

地球極軌道におけるプラズマ環境の

衛星観測データ統計解析

浜永 貴光、 趙 孟佑 (九州工業大学)

1. はじめに

2003年10月、日本の極軌道衛星 ADEOS-II に全損事故が発生した。これは周辺プラズマとの相互作用による電力伝送部の帯電-放電現象が原因であることが究明された[1]。プラズマ中における宇宙機の電位は宇宙機に流れる正負の電流のバランスによって決まる。地球の極域では低エネルギーの周辺プラズマと高エネルギーのオーロラ電子が同時に存在する環境であり、周辺プラズマの密度の減少やオーロラ電子フラックスの増加により宇宙機は周辺プラズマに対して負に帯電する。このとき周辺プラズマに対する宇宙機の電位と、それに対する絶縁体との電位差が放電閾値を超えると放電が発生し、最悪の場合それが全損事故を引き起こす。ADEOS-II の事故以来、宇宙機帯電についての認識が JAXA や宇宙企業内で高まっている。

このような背景から、九州工業大学では JAXA の委託により汎用の宇宙機帯電解析ソフト MUSCAT (Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool) の開発が行われている。本研究では MUSCAT で使用する極軌道のプラズマ環境のデータベースの作成が目的である。極軌道衛星 DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) に搭載されている機器が観測した背景イオン、降下電子のデータを用いオーロラ帯において宇宙機が遭遇するプラズマ環境の統計解析を行った。

2. 解析データ

解析には DMSP に搭載されている機器、SSJ/4、SSIES のデータを使用している。

SSJ/4 は 30eV~30keV のエネルギーを持つ粒子のエネルギーフラックスを 20 個のチャンネルで毎秒観測している[2]。各チャンネルによってある幅のエネルギーを持つ

粒子を観測している。SSJ/4 のデータからオーロラ電子による電流密度を算出し統計解析に使用した。電流密度の算出過程を以下に示す。

オーロラ電子は立体角 2π で等方的速度分布をしていると仮定し、図 1 に示すように $0 < \theta < \pi$ 、 $-\pi/2 < \Phi < \pi/2$ の極座標系を考える。

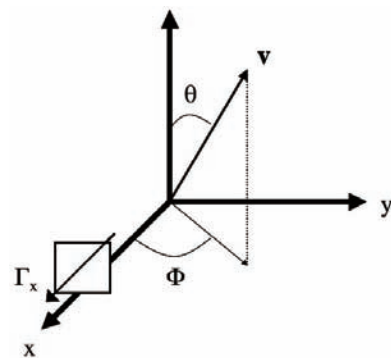


図 1 粒子フラックスと速度ベクトル

図 1 における粒子のエネルギーフラックスは以下に示す式(1)から求められる。ここで、 Γ_{flux} は SSJ/4 の観測値、 v は各チャンネルに入る粒子の速度である。

$$\begin{aligned} \text{EnergyFlux}(J / s / m^2) &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\phi \int_0^{\pi} d\theta \int_{v_a}^{v_b} dv \cdot v \sin\theta \cos\phi v^2 \sin\theta f(v) \frac{1}{2} m v^2 \\ &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos\phi d\phi \int_0^{\pi} \sin^2\theta d\theta \int_{v_a}^{v_b} v^3 \frac{1}{2} m v^2 f(v) dv \\ &= 2 \cdot \frac{\pi}{2} \int_{v_a}^{v_b} v^3 \frac{1}{2} m v^2 f(v) dv \\ &= \Gamma_{flux} \cdot \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} \sin\theta d\theta \\ &= 2\pi \Gamma_{flux} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)から分布関数を求めると式(2)のようになる。ここで、 $v_{i,max}$ 、 $v_{i,min}$ はそれぞれチャンネル i で観測できる最小、最大の粒子の速度である。

$$f(v) = \frac{2\Gamma_e(E)}{v^3 \frac{1}{2}mv^2} \cdot \frac{1}{v_{i,max} - v_{i,min}} \quad (2)$$

