



講座 今日からはじめる磁場閉じ込めプラズマ実験

## 4. プラズマのいろんなパラメータを測るよ！

### 4.2 信号を正しく伝送する！

#### 4.2 Transmit Signals Correctly

江角直道

EZUMI Naomichi

国立高専機構長野高専電子制御工学科

(原稿受付：2014年8月4日)

プラズマ計測における各種センサーの出力信号をデジタイザに入力するまでの、主に電気回路的な部分についての実践的な内容を取り扱う。雑音の要因としての実配線における寄生容量や寄生インダクタンス、ループ回路の影響とその対策について基礎的な事柄を述べるとともに、信号伝送用のケーブルや雑音除去に用いられるフィルタ、アンプの概要についても述べる。

#### Keywords:

normal mode noise, common mode noise, ground, earth, impedance, filter, amplifier

#### 4.2.1 信号と雑音

##### 4.2.1.1 信号と雑音の違い

プラズマ実験において、その目的に応じて様々な計測機器により様々な物理量の計測が行われている。昨今の実験の多くに共通するのは、物理量がセンサーで電気信号に変換され、デジタイザ (AD変換器) を介してコンピュータに取り込まれるという流れであろう。実験に携わる多くの方が経験しているように、電気信号にはいわゆる「雑音 (ノイズ)」が乗ることが多い。しかし、ここでいう雑音とはどのようなものか。信号と雑音は何が違うのか。これらの違いは実験者が何に注目して実験を行っているかによって異なってくることは想像できるであろう。見方によっては雑音と思っていた信号の中に重要な物理的な情報が含まれている可能性も大いにありうる。

例えば、プラズマの揺動に伴う信号の変化はその典型的なものである[1]。プローブ計測を行う際、通常のプロープ電流-電圧特性にはプラズマの揺動に伴う信号のバラツキが観測される。プローブ特性を解析しようとする場合にはこれら信号のバラツキは電子温度、密度評価の誤差の原因となるため、適当なローパスフィルタを入れたり、複数回の特性を平均化したりする等して、雑音を除去する方法をとる。一方、プラズマの揺動そのものに注目する場合、信号のバラツキは雑音ではなく意味のあるデータとして取扱うことになる。

このように一見雑音か意味のある信号かの区別が困難な信号が重要な物理的な情報を含むケースは、近年のデータ集録システムの高性能化によって直面する場面が増えてい

る。実際の揺動計測等では、とにかくできるだけ高いサンプリング周波数でデータを集録しておき、データ解析の際にフィルタ処理や統計処理を行い、目的とする物理量を抽出する手法が取られることもある[2]。そのため、信号をデータとして取り込むまでにいかに「明らかに不要な雑音」を減らすかという課題は、データ精度の向上や的確な解釈のために非常に重要である。

雑音全般に関する解説としては、文献[3]やWebサイト[4]でも詳しく述べられているが、本章ではプラズマ実験における「明らかに不要な雑音」に注目して、その種類や対策について述べてみたい。

##### 4.2.1.2 雑音の様々な要因

さて、前節で述べた明らかに不要な雑音とはどのようなものであろう。当然であるが、プラズマ実験を行う立場からは、プラズマに起因しない雑音ということになる。つまり、プラズマ自身が発する信号ではなく、センサー機器が発する雑音や、放電回路や計測回路の特性に起因する雑音のことである。

センサーが発する雑音としては、素子内の電子の熱運動に伴う「熱雑音」がある。微弱な信号が出力される場合にはこの熱雑音の影響が無視できなくなるため、素子を冷却する等の対策がとられることが多い。

また、電源機器等から比較的大きな電流のスイッチングや変調に伴って空間に電磁波として放射される雑音である「放射雑音」は、計測機器に影響を与えることが多い。空間を伝搬する電磁波については、いわゆる「静電シールド」することによってその影響を低減させることが可能である

