

科学衛星における電磁適合性

小嶋 浩嗣^{1*}

Electromagnetic Compatibility in science satellites

Hirotsugu Kojima^{1*}

概要

電磁適合性(EMC: Electromagnetic Compatibility)の考え方は電子機器をある環境下で、その性能を保証し動作させるために必須の考え方である。近年の地上での電気製品ではこの考え方が確立されているが、科学衛星においても同様に EMC 基準の導入が行われている。特に、宇宙プラズマ環境を探索する科学衛星には微弱な電波を観測するプラズマ波動観測器や微弱な磁場の観測器が搭載されており、そこから要求される EMC 基準は非常に厳しいものになる。本稿ではプラズマ波動観測器から要請される EMC 基準とその具体的な内容について述べ、科学衛星における EMC がどのように取り組まれているかを紹介する。

1. はじめに

電磁適合性 (EMC: Electromagnetic Compatibility、以後、EMC と呼ぶ)は、電氣的に動作するすべての機器の性能をその動作環境下で維持させるために重要な考え方である。回路の低電圧化、クロックの高周波化などにより、自分が出した電気ノイズが他の機器の性能に影響を与えてしまう、あるいは、自分の機器が他人からのノイズで誤動作してしまう、など、機器の安定した動作や性能維持のためには、それ単独の機器のことだけを考えればよいという考え方は通用しなくなっている。「それぞれの電子機器が性能を落とすことなく動作できることができる環境」を実現させるための考え方が EMC である。よく似たターミノロジーで、電磁干渉(EMI: Electromagnetic Interference)があるが、こちらは他の機器に対して電磁ノイズを出すなどして干渉を起こす事象のことである。一方、EMC はそれを包含した上で、ノイズを出す側、ノイズを受ける側が、それぞれの性能を維持するためにどのような条件を満たすべきかを規定する。従って、EMC は、放射(emission)と耐性/感受性(immunity/susceptibility)というカテゴリーに大きく分けられる。Emission は相手の機器の性能を劣化させる電磁ノイズや磁場を「出す」ことに対する規定であり、immunity は、どれほどの電磁ノイズを受けても性能が劣化しないようになっているか、というノイズを受ける側の規定である。この両方の観点から EMC は構成されている。

EMC は一般的な電気製品を含め、電子機器動作に重要な考え方であるが、宇宙における人工衛星においてもそれが電子機器の集合体である限り、同様に EMC の考え方が導入されている^{1),2)}。特に宇宙で科学的な観測を行う科学衛星では、地上における通常の電子機器や実用衛星に対する EMC よりもより多くの項目、より厳しい条件が課せられることが多い。本稿では科学衛星、特に厳しい条件が課される宇宙プラズマ環境探索用科学衛星における EMC の現状について、具体例をあげながら解説

2018 年 7 月 5 日受理.

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所宇宙圏航行システム工学分野.

* E-mail: kojima.hirotsugu.6m@kyoto-u.ac.jp



図 1: EMC 規格のイメージ図. ノイズを出す側、受ける側にそれぞれ規格が存在する.

をする。

2. 科学衛星における EMC 構成

2.1 科学衛星と EMC 項目

人工衛星の構成は、大きく分けるとバスシステムとペイロードに分けられる。バスシステムはどの衛星でも必要となる基本コンポーネント、通信、電源、エンジン等のシステム部であり、ペイロードは、その衛星の目的を達成するために必要となる固有の機器の集合である。EMC についても、これらバスシステム観点からの EMC とペイロードの観点による EMC がある。バスシステムの EMC 条件は、衛星毎に大きく変わることがないが、ペイロードからの EMC 要件はその観測器の内容によって大きく変わる。科学衛星における EMC の要件項目を整理すると下記ようになる。図 1 に各規格とノイズ源、および影響を受ける機器との関係のイメージを示す。

1) Immunity/susceptibility

ノイズを受ける側の規格である。近年は immunity と呼ばれることが多い。

1-1 Conducted immunity(susceptibility) (CI(CS))

計装線(主に電源ライン)を経由してはいつてくるノイズに対して耐える必要のある信号レベル条件。

1-2 Radiated immunity(susceptibility)(electric field) (RI(RS))

