

GEOTAIL 衛星より発生した光電子の 非対称分布とその原因

下田忠宏⁽¹⁾、町田忍⁽¹⁾、向井利典⁽²⁾、齋藤義文⁽³⁾、笠羽康正⁽⁴⁾、早川基⁽³⁾

(1) 京都大・理・地球惑星 (2) JAXA (3) ISAS/JAXA (4) 東北大・理・地球惑星

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に混入してしまう。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分布関数と、その衛星電位依存性について調べた。

2 衛星および観測機器

GEOTAIL[1] 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 2 組 4 本伸びており、また、長さ 6m および 4m の 2 本のマストが対向して設置されている。衛星本体およびマストは導電性の酸化インジウムで覆われており、これらの表面はほぼ等電位となっている。

本研究では、GEOTAIL 衛星に搭載されている観測機のうち、低エネルギー粒子計測器 (LEP-EA)[2]、電場観測プローブ (EFD-P)[3] および磁力計 [4] より得られたデータを用いた。LEP-EA(以下、LEP) 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(CH.) 1-7: CH. 番号が大きいほど LEP 視野の仰角は小さくなり、CH. 4 は衛星表面垂直方向から飛行する粒子を観測)、粒子のエネルギー (速度) について 32 分割し、これらを掃引することで、電子・イオンの 3 次元速度空間分布を 12 秒の時間分解能で観測する。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。また、EFD-P は、2 組 4 本のワイヤー (直径 0.45mm) で構成され、先端部以外はポリイミドの絶縁塗装がなされている。2 組のワイヤーは、先端にワイヤーのうち先端に直径 105mm の球プローブがついている 1 組 (PANT) と先端のプローブが無い 1 組 (WANT) からなり、衛星電位は PANT により測定される。PANT では、先端の球プローブと衛星本体間にバイアス電流を流すことで、球表面と背景プラズマをほぼ等電位に保っている。

以下、観測された光電子について、衛星と垂直に入射する場合 (LEP の CH. 4) を中心に述べ、最後に上下方向 (CH. 1, 7) から入射した光電子についての結果を紹介する。

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)、および衛星電位の時間変化に関するプロットである。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。

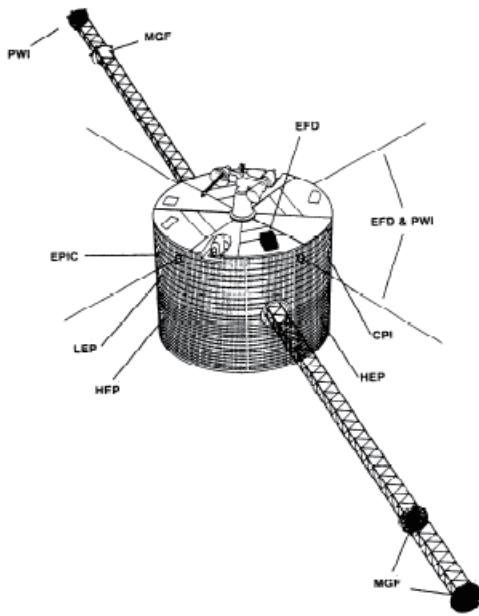


図 1: GEOTAIL 衛星の外観 [1]

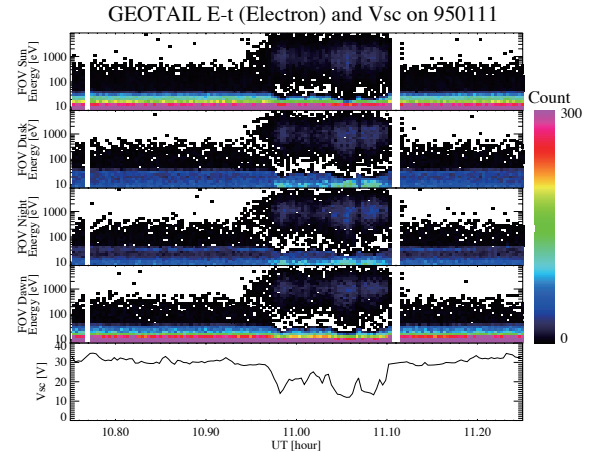


図 2: 1995 年 1 月 11 日 1045-1115UT の期間の電子カウント E-t 図および衛星電位。上から順に、昼側から (夜側へ)、夕方側から、夜側から、朝側から飛行する電子のカウント、衛星電位。上 4 つのパネルについてエネルギーの範囲は 7.4eV - 8.5keV。

