



2. 電磁ノイズとその対策

2.1 電磁ノイズの基礎知識

2. Noise Reduction on Electromagnetic Noise

2.1 Basic of Electromagnetic Noise

徳沢 季彦

TOKUZAWA Tokihiko

自然科学研究機構・核融合科学研究所 総合研究大学院大学

(原稿受付：2019年7月26日)

実験室でプラズマを精度よく計測するためには、電磁ノイズへの対策が重要です。そのための基礎知識として、一般的なノイズの定義、ノイズ伝搬の考え方、サーマルノイズ・ショットノイズ等のノイズの種類、ノイズの計測器への侵入経路とシールドの方法、アース・グラウンドの重要性等について、概説します。

Keywords:

electromagnetic noise, error, signal, SNR, plasma diagnostics, noise figure, thermal noise, shot noise, quantization error, sampling, Nyquist frequency, shield, common mode, normal mode, ground loop

2.1.1 はじめに

多様な振舞いをするプラズマについて調べるために、我々は様々な計測器を作成し実験に適用します。目的の「信号」を得るために工夫を凝らした設計を行い、注意深く計測器を組立て、いざ実験に供する際には、新しい物理を知ることができるという期待に大いに高揚するのですが、得られた観測結果を見ると所望するような「信号」が観測できず、ノイズに埋もれてしまっているというようなことを誰しも経験します。その原因を調べて対策を施し、当初期待した「信号」が得られるように努力することこそが、研究の醍醐味であると言われることもあります。できればそのような苦労は避けたいと皆さんも考えると思います。前章でも記述されているようにプラズマ実験はノイズの宝庫です。中国語で等離子体と呼ばれる電離気体であるプラズマの実験では、特に電磁ノイズの対策が重要です。本章では一般的なノイズの定義とともに、特にこの電磁ノイズについてその特性について以下に記述します。

2.1.1.1 誤差とノイズ[1-4]

計測器によって得られる測定値は、一般に、偏り（真値からのズレ）の小ささを表す正確さ（trueness）とバラツキの小ささを表す精密さ（precision）、および両者を含めた総合的な精度（accuracy）などの用語を用いて表現されます（図1）。そして、精度の良い計測ができる計測器のことを確度の高い計測器というように呼びます。

形而上学的な表現になりますが、真の「信号」（真値）とは観測者が求めている対象であるため、現実的に計測器に

よって、その値の正しさ（確らしさ）を表現するには、それをどのような精度で観測できたかを明らかにする必要があります。これは、一般には、真値に対する誤差(error)として表現されます。すなわち、

$$\text{信号} = \text{真値 (true value)} + \text{誤差 (error)}$$

と表現されます。また、誤差については、

$$\begin{aligned} \text{誤差} = & \text{系統誤差 (systematic error : 偏りによる誤差)} \\ & + \text{偶然誤差 (accidental error : バラつきによる誤差)} \end{aligned}$$

というように表されます。ここで、系統誤差の原因は、計測理論から生じるもの、計測器の仕様によって決まるもの、計測環境によるもの、などがありますが、これらは、一般的にはいわゆる校正作業によって減少させることができ

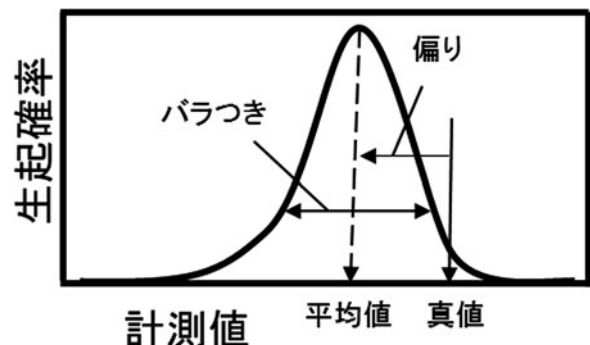


図1 計測値の分布（真値、平均値、偏り、バラツキの関係）。

ます。一方の偶然誤差は、確率的不規則現象によって生じるため、統計的な処理によってしか軽減する方法は無いと考えられています。そして、この偶然誤差の原因こそが、本講座で取り扱う、「雑音（ノイズ）」です。（なお、近年、観測者は真値を知ることができない（「神のみぞ知る」）ということから、「不確かさ」を指標として計測の信頼性を評価する方法が提案されてきています。興味のある読者は文献[2, 5]を参照してください。）

