

3.2.4 太陽高エネルギー粒子

八代 誠司 (米国カトリック大学 NASA ゴダード宇宙航空センター)

(2020年6月17日受付、2021年5月31日公開)

太陽嵐によって引き起こされる宇宙天気現象の一つが太陽高エネルギー粒子 (Solar Energetic Particle; SEP) である。太陽嵐により最大数 GeV まで加速された荷電粒子 (電子、陽子、イオン) が、らせん状の惑星間磁場に沿って地球に飛んでくる現象である。SEP は狭義には加速陽子を意味し、プロトン現象 (Proton Event) と呼ばれることもある。電磁波と比較すると遠回りをして地球に飛来するが、数 GeV 陽子の速度は光速の 90% 程度と非常に高速のため、太陽嵐発生 (を地球で観測した時刻、実際の発生時刻の約 500 秒後) から数分後には地球軌道に SEP が到達する。SEP は宇宙飛行士や高緯度飛行航空機内の乗客・乗員の被ばく、衛星障害などの宇宙天気被害をもたらす。

3.2.4.1 SEP 観測

SEP は米国の気象衛星 (静止衛星で地球磁気圏内に位置) の GOES 衛星でモニター観測されている。静止軌道における地球磁場の強さは約 100 nT で、陽子のラーモア半径は (ピッチアングルが 90° の場合)、0.7 Re (10 MeV)、2.3 Re (100 MeV)、8.9 Re (1 GeV) である。ここで Re は地球半径である。地球磁気圏の大きさ (太陽側で 10 Re) と比較すると 100 MeV 以下の陽子のラーモア半径は小さいので、陽子は遮蔽されて静止軌道 (6.6 Re) まで届かないと思われるかもしれない。しかし実際には 20 MeV 以上の陽子は静止軌道まで自由に侵入することが、磁気圏内外の衛星データの比較から判明している (Paulikas and Blake, 1969)。また低エネルギーの SEP は磁気圏尾部より静止軌道に侵入してくる。太陽近傍で加速されて飛んでくる粒子ではあるが、イベント初期を除き SEP は等方的になる。

SEP の規模を表す陽子フラックスには、微分フラックス (Differential Flux) と積分フラックス (Integral Flux) の 2 種類がある。単位はそれぞれ Particles/ (cm² s sr MeV) と Particles/ (cm² s sr) であり、後者は pfu (Particle Flux Unit) とともに表記される。米国 NOAA は積分フラックスの、とくに >10 MeV フラックスを SEP の多寡を表す指標として使っている。GOES 衛星は様々なエネルギーチャンネルで Differential Flux を測定しており、Integral Flux は計算で求められている。

3.2.4.2 Impulsive SEP と Gradual SEP

SEP はその組成や継続時間などから Impulsive SEP と Gradual SEP に分類される (Reams, 1999,

2003)。表 1 にその特徴をまとめる。一番の違いは ^3He の多寡にある。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を調べると Gradual SEP は太陽風と変わらないのに対し、Impulsive SEP では 1 程度と ^3He が非常に多いため、両者で異なる加速メカニズムを考える必要がある。Impulsive SEP は鉄の電離度が高いため、フレアによって高温になった粒子が加速されていると考えられている。加速電子が観測される領域の広がり（経度）の違いは、自然に考えれば、加速領域の大きさの違いを反映している。Impulsive SEP が 30° 以内と狭い範囲なのに対し、Gradual SEP は 120° 以上に広がる。そのため Gradual SEP は広範囲に膨張する CME の前面に発生する衝撃波で加速されていると考えられている。完全な一対一対応ではないが、付随する電波バーストも異なる。Impulsive SEP は III 型電波バースト（フレア領域で加速された電子が惑星間空間へと逃げ出すときに発生する電波放射）が付随するのに対し、Gradual SEP は II 型電波バースト（高速 CME によって駆動される衝撃波によって起こる電波放射）を伴う。このように様々な観測から Impulsive SEP は太陽フレアで、Gradual SEP は CME 前面の衝撃波によって加速されると結論されている。

表 1. SEP の分類。Reams (1999, 2003) より。

| | Impulsive SEP | Gradual SEP |
|-----------------------------|---------------------|------------------|
| 別名 | ^3He -Rich | Long-duration |
| 組成 | Electron rich | Proton rich |
| $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比 | ~ 1 | ~ 0.0005 |
| Fe/O 比 | ~ 1 | ~ 0.1 |
| 鉄の平均電離度 | ~ 20 | 10 – 14 |
| 継続時間 | 数時間 | 数日 |
| 加速粒子の広がり（経度） | $< 30^\circ$ | $\sim 180^\circ$ |
| 太陽電波バースト | III 型 | II 型 |
| 起源 | 太陽フレア | CME 衝撃波 |

3.2.4.3 Gradual SEP と CME

1942年2月28日に発生した太陽フレアにともなって宇宙線の増加が観測され、SEPは発見された(Forbush 1946)。この場合のように地上で観測されるSEPは、Gradual SEPの中でも特にGround Level Enhancement (GLE)と呼ばれる。当時はGradual SEPも太陽フレアで加速されていると考えられていたが、30年後にCMEが発見され(Tousey 1973)、そしてCME衝撃波によるSEP加速が提案され広く受け入れられている(Kahler et al. 1978, 1984)。Gradual SEPへの太陽フレアの寄与が無いのかは検証が難しい問題であるが、少なくともCMEを伴わないフレアはたとえXクラスと巨大であってもGradual SEPを発生させることはないので、Gradual SEPの加速にCMEが本質的に重要であることは疑いようがない。

