文台 野津翔太博士(日本学術振興会海外特別研究員)、京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室 佐々木貴教 助教、同附属天文台 柴田一成 教授、および EXOKyoto 開発チームに関わる学生たちの国際共同研究グループは、太陽型恒星でのスーパーフレアの発生頻度とエネルギーおよび極紫外線を考慮した惑星放射線環境と大気散逸の定量的評価を世界で初めて行いました。また、フレアにより放出される高エネルギー宇宙放射線によって起こりうる被ばく量は、これらの惑星の岩石表面では惑星が地球と同じ大気圧を備えている限り地球型生命にとって致命的なレベルにはならないことを明らかにしました。プロキシマ・ケンタウリ b (Proxima Centauri b) やトランプスト-I e (TRAPPIST-I e) などでは、惑星がより中心星に近い位置に存在することなどの理由で、大気散逸(大気が宇宙空間に流出すること)が地球に比して 70 倍前後になることから大気圧が十分ではなく、高エネルギー宇宙放射線が惑星表面に直接到達してしまうため、毎年 1 度発生する規模のフレアでも致命的な被ばくを受ける可能性があることが判明しました。したがって、これらの惑星においては、内部からのガス放出が継続するか、惑星磁場が形成されていない限り、ハビタブルであると評価することは困難であると考えられます。なお、生命の放射線耐性は種に大きく依存しますが、本研究では人間と同程度の耐性を持つ生命を想定しました。本研究成果は、2019 年 8 月 20 日に米学術誌「The Astrophysical Journal」のオンライン版に掲載されました。

1. 背景

生命体が居住可能な範囲(ハビタブル・ゾーン)に存在する太陽系外惑星(系外惑星)は、赤色矮星(M 型星)の周囲で多く発見されています。これは、恒星の前を惑星が通過する際の減光を捉えるトランジット観測において、減光が大きく公転周期が短いために非常に発見が容易なためです。そのため、ケプラー宇宙望遠鏡が役目を終えた今、次世代の惑星探査衛星 TESS(トランジット系外惑星探索衛星)などの観測対象としてもっとも注目されています。ところが、赤色矮星では頻繁にフレアが発生するため、これらの惑星では、フレアによる影響で生命が存在しないかもしれないという評価も多くあ

りました。しかしながら今までは、実際のフレアの発生頻度やその規模、またフレアにより発生するコロナ質量放出（CME）に伴う惑星表面の宇宙放射線被ばく等において、定量的な評価はなされてきませんでした。その原因は、（１）系外惑星の主星におけるフレアの発生頻度と規模の評価が不十分であったこと、（２）ある一定規模のフレアが発生したとき、周回する惑星にどれくらいの影響が生ずるのかについて定量的な評価を行う手法が確立していなかったこと、（３）系外惑星の大気環境や磁場環境が不明確であったこと、（４）系外惑星の主星から出る宇宙放射線のスペクトルが不明であること、（５）一連のプロセスを統合的に評価できるシステムがないこと、が理由としてあげられます。

2. 研究手法・成果

今回、本研究グループは、上記の五つの問題点を以下のような取り組みによって解決しました。

(1)黒点面積および自転速度などの系外惑星の主星の観測情報と、従来のケプラー宇宙望遠鏡および関連の観測結果を用いて、それぞれの主星のフレアの発生頻度と規模を、(a) 1年に1度のフレア、(b)観測された黒点に対する最大のフレア、(c)その温度の主星で発生しうる最大のフレアに分けて、そのエネルギーの定量化を行なった。(2)電磁流体力学シミュレーション(MHD)や観測から推定されるCMEの飛行経路に基づいて、惑星の公転軌道面からの広がり角度と、水平に飛散する方向を考慮して、惑星の主星からの距離や位置に従ってCMEによる宇宙放射線強度の比を算出する定式化を行い、簡単な計算でおおよその比率を求める工夫を行なった。(3)系外惑星の大気として想定される3つの代表的な大気組成(N_2+O_2 , CO_2 , H_2)を想定し、また地球規模の双極子磁場（二つの極が生む磁場）がある場合と、磁場がない場合などを想定し、放射線輸送計算コードPHITSを用いて大気中の宇宙放射線挙動を詳細に解析して想定被ばく量を定量化した。(4)過去に観測された太陽CMEで最も大気中の透過力の高かったイベント(GLE43)と同じエネルギースペクトルを想定した。(5)これらの一連の測定データと、PHITSによる計算手法および計算結果を、系外惑星データベースExoKyotoに組み込むことにより、すべてのデータを統合的に評価できるシステムを構築した。これらの一連の工夫により、世界で初めて定量的に系外惑星における恒星フレアの影響を評価可能にした。