電波(電界)として放射されたノイズにさらされても耐える必要のある信号レベル。

1-3 Radiated immunity(susceptibility)(magnetic field) (RI(RS))

電波(磁界)として放射されたノイズにさらされても耐える必要のある信号レベル。

2) Emission

2-1 Conducted emission (CE)

計装線(主に電源ライン)に対して出力されるノイズの許容信号レベル。

2-2 Radiated emission (electric field) (RE)

電波(電界)として放射されるノイズの許容信号レベル。

2-3 Radiated emission (magnetic field) (RE)

電波(磁界)として放射されるノイズの許容信号レベル。

これらは、一般的な電気製品でも求められる EMC 項目であるが、科学衛星ではこれ以外にも例えば、次のような要件も含まれる。

3) DC magnetic field

帯磁状態、あるいは、直流電流による発生磁場に対する要件である。宇宙空間における微弱な直流磁場を観測する科学衛星では、この帯磁および、直流電流ループ形成からの磁場放射について厳しい要件が課される。

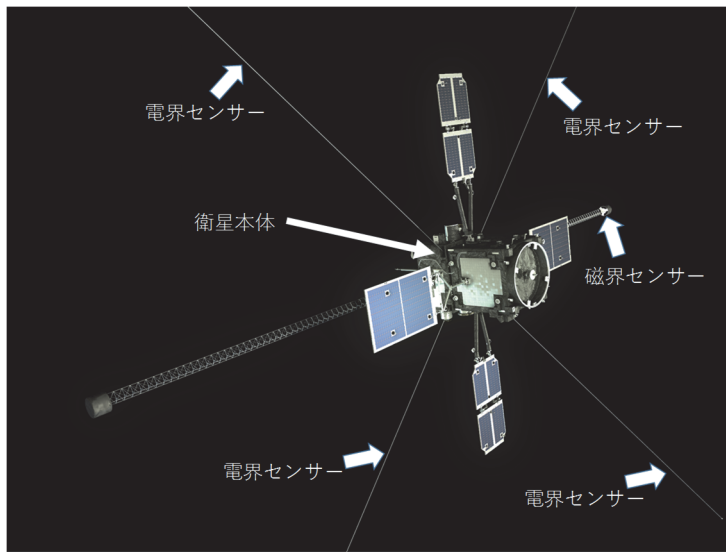


図 2: Arase 衛星とプラズマ波動観測用センサー(JAXA/ERG プロジェクトチーム提供).

4) 帯電

人工衛星は宇宙空間において宇宙プラズマの影響で帯電をする。その帯電状況により放電などの危険性につながるだけでなく、科学衛星に搭載した荷電粒子(イオン・電子)の観測装置や電界観測装置に影響がでる。この帯電を制御するための衛星表面や曝露部の表面抵抗などの規定を行う。

2.2 科学衛星 EMC 基準の例

科学衛星に搭載される各機器が満たすべき EMC 基準レベルは、衛星毎に具体的に決定される。特にペイロードからの要請で決められる EMC 基準は衛

星毎に大きく異なる。ここでは、特に厳しい EMC 基準となる宇宙プラズマ環境探査用の科学衛星におけるその EMC 基準について述べる。

2.2.1 科学衛星 Arase とプラズマ波動観測

我が国の科学衛星 Arase(打ち上げ前のコード名は、ERG)は、地球放射線帯を中心とした地球周辺のプラズマ環境を探査する衛星で、これには微弱な磁場を観測する装置やプラズマ波動を観測する装置が搭載されている。ここでは、このプラズマ波動観測装置から要請される Emission としてのノイズレベルについて紹介する。図 2 は、Arase 衛星の外観図である。プラズマ波動を観測する装置 PWE(Plasma Wave Experiment)は二種類のセンサーによってプラズマ波動を観測する³⁾。衛星本体から伸びる計 4 本の電界センサーは、2 本ずつセットで用いるいわゆるダイポールタイプのセンサーである⁴⁾。プラズマ波動の電界変動成分をとらえるこの電界センサーは、2 本ずつの組み合わせで 30m の長さのダイポールセンサーとなる。一方、磁界成分を捉える磁界センサーは、サーチコイルを用いている⁵⁾。特に磁界成分は微弱なため衛星からのノイズを受けにくくするため、衛星本体からマストと呼ばれる 5m の伸展物の先端に搭載されている。いずれもこれらセンサーは衛星本体の外部に設置されており宇宙空間に直接曝露している形式となる。一方、PWE に対してノイズの影響を与える側の機器は、その大部分が、衛星本体の内部におさめられている。しかし、プラズマ粒子を直接捉えることを目的としたセンサーなどは、衛星本体側面からセンサーを露出させて宇宙空間に曝露した形で搭載されている。

