

平成 21 年 6 月 17 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19760279

研究課題名 (和文) 科学衛星搭載用電界センサの特性解析

研究課題名 (英文) Characteristics of electric field sensors  
onboard scientific satellites

研究代表者

東 亮一 (HIGASHI RYOICHI)

石川工業高等専門学校・電気工学科・助教

研究者番号：10435422

研究成果の概要：

本研究では衛星搭載用電界センサのインピーダンスについての膨大な量の計測データ解析環境を構築し、統計解析を行った。その結果、負性抵抗が実測される原因の一端を明らかにした。また誤差のある測定データに対して補正することを試み、理論値にほぼ等しい値を示すことができ、この方法の有効性を示すことができた。これによりこれまで計測されたデータの有意性を向上させ、また将来の衛星計画において貢献できると思われる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	0	2,200,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	270,000	3,370,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：電界センサ、アンテナインピーダンス、宇宙プラズマ、科学衛星

## 1. 研究開始当初の背景

地球周辺の宇宙空間は何もない空間（いわゆる真空）ではなく、地表から高度約 80 km 以上はプラズマ粒子によって満たされている。このプラズマ粒子は太陽からの紫外線によって地球の大気分子が電離したものや、太陽から吹き付ける太陽風に含まれていたものである。一方地球は固有の磁場を持っており、太陽から吹き付けるプラズマ粒子のほとんどは地球の磁場によって遮られ、大気圏まで届くプラズマ粒子は一部である。つまり、主に太陽風のプラズマ粒子が存在する領域

と、地球の大気分子を起源とするプラズマ粒子が存在する領域に分けることができ、後者を地球磁気圏と呼んでいる。

これまで地球磁気圏及びその他の惑星磁気圏の構造を明らかにする為、世界各国から多くの科学衛星が打ち上げられ様々な観測が行われている。日本もその例外ではなく、宇宙航空開発研究機構を始め、多くの大学や研究機関が協力して科学衛星を打ち上げ、地球磁気圏におけるプラズマ粒子、電磁波動、惑星磁場など磁気圏構造に関わる物理量の観測を行っている。磁気圏中を伝搬する電磁

波動はプラズマ粒子とエネルギーの授受を行うので、波動の伝搬特性は伝搬経路に存在するプラズマ粒子の影響を受ける。つまり地球磁気圏中の電磁波動を観測し解析することで伝搬してきた経路の情報を取り出すことができるので、伝搬経路のプラズマ環境のリモートセンシングができ、地球磁気圏の構造を解明する有効な手段の1つとなっている。太陽活動は地球磁気圏を通じて地球の環境に大きな影響を与えていて、フレアなどの太陽表面の爆発現象が地球の磁気嵐の発端となり、気象衛星や通信・放送衛星などの人工衛星に電波障害や通信障害を起したり、オーロラをもたらしたりするのはその例である。宇宙空間はまだ未開発な環境であり、これより開発が進む宇宙太陽光発電や、未知なる活動領域に踏み込む我々にとって、その物理的環境を十分に把握することは非常に重要であると言える。

磁気圏を対象とする研究分野では、科学衛星による観測データの解析だけではなく、コンピュータ・シミュレーションによる解析も盛んに行われている。科学衛星による観測だけでは観測領域や観測時間、観測器のスペックなどの制限があり、十分な解析ができないためである。観測結果とシミュレーションによる解析から得た情報を元に、既存の理論と照らし合わせることで、新たな物理過程や理論の発見につながるのである。つまり「観測」・「シミュレーション」・「理論」の3つのアプローチを連携させることが、磁気圏の構造を解明するための重要な手法となっている。その上で「観測」に関する重要な要素として物理量の正確な絶対値観測がある。研究を進める上では、観測値とシミュレーション結果及び理論値との「比較」が最も基本的な研究アプローチとなるが、物理量の絶対値が分からなければ結果の比較が非常に困難となる。このため、「観測」においては「校正」、つまり衛星に搭載されるセンサと観測器の正確な特性を把握し、得られた観測データをセンサで捉えた物理量の絶対値へ戻すことが最も根本的かつ重要な作業となる。

