

2-2-3 磁気圏シミュレーションによる静止軌道 プラズマ環境変動の予測

2-2-3 Prediction of the Plasma Environment in the Geostationary Orbit Using the Magnetosphere Simulation

中村雅夫

NAKAMURA Masao

要旨

静止軌道の人工衛星は、通信・放送・気象観測などに用いられ重要な社会インフラとなっており、周囲のプラズマ環境との相互作用による帯電とそれに伴う放電とによって衛星に障害がおこると、大きな社会的損失につながる。そのため静止軌道のプラズマ環境変動を予測することは、宇宙天気において重要な課題となっている。ここでは、衛星帯電を引き起こす静止軌道のプラズマ環境について簡単に説明し、磁気圏モデルを用いた計算機シミュレーションによるプラズマ環境の変動の予測研究について述べる。

The geostationary orbit satellites are used for communication, broadcasting, meteorological observation, etc. and have become important social infrastructures. Since the interaction between the satellites and the plasma environment sometimes induces charging and electrostatic discharging, which cause satellite anomalies, the prediction of the plasma environment in the geostationary orbit is an important subject of space weather. We briefly describe the plasma environments inducing satellite charging and introduce the study of the prediction of the plasma environment in the geostationary orbit using the magnetosphere simulation.

[キーワード]

磁気圏シミュレーション, 磁気圏サブストーム, 静止軌道衛星, 衛星帯電
Magnetosphere simulation, Magnetospheric substorm, Geostationary orbit satellite, Satellite charging

1 はじめに

地球周辺の宇宙プラズマ環境は、太陽表面でおこる様々な活動に連動して大きく変動し、時として衛星に障害を引き起こすことが知られている。衛星障害を引き起こす宇宙プラズマ環境には、静電作用により衛星帯電を引き起こす数～数百 keV (キロ電子ボルト) のエネルギーの宇宙プラズマ環境と、宇宙放射線環境とも呼ばれる、半導体素子などに電離作用により障害を与える数百 keV 以上の高エネルギーの宇宙プラズマ環境とがある。軌道上の衛星障害の約半分は、前者の宇宙プラズマ環境による衛星帯電に起因する障害であり、後者の放射線環境によるものを含めると約 8 割が宇

宙プラズマ環境によるものと報告されている^{[1][2]}。ここでは、前者の宇宙プラズマ環境について取り上げる。特に、静止軌道では衛星表面の帯電が起こりやすいため、静止軌道のプラズマ環境変動を予測することは、宇宙天気において重要な課題である。

2 静止軌道プラズマ環境と衛星帯電

2.1 宇宙プラズマ環境

太陽からは太陽風と呼ばれる、磁場を含んだ超音速のプラズマ流が放出されている。この太陽風と地球の固有磁場がつくる磁気圏との相互作用により、地球周辺の宇宙プラズマ環境は大きく変動

する。太陽風の密度や速度、磁場の向きや強さなどの諸条件により、太陽風のエネルギーとプラズマの一部が、磁気圏境界を通して磁気圏内に進入し、磁気圏尾部に蓄えられる。この蓄えられたエネルギーが急激に開放される過程で、磁気圏尾部のプラズマが加速・加熱されながら静止軌道を含む内部磁気圏に輸送される現象がおこる。この急激なエネルギー開放をとまなう現象は、磁気圏サブストームと呼ばれる。このとき、静止軌道では、尾部から輸送された高温のプラズマの進入(プラズマ・インジェクション)により、衛星帯電が引き起こされる。

2.2 衛星帯電と障害

衛星各部には、宇宙プラズマ中のイオンと電子の衝突や光電子と2次電子放出などの荷電粒子の流入により電荷が蓄積され、宇宙空間に対して電位が発生する。これを衛星帯電と呼ぶ。衛星帯電を表す電位には、基準の取り方により2種類ある。まず、無限遠の宇宙空間の電位をゼロとした衛星(通常は構体)の電位を衛星電位と呼び、この帯電を絶対帯電という。次に、衛星表面もしくは内部に衛星構体にアースされていない導体や誘電体があると、その部位と衛星構体との間で電位差が発生する。この電位差を乖離電位と呼ぶ。また、帯電が起こる場所により、表面帯電と内部帯電の2つに分類される。

