

宇宙総合学研究ユニット NEWS 2020 年 11 月号



第 3 回 SCB2 海洋環境実習 in 白浜 開催報告

第 3 回目となるアメリカ・アリゾナ州にある人工閉鎖生態系 Biosphere2 におけるスペースキャンプ (Space Camp at Biosphere2; SCB2) は、新型コロナウイルス感染症の世界的蔓延による渡航制限の下、日本側参加者の渡米を断念して国内代替地 3 か所における環境実習と宇宙無線通信実験を行うこととなった。

2020 年 10 月 24 日～25 日にかけて海洋環境実習を、和歌山県白浜でおこなった。3 つの大学から参加した 5 名の学生は、1 日目にはまず京都大学防災研究所白浜海象観測所において馬場康之准教授から、海洋固定観測点が果たす役割と、海洋環境の長期的観測の方法とその重要性について講義を受けた。その後、田辺湾で乗船し、河口部と沖合の 2 地点で海水サンプルの水質測定を行った。夜間には宇宙無線通信実験も行った。ハンディ無線機の使用方法を学び、アマチュア無線衛星 SO-50 の電波を比較的明瞭に受信することができた。

2 日目は、京都大学瀬戸臨海実験所において後藤龍太郎助教の案内のもと、京都大学白浜水族館を見学した。参加学生は海洋環境における調査方法と、環境が人間を含めた生物の生存に果たす役割について学び、火星における Biosphere3 のデザインと居住コンセプトの考案に今後活かすことになる。今回の実習で学んだ知識や得たデータは、アメリカ側の SCB2 参加者 5 名とオンラインで共有して、今後 Biosphere2 の人工の海洋環境との比較を行う予定である。

参加学生

東 亜希哉 (産業医科大学 医学部 医学科 4 年)

高畑 花帆 (近畿大学 医学部 医学科 4 年)

大上 耕平 (京都大学 工学部 物理工学科 2 年)

清水 里香 (京都大学 理学部 宇宙物理学分野 3 年)

堀山 勝輝 (京都大学 医学部 人間健康科学科 1 年)



乗船して海上 2 か所で水質測定を行った。



瀬戸臨海実験所の海岸で生物を観察した。

今後の宇宙学セミナー・関連イベントなど

日時	内容	開催方法
11月26日 (木) 13:00-14:30	第4回宇宙学セミナー タイトル：宇宙の始まりと最初のブラックホール誕生 講師：細川隆史 氏 (理学研究科 物理学第二教室 准教授)	Zoom によるオンライン開催 (事前登録必要。詳細は決まり次第宇宙ユニット HP に掲載します。)
12月11日 (金) 16:30-18:00	第5回宇宙学セミナー タイトル：宇宙ビジネス・宇宙産業拡大 講師：岩本裕之 氏 (JAXA 新事業促進部)	Zoom によるオンライン開催 (事前登録必要。詳細は決まり次第宇宙ユニット HP に掲載します。)
2021年2月 13日(土) 13:00-17:00 14日(日) 10:00-17:30	第14回 京都大学宇宙ユニットシンポジウム テーマ：「人類は宇宙に居住できるのか？ ―宇宙生物学を踏まえた教育と展望」	オンライン開催 (事前登録必要。詳細は決まり次第宇宙ユニット HP に掲載します。)

※宇宙学セミナー・宇宙ユニットシンポジウムの詳細は随時 Web ページ (<http://www.ussf.kyoto-u.ac.jp/seminar.html>) で公開いたします。

【告知】

今年度も宇宙ユニットシンポジウムを開催いたします。今回は、新型コロナウイルス感染症対策のため、オンライン開催となります。プログラムの詳細については今後宇宙ユニット HP に掲載いたします。ぜひ多くの皆さまのご参加をお待ちしております。

第14回 京都大学宇宙ユニットシンポジウム

「人類は宇宙に居住できるのか？ ―宇宙生物学を踏まえた教育と展望」

京都大学宇宙総合学研究ユニット(宇宙ユニット)では、文理を超えた幅広い領域を射程に、人類と宇宙に関わる諸問題の研究を推進しています。宇宙ユニットが主催する 14 回目のシンポジウムでは宇宙での居住に関する問題を議論します。

イーロン・マスク率いるスペース X 社が火星移住を掲げ、他惑星への移住の機運が高まっています。月面基地の構築を 2020 年代に始めようとする動きもあり、各国による火星探査機の打ち上げも進んでいます。しかし、地球外惑星への移住を実現するためには依然として高いハードルが存在します。果たして人類はこの難題をどのように解決できる可能性があるのか、最新の研究をベースに議論を行います。

