

計測・制御
テクノロジー
シリーズ
1

計測自動制御学会 編

計測技術の基礎 (改訂版)

— 新 SI 対応 —

山崎 弘郎
田中 充 共著

コロナ社

出版委員会（平成12年度）

委員長 黒 森 健 一
委員 岩 月 正 見
(五十音順) 國 藤 進
田 村 安 孝
松 尾 芳 樹
武 藤 康 彦
劉 康 志
渡 辺 嘉二郎

(本シリーズ企画時の出版委員会構成)

ま え が き

計測技術は、科学技術の分野をはじめとして、社会生活のあらゆる局面で重要な役割を果たしている。計測技術は代表的な横断型の技術である。幅広い分野で活用されるため、それぞれの分野で固有技術として発達し細分化された。細分化された技術の問題点として学問や技術の全体像が見えにくいことが、学習や技術の伝承に問題となり、若い世代の科学技術離れの原因の一つともいわれている。本書は計測技術の基礎を解説するにあたり、計測技術の全体像を示すことを重視した。

計測の目的は対象に関する不確かさを減らし、より明確な情報を得て、対象を正しく把握することである。そこで、不確かさを重要なキーワードとした。

本書の構成をつぎに述べる。**1**章では、計測の目的を解説し、技術の発展と将来への展望を背景に全体像を示した。特に対象のモデル構築の重要性を強調した。**2**章では、計測技術が社会で果たしている役割と、その中で解決を迫られる課題を述べた。**3**章では、計測対象を知るための仕組みを示しつつ計測システムを解説し、計測される量や対象に依存せず共通に使われる技術を示した。つぎに信号の変換の基本を解説し、実例として基礎的なセンサの原理や構造を述べた。**4**章では、不確かさが増すために計測の障害となるノイズを排除し、得られる情報の質を高める構造や信号処理の基礎を解説した。**5**章では、従来の誤差に代わって計測の評価を支配する不確かさについて、その原因を見極め、定量化し、正しく表現する手順を解説した。**6**章では、計測結果が正確で客観性をもつための計測標準の確立について歴史的過程や高い安定性を実現する技術、その基礎となる単位系や物理定数など、量の体系について解説した。

本書の執筆は**1**～**4**章は山崎、**5**、**6**章は田中が分担し、事前に協議し、連携をとりながら進めた。それでも、前半と後半の記述の間に差があるのに気づ

かれるであろう。これは執筆前から予想されたことなので、著者らの考えをここで述べる。

本シリーズのなかで、本書は第1巻にあたり、計測技術への入門と計測技術の基盤である標準技術を解説する。入門の部分では、すべてを網羅することより技術の基礎を示し、計測の全体像を示すことを重視した。一方、計量標準や不確かさに関する議論を扱うのは本書のみである。標準は国家標準を確立し供給するために、最先端の技術が投入される最も革新的な部分である。

改訂版では、まさにこの技術が結実し現在科学的に最も普遍的かつ安定とされる計量標準の単位がメートル条約体制下で2019年5月決議されたこと（SI基本単位の改訂）を機会に、その内容の紹介と産業・社会への影響を取り上げている。

本書は全体像を示した入門書であると同時に、最先端技術を解説する二重の役割を負っている。私たちはこの課題を両立させたいと願い、努力した。

本書を計測技術の教科書として使用される場合について、著者としての希望を述べる。前半については、縦割の工学技術が多いなかにあつて、横断型の構造をもつ計測技術の特徴と、その全体像を伝えて計測に対する興味を引き出されることを期待する。後半では、計測の信頼性を評価し社会へ役立てる技術を伝えることが重要で、そのために個々の話題については講義のなかでどこまで踏み込むか、その程度を適宜選択されることを妨げない。

著者らの思いがどのように伝わり、理解されるか、読者の判断に待つのみであるが、計測技術の奥深さと同時に最先端技術としての革新性が伝えられれば、著者らにとって大きな喜びである。

末尾ながら、計測自動制御学会の出版委員会委員として、本シリーズの構築に尽力された田村安孝 教授、および原稿に目を通されて貴重なご意見をいただいた黒森健一 博士に深く感謝する。また、終始本書の出版に尽力されたコロナ社に御礼を申し上げる。

