

令和元年6月21日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13886

研究課題名(和文)宇宙空間観測用光電界センサーの研究

研究課題名(英文)Study on the use of optical electric field sensors for the measurement in space

研究代表者

小嶋 浩嗣(Hirotsugu, Kojima)

京都大学・生存圏研究所・教授

研究者番号：10215254

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：非侵襲性が特徴である光電界センサーを宇宙空間でプラズマ波動を観測する衛星搭載センサーとして利用する上での技術的な評価と開発ポイントについて明らかにした。特に衛星観測で用いられるトップハット型のダイポールアンテナを光電界センサーに接続した上で、その電気的特性を実験により明らかにした。そして、光電界センサーは、従来の科学衛星に搭載されている電界センサーの感度に対し劣るものの、すべての周波数帯にわたって通常強度のプラズマ波動であれば観測できることを示した。また、光電界センサーの特徴である「センサー部に計測回路のグラウンドを接続する必要がない」ことから、外来導電性ノイズに対して非常に強いことも実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光電界センサーは非侵襲型のセンサーとして、地上において既に利用されているが、衛星に搭載して宇宙空間で利用することを想定した評価は存在しなかった。本研究により、光電界センサーの宇宙空間での利用に対するポテンシャルを示すことができた意義は大きい。感度的にはまだ不足しているものの、ノイズに対する耐性が非常に強いことは科学観測において非常に重要な特徴であり、将来の衛星観測において、衛星からのノイズや擾乱の影響を受けずに高精度で電界を観測できるシステムが光電界センサーで実現できる可能性が開けた。

研究成果の概要(英文)：Optical electric field sensors are noninvasive sensors. They are commonly used in ground tests. The present research focuses on the use of the optical electric field sensors with top-hat antenna elements on board scientific satellites for observing electric fields of plasma waves in space. The noninvasive feature of the sensor is also the significant advantage for plasma wave measurements in space. The present research succeeded in showing that the sensitivity of the optical electric field sensors is enough to observe plasma waves with moderate intensities. However, since the sensitivity of the optical electric field sensor is worse than the sensitivity of conventional electric field sensors on board scientific satellites, further improvements should be expected in the use for space science missions. The present research also showed the optical electric field sensors have the immunity for external conductive noise emissions.

研究分野：宇宙電波科学

キーワード：光電界センサー 宇宙電磁環境 プラズマ波動 電界観測 科学衛星

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地球磁気圏中に存在するグローバルな電界から、プラズマ波動と粒子の間のエネルギー授受として発生するマイクロな波動電界まで多岐にわたる様相で、電界は宇宙空間に存在している。このような電界を科学衛星により計測する一般的な手法はプローブ法である。プローブ法は、数 m から数 10m のワイヤ等の伸展部の先端に球をとりつけ、球で静電ポテンシャルをワイヤで交流電界を捉える。特に、伸展部は、二本を対にしてその差動成分を取得することにより、ダイポールアンテナとして機能する。図 1 にプローブ法による電界センサーの典型的な configuration を示すがそれぞれ次のような欠点がある。(a)では電界センサーエレメントが衛星から直接伸展され衛星のノイズを受けやすく、またセンサーが周囲のプラズマに影響を与えその特性に衛星本体の影響がでる。(b)では、センサーエレメントはマストの先端にあり衛星ノイズの影響は受けにくい、先端のプリアンプに電源/グランドを衛星からフィードする必要があり、そこからノイズの影響を受ける上に周囲のプラズマに影響を与えてしまう。このように現在の電界センサーは観測精度に課題をもっている。一方、光電界センサーは、地上において非侵襲の電界計測方法として開発が進められてきた。光電界センサーでは、そのセンサー部では、ファイバーで供給される光の情報を用いるため、電源が不要であり、図 1(b)のようにセンサーを搭載しても、電源グランドに関しての上述のような問題は起こらず精度の高い計測が期待できる。しかし、この光電界センサーを宇宙で用いようとする試みは、国内外を通じてまったくなされておらず、科学衛星に搭載してプラズマ波動を観測する上でのポテンシャルがどのようなものか評価されていない状況であった。

