

SPIS を用いた最悪プラズマ環境下の 静止軌道衛星表面帯電解析

中村 真弥, 中村 雅夫

大阪府立大学

1 はじめに

宇宙空間で人工衛星などの宇宙機を運用する際に、宇宙プラズマに起因した帯電が生じる。衛星の帯電により放電などの障害が発生することがあり、材料劣化や機器の故障を引き起こし、運用できない状態になる可能性がある。衛星帯電には内部帯電と表面帯電があるが本研究では表面帯電を取り扱う。表面帯電による障害を考える際に重要となるのが物性値の違いにより生じる表面部材間の乖離電圧である。したがって、宇宙機の故障を設計段階で未然に防ぐために、様々に変化する宇宙環境下の宇宙機の帯電状況を知るのは有効である。そのため、各国で様々な宇宙環境における衛星表面帯電電位をシミュレーションするソフトウェアが開発されている。アメリカは NASCAP-2k、日本は MUSCAT、ロシアは COULOMB-2 を発表している。本研究では、欧州宇宙機関が主体となって開発したオープンソースの衛星表面帯電電位シミュレーションソフト Spacecraft Plasma Interaction Software(以下 SPIS) を用いて、提案されている幾つかの静止軌道最悪プラズマ環境における表面帯電電位を計算し解析を行ったのでその結果を報告する。

2 衛星表面帯電シミュレーションのための最悪プラズマ環境

人工衛星などの宇宙機を設計する際に、

宇宙機帯電評価シミュレーションに用いる静止軌道最悪プラズマ環境は、国によって様々であるため国際規格 (ISO) が策定中である (2015 年 11 月現在)。この ISO 規格の策定のために Round-Robin Simulation が行われた[1]。目的は、基準となる乖離電圧のシミュレーション方法を示し乖離電圧がワーストになる最悪プラズマ環境を与えることである。Round-Robin Simulation では、Figure.1 に示す AFRL (Air Force Research Laboratory) モデルを用いて、衛星表面帯電シミュレーションソフト NASCAP-2k、MUSCAT、SPIS で提案されている幾つかの静止軌道の最悪プラズマ環境のシミュレーションを行い結果比較するというものであった。SPIS を用いたシミュレーションは Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering の Feng 先生

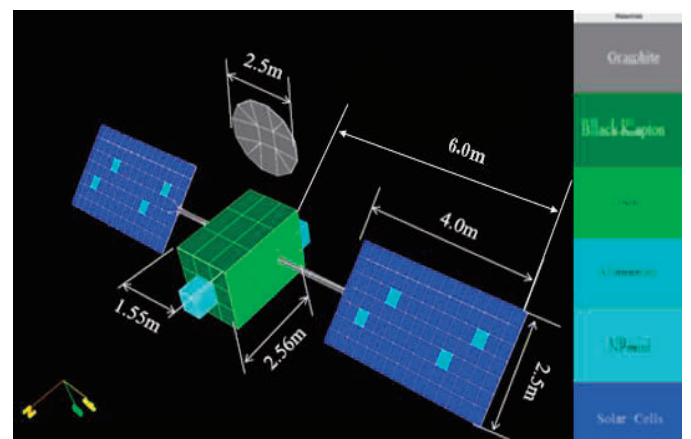


Figure.1 AFRL モデル*[1]

が発表したものがある[4]。しかし、AFRLモデルの再現が完全ではない点、使用している SPIS のバージョンが古い点、金属導電体暴露部でない表面 (Black Kapton) の電位を衛星電位としている点など、Round-Robin Simulation の結果としては不十分であると考えられる。