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調べるため、以下の統計解析を行った。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、観測モードが RAM-B、衛星が磁気圏内にいてかつ日陰にいない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) にいると判断して解析より除いた (Nakamura et al., (1997)[5] にて用いられた条件を若干変更)。このデータ抽出より得られた全部で 168,166 個のデータについて、衛星の位置をプロットしたものを図 3 に示す。この図から、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確認できる。

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) の場合には、観測器が太陽方向を向いているとき (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

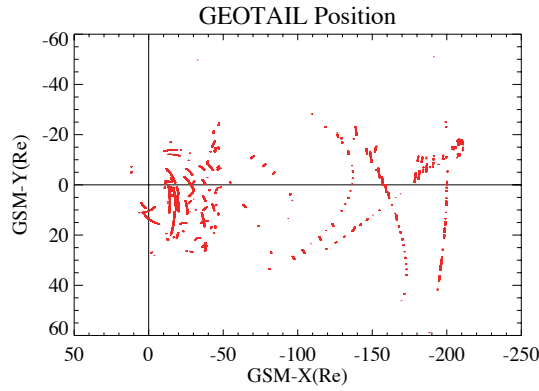


図 3: データ取得期間の衛星位置。GSM-X、GSM-Y の正の向きはそれぞれ地球から見て太陽方向、ほぼ夕方方向。

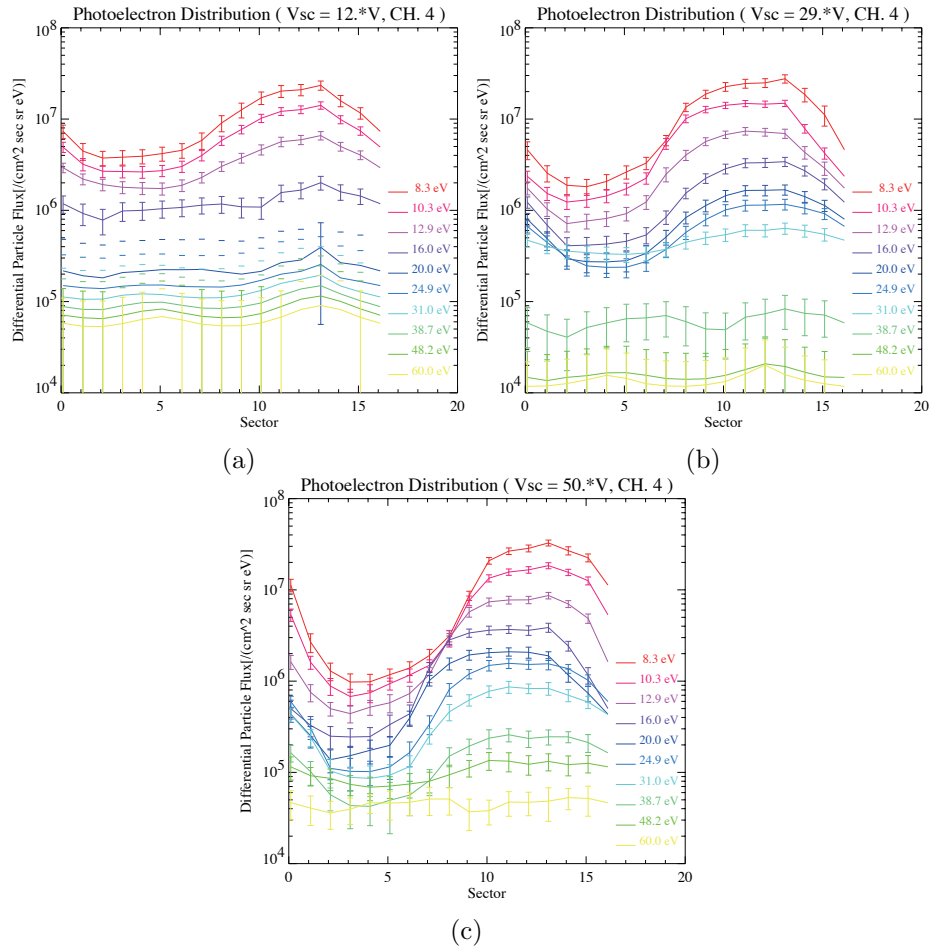


