

# GEOTAIL 衛星で観測された光電子の分布と 衛星電位との関係

下田忠宏、町田忍 (京大・理)

向井利典、齋藤義文、笠羽康正、早川基 (ISAS/JAXA)

## 1 導入

人工衛星の導体表面からは、太陽紫外線の照射により光電子が発生する。地球磁気圏内では衛星の導体表面は背景プラズマに対し数 V から 100V 正に帯電しているため、発生した光電子のうち衛星電位以下のエネルギーのものは衛星表面に引き戻され、プラズマの粒子計測器で観測対象とする自然のプラズマと一緒に検出される。従って、粒子計測器で観測された電子の速度空間分布データから光電子の分布を推定することが可能である。本研究では、GEOTAIL 衛星によって観測された光電子の速度空間分布と、その衛星電位依存性について調べた。

## 2 GEOTAIL 衛星

GEOTAIL は磁気圏探査用衛星として、1992 年 9 月に打ち上げられた。本衛星は、図 1 に示すように、本体が直径 2.2m、高さが 1.6m の円柱形であり、その本体からは直交する 50m 長のワイヤーが 4 本 (WANT-A/B, PANT-A/B) 伸びており、また、長さ 6m のマストが 2 本 (MST-F/S) 対向して設置されている。衛星の表面は導電性の酸化インジウムで覆われていて、衛星表面全体はほぼ等電位となっている。

以下で説明される低エネルギー粒子計測器 (LEP-EA) 及び電場観測プローブ (EFD-P) によって光電子分布、衛星電位のデータが得られる。

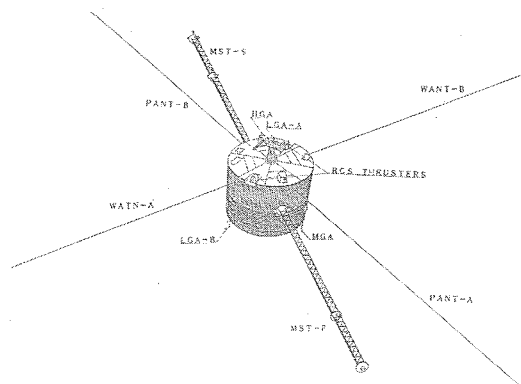


図 1: GEOTAIL 衛星の外観 (GEOTAIL Prelaunch Report より)

## 2.1 低エネルギー粒子計測器 (LEP-EA)

イオンおよび電子の3次元速度分布はLEP-EA[Mukai et al.,1994]によって観測される。この装置は視野を衛星の回転方向に16分割 (Sector 0-15)、仰角方向に7分割 (Channel 1-7、Channel 4が衛星表面に垂直に飛行する粒子を観測)、そして、粒子のエネルギー (速度) についてあらかじめ設定した範囲を32分割して観測する。12秒の時間分解能で3次元速度空間分布を取得し、それに基づいてイオン・電子の密度、速度、温度等が求められる。この観測器にはエネルギー範囲が異なる2つのモード (RAM-A, RAM-B) があるが、本研究では電子に関してはRAM-B(7.4eV-8.5keV)のデータを用いた。

## 2.2 電場観測プローブ (EFD-P)

衛星電位は、図1に示されているワイヤーのうち先端に直径105mmの球がつけられている2つのもの (PANT-A/B) にプローブ法を適用して測定される。ワイヤーの直径は0.45mmであり、先端部以外はポリイミドの絶縁塗装がなされている。球プローブと衛星本体間にバイアス電流を流して球表面と背景プラズマをほぼ等電位にし、衛星と背景プラズマの電位差を測定する [Tsuruda et al., 1994]。

## 3 光電子分布の1例

図2は、1995年1月11日1045-1115UTの時間帯に得られた電子カウントを4つの飛来方向に分けて求めたエネルギー・時間分布図 (E-t 図)、および衛星電位のプロットである。このとき衛星は地球中心から $44R_E$  ( $R_E$ は地球半径) 離れたほぼ真夜中の領域に位置していた。30eVより下のエネルギー帯で見られる大きいカウントが光電子によるものであるが、太陽方向と反太陽方向だけではなく、朝側の方向と夕方側の方向についても光電子カウントのエネルギースペクトルに違いが見られ、衛星電位が大きいときに朝夕の非対称性がより明確になる傾向を示している。