2.2.2 プラズマ波動観測器からの EMC 基準の例

図 3 から図 5 は、Arase 衛星プラズマ波動観測器から要請された EMC 基準の例である^{2), 3)}。このようにプラズマ波動や磁場の観測を行う科学衛星では特に厳しい EMC 基準が設けられる。Arase 衛星に搭載される全機器は、この基準値以下のノイズ emission レベルにする必要があった。

図 3 は、CE(Conducted emission)に関する EMC 基準値である。伝導性ノイズであるのでワイヤハーネス経由で伝搬するノイズに対する基準である。Arase 衛星では基本的に電源ライン上での基準とした。カーブが 2 本あるのは、Normal mode noise に対する基準と Common mode noise に対する基準を意味している。Normal mode noise と Common mode noise に対しては後述する。この CE によるノイズは、放射されている計装や本来流れるはずのないノイズ電流が衛星本体パネルに流れてしまってい

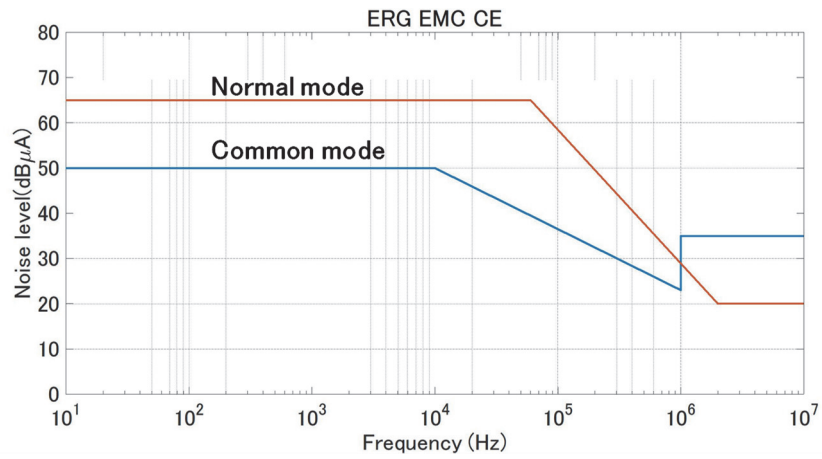


図 3: Arase 衛星における CE 基準値^{2), 3)}.

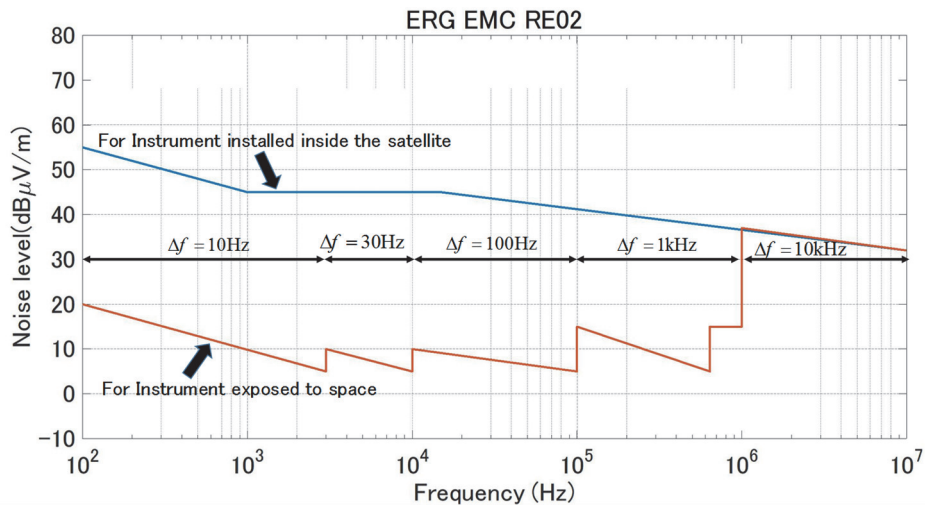


図 4: Arase 衛星における RE02(電界)基準値^{2), 3)}.

