

講座

プラズマ実験におけるノイズ対策の基礎

Introduction to Noise Reduction in Plasma Experiment

1. はじめに

1. Introduction

井 通暁

INOMOTO Michiaki

東京大学大学院新領域創成科学研究科

(原稿受付：2019年8月4日)

他分野の実験研究者に「私の専門はプラズマ実験です」と紹介すると、「ああ、ノイズとの戦いですね」と言われることがあります。ノイズはあらゆる場面で発生しますので、どのような実験でもノイズ対策が必須であることは言うまでもありませんが、特にプラズマ実験が難しいのは、

- ・物理量に応じて多様な原理の測定器を利用し、それぞれに異なった種類のノイズが含まれる。

- ・その測定器をプラズマパラメータやプラズマ実験装置の構造や設定に合わせて構築・調整しないとイケない。

という条件に加えて、何より測定対象そのものが強烈なノイズ源となるからです。一般的なノイズ源として考えられる自然由来（宇宙線など）や周辺環境由来（通信機器の電磁波やスイッチングノイズ、交流電源周波数のノイズ（ハムノイズ））に加えて、プラズマ実験用の電源装置からは大きな電磁ノイズ、接地電位の急激な変動などが発生しますし、プラズマ自身から放射される電磁波や放射線なども他の物理量の測定にとってはノイズとなります。さらに実験装置そのものが高い独自性（同じ装置は他にはない）を有しているので、教科書的な定石に加えてそれぞれの実験現場に応じたノイズ対策が必要となります。一言でいうと「プラズマ実験装置も測定器も“ワンオフ”品なので、状況に応じてノイズ対策を施さないとイケない」となり、「ある実験装置で稼働していた測定器を他の装置に持ってゆくとノイズがひどくて測定できない」、あるいは「先週末までは測定できていたのに今週はノイズがひどい」ということも起こりえます。

もちろんノイズ対策には一般的な手段[1-5など]が存在しますし、それらを参考に電子回路などを作製することは

有効ですが、プラズマ実験ならではの対策も存在します。そのため、測定器を開発・製作・調整・運用する際には、ノイズ源、ノイズの混入経路、ノイズ対策に関する知識をストックして、現場で判断する必要があります。あまりスマートじゃないと思われるかもしれませんが、実はこういう経験こそが実験研究に必要なセンスを磨くことにつながります。例えば「測定されたこの波形は正しい信号なのかノイズなのか」を判断するためにもノイズに関する知識が不可欠ですし、ノイズ対策手段を安易に施すと肝心の信号を変化させてしまうこともありえます。そこで本講座では、主に初めてプラズマ実験に携わることになった学生を対象に、精度の良い測定を行うために重要となるノイズ対策について紹介します。

プラズマに限らずあらゆる実験（あるいは計算）では、測定器の出力に「ノイズ」すなわち望ましくない成分が存在し、測定量を正確な値から変化させてしまいます。測定器が出力するアナログ信号をADC（アナログデジタルコンバータ）を用いてデジタル化して保存し、そのデジタル信号を処理して目的の物理量を得るという一般的なケースを考えると、ノイズの混入経路としては、

- (1) 測定器が原理的にノイズを含んでいる（例：ショットノイズ、光学計測における背景光など）
- (2) 測定器が目的の測定量以外の物理量に感度を有している（例：受光素子に対する放射線など）
- (3) 測定器／測定システムが実験室環境に起因するノイズ（誤差）を含んでいる（例：温度変化によるレーザ波長のドリフトなど）
- (4) 測定器／測定システムがノイズを発生する（例：増幅

器の熱雑音, 受光素子の暗電流など)

(5) 測定器の出力から ADC までの配線や各種アナログ機器 (増幅器など) でノイズが混入する (例: 電磁ノイズ, 電源ノイズなど)

(6) ADC でのデジタル化の際に発生する情報量の低下 (例: ADC の量子化雑音など)

などが考えられ, さらにこれらのノイズを含む測定量を用いて物理量を推定する際に現れる誤差 (分散およびバイアス) を考慮する必要があります ([6]など).

測定の正確さを判断する指標の一つに S/N 比 (信号雑音比, Signal to Noise Ratio) があります. ノイズはできるだけ小さくしたいので, S/N 比の大きな測定器を構築することがまずは目標となります. さきほどの(4)(5)(6)の例では, 熱雑音や暗電流の少ない素子を選ぶ, 電磁ノイズが混入しにくくなるように測定回路を構成する, 測定器や配線に電磁シールドを施す, 高分解能の ADC を用いる, などが対策となりえます. これらの対策では不十分な場合や, (1)(2)などの場合には, ノイズとシグナルの性質の違いを利用してノイズだけを取り除く操作を行うこともあります. 例えばノイズとシグナルの周波数が大きく異なっている場合にはフィルタ (アナログ/デジタル) を, ノイズの平均値がゼロになる場合には多数の測定結果を統計的に扱う手法などを適切に用いることでノイズのみを取り除くことができるかもしれません (ただし, 正しい信号にも影響を与えうることに留意する必要があります). また(3)によるノイズを低減するためには, 測定システムを適切に設計する必要があります.

