

人工衛星「あらせ」により観測された電場方向のずれの特性

著者	中川 朋子, 三好 由純, 笠羽 康正, 笠原 禎也, 土屋 史紀, 熊本 篤志, 北原 理弘, 中村 紗都子, 松岡 彩子
雑誌名	東北工業大学紀要 理工学編・人文社会学編
号	43
ページ	1-7
発行年	2023-03-31
URL	http://doi.org/10.51048/00000225



人工衛星「あらせ」により観測された電場方向のずれの特性

Directional Deviation of Electric Field Measured from ARASE Satellite

中川 朋子* 三好 由純*² 笠羽 康正*³ 笠原 禎也*⁴ 土屋 史紀*⁵ 熊本 篤志*⁶ 北原 理弘*⁷
中村 紗都子*⁸ 松岡 彩子*⁹

Tomoko NAKAGAWA* Yoshizumi MIYOSHI*² Yasumasa KASABA*³ Yoshiya KASAHARA*⁴
Fuminori TSUCHIYA*⁵ Atsushi KUMAMOTO*⁶ Masahiro KITAHARA*⁷
Satoko NAKAMURA*⁸ and Ayako MATSUOKA*⁹

Abstract

Direction of the electric field vectors obtained by the Electric Field Detector (EFD) of the Plasma Wave Experiment (PWE) instrument onboard the Arase spacecraft were examined to assess the quality of the DC to low-frequency electric field. The electric field components in the spin plane of Arase were obtained by measuring electric potential differences between two orthogonal pairs of the wire antennas extending from the satellite. Due to the spin of the spacecraft, the orthogonal pairs are expected to yield the same sinusoidal waveforms with phase shift by 90 degrees, but the observed waveforms sometimes deviate from a sinusoidal curve resulting in inconsistent electric field vectors. In this paper, deviation of the observed electric field direction from the ideal direction was examined using observations made in the magnetic field parallel to the spin plane during the period from April 1, 2017 to November 30, 2019. Within 2 Earth radii (R_E) from the Earth, the deviation angle was less than 10 degrees. The deviations larger than 50 degrees were found mostly at distances larger than 2.5 – 4 R_E depending on the local time, while small deviations were also found at the large distances. Beyond 4 R_E , the percentage of small deviation was 84% in high density plasmas (larger than 640 cm^{-3}) inferred from High-Frequency Analyzer (HFA)/PWE observation.

1. はじめに

太陽系の宇宙空間は太陽から噴き出す高速のプラズマ流「太陽風」で満たされているが、地球が持つ磁場によって太陽風が遮られるので直接

地球に太陽風が当たることはない。地球磁場によって守られた領域を地球磁気圏と呼ぶ。地球磁気圏は太陽風と隔絶されているわけではなく、太陽風の変化に応じて、荷電粒子や磁場がダイナミックな変化を見せている。地球磁気圏内の放射線帯と呼ばれる領域には数百 keV から数 MeV の高いエネルギーを持つ粒子群が存在する^[1]。放射線帯粒子の加速過程を解明するために 2016 年 12 月 20 日に打ち上げられたのがジオスペース探査衛星「あらせ」である^{[2][3]}。「あらせ」には、高エネルギー粒子を観測する機器だけでなく、磁場観測器 Magnetic Field experiment (MGF)^[4]、プラズマ波動・電場観測器 Plasma Wave Experiment

2022 年 9 月 21 日受理

* 情報通信工学科 教授

*² 名古屋大学 教授

*³ 東北大学 教授

*⁴ 金沢大学 教授

*⁵ 東北大学 准教授

*⁶ 東北大学 准教授

*⁷ 東北大学 助教

*⁸ 名古屋大学 特任助教

*⁹ 京都大学 教授

(PWE)^[5]が搭載されている。

PWE は高周波のプラズマ波動の計測だけでなく、低周波ないし静電場を計測できる Electric Field Detector (EFD)^[6]というサブコンポーネントを持っている。地球磁気圏のような磁化プラズマ中では、電場 \mathbf{E} 、磁場 \mathbf{B} 、磁場を横切るプラズマ速度 \mathbf{V} の間に磁気凍結の条件