が、回路を介して混入する雑音については、後述の配線上の対策が必要になる。

計測回路の配線を伝わって混入する雑音は、「ノーマルモードノイズ (ディファレンシャルモードノイズ)」と「コモンモードノイズ」に分類される。図1に示すように、ノーマルモードノイズ電流 (実線矢印) は、回路内を伝搬する信号電流と同じように、回路を周回するように伝搬するので、信号の行き (信号線) と帰り (戻り線) でセンサー等の信号源から見た向きが異なる。これは信号に重畳された形で観測される。一方、コモンモードノイズ電流 (点線矢印) は、信号線と戻り線に同じ向き (同相) で重畳される。ノーマルモードノイズは、回路の実配線によってできるループ内の磁束の変化や、信号線間の寄生容量によって、互いの信号線を伝わる信号が他の信号線の信号に重畳するクロストーク等、外的要因によって生じる。特に信号レベル (電圧) の大きく異なる信号が平行に配線されている場合は、レベルの高い信号が低い方に影響を与える。これに対し、コモンモードノイズは真空容器、センサーのグランド (GND1) と計測機器のグランド (GND2) 間に存在するインピーダンスに由来する電位差やループ回路の形成 (一点鎖線) に伴うものである。コモンモードノイズは、計測回路全体の電位がノイズ電圧で振られている状態であるといえるので、デジタイザで観測される線路間電圧に対して陽に影響を与えるものではない。しかし、実際の計測では、図2に示すように信号線と戻り線のインピーダンスが異なる非平衡回路となるので、コモンモードノイズは両線路を同方向に伝わるものの、それぞれの線路インピーダンスの違いにより、電圧降下の大きさが異なり、結果として線路間に電位差が生じ、これがノーマルモードノイズとして現れることになる。

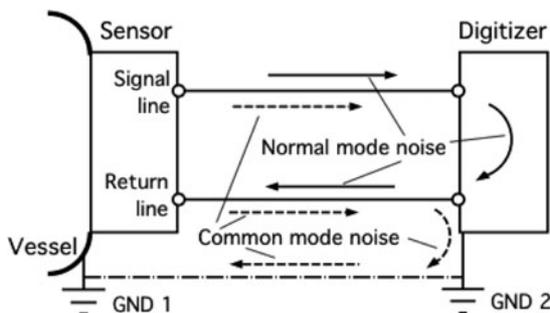


図1 ノーマルモードノイズとコモンモードノイズ。

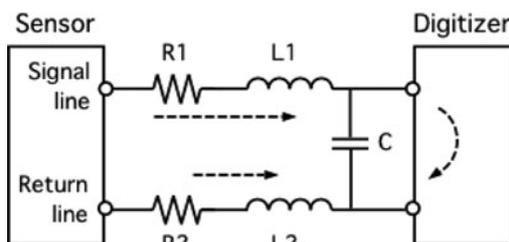


図2 信号伝送路の等価回路。信号線と戻り線のインピーダンスが異なる非平衡回路であるので、コモンモードノイズが線路を伝わる際の電圧降下により線路間に電位差が生じ、コモンモードノイズがノーマルモードノイズとして現れる。

ノーマルモード、コモンモード、いずれの雑音も現象としては電磁気学で学ぶ電磁誘導とインピーダンスに電流が流れることによる電圧降下に起因するものであるが、通常これらは実際の配線の際に問題となるもので、回路図には載っていないのが厄介なところである。特に、プラズマ実験では放電部で大電流やパルス電流を扱うことが多く、計測回路や機器筐体のグランド、アースの取り方は不要な雑音を拾うのを避けるだけでなく、雑音を発生させないためにも重要である。そもそもプラズマ実験の電気回路は、定常運転のプラズマであってもプラズマの揺動や雑音のことを考慮すると、直流回路ではなく、交流回路 (周波数が高い場合には高周波回路) として考えるべきで、直流電圧を観測している場合でも図2に示したように、配線間や配線 - グランド間に寄生容量と寄生インダクタンスを含んだ等価回路として表される。また、配線に用いられる導線やグランド間は理想的には電気抵抗はないものとして扱うことが多いが、実際には有限の値 (共通インピーダンス) があるため、ここに電流が流れることによる電圧降下が雑音発生の一因となる。

