



2. 電磁ノイズとその対策

2.2 電磁ノイズ対策の勘どころ

2.2 Key Points of Electromagnetic Noise Reduction

桑原 大介

KUWAHARA Daisuke

中部大学工学部

(原稿受付：2019年7月26日)

プラズマ実験においてノイズ対策を行う際、その検討範囲は広範に渡る。実験棟、実験室から始まり個々のプラズマ装置から検出器、検出回路を経てデジタイザまでがその範囲に当たるが、実験室の作りや実験装置の構造、予算、時間との兼ね合いで多くの場合は原理に基づいた理想的な対策は困難であり、また工学的に対策が無いこともある。本稿では電氣的ノイズについて「場当たりの」なものも含め著者の経験に依る対策法を紹介する。

Keywords:

power supply noise, discharge noise, electromagnetic noise, electromagnetic compatibility, electromagnetic shielding

2.2.1 実験室規模のノイズ対策

プラズマ実験に限らずあらゆる分野の実験的研究において研究者はノイズ対策に四苦八苦している筈で、半ば諦観も含んだ苦勞話で盛り上がった経験が一度や二度はあることかと思われる。特に苦勞を感じたことの無い者は、幸運にも実験装置の信号／ノイズ比 (S/N 比) が良いか、本人の預かり知らぬところで誰かが対策を講じてくれているか、はたまた S/N 比の限界まで観測せずに満足しているかのどれかである。著者が学生時代に聞かされ、今でも思いだす格言として、「ある装置の測定限界を2桁改善できれば、新しい現象が見つかる可能性がでる」というものがあるが、すなわち S/N 比向上に終わりはなくノイズに負けずこれを制した者のみが新たな発見を勝ち取る権利を持つ、と理解している。結言でこの高尚な格言の証左の一例を示しているが、多くの実験の場合、ある現象を観測するに当たり計測値の特性、変位幅の見当は付いており、この範囲外の信号、すなわちノイズを除去してしまえば実験は成功であることも事実である。よって、実験を行う際は自分がどのような信号を得ようとし、どのような信号をノイズとするのか理解しておかなければならない。また、実際にノイズと考えられる信号が計測された際は、どこに由来するものか解明することが肝心であり、出処不明のノイズは対策が困難になることを心しておく必要がある。

この章では実験室規模のノイズ対策や一般的な計測器における配線法等のノイズ対策について、前章の議論をベースにより実践的なテクニックを紹介する。一部、経験則に基づき詳細な物理背景の解説を除いた論も見受けられるが、これからプラズマ実験に臨む学生だけでなく、ノイズ

対策に長じた諸氏の議論の発端となれば本望である。

2.2.2 実験室のインフラ

プラズマ実験環境の一例として、著者の実験室の模式図を図1に示した。高周波プラズマをプラズマ源とした電気推進機実験装置であり、数 MHz～数百 MHz、数 kW の高周波電源や定常 500 A の電磁石用直流電源など多くのノイズ発生源が稼働する実験室であり、日々ノイズ対策に追われている。

2.2.2.1 分電盤

電力供給から実験データ取得までの流れを考えるに、その最上流は実験装置への電源供給を行う分電盤である。この実験室には分電盤が3つあり、電灯盤(单相 100/200 V)、動力盤1 (3相 200 V) と動力盤2 (3相 200 V) である。なお、動力盤2は50 kW 出力の大電力直流電源のための専用盤である。電灯盤は比較的小電力の多くの機器へ供給する分電盤で、壁コンセントのほか小型のチラーやターボ分子ポンプ、2 kW 程度の高周波電源に直結した線路を持つ。動力盤1は比較的大きな電力が必要な機器に使用され、10 kW 程度の高周波電源や大電力直流電源の冷却器等、モーター負荷が接続されている。動力盤2は大電力直流電源のみが接続されているが、これはそもそも400 A ブレーカーやその配線が大きいため動力盤1と共通にできないことや経験的にノイズが乗りやすいことが明らかとなっており、対策を容易にするため分離して配置したものである。