さらに惑星移住を考える際には「宇宙に生命は存在するか」という点が問題になります。かつて海があったと目される火星や、間欠泉や内部海を持つ可能性がある木星衛星には生命の存在や痕跡が見つかる可能性はあるのでしょうか、また人類がこれまでに見つけた「ハビタブルな系外惑星」は居住に適した環境を持つのでしょうか。NASA のケプラー宇宙望遠鏡や TESS 宇宙望遠鏡、また 2019 年より運用が始まった日本のせいめい望遠鏡などが生み出してきた成果を踏まえ、様々な専門背景を持つ登壇者とともに、今後の展望について議論を行います。

開催概要

日時 : 2021 年 2 月 13 日(土) 13:00-17:00、14 日(日) 10:00-17:30

開催形態 : オンライン参加、オンライン配信

参加費 : 無料

申し込み : 要申し込み、11 月以降にウェブサイトにてご案内します

2 月 13 日(土) 13:00-17:00

・オンラインポスター展示交流会（発表ポスターを公募し、発表賞を設ける予定です）

・基調講演 山崎直子 氏（宙ツーリズム推進協議会理事、元 JAXA 宇宙飛行士）（予定）

2 日目 : 2 月 14 日(日) 10:00-17:30

・シンポジウム講演（登壇者は決定次第、順次ウェブサイトに掲載します）

・パネルディスカッション「人類は宇宙に居住できるか」

太陽高エネルギー粒子(SEP)とコロナ質量放出(CME)の 関係性に対する統計的研究 木原孝輔 (京都大学理学研究科 附属天文台 博士後期課程 1 年)

太陽高エネルギー粒子(Solar Energetic Particle; SEP)とは、太陽の突発的な現象によって粒子が加速されることで生み出される高エネルギー粒子(いわゆる放射線粒子)です。SEP は、宇宙空間で活動する宇宙飛行士や、特に高緯度を航行する航空機乗員を放射線被曝の危険にさらすなど、現代社会において非常に注意すべき現象です。さらには近年、火星への有人探査に与える影響なども検討され始めており、今後一層注目される宇宙天気現象^{*1}といえます。

SEP を発生させる現象(SEP イベント)は、その発生原因から Impulsive SEP イベントと Gradual SEP イベントの 2 種類に分類されます[1,2]。中でも私たちは、Gradual SEP イベントに着目しました。コロナ質量放出(Coronal Mass Ejection; CME)という、太陽大気からプラズマが放出される現象が発生する際、その放出されたプラズマの前面に衝撃波面が形成されます。この衝撃波面が粒子を加速し、高エネルギーな粒子を生み出すのが、Gradual SEP イベントです。

SEP イベントを考える上で最も重要な問題は、「どのような CME が SEP イベントを引き起こすのか？」です。観測者から見て太陽の西側 60 度付近で発生した CME は、SEP を伴いやすいことが知られており、「太陽面上のどの経度で CME が発生したか」は、SEP の発生頻度を探る上では重要な情報の 1 つです。これは言い換えると、1 つの CME を異なる場所から観測すれば、SEP の観測の有無も変化する、ということになります。そこで私たちは、地球周辺での高エネルギー粒子の観測データを持つ GOES 衛星^{*2}に加え、太陽の周りを周回するいわゆる「人工惑星」である 2 つの衛星、STEREO-A と STEREO-

B 衛星^{*3}のデータに着目しました。これらの衛星のデータにより、1 つの CME を最大 3 方向から観測することができ、様々な方角から見た CME がどのように SEP イベントの発生と関係するかを調査しました。今回私たちは、10MeV 以上のエネルギーを持ったプロトン(水素イオン)を対象としました。2006 年 12 月に STEREO 衛星が観測を開始してから現在に至るまでの期間で、規模の大きな(放出速度 900km/s 以上である)CME は 239 例存在しました。これを GOES 衛星、STEREO-A 衛星、STEREO-B 衛星の 3 方向から観測することで、 $239 \times 3 = 717$ 例のイベントについて、SEP の検出を調べることができます。これは、CME をスタートとして SEP イベントを調査した研究としては、過去最大級のイベント数です。