## 4.2.2 雑音に強い信号の伝送

### 4.2.2.1 回路配線上の対策

いくつかの雑音の要因を見てきたが、ここではそれら雑音を如何に低減するかの方策について述べる。まず、回路の配線の引き回しについて、共通インピーダンスや意図しない配線ループ (グランドループ) を避け、コモンモードノイズの発生を可能な限り抑制するためによく取られる措置が、「1点アース」である。文字通り、複数の計測系からの信号の戻り線 (シグナルグランド側) を一カ所に集め、アースに接続するという方法である。ただし、高周波回路では各戻り線とグランド間の寄生容量の影響で実際には1点アースにならないので注意が必要である (本講座1.2章参照)。1点アースを行うのが困難な場合は、グランド間での電位差の発生を抑えるため、グランドの質を上げる (インピーダンスを下げる) 工夫が必要になる。つまり電気伝導率の高い材料 (銅等) を太く短く用いることによって、グランドそのものの電気抵抗を小さくする。回路のシグナルグランドとして金属製の筐体 (フレームグランド) を用いる場合があるが、大電流や高周波回路の場合には、筐体のインピーダンスが大きいため、筐体の中で電位差が生じ、雑音の原因となることがある (高周波回路の筐体の内側に銅板が敷き詰めてあるのはこのためである)。

実験室では放射雑音対策として配線や機器をアルミホイルで覆う光景をよく目にする。静電シールドとして機能させるためには、アルミホイル自体をアースに繋ぐ必要があるが、上述のようにむやみにアースに繋ぐと不要なループが生じ、逆に雑音を拾ったり、まき散らしたりすることになる場合もあるため、アースを繋ぐ場所はよく吟味する必要がある。

### 4.2.2.2 ケーブルとコネクタの特性

配線上の不要なループが生じるのを防ぎ、機器間を確実に接続するためには、信号伝送用ケーブルとコネクタを適

切に用いる必要がある。通常の計測用途であれば、特性インピーダンス  $50\ \Omega$  の BNC コネクタと同軸ケーブル 3D-2V や 5D-FB 等の組み合わせで用いられることが多いであろう。T 字やストレートアダプタ等のケーブル接続用アダプタを用いることで容易に信号伝送用の回路を組むことができる。外部導体は網線となっているため、配線取り回しの柔軟性を確保しつつ、シールド効果をもつ。ただし、同軸ケーブルは非平衡線路であり、4.2.2.1 で述べたように外部導体のアースの取り方によっては、不要なループができることがあるので注意を要する。また、電氣的に浮いた部分の電位差を測定する際には、接続先がグランドから切り離されている（接続される側の端子が絶縁入力端子あるいは差動入力になっている）かどうか確認の上で接続することが重要である。これを怠ると、意図しない短絡回路を構成してしまい、雑音対策以前に、機器を損傷することになる。

高い周波数の信号計測では、より高いシールド性と周波数特性を有する同軸ケーブルであるセミリジッドケーブルと SMA コネクタ等の組み合わせが用いられる場合もある。セミリジッドケーブルは外部導体が網線ではなく銅管が用いられており、配線の取り回しの自由度は低いが、静電シールド性は高く、ガス放出が少ないことから真空装置内で用いる機器での配線に用いられることもある。

同軸ケーブルが使えないような大きな電流を扱ったり、同軸ケーブルから 2 つの端子に接続したりする場面では、ツイストペアケーブルも有効である。これは 2 本のビニール被覆導線を編むように撚ったもので、回路を作製する際にその場で施されることが多い。2 本のケーブルを撚ることで、不要なループが生じるのを防ぐと同時に、それぞれのケーブルの周りに発生する磁場が互いに打ち消されるため、電磁誘導の影響を低減し、雑音の発生と受取の両方を防ぐことができる。簡便であるが雑音対策として有効な方法である。

