

電気・電子計測工学

博士(工学) 吉澤 昌純 編著

博士(医学) 降矢 典雄

博士(工学) 福田 恵子

博士(工学) 吉村 拓巳 共著

博士(工学) 高崎 和之

工学博士 西山 明彦

電気・電子系 教科書シリーズ編集委員会

編集委員長 高橋 寛 (日本大学名誉教授・工学博士)
幹 事 湯田 幸八 (東京工業高等専門学校名誉教授)
編 集 委 員 江間 敏 (沼津工業高等専門学校)
(五十音順) 竹下 鉄夫 (豊田工業高等専門学校・工学博士)
多田 泰芳 (群馬工業高等専門学校名誉教授・博士(工学))
中澤 達夫 (長野工業高等専門学校・工学博士)
西山 明彦 (東京都立工業高等専門学校名誉教授・工学博士)

(2006年11月現在)

刊行のことは

電気・電子・情報などの分野における技術の進歩の速さは、ここで改めて取り上げるまでもありません。極端な言い方をすれば、昨日まで研究・開発の途上にあったものが、今日は製品として市場に登場して広く使われるようになり、明日はそれが陳腐なものとして忘れ去られるというような状態です。このように目まぐるしく変化している社会に対して、そこで十分に活躍できるような卒業生を送り出さなければならない私たち教員にとって、在学中にどのようなことをどの程度まで理解させ、身に付けさせておくかは重要な問題です。

現在、各大学・高専・短大などでは、それぞれに工夫された独自のカリキュラムがあり、これに従って教育が行われています。このとき、一般には教科書が使われていますが、それぞれの科目を担当する教員が独自に教科書を選んだ場合には、科目相互間の連絡が必ずしも十分ではないために、貴重な時間に一部重複した内容が講義されたり、逆に必要な事項が漏れてしまったりすることも考えられます。このようなことを防いで効率的な教育を行うための一助として、広い視野に立って妥当と思われる教育内容を組織的に分割・配列して作られた教科書のシリーズを世に問うことは、出版社としての大切な仕事の一つであると思います。

この「電気・電子系 教科書シリーズ」も、以上のような考え方のもとに企画・編集されましたが、当然のことながら広大な電気・電子系の全分野を網羅するには至っていません。特に、全体として強電系統のものが少なくなっていますが、これはどこの大学・高専等でもそうであるように、カリキュラムの中で関連科目の占める割合が極端に少なくなっていることと、科目担当者すなわち執筆者が得にくくなっていることを反映しているものであり、これらの点については刊行後に諸先生方のご意見、ご提案をいただき、必要と思われる項目

ii 刊 行 の こ と ば

については、追加を検討するつもりでいます。

このシリーズの執筆者は、高専の先生方を中心としています。しかし、非常に初歩的なところから入って高度な技術を理解できるまでに教育することについて、長い経験を積まれた著者による、示唆に富む記述は、多様な学生を受け入れている現在の大学教育の現場にとっても有用な指針となり得るものと確信して、「電気・電子系 教科書シリーズ」として刊行することにいたしました。

これからの新しい時代の教科書として、高専はもとより、大学・短大においても、広くご活用いただけることを願っています。

1999年4月

編集委員長 高 橋 寛

ま え が き

人はなにかを感じて記録したり、なにかに利用するために言葉や絵、記号（文字、数値）を用いて表現したりしようと試みる。この行為が「はかる」の始まりである。

紀元前 500 年頃（ギリシャ時代）、琥珀は装飾品として使われていたが、当時の哲学者ターレスは琥珀を摩擦すると塵など軽いものを引き付ける現象に強く惹かれ、琥珀を *electrum*（ギリシャ語で引くもの）と名付けた。また、BC10 世紀以前の中国や古代ギリシャ時代では、ある種の石（天然マグネタイト）に鉄を吸い付けるなどの性質があることを理解していたようで、漢代には占盤に使われていた。「はかる（計る・測る）」という行為は「他者との違いを認識（観察）することから始まる」と大きく捉えたと、静電気や磁気の現象についての認識は、定量的な扱いとはいえないが、「測った」ことになる。科学史上はじめての定量的な扱いは、1600 年に発行されたイギリスの物理学者ウィリアム・ギルバート（William Gilbert）の電気、磁気に関する著書『磁石について』まで待つことになる。ギルバートは実験を行って、当時の電気、磁気に関する知識をまとめている。また、琥珀を帯電させて静電気の研究も行い、*electrum* から *electricity*（電気）という言葉をはじめてつくった。電子計測分野でのこうした歴史は脈々と引き継がれ、電子回路の進展にもなって高度化してきている。

そして現在、アナログとデジタルの相互変換器の高速化、低価格化に代表される電子技術およびセンサの発達に従い、多くの物理量が電氣的に計測され、それをデジタル値として扱うように変わってきている。これは、計測が機械的より電氣的なほうが高精度な割に構造が簡単で安価にできるようになってきたことに加え、電圧や電流のかたちで計測した物理量を用いてコンピュータにより対象物を制御したり、計測データをコンピュータ処理して必要な情報を得

たりできるためである。また、CD、DVD やブルーレイディスクのように多くの情報を記録したメディアから、正確に情報を読み取ることも計測技術の一面である。このように、われわれの生活において、デジタル化された多くの計測技術が用いられており、知らず知らずにこれらの恩恵にあずかっていることになる。したがって、現在の計測技術者には、指針形の電圧計や電流計の原理や取扱いなどの計測の基礎技術だけでなく、デジタル化された計測システムを構築でき、計測された信号から必要な情報を抜き出す能力が求められる。