観測データを校正するためには、観測対象に対するセンサ及び観測器の電気的な特性を把握していなければならない。観測器の特性については衛星打ち上げ前の試験によってその特性を把握することができるが、電界用センサに関してはプラズマの影響を受けるためその特性を把握するのは非常に困難である。科学衛星に搭載される電界用センサはその長さが数十メートルに及ぶため、地上で地球磁気圏と同じ環境を作って特性を測定するには非常に大規模な施設が必要となるからである。科学衛星に搭載されている電界用センサは磁気圏におけるプラズマ中を伝搬する電磁波動のうち、電界成分を観測す

るためのセンサとして用いられる。センサの特性で最も重要なものとして「実効長」と「インピーダンス」がある。実効長はアンテナが受信した「電界強度」とアンテナの端子間に誘起される「電圧」を直接関係付ける係数であり、インピーダンスはアンテナで誘起された「電圧」が観測器にどれだけ「伝わるか」を表すパラメータとなる。つまりこれらの正確な値が分からなければ、受信した電界と得られたデータを結びつけることができず、得られたデータから電界の絶対値を計算することができないことになる。

申請者はこれまでにあけぼの衛星に搭載されている電界センサの特性に関する研究を行ってきた。これまでの研究活動ではセンサの「実効長」に着目し、プラズマ中におけるセンサの実効長を推定し、あけぼの衛星の観測領域においては実効長がプラズマの影響をほとんど受けないということが分かっている。さらに小型センサによる電界観測実験を水中で行い、低周波（～100 kHz）におけるセンサの実効長の周波数特性を計測し、その結果センサの形状及び導体表面の被覆が実効長に影響を与えることが分かり、この影響について理論的に説明することができた。

一方、VLF帯（～100 kHz）を対象としたプラズマ中における電界センサの「インピーダンス」についての研究も行われている。電界センサがプラズマ中に置かれるとその周りにプラズマシースが形成され、電界センサのインピーダンスはほぼこのプラズマシースによって決まるとされているが、これまでの報告で示されている理論では説明できない観測結果が得られている。現状の理論では、電界センサのインピーダンスは正の抵抗成分と容量成分が並列に合成されたモデルで表されるされているが、抵抗成分が負の値となる観測結果が確認されている。つまり現状のモデルでは説明できない結果が得られており、これらの原因を突き止める必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究では衛星搭載用電界センサのインピーダンスに着目し、負の抵抗成分、つまり負性抵抗が実測されるメカニズムを明らかにすることを目的とする。

1989年に打ち上げられた日本のあけぼの衛星には全長数60 mのワイヤアンテナが電界センサとして搭載されている。あけぼの衛星は現在も地球磁気圏を飛翔していて、打ち上げられた1989年から17年間に及ぶ長期間の観測を行っているため、その観測データも膨大な量となっている。あけぼの衛星には電界センサのインピーダンスを直接計測する機能が搭載されており、その計測データも17年分蓄積されている。

まず、これらの膨大なデータを解析することでインピーダンスの抵抗成分が負性抵抗となる、つまり現状のモデルが適用できない場合の計測データを全て探し出し、その条件について検討する。またジオテイル衛星も日本の科学衛星で、あけぼの衛星と似た設計であり、同様に本研究の対象とする。

次に、抵抗成分が負性抵抗を示す条件を元に、理論的に負性抵抗として計測されるメカニズムについて検討する。さらに、理論的解析の結果を元に、電界センサのインピーダンスを既存の観測データの校正に適用し、電界の正確な絶対強度を校正するシステムの構築を行う。

### 3. 研究の方法

まず金沢大学のサーバに保存されている膨大な科学衛星の観測データを申請者の研究室のシステムに保存するためにファイルサーバを構築する。さらに電界センサのインピーダンス計測に関するデータを抽出して解析を行うプログラムの開発を行い、膨大なデータの中から欲しい情報だけを容易に取り出すことができるシステムを構築する。