式(2)で得られた分布関数を積分することによりオーロラ電子の密度が算出できる。式(3)にオーロラ電子の密度の式を示す。

$$n = 4\pi \int_{v,a}^{v_i,b} f(v)v^2 dv \quad (3)$$

式(2)で得られた分布関数と式(3)で得られた密度からオーロラ電子の電流密度が算出できる。式(4)にオーロラ電子の電流密度の式を示す。

$$\begin{aligned} j &= e \langle nv \rangle \\ &= e \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} d\phi \int_0^{\pi} d\theta \cdot v \sin\theta \cos\theta v^2 \sin\theta f(v) dv \\ &= e \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos\phi d\phi \int_0^{\pi} \sin^2\theta d\theta \int_{v_{i,a}}^{v_{i,b}} v^3 f(v) dv \\ &= e\pi \int_{v_{i,a}}^{v_{i,b}} v^3 f(v) dv \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、SSJ/4 の観測値はエネルギーフラックスのみであるため、実際にオーロラ電子がどのくらいの立体角で降下してきているのかを見積もることは難しい。立体角を 2π としているため、実際のオーロラ電子の電流密度より大きく見積もっていると思われる。

SSIES は背景プラズマの密度、温度、速度を観測しており、サンプリングレートは4秒である[3]。SSIES が観測した背景イオンの密度のデータを使用した。イオンの電流密度もオーロラ電子の場合と同様、 $j=e\langle nv \rangle$ から求めら

れるが、このときイオンの速度は宇宙機の速度に対して無視できる程小さいので、速度 v には DMSP の軌道速度 7.5km/s を使用し背景イオンの電流密度を算出した。

解析に使用したデータは[2]、[3]から入手した DMSP F13、F14 が観測した 2003 年の 1 月、4 月、7 月、10 月の 4 ヶ月分のデータである。このデータの内、磁気緯度 45~90° において SSJ/4、SSIES のデータを同時に観測しているものだけを抜き出し解析を行った。データは 1 秒を 1 データとすると、約 22 万データである。

3. 解析結果

2003 年 1 月、7 月の極域における熱イオン密度の平均値を図 2 に、オーロラ電流密度の平均値を図 3 に示す。電離層プラズマは主に太陽光紫外線による中性大気の大気密度により生成されるため、太陽光が強く当たる所ほどプラズマ密度が高くなる。1 月は北半球では冬、南半球では夏であるため、太陽光の強い夏の半球でイオン密度が高くなっている。同様に、7 月では北半球は夏、南半球は冬である。平均値で見ると、7 月の南半球で最もイオン密度は低くなるのがわかる。緯度 -50~-80°、経度 0~100° の領域では密度が低い。これはこの領域の中性大気密度が低いためだと思われる。MSIS E 90 や IRI 2001 の中性大気モデルでも南半球に中性大気密度の低い領域が存在する。一方オーロラ電流は季節によるはっきりとした違いは見られない。また、オーロラ帯で特に大きな電流が流れていることがわかる。

図 4 にオーロラ電流がイオン電流を上回った場所を示す。そのほとんどがイオン密度が最も低くなり易い 7 月の南半球であることがわかる。このときのイオン電流とオーロラ電流の関係を示したものが図 5、磁気緯度、磁気地方時の関係を示したものが図 6 である。イオン密度が $10^{10}m^{-3}$ 以下になるとイオン電流はオーロラ電流を下回る可能性が出てくる。イオン密度が 10^7m^{-3} 以下と非常に低くなると、オーロラ電流が平均値程度の大きさの場合でもイオン電流を上回る。また、オーロラ電流がイオン電流を上回る時、そのほとんどが磁気緯度 60° 以上の高緯度で起きる。