一方、企業で開発された計測機器、計測制御機器の信頼性を評価する、あるいは測定値を保証する必要がある。また、企業にて作製された製品の品質保証や製造ロットごとの品質管理のためのデータ取得には、さまざまな計測技術が用いられている。これらの際、計測機器の信頼性あるいは測定値の保証のために測定結果の評価が行われている。ところで、電圧計と電流計を用いた電圧降下法により抵抗の値を測定する場合、計器の内部抵抗の影響で、計器の接続によっては抵抗値に非常に大きな誤差が生じることがある。このため、抵抗値の大きさに応じて接続法を変える、あるいは内部抵抗を考慮して測定値を補正する必要がある。このように、計測手法が適切かどうかを検討するうえで、誤差による議論は非常に有効である。従来は測定結果の評価の際にも、その値がどの程度正しいのかを測定値がどれだけ真の値に近いかという誤差で評価してきた。しかし、誤差は真の値からのずれであるが、そもそも計測では真の値は求められず、求められるのは最確値にすぎない。測定値には偏りもばらつきも生じ、すべての偏りの要因が特定できるとは限らない。このため、統計的手法を用いて偏りもばらつきとして捉えるべきである。計測された値のまわりに真の値の候補が広がっているため、指定された区間にどの程度の確率で測定値が存在するか、信頼区間で表現すべきとの提案があり、トレーサビリティを考慮した測定結果の質の保証を行う観点から「測定の不確かさ」の概念が測定結果の評価に導入された。近年、評価過程の透明性をはかり、計測機器や測定値の信頼性を保証するための評価表現が、誤差から不確かさへと大きく変化してきている。したがって、不確かさについての知識が、製品の品質保証や品質管理

に不可欠となる。

このように、計測がコンピュータを中心としたデジタル計測に移行し、また、測定結果の評価表現が変化している現在、電気・電子計測技術を学ぶ際には、従来の範囲に加え、センサ、アナログとデジタルの相互変換、データのコンピュータへの取込み、信号処理や計測データの評価におよぶ全体像を見わたした考え方が必要となる。そこで本書では、不確かさを含む計測の基礎から、センサを用いたデジタル計測の基本、つまり、センサからのアナログ信号を、雑音をできるだけ少なく伝送し、デジタル化してコンピュータに取り込み、そして計測データから情報を抽出する信号処理手法の一部までを記載した。これは、学びの際だけでなく、社会に出てからの実践的な場面でも、まずは本書を見て、そこから必要に応じてさらに詳細な情報を調べる手がかりを得られるように配慮したためである。

このため記載が多岐にわたっており、限られた時間数での計測の授業に使用する際は、必要に応じて章や節をとばしてほしい。そして、授業が終わっても、未永く手もとに置いて利用していただきたい。

また、本書は1章と4章、巻末の付録を降矢が、2章と5章を吉村が、3章を福田が、6章を高崎が、7章～10章を吉澤が分担して執筆したため、文章表現に個性がある点をご容赦願いたい。なお、ここに、西山の草稿を受け、まえがきと1章の一部、ならびに付録が執筆されたことも加えて記したい。最後に、長きにわたり諦めずに粘り強く執筆を促してくださったコロナ社に感謝の意を表し、ここに筆を置きたい。

2016年5月

著 者

目 次

1. 計測と測定

| | |
|-------------------------------|----|
| 1.1 SI 単 位 | 1 |
| 1.2 SI 接 頭 語 | 2 |
| 1.3 固有名称をもつ SI 組立単位 | 3 |
| 1.4 計 測 の 標 準 | 4 |
| 1.4.1 電 流 標 準 | 4 |
| 1.4.2 ジョセフソン効果を用いた電圧標準 | 5 |
| 1.4.3 量子化ホール効果を利用した抵抗標準 | 6 |
| 1.5 校正とトレーサビリティ | 7 |
| 1.6 測定法の分類 | 8 |
| 1.6.1 直接測定と間接測定 | 8 |
| 1.6.2 絶対測定と比較測定 | 9 |
| 1.6.3 受動的測定と能動的特性 | 9 |
| 1.6.4 偏位法と零位法 | 10 |
| 1.7 測定値の扱い | 11 |
| 1.7.1 母集団と標本 | 11 |
| 1.7.2 誤 差 の 定 義 | 12 |
| 1.7.3 偶然誤差と系統誤差 | 12 |
| 1.7.4 正確さと精密さ | 13 |
| 1.7.5 統 計 処 理 | 14 |
| 1.7.6 間接測定における誤差の伝搬 | 16 |
| 1.7.7 測定値間の関係 | 18 |
| 1.8 測定値の保証と計測の信頼性 | 20 |
| 1.8.1 不確かさの評価 | 22 |
| 1.8.2 タイプ A の評価法 | 23 |

| | | |
|-------|-------------------------|----|
| 1.8.3 | タイプ B の評価法 | 23 |
| 1.8.4 | 合成標準不確かさ | 25 |
| 1.8.5 | 包含係数 k の決定と拡張不確かさ U | 27 |
| 1.8.6 | 不確かさの報告 | 27 |
| 演習問題 | | 28 |

2. センサ

| | | |
|-------|-------------|----|
| 2.1 | センサとは | 29 |
| 2.2 | 光センサ | 32 |
| 2.2.1 | ホトダイオード | 33 |
| 2.2.2 | C d S | 34 |
| 2.2.3 | 太陽電池 | 35 |
| 2.3 | 温度センサ | 37 |
| 2.3.1 | サーミスタ | 37 |
| 2.3.2 | 白金温度計 | 39 |
| 2.3.3 | 熱電対 | 40 |
| 2.4 | ひずみセンサ | 42 |
| 2.5 | 圧力センサ | 43 |
| 2.6 | 加速度センサ | 46 |
| 2.6.1 | 抵抗形加速度センサ | 47 |
| 2.6.2 | 圧電形加速度センサ | 48 |
| 2.6.3 | 静電容量形加速度センサ | 49 |
| 演習問題 | | 50 |

