

2-3-3 3次元シミュレーションによる惑星間空間 衝撃波伝播の到達予測システム

2-3-3 *Prediction System of the 1-AU Arrival Times of CME-Associated Interplanetary Shocks Using Three-Dimensional Simulations*

田 光江 小川智也 田中高史 亘 慎一 天羽宏嘉 杉原光太
武井利文

DEN Mitsue, OGAWA Tomoya, TANAKA Takashi, WATARI Shinichi, AMO Hiroyoshi,
SUGIHARA Kouta, and TAKEI Toshifumi

要旨

コロナ質量放出 (coronal mass ejections, CMEs) に伴う惑星間空間衝撃波の地球近傍への到達時刻の予測システムを開発した。このシステムでは適合格子法を用いた3次元数値シミュレーションにより衝撃波伝播のモデリングを行っている。SOHO 衛星搭載のコロナグラフ (LASCO) による CME の観測情報が入ると、まずその CME が発生する前の背景太陽風の状態を得るためにシミュレーションを行う。その後、CME の初期状態のモデリングに必要な観測データ情報を入力し、CME とそれに伴う惑星間空間衝撃波の伝播の数値シミュレーションを実行する。このシミュレーションは衝撃波が地球から太陽方向に約 150 万 km 離れたラグランジュ (L 1) 点を通過するまで行われる。数値計算の実行開始やパラメータの入力は Web 上で行うことが出来、また CME と衝撃波のシミュレーションの可視化データ、衝撃波の到達時刻などの情報は自動的に Web 上に表示されるので、スーパーコンピュータの利用経験がなくてもこのシステムを利用することができる。従って例えば宇宙天気予報官自身が利用できる、有用なツールになることが期待される。ここではこのシステムの詳細について報告する。

We describe prediction system of the 1-AU arrival times of interplanetary shock waves associated with coronal mass ejections (CMEs). The system is based on modeling of the shock propagation using a three-dimensional adaptive mesh refinement (AMR) code. Once a CME is observed by LASCO/SOHO, firstly ambient solar wind is obtained by numerical simulation, which reproduces the solar wind parameters at that time observed by ACE spacecraft. Then we input the expansion speed and occurrence position data of that CME as initial conditions for a CME model, and 3D simulation of the CME and the shock propagation is performed until the shock wave passes the 1-AU. Web interface is available for input of the parameters, execution of simulation and output of the result, so a person who is not familiar with operation of computer or simulations or is not a researcher can use this system to predict the shock passage time. Simulated CME and shock evolution is visualized at the same time with simulation and snap shots appear on the web automatically, so that user can follow the propagation. This system is expected to be useful for forecasters of space weather. We will describe details of the system and simulation model.

[キーワード]

宇宙天気シミュレータ, 惑星間空間衝撃波, 3次元数値シミュレーション

Space weather simulator, Interplanetary shock wave, Three-dimensional numerical simulation

1 まえがき

太陽面現象の一つである CME は地磁気嵐や電離圏嵐、高エネルギー粒子の放出など地球の超高層大気や地球周辺的环境に大きな影響を及ぼすことが知られている。惑星間空間衝撃波は CME 伝播中に形成され、衝撃波後方にはフラックスロープ(本特集号 2-1-3 参照)を伴うことが多い。このフラックスロープが持つ強い南向きの磁場と地球磁気圏との相互作用により、地磁気嵐、電離圏嵐を引き起こす。さらに惑星間空間衝撃波は衝撃波加速により高エネルギー粒子を作り出す加速源ともなっており、衝撃波の通過と同時に高エネルギー粒子のフラックスのピークを迎えることが多い。このようなことから CME が起こす宇宙環境擾乱の発生の予測するためには、惑星間空間衝撃波の地球への到達時刻を事前に知ることが有効であることが分かる。

