3.2.3 コロナ質量放出

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 5 月 22 日受付、2021 年 5 月 31 日公開）

磁化したプラズマが太陽から惑星間空間へと噴出する突発現象があり、これをコロナ質量放出、英語では Coronal Mass Ejection（CME）という。CME の噴出速度は数十 km/s から 3500 km/s と２桁ほど幅があり、その平均値は 450 km/s 程度である。前面を流れる太陽風の流速よりも CME が十分速い場合、その前面には衝撃波が形成され粒子加速が起こる。高速 CME が発生した場所が地球から見て太陽の西半球だった場合は、加速粒子は惑星間磁場に沿って地球へ到達し、プロトン現象として観測される（Reames 1999）。巨大な CME が地球方向へ噴出されれば 18 時間～５日後に地球に到達し、CME が南向き磁場を持っていると磁気嵐を引き起こす（Gosling et al. 1991, Zhang et al. 2007）。このように CME は私たちの生活に影響をおよぼす宇宙天気現象の主原因である。

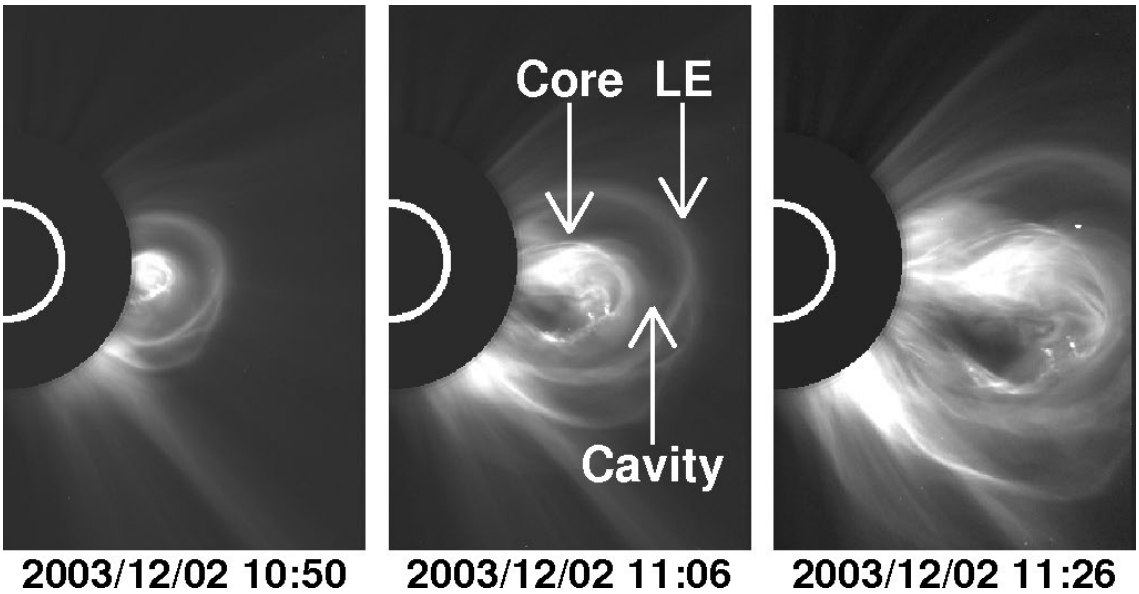

図 1.　SOHO 探査機搭載 LASCO コロナグラフで観測された CME。白い半円は太陽の場所と大きさを表す。

図１に SOHO 衛星搭載の LASCO コロナグラフで観測された CME の時間変化を示す。時間とともに膨張しながら太陽から遠ざかる明るい塊が CME である。中心にある明るい構造は Core と呼ばれる。Core は、太陽表面付近ではプロミネンス（フィラメント）に対応する（Webb & Hundhausen 1987, Gopalswamy et al. 2003）。最も外側にある、やや明るい半円のループが Leading Edge（LE）、Core と LE の間にある暗い領域が Cavity または Void と呼ばれる。これら LE, Cavity, Core は Three-Part Structure