衛星表面の絶対帯電は、周辺のプラズマからイオンが流入することによるイオン電流と、電子が流入することによる電子電流、太陽光が当たる面から光電子が放出されることによる光電子電流、プラズマ粒子が衛星に衝突することで発生する2次電子放出による2次電子電流、および後方散乱電子電流が流出入する。これら衛星表面への電流の総和と、衛星の宇宙空間に対する静電容量により衛星電位が決まる。電子はイオンに比べて非常に軽いため、衛星への電流は電子電流が支配的になる。また、2次電子電流と後方散乱電子電流は、一般に、電子電流よりずっと小さいため無視できる。通常、光電子電流は電子電流より大きく、また光電子は数eV程度の低いエネルギーしか持たないため、衛星電位は周辺のプラズマに対して数V(ボルト)の電位しかもたない。しかし、衛星が地球の影(蝕)に入り光電子放出が無くなったり、磁

気圏サブストームにより周囲に高温の電子が増えることにより電子電流の増大が起こったりすると、衛星へ流れ込む電流の総和が大きな負の値になり、時としてマイナス1万Vにもおよぶ衛星電位が引き起こされる[3][4]。しかし、衛星の宇宙空間に対する静電容量は小さいため、絶対帯電で蓄積される電荷の量はたいしたことはなく、衛星にとってはそれほど危険ではないと考えられている。一方、表面に衛星構体にアースされていない導体や誘電体が存在した場合、それらは衛星に対して静電容量を持つコンデンサーとして働き、絶対帯電が起こっている間に、衛星構体との間で乖離電位が発達する。これらの静電容量は、場所により衛星構体の宇宙空間に対する静電容量より大きく、多くの電荷が蓄積される。この蓄積された電荷が衛星構体へと急激に放電されることで、絶縁体破壊や素材の溶解・気化など物理的損傷や電磁ノイズなどが発生し、衛星に障害を引き起こすことがある。これら衛星表面電位の発達には、衛星電位で反射されたり、逆に衛星表面を通り抜けたりしない、数keVから十数keVのエネルギーの電子が寄与している。

内部帯電は、衛星内部にあるアースされていない導体や電子基盤やケーブルの皮膜などの誘電体に電荷が蓄積されることにより起こる帯電である。プラズマ粒子は、様々な方向から衛星表面部位を通過して衛星内部に到達するため、その帯電過程は複雑であるが、主として百keV程度のエネルギーの電子が寄与していると考えられている。内部帯電でも、蓄積された電荷の放電により、絶縁体破壊による回路や基盤の損傷や電磁ノイズなどが発生し、衛星に障害を引き起こすことがある。

2.3 宇宙天気

宇宙天気とは、宇宙環境変動それ自身および地上で起こる宇宙環境起源の諸現象を予報するものである。その中でも、磁気圏サブストームや磁気嵐の予報は、宇宙プラズマ環境に起因する衛星障害の予防に役立てることができる。つまり、宇宙プラズマ環境の悪化を事前に予測できれば、その間、衛星の姿勢変更などのミッションクリティカルな運用の制限することで重篤な衛星障害の発生を予防することができ、もし障害が発生しても迅速に原因の特定と対処を行なうことができるよう

になる。

3 磁気圏シミュレーションとプラズマ環境予測

3.1 リアルタイム磁気圏シミュレーション

情報通信研究機構では、3次元の電磁流体(Magneto-HydroDynamics:MHD)計算手法を用いてリアルタイムで磁気圏シミュレーションがおこなわれている[5][6]。そのシステムの概要を図1に示す。ACE(Advanced Composition Explorer)衛星は、地球から太陽方向に約150万km離れた太陽と地球の引力がつりあうラグランジュ第1点にあり、太陽風の観測データを地球にリアルタイムに送っている。ACE衛星から送られた太陽風の密度、温度、速度、磁場を逐次入力パラメータとして、スーパーコンピュータを用いて磁気圏シミュレーションがリアルタイムでおこなわれている。太陽風は平均すると約400km/sの速度を持ち、ACE衛星の位置を通過した太陽風は、約1時間後に地球磁気圏に到達する。したがって、計算結果は、約1時間後の磁気圏の状態を予測していることになる。この計算結果は、リアルタイ

