

# まえがき

本書は、大学の2年次の学生を対象とした「計測工学」の授業をもとに、従来の計測工学の教科書に対する下記の動機から執筆した。

- 1) 不確かさの導入，SI，次元，単位の正確な記載
- 2) 新 JIS 記号・用語，デジタル計測への対応
- 3) 新しい授業形式への対応と理解しやすい記述と課題

1) に関しては、国際度量衡委員会の勧告による変化であり、従来の誤差という表現に代わる不確かさを2章において詳しく解説して、次元や単位表記に関しても記載した。

2) に関しては、図面・用語の更新と同時に、可動コイル型計器の説明を減らしてA-D変換器による電圧測定と演算増幅器を用いた信号処理による電流、電力測定を中心に説明することで、現代の計測の実情に合わせた内容とした。また、電圧・電流・抵抗測定のとに、センサの種類と計測を入れることで理解を深める工夫をした。また、コンピュータ・マイコン計測やセンサネットワークに用いられる無線計測など、今後のトレンドに関して説明を行った。

3) に関しては、章末の演習問題を多くして授業内演習や宿題に活用できるようにし、理解・計算力の向上を目指した。米国の教科書を参考に、できるだけ教科書による説明でも自習できるように心がけ、授業数の増加に対して理解度確認や計算反復練習を増やすことで学力向上と達成感を得させる形を目指した。

世の中の電子機器が高度化する一方で、ハードウェアに触れたことのない学生が増えてきている。また、企業においても社内教育に割く時間がなくなり、団塊の世代のベテラン技術者の退職に伴い、日本の大学教育の在り方は大きな転換点に立っていると感じている。2年次の大学教育に何を求めるかは、大学

や教師により異なるが、高度な内容を簡略化して概念を把握させることと、現時点では消化不良であっても将来直面するであろう内容を丁寧に説明することをうまくバランスさせる必要があると考える。簡略化した内容であるとかえって理解不足や勘違いを招くと思われる演算増幅器に関しては最初から実際の製品の仕様から説明することで、種類や特性項目が多いことを理解させたうえで、現実のセンサ回路などで起こる問題を提示しつつ初心者にもわかる説明を心がけた。技術が高度化するなかで研究室や会社業務で役立つ技能と常識を身につけて欲しい。このため、計測の現場で出会う難解なノウハウ的内容やA-D変換器に関しては近年普及が進んでいる $\Delta\Sigma$ 方式についても説明した。

計測工学の教科書は、すでに多くの良書が出版されているが、電気回路および電磁気を学んだ段階の2年次の学生には網羅的すぎるとも感じており、この教科書では選定した基礎内容の理解、演習から始め、徐々に電子計測を説明していく方針とした。ゆとり教育の余波が大学の理工教育や企業活動にさまざまな影響を与えている反省からも、計算力と論理性を伸ばし、かつ実践にもつながる内容を教えることで第一線の企業、研究活動で活躍できる学生が育つことを期待している。同時に教師が教えやすい内容となるよう配慮を行ったつもりであるが、紙面の制約からやや説明を簡略化した記載や説明不足や厳密ではない部分もある。筆者の力不足の面も含め、不十分な点に関しては今後ご意見をいただき改善をしていきたい。

本書の執筆にあたって、多くの参考文献を参考にさせていただき、これらの著者に謝意を表す。最後に、本書を出版するお世話をいただいたコロナ社の方々に感謝する。

2014年7月

著者

# 目 次

## 1. 計測の基礎と SI

1.1 計 測 と は	1
1.2 計 測 の 事 例	3
1.2.1 天 文 と 暦	3
1.2.2 クーロンの法則	4
1.3 次元と表記法	5
1.3.1 次 元	5
1.3.2 量記号, 単位記号の表記法	5
1.4 国際単位系 (SI)	6
1.5 単 位 の 例	9
1.5.1 メ ー ト ル	9
1.5.2 秒	10
1.5.3 質 量	11
1.6 電気量の標準と量子標準	11
1.6.1 電 気 量	11
1.6.2 量 子 標 準	12
演 習 問 題	12

