# 衛星帯電について

## 宇宙航空研究開発機構 研究開発本部/宇宙環境グループ 古賀 清一

目次

## 1. 衛星帯電

- 1.1 表面帯電
- 2.2 内部帯電

2. 帯電に関する宇宙環境計測技術

- 2.1 プラズマ計測(PLAM)
- 2.2 帯電計測(各種POM)
- 3. 衛星帯電シミュレーション技術
  - 3.1 衛星帯電解析ソフト(MUSCAT概要)

### 衛星帯電防止・計測技術の大きな3つの柱







能動的電子放射 $I_a$ )

衛星構体の宇宙空間に対する電位は、外部とやりとりする 正電流と負電流が均衡するように決められる



- ・沿面放電やアーク放電が発生し、金属溶融や絶 縁破壊による熱制御材料や太陽電池セル間の破 壊を引き起こす
- 放電パルスが内部電子機器に電磁干渉を与える
- 負に帯電した光学機器、熱制御材料に、真空蒸発ガス(アウトガス)が紫外線でイオン化して
   再吸着し汚染(コンタミネーション)する

# <u>表面帯電の対策</u>

- 表面の物体間を導線で結線する
- 太陽電池のカバーガラスを導電性被膜付き(酸化インジウム:ITO)にする。
- 熱制御材表面にITOを被覆する。
- 熱制御材は、高誘電率のテフロンの使用を避け、 高電導度・耐環境性に優れたブラック・カプト ンを使用。
- 低高度衛星は電源を逆接地する(Champ衛星)
- イオンエンジンの中和器で能動帯電制御

# 衛星表面帯電を起こしやすい場所

• 静止軌道衛星

夜側の磁気嵐等に伴うサブストーム(高エネ ルギー粒子)による帯電。

•極軌道衛星

極域のオーロラ粒子による帯電。



sunlight) in volts as a function of altitude and latitude for the Earth (Evans et al., 1989). Outside the "horseshoe" region charging is neglible.

### 低エネルギーイオン計測によるLEO衛星(DMSP)帯電の実測例



Figure 3. The environmental parameters associated with a charging event in the premidnight sector: the ion (electron) density (top panel), the precipitating electron number flux spectrogram (middle panel), and the precipitating ion number flux spectrogram (bottom panel). The ion spectrogram is plotted with low energy at the top and high energy at the bottom. The polar dial at the top right indicates the spacecraft orbit track in MLT and MLAT.

Surface Charging in the Auroral Zone on the DMSP Spacecraft in LEO, P.H. Anderson, 6<sup>th</sup> SCTC, AFRL-VS-TR-20001578,1 Sep. 2000

### オーロラ帯と低エネルギーイオン計測による LEO衛星(DMSP)帯電の実測例



discrete and multiple arc locations (after Whalen et al., 1985).

Figure 2. MLT and MLAT distribution of 2824 1-second SSJ/4 sweeps associated with the 704 charging events.

Surface Charging in the Auroral Zone on the DMSP Spacecraft in LEO, P.H. Anderson, 6<sup>th</sup> SCTC, AFRL-VS-TR-20001578,1 Sep. 2000

### 静止軌道での電子の流入位置と衛星帯電の実測例



# 1. 衛星帯電 1. 1 表面帯電 <u>2. 2 内部帯電</u>

内部帯電

- 内部帯電は衛星の外壁を貫通した放射線
   帯外帯の0.1MeV以上の電子が内部に侵入
- 基板間や同軸ケーブルの線間等の容量 (コンデンサ)や誘電体に帯電
- 接地されてない導体片に帯電
- その耐圧電圧を超えると、その耐圧の弱い箇所(材質の欠陥や針状突起などの箇所)で放電して故障に至る。

### 内部帯電(あるエネルギ-以上の粒子が入射、光電子なし)



NASA-HDBK-4002より

### 静止衛星での内部帯電

静止軌道で、内部帯電を起こす可能性のある放射線帯粒子のエネルギーは、 0.1MeV以上(それ以下では衛星の構体を突き抜けられない)、

3.0MeV以下(それ以上のエネルギーは内部帯電を引き起こすほどフラックス が無い。)



FIGURE 3. Electron/Proton Penetration Depths in Aluminum

### 内部帯電を起こし始める粒子フラックス量



See Appendix F, Section F.3 for information about CRRES.

