

宇宙飛翔体環境の数値シミュレーションに関する国内外動向報告

「SPINE ワークショップ報告」と 「宇宙環境シミュレータプロジェクトの概要と進捗状況」

岡田 雅樹 (国立極地研究所)、臼井 英之 (京都大学 RASC)

1. まえがき

宇宙飛翔体環境研究において、数値シミュレーションに寄せられる期待は大きなものがある。一方、宇宙機による観測、計測という in-situ データの蓄積や実験室における着実な成果に比べ、数値シミュレーションの技術は依然として計算機能力、ソフトウェア等の開発において、一步遅れており一層の研究努力が必要と思われる。海外においても同様の状況が続く一方、欧州 ESA においては Spacecraft-Plasma Interaction Network in Europe (SPINE) と呼ばれるシミュレーションプロジェクトが進行し、米国 NASA によって実用化されている NASCAP に対抗するソフトウェアの開発が行われている。

日本においても、世界最速のスーパーコンピュータである地球シミュレータを利用したプロジェクト「宇宙環境シミュレータ」(代表: 大村善治京都大学教授) が、平成 14 年度から開始し、NASCAP や SPINE 以上に詳細な飛翔体プラズマ環境を再現することが可能なシミュレーションコードの開発をすすめている。

これら内外のプロジェクトの進捗状況について報告を行う。

2. SPINE ワークショップ

2003 年 9 月 16、17 日の二日間オランダ (ESTEC) において、第 5 回 SPINE ワークショップが開催された (文献 1)。現在、ESA において、宇宙飛翔体と宇宙プラズマ環境の相互作用に関する衛星ミッションおよび実験グループ相互の情報交換の場として SPINE(Spacecraft-Plasma Interaction

Network in Europe) が組織されている。その中のプロジェクトの一つとして、ONERA (フランス) を中心として飛翔体の帯電解析を行う Spacecraft Plasma Interaction System (SPIS) という数値解析システム開発プロジェクトが進行しており、ソフトウェア開発の進捗報告の場、および衛星ミッションおよび実験グループからソフトウェア開発チームへのフィードバックの場としてワークショップが定期的に開催されている。

具体的な衛星プロジェクトチームからの要求をまとめ、ソフトウェアに求められる仕様を決定する作業を行う段階を経て、ソフトウェアの開発を進めている。

第5回SPINE (Spacecraft-Plasma Interactions Network in Europe) ワークショップ参加報告 (2003年9月16、17日、ESTEC、オランダ)

SPINE (Spacecraft-Plasma Interactions Network in Europe)

ESTECを中心に宇宙飛翔体環境に関する解析チーム

- ・ PI: Alain Hilgers (ESTEC)
- ・ 飛翔体表面材質特性データベース
- ・ 数値モデリング、シミュレーション
- ・ 帯電基準などの標準値提言
- ・ 米国のSEE (Marshall, NASA, Air force lab.) に対抗
- ・ ヨーロッパの宇宙産業からの要請

SPIS (Spacecraft-Plasma Interactions modeling Software) の構築

宇宙飛翔体と周辺プラズマとの相互作用の定量解析用ソフトウェアの構築

- ・ PIはフランスONERAのJ-F. Roussel
- ・ アメリカ (NASA, Air force lab. 系) のNASCAP (帯電解析ソフト) に対抗
- ・ エンジニア側からの要求 (形状、材質)、サイエンスデータへの応用
- ・ 定常状態を重視 (早い計算収束を望む。)
- ・ PICモデルの採用 (プラズマ運動論的効果、でも粒子数小)
- ・ オブジェクト指向プログラミング (JAVA)
- ・ 非構造格子 (pre- post-とも)

図 1 SPINE プロジェクトの目標

SPINE の主な目標は、図 1 に示したように具体的な衛星ミッションに応用可能なシミュレーションソフトウェアを開発することである。飛翔体表面材料特性や形状データを正確に再現することを重視しており、飛翔体の帯電現象を迅速に数値実験で再現できるような環境を構築し

