

帯電解析ソフトのための軌道上宇宙環境観測データ

中村 雅夫 (情報通信研究機構)

はじめに

帯電による衛星障害の危険性は、近年の衛星の大型化・高機能化による太陽電池の出力電圧と衛星バス電圧の上昇や電子機器の高度集積化により高まっている。日本の大型衛星 ADEOS-II の事故も、帯電が引き金になったと考えられることから、その重要性があらためて見直されている。衛星帯電は、表面帯電(surface charging)と内部帯電(internal charging)とに分けられ、ここでは表面帯電と軌道上宇宙環境に関して述べる。表面帯電は、衛星表面に流れ込む電流の収支の結果、衛星の各部位に電荷が蓄積されることにより引き起こされる。表面帯電にも、周辺プラズマに対する絶対帯電(absolute charging)と表面素材間や衛星構造体とに生じる乖離電圧(differential voltage)による表面(局所)帯電(differential charging:以降、表面帯電はこの意味で使用する)がある。絶対帯電は、周辺プラズマに対する帯電で、イオン・電子や光電子放出など外部の宇宙環境の変化に対して、ミリ秒単位の短い時間で追従変化する。一方、表面帯電では、絶対帯電した各部間で、乖離電圧が誘電体の光電子放出係数や2次電子放出係数の違いにより数秒から数分の時間で発達する。乖離電圧が敷居値をこえると衛星表面で放電が起き、衛星に障害を引き起こす場合がある。一般に、絶対帯電が小さいと乖離電圧もあまり発達せず、逆に絶対帯電が大きいと乖離電圧も発達する傾向がある。表面帯電を防ぐため、衛星各部位を衛星構体にアースし、誘電体は表面を伝導性のある膜やコーティングで覆うことが推奨されている。しかし、大型商業衛星ではコストの問題で必ずしも徹底されておらず、熱膨張・収縮やデブリ・宇宙塵の衝突による亀裂や剥離などを考えると、表面帯電を完全に防ぐことは難しい。本報告書の別の箇所でも述べられているように、ADEOS-II の事故では、太陽パドルと本体をつなぐ電力線の束(ハーネス)がアースされていない熱制御材(MLI)により包まれており、その熱制御材の帯電・放電の繰り返しと電力線の規格以上の高温の熱サイクルとで、電力線皮膜が劣化し亀裂が入り、最終的にオーロラ帯電子の異常増大による帯電から放電がおこり、それを引き金に持続放電が起き、雪崩的に短絡または開放したものと考えられている。

衛星帯電と宇宙環境

衛星帯電を考える上で、衛星軌道毎の宇宙プラズマ環境の理解が重要である。それら特徴をまとめたものを表1に示す。ここで示した値は平均的なもので、磁気圏擾乱により大きく変動する。宇宙空間プラズマは、イオンと電子の2種類から成り、正負の電荷がほぼ同数存在し準中性状態になっている。衛星表面に流れ込む電流は、主として、イオン電流、光電子電流、2次電子電流があり、流れ出る電流には、電子電流がある。イオンと電子が同程度の温度ならば、電子の方が軽いため熱速度が大きく、衛星に流れ込む電子が多くな

り負の電荷が蓄積されるため、衛星は負に帯電する。静止軌道の日蝕では、周辺の電子温度のオーダーまで負に帯電する。一方、日照では、電子電流は数 $\mu\text{A}/\text{m}^2$ に対して、光電子電流が数十 $\mu\text{A}/\text{m}^2$ と大きく、光電子の平均エネルギー程度（数 V）の正の値に帯電する。しかし、サブストームが起きると、電子の密度・温度が上昇し、光電子電流を超えて電子電流が流れ込み負の値に帯電する。低軌道では、プラズマ密度が大きく、イオン・電子電流が数 mA/m^2 のオーダーになり、僅かな帯電で電流の収支が釣りあってしまうため、一般に発電電圧による電位差が問題になる程度の帯電しか得られない。しかし、極軌道のオーロラ帯で、時として keV 程度のオーロラ電子の増加とともに電離層の低温プラズマ密度の減少が起こると、kV 程度まで帯電し、衛星障害を起こすことが報告されている。