### 4.2.3 雑音の除去と微小信号の抽出

雑音の除去方法や雑音に埋もれた微小信号を取り出す方法には様々な方法があるが、ここではプラズマ計測でよく利用されるものの中からいくつかを紹介する。

#### 4.2.3.1 周波数フィルタ

回路上の対策やケーブルの使用を適切に行っても雑音（ノーマルモードノイズ）が残る場合もある。求める信号の周波数と雑音の周波数が異なる場合には周波数フィルタが有効である。周波数に応じて、ローパスフィルタ (LPF)、ハイパスフィルタ (HPF)、バンドパスフィルタ (BPF) が用いられる。電気回路の演習問題でもよく目にする、コンデンサ、コイルと抵抗を組み合わせる方法やこれらにオペアンプも組み合わせる方法がよく用いられる。実験室で自作することも多いが、カットオフ周波数が低いフィルタは、必要な信号もなまらせてしまうため、計測系で使用している信号の周波数をよく見極めた上でフィルタ周波数を設定する必要がある。高周波信号がカットされてしまうため、そこに含まれる物理的な情報も失うことになる。近年

ではデジタルのサンプリング能力が向上しているため、4.2.1.1 でも述べたように、あえてフィルタは介さず、高いサンプリング周波数でデータ集録した後、データ解析の際に適切なフィルタと統計的処理を行うことによって、必要なデータを抽出する方法が取られることもある。

#### 4.2.3.2 コモンモードフィルタ

コモンモードノイズの除去に用いられるフィルタに「コモンモードフィルタ（コモンモードチョークコイル）」がある [5, 6]。鉄心コアに 2 つのコイルを同じ向きに巻いたもので、それぞれのコイルが信号の行きと戻りに対応する。ノーマルモードの信号は位相が逆であるため、それぞれのコイルで発生する磁束が打ち消され、信号に対するコイルの影響がなくなる。一方、コモンモードノイズに対しては、2 つのコイルのインピーダンスによって、その大きさが減衰することになり、コモンモードノイズのみ除去することを実現している。電源回路やセンサー、計測機器内部に組み込まれている場合も多い。

#### 4.2.3.3 絶縁アンプ

電氣的に浮いた素子における電圧降下を測定する場合やコモンモードノイズを除去するために有効なのが、絶縁アンプ（アイソレーションアンプ）である [7]。入力と出力の間にフォトカプラがあり、入力と出力が電氣的に絶縁されているのが特徴である。入力端子側の耐電圧に注意する必要があるが、ゲイン調整やローパスフィルタ機能のついた製品もあり、プローブ計測におけるプローブ電流計測に代表されるような、基準電位がグランド電位ではない場合の電圧測定の際に有用なアンプである。

#### 4.2.3.4 ロックインアンプ・ボックスカー積分器

雑音の多い信号の中から、参照信号と同期し信号を抽出することを可能にするのが、ロックインアンプやボックスカー積分器である [8]。例えば、レーザー誘起蛍光法では、入射レーザーを変調させ、レーザー入射に伴ってプラズマから放射される蛍光放射を光電子増倍管で検出し、その微小な出力信号とレーザー変調信号（参照信号）を、ロックインアンプやボックスカー積分器に入力し、蛍光を検出する方法が用いられる [9]。

### 4.2.4 おわりに

本節ではプラズマを計測する際の信号伝送における雑音の影響と対策について、基本的な事柄を述べた。すでにプラズマ実験に携わっている方々には今更の内容であったかと思うが、これから実験をはじめめる学生の方々等が、雑音に悩まされたときの一助になれば幸いである。プラズマ実験は大電流を扱いつつも微小な信号を計測するという、難易度の高い計測が多い。筆者も日々雑音と格闘しているところであるが、今回の執筆を通じて改めて雑音に対する認識を整理することができた。貴重な執筆の機会をいただいたことに感謝する次第である。

### 参考文献

- [1] H. Tanaka *et al.*, Nucl. Fusion **49**, 065017 (2009).
- [2] 辻 義之他：プラズマ・核融合学会誌 **85**, 620 (2009).