$$\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B} = 0$$

が成り立っているため、電場 \mathbf{E} を知ることによって磁気圏内のプラズマの動きを知ることができると期待されている。

PWE/EFD による電場観測は、衛星のスピン面内に展開した直交 2 系統のアンテナ対 (WPT-S-U, WPT-S-V) の電位差計測^[6]によって行われている (図 1)。それぞれのアンテナ対で得られる電位差には、計測対象である DC 電場 (自然電場および衛星が飛行することによって生じる誘導電場) によるものの他に、アンテナ先端に取りつけられたプローブの特性 (仕事関数やシースインピーダンス等) のわずかな違いに起因するオフセット成分^[7]も含まれるので、両者を分離する必要がある。計測対象の DC 電場による信号は、衛星の自転によりスピン周期約 8 秒の正弦波となるため、オフセット成分が時間変化しないと仮定すれば、観測された電位差波形を正弦波にカーブフィッティングすることによって DC 電場とオフセット成分を分離することができる。しかし、オフセット成分に衛星の自転に伴う変動があると、正弦波の信号成分に混入してしまう。また、衛星本体からの光電子の放出や衛星の帯電、衛星が周囲に作る航跡 (ウェイク) 等により人工的な電位構造が局所的にできると、これも信号成分に混入する。

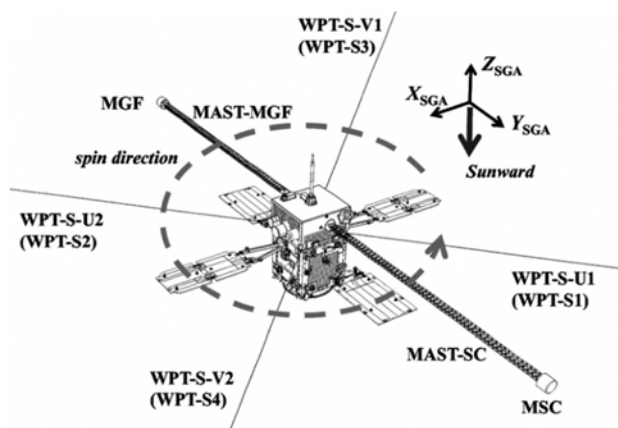


図 1 「あらせ」衛星のスピン方向と PWE/WPT プローブ^[5]

直交するアンテナ対で得られる 2 つの電場波形は、同振幅で位相差 90° の正弦波となるはずであるが、実際には、2 つの波形の振幅が異なったり、位相差が 90° でなかったり、波形が正弦波からずれたりすることがある^[8]。これらは前述のオフセットの変動や人工的な電場に起因すると考えられるが、詳細な原因は未解明であり、このようなデータから求められた電場は、計測対象の DC 電場 (自然電場および誘導電場) からずれているのではないかと懸念される。

そこで本研究では、あらせ衛星で得られた電場と現実の DC 電場とのずれが大きくなるのはどのような場合かを調べた。そのためには参照すべき基準となる電場が必要である。自然電場に対して誘導電場が圧倒的に大きい場合は、磁場と軌道速度から誘導電場を計算して基準とすることができるが、これは地球近傍でしか使うことができない。本研究では、磁場と電場の直交性を利用して電場の方向の基準を決め、この基準方向からのずれが大きくなるのはどのような時かを調査した。

2. 研究方法

2.1 使用データ

本研究では 2017 年 4 月 1 日から 2019 年 11 月 30 日の期間に「あらせ」PWE/EFD によって得られた電場データ、MGF で得られたスピン平均磁場データ^[9]、「あらせ」の軌道データ^[10]、および PWA の高周波受信器 High Frequency Analyzer(HFA)^[11]により推定された電子密度データ^[12]を使用した。これらのデータは ERG サイエンスセンター^[13]より取得した。

2.2 電場ベクトルの算出

本研究では、計測対象の電場が衛星の 1 自転の間は一定と仮定し、その間の U 系 V 系両方の信号に最も良く適合する電場を求めた。具体的には、U 系 V 系それぞれの信号から、1 スピン平均して求めたオフセット成分を差し引いて組み合わせた 8Hz サンプリングの電場ベクトル(E_u , E_v)を、衛星に固定した座標系から、スピン面内で最も太陽に近い方向を x 軸、スピン軸方向を z 軸とする Despun Sun sector Inertia (DSI) 座標系^[14]に変換して電場ベクトル(E_x , E_y)を導出し、これをスピン平均した。