## 2. 測定手法と統計処理

2.1 直接測定・間接測定と偏位法・零位法	14
2.1.1 測 定 法	14
2.1.2 目 盛	14
2.1.3 零 位 法	16

2.2 有効数字	17
2.3 不確かさと測定	17
2.3.1 不確かさ	17
2.3.2 測定と標準偏差	18
2.4 不確かさの伝搬	21
2.5 誤差	23
2.6 正規分布	24
2.6.1 ガウス分布	24
2.6.2 正規分布	25
2.6.3 標準偏差と不確かさ	27
2.7 最小二乗法	27
2.7.1 1変数最小二乗法	27
2.7.2 2変数最小二乗法	28
演習問題	30

### 3. 雑音

3.1 デシベル	32
3.1.1 デシベルの定義	32
3.1.2 デシベルの演算	32
3.1.3 電圧を用いたデシベルの定義と dBm	33
3.2 熱雑音	34
3.3 ショット雑音, $1/f$ 雑音	35
3.4 外来雑音	36
3.5 SN比と雑音指数 $F$	40
3.5.1 SN比の定義	40
3.5.2 雑音指数の定義	40
演習問題	43

## 4. 演算増幅器とフィルタ

4.1 演算増幅器の原理と種類	44
4.1.1 演算増幅器とは	44
4.1.2 構成と特性	45
4.1.3 フィードバック	46
4.1.4 入力抵抗	47
4.2 演算増幅器を用いた各種回路	48
4.2.1 バッファ回路	48
4.2.2 加算回路	49
4.2.3 差動増幅回路	50
4.2.4 計装増幅回路	51
4.2.5 積分回路	53
4.3 フィルタ	54
4.3.1 フィルタの種類	54
4.3.2 一次低域フィルタ	54
4.3.3 二次低域フィルタと効果	55
演習問題	57

## 5. A-D変換器, 電圧測定

5.1 A-D変換器の原理と種類	58
5.1.1 A-D変換器とデジタル	58
5.1.2 ビット数	60
5.1.3 二重積分方式(低速用)	60
5.1.4 逐次比較方式(中速用)	62
5.1.5 $\Delta\Sigma$ (デルタシグマ)方式(中速用)	63
5.1.6 内蔵用(中速用)	66
5.2 交流電圧の測定	66
5.2.1 可動鉄片型交流計器による測定	66
5.2.2 整流回路を用いた交流値	67
5.3 リアルタイムアナログ演算ユニットによる実効値の算出	69

5.4 基準電圧発生回路	70
演習問題	71

## 6. 電圧型センサとマイコン計測

6.1 熱電対	72
6.2 ホール素子	74
6.3 温度IC	76
演習問題	78

## 7. 電流測定

7.1 直流電流測定	79
7.2 微小電流測定	80
7.3 交流測定	81
演習問題	82

## 8. 電流型センサを用いた光・放射線計測

8.1 フォトダイオード	83
8.2 光電子増倍管	87
8.3 放射線センサ	88
8.4 撮像素子	91
演習問題	92

## 9. 抵抗、インピーダンス測定

9.1 間接測定と四端子法	93
9.1.1 抵抗の間接測定	93
9.1.2 デジタルマルチメータによる抵抗測定	94
9.1.3 定電流回路	95
9.1.4 四端子法	96

9.2 高抵抗測定	96
9.3 ブリッジ回路と LCR メータ	97
演習問題	100

## 10. 抵抗・キャパシタンス型センサ

10.1 ひずみゲージを用いた力センサ	101
10.2 白金測温抵抗体	104
10.3 サーミスタと光導電セル	104
10.4 キャパシタンス変化を利用した加速度センサ	106
演習問題	109

## 11. 電力測定

11.1 直流電力	110
11.2 電流計型計器	111
11.3 交流電力	112
11.3.1 交流電力の間接測定	112
11.3.2 3 電圧計法	113
11.3.3 サンプリグ法	114
11.3.4 ホール素子電力計	115
11.4 電力量計による測定	116
演習問題	118

## 12. 周波数

12.1 セシウム原子時計	119
12.1.1 原子時計	119
12.1.2 周波数安定度と平均化	120
12.2 水晶振動子と周波数カウンタ	121
12.2.1 水晶振動子の構造と駆動回路	121
12.2.2 周波数カウンタ	123

