

地球磁気圏 3 次元グローバル MHD シミュレーションの磁力線 追尾可視化技術

久保田康文^{*1}, 村田健史^{*1}, 山本和憲^{*1}, 深沢圭一郎^{*2}, 坪内健^{*3}

Visualization technique using a system of Magnetic Field Tracing in Global MHD simulations

Yasubumi Kubota^{*1}, Ken T. Murata^{*1}, Kazunori Yamamoto^{*1}, Keiichiro Fukazawa^{*2}, Ken Tsubouchi^{*3}

Abstract

We developed a system of Magnetic Field Tracing in Global MHD simulations in order to understand magnetosphere convection. To trace magnetic flux tube with high precision, we need to process big data such as all time-series simulation data. In this paper, we show a parallel distribution visualization technique for magnetic field tracing by using NICT science cloud.

概要

地球磁気圏と太陽風の相互作用を理解するため、3 次元グローバル MHD シミュレーションを用いて研究が行われてきた。MHD シミュレーションデータを可視化する際に、磁力線の可視化は物理を理解する上で重要である。しかし精度よく磁力線を追尾し可視化することは、大規模な時系列データを処理する必要があるため困難であった。我々は大規模データを処理することができる NICT サイエンスクラウドを利用することで磁力線追尾可視化技法の開発を行ってきた。本論文ではこれまでの開発の現状について紹介する。

1. はじめに

磁気圏対流を理解することは太陽風、磁気圏、電離圏のエネルギー輸送を理解する上で重要である。Dungey は地上で観測された電離圏の対流から、磁気圏の境界で太陽風磁場と地球磁場が繋ぎ変わり、太陽風が磁気圏の対流を駆動していると考えた¹⁾。現在では地上の電離圏観測と人工衛星による磁気圏の観測から、Dungey の考えた磁気圏対流が大まかには合っていると考えられている。しかしながら、磁気圏の観測が人工衛星観測のようにローカルな領域しか観測できないことから、今でも複雑な磁気圏対流の詳細は明らかになっていない。その中で磁気圏全体を解くことができる 3 次元グローバル MHD シミュレーションコードが開発され多くの成果を上げてきた^{5,6)}。同時に複雑な 3 次元シミュレーションデータを理解するために、3 次元の可視化技術も必要とされてきた。松岡らは 3 次元グローバル MHD シミュレーションで再現された磁気圏尾部の複雑な磁気フラックスロープの構造について 3 次的に磁力線を可視化することで構造を明らかにした¹⁾。

3 次元 MHD シミュレーションで磁力線を可視化するためには、ある始点を与えその始点から磁場に沿って積分を行い、磁力線を描くのが一般的である。これまで、磁力線の時系列 3 次元可視化は磁力線を描くための始点を空間に固定して連続するスナップショットを繋げることで可視化を行ってきた。このような磁力線の可視化は固定された始点から描かれる磁力線の変化を見ることはできるが、磁気圏対流のような磁力線の輸送は分からない。そこで我々はある流体要素を速度に沿って時間方向に積分をして追尾し、その流体要素を始点として磁力線を描くことで磁気圏対流の可視化を行った。

磁力線を追尾し可視化をすれば直接、磁気圏対流を見ることができるようになる。しかしながら、このような可視化は以下の技術的な問題で困難であった。1 つは精度よく流体要素を追尾し可視化するためにはシミュレーションの全時系列データを処理し、その流体要素を始点として磁力線を可視化する必要がある。このようなスーパーコンピュータで計算された大量データの処理と可視化をするためには、CPU の並列分散化だけでなくネットワークや I/O の並列分散化が

*1 情報通信研究機構

*2 九州大学

*3 東京大学

必要である。また、磁力線を追尾するためにはプラズマの磁場凍結が成り立つ必要があり、磁場凍結の検証をしながら追尾をする必要がある。磁場凍結が成り立たない領域では、磁場が拡散し磁力線が繋ぎ変わり磁力線のトポロジーが変化する。以下ではこれまで開発を行ってきた磁力線追尾可視化技術の概略の紹介をする。セクション2では磁力線追尾と可視化に必要な大規模データ処理について述べ、セクション3ではプラズマの磁場凍結の検証について述べる。

