

LANL 静止軌道衛星のプラズマデータを用いた衛星電位解析

小田光信^[1] 中村雅夫^[1] 趙孟佑^[2]

^[1]大阪府立大学 ^[2]九州工業大学

要旨

人工衛星に発生する障害のうち、約半数が帯電に起因した放電によるものである。この人工衛星の帯電を引き起こす要因はプラズマ環境であるので、そのプラズマ環境の解析は重要である。LANL 静止軌道衛星の観測データから算出したプラズマの温度や密度、衛星電位などのデータが MPA キーパラメータとして NASA の CADweb で公開されている。しかしこの中に、衛星電位やプラズマの温度や密度が正しく算出されていないと考えられるデータが多数含まれていると考えられる。その為、オリジナル観測データであるプラズマのエネルギースペクトラムを用いて衛星電位解析を行い、キーパラメータの値との比較を行った。

1 序論

人工衛星に発生した障害の約半数がプラズマ環境の起因した人工衛星の帯電、放電によるものであるという報告がある [1]。その為プラズマ環境の解析は重要である。

静止軌道プラズマ環境のデータの一つにロスアラモス国立研究所 (LANL) が観測したデータがある。LANL は同時に数機の静止軌道衛星を用いて観測を行っており、温度、密度、衛星電位といったキーパラメータのデータセットが一般に公開されている。これは約 86 秒間隔のデータで、LANL が観測に用いた 7 機の静止軌道衛星すべてのデータを合計すると約 38 年分のデータがある。LANL は衛星を用いてイオン、電子のエネルギースペクトラムを観測し、それらから温度、密度といったキーパラメータを算出している。しかし、キーパラメータのデータセットには正しい値とは考えにくい

値が含まれている [2]。これらは、観測されたデータからキーパラメータを算出する際に何らかの間違がある可能性がある。

衛星電位の値が正しいか疑わしいデータ数は全体の約 34 パーセントを占めており、疑わしいデータを除くか除かないかで統計結果に影響が出る。そこで本研究では衛星帯電電位の算出方法に注目して解析を行った。

2 LANL データ

静止軌道のプラズマ温度やプラズマ密度、衛星電位などのキーパラメータのデータセットが NASA の Goddard Space Flight Center によってインターネットで公開されている (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>)。これはロスアラモス国立研究所 (Los Alamos National Laboratory:LANL) の静止軌道

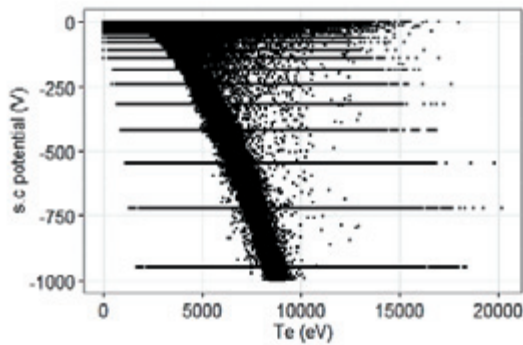


図 1: 電子温度と衛星電位の散布図

衛星を用いた観測から算出されている。LANLは人工衛星を用いてイオン、電子のエネルギースペクトラムを観測し、その結果から衛星帯電電位を算出している。この衛星帯電電位を用いてプラズマの温度、密度を算出している。L4衛星(LANLが観測に使用した衛星の一つ)の観測から算出された電子温度と衛星電位の散布図を図1に示す。ここで電子温度は、磁力線に対し平行な成分と垂直な成分の平均値を用いた。また衛星電位が-1000 Vから0 Vまでのデータのみを表示している。通常電子温度が高くなるほど衛星は深く負に帯電すると考えられる。しかし図1をみると、ある特定の衛星電位の値をとっているデータは広い温度領域に分布しているのでこれらのデータの衛星電位の値は正しくない可能性が高いと考えられる。また衛星電位の値が正しくない場合、その値を用いて算出される温度、密度の値は正しくないと考えられる。LANLのキーパラメータのデータセットについて7機の衛星が観測したデータ数を合計すると14230365であり、衛星電位がこれら特定の値であるデータ数は4857429で全体の約34パーセントを占めている。そこで観測データであるイオン、電子のエネルギースペクトラムを用いて衛星帯電電位の解析を行った。

2.1 解析データ

本研究で解析に用いたイオン、電子のエネルギースペクトラムは Magnetospheric Plasma Analyzer(MPA)によって観測されたものである。MPAでは1 eVから40 eVまでの40個のエネルギーチャンネルで観測しており、全方位(全立体角のうち約92%をカバー)のフラックスを観測できる。そのフラックスから立体角について平均をとったもの(spin-angle-average)を算出している[3]。この平均をとったものを用いて解析を行った。本研究ではLANLが観測したデータのうち、L4衛星が2003年1月12日、2003年2月16日に観測したフラックスのエネルギースペクトラムを用いて解析を行った。