急速に発展しているスーパーコンピュータを用い、NICT では世界に先駆けて、物理法則に基づいた数値シミュレーションを活用した宇宙環境擾乱の予測システムを開発した^[1]。(本特集号 2-3-1、4-1-3 参照)本システムは CME の発生から惑星間空間衝撃波の伝播を 3 次元数値シミュレーションで再現し、衝撃波の到達時刻をシミュレーション結果から得て、CME 起因の宇宙環境擾乱の予測に用いるというものである。このシステムの特徴は三つあり、まず CME の伝播と、その背景太陽風の両方を数値シミュレーションにより求める点にある。CME の発生と背景太陽風の再現

には経験的なモデル(後述)を用いているが、時間発展の方程式を解くシミュレーションによるモデリングのため、伝播の途中経過を把握し、また CME と背景太陽風との相互作用を取り込むことが可能になった。二つ目は計算の実行は数時間から 4 分の 1 日程度で終わることから、CME 発生情報が入った後その擾乱が起こる数日前の間に結果が分り、CME による擾乱時期の予測が可能であることである。三つ目は、計算の実行、途中経過(衝撃波伝播の可視化)、結果の入手、観測との比較まで全て Web 経由で行うことができ、計算の実行以降は自動的に Web 上に表示されるので、スーパーコンピュータの使用経験は必要ない、ということがあげられる。

本稿ではこの予測システムについて詳しく報告する。

2 システム構成

図 1 は全体のシステム構成図である。SOHO 衛星搭載の LASCO による CME 発生の観測情報を得ると、まずその時点の太陽風(背景太陽風)の状態を得るために、L1 点にある ACE 衛星で観測されたその時の太陽風密度と速度のデータを入力する。また CME の初期条件として LASCO による CME の膨張速度と発生位置を入力する。その後 NICT のスーパーコンピュータに数値シミュレーションの実行開始のためのジョブを投入する。CME が太陽面から出て、衝撃波が形成され伝播して行く様子は一定時間ごとに可視化され、自動



図1 システム構成図

的に Web 上に現れる。衝撃波が L1 点を通過した時点でシミュレーションは自動的に終了する。その後、L1 点の通過時刻とその時の惑星間空間プラズマの密度と速度のシミュレーション結果が Web 上の表中に現れる。ここまでは計算の開始から 4 分の 1 日以内である。実際の衝撃波が到達するのは非常に速度の速い CME の場合で 1 日程度、通常は数日の場合が多いので、シミュレーション結果を予測として用いることが可能である。実際の衝撃波が到達し、ACE 衛星で観測されれば、その時の太陽風データを Web 上表に入力する。これら一連の入力操作は全て Web 経由で行うことができ、スーパーコンピュータについての経験や知識は必要ない。なお、ここでは衝撃波が L1 点に到達するまでの時間を求め、観測と比較しているが、衝撃波が地球磁気圏まで到達するには、L1 点からさらに 1 時間程度時間を要することに注意されたい。

3 シミュレーションモデル

ここでは本予測システムで用いているシミュレーションの手法と背景太陽風モデルおよび CME モデルについて述べる。

3.1 シミュレーション手法

本システムでは 3 次元流体方程式を用いてシミュレーションを行っている。惑星間空間磁場は特に南向きの場合に大きな地磁気擾乱を起こすことが知られており、CME による地球磁気圏での擾乱の規模などを予測するためには、磁場を入れた磁気流体方程式を解く必要がある。ここでは目的を CME に起因する擾乱の到達時期に限定しており、CME に伴う衝撃波の伝播速度でおおよそ予測が出来る。伝播速度は太陽面からある程度離れると、運動エネルギーが卓越し、磁場や熱エネルギーは無視できるようになる。太陽磁場の分布を双極子と仮定し、太陽表面で磁場の強さを 0.5 mT、太陽から $3R_s$ 離れた場所で膨張速度 800 km/s の CME が発生したとして、ここでの太陽風の密度と温度をそれぞれ 10^5 cm^{-3} 、1.6 MK としたとき、この場合の磁気圧力、熱圧力、ラム圧力はそれぞれ $4000 \mu\text{Pa}$ 、 $4 \mu\text{Pa}$ 、 $50 \mu\text{Pa}$ となつて、太陽近傍では磁気圧が優勢である。 $(3R_s)$ では

