

電氣計測便覽

監修

東京大学教授・工学博士

山内二郎

新平知
解學

PDG

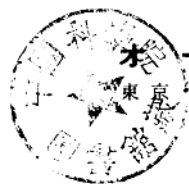


電氣計測便覧

監 修

東京大学教授・工学博士

山 内 二 郎



一 ム 社
東京・京都・大阪

は し が き

電気測定はすでに古い歴史を持つている。その測定は望めば、かなりの確かさででき、実用的に手軽にできるように発達しているし、電気の理論像と実現像とがよく一致する場合が多いという事実と、量の増倍減が容易にしかも正確にできるという事実によつて、電気工学が著実に進歩し、電気に関する工業が非常な発展をしてきている。この発展がさらに新しい現象をとらえ、新しい装置を生み、さらに発展の速度を増して行つた、これが電気測定の特長である。

電気の専門家以外の人々にとつては、何か不安らしかつた電気そのものが、たやすく利用できるようになり、ほかの分野にも広く活用されるようになって、ことに戦後のいちじるしい他の分野への発展はまことに驚嘆の一語につきる。電気が随所随時手軽につかえ、遠方伝達と高速伝達との特長、安定正確な制御系形成の容易な特長、送受装置、記憶装置の簡単確実な特長などが、広く一般計測化、自動化の発達に役立ち、さらに器械人間への道を開いている。

このたび電気計測便覧の刊行が企てられ、その相談を受けた。以上述べたような世の勢に応じて、当然おこる希望に答えるものと信じ、電気計測の研究者、豊かな経験ある技術者、電気計器製造の技術者など、それぞれ第一線にならんでいる人達に協力を求め、でき上つたものが本便覧である。

執筆の方針の第一は、電力、電気通信の専門家はもとより計器製造者の座右に実際に活きたデータを備えるようにすること、執筆方針の第二は、電気の専門家以外の技術者たとえば機械、応用化学、その他いろいろな分野の人々にも役立つようにすること、したがつて電気計器、測定装置はもとより測定用電源、部品、測定法などにわたつて活きた現状を記述し、できるだけ具体的にわかりやすく記述するようにつとめた。随所に見えたとおり、古めかしい題目でも、いままで他の成書には記載されていない新しい行き届いた手引が盛り込まれている。

また現在わが国の電気計器類の現状を知り、利用者が入手しようと思えばただちにその手がかりがつけられるよう、巻末に業務資料をつけておいた。

本便覧はこうしてできたので、電気の専門家はもとより、他の分野の人達、またこれから勉強したい人達には、電気計測の大勢を知り、自ら実験測定を試みるには、絶好の参考書となることと信ずる。

電気測定はわが国では不可思議なほど遅れている。新しい装置と材料はこの発達をうながすであろう。トランジスタの類はこれから実用域に入るであろうし、電子器械化時代はいよいよ進み、原子力時代の暁もあけはじめてきている。この便覧はそうした進みにも寄与するであろう。

各部門主任はじめ執筆者各位の熱心な協力、資料を提供された諸方の団体、会社の好意に対しここに深く感謝し、ことに実質的に幹事役を引き受けて下さつた西野治博士には心から感謝し、刊行を企画し実行されたオーム社に敬意を表す。

昭和 31 年 4 月 12 日

山 内 二 郎

1468811

編纂機関 (50音順)

委員長

東京大学教授・工博 山内二郎

編主任

電気試験所放射線課長

伊藤岳郎

電気試験所第二標準器課長・工博

池田三穂司

東京大学教授・工博

磯部孝

日本通信工業常務取締役

小川建男

富士電機豊田工場設計課長

大浦庸夫

日立製作所多賀工場計器部長

木内勝造

電気試験所検定部長・工博

鈴木重夫

北辰電機計器工場長

堤厚

電気試験所標準器部長・工博

内藤正

電気通信研究所調査役

二条弼基

横河電機計器技術部長

西川基太

東京大学助教授・工博

西野治

日本電気協会計器局長

根本貞治

東京計器検査部長

波多野浩

横河電機常務付

藤木久男

東京大学教授・工博

藤高周平

島津製作所三条工場長・工博

矢幡源三

電気試験所需給計器課長

山口光次

幹事

西野治 三井正光

執筆者

阿部典視
淺石忠巖
麻生元鑑雄
井垣喜二
稻木康一行
茨村清衛
岩上畑郎
太田友哲三
大野高宏
大藤俊文
大森一城
大岡修一郎
柿沼敏雄
梶浦正孝
金田義人
川崎種一
桑山林富士
小林茂雄
小小林夏雄
後藤英一
佐藤秋比古

佐藤齊
笹岡健三
沢勸三郎
七条祐三
柴沼有
島崎辰夫
杉山卓
杉山治
関英男
工博 多田達太郎
田中榮一
田辺共一
工博 高木淳茂
高橋秀俊
高橋清次
高竹庄之助
武木達昭次
工博 寺尾英三
寺西敏彦
土村幸雄
工博 中雲仁一

成田賢仁
新美達也
野田克彦
服部周三郎
林三宏
原崎都平
布施寛博
工博 不破直文
工博 正木知己
松山常雄
三井浦種一
道川純一
宮内太也
宮武和勝
森内之彦
八木博
山田俊雄
吉村正藏
吉米明
渡辺哲男