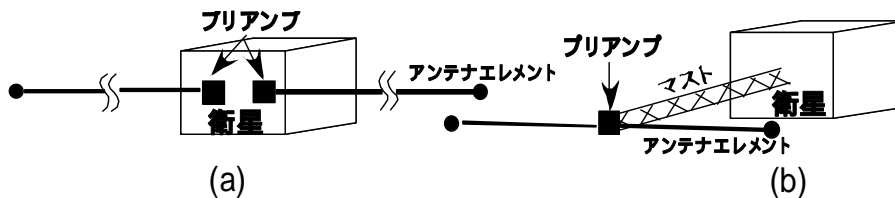


図 1: 現在の衛星搭載電界アンテナの例。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、電子レンジ内部のような閉鎖空間内での電界分布を計測する非侵襲型の電界計測用センサーとして利用されている光電界センサーを、科学衛星に搭載してプラズマ波動を観測するセンサーとして利用した場合のその性能評価を行い、また、搭載条件について明らかにし、現状の光電界センサーを利用した宇宙プラズマ中での観測システムの可能性について検討を行い、技術課題の洗い出しと解決方法を得ようとするのが目的である。

### 3. 研究の方法

既存の光電界センサーのうち低周波計測に特化した仕様の光電界センサーを導入する。そして、衛星観測でプローブ法で行う際と同様に、エレメントにトップハットを装着する形で、ダイポールアンテナを実現する。その上で、電気的特性を評価しながら電界値の絶対値評価を行い、一般に感度が低いといわれる光電界センサーをプラズマ波動観測に使用する上でどの程度の性能となるかを評価する。ただし、その際、光電界センサーの非侵襲性を損なわないために、アンテナエレメントは、従来の衛星観測のように数 10m というような長いもの

ではなく短いものを想定する。

### 4. 研究成果

図 2 は、既成の光電界センサー部 (SEIKOH GIKEN 製) に衛星観測用電界センサーと同様のトップハット型のアンテナを装着したものである。エレメントの長さは 3cm、トップハットは、10cm x 7cm の板である。従来は数 m から数 10m のエレメント長のアンテナを用いているが、ここでは非侵襲性である光電界センサーの特徴をできるだけ損なわないように短いエレメントとした。もちろん、短いエレメント長となる分、実効長が短くなるため、感度が落ちることになるが、この状態で性能を評価して、どこまでエレメント長を伸ばす必要があるかについて

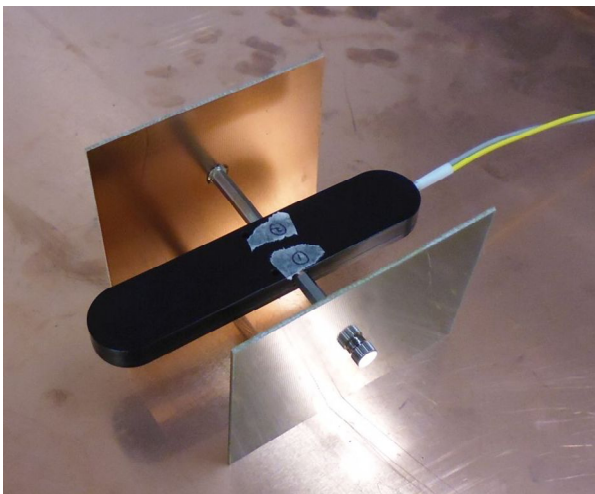


図 2: センサー部と装着させたトップハット型センサー。

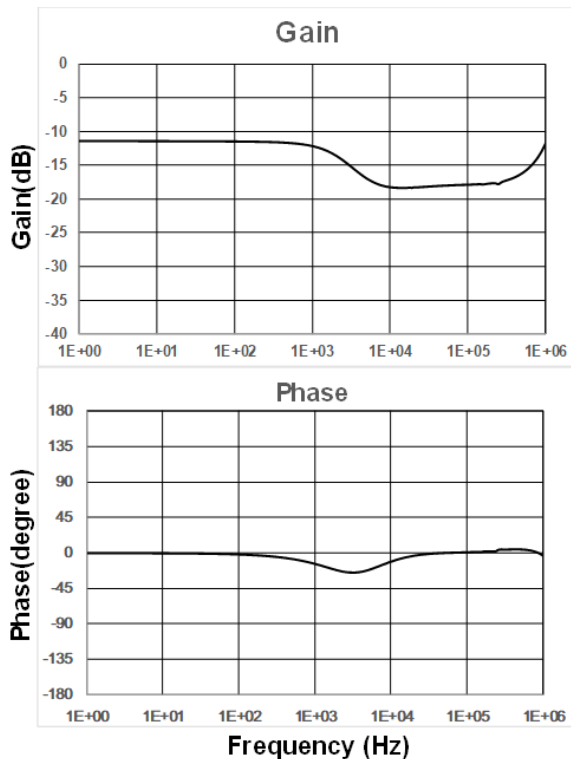


図 3: 実験室で取得した光電界センサーの周波数レスポンス(上: ゲイン、下: 位相).