ている。エンジニアリング的に操作性を向上させ、かつソフトウェアの開発を迅速に行うため JAVA を採用するなど、情報技術的にも先進的といえる。

今回のワークショップでは、ミッション側からの要望を具体的にソフトウェアに反映させることが目的であり、ミッション側からの要望レベルは、非常に高く、単に飛翔体帯電の静電解析のレベルにとどまらず、背景プラズマの数値的取扱いにハイブリッドコードあるいはブラゾフ近似が必要となるようなケースも見受けられた。

今後、これらの具体的かつ複雑なミッションニーズをどのように SPIS ソフトウェアに反映させるか、興味深い。

3. NASCAP による飛翔体環境研究

米国は、航空宇宙局 (NASA) によって開発された NASA Charging Analyzer Program (NASCAP) が実用化されており、多くの衛星プロジェクトにおいて実績を上げている。(文献 3)

わが国においても、中村ら(文献 4)によって NASCAP を使用した帯電解析が ETS-8 について行われており、衛星における放電の発生確率に関する計算が試みられ、第 9 回宇宙機帯電技術会議において発表された。

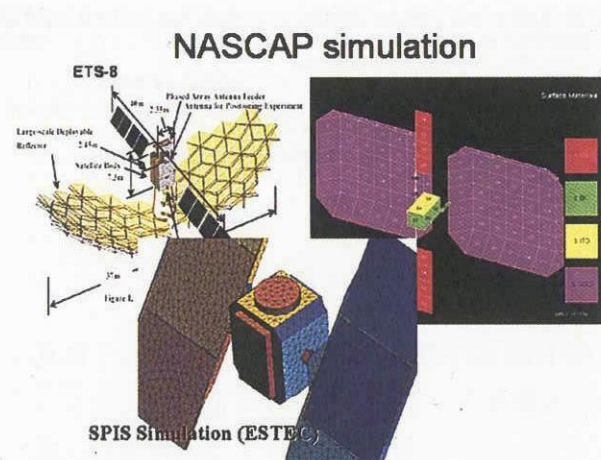


図 2 NASCAP による ETS-8 の帯電解析 (中村ら) と SPIS によるサンプルモデル

NASCAP は、1980 年台から使用されているソフトウェアで実績がある一方、最新版 NASCAP-2000 は米国外への輸出規制対象品であるため、日本では使用することができない。上記、研究も旧版 NASCAP を使用したものである。

NASCAP の特徴は、豊富な表面材料データベースと、これまでの帯電解析の実績にある。計算手法等の詳細は明らかではないが、宇宙機上での観測を説明する上において重要と思われる機能を網羅している点が高く評価されている。一方、相反して外部利用者にとってはアルゴリズムの不明確な点も多く、数値シミュレーションの適用範囲を明確にすることが必要である。また、ソフトウェアが古いこともあり入出力インターフェースひとつをとってみても、歴史を感じさせることは否めない。その点、前出の SPINE に比べると GUI の違いが今後の開発工程の増加を生じることが懸念される。

4. 宇宙環境シミュレータプロジェクト

日本における宇宙環境シミュレーションプロジェクトとしては、昨年度(平成 14 年度)より、海洋科学技術研究センターの地球シミュレータを使用した、宇宙環境シミュレータプロジェクトが始まっている。このプロジェクトは、京都大学の太村善治教授らを中心として、30 名あまりの研究者が参加して進められている。

飛翔体環境シミュレーションをもっぱら担当するプラズマ粒子シミュレーショングループと、主に磁気圏環境を担う MHD グループおよび両者を接続するハイブリッドシミュレーショングループの 3 グループと可視化を行うグループの 4 グループに分担してプロジェクトを進めている。

飛翔体近傍におけるプラズマ電磁環境を再現するためには、プラズマを粒子として取り扱うプラズマ粒子シミュレーションを行う必要がある。プラズマ粒子シミュレーションは、電場および磁場をマックスウェル方程式にしたがって

