

MUSCAT 開発計画の概要

(Multiutility Spacecraft Charging Analysis Tool MUSCAT: 衛星帯電解析ソフト)

五家 建夫(jaxa)

1. 自主開発にいたる背景

みどり2号(ADEOS-II)運用異常の原因究明作業において、極軌道衛星の帯電が衛星全損という大事故につながる危険性が明らかになった。同時に、原因究明作業で明らかになったのは、極軌道衛星の衛星帯電状態を知り得る計算技術が日本国内に存在しないという現実である。みどり2号のような電源系の帯電故障を繰り返さないためには、設計段階から帯電・放電の観点に立った定量的検討を正しく行うことが必要である。特に、衛星の周辺プラズマに対する電位および衛星構造体と各表面の誘電体との電位差は、帯電放電の検討を行う際に最重要の基礎データである。今後の地球観測衛星の極軌道での運用を万全のものとするには、設計段階から反映できるような衛星電位の設計解析ツールが必須である。(図1. 衛星帯電検討の現状とMUSCAT開発後を参照)

極軌道衛星は低エネルギー(0.1~0.2eV)の電離層プラズマと高エネルギー(>1keV)のオーロラ帯粒子が混在する特異なプラズマ環境にさらされる。一方、軌道傾斜角の小さな低軌道は極軌道と比べて低エネルギー粒子が支配的な環境であり、逆に静止軌道は高エネルギー粒子が支配的な環境であるが、極軌道衛星用に開発された解析ツールに修正を加えることでこれらの場合にも適用できるようになる。これにより、ISSや天文・科学衛星などの低軌道衛星から、ETS-VIIIに代表される大型の通信放送衛星等の帯電解析にも適応可能となる。

現在、宇宙航空研究開発機構には衛星帯電の解析ツールとして米国で70年代に開発されたNASCAP/GEO(静止衛星用)、NASCAP/LEO(低軌道衛星用)が導入されている。これらのソフトは、世界のデファクトスタンダードとしての地位を確立している。しかし、極軌道衛星を解析するためには、米国で80年代に開発されたPOLARというシミュレーションコードを新たに導入しなければいけない。しかし、NASCAP/GEO、LEO、POLARはいずれも70-80年代の技術水準で作成されているため、ユーザーインターフェイスなどの使い勝手が悪く、また衛星モデリングの制限などの欠点がある。さらに、昨今の国際情勢とPOLARが米国空軍で開発されたことを考えると、日本に導入できるかどうかは甚だ疑わしい。現在NASCAPシリーズの後継としてNASCAP-2000(2k)という静止軌道・極軌道・低軌道の全てに対応した統合改良版コードが米国で開発・使用されているが、輸出規制のために日本で使用することはできない。一方、欧州では2002年よりESAの資金援助でSPISというコードが開発中であり、2005年度には完成の予定である。同コードは極軌道・静止軌道を共にカバーすることを謳っており、オープンポリシーで開発されているため、日本での使用にはおそらく何の制限もかか

