

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420403

研究課題名(和文) 科学衛星搭載電界観測アンテナの特性解析

研究課題名(英文) Characteristics of a wire antenna aboard a scientific spacecraft

研究代表者

井町 智彦 (Imachi, Tomohiko)

金沢大学・総合メディア基盤センター・准教授

研究者番号：60372489

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000 円

研究成果の概要(和文)：本研究では、科学衛星で宇宙空間の電磁波動を観測するために用いられるワイヤアンテナの特性を解析した。ワイヤアンテナは、電界の大きさを電圧に変換して測定する装置であるが、この両者の関係が精度よく分かっていないと、精確な観測が行えない。この関係を明らかにするため、本研究では長さ数10センチ程度に縮小したモデルアンテナを用い、それを水中に配置して測定する、レオメトリ実験を行った。本研究においては、ノイズの影響を除去するためにアンテナ根元に付加されるシールドに着目し、その影響を調べた。その結果、シールドの影響を物理的に説明できる理論の開発に成功し、これは実験結果ともよく一致した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we analyzed the characteristics of the wire antenna to be used in order to observe the electromagnetic wave in space at a scientific spacecraft. A wire antenna is a device to measure the magnitude of the electric field by converting it to the electric voltage. To perform precise observation, we have to know accurate relationship of them. To clarify this relationship, we performed "Rheometry experiment" using the model antenna that is reduced to several tens of centimeters in length, placing it in the water. In this study, we focused on the shield to be attached to the antenna base in order to reduce the influence of noise, and investigated its influence. As a result, we succeeded in developing a theory to explain the effect of the shield physically, and it is well consistent to the experimental result.

研究分野：電磁気・情報光学

キーワード：科学衛星 電界観測アンテナ 実効長 レオメトリ実験 静電防止シールド 電界分布 インピーダンス DPS法

1．研究開始当初の背景

宇宙空間におけるプラズマ粒子と波動の相互作用や、プラズマ波動の発生メカニズム等に関する研究において、科学衛星による電磁界の観測は重要な役割を担う。電磁波動の観測においては、電界観測にはワイヤアンテナ、磁界観測にはサーチコイルやループアンテナといったセンサが用いられるが、電磁界の強度を正しく求めるためには、これらのセンサが精密に較正されていなければならない。すなわち、我々が直接知ることができるのはセンサからの出力電圧のみであり、これを電界や磁界の物理量に変換する作業が必要となり、この較正を正確に行うためには、センサの高精度な特性が必要である。これらの特性は、可能な限り衛星打ち上げ前の地上試験において測定されるが、電界観測用のワイヤアンテナについては、長さが数 10m～100m におよぶために実施が難しく、その特性を地上試験において正確に知ることは困難である。

2．研究の目的

本研究は、科学衛星の電界観測アンテナの実効長がどのような大きさになるかの理論の構築とその検証を目的とする。

3．研究の方法

一般に、アンテナを電圧計に接続したときの等価回路は図 1 のように表され、出力電圧 (V_0) は、電圧計の入力インピーダンス (Z_i)、アンテナのインピーダンス (Z_a)、および実効長 (h_{eff}) の関数となる。すなわち、 Z_i 、 Z_a であるとき、 $V_0 = h_{eff} \cdot E$ となり、既知の電界を印加したときの出力電圧を測定することで、接続したアンテナの実効長を知ることができる。

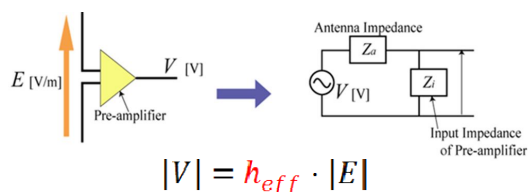


図 1 アンテナの等価回路

本研究では、この実効長の推定方法として、1) レオメトリ実験^{[1][2]}による直接計測と、2) DPS 法^[2]による理論計算の 2 つを用いる。対象とする周波数帯は、10Hz～100kHz とする。

レオメトリ実験は、数 10cm 程度の模型アンテナを水中に配置し、そこに既知の電界を印加してアンテナの出力電圧を測定する実験手法である（図 2）。模型アンテナには入力インピーダンスの高いアンプを接続する。これは、衛星実機でも同様の構成となっている。水槽の両端には金属平板の電極を平行に配置し、その間に交流電圧を掛けることで、

