

# コロナ質量放出 (CME) の太陽周期変化

八代 誠 司

〈The Catholic University of America, Washington, D.C. 20064, USA〉

e-mail: yashiro@cdaw.gsfc.nasa.gov

SOHO 衛星搭載の LASCO コロナグラフは 1996 年から 9 年以上観測を続け、9,000 例ものコロナ質量放出 (Coronal Mass Ejection; CME) を観測した。筆者らは、そのすべての CME について解析し、次のことなどを明らかにした。

- (1) 太陽活動 (黒点数) の増減とともに CME の発生頻度も増減する。
- (2) 太陽活動極小期では赤道帯でのみ発生し、極大期では高緯度帯でも発生する。
- (3) CME の速度は、極小期では 300 km/s、極大期では 500 km/s と、太陽活動に合わせて増減する。

いくつかの結果は LASCO 以前の 1980 年代の観測でも発見されていたが、LASCO コロナグラフの 9 年以上にわたる継続的な観測と、感度の向上に伴う CME の検出数の増加により、太陽活動の増減とともに CME の特徴が変化する様子がより鮮明になった。

## 1. はじめに

1971 年、アメリカの OSO-7 衛星は、太陽の外層大気であるコロナの一部が惑星間空間へと放出される現象を発見した<sup>1)</sup>。当初は Coronal Transient と呼ばれていたが、後に Coronal Mass Ejection (CME)、日本語ではコロナ質量放出と呼ばれるようになった。CME は太陽本体 (光球) よりも非常に暗いので、その観測は人工的に日食と同じ状態<sup>\*1</sup>を作り出すコロナグラフという装置で行われる。さらに地上観測では地球大気による散乱光の影響が大きいため、人工衛星による宇宙からの観測がメイン<sup>\*2</sup>となる。70 年代にはスカイラブ衛星が、80 年代には SMM 衛星と P 78-1 衛星が

CME を観測してきた<sup>2)-4)</sup>。そして 96 年からは SOHO 衛星搭載の LASCO コロナグラフ<sup>5)</sup>による観測が始まり、より鮮明な CME の映像を得ることができた。図 1 (表紙) は LASCO が観測した CME の一例である。時間の経過とともに膨張し、太陽から遠ざかる方向に伝播していく明るい塊が CME である。動画を見るとより理解が深まるので、インターネットに接続できる環境のある方は LASCO ホームページ<sup>\*3</sup>で MPEG 動画をご覧ください。

フレアなど他の活動現象と同様に、CME の活動の起源が磁場にあることは間違いない。図 1 (表紙) に見られる明るいループ状の構造は磁力線の形を表していると考えられており、CME とは磁

\*1 光球からの光はカメラに届かないように、カメラの前に遮蔽板を置く。遮蔽板が月の代わりとなり、日食と同じ状態になる。

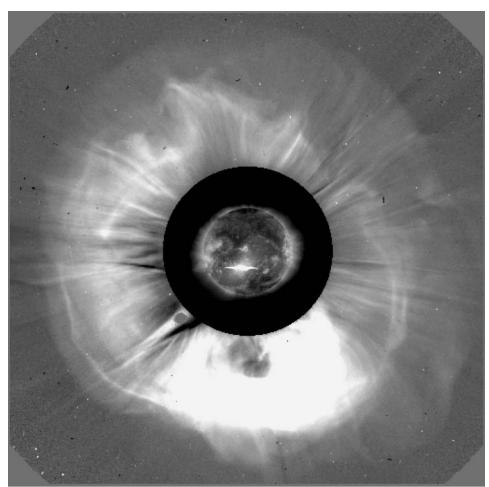
\*2 地上観測では、ハワイ島マウナロア山山頂にある MK4 コロナグラフが有名であり、LASCO と補間的な観測を行っている。

