

# 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・調整しないといけない.

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いけない」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となる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

Graduate School of Frontier Sciences, The Univ. Tokyo, Kashiwa, CHIBA 277-8561, Japan

author's e-mail: inomoto@k.u-tokyo.ac.jp

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章以降で実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 にすると思いますが,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,さらにはそ 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

	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

表1:本講座で扱う測定手法とノイズ.

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] 岡村廸夫: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

OR」を対策しないといけない場合も多いです.

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).

# ■ 講座 プラズマ実験におけるノイズ対策の基礎

# 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

德沢季彦

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が、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)とバラつ き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 National Institute for Fusion Science, Toki, GIFU 509-5292, Japan 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,

信号=真值 (true value)+誤差 (error)

と表現されます.また,誤差については,

誤差=系統誤差 (systematic error : 偏りによる誤差) + 偶然誤差 (accidental error : バラつきによる誤差)

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



author's e-mail: tokuzawa@nifs.ac.jp

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えます. 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  $|\Delta c| = |\Delta a/a| + |\Delta b/b|$  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 ± 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 ンプを用いて微少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)=20log[( $S_i/N_i$ )/( $S_o/N_o$ )]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、

$$NF = NF_1 + \frac{(NF_2 - 1)}{G_1} + \frac{(NF_3 - 1)}{G_1G_2} + \dots + \frac{(NF_n - 1)}{G_1G_2\dots G_n} (1)$$

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*<sub>1</sub> が十分に大きければ, *NF*  $\cong$  *NF*<sub>1</sub> となり,初段のアンプの*NF*<sub>1</sub> 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





[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えません.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( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K), T:絶対温 度(K), B:測定帯域幅(Hz), R:抵抗値( $\Omega$ )).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1Hzの場合は、上式は  $v_n = 1.3 \times 10^{-10}\sqrt{R}$ となり,抵抗R = 1 k $\Omega$ で発生する熱雑音 電圧は $4 \times 10^{-9}$  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 るのかを図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 MHz±100 kHz で見るのか、±1 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 イザで観測したものですが、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)を下げることができ 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



図4 帯域幅と熱雑音と抵抗値の関係.

カ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)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、マイクロ波発振器の周 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子と抵抗体との間,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 Idc 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,  $I_f \approx k I_{dc} \sqrt{B/f}$ 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―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10Vの信号を処理する場合, 10/4096≈2.44 mV が、取り扱える限界電圧値(分解能)と なり、微少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<sub>s</sub>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: fmax)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

様々な箇所で発生したノイズは、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・光ファイバーケーブ 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



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



ノイズの伝搬経路. 図 8

により,計測器の信号線を流れる電流は影響を受けること になります.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が,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になります(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 (RIEMF)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<sup>-6</sup>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用です (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、鉛やタング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気的に 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、どれか一つ 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,特に辻村亭氏,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] 岡村廸夫: 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.

# ■ 講座 プラズマ実験におけるノイズ対策の基礎

# 2. 電磁ノイズとその対策

## 2.2 電磁ノイズ対策の勘ドコロ

### 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.本稿では電気的ノイズについて「場当たり的」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 も含んだ苦労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.特に苦労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500A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(単相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

Chubu University, Kasugai, AICHI 487-8501, Japan

author's e-mail: dkuwahara@isc.chubu.ac.jp



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るべきである.

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ブタイヤケーブル が用いられるが、キャブ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<sup>®</sup>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ブタイヤケーブルを 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ので注意が必要で 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.鋼管にケーブルを収



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鋼管等が用いられる.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 で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 キャブ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」とした訳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1mm 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がある.

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.

苦労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のオシロス 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 5 kHz 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プラや小型ト ランスでトリガパルスを伝送す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 サンプリング程度の高速モジュールや,低サンプリング速 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 定したサンプリ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、サンプリング周波数を  $f_s$ ,計測信号が持 つ最大周波数を f とすると、 $f m f_s/2$  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リング周波数の 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<sup>®</sup>が便利である.

フィルタ設計の例として、サンプリング速度 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.

$$f_{\rm cutoff} = \frac{1}{2\pi CR} \, [\rm Hz] \tag{1}$$

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、2 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].

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

$$C_2 = 2C_1 \quad [F] \tag{3}$$

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

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<sub>cutoff</sub> 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<sub>cutoff</sub> =500 kHz の 1 次 CR LPF の LT spice 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<sub>cutoff</sub> =4 MHz の5次定 K型 LPF のシミュレーション値、濃い実線は (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、CRLPF 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 およびバンドリジェ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, フィルタ有りと無 し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.本講座が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ことが必要である.



図10 ローパスフィルター特性.

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字 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 て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、という教えである.実験作業で よくあるのが、しゃがんでの作業が終わり、さぁよっこい 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 とき 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 てくれるのかわくわくしてます.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」を通 年で適宜開講してますので,興味のある学生さんはぜひ連絡 を.



《わはらだいすけ

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.

# **二 講座** プラズマ実験におけるノイズ対策の基礎

# 3. 計数計測におけるノイズ対策

### 3. Noise Reduction Technique in Pulse Counting System

高田英治<sup>1)</sup>,小川国大<sup>2,3)</sup>,西谷健夫<sup>2)</sup>,磯部光孝<sup>2,3)</sup> TAKADA Eiji, OGAWA Kunihiro, NISHITANI Takeo and ISOBE Mitsutaka <sup>1)</sup>国立高等専門学校機構富山高等専門学校,<sup>2)</sup>自然科学研究機構核融合科学研究所,<sup>3)</sup>総合研究大学院大学

(原稿受付:2019年8月19日)

放射線計測で用いられる計数計測システムにおけるノイズ対策技術について,主に核融合科学研究所 LHD で採用されている方法を例に解説する.他の計測でも対策される電磁ノイズに加え,測定パルスの波高値により 背景放射線信号を除去する手法について述べる.パルス波高分布を用いることで,ノイズ成分に加え,低エネル ギーの背景放射線もある程度除去することが可能である.また,中性子/γ線混合場で中性子を計測する際に用い られるパルス波形弁別手法についても,測定例に基づき解説する.この手法では,中性子に起因する陽子および γ線に起因する電子がシンチレータ中にエネルギーを付与する際のパルス波形の違いから両者を弁別する.

#### Keywords:

radiation measurement, pulse counting, background, neutron, gamma ray, pulse height, pulse shape

#### 3.1 核融合装置における計数計測

核融合実験装置では、空間線量率の評価やトリチウム漏 洩検知に加え、プラズマパラメータの推定等のために広く 放射線計測が用いられている.核融合実験装置(特に磁場 閉じ込め核融合実験装置)では、プラズマ自体が電磁波等 の放射源であるとともに、加熱装置として中性粒子ビーム 入射加熱装置、高周波加熱装置を有しており、中性粒子 ビーム源のブレークダウン時のサージ、高周波の迷光等 が、多くの測定装置に対してノイズ源になる可能性があ る.放射線計測においても、他の物理量の測定と同様にこ れらの電磁ノイズへの対策が必要である一方で、測定対象 の放射線(中性子、γ線等)以外の放射線によるバックグラ ンドを除去する手法が必要である.

放射線計測における信号取得方法は,電流計測および計 数計測(パルス計測)に分類される.電流計測においては, 検出器から出力される電荷を積分した上で電流値として測 定するのに対し,計数計測においては出力パルスの個々の 特徴(波高値,波形等)を取り出し,より多くの情報を抽 出する.本章においては,放射線検出器によって計数計測 を行い,個々のパルスを計数する場合について取り扱う. 特に核融合科学研究所Large Helical Device (LHD)におけ る中性子計測を中心とした測定を例に,計数計測における ノイズ対策について解説する.

# 3.2 核融合実験装置における放射線計測 3.2.1 核融合実験装置で用いられる放射線検出器

核融合実験装置における重水素放電実験では,重水素 (D)-重水素反応(DD反応)による中性子が発生する.ま

National Institute of Technology, Toyama College, TOYAMA 936-8630, Japan

た,その反応によって生成された三重水素(トリチウム, T)と重水素とが二次的に反応し,エネルギー14 MeVの高 速中性子が生成される(DT 反応).これらの高速中性子 は,その計測を通じてプラズマ状態を推定する手段となる が,一方で構造材等と反応することで放射化を引き起こ し,γ線バックグランドを増加させる.これらのことから, 核融合実験装置内外においては,以下のような放射線計測 が行われている[1].

①線量率モニタリングのためのγ線計測

- ②漏洩トリチウムの計測
- ③高速中性子計測

これらの放射線計測に用いられる検出器には次のような ものがある[2].

(1) ガス検出器

適切な容器中に計測用ガスを封入し,容器の外壁および 内部に設置された電極によってガス中に生成された電荷を 回収するもので,電離箱,比例計数管,GM計数管に分類さ れる.ガスや構造に応じて印加電圧は異なるが,電離箱は 入射放射線によって生成された電荷(一次電荷)をそのま ま回収する.一方,比例計数管,GM計数管は内部で電子な だれを発生させ,電荷を増倍した上で回収する.比例計数 管は回収される電荷と一次電荷の間に線形な関係がある が,GM計数管では一次電荷が生成されると内部電極全体 において電子なだれが発生し,回収電荷は一次電荷量によ らず大きい値となる.電離箱,比例計数管は出力されるパ ルス波高値が一次電荷に比例するため,エネルギー付与の 小さい放射線を波高値によって弁別することができる.ま た,計数率が高い場所では,後述するようにキャンベル

corresponding author's e-mail: takada@nc-toyama.ac.jp

モード, 電流モードでの測定が行われる[2,3].

中性子を測定対象とする気体検出器では、検出器中で何 らかの反応によって荷電粒子が生成され、生成された荷電 粒子が気体中にエネルギーを付与することで電気パルスが 生成される.使用される中性子反応によって、**表**1に示さ れるような種類の中性子検出器がある.ここでQ値と は、質量とエネルギーの等価性(E =  $\Delta mc^2$ )をもとに反応 前後の質量差をエネルギー換算した量である.これらの反 応では、反応後の質量が反応前の質量より小さいため、Q 値に相当するエネルギーが反応後の物質の運動エネルギー として放出される.

(2) シンチレーション検出器

放射線計測用蛍光体(シンチレータ)にエネルギーが付 与された際に発生する微弱光を,光電子増倍管等の高ゲイ ン光検出器で測定する.シンチレータの大きさを増すこと で感度向上が容易であり,LHDでは密度や発光量の大きい 無機シンチレータを用いてバックグランドγ線のモニタリ ングに適用されている.

有機シンチレータは無機シンチレータに比べて原子番 号:Zおよび密度が小さいという短所がある反面,シンチ レーション光の立ち上がり時間や減衰時間が短いという長 所があり,短時間で多数の放射線の計測が必要な場所での 使用に適している.中性子がシンチレータ中を通過するだ けではエネルギー付与が行われず,シンチレータが発光し ない.しかし,有機シンチレータと高速中性子が相互作用 すると反跳陽子が発生することから,反跳陽子によってシ ンチレータにエネルギーが付与され,その発光を用いるこ とで高速中性子検出器として使用できる.

エネルギーの低い熱中性子を計測するためには,熱中性 子との反応によって荷電粒子を生成する<sup>6</sup>Liなどを含有す るシンチレータが用いられる.最近ではLiCaF,CLYC-6 (Cs<sub>2</sub>LiYCl<sub>6</sub>:Ce)等が新たに開発され,注目されている.

(3) 半導体検出器

半導体放射線検出器として代表的なものに,高純度 Ge 半導体放射線検出器がある.エネルギー分解能や効率に優 れるため,微小なバックグランド放射線の測定に用いられ る.核融合実験装置においては,3.2.3(2)で示す放射化箔 法によって高速中性子を計測する際,放射化した箔から発 生する γ 線を測定する際にも用いられる.

また半導体検出器の中には,高速中性子と構成材料の相 互作用で荷電粒子が発生し,エネルギー付与が発生するも のがある.それらは高速中性子計測に適用することが可能 である.例えばSiは高速中性子と反応して(n,p),(n,a) 反応を起こすことから,pまたはaによるエネルギー付与 を通じて高速中性子を計測できる.しかし,高速中性子束

検出器	使用する反応	Q 値[MeV]
BF3比例計数管	$^{10}\mathrm{B}(\mathrm{n},\alpha)^{7}\mathrm{Li}$	4.78
<sup>10</sup> B比例計数管	$^{10}\mathrm{B}(\mathrm{n},\alpha)^{7}\mathrm{Li}^{*}$	2.31
<sup>3</sup> He 比例計数管	<sup>3</sup> He (n, p) T	0.765
核分裂計数管	<sup>235</sup> U(n, FP) <i>v</i> n	$\sim 200$

表1 中性子計測用ガス検出器の例.

が大きい場所では、これらの反応による損傷が検出器の性 能劣化を招く.そこで、Siよりも耐放射線性の高いダイア モンドを用いる検出器の開発が進められている.

#### 3.2.2 放射線検出器の使用モード

前節で述べた放射線検出器からは、多くの場合、パルス 状の電流が出力される.計数率が十分に小さい場合には、 それらのパルスを1つずつ処理し、波高値やパルス形状を 測定する、パルスモードが適用できる.電離箱、比例計数 管、シンチレーション検出器では、パルス波高値は検出器 に生成された電荷に比例する.また、重荷電粒子の飛程付 近のように時間・空間的なエネルギー付与が非常に大きい 場所以外では、生成電荷は放射線によって付与されたエネ ルギーに比例する場合が多い.そこで、パルス波高値のヒ ストグラム(以下、パルス波高分布)により入射放射線の エネルギー推定が可能である.

一方,検出器に入射する放射線数が多くなると,パルス が重なり合うことが多くなり,パルス波高値からエネル ギー付与量を推定することが困難となる.そのような場合 には,出力パルスを積分した形で電流として測定し,電流 値から放射線の強度を推定する(電流モード).

さらに、パルスモードと電流モードの中間に当たる領域 では、出力信号の分散をもとに計測が行われることがある (キャンベルモード)[3].キャンベルモードにおいては、 出力電流の定常分を除去し、変動分の2乗の時間平均:  $\overline{\sigma^2}$ を求める. $\overline{\sigma^2}$ はもともとの各電荷生成事象における電荷 生成量の2乗に比例するので、第一の放射線と第二の放射 線で生成する電荷の量が大きく異なる混合放射線場で使用 する場合に、片方の放射線による信号を除去できる.核融 合装置用核分裂計数管の信号処理システムは高度化が進 み、デジタル演算を用いるものが開発されている[4].

#### 3.2.3 核融合実験装置における中性子計測

核融合実験装置においては、プラズマ状態の評価のため、中性子発生量や中性子発生分布の測定が求められる. そのため、複数の中性子検出器が使用されている.ここでは、LHDで採用されているシステムを例として、中性子計 測手法の概略を述べる[5].LHDの中性子計測システム は、(1)中性子束モニタ(NFM)、(2)放射化箔システム、 (3)垂直中性子カメラ、(4)シンチレーティング光ファイバ 高速中性子検出器からなる.

(1) 中性子束モニタ (NFM)

プラズマ性能を評価する上で中性子発生率または中性子 発生量の測定が非常に重要であり、多くのトカマク型実験 装置において熱中性子計数管、放射化箔法等が用いられて きた.LHDにおいても、中性子発生量の評価および高エネ ルギー粒子に関する物理研究の高度化のため、高速応答、 広ダイナミックレンジを特徴とする NFM が設置されてい る.LHDの NFM システムの全体像を図1に示す.システ ムは3つのセットから構成され、そのうちの1つは装置中 心軸上で装置の上部に設置され、他の2セットは装置近傍 の赤道面上に設置されている.各セットは①核分裂計数管 (FC)(TETD,KSA-01)、②<sup>10</sup>B比例計数管(TETD,E6862-500)から



図1 LHD における NFM システム (参考文献[1]の図1を引用).

なる.これらの検出器をパルスモードおよびキャンベル モードによって動作させ、広いダイナミックレンジが実現 されている.検出器種類ごとに見ると、FCは中間から高中 性子発生率領域での測定用であり、その測定値は中性子発 生量管理や高エネルギー粒子閉じ込めに関する研究に用い られる.一方、<sup>10</sup>B、<sup>3</sup>He による測定結果は中性子発生量の 小さいプラズマ放電において用いられる.

(2) 放射化箔法による測定システム

放射化箔測定システム(Neutron Activation System: NAS)は中性子を発生させる実験装置における基本的な中 性子束測定ツールであり、大型トカマクにおいても使用さ れてきた.測定対象の高速中性子が入射する場所に複数の 金属箔を置き、それらの金属箔を高速中性子で放射化させ た後、発生するγ線から各箔の放射化量を測定する.放射 化反応のしきい値が異なる箔を選択し、各箔の放射化量を もとに、あらかじめ求められている各箔の放射化反応のエ ネルギー依存性を用いて逆問題を解くことで中性子のエネ ルギー分布を推定できる.核融合実験装置においては、放 射化箔を適切に選ぶことでDD、DT中性子の入射量推定が 可能である.NAS は NFM による中性子発生量測定結果の クロスチェックに用いられるとともに、DD プラズマ中で 発生する DT 中性子の選択的な測定にも用いられる.

#### (3) 垂直中性子カメラ (VNC)

中性子発生分布を測定することで、核融合プラズマ中で の高エネルギーイオンの分布推定が可能である.LHDにお ける VNC の概略を図2に示す.VNC 用のコリメータは 1.5 m厚の重量コンクリートからなり、LHD実験ホールの厚 さ2 m のコンクリート床にはめ込んである.密度 3.5 g/cm<sup>2</sup> の重量コンクリートを選択したのは、中性子によって生成 される二次γ線が検出器に入射することを防ぐためであ り、ノイズである背景放射線に対する対策となっている. 直径 3 cm×長さ 150 cm のステンレス製の円管が11本、重



図 2 LHD における VNC システム (参考文献[1]の図 3 を引用).

量コンクリートに埋め込まれ,直接検出器に入射する高速 中性子の経路となっている.検出器としてはスチルベンシ ンチレータ(3.3.4で詳述)が使用され,パルス波高値に加 え,パルス波形によって中性子-γ線の弁別を行っている. (4) シンチレーティング光ファイバ高速中性子検出器

DDプラズマ中でD(d, p)T反応によって生成されたトリ トンが重水素と反応し、D(t, n)α反応によって 14 MeV 中 性子が発生する.トリトンとα粒子は類似の挙動を示すこ とから、14MeV中性子の測定を通じてトリトンの挙動を評 価し、それをもとに α 粒子の挙動を推定することが行われ ている(トリトン燃焼計測).このような研究のため、核融 合実験装置にシンチレーティング光ファイバによる高速中 性子検出器が導入され、データ取得が行われた[6-9]. LHDにおいてもトリトン燃焼計測用として導入され. 2018 年度からデータが取得されている.本検出器は144本のシ ンチレーティング光ファイバがアルミ製の治具に平行に埋 め込まれたもので、1端には反射材が設けられ、もう1端 を光電子増倍管に接続してシンチレーティング光を計測す る (図3). プラスチックシンチレータの高速性を長所と して有すとともに、多数本のシンチレーティング光ファイ バを利用することによって、高効率化も可能である.パル ス波高値による弁別を行うことで,γ線,低エネルギー中 性子の影響を除くことができる.