第 1 編	測定法総論	1
第 2 編	電磁気, 電気回路, 数式, 数表	37
第 3 編	標準および標準器	79
第 4 編	計測用材料	111
第 5 編	計測用部品	133
第 6 編	検電器	165
第 7 編	計測用増幅器	179
第 8 編	計測用装置	197
第 9 編	電位差計	253
第 10 編	指示電気計器総論	267
第 11 編	指示電気計器各論	283
第 12 編	電気測定法	335
第 13 編	電気抵抗測定法	381
第 14 編	誘導, 容量, イン ピーダンスの測定	417
第 15 編	周波数の測定法	453
第 16 編	積算計器	475
第 17 編	計器用変成器	537
第 18 編	記録計器	581
第 19 編	オンロググラフ	607
第 20 編	磁気測定	655
第 21 編	遠隔監視装置	695
第 22 編	通信測定	737
第 23 編	航海, 航空計器	801
第 24 編	放射線の測定	857
第 25 編	電気応用計測	887
第 26 編	電気応用探査	945
第 27 編	自動調節計	971
第 28 編	データ処理装置	997
第 29 編	計器管理	1051
索引		1233

第 1 編 測 定 法 総 論

編主任 西 野 治 (東 京 大 学)

執筆者

関 英 男 (岩 崎 通 信 機) 山 内 二 郎 (東 京 大 学)
西 野 治 (東 京 大 学)

目 次

第 1 章 単 位 系

1.1 単 位 系.....	3	1.4 電磁単位系.....	6
1.2 基本単位.....	4	1.5 単位換算表.....	10
1.3 誘導単位.....	5		

第 2 章 次 元

2.1 次 元.....	13	2.2 次元関係の利用.....	13
--------------	----	------------------	----

第 3 章 測 定 方 式

3.1 測定方式.....	14	3.2 測定の誤差.....	16
---------------	----	----------------	----

第 4 章 情 報 理 論

4.1 情 報 量.....	18	4.2 相関関係.....	19
----------------	----	---------------	----

第 5 章 測 定 値 の 処 理

5.1 測定誤差論.....	20	5.3 確率分布と分位点 (百分率点)	30
5.2 測定結果の処理.....	25		

文 献	35
-----------	----

第1編 測定法総論

第1章 単位系

1.1 単位系

1.1.1 単位 ある量を測定するということは、それと同種類の単位にとつた量のなん倍であるかという数値を求めることである。この単位は任意に選んでよいわけであるが、求めた数値が普遍的であるためには常に一定のものをを用いることがのぞましい。また種々の量は物理学の法則または定義により他の量と関連づけることが多いから、その単位も他の物理量の単位に関連させて定めるのが便利である。そこで少数の任意に選ぶる基本単位を制定し、他の単位はこれを基として誘導する。基本単位の選び方により1系の単位群がえられるが、これを単位系という。

1.1.2 単位の名称、記号 単位にある名称が与えられた場合、その記号については国際的に次のように定められている。

(1) 単位の名称の第1字を記号とするが他の単位と混同するおそれがあるときは、その次に適当な字を1字あるいは2字つける。ただしオームの記号を Ω としては零とまちがえやすいので Ω とするなどの例外がある。

(2) 単位の名称が人名によつたものは大文字、そうでないものは小文字とする。

(3) 単位の 10^3 倍には第1.1表のような接頭語をつけて表わすことがある。

1.1.3 単位の統一と維持 世界各国における単位の統一と維持をはかるため1875年メートル条約が結ばれ、わが国も1886年に降これに加入している。各国の分担金により

パリ郊外 Sèvres に国際度量衡局をもうけ、同局はメートル原器、キログラム原器の保管を始め、度量衡、電気、光、温度目盛など各国単位の国際比較、そのほか単位に関する試験研究を行つている。メートル条約は所屬国を異にする18名の委員からなる国際度量衡委員会を組織し、ほぼ2年ごとに開催、国際度量衡局の監督、そのほか単位に関する種々の決議を行う。この決議はほぼ6年ごとに開催される度量衡総会で審議、採決される定めである。なお、国際度量衡委員会の諮問委員会として電気諮問委員会、測光諮問委員会、温度諮問委員会、長さの定義諮問委員会がもうけられている。

以上のほかに単位に関する決議を行う国際会議としては理論ならびに応用物理学国際連合のSUN委員会(Committee for Symbols, Units and Nomenclature)、国際電気標準会議(IEC)のEMMU委員会(Committee on

第1.1表

名	数	記号	π
テ	ラ (tera)	T	12
ジガ、ギガ	(giga)	G	9
メガ	(mega)	M	6
ヘクトキロ	(hectokilo)	hk	5
ミリア	(myria)	ma	4
キロ	(kilo)	k	3
ヘクト	(hecto)	h	2
デカ	(deca)	da	1
デシ	(deci)	d	-1
センチ	(centi)	c	-2
ミリ	(milli)	m	-3
デシミリ	(decimilli)	dm	-4
センチミリ	(centimilli)	cm	-5
ミクロ	(micro)	μ	-6
ナノ	(nano)	n	-9
ピコ	(pico)	p	-12

Electric and Magnetic Magnitudes and Units) などがある。またわが国ではそれまでの度量衡法に代わつて昭和 26 年計量法が施行され、国内単位の一掃をはかっている。電気関係は明治 43 年施行の電気測定法が生きているが、近い将来改正が予想されている。

1-1-4 単位系 基本単位を定める量としては、長さ、質量、時間の 3 つをとるのがふつうである。長さの単位にセンチメートル [cm]、質量の単位にグラム [g]、時間の単位に秒 [s] をとつた CGS 単位系が物理学において一般に用いられていたが、最近ではむしろ MKS 単位系が広く用いられ、昭和 26 年施行された法律、計量法も MKS 単位系を採用している。これは長さと質量の原器がそれぞれ [m] および [kg] であること、および電気の実用単位を誘導するのにつごうがよいからである。

