

# 太陽地球環境システムのシミュレーション研究

課題責任者

草野 完也 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

著者

草野 完也 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

中世温暖期や小氷期において太陽活動が地球環境に影響を与えてきたと考えられているが、そのメカニズムは未だ明らかではない。また、巨大太陽フレアなどの爆発現象は地球大気のみならず、現代の情報化社会にも多様な影響と被害を直接与えると考えられているが、その発生を事前に予測する技術は未成熟である。本研究は、太陽と地球（海洋圏・大気圏・電磁気圏）からなる環境システムの長期的及び短期的変動を再現することができるシミュレーションを開発する。それによって、シミュレーションと多様な観測データとの比較を通して太陽地球環境システムの変動メカニズムを解明すると共に、太陽活動の予測モデルを開発し、太陽地球圏環境変動に備える社会基盤の構築に貢献することを目的としている。本年度は（1）太陽周期活動の南北半球非対称性の機構解明、（2）太陽フレアで発生する磁気リコネクションの高速化機構の解明、（3）磁気嵐の原因となるコロナ質量放出による磁場変動の再現シミュレーションなどについてのシミュレーション研究をそれぞれ進めた。

キーワード：太陽黒点、太陽フレア、コロナ質量放出、宇宙気候、宇宙天気

## 1. 本研究の目的

中世温暖期や小氷期に見られる地球環境の長期変動は人類社会にも大きな影響を与えてきた。樹木年輪中の宇宙線生成核種の分析からこうした千年スケールの環境変動が太陽活動変動と良い相関を持つことが知られている。一方、太陽活動が地球環境に影響を与えるメカニズムについては全太陽放射変動が海洋熱循環に与える影響、太陽放射スペクトル変動が中高層大気に与える影響、銀河宇宙線が電離を通して大気に与える影響など様々な仮説が提唱されている。しかし、いずれも定量的な検証がなされておらず、太陽活動の気候影響の原因は未解明である。このため、太陽活動影響の評価は気候モデルによる長期的な将来予測において不確実性をもたらす大きな要因の一つとなっている。さらに、太陽黒点活動はこれまで大きな変動を示してきたことが、400年にわたる黒点観測と数千年間の炭素同位体解析から明らかにされているが、その原因も明らかでない。特に、現在、極大期を過ぎた第24太陽周期は、過去100年間で最も黒点数が少ない特異な周期になると考えられている。それゆえ、今後の太陽活動がかつて現れたマウンダー極小期のような極端な低活動期に陥る可能性も指摘されている。このため、次の周期（第25太陽周期）の太陽活動状況の予測は、太陽恒星活動のメカニズムの理解に留まらず、今後数十年の「太陽地球圏環境」の予測をおこなう上で必須であり、その学術基盤の構築が急務となっている。

一方、巨大な太陽フレアやコロナ質量放出（CME）などの太陽面爆発現象は地球近傍の宇宙空間と地球大気に大きな影響を与える。その結果として、衛星システム、通信ネットワーク、電力網、航空システムなど現代社会を支える基盤が多大な被害を受ける可能性がある。実際に1989年には太陽面爆発の結果として発生した磁気嵐に

よって、北アメリカ大陸の電力網は甚大な被害を蒙り、ケベック州では全州で停電が発生している。歴史的にはこれを大きく上回る規模の磁気嵐が記録されている。社会全体が高度に情報化された現代においてそのような大規模擾乱が発生した場合には、全地球的な規模で深刻な社会影響が発生すると考えられている。それゆえ、こうした太陽地球圏の激しい環境変動から、現代社会の基盤と我々の生活を守るためには、そうした変動を事前に予測する技術を開発することが不可欠となっている。

上記の背景のもとに、本研究は太陽と地球（電磁気圏、大気圏、海洋圏）からなる環境システムの長期的並びに短期的変動を地球シミュレータの性能を活かした大規模シミュレーションで再現すると共に、多様な観測データとシミュレーションの比較を通して太陽地球圏環境の変動メカニズムを解明し、その変動を予測する技術の開発を推進することを目的としている。特に、太陽周期活動の変動に伴う大気海洋結合システムの応答を定量的に明らかにすることを目指す。同時に、最先端の太陽観測データを取り込んだ太陽活動モデルを開発し、太陽周期活動の予測を実現することで、今後数十年間の太陽気候影響の評価を試みる。また、太陽面爆発の発生とその地球環境影響を予測するための数値予測スキームの開発を目指す。