2009年3月，2020年9月

山崎弘郎・田中 充

目 次

1. 計 測 と は

1.1 計測とセンシング	1
1.1.1 計測の目的と役割	1
1.1.2 計測, 測定, 計量, センシング	2
1.2 量の体系と計測対象のモデル	3
1.2.1 計測対象のモデル構築と量的表現	3
1.2.2 数式モデル, 数値モデル	5
1.2.3 モデルと実際との差異	7
1.3 計測により得られる情報量	8
1.3.1 情報量	8
1.3.2 計測で得られる情報量	8
1.4 計測技術発展の歴史	10
1.4.1 質量の計測	10
1.4.2 時刻・時間の計測	13
1.4.3 長さの計測	14
1.4.4 電信と電気抵抗の計測	15
1.4.5 増幅器の利用	16
1.4.6 伝送と記録 — 時空間軸上のデータ移動 —	18
1.4.7 デジタル技術の影響	18
1.4.8 デジタル技術導入による計測の自動化と知能化	20
1.5 これからの計測技術の発展	21
1.5.1 計測対象空間の拡大	21
1.5.2 計測感度の拡大	22
1.5.3 計測対象のパラダイムの変化	23
1.6 ま と め	26

2. 計測の社会的役割と実例

2.1 知的基盤としての計量標準と単位量の体系	27
2.2 計測と科学的研究	28
2.2.1 火星の位置計測から導かれたケプラーの法則	28
2.2.2 火星の大気と土壌の分析	28
2.2.3 月までの距離の計測	29
2.3 産業計測	30
2.3.1 産業の品質管理と計測値の整合性	30
2.3.2 自動化と計測 — プロセス産業の自動制御 —	31
2.3.3 組立産業における対象認識	33
2.4 計量と取引	34
2.5 環境の計測	36
2.5.1 計測の広域性と同時性	36
2.5.2 地球環境のリモートセンシング — 環境汚染の監視 —	37
2.5.3 大気中のCO ₂ の計測	39
2.5.4 自動車排ガスの計測	41
2.6 医療と計測技術	42
2.6.1 人間対象の計測技術の課題	42
2.6.2 医療用画像計測技術	43
2.7 ま と め	45

3. 計測システムの構成 — 知るための仕組み —

3.1 計測システムの構造	46
3.1.1 計測システムのモデル	46
3.1.2 計測システムのモデルとノイズ	48
3.2 計測システムの機能	48
3.2.1 計測機器の基本的機能	48
3.2.2 センサによる情報獲得と信号変換	49
3.2.3 基準量との比較	50
3.2.4 結果の表示	52

3.2.5	校正とトレーサビリティ	54
3.2.6	ヒューマンインタフェース機能	54
3.3	測定の方式 — 偏位法と零位法 —	56
3.3.1	計測の評価 — 誤差から不確かさへ —	56
3.3.2	偏位法	57
3.3.3	零位法	58
3.3.4	信号の変換と増幅による基本的方式の変化	59
3.4	センサによる検出と変換	60
3.4.1	センサの変換機能	61
3.4.2	信号変換とエネルギー変換	62
3.4.3	受動形センサと能動形センサ	63
3.4.4	受動形センシングと能動形センシング	64
3.4.5	信号変換を支配する物理法則とセンサの構造 — 構造形センサと物性形センサ —	65
3.5	物理センサによる信号変換	67
3.5.1	力, 微小変位センサ	67
3.5.2	位置, 角度センサ	72
3.5.3	エンコーダ — 増減形と絶対値形 —	73
3.5.4	速度センサ, 角速度センサ	75
3.5.5	流速, 流量のセンサ	75
3.5.6	温度センサ	79
3.5.7	光, 赤外線センサ	85
3.5.8	磁気センサ	85
3.6	化学センサの信号変換原理と構造	86
3.6.1	物質成分計測の課題 — 感度と選択性 —	86
3.6.2	感度と選択性を両立させる前処理	87
3.6.3	物質成分計測手法と機器の構造	87
3.7	化学センサによる変換	89
3.7.1	赤外線分光によるガス分析	89
3.7.2	pHセンサによる液体成分計測	91
3.7.3	固体電解質形酸素センサ	92
3.8	アナログ信号処理 — 計測信号処理のための電子回路技術 —	94

3.8.1	アナログ信号処理の基軸，振幅，時間，周波数	94
3.8.2	増幅 — 信号の振幅あるいはパワーの増強 —	96
3.8.3	インピーダンス変換および電圧比較回路	97
3.8.4	線形演算回路	98
3.9	A-Dインタフェースの信号処理	99
3.9.1	信号の符号化 — A-D変換とD-A変換 —	99
3.9.2	標本化によるサンプル値と量子化	100
3.9.3	A-D 変換	101
3.9.4	D-A 変換	106
3.10	ま と め	108