図 4: 3 種類の衛星電位 (V_{sc}) (a) $12V \leq V_{sc} < 13V$ (データ数 6126) (b) $29V \leq V_{sc} < 30V$ (同 1182) (c) $50V \leq V_{sc} < 51V$ (同 36) に関する光電子微分フラックスの衛星スピン軸に直交する面での分布。横軸の Sector 1,5,9,13 はそれぞれ夕方側、夜側、朝側、昼側からの電子が飛来する方向に対応し、エラーバーはそれぞれ平均値からの標準偏差 ($\pm\sigma$)。

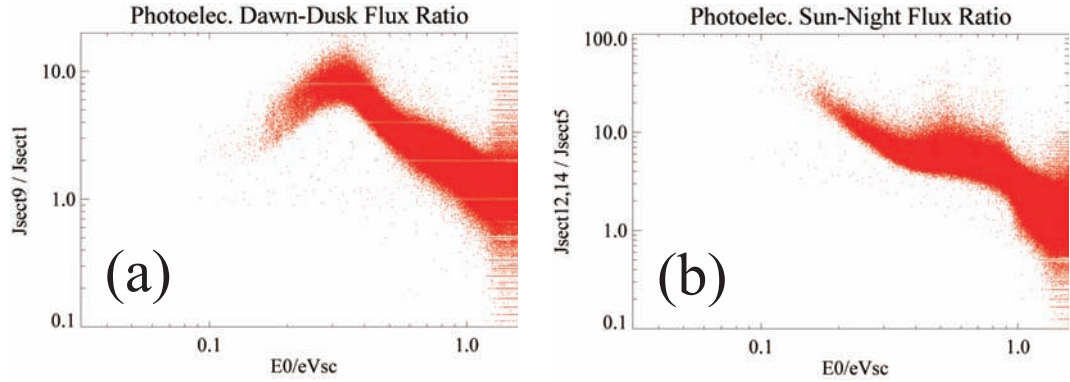


図 5: 統計解析より得られた光電子分布非対称性の E_0/V_{sc} 依存性。(a) 朝側-夕方側から飛来する(光)電子のフラックス比 ($\frac{J_{sect9}}{J_{sect1}}$) (b) 昼側-夜側から飛来する電子のフラックス比 ($\frac{J_{sect12}+J_{sect14}}{2J_{sect5}}$)。計測器内部に太陽光が直接入り込んでしまう Sector13 のデータは除外。

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 数値計算

統計解析によって明らかになった光電子の非対称性について、数値計算を用いることでその原因を調べた。この数値計算では、3次元円筒座標系にて電子を LEP の位置から時間を遡ってトレースし、光電子の発生位置を求めている。数値計算における空間領域および衛星の形状を図 6 に示す。計算リソースの都合上、マストの形は扇形とし、PANT, WANT の長さを実物より短くしている。また、PANT, WANT のワイヤー径は数値計算の格子間隔に比べて非常に細いため、これらは動径方向の格子線として与えた。