なお、本研究は文部科学省科学研究費補助金：新学術領域研究「太陽地球圏環境予測：我々が生きる宇宙の理解とその変動に対応する社会基盤の形成（<http://www.pstep.jp/>）」の一環として実施される。

## 2. 本年度の成果

### 2.1 太陽周期活動の南北半球非対称性のシミュレーション研究<sup>[1]</sup>

太陽黒点に代表される太陽の磁気活動は約11年の周期

で変動することが、ガリレオ以来400年の観測で明らかにされている。また、南北半球の周期活動は1~数年位相がずれていることも観測から指摘されている。それ故、より黒点活動が活発な半球は周期の前半と後半で変わる傾向がある。また、黒点極大期に発生する極域磁場の極性反転のタイミングも北半球と南半球では1~数年ずれる傾向がある。しかし、その原因は未だに明らかにされていない。本研究はこの南北非対称性のメカニズムを探るため、磁束輸送モデルに基づく数値シミュレーションを様々な初期条件に対して実施した。

本研究では南北対称性の数学的性質を厳密に満たすため、磁場を南北対称成分と反対称成分に分離し、それぞれが満たすべき方程式を数値的に解くことでシミュレーションを行った。また、従来、南北非対称性の原因は太陽対流層内部のプラズマ平均流の非対称性に起因すると広く考えられていたが、我々はプラズマ流が対称であっても磁場活動が自発的に非対称となる可能性について検討した。その結果、プラズマ流れが対称であっても、初期条件に依らずに南北非対称性がすべての場合に自発的に発生することを見出した。この非対称性は、双極子型の磁場成分と四重極子型の磁場成分の周期位相がずれることによって発生することを明らかにした。そのため、図1のように双極子型の磁場と四重極子型の磁場は時間発展の過程で交互に出現することになり、その結果として南北非対称性が出現する。さらに、異なる初期条件から計算を開始した場合でも、双極子型磁場と四重極子型磁場の位相差は+90度か-90度のどちらかに収束することも初めて明らかにした。このことは、太陽ダイナモの周期解が2種類のアトラクターを持つことを示唆している。それらは、北極磁場が先行して反転する解と南極磁場が先行して反転する解とに対応している。

黒点観測によれば、周期活動及び極域磁場反転が先行する半球は同じであり、かつ数周期にわたって同じ半球が先行する傾向があることが見出されている。この傾向は本研究が発見したダイナモ活動のアトラクターの存在と整合しているものと考えられる。ただし、計算によると解がアトラクターに達すると活動が先行する半球が変わることはなかったが、観測では数周期の後に先行半球

が変わる。これは、磁場による平均流れの変化など、本研究のモデルに含まれていない何らかの複雑な効果の存在を示唆している。

## 2.2 磁気リコネクションの高速化機構<sup>[2]</sup>

太陽フレアは太陽黒点磁場に蓄積された自由エネルギーがコロナプラズマの熱と運動エネルギーに爆発的に変換される過程と考えられている。その過程において磁気リコネクションは重要な役割を果たす。磁気リコネクションは磁力線の繋ぎ替わりであり、プラズマの熱化と高エネルギー粒子の加速の原因となる。また、磁力線の繋ぎ替わりの結果、捻じれた磁束管（フラックス・ロープ）が形成され、フラックス・ロープが電磁流体力学的に不安定化することにより、磁気リコネクションがさらに進むというフィードバックが急速なエネルギー解放を駆動すると考えている。

しかし、古典的な定常リコネクションモデルによると、リコネクション領域に入射するプラズマ流の相対的な速さ（リコネクション率）は磁気レイノルズ数（ $S$ ）の平方根に反比例すると考えられている。一方、太陽フレアにおけるリコネクション率は $10^2$ 程度であることが観測で見出されている。それ故、 $S \sim 10^{14}$ に達する太陽コロナでなぜこれまでの理論モデルに比べて遥かに高速のリコネクションが進み得るのかは長年の課題であった。