分電盤は上述のような各機器への電力供給を個別に管理し、また故障や短絡による過電流を遮断するために用いられるが、ノイズ対策においても重要な要素である。分電盤

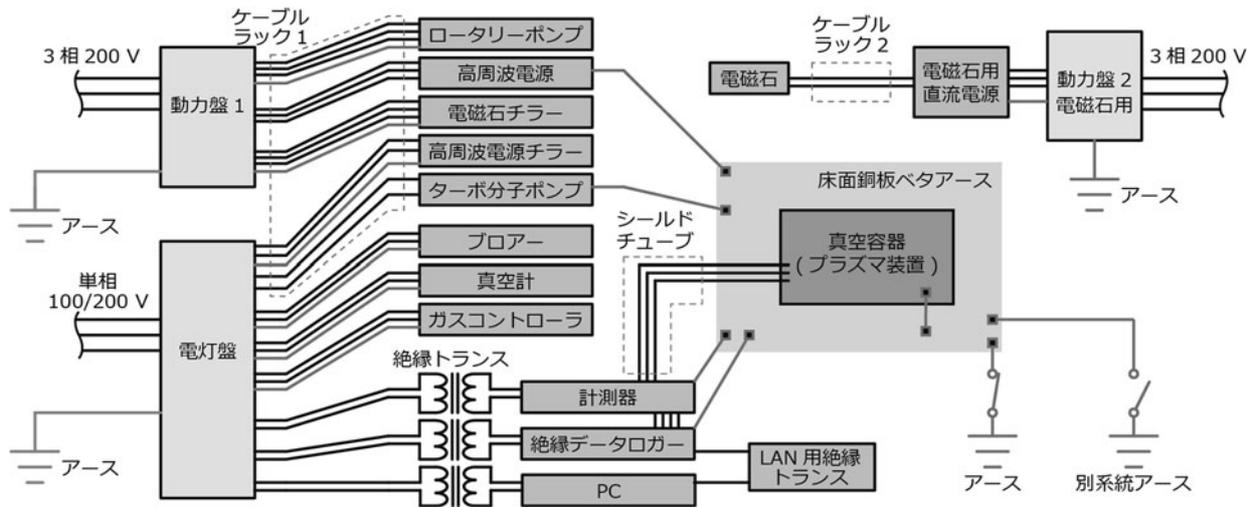


図1 実験室模式図。

にはアース端子が設置されている。アースについては後述するが、通常1系統のアースを2系統用意し、大きなノイズの発生する機器を別系統アースに分離して他の機器にノイズが混入しないようにする手法がある。この場合、1つの分電盤に2つのアースを設置するよりも分電盤ごと分離されている方がノイズの混入防止や狭い分電盤の中での取り回しも容易になる。なお、分電盤作業等の電気工事には電気工事士の資格が必要なので、無資格者のみでの作業は安全の面でも絶対に行ってはならない。

2.2.2.2 電線の敷設

実験室には電源線、信号線、LAN等の通信線など数多くの電線が張られることになるが、これらは適切に配置する必要がある。

第一は安全のためであり、床に配線を這わせたり、作業場所の周辺に配線が垂れていればそれに体を引っ掛けて機器を破損したり、転倒して怪我をする可能性が高くなる。実験装置の配置作業中等は配線の配置がおざなりになりがちだが、作業者の動線に重なる部分は最低でも養生テープ等を使用して固定すべきである。

第二はノイズ対策である。真空ポンプ、コイル電源や高周波電源等の電源線は50/60 Hzの商用電源を用いている。大抵の場合、これらの配線は頑丈なキャプタイヤケーブルが用いられるが、キャプタイヤケーブルは頑丈な被覆の中に単相であれば2芯、三相であれば3芯、そして多くの場合アース線が1芯追加される。これらの芯線はツイストされており、漏れ磁場を防ぐように考慮されているが、信号線を並行して配線すれば50/60 Hz信号の混入があり得る。この50/60 Hzの商用電源由来のノイズはハムノイズと呼ばれている。なおハムノイズの「ハム」はハミング（唸り）の略で、このノイズが可聴周波数であるために電力機器がこの周波数で鳴ることに由来している。これに加え、インバータを使用した機器の電源線には数k~数百kHzのインバータノイズが重畳していることもある。コモンモードで電源線に乗ったこれらのノイズは絶縁トランスで低減することができる。絶縁トランスは1次側巻線と2次側巻線が絶縁されたトランスであり、コモンモードノイズは打ち消