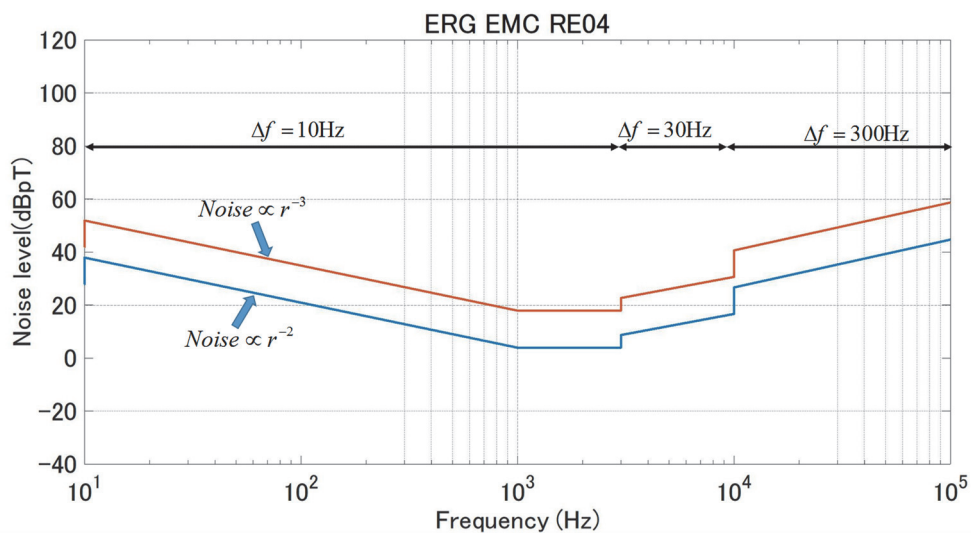


図 5: Arase 衛星における RE04(磁界)基準値^{2), 3)}.

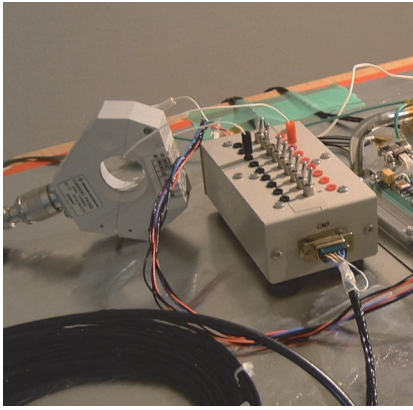


図 6: 電流プローブによる CE 計測.

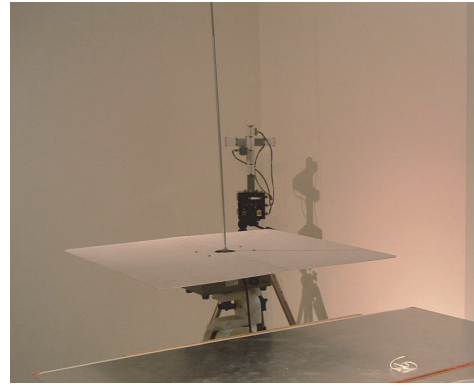


図 7: 電界ノイズ計測用モノポールアンテナ(手前)と磁場ノイズ計測用サーチコイル(奥).