2.3 観測された電場の方向ずれの算出

プラズマ周波数より低い周波数範囲では電場は磁場と垂直と考えられるので、本研究では、得られた電場ベクトルと MGF で観測された磁場ベクトルが垂直になるかどうかで、電場の方向のずれを評価する。

しかし「あらせ」はスピン面内の電場 2 成分しか計測しないため、図 2(a)に示すように、磁場ベクトル (黄色矢印) がスピン面に平行でない時は、電場ベクトル (緑矢印) が磁場ベクトルに垂直だったとしても、スピン面に投影された電場 (図 2(b) 緑矢印) は磁場に垂直になるとは限らない。一方、図 2(c)のように、磁場がスピン面に平行な時は、電場が磁場に垂直な面のどこを向いていたとしても、あらせ衛星のスピン面内に投影した電場は磁場に垂直 (図 2(d)) になるはずである。

よって、本研究では磁場があらせ衛星のスピン面に平行な時、具体的には、スピン面に対する磁場の仰角 θ_B の絶対値が微小の時に得られた電場データを使用し、スピン面内で磁場に直角な方向をスピン面内電場成分の基準方向として、その方向からの観測電場のずれと、その時の衛星位置やプラズマ条件との関係を調査する。

日の期間中、スピン面に対する磁場の仰角 θ_B の絶対値が 1° 未満の時に観測された電場を用い、スピン面内電場成分の基準方向 (磁場から 90°) からのずれを色分けして「あらせ」軌道に表示したものである。軌道は地球中心太陽磁気圏 Geocentric Solar Magnetospheric (GSM) 座標で、+x が太陽方向である。 10° 未満のずれを緑、 10° 以上 20° 未満のずれを黄色、 20° 以上 50° 未満のずれを橙、 50° 以上のずれを赤で表示してある。

地球の近く、 $2 R_E$ までは、方向ずれが 10° 未満の電場 (緑) が観測されるが、地球から離れるにつれ、ずれの大きい電場データ (赤) が増える。夜側 (local time 0 時) は $4 R_E$ まで、昼側 (local time 12 時) は $3 R_E$ までずれの小さい良い電場データが観測されている。朝側 (local time 6 時) と夕側 (local time 18 時) は $2.5 R_E$ 付近でずれの小さい電場データとずれの大きい電場データが存在している。

「あらせ」の観測する電場には、自然電場とともに、衛星が地球磁場 \mathbf{B} を横切って運動することによる誘導電場 $\mathbf{V}_{sc} \times \mathbf{B}$ が含まれている。地球の近くでは磁場が強く、また、ケプラーの法則により「あらせ」の速度 \mathbf{V}_{sc} も大きいため、誘導電場も大きく、多少のノイズや