我々はこの問題を解決するため、地球シミュレータを用いてこれまでに最も精密な磁気リコネクションの2次元電磁流体シミュレーションを実施した。その結果を図2に示す。この図に示す通り、計算開始直後にはリコネクション率は磁気レイノルズ数の増加と共に減少するが、その後、高い磁気レイノルズ数を持つ場合ほど早期かつ急速にリコネクション率が増加することが分かった。さらに、最終的にリコネクション率は磁気レイノルズ数に依らずに観測値と同等の値（ $10^2$ ）をとることが見出された。

詳しい解析の結果、この高速化は図3に示す通り、リコネクション領域で生成される磁気島の成長と運動に伴って発生することが分かった。すなわち、磁気島が電流層の幅に対して十分大きく成長し、かつ電流層に沿って運動するとき、磁気島の先端で電流層が分岐した構造

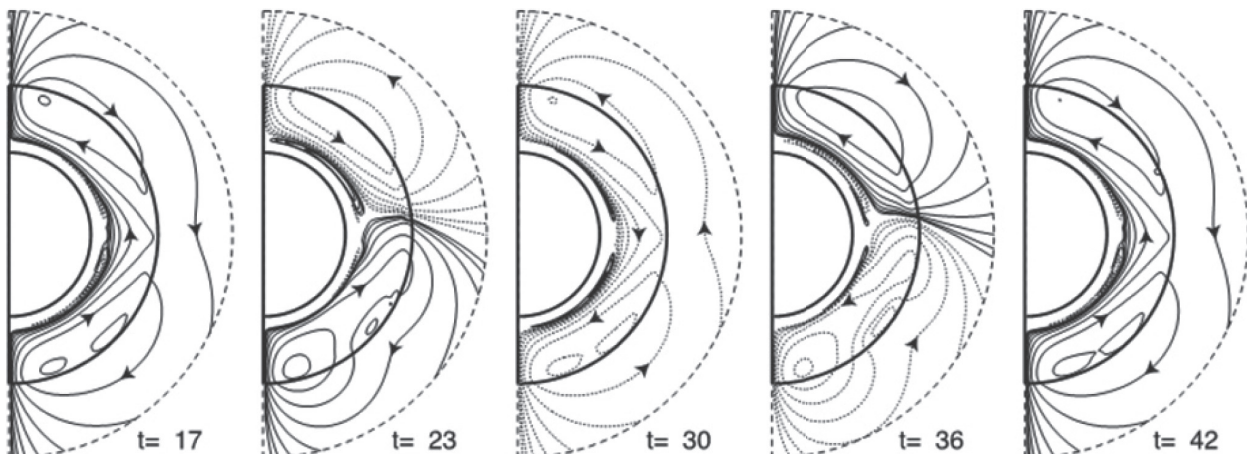


図1 太陽周期計算における磁束の時間変動。

が生まれることで、リコネクションの拡散領域の長さが短くなることでリコネクションの高速化を生み出すことが見出された。さらに、この電流層の分岐は、遅い磁気流体衝撃波の形成によるものであることも明らかにされた。遅い磁気流体衝撃波がリコネクションを高速化させることは Petschek (1964) によって提案されていたが、その後の数値シミュレーションによって、電気抵抗の非一様性がなければ、遅い磁気流体衝撃波は存在できないと考えられていた。これに対して、本研究は磁気レイノルズ数が大きなシステムでは、磁気島の非線形効果によって一様抵抗の場合でも、非定常的に遅い磁気流体衝撃波が自発的に形成され、磁気リコネクションは高速化し得ることを初めて示すことができた。