3. 電圧・電流・電力の測定

| | | |
|-------|--------------|----|
| 3.1 | アナログ指示計器 | 51 |
| 3.1.1 | 指示計器とは | 51 |
| 3.1.2 | 指示計器の構成と動作 | 52 |
| 3.1.3 | おもな指示計器とその用法 | 54 |
| 3.2 | 直流計測 | 56 |

| | |
|----------------------|----|
| 3.2.1 電圧・電流の計測 | 56 |
| 3.2.2 分流器と倍率器 | 58 |
| 3.3 電圧・電流の指示値 | 60 |
| 3.3.1 電圧・電流の大きさの表現方法 | 60 |
| 3.3.2 電子計測 | 62 |
| 3.3.3 波形の測定 | 63 |
| 3.4 電力の測定 | 64 |
| 3.4.1 電力の定義 | 64 |
| 3.4.2 実効電力の計測 | 65 |
| 演習問題 | 66 |

4. 回路素子定数の測定

| | |
|------------------------------|----|
| 4.1 抵抗の測定 | 67 |
| 4.1.1 電圧降下法による抵抗の測定 | 67 |
| 4.1.2 ホイートストンブリッジによる抵抗の測定 | 69 |
| 4.1.3 低抵抗の測定 | 71 |
| 4.1.4 高抵抗の測定 | 73 |
| 4.2 インピーダンスの測定 | 74 |
| 4.2.1 交流ブリッジを用いたインピーダンス測定 | 74 |
| 4.2.2 Qメータを用いたインピーダンス測定 | 79 |
| 4.2.3 電子回路技術を取り入れたインピーダンス計測法 | 81 |
| 演習問題 | 83 |

5. 磁気量の測定

| | |
|---------------------|----|
| 5.1 ヒステリシス特性と透磁率の測定 | 84 |
| 5.1.1 ヒステリシスループ | 84 |
| 5.1.2 透磁率の測定 | 86 |
| 5.2 ホール効果 | 87 |
| 5.3 SQUID磁束計 | 89 |

| | | |
|-------|--------------|----|
| 5.3.1 | ジョセフソン効果 | 89 |
| 5.3.2 | SQUID 磁束計の原理 | 90 |
| 5.4 | 核磁気共鳴の測定 | 94 |
| 5.4.1 | 核磁気共鳴の原理 | 94 |
| 5.4.2 | プロトン磁力計 | 95 |
| 5.4.3 | 核磁気共鳴画像法 | 96 |
| | 演習問題 | 97 |

6. 高周波計測

| | | |
|-------|-------------------|-----|
| 6.1 | 高周波の定義 | 98 |
| 6.2 | 分布定数回路 | 99 |
| 6.3 | 高周波におけるインピーダンスの測定 | 101 |
| 6.4 | 高周波電力の測定 | 101 |
| 6.4.1 | 高周波電力測定の概要 | 101 |
| 6.4.2 | 高周波電力の測定方法 | 103 |
| 6.4.3 | 不整合誤差 | 104 |
| 6.5 | 周波数の測定 | 105 |
| 6.6 | EMC, EMI, EMS の測定 | 107 |
| 6.6.1 | EMI の測定 | 107 |
| 6.6.2 | EMI 発生源の簡易的な特定方法 | 108 |
| 6.6.3 | EMS の測定 | 109 |
| | 演習問題 | 112 |

7. 雑音源と信号

| | | |
|-------|--------------|-----|
| 7.1 | 雑音源 | 113 |
| 7.1.1 | 内部雑音と外部雑音 | 113 |
| 7.1.2 | 統計的性質による分類 | 114 |
| 7.1.3 | 周波数特性による分類 | 114 |
| 7.1.4 | 発生メカニズムによる分類 | 115 |

| | |
|-----------------|-----|
| 7.2 信号と雑音の評価 | 117 |
| 7.2.1 S/N 比 | 117 |
| 7.2.2 雑音指数 | 120 |
| 7.2.3 等価雑音電力 | 121 |
| 7.2.4 ダイナミックレンジ | 122 |
| 演習問題 | 123 |

8. 信号の伝送と雑音対策

| | |
|--------------------------|-----|
| 8.1 信号源としてのセンサ | 124 |
| 8.1.1 理想信号源と実際の信号源 | 124 |
| 8.1.2 インピーダンスマッチング | 125 |
| 8.1.3 信号源インピーダンスと雑音 | 129 |
| 8.2 計測信号の伝送と雑音対策 | 131 |
| 8.2.1 信号の伝送形態 | 131 |
| 8.2.2 信号の変換 | 132 |
| 8.2.3 センサとインピーダンスマッチング | 134 |
| 8.2.4 ノーマルモード伝送とコモンモード伝送 | 136 |
| 8.2.5 コモンモード伝送する雑音の除去 | 137 |
| 8.3 シールドとアース | 138 |
| 8.3.1 電磁環境両立性と電磁干渉対策 | 138 |
| 8.3.2 静電シールド | 139 |
| 8.3.3 電磁シールド | 139 |
| 8.3.4 アースと信号の伝送線 | 141 |
| 演習問題 | 145 |