3. 結果

3.1 方向ずれの大きい電場の観測位置の分布

図 3 は、2017 年 4 月 1 日から 2019 年 11 月 30

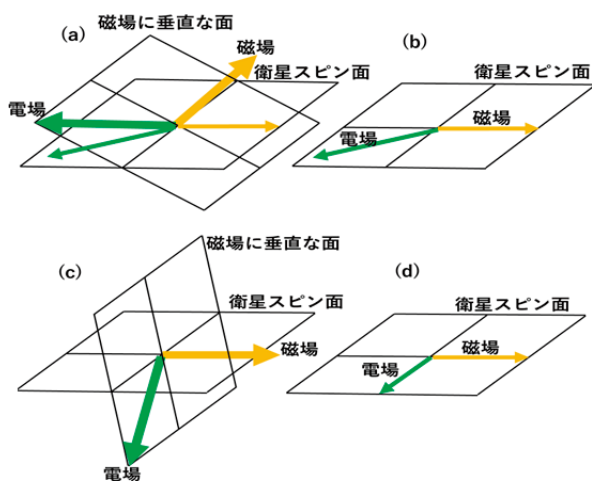


図 2 磁場に垂直な電場の衛星スピン面への投影。(a)(b)磁場がスピン面に平行でない場合、(c)(d) 磁場がスピン面に平行な場合。

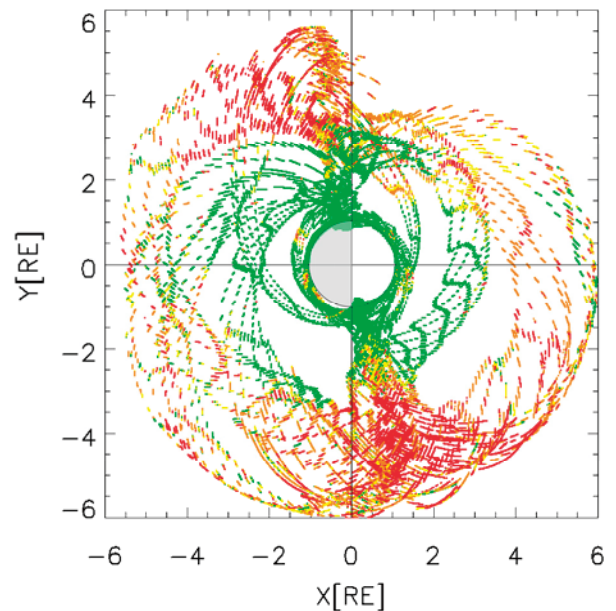


図 3 「あらせ」衛星の軌道上に示した観測電場の方向ずれ。+x は太陽方向、中央の丸が地球。緑は 10° 未満のずれ、黄は 10° 以上 20° 未満、橙は 20° 以上 50° 未満、赤の点は 50° 以上のずれを表す。2017 年 4 月 1 日から 2019 年 11 月 30 日までの観測。軌道は GSM 座標系で、縦軸・横軸の単位は地球半径 ($1 R_E = 6370 \text{ km}$)。

干渉にも埋もれることがないので、地球近くでずれの少ない電場ベクトルが観測されたのは当然と考えられる。

これを確かめるため、誘導電場 $\mathbf{V}_{sc} \times \mathbf{B}$ の「あらせ」スピン面内成分の大きさを図 4 に示す。緑の点が 1mV/m 、赤い点が 2mV/m となった位置である。分布が単純な円形にならないのは、地球の磁場が完全な双極子でないこと、様々な磁気緯度のデータが重なっていること、地球の磁極の日周運動に伴い GSM 座標では誘導電場 $\mathbf{V}_{sc} \times \mathbf{B}$ が同じ値になる場所が 1 日のうちでも変化すること、さらに、「あらせ」衛星のスピン面が常に同じ方向を向いているわけではないことによる。「あらせ」のスピン軸は地球の公転により次第に太陽からずれていくため、時折大きな修正が加えられる。

図 3 と図 4 を見比べると、夜側 $4 R_E$ 、昼側 $3 R_E$ 以内でずれの小さい観測が行われたのは、予想通り誘導電場のスピン面内強度が強い領域(赤い点より地球に近い側)であった。しかし朝夕側では、図 4 で誘導電場成分が強い $Y=2.5 R_E$ 、 $-2.5 R_E$ 付近でも図 3 ではずれの大きい電場データがあることがわかる。これは、単に誘導電場の強さだけでなく、他の要因が電場の方向ずれに関わっていることを示唆している。

図 3 では色が重なっている場所があるため、ずれの大きさ別にプロットした結果を図 5 に示す。

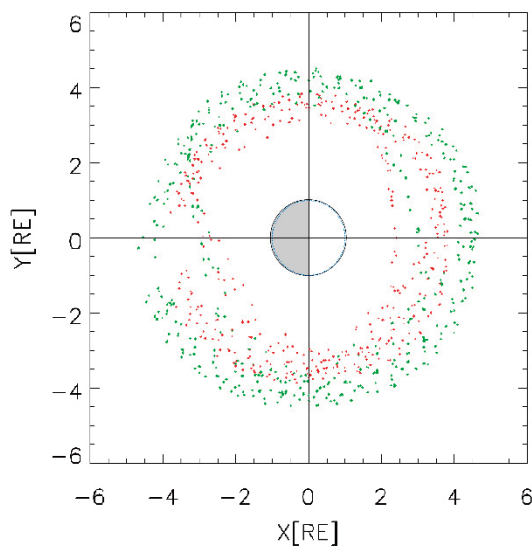


図 4 「あらせ」衛星の軌道運動による誘導電場($\mathbf{V}_{sc} \times \mathbf{B}$)の「あらせ」スピン面への投影成分。緑が 1mV/m 、赤が 2mV/m となる位置。2017 年 4 月 1 日から 2019 年 11 月 30 日までの期間について、およそその位置を示すため 10 日おきに描画。