### 3.3 中性子計測におけるバックグランドノイズ 対策

### 3.3.1 電磁ノイズ対策

核融合実験装置においてパルス計測によって中性子を計 測する場合,他の測定と同様に電磁ノイズ対策が必要であ る.例えば,LHDにおいては,信号線および電源線への電 磁ノイズの混入を防ぐため,次のような対策が取られてい る.



図3 LHD に設置されているシンチレーティング光ファイバ高速 中性子検出器の例(長さ3 cm).

・信号線における対策

ジッパーチューブ,金属管等により信号線を電磁シー ルドしている.例えば,FC検出器からプリアンプへの接 続のために,SUS304製のプリカチューブによって最大 約50mにわたり同軸ケーブルを覆っている.ただし,検 出器付近においては,可とう性を持たせる為に,ジッ パーチューブ或いはフレキシブルチューブを用いている (図4).

・接地系と電源における対策

磁場閉じ込め核融合実験装置では、大きな電流と磁場 を扱うので、機器の接地系はノイズ対策の上からも重要 である.基本的には十分な太さの基準接地端子に一点接 地する.さらに、電源からの電磁ノイズの混入を防ぐた めに、ノイズカットトランス(電研精機,NCT-G-1KVA) を設置している.1次-2次間の伝導及び静電結合、ま た高周波の電磁誘導がないことが長所であり、高周波ノ イズ対策として有効である.

重水素実験実施前において電磁ノイズの評価を行ったと ころ、これらの電磁ノイズ対策前には、中性粒子ビーム入 射のブレークダウンに伴い図5に示すようなノイズ波形が FCのプリアンプから出力され、僅かな誤カウントが発生 したが、ノイズ対策後にはこのようなノイズが観測されな くなった.図6のLHDにおけるプラズマ放電時にも対策 の効果が現れている.上から3個目に示された中性粒子 ビーム入射電力の推移において、丸で囲った時刻3.3s付近 に中性粒子ビーム#1のブレークダウンが発生している が、FCで測定した総中性子発生率にはブレークダウンに



図4 NFM の検出器付近における電磁ノイズ対策例.



図5 ノイズ対策前の FC ノイズ波形 (プリアンプ出力).



図6 LHD におけるノイズ対策後のプラズマ放電例.

起因するノイズの影響が見られない.

#### 3.3.2 中性子吸収材の設置

NFM に用いられている検出器は、LHD から発生する高 速中性子を測定対象とするが、荷電粒子生成反応の断面積 におけるエネルギー依存性から、低エネルギー中性子に対 する感度が高い.そのため、散乱線によって生成された低 エネルギー中性子が設置場所に存在する場合、それらがノ イズ計数の原因となる.そこで、NFMに使用されている検 出器の周囲を熱中性子吸収断面積の大きい材料(カドミウ ムシート、厚さ1mm)で覆い、散乱熱中性子によるノイズ の低減を行っている.

#### 3.3.3 パルス波高値に基づくノイズ対策

計数計測では、測定されたパルス波高値のヒストグラム を求め、パルス波高分布として表示されることが多い.こ れは、検出器中で中性子、γ線によって荷電粒子(中性子の 場合、陽子、α線など、γ線の場合は電子)が発生し、それ らの荷電粒子によって検出器に付与されるエネルギーと検 出器の出力パルス波高値(パルスの高さ)が概ね比例する ことを利用している.**図7**の上図に示すように、放射線検 出器からはパルス状の信号がランダムに出力される. それ らのパルスの波高値が放射線による検出器へのエネルギー 付与量に相当する. そこで, 各パルスの波高値をそれぞれ アナログ-デジタル変換(AD変換)し、パルス波高値のヒ ストグラムを作成する.図7下図は、光電子増倍管に接続 した円柱状 NaI (Tl) シンチレータ (直径1インチ,高さ1 インチ)に、<sup>137</sup>Csy線を照射した時に発生した電流パルス を,前置増幅器,波形整形増幅器により処理し、マルチ チャンネルアナライザでヒストグラム処理した結果であ る.パルス波高分布を表しており、横軸は波高値の AD 変換結果に相当する. この図にはγ線とシンチレータの相 互作用による光電効果のピーク(光電ピーク),コンプト ン散乱の成分などが現れている.光電ピークはγ線のエネ ルギーに相当するので、あらかじめ波高値の AD 変換結果 とエネルギーの関係を求めておけば、光電ピークの波高値 からγ線のエネルギーを求められる.

例えば、<sup>3</sup>He比例計数管を厚さ1mmのカドミニウム シートで覆ったうえで、DD中性子を発生する加速器ター ゲット(量子科学技術研究開発機構、LIPAc)の近くに置 いた場合の測定結果を図8に示す.この時、<sup>3</sup>He比例計数 管からの出力は前置増幅器(CANBERRA, 2006E)に入力後 に、整形アンプ(CANBERRA, 2015A)によって整形し、マ ルチチャンネルアナライザ(YOKOGAWA, WE7562)で 測定した.測定後は横軸をパルス波高値としてヒストグラ ムを求めるが、あらかじめパルス波高値と検出器へのエネ ルギー付与量の関係を求めておけば、図8のように横軸を エネルギーとして表示することができる.

図8の測定結果では、DD反応による中性子エネル ギー: 2.45 MeV に<sup>3</sup>He 検出器における<sup>3</sup>He (n, p) T反応の



図7 パルス波高分布計測の概念.

Q値(0.765 MeV)を加えた 3.21 MeV の位置にピークが現 れている.ピークはバックグランド成分の分布(曲線)上 に乗った形となっており、このような場合には、図8下に 示すように、バックグランド信号を曲線で近似し、曲線よ りも上にある信号ピークの計数を積算する.このような処 理を行うことで、波高値情報から背景放射線の寄与を除く ことができる.

また、シンチレーティング光ファイバ検出器においても、 パルス波高値による弁別が行われている[10,11].検出器 からのパルス信号(立ち上がり時間:数nsec)を高速ADC (サンプリング周波数:1GS/s)に入力し、高速サンプリン グする.その後、各測定パルスに対し、FPGAによって 図9に示すような電荷積分を行う.積分は波形全体、ピー ク到達前、およびピーク到達後のそれぞれについて行い、 結果をQtotal、Qfast、Qslowと呼んでいる.後述する波形弁別 による背景 γ線の除去においては、これらの電荷積分の結 果をもとに散布図を作成し、波形弁別を行っている.

シンチレーティングファイバ検出器の出力を高速 ADC (CAEN 社, DT5751) でサンプリングし,Q<sub>total</sub> に関するヒ ストグラムをとった結果を図10に示す.図10(a) は大阪大 学の14MeV中性子発生装置:OKTAVIANにおいて,トリ チウムターゲット近傍に検出器を置いた場合の測定結果を 表している.検出器はシンチレーティング光ファイバが 3 cm, 6 cm, 9 cm のものの3種類を使用した.また,図10





図 9 高速 ADC によるサンプリング結果と電荷積分範囲 (AIP Publishing の許可を得て, "A study on fast digital discrimination of neutron and gamma-ray for improvement neutron emission profile measurement"(参考文献[10]) から図 1 を転載).

(b)は同様の検出器を用い,東北大学 FNL において DD 反応による中性子を入射した結果を表す.図10(c)は背景 γ線の影響を調べるために,<sup>60</sup>Coy 線源を検出器近傍に置 き,1.17 MeV,1.33 MeV のγ線を入射させた結果である [12].

これらの結果から、14 MeV中性子が入射した際には、他 のケースに比べQ<sub>total</sub>が大きくなっていることがわかる.例 えば、2.5 MeV の DD 中性子を入射させた場合には Qtotal が300程度以下の範囲に計数が集中している.一方,<sup>60</sup>Coy 線を入射させた場合でも、計数の多くは Q<sub>total</sub>=300 程度ま での範囲にある. 中性子入射時には光ファイバ中の陽子が 中性子によってたたき出される反跳陽子によってエネル ギーが付与される一方で,γ線入射時には発生した電子に よってエネルギーが付与される.シンチレータの発光量は 陽子と電子で異なることが知られており、実際にはγ線入 射時の方が発光量は大きくなる.しかし、それを考慮して も、Q<sub>total</sub>のしきい値を500程度に設定すれば、2.45 MeV の DD 中性子および背景 γ線の存在下でも、ある程度選択 的に DT 中性子を測定することができる. 既往評価による と、LHD における典型的な背景γ線の平均エネルギーは 1.4 MeV 程度であるが、それよりも高エネルギーのγ線も 存在する.これは、例えばステンレスに含まれる56Feの中 性子捕獲反応に起因する即発γ線(7.8 MeV)等によるもの である[13]. 高エネルギーγ線の影響は小さいと見込まれ るものの, 波高弁別だけでは, γ線イベントの混入は避け られない.

#### 3.3.4 パルス波形に基づくノイズ対策

背景 γ 線の混在下で中性子を選択的に測定する手法とし て、パルス波形弁別がある[2]. 陽子、電子のシンチレー タとの相互作用の特性が異なるため、液体シンチレータや プラスチックシンチレータのうち特定のものでは、中性子 入射時、γ 線入射時でパルス波形が異なる.これは、有機シ ンチレータの発光が、減衰の速い(数 nsec)成分と、遅い (数 10 nsec) 成分の総和で構成されていることによるもの





である.各成分の比率は有機シンチレータにエネルギーを 付与する荷電粒子の種類によって異なるため,発生するパ ルスの減衰時間の違いにより,中性子に起因する反跳陽子 によるパルスとγ線に起因する電子によるパルスを弁別す ることができる.

LHD においても有機シンチレータ:スチルベン (stilbene, C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CH=CHC<sub>6</sub>H<sub>5</sub>)を用いる検出がVNCとして設置

されている.スチルベンは中性子,y線に起因するパルス において,速い蛍光と遅い蛍光の比率の違いが大きく,出 力波形が異なることが知られている. LHDで使用されてい る検出器を用い,日本原子力研究開発機構 FNS で発生させ た DD 中性子を測定した結果を図11に示す. FNS のような 加速器中性子源においても、中性子とともにγ線が放出さ れており,測定結果には中性子およびγ線に起因する成分 が混在する. そこで、図9のようなパルス波形から適切な 部分を積分し、それをもとに散布図を作成することで、中 性子, γ線を弁別することが可能である.積分範囲の決定 に当たっては、予備的な測定結果から、ピーク値とそのタ イミングを基準として積分範囲を変化させ、中性子とγ線 が弁別しやすくなる条件を決定する.決定された積分範囲 は同様の測定を行う間,変化させない.図11のケースでは, 横軸の値が 0.12 程度をしきい値として左側をガンマ線,右 側を中性子とする.

散布図作成のための指標に工夫した例が参考文献[10] に示されている.従来の弁別では、図9のような検出器の 出力波形において,まず波形のピーク(最大値)を求め,そ の前後の特定の時間だけ電荷を積分することが行われてき た.しかし、ADCのサンプリングレートが低い場合には、 波形のピークがサンプリング点とサンプリング点の間に 入った場合、ピーク位置の測定結果にジッタが発生する. そのため、積分結果にも影響が生じ、散布図の各イベント が広がって分布する結果となっていた. すなわち, ピーク 付近では波形が大きく変化しているため, ADC のジッタ によって本来の波形ピークが捉えられなかった場合、ピー ク時刻を積分の始点または終点とした積分範囲の設定で は、散布図に広がりが出てしまう(図12(a)). そこで、 Q<sub>rise</sub>+Q<sub>fast</sub>を指標とすることで、積分範囲の中に波形ピー クを含めてしまい、波形ピークのジッタの影響を小さくす る方法が提案された.本手法により、図12(b)のように弁



図11 スチルベン検出器による測定結果 (Q<sub>short</sub>:図9のQ<sub>rise</sub>+Q<sub>fast</sub>, Q<sub>long</sub>:図9のQ<sub>total</sub>に相当) (AIP Publishingの許可を得て, "Probabilistic n/y discrimination with robustness against outliers for use in neutron profile monitors"(参考文献[11])から図13を転載).

別しやすい散布図の作成に成功している.

また、このような手法の課題の一つに境界領域における 誤弁別がある.中性子とγ線の分布中心が近いとき、境界 領域においてはγ線イベントであるにもかかわらず中性子 と判断される、というような事象である.これを避けるに は、波形から散布図を作成する際の指標を工夫する.すな わち上の例ではQshortやQlongの積分範囲を最適化すること が考えられる.また、誤弁別をできるだけ少なくするため、 確率的な弁別手法についても検討が行われている.先述の ように図12の横軸=0.12程度を境界として弁別を行う場合 には、各測定点はγ線か中性子に確定的に割り振られるこ とになり、これが境界領域での誤判断の原因になる.

図12のような実際の散布図は、模式的には図13のように 表せる. 確率的な弁別手法においては、 $\gamma$ 線、中性子の分布 に何らかの確率分布を仮定し、境界領域においても $\gamma$ 線で ある確率:  $P_{\gamma}$ および中性子である確率:  $P_{n}$ を各イベント に割り振る. すなわち仮定した確率分布のパラメータを データから推定し、それをもとに各データに中性子または  $\gamma$ 線の確率を割り振る.図13のσは仮定した各確率分布の広 がり(標準偏差)を表しており、各分布のピーク間距離を D、中性子、 $\gamma$ 線の分布における標準偏差を $\sigma_{neutron}, \sigma_{\gamma-ray}$ 



図12 <sup>252</sup>Cf からの中性子, γ線を NE213 シンチレータで測定した 結果のパルス波形に基づく散布図(AIP Publishing の許可 を得て, "A study on fast digital discrimination of neutron and gamma-ray for improvement neutron emission profile measurement"(参考文献[10])から図 2 を転載).

とおくと,分布の弁別性能:FOM (Figure Of Merit) は次 のように計算できる.

$$FOM = \frac{D}{\sigma_{neutron} + \sigma_{\gamma-ray}}$$

全中性子数を評価する場合には、このように割り振った 各イベントの中性子である確率:  $P_n$ の総和をとる.実際 に<sup>252</sup>Cf 密封線源を用いて測定したデータや JT-60Uにおけ る同様の測定結果に対し、混合正規分布を仮定して本手 法を適用した.その際、混合正規分布のパラメータの推定 に、機械学習[14]でよく用いられている EM アルゴリズ ム (Expectation-Maximization algorithm) と k-means 法 (k-means clustering)を組み合わせることで、自動弁別を 検討した.その結果、確率的な手法により誤判別確率を低 減できることが示された[10].

また,混合正規分布は外れ値の影響を受けやすく,ノイ ズを含むデータには適用しにくい場合がある.そのような 場合に対応するために,t-分布を用いた弁別についても検 討されている.平均:0,分散:4の正規分布と,平均0, 自由度:8/3(分散=4に相当)に設定したt-分布の確率密 度関数を図14に示す.t-分布の方が,平均値付近の確率値 が平均から離れた位置での確率値よりも際だって大きいこ とが分かる.この特徴のため,平均から離れた位置にデー タ点があっても,平均・分散の推定結果への影響が小さく なる.一方,正規分布は離れた位置の確率が大きい形状で あるため,外れ値があることで平均・分散の推定結果が大 きく変化する.実際の測定データについて解析した場合 も,t-分布を用いることで外れ値の影響を低減できること が示された[15].

EM アルゴリズム等の確率的な手法による分布パラメー タの推定には繰り返し計算が必要であるが、多数のデータ を蓄積した上でのオフライン解析であれば、特段の問題な く適用できる.また、コンピュータの性能向上に伴い、 データ処理に要するハードウェアも進歩するものと考えら れ、今後、リアルタイム化の検討が進むものと予想される.



図13 確率的な手法による弁別の概念 (AIP Publishing の許可を得て, "A study on fast digital discrimination of neutron and gamma-ray for improvement neutron emission profile measurement"(参考文献[10]) から図5を転載).



図14 正規分布とt-分布の形状比較 (正規分布では平均:0,分散:4を仮定.t-分布では平均: 0,自由度:8/3を仮定(分散:4に相当)).

#### 3.4 まとめ

核融合実験装置において中性子検出器を行う場合,他の 計測項目と同様に電磁的なノイズ対策が重要である.一方 で,検出器自体が中性子に加えてγ線や,測定対象として いないエネルギーの中性子にも感度を持つことから,それ らを除去する手法も必須である.本章ではこれらの対策に ついて概説した.今後,実験装置の大型化に伴って中性 子・γ線発生量が多くなるに伴い,新たな計測手法の開 発・適用や,その手法に適したノイズ対策の採用が必要と なる.

#### 参考文献

- [1] 甲斐倫明 他:講座「核融合施設における放射能計測の 基礎」プラズマ・核融合学会誌 89,622-691 (2013).
- [2] G.F. Knoll et al., 放射線計測ハンドブック 4 (2013).
- [3] R.A. DuBridge, IEEE Trans. Nucl. Sci. 14, 241 (1967); https: //doi.org/10.1109/TNS.1967.4324422
- [4] 山内道則 他: 東芝レビュー 71, 29 (2016).
- [5] M. Isobe *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. 46, 2050 (2018). https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2836987
- [6] W.C. Sailor *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 66, 898 (1995); https: //doi.org/10.1063/1.5074131
- [7] G.A. Wurden *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **66**, 901 (1995); https: //doi.org/10.1063/1.1146200
- [8] T. Nishitani *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion 38, 355 (1996); https://doi.org/10.1088/0741-3335/38/3/010
- [9] H. Harano et al., JAERI-Research 97-060(1997).
- [10] Y. Uchida *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **85**, 11E118 (2014); https: //doi.org/10.1063/1.4891711
- [11] E. Takada *et al.*, Plasma Fusion Res. 11, 2405020 (2016); https://doi.org/10.1585/pfr.11.2405020
- [12] E. Takada *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **90**, 043503 (2019); https: //doi.org/10.1063/1.5074131
- [13] T. Nishitani, Plasma Fusion Res. 11, 2405057 (2016); https: //doi.org/10.1585/pfr.11.2405057
- [14] C.M. ビショップ著,元田浩ら訳:パターン認識と機械 学習下(丸善出版, 2012).ISBN-10:4621061240.
- [15] Y. Uchida *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **88**, 083504 (2017); https://doi.org/10.1063/1.4996177

Lecture Note



# おがわくにひろ小川国大

自然科学研究機構 核融合科学研究所 ヘリ カル研究部 高温プラズマ物理研究系 助 教,博士(工学)(名古屋大学).主に,磁 場閉じ込め核融合プラズマにおける高エネ

## 西谷健夫

核融合科学研究所・研究力強化戦略室・特 任教授. 1980年東京大学大学院工学系研究 科原子力工学専攻修士課程修了.工学博 士. 日本原子力研究所/日本原子力研究開

発機構を経て2015年4月よりNIFS. 主な研究分野は, 核融合 プラズマの中性子計測,核融合中性子工学など中性子をキー ワードにしたプラズマと炉工学の境界領域.特にJT-60U, ITER, LHD の中性子計測開発に携わってきた. 2019年10月 からは研究の現場を離れ、URA として NIFS の国際・国内共 同研究の推進等を担当している.名古屋近郊の生活もほぼ5 年.名古屋飯にも結構詳しくなったが、ちょっと飽きてきて 最近はあまり食べに行かなくなった.