12.2.3	ヘテロダイン	124
12.3	掛け算器と周波数の引き算	125
	演習問題	127

### 13. オシロスコープ, 記録計 (ロガー)

13.1	オシロスコープの原理	128
13.1.1	アナログオシロスコープ	128
13.1.2	デジタルオシロスコープ	129
13.1.3	入力プローブ	130
13.2	波 形	132
13.2.1	波形の読み方	132
13.2.2	波形の用語	133
13.3	リサージュの図形	135
13.4	記 録 計	136
	演習問題	137

### 14. コンピュータ計測とセンサ無線

14.1	計測ソフトウェア	138
14.2	センサ無線	138
14.3	センサネットワーク	141
	演習問題	143

	参 考 文 献	144
	演習問題解答	145
	索 引	153





# 計測の基礎と SI



## 1.1 計測とは

計測という文字は、数量、時間を計る（count）という文字と、長さ、面積、速さを測る（measure）の2文字からなりたっている。ほかに、量る、諮るなどの文字があるが、「JIS 技術用語」によれば計測（instrumentation）とは「なんらかの目的を持って、事物を量的にとらえるための方法・手段を考究し実施し、その結果を用いること」となっている。「事物を量的にとらえること」を測定とすると、計測の概念は図 1.1 のように表される。

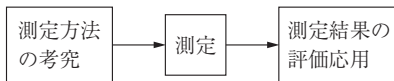


図 1.1 計測の概念

測定（measurement）が既存の測定器で定量的な数値を求める単純作業であるのに対して、計測では、測定手法に対する理解ののちに測定・統計処理を行い、必要に応じて新手法の考案も行う。さらに、測定誤差などを踏まえた測定結果の評価や応用も必要である。

「計測なくして科学なし」

“There can be no science without measurement.”

という言葉は熱力学を確立したイギリスの物理学者 W. トムソン（別称：ケルヴィン卿）の

“When you can measure what you are speaking about, and express it in

## 2 1. 計測の基礎と SI

numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meager and unsatisfactory kind: it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely in your thoughts advanced to the stage of science.”

からきているが、科学の進歩に不可欠なものが計測である。

電気電子計測は、電圧、電流などの電気量の測定から始まり、その後、物理量を電気・電子機器を用いて測定することも意味するようになった。物理量の測定では、物理量を電気量に変換するセンサとその信号処理回路を用いて電圧信号とする。センサには、温度より電気抵抗が変化する素子、温度により起電力が発生する素子、光により起電力が発生する素子、圧力により電気抵抗が変化する素子などがある。

現代的な計測の手順としては

- ① 単位と測定対象の物理
- ② 測定手法
- ③ 計測器と測定回路の原理

を学んで理解したのちに、測定を実施してコンピュータにデータを取り込み、さらに

- ④ データ処理と解析
- ⑤ わかりやすくまとめと発表・報告
- ⑥ 新現象の場合には、単位系の確立

を行うことになる。まとめと発表により知識の共有と国内外との共同作業が可能となるが、共同作業では共有できる単位を決め、相互に数値化することが必要になる。中世では国ごとに単位がばらばらであり、単位そのものも個人の身体の長さなどを利用したものも多かった。これに対して、世界的に単位を統一しようとして確立したのが国際単位系 (SI<sup>†</sup>) である。

科学的な判断というものは、知識、測定、計算、熟考ののちに生まれる。こ

---

† フランス語の *Système International d'Unités* (英語では *International System of Units*) の頭文字からとったものである。

の判断ができるように、本書を通して方法論を学んで欲しい。合理的な判断ができる能力は、科学者・技術者としての大切な素養であり、将来の大切な指針（コンパス）となる。

## 1.2 計測の事例

### 1.2.1 天文と暦

人類が初めて取り組んだ計測の一つとして、天文と<sup>れき</sup>暦がある。最初に、実際の事象から説明すると SI 基本単位の 1 秒を基準にすると、1 日は 86 400 秒である。ところで、地球の自転は約 23 時間 56 分 4 秒であり 24 時間ではない。地球が自転する間に地球はさらに同じ方向に太陽の周りを公転しているので、約 24 時間で地球から見る太陽は同じ高さに昇る。実際には地球の自転速度は変動するため、1 太陽年の時間間隔の  $1/31\,556\,925.974\,7$  を 1 秒とすることが、1956 年の国際度量衡委員会（Comité International des Poids et Mesures, CIPM）において決議された。その後、1967 年の第 13 回国際度量衡総会（CGPM）において現在の原子時計による SI 基本単位の秒の定義が決定されたわけであるが、この秒の定義による 1 日を用いて地球の公転の日数を示すと 365.242 189 572 日である。