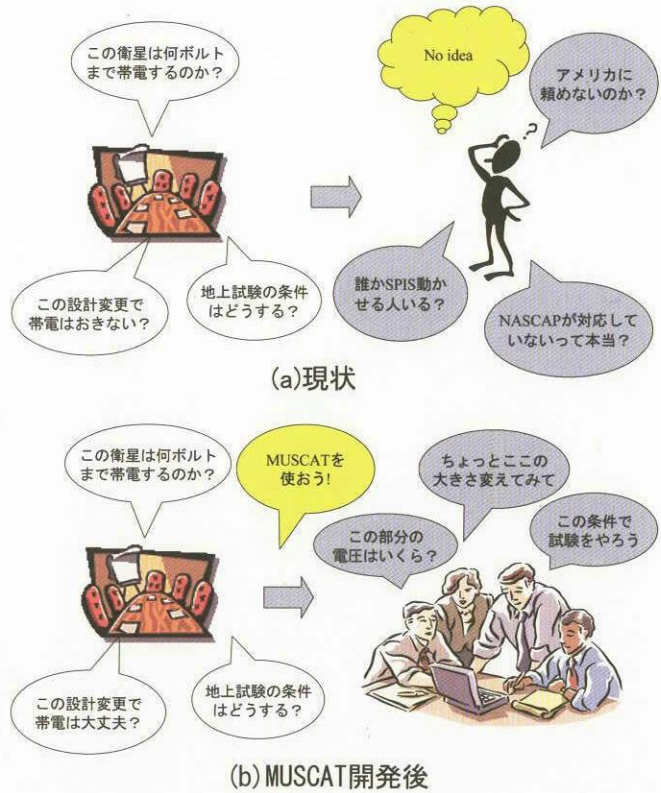


図1. 衛星帯電検討の現状とMUSCAT開発後

らないと思われる。しかし、2004年3月のプレリリース時点では、それ利用するためにはコンピュータについてのかかなりの知識が必要であり衛星エンジニアが簡単に操作できるソフトウェアではない。さらに精度、実用性については未知数である。また衛星メーカーの Alcatel 社等も自前の帯電解析コードを開発していることが、2003年の国際会議で発表されている。

日本国内では京都大学を中心とした宇宙プラズマシミュレーショングループが地球シミュレータを用いて「宇宙環境シミュレータ(Geospace Environment Simulator:GES)」開発プロジェクトを推進しており、その一部として、衛星周辺のプラズマ環境解析用シミュレーションコードを開発中である。同コードは地球シミュレータの計算能力を生かして、宇宙プラズマ中の物理素過程、宇宙機との相互作用などを網羅し、サイエンスから実用までカバーすることを目的としている。「宇宙環境シミュレータ」による宇宙機近傍環境解析では、宇宙プラズマを代表粒子群として取り扱い(Particle-in-Cell:PIC法)、非定常から定常状態に至るプラズマ過程を全て解き進めるため、世界最速の地球シミュレータを用いても長時間の演算となる。すなわち、衛星の帯電の時定数(数秒から数分)にわたる計算を行うには膨大な計算時間と計算機資源が必要であることが予想され、衛星設計段階でいくつかのパラメータを振って計算を行うという手軽な運用目的には適さない。(表1. MUSCATとGESの特徴比較を参照)

しかし、衛星帯電は周辺プラズマ相互作用の定常値として得られることから、「宇宙環境シミュレータ」を用いてその定常値に至る非定常過程を近似なしに解き進め、その結果として得られる帯電状況を得ることは非常に重要であり、衛星帯電解析ソフトの結果の妥当性、信頼性の検証を行う上でも必要不可欠なツールである。つまり、「宇宙環境シミュレータ」は、近似を取り払った数値チャンバー実験であり、真空チャンバー実験において材料パラメータ取得や衛星モックアップを入れて比較検証をおこなうのが不可欠なように、地上実験では再現できない衛星軌道上のプラズマ環境を大規模に模擬できる、世界で唯一の数値実験システムである。このことは、欧米で開発されている帯電ソフトに対する本ソフト開発における利点となる。現在、「宇宙環境シミュレータ」では外部プラズマ環境を解く主要プログラムは完成しているため、素材パラメータなどを取り入れた衛星帯電解析用モジュールを共同で開発し、ユーザーインターフェイスの共通化とともに計算結果の物理的検証と比較評価をおこなっていくことを計画している。なお、本衛星帯電解析ソフトは、JAXA 先端情報技術研究開発の研究の一環として開発を行う。

表 1. MUSCATとGESの特徴比較

項目	MUSCAT	GES
使用計算機	小規模PCクラスタ (4~8 CPU, メモリ10GB)	スパコン (メモリ数百GB以上)
メインアルゴリズム シース計算 流入電子計算 (精度)	PIC 粒子軌道計算法 近似解	PIC PIC ≡ 厳密解
解析アウトプット時間 詳細衛星モデル 簡略衛星モデル (旧NASCAP程度)	半日程度 数分程度	莫大な時間 1日程度
衛星設計解析での 使い易さ	Try&Errorが容易で、衛星設計 で繰返すフィジビリティスタ ディに有用	割当CPU時間、メモリ容量 に依存するため、利用申請、 計画が必要

2. 衛星帯電解析ソフトの開発の目的

今後の衛星開発において、極軌道、低軌道衛星から静止軌道衛星までの設計段階からの帯電障害のリスク評価から運用中の衛星の不具合解析までをおこなう汎用の衛星帯電解析ソフト(MUltiutility Spacecraft Charging Analysis Tool :MUSCAT)を作成する。

3. 衛星帯電解析ソフトの開発の作成範囲

衛星帯電解析用計算機システム、衛星帯電解析ソルバー、衛星モデルの作成、計算実行、結果解析、可視化用の共通グラフィカル・ユーザ・インタフェース(GUI)、および日本語・英語マニュアルを作成する。(図 2. 衛星開発プロセスにおける MUSCAT の役割)