(1) 金沢大学のファイルサーバには日本の科学衛星であるあけぼの衛星の膨大な量の観測データが保存されている。これらのデータに対して、申請者の研究室からリモートアクセスによる解析を行おうとすると、両者の間のネットワークに高負荷をかけることになる。また両者間のネットワークの転送速度の上限によって制限を受け、作業効率が非常に低いものとなる。そこで作業効率の高い解析を行うため、申請者の研究室に大容量のファイルを保存できるファイルサーバを構築・設置する。サーバのハードディスクの故障や、予期せぬ停電によるトラブルへの予備対策として、保存データのバックアップシステムの構築と無停電電源装置の設置を行う。金沢大学には観測された電磁波動データ、粒子データなどのデータベースが既に構築されているが、本研究では電磁波動データの校正に関する部分についての解析プログラムを開発し、将来的には金沢大学のデータベースに組み込むことを想定する。ファイルサーバの構築には、ハードウェアとしてパーソナルコンピュータを用い、オペレーティングシステムとして無償の **Linux** やそれに付随するサーバ用プログラム及びプログラム開発環境を用いることで、安価で高性能なシステムを構築する。

(2) ファイルサーバに保存されたデータから電界センサのインピーダンス計測に関するデータを抽出して解析を行うプログラムを開発する。また膨大な観測データからイン

ピーダンスの抵抗成分が負性抵抗として計測される条件を調べ、統計的に解析・検討する。抽出・解析プログラムの開発には汎用性の高い C 言語を用いることで、同じ分野の研究者とプログラムの交換を可能とする。お互いの技術を交換し合える環境を構築することで、それぞれのシステムのアルゴリズムを相乗的に高効率化できるようにし、高速処理が可能な解析システムを目指す。

次に電界センサのインピーダンスの抵抗成分が負性抵抗として計測される条件を元に、プラズマシースと電界センサの単純なモデルを考え、負性抵抗として計測されるメカニズムについて検討する。また、その結果を元に電界センサのインピーダンスの情報を既存の校正システムに組み込み、正確な電界データを校正できるシステムを構築する。

(3) (2) で得られたインピーダンスの抵抗成分が負性抵抗として計測される条件から、電界センサとプラズマシースの単純なモデルを検討し、そのメカニズムについて理論的に検討し評価を行う。

(4) 負性抵抗が計測されるメカニズムを元に、観測データ校正システムに組み込むための校正プログラムを開発し、金沢大学のデータベースに組み込むための検討を行う。

(5) さらにジオテイル衛星の計測結果についても同様の解析・検討を行い、校正システムに組み込むためのプログラムを開発・検討する。

### 4. 研究成果

#### (1) 解析環境の構築

あけぼの衛星の電界観測用アンテナのアンテナインピーダンスのための解析環境の構築を行った。これにより膨大な観測データのうち、1989年から1995年までのデータを扱うことができるようになった。また汎用性の高いプログラムを開発する環境も構築した。

#### (2) 統計的解析

あけぼの衛星で観測された電界観測用アンテナのアンテナインピーダンスの抵抗成分と容量成分についての統計解析を行った。

1989年から1995年までのアンテナインピーダンスのデータを解析したが、抵抗成分は負の値をアンテナインピーダンス測定器の経年変化による影響が考えられたため容量成分についてのみ統計解析を行い、地球磁場、衛星の高度、速度が与えるアンテナインピーダンスへの影響について調べた。

6年分のデータを解析すると全体的にかな

りばらつきがみられ標準偏差も大きなデータも含まれていた。標準偏差が大きなデータは地球磁場や衛星の高度・速度の影響以外の他の影響を大きく受けていると考え、標準偏差が大きなデータは省くことにより地球磁場や衛星の高度、速度による影響を調べた。