以上の結果、系外惑星のほとんどの表面環境では、1気圧の大気圧が備わっている限りにおいて、地表面での想定被ばく量は最大で1～数ミリシーベルト程度となり、地球型生命にとっては致命的でないレベルであることが示唆されました。また、惑星が地球のような双極子磁場を備えている場合、さらにその値が低くなるため、基本的にこれらの惑星は大気を十分に有している限りにおいて、CMEに伴う宇宙放射線被ばくの影響は少ないと評価しました。

しかしながら、以上の結果はこれらの惑星に十分な量の大気が備わっている場合であり、大気圧が十分でない環境（例えばヒマラヤ山脈山頂部など、地球の表面上における最低気圧環境）の場合、生命にとって十分に危険なレベルまで放射線被ばく量が高くなることが算定されました（図1）。さらに、これらの系外惑星の大気散逸率を評価するため、主星からの極端紫外線（XUV）成分の定量評価を行い、大気散逸率を比較したところ、地球と比較して70倍前後の高い大気散逸率が算定されました。これらを考慮すると、M型星周りのハビタブルゾーンに存在する地球型の系外惑星は、十分な大気圧を有していない可能性が高く、さらに主星の重力により潮汐固定（惑星が常に同じ面を主星に向けること）されている可能性を考えると、十分な磁場も有していない可能性が想定されます。これらを考慮し、推定被

ばく量を再算定すると（条件は「1/10 気圧、磁場なし」）、ハビタブルと考えられている系外惑星プロキシマ・ケンタウリ b（Proxima Centauri b）やトランプスト-I e（TRAPPIST-I e）であっても、毎年一度発生する頻度における CME において、地球型生命に危険な影響を及ぼすレベルの被ばく量(10 シーベルト)に近くなることが算定されました。

なお、今回の研究においては、上記（４）において、推定エネルギースペクトルを GLE43 のものとしたが、実際の M 型星のフレアにおけるスペクトルは不明です。これらの星で推定されているフレアのエネルギー規模が大きいことを考慮し、かつ、フレアのエネルギーに比例して陽子が更に加速されると考えた場合、さらに大きな被ばく量が想定されます。また同時に、これらの星のフレア発生に伴う極端紫外線は、それほど致命的なものにならないことも今回の研究にて推定されました。

