

4-2-2 3次元可視化とビジュアルデータマイニング

4-2-2 3D Visualization and Visual Data Mining

松岡大祐 村田健史 藤田 茂 田中高史 山本和憲 大野暢亮
MATSUOKA Daisuke, MURATA Ken T., FUJITA Shigeru, TANAKA Takashi,
YAMAMOTO Kazunori, and OHNO Nobuaki

要旨

近年のスーパーコンピュータの性能向上によって、宇宙天気予報を目的とした大規模かつ高精度な3次元シミュレーションが実用化されつつある。このようなシミュレーションによって得られるデータセットには、プラズマ現象を理解するためのより有益な情報が含まれている。しかし、大量の数値データから現象や構造の時間変化を3次元的に理解するのは困難であり、より効率的に有益な情報を抽出し、解析を進めるための手法が求められている。そこで筆者らは、可視化処理を用いたデータマイニング手法を用いることで、磁力線の複雑な3次元トポロジーとその時間変化を効率的に解析するため手法を研究している。本稿では、3次元ビジュアルデータマイニングによる磁気フラックスロープの時間発展の解析手法とその結果について紹介する。

With the recent development of supercomputers, large scale 3D space plasma simulations to study electromagnetic environments have become practicable. We obtain a variety of 3D phenomena and configurations from 3D numerical simulations. To analyze 3D numerical simulation data has a great importance on the understanding of Earth's magnetospheric dynamics. However, it is difficult to analyze and understand 3D complex plasma phenomena or configurations. In particular, since magnetic field line's topology is strongly dependent on temporal and spatial change, it is not easy to understand time-dependent 3D configurations. In this paper, we discuss a various types of 3D visualization and Visual Data Mining(VDM) techniques to analyze the time-dependent change of magnetic field line's topology more effectively and efficiently.

【キーワード】

3次元可視化, ビジュアルデータマイニング, バーチャルリアリティ, 磁気フラックスロープ, 磁力線トポロジー

3D visualization, Visual data mining, Virtual reality, Magnetic flux rope, Magnetic field line

1 まえがき

スーパーコンピュータの性能向上により、太陽地球系物理学分野においても、より現実のモデルに近い高精度かつ大規模な3次元シミュレーションが主流となってきた。そのため、シミュレーションの結果として生成される3次元数値データには、従来と比べてより多くの有用な情報が含まれており、その有用な情報を効率的に抽出するための先進的手法が求められている。そのための手法の一つに、可視化がある。可視化とは、人間が

直接見ることが困難な現象や事象、関係性を目で見ることでできる形にすることをいう。自然科学の様々な分野においても、観測機器や計算機シミュレーション等によって生成される数値データを可視化することは、対象となるデータの全体像を直感的に理解するための有効な手段である。

一方、自然科学のみならず、金融やマーケティング、インターネット等、あらゆる分野において、大量のデータの中から有益な情報を抽出し知識として昇華するための技術としてデータマイニングが知られている。データマイニングは、「自明でな

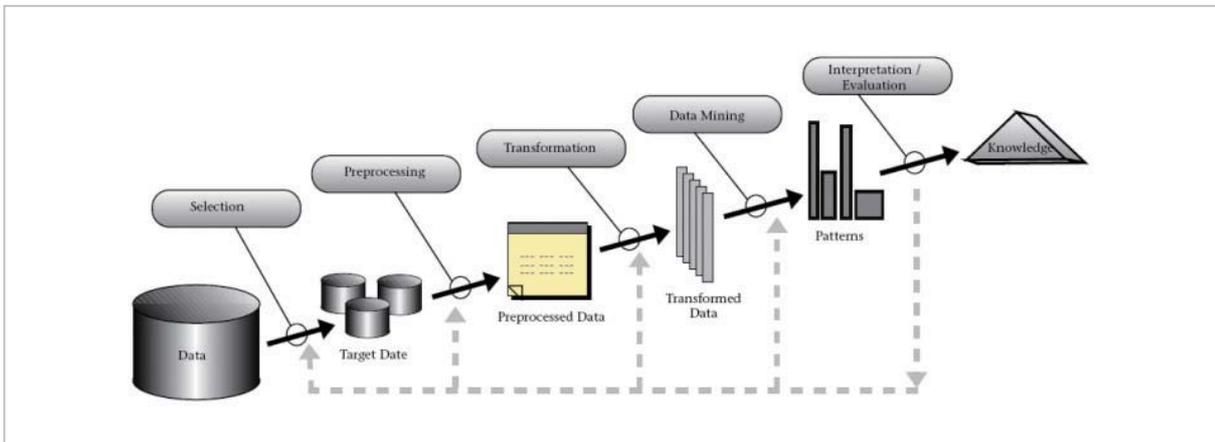


図1 知識発見のプロセス[1]

い情報をデータから抽出すること」と定義される [1]。データの特徴や目的によって様々な手法があるが、パターン抽出や回帰分析、クラス分類、クラスターリング等の解析手法が知られている。可視化によるデータマイニングもその一手法として含まれ、ビジュアルデータマイニングと呼ばれる。単純に可視化するだけでは理解することが困難な大量のデータに対して、先進的な可視化処理を施すことによって発見的な解析を行うためのデータマイニングの手法である [2]。

自然科学分野の数値シミュレーションデータに対するビジュアルデータマイニングとしては、ウェブレット解析やパターン認識等、主に2次元平面上のデータの解析を目的とした手法が知られている。一方、3次元空間上のデータに対する可視化手法やビジュアルデータマイニング手法は、3次元データからの情報抽出が求められている現在においても、確立されているとは言えないのが現状である。そこで、筆者らはこれまで3次元データや3次元時系列データからの情報抽出と発見的な解析を目的としたビジュアルデータマイニング手法の研究を行ってきた。本論文では、太陽地球系物理学分野における3次元シミュレーションによって生成された3次元時系列データに対するさまざまなビジュアルデータマイニング手法と応用例について紹介する。

