

3.3.4 コロナ質量放出予測

塩田 大幸 (情報通信研究機構)

(2021年5月19日受付、2021年5月31日公開)

コロナ質量放出 (CME・ICME) と太陽風

3.2.3節で解説された通り、コロナ質量放出 (Coronal Mass Ejection: CME) は太陽コロナから磁束とともにコロナプラズマが放出される現象である。惑星間空間のすべての方向にはコロナから太陽風が流れ出しているため、CMEはその太陽風の中を伝搬する。

CMEは、コロナ中の磁気ループに蓄えられた自由エネルギーが磁気リコネクションの過程を経て太陽から放出される現象である。実際にコロナグラフで観測された一部のCMEには、その中心部分にねじれた高密度な構造が観測されている。この構造はプロミネンスで見られるものと同様に、「ねじれた磁束管 (フラックスロープ)」の磁力線の一部に支えられた構造と理解できる。ねじれた磁力線は内部に電流を持った磁力線であるため、磁気自由エネルギーを持った構造であり、そのエネルギーを解放しながら、CMEは放出・伝搬すると理解できる。

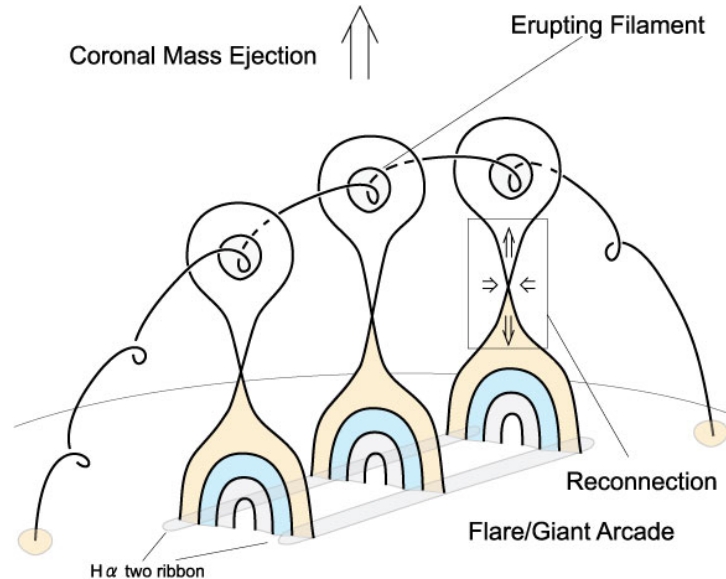


図 1. 太陽フレア・CME 発生時の磁力線の様子。(Shiota et al. 2005)