ムにインターネット上に公開されている。

3.2 計算手法と計算結果

磁気圏シミュレーションでは、MHD計算手法が用いられている。この計算手法は、イオンと電子から成るプラズマを1流体と近似して解く方法で、実質的に、プラズマの質量の大部分を担っているイオンの流体的運動を高速に計算することができる。図2に、2006年2月15日09:28UTの計算結果を示す。磁気圏尾部に磁力線のループ構造が発生し、その中にプラズマの圧力が高い領域が見られる。これはプラズモイドと呼ばれ、磁気圏尾部方向に放出される。プラズモイドの発生と同時に、反対(地球)方向の流れが生じ、内部磁気圏領域のプラズマ圧力を上昇させる。これがプラズマ・インジェクションに相当し、計算結果が磁気圏サブストームの発生を定性的に再現していることを示している。この図は約1分毎に更新され、1日毎に動画としてアーカイブされている。

このように、MHD計算は、リアルタイムで磁気圏をシミュレーションすることを可能にしたが、プラズマを流体近似したため、プラズマの粒子的性質を取り扱えず、粒子効果による加熱・加

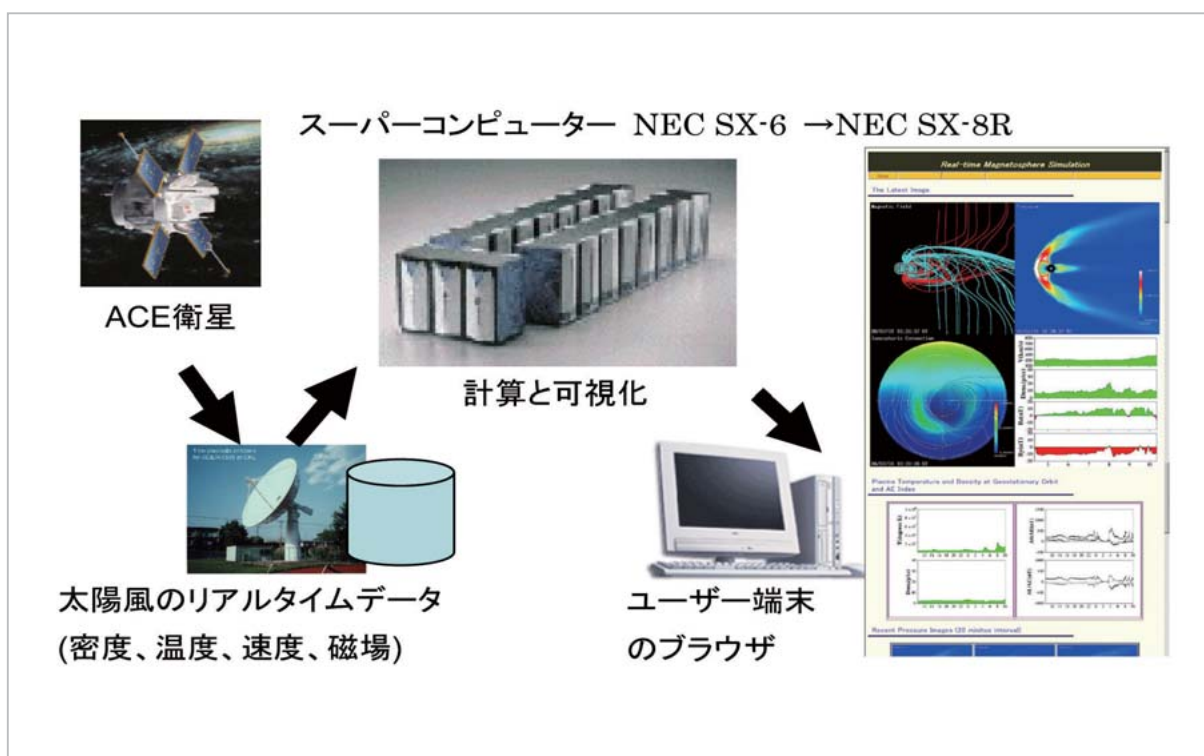


図1 情報通信研究機構のリアルタイム磁気圏シミュレーションシステムの概要

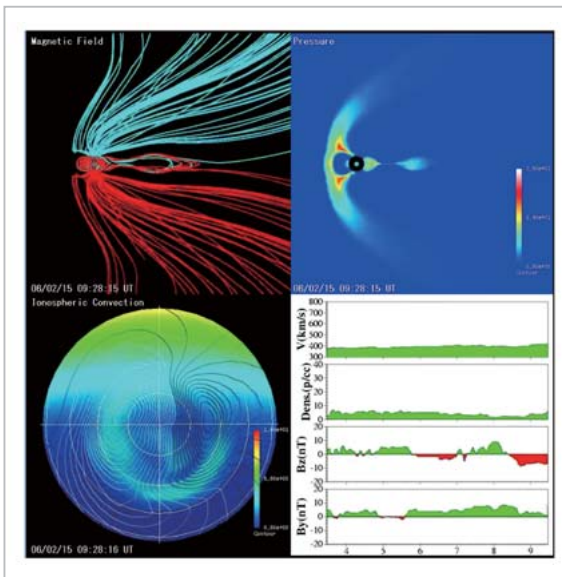


図2 2006年2月15日09:28 UTのリアルタイム磁気圏シミュレーションから得られた、磁力線(左上)、子午面内のプラズマ圧力分布(右上)、極域電離層の等電位線と電気伝導度分布(左下)、および計算に用いた直前6時間の太陽風データ(右下)

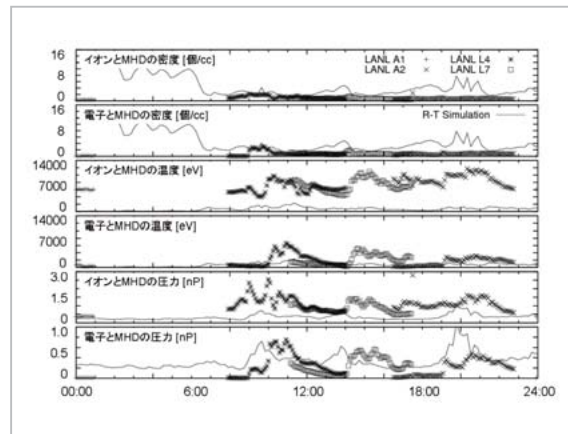