オーロラ電流がある値以上になる確率、イオン密度がある値以下になる確率を北半球、南半球それぞれ図 7、8 に示す。宇宙機の帯電条件の一つとして周辺イオン密度の減

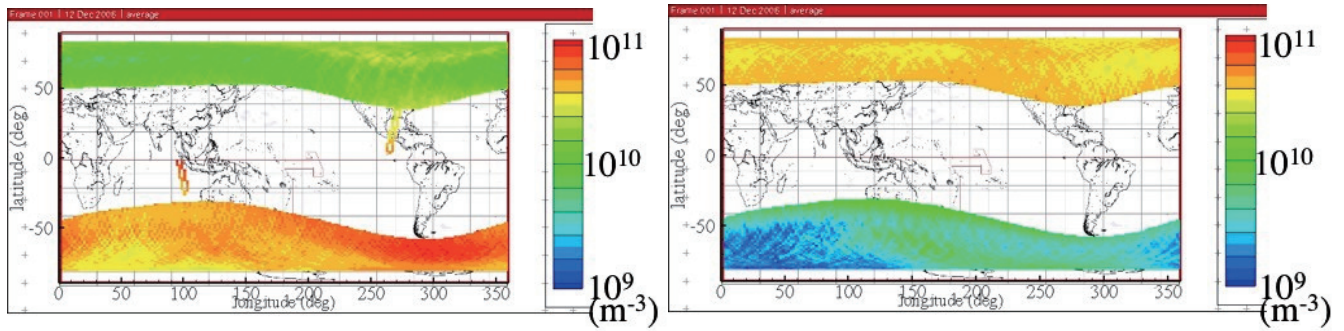


図2 2003年1月(左)、7月(右)のイオン密度の平均値

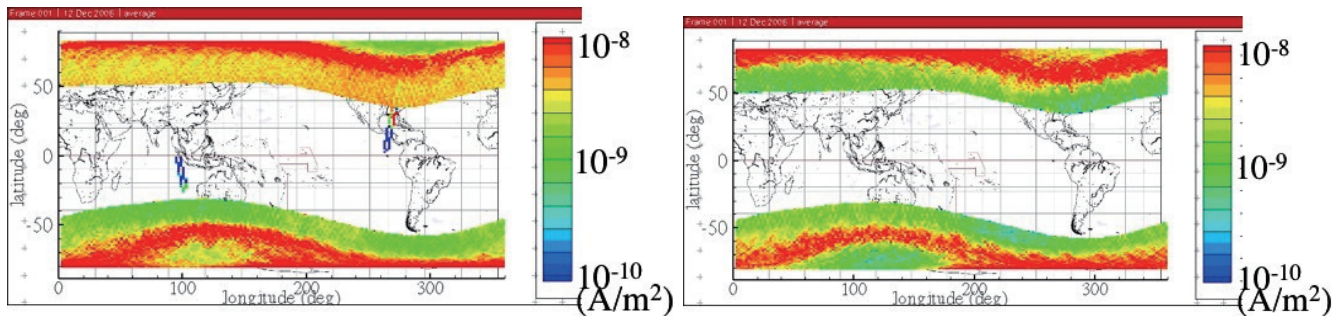


図3 2003年1月(左)、7月(右)のオーロラ電流密度の平均値

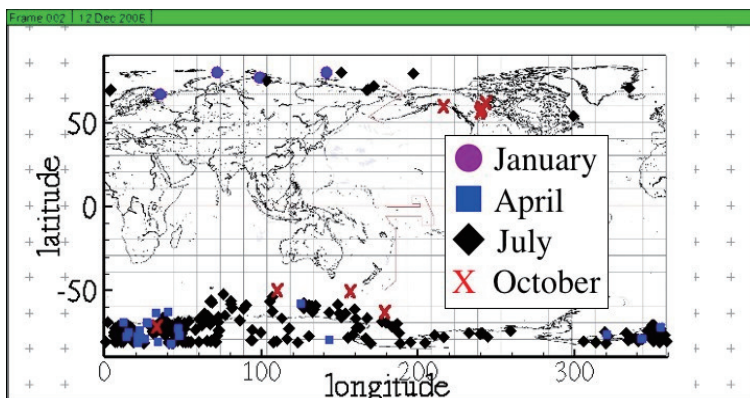


図4 オーロラ電流がイオン電流を上回った場所

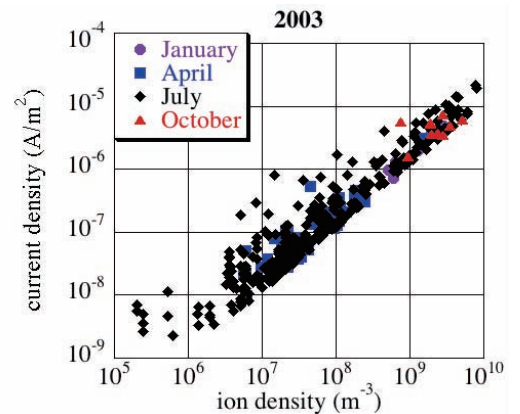


図5 オーロラ電流とイオン電流の関係

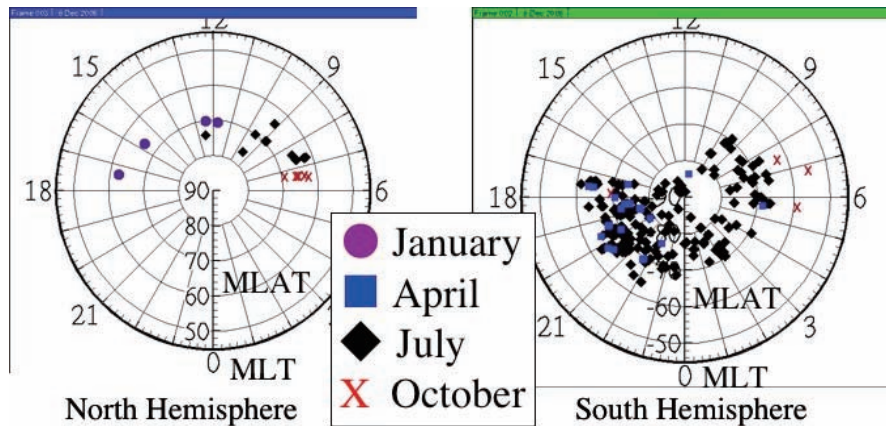


図6 磁気緯度、磁気地方時依存性

少があげられる。イオン密度が低くなりやすい時期では帯電発生回数が増加する。図7、8から7月の南半球で最も帯電発生回数が多くなるであろうことがわかる。また、帯電はオーロラ電流が増加することによっても発生する。図5からもわかるように、7月、10月では、オーロラ電流が非常に大きくなることによりイオン電流をオーロラ電流が上回るものがいくつか観測されている。これは主に磁気嵐などの擾乱によりオーロラ活動が非常に活発になったことが原因だと思われる。