2.2 衛星帯電電位とエネルギースペクトラム

衛星の帯電について興味があるのは衛星が深く負に帯電するケースである。衛星が深く負に帯電すると衛星ポテンシャルの影響でイオンは加速して、電子は減速して衛星に向かってくる。衛星周囲のイオンに注目すると、ポテンシャルエネルギーの分だけ運動エネルギーが増加して観測される。つまり理想的にはポテンシャルエネルギーよりも低いエネルギーの粒子が存在しなくなる。このことをカットオフと呼び、観測される粒子のエネルギーの下限をカットオフエネルギーと呼ぶ。無限遠を基準にした衛星の電位を Φ (V)、カットオフエネルギーを E_c (eV)とすると $E_c = -\Phi$ となる。この E_c を検出することで衛星電位 Φ が求まる。

衛星電位を解析する際、観測されたプラズマのエネルギースペクトラムを使用する。観測値は微分フラックス(単位は $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{st}^{-1}\text{eV}^{-1}$)で記述されている。ここで微分フラックス F ($\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{st}^{-1}\text{eV}^{-1}$)と

位相空間の分布関数 f (m^{-6}s^3) との間には以下の関係が成り立つ.

$$f(E) = \frac{m^2}{2Ee^2} F(E) \quad (1)$$

ここで, m は粒子の質量, e は単位電荷, E は観測エネルギーを表す. 式 (1) を用いて観測データを分布関数に変換し, 衛星周囲のイオンが得たエネルギー E_c を検出する. プラズマの分布関数としてマクスウェル分布を想定する. マクスウェル分布は平衡状態における粒子の分布を表す. 式 (2) に温度の関数としたマクスウェル分布を示す. ここで, n は粒子の密度, m は粒子の質量を表している.

$$f(E) = n \left(\frac{m}{2\pi eT} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E}{T}\right) \quad (2)$$

図2に人工衛星が帯電した場合に観測されるイオンの分布関数の変化を示す. 図2は両対数軸で描かれている. 左側の点線で描かれた曲線は帯電前のイオンの分布関数(マクスウェル分布)を表し, 右側の実線で描かれた曲線は帯電後のイオンの分布関数(加速されたマクスウェル分布)を表している. ここで式(2)において $m_i = 1.67 \times 10^{-27}$ kg, $T_i = 100$ eV, $n_i = 0.05 \text{ cm}^{-3}$ とした. 衛星ポテンシャルによってイオンは加速されて衛星に向かってくる. このとき各イオンは $E_c = 2000$ eV のエネルギーを得る. 帯電後に観測される分布はマクスウェル分

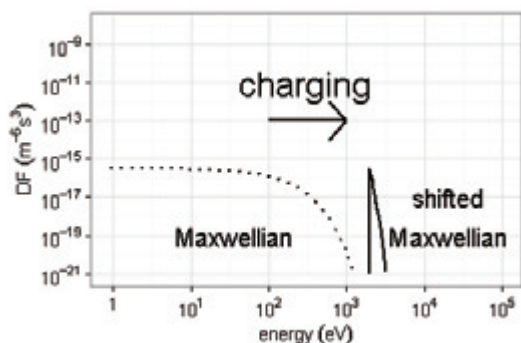


図2: イオンの分布関数の変化

布が E_c だけ平行移動したもので, shifted-maxwellian と呼ばれる. 図2の実線のようにあるエネルギー (E_c) より低いエネルギー値の粒子が存在しなくなる(カットオフ). このカットオフを検出することで人工衛星の電位を $\Phi = -E_c$ として算出することができる.

ここでワンカウントという観測機器の特徴的値を考える. ワンカウントは各エネルギーチャンネルに対して一つの粒子が観測されたときの平均のフラックス量を表している. 本研究では [3] を参考にして微分フラックスで与えられたエネルギースペクトラムに対し $10^5/E$ という値をワンカウントレベルの目安として用いた. つまり分布関数で与えられたエネルギースペクトラムに対するワンカウントレベルはイオン, 電子ごとに $10^5/E$ という値を式 (2) を用いて変換することで得られる.