4. 計測の質を高める仕組み

4.1	計測の不確かさを増すノイズ	109
4.1.1	信号とノイズ	109
4.1.2	ノイズの発生源	110
4.1.3	信号対ノイズ比 (SN比)	111
4.1.4	ノイズの遮へい技術	112
4.1.5	耐ノイズ性	115
4.2	信号選択技術	115
4.2.1	静的な選択構造	116
4.2.2	補償構造	116
4.2.3	差動構造	118
4.2.4	動的な選択行動	120
4.2.5	時間領域における表現	121
4.2.6	時間領域における信号の選択	121
4.2.7	周波数領域における表現	123
4.2.8	周波数領域における信号の選択	126
4.3	アナログ信号処理 — 信号選択のための電子回路技術 —	127
4.3.1	アナログ信号処理の基軸，振幅，時間，周波数	127
4.3.2	差動増幅回路	127
4.3.3	差動増幅器の応用	129
4.3.4	アナログフィルタ回路 — 周波数領域の処理 —	131

4.3.5	変調増幅器	133
4.3.6	電圧安定化回路	137
4.4	ま と め	139

5. 計測の評価と限界 — 不確かさ, 精度, 不確定性 —

5.1	計測の信頼性とトレーサビリティ	140
5.2	計測の信頼性と測定の不確かさ	143
5.3	質量測定 of 計測システムのモデルと測定量の推定	145
5.4	計測システムのモデルと推定の偏りと不確かさ	149
5.5	不確かさの原因	153
5.5.1	一様な確率分布と不確かさの起源	153
5.5.2	いろいろな確率分布と不確かさ	155
5.5.3	測定量の定義が不完全なための不確かさ	159
5.5.4	測定量の定義を文字どおり実現することができないための 不確かさ	161
5.5.5	対象とする測定量を代表する測定資料が選ばれないための 不確かさ	161
5.5.6	測定に対する環境条件とその影響が十分に知られていない ことによる不確かさ	162
5.5.7	測定作業による不確かさ	163
5.5.8	機器の分解能または識別限界が有限であることによる不確かさ	164
5.5.9	測定に使用する計量標準および標準物質の不正確な値に起因する 不確かさ	165
5.5.10	測定の方法および手順に組み込まれる近似と仮定に基づく 不確かさ	166
5.5.11	見掛け上の同一条件のもとでの測定量の繰返し観測の変動による 不確かさ	166
5.5.12	評価できない不確かさ	167
5.6	不確かさの評価と表現	168
5.6.1	不確かさの表現方法	168
5.6.2	電気抵抗校正での不確かさ評価の事例	170
5.6.3	質量標準校正での不確かさ評価の事例	174

5.7 校正と計量標準供給	178
---------------------	-----

6. 単位と計量標準

6.1 量の体系と単位系	182
6.1.1 SIとその仲間	184
6.1.2 SI以外の単位	188
6.1.3 実用的な単位	189
6.2 計 量 標 準	189
6.2.1 国際単位系 (SI) のための計量標準	190
6.2.2 時間の単位の定義	192
6.2.3 長さの単位の定義	197
6.2.4 質量の単位の定義	201
6.2.5 電気量の単位	204
6.2.6 温度の単位	209
6.2.7 測光量の単位	213
6.2.8 物質量の単位	216
6.3 組立量などの国際計量標準	222
6.3.1 電離放射線の単位	222
6.3.2 圧力標準の単位	225
6.4 基礎物理定数	227
付 録	229
引用・参考文献	233
索 引	235



計測とは



本章では、計測とは何か、その概念を説明する。計測とは、対象に関する情報を獲得し、不確かさを減らす行為である。最初に対象を表現するモデル構築の重要性を強調する。また、計測技術の発展と役割の拡大について、その歴史と背景を説明する。そして、今後における計測技術の進歩とパラダイムの変化について述べる。

1.1 計測とセンシング

1.1.1 計測の目的と役割

われわれは対象に興味を惹かれると、ごく自然に対象についてより正確な情報を獲得しようとする。対象に関する曖昧さを減らし、明確化しようとする欲求に基づく行動である。それは、対象が存在する「実の世界」と「人間の知の世界」を情報で結びつける道筋となっている。対象に関する情報を「人間の知の世界」にもち込むことを広い意味でセンシングという。