し合うため除去できる。様々な種類の絶縁トランスが市販されているが、1次・2次巻線が静電的に遮蔽されたシールドトランス、高周波信号を低減するノイズカットトランス[®]等がよく使用される。なお、トランスには周波数特性があるので信号の帯域を良く把握しておく必要がある。ノーマルモードで電源線に高調波ノイズが乗った場合、原理的には後述の各種フィルタで除去できる。しかしながら大電力電源線の場合はフィルタ用の素子も大型化するため金額的に困難なことがある。これらの事情から電源線は信号線と離し、特にノイズが乗る電源線は他の電源線とも離して配置するべきである。一番良いのは電源線と信号線のケーブルラックを分けることである。

また、電源線のノイズ混入、放射を防ぐために電源線に静電シールドを施すことも有効である。よくアルミ箔を巻き上からビニールテープで巻いたキャプタイヤケーブルを見かけるが、アルミ箔は細かい端切れが実験装置や機器内に混入してショートさせる可能性があるため注意が必要である。図2に示すような銅シートをマジックテープで巻きつけることができる市販の静電シールドが市販されている。外側に絶縁加工が施されているものもあり、アルミ箔より施工性が良い。

磁気シールドには高い透磁率を持つ素材で線路を覆う必要がある。しかしながら磁場減衰の効果は静電シールドと比べて弱いため、施工しやすいようなアルミ箔のような数十 μm の薄板材料では効果が薄い。鋼管にケーブルを取

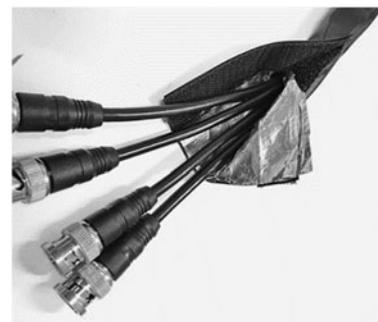


図2 銅箔シールドチューブ。

める方法もあるが施工性が悪いため、可撓性のあるコルゲート状亜鉛メッキ銅管等が用いられる。また当然ではあるが電源線の経路と磁場源の距離を離すことも重要である。

ケーブルラックは天井、または床下等に設けたケーブル専用の経路であり、大抵の実験室では既に配置されている筈である。信号線用のケーブルラックは金属板で周囲を完全に覆って電磁遮蔽したケーブルダクト構造のものもある。ケーブルラックは様々な接続用パーツが市販されており、最近では Web 通販で購入できる。図 3 のように既存の天井ケーブルラックの下面に新たなケーブルラックを並走して敷設することも容易である。耐荷重量や振動対策は必要だが、電源線と信号線の分離が容易になるので方策の一つとして検討する価値はある。ただ、高所作業になるので適切な脚立の使用、ヘルメットや安全帯の着用、二人以上の作業を徹底する必要がある。

2.2.2.3 アース

前章でも説明されているが、各機器、配線のアース接続はノイズ除去に大きな影響を与える。しかしながらアースの第一目的は地絡事故や感電防止である。機器内で絶縁不良が発生したり、パルス放電実験による電磁ノイズが放射されることによって機器の筐体表面に高電圧が印加されることがある。このとき、筐体がアースに接続されていれば仮に人間が筐体を触ってしまってもより抵抗の低いアースに電流が流れるため感電の可能性が減る。

通常、各機器のアースは分電盤からの専用線路であればキャプタイヤケーブル等の電源線に内蔵されたアース線か、壁コンセントの 100 V 供給であれば 3P プラグで接続することで分電盤内のアース端子に接続される。アース線路を短くすることやインピーダンスの低いアースを用いたい場合、グラウンドループを除去するためには任意の箇所でアースに接続できるように加工する必要がある。専用線路であれば、ブレーカー内のアース接続を外し、機器筐体のアース端子に別途用意したアース線を接続するか、壁コンセントであれば図 4 のような 2P-3P 変換アダプタを使用すれば任意のアース接続が可能になる。もちろん、分電盤内の作業は電気工事士に依頼する必要がある。