図 1(a)は、今回観測対象とした CME のうち、SEP を発生させたものの割合(SEP の発生率)を、観測者から見た相対経度に対して表示しています。図 1(b)は、(a)にさらに CME の放出速度の情報を加えて SEP の発生率を表しています。今回、大規模な数のイベントに対して調査を行ったことにより、どの経度帯、どの速度帯の CME が SEP を発生させやすいか、を視覚的に表すことができました。ここで登場する単位 pfu とは、proton flux unit の略で、particles/cm²/sr/s つまり単位面積、単位立体角、単位時間あたりにいくつの粒子が観測されたかを表し、SEP の強度あるいは規模を表します。どの規模の SEP に注意すべきか、は状況によって異なりますが、アメリカの気象庁にあたる NOAA の SWPC(宇宙天気予報センター)という部局では 10 pfu を警戒レベルとしています。図 1(a)は 1-10 pfu の SEP が発生した割合を灰色で、10 pfu 以上の割合を黒色で表しており、図 1(b)は 10 pfu 以上の SEP を発生させた割合を、数値と黄から赤のカラーで表しています。今回、717 例のイベントについてプロトンの観測データを調査したところ、そもそもプロトンの観測データが存在したイベントは 577 例あり^{*4}、そのうち 142 例で 1 pfu 以上、さらにそのうちの 90 例では 10 pfu 以上の SEP イベントが観測されました。

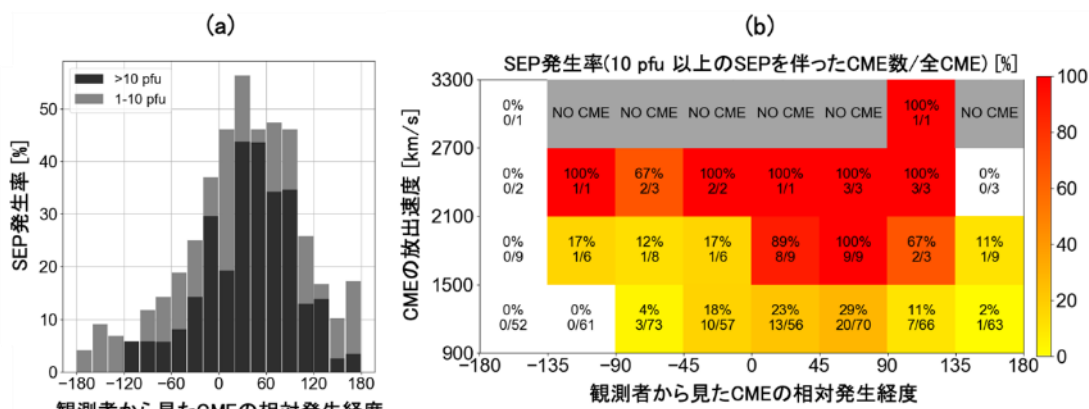


図 1: (a)観測者から見た CME の相対発生経度に対する SEP 発生率の分布。

(b)観測者から見た CME の相対発生経度と CME の放出速度に対する SEP 発生率の分布。

図 1(a)では観測者から見て西側 50~60 度付近で最も発生率が高くなっており、その発生率は 40%を超えています。これはこれまでの研究成果と整合性の取れた結果である一方、図 1(b)に着目するとさらに興味深い点が明らかになります。900-1500 km/s で放出された CME による SEP の発生率は図 1(a)と同様の傾向が見られますが、1500-2100 km/s の CME では西経 0-90 度で発生率がほぼ 100%になっており、さらに高速の CME については、より広い範囲でほぼ確実に SEP が発生してい

ます。これまで、高速な CME ほど規模の大きな SEP を伴う[3]ことや、規模の大きな CME ほど SEP を伴いやすいことが報告されていましたが、私たちの解析がそのような結果を支持することとなりました。

SEP を特徴付ける別の要因として、私たちは SEP イベントのタイムスケールに着目しました。これはつまり、「CME が発生してからどれくらいで SEP は地球まで到達するのか?」「最初に SEP が観測され始めてから、どれくらいでピークの強度に達するのか?」「どれくらい長い時間、高いピークを維持し続けるのか?」に説明を与えるということです。私たちは、1 pfu 以上のプロトンが観測されたイベント 142 例のうちの 134 例に対し、詳細なタイムスケールを測定することができました。図 2 は測定したタイムスケールの例を示しています。CME が放出されてから SEP が観測され始めるまでの時間を TO(onset time; 粒子到達時間)、SEP が観測され始めてからピーク強度の半分の値に到達するまでの時間を TR(rise time; ピーク到達時間)、ピーク強度の半分の値を上回っている時間を TD(duration; 継続時間)としました。また、このタイムスケールを説明できるような解析方法を模索した結果、「パーカースパイラル」の足元からみた CME の相対発生経度($\Delta\Phi$)を測定すると、うまく説明することができました。太陽表面近くで加速された粒子は、太陽面から惑星間空間へと伸びる磁力線に沿って放出されます。この磁力線は放射状に伸びているのではなく、太陽の自転によって曲げられて螺旋状に伸びており、これをパーカースパイラルと呼んでいます*⁵。 $\Delta\Phi$ の絶対値が 0 に近いと、観測者に繋がる磁力線の足元付近で CME が発生し、大きいほど足元から遠い位置で CME が発生したことを表しています。