過去の歴史において天体観測と計算に基づくさまざま暦が作られたのは、この 1 日と 1 年の関係が原因であり、これが暦を難解にした理由でもある。詳細は、天文学や歴史書の説明に譲るとして、大まかに 1 年を 365.25 日として 4 年ごとに<sup>うるう</sup>閏年で補正を入れるユリウス暦、1 年を 365.242 5 日として 400 年間 97 回の閏年で補正するグレゴリオ暦、正確な 1 日の観測を月の満ち欠けに求め、月の満ち欠けを基本とする月と閏月での補正をする太陰暦などがある。これらの天文観測と暦の計算が天文、光学、幾何学、微分・積分などの学問を進展させたといってもよい。

## 1.2.2 クーロンの法則

別の例として図 1.2 に示すクーロンの法則について述べる。昔から、静電気の存在は知られていたが、その関係はよくわかっておらず、微弱な静電力を測る装置もなかった。それに対して C. A. クーロンは、図 1.3 のようなねじり秤<sup>はかり</sup>を考案して、絹糸でつり下げた状態の球に電荷  $Q_A$ 、 $Q_B$  を与え（図 1.2）、そのときに移動する距離  $r$  を糸のばね係数をねじで変えながら測定した。これより反発力  $F$  をデータ収集して統計処理を行うことで、関係式 (1.1) を導出した。

$$F = A \frac{Q_A Q_B}{r^2} \quad (1.1)$$

この関係式に、ガウスの面積分と電界という考えを取り込むと電磁気学でなじみのある式 (1.2) が導かれる。

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_A Q_B}{r^2} \quad (\epsilon_0: \text{真空の電気定数}) \quad (1.2)$$

電荷の単位は C (クーロン) であるが、これにより電流の単位の必要性が生まれる。

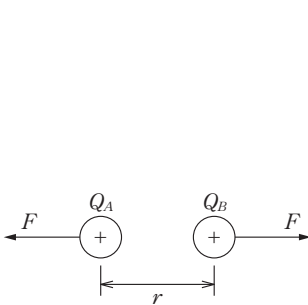


図 1.2 クーロンの法則  
(電荷の反発の例)

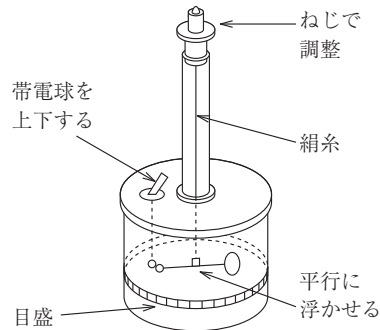


図 1.3 ねじり秤の構造

## 1.3 次元と表記法

### 1.3.1 次元

物理量を文字、数値、単位を使って表すルールである表記法に関して説明を行う。物理量を表す文字は次元を持っており、この関係は表 1.1 のように表される。

表 1.1 国際計量系 (International System of Quantities) の基本量の記号と次元の記号

基本量	基本量の記号	次元の記号
長さ (length)	$l$	<b>L</b>
質量 (mass)	$m$	<b>M</b>
時間 (time)	$t$	<b>T</b>
電流 (electric current)	$I$	<b>I</b>
熱力学温度 (thermodynamic temperature)	$T$	<b>Θ</b>
物質質量 (amount of substance)	$n$	<b>N</b>
光度 (luminous intensity)	$I_V$	<b>J</b>

例えば、力 ( $F$ ) = 質量 ( $m$ ) × 加速度 ( $a$ ) の場合には質量の次元を **M**、長さの次元を **L**、時間の次元を **T** とする。dim を次元を導く関数とすると

$$\dim m = \mathbf{M}, \quad \dim a = \mathbf{LT}^{-2}, \quad \dim F = \mathbf{MLT}^{-2}$$