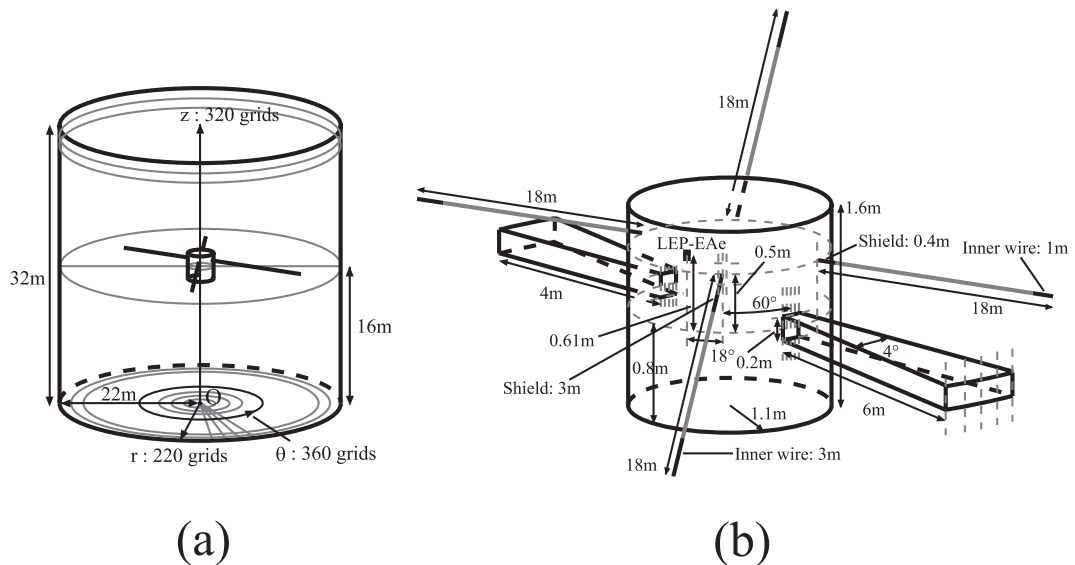


図 6: (a) 数値計算空間および GEOTAIL の配置 (b) 数値計算上での GEOTAIL の形状モデル

上記の系の境界条件としては、衛星電位を 30V、計算領域の外部境界を 0V とした。PANT の先端から 1m の電位は 2V とし、PANT の衛星側、WANT 全体、マストの電位は衛星電位と同一とし

た。また、電場の計算には Laplace 方程式を用いた。衛星周辺の空間には光電子が存在しているにもかかわらず、これらを見捨てて電場を求めているのは、Cluster 衛星の数値計算 [6] においてこれらの光電子の有無による電位差は高々 0.6V 程度となり、衛星電位に比べて無視できるほど小さいためである。

電場を計算した後に、LEP に入射する光電子について LEP 入射時点から時間を遡り、軌道と発生位置を計算した。その際、光電子は全て衛星本体から発生したものと考え、光電子がマストの位置に来たときにはそのまま通り抜けるものとした。

このようにして求めた衛星周辺の電位分布および XY 平面上に投影した光電子軌道は図 7 のようになる。この図では、LEP の視野角内 (仰角 10 度×回転方向角 5 度) で掃引した同一エネルギーの光電子の軌道を全て表示している。WANT や PANT、マストの存在により、衛星周辺の電位分布は $1/r$ 則に従わず、光電子の軌道はワイヤー周辺の電場の影響を大きく受けている。特に、7eV の電子は LEP から回転方向角正方向の領域から発生し、衛星の表面から数 m の距離まで飛行してから LEP に入射することがわかる。この位置関係は、LEP が朝側 (夕方側) を向いているときに光電子の発生位置が昼側 (夜側) となる。