と呼ばれ、CME の基本構造である（Illing & Hundhausen 1985, Webb 1988）。

表 1. 主な宇宙天気現象の発見の歴史

観測年	現象	発見者
1859 年	太陽フレア	Carrington 1859
1891 年	高速プロミネンス噴出	Fenyi 1892
1908 年	黒点磁場	Hale 1908
1942 年	太陽高エネルギー粒子（SEP）	Forbush 1946
1947 年	II 型電波バースト	Payne-Scott et al. 1947
1962 年	惑星間ショック	Sonett et al. 1964
1971 年	コロナ質量放出（CME）	Tousey 1973

CME 観測の歴史

CME は宇宙天気研究の骨格となる現象であると今日では知られているが、その発見は他の関連現象に比べてかなり遅い（表１）。人工日食により太陽コロナを観測できるコロナグラフは 1931 年に発明されたが（Lyot 1939）、非常に暗い CME は直ぐには発見されなかった。Seventh Orbiting Solar Observatory（OSO-7; 1971 年-1973 年）により地球大気の影響を受けない宇宙からのコロナグラフ観測が行われ、1971 年 12 月 13 日から翌日にかけて、初めて CME は観測された（Tousey 1973）。OSO-7 は 1974 年 7 月までの２年半で 20 例の CME を観測した。CME の発見により宇宙からのコロナグラフ観測の重要性が認識された。

発見当初は Coronal Mass Ejection でなく Coronal Transient と呼ばれていた。本稿執筆時の日本語版 Wikipedia には命名の理由として「当時は太陽フレアに伴う爆風ではないかと考えられており」とあるが、この説明は誤りと思われる。そのような文献は見つけられないし、発見された現象がプロミネンス噴出に関連したプラズマ雲の噴出であると、当時のプレスリリース（NRL SSD Research Achievements: 1960–1970）や Tousey and Koomen（1972, アメリカ天文学会紀要）で説明されている。Gosling et al.（1974）によれば（コロナグラフで観測される）コロナの急激な変化を示す現象全般を Coronal Transient と命名したようだ。その中のカテゴリーとして Mass Ejection Coronal Transient があり、後に Coronal Mass Ejection と改名される。

1973 年 5 月から性能が向上したスカイラブのコロナグラフが観測をはじめ、1974 年 2 月までに 110 例の CME を観測した。CME 活動の起源が磁場にあること、強いフレアを伴う CME は速いことなどが発見された（MacQueen et al. 1974, Hildner et al. 1976, Gosling et al. 1976）。

P78-1 衛星（Solwind; 1979-1985）は約 1000 例の CME を観測し太陽周期変化を明らかにした。また地球方向に飛来する Halo CME を発見し、宇宙天気研究における Halo CME の重要さを示した（Howard et al. 1985）。Solar Maximum Mission（SMM; 1980, 1984-1989）も約 1000 例の CME を

観測し、CME の基本的構造を明らかにし（Illing & Hundhausen 1985）、その特徴や太陽周期変化を明らかにした（Hundhausen 1993, Hundhausen et al. 1994）。

Solar and Heliospheric Observatory（SOHO; 1995-Present）搭載の Large Angle and Spectrometric Coronagraph（LASCO）は 1996 年から観測をはじめ、30,000 例以上の CME を観測した（http://cdaw.gsfc.nasa.gov/; Yashiro et al. 2004）。24 年以上長期観測で異なる太陽活動周期の比較が可能となり、また大量のデータ取得によりフレアなど様々な現象との関連研究も進展し、2 つの CME が関連する CME Interaction とそれに伴う粒子加速（Gopalswamy et al. 2001）などの新しい現象も発見された。そして Solar Terrestrial Relations Observatory（STEREO; 2006-Present）が 2006 年に打ち上げられ、CME 多点観測により詳細な宇宙天気研究が可能となった。