る場合など、その結果が電界や磁界ノイズの放射へと変換されてしまうことが懸念される。特に、衛星本体パネルにノイズ電流が流れると、その衛星本体のインピーダンスによって電界放射へと変換され結果的に電界ノイズとなる。衛星本体のインピーダンスは周波数が高くなると大きくなるため(インダクタンス成分による)、電流ノイズはより効率よく電界ノイズへと変換される。Arase 衛星では模擬構体を使って衛星本体のパネルインピーダンスの計測が繰り返し行われ、その結果を踏まえて図 3 の基準値が設定された。逆にいうと、図 3 の電流ノイズ基準値を満たすことができない機器であっても、図 4 や図 5 の電界ノイズ、磁界ノイズの基準を満足できていればよいとした。実際の評価にあたって図 3 のノイズ基準は、他の機器を誤動作させてしまうような巨大なノイズを除けば(実際はそのようなノイズはなかった)、満たされていないとしても電界ノイズ、磁界ノイズとして基準を満足できていればよいという考え方である。

図 4 は機器から 1m の距離で規定した電界ノイズに対する基準である。電界ノイズの基準値は実際にプラズマ波動観測器が観測を行う電界値との関係で決まっていることもあり、プラズマ波動観測器の観測バンド幅に従って周波数バンド毎にバンド幅を指定した形で基準値が決められている。基準値が 2 本あるのは、その機器が宇宙空間に曝露しているものか、それとも衛星本体に収められているものか、による違いである。衛星本体に収められている機器から出る電界ノイズは衛星本体によるシールド効果が期待できるため電界ノイズの基準値が大きめに設定されている。衛星によるシールド効果は実験的に確認を行い、おおむね 30dB 程度を期待して基準を決めているが、1MHz 以上ではシールド効果があまり期待できなかったため、二つの基準値は同じ値をとっている。

図 5 は機器から 1m の距離で規定した磁界ノイズに対する基準である。磁界ノイズの基準値は磁界センサーであるサーチコイルのノイズレベルから換算されて規定されている。電界のときと同じようにプラズマ波動観測器の仕様に合わせたバンド幅で基準値は周波数バンド毎に決められている。この磁界ノイズ基準値においても二種類が規定されているが、これはノイズからの距離特性によって決定されている。磁場ノイズは基本的に電流ループからのノイズであり、その電流ループの大きさと計測場所との距離によって、ノイズレベルが距離の 2 乗で変化するか 3 乗で変化するかの特性が決まることになる。この距離特性を実際のセンサーとの距離である 5m のマスト分に反映させたことを想定して 2 本の基準値が規定された。

2.3 科学衛星 EMC 計測

EMC 計測は外部電磁環境からの影響を極力軽減して行うために電磁シールドルームで行われる(帯磁を含めた計測を行うため実際には「磁気シールドルーム」で行われることが多い)。計測は機器単体で行う単体機器 EMC と、衛星全体を磁気シールドルームに入れて行うシステム EMC の二種類に分け

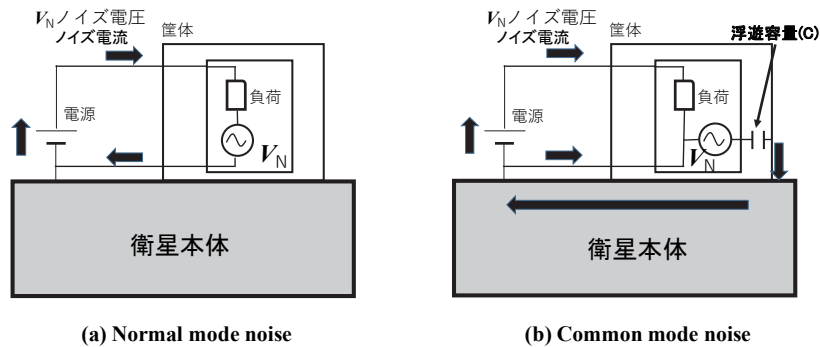


図 8: Normal mode noise と Common mode noise.

られる。単体 EMC は搭載する機器毎に行うため、Arase 衛星では合計数 10 回以上の EMC 計測を行った。実際の計測は電流ノイズに対しては電流プローブ(図 6)で、図 4、図 5 で示した 10MHz 程度以下の電界・磁界低周波数帯では、電界ノイズにはモノポールアンテナ、磁場ノイズにはサーチコイルをセンサーとして計測を行うことが多い(図 7)。