アース接続に用いる配線はインピーダンスが低いことが求められる。図 5 に示すようなスズメッキ銅編組線や高周波



図 3 ケーブルラック。

機器であれば銅製の薄板等が用いられる。図 6 は高周波プラズマ装置の床面に施した銅板によるアース板（ベタアースとも呼ばれる）である。アースへの距離短縮や大面積とすることで低インピーダンスなアースが実現でき、後述の装置全体を遮蔽する際の金属床板としても使用することができる。「インピーダンス」としては直流としては抵抗成分が低いほど、交流としてはインダクタンスが低いほどノイズ成分を除去できるためである。低抵抗とするためには線路断面積の増加、低インダクタンスとするためには平板化が挙げられる。一方、パルス放電装置の場合は機器とアース間に抵抗やインダクタを挿入して、過渡的にはアースから絶縁、直流的にはアース接続とする処理も行われる [1]。また、大電力パルス実験では地絡が発生するとアースを通して大電流が他の機器へ流れ、これが破壊されることもあるためアースを取らないこともある。非接続とする場合は機器が高電圧に帯電する可能性等を十分考慮しなければならない。

実験によっては思わぬところに人命に関わるような高電圧が発生することもある。大電力の高周波やパルス電源を用いるとアースに接続された機器の金属筐体間や距離が少し離れたアース板間で高電圧が発生することがある。細線でアース接続されている機器筐体間の 1 mm 程度の間隙で火花が生じた、アースとなっているはずのステージ間の手すりを触ったら感電した、などの危険もあるのでアースの

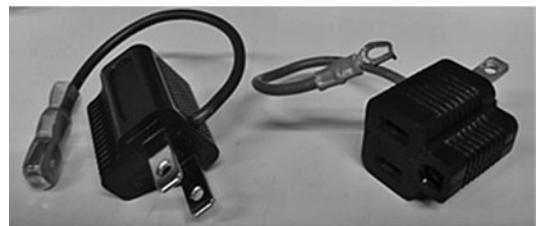


図 4 2P-3P 変換アダプタ。



図 5 スズメッキ銅編組線。

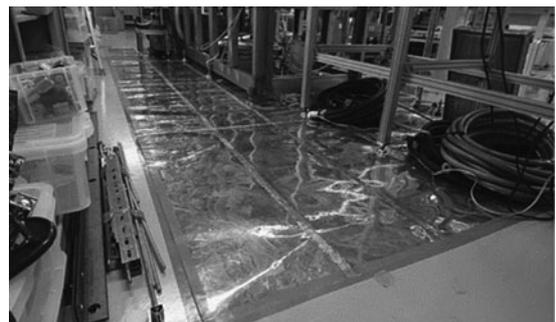


図 6 プラズマ装置床面の銅板ベタアース。

過信は控える必要がある。特に高周波においては信号伝達に同軸線を用いたり、アンテナ等の素子と接続する際にインピーダンスマッチングを行わなければ信号が反射してしまう訳で、単に低インピーダンスとした銅板アースに都合よくノイズが流れる道理は無いのである。

2.2.2.4 空間放射ノイズ

プラズマ生成に周波電力を用いる装置等では電力が電磁波として空間に放射され、計測器へのノイズや電源装置の誤動作に繋がることある。

空間に放射された電磁波の遮蔽には静電シールドが効果的で、プラズマ装置の全体を金属で覆うことで遮蔽できる。装置の床面に設置したアース板から金属製の壁、天井を組み上げてシールドケースとすることでプラズマ装置全体の遮蔽が可能となる。ただ良いことばかりでもなく、ダブルプローブ計測等で外側導体が浮いた状態のBNCケーブルを床に落とすとショートして回路が壊れたりするので注意が必要である。なお、遮蔽に用いる板材は金属板でなくとも金網や開口のある金属製パンチング板を用いることができるが、開口の大きさは導波管の遮断周波数と同様に検討が必要である。ただ、実験装置には高周波供給電線、磁場コイル用の大電流直流電源線や真空計用の多芯線や各種計測器用のBNCケーブルなど多くの配線があり、これらはシールドケースを貫通してケース外機器に接続する必要がある。しかしながら、シールドケースに遮断周波数以下の開口を開けたとしても配線を通すと同軸線路を形成して電磁波が漏れ出すことがある。シールドを完全にするには貫通コンデンサやEMI (Electromagnetic interference) フィルタ等を用いてケース内外を接続する必要があるが[2]、遮蔽性、電流容量、周波数帯域、多芯など様々な要求を同時に満たすフィルタは存在しない。BNCケーブルや細線が対象であれば市販のフェライトコアを用いることで高周波ノイズを減衰できるが、効果のある周波数帯を把握して使用する必要がある。