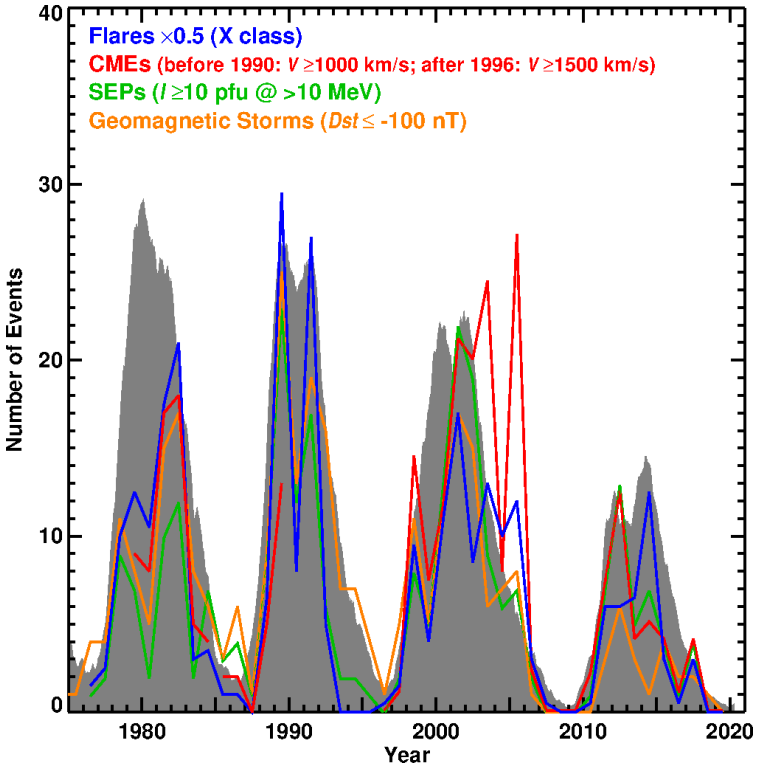

図 2. 宇宙天気現象の発生数の太陽周期変化。

図 2 に主な宇宙天気現象の発生数の太陽周期変化を示す。CME（赤）は高速 CME の発生数で、1979-1985 が Solwind、1984-1989 が SMM、そして 1996 年以降が SOHO による観測である。コロナグラフの性能が大きく異なるので、Solwind と SMM は速度が 1000 km/s 以上の CME を、SOHO では 1500 km/s 以上の CME の観測数を表示している。太陽フレア（青）は GOES 衛星による分類で X クラスフレアの数である。表示の関係でその半分をプロットしている。太陽高エネルギー粒子（緑; Solar Energetic Particles（SEPs））は GOES 衛星の >10 MeV フラックスで 10 pfu（particle flux unit; proton/（cm^2 s sr））以上のイベント数、磁気嵐（橙; Geomagnetic Storms）は Dst 指数が -100 nT 以下の磁気嵐の発生数を表示している。Dst 指数は京都大学地磁気世界資料解析センターから取得した。灰色の

背景は黒点数（Royal Observatory of Belgium より取得）の変化を示す。

すべての宇宙天気現象の増減は、おおまかには黒点数の増減に対応する。極大期には発生数が増加し、極小期には減少する。第 21 太陽活動周期（Solar Cycle 21; SC21）は当てはまらないが、SC22、SC23、SC24 とピーク黒点数が減少するのに対応して、フレア数、CME 数、SEP 数、磁気嵐数も減少しているのが分かる。太陽活動の減衰期には巨大黒点が現れることが知られており、少数の巨大黒点が多数の宇宙天気現象を引き起こすため、例えば 2005 年は黒点数の割には宇宙天気現象のイベント数が大きい。

また SC24 を詳細にみると、高速 CME 発生数のピークは 2012 年に、フレア発生数のピークは 2014 年にある。それぞれ北半球と南半球での黒点数ピークに対応する。SEP 数と磁気嵐数のピークは 2012 年にあり、高速 CME 数のピークと一致する。フレアと CME は密接に関連した爆発現象であるが、約 10%の X クラスフレアは CME を伴わず（Yashiro et al. 2005）、そのようなフレアは SEP も磁気嵐も引き起こさないためである。