9. デジタル計測

| | |
|--------------------|-----|
| 9.1 信号のデジタル化 | 146 |
| 9.1.1 アナログ信号のデジタル化 | 146 |
| 9.1.2 量子化 | 152 |
| 9.1.3 A-D 変換 | 153 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| 9.1.4 D-A 変換 | 158 |
| 9.2 デジタル信号のパソコンへの転送 | 159 |
| 9.2.1 A-D変換ボード | 159 |
| 9.2.2 デジタルオシロスコープとコンピュータの接続 | 160 |
| 9.2.3 ネットワークによる遠隔計測 | 163 |
| 演習問題 | 165 |

10. 周波数解析と雑音処理

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 10.1 周波数解析 | 166 |
| 10.1.1 スペクトルの概念 | 166 |
| 10.1.2 フーリエ変換とスペクトル | 167 |
| 10.1.3 パワースペクトル密度 | 171 |
| 10.1.4 離散フーリエ変換と高速フーリエ変換 | 171 |
| 10.1.5 離散フーリエ変換, 高速フーリエ変換の問題点と窓関数 | 172 |
| 10.1.6 短時間フーリエ変換とウェーブレット変換 | 177 |
| 10.1.7 そのほかの周波数変換法 | 183 |
| 10.2 雑音処理 | 183 |
| 10.2.1 ローパスフィルタ | 183 |
| 10.2.2 移動平均法 | 185 |
| 10.2.3 積算平均化処理 | 187 |
| 演習問題 | 188 |

付 録 189

| | |
|----------|-----|
| 1. 質量の標準 | 189 |
| 2. 時間の標準 | 189 |
| 3. 長さの標準 | 190 |

引用・参考文献 192

演習問題解答 196

索 引 203

きない。むやみに数字を並べても意味がない。有効数字とは、誤差を含みながらも、測定値として意味をもつ桁数だけ表示したものである。そして、測定結果などを表す数字のうちで位取りを示すだけの0を除いた意味のある数字である。

例えば、ある長さを最小目盛1mmのものさしで測り、最小目盛の10分の1まで読み、測定値を32.5mmと記述すると、1mm以下の桁は目分量であることを示し、末位の「5」には誤差を含んでいることを示している。この場合、有効桁数は3桁となる。

<数値の丸め方>

測定値の処理を行うとき、一般には四捨五入で端数処理（丸め）を行うが、これも偏りの原因になる。四捨五入で切り捨てとなるのは、4, 3, 2, 1, 切り上げになるのは5, 6, 7, 8, 9である。

そこで、切り捨てと切り上げの割合を均等にするため、丸め方についてつぎのように規定されている。数値の丸めを小数第 n 位に丸めようとするとき

条件1 小数第 $(n+1)$ 位の数字が5以外のときは、四捨五入をする。

条件2 小数第 $(n+1)$ 位の数字が5のときは、小数第 $(n+2)$ 位以下の数値があきらかに0でなければ四捨五入により切り上げる。

条件3 小数第 $(n+1)$ 位の数字が5で、小数第 $(n+2)$ 位以下の数値が不明か0であるときは

① 小数第 n 位が偶数のときは切り捨てる。

② 小数第 n 位が奇数のときは切り上げる。

この端数の処理方法は四捨五入と比べて、丸めと演算を交互に何度も繰り返したときの誤差の蓄積が小さいという利点があり、浮動小数演算などで利用される。

1.8 測定値の保証と計測の信頼性

系統誤差を調べ“正確さ”を追求し、偶然誤差の軽減をはかり“精密さ”を追求することは、測定対象から情報を検出するためのシステムや測定法を検討するうえで、非常に有用である。

従来、測定結果の評価に関しては、その値がどの程度正しいか（どの程度の精度なのか）を、測定値がとれだけ真の値に近いのかで評価してきた。

しかし

- そもそも、真の値は求められない。求められるのは最確値である。誤差は真の値を前提にしている。
- すべての偏りの要因を特定し、すべての値を補正するのは難しい。特定できない未知の偏りが存在する可能性もある。

などといったことから、偏りについてもばらつきとして捉えるべきである。

そこで、「推定した値のまわりに真の値の候補が広がっている。指定された区間にどの程度の確率で測定値が存在するか、信頼区間で表現すべきである」などといった意見が提案され、トレーサビリティを考慮した測定結果の質の保証を行う観点から、図 1.15 に示すような「測定の不確かさ」の概念が導入された（GUM：計測における不確かさの表現ガイド）。

不確かさ(精度)評価の概念

* JIS Z 8103 「計測用語」による(本文の説明はこの用語に準じる)

** JIS Z 8402 「分析・試験の許容差通則」による

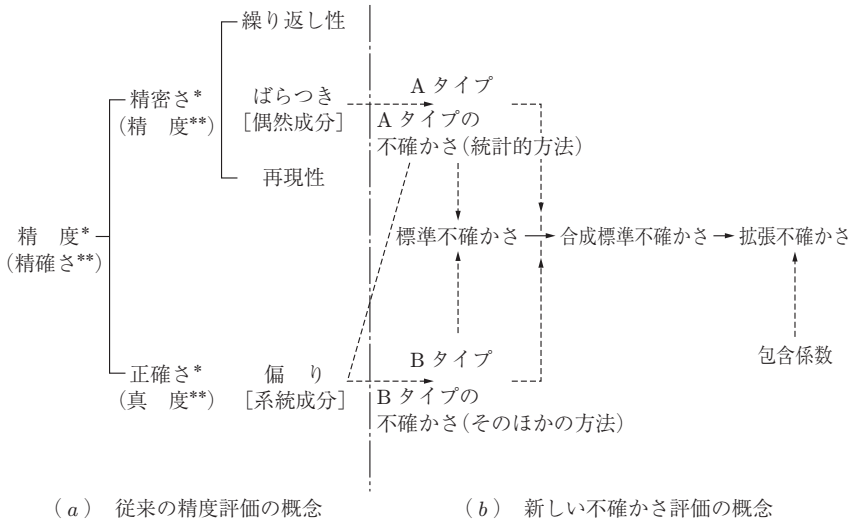


図 1.15 精度による評価と不確かさによる評価の対比
(引用元：山崎弘郎『電気電子計測の基礎』電気学会)