解き進める一方、プラズマ粒子である電子、イオンをクーロン力とローレンツ力を考慮した運動方程式にしたがってとき進めるシミュレーション手法である。

宇宙環境シミュレータ 概念図



図 3 宇宙環境シミュレータプロジェクトにおけるシミュレーションの役割

粒子シミュレーションによってとくことができる空間は、地球シミュレータを使用した場合でも、数 Km^3 程度の規模であるため、その外側の空間は MHD 方程式やハイブリッド方程式に従った大規模なシミュレーションを別途行う必要がある。その概念を第 3 図に示した。

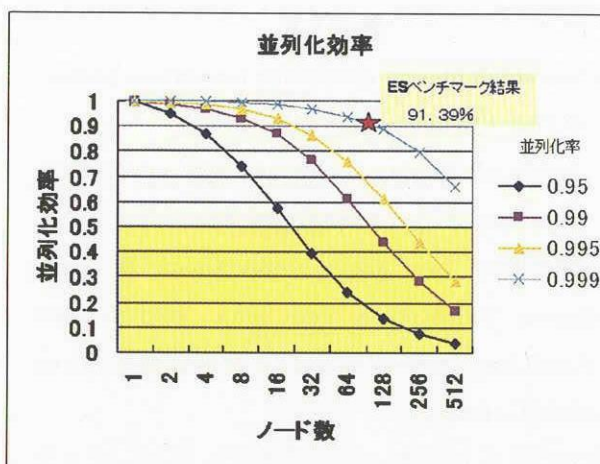


図 4 地球シミュレータにおけるプラズマ粒子シミュレーションコードの並列化効率

地球シミュレータは、2002年に完成し現在に至るまで世界最速の計算機であり、多大な計算資源を必要とするプロジェクトに広く活用

するために、実行するプログラムの利用効率が重視されている。第 4 図は、プラズマ粒子シミュレーションコードで実現されている並列化効率を示している。128ノードまでの利用においては、地球シミュレータ利用の条件となる 50%以上の並列化効率を達成し、その効率性が確認された。

プラズマ粒子コードのチューニング状況

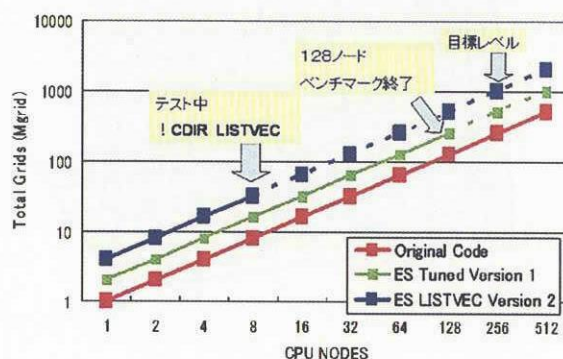


図 5 シミュレーションコードのテスト状況

現状のシミュレーションコードによると、飛翔体近傍の 1 km^3 の空間を計算機上に再現するためには、地球シミュレータの全計算機資源を消費しても困難であるが、現状の 2 倍程度の高集積化を行うことにより可能になることわかった。第 5 図は、現在のシミュレーションコードを地球シミュレータに特化した最適化を行うことにより、2 倍程度高集積化が可能になり、128ノード前後で飛翔体近傍 1 Km^3 の空間をシミュレーション可能になることを示している。

これまで、直交格子によるシミュレーションコードのテストを行ってきたが、今後、4 面体要素を基本要素とする非構造格子によるシミュレーションコードの組み込みを進めていく予定である。

第 6 図は、すでに開発されている 4 面体要素を使った非構造格子電磁粒子コードによるグリッド生成例である。中央に立方体の衛星形状を配置し、周囲の空間を 4 面体によって格子生成を行っている。色は、試験的に静電ポテンシャルを色で表示した例である。これによって、大