いそ べ みつ たか 磯 部 光孝

自然科学研究機構 核融合科学研究所 ヘリカル研究部 高温 プラズマ物理研究系 教授. 博士(学術)(総合研究大学院大学 数物科学研究科 核融合科学専攻).

磁場閉じ込め核融合プラズマにおける高エネルギー粒子を対 象とする計測機器開発、及び高エネルギー粒子閉じ込め物理 を中心に研究を行っている.

# 講座 プラズマ実験におけるノイズ対策の基礎

# 4. 光学計測におけるノイズ対策

### 4. Noise Reduction in Optical Measurements

荒巻光利
 ARAMAKI Mitsutoshi
 日本大学生産工学部
 (原稿受付: 2019年9月15日)

近年,安価かつ狭帯域な波長可変レーザーである外部共振器型ダイオードレーザー(ECDL: External Cavity Diode Laser)の登場により,比較的気軽にレーザー分光を行えるようになってきている.ここでは, ECDL を用 いた波長可変ダイオードレーザー吸収分光 (TDLAS: Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy)を取り上 げ,光学計測におけるノイズ対策を紹介する.

#### Keywords:

plasma spectroscopy, ECDL, TDLAS, absorption spectroscopy, noise reduction

#### 4.1 はじめに

ノイズは様々な経路を伝って実験系に侵入し、実験装置 の制御や測定の精度に悪影響を与える、ノイズの混入箇所 によっては、それ以外の箇所でいかにノイズ対策をしても 無意味なものとなる可能性がある.例えば電磁波等でプラ ズマに刺激を加え、それに対する応答を観測するような測 定の場合、測定系の上流である電磁波源にノイズが乗って しまうとプラズマの応答そのものが変わる可能性があり測 定系の下流でノイズ対策を行っても無意味なものとなる. 一方で、ノイズ混入箇所が測定系の下流であれば、ノイズ フィルタ等による対策が有効な場合もある. このようにノ イズ対策はそれぞれの実験装置や測定法に強く依存するた め、汎用的なノイズ対策について述べようとすると、どう しても抽象的な表現になってしまう.一方で,実際のノイ ズ対策では、実験系を構成する各装置の動作原理や内部構 造まで考慮する必要があるため、汎用的なノイズ対策の知 識と実践の間には隔たりがあり、ノイズ対策の経験を積み 重ねることで、その隔たりを埋めていく必要がある、そこ で本章では、ノイズ対策を追体験できるよう、波長可変の 外部共振器型ダイオードレーザー (ECDL: External Cavity Diode Laser) を用いた吸収分光 (TDLAS: Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy)を取り上げ、光学計測に おけるノイズ対策の具体例を解説する.特に重要となる光 源の安定化のために、電源系に起因するノイズへの対策を 4.4節で詳述しているので、光学計測を専門としていない 読者の方も参考にしてほしい.

光学計測にも様々な種類があり、ノイズ対策のポイント もそれぞれ異なったものとなる.本題であるノイズ対策の 解説に入る前に、まずは TDLAS という測定法について幾 分直観的な紹介をしたい.TDLAS とは、狭帯域で波長可

変の ECDL を光源とした吸収分光法である. 吸収分光では 吸収の飽和を避けるためプローブレーザーの強度を抑える 必要があり、例えば10µW程度のレーザーが用いられ る.この程度のパワーであればフォトダイオードで容易に 観測できる.一般的に吸収率が1%程度以下になると単純 な吸収分光法では測定が難しくなってくるが、これはプ ローブレーザーのパワーの安定性によって制限されている 場合が多い.技術的には半導体レーザーの出力安定化の提 案もあり単純な吸収分光法の感度を向上させることも可能 と考えられるが[1],一般的には微量物質の検出にはキャ ビティリングダウン分光法等が用いられる.これに対し て、TDLASでは吸収率が数十%程度の測定対象に対して 用いられることが多く、プローブ光もフォトダイオードで 十分な信号が得られる強度のため、受光側でのノイズ対策 は比較的容易である.一方, TDLAS では線幅の狭い原子 のドップラースペクトルを測定するため、プローブレー ザーの波長(周波数)には高い制御性が求められる. ECDL を原子の励起波長前後で掃引して得られる吸収率の波長依 存性から, 原子のドップラースペクトルが得られる. 例え ば,可視光の領域(数百テラヘルツ)の電子遷移を利用し て室温程度の原子を観測した場合、ドップラースペクトル の半値全幅は数ギガヘルツ程度となる. 衝突広がり等が無 視できる場合の TDLAS の周波数分解能は、測定に用いら れる電子遷移の自然広がり程度であり、通常は数十 MHz 程度とドップラースペクトルを測定するには十分な分解能 となる. ECDL の線幅は非常に狭いため実測するのは容易 ではないが、概ねメガヘルツ以下程度である.したがって、 TDLASの光源のノイズ対策では、実験室環境の様々なノ イズによるECDLの線幅の増加を自然広がりよりも十分小 さく保つことが目安となる. このことは ECDL の波長を8

Nihon University, Narashino, CHIBA 275-8375, Japan

author's e-mail: aramaki.mitsutoshi@nihon-u.ac.jp

桁以上の精度で制御することを意味しており,TDLASの ノイズ対策の中心となる.本章では,以下の構成で主に光 源のノイズ対策を中心としつつ,TDLASのノイズ対策全 般について解説する.まず,4.2節ではノイズ対策を考える 上で必要な光源の動作原理と実験系の概要を述べる.4.3 節ではTDLASを行う上で考慮すべきノイズ源につい て,周波数帯ごとに分類して解説する.4.4節では光源を安 定に動作させるためのノイズ対策について解説する.4.5 節で受光系のノイズ対策について簡単に解説した後 に,4.6節で本章をまとめる.

#### 4.2 TDLAS 実験系の概要

近年,安価かつ狭帯域な波長可変レーザーである ECDL の登場により,比較的気軽にレーザー分光を行えるように なってきている.ここでは ECDL を用いた TDLAS のノイ ズ対策を考えるために必要な測定系の概要を示す.

#### 4.2.1 ECDL の動作原理

レーザーダイオードのレーザー媒質の利得曲線は温度と 電流によって決まっており、レーザーダイオード単体での 動作であれば利得が最大となる波長でレーザー発振する. ECDL とは、レーザーダイオードの内部共振器に外部から 光を入射することで積極的に発振波長を制御する装置であ る. ECDLの基本構造を図1に示す[2]. レーザーダイ オードの出力光はレンズによりコリメートされ、回折格子 へと入射される.ここで、回折格子の0次回折光と1次回 折光が同じ角度になるよう回折格子の角度を調整すること で,入射側の1次回折光をレーザーダイオードへとフィー ドバックして発振波長を安定化する (Littrow型 ECDL). 1次回折光の回折角は波長に依存するため、回折 格子の角度をピエゾ素子で変化させると、レーザーダイ オードへとフィードバックされる波長も変化し、発振波長 を制御できる.以上のように ECDL の発振波長は、レー ザーダイオードの動作温度,動作電流に加え,レーザーダ イオードと回折格子の物理的な位置関係(光フィードバッ クの波長)によって決まっており、これらへのノイズの影 響を取り除くのが TDLAS の最上流である光源のノイズ対 策となる.

#### 4.2.2 TDLAS の測定系

ECDLを光源としたTDLAS測定系を図2に示す.ECDL は温度(T)コントローラおよび電流(I)コントローラに よって温度と電流が安定化されている.ECDLは外部から の反射光がレーザーダイオードに入射すると,回折格子か らの光フィードバックと競合するため,発振波長が不安定 となる.これを避ける目的で,ECDLの直前には光アイソ レータが配置される.ECDLの発振波長および発振スペク トルは,それぞれ波長計とファブリ・ペロー干渉計(FPI) で測定される.FPIには共振器長固定と共振器長掃引の2 つの動作モードがあり,ECDLの波長掃引時には共振器長 固定モードで動作させてスペクトルを掃引波長の校正に用 い,ECDLの波長が固定の時には共振器長掃引モードで動 作させてレーザーの発振スペクトルの測定に用いる. TDLASではECDLの発振波長を原子・分子の吸収波長前







図2 波長可変ダイオードレーザー吸収分光測定系.

後で掃引しつつ透過光強度の変化を測定することでプラズ マによる吸収スペクトルを得る. PC で制御されたDA コン バータのノコギリ波出力を ECDLに接続されたピエゾドラ イバに入力し,波長を掃引しつつ透過光強度をフォトダイ オード (PD) によって電気信号に変換して AD コンバータ を介して PC に記録する.

#### 4.3 周波数によるノイズ源の推定

測定系全体のノイズ対策は、測定の上流(レーザー光源 等)から下流(フォトダイオード等の受光系)の順で行い、 個別の装置のノイズ対策は、ノイズ発生の上流 (ノイズ源) から下流(ノイズの影響を受けている装置)の順で行う. 上流のノイズ源からの漏れを可能な限り抑えることが第一 で、その後、それでも漏れてきたノイズについては、その 影響を受けている装置の側で遮断する努力をするという手 順となる.したがって、問題となっているノイズの発生源 を特定することが最初の作業となる. ノイズ源を探す作業 では、ノイズ源になっている可能性のある機器を絞り込む ため、ノイズの周波数を確認するのが有効である.本章で 取り上げている TDLAS の場合、1節で述べたように、ノ イズの影響を最も受けやすいのは実験系最上流部の ECDL であるため、その発振スペクトルの揺らぎやドリフトを FPIで観測することでノイズ源の推定ができる.図3に FPI を共振器長掃引モードで動作させた場合に観測される スペクトルの例を示す. FPI の共振器長はノコギリ波信号 によって掃引されており、共振器長が半波長の整数倍にな るたびにレーザーのスペクトルが表示される.スペクトル が繰り返し表示される間隔はFSR (Free Spectral Range) と呼ばれ、共振器長によって決まっている[3]. 例



図3 FPIによる光源ノイズの検出.

えば、焦点距離250mmの凹面鏡で構成した共焦点型のFPI であれば FSR は約300MHz となる. また, 市販の FPI の装 置幅はFSRの100~200分の1程度である.可視光を仮定す ると、その周波数は数100THzなので、FPIを用いることで 周波数の8桁目の変化を検出することができる. ノイズに よる ECDL の発振波長の変化は、FPI で観測されるスペク トルの位置の変化として検出される. FPIの掃引周波数よ り低い周波数のノイズの影響であればスペクトルがドリフ トしているように見え、高い周波数のノイズの影響であれ ばサイドバンドのようなスペクトルが見える.表1に ECDL の発振波長に影響を与える主なノイズ源を中心に周 波数帯毎のノイズ源とノイズ対策の概要を示す.1Hz以下 の周期でスペクトルがドリフトする場合, ECDL の温度変 化が原因の場合が多い.これは、実験室内の風やエアコン の温度制御の周期、あるいは午前・午後の気温差等が原因 となる.したがって、光源を断熱性のあるケース等に入れ ることで抑えることができる. FPI を商用電源の周波数で 掃引した場合には安定したスペクトルが観測されるが、商 用電源の周波数の倍数や約数でない周波数での動作でスペ クトルに揺らぎが観測される場合、商用電源からの漏れ電 流等がノイズ源である.このノイズ対策に関しては4.4節 で詳しく解説する. 4.2節で述べたように, ECDL の発振波 長はレーザーダイオードと回折格子の物理的な位置関係で 決まっているため、実験室内のポンプ等の電動機による振 動や音響ノイズも ECDL のノイズ源となる. これらのノイ ズの周波数帯は商用電源周波数からその2倍程度の範囲で ある.このタイプのノイズは、光源を除振台の上に設置す るとともに防音ケースに入れることで対策できる.また, 測定系の下流となる受光系でもこの周波数帯のノイズが観 測されることがあるが、例えば、商用周波数の2倍の周波 数で点滅している蛍光灯がノイズ源の場合等である. 光源

表1 周波数帯毎の主なノイズ源.

周波数	ノイズ源	ノイズ対策
1 Hz 以下	風,気温や気圧の変化	断熱ケースによる遮蔽
$50/60 \mathrm{Hz}$	商用電源	4 節で解説
数十Hz~数百Hz	電動機等の振動や動作	除振台,防音
	音,蛍光灯	
数 kHz	ターボ分子ポンプ等	ノイズトランス
数 MHz 以上	高周波電源等	放電部のシールド
ランダム	反射光等の光フィード	光アイソレータの設置
	バック	

の近くでターボ分子ポンプが動作している場合,数 kHz 程度のノイズが重畳することがあるが,これらは光源の電 源ラインにノイズトランスを挿入することで取り除くこと ができる.数メガヘルツ以上のノイズはプラズマを生成し ている高周波電源からの電磁波が原因のため,高周波アン テナをシールドするとともに,高周波回路を十分に低いイ ンピーダンスで接地することで対策できる.ECDLは光 フィードバックによって波長の安定化・制御を行っている が,FPI等から強い反射光が ECDLに戻ると発振が不安定 になることが知られている[4].発振波長がランダムに変 化しているように見える場合はこのような戻り光が原因の 可能性があるため,40dB程度以上の光アイソレータを ECDLの前に設置する.これまでに紹介したTDLASにお いて問題となるノイズ源について,いくつかを選んで以降 の節で詳しく解説する.

#### 4.4 光源のノイズ対策

ここでは TDLAS の実験系における最上流部にあたる波 長可変レーザーシステムのノイズ対策について解説する. このシステムで中心となるのは ECDL である. TDLAS では ECDL の波長を PC からのノコギリ波信号で掃引しな がら吸収率の変化を記録してスペクトルを得る. 通常は波 長掃引中、ノコギリ波信号やレーザーのスペクトルをオシ ロスコープやPCでモニタする.したがって、波長可変レー ザーシステムの最小構成は, ECDL, 制御装置, 測定装置の 3要素となる.これらの装置を単独で使用する場合は特に 問題がなくても、システムとして組み合わせた場合に接地 回路の取り回しによっては給電線からのコモンモードノイ ズやノーマルモードノイズが原因でECDLの発振波長が不 安定になることがある.この影響は非常に大きく,装置間 の接地回路を工夫して解決しない限り実験を開始すること が出来ない、この給電と接地回路に起因する問題は光計測 に限らず他の多くの実験にも関係するため、特に詳細に解 説する.その後,ECDLの安定化に関するその他の事項に ついて解説する.

#### 4.4.1 給電と接地回路に関連したノイズ対策

ここでは,**表**1に示した商用電源周波数のノイズについ て解説する.商用電源の配線は建物で共通のため,様々な ノイズを拡散させる媒体となる.例えば,周辺の研究室で 大きなノイズを出す実験を行っている場合,それが電源線 を伝って来て悪影響を及ぼすことがある.これを防ぐため にノイズトランスや絶縁トランス等が利用される.しか し,ここで紹介する商用電源に起因するノイズはこういっ た類のものではなく,使用する電気機器の内部構造と接地 回路に依存するものである.

実験系の研究室に所属する多くの方が計測ラックや実験 装置に触れた時に何となく不快に感じる程度の感電をした 経験があるのではないだろうか?感電した箇所の電圧を測 ると、50V 程度のことが多い.これは測定器等に内蔵され るラインフィルタを介して漏れてきた商用電源の電圧で, 通常は命に関わるほどではないが,精密な実験にとっては 重大なノイズ源となる[5].TDLAS においても,このノイ

#### Lecture Note

ズがピエゾドライバに侵入してECDLの発振波長が不安定 になることがしばしばある.ここでは、この商用電源に起 因するノイズを理解するために商用電源および電気機器の 構造について説明し、これらを組み合わせて実験系を構築 する際に生じる問題点について解説する.

#### 4.4.1.1 単相3線式の電力供給

まずは、電気機器を利用する際の最も基本的なインフラ である商用電源について説明する.実験室のように大電力 を必要とする場合、分電盤には図4に示すような単相3線 式で電力が供給される場合が多い. 日本の一般家庭のコン セントは図4(a)に示したような,差し込み口が2つのも のが主流である. 左側が接地で右側に 100 V が供給されて おり(JISC 8303),水回り等の特に接地側を明示したい場 所のコンセントでは接地側の差し込み口の方が2mm ほど 幅広になっている.この図でわかるように、単相3線式で 給電されている実験室の場合,コンセントによって中点 N (Neutral) と L1 (Live1) 相か L2 (Live2) 相のどちらかが 接続されており、L1相とL2相は位相が反転している.本 来はL1相とL2相はある程度バランスよく利用する必要が あるが、後述するようにノイズ対策という観点からは電気 的に繋がっている装置は利用する相を統一した方が有利と なる. 図5は筆者の研究室の100V用分電盤の例である.

L1 相, N, L2 相の単相 3 線式で給電されている. N-L1 相, N-L2相の 2 系統が実験室のコンセントへと接続されて いる.一般的には L1 相と L2 相の位相差の影響について認 識されることなく利用されている. それぞれの相がどのコ ンセントに来ているかは, ブレーカーをオンオフすること で確認できるが, それができない場合であっても, コンセ ント間の位相が揃っているかどうかは, 100 V 側端子(正 しく配線されていればコンセントの右側の端子)間の電圧 を測ることでコンセント間の位相は確認できる. すなわ ち, 同位相であれば電位差はほぼ0 V, 逆位相であれば 200 V となる. ここまで, 2 極コンセントについて説明し







図5 単相3線式の分電盤.