2. 磁力線追尾のための NICT サイエンスクラウドによる大規模データ処理

磁力線追尾で用いた3次元グローバルMHDシミュレーションデータとNICTサイエンスクラウド³⁾による大規模データ処理について述べる。

2.1 3次元グローバルMHDシミュレーションデータ

使用したシミュレーションデータは地球磁気圏と太陽風の相互作用についてグローバルにMHD方程式系を解いている。解像度は0.2Reで、計算格子は $450 \times 300 \times 300$ のデカルト座標系を用いた。1ステップのデータ量は1.3GBである。時間刻みは0.5秒で2時間分のデータを用いた。全データ量は約18TBとなる。太陽風パラメータはGalaxy15イベント(2010/4/5)のACEで観測された値を用いた。

2.2 NICTサイエンスクラウドによる大規模データ処理

磁力線を追尾するためには磁力線を描く際の始点となる流体要素を追尾する必要がある。時間方向に精度よく追尾するためには、最小の時間分解能で積分するのがよい。つまり時系列の順に14400個ファイルを読み込み処理する必要がある。また流体要素を追尾した結果を始点として磁力線を可視化する必要がある。このような大規模データ処理を行う場合、ボトルネックになるのは可視化処理と共にディスクI/Oである。NICTサイエンスクラウドではCPU分散をすると同時に、並列分散大規模ストレージにGfarmファイルシステム⁴⁾を用いている。Gfarmを用いることで、アクセス集中によるディスクI/O性能の低下を回避することができる。またGfarmによるスケーラブルな並列I/O性能を活用し、Rakeによるワークフロー記述性を用いるため開発されたPwrake⁸⁾を用いて磁力線追尾と可視化のためのワークフローを記述した。

可視化にはNICTサイエンスクラウドのアプリケーションであるAVSベースで開発されたバーチャルオーロラを用いた。バーチャルオーロラはHDF形式の地球磁気圏シミュレーションデータを読み込み、磁気圏断面、等数値面、流線、ベクトル、点の球表示、2次元プロット等、解析に必要な可視化をインタラクティブに操作できる。図1はバーチャルオーロラの実行画面である。インタラクティブに操作し、磁力線追尾の初期状態を可視化、初期の追尾データを作成、その後、並列分散可視化を行う。

