

令和元年度学内公募研究（実用化型）
〔研究論文〕

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

中川 朋子¹⁾, 笠羽 康正²⁾, 笠原 禎也³⁾, 三好 由純⁴⁾

Method of Quality Assessment of DC to Low-frequency Electric Field Data Obtained by PWE/EFD Onboard the Arase Satellite

Tomoko NAKAGAWA¹⁾, Yasumasa KASABA²⁾, Yoshiya KASAHARA³⁾, Yoshizumi MIYOSHI⁴⁾

Abstract

This paper reports an assessment of the quality of the data of DC electric field obtained by the Electric Field Detector (EFD) of the Plasma Wave Experiment (PWE) instrument onboard the Arase spacecraft. The quality of the EFD data was examined in two aspects, consistency of data from two orthogonal probe systems and angular deviation of electric field from right direction orthogonal to the background magnetic field. Disagreement in amplitudes (> 40%) and directions (>18 degree) of orthogonal measurements was found when spin modulation of spacecraft potential was larger than 5% of the potential difference. Electric field vector deviated from right direction at large distance from the Earth. Asymmetry of waveform of probe potential can serve as an indicator of inaccuracy of directional measurement of the electric field.

1 はじめに

地球磁気圏中の電場の情報は、磁気圏内のプラズマの動きを知り磁気圏のダイナミクスを知る上で重要である^{1) 2) 3)}。また、電場と磁場の変動を共に解析することによってプラズマ波動のポインティングベクトルを知ることができ、磁気圏内のエネルギー輸送の解明に大きな貢献が期待される。

DC電場を計測するには様々な方法があるが、最も一般的に行われているのが2つのプローブ間の電位差を計測してプローブ間の距離で割って電場を求める「ダブルプローブ法」^{4) 5)}

1) 情報通信工学科 教授

Professor of Department of Information and Communication Engineering

2) 東北大学 惑星プラズマ・大気研究センター 教授

Professor of Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Tohoku University

3) 金沢大学 総合メディア基盤センター 教授

Professor of Information Media Center, Kanazawa University

4) 名古屋大学宇宙地球環境研究所 教授

Professor of Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

である。しかし宇宙空間プラズマ中では、熱速度の大きいプラズマ電子がプローブに付着するため、プローブは負に帯電し、その場の電位と同じにはならない。一方、日照中では光電子が放出されプローブは正に帯電するが^{6) 7)}、エネルギーの低い光電子はプローブに戻る事となる。結果としてプローブの電位は、光電子と周辺プラズマ、その他二次電子・二次イオン等の変化に応じて、電荷の流入と流出が釣り合うように揺れ動くことになる^{4) 5) 6) 7)}。帯電の影響が及ぶ範囲をプラズマシース、その厚さの指標となる長さをデバイ長というが、プローブと衛星間の距離をデバイ長より十分長くする、浮遊電位の値が同じになるよう2組のプローブ対の素材・大きさ・形状を揃える、浮遊電位を小さくするためプローブにバイアス電流を流す、などの工夫が行われている^{1) 2)}。

このような努力にもかかわらず、電場の計測は容易ではない。一定の電場中を衛星がスピンしながら計測すれば、理想的には正弦波の信号が得られるはずであるが、得られた信号が正弦波からかけ離れていることが多いのである。プラズマ中の衛星本体の下流にできる航跡（ウェイク）や衛星本体の影による波形の乱れ、プローブから出た光電子が直接衛星本体に流れ込む影響などが内外の人工衛星観測によって報告されている^{8) 9)}。電場を用いた磁気圏の研究に先立ち、得られた電場データのうち、どの期間のデータの信頼性が高く、どの区間のデータにエラーのリスクが大きいかを簡便に見極める方法の開発が急務である。

従来の衛星においては、衛星電位のデータの出力が衛星の1スピンに数回という少なさであったため、衛星電位による影響を調査するうえで困難があったが、2016年に打ち上げられたジオスペース探査衛星「あらせ」においては、衛星電位の波形解析を行える十分な量のデータが得られるようになった^{1) 2)}。本研究では、あらせ衛星観測によるDC電場及び衛星電位の波形を解析し、データの品質を見分ける指標を提案することを目標とする。

