

SPIS を用いた衛星帯電解析 -SPIS 利用の手引き-

岡本好実, 中村真弥, 中村雅夫
大阪府立大学 工学部航空宇宙工学科

1. 要旨

人工衛星の故障の原因のひとつとして、表面帯電が考えられる。帯電電位の計算機シミュレーションを事前に行うことは、人工衛星の故障を防ぐために有益である。そのシミュレーションソフトは各国で開発されているが、その中でヨーロッパ製が主体となって開発された SPIS (Spacecraft Plasma Interaction System) はオープンソースで無償公開されていて大学などでも使用できる。しかしサポートを受けることができず、実際に使用するには敷居が高い。そのため SPIS を用いて衛星帯電の計算を試みている経験から、今後研究者が SPIS の利用を始める際に問題になりそうな点を取り上げ、利用するための手引きになるように本報告書を作成した。

2. 背景

人工衛星には一部絶縁体が用いられており、絶縁体間や衛星構体との間の宇宙プラズマ環境変動に起因した帯電(乖離電圧の発達)・放電の原因となっている。人工衛星は通信・地球観測・航行・気象など社会インフラにはなくてはならない存在で故障すると社会的損失につながるが、帯電とそれに伴う放電による衛星故障は数多く報告されている。日本では 2003 年に地球観測衛星「みどり 2 号」の衛星帯電による故障以降、衛星帯電に関する研究の重要性が高まった。これにより設計・開発段階から人工衛星の帯電を想定した設計が求められる。衛星の形状・材質・運用環境などを考慮した衛星帯電シミュレーションを行うことが一般的に行われるようになってきた。また現在、衛星帯電に関する ISO (国際標準) 規格の策定作業が行われており、その中で衛星帯電ソフトの利用につい

でも取り上げられている。今回 SPIS を用いるのは無料であることに加え、この ISO 規格の策定作業で進められている各国のシミュレーションプログラム比較・検証に協力するためでもある。

3. SPIS 概要

SPIS とは European Space Agency (欧州宇宙機関: ESA) が主になって開発した、オープンソースで無償公開されているソフトである。人工衛星周りのプラズマ電位や、表面電位をシミュレーションによって求めることができる。ソフトは三次元 Particle-in-Cell (PIC) 計算法を基に作られていて、2次電子放出や光電子放出等の表面相互作用も考慮されており、複雑な形状の衛星への対応もうたっている。試用中にも短い間にバグなどの理由で頻繁にアップデートされているが、無償で使える衛星電位シミュレーションソフトとして、研究目的などの使用において今後の活用が期待される。

4. SPIS 利用の手引き

SPISver5.1.6(2014年12月8日現在の最新版)を用いてシミュレーションを行う方法を示す。英語版のドキュメント[1]に沿って進めるが、その途中で日本語環境で使用した際に発生した問題点についても示す。

① インストール

SPIS は以下のサイトでユーザー登録を行いダウンロードする。

LibreSource

<http://dev.spis.org/projects/spine/home/spis>

ソフト自体は zip ファイルで圧縮されているので解凍すればそのまま利用が可能である。SPIS の公式推奨環境は表に記したとおりである。

表 1. SPIS の公式推奨環境

OS	Multi Platform
CPU	multi-core CPU with frequency higher than 2.4 GHz
RAM	8Gb
Graphic card	NVIDIA Quadro FX 570M or equivalent
解像度	1280x1024

表 2. 使用した PC 環境

OS	Windows7 Enterprise Service pack 1 64bit
CPU	Intel® Core™ i7-4770 4 cores/8 threads 3.40GHz
RAM	16.00Gb
Graphic card	Intel® HD Graphics Family 4600 1696Mb
解像度	1920 × 1080

SPIS はマルチプラットフォームをうたうソフトである。しかし Windows は 7 までしかサポートしていないようで、Windows8 では起動はするもののエラーが出て計算自体を行うことができなかつた。また Windows7 で起動ができない場合は、

/SPISROOT/dependencies/thirdparty/jre_wi
n7/bin/ディレクトリの中にある java.exe
ファイルを右クリックし、互換性のトラブルシューティングを行うことで起動できた。Linux など他の OS は試していない。