所望する「信号」成分以外は、全て「雑音（ノイズ）」であるという考えに基づいて、信号対雑音比（signal to noise ratio; SNR・S/N比）というような表現で、信号と対になる概念として雑音を表現することも実用上多いです。ここで、重要なことは、観測者は、「信号」とはどのようなものかを知っている（想定している）ということです。その周波数はどの位であり、振幅はどれ位かというような想定がまず存在し、これに対して、それ以外の成分を「ノイズ」と表現することになります。すなわち、同じ計測器の出力であっても、観測者によっては、信号であったりノイズであったりすることが有ります。例えば、プラズマの線平均密度計測によく用いられる干渉計の出力信号には、プラズマ中のMHD揺動などの成分が含まれています（図2）が、プラズマの密度制御を行いたいような場合には、このような速い揺動成分はノイズであるとして、処理（平均化処理やフィルタによる抑制）を施すことがあります。

2.1.1.2 誤差の伝搬[1-3]

計測によって得られた測定値を基に、解析を進める時に、忘れてはいけないことに誤差の伝搬があります。計測値には必ず誤差が含まれていますが、複数の処理を行う時に各段階での誤差が蓄積されて行くことを考慮する必要があります。例えば、ある信号の電圧が、平均 111.11 V、標準

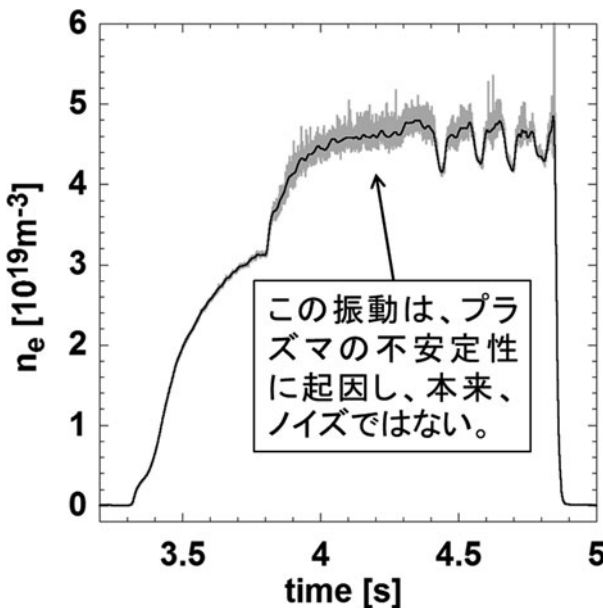


図2 LHD プラズマの電子密度の時間変化を計測した例（灰線）。3.8秒以降に信号がバーストしているのは、ノイズが増大したせいではなく、プラズマの振動（MHD揺動）のためであるが、密度制御に用いる際には、この速い変動成分は「ノイズ」として処理する（黒線）。

偏差 0.02 V で、電流が平均 1.25 A、標準偏差 0.03 A と測定できた場合に、電力値は平均値を単純に掛けて 138.8875 W であるとするのは良くありません。一般に、計測値 a, b から c という値を求める際には、それぞれの誤差 $\Delta a, \Delta b, \Delta c$ の関係は、 $c = a + b$ と加法的な場合には $|\Delta c| = |\Delta a| + |\Delta b|$ 、 $c = ab$ と乗法的な場合には $|\Delta c/c| = |\Delta a/a| + |\Delta b/b|$ となりますので、上記の例では、 $\Delta c = (0.02/111.11 + 0.03/1.25) \times c = 0.24 \times 10^{-1} \times c = 3.36 [W]$ とし、電力は $139 \pm 3 W$ と見積られます。

誤差を考慮する上で重要なことは、四捨五入あるいは四捨六入などを用いた有効数字です。統計的には、標準偏差程度を有効数字の最小桁とし、グラフではエラーバーとして表示することが一般的です。

2.1.1.3 ノイズの伝搬[1, 6-8]

プラズマ実験に限らず計測器の信号処理においては、アンプを用いて微小信号を増幅することが多々あります。アンプには、用途と目的に応じてプリアンプ、パワーアンプ、絶縁アンプ、ログアンプ、など様々な種類や呼び方がありますが、その特性を示す項目の中で重要なものとして、増幅率 (gain; $G = S_o/S_i$) と雑音指数 (Noise Figure; $NF = N_o/GN_i$) があります。ここで、 $S_i(S_o)$ は入力 (出力) 信号の振幅、 $N_i(N_o)$ は入力 (出力) 信号の雑音です。 NF は増幅器の入出力端での S/N 比の劣化を表す指標で、 $NF (dB) = 20 \log[(S_i/N_i)/(S_o/N_o)]$ となります。微小な信号を図3のように多段 (n 段) のアンプで増幅した場合、最終的な雑音指数は、

$$NF = NF_1 + \frac{(NF_2 - 1)}{G_1} + \frac{(NF_3 - 1)}{G_1 G_2} + \dots + \frac{(NF_n - 1)}{G_1 G_2 \dots G_n} \quad (1)$$