2 ジオスペース探査衛星「あらせ」による電場観測

2.1 「あらせ」衛星

ジオスペース探査衛星「あらせ」は2016年12月20日に打ち上げられた人工衛星であり、近地点340 - 440 km、遠地点32,200 - 32,300 km、軌道傾斜角31度の長楕円軌道をおよそ9時間半の周期で周回している¹⁰⁾。地球内部磁気圏の放射線帯粒子の加速メカニズムを解明するため、6種のプラズマ粒子観測器と1個の磁場観測器、1個のプラズマ波動・電場観測器、およびソフトウェア型波動粒子相互作用解析装置を搭載している³⁾。

2.2 プラズマ波動・電場観測器による衛星電位・DC電場観測

DC電場観測はこのうちプラズマ波動・電場観測器 Plasma Wave Experiment (PWE) のサブシステム Electric Field Detector (EFD) によって行われる。PWEはU1とU2, V1とV2という直交2系統4本のワイヤアンテナ Wire Probe Antenna (WPT) 間の電位差計測を行っている(図1)。WPTは、約15mのステンレスワイヤの先に窒化チタンアルミでコーティングされた直径60mmのアルミ合金球のついた構造であり、先端部0.7mが導体として周辺プラズマと接触、残りの部分はポリイミドによって絶縁されている。衛星の自転軸から球プローブ中心までの距離は15.7mである²⁾。PWE/EFDは高時間分解能の電場2系統 E_u , E_v , および4つのプローブそれぞれについてのプローブと衛星間の電位差 V_{U1} , V_{U2} , V_{V1} , V_{V2} を出力することができる²⁾。

「あらせ」衛星は約8秒でスピンすることによって姿勢安定とアンテナの展開を行っているので、空間的に一様なDC電場を計測すると、電場 E_u , E_v および衛星間電位差 V_{U1} , V_{U2} , V_{V1} , V_{V2} ともスピン周期の正弦波として観測される。

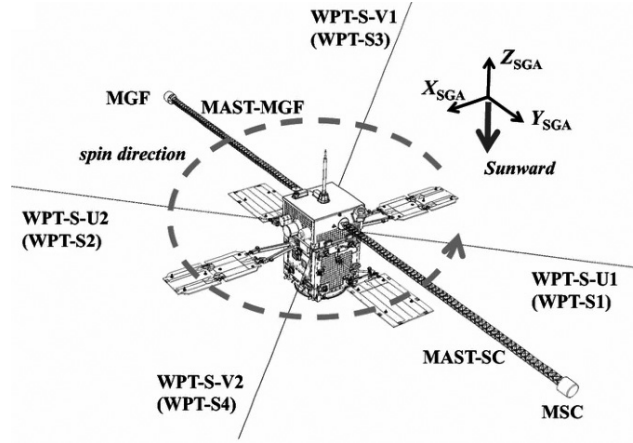


図1 ジオスペース探査衛星「あらせ」の外観とスピン方向（点線矢印）、アンテナ進展方向¹⁾

2.3 観測できる物理量

衛星本体の位置における電位を0とし、衛星の帯電による浮遊電位を ϕ_{sc} 、仕事関数を WF_{sc} 、プローブU1の位置の電位を ϕ_{U1} 、プローブU1のシースによる電位のずれを $\phi_{sheathU1}$ 、プローブU1の仕事関数を WF_{U1} とし、シースインピーダンスによる電圧降下を無視すると、U1プローブと衛星間の電位差 V_{U1} は

$$V_{U1} = \phi_{sc} + WF_{sc} - \phi_{U1} - \phi_{sheathU1} - WF_{U1},$$

と書くことができる。観測可能なのは左辺の V_{U1} であり、右辺の ϕ_{sc} , ϕ_{U1} , $\phi_{sheathU1}$, V_{U2} を直接計測することはできない。同様にU2プローブと衛星間の電位差は

$$V_{U2} = \phi_{sc} + WF_{sc} - \phi_{U2} - \phi_{sheathU2} - WF_{U2}$$

と書ける。この2つの差をとると、2つのプローブ間の電位差は

$$\Delta V_U = V_{U1} - V_{U2} = -(\phi_{U1} - \phi_{U2}) - (\phi_{sheathU1} - \phi_{sheathU2}) - (WF_{U1} - WF_{U2})$$