3 研究方法

3.1 衛星の各表面部材の帯電電位

衛星の各表面部材の電荷 Q 、静電容量 C 、電位 ϕ 、流出入する電流 I に以下の関係式が成り立つ。

$$Q = C\phi \quad (1)$$

$$\frac{dQ}{dt} = C \frac{d\phi}{dt} = I \quad (2)$$

流出入する電流の総和がゼロとなったとき各表面部材の定常状態の電位となる。定常状態における電流の評価式は式 (3) * [2] である。

$$I_e(\phi_{sc}) - \{I_i(\phi_{sc}) + I_{se}(\phi_{sc}) + I_{si}(\phi_{sc}) + I_{be}(\phi_{sc}) + I_{ph}(\phi_{sc}) + I_a(\phi_{sc}) + I_s(\phi_{sc})\} = 0 \quad (3)$$

衛星表面には外部電子が流入する外部電子電流 I_e 、外部イオンが流入する外部イオン電流 I_i 、太陽光が当たる面から光電子が放出されることによって生じる光電子電流 I_{ph} 、電子 (イオン) の衝突で二次電子放出されることによって生じる二次電子電流 I_{se} (I_{si})、電子が衛星表面に衝突しそのまま跳ね返されることによる後方散乱電子電流 I_{be} 、能動的放射電流 I_a 、絶縁体表面からの漏れ電流 I_s などの電流が流出入している。 ϕ_{sc} は衛星電位である。第 1 項は電子の流入、第 2 項以下はイオンの流入もしくは電子の放出を意味している。また、衛星表面に流出入する電流の模式図を Figure.2 に示す。本研究では後方散乱電子

電流及び能動的放射電流はないものとする。

3.2 Spacecraft plasma Interaction Software

SPIS は、オープンソースで無償公開されており、大学の PC 環境でも動かすことができる。本研究で使用した SPIS は Spis-5.1.8 である。SPIS 内で Gmesh を用いてモデルの作成およびメッシュ化を行い、プラズマ環境を設定し 3 次元 Particle In Cell 法で粒子軌道を時間変化で計算することで各電流成分を求め、それから衛星各表面電位を算出する。Figure.3 は SPIS のモデリングの流れである。SPIS のシミュレーションサイクルは、プラズマ粒子や境界条件を元に電場を計算し、粒子軌道を時間変化で解いて宇宙機の電流の収支や電位を計算する仕組みになっている。Figure.4 にその模式図を示す。荷電粒子の運動をローレンツの運動方程式を解き求め、場についてはポアソン方程式を解く。

