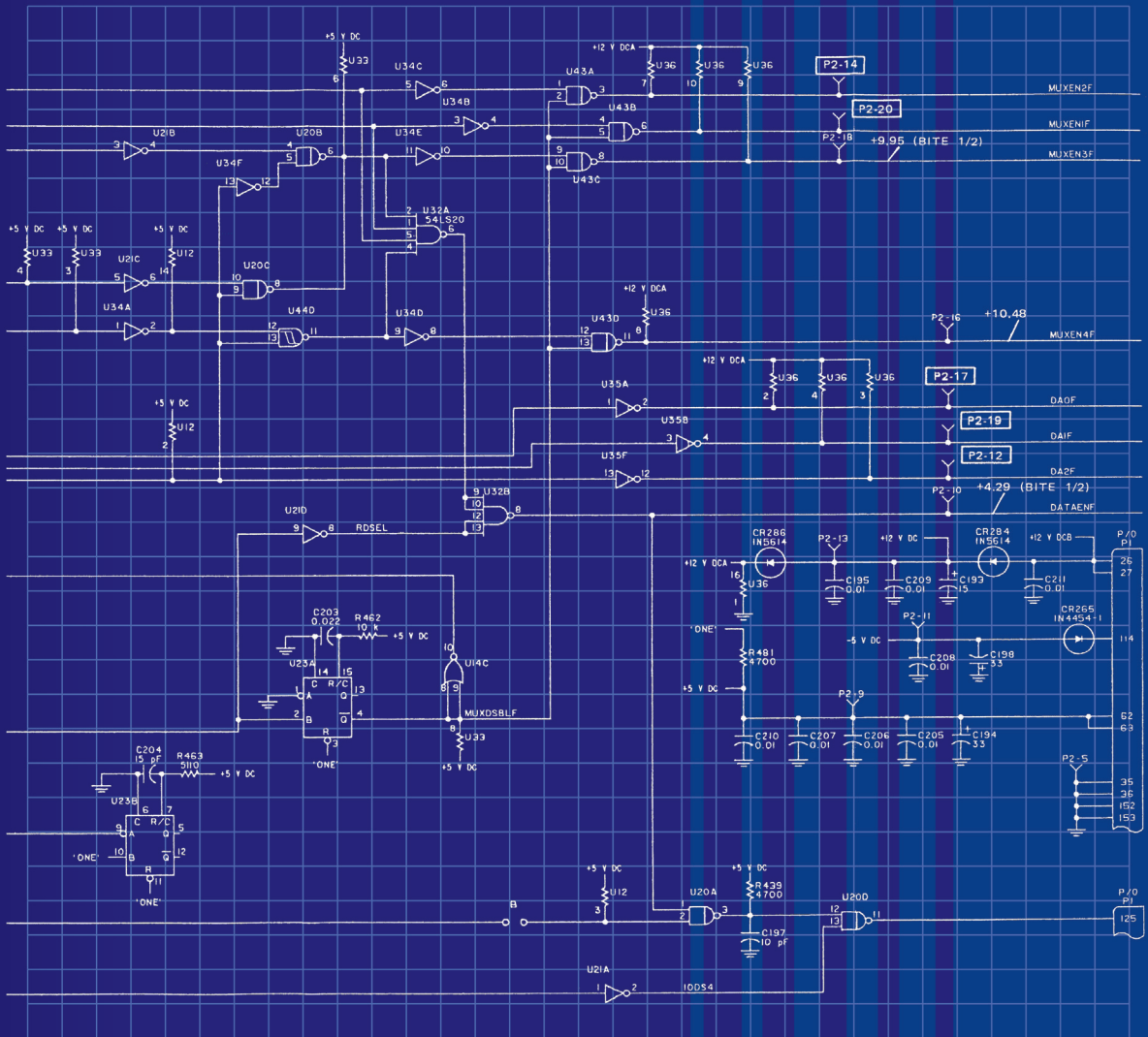


航空電子・電気の基礎

Avionics Basic



目 次

第1章 国際単位系

- 1-1メートル法から国際単位系の成立まで.....1
- 1-2 国際単位系の構成.....3
- 1-3 基本単位.....3
- 1-4 組立単位 (Derived Unit)9
- 1-5 接頭語11
- 1-6 航空工業界で常用される単位12