CME の発生頻度

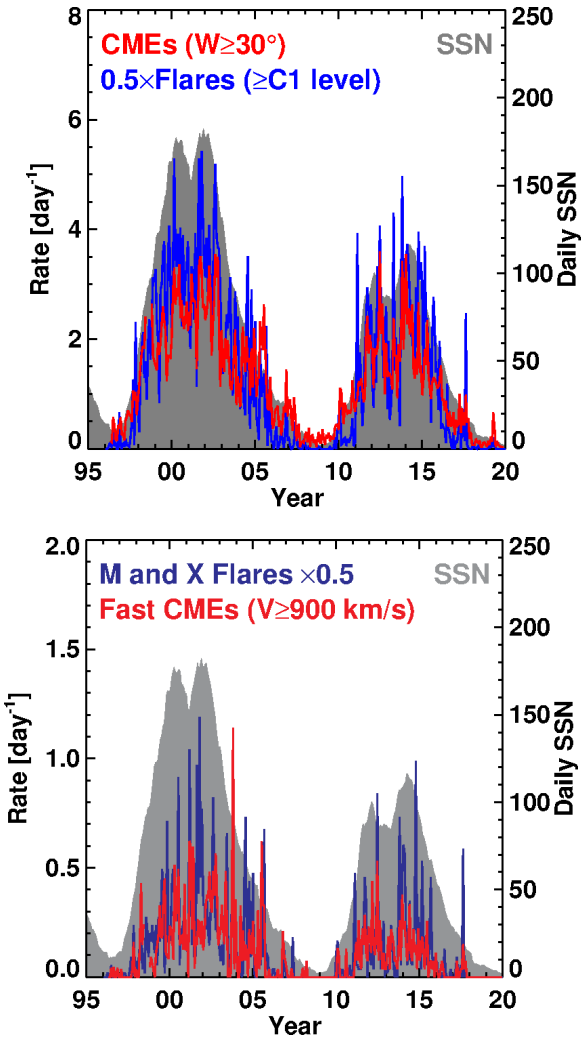

図 3. 太陽フレア（青）と CME（赤）の発生数の太陽周期変化。

図３左に Carrington Rotation（27.3 日）ごとの LASCO コロナグラフで観測された CME（赤; 幅 30°以上）と太陽フレア（青; C クラス以上）の平均発生頻度を示す。表示の関係でフレア数を半分にして表示しており、実際のフレア数のピークは 10 個/day を超える。CME もフレアなどの活動現象と同様に、極小期に発生数が少なく、極大期に多く発生する現象であることがわかる。極小期には CME が発生しない日も多くあり、平均すると 0.5 個 / day 未満となる。極大期には発生数が 3 個/day を超えることもある。第 23 太陽周期（Solar Cycle 23; SC23）と第 24 太陽周期（Solar Cycle 24; SC24）を比較すると、平均黒点数は 40%減少しているのに対し、CME 発生数は変化があまりない（Gopalswamy et al. 2020）。CME を自動認識している CACTus のカタログ（http://sidc.be/cactus/）でも同様の結果がみられる。CME のおよそ半数は静穏領域で発生するので、その寄与が大きいのかもしれない。

図３右に高速 CME（赤; 速度が 900 km/s 以上）と M クラス以上のフレア（青）の発生頻度を示す。SC23 のピークでは高速 CME の発生数は 1 個 /day を超えている。これは 2003 年 10 月のハロウィーンイベント群を含む期間である。SC23 と SC24 を比較すると、黒点数の減少に対応して高速 CME 数も減少しているのがわかる。これは高速 CME のほとんどが活動領域で発生するためである。