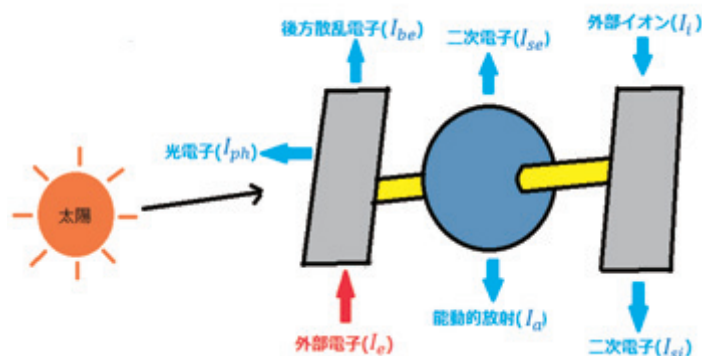


Figure.2 衛星表面の流出入電流

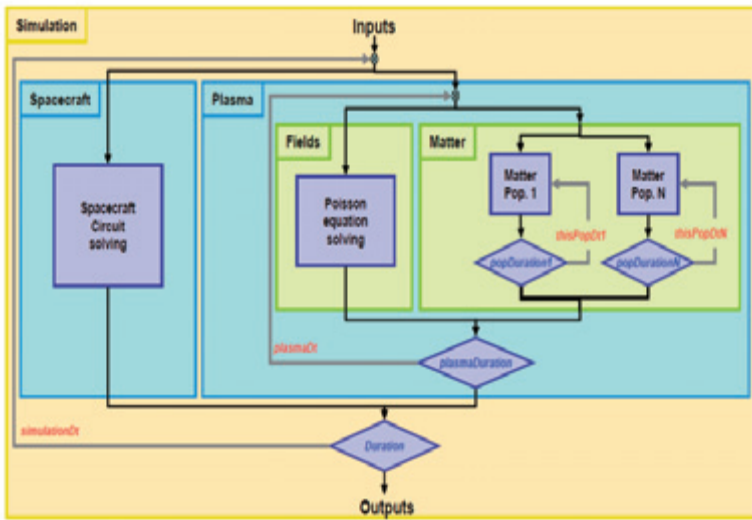


Figure.3 SPIS modelling chain*[3]

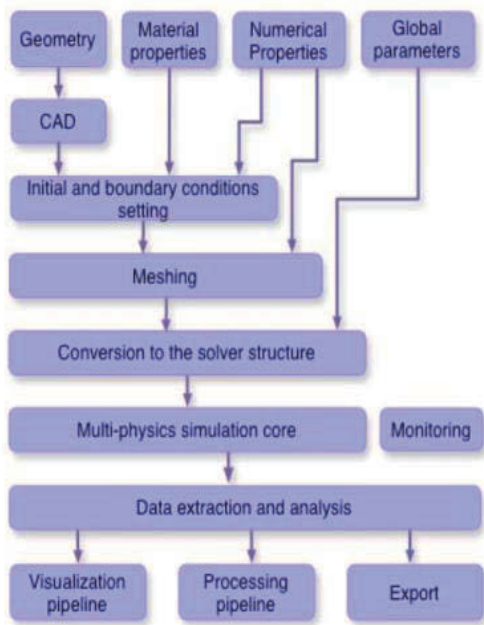


Figure.4 SPIS のシミュレーションサイクル*[3]

4 研究結果

4.1 SPIS のモデリングと実行

SPIS のドキュメント内のユーザーマニュアルに従いモデルの作成やシミュレーションの環境パラメータの設定をして計算ができる。しかし、モデルが複雑になるとエラーが頻発し、シミュレーションが走っても時間がかかってしまう。Figure.5 のように AFRL モデルの形はモデリングで

きているが、シミュレーションが走らないため Round-Robin Simulation はできていない。ユーザーマニュアルだけではモデル作成やメッシュ化、環境設定などでエラーが発生した際、エラー詳細が出ず対処が難しい。エラーについては、SPIS のホームページにある SPIS 使用者用の質問掲示板や、バグ報告掲示板を通して質問できるが、現時点で十分な回答が得られていない。

4.2 SPIS モデル

自作 AFRL モデルのシミュレーションはまだ問題を抱えているが、SPIS のプログラムの中に例として入っている数値衛星モデルを用いた場合、最悪プラズマ環境とされる環境でも短時間でシミュレーションできることが確認できた。その数値衛星モデルを SPIS モデルと呼ぶことにし、Figure.6 に示す。シミュレーションの外境界は約 30×50×30 m の楕円球形で、衛星構体を中心に左右対称に太陽電池と円形アンテナをそれぞれ 2 つずつ持つ構造をしている。全長は約 8×22×3 m である。なお、SPIS モデルのソースファイルがないため、モデル形状を修正することはできないが、AFRL モデルと似ているため、SPIS モデルで最悪プラズマ環境のシミュレーション