本論文の構成は、以下の通りである。まず、**2**では一連の研究で用いた3次元ビジュアルデータマイニング環境について紹介し、**3**では、本論文で主に解析の対象とした磁気フラックスロープ生成の磁気圏 MHD シミュレーションについて述べ

る。**4**では、磁気フラックスロープの3次元磁力線トポロジーの特徴分類と時間変化の推測を行う。**5**では、**4**で推測された結果に基づいて、磁気リコネクションが発生していると思われる場所の抽出を行い、**6**でまとめと今後の展望を述べる。

2 3次元ビジュアルデータマイニング

2.1 知識発見のプロセスとデータフローモデル

ビジュアルデータマイニングは、数値データから目的とする科学的な知識を発見するための一プロセスである。データマイニングを含む、一般的な知識発見の流れを図1に示す。解析者は、データの中から解析対象となるデータを選択し、必要に応じて前処理や変換等を行う。次に、データマイニングの処理を施すことによって得られた結果を評価する。これらの処理を、評価結果に基づいて繰り返すことによって、最終的に知識へと昇華する。知識発見のプロセスにおいては、人間の評価結果や既知の知見を、より容易に、よりインタラクティブにフィードバックさせることが、より良い知識の発見につながる。

次に、可視化プロセスにおける処理とデータの流れ(データフロー)のモデル [3] を図2に示す。解析者は、数値データから解析対象となる時刻ステップや物理成分等を選択し、必要に応じてデータの間引き(リダクション)等のフィルタリング処理を行う。次に、フィルタリングが施された3次元空間上の離散データに対して、等値面生成や流線等のジオメトリデータに変換する。ジオメトリデータは3次元データであるため、視線方向や視

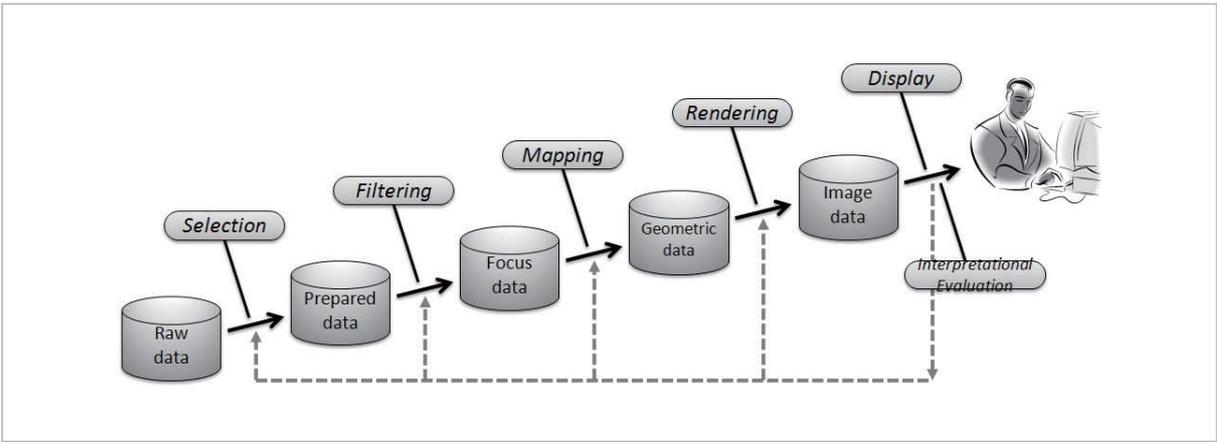


図2 可視化のデータフローモデル[3]

点位置を設定し、レンダリング処理を施すことによって画像データを生成する。また、必要に応じて視点位置や可視化手法の変更、データの選択を繰り返すことによってインタラクティブに解析を進める。可視化データフローモデルは、知的発見のプロセスと酷似しており、ビジュアルデータマイニングにおいては、知的発見プロセスにおけるデータマイニングの手法が、可視化となる。可視化を用いたデータマイニングは、人間の知識や知見を、知識発見のプロセス中にインタラクティブに与えることが容易であるという特徴がある。

2.2 3次元ビジュアルデータマイニング環境

ビジュアルデータマイニングのプロセスにおいては、得られた結果の理解と、それに基づくフィードバックにおいて人間とのインタラクションが発生する。具体的には、可視化結果を視覚的に捉え、物理成分やパラメータ、領域、可視化手法、視点位置を選択する等といった操作である。これらの操作では、従来では平面ディスプレイ、マウス、キーボード等が主なインタフェースとして用いられてきた。しかし、これらのインタフェースでは、3次元的(立体的)な映像出力や3次元的な位置の入力をするのが困難である。

そこで、本研究では立体的な映像出力が可能なバーチャルリアリティシステムとして、Portable VR[4]やCAVE[5]を用いた。また、3次元空間における位置指定が可能な3Dポインタとして、PHANToM[6]やワンド[7]を用いた。特にCAVEは、図3に示すように4面(または5面)構成になっているため没入感が高い。さらに、空間位置

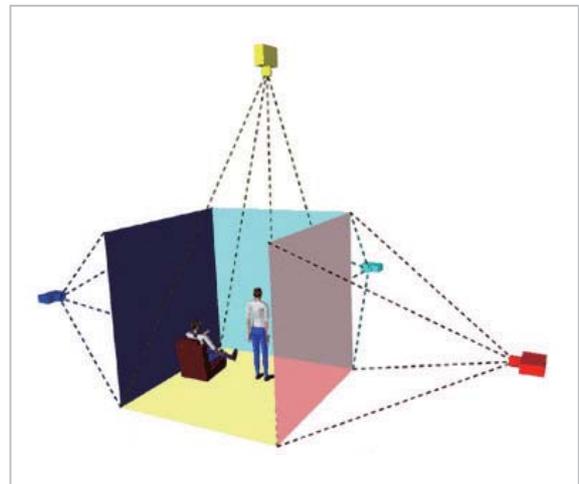


図3 CAVE[5]



図4 PHANToM[6]