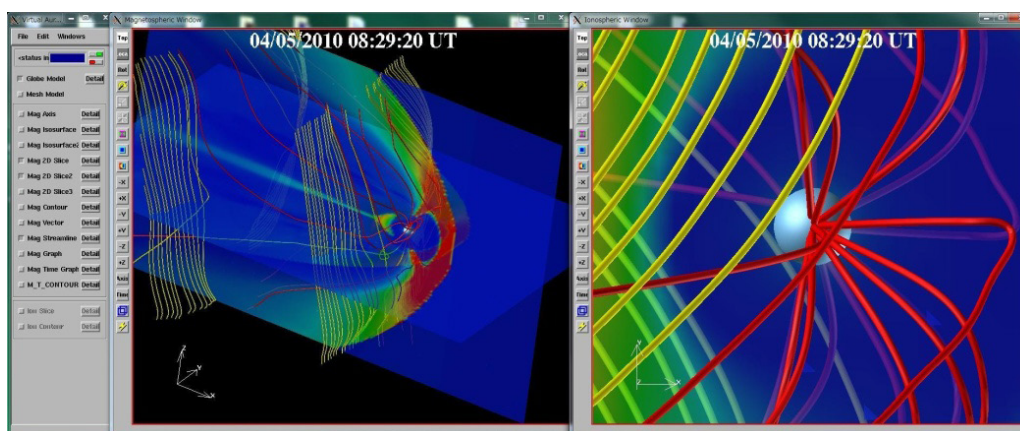


図1 バーチャルオーロラ実行画面。磁気圏の断面と磁力線を描いている。

図2は磁力線追尾のワークフローである。青枠で囲まれている処理過程は並列分散処理を行った処理過程である。最初に、全シミュレーションデータをバーチャルオーロラで読み込めるHDF形式に変換する。また、シミュレーションデータを時系列の順で読み込み流体要素の追尾計算を行う。その後、HDF形式のデータと流体要素の追尾データをバーチャルオーロラに読ませて磁力線を描き、1時刻ステップ毎にHDF形式の3次元オブジェクトの出力を行う。最後に複数のHDF形式の3次元オブジェクトをAVSの幾何形状のアニメーションデータフォーマットであるGFAファイルに結合をする。36コアで並列分散処理を行うことで、数時間で磁力線を追尾し可視化することができるようになり、インタラクティブに研究を進めることが可能となった。

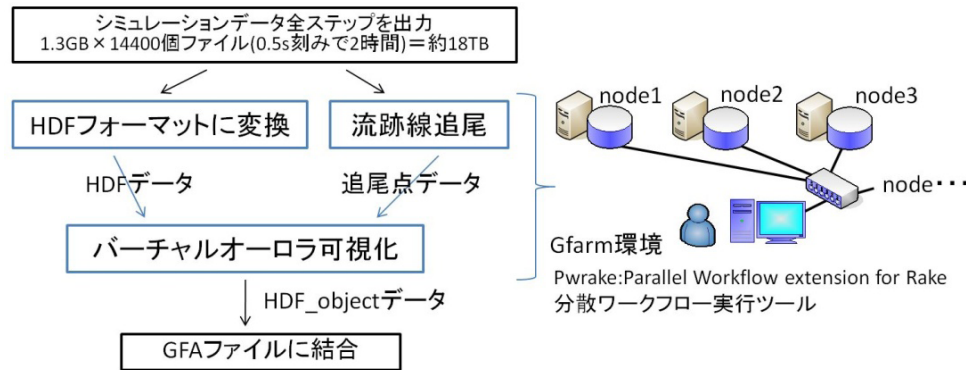


図2 磁力線追尾のワークフロー。青枠の処理過程について gfarm と pwrake を用いて並列分散処理を行っている。

表1に1stepあたりの磁力線追尾処理と可視化処理のそれぞれの演算時間とI/O時間を示した。磁力線追尾処理では、I/O時間が主な処理時間である。可視化処理では、演算時間がI/O時間に対して約6倍となっている。処理の種類により演算時間とI/O時間に偏りがある。最適にリソースを分配するため、ノードに対してコア数を変えて計算をした。本計算の処理に用いたコア数は磁力線追尾処理にはI/O処理を分散させるため6ノード×1コアを用いた。可視化処理にはI/O処理と演算処理を分散させるため6ノード×6コアを用いた。表2に磁力線追尾処理と可視化処理について1000stepの処理時間と1コアの処理時間との比を示した。まず可視化処理では1コアの処理時間との比が19.64倍となっている。6ノード×6コアで全コア数が36に対して効率が出ていないのはI/O処理で輻輳が生じているためである⁷⁾。磁力線追尾処理では1コアの処理時間との比が2.79倍となっている。6ノード×1コアで全コア数が6に対して効率が出ていないのは、追尾処理は追尾点データの受け渡しのためファイル間の処理に依存関係があり、待ち時間が生じるためである。磁力線追尾処理の並列化効率を高くするのは今後の課題である。

表1 1ファイルあたりの演算時間とI/O時間。750本の磁力線について処理を行った。

	演算時間 [sec]	I/O 時間 [sec]
磁力線追尾処理 (1.3GB)	0.33	4.88
可視化処理 (2.3GB)	47.50	7.57

表2 1000stepの処理にかかった時間と1コアの処理時間との比。

	1000stepの処理時間 [sec]	1コアの処理時間との比 [倍]
磁力線追尾処理 (6ノード×1コア)	1869.29	2.79
可視化処理 (6ノード×6コア)	2804.77	19.64