3 2月16日の衛星帯電

2月16日の衛星電位のプロットを図3に示す. 図3をみると a で囲まれた時刻 (11点, 約15分間) で衛星は深く負 (-2000 V から -8000 V) に帯電していることを示している. この a の時間帯の衛星電位の値が正しいか調べる. 図4に a の時間帯のうち初めの5点 (14時24分40秒から14時30分24

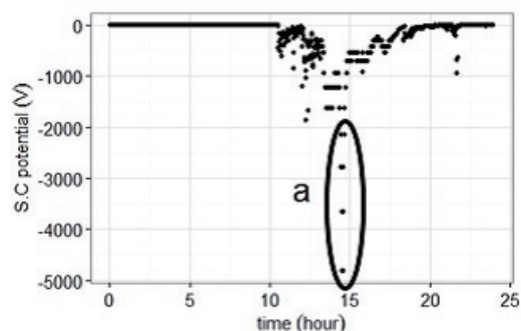


図3: 2003年2月16日のL4衛星電位のプロット

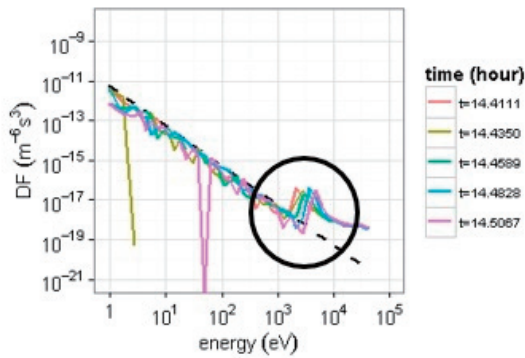


図 4: a の時間帯の初めの 5 点のイオンのエネルギースペクトラム

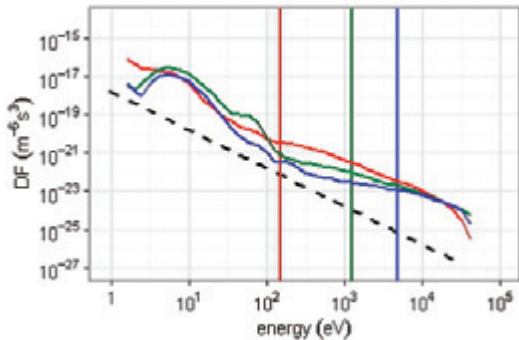


図 5: 帯電によるエネルギースペクトラムの変化

秒まで)のイオンのエネルギースペクトラムを示す。ここで図の点線はワンカウントを表している。図 4 において 10^3 から 10^4 のエネルギー範囲でピークとカットオフが確認できる。つまりこれらの時刻では衛星は実際に帯電していたと考えられる。

衛星が深く負に帯電した場合の電子のエネルギースペクトラムの変化をみる。図 5 の赤色、緑色、青色の線はそれぞれ 12 時 1 分 18 秒 (-151 V), 14 時 18 分 56 秒 (-1240 V), 14 時 30 分 24 秒 (-4820 V) のエネルギースペクトラムを示している。ここで 12 時 1 分 18 秒 (-151 V) は衛星があまり負に帯電していない時刻のエネルギースペクトラムの例であり, 14 時 30 分 24 秒 (-4820 V) は L4 衛星が 2003 年 2 月 16 日に観測した中で最も衛星が負に帯電した時刻のエネル

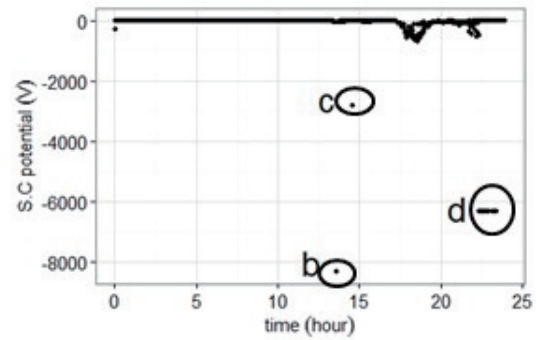


図 6: 2003 年 1 月 12 日の L4 衛星電位のプロット

ギースペクトラムである。14 時 18 分 56 秒 (-1240 V) は両者の中間のエネルギースペクトラムの例である。また縦線はそれぞれの時刻でのキーパラメータの衛星電位の値を示している。ここで図の点線はワンカウントを表している。図 5 より衛星が負に帯電していくにしたがって、カットオフエネルギーよりも低いエネルギー帯 (図 5 では 10^2 eV から 10^3 eV のエネルギー帯をみると分かりやすい) でフラックスが減少していることが確認できる。

4 1 月 12 日の衛星帯電

1 月 12 日の衛星電位のプロットを図 6 に示す。図 6 に示した 3 箇所 b(13 時 37 分 55 秒), c(14 時 33 分 49 秒), d(22 時 21 分 11 秒から 23 時 22 分 49 秒までの連続していない 14 点) の時刻で衛星が深く負に帯電していることを示している。b, c, d の三つの時間帯のうち b の時刻に注目すると, 1 点で -8320 V に帯電していたことを示している。この衛星電位の値が正しいか調べる。b の時刻 (13 時 37 分 55 秒) とその前後の時刻それぞれのイオンのエネルギースペクトラムを図 7 に示す。図の縦線は b の時刻 (13 時 37 分 55 秒) のキーパラメータの衛星電位 (イオンのカットオフエネルギー) を示している。図 7 をみても b の時刻 (13 時 37 分 55 秒) で