認識がなされるHMD(ヘッドマウントディスプレイ)やワンドと組み合わせることで、よりインタラクティブ性の高い操作が可能となる。また、図4に示すPHANToMは、3次元的な空間位置指定だけでなく、データを触覚や力覚として変換

し、フィードバックとして与えることが可能である。本研究では、全体像の理解に CAVE とワンドを、詳細な解析には Portable VR と PHANTOM を組み合わせて用いた。

3 磁気フラックスロープ生成の 3 次元 Global MHD シミュレーション

3.1 3次元 Global MHD シミュレーション

本研究では、太陽風および惑星間空間磁場 (IMF: Interplanetary Magnetic Field) と地球磁気圏の相互作用の解析を目的とした 3 次元 Global MHD シミュレーションを行った。プラズマを構成する粒子を流体として近似した MHD 方程式を、TVD スキームによって差分化したシミュレーションコード [8] を用いた。

格子モデルは、図 5 に示す変形球座標の非直交構造格子 (GSM 座標系) である。格子点数は経度、緯度、鉛直方向にそれぞれ $88 \times 120 \times 120$ 個であり (図では 10 分の 1 に間引いて表示)、尾部は格子点を密にしている。

3.2 入力パラメータ

入力パラメータとして、人工衛星 ACE による太陽風 (速度の x 成分、温度、密度) および IMF (B_y 、 B_z) の実観測データを用いた。入力パラメータは、図 5 に示すように磁気圏の上流側 ($x = 20R_E$)

から一様に与える。図 6 に用いた入力パラメータの B_y 、 B_z 成分を示す。まず、強い B_y 成分を持った (a) の時刻の北向き IMF を双極子磁場に与えて定常磁気圏を生成し、(b) の時刻で IMF が急激に南転する。

3.3 シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 7 と図 8 に示す。図 7 は、プラズマ圧力の時間変化を夕方側の尾部方向から見たものであり、等値面表示を用いて 3 次元可視化している。図 8 は図 7 と同じ方向から見た磁力線の時間変化であり、x 軸上に $1R_E$ 間隔にとった 120 個の点を始点として可視化したもの

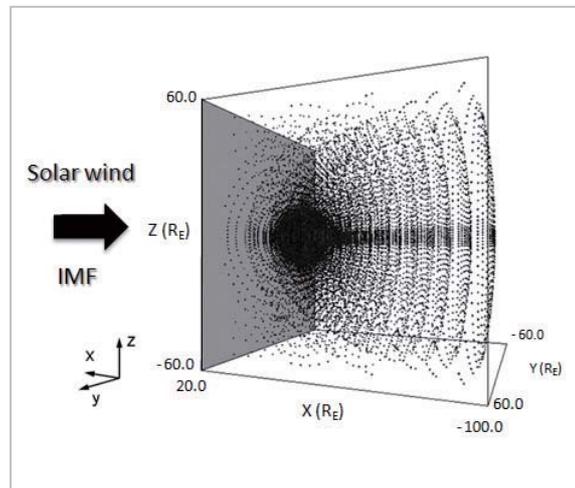


図5 格子モデル (GSM 座標系)