大規模なGFAファイルを見るためにはビューアが必要である。NICTでは64bit版GFAプレーヤーを開発した。ビューアのメモリーモードでのGFAデータのレンダリングにはパソコンのメモリの制限があるため14400stepを表示するのは難しいが、これまで2000stepのGFAデータを可視化した実績がある。

3. 磁力線追尾技法の検証

地球磁気圏 3 次元グローバル MHD シミュレーションでは、磁場の誘導方程式を解いており、物理的または計算を安定させるために人工的に磁場の拡散項を与えている。磁場の拡散項が移流項と比較して小さい領域でプラズマの磁場凍結を仮定できる。拡散項が大きな領域ではプラズマの磁場凍結が破れ、磁力線を追尾することは意味をなさない。以下では、シミュレーション中でプラズマの磁場凍結の定義である微小面積内の磁束の変化をモニターすることで、磁力線追尾ができているかを検証する。

3.1 プラズマの磁場凍結と磁束保存

いまプラズマ中の微小面積 dS を通る磁束 Φ は、磁束密度を B とすると

$$\Phi = \oint B \cdot dS \quad (1)$$

と書ける。微小面積 dS が時間と共に移動する場合を考える。磁場の誘導方程式は速度を v とすると

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B) + \eta \nabla^2 B \quad (2)$$

と書ける。 η は抵抗係数で 0.002 である。式 (1) を時間微分し式 (2) を代入すると、磁束の時間変化は

$$\frac{d\Phi}{dt} = \eta \oint \nabla^2 B \cdot dS \quad (3)$$

となる。式 (3) の右辺が 0 の場合、時間に対して微小面積を通る磁束は変化しない。このため、微小面積と共に、磁場が凍結したように移動する。

3.2 磁束の計算と評価方法

磁力線追尾は 2.2 節で述べた処理を行い、流体要素を追尾し、その後流体要素を始点として磁力線を描く。時刻 t の流体要素のある位置 $x(t)$, $x(t)$ の位置の速度を v とすると、 dt 後の流体要素の位置 $x(t+dt)$ は

$$x(t+dt) = x(t) + vdt \quad (4)$$

である。 v は一番近い格子点の値から線形に補間し求めた。

ある微小面積の磁束を計算するため、図 3 の様に微小な円の円周上に 29 点と中心に 1 点の流体要素を配置し、それぞれの流体要素を追尾する。円周の隣り合った 2 点と中心点からできる三角形の面積を計算し、式 (1) から磁束を計算する。29 個の三角形の磁束を足し合わせ微小面積内の磁束を計算する。

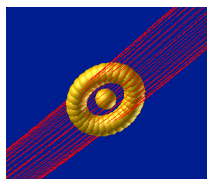


図 3 円周上に 29 点と中心に 1 点の流体要素から磁力線を書いた磁気フラックスチューブ

以下では、初期に配置した微小面積内の磁束からの磁束の変化率でプラズマの磁場凍結を評価する。磁束の変化率の定義は

$$(\Phi(t) - \Phi(0)) / \Phi(0) \times 100 \quad (5)$$

である。磁束の変化率が 0% の場合は、完全に磁場凍結が成り立っている。磁束の変化率が -100% の場合は、磁場が拡散し微小面積の法線方向の磁束密度がなくなる場合を表しており、この領域で磁気フラックスチューブは他の磁気フラックスチューブと繋ぎ変わることができることを意味している。