となるが、2つのプローブのシース電圧と仕事関数がほぼ同じと仮定すれば、

$$\Delta V_U \sim -(\phi_{U1} - \phi_{U2})$$

と考えることができる。 ΔV_U をプローブ間距離で割ったものが E_u である。

観測されたプローブと衛星間の電位差 V_{U1} と V_{U2} の平均をとると、衛星電位の指標

$$\phi_{scU} = \frac{V_{U1} + V_{U2}}{2}$$

が得られる。U1, U2 のプローブは反対方向に伸展しているため $\phi_{U1} + \phi_{U2}$ がほぼ打ち消しあい、

$$\phi_{scU} \sim \phi_{sc} - \frac{\phi_{sheathU1} + \phi_{sheathU2}}{2} + WF_{sc} - \frac{WF_{U1} + WF_{U2}}{2}$$

となる。日照中ではプローブ U1, U2 にバイアス電流を流すことによって、シース電圧 $\phi_{sheathU1}$, $\phi_{sheathU2}$ を小さくしているため、右辺 2 項目は右辺 1 項目 ϕ_{sc} より小さいと考えられる。仕事関数は一定と仮定すると、この値 ϕ_{scU} の変化はほぼ衛星の浮遊電位 ϕ_{sc} の変化と考えることができる。

2.4 実際に観測された電位差波形

図 2 に 2017 年 12 月 1 日に観測された良好な電位差波形の例を示す。 ΔV_U , ΔV_V も衛星のスピンの同期した正弦波となっており、その振幅は等しく、位相差は 90 度となっている。衛星電位の指標 ϕ_{scU} はほぼ一定であり、その変動の振幅は計測したい電位差 ΔV_U よりも十分小さい。

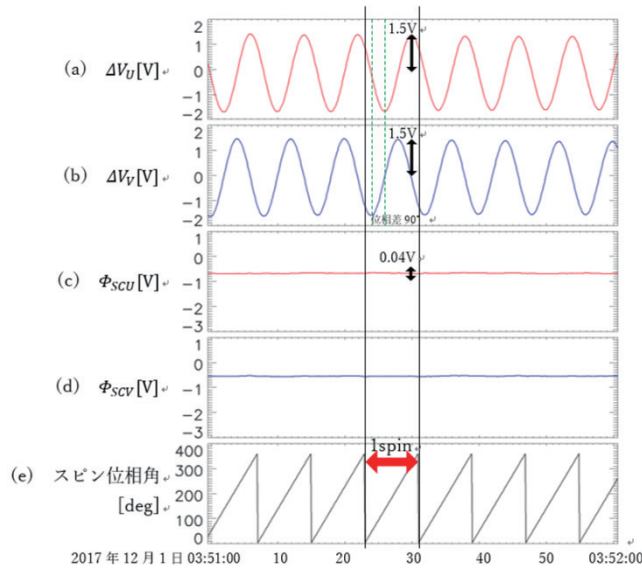


図 2 あらせ衛星 PWE/EFD によって 2017 年 12 月 1 日に観測された良好な電位差観測の例。(a) U 系プローブの電位差, (b) V 系プローブの電位差, (c) U 系で測定した衛星電位 ϕ_{scU} , (d) V 系で測定した衛星電位 ϕ_{scV} , (e) 衛星のスピン位相角 [度]。

問題のある電位差観測例を図 3 に示す。この例では ΔV_U と ΔV_V とで同じはずの正弦波の振幅が違っており、90 度のはずの位相差が 180 度になっている。つまり電場計測が正しく行われていないということである。これらの波形それぞれに正弦波をフィッティングして電場を求めると、U 系と V 系で異なる大きさ・方向の電場が導出されてしまう。疑似

衛星電位 ϕ_{scU} の変動の振幅は、図2の良好な観測例の場合と同じくらいであったが、計測したい電位差のほうが小さくなっているため、相対的に大きくなっている。また、U系アンテナから求めた疑似衛星電位 ϕ_{scU} と、V系アンテナから求めた疑似衛星電位 ϕ_{scV} の波形が異なっている。

