

電氣学会大学講座

電氣応用計測

改訂版

電氣学会

電気学会大学講座

電気応用計測

改訂版

執筆委員

青山学院大学	工学博士	内藤 正	(第1章, 第2章)
日本大学	工学博士	松代 正三	(第7章)
住友重機械工業	工学博士	上滝 致孝	(第3章)
東京芝浦電気	工学博士	東 堯	(第4章)
電子技術総合研究所	工学博士	服部 昭三	(第5章)
東京大学	工学博士	寺尾 満	(第6章)
東京大学	工学博士	丹羽 登	(第8章)
ティアック特機	工学博士	大岡 崇	(第9章)
電子技術総合研究所	工学博士	桜井健二郎	(第10章)
			(第11章)

電気学会

電気学会大学講座

電気応用計測 (改訂版)

1974 年 6 月 1 日 初版発行

1984 年 3 月 26 日 13版発行

著 作 者	電 気 学 会 通 信 教 育 会
発 行 者	横 井 忠 明
印 刷 所	株 式 会 社 三 秀 舎
製 本 所	石 川 製 本 所

発 行 所 社 団 法 人 電 気 学 会

〒 100 東京都千代田区有楽町 1-7-1

電 話 (03) 215-4811 (代)

振替口座 東京 7-720 (電気学会大学講座)

発 売 元 株 式 会 社 オ ー ム 社

〒 101 東京都千代田区神田錦町 3-1

電 話 (03) 233-0641

振替口座 東京 6-20018

乱丁落丁の際はお取替え致します

序 言

電気学会は、電気に関係ある学者、経営者、技術者、学生等を会員とし、電気工学のほか、電子工学、情報工学等も含めた広い分野において活躍する総合学会であり、我が国における、この分野の研究と技術の進歩に大きく寄与しており、また国際的にも権威のある学会である。

この講座は、電気学会がその事業の一つとして開講したものであり、その目的は向学の熱意に燃えながらも、進学の機会に恵まれない青年諸君に対して大学、高専あるいは工高程度の学力を与え、我が国の電気工業の進歩と発展を担うべき技術者を一人でも多く養成しようとするにあった。

また、この教科書はいずれも執筆者が斯界の最高権威であり、その内容がきわめて正確・嶄新であるので、各大学、高専、工高および企業内教育における教科書として、最も適した、最も信頼のおけるものとして広く活用されている。

この教科書の編修については、斯界における第一線の技術者と老練なる学者とからなる編修委員会において立案された大綱に基づき執筆され、さらに編修委員が原稿を読み返して慎重なる検討を加えて出来上がったものであるので、学会として責任を持って各方面に推薦することが出来る。

また、年々新しい技術の進歩に速応して改訂がなされている。この講座は開講以来すでに四半世紀を経て、この教科書で学んだ人達の数は一百万人を遙かに突破し、受講学生もいまでは各界の指導者として活躍されており、一つの伝統を創り出すにいたっている。

終りに、本講座の推進に尽力された学会歴代の役員諸先輩に対し敬意を表するとともに、教科書、学習指導書、ならびに学習資料に執筆および編修の実務に携って努力された諸兄に厚く御礼申上げる。

昭和49年4月

編修委員長 高 木 正

電 氣 学 会 大 学 講 座
電 氣 測 定 改 訂 編 修 委 員

工 学 院 大 学	工学博士	西	野	治
青山学院大学	工学博士	内	藤	正
東 京 大 学	工学博士	寺	尾	満
東 海 大 学		西	川	甚 太
広島電機大学	工学博士	山	口	光 次

電 氣 学 会 大 学 講 座 編 修 委 員

委員長		高	木	正	工学博士	星	合	正	治
幹 事		相	木	一 男		三ツ井		新	次郎
委 員	工学博士	一	本	松 珠 璣	工学博士	森		寿	五 郎
		井	上	清 二	工学博士	山	口	次	郎
		柴	田	二 三 男	工学博士	山	下	英	男
		瀬	戸	千 秋	工学博士	山	田	直	平
		豊	島	嘉 造		吉	岡	俊	男
	工学博士	埴	野	一 郎		吉	田	確	太
		原	田	久	工学博士	六	角	英	道
	工学博士	法	貴	四 郎					