3. Common mode noise

ノイズ源とその発生メカニズムは多岐にわたり、なかには試験をしても発生メカニズムがつかない場合もある。そのようなノイズの中で最もやっかいなのが **Common mode noise** である。**Common mode noise** は伝導性のノイズであるが、その結果として電界や磁界のノイズを放射させるため、放射ノイズとしての問題も発生させてしまう。伝導性ノイズは大きく **Normal mode noise** と **Common mode noise** に分けられる。図 8 はその仕組みの違いを示している。ここでは、発生するノイズ電圧を V_N として表している。(a)の **Normal mode noise** では発生したノイズ電圧が電源ラインに直列に入っておりそのノイズ電流は電源ラインの hot と return でバランスがとれており計装がツイストペアシールド線などになっていれば電界や磁界のノイズとして放射するレベルをある程度抑えることができる。一方、(b)の **Common mode noise** では、ノイズ電流が衛星本体を流れてしまう上に電源ラインでノイズ電流の向きが hot と return で同じ向きであるためアンバランスになっており、電源ラインの計装あるいは衛星本体から電界ノイズや磁界ノイズを放射してしまう。**Common mode noise** でやっかいなのは、図 8(b)でわかるようにその発生メカニズムが浮遊容量などの回路図に現れない部分に深く関係していることである。例えば、衛星搭載機器でも FPGA や CPU の利用は当たり前になっているが、これらのデジタル回路のクロック周波数は高くなる一方であり、その周波数が高くなるがために浮遊容量の影響を受けやすくなり、**Common mode noise** 発生のお機会が大変多くなっている。

Common mode noise を発生させる代表的なアナログ回路としては、DC-DC コンバーターがある。非絶縁型の DC-DC コンバーターではノイズが多くなるのは当然のことであるが、絶縁型の DC-DC コンバーターでも、実際にスイッチングを行っている 1 次側と 2 次側のトランス内での浮遊容量によるカップリングによってそのスイッチング周波数が **Common mode noise** となってしまう、衛星構体のインピーダンスで電界に変換されて放射されてしまうことが多い。

図 9 に実際に計測された **Common mode noise** の例を示す。BepiColombo という日欧共同の水星探査機に搭載される機器に対する EMC 計測で測定されたものである。図 9(a)に計測時の結線などを示す。被測定機器をシールドルーム内の導電性台座(机)の上に設置し、シールドルーム外に衛星電源を配置してある。そして被測定回路と衛星電源はツイストペアシールドで接続され、このシールドを含めた計装を一括して **current probe** で計測した。そして、機器を full operation の状態にして計測した電流変動の周波数スペクトルが、図 9(b)である。図 9(b)は **current probe** の出力を直接スペクトルアナライザ

で解析したものである。この図 9(b)の 100kHz 以上に出現しているスペクトルが common mode noise である(10Hz から 100kHz あたりまで下がってきているスペクトルは計測系のノイズレベルである)。Current probe で計測した電源ラインが、hot 側と return 側で等しいノイズ電流が逆向きに流れていれば、このようなスペクトルは現れない。図 9(a)の矢印で書いてあるように、ノイズ電流は hot 側も return 側も電子回路に流れ込む電流となるために、current probe に信号として現れているのである。これが common mode noise である。ノイズ電流の波形は回路の動作によって複雑に歪むため、周波数解析をすると源振に近い周波数とその高調波成分が現れ、結果的に広帯域にノイズが広がる。

では、どうしてノイズ電流のアンバランスが発生するかというと、この場合も図 8(b)で示したような浮遊容量がデジタル回路とシャーシの間に発生して、ノイズ電流の一部がシャーシから導電性台座に流れ込んでいるからである。図 10(a)では、そのノイズ電流の様子を示している。電子回路とシャーシ間で発生している浮遊容量により、ノイズ電流の一部がシャーシや導電性台座に流れ込んでしまい、その結果、電源の計装の hot 側と return 側に同相のノイズ電流が流れる。

この状態で図 10(b)のように電源ケーブルのシールド線を導電性台座と結線すると、図 9(b)の 100kHz 以上のノイズが著しく改善されることがわかっている。これは、導電性台座とシールドを結線することにより導電性台座を迂回していたノイズ電流が、シールド線に戻って流れるようになり、シールド線を含めて一括して測定している **Current probe** からは電流のバランスがとれたようにみえるからである。**Common mode noise** が発生していたことはこの事実からも明らかである。