電磁気に関する量を定めるには、長さ、質量、時間のほかに 1-3 で述べるように第 4 の基本単位が必要である。また、ある量に対しては温度の単位、光度の単位も必要である。

主としてアメリカ、イギリス両国で用いられているヤード・ポンド単位系、またわが国には尺貫法があるが、これらによる単位は計量法施行法では昭和 34 年 1 月 1 日以後は法定単位とみなさないことになっており、またいずれも電磁気に関する量には用いられていない。

重力単位系 基本単位を定める量として長さ、力、時間をとつたもので、力の単位としては 1g または 1kg に働く重力の大きさ(重量グラムまたは重量キログラム)をとる。重力加速度の標準値は $9.80665 \text{ m/s}^2 = 980.665 \text{ cm/s}^2$ である。この単位系は機械工学方面で用いられているが、最近はその方面でも MKS 単位系を使用する傾向である。

1-2 基本単位¹⁾

1-2-1 長さの単位 メートル [m] は 1790 年に地球の北極から赤道までの距離の $1/10^7$ と定められたが、現在は国際メートル原器という白金 90、イリジウム 10 の合金でつくつた棒の、磨いた表面上に刻まれた 2 線間の 0°C における長さである。このメートル原器は[国際度量衡局]に保管されており、各国にその写しである副原器が配布されている。わが国においては工業技術院中央計量検定所が保管している。このような人工的な原器は変化や破損のおそれがあるので、これをそのようなおそれのない自然現象と関連づけておくことがのぞましい。現在まで最も多く実験されたのはカドミウムの赤い波長で、 15°C 、1 気圧の乾いた空気中で

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{Cd}} &= 6438.4707 \times 10^{-3} \text{ cm} \\ &= 6438.4696 \text{ \AA} \text{ (int)}\end{aligned}$$

である (int は国際単位の略)。最近同位元素を分離した質量数が偶数である物質からでる光の波長が非常に精密に測定できることが注目され、金 197 を変換した水銀 198、カドミウム 116、114、112、クリプトン 86、84 などにつき実験が行われており、メートル原器を廃止して、これらの波長に置換しようという気運である。

1-2-2 質量の単位 グラム [g] は元来は 1 気圧、最大密度の温度 (3.945°C) における水 1 cm^3 の質量と定めたのであるが、現在はほぼその千倍にあたるキログラムを表わすキログラム原器(直径・高さとも 39 mm の白金イリジウム合金製)によつている。キログラム原器もメートル原器同様国際度量衡局に保管され、わが国の副原器は中央計量検定所に保管されている。MKS 単位系が広く使用されるにつれ、[kg] に適当な名称を与えようという提案があるが、決定にいたつてはいな

い。なお1気圧、 3.945°C における水10cm立方の質量は正確には $(1-0.000028)\text{ kg}$ であり、この状態の水1kgの容積は1リットル[l]である。

1・2・3 時間の単位 秒[s]は平均太陽日の1/86400である。平均太陽日の正確な定義や、秒を実現する方法については第15編第1章参照のこと。

1・2・4 基本単位の倍数、分数

[1] 長さ [m], [cm]のほかには[km], [dm], [mm], ミクロン(μ , 10^{-6} m), ミリミクロン($\text{m}\mu$, 10^{-9} m)が用いられる。オングストローム[Å]は 10^{-10} m であるが、スペクトル波長、結晶格子定数などにはこれとやや異なつた国際オングストロームが用いられる。海里[M, nm]は1852mで地表で1'に相当する長さ、海洋、航海などに用いる。

[2] 質量 [kg], [g]のほかには[mg], [t] (1000kg), カラット[ct], [car] (200mg, 宝石に用いる)が用いられる。

[3] 時間 1時間=60分, 1分=60秒, ミリ秒, マイクロ秒などが用いられる。

1・3 誘導単位

基本単位から誘導された誘導単位の主なものを以下に記す。キロ、ミリなどを附した補助単位は特に必要がない限り省略する。おおむね計量法による。これによらないものには・を附する。[]内は略字, ()は使用範囲を示す。

[1] 面積 平方メートル [m^2], 1アール[a]=100 m^2 , 1ヘクタール[ha]=100a (土地、水面)

[2] 体積 立方メートル [m^3], 立方センチメートル [cm^3 , cc], 1リットル[l]=1.000028 dm^3 (流体など)

[3] 速さ メートル毎秒 [m/s], 1

カイン [kein]=1cm/s, 1キロメートル毎時, 1ノット[kt, kn]=1海里毎時(航海)

[4] 加速度 メートル毎秒毎秒 [m/s^2], 1ガル[Gal]=1 cm/s^2

重力加速度 地球重力のため起るもので、通常gで表わす。

国際的標準重力加速度 $g=9.80665\text{ m/s}^2$

[5] カ ニュートン[N] 1kgの質量の物体に働くとき1 m/s^2 の加速度を与える力の大きさ。CGS単位は1ダイン[dyne]= 10^{-5} N , 1メガダイン[Mdyne]=10N, 1重量キログラム(kgw または kg)=9.80665N

[6] 圧力 1バール[bar]= 10^5 N/m^2 , 1重量キログラム毎平方センチメートル[kgw/ cm^2]=0.980665bar, 1水銀柱メートル[mHg]=1.333224bar=13595.10kg/ m^3 の密度を有する高さ1mの液柱が, $g=9.80665\text{ m/s}^2$ のところにおいてその底面におよぼす圧力。1水柱メートル(mH_2O または mAq)=0.9980638bar=999.972kg/ m^3 の密度を有する高さ1mの液柱が, $g=9.80665\text{ m/s}^2$ のところにおいてその底面におよぼす圧力。1気圧[atm]=1.013250bar=0.76mHg, 1ata*=1気圧, 1atü*=1ata=1, 1Torr*=1mmHg