凡 例

1. 高等学校卒業程度の基礎教育によって、十分に理解し得るように考慮して組み立てられてある。
2. 本書は、大学の標準教科書または参考書としても使用し得るように、十分な考慮を払っている。これによって、従来講義の筆記に費された学生の労力を省き、理解の容易な記述と、教室での講義および討論の効果と相まって、学習活動を最も有効にすることができる。
3. 各章の終りには、その章で得られた知識を整理するために特に摘要をつけ、さらに適切な問題を掲げ、いわゆる自己検査ができるようにしてある。
4. 各章には適当な例題を掲げ解答を付してある。
5. 本書の記述は、つぎの方針によった。
 - a. 本文は口語体とし、つとめて当用漢字、新かなづかいに従った。熟語、人名など、やむを得ないものはその例外である。
 - b. 電気関係術語および図記号は、文部省、日本工業規格および電気学会電気規格調査会制定のものに従うのを原則とした。
 - c. 重要な用語は、主として初出の際、太字をもって示し、また、その英語をつとめて脚注に示した。
 - d. 図、表、式番は、章ごとに通し番号とした。
 - e. 図、表を本文中で最初に引用する際は、太字で示した。
 - f. 単位には、MKS 有理単位系を用いた。
 - g. 記号などの使用は次の例による。
 - (i) 記号文字の使用には、単位の記号は立体、量の記号は斜体とする。たとえば、単位は、V, mm, 量は V, l
 - (ii) 量記号の後の単位を表わす記号は、間違いをおこさないために括弧を付する。たとえば、 $I [A], l [mm]$

目 次

第1章 電気応用計測一般

1.1 総 説	1
1.2 電気応用計測の原理	2
1.3 電気値変換	3
1.4 電気計測回路	5
1.5 電気応用計測の特徴	6
高感度計測——遠隔計測——迅速計測——計算機計測——無反作 用計測——非破壊的計測	
1.6 摘 要	8
1.7 問 題	8

第2章 力学量の計測

2.1 総 説	9
2.2 長さ、変位の計測	9
2.2.1 概 説	9
2.2.2 キャパシタンス法	10
原理——振幅変調法——周波数変調法——位相変調法	
2.2.3 インダクタンス法	16
原理——差動変圧器——電磁形マイクロメータ	
2.2.4 電気抵抗法	20
2.2.5 パルス変換法	21
2.3 力の計測	22
2.3.1 概 説	22
2.3.2 圧電気による圧力計測	23
2.3.3 抵抗線ひずみ計	24
2.4 振動の計測	27
2.4.1 振動計測一般	27
2.4.2 振動形の種類	29
2.4.3 動電形振動計	30
2.4.4 電磁形振動計	31
2.4.5 圧電形振動計	32
2.5 速度の計測	34
2.5.1 概 説	34

2.5.2	熱線形速度計	35
2.5.3	電気回転速度計	36
2.5.4	ストロボスコープ速度計	37
2.6	摘 要	38
2.7	問 題	39

第3章 流体の計測

3.1	流速, 流量の計測	40
3.1.1	概 説	40
	流体の性質——流速——流量——レイノルズ数	
3.1.2	流速, 流量の計測	43
	流速の計測と計測器——流量の計測と計測器の一般——流量 指示の電気信号への変換	
3.1.3	電磁流量計	49
	原理——構成と特徴	
3.1.4	超音波流量計	51
	原理——構造と特徴	
3.1.5	熱式流量計	54
	原理——構造と特徴	
3.1.6	その他電子技術を利用した流量計	55
	質量流量計——核磁気共鳴流量計	
3.2	比重, 密度の計測	58
3.2.1	概 説	58
	比重と密度の定義——液体の比重測定——気体の比重測定	
3.2.2	連続比重測定	61
3.3	液面の計測	63
3.3.1	概 説	63
	直接法——フロート法——圧力法	
3.3.2	静電容量を利用した液面計	65
3.4	摘 要	66
3.5	問 題	67