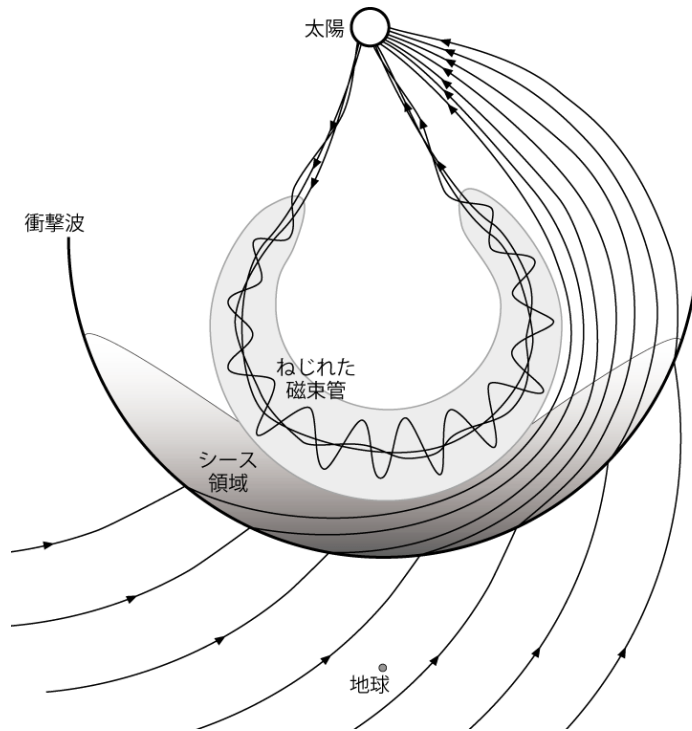


図2. 太陽風中を伝播する CME の模式図。矢印は磁力線を示す。背景の影が相対的な密度を示す。

図1はCME発生時の磁力線の様子を示している。コロナの磁気ループが縦に引き伸ばされ逆向きの磁力線が接するところで磁力線がつながり変わる磁気リコネクションが発生する。磁気リコネクションによってつながり変わった磁力線の太陽側では、解放されたエネルギーによってプラズマが加熱されて太陽フレアが発生する。反対に上空側にはフラックスロープが形成され、放出される。これによって磁気エネルギーは運動エネルギーに変換される。磁気リコネクションはフラックスロープの軸周りの磁力線を補充するため、リコネクションが進むとともにフラックスロープの電流は増加する。これにより、フラックスロープに巻き付く磁束が増加し、フラックスロープは膨張する。この過程でフラックスロープはさらに加速され、上昇していく。上空に行くにつれて周りの磁場が弱くなるため、フラックスロープはさらに膨張する。このとき、周りの磁場の減少率 (decay index) が磁場構造で決まる閾値より大きい場合、フラックスロープが継続して膨張する条件 (Torus instability, Kliem & Torok 2006) を満たし、加速しながら惑星間空間へ放出される。

このようにCMEの初期過程ではコロナの磁気エネルギーを駆動源として放出されるが、その後フラックスロープは周囲を流れている太陽風と相互作用をしながら伝搬する (図2)。例えば、前面を流れる太陽風よりもCMEの速度の方が速ければ、太陽風を後ろから押して圧縮し、

速度差が磁気音速を超えれば衝撃波を形成する。またCMEの速度が周囲の太陽風より遅い場合、太陽風によって同じ速度まで加速され一体となって伝搬する。

CMEはある程度太陽から離れると、一定の方向に一定の立体角を保ちながら惑星間空間の太陽風の中を拡大し伝搬していく。このような惑星間空間を伝搬するCMEはinterplanetary CME (ICME) と呼ばれる。典型的には、CMEの中心部にはコロナから放出されたねじれたフラックスロープがあり、太陽風よりも高速なCMEの場合、前面に衝撃波を形成して、太陽風を圧縮した構造が蓄積される（シース領域）。これらが一体となって膨張しながら伝搬していると考えられている（図2）。前面の太陽風中を伝搬する速度が大きくなるほど衝撃波のマッハ数が大きくなり、プラズマの圧縮比は大きくなる。衝撃波のマッハ数は背景太陽風の状態と伝搬速度差によって決まるため、背景太陽風が低温で高密度な低速太陽風な場合、fast modeの磁気音速が小さくなるため、速度差が小さい場合でも強い衝撃波を形成することがある。

また、CMEが伝搬する方向の太陽風が速度やプラズマ状態の異なる非一様な構造を持っていると、その中を伝搬するCMEは伝搬方向の異なる各領域がそれぞれの背景太陽風構造と相互作用をする。その結果、例えば高速風の流れていた領域は相対的に伝搬速度が大きくなる。一方、低層太陽風の流れていた領域は相対的に伝搬速度が小さくなり、CMEの構造が拉げていくといったような変形をうける（Odstrcil et al. 1999）。また太陽から十分に離れた場所で太陽風の非一様構造の境界面はParker スパイラルによって、動径方向から角度を持つ。CMEがこの斜めの不連続面と遭遇する場合、経度方向へ拉げた構造を持つ結果、CMEの伝搬速度が経度方向にずれて見えることがある。こうした現象をCMEのdeflectionという（Wang et al. 2004）。