図3 上から、2006年2月15日に4機のLANL 静止軌道衛星(A2, A1, L4, L7)が観測した夜側(MLT: 21時~3時)のイオンと電子の各密度・温度、圧力の5分平均値を衛星毎に表示し、磁気圏シミュレーションの静止軌道の真夜中位置で得られた密度、温度、圧力を線で重ねて示した。計算結果の圧力上昇は、観測に比べ太陽風の到達時間(約1時間)だけ前にずれている

速や内部磁気圏の強磁場領域におけるドリフト運動などが正しく取り扱えない。また、衛星表面帯電に寄与する静止軌道プラズマ環境では、数~数十 keV の電子が重要であることがわかっているが、MHD 計算では実質的にイオン流体運動だけを取り扱っているという問題がある[7]。

3.3 観測との比較研究

計算結果と観測とを比較するため、Los Alamos National Laboratory (LANL) の静止軌道衛星に搭載された Magnetospheric Plasma Analyzer (MPA) の Key Parameter として公開されている、イオン密度 (0.13-45 keV/e) と電子密度 (0.03-45 keV/q) とそれぞれの温度 (磁場に平行成分と垂直成分の平均値) を5分平均した値を用いた。図3に、2006年2月15日の計算結果と観測データを示す。ただし、磁気圏サブストームによるプラズマ・インジェクションに着目しているため、静止軌道の真夜中位置での計算結果と磁気地方時 (MLT) で 21~3 時の夜側の観測結果とを示した。この日、観測と計算結果の両方で圧力上昇が3回見られた。計算結果が約1時間後の磁気圏を計算していることを考慮すると、プラズマ・インジェクションの