3.3 磁気圏内の磁束保存の検証

磁気圏内の磁束保存について、特徴的な領域を通過する微小面積を追尾することで磁束保存の特徴を調べた。半径 $0.1R_E$ の微小面積をシース、ローブ、プラズマシートの磁気フラックスチューブに配置して、480 秒間追尾を行い磁束の保存を調べた。図 4 は地球磁気圏 MHD シミュレーション結果の子午面の圧力断面上に、調べた微小面積と磁気フラックスチューブを書いた図となっている。左図が初期状態 ($t=0$ 秒), 右図が $t=370$ 秒の図である。図中の橙の円内に微小面積の位置を示している。図中の英字は個々の微小面積を示しており、左図と右図で対応している。磁気フラックスチューブの色はトポロジーを表しており、紫が detached, 赤が open の磁気フラックスチューブである。初期状態で (a), (b), (b') は一本の磁気フラックスチューブ中に配置してある。 $t=370$ 秒では、1 本であった磁気フラックスチューブが 3 本に分かれることが分かる。つまり、(b), (b') を始点とした磁気フラックスチューブは地球磁場と繋ぎ変わり、南北対象に夜側のローブ領域に輸送される。(a) は後に述べるが磁場の拡散領域を通過したため、追尾することに意味がなくなった磁力線である。(c) は磁場の繋ぎ換えが起き、open から detached の磁気フラックスチューブとなる。(d) はローブ領域を輸送される。

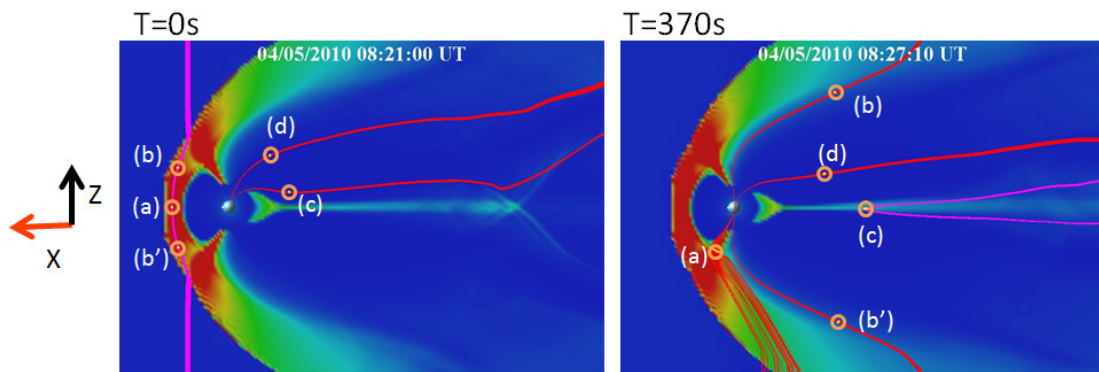


図 4 圧力の子午面断面図上に磁気フラックスチューブを書いた図。橙の円は微小面積の位置を示している。英字は個々の微小面積を示している。磁気フラックスチューブの色はトポロジーを表しており、紫が detached (地球と繋がっていない)、赤が open (一方の端が地球と繋がっている) の磁気フラックスチューブである。

図 5 は初期状態からの磁束、法線方向の磁束密度、微小面積の変化率を表しており、黒線が磁束、青線が法線方向の磁束密度、緑線が微小面積を示している。法線方向の磁束密度と微小面積の変化率の定義は式 (5) の磁束を、それぞれ法線方向の磁束密度と微小面積に置き換えたものである。(a), (b), (c), (d) は図 4 と対応している。最初に (d) を見ると、プラズマシートに向けて輸送される間、磁束密度が減少するが、面積が増えて、磁束はほぼ一定となり、プラズマの磁場凍結が成り立っていることを示している。(a) を見ると、磁束の変化率は $t=80$ 秒で -100% を超える。 $t=80$ 秒で磁場が拡散し、法線方向の磁束密度がほぼなくなることを示している。ここで磁力線の繋ぎ換えが起きる。磁場の拡散領域を通過した後は、プラズマの磁場凍結が破れているため、図 4 の右図の (a) のように流体要素を追尾することは意味をもたない。 $t=80$ の前に法線方向の磁束密度が上昇し面積が減少するが、磁気圏境界の前に停留点があり太陽風磁場が強くなるためである。(b) を見ると、 $t=0$ から 180 秒に、法線方向の磁束密度が減少し、次に増加する。これは流体要素がカusp領域を通過するためである。面積は逆相関となっており、磁束は保存する。磁束密度と面積の変化率は $t=180$ 秒でそれぞれ -50% , 100% を超えるが磁束は 20% 程度の変動となっている。磁束が時間に対しておおよそ保存をしている。(b), (b') を始点とした磁気フラックスチューブは (a) の磁束の変化率が -100% を超えた領域で地球磁場と繋ぎ変わるが、それぞれ磁気フラックスチューブを形成したまま、ローブ領域に輸送される。(c) はプラズマシート通過時に磁束の変化率が -50% を超える。しかし、磁束の変化率が -100% を超えないため、(b), (b') と同様に磁気フラックスチューブ上の他の領域で繋ぎ換えがあり、繋ぎ変わった後も磁気フラックスチューブを維持する。