てきたが、実験室では図4(b)に示すような2極接地極付 きコンセントが一般的である.このタイプのコンセントの 場合、物理的に左右を逆に接続することはできない構造に なっているが、後述するようにL1相とL2相が混同するこ とによる問題については依然として注意が必要となる.ま た、N極および接地極は共に接地されているが、N極は変 圧トランスのそばで接地されており、3極コンセントの接 地極は建物に設けられた接地から配線された分電盤の接地 電極に接続されているため、一般的にこれらの接地場所は 異なる.

#### 4.4.1.2 電気機器の内部構造

次に、図6に示した例を用いて電気機器の内部構造につ いて考えてみるが、機器内部の配線に関してはメーカー毎 あるいは設計者毎に異なるため、あくまでも例として内部 の構造を示したものである.現場でのノイズ対策におい て,実験系を構成する装置の内部回路がマニュアル等で全 て分かっているような状況は殆どない.したがって、それ ぞれの装置の内部回路を想像しながらノイズ対策を行うこ とになるため、不確定要素が非常に多くなる.まず、図6 (a)は日本で一般的な2極用コンセントでの使用を仮定し て設計された電気機器の例である.電源線は装置に入った ところで電源スイッチによってオンオフが切り替えられ る. ここでは、2本の電源線それぞれにスイッチ S1 および S2が挿入されている両切りの例を示しているが、電気回路 としては S1 か S2 のどちらか片方でオンオフ制御できるた め、コストを抑える目的で片側の電源線にしかスイッチが ない機器もあるはずである. コンセントと内部回路の間に は、電源線からのノイズの侵入を防ぐためにラインフィル



図6 機器による給電の違い.(a) 2極プラグの場合,(b) 3極 プラグの場合.

タが挿入されている.電源線の片方は接地でもう片方は 100 V なので、ラインフィルタの中点はコンデンサーで分 圧されて 50 V になっている. この図の場合, ラインフィル タの中点はシャーシグラウンドに接続されている.した がって、接地しなければこの装置のシャーシには50 Vの電 圧がかかっており、ハムノイズおよび感電の原因となる. 先ほど触れた実験室における50V程度の感電は、このライ ンフィルタの漏れ電流によるものである.この漏れ電流は ラインフィルタに電圧がかかっていれば流れるもので、機 器の電源が入っていなくてもコンセントに繋がっているだ けで流れる場合もあるので注意が必要である.例えば, 図6(a)とは異なり、電気機器の電源スイッチが片方にし か入っていない場合、スイッチが無い方の回路にコンセン トのL相側が接続されていれば、たとえ電気機器の電源が 入っていなくてもシャーシの電圧は常に50 Vとなる.ちな みに、日本の電気用品安全法の検査項目では、この漏れ電 流の上限値は10mAとされている. 商用電源周波数での感 電において 10 mA という値は離脱電流ギリギリの値であ り、場合によっては感電の際に自力で電流源から離れるこ とができなくなる可能性がある.したがって、2極プラグ による使用を前提とした電気機器の場合, ユーザーが シャーシを接地せずに使用する可能性を考慮して、ライン フィルタの漏れ電流をこの値よりもかなり低い値で設計し ているのではないかと想像できる.図6(a)の例では、ライ ンフィルタの中点はシャーシに接続されており内部回路と は切り離されているが、装置によっては内部回路の接地と 共通になっている可能性もある.また,機器の出力端子の マイナス側がシャーシグラウンドと接続されている場合や 絶縁されている場合もある.このように、ここで問題にし ている商用電源からのノイズ伝播は機器の内部構造に依存 しており、さらに、その内部構造の情報がない場合が多い ため、ノイズ対策は機器の内部構造を想像しながらの試行 錯誤となる.2極プラグの極性については、電極付近に刻 印されている N (Neutral), W (White), C (Cold) やG (Ground)といった記号や,電源線に白い線や文字等を入 れることで接地側が示されている.市販の電気機器の多く はコンセントの左右を逆に接続しても壊れることはない が,ノイズ対策を容易にするためにも正しい向きで接続し た方が良い.それは,隣り合った電気機器が位相が異なる 電源に接続された場合,適切にアースされていなければ機 器のシャーシ間の電圧は50 Vの2倍で100 Vとなり,より 大きなノイズの原因となるためである.

次に、図6(b)に示した3極タイプのコンセントへの接 続を仮定した電気機器について考える.3極タイプのコン セントの場合、電源線が接続する前に必ず接地線が接続す るため、感電の危険性は低い.したがって、3極タイプの コンセントが主流の国で設計された電気機器はラインフィ ルタの中点が接地されていることを前提としており、漏れ 電流を小さくするよりもラインフィルタのノイズ減衰特性 を優先している可能性がある.そのため、3P-2P変換アダ プタを用いて機器をフローティングにして使用した場合, 10 mAに近い漏れ電流で感電する可能性があり,注意が必 要である. また, ラインフィルタの中点がシャーシグラウ ンドと接続されているのか,あるいは内部回路や出力の接 地と接続されているのか等は、漏れ電流によるノイズがコ モンモードノイズになるかノーマルモードノイズになるか 等を考察する上で重要な情報であるが、図6(a)の例と同 様に不明であり、内部構造を想像しながらノイズ対策を試 行錯誤する必要がある. ECDL を使用する際のノイズ対策 の場合, FPIによって観測されるレーザーのスペクトルの 揺らぎが最もノイズに敏感なため、このスペクトルの揺ら ぎを抑えるよう試行錯誤する.

#### 4.4.1.3 複数の電気機器を接続することで生じる問題

実験系は、ここまでに解説した電源および電気機器の組 み合わせで構築されている. 電気機器単体で動作させる場 合は正常に動作するが、それらを組み合わせると正常に動 作しないことがしばしばある.例えば、ECDLを用いた実 験の場合,スペクトルをモニタしている FPI の掃引周波数 を商用周波数の整数倍にした場合はスペクトルに異常が観 測されないが、非整数倍の周波数で動作させた時にスペク トルが揺らぐような場合は、以下に解説する接地回路の取 り回しによって生じるハムノイズの影響でECDLの発振周 波数が不安定になっている. ここでは TDLAS に用いる光 源をレーザーシステム(ECDL)とその制御装置および動 作状況をモニタする測定装置の3つの要素で表した図7を 用いて、複数の電気機器を接続して用いた場合に生じる問 題点について解説する.図7(a)は各装置が3極プラグで 実験室の離れた場所にある複数のコンセントに接続される ことで個別に接地された状態を表している. このように複 数箇所で接地すると接地回路は実験室の壁の中を通る大き なグラウンドループとなり、大きなノイズ源となる、図7 (b)は若干改良を行い、全ての装置を1箇所のコンセント に3極プラグで接続して給電することで一点接地した例で ある. この場合, グラウンドループのサイズは小さくなる が,依然としてその影響は残る. そこで, 3P-2P 変換アダプ タを使用して制御装置および測定装置をコンセントの接地



図7 レーザーシステムと周辺機器の接地接続.(a)全ての機器 が個別に接地,(b)1点接地,(c)周辺機器はフローティ ング,(d)アイソレーションアンプ等の利用.

極に接続しないことでフローティングとし、機器間の配線 によってレーザーシステムのシャーシグラウンドに接続し たのが図7(c)に示した例である.このように、レーザーシ ステムのみを接地した放射状の接地回路とすることで、グ ラウンドループの問題を回避できるように思える.しか し、この接続方法は以下の理由によりノイズを十分に低減 することができない.まず, PC はデジタルノイズの発生源 であり、レーザーシステムと接地を共有するべきではな い. また、この図ではPCはレーザーシステムのみと接続さ れているが、実際の実験系では受光系等とも接続されてい るうえ、LAN ケーブルによってさらに大きな接地回路と も接続しており、これら全てをフローティングにして図の ような接地回路とすることは困難なためである.また, 図6で解説したように3極プラグでコンセントに接続しな い場合、レーザーシステムに接続されているオシロスコー プ等周辺装置のラインフィルタの漏れ電流は全てレーザー システムを介して接地に流れるため大きなノイズ源とな る.このように、電気機器の接続ではノイズの影響を受け やすい装置に漏れ電流を流さないことと、グラウンドルー プを最小に抑えることが重要となる。例えば、図7(d)で は、PCに接続された DAC および ADC にフォトカプラが 内蔵されたチャンネル間絶縁のものを用いることで、グラ ウンドループと漏れ電流の両方を排除している. このよう に、ノイズ対策としてはレーザーシステムに接続する全て の装置を絶縁タイプにすることが理想的だが、コストのか

かる方法である.コストを抑えつつノイズ対策をする場合,グラウンドループと漏れ電流の影響を比較しつつ図7 (b)と図7(c)の接続法を併用することになる.すなわち,漏れ電流が大きな装置は図7(b)の接続法で出来るだ けグラウンドループを小さく取りつつ漏れ電流は接地へと 直接流し,漏れ電流が小さな装置は図7(c)のように 3P-2P変換アダプタを使用してフローティングとしてレー ザーシステムに接続する.このような試行錯誤によりノイ ズを最小限とする接続の組み合わせを見つけることで,多 くの場合商用電源からのノイズを十分小さく抑えることが できる.

### 4.4.2 光源の安定性に影響を与えるその他のノ イズについて

ここまで、レーザー光源安定化の基本となる給電と機器 間の接続に起因するノイズへの対策について詳しく解説し てきたが、ここでは、光源の安定性に影響を与えるその他 のノイズ源とその対策について述べる.表1でも述べた が、実験室のエアコンからの風の影響は意外と大きく、 ECDLの波長ドリフトの原因となる.また、光路の空気が 揺らぐことでビームの位置も数マイクロメータ程度は容易 に変化するため注意が必要である.著者の研究室では図8 のような簡易的な風除けをエアコンの吹き出し口に取り付 けることで、エアコンの風が実験室の壁際で下方に流れる よう制御している.それと同時に、光源側の対策として 図9に示すような堅牢なケースにECDLおよびFPIを組み 込んでいる.これにより実験室内の風の影響に加えて、音 響ノイズの影響も抑えることができる.

プラズマの近くに光源を置くことができない場合,図10 のように光ファイバを用いてプローブ光を伝送することが しばしばある.光アイソレータを介して ECDL の出力を偏 波保持ファイバ (PMF: Polarization Maintaining Fiber) に 光を導入して伝送する.吸収分光などでプラズマに入射す るレーザーパワーを調整したい場合,PMF の出力側に半 波長板と偏光ビームスプリッタ (PBS: Polarizing Beam Splitter)を配置する.このようなシステムの場合,プロー ブ光の強度を一定に保つには,PMF から出力された光の 偏光の向きが安定であることが必須となる.磁場中でレー



図8 プラダンを用いた簡易的なエアコンの風除け.



図9 安定化のために堅牢なケース中に収められたレーザー光源.



図10 光ファイバによるプローブ光の伝送.



図11 プラズマの発光とレーザー光の伝播方向の違い.

ザー分光を行う場合も磁場と偏光の向きの関係は重要なた め,偏光の向きが安定である必要がある.PMF は伝播によ る偏光面の変化を抑えるために開発されたファイバである が,ファイバの温度が変化したり,配線の曲率等の物理的 な形状が変化したりすると容易に偏光の向きが変化してし まう.したがって,偏光の向きを制御する必要がある測定 の場合,ファイバの温度や形状を安定化することが非常に 重要となる.



#### 4.5 受光系のノイズ対策

紙面の関係で詳細な解説はできないが、受光系のノイズ 対策では測定対象の光とノイズの伝播モード、波長・周波 数,時間の違いを利用する.図11に示すようにプラズマを 透過したレーザー光をフォトダイオード (PD) で測定する 場合、視線上にあるプラズマからの発光がノイズ源とな る. レーザー光は発散角が非常に小さいため、プラズマか ら離れたところに PD を配置しても信号の減衰は殆どない のに対して、プラズマの発光はプラズマからの距離の2乗 に反比例して減衰する.したがって、プラズマから離れた 場所でレーザー光強度を測定することで容易に信号雑音 (S/N) 比を向上させることができる(伝播モードの違いの 利用).また、プラズマの発光が強い場合でも干渉フィル タによって必要な波長のみを抽出することで通常は十分な S/N が得られるが、不十分な場合はレーザー光強度を光 チョッパ等で変調して PD 出力をロックイン検出する等の 方法が用いられる(波長・周波数の違いの利用).また、パ ルス放電によるノイズのように継続時間が限られているノ イズの場合、レーザー光を余分に伝播させて時間差をつく ることでノイズの影響を回避することができる(時間差の 利用). 例えば, 光路長を3m延ばすことで, 測定のタイミ ングを 10 ns 遅らせることができる.

#### 4.6 まとめ

本章では TDLAS を具体例として取り上げ,関係するノ イズ対策について解説した.ノイズ対策では,ノイズ発生 を抑えることが最も大切であり,それでも漏れてくるノイ ズに関しては,その影響を受けている装置の側でノイズを 遮断する努力をすることになる.また,実験系全体を考え た場合,測定の上流にある装置から順にノイズ対策を行う ことになる.TDLAS の場合,実験系の最上流にある光源 のノイズを取り除くことが重要となるため,本章では光源 のノイズ対策を中心に解説した.

#### 参考文献

- [1] F. Tricot et al., Rev. Sci. Instrum. 89, 113112 (2018).
- [2] L. Ricci et al., Optics Commun. 117, 541 (1995).
- [3] W. Demtröder, Laser Spectroscopy 1 (Springer, 2013).
- [4] J. Mork et al., IEEE J. Quantum Electron. 28, 93 (1992).
- [5] 岡村廸夫: 解析 ノイズ・メカニズム (CQ 出版社, 1987).

# ■ 講座 プラズマ実験におけるノイズ対策の基礎

# 5. 画像のノイズ対策

### 5. Noise Reduction for Images

西野信博 NISHINO Nobuhiro 広島大学大学院工学研究科 (原稿受付:2019年10月3日)

本章では画像のノイズ除去法について概説する.プラズマ分野の計測では画像計測は時系列で取得する場合 が多いので,実際はビデオデータの場合が多い.データを時系列でみた場合,画素毎の時系列データ(1次元デー タ)での処理となり,空間情報としてみた場合は,画像(2次元データ)処理となる.これらの方法は,今まで 多く提案されている.3次元の時空間上での処理はあまり提案されておらず,今後の進展が期待される.

#### Keywords:

image, video, filter, processing, convolution, deconvolution, spectrum

本章では、2次元の画像データ(ビデオデータを含む) のノイズ対策(ノイズ除去)についての技術を概観する. ここに「信号」とは研究者が対象としているデータのこと で、「ノイズ」とは「信号」以外のデータ、すなわち、研究 者が対象としていないデータとする.したがって、「ノイズ 除去」とは、データから信号を抽出する行為の一つである.

一般にノイズの種類はさまざまであるので、その除去方 法も多様である。例えば、カメラにおいてのノイズはセン サーからのショットノイズ、回路からのノイズ、主にプラ ズマからの放射線(真空中では中性粒子も)等によるノイ ズ、信号過多による隣接画素への影響、場合によっては装 置関数としてのレンズによる歪、ボケなどがあり得る。本 章以前にハード的なノイズ除去についてはかなり解説され ているので、ハードの話はそちらを参照されたい。ここで はソフト的なノイズ除去法、つまり、プログラムを使用し たノイズ除去を概説する。

まず,時系列の点データ(空間0次元,時間1次元の1 次元データ)と時系列の画像データとは何が違うのであろ うか? それは,点では空間上の相関は取れない(取りよ うがない)が,空間1次元以上のデータは空間上の相関が 取れることである.すなわち,点データのノイズ除去では, ノイズと信号の時間的性質の違いを利用する方法しかない が,画像データではノイズと信号の空間的性質の違いを利 用する方法もあり得る.時間的性質を使ったノイズ除去方 法は,画像においても各画素毎の時系列データに適用でき る.蛇足ながら,現在の計測は全てデジタルであるので, 時間,空間情報も全てナイキスト周波数の範囲外のアナロ グ情報は欠落している.データを解析する際には,ナイキ スト周波数の数分の一以下の周波数を使用するのが通例で あるが,特に基準はない. 以降,時系列の空間1次元以上のデータでも使用可能な 方法が多いが,画像データ(ビデオ)を例に概説する.尚, 各手法の詳細については,参考文献などを利用していただ きたい.

#### 5.1 時間領域における処理

完全に再現性のある信号のノイズ除去には積算平滑化処 理が最も良い.これは同一条件の実験を繰り返し行い,位 相平均(アンサンブル平均)をとる方法である.N回の実 験なら,ランダムノイズの減衰率が1//Nとなる.例えば, N=100でノイズは1/10となり,Nが大きいほど効果が大 きいが,効率は悪くなる(ノイズを1/100にするNは 10000回である.通常,Nは実験のコストとノイズ除去効果 のバランスで決まる).積算平滑化処理のみが信号のスペ クトルを変えない優れた方法であるが,プラズマ実験では 全く同一条件の実験を繰り返し行うことが困難なことから 使用にはかなり制限があるだろう.また,ノイズに相関が あれば除去率はそれだけ悪くなる.

以下,積算平滑化処理以外でよく使用される処理を記す [1,2,webでは3など].通常,データを取り終わった後での 処理が圧倒的に多いため,時間について過去と未来のデー タを使用して平滑化を行う.

#### 5.1.1 単純移動平均と重み付き移動平均

単純移動平均は,時系列データ*x<sub>k</sub>*について*i*番目のデー タをその前後の区間幅*N*のデータの平均値と置き換える 操作で通常*N*は奇数,*i*は区間の中心である.

N = 2m + 1の時,  $\bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=-m}^{m} x_{i+j}$ と表せる. 積算平滑化 処理が位相平均を取るのに対して,単純移動平均は時間平 均を取っている.

Graduate School of Engineering, Hiroshima University, Higashihiroshima, HIROSHIMA 739-8527, Japan

author's e-mail: nishino@hiroshima-u.ac.jp

特徴は、ランダムノイズに対して積算平滑化処理と同程 度の  $1/\sqrt{N}$  の効果が期待できる事で、高周波ノイズ対策で は最も有効な方法と考えられている. 但し、N を大きくと ると高周波成分が抑えられる分だけ元の信号も歪が大きく なる. この N の選定は研究者が行う.

上記の欠点の改良をめざしたのが,重み付き移動平均で,  $\overline{x}_i = \frac{1}{T_W} \sum_{j=-l}^n W_j x_{i+j}$ ここに,  $T_W = \sum_{i=-l}^n W_i$  で, N = n + l + 1である. 区間幅 N に対して下限 l と上限 n の絶対値は異 なってよいが,通常, l = n で使用する.