第4章 熱の計測

4.1	総 説	68
4.1.1	温度目盛	69
4.1.2	温度定点	70
4.2	温度計の原理による分類	71

4.2.1	熱学的分類	71
4.2.2	電気工学的分類	75
4.3	熱電温度計	77
4.3.1	熱電温度計の構成	77
4.3.2	熱電対による高温の測定	80
4.3.3	熱電対による低温の測定	81
4.4	抵抗温度計	81
4.4.1	抵抗温度計の構成	81
4.4.2	極低温測定用抵抗温度計	83
4.4.3	抵抗温度計と熱電温度計との特性および用途の比較	83
4.5	放射温度計	84
4.5.1	サーモパイルおよびボロメータの構造	84
4.5.2	サーモパイルの感度	86
4.5.3	投射エネルギーと測定温度	87
4.6	光による温度測定	88
4.6.1	光高温計	88
4.6.2	光電式放射温度計	91
4.7	熱の測定	93
4.7.1	放射熱量の測定	93
4.7.2	差動式放射計	96
4.7.3	温度計，放射計の目盛定めの標準	97
4.8	摘 要	97
4.9	問 題	99

第5章 光 の 計 測

5.1	総 説	100
5.1.1	放 射	100
	放射の速度——波長の単位——電磁波のスペクトル——光量	
	光子エネルギーと真空中の波長との関係	
5.1.2	放射量と測光量	100
5.1.3	測光の基本	102
	距離逆二乗の法則——照度の余弦法則——ガラス板の透過	
	および反射——溶液の透過	
5.2	光計測の素子	104
5.2.1	光の検出器	104
	光電効果による検出器——放射エネルギーを熱に変換して	
	検出する検出器	

5.2.2	フィルタ	109
5.3	光と色の計測	111
5.3.1	測光の基礎	111
5.3.2	照度の測定	112
5.3.3	光度の測定	115
5.3.4	光束の測定	115
5.3.5	輝度の測定	116
5.3.6	分光測定	117
5.3.7	測色	118
	測色の原理——光電色彩計	
5.3.8	色温度・分布温度の測定	121
5.3.9	三色分解測定とその応用	121
5.4	光を使う応用計測	122
5.4.1	測定手段としての光の特徴	122
	物性に関連した周波数範囲——測定によって対象の状態が 乱されることが少ない——不確定性	
5.4.2	物理法則の利用	124
	概説——変換器——測定の形式	
5.4.3	幾何光学系の応用	125
5.4.4	波動現象の利用	128
5.4.5	物理眼の応用	129
	交照帰零方式——標線との合致検出法——パルス技術の応用 ——テレビ技術の応用	
5.4.6	物質形変換器の利用	137
5.5	摘要	140
5.6	問題	142

第6章 音の計測

6.1	総説	143
6.2	音の性質	143
6.2.1	気体媒質の性質	143
6.2.2	波動方程式	144
6.2.3	平面波，球面波	146
6.3	音の単位と標準	147
6.3.1	物理量の単位	147
	音圧——音圧レベル——デシベル——音の強さ——音の強さ のレベル	

6.3.2	音響標準.....	148
	標準マイクロホン——音圧感度——自由音場——拡散音場 ——自由音場感度，拡散音場感度	
6.4	音響測定法.....	150
6.4.1	測定器.....	150
	平均値メータ——RMS 形メータ——VU メータ——高速度 レベル記録計	
6.4.2	音の周波数分析法.....	152
	ヘテロダイン分析法——フィルタによる分析法	
6.4.3	相関法.....	154
	相関関数——相関器——騒音源の測定——しゃ音量の測定	
6.5	音響機器の測定.....	156
6.5.1	マイクロホン.....	156
	音場レスポンス——指向特性——電気インピーダンス—— 位相特性	
6.5.2	スピーカ.....	158
	周波数レスポンス特性——指向特性——非直線ひずみの測定 ——電気インピーダンス	
6.6	騒音測定.....	160
6.6.1	騒音と聴感.....	160
	音の大きさ——音の大きさのレベル——騒音レベル	
6.6.2	騒音計.....	162
	マイクロホン——抵抗減衰器——聴感補正回路——指示計器 ——校正装置	
6.6.3	騒音計による騒音測定法.....	163
	音場——暗騒音——反射音——その他の影響	
6.7	建築音響.....	164
6.7.1	残響時間.....	164
6.7.2	吸音率.....	165
	残響室法による測定——定在波管による測定	
6.8	音波を利用した計測.....	167
6.8.1	距離の計測.....	167
	パルス法——周波数変調法	
6.8.2	音速計測による応用計測.....	168
	風速の計測——気温の計測——流速の計測	
6.8.3	その他の応用計測.....	169
	液体の粘度の計測——ドプラ効果の応用——計数への応用	