発生タイミングを1時間前に予測していることがわかる。しかし図より、イオンについては、密度・温度・圧力観測と計算結果は定量的に合わないことがわかる。一方、電子の圧力変動に着目すると、計算結果と観測が定量的に比較的良く合っていることがわかる[8]。このことは、電子はプラズマ・インジェクションの過程で磁気圏尾部から流体的な断熱過程による圧力上昇を受けることから、電磁流体計算から得られる圧力変動と定量的に良く合致したと推測される。しかし、電子の密度と温度については定量的な合致は見られず、計算結果で得られる密度は、ほとんどの場合、観測よりかなり大きな値となっている。衛星帯電には電子温度が大きく寄与しているため、観測統計から電子密度を推定し、その値と圧力の計算値とから温度を推定した結果を観測で得られた電子温度と比較した。その結果、温度上昇のタイミングや観測での温度上昇値が、電子圧力より良い推定になることがわかった[9]。この方法で求めた電子温度の推定値と観測で得られた電子温度とを、2006年1月~4月の期間で比較したものを図4に示す。ほぼ全ての点が、図中の線(電子温度の推定値=観測された電子温度)より下に分布している。

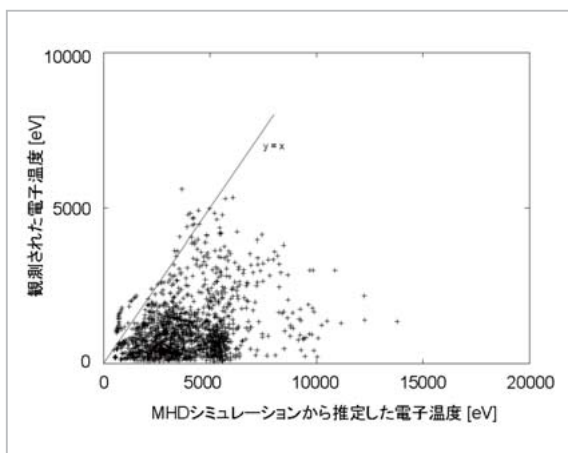


図4 2006年1月～4月の磁気圏シミュレーションで得られた圧力から電子密度を0.5個/ccと仮定して推定した電子温度と、1時間後に観測された電子温度の分散図

つまり、この線は観測される電子温度の上限値を示している。ただし、推定した温度は、多くの場合電子温度を過大に推定していることがわかる。これは、計算では、磁気圏が荒れた状態が観測より長く続く傾向があること、静穏時でも計算の数値ノイズにより圧力のベースラインが上がっていると考えられる期間があること、また、電子温度や圧力の上昇は、実際には局所的な現象で、静止軌道上での電子温度の最大値が必ずしも衛星で観測されているわけではないことなどが原因と考えられるが、さらなる解析と検証が必要である。

3.4 衛星帯電予測

この電子温度の推定値を用いて、衛星電位の最悪値を予測することができる。衛星の電位の計算には過去の研究で得られた、プラズマ環境と静止軌道衛星きく8号(ETS-VIII)の電位および乖離電圧の対応表を用いた[10]。ただし、衛星電位を求めるためには、電子温度の他に、電子密度とイオンの温度と密度が必要である。ここでは電子密度と同様に、イオンの温度と密度も、観測の統計値を用いて推定をおこなった。その結果得られた静止軌道衛星 ETS-VIII の乖離電圧と衛星電位の最悪値の推定値を図5に示す[11]。この図から衛星帯電の発生が、約1時間前に予測できていることがわかる。ただし、電位の値は、LANL衛星で計測された衛星電位と異なっている。これは、衛星に

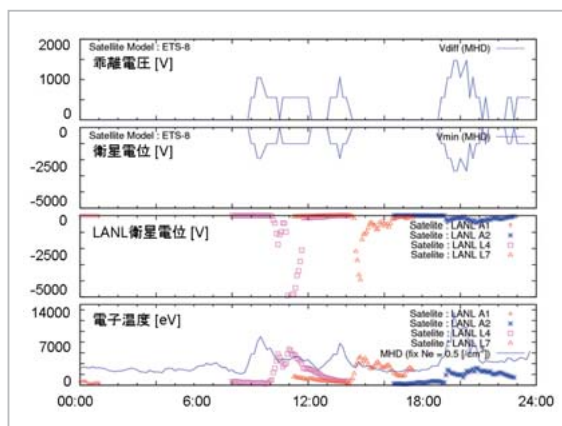


図5 上から、2006年2月15日の静止軌道衛星きく8号(ETS-VIII)の乖離電圧の推定値、衛星電位の推定値、4機のLANL静止軌道衛星(A2, A1, L4, L7)が夜側(MLT: 21時～3時)で計測した衛星電位、電子温度の推定値と観測値