重みの選定はデータ点 $x_k$ を区間幅Nの範囲でどの様に 近似するかで決まる.例えば, Savitzky-Golayの係数は,多 項式近似を使用している[1].その他にもガウス分布形の 重み,過去のデータしか使用しない例として指数移動平均 など,いろいろな係数が平滑化のために考案されている [4].

以下に,簡単な実施例を紹介する.この例では高周波成 分を除去した背景画像を単純移動平均で作成し,原画像と の差分を取って,変動成分を強調している.図1-4に,高 速カメラデータの原画像と処理後の画像を示す.もともと の画像は白黒であるが,見やすいように人工着色してあ る.図1が原画像で,図2-4は現画像から移動平均で得た 画像を差し引いたものである.移動平均を取る区間幅 N (この例ではフレーム数)を変えると,強調される変動部分 の画像が変わることがわかるだろう.どの画像が判り易

#### Original before subracted background: 241.630ms



図1 高速カメラの画像 (見やすいように着色している).

Subtract Image 56703, 241.630ms, width= 11frames



図2 図1の画像から11枚の単純移動平均の図を引いた画像.

く,研究者の主張に合うか,また,合理的かを判断し,区 間幅 N を選択するのは研究者本人である.このように,最 も簡単な単純移動平均でも研究者本人の判断によるところ が大きい.図5は周波数領域でバンドパスフィルターを施 した例(後述)である.図2-4のように低周波成分をカッ トした上で,より見やすくするため,余分な高周波成分を カットした図になっている.この場合も,バンドパスの下 限と上限の2つの周波数は研究者が決める.

#### 5.1.2 適応化平滑化

信号とノイズの大小がデータの区間によって異なること を利用した方法として,適応化平滑化法がある.移動平均 と異なり,データの全区間で同一の処理を行うわけではな

Subtract Image 56703, 241.630ms, width= 21frames



図3 図1の画像から21枚の単純移動平均の図を引いた画像.

#### Subtract Image 56703, 241.630ms, width= 41frames



図4 図1の画像から41枚の単純移動平均の図を引いた画像.

Time= 241.670ms, bandpass= 5000.00Hz- 15000.0Hz



図5 5 kHz-15 kHz のバンドパスフィルタを適用した例.

い. 例えば,線スペクトルのような信号では,信号が大き くノイズが小さい所と,信号が小さくノイズがほとんどの 所に分かれる場合が多い. この場合,単純移動平均の $\bar{x}_i$ を用いて $\hat{s}_i = \frac{\sigma_{x,i}^2 - \sigma_n^2}{\sigma_{x,i}^2} (x_i - \bar{x}_i) + \bar{x}_i$ と置く.

ここに、 $\sigma_{x_i}^2$ は、単純移動平均 $\bar{x}_i$ の区間幅Nのデータの分散で、 $\sigma_n^2$ はノイズのみの区間(幅M)の分散である、ノイズの区間と区間幅N、Mの選定は研究者の判断による。

右辺の係数  $\frac{\sigma_{x,i}^2 - \sigma_n^2}{\sigma_{x,i}^2}$  は,信号の大きいところでは,  $\sigma_{x,i}^2 \gg \sigma_n^2$ で,1に近く,信号の小さいところでは $\sigma_{x,i}^2 \sim \sigma_n^2$ で,0に近い数値となる.したがって,信号が大きいところで, $\hat{s}_i \approx x_i$ となり,信号が小さいところでは, $\hat{s}_i \approx \bar{x}_i$ となる.すなわち,データで信号波形が大きいところでは,信号波形を崩さず,ノイズが大きいところでは平均値に置き換える操作になっており,実際,ノイズの区間の選定次第でかなりきれいな線スペクトルが得られる.残念ながら,画像解析において画素の時系列データに適用した例は寡聞にして知らない.

#### 5.1.3 高周波強調

計測器から得られるデータは、信号に装置関数が畳み込 み積分の形で作用した結果である.装置関数とは、測定装 置、センサー、アンプなどを含めて信号波形を平滑化する 作用のことで、場合によっては信号歪みを伴う、この時、 雑音はどの段階でも入りうることを忘れてはならない.装 置関数補正とは、装置関数がわかっている場合に、装置関 数による畳み込み積分の結果から真の信号を得る手法であ る.このような手法は通常,高周波強調となり、数学的に はデコンボルーション法として知られている.手法として は, Gauss-Seidel 法, SOR (Successive Over Relaxation) な どがある.計算機内では畳み込み積分は行列演算として, AX = B の形である. ここに, A が装置関数, B は計測され たデータベクトル, X は真の信号ベクトルである. デコン ボリューションはこの逆演算であるから、A、Bが既知の場 合に、Xを求める単純な連立一次方程式の解法である. データ点が少ない場合は直接解けるが,多くは,反復法に よって解かれる.

Lを下三角行列, Dは対角行列, Uを上三角行列として, 係 数 AをA=L+D+Uとし, X<sup>ν+1</sup> = -D<sup>-1</sup>(L+U)X<sup>ν</sup>+D<sup>-1</sup>B の形で反復して解く方法が Jacob 法である. この方法 は効率が悪いため使用されない. Jacob 法の欠点を 補った方法が Gauss-Seidel 法で, 行列 形で書くと X<sup>ν+1</sup> = -D<sup>-1</sup>(LX<sup>ν+1</sup>+UX<sup>ν</sup>)+D<sup>-1</sup>Bとなる. 成分で書く と,  $x_i^{\nu+1} = \frac{1}{a_{ii}} \left( b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} x_j^{\nu+1} - \sum_{j=i+1}^{n} a_{ij} x_j^{\nu} \right)$ の形で, 先に Jacob 法で求めた  $x_j^{\nu+1}$ を Jacob 法の右辺にいれて収束を速 めた方法である. SOR は Gauss-Seidel 法で求めた解を $\tilde{X}^{\nu+1}$ として,  $X^{\nu+1} = X^{\nu} + \omega(\tilde{X}^{\nu+1} - X^{\nu}) = (1-\omega)X^{\nu} + \omega\tilde{X}^{\nu+1}$ ,  $0 < \omega < 2$  とした手法で, 通常,  $1 < \omega < 2$  で $\tilde{X}^{\nu+1}$ 方向に加 速した解を採用することで, より収束性を高めたものであ る.

5.1.1の例も,原画像から低周波成分の画像を引いたも

のであり,間接的に高周波が強調されていたが,上記の手 法は,直接高周波成分を強調する手法であるため,雑音成 分も大きくする可能性が高く,適度に平滑化を入れる場合 もある.蛇足ながら,高周波強調のフィルターの重みは, 総和が0 (DC 成分を通さない)であるので,形としては, 重み付き移動平均の最初の**Tw**は1と置く.

2次元画像のような空間領域では,ボケた画像の鮮鋭化 (後述)に代表される低周波ノイズ除去となるが,使用対象 が限られるので,詳細は参考文献などを見ていただきたい.

#### 5.1.4 周波数領域における処理

通例,周波数領域で見たときに,信号とノイズが分かれ ている場合も多い.その場合は,単純にノイズの大きい周 波数領域の成分を小さく(あるいは,カット)し,信号の 大きい周波数領域を強調するスペクトルを作ればよい.多 少領域に重なりがあったとしても信号を含まない領域の成 分を小さくすれば,それだけS/N比の向上が見込める.そ のように加工したスペクトルを逆変換すれば,ノイズの少 ない画像が得られる.図5は図1のデータにFFT(Fast Fourier Transform)を使用して,5-15kHzの成分のみを 逆変換して求めた画像で,バンドパスフィルターを通した 画像となっている.FFTを使用する区間を大きくすると時 間がかかるが,より細かい周波数の指定が可能となる.

これまでにあげた移動平均や装置関数の補正などは,演 算としてみるとフィルター関数と画素データの畳み込み積 分の形になっている.それ故,周波数領域で見るとデータ のスペクトルにフィルター関数のスペクトルを掛け,得ら れたスペクトルを時間領域に逆変換した形となっている. すなわち,FFT を利用してスペクトルを計算し,周波数領 域で処理するほうが一般的には自由度が大きい処理方法に なる.但し,計算時間については,畳み込み積分よりFFT の方が時間がかかる場合が多いだろうし,畳み込み積分法 の方が,よりリアルタイムに近い演算ができるため,将来 的にも使用されるだろう.適切なフィルター関数を選ぶに は,テストケースで周波数領域におけるフィルター関数を 探し出し,そのフーリエ逆変換の時間フィルターをあらか じめ作っておくと,畳み込み演算が使用できる.

フーリエ変換以外に、周波数解析にはウェーブレット解 析、最大エントロピー法 (MEM) などもある.フーリエ変 換は三角関数による展開のため、データ中の長周期の解析 や周期が時間により変動する信号解析では精度が悪くなる 性質がある.ウェーブレット解析は、時間により周波数が 変化するような信号解析にも精度が高く、一方、MEM は 長周期の解析に精度が高い.但し、フーリエ変換と異なり、 逆変換不可のものがある.得られたスペクトルを周波数領 域で適宜加工し、逆変換するためには、逆変換可能な離散 ウェーブレット変換などを使用する必要がある.

#### **5.2** 空間領域における処理

空間領域における処理も基本的には時間領域における処 理と同じである.なぜなら,時間も空間も独立次元で,数 学上の差はないから.但し,画像データは2次元空間であ り,信号の多くは2次元空間での相関がある.相関がある かどうかを調べる場合には,相関関数が用いられる.よく 知られているように,相関関数はノイズ(白色雑音)の フィルターとなっているので,ノイズ除去が実施された結 果が期待できる.但し,データの範囲は有限であり,ノイ ズが白色雑音でない場合が多いため,期待した結果になら ない場合もあるだろう.自己相関関数の場合は,Wiener-Khintchineの関係を使って,パワースペクトルをフーリエ 変換する方が,相関関数を直接計算するよりは早いと思わ れる.相互相関関数の場合も同様な関係式があるため, フーリエ変換を使用する方が楽だろう.また,前項に述べ た離散ウェーブレット変換,MEM なども画像の再構成に 使用されている.一般的な写真などのノイズ除去には,こ れらの手法の方がよく使用されていると思われる[5].

空間における微分,積分も1次元から2次元になるだけ で従前の方法が使用できる.画像の場合は、ノイズ除去と して、各種フィルターが用意されるが、ほとんどが2次元 フィルターと原画像との畳み込み積分の形を取る[6].参 考文献以外にも、「画像」「フィルター関数」などで調べれ ば、いろいろ出てくる.畳み込み積分を使用しないフィル ター関数として、メディアンフィルターがある.これは、 ある画素の値を周りの画素の値の中央値に変換する手法 で、境界をほかすことがなく、所謂ゴマノイズ対策に有効 である.この種のフィルター関数もいくつか提案されてい る.総じて、画像上でのフィルター操作のほとんどが、波 数領域でのスペクトルの加工を行っていることと同じであ る.

フィルター関数として,積分系なら平滑化であり,微分系 (差分系)なら高周波強調で,境界(エッジ)強調となる. もちろん,低周波,高周波のどちらも抑制するバンドパス のフィルターも使用できるし,その逆もしかりである.

境界強調ではよく知られた Laplacian フィルターは,空間の2次微分(差分)を使用したもので,

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$
の形などが使用される.これは,  
$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$
とも書ける.即

ち,現画像から単純移動平均を差し引いたものとなってい る.蛇足だが,現画像にLaplacianフィルターの結果を適当 な係数をかけて加えると,鮮鋭化のフィルター関数になる (Unsharpフィルターと呼ばれており,係数は研究者が適 宜選ぶ).単純移動平均の代わりにガウス分布を利用した 重み付き移動平均を利用するなど,応用はいろいろ提案さ れている.

すでに、多くのプログラム言語(有料の IDL, MatLab や無料の Python など)で画像関係のフィルター関数が多

数用意されている. また, ImageJ (Fiji) に代表される無料 の画像処理ソフトなどにも標準、あるいは、プラグインで 各種フィルター関数が用意されている(Fiji はほとんどの プラグインがあらかじめ入っている).もしそれらで機能 が足りない場合は、独自フィルター関数を作成すればよ い. 例えば、波数領域において望ましい加工を実現する フィルター関数を作り、その逆変換を行って、空間のフィ ルター関数を作ればよい. 今日の研究者にとって必要なこ とは、フィルター関数が数学的にどのような処理をしてい るかを理解することであると言ってもよい.後述するが, AI などの導入により研究者が考えなくても"きれいな"結 果が得られるからそれを使うという場合もあるだろう.し かし、処理の中身が分からない物を無制限で使用すること は科学技術分野では控える方が良いと筆者は感じる(論文 などでは再現性を保証するために、使用したソフトとその 処理方法を記述することが必要).

波数領域での処理の一例を図6-9に挙げる. 高速カメ ラの装置ノイズをわざと残した画像(図6)の波数スペク トル(図7)から、マニュアルでノイズ成分と思われる部 分を加工して(図8)、逆変換した例(図9)である. ノイ ズが大きかった場所の周期的ノイズは大部分消えているこ とがわかる. 但し、フィルター関数の最適化は行っていな いので、この例では、一部ノイズが残り、他の部分で情報 が消えてしまっているように見える. このようにフィル ター関数の最適化も研究者が決めることになる.

#### 5.3 時間空間領域における処理

ビデオデータ特有の3次元時空間における信号の時間空間特性(例えば,速さ)などがわかっている場合は,その部分を強調するアルゴリズムを採用すれば,S/N比の向上が見込めるはずである.信号に何らかの空間時間の特性を探す方法として,Singular Value Decomposition (SVD,特異値分解)による解析方法が挙げられる[7].典型的な空間的構造の動きを探るには適切な方法であろう.注意すべき



図6 テスト用高速カメラ画像 (所謂,黒色調整なし.主に横縞ノイズが入っている画像).



図7 図6の空間のパワースペクトル. 図6の横方向をx軸,縦方向をy軸とした.



図8 加工した図7のパワースペクトル. (中央縦ピークを付近の平均値で置き換えた).

は得られた画像の各画素間の同時性は担保されない事であろう.現時点で、3次元以上の領域での強調処理方法は充分開発されているとは言い難い.2次元画像を加工する技術が進み、画像同士の時間軸での関連に関してまだ興味が起きていないのだろう.今後の進展を期待したいところである[8].

最近, AIを使用したノイズ除去方法がWeb上にいくつ か公開されている.例えば,ネットで「画像」「拡大」で調 べると,waifu2xが出てくる.図の拡大が主目的だが,ノイ ズ除去のみにも使用でき,除去レベルを選べる.PC上でも 作動するプログラムもあり,試用してみるのも良いだろう [9]. Deep Learningを使ったアルゴリズムのようで [10],筆者が試用した感触は,輝度,色の変化がはっきり している画像にはかなり有効と感じた.マニュアルで,平 滑化(メディアン)と境界強調を同時に行った雰囲気で あった.

繰り返しになるが、見た目は良くても、どのような処理

Only ky modified



図9 図8のパワースペクトルの図の逆変換 右側にノイズが少し残るが、全体的には加工過剰気味と思われる。

をしているかわからないため,使用する場合は,目的に合 致した処理をしているかどうかを確認すべきである.現画 像と加工後の画像にFFTなどを使用して,波数領域で比較 してどのように加工されているか,あるいは,同じことだ が,加工後の画像と現画像の差を取り,その波数成分を調 べるなど,適切な調査方法をいくつか考えられるだろう.

waifu2x以外にも, AIを利用したソフト(有料, 無料)が 出ており,従来手法を凌駕していくかもしれない[11].但 し,上述したように,見た目はよくても研究者にとって信 号を適切に抽出してくれているかどうかの吟味は常に必要 である.

最後に,ノイズ除去を行うどのような手法も,信号を得 るのに"適切"なパラメータを吟味するのは研究者自身であ ることを忘れてはいけない. "適切"の判断基準は,ノイズ と信号の分離がどの程度行われているか,例えば,周波数 領域での違いなど,が研究者自身が説明できれば良いと考 える.

#### 参考文献

- [1] 南 茂夫:科学計測のための波形データ処理-計測シス テムにおけるマイコン・パソコン活用技術(CQ 出版 社, 1986).
- [2] 河田 聡,南 茂夫:科学計測のためのデータ処理入門-科学技術分野における計測の基礎技術 (CQ 出版社, 2001).
- [3] 例えば、https://home.hiroshima-u.ac.jp/nishino/2018/ keisoku/keisoku.htmlの講義録など、ネットで探せ ば、いろいろあるだろう.
- [4] 例えば,移動平均(Wikipedia 参照),多くの移動平均が 使用される場所は,凡そ市場(相場)の世界である.
- [5] 例えば, JPEG2000 (Wikipedia 参照).
- [6] 于 子涵: "ノイズとヘイズを除去する画像強調",九州 大学工学研究科博士論文(2015).
   https://catalog.lib.kyushu-u.ac.jp?opac\_download\_md?

design0194

- [7] 西野信博, 大館 暁:プラズマ・核融合学会誌 86,648 (2010).
- [8] 厳密には異なるが、HDR (Wikipedia 参照) など.
- [9] https://github.com/nagadomi/waifu2x
- [10] Chao Dong, Chen Change Loy, Kaiming He, Xiaoou Tang, "Image Super-Resolution Using Deep Convolutional Networks", http://arxiv.org/abs/1508-1.00092
- [11] 例えば, https://arxiv.org/abs/1805.01934

# ■ 講座 プラズマ実験におけるノイズ対策の基礎

# 6. ノイズと統計処理

### 6. Noises and Statistical Processing

永島芳彦,稲垣 滋 NAGASHIMA Yoshihiko and INAGAKI Shigeru 九州大学応用力学研究所 (原稿受付:2019年11月1日)

本章では、ノイズによるデータの誤差と誤差伝播、及び誤差評価と誤差低減のための統計処理について基礎 統計学を用いて初学者向けに解説する.実験家は測定量から目的の物理量の真値を表すものとして推定量を用い る.推定量は測定量の線形・非線形関数であり、関数形は直接測定もしくは間接測定の種類に依存する.測定量 にノイズが重畳すると、ノイズが誤差成分として線形・非線形に伝播し、推定量に偶然誤差/ばらつきや系統誤 差/バイアスを与える.ノイズによる誤差を低減するには同一条件の測定量を増やすことが最良である.最後に、 真値が時間的に揺らぐ乱流データの場合の解析例を紹介する.