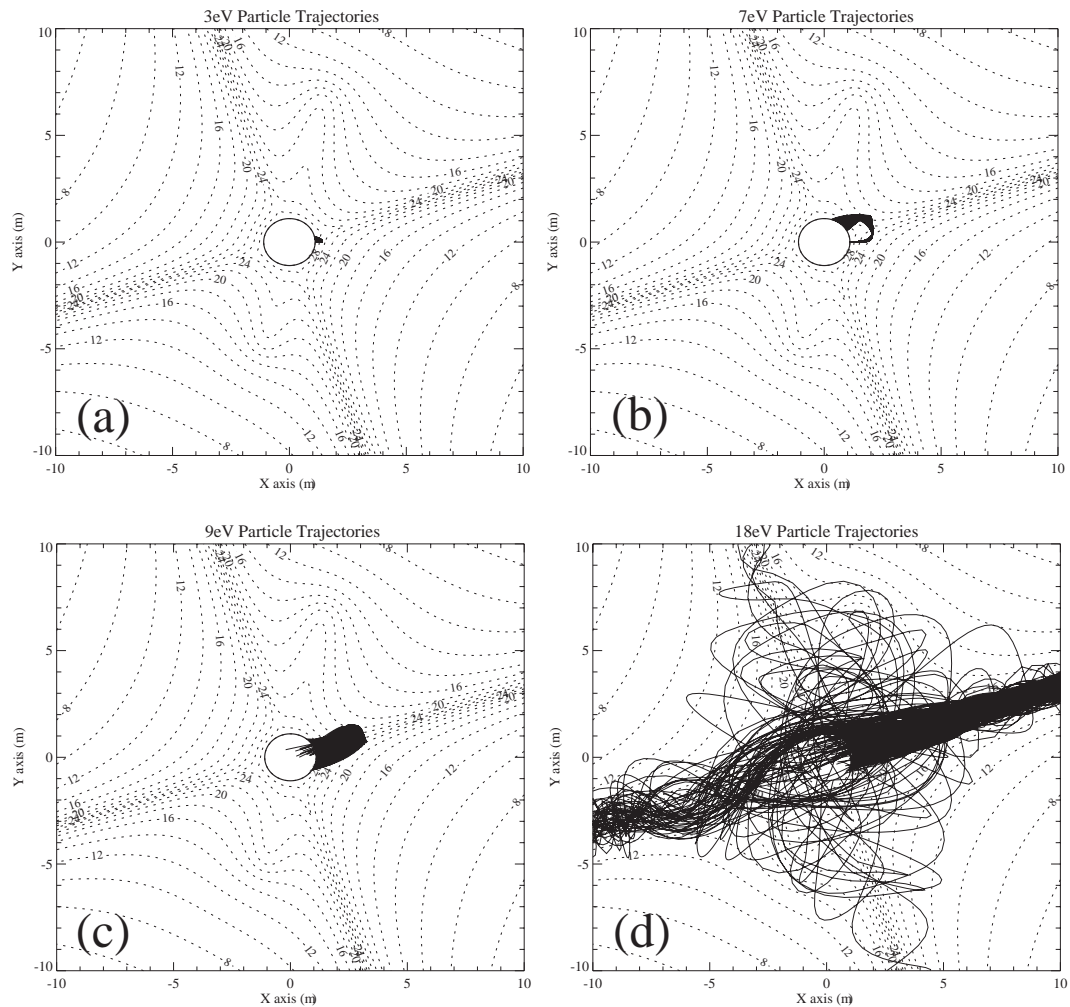


図 7: GEOTAIL 周辺の電位分布および光電子の軌道。(a)3eV の光電子の場合。(b) 同 7eV。(c) 同 9eV。(d) 同 18eV。

このことを踏まえ、観測データの統計解析と同様、数値計算の結果について光電子のフラックス比を求めた。

LEP の視野の向きを決めることで、図の結果を用いて個々の光電子発生位置の太陽角が一意に決まる。その発生位置の光電子生成量を光電子のフラックスとし、このフラックスを数値計算で扱った全ての光電子についてを足し合わせることで、LEP に入射する光電子フラックスが計算できる。本研究ではその光電子生成量を、太陽光が照射している面では $q_{ph} \cos \theta + q_{iso}$ 、太陽光が照射していない面 (頂面、底面含む) では q_{iso} として与えた。ここで、 q_{ph} , q_{iso} , および θ はそれぞれ光電子生成関数、(2 次電子などの) 等方的に発生する成分、太陽方向を基準とした角度を表す。このようにして求めた光電子のフラックス比を図 8 に示す。