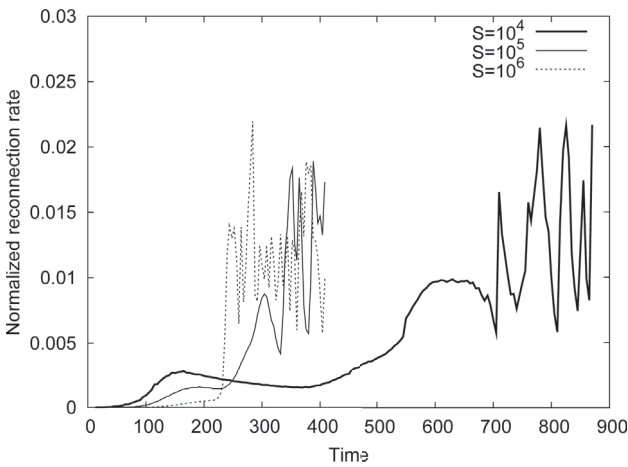


図2 3種類の磁気レイノルズ数についてのリコネクション率の時間変化。

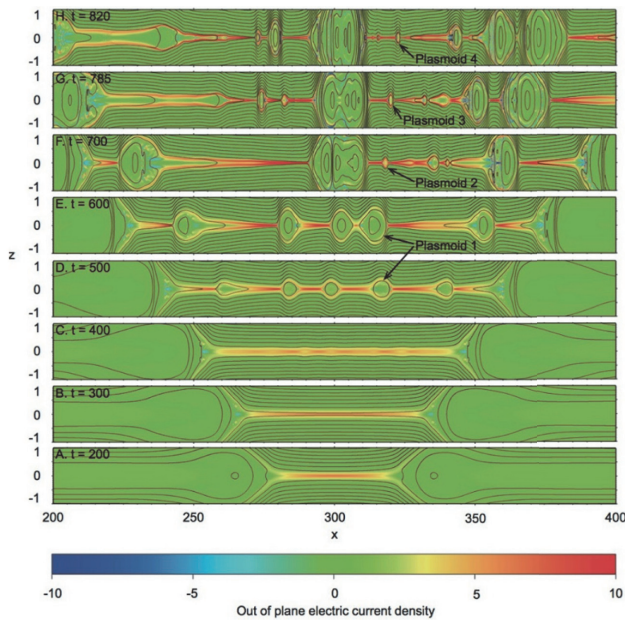


図3 磁気リコネクション領域の電流密度 (カラースケール) と磁束構造 (等高線)。

### 2.3 コロナ質量放出による磁場変動の再現シミュレーション<sup>[3]</sup>

太陽コロナ中で発生する爆発現象に伴って、大量のコロナが惑星間空間へ放出されるコロナ質量放出 (CME) がしばしば発生する。CME もフレアと同様、太陽表面からコロナへ入射される磁場のエネルギーを駆動源とした爆発現象である。CME に伴って放出されたプラズマ塊はしばしば地球磁気圏にも衝突し、地球磁気圏内部にエネルギーを注入することで磁気嵐を引き起こすことが知られている。その際、CME 内部の磁場の向きが重要なパラメータとなる。なぜなら、現在の地磁気は北向きであるため、CME が南向きの磁束を持つとき地球磁気圏の内部に向けたポインティング・フラックスが増加するためである。それゆえ、CME が地球軌道まで運ぶ磁場の方向と強度を予測することは、宇宙天気予報の高度化のために重要な課題となっているが、未だにその予測は困難な状況にある。

本研究ではこの課題を解決するため、太陽から惑星間空間に打ち出される CME 内部に一定のねじれを持つフォース・フリー磁場を導入した3次元電磁流体力学シミュレーションを実現することで、地球軌道における CME 磁場の予測を試みた (図4)。その結果、いくつかのイベントについて、これまで不可能であった南北成分磁場変動の再現にある程度せいこうすることができた。今後は、適切な計算の初期条件を太陽磁場観測データから導く方法を開発することで、本研究の成果を実際の宇宙天気予報に応用するための研究を進める予定である。

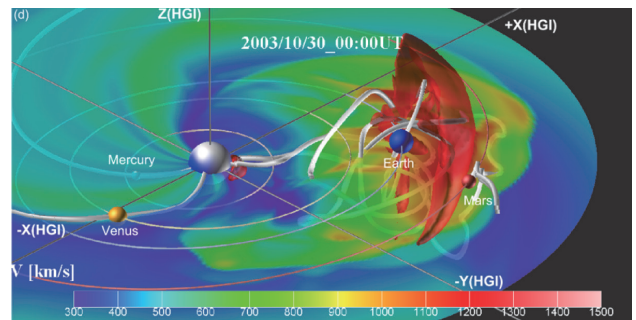


図4 コロナ質量放出とそれに伴う磁場変動のシミュレーション結果。

### 謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金：新学術領域研究「太陽地球圏環境予測：我々が生きる宇宙の理解とその変動に対応する社会基盤の形成 (<http://www.pstep.jp/>)」の助成を受けて実施したものです。

## 文献

- [1] D. Syukuya, and K. Kusano, “Simulation Study of Hemispheric Asymmetry in Solar Cycle Activities,” (submitted to *The Astrophysical Journal*).
- [2] T. Shibayama, K. Kusano, T. Miyoshi, T. Nakabou, and G. Vekstein, G., “Fast magnetic reconnection supported by sporadic small-scale Petschek-type shocks,” *Physics of Plasmas*, 22, 100706, 2015.
- [3] D. Shiota, and R. Kataoka, “Magnetohydrodynamic simulation of interplanetary propagation of multiple coronal mass ejections with internal magnetic flux rope (SUSANOO-CME),” *Space Weather*, 14, 56, 2016.