比較的活動度の高い太陽活動領域は短い時間間隔でCMEを連続発生することがしばしばある。その場合、先行するCMEの伝搬速度が後続のCMEよりも相対的に遅いときは、伝搬中に後発のCMEが先発のCMEに追いつきCME間の相互作用を引き起こす（Lugaz et al. 2005）。

このようにCMEの伝搬過程は放出される構造と伝搬する方向にある背景太陽風の構造とその相互作用が重要な役割を果たしているため、その両者をできる限り精度を上げて再現することがCME予測にとって重要である。

ICMEと宇宙天気じょう乱

ICMEが地球に到来するときのin situで観測された特徴について説明する。図2に示す様に、ICMEは地球近傍の惑星間空間に達するまでに天文単位オーダーまでその空間スケールが膨張していると考えられる。それ故、地球の位置をICMEのどの部分が通過するかによって、観測される様子が異なる。

まず、地球の真正面から高速なCMEが放出され、ICMEの中央を地球が通過する場合を考える。初めに地球に到来する構造は、ICME前面の衝撃波になる。ただし、衝撃波で加速された高エネルギー粒子（SEP）が衝撃波よりも早く地球に到来することがしばしばある。衝撃波では、プラズマの密度・温度・速度・磁場強度の急激な上昇を伴うため、その衝撃波が地球磁気

圏を通過するとき、大きなじょう乱をもたらす。

衝撃波後面のシース領域には、背景太陽風とともに惑星間空間磁場が圧縮されて折り重なった構造が掃き寄せられていることがある。強い衝撃波のシース領域には衝撃波面の接線方向の磁場ベクトルが短い周期でランダムに入れ替わる構造 (Planar Magnetic Structure: PMS, Nakagawa et al. 1989) が形成されることがある。PMSだけでなく、広域の背景太陽風が圧縮されたときには、強度が大きい同じ向きの磁場がシース領域に形成されていることもある。このようなシースの磁場が南向きの成分を持つときに磁気圏じょう乱をもたらすことがある。

シース領域が通過した後に、プラズマの温度・密度が減少した一方で磁場強度が大きくなり、磁場のベクトルの方向がゆっくりと回転して見える構造が通過することがある。この構造は磁気雲 (Magnetic cloud: MC, Burlaga et al. 1981) と呼ばれ、CME中央のねじれたフラックスロープが通過する過程を観測していると理解できる。この一部の磁場が南向き成分を持つときに磁気圏じょう乱の要因となる。とくにMC (フラックスロープ) は十分な磁束があると、その中の南向き磁場は長時間継続するため、大きな磁気圏じょう乱を引き起こす可能性が高くなる。

CMEの伝搬方向が太陽—地球線からより離れると、図2のCMEから見た地球の位置を通過する領域が、中央から離れていく。十分にCMEの伝搬方向が太陽—地球線が大きいときには、地球にはフラックスロープ (MC) は到来せずに、衝撃波やそのシース領域のみが到来することがある。その一方で、太陽風よりも伝搬速度が遅いCMEの場合は衝撃波が形成されず、フラックスロープ (MC) のみが到来することがある。

太陽風・CME到来予測モデル

地球に到来するCMEの影響を予測するには、CME内部の構造 (衝撃波・シース・MC) を精度よく再現した上で、そのCMEのどの領域を地球が通過するかを正確に再現することが重要である。

これらを物理的に正しく取り入れる予測手段として、太陽—地球近傍を含む内部太陽圏の global MHD シミュレーションが用いられている。宇宙天気予報のoperationで広く利用されているMHDシミュレーションはENLIL (Odstrcil 2003) である。このモデルでは、計算コストを必要とする太陽コロナから太陽風加速領域となる0.1天文単位より内側の領域と、高緯度領域を計算領域から除外することで計算を高速化し、十分なリードタイムでCMEの予測を行っている。背景太陽風に関しては、太陽光球の観測磁場とコロナ磁場モデル+経験的な太陽風速度モデルを用いて、加速された超音速の太陽風分布を計算領域の内側境界面より与え、シミュレーションを実行している。磁場モデル、太陽風速度モデルにはさまざまなバリエーションが存在するが、もっともオーソドックスなバージョンは、WSAモデル (Arge et al. 2004) を用いたもので、WSA-ENLILと呼ばれる。