#### Keywords:

random error, bias, estimator, normal distribution, chi-square distribution, t-distribution, correlation

#### 6.1 はじめに:プラズマ乱流の解析

乱流研究では乱流の何に注目するのか? 瞬時の流速場 が予測できれば理想的だがそこには境界条件等の系の詳細 が必要となる.乱流の本質を理解するためにはそのような 微細構造よりも,系の詳細によらない統計的性質に着目し た方が良い.このため乱流の解析では得られた時系列デー タをしばしば統計処理する.乱流の解析対象は密度や電位 等の物理量の真値の時間変化である.しかし我々が得られ るのはイオン飽和電流のような測定量の時間変化である. 乱流解析では,誤差を含んだ測定量の時間変化である. 乱流解析では,誤差を含んだ測定量をそのまま物理量とし て扱うだけでなく,しばしば誤差を含んだ測定量の非線形 関数によって表される物理量を扱うことも有り,本章では そのようなプラズマ乱流計測を例として,データを統計処 理する手法について述べる.

ここでは測定量が物理確率過程の確率変数とノイズの確 率変数の和であると考える.測定量のデータ解析によって 何がしかを実証する上では,測定値の確からしさの範囲を 規定するために,精度/誤差の評価が不可欠である.極論 すれば,誤差を評価できない測定点は無価値である.あら かじめ測定の誤差が判明していれば最良だが,実験に固有 のノイズの混入を完全に予測することは困難であり,しば しば再現実験を重ねて誤差自体も実験から評価することが 多い.本章では,ノイズを誤差源と捉え,実験データ解析 における誤差への対処法の基礎について初学者向けに解説 する.乱流解析では,揺動データが解析の主対象であるが, 平均値もしばしば用いられる.また,統計処理では平均操 作が本質である.それらの操作と誤差の解釈には統計学の 知識が求められる. 6.2では測定と誤差について概説する. 直接測定と間接測定,偶然誤差/ばらつきと系統誤差/バ イアスについて説明する.6.3では測定に係る用語解説と 準備を行う.母集団や標本,推定量やその種類,標本分布 などを説明する.6.4では直接測定において正規分布の標 本から各種統計量を得るための手法について概説す る.6.5では間接測定における誤差の伝播について述べ る.6.6では,乱流データにノイズが重畳した系の解析例を 示す.乱流では,物理確率過程によって測定量の真値が時 空間で大きく揺らぎ,完全に同一条件下での複数回測定は 難しい.その上測定量にノイズが重畳し,物理確率過程と ノイズの分布とが混在した分布が観測され,分別は一般に 難しい.ここではノイズと物理確率過程を分別する試みを 紹介する.最後にまとめを行う.

#### 6.2 データ解析ではノイズを誤差源と捉える[1]

実験研究者は目的の物理量の値を得るために,直接その 物理量を測定するかあるいは測定可能な別の物理量を測定 し数式を用いて間接的に目的の物理量を計算する.前者の 場合を直接測定,後者の場合を間接測定という.測定量は 物理量の関数であり得られた値を測定値という.ノイズが 無い場合は測定によって測定量(データ)の真値が得られ る.しかし測定値と測定量の真値は一般には異なり,測定 量を用いて目的の物理量の真値を表現する手段として,推 定量という測定量の線形・非線形関数を用いる.関数形は 直接測定もしくは間接測定の種類に依存する.推定量の式 に測定値を代入することで推定値を得て,目的の物理量の 真値の代用品とする.簡単な例として,円の面積という物 理量を半径という測定量から求める場合を考える.実際に

Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Kasuga, FUKUOKA 816-8580, Jaoan

corresponding author's e-mail: nagashima@triam.kyushu-u.ac.jp

半径を測定すると,真の値(定数)にノイズという確率的 な値が加算された値(測定値)が得られる.一回の測定で はノイズの性質がわからないため,測定を複数回繰り返し て得られた測定値(標本)を用いて,例えば平均などの操 作によって真の値を推定する(推定量).詳しくは6.5.1に て述べる.

直接測定と間接測定に係らず、測定対象に確率過程が含 まれなければ、同一実験条件下の複数回測定で測定値は変 化せず集中分布となる(図1(a)).一方しばしばノイズが 測定量に混入し、求める物理量の真値を歪める.ノイズと は、ターゲットの物理量と関連がなく定常的及び確率的に 振舞う測定成分であり、ノイズによって物理量の真値から ドリフトし、また同一条件下の複数回測定によって測定値 に分散が生じる.実際の測定値と測定量の真値との差を誤 差という.誤差として着目されるのは、平均に重畳する成 分と、平均0で分散に重畳する成分である.前者を系統誤 差(systematic error)/バイアス(bias)、後者を偶然誤差 (random error)/ばらつき(dispersion)という.本稿では、 測定量に直接重畳する成分を系統誤差や偶然誤差とし、測 定量の関数で目的の物理量の真値を推定する際に重畳する 誤差成分をバイアスやばらつきと呼ぶことにする.

実験系が十分制御されていない限り,これら誤差成分が 実験前に判明している例は少ない.特に系統誤差は判明し がたく,その発見と対策は一般には大仕事だが,判明すれ ば測定値から差し引くことで除去できる可能性がある.例 えば,オフセット処理は系統誤差除去手段の一つである. 測定の時間帯や測定機器を変えることでも系統誤差の発見 に結びつく場合があり,その過程で系統誤差が偶然誤差に 変化する場合がある.すなわち,系統誤差の発現する条件 がばらつくことで系統誤差自体がばらつく場合である.ま た較正によって系統誤差の一部を除去でき,最良の系統誤 差対策と考えられている.

一方偶然誤差については,偶然誤差の結果測定量が確率 変数として振舞うため,その制御と差分による除去は困難 であり,統計的推測によって真値を推定する.注意すべき は,事前に誤差分散が判明している場合を除き,測定量を



図1 (a) 真値が0の集中分布,(b)標準正規分布,(c)標準正規 分布乱数1000点の度数分布,(d)標準正規分布乱数を9点 平均した平均値推定量1000点の度数分布.横軸の範囲を ±5でプロットしている.(a)は真値,(b)は真値と偶然誤 差で構成される確率変数の母集団分布,(c)は標本,(d)は 標本平均の標本分布を表現している. 得る前は真値のみならず偶然誤差の情報すら持っていない という事実であり,特に,実験前に誤差分散が判明してい ても,実験中に新たに重畳するノイズによって誤差分散が 変化する場合がある.したがって誤差分散も推定すべき量 であり,これを特に推定誤差というが,混同の恐れがない 場合は推定誤差を誤差と呼ぶことが慣例である.

測定量の真値が誤差を含んだ結果,測定量は真値だけで なくバイアスやばらつきが重畳した分布を持つようにな る.この時測定とは,確率や作法に従って分布から標本を 得ることに相当する.標本から真値を推定するには統計学 が必要であり,6.3で述べる.

# 6.3 標本としての測定量と真値の推定[2,3]6.3.1 測定量の真値の推定:統計量/推定量

まず複数の異なる属性を持つ複数の個体が集団を構成し ているとする.統計の対象とする全固体を包括する母集団 (population) があり、その中に各属性の母集団分布 (population distribution) が複数存在する. 測定量を得ることは, 母集団分布を調査してその全部もしくは一部を得ることに 相当する、母集団分布の一部を標本という、母集団分布や 標本は集団であり、集団から分布を特徴付ける量を抽出す る上で統計学を用いる、母集団分布の要素数が有限でかつ その全数を把握できる場合(全数/悉皆調査)では記述統 計学,無作為抽出した標本が有限で母集団分布の要素数よ り少ない場合 (標本調査) では統計的推測 (推計統計学) を 用いる.国勢調査は全数調査の一例である.全数調査と標 本調査では、同じ数学表式でも意味の異なる場合がある. 各調査では分布を特徴付ける量をしばしば調査対象とす る.特徴付ける量とは、分布を代表する量すなわち算術平 均 (arithmetic mean),幾何平均 (geometric mean),頻度 50%の按分点である中央値 (median),分布の峰である最 頻値 (mode),最大と最小の平均であるミッドレンジ (mid-range) 等である. また, ばらつきの尺度すなわち二 次キュムラントの分散 (variance),分散の二乗根である 標準偏差(standard deviation),平均値からの差の絶対値 の平均である平均偏差 (mean deviation), 最大と最小の差 であるレンジ (range) が求められる場合もある.この原稿 では、特に断らない限り、算術平均を平均として用いる.

最も単純な問題設定として,直接測定で系統誤差が除去 され測定量が真値と偶然誤差の和の場合を考える.すなわ ち,測定量を同一母集団から復元無作為抽出し,母集団分 布の一部である標本を得る.標本から真値や誤差分散の同 定は困難だが,母集団分布の平均や分散などを標本から推 定することになる.一般的には母集団分布が少数の母数 (parameter)の関数形であるとは限らないが,標本が少な い場合は,関数形を持つとモデル化して母数を推定する. 正規分布は平均と分散でのみ分布の関数形が決まる例であ る.少数の母数で記述できる分布をパラメトリック分布, それ以外の場合をノンパラメトリック分布と呼ぶ.標本か ら計算された,モーメントなどの分布を特徴付ける量を統 計量(statistic)という.また母数の推定に係る量を推定量 (estimator)といい,一般には統計量と区別される.しばし ば推定量として統計量が用いられるが,統計量ではない量 が推定量として用いられる場合もある.統計量/推定量は 標本のみの関数であり,平均や分散等に対応した関数形が 存在する.

#### 6.3.2 標本分布:統計量自体のばらつき

標本抽出には確率の要素が入るため、統計量自体もばら つきを持つ. 例えば、一回の実験で得た1つのデータは真 値と誤差の和であり、真値と誤差いずれも不明である. 複 数回の実験で得たデータをすべて用いて一つの統計量を得 た場合、そのばらつきも同様に不明である。統計量のばら つきを知る手段として、複数の同一統計量を得る方法があ る. 例えば一日にN回実験しそれをM日実施する場合を考 える.実験日ごとにN回の実験からそれぞれ統計量を 得, M 日の実験で M 個の統計量を得る. 統計量は N 個の確 率変数の関数であり、たとえ異なる実験日でデータの母集 団が変わらない場合であっても、実験日ごとに異なる統計 量が得られ統計量の集団は分散を持つと予想される. その ようにして得られるであろう統計量の集団を標本分布とい い, データの集団である標本と区別される. データ自体の 平均(標本平均)やデータ自体の分散(標本分散)は標本 分布を構成し、統計量もエラーバーを持つ. 実験研究者が データとそのエラーバーを図示/プロットする場合,通常 はデータの真値が何%の確率でエラーバーの中に含まれる かを示す意図があるだろう.測定量が真値と偶然誤差の和 である場合、エラーバーとして表記すべきはデータ自体の 標準偏差(標本標準偏差)ではなく標本分布の標準偏差で ある.標本標準偏差をエラーバーとした場合,エラーバー は真値の納まる範囲確率を規定していない. データが正規 母集団分布を持つ場合,一日 N回の実験から標本平均の標 準偏差を計算でき,標準誤差(standard error)と呼ぶ.

一方分散がノイズ由来のみではなく物理確率過程に強く 依存する場合は,標本標準偏差を表記・プロットすること は物理確率過程の標準偏差を示す意味で一定の意味があ る.しかしそのプロットでは標本標準偏差に含まれるノイ ズすなわち誤差の情報が明示されていないことに留意すべ きである.

#### 6.3.3 同じ母数の推定量は複数種存在しうる

推定量は同じ母数に対しても複数存在し,それぞれ基準 が異なる.以下に,推定量の基準の例を述べる.

○一 致 性:標本の要素数を増加させた場合に,推定量 が母数に漸近する.推定量自体の期待値が 母数に一致するとは限らない.

○不 偏 性:偏りが無く,推定量の期待値が母数になる.

○有 効 性:推定量のばらつきがより小さいことを言う.
 ○漸近正規性:標本の要素数を増加させた場合に,標本分布が正規分布に漸近する.

ー致性と不偏性は特に重要な基準で、その推定量の極限 が求める母数であることを担保する.以下に、平均と 分散を例に推定量の違いを説明する.用いるデータ  $[X_1, X_2, ..., X_i, ..., X_n]$ について、記述統計学の場合は全要 素、統計的推測の場合は標本かつ $X_i$ は確率変数である.ま た n はデータ数である.平均モーメントの表式は、

$$\mu = \sum_{i=1}^{n} X_i / n \tag{1}$$

$$\overline{X} = \sum_{i=1}^{n} X_i / n \tag{2}$$

(1)は記述統計学の母平均,(2)は標本平均で統計的推測 では母平均の不偏推定量(unbiased estimator)である.平 均の推定では,記述統計学と統計的推測では同一の数学表 現である.nが大きくなるにしたがって標本平均はほぼ母 平均とみなせることを大数の法則という.また,元の確率 変数の母集団分布がどのような確率分布でも,nが大きく なるにしたがって標本平均の標本分布は母平均の近傍で正 規分布に漸近する定理を中心極限定理という.

一方二次キュムラントである分散の表式は,

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^{n} (X_i - \mu)^2 / n \tag{3}$$

$$s^{2} = \sum_{i=1}^{n} (X_{i} - \overline{X})^{2} / n \tag{4}$$

と書ける.(3)は記述統計学の母分散,(4)は標本分散で 統計的推測では母分散の一致推定量である.その期待値は 母分散に一致しないが,母集団分布の要素数が無限大で標 本数が母集団分布に漸近する極限では母分散に一致する. 更にモーメントそのものではないが,以下の表式

$$u^{2} = \sum_{i=1}^{n} (X_{i} - \overline{X})^{2} / (n-1)$$
(5)

は統計的推測における母分散の不偏推定量であり,その期 待値は母分散に一致する.分散の推定では,記述統計学と 同じ数学表現を用いた場合は不偏ではない推定量となる. データ分析で採用されるのは不偏推定量が多数だが,用途 によって不偏でない推定量が選ばれる場合もある.また, 適切な不偏推定量が存在しない例もある.その場合はバイ アスを考慮しなければならない.

中心極限定理に従い,標本平均の標本分布は n が大なる に従って正規分布に漸近する.さらに正規分布の再生性を 用いると標準誤差は

standard error = 
$$u/\sqrt{n}$$
 (6)

と書ける.分布の再生性とは、同種の確率分布で独立な確 率変数同士の和の確率分布について、その平均と分散が元 のそれらの算術和となり、元の確率分布が再生される性質 を言う.平均の結果、データ数の増大に伴い標準誤差は縮 小していく.このことは、標本平均の期待値が母平均に一 致することから理解できる.標準誤差は、一般的にはエ ラーバーの正確な範囲を規定するものではないが、ある種 の目安を与える.図1はデータの各種分布を示している. (a)はデータに揺らぎが無い場合の真値が0の集中分布、 (b)は標準正規分布、(c)は標準正規分布乱数1000点の度 数分布、(d)は標準正規分布乱数を9点平均した平均推定 量1000点の度数分布である.(d)では9点平均によって分 散が縮小される.

統計量/推定量を用いてある一つの値として母数を推定 する手段を点推定という.点推定における推定量の導出法 として,分布のモーメントを算出するモーメント法と,対 数尤度関数の極値を持つ条件から算出する最尤法の2種類 がある.最尤法では確率分布関数の微分操作を行うため, 背景確率分布のモデル化が必要である.正規母集団分布の 場合には,モーメント法と最尤法の平均及び分散の推定量 は一致する.最尤法で求めた推定量を最尤推定量という. 点推定においてエラーバーとして標本分布の標準偏差を用 いる場合,真値が上下のエラーバーの範囲に存在する(当 たりの)確率は正規分布の場合は70%程度であり,範囲外 に存在する(はずれの)確率が30%程度存在する.また データから得られる標準偏差はばらつきを持ち,エラー バーの範囲に真値が納まる確率を厳密には定義できない. 当たりの確率範囲を規定する手段として,次章で述べる区 間推定がある.

#### **6.4** 正規母集団からの区間推定[2,3]

区間推定は,真値の入る範囲の確率を決め,確率分布の 積分がそれと一致するような積分区間を求める推定法をい う.統計量の背景確率分布を既知の関数でモデル化するこ とで範囲確率を規定できる.測定量の確率分布を正規分布 としてさらに標準化(確率分布から平均を差し引き標準偏 差で除する)すると,標準正規分布から派生した種々の関 数モデルが確率分布に適用できる.真値が納まる範囲の確 率(信頼係数1-αという)を厳密に指定したい実験に有効 である.このときαははずれの確率で,しばしば上側と下 側で α/2 ずつ積分区間を按分する.真値の(上下)範囲を (上側/下側)信頼限界という.通常は中心極限定理を根拠 として,どのような確率変数の平均値でも確率分布が正規 分布に従うとして理論展開される.さらにデータの確率分 布を標準化し,各種統計量が従う標準正規分布を用いた (別の)確率分布モデルを用いる(図2).

#### 6.4.1 母分散が既知の場合の母平均の区間推定

母平均 μ が不明の状態で母分散だけがわかっている場 合,平均値の確率変数 X を標準化して標準正規分布に従う 統計量 z を定義し,

 $z = \sqrt{n} \left( \overline{X} - \mu \right) / \sigma$ 

と書く.このときσは既知の母標準偏差である.母分散が



図2 正規分布の区間推定の概念図.αははずれの確率を表す.統 計量が標準正規分布に従う場合、上下側の積分確率がそれ ぞれα/2となる区間の境界を±Zα/2で表す.Zは正規分布を 表す.

既知のケースはまれであるが,よく制御された実験では信 号が来る前のノイズの振る舞いから分散を別途求め,分散 が既知とできる場合があるかもしれない. z の確率が

$$P(-Z_{\alpha/2} \le z \le Z_{\alpha/2}) = 1 - \alpha$$

と書けることから信頼係数1-αの母平均μの上下信頼区間

$$\overline{X} - Z_{\alpha/2}\sigma/\sqrt{n} \le \mu \le \overline{X} + Z_{\alpha/2}\sigma/\sqrt{n}$$

が決定される.この表式は,真値が標本平均±ファクター をかけた標準誤差の範囲に納まることを意味し,このファ クターが範囲の確率を規定する.

#### 6.4.2 母分散の区間推定:x<sup>2</sup>統計量

前節では母分散がわかっている場合の推定を述べたが, 一般的には母分散は不明であり,推定誤差としてデータから推定する必要がある.確率変数が標準正規分布に従うと きその不偏分散を用いた次の表式

$$\sum (X_i - \overline{X})^2 / \sigma^2 = (n-1) u^2 / \sigma^2 = \chi_{n-1}^2$$

は自由度 n-1 の  $\chi^2$  分布に従う. 母分散  $\sigma$  の信頼区間は,

$$(n-1)u^2/\chi^2_{n-1} \leq \sigma^2 \leq (n-1)u^2/\chi^2_{n-1} \leq \sigma^2$$

と書ける. すなわち, 母分散が確率1-a内に納まる範囲は 不偏分散にファクターを乗じた(除した)範囲で規定され る.  $\chi^2$ 分布の期待値は自由度と同一,分散は自由度の2倍 であり,自由度が増すに従って変異係数=標準偏差/期待 値は縮小する. また自由度はデータ数-1に相当し,自由 度が増すに従って正規分布に漸近する.