計測とは、人間の知の対象を量的に把握する目的で情報を獲得し、それを量的に記述し活用することである。計測あるいはセンシングを実行する機器やアルゴリズムを含むシステムを、計測システムあるいはセンシングシステムと呼ぶ。そのなかで対象に最も近い機器をセンサ (sensor) という。

対象に関する情報を獲得することで、対象についての不確かさが減少する。したがって、計測とは対象についての不確かさを減らす行為といえる。後述するように、得られた情報の量を不確かさの減少量と結びつけて定量化できる。

情報は、計測による定量的な記述により明確に把握されるが、その目的はい

ろいろである。知的好奇心により対象を深く理解するための計測は科学的計測と呼ばれ、科学研究の基盤である。産業、特に工業において生産効率を上げ、また、高い品質を維持する目的の計測は工業計測と呼ばれる。特に自動化された生産工程では計測も自動的に実行される。また、物質やエネルギーの取引は対象の量の計測値を根拠にして取引が行われている。このように、社会における活動や生活のほとんどあらゆる局面において計測が実施されており、その技術は重要な基盤技術となっている。

1.1.2 計測、測定、計量、センシング

計測に関連した言葉で、測定と計量あるいはセンシングという言葉がしばしば使われる。ここで、これらの言葉の差異を明らかにしておく。

「測定」とは、対象となる量を、基準とする量と比較して対象量がその何倍であるかを定め、表示することである。測定の結果は通常、数値で表される。したがって、測定を行う機器には「基準」とする量を保持し、対象量と「比較」し、結果を「表示」する機能が不可欠である。

測定に対して、「計測」は「基準」、「比較」、「表示」の機能は共通であるが、客観的な基準量を定めることができない対象などについても、その情報を獲得し、それを量的に記述できる技術を含む。したがって、計測は測定を包含するだけでなく、それよりも広い概念である。

また、通商取引のために取引対象の量を明確にする目的の計測は日常生活と関係が深く、特に「計量」と呼ばれ、公的に取り決められた基準量を基礎とする計測である。

さらに、対象の不確かさを減らす目的では、センシングは計測と共通だが、量的な記述ができない対象の情報を獲得するので計測より広い概念である。計測、測定、計量、センシングの包含関係を図 1.1 に示す。

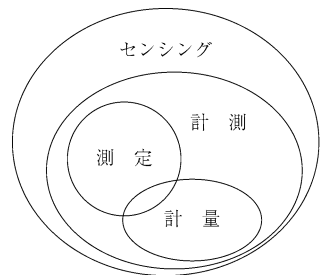


図 1.1 計測、測定、計量、センシングの包含関係

1.2 量の体系と計測対象のモデル

1.2.1 計測対象のモデル構築と量的表現

計測とは対象を量的に把握することであるから、対象の量的記述を可能にする表現が必要である。その量的な表現は、対象から獲得した情報を量の体系と結びつけて実現する。ここで、量の体系とは人々が広く共有している数値により対象の大きさを表現する枠組みである。量の体系と結びつけることにより計測の結果が客観化される。例えば、「富士山は高い」という表現では客観性がない。山の高さを海面を基準とした海拔の高さで数値で表現すると決めることにより、「3 776 m の富士山が日本で最も高い」、しかし、外国には富士山の 2 倍以上の高さをもつ山が多数存在することが明確になる。

対象を量的に把握するには、対象のモデルが必要である。対象の構成や構造がわかっている場合は、いかなる量で対象を表現するかを定めたものがモデルである。地球上の山の高さを表現するのに海面という基準面を設定し、そこからの高さの差で表す。これが山の高さを量的に表現するモデルである。

対象の構造や構成がわからないときは、それらを想像して仮定のモデルを構築し、対象の特徴を定量的に表現するパラメータを定める。その特徴パラメータを測定することで定量的な記述が可能になる。また、その表現を対象の特性の計測結果と比較することで、仮定したモデルの正しさが確認される。

例えば、構造不明な電気回路素子を計測対象とすると、抵抗、インダクタンス、キャパシタンスからなる等価回路で構築した場合の素子の相互接続関係モデルを図 1.2 (a)、(b) のように仮定する。等価回路は素子の仮定した近

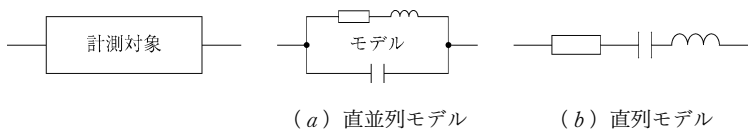


図 1.2 計測対象とそのモデル (等価回路で構築した場合の素子の相互接続関係モデル)