となり、各段の NF とゲイン G との関数で表現されますが、初段のアンプ (プリアンプ) の G_1 が十分に大きければ、 $NF \cong NF_1$ となり、初段のアンプの NF_1 が最も重要であることがわかります。そのため、計測器ではこのアンプには、低雑音高利得のもの (ローノイズアンプ) を用意することが求められます。

2.1.2 ノイズの種類

計測器を作る際には様々な部品を組合せますが、その際どのような部品を選び、どのように用いるかによってノイズの大きさは変わります。全ての部品はノイズを発生させますが、場合によっては、不要なノイズを計測器の中に抱え込むことがあり得ますので、自分が用いる部品の特性をよく知っておくことが重要です。部品から出るノイズ (内部雑音) の他、外部からくるノイズ (外部雑音)、デジタル機器特有のノイズなど、代表的なものを以下に記します

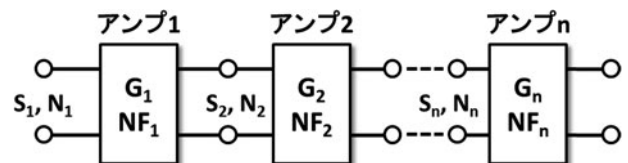


図3 多段増幅器における総合雑音指数。

[1-4, 6, 9-11].

2.1.2.1 サーマルノイズ (Thermal noise : 熱雑音)

抵抗の中を電子が動く (電流が流れる) 際に、部品の温度によって電子の流れが乱されて発生するノイズです。いわゆる自由電子の熱運動 (ブラウン運動) に由来します。抵抗を含む回路では、その回路のノイズレベルはサーマルノイズ以下にはなりません。すなわちこのサーマルノイズがその回路の最低の雑音レベルとなり、回路の特性を表現することに使われることがあります。発見者の名をとって、ジョンソンノイズ (Johnson noise) とも呼ばれます。

抵抗から発生する実効雑音電圧は、 $v_n = \sqrt{4kTRB}$ となります (k : ボルツマン定数 (1.38×10^{-23} J/K), T : 絶対温度 (K), B : 測定帯域幅 (Hz), R : 抵抗値 (Ω)). このサーマルノイズの周波数スペクトルは均一の強度 (白色雑音) で、同じ帯域幅であればどの周波数であっても同じ値となります。室温 (300 K), 帯域幅 1 Hz の場合は、上式は $v_n = 1.3 \times 10^{-10} \sqrt{R}$ となり、抵抗 $R = 1 \text{ k}\Omega$ で発生する熱雑音電圧は $4 \times 10^{-9} \text{ V}$ となります。抵抗値とサーマルノイズ (熱雑音) との関係を図 4 に示します。製作した回路のノイズレベルが図 4 の値よりも非常に大きいようでしたら、何か想定外のノイズ源を含んでいる可能性があります。

サーマルノイズを減らすためには、次の 3 つのことが考えられます。

- (1) 環境温度を下げる。(計測器を冷やす)
- (2) 雑音抵抗を小さくする。
- (3) 帯域幅を狭くする。

実際に、帯域幅を狭めた場合にノイズがどのように変化するかを図 5 に示します。信号を計測する際には、計測器が持つ有限の周波数帯域幅で観測することになります。例えば 1 MHz の信号を見るという時に、 $1 \text{ MHz} \pm 100 \text{ kHz}$ で見るのか、 $\pm 1 \text{ kHz}$ で見るのか、計測器を設定する必要があります。図 5 は、発振器の周波数をスペクトルアナライザで観測したのですが、スペクトルアナライザの帯域幅を狭めることにより、スペクトルの幅は細くなり、ノイズフロア (最低となる雑音のレベル) を下げることが分かります。

2.1.2.2 ショットノイズ (Shot noise)