図9、図10、図11にオーロラ電流とイオン密度の関係を示す。オーロラ電流が $\log_{10} j=0.07$ の幅にある値にあるときにイオン密度が $\log_{10} n=0.08$ の幅である値にある確率を示している。図で縦軸はオーロラ電流の電流密度、横軸はイオン密度である。確率は色の濃さで表されている。

1月の南半球や7月の北半球では密度の変動はほとんどない。変動するのは主にオーロラ電流であり、オーロラ活動の強さが帯電に影響する。一方1月の北半球や7月の南半球では密度の変動も大きく、分布が低密度方向へ広がっている。また、オーロラ電流が $10^9 \sim 10^8 (A/m^2)$ のときに特に密度が低くなり易いという傾向が見られた。夏の半球であれば太陽光の影響が強いためイオン密度はあまり変動しない。しかし、冬の半球では太陽光の影響が少ないため、オーロラアーク、オーロラキャビティなどの様々な影響が現れ易い。これらの影響のため、冬の半球では分布の形がいびつになっているとおもわれる。

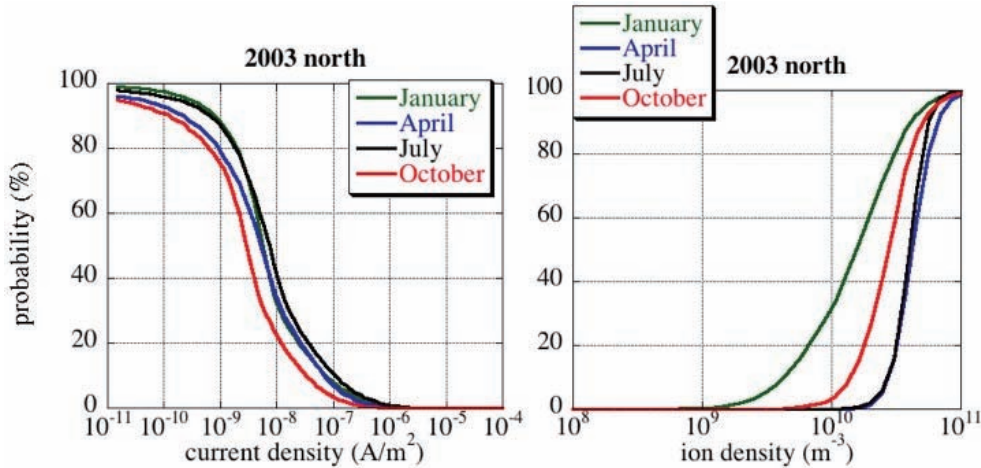


図7 2003年北半球におけるオーロラ電流がある値以上になる確率(左)、イオン密度がある値以下になる確率(右)