# Simulation Study of Solar-Terrestrial Environmental System

Project Representative

Kanya Kusano      Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

Author

Kanya Kusano      Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

Solar activities may seriously impact terrestrial environment as well as our infrastructure in different manners. However, our predictability of solar activities and the influence upon the Earth is substantially hindered, because the evolution mechanism of solar activities and the causal relationship between the solar variation and the climate change are not yet well understood. The objective of the Earth Simulator Project “Simulation Study of Solar-Terrestrial Environmental System” is to advance our understanding for the variability of terrestrial environment caused by the dynamics in space including the Sun. In FY 2015, we have continued the development of the several simulation models for space weather and space climate, respectively, particularly for (1) understanding the mechanism of north-south asymmetry of solar cycle, (2) understanding the mechanism of fast magnetic reconnection in solar flares, and (3) predicting the coronal mass ejection (CME) that may cause magnetic storm of the Earth.

**Keywords:** sunspot, solar flare, coronal mass ejection, CME, space weather, space climate

## 1. Introduction

The solar activities influence the terrestrial environment and the social system. However, the mechanism whereby the solar activity may affect the climate is not well understood yet. Although giant solar eruptive events such as solar flares and coronal mass ejections (CMEs) may seriously impact the infrastructure of satellite, power grids, and communication facilities, our capability to predict the onset and the influence of solar eruption is still limited. Therefore, the improvement in our understanding and predictability of the solar-terrestrial environment is crucially important not only from scientific point of view but also from the social and economic aspects.

Earth Simulator Project “Simulation Study of Solar-Terrestrial Environmental System” was established in order to improve our understanding and predictability of solar-terrestrial environmental dynamics. In FY 2015, we have continued the development of simulation studies of solar cycle activity, magnetic reconnection in solar flares, and coronal mass ejection as shown in the following sections.

## 2. Results

### 2.1 Simulation Study of North-South Asymmetry of Solar Cycle<sup>[1]</sup>

Observations of the Sun suggest that solar activities systematically create north-south hemispheric asymmetries. For instance, the hemisphere in which the sunspot activity is more active tends to switch after the early half of each solar cycle. Svalgaard & Kamide (2013) recently pointed out that the time gaps of polar field reversal between the north and

south hemispheres are simply consequences of the asymmetry of sunspot activity. However, the mechanism underlying the asymmetric feature in solar cycle activities is not yet well understood.

In order to explain the cause of the asymmetry from the theoretical point of view, we investigated the relationship between the dipole-type and quadrupole-type components of the magnetic field in the solar cycle using the mean-field theory based on the flux transport dynamo model. As a result, we found that there are two different attractors of the solar cycle, in which either the north or the south polar field is first reversed as shown in Fig.1. This results suggest that the flux transport dynamo model well explains the asymmetry of sunspot activity and the polar field reversal without any ad hoc source of asymmetry.

### 2.2 Simulation Study of Fast Magnetic Reconnection<sup>[2]</sup>

Magnetic reconnection, which is a change in connectivity of magnetic field lines in a highly-conducting fluid, plays a crucial role in explosive conversion of magnetic energy into heat and bulk kinetic energy. Standard magnetohydrodynamic (MHD) theory predicts reconnection rate that is far too slow to account for a wide variety of reconnection events observed in space and laboratory plasmas. Therefore, it was commonly accepted that some non-MHD (kinetic) effects play crucial role in fast reconnection. A recently renewed interest in simple MHD models is associated with the so-called plasmoid instability of reconnecting current sheets. Although it is now evident that this effect can significantly enhance the rate of reconnection, many details of the underlying multiple-plasmoid process still remain controversial.