また、衛星電位を決める重要なパラメータにシース長がある。シース長とは、荷電粒子のクーロン相互作用がプラズマの集団的振る舞いにより遮蔽される距離である。一般にシース長は、プラズマの基本長であるデバイ長（プラズマ温度のルートに比例し密度に逆比例）のオーダーで、温度が高く密度が低い時に長く、その逆は短くなる。静止軌道では、衛星の大きさがシース長よりずっと小さくなるため、準クーロ的な扱いが可能になる。逆に低軌道では、シース長が衛星に対して小さくなるため、プラズマシースは衛星の形状・姿勢・速度に依存する。その影響の顕著なものとして、低軌道衛星後方にできるウェーク (wake) 領域がある。低軌道衛星は約 8 km/s で移動しており、イオンの熱速度は約 1 km/s である一方で電子の熱速度は約 100 km/s のため、ウェークには、イオンが熱運動では入り込めず、電子のみが流入し、負の電位となる。ウェークでは、衛星の形状・姿勢・速度・プラズマ環境により電位構造が変わり、時として大きな電位を作り出し得るため、今回開発する帯電解析ソフトの重要な解析対象の一つとなっている。

帯電解析ソフトと軌道上宇宙環境データ

これまで述べたように、軌道上宇宙環境は衛星帯電を決める重要なパラメータである。そこで、まず衛星表面帯電解析ソフトのインプットとして、衛星不具合の予防・解析を目的とした最悪値のデータを調べておく必要がある。実際に衛星障害が頻発するのは、静止軌道では磁気嵐やサブストーム時の真夜中から朝側にかけての領域で、極軌道では ADEOS-II の事故に見られるようにオーロラ帯で、keV オーダーの電子密度の増加により引き起こされる。これら最悪値は、衛星の軌道（高度・軌道傾斜角）と運用時期（太陽活動周期）とに依存して決まる。

また、衛星バス電圧の上昇にともない持続放電による太陽電池損失の発生電力低下が問題となっており、衛星軌道上の帯電時間・放電回数を予測しリスク評価を行う必要がある。以前に、静止軌道衛星の ETS-VIII と WINDS に対して、NASCAP/GEO を用いて解析をおこなった。その解析では、まず LANL 静止軌道衛星の観測データを、衛星の地方時（太陽方向を正午として衛星位置を時刻で表したもの）、イオン・電子の密度・温度をパラメータとしてマトリックスに分類し、各マトリックスの滞在時間から期待値を求めた。その様子

を図1に示す。次に、マトリックスの代表パラメータで衛星の帯電解析をおこない、その結果を用いて帯電時間や放電回数を統計的に計算し、太陽電池損失のリスク評価をおこなった。その結果を図2に示す。この解析結果は、軌道上環境統計データベースが同じでも、衛星の形状・表面素材により、帯電時間や放電回数の特徴が異なることを示している。今後、極軌道や低軌道でもプラズマ環境統計データベースを作り、帯電解析ソフトのインプットとして用いることで、各衛星のリスク評価をおこなうことができるようにする必要がある。

まとめ

衛星帯電には、軌道上宇宙環境が重要なパラメータであり、帯電解析ソフトのインプットパラメータとして、宇宙環境計測データから軌道毎に最悪値と軌道上環境統計データベースを用意する必要性を述べた。

最後に、内部帯電について簡単に述べて終わりにする。内部帯電は、衛星内部の基盤などの誘電体や接地が取られていない導体や回路に、衛星表面を通り抜けてきた電子の電荷が蓄積することにより起こる帯電現象である。その電界が絶縁強度を超え放電や絶縁破壊がおこると、表面帯電より衛星の電気回路に近いところで起こるので重大な影響がある。内部帯電は、百 keV 程度のエネルギーの電子フラックスの密度と持続時間が重要なパラメータとなり、予防にはシールド実行長を厚くする衛星設計とともに、電子フラックスが増大する磁気嵐を、宇宙天気予報の一環として予測し、事前に回避オペレーションすることが考えられる。

軌道	密度(cc)	温度(eV)	衛星帯電の決定要因	ノミナル値	最悪値(絶対帯電)	最悪値発生要因
GEO	<~10 ² (~10 ² : substorm)	<~10 ⁴ (~10 ⁵⁻⁶ : substorm)	電子フラックス 日照	数Vの正	10kV以上の負	サブストームによる電子フラックスの増加
PEO	~10 ³⁻⁶ (~10 ⁴ : auroral electron)	<~10 ² (~10 ⁴ : auroral electron)	オーロラ帯電子 日照 電離層プラズマ密度 衛星電圧	衛星電圧程度の負	1kV以上の負	オーロラ発生による電子フラックスの増加 電離層プラズマ密度の減少
LEO	~10 ²⁻⁶	<~10 ²	電離層プラズマ密度 衛星電圧	衛星電圧程度の負		