磁場強度は $19 \mu\text{T}$ しか $30 R_s$ では磁場強度、太陽風密度、温度、速度はそれぞれ 19 nT 、 250 cm^{-3} 、 0.3 MK 、 800 km/s と見積もると、磁気圧力、熱圧力、ラム圧力はそれぞれ 4 nPa 、 2 nPa 、 130 nPa となる。この時点で既にラム圧力が優勢となっており、これより外側は常にこの状態であることから、衝撃波の伝播時間の評価には流体近似でおおよそ良いことが分かる。

解く方程式は

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = \rho g \quad (2)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (e + P)u = \rho g \cdot u + (\gamma - 1)Q \quad (3)$$

で、ここで g と Q はそれぞれ重力と加熱項 [2]、 γ は比熱比で、

$$g = G \frac{M_s}{r^3} \mathbf{r},$$

$$Q = -\rho q_0 (T - T_0) \exp \left[-\frac{(r - R_s)^2}{\sigma_0^2} \right] \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{5}{3}$$

$$q_0 = 10^6 \text{ erg/g/s/K}$$

で与えられる。また M_s 、 R_s はそれぞれ太陽質量と太陽半径であり、 T_0 は CME 発生時の太陽風を再現するように決める。

シミュレーション手法は、フラックス部分は衝撃波捕獲スキームで TVD 法の一つである空間 3 次精度の Roe-MUSCL 法 [4] - [6] で、メッシュは適合格子 (Adaptive Mesh Refinement, AMR) 法の一つ Fully Threaded Tree (FTT) 法 [7] を用いている。これは物理量の変化に応じて自動的に格子を切りなおす手法で、衝撃波伝播のように、希薄な空間中に物質が局在し、その位置が時々刻々変わるような系に適している。この計算では、もっとも細かいメッシュは太陽面周辺でシミュレーション領域 1 辺の $1/4096$ であり、等間隔メッシュでは 4096^3 に相当する。シミュレーション領域は、

太陽を中心にして一辺 2.3 AU の 3 次元空間である。

3.2 背景太陽風モデル

太陽風は常時吹いているプラズマの流れだが、CME はこの上を伝播するため、CME の速度と太陽風速度の差が大きくない場合は、CME の伝播速度はこの背景太陽風の状態に依存する [3]。太陽コロナは定温に近く、比熱比で表すと 1 に近い。コロナ加熱の機構はまだ解明されておらず、ここでは 3.1 に示した (4) 式で加熱項 Q を導入し、ACE 衛星の太陽風密度と速度の観測データに合うようにパラメータ T_0 を決める手法を採用する。背景太陽風は常時変化していることから、CME が発生するたびに、その時点での ACE 衛星のデータから太陽風密度と速度を読みとり、背景太陽風を再現することからシミュレーションを始める。

3.3 CMEモデル

CME の発生機構は数々のモデルが提唱されている状況にあり、未だ解明されておらず、代表的な CME の物理モデルはまだない状況にある。ここでは文献 [8] で使われている幾何学的な CME モデルを参考にし、これまで衝撃波が来たときの ACE 衛星の太陽風のふるまいをおおよそ再現することが出来るパラメータを用いた CME モデルを採用した。それは下のような式で与えられる。

$$V(t, \xi) = V_{\max} A(\xi) B(t) \quad (5)$$

$$A(\xi) = \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\xi}{45^\circ}\right) \quad (6)$$

$$B(t) = \begin{cases} \frac{t}{0.1h} & (0 < t < 0.1h) \\ 1 & (0.1h < t < 0.2h) \\ \frac{1.2h - t}{1.0h} & (-.2h < t < 1.2h) \end{cases} \quad (7)$$

A が CME の形状を表しており、現在広がりは一固定している。また B が継続時間を表しており、ここでの数字は経験則に基づいて当てはめたものである。CME の形状や加速過程は事象毎に異なることが多く、上記のような単一のモデルを適用