WSA-ENLILは、普段は太陽風の予測に用いられており、CMEの情報は含まれていない。CMEが発生したときは、CMEの情報を追加したシミュレーションによる予測が行われている。CMEの情報はコロナグラフから伝搬方向と角度的な広がり、伝搬速度を推定するConeモデル (Zhao et al. 2002; Xie et al. 2004) が用いられる。CMEの情報を内部境界に流体的なパルス (一定時間の間、速度や圧力を上昇させたプラズマの塊) として入力することで、太陽風の中をCMEが伝搬する過程を計算する。前述したとおり、CMEは中心にフラックスロープがあるプラズマの塊であるが、Coneモデルで入力されるものは内部にフラックスロープがないプラズマの塊である。そのため、MCとして観測される磁場の予測には適さないが、衝撃波を形成して背景磁場を掃き集めたシースを形成可能であるため、衝撃波到来のタイミングの予測や、シース磁場のインパクトの予測には利用できる。

日本では、名古屋大学および情報通信研究機構 (NICT) で開発されている数値シミュレーション「SUSANOO (Space-weather Usable System Anchored Numerical Operations and Observations)」が運用されている。基本的にはENLILと同様の手法で背景の太陽風を計算する (Shiota et al. 2014)。ENLILとの大きな違いは、SUSANOOではYin-Yang格子を用いて全方向の伝搬の計算を行う。また内部にフラックスロープを含むCMEを太陽風中に伝搬させることができる点が大きく異なる (SUSANOO-CME, Shiota & Kataoka 2016)。

SUSANOO-CMEのCMEモデル (図3) について説明する。このCMEモデルでは、CMEは伝搬方向に立体角を保ちながら自己相似的に膨張伝搬していると仮定している (Gibson & Low 1998)。その場合、自己相似系の座標に乗ってみたとき、CMEが空間に固定された状態として見なすことができる。図3が自己相似系の座標系でのCMEの概念図である。この固定したCMEの状態 (CMEの形や向き・磁場強度など) および自己相似系と実空間の関係性 (伝搬方向、発生他時刻) を10種類のパラメータを用いて与えている。自己相似系の座標からみると計算領域の内側境界に当たる球面は、図3中の原点に向かって収束する半径 R'_{cut} の球面に対応する。この関係を用いて、シミュレーションの内部境界にCMEモデルの断面与えることで、図4に示すような計算領域の中に内部にフラックスロープを含むCMEが伝搬していく過程を再現することができる。