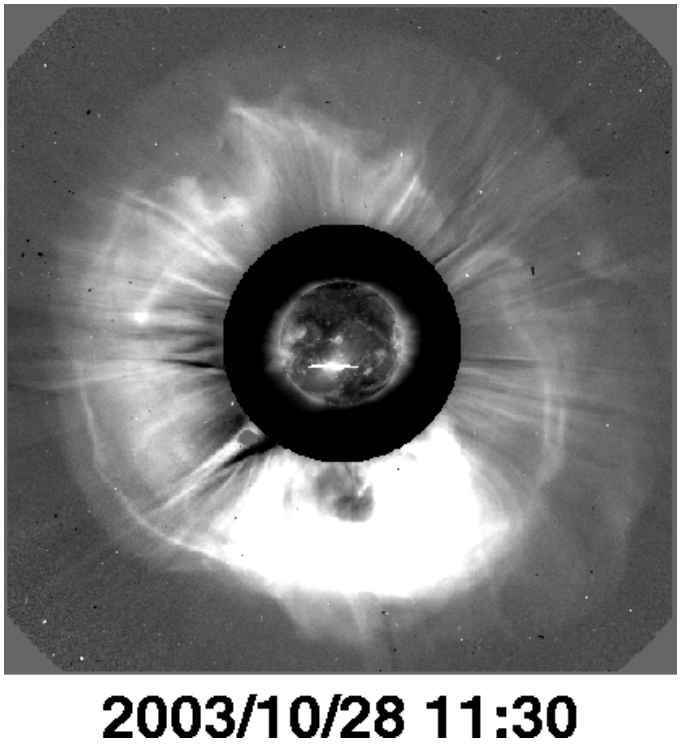

図 4. LASCO で観測された Halo CME。

Halo CME

CME が太陽のディスク中心付近（または真裏）で発生し、Sun-Earth Line を貫くように伝播すると、遮光板の周りを覆い尽くす CME として観測され（図４）、Halo CME と呼ばれる（Howard et al. 1982）。太陽前面で発生した Halo CME は地球に到達するので宇宙天気研究において非常に重要である。

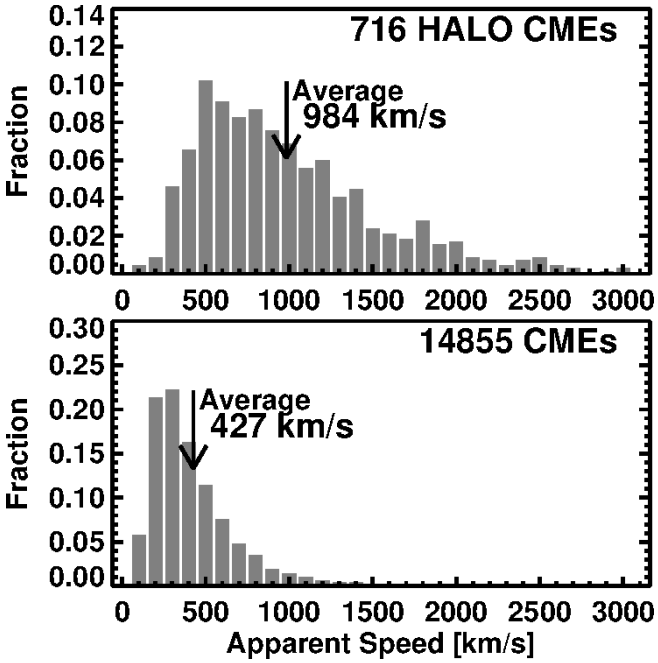

図 5. HALO CME（上）と幅 30°以上の CME（下）の速度分布。

図 5 に Halo CME（上）と幅 30°以上の CME（下）の速度分布を示す。速度は見かけの速度であり、射影効果の補正は行っていない。分布のピークは、幅 30°以上のすべての CME が 300 km/s であるのに対し、Halo CME は 500 km/s にある。 Halo CME は分布が右側（高速側）に大きく広がり、平均速度で比較すると、すべての CME の 427 km/s に対し、Halo CME は 984 km/s と２倍以上も速い。幾何学的に考えた場合、ディスク中心で発生する Halo CME は、速度ベクトルが視線方向に近いので射影効果が大きく働き、見かけの速度は遅くなるように思われる。

Halo CME として観測されるためには、Sun-Earth Line が CME を貫く必要がある。元々の幅が広い CME ほど、Sun-Earth Line が CME を貫く確率があがるので、Halo CME として観測されやすい。CME が Cone 形状をしていると仮定して Halo CME の実際の幅を見積もると 120°程度となり、Halo CME は本来の幅が大きいことが確認されている（Michałek et al. 2003）。そして CME には幅が広いほど速度が大きいという関係がある（Yashiro et al. 2004）。したがって、速度の大きい、幅の大きい CME ほど Halo CME として観測される確率が高くなる。この選択的バイアスのため、Halo CME は非常に速い CME の集まりとなっている。