\*3 LASCO ホームページ <http://lasco-www.nrl.navy.mil/>

化したプラズマが太陽から放出される現象である。CME の太陽近傍 (<0.15 AU) での速度は 10-3,000 km/s (平均 450 km/s), 総質量は  $10^{14}$ - $10^{16}$  グラム (平均  $10^{15}$  グラム) であることが分かっており, 両者とも 2 桁ほど分布に幅がある。CME の出発点付近の太陽表面を見ると, フレアやプロミネンス噴出などがよく観測される。プロミネンスは CME 中心部のもっとも明るいコアに対応することが分かっており, CME とプロミネンス噴出は基本的に同じ現象である。CME の運動エネルギーと太陽フレアの規模には正の相関があり, 1,000 km/s を超えるような高速 CME は, 太陽の反対側で発生していない限り, ほぼその足元でフレアが観測される。フレアのエネルギー解放と CME の加速には密接な関係があることが知られており<sup>6)</sup>, 磁気リコネクション<sup>\*4</sup>が CME 発生においても重要なメカニズムだと考えられている。

巨大な CME が太陽面の真正面付近, または真裏付近で発生すると, コロナグラフの遮蔽板の外側を覆い尽くすような CME が観測される (図 2)。これはハロー (Halo) 型 CME と呼ばれている<sup>7)</sup>。図 1(表紙)は CME を横から, 図 2 は CME を正面 (または真後ろ) から眺めていると考えればよい。太陽正面で発生した場合, ハロー型 CME は通常 2 日から 4 日 (最短で 15 時間) で地球に到達する<sup>8), 9)</sup>。CME を地球近傍の人工衛星で直接測定すると磁場が強くなる領域として現れ, CME は磁気雲 (Magnetic Cloud) と呼ばれる<sup>10)</sup>。CME は地球を通過する際に地球磁場に作用し, 磁気嵐やオーロラを引き起こす。また高速 CME の前面にはショックが形成され, 太陽風中のプラズマを加速する。このように CME は, 地球環境に多大な影響を与える。宇宙開発が活発な米国では, Space Weather (宇宙天気) の研究が盛んであり, CME は主要研究テーマとなっている。

黒点の数はおよそ 11 年周期で増減し, 黒点数



2003/10/28 11:30

図 2 LASCO コロナグラフで観測されたハロー型 CME。地球の方向, または正反対側に伝播している場合, このように遮蔽板の外周 360° に明るい CME の塊が見える。図のケースでは太陽正面やや南よりの活動領域で最大級のフレアが発生し, 超高速ハロー型 CME が地球方向へと伝播した。19 時間後に地球に到達し, 巨大磁気嵐を引き起こした。

の増加に伴いフレアなど, ささまざまな太陽活動現象の活動度が上がる。CME の発生数もまた, 黒点数の増加とともに, 上昇することが知られている<sup>11)</sup>。SOHO 衛星搭載の LASCO コロナグラフは, 1996 年から 9 年以上にわたり観測を続け, 9,000 例以上の CME を検出した。以前の観測よりも, 時間空間分解能, 視野の広さ, そして感度も上昇し, CME の検出能力ははるかに向上した。筆者らは, そのすべての CME について, 速度, 幅, 発生場所などの解析を行い, CME カタログとしてホームページ<sup>\*5</sup>で公開している。太陽活動極小期から極大期まで, 同じ観測機器で継続的に観測を続けることができたので, CME の太陽周期変化の詳細がより明らかになった<sup>12), 13)</sup>。本稿ではその代表的な結果を紹介する。

\*4 磁気線がつながり変わるにより, 磁気エネルギーを熱エネルギーや運動エネルギーに変換するメカニズム。

\*5 CME カタログ <http://cdaw.gsfc.nasa.gov/>

## 2. CME の発生頻度

まずは CME の発生頻度から見てみよう (図 3). 地球から見た太陽の自転周期 (約 27.3 日) ごとに CME の発生数と全観測時間から、1 日当たりの CME 発生数を求めた. おおまかな変化を見るために 5 自転周期で平滑化を行った. 青い線は CME の発生数で、比較のために黒点数の変化が黒い線を書いてある. 太陽活動極小期の 96 年では、1 日当たり 0.5 個の CME が発生した. 図 3 を見ると、97 年から黒点数が増え始め、同時に CME の発生頻度も上昇しているのがよく分かる. 黒点数が最大になったのは 2000 年の 5 月で、そのときは 1 日当たり約 5 個の CME が発生した. つまり極大期では、極小期の 10 倍の CME が発生している. 短いタイムスケールの変化にも着目すると、黒点数の局所的なピーク位置で CME 発生数が増加しているのが分かった. これは LASCO が継続的に観測を続けたからこそ、得ることができた結果である.