- [3] 例えば伊藤健一：アースと雑音（日刊工業新聞社，1974）。
- [4] 例えば，宮崎誠一：Web 講座良く分かる実用ノイズ対策技術 <http://www.miyazaki-gijutsu.com/series2/>
- [5] TDK：テクノマガジンなるほどEMC入門，<http://www.tdk.co.jp/techmag/emc/200412/>
- [6] 村田製作所：ノイズ対策PLAZA，[http://www.murata.co.jp/products/emicon\\_fun/2011/09/emc14.html](http://www.murata.co.jp/products/emicon_fun/2011/09/emc14.html)
- [7] 松井邦彦：トランジスタ技術 5月号，185 (2008)。
- [8] 内田照雄他：分光研究 23, 196 (1974)。
- [9] プラズマ・核融合学会編：プラズマ診断の基礎と応用，163 (2006)。



え ずみ なお みち  
江角直道

国立高専機構 長野高専 電子制御工学科，准教授。境界プラズマと大気圧プラズマという相異なるプラズマを研究対象としていますが，プラズマ・ガス相互作用をキーに研究を進めています。計測のためにプローブを作ることが多く，最近ではプローブ職人化しています。長野に来て早16年になりますが，未だに事務職員に学生扱いされることがあるのが残念です...

## コラム5 “一寸の光軽んずべからず”

大昔の実験装置の時代，デジタルストレージオシロスコープもまだなかった時代の話です。機器のリレーのオンオフ時やコンデンサーバンクの充電中にオシロスコープのトリガー信号にノイズがのり，再度レディボタンを押すために専任の学生が一人つきっきりということがあります。また，機器単体では正常動作しているのに，別の機器に信号線を接続すると誤動作するということがあります。原因のほとんどはコモンモードノイズ（2本の信号伝送線とグラウンド間の雑音）とグラウンドループ（接地線が閉ループになっている）によるものでした。実験者は計測器からの信号を見ないと実験になりませんから計測器からの信号は注視しています。したがって，実験者はノーマルモードノイズ（2本の信号伝送線間の雑音）には敏感で，S/N比がよくない場合にはノーマルモードノイズを減らす努力をします。静電シールド，磁気シールドの付加，機器の出力インピーダンスを下げるなどをしてみるわけです。特に，微小電流信号を計測する場合はノーマルモードノイズが乗りやすく，また，信号源インピーダンスが大きいと周波数特性が悪化し，前置増幅器が必要となるかもしれません。一方，トラブルの原因であったコモンモードノイズについてですが，このノイズを注視することはあまり行わない，というかみていないことが多いです。したがって，コモンモードノイズを由来とするノーマルモードノイズで異常が発生していることに気付くのが遅れる場合があります。このコモンモードノイズ除去には差動入力にすることが教科書的回答ですが，差動増幅器のグラウンドに対する入力耐電

圧は差動増幅器が使用している電源電圧程度であり低い場合が多いです。そこで，グラウンドアイソレーション（接地線を開ループにする）にもなる絶縁増幅器の登場となります。入力のグラウンドに対する耐電圧は高いです。しかし，高帯域の既製品の種類は少ないです。低周波帯域用であれば自作可能ですが，絶縁電源をどうするかが問題となります。電池交換が煩わしいですが，電池駆動も一つの手です。絶縁増幅器は設置場所を考えれば前置増幅器にもなり，一石二鳥です。

さて，その後の話です。実験装置を新設することになり，設計時にいろいろな方針を定めましたが，その中の一つ，機器間の信号線をどういう方法で結線するかを策定しました。「機器はすべて一点アースとし，グラウンドループを作らない」です。具体的な対策としては「計測器からのアナログ信号線はすべて絶縁増幅器によりグラウンドアイソレーションする。制御機器からのデジタル信号線はパルストランス，光ケーブル，フォトカップラによりすべてグラウンドアイソレーションする」ということです。このような対策のおかげで耐ノイズ性が格段に向上し，結果は非常に良好でした。ところがある時，ある時間帯だけ機器が誤動作する事態が発生しました。原因をいろいろ調査しましたがなかなか発見できず，半ば諦めていた頃，なんと，トラブルが発生する時間帯になるとほんの小さな隙間から朝日が機器に差し込むことがわかりました。隙間から漏れた朝日が保護カバーをつけ忘れた光ケーブル入力端子にあたって，誤動作するという珍事でした。（北島純男，東北大学工）