となり、両者の次元は等しくなる。

### 1.3.2 量記号、単位記号の表記法

本書で使う量記号、単位記号の表記に関しておもな留意点を以下にまとめる。

- ・量記号は斜体 (イタリック体) で書き、単位記号やその接頭語は直立体 (ローマン) で書く。
- ・数値のあとの単位記号や = の前後には、小さなスペースを入れる。

・量記号に単位を指定せず、数値に単位を指定する。例えば、量記号のあとに〔 〕や（ ）で単位を指定する表記は行わない。これは、質量を  $M$  [kg] と表記した場合、 $M$  が物理量ではなく単なる数値と解釈されるためである。また、物理量 = 数値 × 単位という意味からも  $M = 1 \text{ kg}$  が正しい。 $r = a \text{ m}$  とした場合に、 $r$  が物理量、 $a$  が定数、 $m$  が単位記号であることは斜体と直立体で判断する。

・単位の除算には斜線 / を用い、乗算の場合では乗算記号 × を用いずに ・ や小さなスペースを入れて表す。

例えば、 $1 \text{ N} = 1 \text{ m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} = 1 \text{ m kg s}^{-2} = 1 \text{ m kg/s}^2$  と書くのが正解であり、 $1 \text{ mkg s}^{-2}$  のように続けて書かない。

・sin, cos, log などの関数を表す記号は直立体（ローマン体）で書く。  
 ・表、グラフ中の表記には、一般に  $M$  [kg] などの表記が使われることが多いが、 $M/\text{kg}$  の表記のほうが次元をなくした数値を記述するという意味では適切である。

## 1.4 国際単位系 (SI)

人類が道具を使い世界へ広がっていくなかで、さまざまな国々で計測に関する独自のルールを定めて用いてきた。日本では、尺貫法が明治時代まで使われていたが、この中の長さの単位（寸）、容積の単位（合）、重さの単位（両）は中国の前漢末期に起源がある。現在でも、土地面積を坪（2 畳、約  $3.3 \text{ m}^2$ ）で表し、米国では、ヤード・ポンド法が生活の中で使われているように、メートル法の導入後も、民間の固有文化はなかなかなくなるならない。

一方、社会生活が地球規模に拡大する過程で、国際的に統一した計量単位の必要性が高まった。メートルはフランス革命の時代に創設され 1799 年にメートルとキログラムの白金製標準器がパリ国立公文書館に収蔵保管されたことから始まり、その後、ガウスの研究、マクスウェル、トムソンらの主張に従って三つの力学系単位 センチメートル (cm)、グラム (g)、秒 (s) に基づく

表 1.2 国際単位系 (SI) の 7 個の基本単位

量	名称	記号	定義
長さ	メートル (meter)	m	メートルは、1 秒の $\frac{1}{299\,792\,458}$ の時間に光が真空中を伝わる行程の長さである [第 17 回 CGPM (1983), 決議 1]。
質量	キログラム (kilogram)	kg	キログラムは、質量の単位であって、それは、国際キログラム原器の質量に等しい [第 3 回 CGPM (1901)]。
時間	秒 (second)	s	秒は、セシウム 133 の原子の基底状態の二つの超微細準位の間の遷移に対応する放射の周期の 9 192 631 770 倍の継続時間である [第 13 回 CGPM (1967), 決議 1]。
電流	アンペア (ampere)	A	アンペアは、真空中に 1 メートルの間隔で平行に置かれた無限に小さい円形断面積をもつ無限に長い 2 本の直線状導体のそれぞれを流れ、これらの導体の長さ 1 メートルにつき $2 \times 10^{-7}$ ニュートンの力を及ぼし合う一定の電流である [CGPM (1946), 決議 2, 第 9 回 CGPM (1948), 承認]。
熱力学的温度	ケルビン (kelvin)	K	ケルビンは、水の三重点の熱力学的温度の $1/273.16$ である [第 13 回 CGPM (1967), 決議 4]。
物質質量	モル (mole)	mol	モルは、0.012 キログラムの炭素 12 の中に存在する原子と同数の要素粒子を含む系の物質質量である [第 14 回 CGPM (1971), 決議 3]。
光度	カンデラ (candela)	cd	カンデラは、周波数 $540 \times 10^{12}$ ヘルツの単色放射を放出し、所定方向におけるその放射強度が $\frac{1}{683}$ ワット毎ステラジアンである光源の、その方向における光度である [第 16 回 CGPM (1979), 決議 3]。