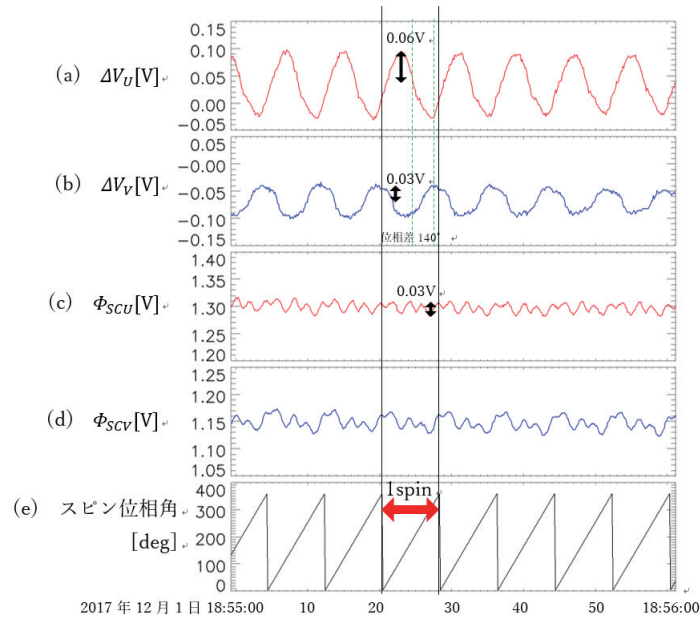


図3 問題のある電位差観測例。各パネルの説明は図2と同じ。

3 研究方法

電場データのもとになる電位差データの信頼性を、1) U系とV系の2つの観測の整合性、2) 得られた電場と磁場の直交性、の2つの側面から調査し、信頼できる電場データの条件を調べる。使用データは2017年3月29日から、2018年3月31日にあらせ衛星PWE/EFDによって取得された低周波の電位差 V_{U1} , V_{U2} , V_{V1} , V_{V2} (サンプリング周波数8Hz, 分解能8bit) である。各プローブのサンプリングの時間差は1ms程度であり²⁾、低周波の解析には問題にならない。

3.1 U系とV系の2つの電位差の整合性

電位差の整合性の指標として、U系とV系のそれぞれの電位差波形に正弦波をフィットして得た電位差の振幅比 (理想的には1) と位相差 (理想的には90度) を用いる。これらが食い違うときに、衛星本体の電位も揺らいでいたことに着目し、計測したい電位差の振幅 ΔV_U で規格化した疑似的衛星電位 ϕ_{scU} のゆらぎの振幅を横軸に、振幅比と位相差をプロットする。衛星電位のゆらぎの振幅は、1スピン内の最大・最小値の差を用いるが、長期変動 (トレンド) が乗っている場合があるので、1スピン内の長期変化 (トレンド) を差し引いた後、1スピン内の最大・最小値を用いて算出する。

3.2 電場と背景磁場の直交性

電子の易動度が高いため、磁力線に沿った方向に電位差があっても短時間で解消される

ので、特殊な条件を除けば宇宙空間の電場は背景磁場と直交するはずである。実際の電場は3次元であるが、「あらせ」衛星が観測しているのはスピン軸に垂直な2次元平面内に限られるため、この電場・磁場直交性をチェックできるのは背景磁場がスピン面に平行な場合に限られる。あらせ搭載の磁場観測装置Magnetic Field Experiment (MGF)¹¹⁾によって観測された磁場データ8秒値を用い、磁場がスピン面内に入る場合を選び、電場と磁場のなす角を調べる。

4 結果

4.1 U系とV系の2つの電位差の整合性と衛星電位のゆらぎの関係

U系とV系の電位差の振幅比を、電位差の振幅 ΔV_U で規格化した衛星電位 ϕ_{scU} のゆらぎの振幅に対してプロットした例が図4(a)である。電位差の振幅比は1となるべきであるが、衛星電位ゆらぎが大きくなると1からずれてゆく様子が明らかである。電位差振幅の許容範囲を0.7から1.4まで(青い破線)とすると、衛星電位のゆらぎの許容量は ΔV_U の0.05倍(5%)以下(赤い縦の破線)となった。