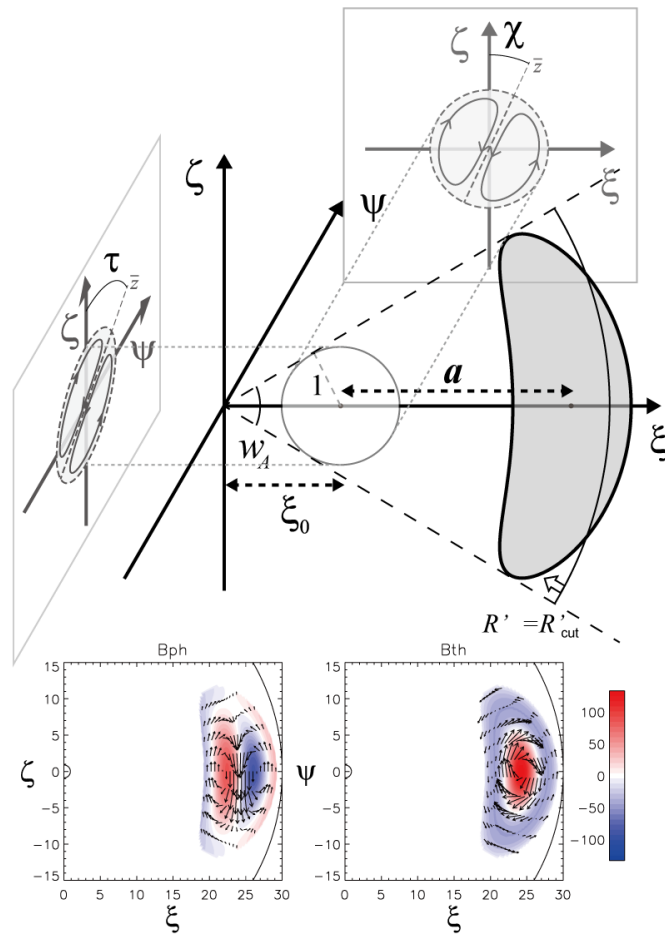


図 3. SUSANOO-CME の CME モデルの概念図 (Shiota & Kataoka 2016)。球殻に含まれる spheromak 磁場を、動径方向につぶれた領域 (ハッチ領域) に変形した CME を想定。下段は、spheromak 磁場の軸が南を向いたときに磁場の様子 (子午面断面、赤道断面)。

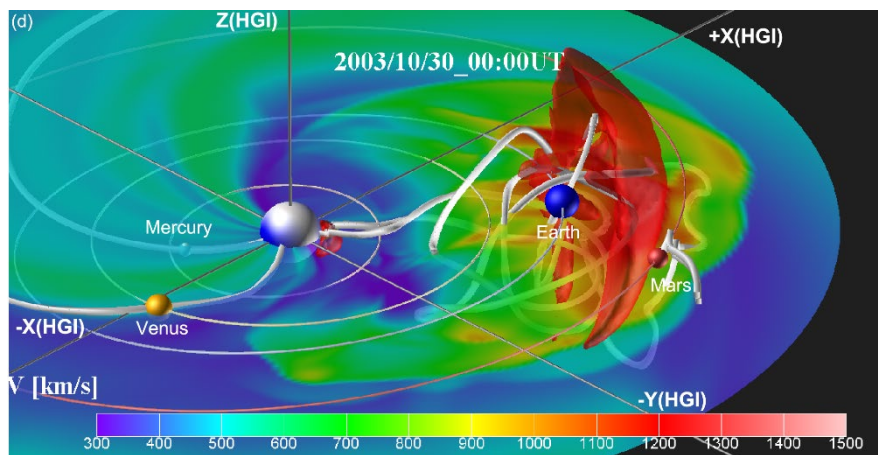


図 4. SUSANOO-CME による 2003 年ハロウィンイベントの CME が地球の位置を通過している間の、プラズマ速度 (色) と磁力線 (チューブ) の様子。 (Shiota & Kataoka 2016)

現在このシミュレーションをリアルタイムの予報に利用する試みがNICTで進められている。しかし、このシミュレーションを実際のCMEの到来の影響予測に用いるためには、まだ解決すべき課題が多く残されている。まず、前述したとおりCMEのパラメータが10種類あるが、観測データを用いて制限できる情報に限りがあり（また伝播中に変化する可能性もある）、地球に到来するCMEの磁場構造の定量的な予測は難しい。また、背景太陽風の正確な再現もCMEの地球への到来に大きく影響をするため、解決すべき課題である。この不定性を減少させるために、アンサンブル予測を行うシステムの開発が進められている。さらに、アンサンブル予測シミュレーションの結果と伝播中のICMEのIPS観測との比較を行うことで、予測結果から最適となるケースを限定する手法の開発も進められている（Iwai et al. 2019; 2021）。