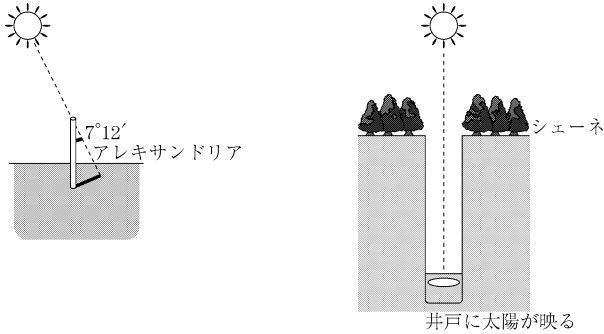
似モデルであり、図 (a) および (b) のいずれの接続がより正しいかは、素子全体の特性の計測結果で判断される。また、特徴パラメータである抵抗、インダクタンス、キャパシタンスなどの値も推定される。

コンデンサのような素子においても、キャパシタンスだけではなくインダクタンス分や抵抗分が存在する。これらの特性は、異なる周波数においてコンデンサの特性を計測することにより、共存する抵抗やインダクタンスの値と素子の構造が推定できる。

ここで、計測とモデルとの関係を示す別の事例を示す。アレキサンドリアにいたギリシャ人のエラステネスは、B.C.230 年につぎの方法で地球の大きさを推定した。彼は夏至の日、南中の時刻に地面に垂直に立てた棒がつくる影を見る角度を測り、図 1.3 (a) のように $7^{\circ} 12'$ の値を得た。また、同じ夏至の南中時刻、アレキサンドリアより南のシェーネ（現在のアスワン）では、図 (b) のように深い井戸の水面に太陽が映ることから、南中時に太陽が真上にある事実を知っていた。また、アレキサンドリアとシェーネの間にはたがいに交通があったので、その距離はわかっていた。エラステネスは地球が大きな球形であると仮定し、図 (c) のような状況を想像した。

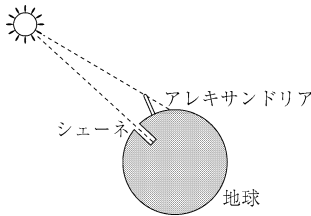
夏至の南中時刻の 2 地点における太陽の角度の差と 2 地点間の距離から、地球の円周の長さは現在の単位に直すと約 45 000 km であると推定した。現在は人工衛星から撮影した画像などにより地球が球であることを疑う人はいない。また、それが約 40 000 km の円周の長さをもつことも知られている。しかし、いまから 2200 年以上前にそれを推定したのは見事な洞察力である。エラステネスは、直接観測された図 1.3 (a), (b) の状況から、全体を見ることができない図 (c) の状況を洞察して、地球の球形のモデルを仮定し、観測された事象と符合し、地球の大きさを記述するモデルを構築したのである。

モデルのなかで、2 地点間の距離や緯度の差はモデルの特徴パラメータであり、それがわかれば目的の特徴パラメータである地球の円周の長さが得られる。そして地球が真の球形であれば、半径あるいは円周の長さにより完全に大きさが記述できる。また、 $7^{\circ} 12'$ という値を得る行為は測定であり、その正確



(a) アレキサンドリアでの観察

(b) シェーネでの観察



(c) 対象のモデル構築 (パラメータの測定)

図 1.3 エラトステネスによる地球の大きさを記述するモデルの構築

な測定値があって、正しい計測値が得られる。

計測値をモデルに導入することで、対象が人間の知の世界において再構成される。それにより定量的な全体像が再構成され、正確な知識となる。逆に仮定のモデルにせよ、モデルがまったく構築できない対象の計測は不可能である。

1.2.2 数式モデル, 数値モデル

モデルとして使われるのは、1.2.1 項の例のように具体的なものばかりではない。モデルが数式や数値で表現される場合もある。計測対象の量 x がセンサに作用して物理法則で一定の関係がある y がセンサ出力として得られた場合を考える。いま、物理法則で x と y との間に式 (1.1) の関係があるとす