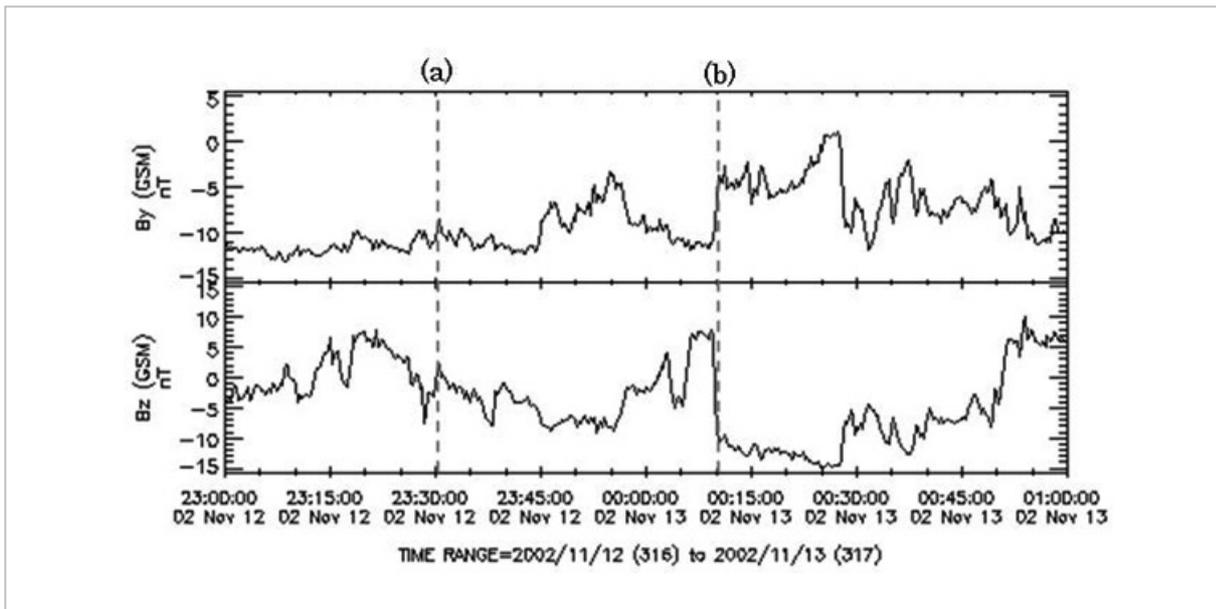


図6 入力パラメータ

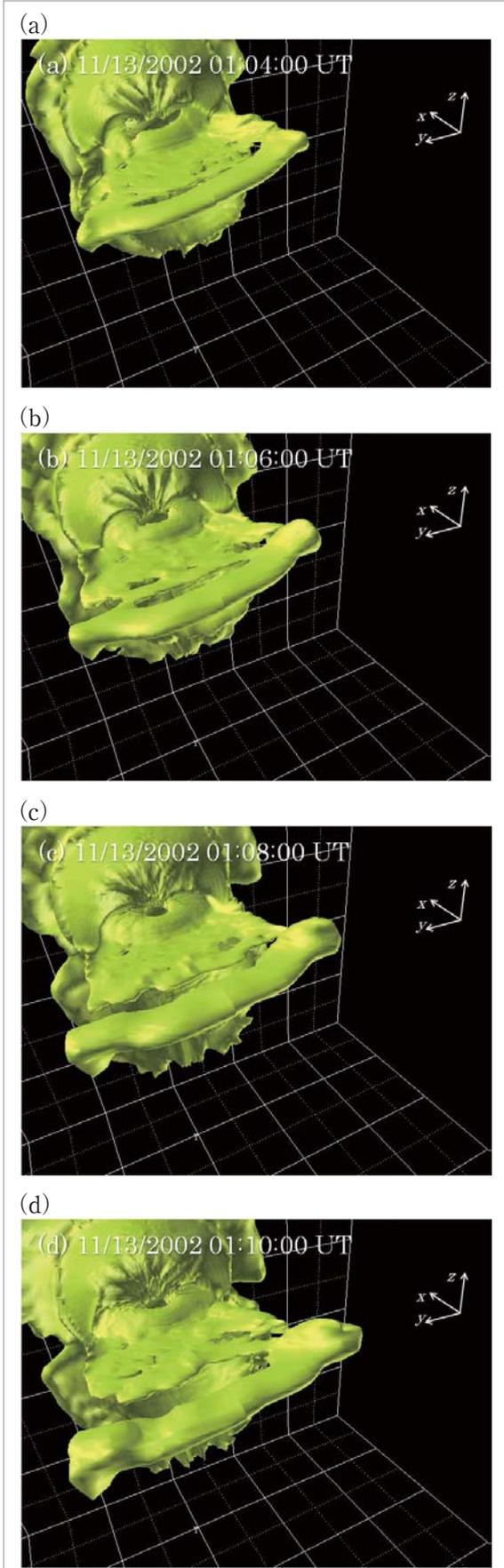


図7 プラズマ圧力の等値面の時間変化

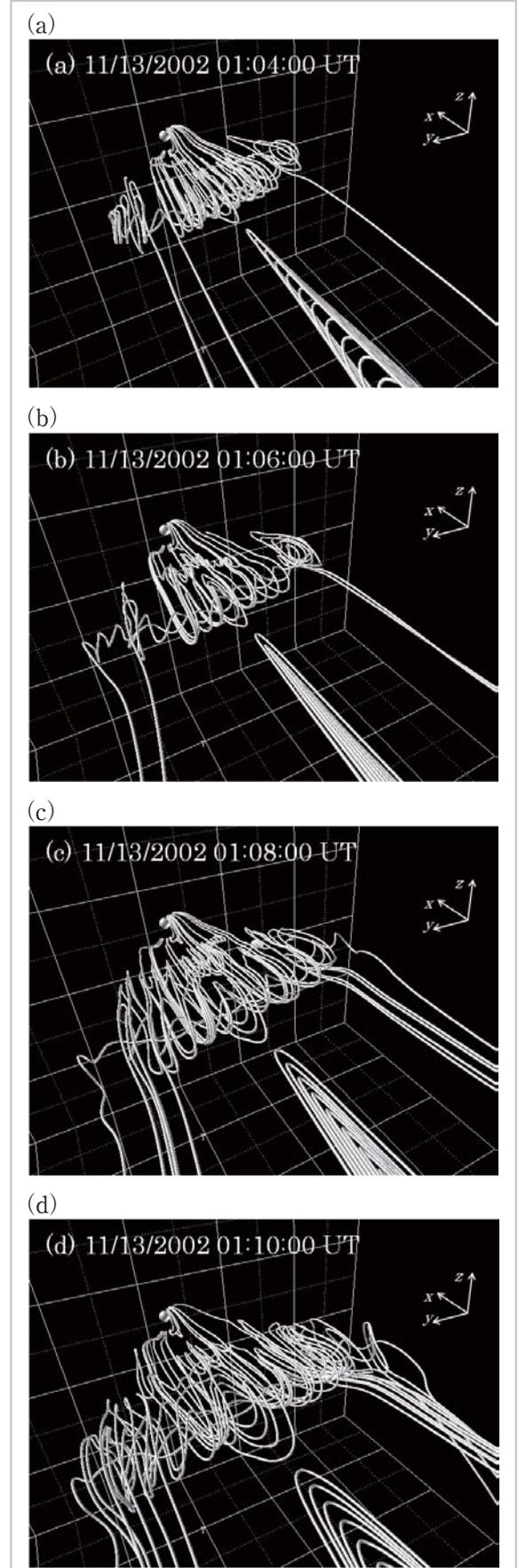


図8 磁力線の時間変化

である。図7を見ると、時間の経過とともにプラズマシートが薄く引き伸ばされ、プラズマシートから分離したプラズマのかたまりが尾部方向に向かって伝播しているのが分かる。同様に図8を見ると、尾部方向に伝播するプラズマのかたまり中の磁力線がらせん状となり、時間の経過と共に磁力線のループが大きく発達しているのが分かる。これは、磁気フラックスロープと呼ばれる。

IMF が一定時間北を向いた後に急激に南転すると、磁気圏尾部においてエネルギーの解放現象が起きることが知られている。このとき、ループ状、またはらせん状の磁場構造をともなった高密度・高圧力のプラズマのかたまりが生成される[9][10]。これらは、その磁場構造の特徴によってプラズモイド、または磁気フラックスロープと呼ばれる。特に、本研究で用いた入力パラメータのように IMF が強い B_y 成分をもっている場合には、図8のような磁気フラックスロープが生成されることが知られており、人工衛星観測や数値シミュレーションでも確認されている[11] - [13]。