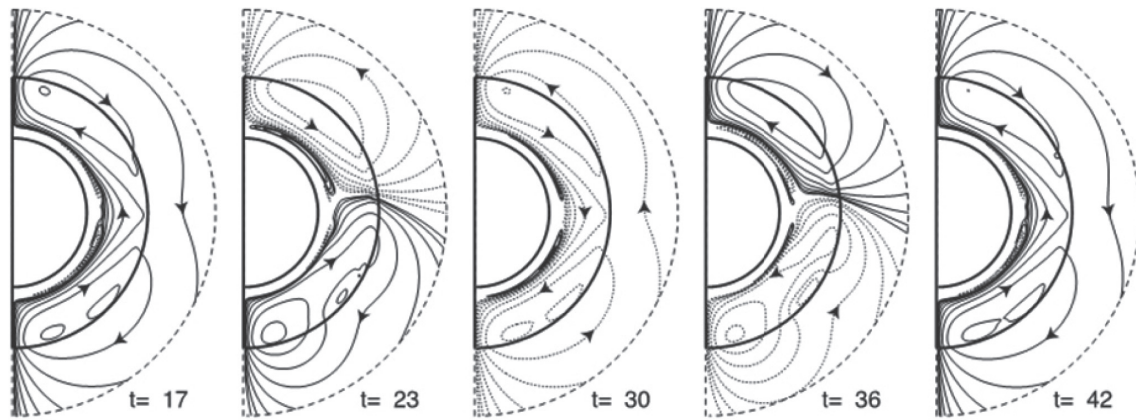


Fig. 1 The evolution of magnetic flux on a meridional plane in the solar cycle simulation.

Thus, we developed a high resolution MHD simulation to elucidate the issue of fast MHD reconnection by revealing the small-scale mechanism of its working. Figure 2 shows the temporal evolution of the scaled reconnection rate for three different simulations of the cases of  $S_0 = 10^4, 10^5, 10^6$ . Initially, at  $t \leq 200$ , the reconnection rate is slower for higher Lundquist numbers. At this stage an elongated Sweet-Parker type current sheet is formed as shown in Fig. 3, which represents temporal evolution of the magnetic field and the electric current structure for the case of  $S_0 = 10^4$ .

Then, as time progresses, the aspect ratio of the current sheet becomes too large, and the sheet breaks up due to plasmoid instability ( $t \approx 400$ , Panel (c)). After that, a further growth of plasmoids increases the reconnection rate up to 0.01 at  $t = 500 - 600$  (Panels (d), (e)). As seen from Fig. 3, between  $t \sim 600 - 700$  the central three plasmoids (including Plasmoid 1) collide and merge, creating the next-generation ones such as Plasmoid 2. At about the same time (after  $t \sim 700$ ) an intermittent fast reconnection with the rate up to 0.02 becomes established, which is caused by strong electric currents concentrated adjacent to plasmoids. Importantly, at this stage the global current sheet becomes bifurcated, forming V-shaped structures with the vertexes facing plasmoids. The results first indicate that fast albeit intermittent magnetic reconnection is sustained

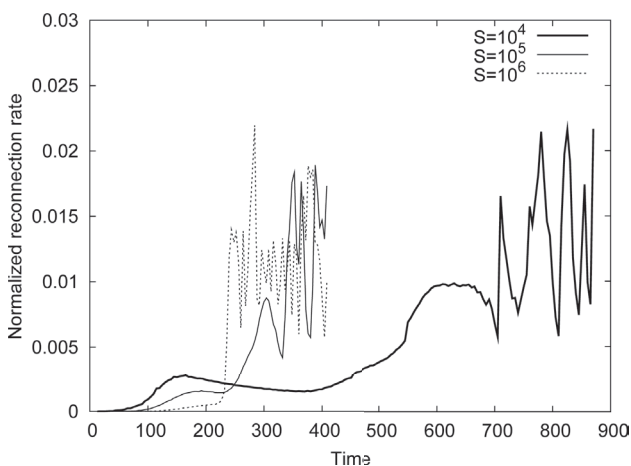


Fig. 2 The evolution of magnetic reconnection rate for three different magnetic Reynolds number.

by numerous small-scale Petschek-type shocks spontaneously formed in the current sheet due to its plasmoid instability.