電子や光子などの量子がもつ粒子的な性質に由来するノイズです。電子回路における PN 接合部をもつ半導体の出

力や光検出でのフォトダイオードによる光電変換などで、観測する量子の数が少ない時、平均的電流値に対して個々の粒子の数が相対的に顕著になることで、問題になります。半導体回路の出力を見ていると、一定の電圧閾値を超えて電流が流れだすような場合、電流の流れ方がランダムに (ポロポロとこぼれるように) になります。これは、半導体中のキャリア (電子またはホール) のランダムな拡散によって生じる現象で、ショット効果と呼ばれ、防ぐことができません。

このショットノイズによる雑音電流の実効値は、 $I_s \approx \sqrt{2qI_{dc}B}$ と表されます (q : 電子電荷, I_{dc} : 回路に流れる平均電流, B : 測定帯域幅). この式からもわかるように、ショットノイズも、サーマルノイズと同じく帯域幅が同じであれば同じノイズ強度となる、周波数依存性の無い、いわゆる白色雑音です (図 6). ただし、ノイズの分布 (単位時間当たりの電子数の分布) は、サーマルノイズが正規分布に従うのに対し、ショットノイズは Poisson 分布になり、かつ正の値かつ整数値しか持たないという違いがあります。

2.1.2.3 接触ノイズ (Contact noise)

材料の不完全な接触によって電気抵抗が変化することに

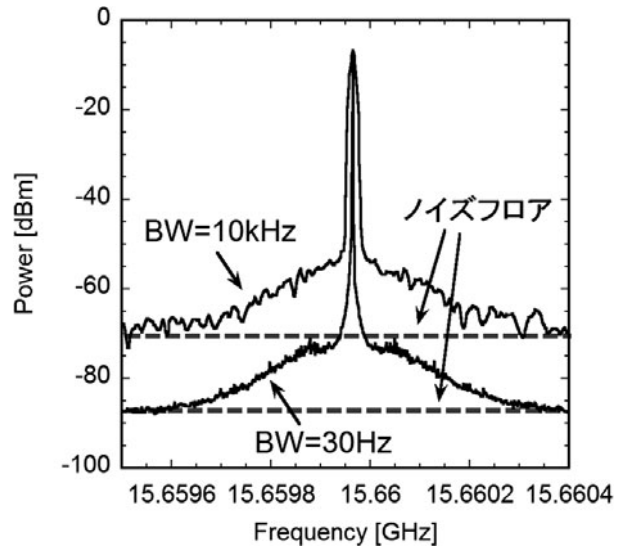


図 5 スペクトルアナライザで観測した、マイクロ発振器の周波数スペクトル。帯域の違いにより、ノイズフロアが約 20 dB (100倍) 異なる。

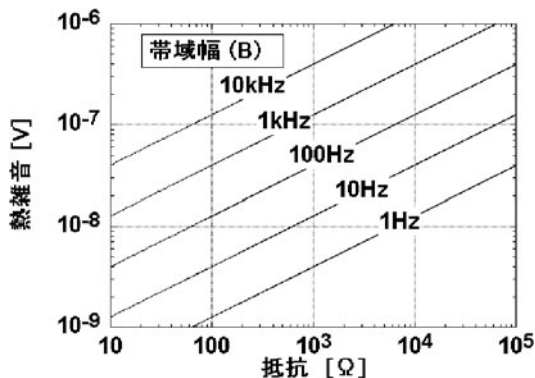


図 4 帯域幅と熱雑音と抵抗値の関係。

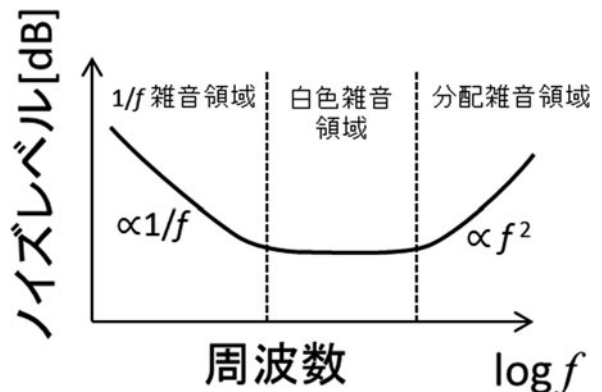


図 6 内部雑音の周波数特性。

よって生じるノイズです。炭素と樹脂とを混合して焼き固めたソリッド抵抗や可変抵抗の接触点と抵抗体との間、あるいは、真空管やダイオードに至るまで様々な素子の内部で発生します。このノイズが真空管電流で発見されたことからフリッカーノイズ (flicker noise : チャラツキ雑音) と呼ばれます。また、このノイズの電力密度分布が $1/f$ の形をしているため $1/f$ 雑音あるいは白色雑音 (ホワイトノイズ) と対比してピンクノイズとも呼ばれます。