## 3. CME の緯度分布

次に CME の発生場所がどのように変化したの

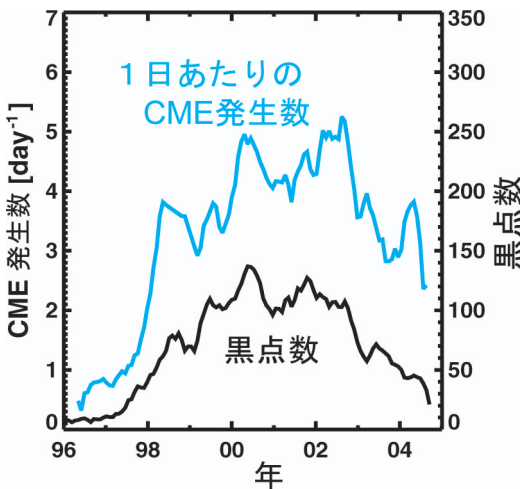


図 3 1 日当たりの CME 発生数(青)と黒点数(黒)の太陽周期変化.

か見てみよう. 発生場所 (CME の中心) の見かけの緯度を計算し、各年ごとの分布図にしたものが

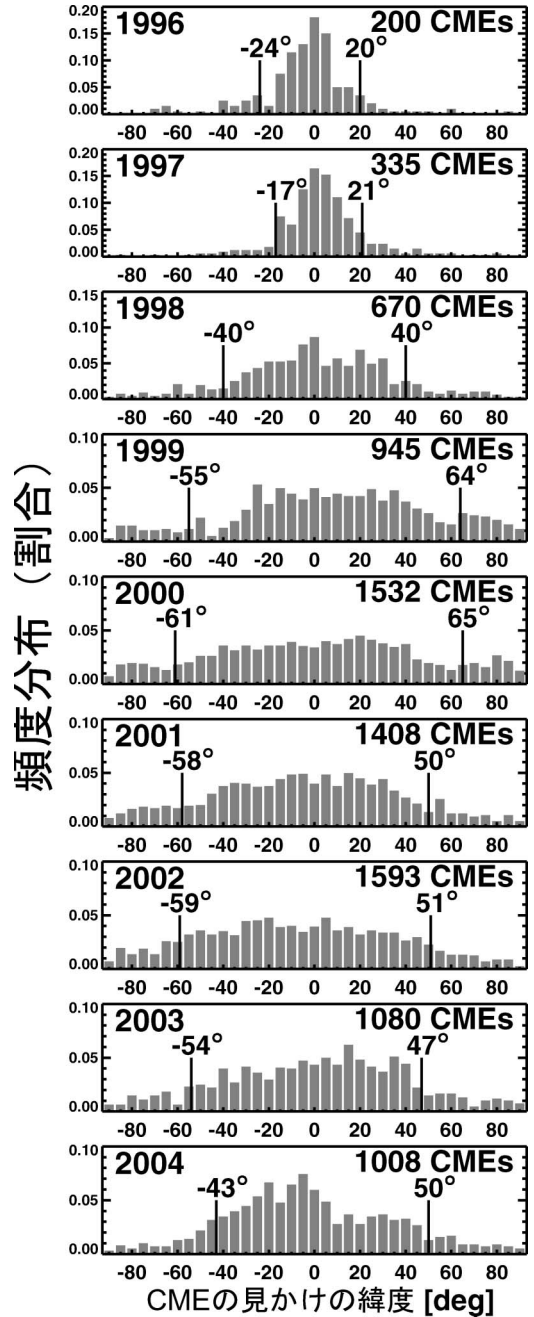


図 4 CME の緯度分布. CME は極小期には赤道付近からのみ発生し、極大期には高緯度帯からも発生する.