表 1.3 基本単位を用いて表される SI 組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立法メートル	m <sup>3</sup>
速さ, 速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
質量体積 (比体積)	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
濃度 (物質質量)	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>

表 1.4 固有の名称と記号で表される SI 組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	固有の名称	記号	SI 基本単位による表し方
平面角*1	ラジアン	rad	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1} = 1$
立体角*1	ステラジアン	sr	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} = 1$
周波数	ヘルツ	Hz	$\text{s}^{-1}$
力	ニュートン	N	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
圧力, 応力	パスカル	Pa	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
エネルギー, 仕事	ジュール	J	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
熱量, 電気量*2	ジュール	J	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
仕事率, 放射束	ワット	W	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
電荷, 電気量	クーロン	C	$\text{s} \cdot \text{A}$
電圧, 起電力	ボルト	V	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
静電容量	ファラド	F	$\text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$
電気抵抗	オーム	$\Omega$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンズ	S	$\text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^3 \cdot \text{A}^2$
磁束	ウェーバ	Wb	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$
インダクタンス	ヘンリ	H	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度	$^{\circ}\text{C}$	K
光束	ルーメン	lm	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{cd} = \text{cd}$
照度	ルクス	lx	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{cd} = \text{m}^{-2} \cdot \text{cd}$
モーメント	ニュートンメートル	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = \text{s}^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	$\text{rad}/\text{s}^2$	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} = \text{s}^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	$\text{V}/\text{m}$	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
電気変位	クーロン毎平方メートル	$\text{C}/\text{m}^2$	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
誘電率	ファラド毎メートル	$\text{F}/\text{m}$	$\text{m}^{-3} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$
透磁率	ヘンリ毎メートル	$\text{H}/\text{m}$	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} = \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$

\* 1 平面角 (ラジアン) と立体角 (ステラジアン) は、従前は SI の補助単位として取り扱われていたが、補助単位という階級が第 20 回国際度量衡総会 (1995 年) の決議により廃止されたことに伴い、現在では次元 1 として組立単位に組み入れられている。

\* 2 課金のために、例えば家庭用電力量計などで計測される電気量の単位はキロワット時 (kW・h) である。1 kW・h = 3 600 kJ = 3.6 MJ

表 1.5 SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
$10^{24}$	ヨタ (yotta)	Y	$10^{-1}$	デシ (deci)	d
$10^{21}$	ゼタ (zetta)	Z	$10^{-2}$	センチ (centi)	c
$10^{18}$	エクサ (exa)	E	$10^{-3}$	ミリ (milli)	m
$10^{15}$	ペタ (peta)	P	$10^{-6}$	マイクロ (micro)	$\mu$
$10^{12}$	テラ (tera)	T	$10^{-9}$	ナノ (nano)	n
$10^9$	ギガ (giga)	G	$10^{-12}$	ピコ (pico)	p
$10^6$	メガ (mega)	M	$10^{-15}$	フェムト (femto)	f
$10^3$	キロ (kilo)	k	$10^{-18}$	アト (atto)	a
$10^2$	ヘクト (hecto)	h	$10^{-21}$	ゼプト (zepto)	z
$10^1$	デカ (deca)	da	$10^{-24}$	ヨクト (yocto)	y



CGS 単位系が導入された。

1875 年にメートル条約が締結して、日本は 1885 年（明治 18 年）にこの条約に加入し、1890 年に原器が日本に到着した。「メートル条約に加盟しているすべての国が採用しうる実用的な単位系」として、国際度量衡総会で 1960 年に採用されたのが国際単位系であり、その略称として SI と呼ばれている。国際度量衡総会の決議をベースにした国際文書が SI 文書であり、決議を要約して 7 個の基本単位として表 1.2 のように定められた。7 個の基本単位からさまざまな単位が定義され、これを組立単位と呼ぶ。表 1.3 に SI 組立単位の例をまとめて示す。

また、SI 組立単位の中には固有の名称（多くは人名）を持つものがあり、これらを表 1.4 に示す。また、量を表す単位には 10 の整数乗倍である記号（表 1.5）を SI 接頭語（prefix）として付ける。なお、SI という用語の中に、国際単位系という意味が含まれているため、MSK 単位系のように「SI 単位系」とは叫ばない。