U系とV系の位相差をプロットしたのが図5(b)である。位相差の許容範囲を90度 \pm 18度(青色破線)と設定すると、衛星電位のゆらぎの許容量はやはり ΔV_U の0.05倍(5%)以下(赤い縦の破線)ということが示された。軌道の異なる他の日についても同様の解析を行い、同様の結論を得た。

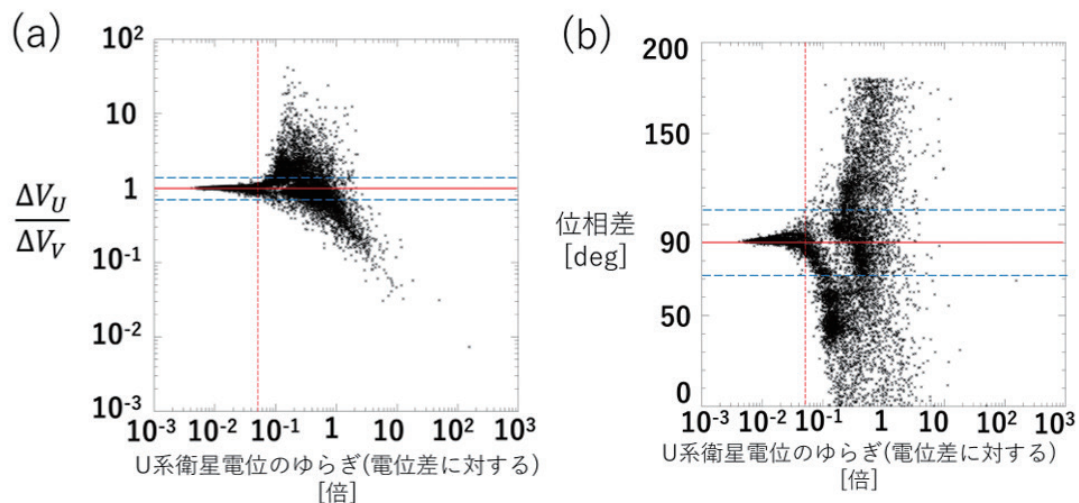


図4 2017年12月1日にあらせ衛星が観測したU系とV系のプローブ間電位差の(a)振幅比、(b)位相差。横軸はU系電位差の振幅 ΔV_U で規格化した衛星電位 ϕ_{scU} のゆらぎの振幅。

4.2 電場と磁場の直交性

電場と磁場が正しく直交していた例とそうでなかった例をそれぞれ図5(a), (b)に示す。上から4段目に示したのがU1アンテナのスピン位相角であり約8秒で0度から360度へと増加してゆく。同じパネルに示した2本の横線が背景磁場の方向である。それらの交わるのが、アンテナが磁場に平行となる瞬間であり(緑の点線)、この時電場は0のはずである。1スピンに2回ある交点の中間でアンテナは磁場に垂直になり(緑の実線),

そのとき電場が最大・最小となるはずである。図5 (a) では、アンテナが磁場と直角となる時刻 (実線) で電位差波形 ΔV_U がピークとなっていることがわかる。U1, U2プローブと衛星間の電位差 V_{U1}, V_{U2} も、おおむね正弦波となって同じ位置でピークを迎えている。

一方、図5 (b) では、電位差波形 ΔV_U のピークはアンテナが磁場と直角となる時刻 (実線) よりも約1秒早い。スピン周期が約8秒であることを考えるとこれは約45度に相当し、電場方向の計測として無視できない。U1, U2プローブと衛星間の電位差 V_{U1}, V_{U2} の波形も正弦波からかけ離れており、衛星電位の変動の影響が強いと考えられる。