地球磁場による影響は図1のように、地球磁場強度によらず容量成分の値が若干右上がりとなっているが、ほぼ一定となり地球磁場による影響はあまりないと考えられた。

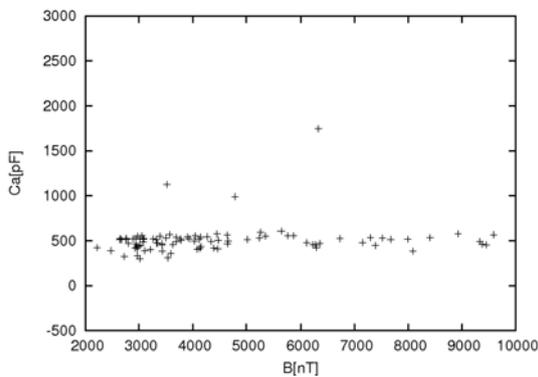


図1 容量成分の地球磁場依存性

衛星の高度による影響は、アンテナの周囲に形成されるアンテナシースが電子密度によって変化するため高度による影響が考えられた。高度による電子密度のデータから理論値を算出しそれをグラフにすると、高度が高くなるほど容量成分が小さくなることが分かった。理論値と観測されたデータを同じグラフ上に描くと図2のようになり、ほぼ500[pF]で一定となった。ただ、9000[km]以上の高高度では若干ではあるが値が小さくなった。しかし、各高度におけるばらつきに比べて、高度による変化は僅かである。

したがって、今まで低高度と高高度ではアンテナインピーダンスの値を変えて考えてきたが、高度によらず500[pF]一定としてもよいと思われる。

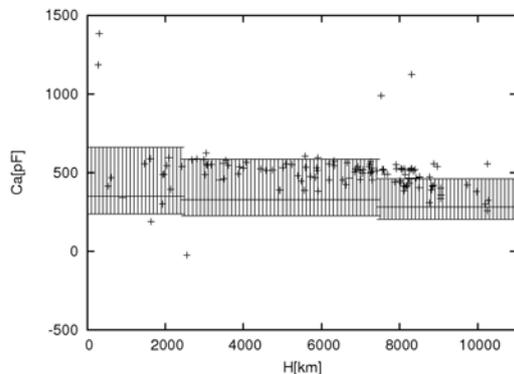


図2 容量成分の高度依存性

衛星の速度による影響についても、地球磁

場と同様にあまり変化は見られず速度がアンテナインピーダンスに影響をあまり与えていないと考えられた。

今回、アンテナインピーダンスに影響を与えると考えられた地球磁場、衛星の速度・高度による影響について統計的解析を行った結果それぞれあまり影響していないように考えられた。統計的に見ると影響はなかったが、もっと微視的にみればそれぞれアンテナインピーダンスに影響を与えている可能性はある。

また、ばらつきが大きく特性がよくわからない部分があり、これらのばらつきは3つの影響以外の他の影響を大きく受けたためこのようになったと思われる。今後は、アンテナインピーダンスに影響を与える他の因子(電子密度や温度)による影響について調べたり、1996年以降のデータも含めた解析を行う必要がある。さらには地球磁場領域に分けてインピーダンスの解析を行う必要がある。

### (3) 負性抵抗の原因とその対策

1989年から1995年までの計測されたデータを解析した結果、抵抗成分がアンテナ端子間に印加される電圧の周波数によって抵抗値が変化する現象が見られた。また、印加電圧の周波数に関係なくアンテナインピーダンスの抵抗成分が負の値を取り、年数が経過するごとにその頻度が高くなる傾向が見られた。(図3)

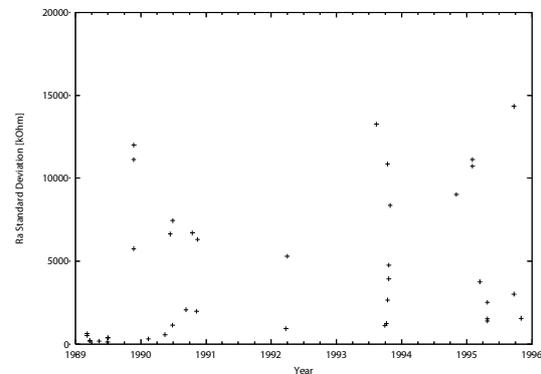


図3 1989年から1995年までの周波数依存性をもつ抵抗成分の標準偏差

衛星の打ち上げ初期ではアンテナ端子間に印加される電圧の周波数によって、抵抗成分が変化する現象は見られなかったが、1990年を過ぎるとこのような現象が見られるようになった。特に1992年以降では数多く見られた。