第2章 静電気

- 2-1 物質の構造13
- 2-2 静電気15
- 2-3 電 界17
- 2-4 電 位19
- 2-5 静電容量20
- 2-6 雷21
- 2-7 解 説23

第3章 電 流

- 3-1 電 流31
- 3-2 電気抵抗32
- 3-3 電池の直列接続と並列接続33
- 3-4 オームの法則35
- 3-5 抵抗の直列接続と並列接続36
- 3-6 電力と電力量39
- 3-7 解 説40

第4章 磁 気

- 4-1 磁 気48
- 4-2 解 説50
- 4-3 鉄の磁化現象52

第5章 電磁誘導現象

5-1	電流による磁界の発生	55
5-2	ソレノイド・コイルによる磁界	56
5-3	磁界中の電流に働く力	57
5-4	電磁誘導現象とレンツの法則	58
5-5	磁界中を運動する導体の起電力	58
5-6	相互インダクタンスと自己インダクタンス	59
5-7	うず電流	60
5-8	解 説	61
5-9	SI単位と電磁気の諸法則	66

第6章 交流回路

6-1	交流発電機	69
6-2	交流の性質	71
6-3	インダクタンス回路	73
6-4	キャパシタンス回路	75
6-5	インピーダンス回路	76
6-6	交流回路の電力	79
6-7	共振回路	81
6-8	変圧器	83
6-9	3相交流	85

第7章 電気部品と機内配線

7-1	航空機用電線	92
7-2	抵抗器	94
7-3	コンデンサ	97
7-4	スイッチ、リレーおよびサーキット・ブレーカ	100
7-5	鉛蓄電池	105
7-6	ニッケル・カドミウム蓄電池	106
7-7	コネクタ	110
7-8	電 球	113
7-9	機内配線法	118
7-10	ラジオ・ラック	121
7-11	光ファイバー	122

第8章 電気計測

8-1	可動コイル形計器	125
8-2	電流力計形計器	126
8-3	整流形計器	127
8-4	熱電形計器	127
8-5	誘導形計器	128
8-6	比率計形計器	128
8-7	回路計	129
8-8	変流器付電流計	130
8-9	クランプ・オン電流計	130
8-10	真空管電圧計	131
8-11	ブリッジ回路	132
8-12	デジタル回路計	133
8-13	シンクロ計器	135
8-14	オッシロスコープ	138

第9章 電気機械

9-1	発電機と電動機の原理	140
9-2	直流発電機	141
9-3	直流電動機	144
9-4	交流発電機	146
9-5	交流電動機	149

第10章 電子部品

10-1	電子放出	155
10-2	真空中の電子の運動	158
10-3	電子管	161
10-4	半導体	163
10-5	ダイオード	167
10-6	トランジスタ	170
10-7	電界効果トランジスタ	173
10-8	サイリスタ	175
10-9	フォト・ダイオードとフォト・トランジスタ	178
10-10	ホール素子	179
10-11	サーミスタ	179

IV

10-12 パリスタ180
10-13 集積回路181
10-14 ブラウン管182
10-15 液晶ディスプレイ183

第11章 電子回路

11-1 電源回路187
11-2 増幅回路192
11-3 帰還のある増幅回路197
11-4 発振回路199
11-5 変調および復調回路203
11-6 音と聴覚209
11-7 テレビジョン211
11-8 ラジオ受信機216
11-9 ノイズ対策218

第12章 自動制御

12-1 サーボ機構224
12-2 フィードバック制御の基礎229

第13章 デジタル技術

13-1 数の表現方法と2進数238
13-2 論理回路242
13-3 パルス回路246
13-4 パルス変調復調回路253
13-5 データ・バス256
13-6 コンピュータ265

第14章 電気回路図

14-1 シンボル266
14-2 配線図268
14-3 系統図269

別表270

練習問題273

練習問題解説291

※改定箇所については欄外に傍線を入れてあります。

第 1 章 国際単位系

数をかぞえ、いろいろな物や現象の大きさを数量であらわすことができるのは人類だけで、はかるべきものに単位をつけることにより、自分の欲しい物の種類と大きさを相手に正確に伝えることができるようになり、人間社会に分業体制ができあがった。