## 4 統計解析

光電子分布の朝夕非対称性と衛星電位の関係を統計的に調べるため、以下に示す統計解析を行った。使用したデータは1993年9月から1997年6月までの期間の電子データで、観測のモードがRAM-B、衛星が日陰におらずかつ磁気圏内にいるときのデータを選んだ。そのように抽出したデータを衛星電位について1V単位でグループ分けした後、それぞれのグループについて電子の微分フラックスの平均値を求めた。衛星の領域判定については、イオンの密度が0.5個/cc以上、イオン速度の反太陽方向成分が200km/s以上、イオン温度が400eV以下、およびイオン動圧 ( $P_d = mnv^2$ ) が0.5nPa以上という4つの条件を全て満たすときに、衛星は磁気圏の外 (太陽風中またはマグネトシース) にいると判断した ([Nakamura et al., 1997] を若干変更)。この解析で用いたデータ数は全部で168,166個である。この時の衛星の位置をプロットすると図3のようになり磁気圏の広範囲にわたるデータが使用されていることが分かる。

図4に、衛星電位が12-13V(a)、29-30V(b)、50-51V(c)の時の解析結果を示した。

衛星電位よりエネルギーが低い光電子は、衛星電位が高い(c)などの時に、観測器が太陽を向いているとき (Sector 13) と反太陽方向を向いているとき (Sector 5) のフラックス比だけでなく、朝側を向いているとき (Sector 9) と夕方側を向いているとき (Sector 1) の比も大きくなる事が分かる。さらに、朝夕のフラックス比は、衛星電位が12V台(a)の時は8eV(電子の観測下限エネルギー)、同じく29V台(b)では10eV、50V台(c)では16eVのエネルギーで特に大きく、これらのエネルギーは(b)と(c)の場合、衛星電位の約1/3となっている。このことから、光電子分布の偏りは衛星電

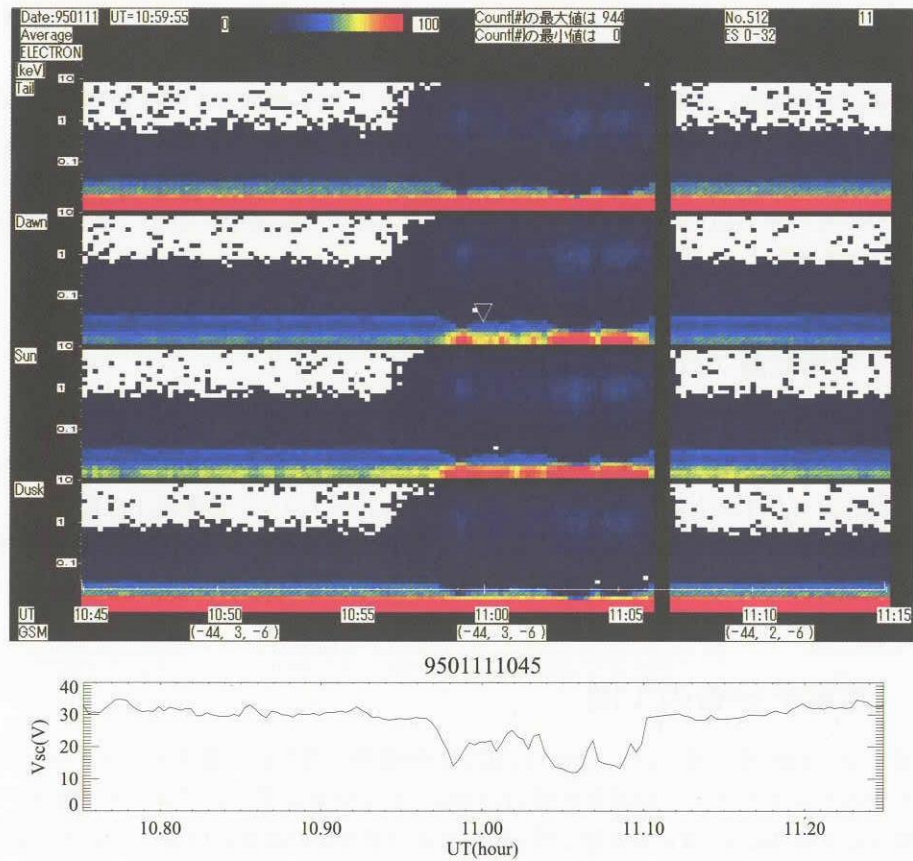


図 2: 1995 年 1 月 11 日 1045-1115UT の期間の電子カウント E-t 図および衛星電位。E-t 図の 4 つのパネルは上から順に、昼側から (夜側へ)、夕方側から、夜側から、朝側から飛行する電子のカウントをカラーコンターで表している。4 つのパネルともエネルギーの上限および下限は 7.4eV、8.5keV である。[協力: 永田大祐氏 (京大・理)]