地球から夜側 $4 R_E$ 、昼側 $3 R_E$ 、朝夕 $2.5 R_E$ 以上離れた位置では、方向ずれが大きい電場だけでなく、方向ずれ 10° 以内の電場も観測されている。電場の方向ずれは距離だけで決まるわけではないことがわかる。

3.2 電場のずれとプラズマ密度との関係

次に、地球から遠い場所 ($4 R_E$ 以上) において、方向ずれの大きい電場がどのような時に観測されたのかを知るため、プラズマ密度との関係を調べた。プラズマ密度が低いとデバイ長が長くなり、衛星本体の帯電の影響がプローブにまで及ぶなど、観測上不利な条件が増えるためである。

量的な分布を知りたいので、前節よりも磁場のスピン面平行条件を厳しくし、スピン面に対する磁場ベクトルの仰角 θ_B の絶対値が 0.4° 未満となる点を 1 つの調査点と数え、その点における、スピン面内電場成分の基準方向(磁場から 90° 方向)からの電場ベクトルのずれと、その時の PWA/HFA によって推定された電子密度を調べた。

図 6 は 2017 年 4 月 1 日から 2017 年 9 月 30 日までの半年間に地球から $4 R_E$ 以上の距離で「あらせ」によって観測された電場の方向ずれと電子密度の関係である。プラズマ密度が低いとずれが大きく広がり、図の対角線より左上の領域に点が集まる傾向が見られる。

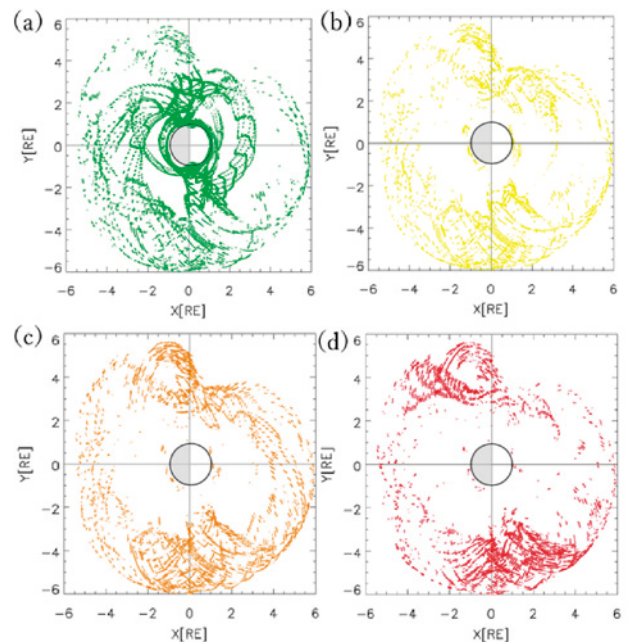


図 5 図 3 を観測電場の方向ずれの大きさ別にプロットした図。(a) 10° 未満のずれ、(b) 10° 以上 20° 未満、(c) 20° 以上 50° 未満、(d) 50° 以上のずれ。

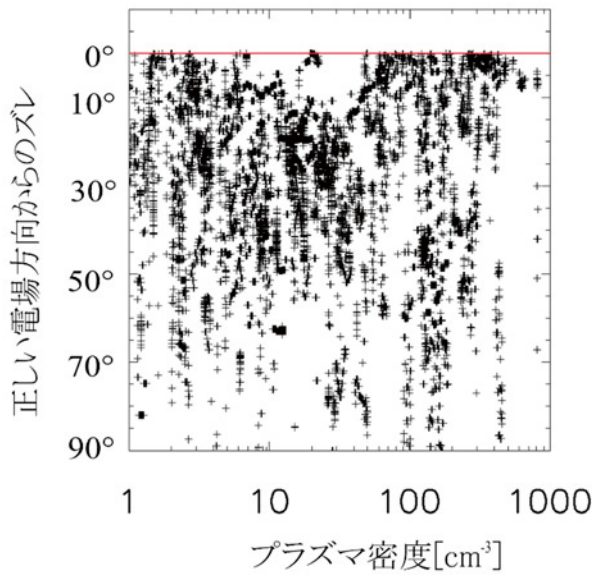


図6 あらせ衛星が地球から4R_E以遠で観測した2017年4月1日から2017年9月30日までの期間のプラズマ密度と観測電場の方向ずれの関係。横軸がHFAから求めたプラズマ密度、縦軸が電場の方向ずれである。