苦勞してシールドケースを製作しても遮蔽効果が得られないこともあるし、遮蔽に成功してもシールドケース化すると実験作業が困難になったり、信号線へのノイズ混入量が増加することもありうる。シールドケースは取り外し可能とすることを勧める。

ノイズの放射点を大まかに知る方法として図7のようなアンテナで空間の放射強度を計測する方法がある。このアンテナはセミフレキシブルケーブルの1ターンのループコイルとし、芯線を外導体にはんだ付けしたもので、静電場をシールドして磁場に感度を持たせたものである。適当な50Ωケーブルを介してオシロスコープに接続して、現れる交流電圧から電磁界強度を計測するもので、大まかな変動磁場、相対強度を観測するには十分である。高圧回路の周辺を走査する場合はショートさせないように注意する。

2.2.3 計測機器との接続

各種計測器からの信号はデジタイザに入力されデジタルデータとなる。これらの信号は計測器によって周波数帯域が異なるため、適切な信号線を使用する必要がある。一般

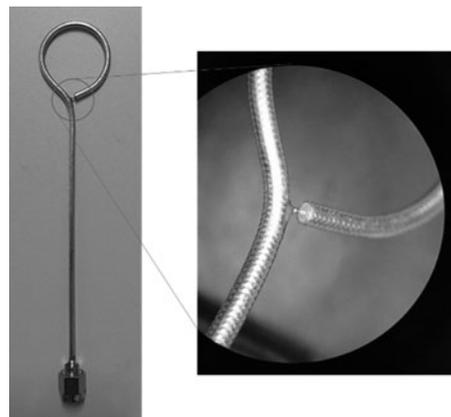


図7 ワンターンループアンテナ (右:拡大図)。

的に用いられる信号線として、RG58/Uや3D-2V等の50Ω同軸線を使用したBNCケーブルがある。GHz以下、数百V以下の小電力信号であればBNCケーブルを用いればまず問題は無い。実際にはコネクタとケーブルの両方で固有の周波数帯域や特性インピーダンスを持つので、伝送する信号の特性をよく理解しておく必要がある。より高い周波数の信号を扱う際はSMAコネクタやセミリジッドケーブル、セミフレキケーブル等が用いられる。特にセミリジッドケーブルは外側導体が銅管となっているため、高い静電遮蔽能が求められる箇所で用いることができる。

次にデジタイザだが、一般的なオシロスコープの入力はBNC端子となっており、グラウンドは共通となっている。ここにBNCケーブルを接続すれば外側導体がグラウンドループを形成し、コモンモードノイズが発生する可能性がある。BNCケーブル同士を束ねたり緩くツイストすることでグラウンドループの影響を低減することができるが、グラウンドループを除去するには絶縁アンプを用いるか、各チャンネルの外側導体が絶縁された絶縁入力オシロスコープを使用するのが最も簡単である。絶縁アンプは入力と出力が絶縁されたアンプで、市販されているものでは数kV程度の絶縁耐力を持つものもあるが、多くのものは周波数帯域が数kから数十kHz程度で、高周波数で使用できるものは高価である。使いやすい絶縁アンプとしてAnalog Devices社のAD202JNがある。帯域幅5kHzと比較的低速だが入力・出力側の両方に絶縁された電源を供給できる。

なお、グラウンドループ形成で最も問題となるのが各機器に接続されるトリガ信号である。トリガ信号はノイズ発生源であるプラズマ生成用電源や低ノイズであることが求められるデジタイザにも接続されており、波形が乱れるとトリガのタイミングがズレることもあるのでノーマルモードでのノイズ対策も必要である。トリガ信号の絶縁には電気信号を一度光に変換して伝達するフォトカップラや小型トランスでトリガパルスを送るパルストランスを用いる方法がある[3]。注意点として、MHz程度の高速度現象の同期に上述のトリガを用いる場合は元信号との遅延やトリガ波形の劣化の程度を把握しておくことが挙げられる。遅延や波形劣化によって本来であれば同位相となる信号に位相差が発生してしまい解析が困難になる、実験シーケンスの