4 磁気フラックスロープの時間変化の解析

4.1 磁気フラックスロープの構造分類

本章では、磁気フラックスロープの時間変化に

ともなう磁力線トポロジーの変化を理解するためのビジュアルデータマイニング手法について述べる。磁気フラックスロープは FTEs (Flux Transfer Events) 時に IMF が磁気圏前面で地球磁場とつなぎ変わって磁気圏尾部に生成され、時間発展とともに地球磁場から切断されて IMF とつながっていくことが知られている[14][15]。しかし、その生成、伝播、地球磁場からの切断過程における、磁力線トポロジーの詳細な変化は明らかにされていない。

本研究では、磁気フラックスロープの3次元構造を理解するために、まず、全時間ステップにおいて磁力線トポロジーの分類を行った。複雑に絡み合った磁力線の束の中から特徴的なトポロジー

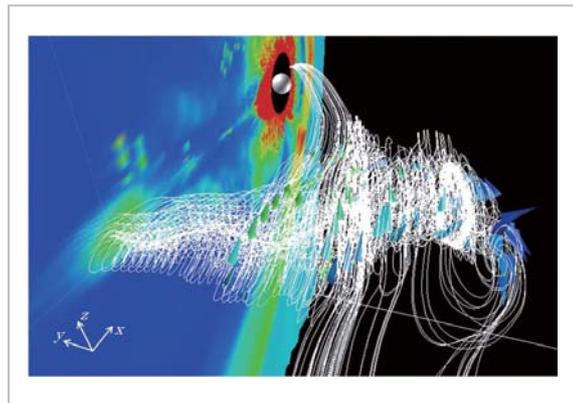


図9 磁力線に沿ったパーティクルトレース

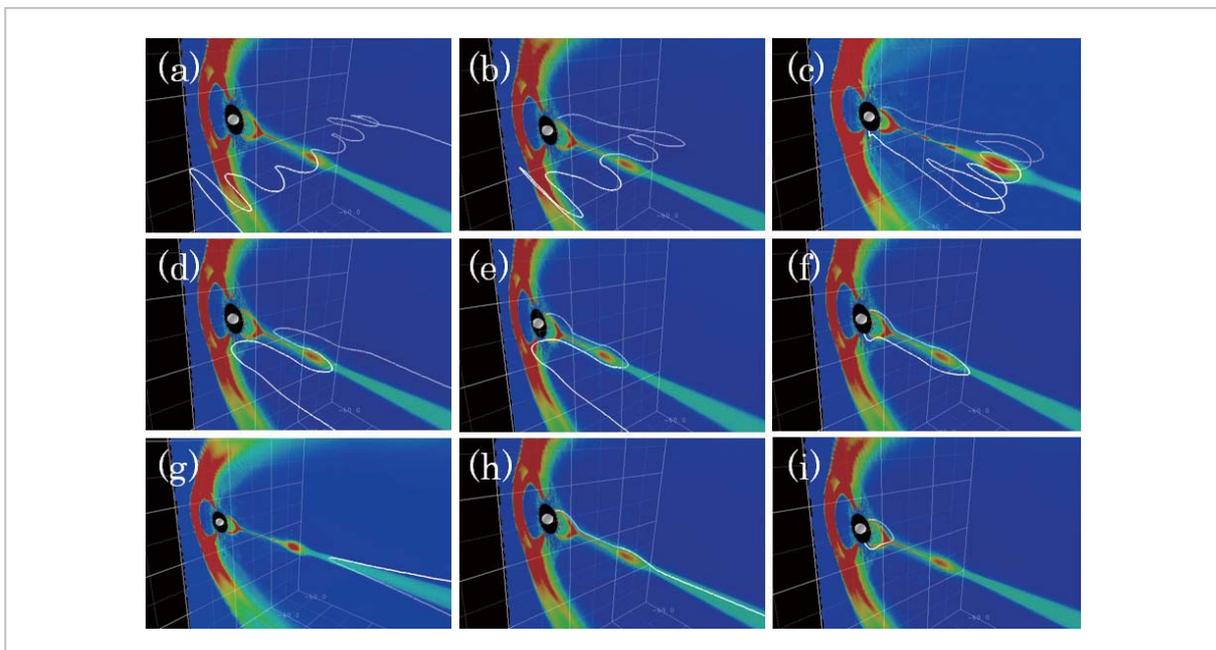


図10 磁気フラックスロープの構造分類

を特定するため、磁気フラックスロープ中の磁力線に沿ってパーティクルトレースを用いて可視化した。子午面上から磁力線に沿ってパーティクルトレースを行っている様子を図9に示す。パーティクルトレースは、無質量のテスト粒子を速度場に沿って放出することによって、その特徴を視覚的に理解することができる[16]。また、3次元的な構造をより直感的に理解するために、CAVEおよびPortable VRシステムを併用した。

その結果、図10に示す9種類の磁力線トポロジーに分類された：(a) detached (helical)、(b) open (helical)、(c) closed (helical)、(d) detached (not helical)、(e) open (not helical)、(f) closed (not helical)、(g) detached (not flux rope)、(h) open (not flux rope)、(i) closed (not flux rope)。これらは、磁力線が open (磁力線の片方が地球に、片方が IMF につながるトポロジー)、closed (磁力線の両端が地球につながるトポロジー) または detached (磁力線の両端が IMF につながるトポロジー) で分類される。さらに、それらの磁力線が helical (らせん状の磁気フラックスロープ)、not helical (らせん状ではない磁気フラックスロープ)、not flux rope (磁気フラックスロープの周辺) の3種類にそれぞれ分類される。

4.2 磁力線トポロジーの時間変化

次に、9種類に分類した磁力線トポロジーが、時間経過につれてどのように変化するかを解析する。本研究では、図11に示す $-30R_E \leq x \leq -10R_E$ 、 $-2R_E \leq z \leq 2R_E$ の子午面上にとった $0.1R_E$ 間隔の格子点上を通る磁力線に対して図10

の分類結果を適用し、自動的な分類を行った。その際、各磁力線の可視化結果を xy 平面と xz 平面に投影し、画像データのピクセルに対する走査を行うことで磁力線のループ回数を判別する手法を用いた。 xz 平面においては、図12(a)に示すように磁気フラックスロープの中心点から放射状に8本の線を用いて走査を行い、各走査線における磁力線との交点数の平均が1回未満の場合は(a)~(c)、1回以上3回未満の場合は(d)~(f)、3回以上の場合は(g)~(i)に分類した。さらに、 xy 平面に対しては磁力線の両端の位置によって open、closed、detached を判別し(図12(b))、それらの結果を合わせることで9種類のトポロジーに分類した。