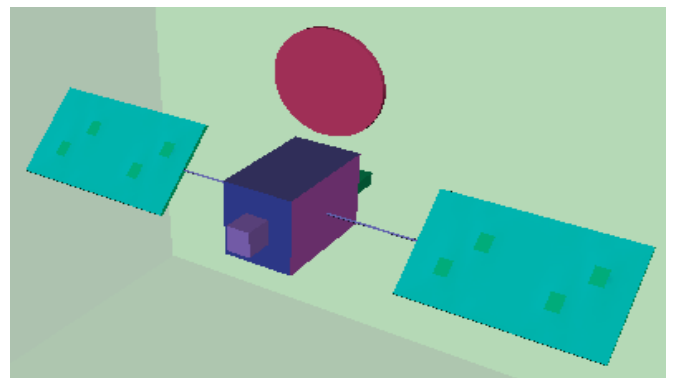


Figure.5 作成中の AFRL モデル

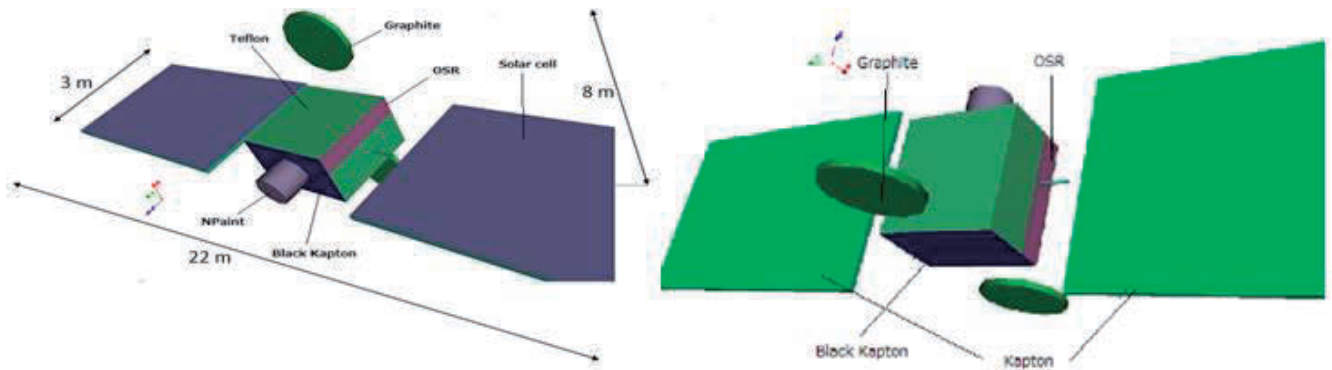


Figure.6 SPIS モデルの形状と表面材質

ンを行った。AFRL モデルを Figure.1 に、SPIS モデルを Figure.6 にそれぞれ図示したが、相違点は大きさ、構造、材質が挙げられる。大きさは SPIS モデルの方が AFRL モデルよりも大きい。構造の違いは、円形アンテナの数、太陽光の入射角の違いによる太陽電池の傾斜角、太陽電池のパッチの有無、金属導電体暴露部の有無が挙げられる。これらの違いをまとめたものを Table.1 に示す。材質の違いは、SPIS モデルには Round-Robin Simulation で用いられていない Teflon が使われている。また、

表面材質の誘電体を導体に変更することはできないが、物性値を Round-Robin Simulation で用いられた物性値と合わせた。ただし、Teflon の物性値は SPIS の初期値を使った。設定した物性値を Table.2 に示す。

Table.1 SPIS モデルと AFRL モデルの相違点

相違点	SPISモデル	AFRLモデル
モデルの大きさ	約8×22×3 m	約4.5×13.5×2.5 m
円形アンテナの数	2 個	1 個
太陽電池の傾斜角	z軸から0 度	z軸から45度
金属導電体暴露部	無	有

4.3 静止軌道最悪プラズマ環境

本研究でシミュレーションしたプラズマ環境を Table.3 に示す。SCATHA-Mullen1、SCATHA-Mullen2、ECSS-E-ST-10-04C(SCATHA 1979)、MIL-STD-1809 は double-Maxwellian 分布のプラズマ環境であり、NASA Worst-Case、ATS-6、LANL-KIT、Galaxy 15 は single-Maxwellian 分布のプラズマ環境である。これらの各環境について日陰、日照の計 16 パターンをシミュレーションした。今回シ

Table.2 シミュレーションに用いた物性値*[1]