最初に単位を使い出したのは、紀元前3000年ごろの古代バビロニア人であったといわれ、当時は60進法が用いられていた。これが今でも時間の単位として使われている。

今日の単位系は、世界的にメートル単位系に統一されつつあり、人類は単位という共通の言葉で意思の伝達ができるようになった。これからの学習に備え、まず単位系について述べる。

1-1 メートル法から国際単位系の成立まで (International System of Units from Metric System)

長さ、面積、重さなどの物理量をはかることは古代から行われており、同一文化圏では共通の単位が使われていた。長さの単位は、人体の各部分の長さ由来するものが多く、古代西洋では、足の長さからフィートが、親指幅からインチが、東洋では、手幅から尺が、親指幅から寸ができ、広く使用されていた。このような単位系が生じたのは、それを使う文化圏で共通性があったため、人間のからだの部分は同一人種の成人ではそんな違いがあるはずはなく、古代から人間の住居を作る際の基準となっていたと考えられる。文化が発達し、国家が形成され、他の文化圏、または国家と交流をもつようになると、国際的に広く使われる統一的な単位制度が必要になった。

現在のメートル法の単位系が生まれたのは、18世紀の終わりごろのフランスで、そのころは度量衡、つまり長さ、体積、質量、時間、角度ぐらいが、単位を約束する必要のある物理量であった。その後、このメートル法は各国の注目するところとなり、1875年にメートル条約が結ばれた。このように、われわれが使いなれているメートル単位も、実は今から約130年前に地球の子午線の長さをもとに定められたものに過ぎず、古代から使われていたフィートや尺に比べれば、大人と赤ん坊ほどの年齢差がある単位系といえる。

メートル条約が結ばれたころから、科学の実用化が進み、工業上の諸単位が多く作られ実用化さ

れるようになった。基本単位は、学者やそれを使用する工業や商業により異なるものが選ばれ、いろいろな単位系が生まれた。物理学者は、長さはセンチメートル (cm)、質量はグラム (g)、時間は秒 (s) ではかる、いわゆる **CGS 単位系** を使用した。技術者や商工業では、長さはメートル (m)、重量は重量キログラム (kgf)、時間は秒 (s) ではかる、いわゆる **MKS 重量単位系** を採用した。

同じメートル法の単位にも、こうした基本単位の取り方で、物理学上の単位「長さ」—「質量」—「時間」と工学上の単位「長さ」—「重量」—「時間」という2つの単位系が生じてしまった。さらに困ったことには、CGS 単位系の「質量」の単位も、MKS 重量単位系の「重量」の単位も、全く同じキログラム (kg) と呼ばれたために、「質量」と「重量」は、混同されて使われるようになってしまったのである。現在われわれが、商工業で使用している単位、キログラムは、実は重力単位系の重量キログラム (kgf) なのである。

電気工学関係では、質量は、キログラム (kg) ではかり、さらに電流をアンペア (A) ではかる、いわゆる **MKSA 単位系** を使用することが多く、つい最近までは、CGS ガウス単位系も用いられていた。

もともと、メートル法は、世界中を1つの単位系で統一する目的で作られたものであるが、メートル法の中で、10以上もの単位系が使われだしたのである。

1948年のメートル条約国による、第9回国際度量衡総会で、1本のメートル法の幹から、多くの枝に分かれた単位系を、新しい首尾一貫した単位系に統一すべきである、と決議された。1954年の第10回総会で、基本単位にとる物理量として、長さ、質量、時間、電流、熱力学温度、光度の6個を用いることにした。これらの単位は、それぞれの単位を実現する標準が、明確かつ高精度に確立されていたからである。

メートル条約の理事機関である国際度量衡委員会は新しい実用単位の基本を作り、これが1960年の第11回総会で採択され、ここに**国際単位系** (International System of Units) が誕生した。

SI 単位は、6個の基本単位 (現在は物質量が追加されて7個) と、2個の補助単位を設け、これらを代数的に組み合わせて、他の物理量の単位を組み立てていく単位系で、1つの物理量には、ただ1つの単位が対応し、各単位にはそれぞれ1つの単位記号が与えられている。