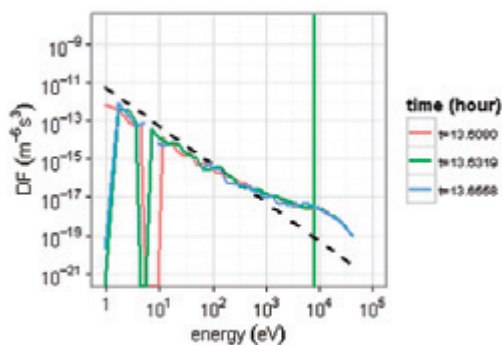


図 7: b の時刻とその前後の時刻のイオンのエネルギースペクトラム

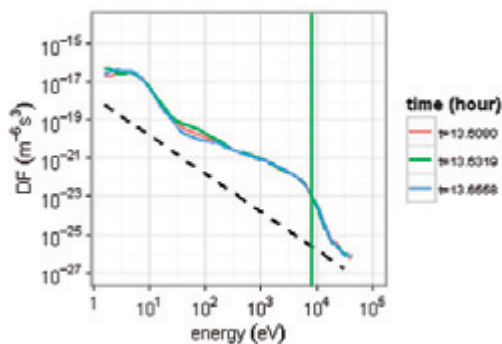


図 8: b の時刻とその前後の時刻の電子のエネルギースペクトラム

イオンのエネルギースペクトラムに明らかかなカットオフは確認できない。この理由は LANL がカットオフの検出に用いたプログラムがエネルギースペクトラムのわずかな起伏をカットオフと誤認したためであると考えられる。

同時刻の電子のエネルギースペクトラムを図 8 に示す。図の縦線は b の時刻 (13 時 37 分 55 秒) のキーパラメータの衛星電位の値を示している。図 8 をみても b の時刻とその前後の時刻でエネルギースペクトルは大きく変化していないことが確認できる。実際に b の時刻にあるように衛星が負に深く帯電していた場合、衛星電位の値より低いエネルギー帯でフラックスが減少しているはずである。つまり b の時刻の衛星電位の値は正しくないと考えられる。また

c, d の時間帯のエネルギースペクトルも b と同様であり、c, d の時間帯の衛星電位の値は正しくないと考えられる。算出された衛星電位と他のキーパラメータの関係をみるために図 9 に 1 月 12 日の電子密度の値を時間変化を示す。図 9 の赤い点でプロットされたデータは b, c, d の時刻のデータである。図 9 より衛星電位の値が正しくない箇所では密度の値が極端に不連続になっている。電子密度だけでなく電子温度、イオン密度、イオン温度についても同様に不連続を示す。つまり、衛星電位の値が正しくないで他のキーパラメータの値も正しく算出されていないと考えられる。

5 まとめ

LANL の静止軌道プラズマ環境のキーパラメータデータセットには衛星電位の値が正しいか疑わしいデータが含まれている。疑わしい衛星電位の値が正しいか調べたところ、正しいデータと正しくないデータの両方が含まれていることが分った。また衛星電位の値が正しくない場合その時刻の温度、密度の値は時系列表示で極端な不連続が見られ正しくない可能性が高い。つまりキーパラメータのデータセットを用いて統計を行うときには注意が必要である。

本研究で、衛星電位の値が正しいかどうか

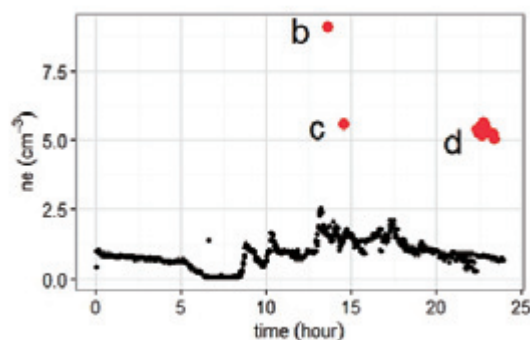


図 9: 1 月 12 日の電子密度の値を時間変化

かの判定はイオン，電子のエネルギースペクトラムを時系列解析することで行えることを示した。したがって疑わしい衛星電位をとっているデータについてエネルギースペクトルの時系列解析を行い，より信頼性の高いキーパラメータのデータセットを作成することができる。

参考文献

- [1] H. C. Koons et al, The impact of the space environment on space systems, Aerospace Report TR-99(1670)-1, (7/20/1999).
- [2] 米田 麻人，サブストームに伴う最悪宇宙環境の極値統計解析，平成 26 年度大阪府立大学修士論文，2014
- [3] V. A. Davis, M. J. Mandell, M. F. Thomsen, Representation of the measured geosynchronous plasma environment in spacecraft charging calculations, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 113, A10204, doi:10.1029/2008JA013116, 2008