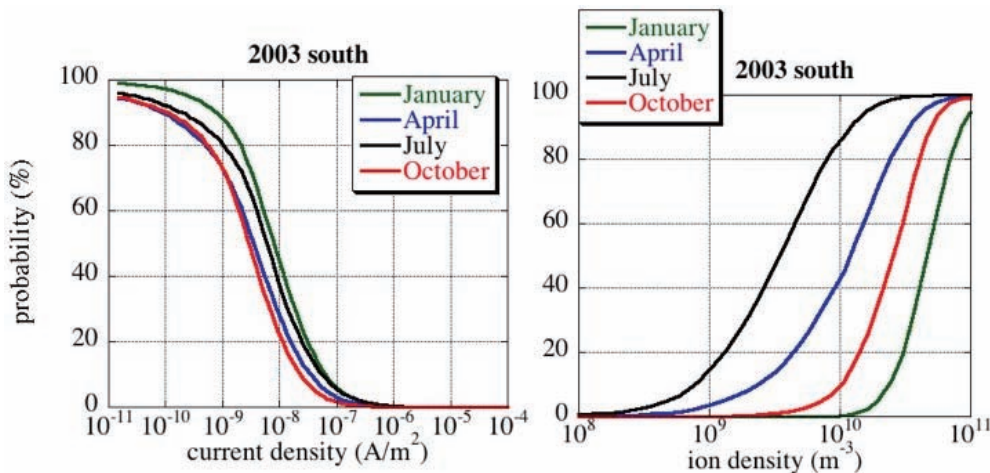


図8 2003年南半球におけるオーロラ電流がある値以上になる確率(左)、イオン密度がある値以下になる確率(右)

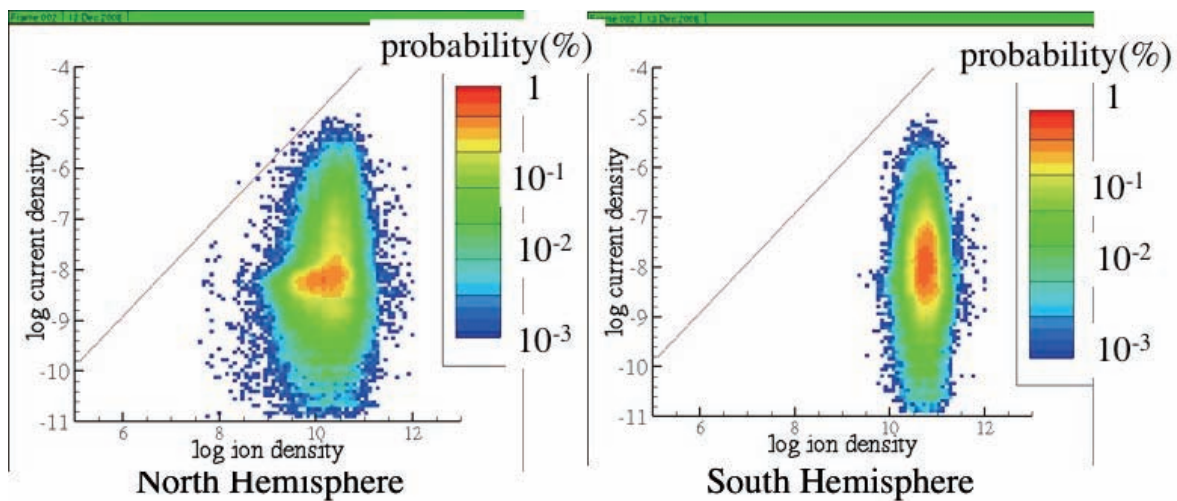


図9 2003年1月 イオン密度、オーロラ電流の確率分布 北半球(左)、南半球(右)