接触ノイズの大きさはこの回路に流れる電流値 I_{dc} に比例します。すなわち、試料で決まる比例係数 k を用いて、 $I_f \approx kI_{dc}\sqrt{B/f}$ となります。接触ノイズの大きさが $1/f$ 特性であるということは、対象とする周波数が直流に近づけば近づくほど、無限に大きくなるため、直流増幅器では注意が必要です。

2.1.2.4 分配雑音

トランジスタ等の半導体素子のエミッターとベースに電流が分配する時の揺らぎに起因するノイズです。図6のように、周波数の2乗に比例して大きくなり、高周波数帯ではサーマルノイズよりも大きくなるため、このような素子を用いる場合は周波数帯の検討が重要となります。

2.1.2.5 外部雑音

上述したノイズは機器の内部で発生するノイズ (内部雑音) ですが、外部から混入してくるノイズもあります。例えば、雷などの自然現象が原因となるノイズ (自然雑音) とか、100 V 電源 (ハム) から混入してくるような電源ノイズやリレーやスイッチの動作に起因する電圧サージなど (人工雑音)、様々なものがあり、個々の対策が必要になります。電源ノイズには、電源ラインと機器との間にフィルタやノイズカットトランスなどを挿入する手法が良くとられます (対策の詳細は次章を参照)。

2.1.2.6 デジタル化による雑音 (量子化雑音, 標本化)

計測信号そのものに含まれるノイズでは無いのですが、計測器の出力電圧値をデータとして収録する際など、デジタル信号処理に伴って生じるノイズがあります。デジタル機器が取り扱えるダイナミックレンジとビット数によって、取り扱える信号電圧値に限界が現れます。例えば、12ビットのデータ収録装置で 10 V の信号を処理する場合、 $10/4096 \approx 2.44$ mV が、取り扱える限界電圧値 (分解能) となり、微小信号を取り扱う場合には、この1ビット毎に離散化した信号しか処理できません。これに起因する離散化信号の影響を、量子化雑音と呼びます (一部では、ビットノイズとも呼ばれます)。

また、データをデジタル収録する際には、ある一定の時間間隔でデータを保存することになりますが、この時間間隔 T_s を標本化間隔 (あるいはサンプリング間隔) と呼び、これの逆数 $f_s = 1/T_s$ を標本化周波数 (サンプリング周波数) と呼びます。このサンプリング周波数は、計測対象とする信号の持つ周波数 (上限: f_{max}) よりも十分に高くする ($f_s > 2f_{max}$) 必要があります (図7)。特に、 $f_s/2$ をナイキスト (Nyquist) 周波数と呼び、これよりも高い周波数の信号をフィルタなどで処理せずにそのままデータ収録すると、エイリアシング (Aliasing) と呼ぶ偽の信号が出現します

ので、注意が必要です。

2.1.3 ノイズの経路

様々な箇所が発生したノイズは、色々な経路をたどって計測器の中に入り込んできます (図8)。ノイズ対策は、その侵入経路を見つけてこれを断つことが重要です [6]。

2.1.3.1 伝導ノイズ

計測器は信号線 (電線・ケーブル・光ファイバケーブル) や筐体を通じてプラズマ実験装置や他の機器とつながっています。この接続経路を通じて信号だけでなく、ノイズも伝わっていきます。ノイズの原因の一つとして、電源から発生するノイズがあります。近年は小型・簡便なスイッチング電源が良く使われることがありますが、スイッチングの動作からスパイク状のノイズが発生します。また、商用の 100 V 電源 (50あるいは60 Hz) に雷によるサージや他機器 (例えば大電力を使う NBI 等の加熱機器) によるノイズが混入し、計測器に入ってくることもあります。

2.1.3.2 誘導ノイズ

近接する信号線間に流れる電流の影響で誘導ノイズが発生することが知られています。また、プラズマ実験では、閉じ込めや制御に磁場を用いることがよくありますが、計測器はこの環境磁場中に存在しますので、この磁場の変動