タイミングがずれる, などの問題が起きる可能性がある。

数 MHz 程度の信号, かつチャンネル数が多いようであれば絶縁入力データロガーの使用をお勧めする。データロガーは多チャンネル入力が可能なものが多く, 100 MS/s サンプルング程度の高速モジュールや, 低サンプルング速度だがチャンネル数の多いモジュールなど様々な機種がある。ロガー間の同期が可能な機種もあるため, 近年の計測チャンネル増加にも対応できる。

なお, ノイズとは異なるがデジタイザにおいて発生するエイリアシングについて簡単に説明する。デジタイザは信号を量子化してデジタルデータに変換するが, 量子化は設定したサンプルング周波数のタイミングで行われる。エイリアシングとは, サンプルング周波数を f_s , 計測信号を持つ最大周波数を f とすると, f が $f_s/2$ よりも高いと偽の周波数 $f_s - f$ が計測されてしまう現象である。これを防ぐためには $f_s/2$ 以上の信号を除去するローパスフィルター (LPF) をデジタイザ入力の前段に挿入する必要がある。なお, デジタイザを使用するにあたりサンプルング周波数の他, これ以上の周波数を持つ信号は振幅が $1/2$ になるアナログ周波数帯域についても把握しておかなければならない。

2.2.4 信号のフィルタリング

信号のノーマルモードノイズ除去やエイリアシング除去のためオシロスコープやデータロガーなど, またはトリガ信号の誤動作防止としても受動素子を組み合わせた LPF が良く用いられる。図 8 上に示すような BNC コネクタが付けられたアルミダイキャスト製ケースが市販されており, この中に抵抗やキャパシタで構成されたフィルタ回路を実装して使用する。金属ケースなので遮蔽効果も期待できるが, 図のように塗装されたケースは蓋と筐体が伝導の隙間ができるため, 完全に遮蔽するには塗装を紙やすりで剥がすなどの処理が必要である。図 8 下は数百 MHz 程度まで使用できる自作汎用フィルタベースである。フィルタ回路を構成する抵抗, キャパシタおよびインダクタは数 MHz 程度の帯域であればラジアルリード素子で十分だが, それ以上の周波数では寄生インダクタンス・キャパシタンスの影響が大きくなるため, 高周波帯の特性が良好な表面実装用のチップ部品と低損失な薄型高周波基板を用いると良い。これらのチップ部品は電子部品通販サイトで安価に購入でき, 基板も国内・海外のプリント基板製作サービスを利用すれば 1 週間程度で入手できる。なお, フィルタ回路の設計には Analog Devices 社のフリー電子回路シミュレーションソフトの LTspice[®] が便利である。

フィルタ設計の例として, サンプルング速度 10 MHz のデジタイザのアンチエイリアシング用 LPF を考える。デジタイザに入力する信号は 5 MHz 以下としなければならないので, 5 MHz で信号強度が $1/10$ となるよう設計する。図 9 (a) はデジタイザ前段などでよく使用される抵抗 R とキャパシタ C を一つずつ使用した 1 次 CR LPF である。この LPF のカットオフ周波数 f_{cutoff} は (1) 式で示される。

$$f_{\text{cutoff}} = \frac{1}{2\pi CR} \text{ [Hz]} \quad (1)$$

これに対し図 9 (b) はインダクタ L_1 とキャパシタ C_1, C_2 を使用した 5 次定 K 型 LC LPF で, 1 次 CR LPF よりも急峻な周波数特性を持つ。この LPF の各素子の値は式 (2), (3), (4) で計算される。ただし, z はフィルタのインピーダンスである。詳細な原理などについては文献を参照されたい [4]。

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_{\text{cutoff}} z} \text{ [F]} \quad (2)$$

$$C_2 = 2C_1 \text{ [F]} \quad (3)$$

$$L_1 = \frac{2z}{2\pi f_{\text{cutoff}}} \text{ [H]} \quad (4)$$

フィルタ特性の設計は LTspice によるシミュレーションを用いて行った。 f_{cutoff} を適宜調整し, 5 MHz で $1/10$ になるような素子の値を選定した。実際に入手可能な素子の値は飛び飛びであるため, それも念頭に置いて設計すると部品点数を減らすことができる。注意点として, 大容量小型のキャパシタは耐電圧が低くなるので信号の上限電圧を把握しておかなければならない。