4. 衛星帯電解析ソフトの開発の目標設定

現在市販されているパーソナルコンピュータを並列化した計算機を用いて、低軌道、極軌道衛星から静止軌道衛星までの設計に適応できる帯電解析ソフトを作成する。計算の際、極軌道のある与えられた条件に対して、半日以内に答を出せるようにする。衛星モデル作成、計算実行、計算結果解析可視化が簡単にできる GUI を持ち、日本語・英語マニュアルを完備し、3日間程度のトレーニングで初心者でも基本的な操作ができるようにする。(図 3. MUSCAT 完成時点の成果と将来の見通し参照)

5. 衛星帯電解析ソフトの開発の内容

- ALOS 規模の大きさの衛星に対応可能であり、将来の計算能力向上により ISS 規模まで拡張可能
- 矩形グリッドによる衛星形状の 3 次元モデル化が可能
- 最小空間分解能 3cm(ALOS 規模の場合)
- 最小時間分解能 1 秒以下
- 衛星モデリング・計算実行・解析結果可視化のための GUI を装備

上記の要件を満たし PIC 法と粒子軌道計算法を併用し、基本的なアルゴリズムは以下の通りとする。

1. 衛星の形状、表面材料を GUI 画面で入力
2. 衛星姿勢、プラズマ環境データを入力

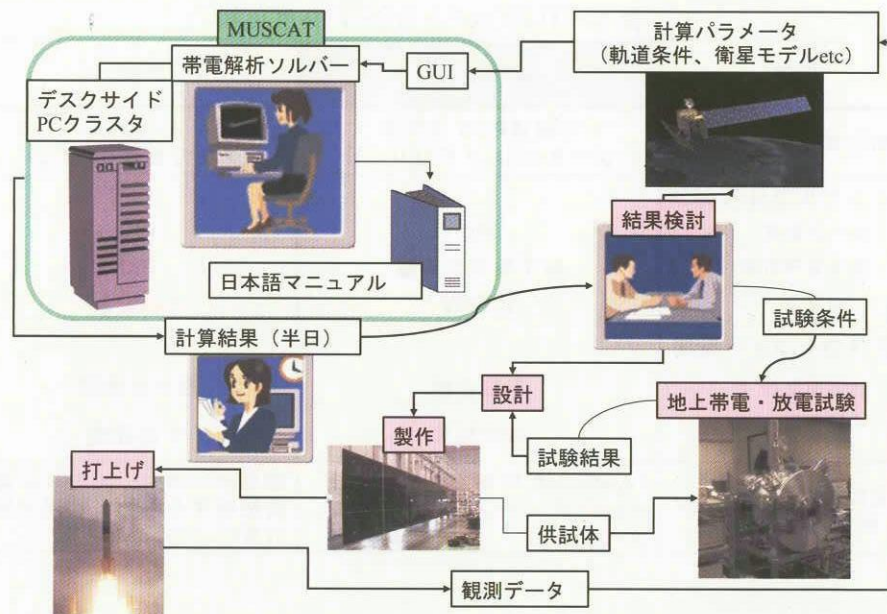


図 2. 衛星開発プロセスにおける MUSCAT の役割

3. 衛星周りの初期プラズマシース形状の計算 (PIC 法を使用)
4. シース内の高エネルギー粒子軌道、低エネルギー粒子軌道、光電子軌道を計算 (粒子軌道計算法を使用)
5. 衛星表面各部への流入電流の計算
6. 衛星表面各部の帯電電荷量の計算
7. 衛星電位及び絶縁体表面電位の計算
8. 新しい衛星電位に対するプラズマシース形状の再計算。4に戻る。
9. 所定の時間が経過または定常状態に達すれば計算を終了

上記の計算アルゴリズムにおいて、PIC 法や粒子軌道計算は既に確立された手法であり、実際、今回開発の主要部分を担う九州工業大学工学部・助教授・趙孟佑氏は太陽電池アレイのカバーガラスの帯電計算を目的とした2次元版のFortranコードを91年には開発済みである。(M. Cho and D. Hastings, "Dielectric Charging Processes and Arcing Rates of High Voltage Solar Arrays", J. Spacecraft and Rockets, Vol. 28, No.6, pp. 698-706, 1991)。この3次元コードの開発に原理的問題は存在せず、並列化による高速化とGUIの開発等が新規開発要素である。このことから、適当な人的資源を投入すれば、開発開始から1年半程度で試作版を完成させることが可能である。また、「宇宙環境シミュレータ」の帯電解析モジュール等による精度検証も重要な要素であり、その開発も並行して行う。こちらも1年程度で試作版を完成させ、両者の計算結果の比較検証と改良を継続的にこなしていく。