2次元平面上に投影した画像データに対して特徴を判別することで、3次元データから磁力線を描画する際に判別する場合と比べて計算コストの面で効率的になる。判別処理を自動化することでより多くの磁力線を分類できるため、より高精度

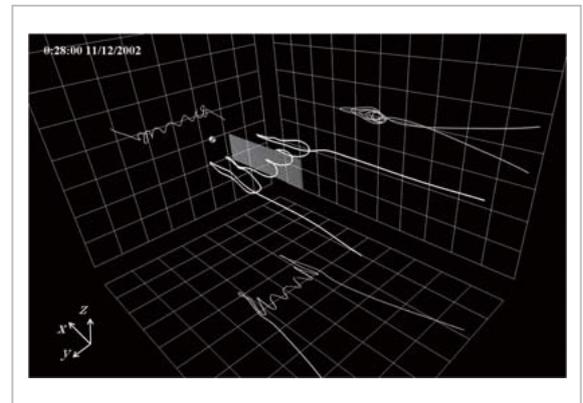


図11 磁力線の2次元平面への投影

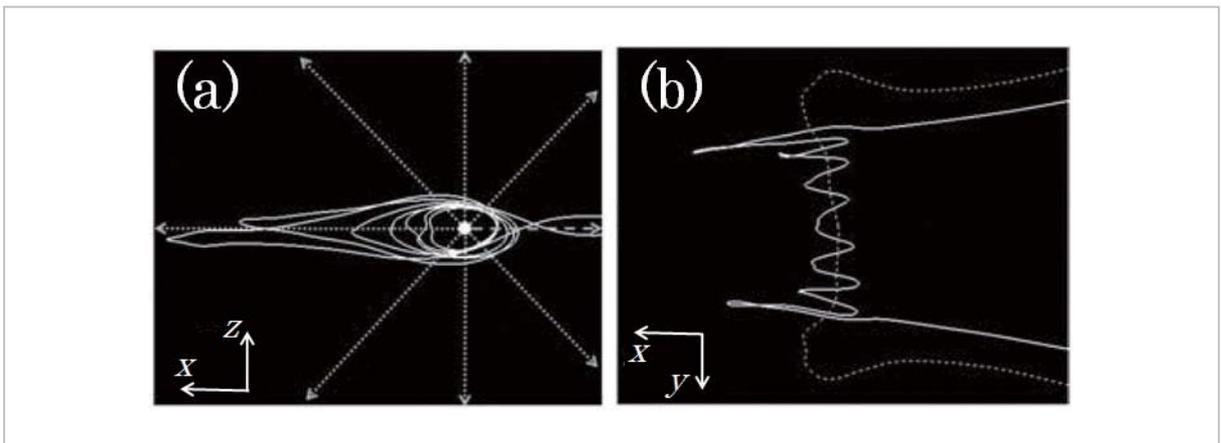


図12 投影画像を用いた磁力線トポロジーの自動分類

な解析が可能となる。

図 13 は、前述の手法を用いて分類した、01:07:00 UT から 01:13:00 UT の子午面上における磁力線トポロジーの分布の時間変化を表したものである。01:07:00 UT においては、磁気フラックスロープのほとんどが helical な detached 磁力線 (a) で構成されており、その外側に helical な open 磁力線 (b)、helical ではない detached 磁力線 (d)、helical ではない open 磁力線 (e)、helical ではない closed 磁力線 (f) が存在する。それらの外側は、ロープ領域の open 磁力線 (h) である。01:09:00 UT においては、01:07:00 UT に存在していた helical ではない detached 磁力線 (d) と helical ではない open 磁力線 (e) が消え、代わりに、helical な closed 磁力線 (c) が現れている。01:11:00 UT においては、01:09:00 UT と同様の順序で並んでいるが、helical な detached 磁力線 (a) の占める割合が多くなり、また、磁気フラックスロープの割合が多くなっている。01:13:00 UT においても、01:11:00 UT と比べて同様の傾向にある。

速度場に沿ってトポロジー分布の変化を追跡した結果、時間経過とともに磁気フラックスロープの直径が大きくなることと、内側のトポロジー分布が広がっていくことから、磁力線のトポロジー

が (h) または (g) → (f) → ((e) → (d) → (c) → (b) → (a) の順番で変化していることが推測できる。

5 磁気フラックスロープの時間変化における磁気リコネクション

4.2 で推測した磁力線トポロジーの変化を、磁力線を可視化することによって検証する。磁力線描画のための開始点指定をインタラクティブに行うために、3次元空間内における入力インタフェースである PHANToM を用いた。その結果、以下に示す 5 種類の磁力線トポロジーの変化が確認された。

まず初めに、 B_y 成分を持った IMF が図 14 (a) のように磁気圏前面の地球磁場とリコネクションを起こすことにより、図 14 (b) のような open な磁力線が生成される。次に、図 14 (b) で生成された open な磁力線が、 B_y 成分をもった closed な磁力線とリコネクションを起こすことにより、図 14 (c) のように IMF に起源をもつ detached な磁力線 (または片側が IMF とつながる open な磁力線) が、磁気圏内に入り込む。この磁力線が磁気フラックスロープの core field line となる。これらのトポロジー変化は、先行研究においても同様の結果が示されている [13][15][17]。

図 14 で生成された両端が IMF とつながる磁力線が磁気フラックスロープの core field line となるためには、core field line を closed な磁力線で取り囲む必要がある。図 15 のように、core field line の南北にあるロープ磁場が core field line の尾部側でつなぎ変わることによって、closed な磁力線の内側に core field line となる磁力線が入り込むことができる。この磁力線のつなぎ変わりは 1 か所だけではなく、dawn to dusk 方向に一様に発生する。