## 1.5 単位の例

単位の元となる標準という概念も科学技術の進化と同時に改定が続けられている。具体的な例としてメートル、秒と質量をあげる。

### 1.5.1 メートル

メートル（m）の以前の定義は、地球の北極から赤道までの子午線の長さの 1 000 万分の 1 であった。フランスのダンケルクとスペインのバルセロナ間の測量によりメートルを算出してメートル原器が作られ、各国で使用するためのメートル原器が 30 本製作された。日本に配布されたものは“No.22”で、国際メートル原器との差は  $0.78 \mu\text{m}$  である。原器上で 1 m の長さを規定する目盛線の幅が  $7 \mu\text{m}$  あるため、この程度の不確かさが残ることになる。そこで、1960 年に次ページの決議 6 により、クリプトン ( $^{86}\text{Kr}$ ) の出す光の波長を標準

と定めている。

〈決議6〉

第11回国際度量衡総会（CGPM）は

- ・ 国際原器が、計量学上で今日要求される十分な正確さでメートルを定義していないこと、
  - ・ 他方では、自然界に由来する不滅の標準を採用することが望ましいこと、を考慮し
1. メートルは、クリプトン86の原子の準位  $2p_{10}$  と  $5d_5$  の間の遷移に対応する放射の、真空中における波長の1650763.73倍に等しい長さである。
  2. 1889年以來有効であった白金イリジウム製の国際原器に基づくメートルの定義は廃止される。
  3. 1889年の第1回国際度量衡総会によって承認された国際メートル原器は1889年に定められたのと同じ条件の下で、国際度量衡局に保管される。ことを決定する。

この決議も1983年に更新され、現在は光速と時間から長さ1mを定義している。これは真空中の光速の不変性と、セシウム原子時計の $10^{-13}$ の精度をよりどころとしている。近年ではさらに精度の高い $10^{-16}$ を実現する光格子時計が提案されている（コラム参照）。

**コラム** ストロンチウム光格子時計

レーザー光の干渉定在波によって作られた光格子の中に、ストロンチウム原子を数 $\mu\text{K}$ までレーザー冷却して約100万個を閉じこめる。光格子を構成するレーザーの波長を適切に選び（魔法波長（399.9 nm））とすると、時計遷移の基底状態と励起状態の光シフトを打ち消すことができるため、光シフトの影響がきわめて少なくなる。2001年、東京大学の香取秀俊によって提唱されセシウム原子時計を超える原子時計として期待されている。理論的にはセシウム原子時計の1000倍の「300億年に1秒」の精度があり、2009年に16桁の精度を実現している。

### 1.5.2 秒

1時間を60等分ずつに分割したのは、60進法を使用していたバビロニア人であり、1日を24時間に分割するのはそれより以前にエジプト人によって始められた。これにより1秒（s）は平均太陽日の86400分の1の定義となっ