図 10 のグラフはシミュレーションと実測のフィルタ特性を示しており, 横軸は周波数, 縦軸はフィルタの通過特性を電圧比で示したものである。 -20 dB で通過信号の電圧は $1/10$ に, -40 dB で $1/100$ となる。薄い点線 (CR Sim.) は $f_{\text{cutoff}} = 500$ kHz の 1 次 CR LPF の LTspice による計算値

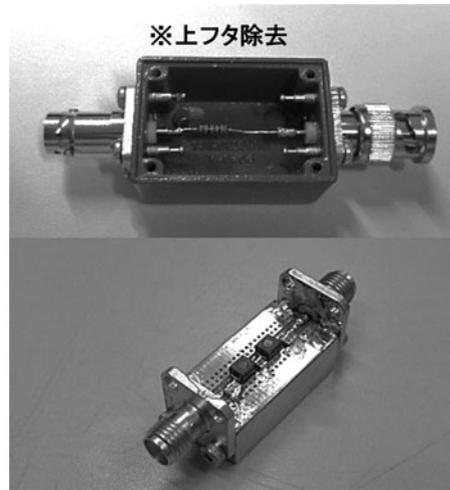


図 8 フィルタ実装例 (上: BNC フィルターケース, 下: 自作 SMA コネクタボード。

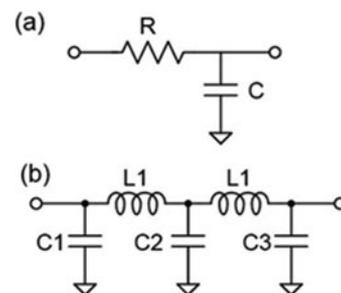


図 9 CR 型 LPF と LC 型 LPF。

で、実線 (CR Meas.) は実測値である。手軽な LPF だが減衰特性はなだらかなので、除去したい周波数帯域より低い帯域でも広く減衰を受ける。また、直列に抵抗が入っているため低インピーダンスにおいては損失も大きい。一方、濃い点線 (LC Sim.) は $f_{\text{cutoff}} = 4 \text{ MHz}$ の 5 次定 K 型 LPF のシミュレーション値、濃い実線 (LC Meas.) は実測値である。DC から 2 MHz 程度まで減衰が非常に少ないが、これ以上の周波数では急峻に減衰し、8 MHz では 1/100 まで減衰する。どちらの計測も実測とシミュレーションがほぼ一致しているが、CR LPF の 70 MHz 辺りで減衰量が大きくなりシミュレーションから外れている。これは抵抗の寄生インダクタンス成分が影響しているためで、高い周波数では各素子のインダクタンスやキャパシタンスも考慮して設計する必要がある。

LPF に限らず、ハイパスフィルタ、バンドパスフィルタおよびバンドリジクションフィルタは高周波ノイズ等の除去に有効なものだが、カットオフ周波数付近の周波数を持つ信号は遅延が生じることに注意する。波形が単一の正弦波であれば単に遅延するだけで済み、フィルタ有り無しとの信号間で遅延があることを考慮しておけば良い。しかしながら三角波やインパルス的な信号は多くの高調波が重畳されたものなので、基本波の周波数がカットオフ周波数に近い場合は高調波成分で遅延が生じて波形が歪む可能性がある。デジタイザに記録されるまでに信号が辿る経路と特性をしっかりと把握しておきたい。

2.2.5 おわりに

ノイズ対策と一言で言ってもノイズの種類によっても対応は異なるし、実験室、実験装置、計測器や回路基板内というスケールによっても対策は千差万別である。また、プラズマ実験において完全にノイズを消すことは、よほど腰を据えて当たっても困難であることも理解頂けたと思う。複合的なノイズ、例えば複数の経路を通る電磁ノイズ等は除去が難しく、計測器の接地・非接地や計測器電源の絶縁・電池化等の様々な手法を試す他無いことが多い。本講座で紹介する手法以外にも研究者が独自に発見した手法や別の分野では常套手段として用いられている手法も多く存在している筈である。学会等で同分野・異分野の研究者と広く交流し、対策の手札を増やすことに努める必要がある。