図 9、10 では浮遊容量は 1 つのコンデンサで代表して示しているだけであるが、実際には何カ所でもカップリングが想定される。ここで紹介している機器の場合は、デジタル部とその基板を支えるフレームの位置が近かったためそこで、浮遊量が発生して電流が迂回してしまったと考えられた。そしてこの時に見積もられた浮遊容量は、たかだか 2pF 程度であった。

周波数が高いとたかだか数 pF の容量で common mode noise が発生してしまう。すでに述べてきているように、common mode noise は電流として計装や衛星本体を流れる。その際、そのインピーダンスに従って電界に変換され電界ノイズとなって放射してしまう。また、common mode noise 電流が電流ループを形成するとそこから磁場ノイズとなって放射してしまう。特に電界ノイズに対しての影響は大きく、common mode noise 電流が衛星の本体のなかを流れてしまうと、衛星全体からノイズを放射してしまい、プラズマ波動観測器の観測に著しい影響を与えてしまう。

Common mode noise の発生はバラエティに富んでおり、その回路や装置の configuration によって大きく変化するので、common mode noise を抑える決定打というのはなかなかみつからないが、common mode filter の挿入が典型的なものであろう。これもうまく設計しないと軽減には結びつかないことが多い。一旦、出てしまった common mode noise の影響をできるだけ少なくするには、その迂回してし

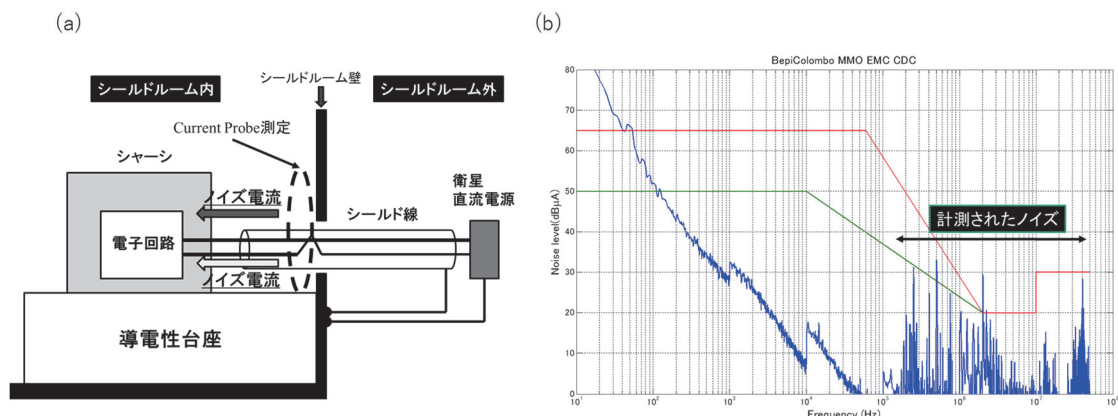


図 9: (a) CE 計測 configuration の例, (b) Common mode noise の例.

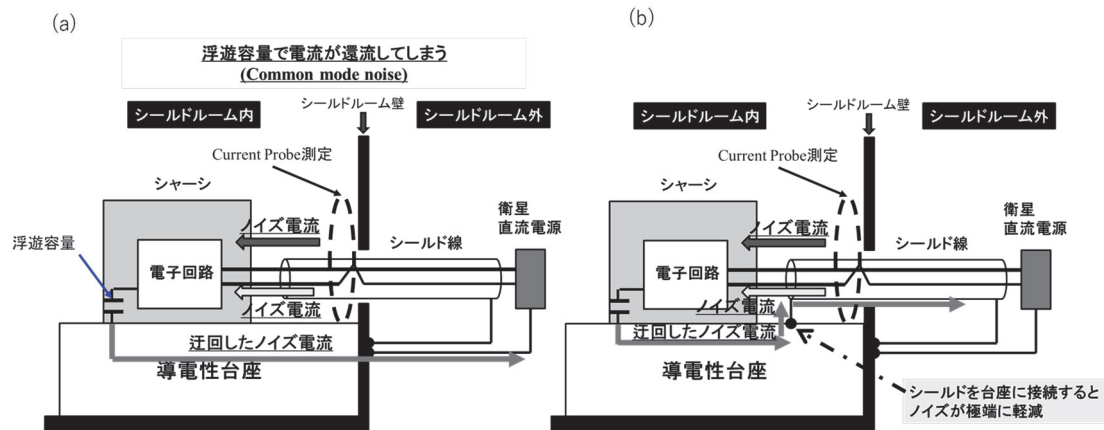


図 10: (a) Common mode noise に対する電流の環流. (b) シールド線を台座と接続するとノイズ軽減.