[7] 仕事 ジュール[J] 1Nの力がその方向に物体を1m動かすときにする仕事。1ワット時[Wh]=3600J, CGS単位は1エルグ[erg]= 10^{-7} J , 1キログラム・メートル[kg·m]=9.80665J=0.002724069Wh, 1kgwの力がその方向に物体を1m動かすときにする仕事。

[8] 工事 (電気の場合は電力) 1ワット[W]=1J/s

1英馬力[HP]=746W (=550フート・ポンド/秒=745.7W)

1仏馬力[PS]=735.5W (=75kg·m/s)

[9] 熱量 ジュール [J] 1Jの仕事に相当する熱量.

1 キロカロリー [kcal] = 4186.05 J = 1/860 kWh
1 気圧のもとで 1kg の水の温度を 0°C から 100°C まで高めるに要する熱量の 1/100. 1kg の水を ($t-0.5$)°C から ($t+0.5$)°C まで高めるに要する熱量は t により異なる. そこで次のようにいうことがある.

$t=15^{\circ}\text{C}$ 15 度キロカロリー [kcal 15°]
= 4185.8 J

$t=20^{\circ}\text{C}$ 20 度キロカロリー [kcal 20°]
= 4181.9 J

[10] 周波数 サイクル毎秒 [c/s], サイクル [~], ドイツではヘルツ [Hz] = c/s が用いられる. 回転数毎秒* [rps], 回転数毎分 [rpm]

[11] 流量 立方メートル毎秒 [m³/s], 立方メートル毎分 [m³/分], キログラム毎秒 [kg/s], トン毎時 [t/h].

[12] 粘度 (或いは粘性係数) 流体が x 軸に平行に流れ, 速度 v が y 軸方向に変化するとき, y 軸に垂直な面には $X_y = \eta dv/dy$ なる接線応力が生ずる. 比例係数 η は粘度であつて $X_y = 1 \text{ dyn/cm}^2$, $dv/dy = 1 (\text{cm/s})/\text{cm}$ の場合を単位にとりポアズ [p] という.

[13] 密度 キログラム毎立方メートル [kg/m³]

比重 物体の密度と 1 気圧のもとでの水の密度との比をいい, 基準となる水の温度を指定して表す. 水の温度を指定しない場合は 4°C とする.

[14] 濃度 質量百分率 [質量 %], 体積百分率 [体積 %]

モル濃度 [mol] 溶液 1 m³ 中に溶質 1000 グラム分子を含有する溶液の濃度.

規定 [N] 溶液 1 m³ 中に溶質 1000 グラム当量を含有する溶液の濃度.

1-4 電磁単位系

1-4-1 電磁単位系 電磁気の単位も古くはクラーク電池の起電力を電圧の単位, 断面積 1 mm², 長さ 1 m の水銀柱の抵抗を抵抗の単位とするなどの定めかたであつたが電磁気学の進歩とともに 1-1 で述べたように, 電磁気学の諸法則を用い, 力学的諸量と関連づけて定めることが必要になつた. 通常この法則としては次の 3 つをとる.

電気量のクーロンの法則

$$F = \frac{q_1 q_2}{ar^2} \quad (1)$$

磁気量のクーロンの法則

$$F = \frac{m_1 m_2}{\beta r^2} \quad (2)$$

ビオ・サバールの法則

$$dF = \frac{mid \sin \theta}{r r^2} \quad (3)$$

ただし q_1, q_2 : 電気量, m_1, m_2 : 磁気量, i : 電流, r : 距離, dl : 線素片, F : 力.

(1), (2), (3) および $q = it$ なる関係から

$$\frac{r^2}{\alpha \beta} = \left(\frac{r}{t} \right)^2$$

でなければならない. r/t は速度の次元を有し, 真空中では光の速度 c になることが実験的に確かめられている. 真空中を考えるとその誘電率を ϵ_0 , 透磁率を μ_0 とし, $\alpha = k_1 \epsilon_0$, $\beta = k_2 \mu_0$, $\gamma = k_3 K$ とおく. ここで k_1, k_2, k_3 は次元のない数である. また誘電率 ϵ , 透磁率 μ は媒質に関係するが, K は媒質に無関係の定数である.

$$K^2 = \epsilon_0 \mu_0 c^2$$

なる関係があるとすれば

$$k_3^2 = k_1 k_2 \quad (4)$$

でなければならない.

したがつて電気の単位を定めるには, まず c を表わすに用いる基本単位を定める. 次に ϵ_0, μ_0, K のうちいずれを独立量とするかを

第1-2表 代表的な電気単位系

単 位 系	基本単位	独立量*	k_1, k_2, k_3	e_0	μ_0	K
CGS 静電単位系	cm, g, s	e_0, K	1	1	$1/c^2$	1
CGS 電磁単位系	cm, g, s	μ_0, K	1	$1/c^2$	1	1
ガウス単位系	cm, g, s	e_0, μ_0	1	1	1	c
實用単位系 (QES 単位系)	$10^7\text{m}, 10^{-11}\text{g}, \text{s}$	μ_0, K	1	$1/c^2$	1	1
MKS 単位系	m, kg, s	μ_0, K	4π	$10^7/4\pi c^2$	$4\pi \times 10^{-7}$	1