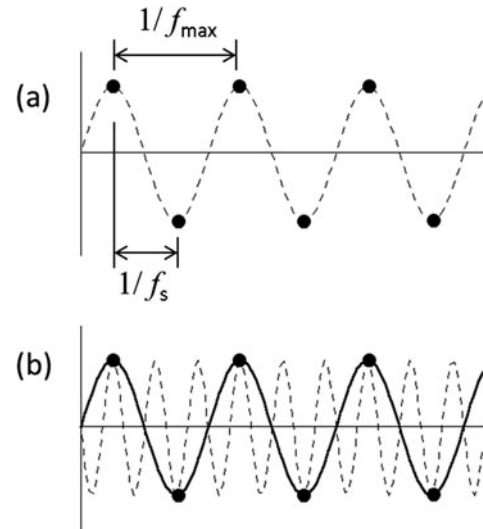


図7 (a) 信号の山と谷を再現するための最低標本化周波数 (b) 同じ標本化周波数で3倍高い周波数の信号 (点線) を測定した場合エイリアシング (実線) が発生する。

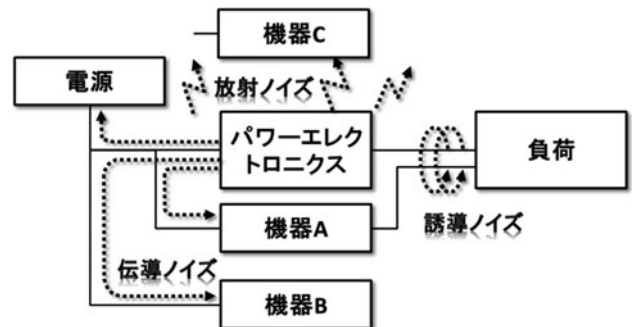


図8 ノイズの伝搬経路。

により、計測器の信号線を通る電流は影響を受けることとなります。また、プラズマ実験では電磁波を用いてプラズマの生成や加熱を行います。その一部の電磁波はプラズマに吸収されず空間に放出されます。これらの電磁波による電磁界変化によっても誘導ノイズが発生し、これが信号線中を伝搬していくこととなります（直接機器に侵入することも有ります。その場合は次節の放射ノイズに分類されます）。環境を飛び交う携帯電話の電波や無線LANの通信用電波もノイズ源となり得ますので実験室内での設置には注意が必要です。

2.1.3.3 放射ノイズ

プラズマからは様々な波長の電磁波（ラジオ波-ミリ波-赤外線-可視光-X線-γ線）が放出されますし、中性子などの粒子も出てきます。これらによって直接、計測器が影響を受けることがあります。例えば、電子サイクロトロン放射（ECE）の光は、（それ自体も電子温度計測では測定対象信号ともなりますが）協同トムソン散乱計測においては、真の信号を隠すノイズ源（迷光成分）となりえます。

また、核融合プラズマ特有の例としては、計測器を構成する半導体部品にγ線や中性子が衝突することにより、ノイズが発生することも知られています[12,13]。信号ケーブルに生じる照射誘起伝導（RIC）・照射誘起起電力（RIEMP）の影響や、窓材・光ファイバ等の透過型光学材料に生じる照射誘起発光・照射誘起透過損失、また、放射線を受けることでチェレンコフ光が発生することも起こり得ますし、機器の放射化が進むと、バックグラウンドノイズが増大することも予測されています。

一般に、空中を飛来してくる放射ノイズには、シールドを用いて計測機器を保護する対策が有効です。その際、静電的なノイズには金属（銅、アルミ、真鍮）などの導電性材料で機器を覆うことで、シールド表面に電荷を発生させ、ノイズを遮ることができます（静電シールド）。シールド効果は材料のインピーダンスと自由空間のそれとの比で決まり、銅の場合、電界強度を1MHzで 10^{-6} 程度にできます。一方、磁場に対しては、フェライトなどの強磁性体や超伝導体のマイスナー効果を用いたシールドが有効です（磁気シールド）。中性子対策としては、水素を大量に含むポリエチレンやパラフィンにより高速中性子を、ボロンにより熱中性子を吸収させることができます。X線やγ線には、鉛やタンゲステンをシールドに利用します。

2.1.4 アースとグラウンド

実験室で計測を行う上で、計測器のアース・グラウンドをどこに取るかということには、注意を払う必要があります。しばしば混用されていますが、アースとは文字通り大地（地球）に接続することで、グラウンドとは電位の基準点のことを意味します。ご家庭の電気設備の場合は、電柱からの引き込み線（ブレーカのところにあるアース線）が共通のアースとなり、部屋毎に別々のアースになっているということは無いと思いますが、実験室では機器ごとにアースやグラウンドが異なっている場合があります。例えば、真空容器と、高電圧を印加する加熱機器とは電氣的に