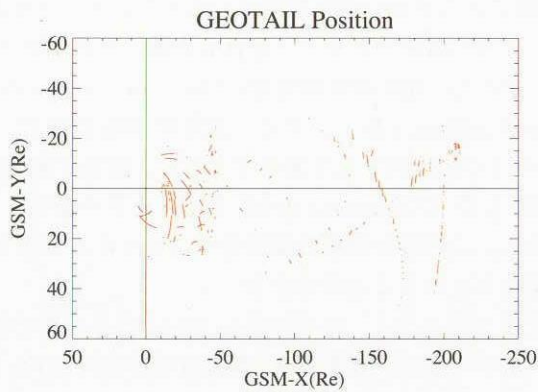


図 3: データ取得期間の衛星位置。GSM-X、GSM-Y の正の向きはそれぞれ地球から見て太陽方向、ほぼ夕方方向である。

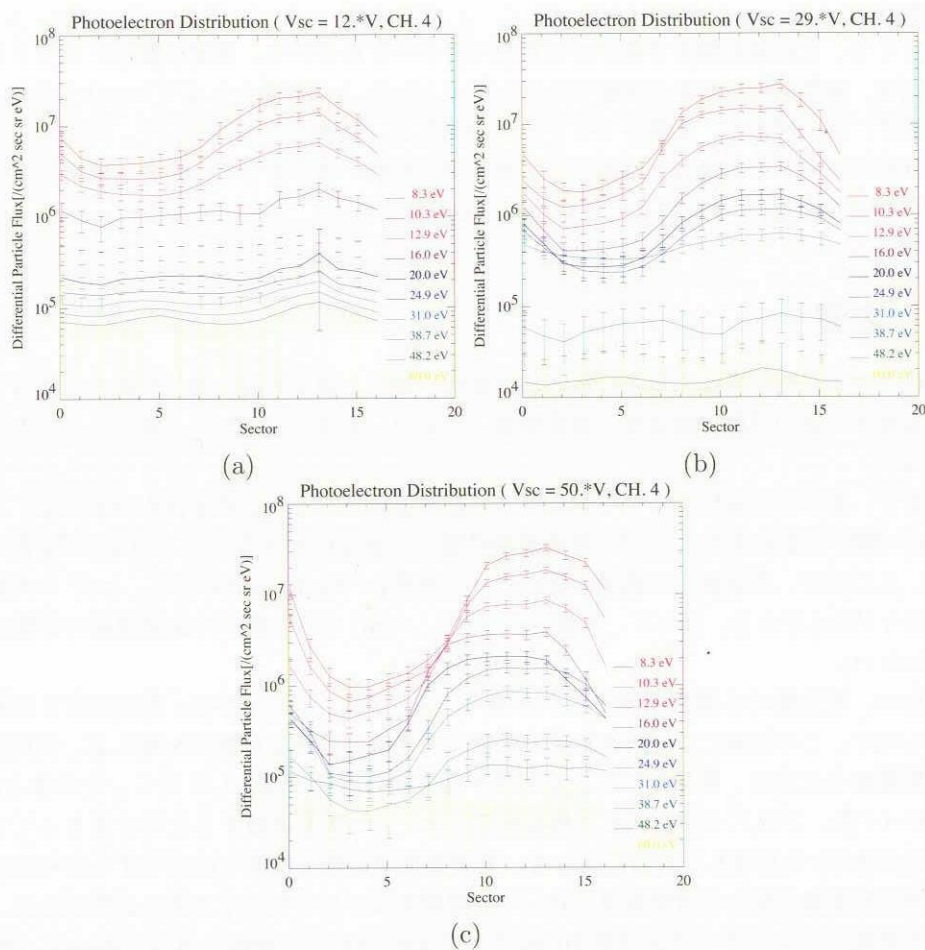


図 4: 3 種類の衛星電位 ( $V_{sc}$ ) (a)  $12V \leq V_{sc} < 13V$  (データ数 6126) (b)  $29V \leq V_{sc} < 30V$  (同 1182) (c)  $50V \leq V_{sc} < 51V$  (同 36) に関する光電子微分フラックスの衛星スピ軸に直交する面での分布。横軸の Sector 1,5,9,13 はそれぞれ夕方側、夜側、朝側、昼側からの電子が飛来する方向に対応しており、エラーバーはそれぞれ平均値から  $\pm\sigma$  の幅に対応。