# 索 引

<p style="text-align: center;"><b>【あ】</b></p> <p>アナログ演算ユニット 69 アナログオシロスコープ 128 アバランシェ   フォトダイオード 86 アベレージングモード 134</p> <p style="text-align: center;"><b>【い】</b></p> <p>一次低域フィルタ 54 インピーダンスブリッジ 98</p> <p style="text-align: center;"><b>【え】</b></p> <p>演算増幅器 44</p> <p style="text-align: center;"><b>【お】</b></p> <p>オフセット電圧 46 温度 IC 76</p> <p style="text-align: center;"><b>【か】</b></p> <p>ガウス分布 24 拡張不確かさ 27 加算回路 49 可動コイル型電流計 14 可動鉄片型交流計器 66 ガードリング 80 間接測定 14</p> <p style="text-align: center;"><b>【き】</b></p> <p>基準電圧発生回路 70</p>	<p style="text-align: center;"><b>【く】</b></p> <p>クーロンの法則 4</p> <p style="text-align: center;"><b>【け】</b></p> <p>計器の階級 23 計装増幅回路 51 計 測 1</p> <p style="text-align: center;"><b>【こ】</b></p> <p>高域フィルタ 54 合成標準不確かさ 27 光電子増倍管 87 光導電セル 106 国際単位系 6 コモンモード雑音 39</p> <p style="text-align: center;"><b>【さ】</b></p> <p>最小二乗法 27 雑音指数 40 撮像素子 91 差動増幅回路 50 サーミスタ 104 サンプルホールド回路 59</p> <p style="text-align: center;"><b>【し】</b></p> <p>次 元 5 四端子法 96 実験標準偏差 19 質 量 11 周波数カウンタ 123 ショット雑音 35</p>	<p>シールド 36 シンチレーション   カウンタ 89</p> <p style="text-align: center;"><b>【す】</b></p> <p>水晶振動子 121 スルーレート 46</p> <p style="text-align: center;"><b>【せ】</b></p> <p>正規分布 25 積分回路 53 セシウム原子時計 119 ゼーベック効果 72 センサネットワーク 141 センサ無線 138 全波整流回路 68</p> <p style="text-align: center;"><b>【そ】</b></p> <p>測 定 1</p> <p style="text-align: center;"><b>【た】</b></p> <p>帯域消去フィルタ 54 帯域フィルタ 54</p> <p style="text-align: center;"><b>【ち】</b></p> <p>逐次比較方式 62 直接計数方式 123 直接測定 14</p> <p style="text-align: center;"><b>【つ】</b></p> <p>ツェナーダイオード 70</p>
--	---	---

<b>【て】</b>		<b>【は】</b>		<b>【ほ】</b>	
低域フィルタ	54	白金測温抵抗体	104	放射線センサ	88
抵抗値の系列	75	バッファ回路	48	ホール素子	74
デジタル		半波整流回路	68	ホール素子電力計	115
オシロスコープ	129			<b>【め】</b>	
デジタルマルチメータ	94	<b>【ひ】</b>		メートル	9
定電流回路	95	ひずみゲージ	101		
デシベル	32	秒	10	<b>【ゆ】</b>	
電荷結合デバイス	91	標準偏差	18, 27	有効数字	17
電流計型計器	111			<b>【り】</b>	
<b>【と】</b>		<b>【ふ】</b>			
トリガ	128	フィードバック	46		
トリマコンデンサ	131	フィルタ	54	力率	113
		フォトダイオード	83	リサージュの図形	135
<b>【に】</b>		不確かさ	17, 27	量子効率	85
二次低域フィルタ	55	—の伝搬	21	量子標準	12
二重積分方式	60	フリス公式	142		
入力プローブ	130	ブリッジ回路	97	<b>【れ】</b>	
		フルスケール	60	零位法	16
<b>【ね】</b>				暦	3
熱雑音	34	<b>【へ】</b>		レシプロカル方式	123
熱電対	72	平均の実験標準偏差	19		
		ヘテロダイン	124	<b>【ろ】</b>	
<b>【の】</b>		偏位法	14	ロガー	137
ノイズシェーピング	65				

<b>【数字】</b>		<b>【G】</b>		<b>【S】</b>	
1/f雑音	35	GM管	89	SI	6
3電圧計法	113			SI組立単位	7, 8
<b>【A】</b>		<b>【L】</b>		SI接頭語	8
A-D変換器	58	LCRメータ	97	SN比	40
		LC低域フィルタ	38		
<b>【D】</b>		<b>【M】</b>		<b>【Z】</b>	
dBm	33	MEMSセンサ	107	ZigBee規格	139
		MOS型撮像素子	92	<b>【ギリシャ文字】</b>	
				$\Delta\Sigma$ 方式	63

— 著者略歴 —

1988年 東北大学工学部電子工学科卒業  
1993年 東北大学大学院博士課程修了（電子工学専攻）  
博士（工学）（東北大学）  
1993年 豊橋技術科学大学助手  
1999年 慶應義塾大学専任講師  
2003年 慶應義塾大学助教授  
2007年 慶應義塾大学准教授  
2010年 慶應義塾大学教授  
現在に至る

## デジタル時代の電気電子計測基礎

Electric and Electronic Instrumentation in the Digital Era

© Yoshinori Matsumoto 2014

2014年9月8日 初版第1刷発行



検印省略

著者 まつもと よしのり  
松本 佳宣  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 新日本印刷株式会社

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 978-4-339-00866-1 (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