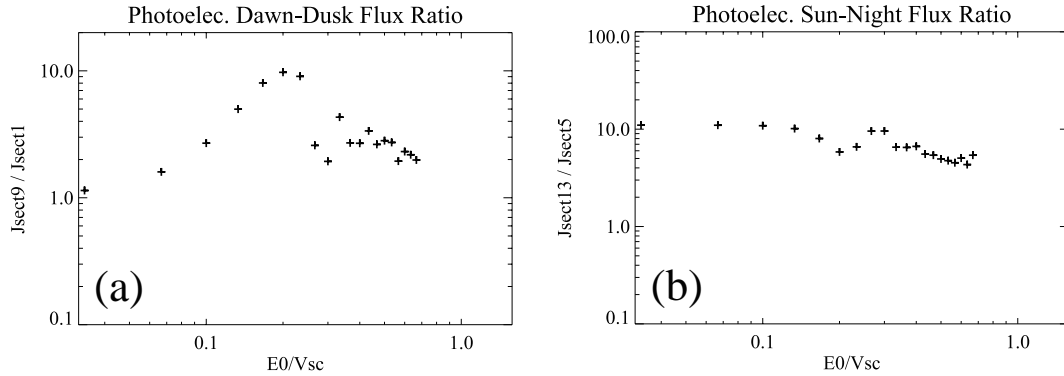


図 8: 数値計算より得られた光電子分布非対称性の E_0/V_{sc} 依存性。(a) 朝側-夕方側から飛来する(光)電子のフラックス比 ($\frac{J_{sect9}}{J_{sect1}}$) (b) 昼側-夜側から飛来する電子のフラックス比 ($\frac{J_{sect13}}{J_{sect5}}$)。数値計算では太陽光が直接計測器に入射する影響がないため Sector13 のデータを使用。

フラックス比と光電子エネルギーの関係について、エネルギーが観測結果 (図 5) より低い方向にずれているものの、両者は互いによく似た傾向を示している。

6 上下方向から飛来する光電子

これまでは衛星の側面に垂直に入射する (LEP の CH.4) 光電子のみを扱ったが、上方向 (CH.1) および下方向 (CH.7) から飛んでくる光電子についても同様の解析および数値計算を行った。これらについても、観測と数値計算とで非常に近い傾向の曲線が得られたが、その中で特徴的なのは、図 9 に示すように CH.7 において夜側から入射する光電子フラックスが昼側から入射する成分を上回るエネルギーが存在することである。この現象は Cluster 衛星でも観測されているが [7]、今回の数値計算によって得られた軌道を見ると、昼側で発生した多量の光電子の一部が衛星底面の下を通じて夜側に回りこみ、LEP に入射していることがわかった。

7 考察とまとめ

GEOTAIL 周辺の光電子分布を解析することで、光電子が昼夜方向のみならず朝夕方向にも非対称分布を持つことがわかった。また、数値計算により、人工衛星本体の太陽面で発生した光電子がワイヤーアンテナ近傍の電場により朝側に運ばれ、それを LEP が観測している様子が明らかになった。さらに、光電子フラックス比についても、観測と同様の傾向が再現された。

光電子フラックス比について観測の統計解析と数値計算を比較すると、比がピークとなる光電子エネルギーがシフトしているものの、フラックス比と光電子エネルギーの関係は両者ともにほとんど同じ傾向を示し、数値計算は観測結果を再現しているといえる。

このことから、光電子の非対称性は、衛星近傍にあるワイヤーによって生じる電場が原因だと結論づけることが出来る。このような非対称性を無くすためには、粒子計測器から見たワイヤーなど