することは大きな近似であり、本来適用範囲を検証する必要がある。これについては 5 においても触れる。

4 使用方法

ここではシステムの使用方法について述べる。使用者はシミュレーションの実行から結果の確認まで全て Web インターフェースで行うことができる。使用の手順は次の通りである。

- 1 入力データを観測画像およびデータから取得して、入力する
- 2 シミュレーションのためのジョブを開始する
(伝播経過観察)
- 3 ジョブ終了、計算結果の確認をして予報の判断材料にする
- 4 衝撃波到達後、結果評価画面に実際の衝撃波の観測データを入力する

1 ~ 4 は、シミュレーションの経験や大型計算機の使用経験は必要なく、可視化画面や結果も全て計算と同時進行で自動的に Web 画面に出力される。

図 2 はシミュレーションの入力データの Web 画面である。シミュレーションの入力データは、CME の発生日時 (YYYYMMDD HHMM) と発生場所、速度、および背景太陽風を再現するための CME 発生時の L1 点の太陽風速度と密度である。CME に関する情報は、LASCO の画像から得ることができ、また太陽風については ACE 衛星のリアルタイム太陽風データ(本特集号 4-1-3 参照)

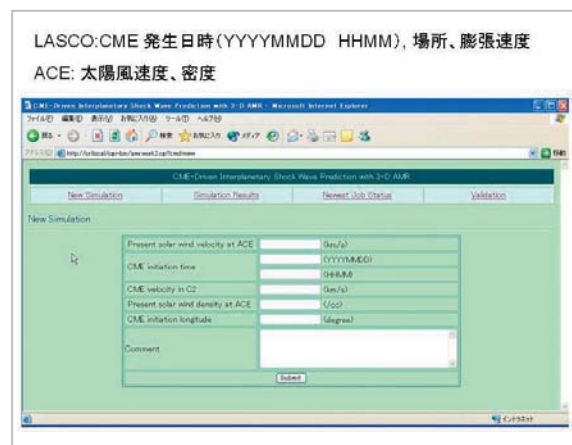


図2 入力画面

から読みとる。

図3は衝撃波伝播の経過が表示される画面である。太陽風速度のカラーコンターを北から見た2次元画像で、右下がCME発生時、左上が計算の終了時となっている。地球と太陽の位置は、それぞれの画面内の中央右側の白い点と、中央から左よりに位置するこい青色の中心(太陽風速度が0の点)である。リアルタイム可視化ライブラリRVSLIB(日本電気社製)を用いることにより、NICTのスーパーコンピュータSXシリーズでシミュレーションと同時に可視化処理が可能になっている。シミュレーション結果を可視化のために一旦ストレージに保存することなく、全てメモリ上で処理しているため高速であり、またI/Oにかかる時間とストレージの節約になっている。シミュレーションに要する時間は、日本電気社製スーパーコンピュータSX-61ノードを使用して4~7時間程度であり、現在のSX-8Rを1ノード使用した場合は、数時間内に計算は終了することが予想される。通常CMEが1日~数日かけて地球へ来るので、非常に高速なCMEでない限り、衝撃波の到達前に予測ができるシミュレーションモデルと考えてよい。