Coverglass material	Dielectric Constant	Thickness (m)	Bulk Conductivity ($\Omega^{-1}m^{-1}$)	Atomic Number	δ_{max}	E_{max} (keV)	Proton Yield	Proton Max (eV)	Photoemission ($A m^{-2}$)	Surface Resistivity ($\Omega/square$)	Atomic Wt (amu)	Density ($kg m^{-3}$)
Graphite	1	1.00E-03	-1	4.5	0.93	0.28	0.455	80	7.20E-06	-1	12.01	2250
Aluminum	1	1.00E-03	-1	13	0.97	0.3	0.244	230	4.00E-05	-1	26.98	2699
BlackKapton	3.5	2.50E-06	-1	5	5.2	0.90	0.455	140	5.00E-06	-1	12.01	1600
Kapton	3.5	1.27E-04	1.00E-16	5	2.1	0.15	0.455	140	2.00E-05	1.00E+16	12.01	1600
Solar Cells (MgF2)	3.8	1.25E-04	1.00E-13	10	5.8	1	0.244	230	2.00E-05	1.00E+19	20	2660
OSR	4.8	1.50E-04	1.00E-16	10	3.3	0.5	0.455	140	2.00E-05	1.00E+19	20	2660
NPaint	3.5	1.27E-04	1.00E-16	5	2.1	0.15	0.455	140	2.00E-05	1.00E+16	12.01	1600
Teflon	2.0	1.27E-04	1.00E-16	7	3.0	0.3	0.455	140	2.00E-05	1.00E+16		1000

Table.3 静止軌道最悪プラズマ環境のパラメーター一覧*[1]

Environment Name	Ne1 (m^{-3})	Te1 (eV)	Ne2 (m^{-3})	Te2 (eV)	Ni1 (m^{-3})	Ti1 (eV)	Ni2 (m^{-3})	Ti2 (eV)
SCATHA-Mullen1	2.00E+05	400	2.30E+06	24800	1.60E+05	300	1.30E+06	28200
SCATHA-Mullen2	9.00E+05	600	1.60E+06	25600	1.10E+05	400	1.70E+06	24700
ECSS-E-ST-10-04C (SCATHA 1979)	2.00E+05	400	1.20E+06	27500	6.00E+05	200	1.30E+06	28000
MIL-STD-1809	2.36E+06	3100	6.25E+05	25100	6.00E+05	200	1.20E+06	28000
NASA Worst-Case	1.12E+06	12000			2.36E+05	29500		
ATS-6	2.36E+06	29500			2.36E+05	29500		
LANL-KIT	5.00E+06	13500			2.50E+05	5000		
Galaxy 15	4.58E+04	55600			1.00E+05	75000		

ミュレーションした Table.3 に示した静止軌道最悪プラズマ環境は、Round-Robin Simulation で用いられたものであるが、NASCAP-2k は LANL-KIT、MUSCAT は MIL-STD-1809、Galaxy 15 についての結果は発表されていない。

4.4 シミュレーション結果

Round-Robin Simulation で NASCAP-2k および MUSCAT のシミュレーション時間が約 2000 s だったことを受け、シミュレーション時間は 2000 s に設定した。日照時をシミュレーションする際は、太陽電池に垂直に太陽光が入射するように設定した。シミュレーション結果は全て、衛星表面に流出入する電流の総和がゼロに収束し平衡状態になっていることを確認した。また、SPIS モデルには金属導電体暴露部がないため、通電性を持っている Black Kapton 部の表面電位を衛星構体電位 (Frame) とした。最高表面電位 (Max Chg) は Solar cell、最低表面電位 (Min Chg) は太陽電池の裏側の Kapton 部の電位となった。乖離電圧は、衛星構体電位、最高表面電位、最低表面電位それぞれの差で評価されるので 3 種類の乖離電圧が考