準静電界を発生させる。

模型アンテナを水中に配置するのは、アンテナのインピーダンスを下げることで、安定した電界を印加することが目的である。ワイヤアンテナを空中に配置した場合、アンテナのインピーダンスはワイヤ間のキャパシタンスが支配的となり、周波数が低い場合、非常に大きなものとなるため出力電圧の測定が難しい。これを水中に配置すると、アンテナのインピーダンスは水の導電率による抵抗支配的となるため、低周波でも値を小さくすることができ、電圧の測定が可能となる。また、水の比誘電率は空気中の 80 倍程度と非常に大きいため、平行平板電極間に電圧をかけたとき、一様な電界を発生させることができる。

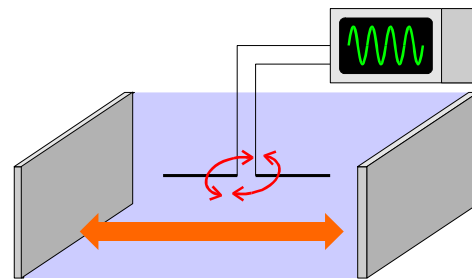


図 2 レオメトリ実験の概要図

DPS 法（分布電源法：Distributed Potential Source method）は我々が提唱する計算手法であり、ワイヤアンテナを等価回路化して出力電圧を理論計算するものである。ワイヤアンテナに一様な電界が印加された場合、ワイヤ上の静電ポテンシャルは線型に変化する。DPS 法では、これを無数の電圧源の並列接続として扱う（図 3）。電圧源の電圧はアンテナ中点から線型的に変化し、電界の大きさを E [V/m]、ワイヤ全長を L [m] としたとき、ワイヤ端で $E \cdot L/2$ [V] となる。これらの電圧源がインピーダンスを介してワイヤに接続された回路をアンテナの等価回路とし、ワイヤ上の電圧を計算する。

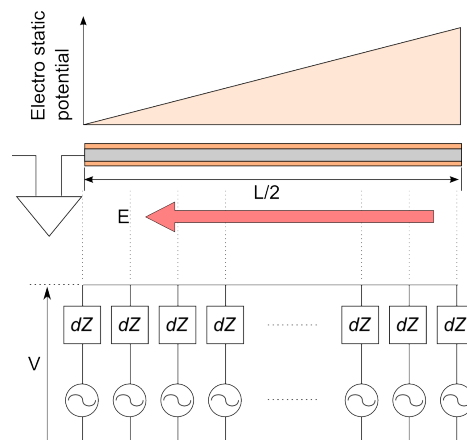


図 3 DPS 法の概念図

4. 研究成果

まず、基本的なケースとして、図4に示す模型アンテナについてレオメトリ実験を行った。ワイヤ長は片側が 15cm であり、中央に入力インピーダンスが $10\text{ G} \parallel 2\text{ pF}$ の差動アンプ (INA128P) を搭載している。模型アンテナは2種類用意し、片方のワイヤには側面に絶縁被覆が施してある。双方とも、回路部を保護するため、3D プリンタで構体を作成し、シリコン樹脂を充填して水密性を確保した。電界形成のための極板間距離は 80 cm であり、水深は 15 cm である。模型アンテナは、その中央に配置している。使用する水は、純水器で作成したのちに食塩を加えることで導電率を調整し、 $15\text{ }\mu\text{S/cm}$ とした。

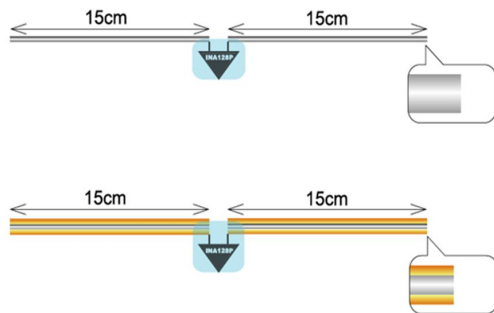


図4 基本的な模型アンテナ

この模型アンテナのワイヤ上に表れるインピーダンスは、図5のようになる。 Z_M はワイヤ先端のインピーダンスであり、ワイヤの断面積から決定される接地抵抗である。 Z_I はワイヤ側面のインピーダンスであり、側面積から決定される接地抵抗と、被覆のキャパシタンスの直列接続となる。