6.9 摘 要	170
6.10 問 題	171

第7章 放射線の計測

7.1 総 説	172
7.2 放射線と放射能	172
7.2.1 α 線	172
7.2.2 β 線	173
7.2.3 γ 線	173
7.2.4 中性子線	174
7.3 放射線の単位	174
7.3.1 放射線に関する単位	174
照射線量——吸収線量——生体実効線量——線量率——粒子 束密度(放射線束密度)——エネルギー束密度	
7.3.2 放射能に関する単位	176
7.4 放射線の検出方法	176
7.4.1 概 説	176
7.4.2 電離作用を利用する検出法	176
検出法の種類——電離箱——比例計数管——GM 計数管—— 半導体検出器	
7.4.3 けい光作用による検出法	181
7.4.4 写真作用による検出法	182
7.5 放射線計測器	183
7.5.1 照射線量計	183
7.5.2 線量率計	184
7.6 放射線応用計測	186
7.6.1 放射線応用計測一般	186
7.6.2 放射線応用計測の基本原理	186
電離作用——透過作用——散乱作用——位置の検出	
7.6.3 応用計測に使用される放射性アイソトープ	190
7.6.4 電離作用を利用した応用計測	193
電離風速計, 流速計——マイクロてんびん——面積計	
7.6.5 透過作用を利用した応用計測	194
厚さの計測——液面位置の計測——密度の計測	
7.6.6 散乱作用を利用した応用計測	198
7.7 摘 要	198
7.8 問 題	199

第8章 成分の計測

8.1 総 説	200
8.2 湿度計	200
8.2.1 概 説	200
8.2.2 電気式乾湿球湿度計	201
8.2.3 電気抵抗湿度計	202
8.2.4 光電式露点湿度計	203
8.2.5 デュー・セル	203
8.3 水分計	204
8.3.1 概 説	204
8.3.2 電気抵抗水分計	204
8.3.3 誘電水分計	205
8.4 液体成分計	205
8.4.1 概 説	205
8.4.2 pH 計	207
電極電位差の測定——水素電極——ガラス電極——その他の 電極——pH 標準緩衝液——電位差測定回路	
8.4.3 液体濃度計	214
電極式濃度計——電磁濃度計	
8.4.4 ポーラログラフ	218
ポーラログラフの原理——金属イオンの半波電位——自動 平衡直流ポーラログラフ——交流ポーラログラフ	
8.4.5 自動滴定装置	222
8.4.6 屈折式分析計	222
8.4.7 けい光光度計	223
8.4.8 ラマン分光計	223
8.4.9 核磁気共鳴装置	223
8.5 ガス成分計	224
8.5.1 概 説	224
8.5.2 熱伝導式ガス分析計	225
原理——構造——応用	
8.5.3 磁気酸素計	226
8.5.4 音響式ガス分析計	227
8.5.5 赤外線分析計	228
赤外線分光計——赤外線分析計の原理——赤外線分析計の構造	
8.5.6 ガスクロマトグラフ	232

クロマトグラフィー——ガスクロマトグラフの原理——工業
用ガスクロマトグラフ

8.5.7	質量分析計	235
8.5.8	化学ルミネッセンス法	237
8.6	固体成分計	237
8.6.1	概 説	237
8.6.2	X線回折計	237
8.6.3	けい光X線分析計	238
8.6.4	X線マイクロアナライザ	238
8.6.5	発光分光分析計	238
8.7	成分測定への電子計算機の利用	238
8.8	摘 要	239
8.9	問 題	242

第9章 非破壊検査法

9.1	総 説	243
9.1.1	非破壊検査とは	243
9.1.2	非破壊検査の原理	243
	放射線による方法——超音波による方法——電磁気その他 による方法——電気回路的考察	
9.1.3	非破壊検査の効用	246
9.2	放射線検査法	247
9.2.1	概 説	247
	物質中の放射線の吸収——透過像のコントラスト	
9.2.2	放射線透過試験	249
	直接撮影法——けい光板による方法——ゼロラジオグラフィー ——計数管法	
9.2.3	放射線反射法	251
9.2.4	サーモグラフィー	251
	赤外線テレビジョン——赤外カメラ	
9.3	超音波検査法	252
9.3.1	概 説	252
	超音波の特異性——探触子	
9.3.2	透過検査法	254
9.3.3	インパルス反射検査法	255
	超音波探傷器——垂直探傷法——斜角探傷法——表面波探 傷法——板波探傷法——水浸法——標準試験片	