えられるが、衛星にとってワーストになると考えられるのは最高表面電位と衛星構体電位の差 (Max Chg-Frame) の乖離電圧である。

4.4.1 日陰のシミュレーション結果

日陰のシミュレーション結果を Table.4 に示す。Double-Maxwellian では SCATHA-Mullen1 の最低表面電位が最低となり各乖離電圧も最大となった。Single-Maxweillian では最低表面電位が最低なのは ATS-6 であるものの、LANL-KIT が乖離電圧最大環境という結果を得た。Figure.8 に日陰の各環境の乖離電圧を棒グラフにしたものを示す。

4.4.2 日照のシミュレーション結果

日照のシミュレーション結果を Table.5 に示す。Double-Maxwellian では SCATHA-Mullen1 の最低表面電位が最低となり各乖離電圧も最大となった。Single-Maxweillian では ATS-6 の最低表面電位が最低となり各乖離電圧も最大となった。Figure.9 に日照の各環境の乖離電圧を棒グラフにしたものを示す。

Table.4 日陰のシミュレーション結果

単位:[V]

Distribution Type	Environment Name	Max Chg	Min Chg	Frame(BK)	Max-Min	Max-Frame	Min-Frame
Double Maxwellian	SCATHA-Mullen1	-17933	-30129	-26995	12196	9062	-3134
	SCATHA-Mullen2	-14254	-24163	-21436	9909	7182	-2727
	ECSS-E-ST-10-04C	-8810	-15194	-13005	6384	4195	-2189
	MIL-STD-1809	-4732	-8783	-7001	4051	2269	-1782
Single Maxwellian	NASA Worst-Case	-9521	-15594	-14961	6073	5440	-633
	ATS-6	-57503	-67265	-66188	9762	8685	-1077
	LANL-KIT	-19904	-34991	-31780	15087	11876	-3211
	Galaxy 15	-11326	-12468	-12301	1142	975	-167



Figure.8 日陰の乖離電圧

Table.5 日照のシミュレーション結果

単位:[V]

Distribution Type	Environment Name	Max Chg	Min Chg	Frame(BK)	Max-Min	Max-Frame	Min-Frame
Double Maxwellian	SCATHA-Mullen1	-15434	-30401	-20426	14967	4992	-9975
	SCATHA-Mullen2	-12259	-24429	-16262	12170	4003	-8167
	ECSS-E-ST-10-04C	1330	-5878	-24	7208	1354	-5854
	MIL-STD-1809	-4343	-8891	-6094	4548	1751	-2797
Single Maxwellian	NASA Worst-Case	-6480	-13738	-7544	7258	1064	-6194
	ATS-6	-23375	-45647	-26182	22272	2807	-19465
	LANL-KIT	-14865	-30120	-17032	15255	2167	-13088
	Galaxy 15	-688	-1958	-1050	1270	362	-908



Figure.9 日照の乖離電圧

4.4.3 乖離電圧による最悪環境順位

シミュレーション結果をもとに最悪プラズマ環境の順位付けを行った。なお、3種類の乖離電圧の中で、衛星にとってワーストになると考えられるのは最高表面電位と衛星構体電位の差 (Max Chg-Frame) の乖離電圧であるので、この乖離電圧を降べきに並べ順位付けした。Figure.10 にその結果を示す。日陰では Single-Maxweillian の LAN-KIT が、日照では Double-Maxwellian の SCATHA-Mullen1 がそれぞれワースト環境となった。電子とイオンの温度がそれぞれ2成分で表される Double-Maxwellian の方が1成分ずつの Single-Maxweillian より現実に近い分布であると考え注目すると、日陰、日照ともに SCATHA-Mullen1 がワーストな環境となる結果を得た。

4.5 結果比較

シミュレーションモデルは違うが、比較参照として発表されている NASCAP-2k、MUSCAT および SPIS の Round-Robin Simulation の結果をまとめた表を載せる。