NASA-HDBK-4002より

## <u>内部帯電の対策</u>

- アルミで3mm厚さに相当するシールドで囲む (Faraday Cage)。
- テフロンやカプトンなどの誘電体材料の内部での使用量を最小限に押さえる
- 回路基板やコンフォーマル・コーティングは誘 電体なので、電流リークパス(10<sup>12</sup>Ωcmまたは 10<sup>12</sup>Ω/cm<sup>2</sup>程度)を必ずつける、
- 特にスポット的な放射線シールドの金属材には 必ず電流リークパスをつける

### 2. 帯電に関する宇宙環境計測技術

## <u>2.1 プラズマ計測</u> 2.2 帯電計測

### 国際宇宙ステーション「きぼう」の曝露部に設置された 宇宙環境計測ミッション装置(SEDA-AP)



プラズマモニター(PLAM)



Picture of PLAM sensor



Figure of PLAM sensor

<u>原理</u>

### 先端の丸い電極に電圧を印加し、流入してくる 電流と印加電圧のカーブから電子温度、電子 密度、プラズマに対する宇宙機の電位等を計 測する。

<u>スペック</u>

Langmuir probe High Gain: -0.2µA~+0.2µA Low Gain : -0.04µA~0.4mA

## 2. 帯電に関する宇宙環境計測技術

2.1 プラズマ計測
 2.2 帯電計測

### ETS-WIに搭載された帯電電位モニタ



Location of POM

Earth panel

Sample (Solar cell cover glass)

BRR/S-0213 CMX-100-BRR CMG-100-AR suitability

Measurement Range

Surface potential:+5kV~-10kV

Sampling

1 sec.

# 3. 衛星帯電シミュレーション技術 3. 1 衛星帯電解析ソフト(MUSCAT概要)

# MUSCAT開発の目的

- 極軌道衛星・低軌道衛星・静止軌道衛星について、 以下の目的に供する汎用衛星帯電解析ツール (Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool: MUSCAT)を作成する。
  - 衛星設計段階での帯電障害の発見
  - 最大帯電電位を知ることによる
    - 地上試験での的確な条件設定
  - 衛星不具合発生時の
    - 帯電起因による不具合発生の有無の検証

### ①衛星設計、運用時

### 衛星開発プロセスにおけるMUSCATの役割



## 次世代の宇宙機帯電解析ツール



米国 NASCAP-2K (NASA Charging Analyzer Program 2000)

■ アメリカ国外に<u>輸出規制</u> <u>新規アップデートの停止</u>(2005年)



欧州 SPIS

(Spacecraft Plasma Interaction Software)

開発の大幅な遅れ



日本 MUSCAT (Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool)



Ver.1の開発完了(2007年3月)



JAXA総合技術研究本部:	五家建夫、松本晴久、古賀清一、上田裕子、香河英史、川北史朗、	に田 工美、三宅	3 弘晃
	(非常勤:小原隆博、趙孟佑)		
JAXA宇宙科学研究本部:	佐々木進、國中均、笠羽康正		
JAXA宇宙利用推進本部:	佐藤哲夫、岩田隆敬、高橋真人、三浦健史		
九州工業大学:	趙孟佑、金正浩、八田真児、細田聡史、村中崇信		
情報通信研究機構:	小原隆博、中村雅夫		
京都大学:	臼井英之		
国立極地研究所:	岡田雅樹	法) 武居(十	閉発開始



# MUSCATの基本仕様

- 1. 極軌道衛星、低軌道衛星、静止軌道衛星に対応
- 2. 普通の衛星エンジニアでも使用可能
- 3. Reasonableな待ち時間(半日程度の詳細計算)
- 4. Parametric Runが可能(10分程度の簡易計算)
- 5. 3次元衛星モデル作成・計算結果可視化用のGUI
- 6. 計算精度の検証



<u>第1項</u>が負電荷の流入 <u>第2項以下</u>が正電荷の流入 or 負電荷の流出 正負の電荷が<u>均衡</u>したとき、衛星の<u>飽和帯電電位φs</u>となる

# MUSCATによる解析の流れ



# GUIの概要

- 衛星形状の設定
  - 簡易な3次元基本部材(箱、プレート、円盤、梁、円錐、四角錘、等)の組 み合わせで衛星形状を作成
- 材料の設定
  - 衛星表面の各面ごとに材料設定
- 宇宙環境の設定
  - 衛星の軌道、姿勢および周辺宇宙空間の環境パラメータを設定
- 高精度計算または簡易計算を選択
- 計算条件(CPU数、計算ステップ数、最大電圧等)の設定、及び実行中強制終 了
- 格子点の生成

- 計算に必要な矩形格子点を生成可能

- グラフ表示
  - 表面ごとの2次元分布図と指定した点の時間履歴
- 環境条件の範囲と刻み幅を指定し、連続計算可能(パラメトリック・ラン)。
- ユーザーレビュー会開催(2回)時の意見を反映
  - 第1回(2006年7月)参加者:15人(内メーカ7人)汐留
  - 第2回(2006年12月)参加者:20人(内メーカ7人)汐留、筑波