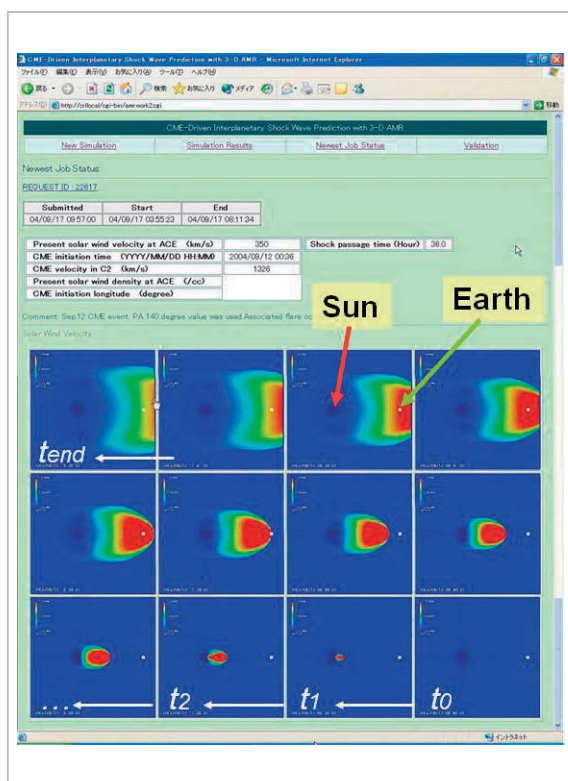


図3 衝撃波の伝播

図4は計算結果の画面である。ここには、シミュレーションのためのジョブ投入、シミュレーションの開始、終了、入力データの表、シミュレーション結果である衝撃波到達時刻が出てくる。また横軸を太陽-地球間の距離にとった、動径方向の太陽風速度の1次元プロット図が出る。この図も自動的に可視化されており、決まった時間間隔で更新される。この図で速度の時間発展を定量的に見ることができる。

図5は結果の評価画面である。ここでは、過去にシミュレーションを行ったイベントの情報を表にまとめてみることが出来る。実際に衝撃波が到達した日時は観測データから読みとって入力する。この情報はシミュレーション結果と観測を比較することにより、シミュレーションモデルの検証を行うことが出来、またデータを蓄積することにより解析に活用できるイベントリストが作成されることになる。