日本国内の計量単位を規制する法律は、計量法 (昭和26年法律第207号) であり、この法律で、計量の基準として定めた単位を法定計量単位といい、これ以外の単位を、取り引き、および証明に使ってはならないとされている。法定計量単位はSIに準じているが、もちろん国内法である関係から例外もある。日本工業規格には、JIS Z 8203 [国際単位系 (SI) およびその使い方] (1974年4月制定) があり、SIの内容とその使い方の一般的ルールを規制している。このJISは、国際標準化機構 (ISO) が、1973年に制定した、国際規格ISO 1000に準拠したものである。

SIが制定されてまもないこともあり、物理学書、工学書では、いまだCGS単位系、MKS重力単位系を使用している。本書では、できるかぎりSIを使用することにするが、航空工業界で現在使用されているSI以外の単位系も、一部これを使用することにする。

表1-2 基本単位

量	単位の名称	単位記号	定義
長さ	メートル	m	1メートルは、光が真空中を $\frac{1}{299,792,458}$ 秒に進む長さである。
質量	キログラム	kg	キログラムは（質量でも力でもない）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。
時間	秒	s	秒は、セシウム 133 の原子の基底状態の2つの超微細単位の間の遷移に対応する放射の9,192,631,770周期の継続時間である。
電流	アンペア	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有する無限に長い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メートルごとに 2×10^{-7} ニュートンの力を及ぼし合う一定の電流である。
熱力学温度 ¹⁾	ケルビン	K	熱力学温度の単位、ケルビンは、水の3重点の熱力学温度の $\frac{1}{273.16}$ である。
物質量	モル	mol	1. モルは、0.012キログラムの炭素12の中に存在する原子の数と等しい数の構成要素を含む系の物質質量である。 2. モルを使用するときは、構成要素が指定されなければならないが、それは原子、分子、イオン、電子その他の粒子またはこの種の粒子の特定の集合体であってよい。
光度	カンデラ	cd	カンデラは、周波数 540×10^{12} ヘルツの単色放射を放出し、所定の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。

注1)：セルシウス温度はセルシウス度（記号℃）で表される。

JIS Z 8023 の要約

1-3-2 重量と質量の単位 (Unit of Weight and Mass)

われわれは、物体の「重さ」とは、物体を手で持ち上げるとき必要な「力」の感覚で知ることができる。ところが、地球から飛び立った宇宙船では、人は物体の重さを感じなくなることはよく知られている。物体の重さが、地球の外に出ると、手に力として感じとれないのはなぜであろうか。手が物体の重さを感じるのは、物体に作用している地球の重力を力として感じているからである。物体により、重さの感覚が異なるのは、物体それぞれに本来備わっている別の「何か」に比例して、重力が作用していることにほかならない。この何かが物体の本質的な量、つまり「質量」であり、重量は重さと同義語である。

力の単位はニュートン (N) で、1ニュートンとは、1 (kg) の質量の物体に働くとき、1 (m/s²) の加速度を与える力の大きさである、と定義されている。地球の重力加速度は、9.80665 (m/s²) であるので、質量1 (kg) に9.80665 (N) の力が作用していることになる。この力を、1重量キログラム (1 kgf) と称している。

われわれは、現実には地球上で生活しているのであり、地球上の重力は世界のどこでもほぼ等しいので、質量1 (kg) に働く重量1 (kgf) もほぼ等しい。したがって、重量を特に力である、と断って、その単位を (kgf) と表す代わりに、簡単に (kg) と表している。

1-3-3 時間の単位 (Unit of Time)

古代人の生活は日の出から日没までが活動の時間であり、日没から日の出までが安息の時間であった。古代メソポタミア人たちは、すでに巧妙な水時計によって精密に1日の長さを測定していたようである。

人間が秒などという細かい単位を使い出したのは、都市国家が発達し軍隊を持ち兵士の走る速さをはかる必要にせまられたからだといわれている。このとき使われたのが人間の脈はくで、大人の1分間の平均脈はく数60回が「秒」の単位の始まりだと考えられている。

1960年までの秒の単位は時間をはかりはじめた古代からの慣習どおり、秒とは平均太陽日の86,400分の1、と定義していた。ここで平均太陽日とは年間を通じた1日の平均の長さのことであるが、その後の調べて地球の自転周期は1日の間でも不規則でだんだん長くなりつつあることが分かり、1960年の第11回国際度量衡総会で地球の自転より安定している地球の公転周期を基準とすることになり、1秒とは1900年1月1日正午における地球の公転の平均角速度に基づいて算出した1太陽年の31,556,925.9747分の1、と定義された。