表1：衛星軌道毎の宇宙プラズマ環境と衛星構造体電位の決定要因。

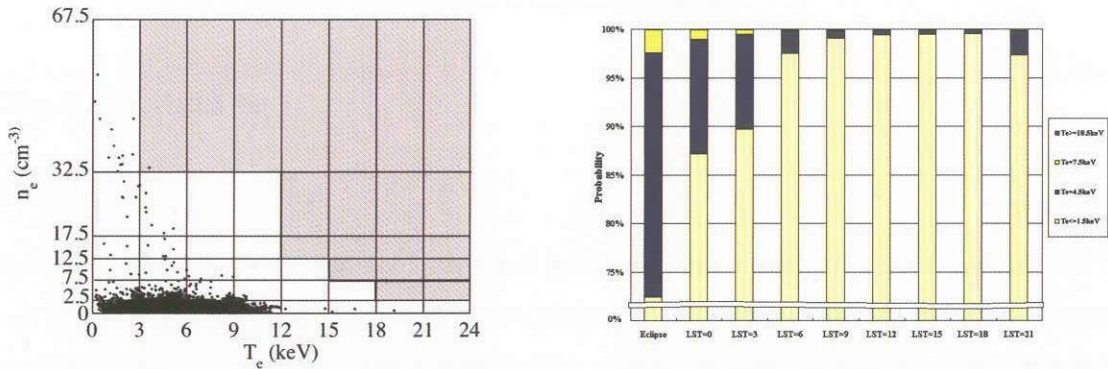


図1：静止軌道プラズマ環境を地方時、電子・イオンの温度・密度をパラメータとして分類し（左）、電子温度の確率分布を地方時毎に分けて示したグラフ（右）。

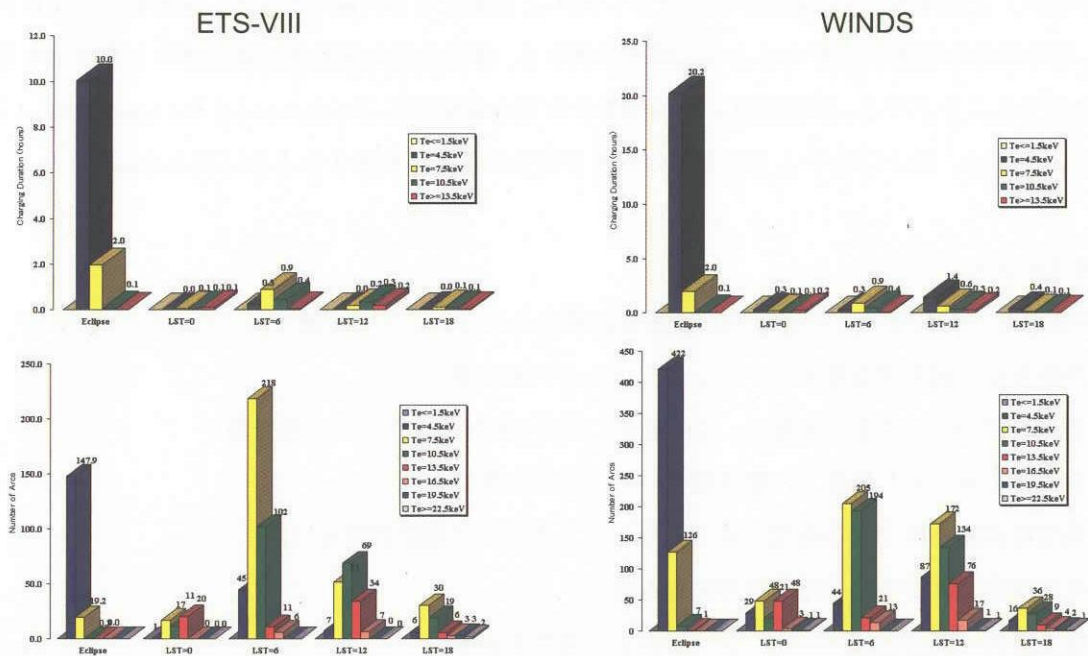


図2：静止軌道衛星 ETS-VIII と WINDS の帯電解析結果。衛星地方時と電子温度で分類した1年間あたりに乖離電圧 ΔV が 400V を超える積算時間（上）と積算時間を乖離電圧 ΔV が 400V に達する秒数で割ることで見積もったトリガー放電回数（下）。