図4に示してある。90°が北極，0°が赤道で，-90°が南極である。極小期(96年，97年)には，CMEはほとんどが赤道付近(±20°以内)で発生した。98年になり活動度が上昇するとともに，分布の幅が広がってくる。極大期となった2000年から2002年では分布はより平坦になる。活動度が減少してきた2004年には，再び分布は赤道付近に集中してきて，極小期の分布に近づきつつある。

黒点の増減に伴いコロナの構造が変化するので，CMEの発生場所はコロナの構造と関係していると考えられる。図5上段はLASCOで撮像されたCMEが発生していないときの静穏なコロナで，左が極小期，右が極大期の様子である。下段は「ようこう」衛星で撮像されたコロナの軟X線画像である。極小期には黒点がほとんど発生しないので，南北両極の大局的な磁場が支配的になり，赤道付近に大規模なストリーマー\*6が発達する。一方極大期では，太陽表面の磁場構造は複雑になり，高緯度にもストリーマー構造が発達する。ストリーマーは，極小期では赤道付近にのみ存在し，極大期には高緯度帯にも存在する。CMEの発生場所は，まさにストリーマーの分布と一致している。

さらに細かく見ると，LASCO以前では分からなかったことが見えてきた。それは高緯度CMEの南北非対称性である。これは筆者の共同研究者であるGopalswamy氏の発見である<sup>14)</sup>。南北高緯度帯のCME発生数に注目すると，北半球高緯度帯のCME発生数は99年，2000年に高い。一方，南半球高緯度帯では，2000年から2002年にピークがある。つまり南北の高緯度帯の活動度は同期していない。太陽表面の磁場の様子を調べると，1999年には北極の磁場の極性が，2001年には南

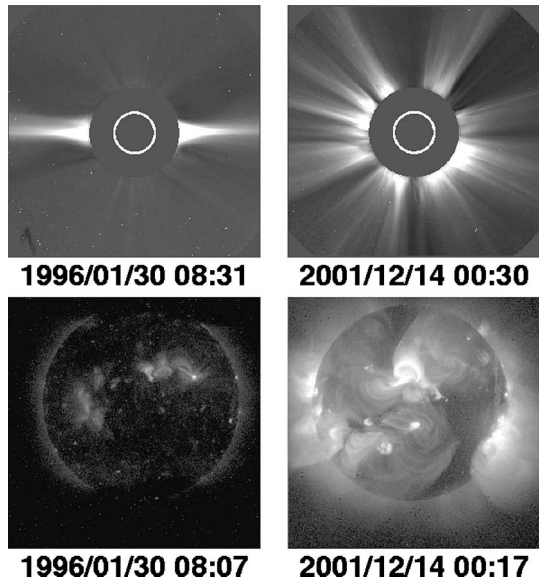


図5 極小期(左側)と極大期(右側)のコロナの違い。上段はLASCOで撮像された上空コロナの白色光像，下段はようこう衛星で撮像されたコロナの軟X線像。

極の磁場の極性が反転\*7していることが分かった。磁場の反転と高緯度CMEの発生には密接な関係があることが，LASCOで発見された。

#### 4. CMEの速度分布

CMEでもっとも大切なパラメーターは，その伝播速度だろう。CME速度が磁気音速\*8を超えるとCME前面にはショックが発生し，電波バースト，粒子加速などのさまざまな現象を引き起こす。高速ハロー型CMEは巨大磁気嵐を引き起こし，さらにその発生時刻(CMEが地球に到達する時刻)もCME速度に強く依存する。つまりCMEの伝播速度は，磁気嵐の規模と時刻の予測に非常に重要である。