磁力線の繋ぎ換えが起こる領域は (a) のように磁束の変化が -100% を超える領域である。3 次元グローバル MHD シミュレーションでは、磁場の拡散項が大きいいため、(b), (b'), (c) のような磁力線の繋ぎ換えが起きない領域でも磁場が拡散していることが確認された。そのため、磁気フラックスチューブを追尾する場合、どの程度磁場が拡散をしているかモニターをしながら追尾する必要があることがわかった。

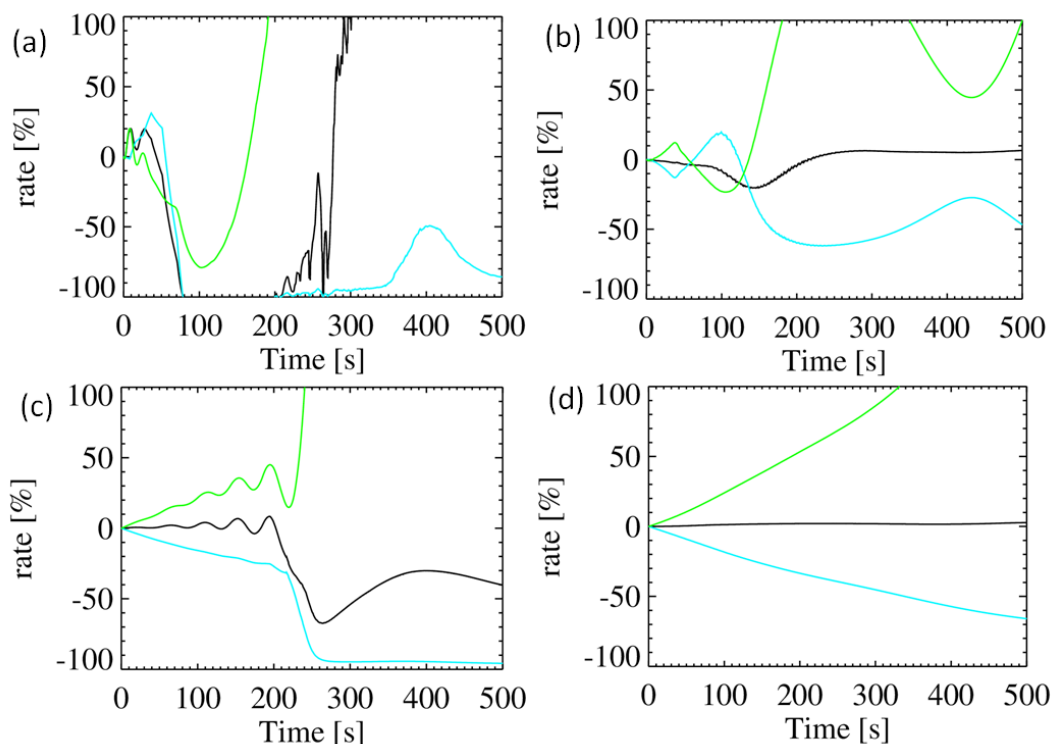


図 5 縦軸が初期状態からの変化率，横軸が時間．黒線は磁束，青線が法線方向の磁束密度，緑線が微小面積の変化率である．(a), (b), (c), (d) は図4と対応している．