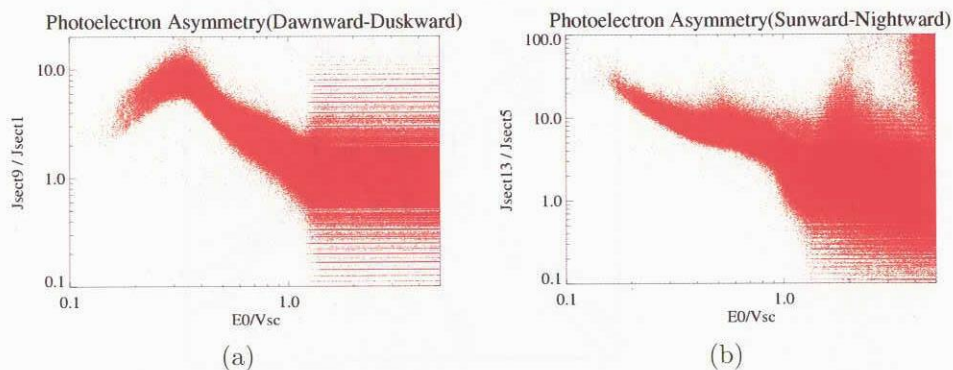


図 5: 光電子分布非対称性の  $E_0/V_{sc}$  依存性。(a) 朝側-夕方側から飛来する (光) 電子フラックスの比 ( $J_{sect9}/J_{sect1}$ ) (b) 昼側-夜側から飛来するフラックス比 ( $J_{sect13}/J_{sect5}$ )

位そのものよりもむしろ衛星電位に対する光電子のエネルギー ( $E_0/V_{sc}$ ) に依存していることが推測される。

そこで、上の統計解析で用いられた全てのデータについて、光電子微分フラックスの朝夕比と昼夜比を、衛星電位に対する光電子エネルギー ( $E_0/V_{sc}$ ) の関数としてプロットした。その結果を図5に示す。この図より、光電子フラックスの朝夕比、昼夜比ともに  $E_0/V_{sc}$  に強く依存していることが分かる。そして、昼夜比は電子のエネルギーが低いほど大きく、朝夕比は衛星電位の約  $1/3$  のエネルギーで約 10 となり最も大きくなることが分かる。

## 5 考察

以上に示したような光電子分布の非対称性、特に、朝夕方向の偏りが現れる要因として、磁場による電子の旋回運動、磁気圏の背景電場、および、衛星周辺における衛星スピン方向の電場が考えられる。

まず、電子が磁場によるローレンツ力で旋回運動をしている可能性を検証する。エネルギーが  $E$  [eV] の電子の回転半径 ( $r_c$ ) は、背景磁場の強さを  $B$  [nT] とすると  $r_c \approx 3.4 \cdot 10^3 \sqrt{E}/B$  [m] と表される。ところが、磁気圏内で磁場が強いローブ領域 ( $\sim 20$  nT) においても、1 eV の光電子の回転半径は高々 170 m である。従って、衛星スケール ( $\sim 1$  m) では光電子の旋回運動の影響はほとんど考えられない。

次に、磁気圏では通常朝側から夕方側の向きに、0.1 ~ 1 mV/m 程度の強さの電場が存在しているため、この電場によって光電子が朝側に引き寄せられる可能性を考える。衛星近傍では、この背景電場とは別に、衛星電位による衛星半径方向の電場が存在していて、その強さは  $V_{sc}/\lambda_D$  ( $\lambda_D$ : デバイ長、プラズマ中にある単独電荷のポテンシャルを遮蔽するために集まってくる反電荷粒種層の大きさ) と見積もられる。従って、背景電場が光電子の偏りに寄与するためには、衛星近傍の半径方向電場の強さが背景電場に比して同程度あるいはそれ以下である必要がある。ここで、磁気圏背景電子によるデバイ長は数 100 m から数 km [Baumjohann and Treumann, 1997] であり、一方、GEOTAIL 衛星の光電子によるデバイ長は、衛星電位が  $6V < V_{sc} < 25V$  の時に  $\lambda_{Dph} = 4.7$  m [Nakagawa et al., 2000] であるため、衛星近傍において衛星電位の遮蔽に寄与しているのはほとんどが光電子である。従って半径方向電場には光電子のデバイ長が寄与し、その強さは  $V_{sc}/\lambda_{Dph} \approx 10$  mV/m と見積もられる。この値は磁気圏背景電場に比べて非常に大きいため、磁気圏背景電場による影響もほとんど考えられない。