図 15 のリコネクションによって、core field line となる磁力線を取り囲む closed な磁力線が生成された。このリコネクションが dawn to dusk 方向で一様に発生することによって、図 16 (a) に示すような状態ができる。このとき、磁気圏内の磁力線も、IMF B_y の影響で強い B_y 成分を持っているため、closed な地球磁場も同様に B_y 成分を持って傾いている。そのため、傾いた地球磁場同士が図 16 (a) の場所でリコネクションを起こす。この

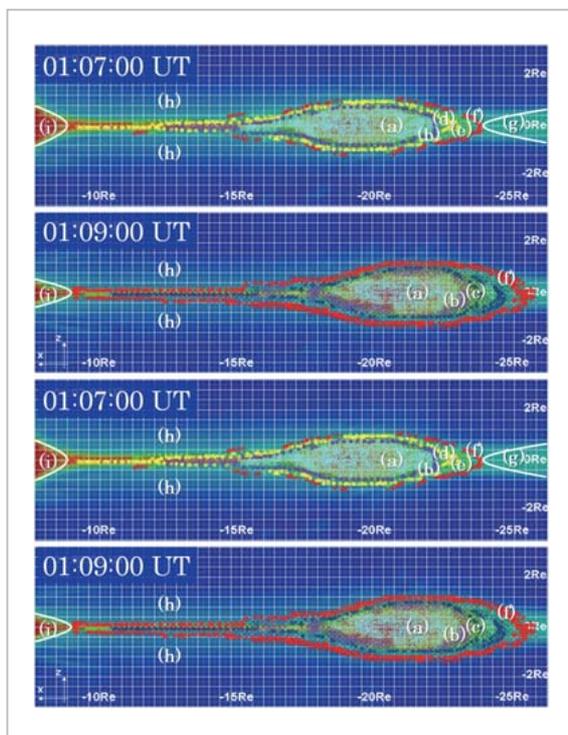


図 13 トポロジー分布の時間変化

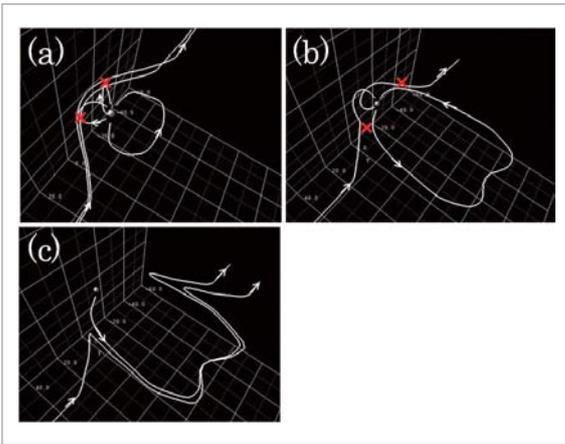


図14 core field line の生成

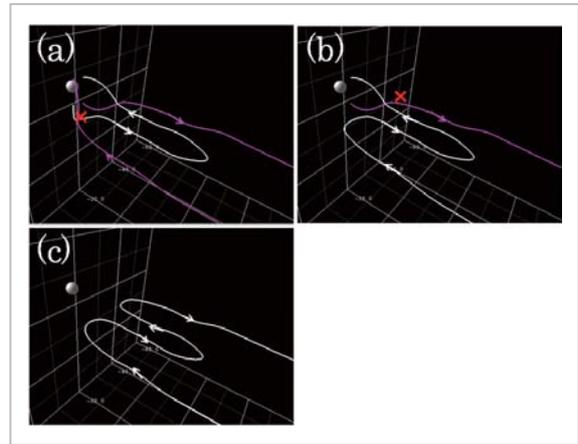


図17 地球磁場からの切断(1)

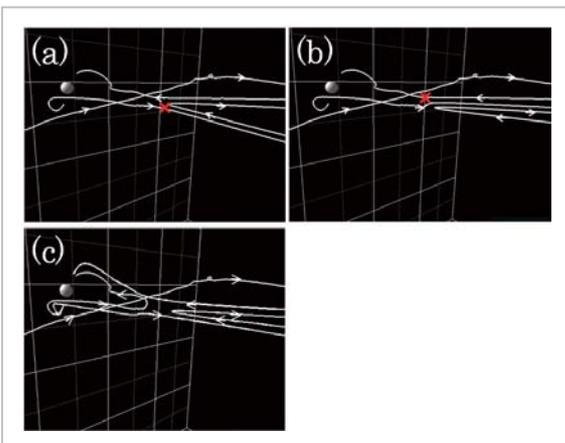


図15 core field line の取り込み

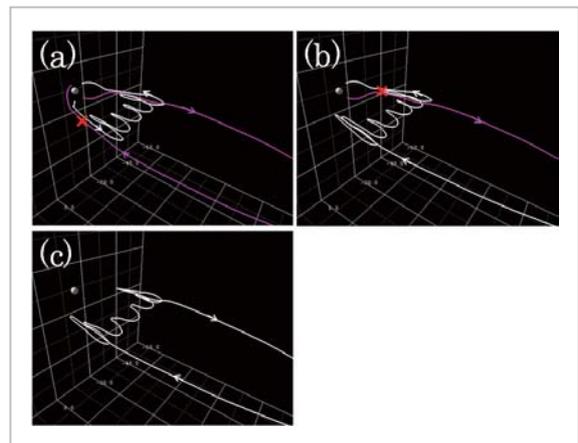


図18 地球磁場からの切断(2)

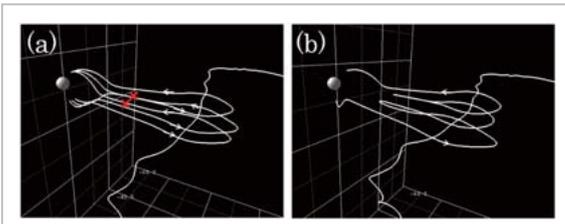


図16 helical 磁力線の生成

リコネクションは1か所だけではなく、dawn to dusk 方向で一様に起きる。これにより、図 16 (b) のような closed な磁気フラックスロープが生成される。