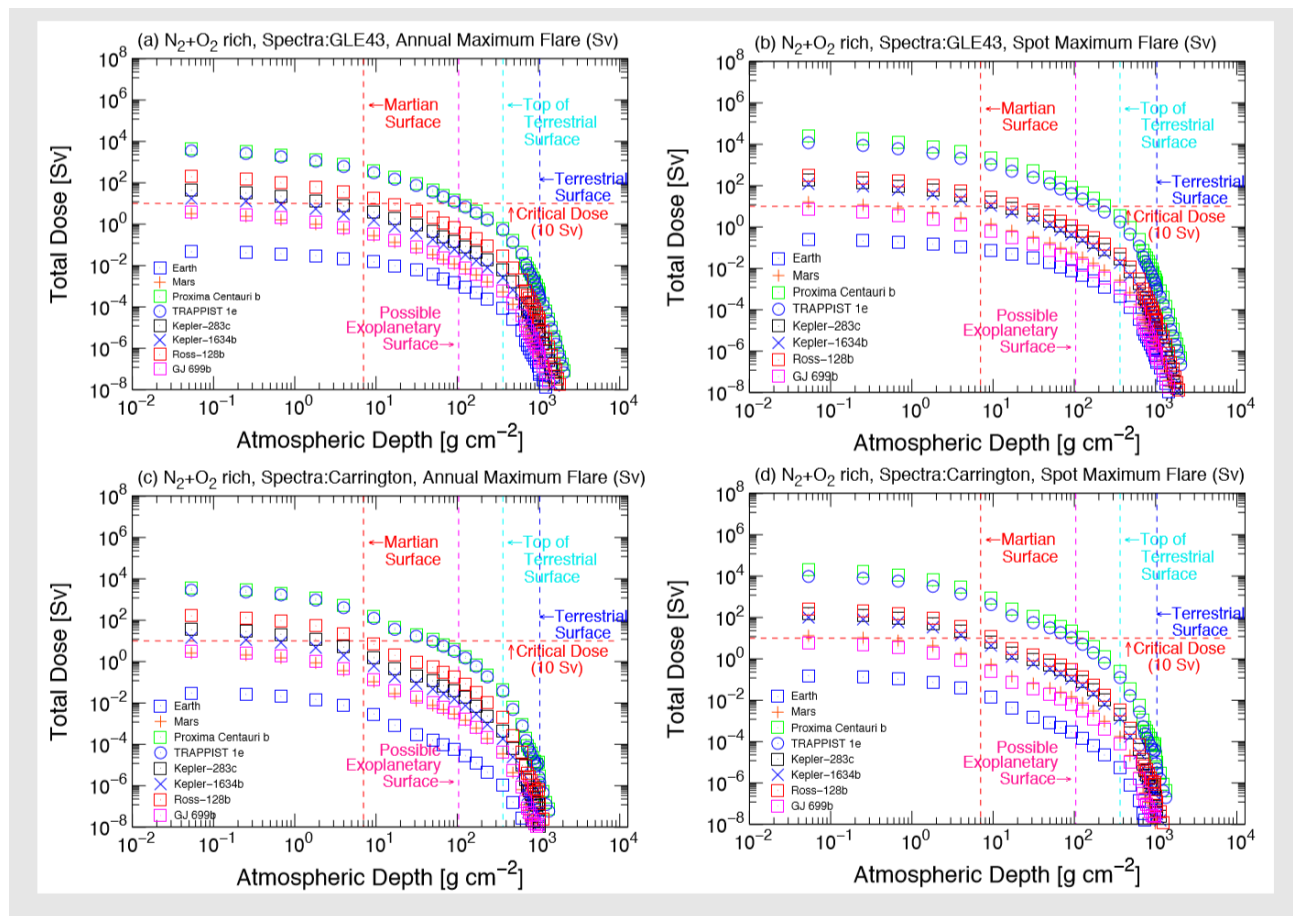


図 1 地球型大気(N₂+O₂)を透過する推定被ばく量(Sv)の鉛直分布、過去に観測された太陽 CME で最も大気中の透過力の高かったイベント(GLE43)を想定。系外惑星は Proxima Centauri b（緑の四角）, TRAPPIST-1 e（青丸）, Kepler-283 c（茶色い四角）, Kepler-1634 b（青いクロス）, Ross-128 b（赤い四角） and GJ-699 b（ピンクの四角）で、比較のために地球（blue square）と火星（red plus）を配置している。それぞれ毎年 1 回起こる最大のフレア（a）（c）と、黒点面積から推定される最大のフレア(b)(d)による推定被ばく量を計算。単位は(Sv)。火星表面の大気圧は 9 g/cm²; 地上最低気圧は 365 g/cm²; 地上の気圧は 1037 g/cm²; 系外惑星の想定大気圧は 1/10 気圧、すなわち 103.7 g/cm² とした。