6. 衛星帯電解析ソフトの開発の進め方

実施体制 (図 4. 実施体制を参照)

環境計測技術グループの五家を中心に、古賀副主任開発部員および情報技術開発共同センターの上田副主任研究員が開発のスケジュールと予算の管理、開発全体に対する調整、共同研究相手先との調整を行う。衛星帯電解析にはソフトウェア、計算結果の検証技術、材料特性データ、および宇宙環境データが必要である。ソフトウェア開発は九州工業大学の趙助教授への委託研究を主体として、九州工業大学に小規模 PC クラスタ計算機システムを導入し、PIC 法・粒子軌道計算のプログラミング、コード並列化、GUI の開発に、主に修士・博士課程修了者

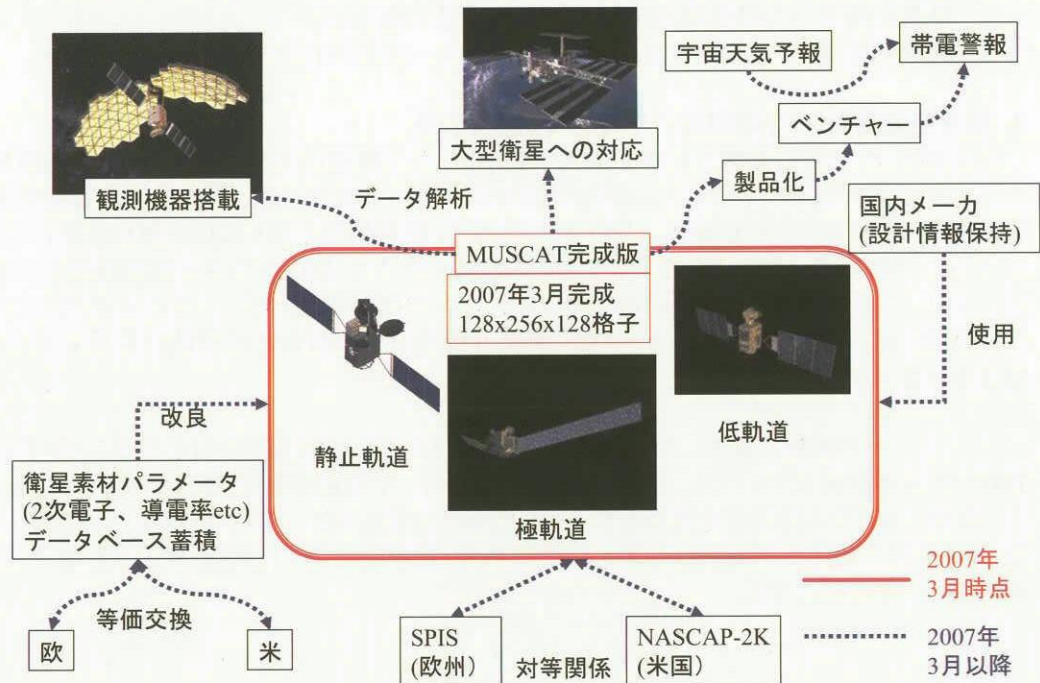


図 3. MUSCAT 完成時点の成果と将来の見通し

レベルの専門家役務 3 人が当たる。またその検証のために、地球シミュレータ利用グループの「宇宙環境シミュレータ」開発に参加している京都大学の臼井助教授とも共同研究契約を結び、その帯電解析用モジュール・GUI・解析可視化ソフトの共同開発と評価用モデルに対する計算結果を比較して検証をおこない、改良を継続的におこなう。さらに帯電解析モジュールを上田副主任研究員が調布 IT センターの NS3 システムへ移植し JAXA 内で動作可能な環境を整備する。真空チャンバーを用いた地上実験による素材パラメータの取得と計算結果の検証は、宇宙科学研究本部の国中助教授を中心に主に専門家の役務 1 人が作業にあたる。(表 2. MUSCAT、GES、地上チャンバーの役割を参照)