NASCAP-2k の結果を Table.6 に示す。最高表面電位と衛星構体電位の差 (Max Chg-Frame) の乖離電圧が衛星にとってワーストになると考えると、日陰では Double-Maxwellian の SCATHA-Mullen1 が、日陰では Single-Maxweillian の NASA Worst-Case が乖離電圧最悪環境となっている。しかし、Double-Maxwellian のみに注目すれば、日陰、日照ともに SCATHA-Mullen1 が乖離電圧最悪環境となっている。また、最高表面電位と最低表面電位の差 (Max Chg-Min Chg) の乖離電圧が衛星にとってワーストになると考えると、日陰、日照ともに ATS-6 が乖離電圧最大環境となっている。

MUSCAT の結果を Table.7 に示す。最高表面電位と衛星構体電位の差 (Max Chg-Frame) の乖離電圧が衛星にとってワーストになると考えると、日陰、日照ともに Double-Maxwellian の SCATHA-Mullen1 が乖離電圧最悪環境となっている。

SPIS の結果を Table.8 に示す。最高表面電位と衛星構体電位の差 (Max Chg-Frame) の乖離電圧が衛星にとってワース

Nighttime			Daytime		
Environment Name	Rank	Distribution Type	Environment Name	Rank	Distribution Type
LANL-KIT	1	Single-Maxwellian	SCATHA-Mullen1	1	Double-Maxwellian
SCATHA-Mullen1	2	Double-Maxwellian	SCATHA-Mullen2	2	Double-Maxwellian
ATS-6	3	Single-Maxwellian	ATS-6	3	Single-Maxwellian
SCATHA-Mullen2	4	Double-Maxwellian	LANL-KIT	4	Single-Maxwellian
NASA Worst-Case	5	Single-Maxwellian	MIL-STD-1809	5	Double-Maxwellian
ECSS-E-ST-10-04C	6	Double-Maxwellian	ECSS-E-ST-10-04C	6	Double-Maxwellian
MIL-STD-1809	7	Double-Maxwellian	NASA Worst-Case	7	Single-Maxwellian
Galaxy 15	8	Single-Maxwellian	Galaxy 15	8	Single-Maxwellian

Figure.10 乖離電圧による最悪プラズマ環境順位

トになると考えると、日陰で Double-Maxwellian の ECSS-E-ST-10-04C が、日照では Single-Maxwellian の LANL-KIT が乖離電圧最大環境となっている。

4.6 まとめ

本研究では構造や材質が完全に一緒ではないものの Round-Robin Simulation に用いられている AFRL モデルに似た形状の数値衛星モデル (SPIS モデル) で静止軌道最悪プラズマ環境のシミュレーションを行った。シミュレーション結果から乖離電圧を算出し、静止軌道最悪プラズマ環

Table.6 NASCAP-2k の Round-Robin Simulation*[1] 単位:[V]

<日陰>	Max Chg	Min Chg	Frame	Max-Min	Max-Frame	Min-Frame
SCATHA-Mullen1	-6752	-11980	-10950	5228	4198	-1030
SCATHA-Mullen2	-6010	-11160	-9736	5150	3726	-1424
ECSS-E-ST-10-04C	-6050	-11430	-9521	5380	3471	-1909
MIL-STD-1809	-3393	-6312	-5509	2919	2116	-803
NASA Worst-Case	-5687	-13230	-9153	7543	3466	-4077
ATS-6	-9733	-18310	-13220	8577	3487	-5090
Galaxy15	-17410	-17820	-17590	410	180	-230
<日照>						
SCATHA-Mullen1	-5236	-11870	-8468	6634	3232	-3402
SCATHA-Mullen2	-4077	-10940	-6573	6863	2496	-4367
ECSS-E-ST-10-04C	-3512	-10870	-5640	7358	2128	-5230
MIL-STD-1809	-1407	-5728	-2267	4321	860	-3461
NASA Worst-Case	-1518	-9286	-2415	7768	897	-6871
ATS-6	-3617	-13910	-5779	10293	2162	-8131
Galaxy15	9.56	-802	2.751	811.56	6.809	-804.751