恒星を基準として太陽年をはかると、200年に0.5秒ほど短くなっているらしいので再度秒の定義は変更され、1秒とは、セシウム133原子の基底状態の2つの超微細準位の間遷移に対応する放射の9,192,631,770周期の継続時間である、と定義された。分かりやすくいうと、セシウム原子に約9.2 (GHz) の電磁波を放射すると共振状態となるが、この共振周波数の1周期の9,192,631,770倍を1秒と定めたのである。

1-3-4 電流の単位 (Unit of Electrical Current)

昔は電流の単位、アンペアとは硝酸銀の溶液を通過し、毎秒0.00111800 (g) の銀を分離する不変電流、と定義されていた。これがSIになり、1アンペアとは真空中に1メートルの間隔で平行に置かれた2本の直線導体のそれぞれを流れ、この導体の長さ1メートルごとに、 2×10^{-7} ニュートンの力を及ぼし合う一定の電流、という新しい力による定義に変わった。アンペアは、基本単位であるにもかかわらず、定義の中にニュートンという力の単位、つまり組立単位が入っているというのが面白い。

1-3-5 熱力学温度目盛と国際実用温度目盛

(Thermodynamics Temperature Scale and International Useful Temperature Scale)

熱力学温度目盛とは、簡単に絶対0度（ -273.15°C で、原子も分子も運動をやめて静止してしまう温度であり、これ以下の温度はない）と、水の3重点（真空中で水と水蒸気と氷が共存する状態）との間を、273.16等分した温度目盛で、単位はケルビン（K）である。

この熱力学温度目盛を再現する温度計が標準温度計で、この標準温度計の目盛を国際実用温度目盛とよんでいる。標準温度計は、表1-3に表す温度定点で校正され、定点間の補間式も設定されている。

13.81 (K) ~ 630.74 ($^{\circ}\text{C}$) までの標準温度計は、白金抵抗温度計であり、630.74 ($^{\circ}\text{C}$) ~ 1,064.43 ($^{\circ}\text{C}$) までの標準温度計は、白金と白金ロジウム（ロジウム10%）の熱電対温度計を使用する。1,064.43 ($^{\circ}\text{C}$) 以上は光高温計を使用する。

SIでは1量1単位が原則であるが、すべてケルビン（K）に統一するのは無理があるので、セルシウス度も使用できるようになっている。熱力学温度 T (K) と、セルシウス温度 t ($^{\circ}\text{C}$) との間には次の関係がある。

$$t = T - 273.15 (^{\circ}\text{C}) \dots\dots\dots (1-1)$$

表1-3 温度定点と測定法

定 点	熱力学温度 (K)	セルシウス温度 ($^{\circ}\text{C}$)	測 定 法	
平衡水素の3重点	13.81	-259.34	白 金 抵 抗 温 度 計	
17.042 K 点	17.042	-256.108		
平衡水素の沸点	20.28	-252.87		
ネオンの沸点	27.102	-246.048		
酸素の3重点	54.361	-218.789		
アルゴンの3重点	83.798	-189.352		
酸素の沸点	90.188	-182.962		
水の3重点	273.16	0.01		
水の沸点	373.15	100		
すずの凝固点	505.118	221.968		
垂鉛の凝固点	692.73	419.58		
銀の凝固点	1,235.08	961.93		白金と白金ロジウム 熱電対温度計
金の凝固点	1,337.58	1,064.43		

注：17.042 K というのは、25/76気圧での平衡水素の沸点、あとの沸点とか凝固点は標準気圧つまり 101,325 Pa での値。（岩波理化学辞典による）

1-3-6 物質質量とモル (Amount of Substance and Mole)

原子量とは、原子の比較的重さであり、比較の標準としてはかつては酸素の原子をとり、これを原子量16と定めていた。この定め方によると、水素の原子量は1であり、炭素の原子量は12である。

分子量とは、分子を構成する原子の原子量の和である。したがって水の分子量は18である。ところが、同位元素の研究が進み、酸素には質量数16の酸素¹⁶Oのほかに質量数17と18の酸素¹⁷Oと¹⁸Oがあることがわかり、ややこしくなってきたので、化学でも、物理学でも共通して使用できるように、質量数12の炭素原子¹²Cに原子量12を与えると定められた。これがモルの定義の中に炭素12というかたちであらわれてくる。