参考文献

Carrington, R.C. 1859, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 20, 13

Cliver, E. W, Feynman, J., & Garrett, H. B., 1990, J. Geophys. Res., 95, 17103

Dryer, M. 1994, Space Sci. Rev., 67, 363

Fenyi, J. 1892, Astron. Astrophys. 11, 63

Forbush, S. E. 1946, Physical Review, 70, 771

Gopalswamy, N., et al. 2001, J. Geophys. Res., 106, 29207

Gopalswamy, N., et al. 2003, ApJ, 586, 562

Gopalswamy, N., et al. 2004, J. Geophys. Res., 109, A12105

Gopalswamy, N., et al. 2005, J. Geophys. Res., 110, A09S00

Gopalswamy, N., et al. 2008, J. of Atmos. Solar-Terr. Phys., 70, pp. 245

Gopalswamy, N., et al. 2009, J. Geophys. Res., 114, A00A22

Gosling, J. T. 1993, J. Geophys. Res., 98, 18937

Gosling, J. T., et al. 1976, Sol. Phys., 48, 389

Gosling, J. T., et al. 1991, J. Geophys. Res., 96, 7831

Hale, G. E., 1908, ApJ, 28, 315

Harrison, R. A., 1986, A&A, 162, 283

Harrison, R. A., et al. 1990, J. Geophys. Res., 95, 917

Hildner, E., et al. 1976, Sol. Phys., 48, 127

Howard, R. A., et al. 1982, ApJ, 263, L101

Howard, R. A., et al. 1985, J. Geophys. Res., 90, 8173

Hundhausen, A. J. 1993, J. Geophys. Res., 98, 113

Hundhausen, A. J., et al. 1994, J. Geophys. Res., 99, 6543

Illing, R. M. E. & Hundhausen, A. J. 1985, J. Geophys. Res., 90, 275

Kahler, S. W. 1992, ARA&A, 30, 113

Kahler, S. W. et al. 1984, JGR, 89, 9683

Kahler, S. W., Sheeley, N. R., & Ligget, M. 1989, ApJ, 344, 1026

Kahler, S. W., Reames, D. V., & Sheeley, N. R. 2001, ApJ, 562, 558

Lin, J., 2004, Sol. Phys., 219, 169

Lyot, M. B. 1939, "Study of the solar corona and prominences without eclipses", Mon. Not.Royal Astron. Soc., 99, 578

MacQueen, R. M., et al. 1974, ApJ, 187, L85

Michałek, G., et al., 2003, ApJ, 584, 472

Munro, R. H. et al. 1979, Sol. Phys., 61, p. 201-215.

Payne-Scott R., Yabsley D.E., Bolton J.G. 1947, Nature 160, 256

Reames, D. V. 1999, Space Sci. Rev., 90, 413

Sonett, C. P. et al. 1964, Physical Review Letters, 13, 153

Tousey, R., Koomen, M. 1972, Bulletin of the American Astronomical Society, 4, 394

Tousey R. 1973, in Space Research XIII, edited by M. J. Rycroft and S. K Runcorn, p. 713, Akademie-Verlag, Berlin

Vourlidas, A., et al. 2002, in Proc. 10th European Solar Physics Meeting, Solar Variability: From Core to Outer Frontiers, Prague, Czech Reg., ed. A. Wilson (ESA SP-506; Noordwijk: ESA Publications Division), 91

Vršnak, B., et al. 2004, Solar Physics, 225, 355

Webb, D. F. 1988, J. Geophys. Res., 93, 1749

Webb, D. F. & Hundhausen, A. J. 1987, Sol. Phys., 108, 383

Yashiro, S., et al. 2004, J. Geophys. Res., 109, A07105

Yashiro, S., et al. 2005, J. Geophys. Res., 110, A12S05

Yashiro, S., et al. 2006, ApJ, 650, L143

Yashiro, S., et al. 2008, ApJ, 673, 1174

Zhang, J. et al. 2001, ApJ, 559, 452

Zhang, J. et al. 2007, J. Geophys. Res., 112, A10102