3. 波及効果、今後の予定

本研究プロジェクトでは、系外惑星における恒星スーパーフレアの影響を定量的に評価する手法を世界で初めて開発し、それらを主要なハビタブルな系外惑星に適用し、様々なシナリオのもとに放射線環境について議論を行いました。また本手法は、EXOKyotoを通じて他の系外惑星への応用を可能とし、さらには同じ手法で太陽系内の惑星における被ばく量推定も可能であることを示しています。ただし、恒星スーパーフレアに起因するコロナ質量放出（CME）を実際に観測した例はなく、今後系外惑星のオーロラなどの観測や、恒星の磁場観測に基づいた電磁流体力学シミュレーション(MHD)の結果により、惑星の大気構造や粒子の加速メカニズムがより詳細に明らかになれば、今回の結果をさらに上回る評価が可能となると思われます。また、CMEに伴う宇宙放射線被ばくを予想し、危険性回避する方法を確立することは、将来の月や火星の探査において大変重要であり、有人宇宙開発に貢献することが期待されています。今後、さらにNASA/GSFCや関係機関との連携を強化し、これらの目標に向けて進んでゆきたいと考えています。

8月に実施された閉鎖性人工生態系-Biosphere2-における有人宇宙キャンプ(SCB2)にて本EXOKyoto システムを用いて、ある想定されたCMEが発生し、太陽粒子線が飛来すると想定した場合の火星表面での被ばく量の推定と、その到達時間および、被ばく回避と被ばく量推定シミュレーションを行いました（図2）。これは参加学生全員が行い、火星表面に立地しているとみたとた Biosphere2 において建物のどの場所にいるか、どのように行動すべきかを想定した「世界初」のトレーニングプログラムでした。

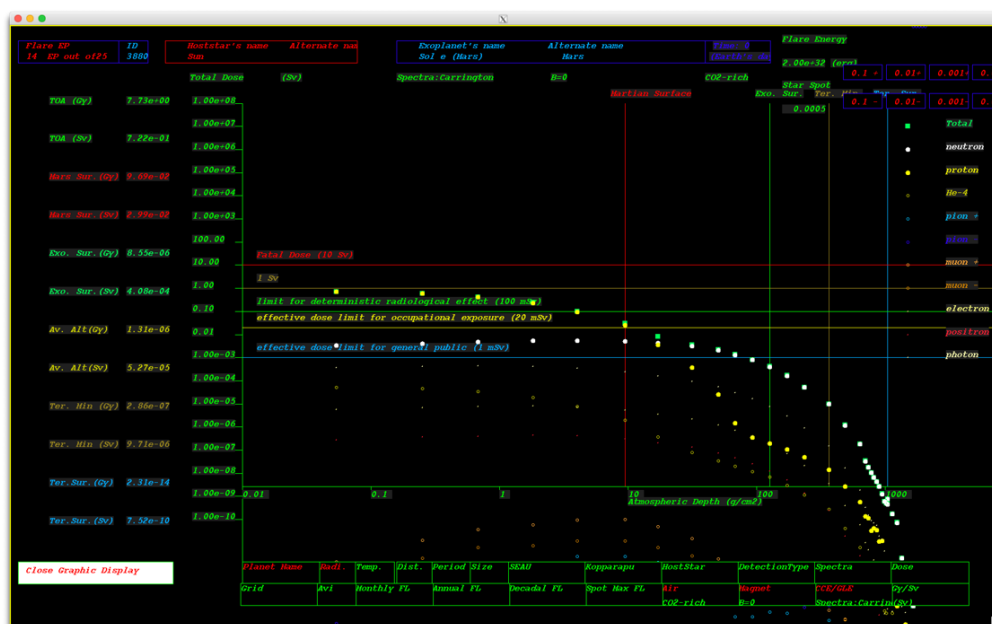


図2 X20クラスのフレアが発生し、太陽粒子線が火星に到達したと仮定した場合の推定被ばく量(GLE42/43と同じスペクトルを利用)

しかしながら、今回の計算においては、算定された被ばく量が本当に正しい値であるかどうか？を検証するためには地球もしくは火星で同様のイベント時に観測を行う必要がありますが、まだまだデータは不十分な状況です。そのような精緻化の一環として、地球における航空機被ばくの影響評価を行っていま