4. まとめ

NICT サイエンスクラウドを用いて地球磁気圏 3 次元グローバル MHD シミュレーションの大規模データを並列分散可視化することで、磁束の保存をモニターしながら磁気フラックスチューブを追尾し可視化することができた。可視化処理では CPU と I/O の並列分散化を行い、約 20 倍の高速化が実現できた。磁力線追尾処理では I/O の並列分散化を行い約 3 倍の高速化を実現した。磁力線を追尾するためにはプラズマの磁場凍結が成り立つ必要がある。磁場凍結が成り立たない領域では、磁場が拡散し磁力線が繋ぎ変わる。そのため 30 点の追尾点から成る微小面積を用いて磁束を計算し、磁束の保存をモニターしながら磁気フラックスチューブを追尾し可視化した。その結果、初期状態からの磁束の変化率が -100% になる場合に磁力線が繋ぎ変わることがわかった。磁力線の繋ぎ換えを含めて磁気フラックスチューブを追尾し可視化することができた。今後は本論文の技術を用いて磁力線の繋ぎ換えが起きる磁場の拡散領域を特定できることから、太陽風パラメータを変化させることによって磁場の拡散領域がどのように変化するかを調べる予定である。

参考文献

- 1) Daisuke Matsuoka, Ken T. Murata, Shigeru Fujita, Takashi Tanaka, Kazunori Yamamoto, and Eizen Kimura, Analyses of 3D Structure of Magnetic Flux Ropes via Global MHD Simulations, Journal of Visualization, 28(6), 2008, 38-46.
- 2) Dungey, J. W., Interplanetary magnetic field and the auroral zones, Phys. Rev. Lett., 6, 1961, 47-48
- 3) Ken T. Murata, Shinichi Watari, Tsutomu Nagatsuma, Manabu Kunitake, Hidenobu Watanabe, Kazunori Yamamoto, Yasubumi Kubota, Hisao Kato, Takuya Tsugawa, Kentaro Ukawa, Kazuya Muranaga, Eizen Kimura, Osamu Tatebe, Keiichiro Fukazawa and Yasuhiro Murayama, A Science Cloud for Data Intensive Sciences, Proceedings of the 1st ICSU World Data System Conference, 2011.
- 4) Osamu Tatebe, Kohei Hiraga, and Noriyuki Soda. Gfarm Grid File System. New Generation Computing, Vol. 28, No. 3, pp. 257-275, 2004.

- 5) T. Ogino, R. J. Walker, M. Ashour-Abdalla, J. M. Dawson, An MHD Simulation of the Effects of the Interplanetary Magnetic Field B_y Component on the Interaction of the Solar Wind with the Earth's Magnetosphere during Southward Interplanetary Magnetic Field, *J. Geophys. Res.*, 91, 1986, 10,029-10,045.
- 6) T. Tanaka, A. Nakamizo, A. Yoshikawa, S. Fujita, H. Shinagawa, H. Shimazu, T. Kikuchi, and K. K. Hashimoto, Substorm convection and current system deduced from the global simulation, *J. Geophys. Res.*, 115, 2010, A05220
- 7) 磯田総子, 村田健史, 渡邊英伸, 深沢圭一郎, 山本和憲, 建部修見, 田中昌宏, 木村映善, NICT サイエンスクラウド ～ビッグデータ分散処理性能検証～, *信学技報*, vol. 113, no. 86, SC2013-4, 2013, pp. 19-24.
- 8) 田中昌宏, 建部修見, 並列分散ワークフローシステム Pwrake による大規模データ処理, *宇宙科学情報解析論文誌*, 1, 2012, 67-75