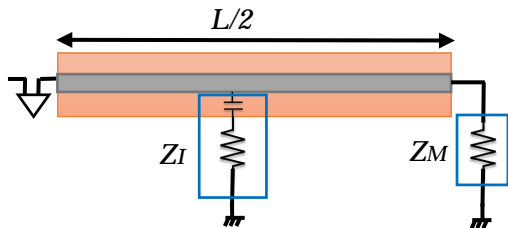


図5 ワイヤ上のインピーダンス

また、DPS 法による等価回路は、図6のようになる。左図は、ワイヤ部分を $n+1$ 並列回路に近似しており、この場合 dZ は $(n+1)Z_I$ となる。右図はこれをテブナンの定理により変換したもので、 Z' は $dZ/(n+1)$ となり、結果として Z_I に一致する。 V' は、 $V_0 \sim V_n$ の平均となる。 V_{n+1} は、ワイヤ中点からみたワイヤ先端の電圧であり、電界の大きさを E とすると、 $EL/2$ となる。 $V_0 \sim V_n$ は、0 から V_{n+1} を線型補完する値となる。この等価回路に、実験環境の実測に基づくパラメータを代入することで、ワイヤの電位を求めることができ、この2倍がアンテナの出力電圧とな

る。

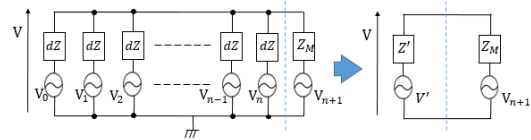


図6 DPS 法による等価回路

レオメトリ実験の結果と、DPS 法による計算の結果を図7に示す。横軸は周波数、縦軸は、出力電圧より実効長を計算し、それをワイヤ全長 L で規格化した数値であり、実線が実験結果、破線が計算結果を表している。実験結果と計算結果はよい一致を見せており、絶縁被覆の無いワイヤについては全ての周波数において全長のほぼ半分となり、側面が絶縁被覆されたワイヤについては低周波においてはほぼ全長となり、周波数が高くなるとほぼその半分の値に遷移している。これは、絶縁被覆がある場合にはワイヤ両端の電位差を検知し、周波数が上がって絶縁被覆のインピーダンスが下がると、各ワイヤの midpoint 電位差を検知しているものと思われる。

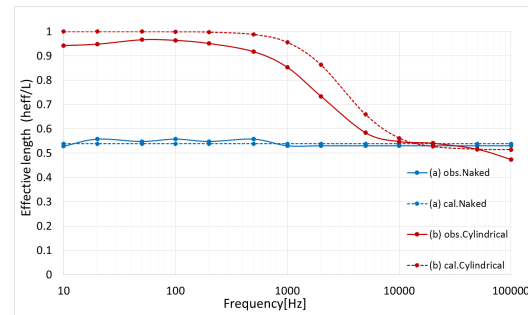


図7 実験結果と計算結果

この結果より、DPS 法による解析は実験結果を良く再現しており、ワイヤアンテナの実効長を計算するのに適切な手法であると言える。

次に、本研究では、ワイヤ基部にシールドが施されたアンテナについて、同様の解析を行った。衛星実機においては、衛星内部で発生したノイズがアンテナに影響を与えることを防ぐために、衛星 GND と導通させたシールドをワイヤ基部に設置する事が多い。この影響について、レオメトリ実験および DPS 法による解析を行った。

模型アンテナは、先の実験において使用した、側面が絶縁被覆されたアンテナを基本とし、これにシールドを設置した (図8)。まず構体部分をアルミテープで覆い、それと導通するようにワイヤにシールド加工を行った。シールド長は、ワイヤ長 15 cm に対し、0 cm、4 cm、8 cm、12 cm の4種類とし、これらに対しレオメトリ実験を行った。その結果は図9に示す通りで、シールドに起因すると思われる出力電圧の低下が観測された。