磁気フラックスロープを取り囲むように存在する closed な地球磁場は、図 17 に示すように open なロープ磁場とつなぎ変わることで detached な磁力線に変化する。また、closed な磁気フラックスロープは、図 18 のように open なロープ磁場とつなぎ変わることで地球磁場から切

断される。

6 むすび

本論文では、地球磁気圏において見られる複雑な磁場構造である磁気フラックスロープを例にとり、さまざまな3次元可視化手法を用いたビジュアルデータマイニングの応用例を紹介した。特に、3次元入出力インタフェースである CAVE や PHANToM を用いた3次元構造の理解や、インタラクティブ性の高い可視化処理を実現した。また、可視化結果に対する画像処理を行うことで計算コストを抑え、大量の可視化結果を自動的に一括処理することで、より高精度な時空間変化の解析を行った。今後の発展として、磁力線トポロジーの3次元的な分布や時間変化をより詳細に解析するために、超高時空間分解能データを用いた3次元セパトリクス表面の可視化や磁力線の時

間トレースが考えられる。

近年では、ペタフロップスを超える計算処理能力のスーパーコンピュータも登場し、シミュレーション技術だけでなく、結果として得られるデータセットの可視化、解析手法についても革新的な手法が求められている。膨大な量の数値データを人間にとって理解しやすい形に可視化し、それによって得られた結果を知識として可視化プロセス

にフィードバックしながら効率よく解析を行うことが、次世代の宇宙天気予報シミュレーションにおいても重要である。

本研究は文部科学省の科学研究費補助金・学術創成研究費「宇宙天気予報の基礎研究」(17GS0208、代表者：柴田一成)の援助を受けて行った。

参考文献

- 1 W. Frawley, G. Piatetsky-Shapiro and C. Matheus, "Knowledge Discovery in Databases: An Overview", *AI Magazine* Fall 1992, pp.213-228, 1992.
- 2 D. A. Keim, "Information Visualization and Visual Data Mining", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.8, No.1, pp.1-8, 2002.
- 3 R. B. Haber and D. A. McNabb, Visualization idioms: A conceptual model for scientific visualization systems, In *Visualization in Scientific Computing*, pages 74-93. IEEE Computer Society Press. 1990.
- 4 Portable VR, <http://www.jip.co.jp/si/soft/avs/App/pvr.html>, 2003.
- 5 C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, T. A. DeFanti, R. V. Kenyon and J. C. Hart, "The CAVE: Audio Visual Experience Automatic Virtual Environment", *Communications of the ACM*, Vol.35(6), pp.64-72, 1992.
- 6 PHANToM, <http://www.sensable.com/haptic-phantom-omni.htm>, 2003.
- 7 Wanda, <http://www.ascension-tech.com/realtime/WANDA.php>, 2002.
- 8 T. Tanaka, "Three dimensional magnetohydrodynamic simulation on the unstructured system using the finite volume TVD scheme", *Computational Fluid Dynamics Journal*, 1, 14, 1992.
- 9 E. S. Hones Jr., "The magnetotail: Its generation and dissipation", in *Physics of Solar Planetary Environments*, edited by D. J. Williams, pp.558-571, AGU, Washington, D. C., 1976.
- 10 E. S. Hones Jr., "Plasma flow in the magnetotail and their relation to substorms theories", in *Dynamics of the Magnetosphere*, edited by S. I. Akasofu, p.545, AGU, Washington, D. C., 1979.
- 11 C. T. Russell, and R. C. Elphic, "Observation of magnetic flux ropes in the Venus ionosphere", *Nature*, 279, pp.616-618, 1979.
- 12 W. J. Hughes, and D. G. Sibeck., "On the 3-dimensional structure of plasmoids", *Geophysical Research Letter*, 14, 636, 1987.
- 13 T. Ogino, R. J. Walker and M. Ashour-Abdalla, "A global magnetohydrodynamic simulation of the response of the magnetosphere to a northward turning of the interplanetary magnetic field", *Journal of Geophysical Research*, Vol.99, No.A6, pp.11027-11042, 1994.
- 14 A. Ieda, D. H. Fairfield, T. Mukai, Y. Saito, S. Kokubun, K. Liou, C. -I., Meng, G. K. Parks, and M. J. Brittner, "Plasmoid ejection and auroral brightnings", *Journal of Geophysical Research*, Vol.106, No.A3, pp.3845-3857, 2001.
- 15 J. C. Dorelli and A. Bhattacharjee, On the generation and topology of flux transfer events, *Journal of Geophysical Research*, 114, A06213, doi: 10.1029/2008JA013410, 2009.

- 16 松岡大祐, 村田健史, 藤田茂, 田中高史, 山本和憲, 木村映善, "Global MHD シミュレーションによる磁気フラックスロープの3次元可視化解析", 可視化情報学会論文集, Vol.28, No.6, pp.38-46, 2008.
- 17 T. Tanaka, "Configuration of the magnetosphere-ionosphere convection system under northward IMF condition with non-zero IMF By", Journal of Geophysical Research, 104(A7), pp.14,683-14,690, 1999.



松岡大祐
 まつおか だいすけ
 海洋研究開発機構地球シミュレーションセンター研究員 博士(工学)
 太陽地球系物理学、科学可視化



村田健史
 むらた けんし
 電磁波計測研究センター宇宙環境計測グループグループリーダー 博士(工学)
 宇宙情報工学、福祉情報工学



藤田 茂
 ふじた しげる
 気象大学校准教授 理学博士
 磁気圏電離圏系物理学



田中高史
 たなか たかし
 九州大学大学院理学研究院教授
 理学博士
 複合系磁気圏物理学



山本和憲
 やまもと かずのり
 愛媛大学工学部研究生
 Virtual observatory、セマンティックWeb



大野暢亮
 おおの のぶあき
 海洋研究開発機構地球シミュレーションセンター研究員 博士(理学)
 科学可視化、バーチャルリアリティ