図5の最下段に、4つのプローブの衛星との電位差出力の平均で求めた疑似衛星電位

$$\phi'_{sc} = \frac{V_{U1} + V_{U2} + V_{V1} + V_{V2}}{4}$$

を示す。図5 (a) (b) いずれの場合でも衛星電位の変動はあり、(b) の場合は見たい信号に対して変動が無視できない大きさとなっていたことがわかる。

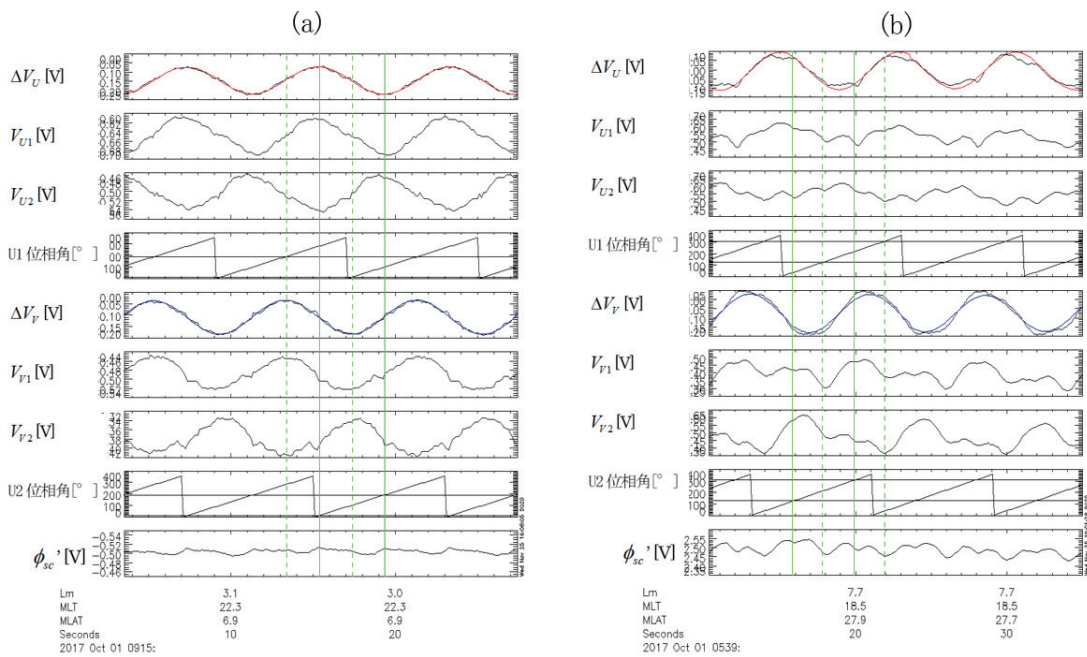


図5 電場と磁場が (a) 直交している良好な電位差波形, (b) 直交していない電位差波形。上から、U系電位差 ΔV_U , U1プローブと衛星間の電位差 V_{U1} , U2プローブと衛星間の電位差 V_{U2} , U1アンテナ位相角と背景磁場及びその反対方向の位相角 (2本の横線), V系電位差 ΔV_V , V1プローブと衛星間の電位差 V_{V1} , V2プローブと衛星間の電位差 V_{V2} , U2アンテナ位相角と背景磁場位相角, 疑似衛星電位 ϕ'_{sc} 。下段は観測された際の衛星の位置を示しており、上からL値, 地磁気地方時 (MLT), 磁気緯度 (MLAT) を表す。2017年10月1日の (a) 9:15:03-9:15:27 (b) 5:39:00-5:39:35の観測結果。

衛星電位の変動の影響を消して、各プローブ位置での電位の状況を知るため、疑似衛星電位からプローブ出力 V_{U1} を引いて

$$\phi'_{U1} = \phi'_{sc} - V_{U1}$$

と定義する。疑似衛星電位が

$$\phi'_{sc} = \phi_{sc} - \frac{1}{4} \sum_{probes} \phi_{sheath} + WF_{sc} - \frac{1}{4} \sum_{probes} WF$$

と書けることを使うと、

$$\phi'_{U1} = \phi_{U1} + \phi_{sheathU1} - \frac{1}{4} \sum_{probes} \phi_{sheath} + WF_{U1} - \frac{1}{4} \sum_{probes} WF$$