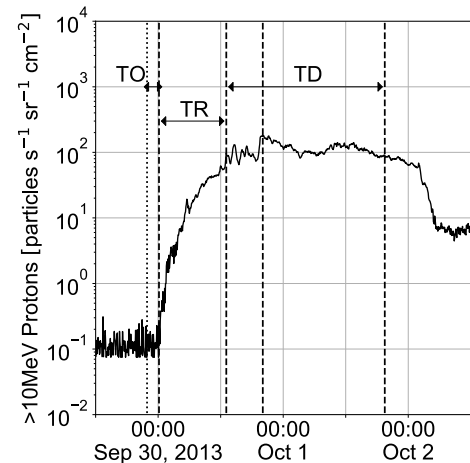


図 2: 測定したタイムスケールの例。一番左の点線が CME の放出時刻を、続く鎖線がそれぞれ、SEP の観測開始時刻、ピーク値の半分に到達した時刻、ピーク時刻、ピーク値の半分を下回った時刻。

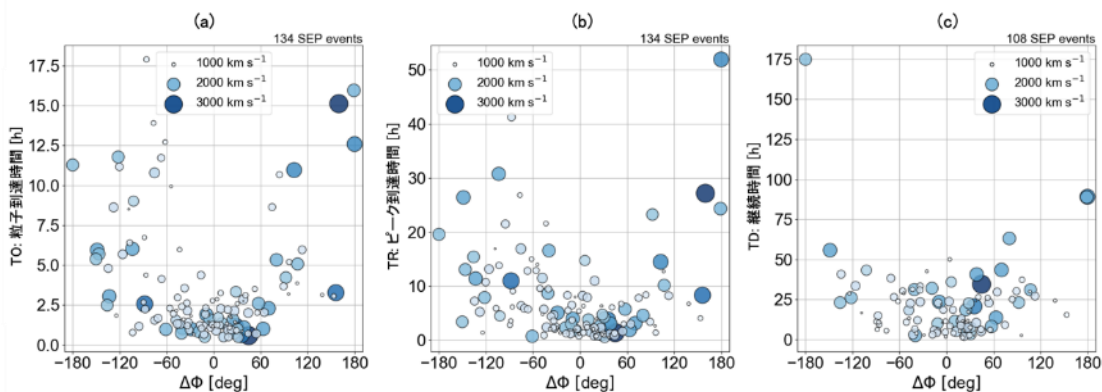


図 3: パーカースパイラルの足元から見た CME の相対発生経度($\Delta\Phi$)と各タイムスケールの関係。

図 3(a)-(c)は、横軸が $\Delta\Phi$ 、縦軸がそれぞれ、TO(粒子到達時間)、TR(ピーク到達時間)、TD(継続時間)です。各データ点の色と大きさは、CME の放出速度を表しています。図 3(a)では、 $|\Delta\Phi| = 60^\circ$ 付近が、TO(粒子到達時間)の振る舞いが大きく変わる境目になっています。図 3(b)の TR(ピーク到達時間)でも同様の傾向が見られるものの、TO(粒子到達時間)ほど顕著ではありません。図 3(c)の

TD(継続時間)ではさらにその傾向は弱くなっています。これらの結果より、 $|\Delta\Phi| < 60^\circ$ で発生した CME による SEP は、直ちに加速されて地球軌道まで到達するため、特に注意が必要と言えます。

私たちは図 1(b)で、CME の放出経度に加えて放出速度による違いを調べました。同様のことをタイムスケールに対して行くと、図 4(a)-(c)のようになりました。ここでは先行研究[4]の手法にならい、傾向を見やすくする工夫を行いました。全データ点を経度(今回は $\Delta\Phi$)で 5 グループに分割し、さらに各グループを CME の放出速度で 4 つのサブグループに分け、各サブグループでの平均値をプロットしています。