この講座では, このような実験や装置固有のノイズ対策の感覚をお伝えするため, ほぼ全ての実験で考慮を要する電磁ノイズについて第2章で解説した後, 実験の目的別にノイズの種類や対策を解説します. プラズマを対象として行われる実験の目的は,

- (A) プラズマ中に発生する現象を解明する.
 - (B) 何らかの目的のために利用するプラズマ源を開発する.
 - (C) プラズマ制御手段や測定手段を開発する.
- または多くの場合それらの組み合わせに分類できます. 研

究目的に応じてプラズマの各種物理量 (密度, 温度, 磁場, 電場, 流速, 電流密度, 速度分布関数など), あるいはプラズマの物理量を間接的に評価できる指標 (線スペクトル強度, 放射電磁波強度など), プラズマ応用の性能を評価できる指標 (中性子発生量, 高速中性子発生分布, X線強度, ラジカル密度など) を測定し, 必要に応じてその測定量を用いて目的の統計量を推定することになります. いくつかの測定については第2章以降で事例を挙げて説明されますが, 測定原理や測定器に応じてノイズの現れ方が異なり, それに対する対策もまた異なってきます.

学生のみなさんが既存のプラズマ実験に参加すると, すでにいくつかの測定器が稼働しており, その測定結果を目にするとおもいますが, 多くの場合には測定結果が表示されるまでにさまざまなノイズ対策が施されています. このような (ノイズ対策された) 既存の測定器を用いる場合には, ノイズのことを知らなくてもよいと思われるかもしれませんが, そんなことはありません. 実験結果のプロットにエラーバーを表示したり, 結果の解析・評価の妥当性を判断したりするためにも, 測定器に施されたノイズ対策を理解し, ノイズの影響を評価することが必要となります. さらに既存の測定器を改良する, あるいは新しい測定器を開発する場合には, 自らノイズを評価し, ノイズ源を同定し, 適切な対策を施す必要があります.

表1に本講座で扱う測定量・測定器とノイズ対策をまとめて示してあります. ノイズの種類は同じであっても, 実験装置に応じてノイズ発生場所やノイズの大きさが異なり, 実験装置の構成 (例えば, 電力ケーブルの配置や接地の取り方など) に応じて混入経路も変化します. 結局のところ, 実験現場でノイズ源と混入経路を同定し, 対策を検討することになってしまうのですが, どのような測定器を用いたときにどのようなノイズが影響を与える可能性があるか, どのような対策手法が有効かを知っておくことは, 優れた測定器を整備運用するために大切な情報となります. 本講座がみなさんの測定器の S/N 比を少しでも向上させ, より精度の高い測定結果が得られること, さらにそのようなノイズ対策の経験がみなさんの研究者・エンジニ

表1: 本講座で扱う測定手法とノイズ.

	測定量	測定器	ノイズの種類	混入経路	主な対策
第2章	各種検出器の出力 (電圧, 電流)	オシロスコープ ADC	電磁ノイズ 電源ノイズ	空間 検出器からの配線 電源線	電磁シールド 絶縁トランス 各種フィルタ回路
第3章	中性子発生量 高速中性子発生分布	気体放射線検出器 シンチレーション検出器	電磁ノイズ 低速中性子 γ 線	検出器 検出器からの配線 電源線	電磁シールド ノイズ遮断トランス 波高弁別 波形弁別
第4章	光強度	フォトダイオード 光電子増倍管	電磁ノイズ 電源ノイズ メカニカルノイズ 光の干渉 プラズマの発光	検出器 検出器からの配線 電源線	ロックイン検出 光学フィルタ 接地の管理
第5章	二次元画像 (主に可視光)	(高速) カメラ	放射線 ショットノイズ	受光素子の各画素	シールド等 ソフトウェア処理
第6章	測定量そのもの		分散 (偶然誤差) バイアス (系統誤差)	物理確率過程 推定量の定義 間接測定	オフセット除去 データ数の増加と統計処理

アとしてのスキルを向上させることを期待しています。

参考文献

- [1] 伊藤健一：アースと雑音（日刊工業新聞社，1974）。
- [2] 岡村勉夫：解析ノイズ・メカニズム（CQ出版社，1987）。
- [3] トランジスタ技術SPECIAL編集部編：トランジスタ技

術 SPECIAL No.64 実験で学ぶノイズ対策技術のすべて（CQ出版社，1998）。

- [4] トランジスタ技術SPECIAL編集部編：トランジスタ技術 SPECIAL 82，実践的ノイズ対策技術のすべて（CQ出版社，2003）。
- [5] 北野 進：計測トラブル110番（オーム社，2003）。
- [6] 吉沢康和：新しい誤差論（共立出版株式会社，1989）。



いのもと みち あき
井 通 暁

東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授，博士（工学）。球状トカマクなどのトーラスプラズマ実験に携わっていますが，今年は実験装置の機嫌がよくないのか故障がととも多いです。システムがうまく動かなくなった時にはその原因を探しますが，故障についてはまずは「あらゆる不具合の原因候補のAND」を探します。ノイズでも同じようなことをするのですが，「あらゆるノイズ混入候補のOR」を対策しないといけない場合も多いです。