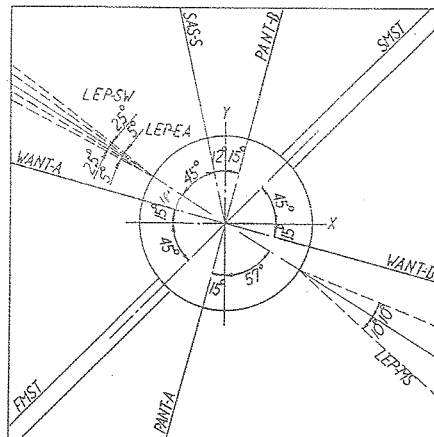


図 6: GEOTAIL 衛星を北から見た平面図 (GEOTAIL Prelaunch Report より)

最後に、衛星近傍でのスピン方向 (時計回り向き) の電場によって光電子の偏りが生じている可能

性について検討する。衛星近傍空間の電場が衛星電位に比例すること、また、光電子の分布が  $E_0/V_{sc}$  に依存している事実は、衛星スピンドirection電場が存在していることを示唆している。すなわち、衛星の昼側(太陽と垂直な面)で多く発生する光電子のうち、低エネルギーのものは発生直後すぐに衛星表面に戻されるためスピンドirectionへの移動は少ない。ある程度のエネルギーを持った光電子は衛星近傍の電場の効果で朝側に運ばれてゆき、偏りが生じている可能性が考えられる。しかし、そうはいつでも、プローブのワイヤーは非常に細いため周辺電場への影響は小さいと考えられるうえ、衛星電位とほぼ等電位であるマストも LEP-EA の視線に関してほぼ対称に配置されているため(図6)、著しく大きな電場の非対称構造は考えられず、光電子分布の朝夕非対称性を説明できない。従って、統計的解析で明らかになった光電子の分布を説明する衛星近傍電場、およびその発生要因は依然不明である。

## 6 結論

本研究では、低エネルギー粒子計測器のデータを用い、GEOTAIL 衛星周辺の光電子分布、特に朝側夕方側の光電子フラックスの非対称性と衛星電位との関係について調べた。その結果、光電子分布の偏りは、衛星電位で規格化された電子エネルギーという形で衛星電位に依存し、朝夕方向の偏りは衛星電位の約 1/3 のエネルギーに匹敵する電子に最も強く現れることが分かった。このことは、GEOTAIL 衛星表面付近での衛星回転方向電場の存在を示唆しているが、その電場の空間的な構造および成因はまだ理解されておらず、今後さらに解明されるべき課題である。

## 7 参考文献

- GEOTAIL Prelaunch Report, *ISAS Data Center*, 1992
- W. Baumjohann and R. A. Treumann, *Basic Space Plasma Physics*, Imperial College Press, 1997
- T. Mukai, S. Machida, Y. Saito, M. Hirahara, T. Terasawa, N. Kaya, T. Obara, M. Ejiri and A. Nishida, The Low Energy Particle(LEP) Experiment onboard the GEOTAIL Satellite, *J. Geomag. Geoelectr.*, *46*, 669-692, 1994
- T. Nakagawa, T. Ishii, K. Tsuruda, H. Hayakawa and T. Mukai, Net Current Density of Photoelectrons Emitted from the Surface of the GEOTAIL Spacecraft, *Earth Planets Space*, *52*, 283-292, 2000
- R. Nakamura, S. Kokubun, T. Mukai and T. Yamamoto, Changes in the distant tail configuration during geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, *102*, A5, 9587-9601, 1997
- K. Tsuruda, H. Hayakawa, M. Nakamura, T. Okada, A. Matsuoka, F. S. Mozer and R. Schmidt, Electric Field Measurements on the GEOTAIL Satellite, *J. Geomag. Geoelectr.*, *46*, 693-711, 1994