絶縁しておく方が好ましいので、一般にアースも別々の位置で取られていますし、計測器も独自のグラウンドを持っていることがあります。また、計測器はそのシステムの中で、オフセット電圧を与えたり、電位的に浮遊（フローティング）させたりするため、あえて異なるグラウンドを持たせることもあります。このように様々なグラウンドが混在していると、グラウンドループが発生したりして、意図しないノイズが混入し計測信号が汚染されることがありますので、注意が必要です[1,6,9-11]。

2.1.4.1 コモンモードとノーマルモード

アースやグラウンドの取り方によって、ノイズの伝搬状況が異なり、計測信号に影響が現れます。図9(a)のような回路を考えた場合、信号源で発生したノイズは信号線を伝わって出力信号として図9(b)のようになります。一方、図10(a)のような回路の場合には、基準となるグラウンド電位自体が変動するために、出力信号は図10(b)のように、ベースラインが変動した信号となります。この図9のような状態をノーマルモード、図10のような状態をコモンモードと呼びます。ノーマルモードの場合は、伝送路に適切なフィルタを設定するなどで、比較的容易にノイズの影響を低減できることがありますが、コモンモードの場合は、機器の外側にノイズ源が存在するため、対策はやや難しくなります。

2.1.4.2 グラウンドループ

比較的大きな実験室でのプラズマ実験では、計測器本体と周辺機器やデータ収録装置が離れているような状況がよくおこります。両者間のグラウンドが異なる状態になったり、あるいは機器とグラウンド間に寄生浮遊容量が発生したりして、コモンモードの状態に陥りやすくなります。このような場合に、しばしばグラウンドループが生じますの

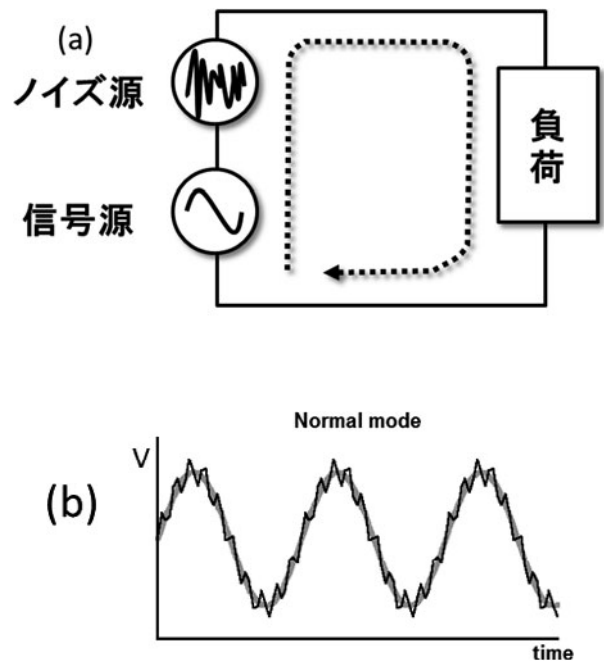


図9 ノーマルモードノイズの(a)模式図と(b)ノイズを含んだ信号（黒）および元信号（灰）。

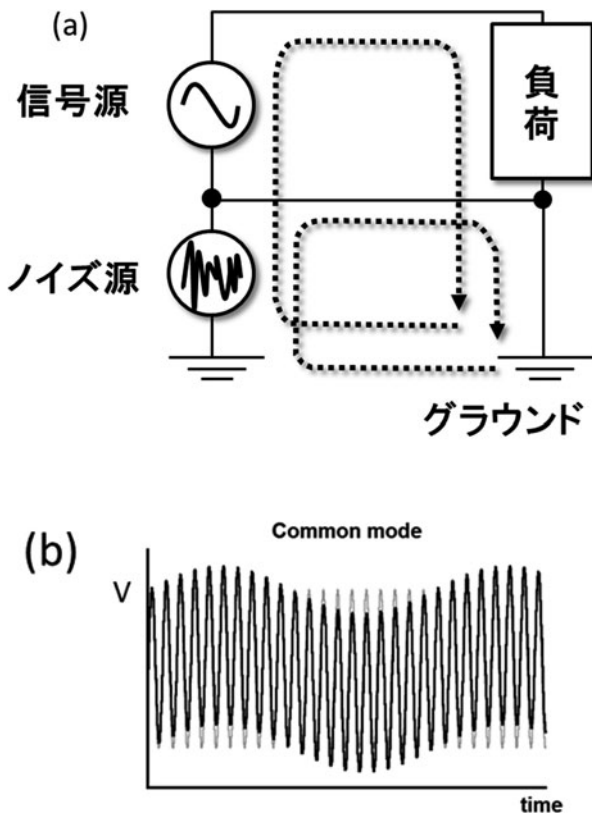


図10 コモンモードノイズの(a)模式図と(b)ノイズを含んだ信号(黒)および元信号(灰).