よる宇宙プラズマ環境との相互作用の違いや、推定に用いたモデルの精度が不十分なことなどが原因と考えられる。

4 まとめ

静止軌道衛星は、現代社会において重要なインフラとなっており、その障害を引き起こすプラズマ環境変動の予測は、宇宙天気研究の重要な課題である。ここでは、情報通信研究機構のリアルタイム磁気圏シミュレーションの結果を用いて、静止軌道プラズマ環境変動、特に衛星帯電に最も影響のある電子温度の上限値を推定する手法を示した。この成果を、プラズマ環境と衛星電位の関係を別途計算した結果と組み合わせることで、静止軌道衛星電位の最悪値が予測できるようになる。これらをリアルタイム磁気圏シミュレーションのリアルタイム出力と組み合わせることで、衛星帯電警報システムを構築し、衛星運用者に情報を提供できるようになる。ただし、現在のリアルタイム磁気圏シミュレーションでは、多くの孤立した磁気圏サブストームに対してシミュレーションの圧力上昇値と電子圧力の観測値が比較的一致する一方で、磁気圏が荒れた状態が続くような期間や計算の数値ノイズにより圧力のベースラインが上がっていると考えられる期間などでは、シミュレーションの圧力が電子圧力の観測値より大きく

なり、その結果電子温度を過大に推定してしまう。そのため現状では、電子温度の上限値を推定するに留まっている。しかし、この問題は、計算精度を高めた次世代のリアルタイム磁気圏シミュレーションにより解消されていくことが期待され、静

止軌道プラズマ環境の予測精度が高まることで、電子温度や衛星電位を、上限値や最悪値ではなく、直接推定することが可能になっていくものと考えている。

参考文献

- 1 Koons, H. C. et al., "The Impact of the Space Environment on Space Systems", Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Conference., pp.7-11, 1998.
- 2 五家建夫, 宇宙環境リスク事典, 丸善, 2006.
- 3 Hastings, D. E. and Garrett, H., "Spacecraft Environment Interactions," Cambridge University Press, New York, 1996.
- 4 恩藤忠典, 丸橋克英, 編, 宇宙環境科学(ウェーブサミット講座), 2000.
- 5 Tanaka, T.; "Finite Volume TVD Scheme on an unstructured Grid System for Three-Dimensional MHD Simulations of Inhomogeneous Systems Including Strong Background Potential Fields", J. Comput. Phys., Vol.111, pp.381-389, 1994.
- 6 Den, M. et al.; "Real-Time Earth's Magnetosphere Simulator with 3-Dimensional MHD Code", Space Weather, Vol.4, S06004, doi:10.1029/2004SW000100, 2006.
- 7 藤田茂, "磁気圏MHDシミュレーションとその宇宙天気業務応用の展望", 情報通信研究機構季報, 本特集号, 2-3-4, 2009.
- 8 中村雅夫, 他, "磁気圏シミュレーションを用いた静止軌道プラズマ環境予報", 第3回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集, JAXA-SP-06-035, 2006.
- 9 中村雅夫, 他, "磁気圏シミュレーションを用いた静止軌道環境予測: 観測との統計解析", 第5回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集, JAXA-SP-08-018, 2008.
- 10 Cho, M., S. Kawakita, M. S. Nakamura, M. Takahashi, T. Sato, Y. Nozaki; Number of arcs estimated on solar array of a geostationary satellite, J. Spacecraft and Rockets, Vol.42, pp.740-748, 2005.
- 11 中村雅夫, 他, "リアルタイム磁気圏シミュレーションを用いた静止軌道衛星表面帯電予測", 第6回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集, JAXA-SP-09-006, 2009.

なかむらまさお
中村雅夫

大阪府立大学大学院工学研究科准教授
博士(理学)
宇宙プラズマ物理、宇宙環境工学