1.8.1 不確かさの評価

不確かさ評価の流れを図 1.16 に示す。

- (1) 測定プロセスの明確化：測定方法，標準器，測定手順，測定環境などを明確にしておく。
- (2) 関数モデルの構築：測定結果に影響を与える要因（測定量や測定器の特性，関数モデルの特性，温度や湿度，気圧などの測定環境，測定者の癖など）を抽出し測定結果を算出するための関数モデルを構築する。
- (3) 不確かさ成分の評価：タイプ A，タイプ B に分類して，不確かさを標準偏差の形で評価する（1.8.2 項および 1.8.3 項参照）。
- (4) 合成標準不確かさ：各項目の不確かさを合成する。
- (5) 包含係数の決定：信頼の水準を選択する。約 95% の信頼で表現するなら，包含係数 $k = 2$ とする。
- (6) 拡張不確かさ U の計算：測定値の存在する区間を表現する尺度として，

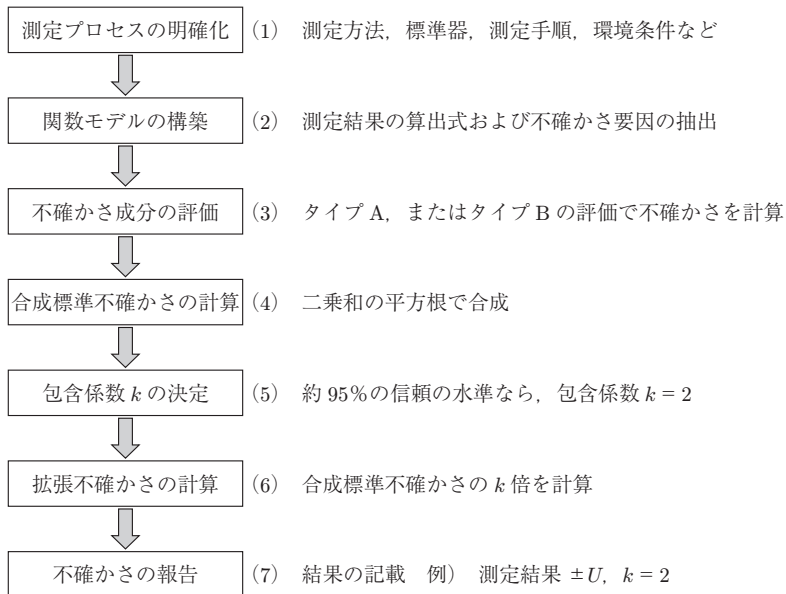


図 1.16 不確かさ評価の流れ

拡張不確かさを用いる。

- (7) 不確かさの報告：拡張不確かさ U を用いて、測定結果 $\pm U$ などと表示する。

1.8.2 タイプ A の評価法

タイプ A の評価法とは、統計的手法を用いてばらつきを算出する方法である。標準不確かさをかりに u_A と記載すると、 u_A は N 回測定したときの平均値の実験標準偏差に相当する。測定値を x_i ($i = 1, 2, \dots, N$) で示し、その平均値を \bar{x} 、実験標準偏差を $s(x)$ とすれば

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.25)$$

$$u_A = \frac{s(x)}{\sqrt{N}} \quad (1.26)$$

1.8.3 タイプ B の評価法

タイプ B の評価法とは、繰り返し計測から求められない不確かさを、入手した情報や予測される要因にもとづいて、適切な確率密度分布を仮定し、ばらつきの度合いとして推定する方法である。なぜタイプ B の不確かさ評価が必要なのか例を挙げて示そう。

- 標準器の校正の不確かさ：使用している標準器の校正の不確かさ評価まで行わなくてはならない？
- 再現することが難しい不確かさ：実験室の温度変化で、ばらつきが生じるなら、実験室の温度を 1 年中測り続けなければならない？
- そもそも測定できない不確かさ：使用している温度計は $\pm 0.5^\circ\text{C}$ でしかわからない。その測れなかった $\pm 0.5^\circ\text{C}$ の間の温度のばらつきの評価は？

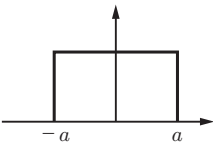
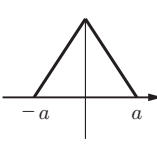
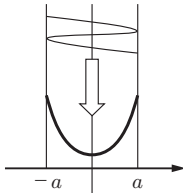
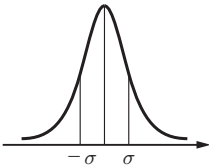
要因が特定でき、定量的に補正できる不確かさについては、測定値を補正するのは当然であるが、例示した不確かさは実際には「特定できない偏り」であり、適切な確率密度分布を仮定してばらつきを評価せざるを得ない。

仮定で用いられる代表的な確率密度分布を表 1.4 に示す。

- 方形分布：最も使われる分布。限界値などに適用。
- 三角分布：中心が多く、端にいくにつれ小さくなる分布。
- U 字分布：周期的に変化する要因に対して適用される分布。
- 正規分布：校正証明書などで不確かさがわかっているときに適用する分布。