* ガウス単位系以外では $K=1$ なるゆえ、通常これを省略している。

第1-3表 MKS 単位と CGS 単位との関係

量	MKS 単位	CGS 電磁単位	CGS 静電単位*
力学量			
長	1m	$=10^3\text{cm}$	
質 量	1kg	$=10^3\text{g}$	
時 間	1s	$=1\text{s}$	
力	1N (ニュートン)	$=10^5\text{dyne (ダイン)}$	
仕事	1J (ジュール)	$=10^7\text{erg (エルグ)}$	
電力	1W (ワット)	$=10^7\text{erg/s}$	
電気量			
起電力, 電位	1V (ボルト)	$=10^8\text{emu}$	$=1/(3 \times 10^9)\text{esu}$
電界の強さ	1V/m	$=10^6\text{emu}$	$=1/(3 \times 10^4)\text{esu}$
電 流	1A (アンペア)	$=10^{-1}\text{デカアンペア}$	$=3 \times 10^9\text{esu}$
電流密度	1A/m ²	$=10^{-5}\text{emu}$	$=3 \times 10^5\text{esu}$
抵抗	1Ω (オーム)	$=10^9\text{emu}$	$=1/(9 \times 10^{11})\text{esu}$
固有抵抗	1Ω·m	$=10^{11}\text{emu}$	$=1/(9 \times 10^9)\text{esu}$
コンダクタンス	1S (シー) = 1シーメンス	$=10^{-9}\text{emu}$	$=9 \times 10^{11}\text{esu}$
電気量	1C (クーロン)	$=10^{-1}\text{emu}$	$=3 \times 10^9\text{esu}$
静電束	1C	$=4\pi/10\text{emu}$	$=4\pi \times 3 \times 10^9\text{esu}$
静電束密度	1C/m ²	$=4\pi/10^6\text{emu}$	$=4\pi \times 3 \times 10^5\text{esu}$
静電容量	1F (ファラド)	$=10^{-9}\text{emu}$	$=9 \times 10^{11}\text{esu}$
誘電率	1F/m	$=4\pi/10^{11}\text{emu}$	$=4\pi \times 9 \times 10^9\text{esu}$
磁気量			
起磁力, 磁位	1AT (アンペア回折)	$=4\pi/10\text{ギルバート}$	$=4\pi \times 3 \times 10^9\text{esu}$
磁界の強さ	1AT/m	$=4\pi/10^3\text{エルステッド}$	$=4\pi \times 3 \times 10^7\text{esu}$
磁束	1Wb (ウェーバ)	$=10^8\text{マクスウェル}$	$=1/(3 \times 10^3)\text{esu}$
磁束密度	1Wb/m ² = 1テスラ	$=10^4\text{ガウス}$	$=1/(3 \times 10^6)\text{esu}$
磁極の強さ	1Wb	$=10^8/4\pi\text{emu}$	$=1/(4\pi \times 3 \times 10^3)\text{esu}$
磁化の強さ	1Wb/m ²	$=10^4/4\pi\text{emu}$	$=1/(4\pi \times 3 \times 10^6)\text{esu}$
インダクタンス	1H (ヘンリー)	$=10^9\text{emu}$	$=1/(9 \times 10^{11})\text{esu}$
磁気抵抗	1AT/Wb	$=4\pi/10^9\text{emu}$	$=4\pi \times 9 \times 10^{11}\text{esu}$
透磁率	1H/m	$=10^7/4\pi\text{emu}$	$=1/(4\pi \times 9 \times 10^{13})\text{esu}$
磁化率	1H/m	$=10^7/(4\pi)^2\text{emu}$	$=1/(16\pi^2 \times 9 \times 10^{13})\text{esu}$

* 簡単のため $c=3 \times 10^8\text{m}=3 \times 10^{10}\text{cm}$ とした値を記してある。正確には係数の3は2.9978, 係数の9は(2.9978)² = 8.9868

シーメンスは主としてドイツで使われる。テスラは1954年 EMMU の決議による。

定める。次に (4) を満足するように k_1, k_2, k_3 を定める。これらを通常使用する単位について示せば第1-2表のようである。

1-4-2 CGS 単位系 第1-1表に示すよ

うに CGS 静電単位系, CGS 電磁単位系がある。ガウス単位系では電気量の単位は CGS 静電単位系のそれに、磁気量の単位は CGS 電磁単位系のそれに一致する。CGS

静電単位系では真空中 1 cm 隔てた2つの単位電気量間に働くクーロン力は 1 dyne であり, CGS 電磁単位系では真空中 1 cm 隔てた2つの単位磁気量間に働くクーロン力は 1 dyne である。

CGS 電磁単位系では第1・2表に示すように, 4つの磁気的量子つまり起磁力, 磁界の強さ, 磁束, 磁束密度にそれぞれギルバート, エルステッド, マクスウェル, ガウスなる単位名がついている。また1951年のSUN委員会ではCGS静電単位系の第4基本量として電気量を, CGS電磁単位系の第4基本量として電流をとつた単位系の導入を勧誘し, CGS電磁単位系の電流の単位をデカアンペアと名づけた。²⁾ これはMKS単位系の使用が広まるにつれCGS単位系との間の換算を便にするためである。

1・4・3 実用単位 実用単位は元来歴史的に定まつたものである。すなわちシーメンスの提案した抵抗単位, 断面積 1 mm², 長さ 1 m の水銀柱の抵抗 (これが後に1908年ロンドンの会議で国際的に定まつた水銀抵抗原器に発展した) がCGS電磁単位のはば 10⁹ に相当するため, 逆にCGS電磁単位の抵抗単位の 10⁹ 倍を抵抗の単位とし, これをオーム [Ω] と名づけた。また電圧の単位として提案されていたクラーク電池やウェストン電池の起電力が, CGS電磁単位のはば 10⁸ 倍に相当するため, CGS電磁単位の電圧単位の 10⁸ 倍を電圧の単位とし, これをボルト [V] と名づけた。この [Ω] と [V] から他の実用単位を導くことができる。単位名を附されているのは [Ω], [V] のほか, 電流 (アンペア) [A], 電気量 (クーロン) [C], 静電容量 (ファラド) [F], インダクタンス (ヘンリー) [H], 磁束 (ウェーバ) [Wb] である。