モルという言葉は化学の分野で物質質量をはかる単位として使用されてきた。簡単には物質の分子量に等しい数のグラム単位の質量が1モルである。たとえば水素原子1モルの質量は1.008グラム、水素分子1モルの質量は2.016グラム、電子1モルの電荷は96,485クーロン (C) である。物質質量をモルではかると次のような便利さが生じる。

(a) すべての物質1モルの中には同じ数の分子が含まれる [これがアボガドロ数 (Avogadro Number) とよばれ

$$N = 6.0220 \times 10^{23} \text{ (分子/モル) である}]。$$

(b) すべての気体1モルは、同温、同圧のもとで同じ体積 (0℃、標準気圧のもとで22.4138 dm³) を占める。

1モルの気体の圧力 P と体積 V 、温度 T との間には次の関係式が成り立つ (ボイル・シャルルの法則)。

$$PV = RT \text{ (J/mol)} \dots\dots\dots (1-2)$$

P : 気体の圧力 (Pa)

V : 気体1モルの体積 (m³/mol)

R : ガス定数 8.31432 (J/K · mol)

T : 気体の温度 (K)

式 (1-2) に出てくる常数 R は気体の種類にかかわらない定数でガス定数という。空気1モルの質量は28.9644 (g) なので、空気の単位質量当たりのガス定数を求めると

$$R = 287.053 \text{ (J/K · kg)}$$

となる。したがって、標準状態の空気 (温度15℃、圧力101,325Pa) の密度は、次のように算出できる。

$$\rho = V^{-1} = \frac{P}{RT} = \frac{101,325}{287.053 \times 288.15} = 1.2250 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

標準状態の
空気密度

1-3-7 光度と測光法 (Luminous Intensity and Light Measuring Method)

光はラジオやテレビの電波や、赤外線、X線、ガンマ線などと同じ電磁波であり、このうち特に人間が眼で感じることができる波長380～760 (nm) の電磁波を光という。光の性質は光度、光束、照度など、いくつかの測光量であらわされるが、その基本に選ばれたのが光度である。光度の単位カンデラ (cd) は、光度標準器のるつぼの中で白金を完全に溶かし、徐々に温度を下げ凝固が始まってから終わるまでの2042 (K) の一定の温度の間に、ガイド・チューブの内壁が発する光を上方に導き、この開口1平方センチの1/60の光度と規定されている。

実用の1次標準器には、図1-1に示すように光度の標準器と視感式光度計を用いて、人間の眼で明るさを見比べて値づけした測光標準電球が用いられる。このように測光の単位は、人間の視感度に応じた特別の単位系になっている。

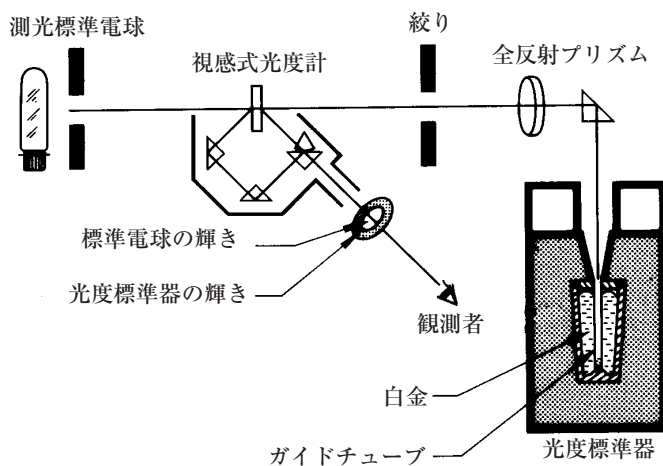


図1-1 光度測光法

いままでの説明では、光度とエネルギーの関係が定義できていない。そこで、国際度量衡総会は、基本単位である光度を再定義し振動数が 540×10^{12} (Hz) の単色光を放出する光源のある方向への放射強度が1/683 (ワット/ステラジアン) であるとき、この光源の光度を1 (cd) と定めた。すなわち定義単色光では、683 (ルーメン) =1 (ワット) となる。

1-4 組立単位 (Derived Unit)