続く2年2か月についても同様に調査を行い、約半年ずつ表示したものが図7である。時期によりばらつきが多く、密度が高いのにずれが大きい場合もあることがわかる。

図6, 図7のようなプロットでは、同一の場所にデータが密集すると重なって見えなくなり、実

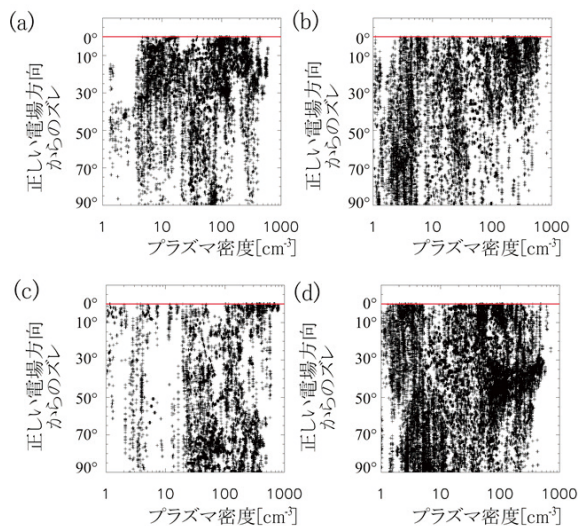


図7 あらせ衛星が地球から4R_E以遠で観測したプラズマ密度と観測電場の方向ずれの関係。(a) 2017年10月1日から2018年3月31日, (b) 2018年4月1日から2018年9月30日, (c) 2018年10月1日から2019年3月31日, (d) 2019年4月1日から2019年11月30日の期間。

際の存在確率を把握するのが難しい。そこで図6, 図7に用いた2017年4月1日から2019年11月30日までのデータサンプル281万4007点を、観測電場の方向ずれ、およびプラズマ密度ごとに区間に分けて、角度範囲10°あたりの割合として示したのが図8である。電場方向のずれ10°以上は区間幅を広く(20°)とったので、数値を10°あたりの割合に換算してある。低プラズマ密度0~10 cm³の割合が高いのは、プラズマ密度の低い遠地点付近では衛星の速度が遅くなり滞在時間が長いことによる。

図8では、プラズマ密度が低いところでは電場方向のずれが様々な角度に広がっているが、プラズマ密度が高くなってくると電場方向のずれが0°に集まる傾向がみられる。すべての密度範囲を通して見ると(右端)電場の方向ずれが10°未満だったのはわずか15.9%であった。

プラズマ密度別に角度のずれの割合をヒストグラムにしたものが図9である。こちらは角度範囲を10°に揃える換算は行っていない。プラズマ密度が高いほど方向ずれが小さい割合が増え、プラズマ密度640 cm³以上では方向ずれ10°以内の観測が84.4%であった。この領域はプラズマ圏の中と考えられる。プラズマ密度320~640 cm³になると、方向ずれ10°以内の観測は25%に激減する。

方向ずれがはなはだしく大きいサンプル(50°以上、濃い桃色、赤)の割合は、プラズマ密度80 cm³以上の範囲では2割程度であったが、プラズマ密度80 cm³以下では4割を超えた。プラズマ

電場と磁場のなす角のずれ [°]	電場方向のずれ [°]	プラズマ密度 [cm ⁻³]							計	
		0~10 [cm ⁻³]	10~20	20~40	40~80	80~160	160~320	320~640		640~1280
80~90	0~10	5.0	1.2	0.9	1.6	2.6	2.7	1.7	0.2	15.9
60~80	10~30	4.8	1.5	1.5	1.2	1.7	1.9	1.2	0.0	13.7
40~60	30~50	4.0	1.0	1.2	1.0	2.2	1.5	0.8	0.0	11.7
20~40	50~70	3.7	0.6	1.1	1.1	0.9	0.8	0.3	0.0	8.5
0~20	70~90	4.0	0.6	1.0	1.1	0.5	0.7	0.3	0.0	8.1