索引

【あ】		
圧電センサ 79	音 速 209	共相関行列 169, 170
アナログ-デジタル変換 19	温度係数 173	キログラム原器 191
アナログ表示 52	【か】	【く】
アナログ方式 13	化学センサ 87	空気浮力 176
アボガドロ定数 219	科学的計測 2	空調設備 163
	拡散ストレイニングージ 70	組立単位 184
	確率分布 155	グランドツルース 38
	確率分布関数 153, 168	クロスキャパシタ 205
	加算回路 98	
	ガス定数 219	【け】
	ガスメータ 35	計算可能な電気容量 205
	偏り 143	計 測 2
	カーマ 223	——のパラダイム 26
	ガラス電極 pH センサ 91	計測システムのモデル 46, 143
	カール・ジャンスキー 109	計測増幅器 129
	カルマン渦 77	計測対象のモデル 3, 46
	勸 告 166	計測標準の供給体系 31
	完全黒体 85	経年変化 174
	観測回数 167	計 量 2
	カンデラ 213	計量標準 142, 189
	感度の補正 151, 174	ゲージファクタ 68
		ゲージブロック 159
	【き】	結晶方位 159
	規 格 142	現 示 189
	基準接点 82	原子時計 193
	基礎物理解定数 227	検出器 50
	基底状態 217	
	輝 度 213	【こ】
	基本単位 184	広域性 36
	逆過程モデル 47	高域通過フィルタ 126, 132
	逆フーリエ変換 124	恒温槽 173
	吸収スペクトル 161	工業計測 2
	吸収線量 223	工業量 159
	吸 着 150	校 正 31
	凝固点降下法 220	
【い】		
イオンチェンバ 223		
位相弁別整流回路 126, 135		
一貫性 184		
移動度 80		
移動平均 121		
インタフェース 54		
インピーダンス変換回路 97		
【う】		
ウィーナー-ヒンチンの定理 125		
【え】		
影響量 63		
エネルギー制御形センサ 63		
エネルギー分与 223		
エネルギー変換形センサ 63		
エラトステネス 4		
遠隔操作 163		
エンコーダ 73		
演算増幅器 96		
【お】		
重みつき平均 181		
オリフィス 76		
温室効果 39		

校正温度	173	磁気シールド	114	ストローハル数	78
校正結果	178	磁気抵抗効果形センサ	85		
合成不確かさ	169, 175	示強変量	62	【せ】	
構造形センサ	66	時空間上のデータの移動	18	正規分布	156, 157
光 束	213	子午線	191	制御エラー	165
光 度	213	自己相関関数	122	静的な選択構造	116
後 流	78	磁 性	176	静電遮へい	112
国際キログラム原器	201	自然単位系	188	静電シールド	113
国際計量基本用語集	187	質量分析器	218	積分回路	98
国際原子時	194	自動化	21	セシウム原子時計	195
国際単位系	27	自動検針システム	36	絶対値形エンコーダ	74
国際度量衡委員会	187	自動平衡形	60	絶対零度	211
国際度量衡委員会単位		遮へい	112	接地電位	130
諮問委員会	188	周期信号	121	接頭語	184, 186
国際度量衡局	188	周期的ノイズ	121	センサ	1, 49
国際比較	179, 190	集積回路	18	センシング	2
国際標準化機構	187	従属的	155	センシング機能	49
国際放射線防護委員会	223	重量法	218	全放射温度計	84
国際法定計量会議	187	重力加速度	149, 151	線量当量	223
誤 差	56	重力マップ	152		
固体電解質形酸素センサ	92	受動形センサ	64	【そ】	
国家計量標準	178	順過程モデル	47	相関関係	155
コックピットの情報提示	56	小数点	186	増減形エンコーダ	73
コンパレータ	98	状態方程式	219	相互承認	189
【さ】		照 度	214	相互相関関数	122
差圧流量計	75	示容変量	62	走査形トンネル顕微鏡	22
サイコロ	156	情報の移動	18	相対不確かさ	170
差動構造	118	情報量	8	増幅器	17
差動増幅回路	127	ジョセフソン素子アレイ	207	測温接点	82
差動変圧器	71	ジョセフソン電圧標準	207	測温抵抗体	80
サーベイメータ	222	ジョンソン雑音温度計	210	測 定	2
サーボ形	60	シールド線	113	測定・校正の能力	180
サーミスタ	81	信 号	109	測定分解能	164
三角関数の直交性	136	人工ノイズ源	111	測光量	213
三角分布	169	信号変換機能	49		
サンプリング	161	信頼性水準	178	【た】	
サンプリング値	100			帯域除去フィルタ	133
サンプル値	100	【す】		帯域通過フィルタ	126, 133
サンプルホールド回路	100	推奨波長	199	ダイオードレーザ	215
【し】		水素イオン濃度	91	大気屈折率	200
時間平均	121	推 定	145	大気窓	38
磁気遮へい	114	水道メータ	35	耐ノイズ性	115
		数式モデル	6	単位系	182
				単位構造	72