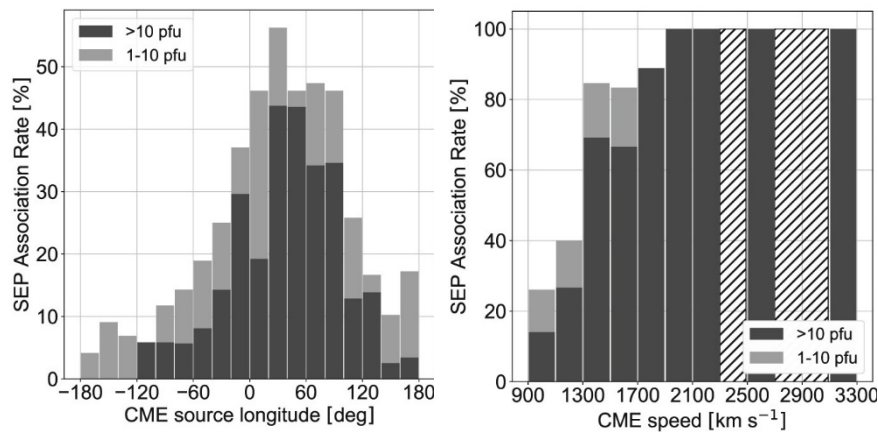


図1. (左) 高速CME (>900 km/s)が発生したときのSEP付随率の経度依存性。(右) E10-W100で発生した高速CMEのSEP付随率のCME速度に対する依存性。網掛のピンにはサンプル不足のためデータがない。(Kihara et al. 2020 より)

図1左は高速CME(速度900 km/s以上)が発生したときのSEP付随率で、CMEの発生場所が太陽中心から西40°あたりにピークを持つ。高速CMEが太陽のどの場所で発生しても同じようにSEPは発生するはずなので、発生経度によるSEP付随率の違いは加速された粒子が観測者(地球)に届くかどうかの違いを反映している。Gradual SEPはCME衝撃波により太陽近傍で加速され、スパイラル状の惑星間磁場にそって地球に飛来してくると考えられており、その描像と図1は一致している(太陽風の速度が450 km/sのとき西50°付近からの磁場が地球へとつながっている)。E10-W100の範囲でCMEが発生したときにSEPが観測されやすく、地球との磁力線を介した結びつきからWell-Connected Longitudeと呼ばれる。Well-Connected Longitudeは研究ごとに異なり、きっちりとした経度範囲は決まっていない。

Well-Connected Longitude (E10-W100)で発生した高速CMEのSEP付随率のCME速度に対する依存性を図1右に示す。Major SEP(>10 MeV陽子のフラックスの最大値が10 pfuを超えるSEP)の付随率は、1000 km/sのCMEで10%強程度であり、速度増加とともに増加し、2000 km/s超で100%になる。CME速度(すなわち衝撃波速度)が本質的に重要であることを示している。

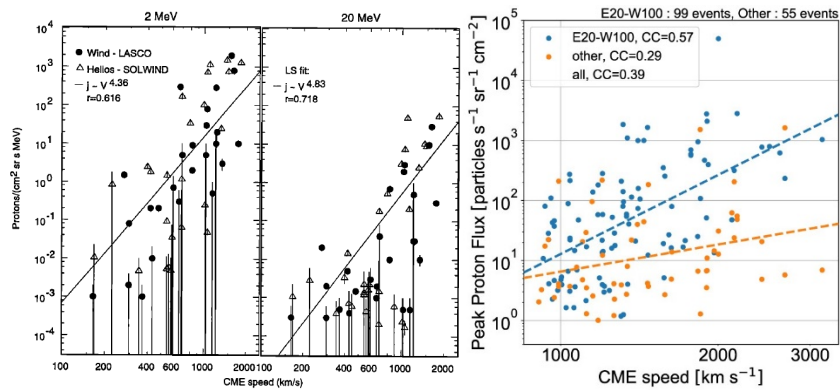


図 2. SEP 微分フラックス (左; Kahler et al. 2001 より) と SEP 積分フラックス (右; Kihara et al. 2020 より) の CME 速度との関係。

CME 速度と SEP フラックスの関係を図 2 に示す。左図の Y 軸は 2 MeV、20 MeV 付近の微分フラックスで、右図は >10 MeV の積分フラックスと違いがある。両者とも CME 速度の増加とともに、ピーク SEP フラックスが増加しているのがわかり、高速な CME ほど宇宙天気にとって重要であることは明らかだ。しかし一方相関は強くなく、ある CME 速度に対し SEP フラックスは 3-4 桁もの幅がある。Kihara et al. は Well-Connected Longitude の外側のイベント (オレンジ) と比較して、内側のイベント (青) は平均的には強いことを示したが、両者はオーバーラップしている。また Well-Connected Longitude で発生したイベントに限っても、ある CME 速度に対する SEP フラックスは 3 桁もの幅が残っている。我々の SEP 現象の理解が著しく不足していることを示している。

参考文献

- Forbush, S. E. 1946, *Physical Review*, 70, 771
- Kahler, S. W., Hildner, E., & Van Hollebeke, M. A. I. 1978, *SoPh*, 57, 429
- Kahler, S. W., Sheeley, N. R., Howard, R. A., Jr., et al. 1984, *JGR*, 89, 9683
- Kihara, K., Huang, Y., Nishimura, N., Nitta, N. V., Yashiro, S., Ichimoto, K., Asai, A 2020, *ApJ* 900, 75
- Paulikas, G. A., Blake, J. B., 1969 Penetration of solar protons to synchronous altitude. *Journal of Geophysical Research*, Volume 74, Issue 9, p. 2161
- Reames, D. V. 1999, Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere. *Space Science Reviews*, v. 90, Issue 3/4, p. 413-491
- Reames, D. V., 2013, The Two Sources of Solar Energetic Particles. *Space Science Reviews*, Volume 175, Issue 1-4, pp. 53-92