

## コード間結合フレームワークに基づく宇宙環境変動－衛星帯電現象連成解析プラットフォームの開発

#三宅 洋平<sup>1)</sup>, 砂田 洋平<sup>1)</sup>, 田中 唯逸<sup>1)</sup>, 深沢 圭一郎<sup>2)</sup>, 南里 豪志<sup>3)</sup>, 加藤 雄人<sup>4)</sup>

<sup>(1)</sup> 神戸大学大学院システム情報学研究科, <sup>(2)</sup> 京都大学学術情報メディアセンター, <sup>(3)</sup> 九州大学情報基盤研究開発センター, <sup>(4)</sup> 東北大学大学院理学研究科

### Development of the Space-Weather-Aware Satellite Charging Analysis Platform based on the Numerical Code Coupling Framework

#Yohei Miyake<sup>1)</sup>, Youhei Sunada<sup>1)</sup>, Yuito Tanaka<sup>1)</sup>, Keiichiro Fukazawa<sup>2)</sup>, Takeshi Nanri<sup>3)</sup>, Yuto Katoh<sup>4)</sup>

<sup>(1)</sup> Graduate School of System Informatics, Kobe University, <sup>(2)</sup> Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University, <sup>(3)</sup> Research Institute for Information Technology, Kyushu University, <sup>(4)</sup> Graduate School of Science, Tohoku University

The assessment of spacecraft charging is one of the important technical elements of space weather forecasting system. Numerical simulations based on the particle-in-cell (PIC) method are widely used for quantitative analysis of spacecraft charging processes in space environment. Due to the high computational cost for advancing the motions of a large number of plasma particles, the method allows us to simulate only phenomena of very limited temporal and spatial scales within practical computation time. This feature makes it difficult to analyze temporal evolution of a spacecraft potential in space environment that changes dynamically.

In this study, we develop a simulation platform that couples the dynamics of the Earth's magnetosphere and satellite charging simulations. The platform enables us to assess a spacecraft potential evolution in a longer time period, which can cover space environmental variations associated with space weather events. Specifically, the Earth's magnetosphere environment during space weather events is simulated by means of a global MHD simulation, and the obtained time-series data of environmental parameters will be served as an input for the spacecraft charging analysis. One of major difficulties of such coupled analysis is the large difference in temporal scales between the magnetospheric dynamics and spacecraft charging phenomena. To address the issue, we have decided to avoid coupling the MHD and PIC computations directly. Instead of PIC simulations, a single/multiple set of ordinary differential equations representing the potential evolutions of individual satellite elements are coupled with the MHD calculations, which allows us for long-time spacecraft charging predictions. The plasma currents, which are source terms of the differential equations, are evaluated based on an analytical model or current-voltage (I-V) characteristic database prepared for each satellite. Such I-V database are constructed in prior to the coupled analysis by performing a large (but manageable) number of small-scale plasma particle simulations.

From an information science perspective, we utilize in-house code-to-code coupling framework named CoToCoA (Code-To-Code Adapter) for coupling the MHD and spacecraft charging calculations. Based on the framework, the coupled analysis can be executed as a single MPI parallel program that encompass the above model calculations as its subcomponents. It is expected that the approach enables us for efficient use of modern supercomputers. The paper focuses on design details of the developed platform and their validity in terms of a coupled physical model involving different temporal and spatial scales.

宇宙環境変動に対する衛星帯電の予測評価は、宇宙天気予報における重要な技術要素の一つである。衛星帯電過程の定量的解析には、粒子 (PIC) 法に基づく数値シミュレーションが広く用いられる。PIC 法はその計算コストの大きさにより、現実的に利用可能な計算資源では非常に限られた時間的・空間的スケールの現象しかシミュレーションできない。このため、動的に変化する宇宙環境における長期の衛星電位時間発展を解析することは困難である。

本研究では、地球磁気圏ダイナミクスと衛星帯電シミュレーションを連成させたシミュレーションプラットフォームを開発する。当プラットフォームは、宇宙天気現象に伴う宇宙環境変動を包摂したより長期の衛星電位時間発展を評価することを目的に開発されている。じょう乱時の地球磁気圏環境をグローバル MHD シミュレーションによって再現し、得られた環境パラメータの時系列データを衛星帯電解析の入力とする。このような連成解析の大きな困難の一つは、磁気圏ダイナミクスと宇宙機帯電現象の時間スケールが大きく異なることである。この問題に対処するため PIC 計算の代替として、個々の衛星要素の電位時間発展を記述する常微分方程式の単一/複数セットを MHD 計算と連成させ、長時間の衛星帯電予測を行う。微分方程式のソース項であるプラズマ電流は、各衛星要素に対応した準解析解もしくは事前に作成した電流電圧特性データベースに基づいて評価される。

本研究では MHD シミュレーションと衛星帯電計算を結合するために、著者らが独自に開発を行ったコード間結合フレームワーク CoToCoA (Code-To-Code Adapter) を用いる。当該連成フレームワークにおいては、MHD および衛星帯電計算をサブコンポーネントとして包含する単一の MPI 並列プログラムとして実行される。当アプローチにより、開発

された連成数値予測モデルを最新のスーパーコンピュータに容易に適合させることが可能となる。本論文では、開発したプラットフォームの設計の詳細と、異なる時空間スケールを含む連成物理モデルの効率性の観点について議論を行う。