数時間にわたる観測イメージがあれば，CME

\*6 太陽から放射線状に伸びる，上空コロナの密度の濃い領域(図5上段の明るい構造)。ストリーマーは磁気反転線の上空に発生する。

\*7 太陽磁場は各周期ごとに極性が反転する。磁極反転を考慮すると22年周期となる。

\*8 磁気プラズマ中に現れる特徴的な波動の速度。



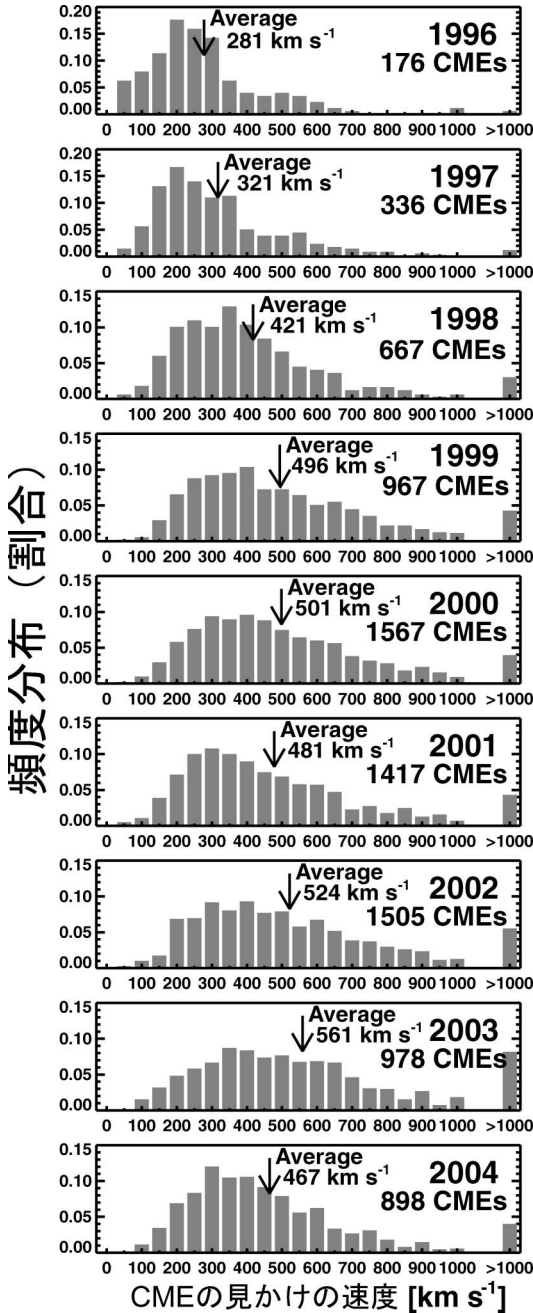


図 6 CME の速度分布. 極大期になると速度分布が全体的に高速側 (右側) へと移動しているのが分かる.

の高さの時間変化から、見かけの速度を求めることができる。観測条件が悪い、現象が著しく小さいなどの理由がない限り、ほとんどの CME について速度を求めることができる。図 6 は各年の速度の分布図である。極小期である 96 年, 97 年は、平均速度が 300 km/s 程度であり、また 1,000 km/s を超える高速 CME の割合は 1% 未満であった。極大期である 2000 年から 2002 年では、平均速度約 500 km/s, 高速 CME の割合も 4% を超えた。太陽が活発になるにつれて、平均速度、高速 CME の割合が上昇 (分布全体が右側へ移動) することが、LASCO 以前に比べ、より明らかになった。

面白いことに 2003 年は、CME の発生数は減少しているが、平均速度は一番速く (562 km/s), 高速 CME の割合も一番高い (8%)。2003 年 10 月後半から 11 月にかけて、非常に活発な活動領域が出現したことがこの結果に大きな影響を与えている。速度が 2,000 km/s を超える CME が複数発生し、この期間の平均速度は 950 km/s (極大期の平均の 2 倍) もあった。本稿執筆中の 2004 年 11 月には、速度が 3,300 km/s<sup>\*9</sup> を超える CME が発生し、2003 年に記録した 2,700 km/s の最高記録を更新した。どうやら巨大フレアが活動周期の減衰期によく出現することと同様に、超高速 CME も減衰期に出現しやすいらしい。