この実用単位は第1・2表に示すように長さに 10³ m (地球の子午線の 1/4, Quadrant),

質量に 10⁻¹¹ g (Eleventh-gram), 時間に秒 [s] をとり, $\mu_0=1$ として組立てた単位系に相当するので QES 単位系 といふことができる。

1・4・4 MKS 単位系³⁾ $\mu_0=1$ とすれば実用単位は QES 単位系の単位になるが, このような長さや質量は実用上不便である。そこで MKS 単位系にし, しかも実用単位に一致させるには μ_0 を変化させればよい。 μ_0 を 10⁻⁷ (第1・2表において k_1, k_2, k_3 を 1, ϵ_0 を 10⁷/c², K を 1) ととつたものを MKS 非有理単位系, 第1・2表のように μ_0 を $4\pi/10^7$ ととつたものを MKS 有理単位系 といふ。現在 MKS 非有理単位系は使用されることがなく, 単に MKS 単位系といえは MKS 有理単位系を意味する。MKS 有理単位系の1つの利点は第1・3表に示すように力の単位がアンペア回数 [AT] になり, これと磁束の実用単位 [Wb] とを用い, 種々の磁気量の単位を組立てることである。MKS 単位系の第4基本量として電流を採用すれば MKSA 単位系となる。1954年の第10回度量衡総会はこの採用を決議している。第4基本量を電流とすれば2・1に述べるように次元に 1/2 がつかぬ利点がある。なおこの場合, アンペアは次のように定義される。

真空中に 1 m の間隔をもつて平行におかれた無限に小さい円形断面面積を有する2本の無限に長い直線状導体のそれぞれを通過し, その導体の長さ 1 m ごとに 2×10^{-7}

N の力をおよぼし合う一定電流の大きさ MKS 単位系の磁束密度の単位として1954年の EMMU 委員会はテスラを採用した。

MKS 単位系を一貫して用いれば, 実用単位と CGS 単位とを混用したときのように 10⁹, 10⁸ などの係数を乗じて換算する必要がなく, 便利であるが, μ_0, ϵ_0 が 1 でないからこれを落さないように注意しなければならない

い。例えば鉄の透磁率が2000とか、ガラスの誘電率が6とかいうのはそれぞれ μ_0, ϵ_0 に対する比であるから、正確には比透磁率、比誘電率といわなければならない。この比透磁率、比誘電率をそれぞれ μ_s, ϵ_s とおけば $\mu = \mu_0 \mu_s, \epsilon = \epsilon_0 \epsilon_s$ である。MKS 単位系は G. Giorgi の提唱にかかり、A. Kennelly などの宣伝により、その便利さが認められて広く使用されるようになった。

1.4.5 有理単位系と非有理単位系 第1・2表において k_1, k_2, k_3 を1ととつたものを非有理単位系、 4π ととつたものを有理単位系という。すなわちクーロンの法則およびビオ・サバールの法則は次のようになる。

有理単位系

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon r^2}$$

$$F = \frac{m_1 m_2}{4\pi \mu r^2}$$

$$dH = \frac{idl \sin \theta}{4\pi r^2}$$

非有理単位系

$$F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$$

$$F = \frac{m_1 m_2}{\mu r^2}$$

$$dH = \frac{idl \sin \theta}{r^2}$$

いま弾性棒を力 F で引張り、伸び x が生じたとすれば、これに蓄えられるエネルギーは $Fx/2$ である。電界または磁界のエネルギー密度は有理系では $ED/2$ あるいは $HB/2$ であり、非有理系では $ED/8\pi$ あるいは $HB/8\pi$ である。 E, H が F に、 D, B が x に相当すると考えれば有理系のほうが合理的である。その他2, 3の公式を示せば

有理単位系

非有理単位系

点電荷の生ずる電界

$$E = \frac{q}{4\pi \epsilon r^2}$$

$$E = \frac{q}{\epsilon r^2}$$

無限長直線電流の生ずる磁界

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

$$H = \frac{2I}{r}$$

球の静電容量 (半径 R)

$$C = 4\pi \epsilon R$$

$$C = \epsilon R$$

平行板の静電容量 (面積 A , 間隔 d)

$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$

$$C = \frac{\epsilon A}{4\pi d}$$

断面積 A , 長さ l , 導電率 σ なる導体のコンダクタンスは $G = \sigma A/l$ で有理単位系の平行板の静電容量と同形である。これらの例のように有理単位系のほうが 4π の入るべき位置が合理化され、電気および磁気の種々の方程式の形が相似となるのはもちろん、力学的現象との相似性も成立する。また1.4.4で述べたように $[AT]$ と $[Wb]$ とを用いて磁気量の諸単位を組立てることができる。ただ $\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6}$, $\epsilon_0 = 8.855 \times 10^{-12}$ とその値が複雑になることが欠点である。

1.4.6 絶対電気単位と国際電気単位⁹⁾ 国際電気単位は1908年ロンドンにおける電気単位国際会議で国際的に定めた単位で、 $[\Omega]$ および $[A]$ を次のように定義し、これから他の電気単位を導く。わが国においても明治43年制定の電気測定法はこの定義にしたがつている。