図8 あらせ衛星が観測した2017年4月1日から2019年11月30日までの期間に地球から4R_E以遠で計測した電子密度と観測電場の方向ずれの分布。角度範囲10°あたりの割合。横軸がHFAから求めたプラズマ密度、縦軸が電場の観測電場の方向ずれである。右端の割合は、角度範囲20°の区間の値を2倍して合計すると100%となる。

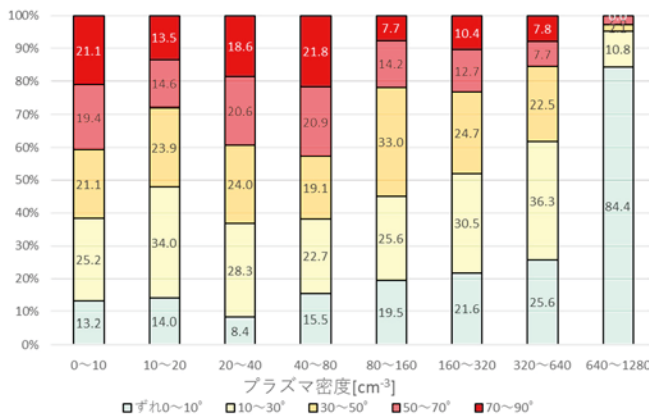


図9 電子密度別に表示した、電場の方向ずれの分布。あらせ衛星が観測した2017年4月1日から2019年11月30日までの期間における地球から4 R_E以遠での観測。

密度 80 cm⁻³以下では、方向ずれの小さい(10°以下)観測の割合も16%以下まで下がった。

4. 考察

電場方向がスピン面内電場成分の基準方向からずれる原因として、調査方法に由来する要因と、プラズマ中の諸現象による要因が考えられる。

本研究で用いた調査方法では、磁場がスピン面に平行という前提の下で、スピン面に投影された電場成分を使って磁場との角度を求めているが、磁場がスピン面に完全に平行(磁場ベクトルの仰角 θ_B が 0°)という条件にしてしまうと、軌道によってはサンプル点がなくなるため、0.4°までのずれを許容した。この程度のずれであれば、電場がもともとスピン面に平行に近い場合は投影された電場成分も元の電場方向に近い。しかし、電場がスピン面に垂直に近い場合は、投影された電場は磁場に平行な成分を持ってしまい、大きな方向ずれとなってしまう。「あらせ」のスピン軸はおおむね太陽方向(太陽方向から 4°~20°)を向いていたことを考えると、この理由による方向ずれが生じやすいのは、太陽方向・反太陽方向の電場が存在する時と予想される。「あらせ」が観測を行っている内部磁気圏では磁気圏対流^[1]により東西方向の電場が主であるとするならば、それに直交する太陽方向・反太陽方向の電場は、後述する人工的な要因によって発生した可能性が高い。

また本研究ではオフセットを一定と仮定して作業を行ったので、オフセットのスピン変調によ

る影響も混入していると考えられる。

最後に衛星周辺のプラズマ諸現象であるが、衛星本体からの光電子の放出や、衛星が周辺プラズマ中を飛行することによってできるウェイク(航跡)など、人工的で局所的な電場ができていると考えられる。それらが磁場に垂直でない場合、およびスピンに垂直な成分を持つ場合は大きな方向ずれの原因となりうるので、今後引き続き調査を継続する。

5. まとめ

プラズマ中の電場が磁場と直交することを利用し、背景磁場が「あらせ」衛星のスピン面と平行になる場合を選んで、「あらせ」PWE/EFDが観測した電場の、スピン面内電場成分の基準方向からのずれを調べた。その結果、電場の方向ずれは地球から遠く、プラズマ密度が薄い場所によく起こることが分かったが、それだけが制御要因ではないことも示された。地球から2 R_E以内の場所ではずれが10°未満の電場データが得られる一方、地球から夜側4 R_E、昼側3 R_E、朝夕2.5 R_E以上離れた位置では、ずれが小さいデータと大きいデータが混在していた。地球から4 R_E以上離れた位置において、観測電場の方向ずれとプラズマ密度の関係を調べた結果、プラズマ密度が640 cm⁻³以上では観測電場の方向ずれが10°以内のことが8割を超えたが、それ以下では電場方向のずれが大きくなり、プラズマ密度80 cm⁻³以下になると50°以上のはなはだしい方向ずれが4割を超えることがわかった。