規模な3次元プラズマシミュレーションは、地球シミュレータによって始めて実用的なレベルに達したといえることができる。

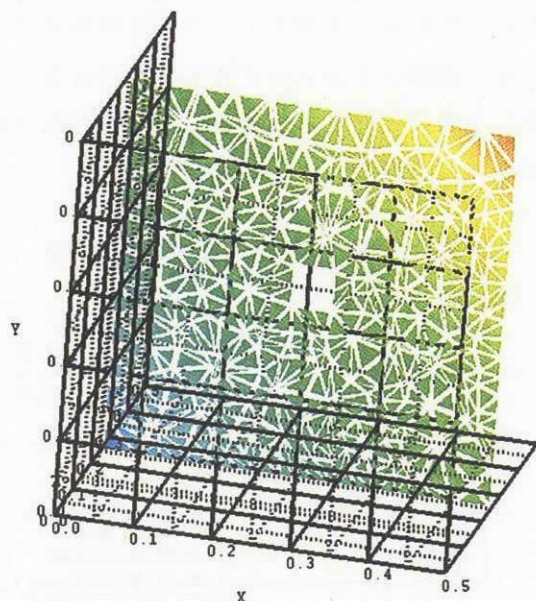


図6 非構造格子を使用した飛翔体近傍のグリッド生成例

一方で、3次元プラズマシミュレーションによって大量のデータが出力され、その解析可視化は、衛星観測によって得られるデータ量を上回るため、データの流通、可視化等の技術開発も重要であることが明らかになりつつある。

宇宙環境シミュレータ開発計画

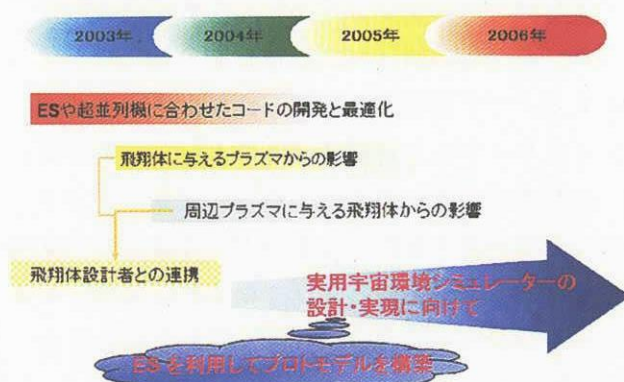


図7 宇宙環境シミュレータ開発の年度計画

宇宙環境シミュレータ開発の計画は、3年計画で進められており、今後の計算機環境の進歩に伴い新しい技術の導入が進むものと考えられる。一方、シミュレーション単独での精度検証、

実用性等には大きな困難があるため、実験との相互検証、宇宙空間における観測データの評価などを同時に進める必要がある。

5. まとめ

宇宙飛翔体環境研究におけるシミュレーションに対する期待は大きい。一方、航空分野におけるような大規模なシミュレーションは、これまで行われておらず、技術レベルはまだ十分とはいえない段階にある。海外においても宇宙飛翔体環境シミュレーションは、ほぼ横並びの状態といってよい。本稿では、実用性の面において秀でた米国と、新しい技術を取り入れて組織的に取り組む欧州の状況をまとめ、われわれの宇宙飛翔体環境シミュレーションの進捗を簡単に紹介した。

2005年には、京都において International School of Space Simulation (ISSS7) が開催され、さらに 9th Spacecraft Charging Technology Conference も NASDA において開催される運びとなった。これを好機として、宇宙飛翔体環境研究が進み、宇宙開発利用に資することを期待したい。

参考文献

- (1) Spacecraft plasma interaction network in Europe, ONERA, <http://spis.oncert.fr/spine>
- (2) Spacecraft Plasma Interaction System, ONERA, <http://spis.oncert.fr/spis/index.html>
- (3) NASCAP homepage, NASA Glenn Research Center, Photovoltaic and space environments blanch, <http://powerweb.grc.nasa.gov/pvsee/software/NASCAP.html>
- (4) 中村雅夫、NASDA の衛星帯電研究 -NASCAP と宇宙環境計測, KDK 利用報告、2002
- (5) 白井英之、岡田雅樹、趙孟佑、佐々木進、中村雅夫、宇宙飛翔体環境研究会ホームページ、<http://www.kurasc.kyoto-u.ac.jp/spacecraft>
- (6) 大村善治ほか、宇宙環境シミュレータ、<http://polaris.isc.nipr.ac.jp/~simulatr>