## 5. さいごに

LASCO コロナグラフは 1996 年から 9 年以上観測を続け 9,000 例もの CME を観測し、これまでにない精度で CME の太陽周期変化を明らかにした。新たな観測事実も明らかになった。また本稿では紹介していないが、他の太陽観測との関係で数多くの成果を上げている。2005 年に入ってから多数の高速 CME が発生しており、まだまだ多くの研究テーマを LASCO は与えてく

\*9 以前の記録を大きく更新したため、CME 研究者はこの速度を安易に受け入れられず、測定精度の悪さを指摘する声もある。

れそうだ。

ここまで特に言及しなかったが、コロナグラフから得られる情報は、天空面での CME の断面図のようなものであった。図 1 から磁力線が渦巻いている様子は分かったが、CME の 3 次元構造はほとんど不明である。また、見かけの運動から見かけの速度を求めていることになり、(宇宙天気にとって特に重要な) 真の伝播速度が分からなかった。それを解決すべく、2006 年には、STEREO 衛星\*10による次世代の観測が始まる。STEREO 衛星とは、地球公転軌道上に置いた二つの衛星を用いて、コロナの構造やコロナ中で発生する活動現象を立体視する計画である。同一の CME を別アングルから見る画像は、全く想像ができないので、筆者は非常に楽しみにしている。

謝 辞

共同研究者である、Gopalswamy 氏、Howard 氏、St. Cyr 氏、Plunkett 氏に感謝します。数年前は CME 初心者であった筆者が、本稿で述べた成果を上げることができたのも、基礎から教えてもらったおかげです。本稿の執筆にあたっては、NASA/GSFC で研究する秋山幸子氏、岡島 崇氏、沼田健司氏、濱口健二氏、見崎一民氏、森田諭氏から、さまざまなコメントをもらいました。どうもありがとうございました。この研究は、NASA/LWS, NSF/SHINE, AFOSR からサポートしてもらいました。

参 考 文 献

- 1) Tousey R., 1973, in Space Research XIII, eds. Rycroft M. J., Runcorn S. K. (Akademie-Verlag, Berlin), p. 713
- 2) MacQueen R. M., et al., 1974, ApJ 187, L85
- 3) Hundhausen A. J., et al., 1984, J. Geophys. Res. 89, 2639
- 4) Howard R. A., et al., 1985, J. Geophys. Res. 90, 8173
- 5) Brueckner G. E., et al., 1995, Sol. Phys. 162, 357
- 6) Zhang J., et al., 2001, ApJ 559, 452
- 7) Howard R. A., et al., 1982, ApJ 263, L101
- 8) Cliver E. W., et al., 1990, J. Geophys. Res. 95, 17103
- 9) Gopalswamy N., et al., 2000, Geophys. Res. Lett. 27, 145
- 10) Burlaga L. F., et al., 1982, Geophys. Res. Lett. 9, 1317
- 11) Hildner E., et al., 1976, Sol. Phys. 48, 127
- 12) St. Cyr O. C., et al., 2000, J. Geophys. Res. 105, 18169
- 13) Yashiro S., et al., 2004, J. Geophys. Res. 109, A07105
- 14) Gopalswamy N., et al., 2003, ApJ 598, L63

The Solar Cycle Variation of Coronal Mass Ejections

Seiji YASHIRO

The Catholic University of America, 620 Michigan Ave., NE, Washington D.C., 20064, USA

Abstract: The Large Angle and Spectrometric Coronagraph (LASCO) on board the Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) mission have observed more than 9,000 coronal mass ejections (CMEs) from 1996 through 2004. We have examined the properties of all these CMEs and documented them in an online catalog. The solar cycle variations of CME properties are revealed with greater clarity in this study as compared with previous studies.

\*10 詳しくは STEREO ホームページ <http://stereo.jhuapl.edu/>