す。これは異なる航空機経路における太陽粒子線による被ばくを WASAVIES(Kataoka et al. 2017, Sato et al.2018)を利用して計算し、空間的、時間的に変化する四次元データと飛行経路を組み合わせ、被ばく経路毎に起こりうる最大の被ばく量を算定するものです(図 3)。

また、系外惑星に本当に生命がいるのか？あるいはいるとしたらどのような生命であろうか？遠い将来人類は移住先としてこれらの惑星を候補に挙げることができるのか？など、系外惑星の居住可能性に関しては様々な疑問が残されています。本研究はこれらの疑問に対する現時点での定量的な答えの一つですが、これからさらに具体的な議論と想像が高まることを期待しています。

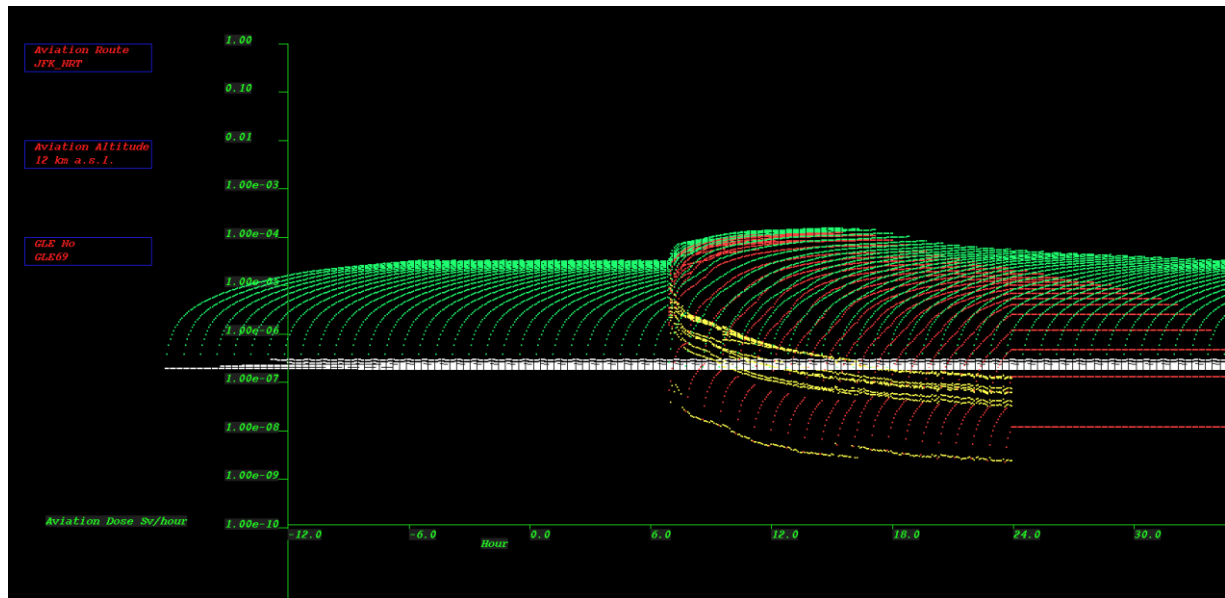


図 3 GLE69 に遭遇したと仮定した際のニューヨーク-成田間の航空機での被ばく線量。銀河宇宙線(GCR-白線)のみにさらされる飛行機が、6:50 に発生した太陽粒子線(SEP)にさらされ、トータルの被ばく量(緑線)が上昇する様子をシミュレーションしたものの。WASAVIES のデータを EXOKyoto にて解析(Fujita et al. 2020, under review)。

参考 URL

http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2019/190716_1.html

京都大学 宇宙総合学研究ユニット
<http://www.usss.kyoto-u.ac.jp/>

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 吉田キャンパス北部構内 北部総合教育研究棟 403 号室

編集人：伊藤梓

Tel&Fax: 075-753-9665 Email: usss@kwasan.kyoto-u.ac.jp