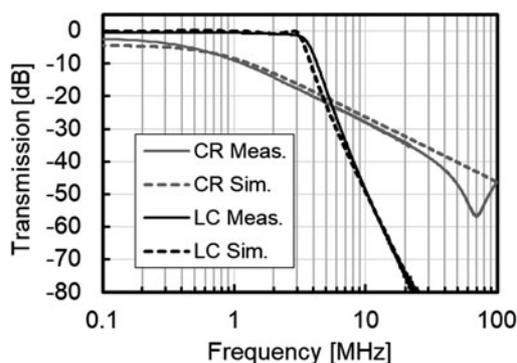


図10 ローパスフィルタ特性。

一方、本記事を含め今後の講座で多くのノイズ対策法が紹介されるが、たまにはこういった対策を取り外してデータを眺めることも大事だと思う。ノイズには対象とする現象以外の現象、すなわち電源ノイズ等の完全に不要なノイズもあれば、実際にプラズマの中で発生している現象による信号ではあるが、その実験では対象としないためノイズとして扱われるものもある。特に、未知の現象が原因であれば多くの場合ノイズにしか見えなまいだろう。ノイズの追求から生まれた発見の良い例として1964年に発見された宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic microwave background: CMB) が挙げられる [5]。CMB は極めて高い等方性で宇宙を満たすマイクロ波帯の放射であり、この発見によりビッグバン理論が広く認められ、発見者はノーベル物理学賞を受賞している。CMB は黎明期の電波望遠鏡による天体観測の際、天球のどこに望遠鏡を向けても同様のノイズが計測される問題に対し、アンテナ感度の向上や都市からの放射である可能性の除外などを通じて宇宙を満たす等方的な放射であることが確認されたものである。「ただのノイズなので無視すれば良い」「とりあえず LPF を付けておけば綺麗な信号が得られる」といった認識でも目的とする研究を進めることはできるだろうが、インパクトのある発見は思いもしないところ、つまり普段はノイズとして切っ捨てている信号から見出されることもある好例と言える。時にはオシロスコープに付けられた LPF と共に『心の LPF』を外す余裕を持ちたいものである。

最後に、ノイズ除去作業に限らず全てに関わる作業中の心得として名随筆「徒然草」の一説「名人の木登り」を紹介したい。木登りの名人が弟子の木登りを監督しているのだが、木の高いところでは特に注意せず、作業が終わりもう木から地上に降りようか、というところでやっと注意を促した、という話である。難しい作業を行っている最中は自ずと注意しているものだが、いざ作業が終わると気が抜けてしまい事故を起こす、という教訓である。実験作業でよくあるのが、しゃがんでの作業が終わり、さあよっこいしょと立ち上がった際に頭上の機器に頭をぶつけることや、狭い箇所にて体を突っ込んでの作業が終わり体を抜く際に肘やらヘルメットやらで配線を引っ掛けて機器を壊す、といった事例だろうか。作業中に体勢を変える時やファイルの保存を行う前には一呼吸置くことを心掛けよう。

参考文献

- [1] T. Asai and H. Gota, J. Plasma Fusion Res. **90**, 609 (2014).
- [2] 村田製作所: 「ノイズ対策 基礎講座」, <https://www.murata.com/ja-jp/products/emc/emifil/knowhow/basic#part1>
- [3] N. Ezumi, J. Plasma Fusion Res. **90**, 727 (2014).
- [4] 森 栄二: 「LC フィルタの設計 & 製作」(CQ 出版社, 2013).
- [5] A.A. Penzias and R.W. Wilson, Astrophys. J. **142**, 419 (1965).



とくざわ としひこ
徳 沢 季 彦

核融合科学研究所・准教授。LHDにてマイクロ波から遠赤外線までの電磁波を使ったプラズマ計測を担当。この著者紹介執筆時はラグビー日本代表のベスト8が決まったところです。この先、brave blossomsのサクラがどう咲いてくれるのかワクワクしてます。ところで、総研大大学院特別講座「小型プラズマ装置を用いたプラズマ計測演習」を今年で適宜開講しますので、興味のある学生さんはぜひ連絡を。



くわ はら だい すけ
桑 原 大 介

中部大学工学部講師。2012年東京工業大学総合理工学研究科博士(工学)。東京農工大学助教を経て2018年より現職。主に高周波プラズマ推進機とマイクロ波計測器開発に従事。最近のマイブームは実験環境整備。ヘッドマウントディスプレイとワイヤレスカメラを用いた装着型多点監視システムを開発し実験操作の大幅な省力化に成功したが、その姿は苦笑されるのみ。むしろ誇らしい。