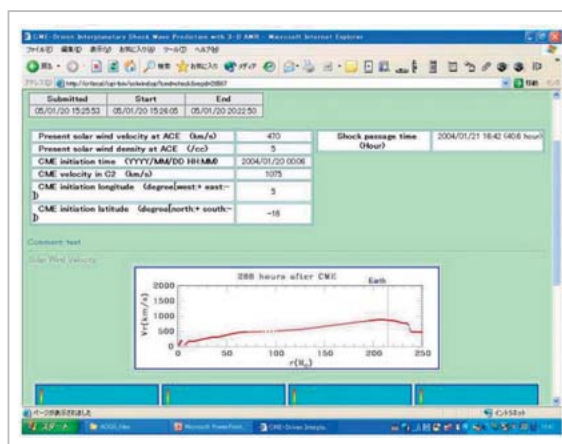


図4 シミュレーション結果

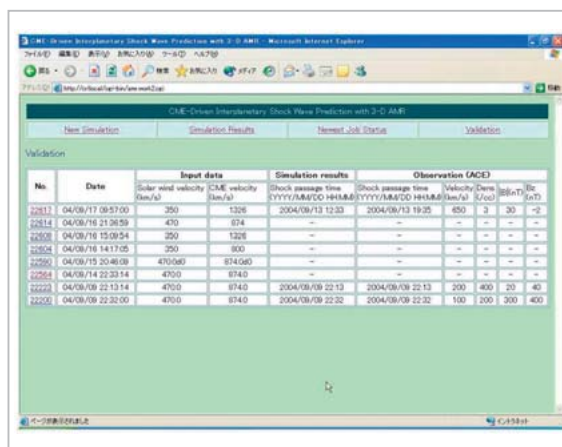


図5 結果の検証

5 モデルの検討

表1は7イベントについて行った計算結果と観測結果である[9]。右端の数字は、シミュレーション結果と実際の伝播時間の差の実際の伝播時間に対する割合をパーセントであらわしたものである。正符号は速く、負符号は遅く評価したことを意味しており、おおよそ2割以内に収まっている。観測と合わない要因として考えられるのは、単独のCME イベントではなかった(1、4、5番目)ことや、CMEと背景太陽風の速度差が大きくなかった(6番目)ことが考えられる。先の場合、直前に別のCMEが発生しており、そのCMEが背景太陽風に与えた影響が反映されていないことが考えられる。活動的な領域が太陽面にあるとき、複数のCMEが連発して相互作用する場面があるが、このモデルではCME発生前は静穏な太陽風を想定しているため、このような状況では適用が難しい。また、後者の場合は、CMEの速度自体が600 km/sとあまり速くなかったことから、背景太陽風の影響を強く受けるため、セクター構造やカレントシートの位置が再現出来るより正確な背景太陽風が必要となる。もっとも外れている4番目のイベントで約10時間遅くシミュレーションは予測しており、小さな時間差ではないが、予め2割程度のずれを想定していれば、予報の情報として活用は可能と思われる。

図6はあるCMEイベントのACE衛星軌道での太陽風密度(左)と速度(右)の時間発展である。横軸が時間であり、細かい振動があるのが観測データ、滑らかな曲線がシミュレーション結果である。密度、速度とも衝撃波面は時刻、物理量とも精度良く合っているが、衝撃波の後方が良くは

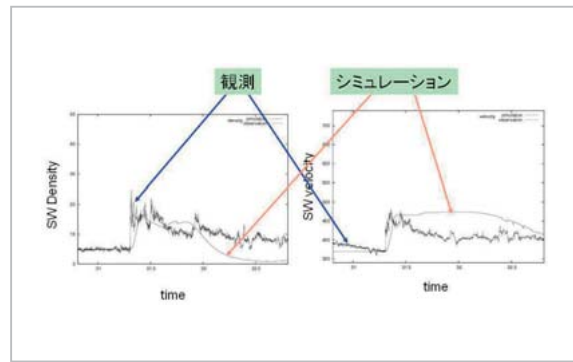


図6 シミュレーション結果と観測の比較

再現出来ていない。これらはフラックスロープなどのCMEの構造部分にあたっており、3.3の幾何学的なCMEモデルには考慮されていないため、そもそもここではモデリングの対象外である。衝撃波の後方部分はここでは直接的な予報対象ではないが、フラックスロープを伴う場合、大きな地磁気擾乱を起こすことが多い。CMEモデルのより精密化は今後の大きな課題と言える。

6 むすび

我々は、3次元数値シミュレーションを用いたCMEによる衝撃波到達予測システムを開発した。シミュレーション手法は、フラックス部分の差分スキームは衝撃波を安定に扱うことが出来るTVD法の一つRoe-MUSCL法を採用しており、またメッシュは物理量の変化に応じて精度を時々刻々切り替える適合格子(AMR)法を用いている。このシステムの特徴は、CME発生前の太陽風を再現し、その上にCME伝播を追うことにより、背景太陽風とCMEとの相互作用を取り入れていることにある。また、可視化処理が自動で行われ、入力データ、シミュレーションの開始、シミュレーション結果の確認が全てWebインターフェースにより行うため、使用者はシミュレーションや大型計算機の利用経験が不要である。さらにシミュレーションに要する時間は現在のNICTのスーパーコンピュータで数時間と予想され、実際のCMEによる衝撃波の到来より十分早く結果を得ることが出来るため、予報に活用することが可能である。

複数のCMEの相互作用など、このシステムの適用外の現象は、太陽活動が活発になると頻繁に

表1 シミュレーション結果の評価

No.	CME 発生日時	衝撃波到達時刻 (シミュレーション)	衝撃波到達時刻 (観測)	差
1	2001/01/20 21:54	01/23 10:06	01/23 02:31	-13%
2	2001/01/28 15:54	01/31 07:23	01/31 08:10	+1%
3	2001/08/25 16:50	08/27 19:19	08/27 22:30	+6%
4	2001/10/19 16:50	10/21 16:12	10/22 02:28	+22%
5	2001/10/25 15:26	10/28 02:42	10/28 01:59	-1%
6	2002/05/16 00:50	05/18 19:19	05/19 08:16	+19%
7	2004/01/20 00:06	01/22 01:04	01/22 02:03	+2%