表 1.4 の下欄の表記は、それぞれの分布におけるタイプ B の標準不確かさを示している。方形分布、三角分布、U 字分布の場合は標準偏差で標準不確かさを表し、正規分布の場合は約 95% の信頼水準の条件下で、拡張不確かさ U の 2 分の 1 を標準不確かさとして表している。

表 1.4 代表的な確率密度分布

| 方形分布 | 三角分布 | U 字分布 | 正規分布 |
|---|---|---|---|
|  |  |  |  |
| $\frac{a}{\sqrt{3}}$ | $\frac{a}{\sqrt{6}}$ | $\frac{a}{\sqrt{2}}$ | $\frac{U}{2}$ |

コーヒーブレイク

標準不確かさの求め方

表 1.4 の確率密度分布 $p(x)$ が方形分布形状の場合の標準不確かさ u_B (= 標準偏差 σ) を求めてみよう。

$$\bar{x} = 0, \quad \int_{-\infty}^{\infty} p(x)dx = 1$$

より

$$p(x) = \frac{1}{2a} \quad (-a \leq x \leq a)$$

$$p(x) = 0 \quad (x < -a, x > a)$$

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 p(x) dx = 2 \int_0^a \frac{x^2}{2a} dx = \frac{a^2}{3}$$

索引

| | |
|-------------------|---------|
| 【あ】 | |
| アクティブブリッジ | 77 |
| アース | 141 |
| アンチエリアシング フィルタ | 151 |
| 【い】 | |
| 位相スベクトル | 167 |
| 位相定数 | 100 |
| 移動平均 | 183 |
| インピーダンス整合 | 101 |
| インピーダンス マッチング | 126 |
| インピーダンスメータ | 81 |
| 【う】 | |
| ウイグナー分布 | 182 |
| ウェーブレット | 178 |
| 【え】 | |
| エネルギーベクトル | 167 |
| エリアシング | 51 |
| エリアシング誤差 | 149 |
| 演算増幅器 | 81, 132 |
| 【お】 | |
| 鳳テブナンの定理 | 69, 130 |
| オシロスコープ | 63 |
| オーバーサンプリング | 157 |
| 【か】 | |
| 外部雑音 | 114 |
| ガウス雑音 | 115 |
| ガウス分布 | 115 |
| 核磁気共鳴 | 95 |

| | |
|--------------------|--------|
| 拡張不確かさ | 27 |
| 確率的現象 | 114 |
| 確率密度関数 | 15 |
| 化合物半導体 | 34 |
| 加重移動平均 | 186 |
| 仮想接地 | 81 |
| 偏り | 12 |
| 可動コイル形指示計器 | 52 |
| ガボールのウェーブ レット変換 | 179 |
| ガボール変換 | 178 |
| 間接測定法 | 9 |
| 感度係数 | 26 |
| 【き】 | |
| 基本波 | 168 |
| 共振形周波数測定器 | 106 |
| 共有結合 | 35 |
| 【く】 | |
| 偶然誤差 | 13 |
| 空乏層 | 33 |
| 【け】 | |
| 形状因子 | 37 |
| 系統誤差 | 12, 56 |
| ゲージ圧 | 44 |
| ケルビンのダブル ブリッジ | 72 |
| 検出能 | 121 |
| 減衰定数 | 100 |
| 【こ】 | |
| 校正 | 7 |
| 合成標準不確かさ | 25, 26 |
| 高速フーリエ変換 | 172 |

| | |
|-------------------|-----|
| 高抵抗の測定 | 73 |
| 光導電効果 | 34 |
| 交流ブリッジ | 74 |
| 国際単位系 | 1 |
| 誤差伝搬の法則 | 18 |
| 誤差の伝搬 | 16 |
| 誤差率 | 12 |
| コモンモード | 136 |
| コモンモードチョーク コイル | 137 |
| 固有の名称をもつ単位 | 3 |
| 孤立波 | 117 |

【さ】

| | |
|----------|-----|
| 最確値 | 14 |
| 歳差運動 | 94 |
| 最小二乗法 | 19 |
| 最大透磁率 | 85 |
| 雑音指数 | 120 |
| 雑音等価電力 | 121 |
| サーミスタ | 39 |
| サーミスタ定数 | 38 |
| 残差 | 12 |
| 散布図 | 18 |
| サンプリング | 146 |
| サンプリング定理 | 147 |
| 残留磁気 | 86 |

【し】

| | |
|------------|-----|
| 磁化曲線 | 85 |
| 磁気飽和 | 85 |
| 指示計器 | 51 |
| 実効値 | 61 |
| 実効電力 | 65 |
| シャーシアース | 142 |
| シャノン・染谷の定理 | 147 |