② SPIS 起動～計算まで

SPIS は起動すると左側に図 1 左列のようなアイコンバーが表示される。アイコンの説明は右列に示す。

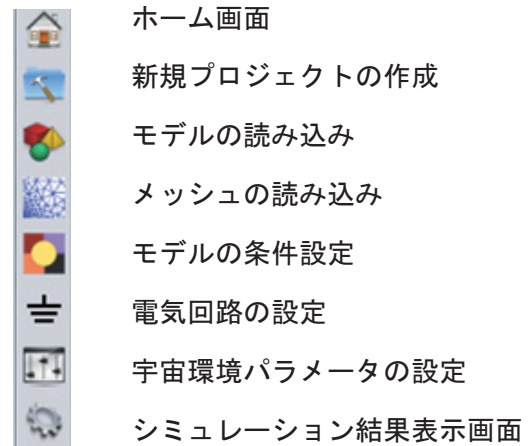
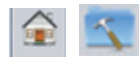


図 1. SPIS のアイコンバーとその説明

この項目を上から順に設定する。本項ではそれぞれの項目で注意しなくてはならない点を記載する。

A) SPIS の起動



ホーム画面アイコンを押すと既存のプロジェクトの読み込みか、新規プロジェクトの作成かを選ぶことができる。既存のプロジェクトの読み込みを選択した場合、モデルの読み込み画面に移動する。新規プロジェクトの作成をえらぶと、アイコン二番目の新規プロジェクト作成の画面に移動する。

B) モデル・メッシュ



この項目では、既存のモデルを読み込むことや、SPIS のインターフェース上でモデル編集を選択することでモデルを自作することができる。この項目で読み込んだモデルは、自動的にモデルファイル内の設定に従ってメッ

シユが生成される。メッシュの生成にかかる時間はメッシュの細かさによるが、1万分割程度ならすぐに終了する。もし別のメッシュを使いたい場合は、メッシュ項目で新たなメッシュを設定することが可能である。モデルやメッシュを読み込む際に、ファイル名やフォルダの一部にでも日本語が入っているとエラーが出る。このエラーがメッシュエラーやモデリングエラーという形でログに記されるが、実際は違うので注意が必要である。メッシュエラーやモデリングエラーが実際に発生しているかの確認は、付属の「GMSH」というソフトで一度モデルを読み込んでみれば判断ができる。もしモデルエラーならこちらのソフトでも同様のエラーが出る。

C) モデルのグループ化



モデルの条件設定

この項目では、衛星モデルの条件全般と計算領域に関する設定を行う。衛星の形状の設定、計算領域の外側境界の設定、衛星に使用する材料の設定などである。計算例として、図2のような立方体衛星のモデルを使って説明する。外側の枠は計算領域で、内側の立方体は全面にアルミを貼り付けた衛星である。衛星の設定をする際に、必要に応じて衛星を形づくっている面をグループ化する。グループ化しないと隣接した導体面でも電気的につながっていないとみなされる。全ての面を同じグループにした時は、全導体面は均一に帯電する(図は省略)。次に図3のように導体面を、黄色の部分をも一つのグループ、残りを別のグループと設定して計算を行った結果を図4に示す。

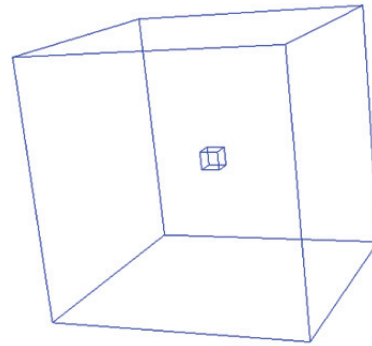


図2. 立方体衛星モデル

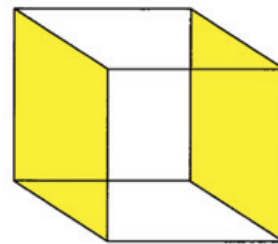


図3. グループ分けの仕方の図

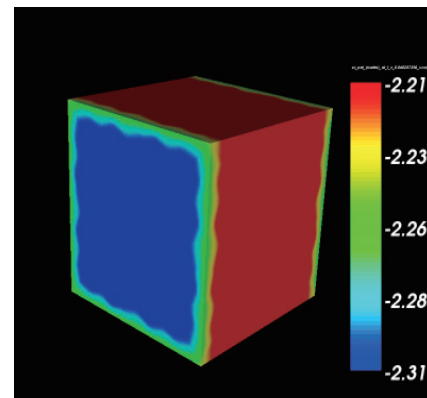


図4. 2グループに分けた際の表面電位

このように2つのグループ間にわずかではあるが電位差が確認できる。これより、グループ間には電気的なつながりがないことがわかる。またこの図では、グループ間の辺の周囲に各面の電位を平均したような電位が発生しているように見える。しかしこれは次に述べるようにグラフィック化する際の仕様の問題であって計算自体は正しいと考えられる。