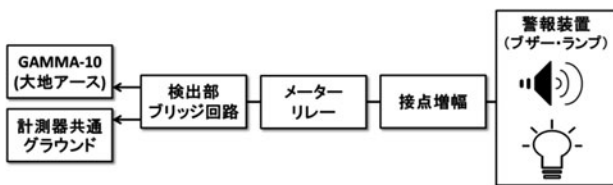
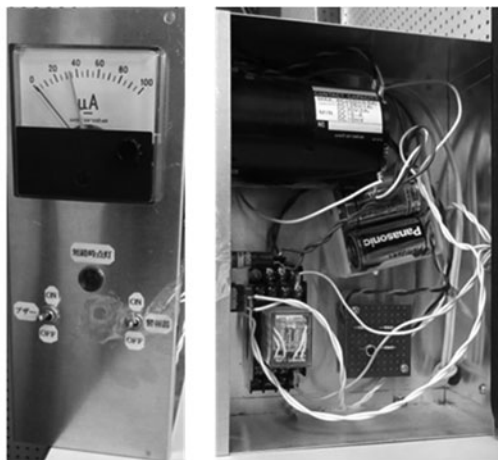


図11 接地線短絡警報器の例。筑波大学 GAMMA-10 装置で活用されている。

で、特に注意を払う必要があります。

このグラウンドループが発生しないようにするためには、その実験室内にある全ての機器が完全に独立した電気基準系統を持てば良いのですが、実際には難しいため、各機器の担当者がアースについて注意を払う必要があります。共通のアースでつながっている機器の内、どれかが異なるアースにつながってしまうと、グラウンドループが全ての機器に現れてしまいます。そこで、ある機器が異なるアースにつながった際には、警報を鳴らすなどして、作業者に注意を払ってもらえると実験を円滑に進める上で有益です。そのための接地線短絡警報器[14]の例を図11に示します。ブリッジ回路により電位差を検出しリレーを用いた簡便なシステムですが、常時監視が可能であるため、作業中に間違えて機器がアースに触れてもすぐに対策を取ることができ大変実用的な装置です。

謝 辞

本企画を考案いただき執筆の機会を与えてくださった、編集委員の皆様、特に辻村亨氏、浅井朋彦氏の両氏に感謝いたします。また、アース短絡検出装置の詳細についてご教示頂いた筑波大学プラズマ研究センターの杉山昭彦氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] 金澤誠司 他：電気電子計測（理工図書，2019）。
- [2] 南 茂夫 他：はじめての計測工学（講談社，2012）。
- [3] 廣瀬 明：電気電子計測（数理工学社，2003）。
- [4] 南 茂夫 他：科学計測のためのデータ処理入門（CQ出版社，2002）。
- [5] 今井秀孝：測定不確かさ評価の最前線（日本規格協会，2013）。
- [6] 岡野大祐，山下繁彦：現場でわかる ノイズ対策の本（オーム社，2010）。
- [7] 伊藤信一：レーダーシステムの基礎理論（コロナ社，2015）。
- [8] 宮内一洋，山本平一：通信用マイクロ波回路（電子情報通信学会，1981）。
- [9] 遠坂俊昭：計測のためのアナログ回路設計（CQ出版社，1997）。
- [10] 岡村勉夫：解析ノイズ・メカニズム（CQ出版社，1987）。
- [11] 松塚晃祐：電磁ノイズ発生メカニズム&電磁ノイズを克服する法（丸善出版，2011）。
- [12] 飯田敏行：核融合診断用センサ・素子の14 MeV中性子照射効果」放射線 17, 57 (1991)。
- [13] Y. Tanimura and T. Iida. J. Nucl. Mater. 258-263, 1812 (1998)。
- [14] 杉山昭彦：ガンマ10計測系設置線の異常短絡検出，筑波大学技術報告 No.12 (1992) P101。