| | | | | | |
|------------|-------|------------|--------|------------|-----|
| 集中定数回路 | 99 | 相対誤差 | 12 | ナイキスト・シャノン | |
| 周波数カウンタ | 105 | 測定の不確かさ | 8, 21 | の標準化定理 | 147 |
| 受動的測定 | 9 | 損失率 | 79 | ナイキスト定理 | 147 |
| 瞬時値 | 60 | | | 内部雑音 | 113 |
| 瞬時電力 | 102 | 【た】 | | 【に】 | |
| 初期透磁率 | 85 | 対地容量 | 77 | 二乗余弦窓 | 174 |
| ジョセフソン効果 | 5, 90 | ダイナミックレンジ | 122 | 二端子法 | 71 |
| ジョセフソン接合 | 90 | タイプ A の評価法 | 23 | | |
| ショット雑音 | 116 | タイプ B の評価法 | 23 | 【ね】 | |
| ジョンソン雑音 | 115 | 短時間フーリエ変換 | 177 | 熱起電力 | 41 |
| 信号源 | 124 | 単純移動平均 | 186 | 熱雑音 | 115 |
| 進行波 | 100 | 【ち】 | | 【の】 | |
| 振幅スペクトル | 167 | 逐次比較形 | 153 | ノイズ | 113 |
| 【す】 | | 直接測定法 | 8 | 能動的測定 | 10 |
| スキndeプス | 141 | 直線回帰 | 19 | ノーマルモード | 136 |
| スペクトラム | | 【て】 | | 【は】 | |
| アナライザ | 106 | 定在波 | 100 | 倍率器 | 58 |
| スペクトル | 166 | 定在波比 | 101 | 白色雑音 | 114 |
| 【せ】 | | デジタルボルトメータ | 62 | ハミング関数 | 174 |
| 正確さ | 13 | 低抵抗の測定 | 71 | ばらつき | 13 |
| 正規分布 | 115 | デルタ・シグマ形 | 153 | パルス電力 | 102 |
| 整合 | 126 | デルタ・シグマ法 | 157 | パワースペクトル | 167 |
| 整合器 | 127 | 電圧降下法 | 67 | パワースペクトル | |
| 静電シールド | 138 | 電荷損失法 | 74 | 密度関数 | 171 |
| 精度 | 14 | 電磁環境両立性 | 107 | ハン関数 | 174 |
| 精密さ | 14 | 電磁感受性 | 107 | 反射係数 | 100 |
| 積形ブリッジ | 76 | 電磁シールド | 138 | 反射波 | 100 |
| 積算平均 | 187 | 電磁妨害 | 107 | 万能分流器 | 59 |
| 積算平均化処理 | 183 | 伝搬定数 | 100 | 【ひ】 | |
| 積分形 | 153 | 電流計形電力計 | 65, 66 | ピエゾ圧電素子 | 48 |
| 接触抵抗 | 71 | 電力量 | 65 | ピエゾ抵抗効果 | 42 |
| 絶対圧 | 44 | 【と】 | | ピエゾ抵抗素子 | 47 |
| 絶対誤差 | 12 | 等価サンプリング | 152 | 比較形 | 153 |
| 絶対測定 | 9 | 等価時間サンプリング | 152 | 比較測定 | 9 |
| 絶対平均値 | 61 | 透磁率 | 84 | 光起電力効果 | 34 |
| 尖頭値 | 61 | 特性インピーダンス | 100 | ピーク電力 | 103 |
| 全並列形 | 153 | トレーサビリティ | 8 | 比形ブリッジ | 75 |
| 【そ】 | | 【な】 | | ヒステリシスループ | 86 |
| 相関係数 | 18 | ナイキスト雑音 | 115 | ひずみゲージ | 42 |
| 相対圧 | 44 | | | | |

| | |
|---------|--------|
| ひずみ波 | 168 |
| 標準不確かさ | 23, 24 |
| 表皮効果 | 141 |
| 標準化 | 146 |
| 標準化定理 | 147 |
| 標本の分散 | 15 |
| 標本標準偏差 | 15 |
| 標本平均 | 12 |
| 標本平均値 | 14 |
| ——の標準偏差 | 15 |
| ピンクノイズ | 114 |

【ふ】

| | |
|------------|---------|
| 不確定性原理 | 178 |
| 複素フーリエ級数展開 | 169 |
| 不整合誤差 | 104 |
| 不確かさ | 14 |
| ——の伝搬則 | 26 |
| ——の評価 | 22 |
| ——の報告 | 27 |
| 浮遊インダクタンス | 77 |
| 浮遊インピーダンス | 129 |
| 浮遊容量 | 77, 129 |
| ブラックマン関数 | 174 |
| フーリエ級数展開 | 167 |
| フーリエ積分 | 148 |
| フーリエ変換 | 167 |
| フレンチハット | 180 |
| フローティング入力 | 143 |
| プロトン磁力計 | 95 |
| 分解能 | 14 |
| 分布定数回路 | 99 |
| 分流器 | 59 |

【へ】

| | |
|------------|-----|
| 平滑化処理 | 183 |
| 平均電力 | 102 |
| ヘテロダイン変換方式 | 106 |
| 偏位法 | 10 |
| 偏差 | 12 |
| 変成器ブリッジ | 77 |

【ほ】

| | |
|-------------|-----|
| ホイートストンブリッジ | 69 |
| 包含係数 | 27 |
| 補償法 | 11 |
| 保磁力 | 86 |
| 母標準偏差 | 15 |
| 母平均 | 11 |
| ホール素子 | 88 |
| ボルテージフォロア | 134 |
| ホワイトノイズ | 114 |

【ま】

| | |
|---------|-----|
| 窓関数 | 173 |
| 窓フーリエ変換 | 177 |

【み】

| | |
|---------|-----|
| ミルマンの定理 | 129 |
|---------|-----|

【む】

| | |
|---------|-----|
| 無線周波数妨害 | 107 |
|---------|-----|

【め】

| | |
|-------------|-----|
| メイエのウェーブレット | 180 |
| メキシカンハット | 180 |

【も】

| | |
|------|----|
| 漏れ電流 | 73 |
|------|----|

【ゆ】

| | |
|------------|-----|
| 誘電体吸収 | 73 |
| 誘導形指示計器 | 66 |
| 有能電力 | 126 |
| ユニバーサル I/O | 159 |
| ユビキタス | 164 |

【よ】

| | |
|------|----|
| 四端子法 | 72 |
|------|----|

【ら】

| | |
|---------|-----|
| ラーモア周波数 | 95 |
| ランダム雑音 | 114 |

【り】

| | |
|----------|-----|
| 離散フーリエ変換 | 172 |
| 量子化 | 146 |
| 量子化誤差 | 147 |
| 量子化磁束 | 92 |
| 量子ホール効果 | 6 |