Table.7 MUSCAT の Round-Robin Simulation*[1] 単位:[V]

<日陰>	Max Chg	Min Chg	Frame	Max-Min	Max-Frame	Min-Frame
SCATHA-Mullen1	-102000	-107000	-105000	5000	3000	-2000
SCATHA-Mullen2	-107000	-112000	-110000	5000	3000	-2000
ECSS-E-ST-10-04C	-67100	-70000	-68600	2900	1500	-1400
NASA Worst-Case	-42900	-43700	-43300	800	400	-400
ATS-6	-63200	-63800	-63500	600	300	-300
LANL-KIT	-71800	-72900	-72300	1100	500	-600
<日照>						
SCATHA-Mullen1	-350	-41500	-16100	41150	15750	-25400
SCATHA-Mullen2	-60	-34000	-10300	33940	10240	-23700
ECSS-E-ST-10-04C	-160	-28800	-7450	28640	7290	-21350
NASA Worst-Case	-40	-14600	-1820	14560	1780	-12780
ATS-6	-70	-19400	-3400	19330	3330	-16000
LANL-KIT	-290	-38800	-15000	38510	14710	-23800

Table.8 SPIS の Round-Robin Simulation*[1] 単位:[V]

<日陰>	Max Chg(Frame)	Min Chg	Max-Min
SCATHA-Mullen1	-25935	-26800.1	865.1
SCATHA-Mullen2	-24943	-26396	1453
ECSS-E-ST-10-04C	-24581.7	-26439.4	1857.7
NASA Worst-Case	-14266.5	-14670.9	404.4
ATS-6	-20401.7	-21824.5	1422.8
LANL-KIT	-32521.1	-34091.2	1570.1

<日照>	Max Chg	Min Chg(Frame)	Max-Min
SCATHA-Mullen1	-14556.7	-17812.2	3255.5
SCATHA-Mullen2	-12057.2	-14265.7	2208.5
ECSS-E-ST-10-04C	-10416.5	-11873.4	1456.9
NASA Worst-Case	-2294.53	-2766	471.47
ATS-6	-5750.13	-6557.49	807.36
LANL-KIT	-15694.1	-20085.4	4391.3

境の順位付けを行ったところ、Double Maxwellian では日陰、日照ともに SCATHA-Mullen1 がワーストで、Single Maxwellian では日陰は LANL-KIT、日照は ATS-6 がワーストという結果を得た。Round-Robin Simulation では Double Maxwellian は日陰、日照ともに SCATHA-Mullen1 がほぼワーストであったので今回のシミュレーション結果も同傾向となった。Single Maxwellian については、NASCAP-2k による LANL-KIT のシミュレーション結果が発表されていないが、ATS-6 や LANL-KIT がワーストとなる場合が多いことが分かった。

今後の予定

SPIS で AFRL モデルを完成させ、各静止軌道最悪プラズマ環境のシミュレーションを行い、Round-Robin Simulation を完成させることで、衛星表面帯電の最悪プラズマ環境の国際規格の作成に貢献したい。

参考文献

- [1] Kazuhiro Toyoda and Dale C. Ferguson, 「Round-Robin Simulation for GEO Worst-Case Environment for Spacecraft Charging」, Spacecraft Charging Technologies Conference 2014 - 171 Paper
- [2] 宇宙航空研究開発機構, 「帯電・放電設計標準」, 2014,
<http://sma.jaxa.jp/TechDoc/Docs/JAXA-JERG-2-211A.pdf>
- [3] SPIS 5.1 User Manual
- [4] Feng Weiquan and LIU Yenan, 「Simulation for Worst Case Spacecraft Charging Environment」, (「宇宙機帯電電位見積りに関する国際標準化」国際ワークショップ発表資料), 2014