# GUIの起動と外観

Eile Edit Modeler Help														
New Project	👙 MUSCAT 11.4 - D:\De	ocumer	its and	Settin	gs₩Ad	ministra	torWMy	, Docum	ients₩I	Muscat	_vine\m	uscat_	2 🔳 🛛	
Open Project	<u>Eile E</u> dit <u>M</u> odeler <u>H</u> elp													
Save Project	Converter Transfer	Run	]			Parametric	Run							
Save Project As	D:)Documents and Settings)Ad	L	,			. )								
New Modeler Ctrl+N	Environment	wateriais	Modeler	Enviror	iment Par	ameter								
Open >	Load Custom     Load Default     Denameter													
Save Modeler As														
Save Modeler, Ctrl+Shift+S	Advanced Parameters													
Print Image, Ctrl+P	⊞	Retri	eved Ma	iterial F	aramete	er setup-	TI.:		e	C.J.	Cand	En all		
Exit			🚫 Co	🔵 Diel	Color	material	Inick [um]	apn [10uA/m2]	ernax [eV]	Samax	[1/ohm.m]	Ebai	Capa [F/m2]	
<b>↑</b>			~	~						1				•
			0	۲		Cover_G	100	1.5	800	3.3	1.00E-16	7.4	6.55E-7	
File menu			0	۲		SiO2	127	2	400	2.4	1.00E-14	4	2.79E-7	
Project ~ ~ 7			$\circ$	۲		Teflon	127	2	300	3	1.00E-16	2	1.39E-7	
			۲	0		Black_Κε	25.4	0.72	280	0.93	-1	3.5	0.0	
/	Log:		۲	0		ITO+OSR	1	1.5	800	1.4	-1	1	0.0	
/	>> real dat file is conied		۲	0		CFRP	200	0.4	150	2.1	-1	4.3	0.0	
/	"Parameter" and "Environmer		$\odot$	0		Magnesii	1000	4	250	0.92	-1	1	0.0	
	>>The parent folder of this													
ファイルシ		User	Materia	1 Paran	ieter Set	ф								1
マテル			0	0										
			$\circ$	0										
			$\circ$	0										
			$\circ$	0										
ログ表示			0	0										
										-	-			
	OK Cancel													
タブパネル											water's all w	ot novem		
J. J. J. 11/10	UDocuments and Settings Administrator Wy Documents Muscat_Vine Muscat_20070227/Parameterisel_mat_param.csv													
	Stand by													

## 衛星モデルの生成と面情報

Rot3D	Surface	e Info	3D View	X-Y plane		Y-Z plane	X-Z plane	Defa	ult Materials:	Co	ver_Gla	ISS	Change	All
				物体クリ 面情報(	パの	レク後S チェッ?	urfacel ク及び変	nfo7 E更	ドタン			r t	Rotation rot axis x angle[d] 90	~
								b Mat	erial Prop	erty	y Inpu	ıt	(	_ 🗆 🛛
							View Geometry Info				/iew Selected Face			
~					Shape: BOX #31			body1			*			
					Face:	body1	Select		ct Faces To Change					
					Disc	xt: 1400		🔄 top	þ	📃 bottom	body0			
					Dim:	y: 2800 z: 100		body1 body2		body3				
							-Change and View Face Info							
		C	n	Y'				Material Cover Glass (o)						~
								Thickn	 ess (um)		1	100.0		
								aph [1)	0uA/m^2]		1	1.5		
							Semax [eV]				800.0			
			∖Z`		Sdmax			3	3.3					
			Į ì		Conductance [1/ohm.m]			1	1.0E-16					
_				Epsilon 7.4						7.4				
<mark>↓ 寸法入力⇒</mark> Make							Capaci	itance [F/m^2]	n^2] 6.5			-7		
物体	の組	み合	わせに	より衛星・	Generating Voltage [V]				0.0					
							Advanced Parameters							
Unit Box	~	×' [mm]	2800 y' [r	nm] 100 z	' [m	m] 1400	Make		ſ	Ok		Cance	9	

# 3D output



#### MUSCATの宇宙環境入力パラメータ

(共通)

電子 密度、温度 イオン 密度、温度

#### (GEO)

Double Maxwellianを使用する場合 高エネルギー電子 密度、温度 高エネルギーイオン 密度、温度

(LEO) オーロラ電子電流密度 オーロラ電子の平均エネルギー



図 I.2-1 高度 840 kmの磁気緯度 60 度から 75 度の間における降下電子電流密度の統計分布。

DMSP 衛星の SSJ/4 (エネルギー範囲は 1keV から 30keV) データの解析[8]による。

JAXA-SC-20-11「帯電放電設計標準」より

上記の組み合わせでシミュレーションで帯電の最悪値および発生確率を算出



上記の帯電電位で不具合が生じないか、実機の部分モデルをチャンバ内帯電試験で検証

### ②地上実験

### 試験検証用チャンバー(運用中) 太陽電池クーポンパネル等の帯電設計の妥当性を確認する。

Chamber dimensions: 1.3m(dia) x 3.2m(L) Vacuum pressure: 6E-5 Pa or less Shroud dimensions: 1m(dia) x 1.35m(L) Shroud temperature: from 100K to 353K TC: Max144ch

Pumpdown time: 2hours (without LN2) Repressurizing time:

20min (without LN2)





### 宇宙環境データへの要求

# 1. 衛星設計時に必要なデータ 1)宇宙環境の最悪値 2)上記の環境の頻度、確率

2. 衛星運用時
 1)宇宙環境の予測情報

- 3. 衛星不具合時
  - 1) データのリアルタイム性

2)衛星搭載の宇宙環境データ、もしくは他の同じような軌 道のデータ、シミュレーション等

3)他の衛星の場合、詳細なデータの入手性