【れ】

| | |
|-------------|-----|
| 零位法 | 10 |
| レイリーの電流天秤 | 5 |
| 連続ウェーブレット変換 | 178 |
| 連続信号 | 117 |

【ろ】

| | |
|----------|-----|
| ローパスフィルタ | 183 |
|----------|-----|

【A】

| | |
|---------|-----|
| A-D 変換器 | 153 |
|---------|-----|

【B】

| | |
|--------|----|
| B 定数 | 38 |
| B-H 曲線 | 85 |

【D】

| | |
|---------|-----|
| DFT | 172 |
| DMA | 160 |
| D-A 変換 | 158 |
| D-A 変換器 | 158 |

【E】

| | |
|-----|-----|
| EMC | 107 |
| EMI | 107 |
| EMS | 107 |

| | | | | | | |
|----------|------------|-----|------------|-----|-------------|-----|
| | 【F】 | | NTC サーミスタ | 39 | SN 比 | 117 |
| FFT | | 172 | | | SQUID 素子 | 90 |
| FIFO | | 159 | 【Q】 | | | |
| FLL 回路 | | 92 | Q メータ | 79 | 【U】 | |
| | 【G】 | | 【R】 | | USB | 161 |
| GP-IB | | 161 | RS-232C | 161 | 【W】 | |
| | 【M】 | | RS-422A | 162 | WFT | 177 |
| | | | R-2R ラダー形 | 158 | 【数字】 | |
| MEMS | | 43 | 【S】 | | 1/f 雑音 | 114 |
| | 【N】 | | SFT | 177 | | |
| n 次高調波 | | 168 | SI | 1 | | |
| | | | SI 接頭語 | 2 | | |

吉澤 昌純 (よしざわ まさすみ)

1984年 東京都立大学工学部電気工学科卒業
1986年 東京都立大学大学院工学研究科修士
課程修了(電気工学専攻)
1991年 東京都立大学非常勤講師
1992年 東京都立工業高等専門学校助教
1995年 博士(工学)(東京都立大学)
2006年 東京都立産業技術高等専門学校教授
現在に至る

福田 恵子 (ふくだ けいこ)

1986年 上智大学理工学部電気電子工学科卒業
1988年 上智大学大学院理工学研究科博士前期
課程修了(電気電子工学専攻)
1988年 株式会社日立製作所勤務
1998年 博士(工学)(上智大学)
2003年 株式会社ルネサステクノロジー勤務
2004年 東京都立航空工業高等専門学校助教
2006年 東京都立産業技術高等専門学校助教
2007年 東京都立産業技術高等専門学校准教授
2013年 東京都立産業技術高等専門学校教授
現在に至る

高崎 和之 (たかさき かずゆき)

2005年 電気通信大学電気通信学部電子工学科
卒業
2009年 電気通信大学大学院電気通信学研究科
博士前期課程修了(電子工学専攻)
2011年 東京都立産業技術高等専門学校助教
2014年 博士(工学)(電気通信大学)
2015年 東京都立産業技術高等専門学校准教授
現在に至る

降矢 典雄 (ふるや のりお)

1975年 上智大学理工学部電気電子工学科卒業
1977年 上智大学大学院理工学研究科博士前期
課程修了(電気電子工学専攻)
1979年 上智大学大学院理工学研究科博士後期
課程中退(電気電子工学専攻)
1979年 獨協医科大学臨床共同研究室研究員
1990年 上智大学立航空工業高等専門学校助教
1998年 博士(医学)(獨協医科大学)
2001年 東京都立航空工業高等専門学校教授
2006年 東京都立産業技術高等専門学校教授
現在に至る

吉村 拓巳 (よしむら たくみ)

1993年 山口大学工学部電気工学科卒業
1995年 山口大学大学院理工学研究科博士前期課
程修了(電気電子工学専攻)
1995年 日本光電工業株式会社勤務
1999年 国立療養所中部病院長寿医療研究セン
ター研究員
2002年 奈良先端科学技術大学院大学情報科学
研究科博士後期課程修了(情報処理学
専攻)
博士(工学)
2002年 東京都立工業高等専門学校講師
2005年 東京都立工業高等専門学校助教
2006年 東京都立産業技術高等専門学校助教
2007年 東京都立産業技術高等専門学校准教授
現在に至る

西山 明彦 (にしやま はるひこ)

1966年 東京工業大学理工学部電気工学科卒業
1968年 東京工業大学大学院理工学研究科修士
課程修了(電気工学専攻)
1971年 東京工業大学大学院理工学研究科博士
課程修了(電気工学専攻)
工学博士
1971年 東京都立工業高等専門学校助教
1985年 東京都立工業高等専門学校教授
2005年 東京都立工業高等専門学校名誉教授
2005年 特許庁研修講師(～2012年), 東京
都品川区ビジネスカタリスト
2013年 モンゴル工業技術大学客員教授
2014年 モンゴル高専教育センター NGO 理
事
現在に至る
2015年 モンゴル工業技術大学名誉教授

電気・電子計測工学

Practical Electrical and Electronic Measurement

© Yoshizawa, Furuya, Fukuda, Yoshimura, Takasaki, Nishiyama 2016

2016年7月8日 初版第1刷発行

検印省略

編著者 吉澤昌純
著者 降矢典雄
福田恵子
吉村拓巳
高崎和彦
西山明彦

発行者 株式会社 コロナ社

代表者 牛来真也

印刷所 三美印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844 ・ 電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-01185-2 (新井) (製本: 愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。落丁・乱丁本はお取替えいたします