さらに1990年ごろは衛星の高度によって抵抗成分と容量成分が正しく計測されていたが、1991年になると、抵抗成分が負の値を取るようになった。これらの原因について、インピーダンス計測器の経年変化の可能性

が考えられる。

インピーダンス計測器は通常ならば0度と90度の位相差がある基準電圧で同期検波を行い、その2種類の測定データからインピーダンスを計算するという方法が用いられているが、計測器の経年変化により基準電圧の位相差にずれが生じていると考えられる。特に90度の位相を遅らせた基準電圧の位相がずれている可能性があるため、そのため同期検波で得られるデータに誤差が生まれていると考えられる。経年変化によるデータの誤差は年数を経過するごとに大きくなっている。

本研究において、誤差のある測定データに対して補正することを試みた。これにより90度の位相を遅らせたデータを補正することでアンテナ端子間に印加する電圧の周波数によって抵抗値が変化する計測データは補正され、理論値にほぼ等しい値を示すことができ、この方法の有効性を示すことができた。

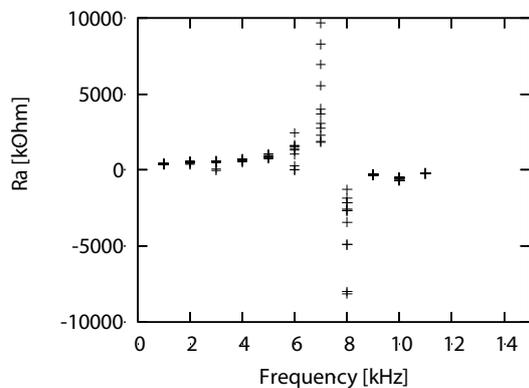


図4 1994年11月3日の抵抗成分の測定結果（補正前）

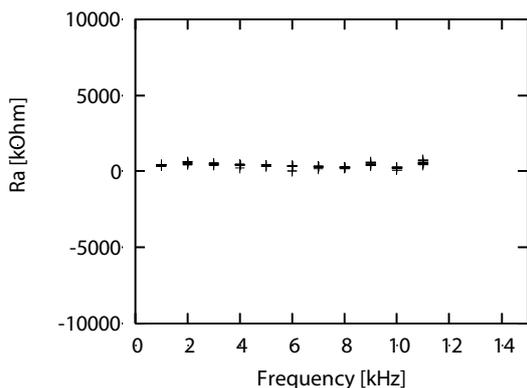


図5 1994年11月3日の抵抗成分の測定結果（補正後）

今後の課題として1996年以降のデータも解析し、どのようにアンテナインピーダンスが変化しているか調べる必要がある。

本研究によりこれまで行われていなかったあけぼの衛星のインピーダンスの統計的

解析を行った。正しくインピーダンスが計測できていない結果を示し、またその補正方法を示すことができた。これにより将来の衛星計画において貢献できると思われる。ただし、当初の計画であった残るデータの解析とジオテイル衛星についての解析を今後行う必要がある。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計0件）

〔学会発表〕（計4件）

① 藪 修平, 東 亮一, “プラズマ中における電界観測用センサの校正に関する研究,” 平成20年度北陸地区学生による研究発表会, 2009/3/1, 富山

② 亀井 亮, 東 亮一, “磁化プラズマ中におけるVLF電界センサの等価回路モデル,” 地球電磁気・地球惑星圏学会 第124回総会・講演会, 2008/10/10, 仙台

③ R. Higashi, M. Kamei, T. Imachi, S. Yagitani, "THE MODEL FOR EQUIVALENT CIRCUIT OF ELECTRIC FIELD SENSOR ONBOARD SATELLITE IN SPACE PLASMA," XXIX General Assembly of the International Union of Radio Science, 2008/08/12, Chicago

④ R. Higashi, T. Imachi, S. Yagitani, "Influence of Plasma Wake Around Satellite Body on Characteristics of Electric Field Sensor," American Geophysical Union 2007 Fall Meeting, 2007/12/14, San Francisco

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

東 亮一 (HIGASHI RYOICHI)

石川工業高等専門学校・電気工学科・助教

研究者番号：10435422