段差パターン	179	電離放射線	222	白金抵抗温度計	208
単色形放射温度計	84	電流滴定法	219	発光ダイオード	215
【ち】		電力量計	35	場の法則	65
地球公転周期	193	【と】		ばらつき	167
地球自転	193	同位体希釈質量分析法	220	パルス幅変調帰還積分	
逐次比較形 A-D 変換回路	102	同期加算	123	A-D 変換器	105
知識の体系	24, 25	同時性	37	パワースペクトル	125
知能化	21	同相信号除去比	128	反転増幅回路	96
中間値	181	動的な選択構造	120	半導体抵抗ひずみセンサ	69
超伝導電流	207	同等性	179, 180	【ひ】	
直列制御形電圧安定回路	138	等比てんびん	145	ピエゾ抵抗係数	69
チョッパ	134	特定標準器	190	比較電極	92
【つ】		独立的	155	光コム技術	200
ツェナー電圧標準	206	ドップラー効果	161, 196	光周波数標準	161
【て】		トレーサビリティ	54, 142, 182	光てこ	17
低域通過フィルタ	126, 131	トレーサビリティ体系	31	光の速度	197
低温熱量計	216	【な】		光放射	210
デジタル-アナログ変換	19	ナイキスト雑音	167	非侵襲性	43
デジタル表示	53	ナイキストの定理	211	ピストンシリンダ	226
デジタル方式	13	ナノスケール	179	ビット	8
デジタルマルチメータ	171	【に】		非反転増幅回路	97
定電圧回路	137	日本産業規格	176	秒	192
定電圧ダイオード	137	認識の計測	23, 24	標準	141
滴定法	219	【ね】		標準ガス	40
データキャリヤ	33	熱雑音	112	標準供給	178
データの平滑化	122	熱対流	150	標準抵抗器	172
デュアルスロープ積分形		熱電対	81	標準場	225
A-D 変換器	104	熱力学的温度	209	標準比視感度曲線	213
電圧比較回路	98	熱量計形測定器	224	標準物質	189, 221
電界効果トランジスタ	92	【の】		標準分銅	148
電気抵抗	170	ノイズ	109	標準偏差	156
電磁気力	147	能動形センサ	64	標準化値	100
電子式はかり	145	ノズル	76	【ふ】	
電磁シールド	114	【は】		ファラデー定数	220
電子てんびん	147	倍量	184	ファントホッフの公式	220
電子密度	208	パソコン	20	負帰還	96
電磁流量計	76	パーソナルコンピュータ	20	負帰還増幅回路	96
電波天文学	110			不規則信号	121

物質質量	216	放射輝度	213	物差し	50
物性形センサ	66	放射強度	213		
物性に関する法則	65	放射照度	213	【よ】	
物理センサ	61	放射線	222	ヨウ素安定化 He-Ne	
物理量センサ	61	放射線源の強さ	225	レーザ	199
フーリエ級数	124	放射束	213	揚力	78
フーリエ変換	124	放射能標準	225	より線	114
浮力	150	放射量	213		
分光学	87	膨張法	227	【り】	
分光分析	87	法令	166	理想気体	209, 219
分光放射束	213	補償構造	83, 116, 118	リモートセンシング	37
分銅	50, 148	補正	143	硫化カドミウム	85
分量	197	補正係数	76	粒子フルエンス	222
分量単位	184	ホール効果	86	流出係数	76
		ボルテージホロワ	97	流体振動	78
【へ】				量子化	100
平均	181	【ま】		量子化誤差	102
平均情報量	9	マイクロ波共振器	196	量子損失	215
平均太陽日	192	マイクロマシニング技術	67	量子ホール効果	208
偏位法	57, 59	マイケルソン	21	量の計測	23
変換器	50	マニュアル	165	量の体系	3, 25, 182
偏差	143	マンガン	208		
変成器ブリッジ	70			【れ】	
ベンチュリ管	76	【み】		零位法	58, 59
変調と復調	126	水時計	192	レーザ干渉計	198
		水の三重点	211	レーザ波長	199
【ほ】		水の相図	212		
ホイートストン	15	【め】		【ろ】	
ホイートストンブリッジ	15, 52	メートル原器	191	ロックインアンプ	134
ボイル-シャルルの法則	209	メートル条約	182	ローレンツの法則	147
ホイストレインゲージ	69	目盛読取り	164		
ボイルの法則	227			【わ】	
方形分布	169	【も】		ワイヤストレインゲージ	68
放射温度計	209	モジュール	72	ワット・バランス	202