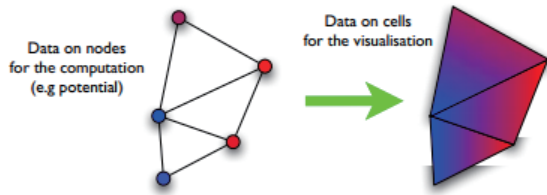


図 5. グラフィック化の処理法

グラフィック化の際に表示される色は、図 5 のようにメッシュの頂点部で計算された電位をなだらかに平均化するように塗られたものである。よって面と面の境界面の電位に着目する際は注意しなくてはならない。

D) 宇宙環境パラメータ



宇宙環境パラメータの設定

この項目では想定する宇宙環境のパラメータ（密度、温度、太陽の角度など）や、計算パラメータ（計算時間、計算のタイムステップ、粒子の分布関数など）を設定することができる。

目的に合わせて計算時間を短縮させ効率的に結果を得るために修正すると良いパラメータがある。付属している球体モデル (SphereLowresolution.spis5) を参考に述べる。初期値から電子温度とイオン温度のみを 10000eV に変えてシミュレーションを行い、計算時間の比較を行った。

●CPUのスレッド数の設定を変更した場合

表 3. スレッド数を変更した場合の計算時間

CPU1 スレッド使用	14 日間
CPU4 スレッド使用	5day13h42min44sec

SPIS はソフトが使用する CPU のスレッド数をユーザーが決定できる仕様であるが、スレッド数を 4 (CPU のコア数と一致させる) に設定すると計算時間が 60%ほど減少することが

わかった。これ以上にしても高速化しないため、ハイパースレッディングは利用できないと考えられる。

●タイムステップパラメータ

計算パラメータに初期値を用いずに、ドキュメント [1] を参考に粒子の速度を考慮して表 4 のように修正することで、計算時間を 30 分に短縮することができた。SPIS の計算ルーチンは科学計算でも使えるように、タイムステップを短く取ればプラズマ振動なども扱えるようになっている。しかし本研究では衛星電位の計算を目的としているため、表に示したタイムステップを用いて計算時間を短くできる。また表のように設定しても、あまりに急激な電位変動が起こらない様に、必要に応じてより細かいタイムステップを自動で取ってくれる仕様になっている。

表 4. タイムステップパラメータ修正表

duration	電流平衡に達する時間
simulationDt	電流平衡に達する時間の 10 分の 1 以下
popDt (elecDt,ionDt)	粒子が計算領域を通過する時間
popDuration	popDt と等しくする
plasmaDt	IonDt と等しくする
plasmaDuration	2*plasmaDt もしくは popDuration のどちらか大きいほうよりも大きく

E) シミュレーションログの処理

シミュレーション中に、OutOfMemory の java エラーが発生して SPIS が動かなくなることがある。これは SPIS のログの蓄積によりメモリ領域が一杯になることが原因と考え

られ、対処法としては

- ①シミュレーションタイムステップの間隔を大きくして計算結果の書き出し回数を減らす
- ① メモリの使用領域を増やすという方法が考えられる。シミュレーションタイムステップは前節の simulationDt を粗くすることで調節できる。またメモリの使用領域は、SPIS ルートフォルダにある spis.dat ファイルをテキストエディタなどで開き、-Xmx2048M の部分すべてを各自の PC スペックに合わせた値にするとよい。

5. 衛星電位シミュレーション計算

SPIS のプログラム比較のためのシミュレーションを行った。この際使用した宇宙環境やモデルは Toyoda [2] と同様のものを用いた。

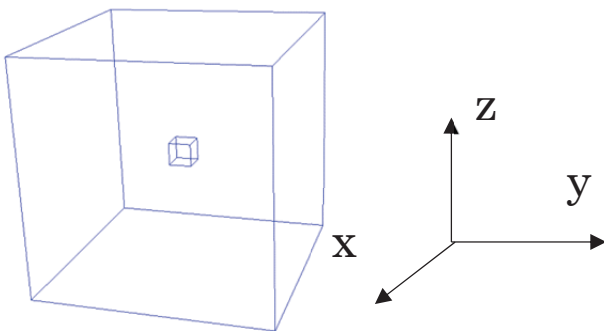


図 6. 使用した衛星モデル

領域 : 32 × 32 × 32m
 衛星 : 一辺 3m の立方体
 表面材料 : 衛星構体アルミ
 +X 面と+Y 面にカプトン
 メッシュ数 : 13633 個
 太陽は (x, y, z) = (1, 0, 1) から照射