参考文献

- Arge, C.N., Luhmann, J.G., Odstrcil, D., Schrijver C.J, Li Y.: Stream structure and coronal sources of the solar wind during the May 12th, 1997 CME. *J Atmos Solar Terr Phys* 66:1295–1309 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.03.018>
- Burlaga, L., Sittler, E., Mariani, F., Schwenn R.: Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios, and IMP 8 observations, *J. Geophys. Res.*, 86, 6673–6684 (1981). <https://doi.org/10.1029/JA086iA08p06673>
- Gibson, S.E., Low, B.C.: A time-dependent three-dimensional magnetohydrodynamic model of the coronal mass ejection, *Astrophys. J.*, 493, 460–473 (1998). <https://doi.org/10.1086/305107>
- Iwai, K., Shiota, D., Tokumaru, M., Fujiki, K., Den, M., Kubo, Y.: Development of a coronal mass ejection arrival time forecasting system using interplanetary scintillation observations. *Earth Planets Space* 71, 39 (2019). <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1019-5>
- Iwai, K., Shiota, D., Tokumaru, M., Fujiki, K., Den, M., Kubo, Y.: Validation of coronal mass ejection arrival-time forecasts by magnetohydrodynamic simulations based on interplanetary scintillation observations. *Earth Planets Space* 73, 9 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01345-5>
- Kliem, B., Török, T.: Torus Instability, *Phys. Rev. Lett.*, 96, 255002 (2006). <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.96.255002>
- Lugaz, N., Manchester IV. W. B., Gombosi T. I.: Numerical simulation of the interaction of two coronal mass ejections from Sun to Earth, *Astrophys. J.*, 634, 651–662 (2005). <https://doi.org/10.1086/491782>
- Nakagawa, T., Nihsida, A., Saito T.: Planar magnetic structures in the solar wind, *J. Geophys. Res.*, 94, 11761–11775 (1989). <https://doi.org/10.1029/JA094iA09p11761>
- Odstrcil, D.: Modeling 3-D solar wind structure, *Adv. Space Res.*, 32, 497–506 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00332-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00332-6).

- Odstrcil, D., Pizzo V.J.: Three-dimensional propagation of CMEs in a structured solar wind flow: 1. CME launched within the streamer belt, *J. Geophys. Res.*, 104, 483–492 (1999). <https://doi.org/10.1029/1998JA900019>
- Shiota, D., Isobe, H., Chen, P.F., Yamamoto, T.T., Sakajiri, T., Shibata K.: Self-Consistent MHD Modeling of a Coronal Mass Ejection, Coronal Dimming, and a Giant Cusp-Shaped Arcade Formation, *Astrophys. J.*, 634, 663-678 (2005). <https://doi.org/10.1086/496943>
- Shiota, D., Kataoka, R., Miyoshi, Y., Hara, T., Tao, C., Masunaga, K., Futaana, Y., Terada N.: Inner heliosphere MHD modeling system applicable to space weather forecasting for the other planets, *Space Weather*, 12, 187–204 (2014). <https://doi.org/10.1002/2013SW000989>
- Shiota, D., Kataoka R.: Magnetohydrodynamic simulation of interplanetary propagation of multiple coronal mass ejections with internal magnetic flux rope (SUSANOO-CME), *Space Weather*, 14, 56-75 (2016). <https://doi.org/10.1002/2015SW001308>
- Wang, Y., Shen, C., Wang, S., Ye, P.: Deflection of coronal mass ejection in the interplanetary medium. *Solar Physics* 222, 329–343 (2004). <https://doi.org/10.1023/B:SOLA.0000043576.21942.aa>
- Xie, H., Ofman, L., Lawrence, G.: Cone model for halo CMEs: Application to space weather forecasting, *J. Geophys. Res.*, 109, A03109 (2004). <https://doi.org/10.1029/2003JA010226>.
- Zhao, X.P., Plunkett, S.P., Liu, W.: Determination of geometrical and kinematical properties of halo coronal mass ejections using the cone model. *J. Geophys. Res.* 107, 1223 (2002). <https://doi.org/10.1029/2001JA009143>