〔1〕 オーム 氷の融解温度において質量14.4521 g, 長さ106.300 cmにして均一なる切断面積を有する水銀柱の不变電流に対する電気抵抗。

〔2〕 アンペア 硝酸銀の水溶液を通して、毎秒0.00111800 gの銀を分離する不变電流。

この国際電気単位は理論的な値、すなわち $[\Omega]$ ならば CGS 磁電単位 10^9 倍とはくいちがつており、電気計測の精度向上に伴なつて種々つごうがわるくなつた。そこで1933年の第8回度量衡総会で、これが廃止の方針を決定し1946年の国際度量衡委員会は廃止の期日を1948年1月1日とし、同日以降は理論的な単位 (これを絶対電気単位という) を使用することを決議した。そして過渡期において両者を区別する必要がある場合はそれぞれ絶対 (absolute 略語 abs) および国際 (in-

ternational 略語 int) をつけることになっている。同委員会が決定した新旧両単位の換算率は次のとおりである。

1 平均国際オーム=1.00049 絶対オーム

1 平均国際ボルト=1.00034 絶対ボルト

以上のように諸外国では現在すべて絶対単位が用いられているが、わが国のみは電気測定法の改正が遅れ法律的には未だに国際電気単位を使用している。ただ法律改正も近日中と予想され、それにそなえて電気試験所では自盛さだめを依頼された標準器類には絶対電気単位による値をも附記している。わが国の現行電気単位と絶対単位との関係は当時の平均国際単位とわが国の単位との差、すなわち 1948~8 年の電気単位の国際比較の結果が

日本国際オーム=0.999980 平均国際オーム

日本国際ボルト=0.999995 平均国際ボルト
であることを考慮し、第 1・4 表のようになる。

第 1・4 表 現行日本国際単位と絶対単位との関係

単 位 名	換 算 率
[Ω] [H]	1.000470
[V] [Wb]	1.000335
[A] [C]	0.999865
[W] [J]	1.000200
[F]	0.999530

例えば現行日本国際単位で標準電池の起電力が 1.018318 V である場合、絶対単位に換算すれば

$1.018318 \times 1.000335 = 1.018659$ 絶対ボルトとなる。

1・4・7 電気単位の定義 現行電気測定法は近く廃止され、これに代わる法律では電気単位は次のように定義される予定である。

[1] アンペア [A] 1・4・4 MKS 単位系のなかに記した定義。

[2] ボルト [V] 1 A の一定電流が流れる導体の 2 点間において費される電力 (電気の仕事) が 1 W になるとき、これら 2 点間に存在する電圧。

[3] オーム [Ω] 起電力の存在しない導体の 2 点間に 1 V の電圧を与えたときの電流が 1 A である場合、これら 2 点間の電気抵抗。

[4] クーロン [C] 1 A の電流により 1 秒間に運ばれる電気量。

[5] ファラド [F] 1 C の電気量を充電するとき、両極間に 1 V の電位差を生じるコンデンサの静電容量。

[6] ヘンリー [H] 1 A/s の割合をもつて一様に変化する電流を通じるとき 1 V の起電力を生じる閉回路のインダクタンス。

[7] ウェーバ [Wb] 1 回巻の回路と鎖交し、一様に減少し、1 秒間に零となるときの 1 V の起電力を生じる磁束。

[8] ボルト・アンペア [VA] 回路に 1 V の正弦波電圧を加え、1 A の正弦波電流が流れるときの皮相電力。

[9] バール [Var] 回路に 1 V の正弦波電圧を加え、これと 90 度位相の異なる 1 A の正弦波電流が流れるときの無効電力。

1・5 単位換算表

だいたい計量法による、これによらないものには * をつける。

1・5・1 長 さ

1 ヤード [yd] = 0.9144 m = 3 ft

= 3.01752 尺 = 2.414016 鯨尺尺

1 m = 1.0936133 yd = 3.2808399 ft

= 39.370079 in = 3.3 尺 = 0.55 間

= 2.64 鯨尺尺

1 英国制ヤード * = 0.9143992 m

1 米国制ヤード * = 0.91440183 m

1 m = 39.370000 米国制インチ

1 フィート [ft], ['] = 0.3048 m = 12 in

= 1.00584 尺

1 インチ [in], ["] = 2.54000 cm

= 1000 ミル = 0.8382 寸

$$1 \text{ ミル } [\text{mil}] = 0.001 \text{ m} = 25.4 \mu$$

$$1 \text{ マイル } [\text{mile}] = 80 \text{ チェーン } [\text{chain}] \\ = 1760 \text{ yd} = 1.609344 \text{ km} = 1.75232 \text{ 町}$$

$$1 \text{ km} = 0.6213712 \text{ mile} = 9.16667 \text{ 町} \\ = 0.2546296 \text{ 里}$$

$$1 \text{ チェーン} = 22 \text{ yd} = 20.1168 \text{ m}$$

$$1 \text{ 尺} = 10/33 \text{ m} = 0.3030303 \text{ m} = 10 \text{ 寸} \\ = 100 \text{ 分} = 1000 \text{ 厘} = 10000 \text{ 毛} = 1/10 \text{ 丈} \\ = 0.3313980 \text{ yd} = 0.994194 \text{ ft} \\ = 11.93033 \text{ in}$$

$$1 \text{ 鯨尺尺} = 25/66 \text{ m} = 0.3787879 \text{ m} \\ = 1.25 \text{ 尺} = 10 \text{ 鯨尺寸} = 100 \text{ 鯨尺分} \\ = 1/10 \text{ 鯨尺丈} = 0.4142475 \text{ yd}$$