【A】

absolute type encoder	74
A-D conversion	19
A-D 変換	19
atmospheric window	38
auto-correlation function	122

【B】

band pass filter	126, 133
band rejection filter	133
bit	8
black body	85
BPF	126

【C】

calibration	31
CdS	85
CGS 組立単位	188
CMRR	128
common mode rejection ratio	128

comparability	181	ion sensitive FET	92	SI	27
computer tomography	20	ISFET	92	SI 基本単位	185
cross-correlation function	122			SI 組立単位	185
		[J, L]		SI 定義	178
[D]		JCGM	187	signal	109
D-A conversion	19	least significant bit	102	signal to noise ratio	111
D-A 変換	19	lift	78	smoothing	122
detector	50	low pass filter	126, 131	SN 比	111
differential pressure		LPF	126	spectroscopy	87
flowmeter	75	LSB	102	STM	22
		[M]		Strouhal number	78
[E]		magnetic shield	114	Systeme International	
electromagnetic flowmeter		mol	216	d'Unites	27
	76	most significant bit	102	[T]	
electromagnetic shield	114	MRI 装置	44	thermistor	81
electrostatic shield	113	MSB	102	thermo couple	81
encoder	73	[N]		transducer	50
E_n 値	180	negative feedback	96	twisted pair	114
error	56	noise	109	[U]	
extensive variable	62	noise immunity	115	uncertainty	56
		[O, P]		U 字管	225
[F]		operational amplifier	96	[V]	
FET	92	paradigm	26	VIM	188
field effect transistor	92	PC	20	von Klitzing 定数	209
		periodical noise	121	[W]	
[G]		periodical signal	121	wake	78
global positioning system	25	personal computer	20	weight	50
GPS	25, 191	power spectrum	125	Wheatstone bridge	52
ground potential	130	PSD	135	Wiener-Khinchine's	
ground truth	38	[R]		theorem	125
		R-2 R はしご形抵抗回路網		[X]	
[H]		random signal	121	X 線 CT	20, 43, 44, 45
high pass filter	126, 132	[S]		[数字]	
HPF	126	sampled data	100	1 次測定法	217
		scale	50	1/f ノイズ	135
[I]		sensor	1, 49	2 項分布	157
IC	19	shielded wire	113		
increment type encoder	73	shielding	112		
instrumentation amplifier	129				
integrated circuits	18				
intensive variable	62				

— 著者略歴 —

山崎 弘郎 (やまさき ひろお)

1956年 東京大学工学部応用物理学科卒業
1956年 株式会社横河電機製作所入社
1971年 東京大学工学部講師 (非常勤) 兼任
1972年 工学博士 (東京大学)
1974年 株式会社横河電機退社
1975年 東京大学教授
1993年 東京大学名誉教授
横河電機株式会社常務取締役, 技術担当
1995年 株式会社横河総合研究所取締役会長
2000年 株式会社横河総合研究所研究理事
2003年 横河電機株式会社, 株式会社横河総合研究所退職

1989~1990年 計測自動制御学会会長

田中 充 (たなか みつる)

1972年 東京大学理学部物理学科卒業
1977年 東京大学大学院理学系博士課程修了
1977年 通商産業省 (現経済産業省) 計量研究所入所
1999年 通商産業省計量研究所計測システム部部長
2001年 独立行政法人産業技術総合研究所 (産総研) 計測標準研究部門部門長, 国際度量衡委員会選任 (~2012年)
2004年 産総研計量標準総合センター (NMIJ) 代表 (~2008年)
2006年 産総研標準計測分野コーディネーター (~2012年)
2012年 産総研 フェロー (~2015年)
2015年 一般社団法人ファイナパル産業会 (~2020年)

計測技術の基礎 (改訂版) — 新 SI 対応 —

Fundamentals of Measuring Technology (Revised Edition)

© 公益社団法人 計測自動制御学会 2009

2009年 4月10日 初版第1刷発行

2020年 12月15日 初版第3刷発行 (改訂版)

検印省略

編者 公益社団法人
計測自動制御学会
著者 山崎 弘郎
田中 充
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 壮光舎印刷株式会社
製本所 株式会社 グリーン

112-0011 東京都文京区千石4-46-10

発行者 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 <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-03375-5 C3353 Printed in Japan

(新宅)



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います。
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いません。
落丁・乱丁はお取替えいたします。