### 2.3 Simulation Study of Coronal Mass Ejection<sup>[3]</sup>

Coronal mass ejections (CMEs) are the most important drivers of various types of space weather disturbance. We developed a newly magnetohydrodynamic (MHD) simulation of the solar wind, including a series of multiple CMEs with internal spheromak-type magnetic fields. First, the polarity of the spheromak magnetic field is set as determined automatically according to the Hale-Nicholson law and the chirality law of Bothmer and Schwenn. The MHD simulation is therefore capable of predicting the time profile of the southward interplanetary magnetic field at the Earth, in relation to the passage of a magnetic cloud within a CME. This profile is the most important parameter for space weather forecasts of magnetic storms. In order to evaluate the current ability of our simulation, we demonstrate a test case: the propagation and interaction process of multiple CMEs associated with the highly

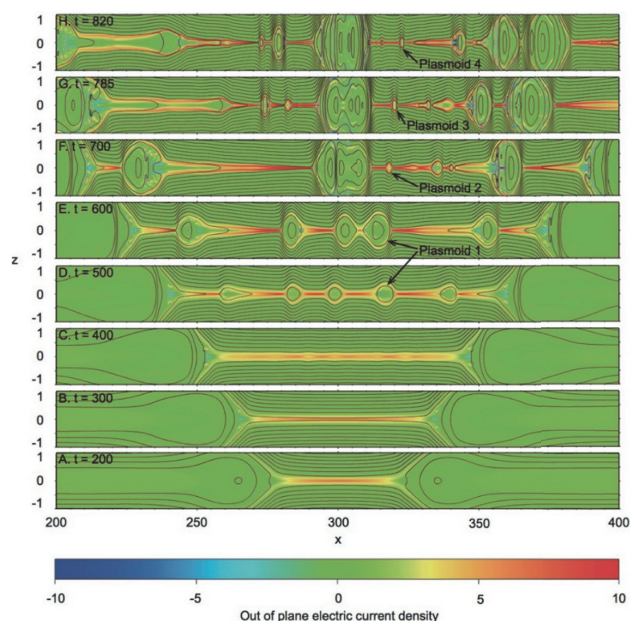


Fig. 3 Electric current density and magnetic flux of reconnection simulation ( $S=10^4$ ).

complex active region NOAA 10486 in October to November 2003, and present the result of a simulation of the solar wind parameters at the Earth during the 2003 Halloween storms (Fig. 4). We succeeded in reproducing the arrival at the Earth's position of a large amount of southward magnetic flux, which is capable of causing an intense magnetic storm. We find that the observed complex time profile of the solar wind parameters at the Earth could be reasonably well understood by the interaction of a few specific CMEs.

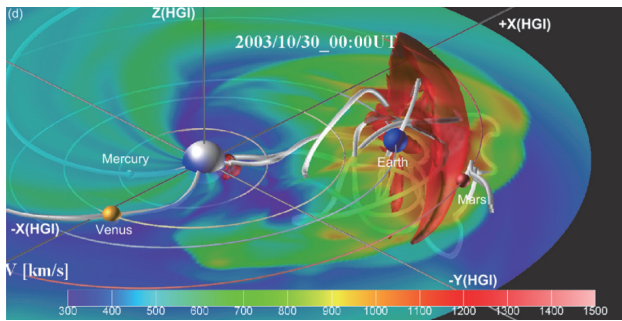


Fig. 4 Magnetic field lines and velocity distribution of MHD simulation for solar wind and the CME on Oct. 30, 2003.

## Acknowledge

This work was supported by MEXT/JSPS KAKENHI Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas (15H05814) “Project for Solar-Terrestrial Environment Prediction (PSTEP).

## References

- [1] D. Syukuya, and K. Kusano, “Simulation Study of Hemispheric Asymmetry in Solar Cycle Activities,” (submitted to The Astrophysical Journal).
- [2] T. Shibayama, K. Kusano, T. Miyoshi, T. Nakabou, and G. Vekstein, G., “Fast magnetic reconnection supported by sporadic small-scale Petschek-type shocks,” *Physics of Plasmas*, 22, 100706, 2015.
- [3] D. Shiota, and R. Kataoka, “Magnetohydrodynamic simulation of interplanetary propagation of multiple coronal mass ejections with internal magnetic flux rope (SUSANOO-CME),” *Space Weather*, 14, 56, 2016.