$$1 \text{ 間} = 6 \text{ 尺} = 1.818182 \text{ m}$$

$$1 \text{ 町} = 60 \text{ 間} = 109.0909 \text{ m}$$

$$1 \text{ 里} = 36 \text{ 町} = 3.927273 \text{ m} = 2.410294 \text{ mile}$$

1・5・2 面積

$$1 \text{ 平方ヤード } [\text{yd}^2] = 0.8361274 \text{ m}^2 \\ = 0.2764057 \text{ 坪}$$

$$1 \text{ 平方フィート } [\text{ft}^2] [\text{□}'] = 0.09290304 \text{ m}^2$$

$$1 \text{ 平方インチ } [\text{in}^2] [\text{□}"] = 6.451600 \text{ cm}^2$$

$$1 \text{ エーカー}^* = 10 \text{ 平方チェーン} \\ = 40.4686 \text{ a} = 4.08058 \text{ 反}$$

$$1 \text{ 平方マイル} = 2.589988 [\text{km}^2] \\ = 261.157 \text{ 町}$$

$$1 \text{ 平方尺} = 0.0918274 \text{ m}^2 = 100 \text{ 平方寸}$$

$$1 \text{ 坪} = 3.305785 \text{ m}^2 = 36 \text{ 平方尺} = 1 \text{ 步} \\ = 10 \text{ 合} = 100 \text{ 勺 (土地, 水面)}$$

$$1 \text{ m}^2 = 0.3025 \text{ 坪}$$

$$1 \text{ 畝} = 0.991736 \text{ a} = 30 \text{ 坪} = 1/10 \text{ 反} \\ = 1/100 \text{ 町} = 0.0245063 \text{ エーカー (土地, 水面)} \\ 1 \text{ a} = 1.008333 \text{ 畝}$$

1・5・3 体積

$$1 \text{ 立方ヤード } [\text{yd}^3] = 0.7645549 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ 立方フィート } [\text{ft}^3] = 0.02831685 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ m}^3 = 35.31467 \text{ ft}^3$$

$$1 \text{ 立方インチ } [\text{in}^3] = 16.38706 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ cm}^3 = 0.06102374 \text{ in}^3$$

$$1 \text{ 容量トン } (\text{t}) = 1000/353 \text{ m}^3 \approx 100 \text{ ft}^3 \\ (\text{船舶})$$

$$1 \text{ ガロン } [\text{gal}] = 0.00378543 \text{ m}^3 \\ = 3.785324 \text{ l} = 2.09846 \text{ 升}$$

$$1 \text{ l} = 0.2641782 \text{ gal} = 0.5543679 \text{ 升}$$

$$\text{英国制 } 1 \text{ ガロン} = 4.545963 \text{ l} = 2.52014 \text{ 升}$$

$$1 \text{ 立方尺} = 0.02782647 \text{ m}^3 = 10^3 \text{ 立方寸} \\ = 10^6 \text{ 立方分}$$

$$1 \text{ 升} = 2401/1331000 \text{ m}^3 = 1.803856 \text{ l} \\ = 10 \text{ 合} = 100 \text{ 勺} = 1/10 \text{ 斗} = 1/100 \text{ 石}$$

$$1 \text{ 立坪} = 6.010518 \text{ m}^3 = 6^3 \text{ 立方尺}$$

$$1 \text{ ガロン} = 1/8 \text{ ブッシュェル}^* [\text{bu}] (\text{穀用}) \\ = 8 \text{ パイント}^* [\text{pint}] = 128 \text{ 米国制液} \\ \text{量オンス}^* [\text{fl. oz}]$$

$$1 \text{ 英国制容量トン} = 42 \text{ ft}^3 \approx 1.05 \text{ 米国制容} \\ \text{量トン}$$

$$1 \text{ 米国制バレル}^* = 31.5 \text{ gal}$$

$$1 \text{ 英国制バレル}^* = 36 \text{ 英ガロン}$$

$$1 \text{ ステール}^* [\text{st}] = 1 \text{ m}^3 (\text{材木})$$

$$1 \text{ 石}^* = 1 \text{ 尺} \times 1 \text{ 尺} \times 10 \text{ 尺 (材木)}$$

1・5・4 質量

$$1 \text{ ポンド } [\text{lb}] = 0.45359243 \text{ kg} = 16 \text{ オンス} \\ = 7000 \text{ グレーン} = 120.95798 \text{ 匁}$$

$$1 \text{ kg} = 2.2046223 \text{ lb} = 35.273957 \text{ oz}$$

$$= 266.6667 \text{ 匁}$$

$$1 \text{ オンス } [\text{oz}] = 28.349527 \text{ g} = 7.559874 \text{ 匁}$$

$$1 \text{ グレーン} = 64.79892 \text{ mg}$$

$$1 \text{ 米トン } [\text{short ton}] = 2000 \text{ lb} \\ = 0.90718486 \text{ t}$$

$$1 \text{ 英トン } [\text{long ton}] = 2240 \text{ lb} = 1.0160470 \text{ t}$$

$$1 \text{ t} = 1.1023112 \text{ 米トン} = 0.9842064 \text{ 英トン}$$

$$1 \text{ 貫} = 3.75 \text{ kg} = 1000 \text{ 匁} = 10^4 \text{ 分} = 10^6 \text{ 厘} \\ = 10^8 \text{ 毛}$$

$$1 \text{ 斤} = 0.6 \text{ kg} = 160 \text{ 匁}$$

1・5・5 圧力

$$1 \text{ bar} = 1.019716 \text{ kgw/cm}^2 \\ = 0.7500616 \text{ mHg} = 10.19745 \text{ mmHg} \\ = 0.9869231 \text{ atm}$$