9.3.4	共振検査法	257
9.4	電気磁氣的検査法	258
9.4.1	磁氣探傷法	258
	磁化の方法——探傷法	
9.4.2	電磁誘導試験法	260
	導体中のうず電流——インピーダンスグラフ——試験法	
9.4.3	電気抵抗法	262
9.5	浸透探傷法	263
9.6	ひずみ測定	263
	機械的ひずみ測定法——電氣的ひずみ測定法——X線応力測定——光弾性法	
9.7	摘 要	264
9.8	問 題	265

第10章 計測値の伝送と集録

10.1	総 説	266
10.1.1	計測システム	266
10.2	データ集録システム	270
10.2.1	データ集録装置	270
10.2.2	紙テープを出力とするデータ集録装置	271
10.2.3	磁気テープを出力とするデータ集録装置	274
10.2.4	小形電子計算機を含んだデータ集録装置	276
10.3	AD変換とDA変換	278
10.3.1	AD変換器の誤差	279
10.3.2	2進符号	280
10.3.3	アナログ信号のディジタル変換	281
10.3.4	積分形AD変換器	284
10.3.5	帰還形AD変換器	286
10.3.6	その他のAD変換器	288
10.3.7	DA変換器	288
	並列形DA変換器——はしご形DA変換器	
10.4	摘 要	290
10.5	問 題	290

第11章 マイクロ波・レーザの計測

11.1	総 説	291
11.2	マイクロ波計測	292

11.2.1	マイクロ波計測の基礎	292
11.2.2	マイクロ波一般計測	295
11.2.3	マイクロ波精密計測	296
11.2.4	マイクロ波自動計測	298
11.3	マイクロ波を使った計測	299
11.3.1	マイクロ波応用計測の特徴	299
11.3.2	マイクロ波応用計測の実用例	300
	レーダスピードメータ——水分計——変流器	
11.4	レーザ計測	304
11.4.1	レーザ計測の基礎	304
11.4.2	レーザの計測	306
	レーザ出力およびエネルギーの計測技術——コヒーレンスの計測——ピコ秒の高速時間の計測	
11.5	レーザを使った計測	312
11.5.1	レーザ応用計測の特徴	312
11.5.2	レーザの応用計測	313
	指向性，単色性，偏光性の応用例——可干渉性の応用例——レーザ発振技術を用いた応用計測——レーザ応用計測の特長	
11.6	摘 要	324
11.7	問 題	324
	問題解答	325
	補 遺	326
	索 引	327

第1章 電気応用計測一般

1.1 総 説

われわれが、学術上あるいは工業上にいろいろな物象の状態を知り、それを自分の思うままに処理するには、それらの間に起こる物象の量を正しく計測する必要がある。また、この正しい計測は、よい計測器なくして行なうことはできない。電気工学の驚くべき長足の進歩も電気計測技術の偉大な進歩があってこそ可能になったのである。

電気計測技術は、他の機械的、光学的計測技術などに比べると、一般的に感度が高く、精密測定が容易であり、操作も便利である。また、新しく生れた技術であるにもかかわらず、飛躍的な進歩が行なわれてきた。

従来の電気計測技術は、あくまでも電氣的諸量そのものを計測する技術であるが、近ごろは電氣的量ではない長さ、圧力、温度などの物理量も適当な方法によって電氣的量に変えることができるようになったので、これらの量も電気計測技術によって計測できるようになった。これらの分野を取り扱うのが電気応用計測である。

したがって、電気応用計測器は次のように定義することができる。「電氣的量以外の物理的、化学的などの量を電気を仲介として計測する計測器」

物理量を電氣的量に変える技術の進歩によって、今では、ほとんどすべての量が電氣的量に変えることができるようになり、一方、オートメーション、自動制御、テレメータ、電子計算機などの進歩につれて、そこで取り扱ういろいろな情報を全部電圧、電流などの電氣的量に変換する方が取り扱いに非常に便利になることが明らかになった。したがって、この電気応用計測技術は、そのままこれらの新技術に利用されて、その重要性が高くなってきたのである。

本章では、電気応用計測に最も共通的な基本的な問題を述べ、将来の発展への指針を提供しようとしている。