まっている電流をできるだけ本来のルートに近いところにもどしてやることである。例えば、図 10(b) では、導電性台座をシールドと接続して電源計装に迂回してしまったノイズ電流をもどし、シールド込みでバランスがとれているようにして noise の軽減をはかることができています。

4. 終わりに

科学衛星、特に、本稿で紹介した宇宙電磁環境を探索する科学衛星では EMC 基準とそれを満足する搭載機器を実現することは、衛星そのものの成否に大きく関わってくる。そのため、EMC 専用のボードを設立し、そこに所属するボードメンバーが各機器の EMC 試験を順次行っていく、管理表に基づきその実施状況把握と問題点の解決指針をたてていく。問題点は基本的に各機器単体での EMC 試験の中でみつけ対策していくが、衛星全体として組んだ後に行うシステム EMC 試験においても問題点が明らかになることも多い。EMC 試験は一つの機器に対して 1 日～2 日を要し、全部で数 10 回にもおよぶ回数の試験を実施する。その時間と人的資源の投入量は膨大なものであるが、それほど EMC は重要であるということである。EMC についてまとめると膨大な量のデータとノイズ発生メカニズムの整理が必要となるが、本稿では Common mode noise の例を具体的に示した。通常、表にあまり現れない EMC 対策であるが、科学衛星においてもこのような地道な試験や解析が行われているということを紹介した。

参考文献

- 1) JAXA, BepiColombo Mercury Magnetospheric Orbiter(MMO) Component Electromagnetic Compatibility Design Criteria (JX-MMO-C0005-1), 2010.
- 2) JAXA. ジオスペース探査衛星(ERG) Component Electromagnetic Compatibility Design Criteria(SPB-002), 2013.
- 3) Kasahara, Y., Y. Kasaba, H. Kojima, S. Yagitani, K. Ishisaka, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, M. Ozaki, S. Matsuda, T. Imachi, Y. Miyoshi, M. Hikishima, Y. Katoh, M. Ota, M. Shoji, A. Matsuoka, and I. Shinohara (2018), The Plasma Wave Experiment (PWE) on board the Arase (ERG) Satellite, Earth, Planets and Space, doi : 10.1186/s40623-018-0842-4.
- 4) Kasaba, Y., K. Ishisaka, Y. Kasahara, T. Imachi, S. Yagitani, H. Kojima, S. Matsuda, M. Shoji, S. Kurita, T. Hori, A. Shinbori, M. Teramoto, Y. Miyoshi, T. Nakagawa, N. Takahashi, Y. Nishimura, A. Matsuoka, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, and R. Nomura (2017), Wire Probe Antenna (WPT) and Electric Field Detector (EFD) of Plasma Wave Experiment (PWE) aboard Arase: Specifications and initial evaluation results, Earth, Planets and Space, 69:174, doi: 10.1186/s40623-017-0760-x.

- 5) Ozaki, M., S. Yagitani, Y. Kasahara, H. Kojima, Y. Kasaba, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, S. Matsuda, A. Matsuoka, T. Sasaki, and T. Yumoto (2018), Magnetic Search Coil (MSC) of Plasma Wave Experiment (PWE) aboard the Arase (ERG) satellite, *Earth, Planets and Space*, 70:76, doi: 10.1186/s40623-018-0837-1.

著者プロフィール

小嶋 浩嗣 (Hirotsugu Kojima)

<略歴> 岐阜県出身。京都大学生存圏研究所 宇宙圏航行システム工学分野准教授。専門は、科学衛星による宇宙空間のプラズマ環境探査。科学衛星によるプラズマ波動の観測を中心に新規装置開発からデータ解析までを手がける。科学衛星による EMC はプラズマ波動観測の観点から中心メンバーとして参画している。近年は特に超小型衛星用にプラズマ波動観測器のワンチップ化に向けて開発を行っている。