となり、仕事関数が一定と考えれば、 ϕ'_{U1} の変化は、プローブ位置での本来の電位 ϕ_{U1} と、このプローブのシース電位 $\phi_{sheathU1}$ と他のプローブにできるシース電位の平均との差によると考えられる。こうして得られた各プローブの電位 ϕ'_{U1} 、 ϕ'_{U2} 、 ϕ'_{V1} 、 ϕ'_{V2} を図6に示す。図6(a)では、図5(a)に見られた波形のゆがみが消え、 ϕ'_{U1} と ϕ'_{U2} で対称な正弦波が得られている。一方、図6(b)では、衛星電位の変動の影響を取り除いても正弦波になっておらず、 ϕ'_{U1} と ϕ'_{U2} の波形が符号反転の鏡像関係になっていない。よって ϕ'_{U1} と ϕ'_{U2} の対称性を見ることによって、電場方向の計測がうまくいっているかどうかの指標として使うことができる。なお、 ϕ'_{U1} 、 ϕ'_{U2} 、 ϕ'_{V1} 、 ϕ'_{V2} は、非対称ながら90度ずれた位相差で波形の再現性がある。これは、特定のスピンの位相にプローブが回ってくると、電位ないしシース電位が同じように変化することを示す。この原因として、衛星周辺のプラズマの不均一、磁力線方向に対する衛星本体シースの非等方性などが考えられる。

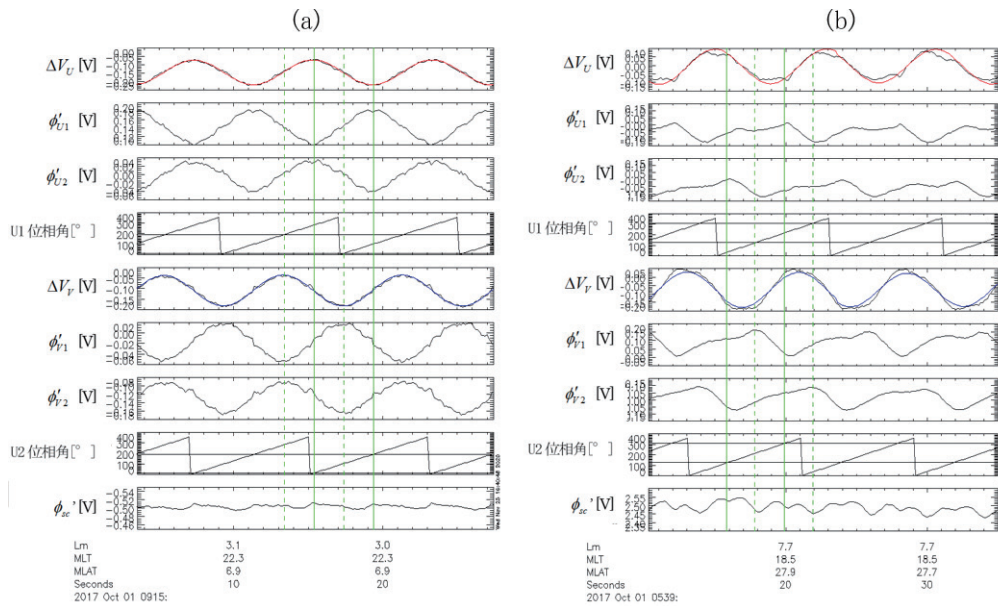


図6 衛星電位変動の影響を除いた各プローブの電位 ϕ'_{U1} 、 ϕ'_{U2} 、 ϕ'_{V1} 、 ϕ'_{V2} 。(a) 電場と磁場が直交している良好な電位差波形、(b) 直交していない電位差波形。図5と同じデータによる。

電場と磁場の直交性をチェックできる機会は、1日に数回あるが、そのうちどこで良好な電場方向が得られ、どこで問題があったかを示した例が図7である。これは2017年10月1日について、得られた電場方向が背景磁場から何度の方向であったかを軌道上に記したものである。地球半径の3倍以内では良好な観測が行われていたが、地球半径の4倍以上の遠距離では、正常な方向からのずれが大きいことがわかる。