図 5 に本研究で用いている光電界センサーの感度を、他の衛星での電界センサーとの感度とともに示す。図 5 では、横軸が周波数、縦軸が電界強度を示している。そして、「Arase」と表示されているのが、我が国の地球放射線帯を観測する科学衛星 Arase に搭載されている電界センサーの感度曲線である。それに対して、effective length 1m, 3m, 15m と矢印でしめされているのが、計測から換算した光電界センサーの感度曲線である。Effective length とは、アンテナの実効長のことであり、ここではアンテナ長の半分を仮定しているため、実効長 1m というのは、ダイポールアンテナとしての長さが 2m ということである。参考までに、先に述べた Arase 衛星の実効長は 15m である。これらと比較すると、明らかに光電界センサーの方が感度が悪い。特に、数 100Hz 以上では顕著である。一方で、低周波になるとそれほど変わっていない。一般にプラズマ波動の強度は低周波程強くなるため、低周波の感度は問題ないといえる。一方、高周波については、一般的な強度のプラズマ波動を観測することはできるものの、現在ある Arase 衛星の電界センサーと同じ 15m の実効長と比較しても、20dB ほど感度が悪いことがわかる。非侵襲で計測ができる光電界センサーであるので、従来の衛星のように 10m 以上のアンテナを伸展させて観測することは、あまり想定していない。そのため、実効長が、1m, 3m のもので比較

も評価を行った。まず、入出力特性を測定して絶対値換算する際のゲイン、位相テーブルを得た。図 3 に取得したその周波数レスポンスを示す。感度を評価する上でゲインが必要となるが、図 3 から 1kHz 程度まではフラットで -12dB 程度、そこから上でやや落ちて -18dB 程度、そして、数 100kHz から上で再び上昇して、-12dB 程度までもどっていることがわかるが、概ね、10dB から 20dB 程度の間でロスしていることがわかる。一方、位相周りにについては、比較的安定している周波数帯が広く存在しているが、数 kHz 程度で、40 度ほどまわっている。波形観測では、この位相変化も補正する必要があるが、この程度の位相まわりであれば、比較的その補正も用意であり精度が高い較正が期待できる。

次に重要なのは、センサーのノイズレベルである。図 4 は電磁シールドルーム内で、光電界センサーを動作させ低ノイズ化で測定した光電界センサーの出力ノイズである。これを見ると 30kHz 以下でノイズレベルの上昇がみられ、逆にそれ以上ではフラットなノイズレベルとなる。この図 3 および、図 4 のデータから光電界センサーの感度を計算することができる。