起こる傾向にある。もっとも宇宙環境に注意が必要な、このような状況においても対応できるような衝撃波伝播のモデル開発が今後の重要な課題の一つである。

また採用しているモデルについては、より現実的な太陽風モデルと CME モデルを用いることがあげられる。具体的には、太陽風については磁場を入れて、セクター構造やカレントシートなどの太陽風構造を入れることが考えられる。カレント

シートに模した太陽風の中を衝撃波が伝播する研究を進めているが、カレントシートと衝撃波の位置関係によって到達時刻が大きく異なる結果が得られており、太陽風構造の精密化は伝播を決める重要な要因の一つであることが分かる [10]。CME モデルについては、物理的な CME モデルを入れることがあげられる。CME 発生機構の研究は現在発展途上であり、今後の進展が待たれる状況にある。

参考文献

- 1 M. Den, T. Tanaka, S. Fujita, T. Obara, H. Shimazu, H. Amo, Y. Hayashi, E. Nakano, Y. Seo, K. Suehiro, H. Takahara, and T. Takei, "Real-time Earth magnetosphere simulator with three-dimensional magnetohydrodynamic code", *Space Weather*, Vol.4, S06004, doi:10.1029/2004SW000100, 2006.
- 2 W. B. Manchester, T. I. Gombosi, I. Roussev, A. Ridley, D. I. De Zeeuw, I. V. Sokolov, K. G. Powell, and G. Toth, "Modeling a space weather event from the Sun to the Earth: CME generation and interplanetary propagation", *J. Geophys. Res.*, Vol.109, pA02107, 2004.
- 3 M. Tokumaru, M. Kojima, K. Fujiki, and A. Yokobe, "Three-dimensional propagation of interplanetary disturbances detected with radio scintillation measurements at 327 MHz", *J. Geophys. Res.*, Vol.105, No.A5, pp.10,435-10,453, 2000.
- 4 P. L. Roe, "Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference schemes", *J. Comp. Phys.*, Vol.43, pp.357-372, 1981.
- 5 B. van Leer, "Towards the ultimate conservative difference scheme, IV. a new approach to numerical convection", *J. Comp. Phys.*, Vol.23, pp.276-299, 1977.
- 6 B. van Leer, "Towards the ultimate conservative difference scheme, V. a second-order sequel to Godunov's method", *J. Comp. Phys.*, Vol.32, pp.101-136, 1979.
- 7 A. M. Khokhlov, "Fully threaded tree algorithms for adaptive refinement fluid dynamics simulations", *J. Comp. Phys.*, Vol.143, pp.519-543, 1998.
- 8 D. Odstrcil and V. J. Pizzo, "Three-dimensional propagation of coronal mass ejections (CMEs) in a structured solar wind flow 2. CME launched adjacent to the streamer belt", *J. Geophys. Res.*, Vol.104, pp.483-492, 1999.
- 9 T. Ogawa, M. Den, T. Tanaka, and K. Yamashita, "Simulation of Interplanetary Shock Wave Caused by CME on August 25 2001", *Adv. in Geosciences*, No.2, pp.65-71, 2006.
- 10 T. Ogawa, M. Den, T. Tanaka, K. Sugihara, T. Takei, H. Amo, S. Watari, and K. Yamashita, "Testing model for prediction system of 1-AU arrival time of CME-associated interplanetary shocks", in paper number PSW1-0022-08 presented in COSPAR 2008.



田 光江

電磁波計測研究センター宇宙環境計測
グループ主任研究員 理学博士
宇宙物理

小川 智也

北里大学一般教育部情報科学講師
博士(理学)
宇宙物理



田中 高史

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



筈 慎一

電磁波計測研究センター宇宙環境計測
グループ研究マネージャー 博士(理学)
太陽地球系物理学、宇宙天気

天羽 宏嘉

日本電気株式会社 博士(理学)
情報工学

杉原 光太

日本電気株式会社 博士(理学)
情報工学

武井 利文

日本電気株式会社 博士(理学)
情報工学