#### 6.4.3 母分散が不明の場合の母平均の区間推定: t統計量

母平均と母分散の両者が不明の状態では,平均値の確率 変数*X*を標準化する際は母分散の代わりに不偏分散を用い る.6.4.1では確率変数は統計量の分子のみに存在したが, 本節では統計量の分母と分子がそれぞれ確率変数であるた め,得られた統計量は標準正規分布とはならない.このと き標準正規分布の統計量の代用品である*t*統計量を定義 し,

 $t_{n-1} = \sqrt{n} \left( \overline{X} - \mu \right) / \sqrt{u^2}$ 

と書く. これは正規分布を $\chi^2$ 分布の二乗根で割った形になり,自由度n-1のt分布に従うことが知られている. t分布は自由度が1の時はローレンツ分布となる. これより,母平均 $\mu$ の上下信頼区間

 $\overline{X} - t_{n-1,a/2} u / \sqrt{n} \le \mu \le \overline{X} + t_{n-1,a/2} u / \sqrt{n}$ 

が決定される.

#### **6.5**間接測定と誤差分散の伝播[1]

間接測定では、求める物理量  $\phi(x, y,...)$ が測定量 x, y,...の関数である.測定量はそれぞれ確率変数 X, Y,... であるため、求める物理量も確率変数  $Z = \phi(X, Y,...)$ にな る.このとき、測定量の誤差が線形・非線形に伝播する. 特に、偶然誤差の二乗がしばしば平均値へバイアスを与え る.ばらつきについては、通常は誤差成分が小さいとして 関数のテイラー展開の1次の項のみ採用し,分散の算術和 から分散の伝播を考える.一方,偶然誤差と系統誤差では 伝播の考え方が異なる.まず,最も単純な例を挙げて,偶 然誤差がバイアスとばらつきの両者に伝播する様子を示 す.次に偶然誤差の分散の伝播から,一般的な誤差伝播の 表式を示す.最後に系統誤差の伝播の考え方を紹介する.

#### 6.5.1 間接測定時の平均操作

まず間接測定での平均への影響を述べる.ノギス等を用い て円の直径を直接測定し,半径を二乗して円の面積を間接 的に推定する.この時 $\phi(x, y,...) = \pi x^2$ と書ける.直接測定 のノイズによる偶然誤差を平均操作によって低減させる が,平均操作の手順は2種類考えられる.面積を算出した 後に平均操作を行うもしくは半径を平均した後に面積を算 出する.測定量の独立な確率変数 $X_i$ が平均 $\mu$ ,分散 $\sigma^2$ を持ち,真値 $\mu$ と確率変数の誤差項 $\epsilon_i$ の和 $X_i = \mu + \epsilon_i$ とし て書け,さらに誤差項同士は無相関とすると,両者では得 られる平均値が異なる.前者は標本平均の統計量であり,

$$\overline{A} = \pi \sum_{i}^{n} X_{i}^{2} / n = \pi \left[ \mu^{2} + \sum_{i}^{n} \varepsilon_{i}^{2} / n + 2\mu \sum_{i}^{n} \varepsilon_{i} / n \right]$$

と書ける一方,後者は統計量ではないが面積推定量であり,

$$\hat{A} = \pi \left(\sum_{i}^{n} X_{i} / n\right)^{2} = \pi \left[ \mu^{2} + \left(\sum_{i}^{n} \varepsilon_{i} / n\right)^{2} + 2\mu \sum_{i}^{n} \varepsilon_{i} / n \right]$$

となる. それぞれの期待値は,

$$E[\overline{A}] = \pi (\mu^2 + \sigma^2),$$
  
$$E[\hat{A}] = \pi (\mu^2 + \sigma^2/n).$$

であり、いずれの面積も期待値は真値 $A = \pi\mu^2$ と一致せず、 不偏性を持たない. Â,  $\overline{A}$  では第二項が二次の項で平均値 の正への偏りの原因である. Â の第二項には異なる誤差項 同士の積  $\varepsilon_i \varepsilon_j$  が含まれるが、誤差項同士が独立である場合 にはその期待値はゼロとなる. 間接測定では、このように 直接測定の偶然誤差が伝播してバイアスになる場合があ る. 更に、平均操作の段階によってバイアス項の大きさが 異なる. この例では、面積算出前に平均操作した方が、面 積算出後に平均操作した面積推定量と比較して 1/n だけ期 待値のバイアス項が縮小され、また、計算された面積推定 量は一致性を持つ. いずれの場合もバイアス項を除去する ために直接測定の分散の推定量が必要なことに留意する.

上記の例では,確率変数の平均を間接測定に入力した場 合と,素の確率変数を間接測定に入力した結果の確率変数 を平均化した場合とでは,期待値が異なっていた.両者が 相違するか否かは推定量の関数形に依存する.また,事前 の平均操作が望ましくない場合もある.例えばフーリエ解 析における相関解析では,2つのフーリエ成分自体の絶対 位相ではなく成分間の位相差が重要な情報源である.複素 数であるフーリエ成分の偏角は実験ごとに異なり且つばら つくケースがある.その場合,事前の平均操作は絶対位相 を平坦化して重要な位相差の情報ごと消去するため,やっ てはいけない操作である.このようにデータ分析では推定 量が含む情報をよく理解し吟味した上で,あくまでデータ 数の増大によってノイズを低減する対策が基本となる. 6.5.2 間接測定時の偶然誤差の分散の伝播

次に偶然誤差による間接測定の分散への影響を述べる. 物理量 $z = \phi(x, y, ...)$ の真値 $z_0 = \phi(x_0, y_0, ...)$ は,測定量の真 値 $x_0, y_0, ...$ の関数である.測定量の確率変数X, Y, ...は互い に独立である.このとき測定量の真値からのずれが小さい として,物理量 $z = \phi(x, y, ...)$ をx, y, ...に関して真値の周り のテイラー級数展開し1次の項のみを取り上げると,

$$z-z_0=\frac{\partial\phi}{\partial x}\bigg|_{x=x_0}(x-x_0)+\frac{\partial\phi}{\partial y}\bigg|_{y=y_0}(y-y_0)+\cdots$$

この式の測定量*x*, *y*,... を確率変数*X*, *Y*,... に置き換えて,式 全体を二乗し期待値を取ると間接測定の分散 *σ*<sup>2</sup> は,

$$\sigma_Z^2 = \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\Big|_{x=x_0}\right)^2 \sigma_X^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\Big|_{y=y_0}\right)^2 \sigma_Y^2 + \cdots$$

 $\sigma_X^2, \sigma_Y^2, \dots$  は確率変数の母分散である.このとき,異なる (真値を差し引いた)確率変数同士の積の項は偶然誤差の 独立性のため期待値 0 としている.いくつかの条件を前提 として,正規分布に係らずこのように母集団分布の分散が 伝播される.先の面積の例では, $\sigma_Z^2 = 4\pi^2 \mu^2 \sigma_X^2$ となる.

#### 6.5.3 間接測定時の系統誤差の伝播

最後に間接測定の系統誤差の影響を述べる.系統誤差は バイアス成分が主であるが,意図せず実験条件が変わるな どの原因によってばらつく場合がある.したがって,系統 誤差伝播の表式は2種類考えられ,1次の誤差項の算術和 に相当する場合と分散の伝播と同様に誤差項の二乗の算術 和の場合との2ケースがある.系統誤差をδ<sub>x</sub>,δ<sub>y</sub>,...とする と,

$$\delta_{Z} = \left| \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{0} \left| \delta_{X} + \left| \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_{0} \right| \delta_{Y} + \cdots,$$
  
$$\delta_{Z}^{2} = \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{0} \right)^{2} \delta_{X}^{2} + \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_{0} \right)^{2} \delta_{Y}^{2} + \cdots$$

このとき偏微分の下添字の0は原点の周りを意味する.前 者が算術和に相当しバイアス成分が主である.後者は系統 誤差が累積され偶然誤差のようにふるまうケースである.

#### **6.6** 乱流解析[5,6]

乱流を理解するためには統計的性質を抽出し粗視化する 必要がある.中性流体乱流ではエネルギースペクトルや流 れの速さ分布が注目されている.プラズマでは多様な不安 定性と飽和機構が共存・競合し外力と釣り合う,と考えら れており,その釣り合い状態では様々な時空間スケールの 波が次々と生まれては消えている(非定常状態の集合), という描像が確立されている.このようなプラズマ乱流を 特徴付ける性質としてフーリエスペクトルが注目されてき た.フーリエ変換は元の波形データの情報をすべて含みま た逆変換によって元に戻せることから,波形データの情報 の過不足なく分析が可能な変換操作であり,揺動解析に広 く利用される.特にその位相情報は波動の伝播や揺動駆動 輸送・波動間結合など種々の高度な物理過程を推定する上 で極めて有用である.特別推進研究「乱流プラズマの構造 形成と選択則の総合的研究」(2004年~2008年,研究代表者 伊藤早苗)において,乱流研究における理論・計算・実験 の統合研究が進展した.ドリフト波乱流を基軸としたマル チスケール間結合をキーワードに,特に実験解析の手法に 劇的な開拓が見られ,それらの一部は本学会誌の小特集 「プラズマ乱流実験の新展開」[7]でまとめられている.

基礎となった解析手法は、実時間データ及び元データに フーリエ変換を介した後の強度分析及び二次的な時空間相 関解析や三次相関解析である。例えば、実時間データの詳 細観察から対象実験系の非定常性を紐解いた永島・荒川 「乱流素過程の詳細計測について」[8]、二次元スペクトル 解析を三次相関解析に発展させまた乱流スペクトルの非定 常性を時空間に適用した山田・Oldenbürger「乱流解析法 の進展について-マルチスケール結合」[9]、そしてそれら 手法を大規模トロイダルプラズマに応用し核融合研究への 展開を示した田村・稲垣「輸送のエッジ-コア結合と長距 離相関を持つ揺らぎの発見」[10]等が挙げられる。図3で は、同一トロイダルプラズマ乱流を対象に、測定点が異な る揺動間(揺動の物理量自体も異なる)の二次非線形性を 実証したクロスバイコヒーレンス解析であり、マルチス ケール間結合を実証した先駆的な研究である。

このようにプラズマ乱流研究ではフーリエスペクトルから乱流の基礎過程を推定しているため,如何に正しいフーリエスペクトルが得られるかが重要である.

ここでは、乱流の波形データをフーリエ変換しスペクト ル解析を行った例について紹介する.乱流の測定量を確率 変数とノイズの和とすると、両者の分別は一般には困難で あるが、ある程度は相関解析によって除去可能である.ま ずノイズの影響について述べ、次にパワースペクトルやバ イスペクトルの分散について説明する.最後に、ノイズに よってバイアスが発生した失敗例とその対策例を示す.

#### 6.6.1 独立なノイズと信号のクロストーク

定常性を仮定しない一般的な場合では,測定量の時間変 動は次のように書ける.

 $x(t) = \langle x(t) \rangle + \tilde{x}(t) + \tilde{n}_{x}(t)$ 



図3 マイクロ波反射計による密度揺動と ECE 輻射計による低周 波放射温度揺動間のクロスバイコヒーレンス[4].

 $\langle x(t) \rangle$  は時刻 t でのアンサンブル平均,  $\tilde{x}(t)$  は時刻 t での 測定量の揺らぎの成分,  $\tilde{n}_x(t)$  は時刻 t での測定量のノイズ 成分である.すなわち,測定量の背景確率分布が時間変動 する.実際には揺らぎの定常性(一次と二次のモーメント のみの弱い定常性と高次モーメントを含む強い定常性があ る)を仮定し,しばしば有限時間幅のデータを抽出し次の 表式が用いられる.

 $x = \overline{x} + \tilde{x} + \tilde{n}_x$ 

 $\bar{x}$  は時間平均成分,  $\bar{x}_x$  は時間揺らぎの成分,  $\bar{n}_x$  は測定量の ノイズ成分である.ノイズ成分は同一母集団分布から復元 抽出した偶然誤差のみとしている.有限時間幅がサンプリ ング帯域効果の下限周波数を決める.フーリエ解析では検 出可能な周波数より低周波成分を除去する目的で,単純な 定常成分である時間平均を取り除くよりも,波形の勾配傾 向を含む線形トレンド除去を前処理として行うことが多い.

揺らぎ信号を対象とするため,二次以上のモーメントが 解析の対象となる.分散・共分散の時間平均は,

$$\frac{\overline{(\tilde{x}+\tilde{n}_x)^2}=\overline{(\tilde{x})^2}+2\overline{(\tilde{x}\tilde{n}_x)}+\overline{(\tilde{n}_x)^2},}{\overline{(\tilde{x}+\tilde{n}_x)(\tilde{y}+\tilde{n}_y)}=\overline{(\tilde{x}\tilde{y})}+\overline{(\tilde{x}\tilde{n}_y)}+\overline{(\tilde{y}\tilde{n}_x)}+\overline{(\tilde{n}_x\tilde{n}_y)},}$$

と書ける.ノイズと揺らぎ信号の分別は、両者が独立であ りその期待値が0となる仮定/性質を利用する.

分散については第2項の期待値は0だが,第3項はノイズの振幅成分で必ず分散にバイアスし除去は不可能である.

共分散については,第二項以降のノイズと信号間やノイズ同士の共分散は,独立性が明らかであれば期待値は0である.すなわち,共分散/相関を大量の測定量で計算すればノイズと物理確率過程の揺らぎを分離可能である.

実際には、クロストークがある場合には第2項以降もバ イアスの原因になりうる.信号源が測定器のセンサー以外 の箇所から信号に混入し、また複数信号間のクロストーク によって互いの信号が他方のノイズ成分に重畳する.クロ ストークを含む信号処理上の対策はノイズ成分振幅に対す る信号成分振幅の比を高め、バイアス項の上限を定めるこ とが必要である.バイアスの問題は、後述するが、クロス トークが無くとも揺動解析では避けられない課題である. 次節以降はノイズ同士やノイズと信号間で独立が保たれて いるとして解説を進める.

#### 6.6.2 **パワースペクトル**

揺らぎの信号のフーリエ解析で代表的なものはパワース ペクトル解析である.高速フーリエ変換で得られた複素 フーリエ振幅を用いて直接パワースペクトルを推定する. 複素フーリエ振幅はその定義から測定量x(t)の線形関数  $X(\omega) = \sum x(t_k) \exp(-i\omega t_k) \Delta t$  であり、測定量のノイズも 線形に重畳する.直接フーリエ変換によるパワースペクト ル推定量は実部と虚部の二乗和であり、

$$S(\omega) = \frac{2\pi}{T} |X(\omega)|^2 \propto |\text{Re}X(\omega)|^2 + |\text{Im}X(\omega)|^2$$

のように複素フーリエ振幅の位相情報を消去して振幅成分 のみを抽出する.元の測定量 x(t) が平均の正規分布に従う 確率変数であるとすると,推定量はその二乗和の確率変数 であり、フーリエ振幅から直接求めたパワースペクトルは 自由度 2 の $\chi^2$ 分布に従うとされる.自由度 2 では変異係数 は $\sqrt{2-1}/(2-1)=1$ でありすなわち誤差100%を意味する. 一方、アンサンブル平均数を増すことで $\chi^2$ 分布の自由度も 増し、変異係数は減少する.アンサンブル平均数が *n* の時 に変異係数 $\sqrt{2n-1}/(2n-1) \sim 1/\sqrt{2n}$ は積算数の二乗根の逆 数に依存して変異係数が改善され、フーリエ振幅を直接用 いたパワースペクトル推定の誤差分散の規準を与える.

一方,ノイズは二乗和にバイアスとして重畳する.この バイアスはアンサンブル平均操作によって減少せずしばし ばノイズフロアと呼ばれる.ノイズフロアの検出には,通 常信号が飛来しないタイミングにおいて測定器を動作さ せ,バックグラウンドノイズを見て判断する.また,信号 の受信外周波数帯域のノイズフロアの性質を受信帯域に外 挿する手法が考えられる.

#### 6.6.3 複素スペクトル (バイスペクトルを例に)

フーリエ解析の強みは、信号の位相情報を複素数の位相 角に含められる点である。クロススペクトルは周波数/波 数が等しい2点のフーリエ成分間の位相差と波形の保存の 程度を表し、共分散(2点相関)に相当する。またバイス ペクトルは三波結合の位相角や保存の程度を表し、3点相 関を表す.いずれも複素数であり、バイスペクトルを例に それら複素スペクトル推定量の分散を示す.バイスペクト ルの不偏推定量が次のように書けるとする.

$$\hat{B}(\omega_3) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^{M} X_j(\omega_1) X_j(\omega_2) X_j^*(\omega_3),$$
  
$$\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$$

下添え字*i*は複数データセットの番号を表し,*M*はデータの積算数である.すなわち,複数データを平均して推定量とする.バイスペクトル推定量の期待値は,

$$E[\hat{B}(\omega_3)] = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^{M} E[X_j(\omega_1)X_j(\omega_2)X_j^*(\omega_3)] = B(\omega_3)$$

となる.一方次のように変数を定義する.

$$P(\omega) = E [|X(\omega)|^{2}],$$
  
$$b(\omega_{3}) = \frac{B(\omega_{3})}{\{E [|X(\omega_{1})X(\omega_{2})|^{2}]\}^{1/2} \{E [|X(\omega_{3})|^{2}]\}^{1/2}}$$

前者はパワースペクトル,後者はバイコヒーレンスと呼ば れバイスペクトルを規格化した量である.この時バイスペ クトル推定量の分散は,

$$\sim \frac{P(\omega_1)P(\omega_2)P(\omega_3)}{M} \left[1 - b(\omega_3)^2\right]$$

である.すなわち,各周波数成分の振幅二乗の積とバイス ペクトル推定量の期待値の二乗との差分が分散に相当す る.データ積算数に反比例して分散が減少する特徴があ る.特に,バイスペクトル推定量の期待値が小さい極限で, 振幅二乗の積を積算数で除した値に収束する.これにより 初めに定義した推定量が期待値に収束することと整合して いる.

一方,クロススペクトルやバイスペクトルの有意性検定 には、しばしば各スペクトルを規格化したクロスコヒーレ ンス/バイコヒーレンスが用いられる.背景の揺らぎがノ イズや物理確率過程であるかに係らず、クロスコヒーレン ス/バイコヒーレンスによって特定の周波数及び周波数間 の線形/非線形相関の有意性が判明する.