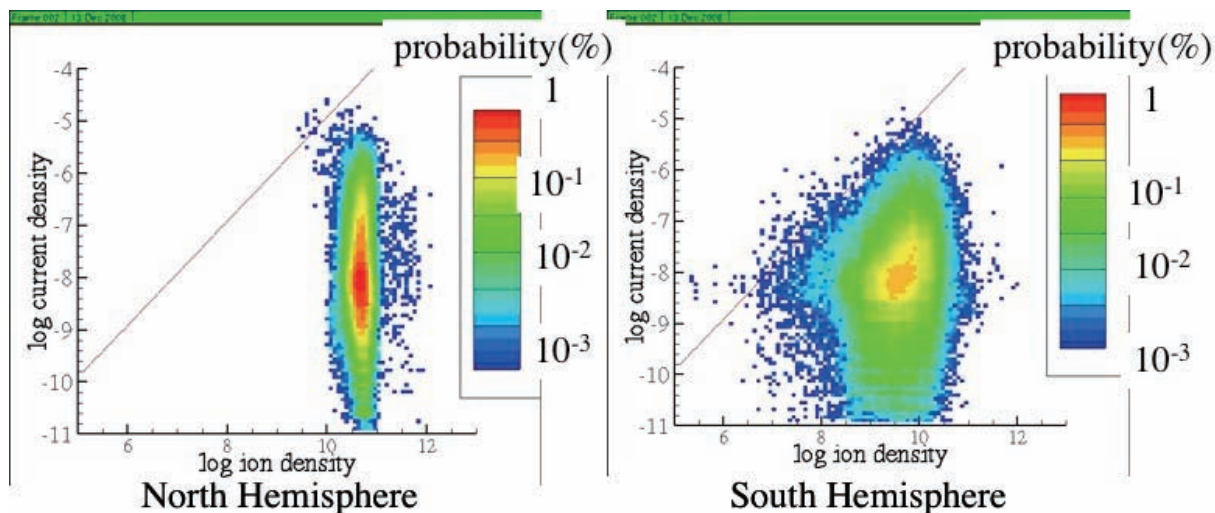


図10 2003年7月 イオン密度、オーロラ電流の確率分布 北半球(左)、南半球(右)

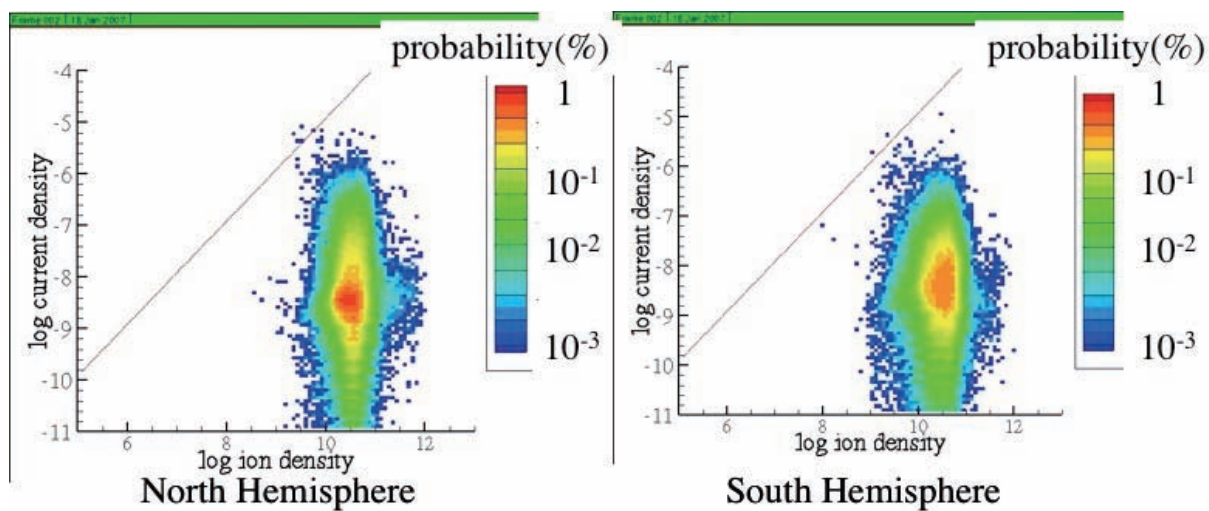


図11 2003年10月 イオン密度、オーロラ電流の確率分布 北半球(左)、南半球(右)

4. まとめ

2003年1月、4月、7月、10月のDMSPが観測した地球極域におけるオーロラ電流、周辺イオン密度データの統計解析を行い、極軌道で宇宙機が遭遇する環境を確率的に知ることができるようになった。今後、太陽活動極大期、極小期のデータの解析も行い、11年周期のオーロラ電流、イオン密度の変動を調べて行く予定である。また、磁気座標依存性、磁気地方時依存性など、より詳細な解析を行う予定である。

4. 参考文献

[1] S. Kawakita, H. Kusawake, M. Takahashi, H. Maejima, T. Kurosaki, Y. Kojima, D. Goto, Y. Kimoto, J. Ishizawa, M. Nakamura, J. Kim, S. Hosoda, M. Cho, K. Toyoda and Y. Nozaki, "Investigation of an Operational Anomaly of the ADEOS-II Satellite", 9th SCTC, Tsukuba, 2005.

[2] http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/dataset_list.html

[3] <http://cindispace.utdallas.edu/DMSP/>