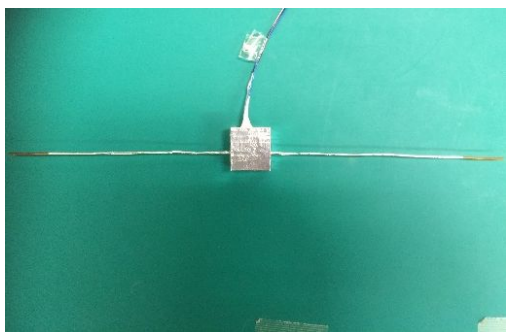


図 8 シールドを設置した模型アンテナ

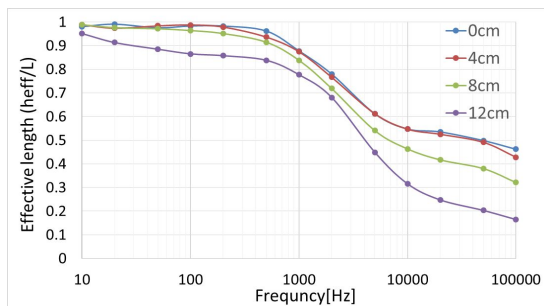


図 9 レオメトリ実験の結果

観測された出力電圧の低下は、周波数に依存するものと、しないものに分けられ、いずれもシールド長が大きくなると、低下の程度も大きくなっている。そこで、それぞれの原因について考察した結果、周波数に依存しないものについては、シールドにより中点電位がワイヤ先端側に延伸されたことによる電界の歪みが原因であると判断した。この電界の歪みについて、有限要素法により電位分布を計算したところ、図 10 のような結果となった。図 10 はシールド長が 12 cm の場合の結果であるが、ワイヤ先端の位置における電位が本来の電位より低くなっていることが分かる。

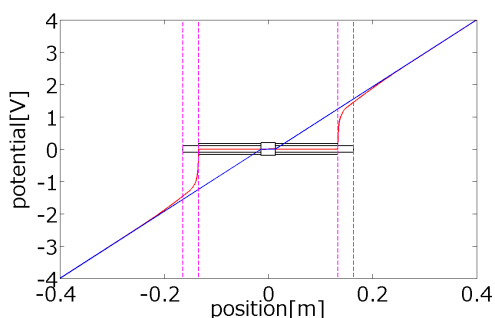


図 10 シールドによる電界の歪み
(解析ツール: CST EM Studio LF solver)

また、周波数に依存するものについては、シールドとワイヤ芯線の間に生ずるキャパシタンスが原因であると判断した。このキャパシタンスはアンプの入力インピーダンス

と並列するように発生するので(図 11) 周波数が高くなるとアンプの入力インピーダンスが低下し、出力電圧の値を低下させるものと考えられる。

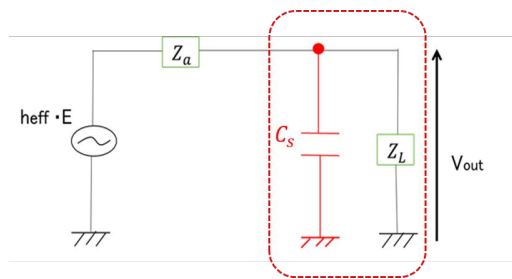
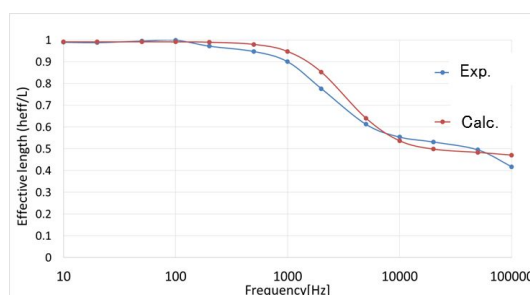
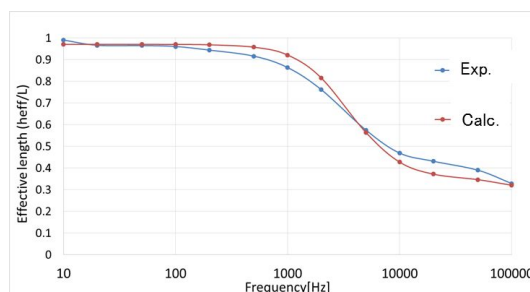


図 11 シールドにより発生するキャパシタンス

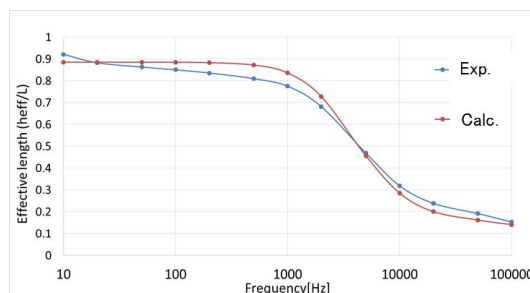
これらの要因を考慮し、DPS 法による計算を行った結果を、図 12 に示す。



a) シールド長 = 4cm



b) シールド長 = 8cm



c) シールド長 = 12cm

図 12 実験結果と DPS 法による計算結果

これらの計算結果は、実験結果ときわめてよく一致しており、出力低下の原因は推定通りだったものと判断できるとともに、DPS 法はこのような複雑なケースにおいても適用可能な理論であることが確認された。