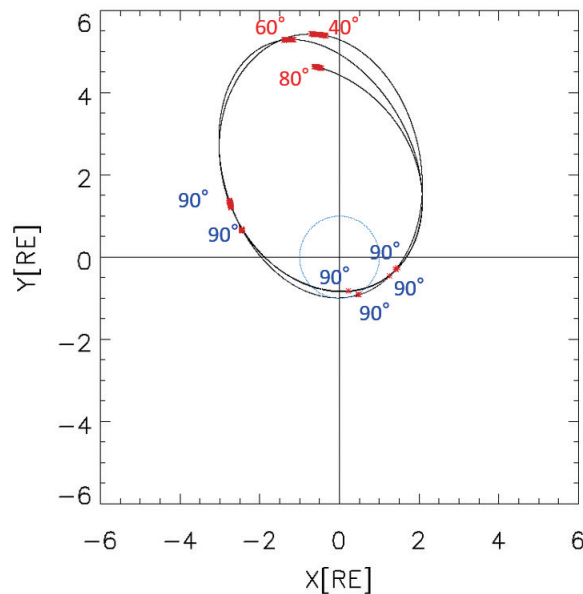


図7 「あらせ」衛星軌道上にプロットした「電場と磁場の角度」。背景磁場がスピン面に平行となる位置を赤点で示した。水色の丸が地球である。Geocentric Solar Magnetic 座標で表示した。

5 まとめ

人工衛星による電場観測データの評価を、直交2系統のプローブシステムの結果の差と、電場・磁場直交性の2つの側面から行った。衛星電位のゆらぎが相対的に大きい時に電場観測の不整合が起こること、また、観測された電場が正しい方向からずれていることの指標として、衛星本体電位の変動を差し引いたプローブ電位の波形の非対称性が使用可能であることが示された。

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¹²⁾ (<https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/index.shtml.en>) より取得した。本研究で使したのはレベル1プライムEFD ver09とレベル2 MGF ver03.04¹³⁾、およびレベル2軌道OBT L2 ver03¹⁴⁾である。本研究は、東北工業大学学内公募研究の助成を受けて行われた。図2, 3, 4は東北工業大学情報通信工学科（当時）4年生の猿田陸君が作成した。

参考文献

- 1) Kasahara, Y., Kasaba, Y., Kojima, H. et al. The Plasma Wave Experiment (PWE) on board the Arase (ERG) satellite. *Earth Planets Space* 70, 86, 2018.
- 2) 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, 2017.
- 3) Miyoshi, Y., Shinohara, I., Takashima, T., et al., Geospace exploration project ERG, *Earth Planets Space* 70, 101, 2018.
- 4) 電子情報通信学会「知識の森」S4群5編宇宙エレクトロニクス 2-3 電界計測
http://www.ieice-hbkb.org/files/S4/S4gun_05hen_02.pdf#page=13, 2009年12月。
- 5) Fahlson, U. V., Kelley, M. C., and Mozer, F. S., Investigation of the operation of a d.c. electric field detector, *Planetary and Space Science*, 18, pp.1551-1561, 1970.
- 6) 岡田敏美, 石坂圭吾, 向井利典, 鶴田浩一郎, 松本紘, 衛星電位 - 電子密度の関係をを用いた地球磁気圏の電子密度構造の研究, *電子情報通信学会論文誌 B*, Vol.J83-B, No.6, pp.885-893, 2000年6月25日。
- 7) 向井利典, 人工衛星の帯電, *静電気学会誌*, 20, 2, pp.92-97, 1996年。
- 8) Amano, K., Tsuruda, K., Hayakawa, H., et al., Interpretation of pulse-like electric field distortions observed by Exos D satellite, *J. Geophys. Res.*, 103, A6, pp.11,851-11,861, 1998.
- 9) Mozer, F. S., DC and low-frequency double probe electric field measurements in space, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, pp.10,942-10,953, 2016.
- 10) 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, 2018.
- 11) Matsuoka, A., Teramoto, M., Nomura, R., et al., The ARASE (ERG) magnetic field investigation, *Earth Planets Space* 70, 43, 2018.
- 12) Miyoshi, Y., Hori, T., Shoji, M., et al., The ERG Science Center, *Earth Planets Space* 70, 96, 2018.
- 13) Matsuoka, A., Teramoto, M., Imajo, S., et al., The MGF instrument Level-2 spinfit magnetic field data of Exploration of energization and Radiation in Geospace (ERG) Arase satellite, DOI:10.34515/DATA.ERG-06001, 2018.
- 14) Miyoshi, Y., I. Shinohara and C.-W. Jun. The Level-2 orbit data of Exploration of energization and Radiation in Geospace (ERG) Arase satellite, 10.34515/DATA.ERG-12000, 2018.