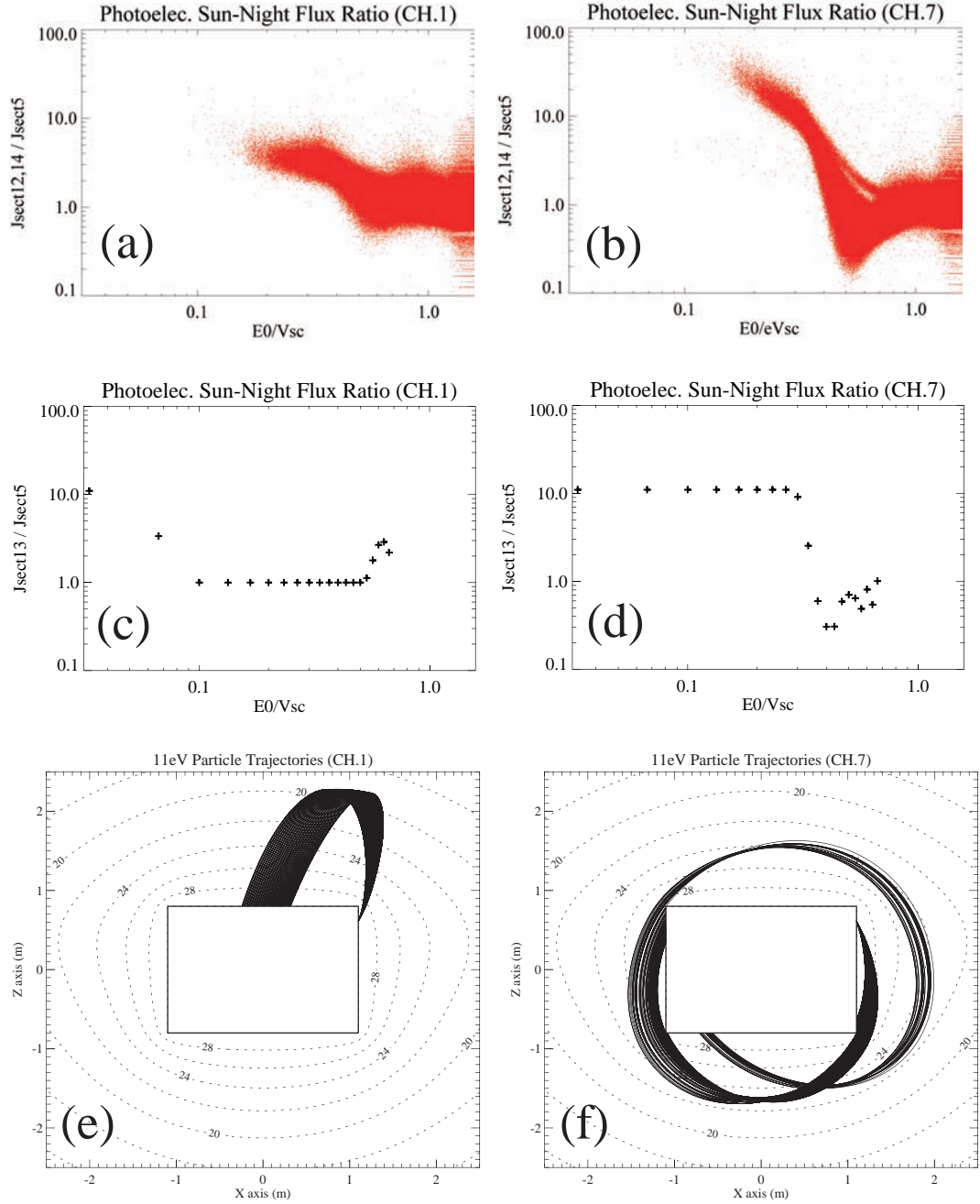


図 9: (a) 観測より得られた CH. 1 での昼側-夜側光電子フラックス比 ($\frac{J_{sect12}+J_{sect14}}{2J_{sect5}}$)。 (b) 同 CH. 7。 (c) 数値計算より得られた CH. 1 での昼側-夜側光電子フラックス比。 (d) 同 CH. 7。 (e) CH. 1 に入射する 11eV の光電子の軌道。 (f) 同 CH. 7。

の構造物が対称に配置されることが必要であり、本研究で得た知見は今後のデータの理解や衛星の構造設計に有効に役立つことが期待される。

参考文献

- [1] A. Nishida. The GEOTAIL mission. *Geophys. Res. Lett.*, 21(25):2871–2873, 1994.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] S. Kokubun, T. Yamamoto, M. H. Acuña, K. Hayashi, K. Shiokawa, and H. Kawano. The GEOTAIL magnetic field experiment. *J. Geomag. Geoelectr.*, 46:7–21, 1994.
- [5] 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.
- [6] C. M. Cully, R. E. Ergun, and A. I. Eriksson. Electrostatic structure around spacecraft in tenuous plasmas. *J. Geophys. Res.*, 112:A09211, doi: 10.1029/2007JA012269, 2007.
- [7] S. Szita, A. N. Fazakerley, P. J. Carter, A. M. James, P. Travníček, G. Watson, M. André, A. Eriksson, and K. Torkar. Cluster PEACE observations of electrons of spacecraft origin. *Ann. Geophys.*, 19:1721–1730, 2001.