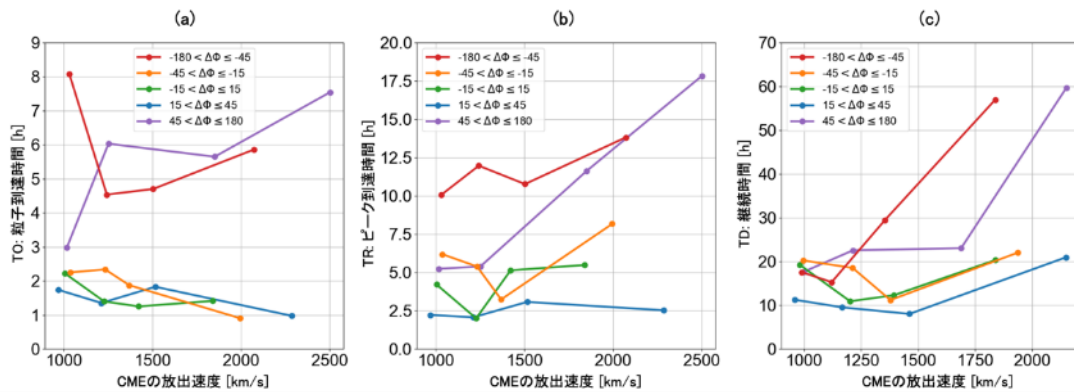


図 4: CME の放出速度と、各タイムスケールの関係性。 $\Delta\Phi$ の値で 5 グループに分割し、グループ内での代表値をプロット(詳しくは本文参照)。

図 4(a)から、 $\Delta\Phi$ が小さいグループ、つまりパークスパイラルの足元付近で発生した CME 由来の SEP イベントでは、CME 速度と TO(粒子到達時間)の間に負の相関があることが分かりました。これは、CME の放出速度が速いほど、粒子が素早く加速されて放出されることを意味します。一方で、図 4(a)や(b)、TR(ピーク到達時間)や TD(継続時間)での振る舞いは異なり、 $\Delta\Phi$ が大きいグループにおいて、弱い正の相関があるように見えます。つまり、CME の放出速度が速いイベントほど、ピークに到達するまでに時間がかかり、継続時間も長くなります。CME 速度が大きいイベントは CME 自体の規模が大きく、SEP の加速現場となる衝撃波も、より広範囲に渡って形成されることが考えられます。

本記事の内容は、米 Astrophysical Journal 誌に掲載された査読論文[5]の内容をもとに執筆しました。使用したデータの詳細等については、そちらをご参照ください。本研究は MEXT/JPSPS 科研費 JP15H05814 の助成を受け開催されたワークショップでの議論をもとに行われました。また、本研究は一部宇宙ユニットからの助成を受けています。

*1: 太陽が地球・惑星環境に与える影響を宇宙天気現象と呼びます。

*2: Geostationary Operational Environmental Satellite はアメリカの気象衛星であり、地球だけでなく太陽からの情報も取得しています。

*3: Solar TERrestrial RElations Observatory は太陽の周りを地球軌道に近い軌道で周回する人工惑星。STEREO-A(Ahead)衛星は地球に先行するような、STEREO-B(Behind)衛星は地

球と逆行するような軌道で周回しており、地球からは見えない面の太陽を観測しています。

*4: STEREO-B 衛星は 2014 年 10 月以降通信が途絶しており、それ以降のデータが存在しません。また、STEREO-A がちょうど地球から見て太陽の反対側に存在する時期はデータの感度が悪く、正確なデータが得られないなどの理由で、元々の 717 例より減少して 577 例となっています。

*5: この足元が太陽面上のどこにあるか、は太陽風(太陽から流れ出るプラズマ流)の状況によって前後しますが、平均的な太陽風速度の場合はおおよそ西経 60 度付近になります。そのため図 1(a)で見たように、西経 60 度付近で発生した CME は SEP を伴いやすい、という訳です。この領域を、観測者と太陽面の接続が良い領域、ということで、“well-connected”な領域と呼びます。

[1] Reames, D. V. 1999, SSRv, 90, 413

[2] Reames, D. V. 2013, SSRv, 175, 53

[3] Kahler, S. W. 2001, JGR, 106, 20947

[4] Kahler, S. W. 2013, ApJ, 769, 110

[5] Kihara, K., Huang, Y., Nishimura, N., et al. 2020, ApJ, 900, 75

宇宙ユニットの活動やイベントについては、下記サイトをご覧ください。また、宇宙ユニットや本 NEWS に関する皆様のご意見等も気軽に下記メールアドレスまでお送りください。

京都大学 宇宙総合学研究ユニット

<http://www.uss.s.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：平井颯

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