バイコヒーレンス推定量の表式は,

$$\hat{b}(\omega_{3}) = \frac{\left|\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}X_{j}(\omega_{1})X_{j}(\omega_{2})X_{j}^{*}(\omega_{3})\right|}{\left[\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}|X_{j}(\omega_{1})X_{j}(\omega_{2})|^{2}\right]^{1/2}\left[\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}|X_{j}(\omega_{3})|^{2}\right]^{1/2}},$$

 $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ 

また,バイコヒーレンス推定量の分散は,近似的に次のように書ける.

$$Var[\hat{b}(\omega_3)] \sim Var\left[\frac{\hat{B}(\omega_3)}{P(\omega_1)P(\omega_2)P(\omega_3)}\right] \\ \sim \frac{1}{M} [1 - b(\omega_3)^2]$$

特に,バイコヒーレンスが小さい場合は,バイコヒーレン ス推定量の分散は1/M となり,標準偏差は積算数の二乗根 に反比例する.すなわち,積算数に応じて精度が改善され る.文献ではしばしばバイコヒーレンス推定量の二乗が三 波非線形性の有意性の指標として用いられる.この時,バ イコヒーレンス推定量の二乗には,バイコヒーレンス推定 量の分散がノイズフロア(バイアス)として重畳する.こ れを特に有意水準と表現し,この値を超えた場合に信号が 有意であるという判断に用いられる場合がある.図4で は,乱流計測におけるバイコヒーレンス推定量の二乗の積 算数依存性を表している.ノイズフロア(バイアス)が積 算数に応じて減少していく様子がわかる.

図4のような図を収束曲線と表現し,通常は得ることが できないデータ数無限大すなわちバイアス0における極限 値の推定に用いる.収束曲線を直線回帰分析し,そのy 切片の推定量が十分議論に足る精度を持つまでデータを収 集する.つまり,収束曲線はデータを取得する数の目安を 与える.実験回数を無限回にはできないため,実験回数を 設定する上で参照される.直線回帰の際は,収束曲線上の 点ごとに誤差が異なることに注意する必要がある.



図4 二乗バイコヒーレンスのデータ積算数依存性. (a)乱流と 帯状流の結合の場合,(b)乱流間の結合の場合.二乗バイ コヒーレンスにはバイコヒーレンス推定量の分散がバイア スとして重畳する.文献[11]より引用.

#### 6.6.4 測定チャンネル数の設計:少々の失敗例とその改 善例

プラズマ実験では、しばしば空間2点の静電ポテンシャ ルデータのの差分から電磁的でない電場を計算し、また空 間3点のデータから直交する2方向の電場が計算可能であ る.そのようにして E×B 速度による静電揺動運動量束を 求める.例えば、次のような表式

$$\begin{split} E_{\rm r} &\sim -\frac{\tilde{\varPhi}_3 - (\tilde{\varPhi}_1 + \tilde{\varPhi}_2)/2}{d_{\rm r}}, \qquad E_\theta \sim -\frac{\tilde{\varPhi}_2 - \tilde{\varPhi}_1}{d_\theta} \\ v_r v_\theta &\sim -\frac{\tilde{E}_{\rm r} \tilde{E}_{\,\theta}}{B^2} \\ &\propto \tilde{\varPhi}_3 \tilde{\varPhi}_2 - \tilde{\varPhi}_3 \tilde{\varPhi}_1 + (\tilde{\varPhi}_1^2 - \tilde{\varPhi}_2^2)/2 \end{split}$$

のように、2つの直交する電場ベクトルに共通の信号が含 まれる.測定量にノイズが含まれる場合、

$$\begin{split} E_{\rm r} &\sim -\frac{\tilde{\varPhi}_3 - (\tilde{\varPhi}_1 + \tilde{\varPhi}_2)/2}{d_{\rm r}} - \frac{\tilde{n}_3 - (\tilde{n}_1 + \tilde{n}_2)/2}{d_{\rm r}},\\ E_\theta &\sim -\frac{\tilde{\varPhi}_2 - \tilde{\varPhi}_1}{d_\theta} - \frac{\tilde{n}_2 - \tilde{n}_1}{d_\theta},\\ v_{\rm r} v_\theta &\propto \tilde{\varPhi}_3 \tilde{\varPhi}_2 - \tilde{\varPhi}_3 \tilde{\varPhi}_1 + (\tilde{\varPhi}_1^2 - \tilde{\varPhi}_2^2)/2 \\ &\qquad + \tilde{n}_3 \tilde{n}_2 - \tilde{n}_3 \tilde{n}_1 + (\tilde{n}_1^2 - \tilde{n}_2^2)/2. \end{split}$$

と書ける.ここに、 $d_{\theta}$ 、 $d_{r}$ はそれぞれポロイダル方向と径 方向の電極間距離である. その期待値はノイズ同士が独立 であっても特に第6項にノイズによるバイアス項が存在す る. すなわち, E×B ドリフト速度の揺らぎによるレイノ ルズ応力の測定を3点プローブで実施した場合,除去困難 なバイアスが発生する.これは、3点のプローブでレイノ ルズ応力を推定した際に、ノイズ成分の独立性が一部損な われたことに起因する.バイアスの量は極めて微小でコ ヒーレントな揺らぎの系では信号ノイズ比が極めて高いこ とから定量的評価が実施できたが、対象が乱流の場合では 応力に寄与する帯域幅の増大に従ってノイズの寄与は増大 するのに加え、本信号の相関が低下する.本計測器の乱流 への適用は困難と判断し、測定器を大幅に改良した. 改良 後は, 観測点を4点に増強し, 電場を計算する上で用いる データの重複を回避し,乱流解析に応用する準備を整え, 実際に乱流の統計則の研究に発展させる端緒となった.

#### 6.7 むすび

以上,データ解析におけるノイズの考え方の例につい て,基礎統計学を軸に乱流実験を具体例に挙げつつ述べ た.基礎統計学の端緒では,正規分布モデルと確率変数の 線形和が主に用いられる.線形システム上でのデータ解析 と誤差評価は,対象実験系の解釈を限定的にするが最も理 論が確立しており,本章がその学習と理解の一助になれば 幸いである.一方,データ解析が複雑になり特に非線形に 係る解析では誤差評価も難しくなり,しばしば研究者自身 が新規に誤差評価を定式化する必要性が発生する.しかし まさにその部分に物理理解の発展があると信じ読者の挑戦 を促したい.

最後に、ノイズというと求める信号に対して取り除くべ きものというイメージが先行している.業務としては尤も であるが、しばしば時系列システムのモデルでは、いわゆ る「ノイズ」が駆動元に組み込まれ、システムの存在には 不可欠になっている.すなわち、物理系の存在には必然的 に「ノイズ」が伴う場合がある.対象系を理解できるかど うかはともかく、ノイズに一番近い実験家が真実に一番近 いともいえる.ノイズを忌避するというよりは、うまく付 き合うことで次の発見と発展があるかもしれず、実験家の 奮闘を期待したい.

#### 謝 辞

本章の根源となった,伊藤早苗九州大学名誉教授と伊藤 公孝核融合科学研究所名誉教授そして藤澤彰英九州大学教 授の,これまでの丁寧なかつ忍耐強い指導に謝辞を申し上 げる.当方は実験家でありながらノイズについて理論家ら に多くを教えていただいた.本章の執筆にあたり科学研究 費補助金基盤研究A(15H02335)及び特別推進研究 (17H06089)の支援を受けた.

#### 参考文献

- [1] 吉沢康和:新しい誤差論(共立出版株式会社, 1989).
- [2] 東京大学教養学部統計学教室 編:統計学入門(基礎統 計学I)(東京大学出版会, 1991).
- [3]東京大学教養学部統計学教室編:自然科学の統計学
   (基礎統計学Ⅲ)(東京大学出版会,1992).
- [4] N. Tamura *et al.*, *Proc. 23rd IAEA Fusion Energy Conference* (Daejeon, South Korea, 2010), EX-C/P-16.
- [5] 日野幹雄:スペクトル解析(朝倉書店, 2010).
- [6] Y.C. Kim and E.J. Powers, IEEE Trans. Plasma Sci. 7, 120 (1979).
- [7] 稲垣 滋 他:プラズマ・核融合学会誌 88,300 (2012).
- [8]田村直樹,稲垣 滋:プラズマ・核融合学会誌 88,302 (2012).
- [9] 永島芳彦, 荒川弘之: プラズマ・核融合学会誌 88,15 (2012).
- [10] 山田琢磨, OLDENBÜRGER Stella:プラズマ・核融合 学会誌 88, 309 (2012).
- [11] Y. Nagashima, Rev. Sci. Instrum. 77, 045110 (2006).

# ■ 講座 プラズマ実験におけるノイズ対策の基礎

7. まとめ

### 7. Summary

井 通 暁,浅 井 朋 彦<sup>1)</sup> INOMOTO Michiaki and ASAI Tomohiko 東京大学大学院新領域創成科学研究科,<sup>1)</sup>日本大学理工学部 (原稿受付:2019年10月16日)

量子力学における不確定性原理とは意味が違いますが, 現実の実験において「完全な観測」はありえません. 仮に ノイズを全く含まず,正確に校正された理想的な測定器が あっても,出力信号を読み取るデジタルオシロスコープの 性能や設定により分解能(2.1.2.6)と測定できる信号の大 きさの範囲(レンジ)が,また時間方向についても分解能 (2.1.2.6, 2.2.3)と測定できる時間幅が制限されます.適 切な観測を行うためには,観測したい信号の大きさ,変化 量,現象の時間スケールや変化速度などに合わせてオシロ スコープの設定を調整する必要があります.多くの場合, 信号分解能と測定レンジ,時間分解能と測定時間幅とはト レードオフの関係にあり,いずれかを犠牲にしなければな りません. つまりこれは,計測において,

#### ① 観測したい信号の性質を理解しておくこと

が重要であること、またどんなに適切な計測をしても

#### ② 測定値からは、すでに一部の情報が失われている

という事実を示しています.「完全な観測」ができないが ゆえに,目的に合わせて「分解能」と「範囲」を最適化す る必要があります.さらに測定値にノイズの影響が加わっ てくる場合には対策が必要となるのですが,上記二点はそ の際にも意識しておく必要があります.

本講座では、様々な種類のプラズマ実験を対象としたノ イズ対策・ノイズの取り扱い方を、ある程度具体的に解説 しました.測定器を開発する段階で低ノイズアンプを使用 したり、ノイズに強い電子回路を採用したりといった工夫 を行うわけですが、それでも測定された信号に大きな影響 を与えてしまうノイズが現れます.

最適なノイズ対策は、対象とする現象や測定手段の性 質、さらには実験室の環境に応じて変わりますので、あら ゆる実験・測定に適用できる処方箋は残念ながら存在しま せん.そこで実験家は、本講座で紹介されたような様々な 症例や対策を頭の中にストックしておき、状況に応じて使 用します.その際には、

#### ③ ノイズの性質(2.1.2, 4.3)を理解しておくこと

の重要性が追加されます。例えば、低周波の挙動にのみ興味がある場合(2.1の図2)には、高周波成分は信号の由来 に関わらず(興味の対象でないという意味で)「ノイズ」と して除去してしまえるのですが、そうでない場合には、ま ずは測定波形から信号成分とノイズ成分とを見分けること が必要です。単純なケースでは、

- ・ある装置を動作させた時にのみ現れる.
- ・ある計測器を接続した時にのみ現れる.
- ・受光素子の窓をふさいでも現れる.
- ・正の信号しか出力しないはずなのに、負のパルスが現れる.
- ・測定器からの配線やデジタイザの位置に応じて変化する.

などの,信号としてはあり得ない特徴を持つかどうかで判 別することができ,場合によってはノイズだけを取得する 実験を行ってノイズの性質を把握した上で対策します.

ノイズ対策手法は,大きく

・測定値にノイズが混入しないようにする.

#### ・測定値からノイズを除去する.

という2つに分類できます.後者に比べて,前者は信号に 全く影響を与えないわけですから,何よりも優先して講じ られるべきです.具体的には、シールド (2.2.2.2,2.2.2.4,3.3.1,3.3.2),電源ノイズの低減 (2.2.2.2,3.3.1),グラウンドループ対策 (2.1.4.2, 2.2.3,4.4.1),接地の強化や切り離し(2.1.4,2.2.2.3, 3.3.1,4.4.1),能動計測機器の安定化(4.4),機械的振動 の除去(4.4.2)などです.前述したような低ノイズ部品を 使ったり,測定回路を工夫したりするのもこちらに含まれ るでしょう.測定値の段階でノイズをできるだけ減らして おく(S/N比をできるだけ大きくする)ことは,計測の信 頼性を向上するだけでなく,その後のデータ処理の妥当性 も高くなりますし,場合によっては信号が持つ予想外の性 質を捉えることができ,新たな発見につながることもあり

Graduate School of Frontier Sciences, The Univ. Tokyo, Kashiwa, CHIBA 277-8561, Japan

corresponding author's e-mail: inomoto@k.u-tokyo.ac.jp

ます.

ただし,これらの手法が有効なのは「ノイズが外部から 測定器や配線に入り込む」場合(2.1.2.5,2.1.3,2.2.2.2, 2.2.2.3,2.2.2.4,4.4)や「測定器よりも後段の機器でノ イズが発生する」場合に限定されるので,問題となってい るノイズがどのようなノイズ源(2.1.2)からどのような経 路(2.1.3)で混入したかを把握することが重要です.ノイ ズ源や経路は,前述のようにノイズがどのような場合に現 れるかといった情報や,観測されたノイズの周波数(4.3) などからも推測できます.

これらの混入防止対策によってノイズが十分除去できれ ばよいのですが,除去しきれない場合には後者の手段,例 えばアナログフィルタ(2.2.4),デジタルフィルタ(5.1, 5.2),波高値/波形弁別(3.3.3,3.3.4),能動計測機器の 変調とロックイン検出(4.5),多次元データからの特徴抽 出(5.3),さらには統計的な処理(6.3,6.4,6.5)などを 試みることになります.いずれの手段でも,信号とノイズ の性質の違いを利用して,できるだけノイズのみを除去す ることを目指します.

信号とノイズの周波数がかけ離れていれば、低次のフィ ルタを用いてもノイズ成分を選択的に減少させることがで きますが、信号とノイズの周波数が近い場合には、ノイズ を十分に減少させようとすると信号そのものが歪んでしま います、ノイズ対策としてフィルタを使用することは簡単 ですが、信号とノイズの周波数帯の違いやフィルタの特性 に基づいて、妥当性を確保することが重要です.

計数計測における波高値/波形弁別(3.3.3, 3.3.4)も, 目的の信号の波高/波形とノイズの波高/波形の違いを利 用しています.事前に信号およびノイズの波形を取得した 上で,測定器やアルゴリズムに工夫を凝らすことによって 弁別性能を向上させることになります.

統計的処理の中でも、アンサンブル平均(5.1)は信号に 影響を与えないという優位性を持ちますが、観測したい現 象が高い再現性を有している場合に限られます。例えば、 現象の発生時間がランダムにずれるような場合に単純にア ンサンブル平均をとると、測定対象であるイベントが均さ れ、信号の情報が保存されなくなります(6.5.1).そのよ うな場合には、(他の計測などで得られた)現象開始時刻 などを条件とした平均(コンディショナル平均)を使用す ることになります。また、求める物理量が測定値の関数で 表されるような間接測定の場合(6.5)には、元の測定値に おいては期待値ゼロであったノイズが目的の物理量では平 均値にバイアスを与える場合がありますので、シンプルな 平均操作といえども油断してはいけません。 乱流研究のように、個々の信号そのものよりも統計量に こそ観測したい性質が色濃く現れるケースもあります (6.6).そのような場合も、統計量をうまく選んだり、物理 量の算出式に応じて測定器を改善したりすることによっ て、計測精度を向上させることができます.

最後に実際にプラズマを測定することをイメージして, 本講座のおさらいをしておきましょう. 第1章「はじめに」 において,プラズマ実験では

- ・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。
- ・測定器をプラズマパラメータや実験環境に合わせて構築・調整しないといけない。
- ・測定対象であるプラズマおよび実験装置そのものがノイズ源となりうる。

ということが、観測を困難にしていると述べました.

第2章で示したように、電磁ノイズはほとんどの測定手 法に関連する普遍的なものですので、その原因や対策を覚 えておくと多くの場面で役に立つでしょう.ただし、測定 器の種類やプラズマの条件によって信号そのものの大きさ が変わり、また、実験装置の構成や周辺環境によってノイ ズの強さや混入経路も変わってくることから、どの程度の 対策が必要になるかは実験を開始してはじめてわかる場合 が多いです.

もちろん測定器を製作する際にノイズを想定して対策を 行うわけですが,往々にして予想外のノイズが現れ,現場 での対応が必要となります.そのような場合にはやみくも に対策を試すのではなく,ノイズ源と混入経路を見極めた 方が迅速に対応できます.また,測定器だけにとどまらず, ノイズ源の側に対策を施すことで,多くの測定器のS/N 比を一度に改善できることもあります.

実験によっては、測定対象であるプラズマそのものがノ イズ源でもあり、しかも、そのノイズが観測したい測定量 と同じ原理で測定器に検出されてしまうことがあります. この場合、ノイズ源側でも測定器側でも対策はほぼ不可能 であり、測定後のデータから信号を抽出する工夫が必要で すが、妥当な抽出を実現するためには信号の性質を正しく 把握し、抽出手法に反映することが重要となります.

このように、ノイズの取り扱いは非常にやっかいな面も ありますが、なおのことノイズを克服して「良い」計測を 実現することは、実験からより広くより深い知見を得るこ とにつながるのです.

### 著者紹介

### 第5章

<sup>にしののがひろ</sup> 西野信博

#### 第6章



#### 第7章



は「こと」「もの」の整理が重要でしょう.時折頑張って整理 するのですが、しばらくすると何をどこに置いたのかがわか らなくなってしまうことが悩みです.整理前の混沌とした状態の方が見つけやすいとは…. H H

き い とも ひこ 浅井 朋彦

日本大学理工学部物理学科・教授.2002年 大阪大学大学院工学研究科・博士(工学). サスカチュアン大学研究員,産業技術総合 研究所研究員,日本大学理工学部准教授等

を経て2018年より現職.専門はFRCを中心とした極限的高 ベータプラズマの実験研究.最近,「『海外の民間企業による 核融合研究』の研究をしている人」とか言われて困惑するこ とが多いですが,国内のFRC実験拠点としてもまだまだがん ばります.