使用した材料パラメータを表 5 に、使用したワーストケースの 1 つである宇宙環境パラメータ (SCHATA-Mullen1) を表 6 に示す。

●計算結果

電流平衡に達した際 (t=2000s) の、各面の最も低い電位を取りだした値を、Toyoda [2] の MUSCAT の結果の値とあわせて表 7 に示す。

表 5. 使用した材料パラメータ

	ALM	KAPTON
MSEY	0.97	1.69
PEE (eV)	300	150
PEY [A/m ²]	40.0E-5	3.2E-6
BUC [ohm-1.m]	-1.0E-14	0.7E-14
RDC	1	3.5

※

MSEY: Maximum secondary electron emission (SEE) yield for electron impact

PEE: Primary electron energy that produces maximum SEE yield

PEY: Photoelectron current for normally incident sunlight

BUC: Bulk conductivity, must be set negative if a conductor

RDC: Relative dielectric constant

表 6. 宇宙環境パラメータ (SCHATA-Mullen1 case)

Ne1 [m ³]	200000.0
Ne2 [m ³]	2300000.0
Te1 [eV]	400.0
Te2 [eV]	24800.0
Ni1 [m ³]	160000.0
Ni2 [m ³]	1300000.0
Ti1 [eV]	300
Ti2 [eV]	28200.0
光電子電流	あり
二次電子電流	あり

表 7. 衛星表面の電位

	SPIS	MUSCAT
日照面 (カプトン)	-17854V	-17300V
日陰面 (カプトン)	-20700V	-19900V
アルミ構体部	-5560V	-13000V
日照面と 構体の乖離電位	-12294V	-4300V
日陰面と構体の乖離電位	-15140V	-6900V

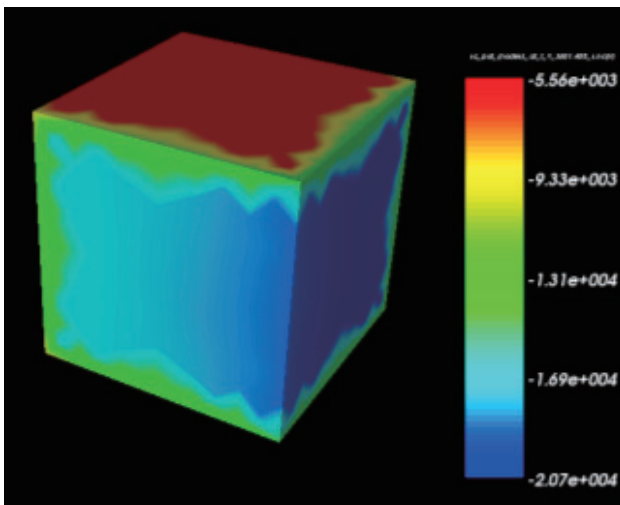


図 7. 表面帯電の様子

導体面と誘電体面の間には乖離電位が発生し、そして誘電体面内でも日照面と日陰面で電位差が発生していることが確認できた。MUSCAT の結果と比較すると、アルミ構体部分の電位にはかなり差がある。現段階では、この原因がプログラムにあるのか、材料のパラメータにあるのか、モデリングにあるのか等ははっきりしたことは分かっていない。今後先行研究のデータと比較しながら検証していく予定である。

6. まとめ

本報告書では簡単な SPIS の使用法と、その使用法に基づいて行ったシンプルなモデルのシミュレーション結果を紹介した。今後はこれを踏まえて ISO 規格の検証モデルなど、衛星を模擬したより

複雑な形状のモデルを作成し、衛星故障を引き起こす悪い宇宙環境と関連付けてシミュレーションを行っていく予定である。

7. Reference

- [1]Benoit Thiebault, Jean-Charles Mateo Velez, Julien Forest, Pierre Sarrailh, 2013, Spis5.1 User manual
- [2]Toyoda Kazuhiro, 2014, Effect of Material properties on spacecraft charging simulation, Proceedings of 13th Spacecraft Charging Technology Conference, #172