また、利用者としての要求提示および試作版等の評価は宇宙科学研究本部の笠羽助教授および ETS-VIII プロジェクトの高橋副主任開発部員を中心に行う。特に ETS-VIII には環境計測技術グループの衛星帯電モニターが搭載されており、観測開始後に計算結果と比較検証することで、ソフトを補正し精度を向上することができる。さらに帯電解析に必要な適切な宇宙環境パラメータの収集を情報通信研究機構の中村氏等の協力を得て行う。

作業の進捗に応じて情報通信研究機構の小原氏および宇宙科学研究本部の佐々木教授に状況報告を行い、アドバイスを受けるながら開発を行う。

衛星帯電は宇宙開発の重要な基盤技術であり、本課題終了後、衛星開発段階から本帯電解析ソフトの利用を働きかけるとともに、精度向上を測るため、衛星帯電モニターや宇宙環境計測装置などの観測機器の継続的搭載を働きかけていく。また、本ソフトの応用として、宇宙天気予報の一つとして衛星帯電予報が考えられる。そのため、宇宙天気関連の研究を行っている情報通信研究機構との情報交換も継続的におこなっていく。

7. 衛星帯電解析ソフトの開発スケジュール

表 3. 研究開発スケジュールを参照。

開発終了後

- 表面物性データベースの蓄積・改良作業の提案
- 衛星設計段階からの帯電解析ソフトの活用の働きかけ
- 多数の衛星への帯電関連の観測機器を搭載の働きかけ
- 国際的帯電ソフト共同補正と衛星素材パラメータの共有化キャンペーンの提案

8. 衛星帯電解析ソフトの開発の期待される波及効果

宇宙航空研究開発機構と九州工業大学を中心として国産の衛星帯電解析ソフトを開発することで、日本語注釈付きのプログラムのソースコードを国内で維持でき、国内の宇宙開発関連企業が衛星開発のノウハウを不必要に公開することもなく、新規機能を取り入れた衛星設計にも柔軟に対応することができる。また、現在欧米で用いられているソフトよりもプラズマ物理機構を正しく取り入れており、これらのソフトとの共同補正キャンペーンや衛星素材パラメータの共有化などで主導的に国際協力を進めることができる。また、衛星近傍電位の解析など科学的な利用目的のユーザも想定される。

さらに、コード開発に参加した研究者にもプログラムの知的財産権を分与することを予定しており、2007 年 4 月以降についても、保守、運用のサポート、宇宙航空研究開発機構以外の顧客への販売、新規プログラム開発等を業務とするベンチャー企業をスピンアウトさせることができる。また、宇宙天気予報を利用し、軌道上の個々の衛星形状・素材を考慮した精度の高い帯電予報サービスの提供なども可能になる。



図4. 実施体制

表 2. MUSCAT, GES, 地上チェンバーの役割

	MUSCAT	GES	地上チェンバー	軌道上計測
役割	<ul style="list-style-type: none"> ●軌道上プラズマ環境における詳細衛星モデルを高速に解析 ●設計に反映 	高精度の解析でMUSCAT解析結果を検証	<ul style="list-style-type: none"> ●物性パラメータの計測 ●MUSCAT等の検証用データを計測 ●フライト品部分サンプルの試験 	<ul style="list-style-type: none"> ●フライトデータの取得 ●MUSCAT等の検証用データを計測
問題点	解析結果は近似値	衛星詳細モデルの解析には非常に時間がかかる	<ul style="list-style-type: none"> ●軌道上プラズマ環境を完全に模擬できない ●評価対象は数十cm規模まで 	観測機器を搭載した衛星が多数必要

表 3. 研究開発スケジュール

	平成16年度	平成17年度	平成18年度
		試作版	完成版
開発用計算機システムの構築 (九工大)	システム構築	メンテナンス	
解析ソルバーの開発・高速化 (九工大)	基本機能開発	必須機能開発	付加機能開発・ユーザー要求・改良
GUIの作成 (九工大 & 京大)	基本機能開発	必須機能開発	付加機能開発・ユーザー要求・改良
NASCAP & SPIS比較評価 (九工大 & JAXA)		ラングミュア・プローブとの比較	衛星モックアップを用いた比較
宇宙環境シミュレータとの比較 (九工大 & 京大)		ラングミュア・プローブとの比較	衛星モックアップを用いた比較
真空チャンバー実験との比較 (九工大 & JAXA)	実験準備	ラングミュア・プローブとの比較	簡略衛星モデルを用いた比較
ETS-VIIIの観測結果の評価補正 (JAXA & 九工大)		ETS-VIII打上後継続	

第9回帯電国際会議 MUSCAT開発宣言