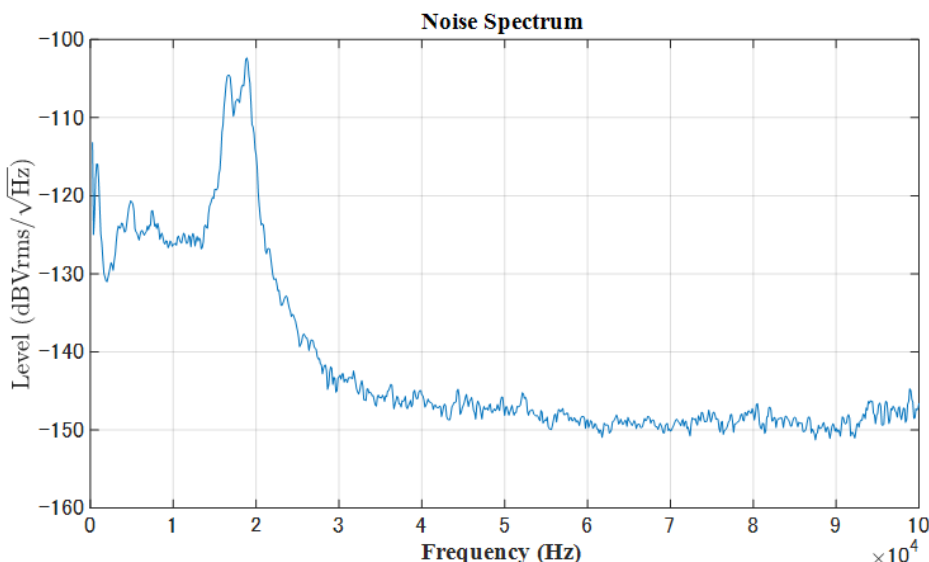


図 4: シールドルーム内低ノイズ下環境で計測した光電界センサーの出力ノイズ。

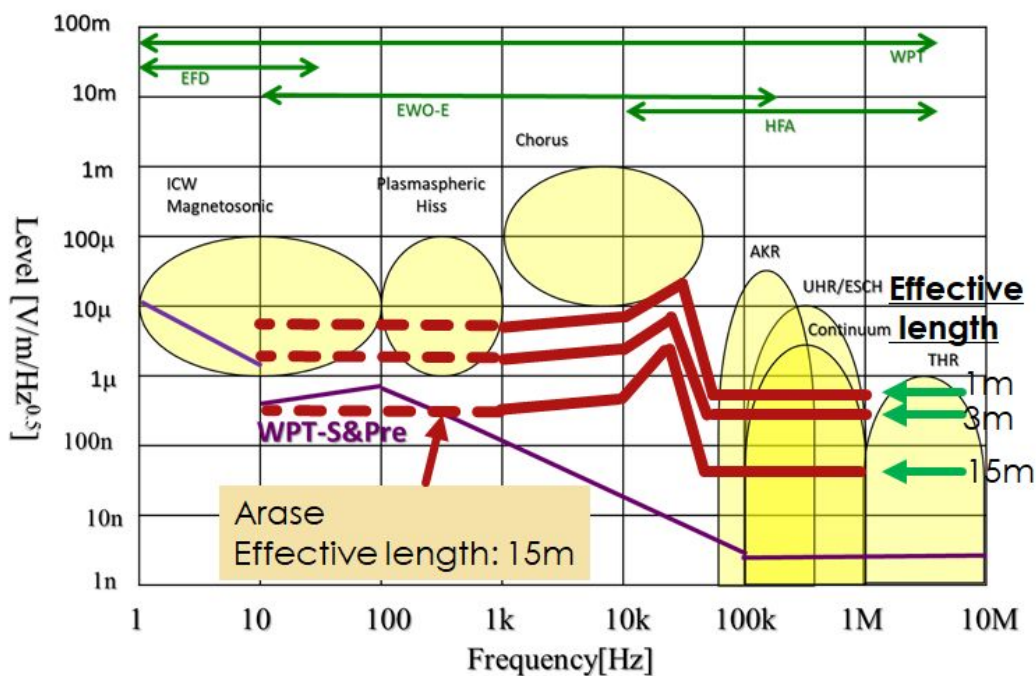


図 5: 求めた光電界センサーの感度と Arase 衛星で使用している電界センサーの感度比較. その他、典型的なプラズマ波動の観測周波数と強度も表示している。



図 6: トップハット型のセンサーとした光電界センサーによるフィールド観測実験。左が基準となる電界アンテナ。右が光電界センサー。

すると更にその感度差は広がる。光電界センサーの感度については、本研究を行うにあたって最も懸念される事項の一つであったが、この計測の結果、従来の衛星の電界センサーに対してどれほど感度が悪いかを定量的に得ることができた。

現状の感度のままで衛星に搭載しても、図5でわかるように、典型的なプラズマ波動の大部分は観測することができる。一方で、高感度を要するような微弱な現象に関しては、感度が不足しており実効長が短いままでその感度を実現するには、更にセンサーの改良が必要となることわかる。

実際に光電界センサーとトップハット型エレメントを用いその特性を確認するために、フィールド実験を行った。図6は屋外で放送波を光電界センサーで計測してその絶対値を算出するための実験の様子である。右に光電界センサー、左には、比較のために較正されている Active monopole 電界センサーを配置している。この実験では、同じ中波帯の放送波を両センサーで観

測して、そこから計算される電界の絶対値の比較を行った。その結果、光電界センサーとトップハット型エレメントによって計測し絶対換算された電界値は、校正された Active monopole アンテナで観測した電界値と 1dB 程度の誤差範囲で一致していることを確認した。また、その指向性についても十分なものであった。そして、更に、光電界センサー側では、Active monopole がうけていた外来ノイズの影響をほとんど受けないことも示すことができた。これは、Active monopole 側が図 1 で示したように電源グランドなどをセンサーまでフィードする必要があるため、そこからのノイズの影響を受けるのに対し、光電界センサーはファイバーによる光のフィードのみであるため外来からの「導電性ノイズ」をほとんど受けないことに由来している。この耐導電性ノイズへの耐性は衛星観測でも非常に重要である。

この他、光電界センサーの構造(結晶体とエレメントとの接触など)を評価した上で、振動や衝撃に対する耐性に問題があることがわかっており、上記の結果も踏まえて、国際学会において宇宙プラズマ中における観測で光電界センサーがもつポテンシャルについて研究成果発表を口頭で行った。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 1 件)

Kojima, H., Can we use an optical electric field sensor in space missions to investigate space environments?, Progress in electromagnetics research symposium, Toyama, August 4<sup>th</sup>, 2018.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

なし。

## 6 . 研究組織

(1)研究分担者

なし。

(2)研究協力者

研究協力者氏名： 臼井 英之

ローマ字氏名： (Hideyuki Usui)

研究協力者氏名： 井町 智彦

ローマ字氏名： (Tomohiko Imachi)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。