謝辞

「あらせ」衛星のサイエンスデータは、宇宙航空研究開発機構(JAXA)宇宙科学研究所(ISAS)と名古屋大学宇宙地球環境研究所(ISEE)が運用しているERGサイエンスセンター^[13]

<https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/index.shtml.en>より取得した。電場データのバージョンはレベル1プライムEFD ver 09、磁場データはレベル2 MGF ver 03.04^[9]、衛星軌道データはレベル2 OBT ver 03^[10]、HFAデータはレベル3 HFA ver 3.07^[12]である。本論文3.1節は東北工業大学工学部情報通信工学科2021年卒業の菅野翔太、武田祐汰、渥美拓馬、3.2節は同2022年卒業の武山

巧, 渋谷滯奈の研究成果である。

参 考 文 献

- [1] 小野高幸, 三好由純, 太陽地球圏, p.24, pp.74-76, 共立出版, 東京, 2012.
- [2] Miyoshi, Y., I. Shinohara, T. Takashima, et al., Geospace Exploration project ERG, Earth, Planets and Space, 70, 101, <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0862-0>, 2018.
- [3] Nakamura, Y., Fukuda, S., Shibano, Y., et al., Exploration of energization and radiation in geospace (ERG) : challenges, development, and operation of satellite systems, Earth Planets Space 70, 102, <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0863-z>, 2018.
- [4] Matsuoka, A., Teramoto, M., Nomura, R., et al., The ARASE (ERG) magnetic field investigation, Earth Planets Space 70, 43, <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0800-1>, 2018.
- [5] Kasahara, Y., Kasaba, Y., Kojima, H. et al. The Plasma Wave Experiment (PWE) on board the Arase (ERG) satellite. Earth Planets Space 70, 86, <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0842-4>, 2018.
- [6] Kasaba, Y., Ishisaka, K., Kasahara, Y., et al., Wire Probe Antenna (WPT) and Electric Field Detector (EFD) of Plasma Wave Experiment (PWE) aboard the Arase satellite: specifications and initial evaluation results, Earth Planets Space 69, 174, <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0760-x>, 2017.
- [7] Fahlson, U. V, M. C. Kelley, and F. S. Mozer, Investigation of the operation of a d.c. electric field detector, Planet. Space Sci., 18, 1551–1561, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(70\)90030-9](https://doi.org/10.1016/0032-0633(70)90030-9), 1970.
- [8] 中川朋子, 笠羽康正, 笠原禎也, 三好由純, “ジオスペース衛星「あらせ」による電場観測データの評価に関する研究”, 東北工業大学地域連携センター・研究支援センター紀要 EOS, vol.33, no.1, pp.87-96, <http://doi.org/10.51048/00000098>, 2021.
- [9] Matsuoka, A., M. Teramoto, S. Imajo, et al., The MGF instrument Level-2 spin-averaged magnetic field data of Exploration of energization and Radiation in Geospace (ERG) Arase satellite, doi:10.34515/DATA.ERG-06001, 2018.
- [10] Miyoshi, Y., I. Shinohara, and C.-W. Jun, The Level-2 orbit data of Exploration of energization and Radiation in Geospace (ERG) Arase satellite, doi:10.34515/DATA.ERG-12000, 2018.
- [11] Kumamoto, A., F. Tsuchiya, Y. Kasahara, et al., High Frequency Analyzer (HFA) of Plasma Wave Experiment (PWE) onboard the Arase spacecraft, Earth, Planets and Space, 70, 82, doi:10.1186/s40623-018-0854-0, 2018.
- [12] Kasahara, Y., A. Kumamoto, F. Tsuchiya, et al., The PWE/HFA instrument Level-3 electron density data of Exploration of energization and Radiation in Geospace (ERG) Arase satellite, doi:10.34515/DATA.ERG-10001, 2021.
- [13] Miyoshi, Y., T. Hori, M. Shoji, et al., The ERG Science Center. Earth Planets Space 70, 96, doi:10.1186/s40623-018-0867-8, 2018.
- [14] ERG Science Center, Definition of science coordinate systems for the Arase satellite, https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/documents/pdf/ERG_Coordinate_System_202004.pdf, April, 2020.