また、図 9 の結果において、シールド長が

4 cm の場合はシールドが無い場合と差がほとんど無かったことから、シールド長がワイヤ長の 1/4 以下であれば、電界の歪みによる影響は無視してよいものと推定される。衛星実機として GEOTAIL 衛星を例に挙げると、ワイヤの片側が 50 m であるのに対し、シールド長は 10 m なのでこの条件に当てはまっており、絶対較正において、シールドの影響はキャパシタンスのみを考慮すればよいことになる。

以上をまとめると、本研究において我々は DPS 法による解析手法を提案し、レオメトリ実験を裏付けとして、この解析手法がシールドが付加されたような複雑なワイヤアンテナに対しても有効であることを確認した。この解析手法は、これまでの衛星観測データの較正および今後の電界観測アンテナの設計において有効なものであると判断している。

今後の課題として、ホッケーパックアンテナのような、より特殊な形状のアンテナに対する DPS 法の演繹が挙げられる。また、DPS 法の衛星実機への適用を考えた場合、精密な計算にはプラズマシースの影響を含めた周辺媒質の特性を把握する必要があるが、これについては地上での実験では、検証までを行うことは困難であると言わざるを得ない。衛星等による実測も含め、今後手法を検討していきたい。

参考文献

[1] 井町智彦, 八木谷聡, 長野勇, 筒井稔, 松本紘, “GEOTAIL 衛星搭載電界観測アンテナの実効長の評価”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J85-B, No. 1, pp. 97-104, 2002.

[2] 井町智彦, 八木谷聡, 東亮一, 長野勇, “レオメトリ実験による科学衛星搭載ワイヤアンテナの低周波特性解析”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J89-B No. 4, pp. 552-559, 2006.

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 1 件)

Mitsunori Ozaki, Satoshi Yagitani, Ken Takahashi, Tomohiko Imachi, “Equivalent Circuit Model for the Electric Field Sensitivity of a Magnetic Search Coil of Space Plasma”, IEEE SENSOR Journal, 査読有, Vol. 15, 2015, pp. 1680-1689.

〔学会発表〕(計 6 件)

北 昂之, 井町 智彦, 八木谷 聡, 尾崎 光紀, 東 亮一, “静電シールド付きワイヤアンテナの亭主は特性解析”, Japan Geospace Union, 千葉, 2016 年 5 月 26 日.

Tomohiko Imachi, Takyuki Kita, Mitsunori Ozaki, Ryoichi Higashi,

Satoshi Yagitani, “Low Frequency Character- istics of a Wire Antenna aboard a Scientific Spacecraft”, Inter- national Workshop of Antenna Technology, Florida, 2016 年 3 月 1 日. 井町 智彦, 東 亮一, 尾崎 光紀, 八木谷 聡, “科学衛星搭載電界観測アンテナの特性解析”, 地球磁気圏・地球惑星圏学会, 東京, 2015 年 11 月 3 日.

Tomohiko Imachi, Mitsunori Ozaki, Ryohichi Higashi, Satoshi Yagitani, “Low Frequency Characteristics of a Wire Antenna aboard a Scientific Spacecraft”, URSI Japan Radio Science Meeting, Tokyo, 2015 年 9 月 3 日.

Tomohiko Imachi, Mitsunori Ozaki, Ryohichi Higashi, Satoshi Yagitani, “Low Frequency Characteristics of a Wire Antenna aboard a Scientific Spacecraft”, General Assembly of International Union of Radio Science, Beijing, 2014 年 8 月 23 日.

Tomohiko Imachi, Mitsunori Ozaki, Ryohichi Higashi, Satoshi Yagitani, “Characteristics of Electric Wire Antenna aboard a Scientific Spacecraft at Low Frequencies”, Asian Workshop on Antennas and Propagation, Kanazawa, 2014 年 5 月 15 日.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

特に無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井町 智彦 (IMACHI TOMOHIKO)
金沢大学・総合メディア基盤センター・准
教授
研究者番号：60372489

(2)研究分担者

尾崎 光紀 (OZAKI MITSUNORI)
金沢大学・電子情報学系・准教授
研究者番号：70422649

(3)連携研究者

無し