基本単位7個を組み合わせ、乗除算のみで、しかも常に係数を1として組み合わせた単位を組立単位と呼んでいる。このうち、表に示す22個の組立単位には、利便性の観点から固有の名称と記号が与えられている。下方の4つの単位は、人体保護の観点から特別に固有の名称が与えられている。

表1-4 固有の名称をもつ組立単位

量	単位の名称	単位記号	基本単位もしくは補助単位による組立方
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$kg \cdot m/s^2$
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
仕事率、工率、動力、電力	ワット	W	J/s
電荷、電気量	クーロン	C	$A \cdot s$
電位、電位差、電圧、起電力	ボルト	V	J/C
静電容量、キャパシタンス	ファラッド	F	C/V
(電気) 抵抗	オーム	Ω	V/A
(電気の) コンダクタンス	ジーメンズ	S	Ω^{-1}
磁束	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
磁束密度、磁気誘導	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度または度	$^{\circ}C$	
光束	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
照度	ルクス	lx	lm/m^2
平面角	ラジアン (radian)	rad	m/m
立体角	ステラジアン (steradian)	sr	m^2/m^2
放射性核種の放射能	ベクレル (becquerel)	Bq	s^{-1}
吸収線量・比エネルギー分与・カーマ	グレイ (gray)	Gy	$m^2 \cdot s^{-2}$
線量当量・周辺線量当量・方向性線量当量・個人線量当量	シーベルト (sievert)	Sv	$m^2 \cdot s^{-2}$
酵素活性	カタール (katal)	kat	$s^{-1} \cdot mol$

参 考：

従来、角度の単位ラジアンと立体角の単位ステラジアンは補助単位という区分に分類されていたが、1995年の国際度量衡総会において、この2つの単位は廃止され、組立単位に含まれるようになった。

ラジアンの意味は、円の周上でその半径の長さに等しい長さの弧を切り取る2本の半径の間に含まれる平面角である。半径 r (m) の円の円周は $2\pi r$ (m) である。したがって、円の中心のまわりの平面角は 2π ラジアン (rad) となる。直角は90 (度) なので、 $\pi/2$ (rad) となる。

ステラジアンの意味は、球の中心を頂点とし、その球の半径を1辺とする正方形の面積と等しい面積をその球の表面上で切り取る立体角である。半径 r (m) の球の表面積は $4\pi r^2$ (m²) である。したがって、球の中心のまわりの立体角は 4π ステラジアン (sr) となる。

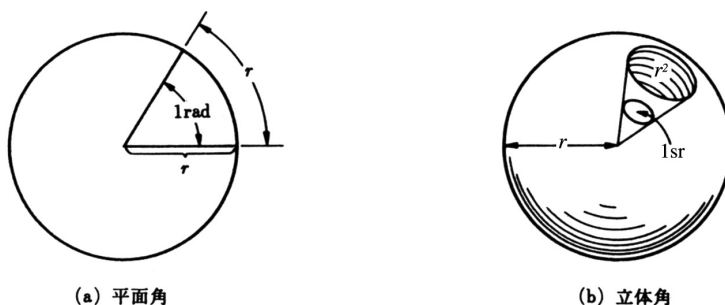


図1-2 平面角と立体角

電気の組立単位は、次のように理論的に組み立てられている。

ニュートン (力の単位) : 1キログラムの質量に1メートル毎秒毎秒の加速度を伝える力である。

ジュール (エネルギーないし仕事の単位) : 1ジュールは、1ニュートンの作用点はその力の方向に1メートルに等しい距離だけ移動するときなされる仕事である。

ワット (仕事率の単位) : 1ワットは毎秒1ジュールに等しいエネルギーを産出させる仕事率である。

アンペア (電流の単位) : 1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有する無限に長い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メートルごとに 2×10^{-7} ニュートンに等しい力を及ぼし合う一定の電流である。

ボルト (電位差および起電力の単位) : 1ボルトは1アンペアの電流が流れている1本の導線の2点間で消費される電力が1ワットに等しいとき、この2点間に存在する電圧である。

オーム (電気抵抗の単位) : 1オームは、起電力源をもたない1個の導体の2点間に加えられた1ボルトの定電圧が、この導体中に1アンペアの電流を生じるとき、この導体の2点間に存在する電気抵抗である。