

第 1 章

‘物理’という文字は、物の^{もの}理^{ことわり}からなる。この文字のとおり、物理学は、ものとは何か、運動とは何か、を問う学問である。これらを問うためには、ものの大きさ、重さ（質量）、それにこれらを記述する単位を知ることが第一歩となる。

単位と物理量

1.1 単位は生活から生まれた

物理量を測定すること、その測定量を多くの人が共通の知識として共有するためには基準が必要である。その基準となる量を単位という。測定量は、その単位の何倍であるかで表す。

単位は、物理に限らず、長さや重さの基準（約束ごと）がなくては混乱をきたすため、生活においても重要である。ものの計量の単位^{どりようこう}を度量衡^{りきやうけい}という。度量衡の「度」は長さを測る物差し、「量」は^{かさ}嵩を^{ます}量る升、そして「衡」は重さを量る秤のことである。現在もこの言葉は使われており、メートル条約に基づいて世界で通用する単位系を維持するための組織を国際度量衡総会 (Conférence générale des poids et mesures, CGPM) という。

長さ

度量衡の法の歴史は、大宝律令 (701 年) まで遡ることができる。昔は、長さは体の一部を単位として使っていた。握った手の指 4 本分長さを束、親指と人差し指 (あるいは中指) をひろげた長さ^{しゃく}を尺、両手を左右に伸ばしたときの左右の指の先端間の長さを尋^{ひろ}という。1 束は約 8 cm、1 尋は約 1.5 m (約 1.8 m という説もある) である。尺と同じ起源をもつ単位として

あた
咫がある。これも手を当てて測ることから生じているが、中指の先端から手のひらの下端までの長さ、あるいは指8本分の幅という説もある。現在では1尺 $\approx$ 30 cmとなっているが、両指を大きくひろげても20 cmほどしかないことを考えると、時代とともに基準が変わったことがわかる。

体の一部を単位とすることは、西洋でも同じである。親指の太さをインチ、手をひろげたときの親指の先から小指の先までの長さをスパン、ひじの長さをキュービット、足(かかとからつま先まで)の長さはフートである。現在の単位で表すと、1インチ(inch)は2.54 cm、1スパン(span)は22.86 cm、1キュービット(cubit)は44.72 cm、1フート(foot)は30.48 cmである。また、3フィートを1ヤード(0.9144 m)という。なお、フートは単数形で、複数形はフィート(feet)である。

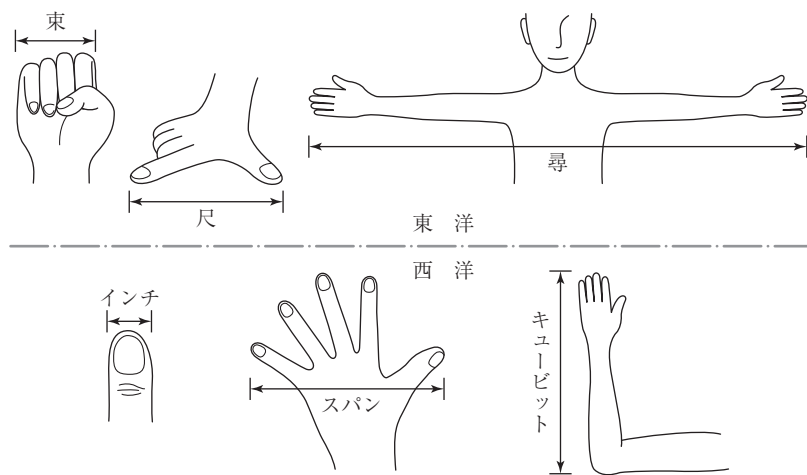


図1.1 東洋と西洋の長さの単位

例題1.1 A4判の用紙の大きさを手と指を使って計ってみた。縦が1スパンより4インチ長く、横が1スパンより1インチ短かった。これをcmで表すとどうなるか。

解 縦は $22.86 \text{ cm} + 4 \times 2.54 \text{ cm} = 33.02 \text{ cm}$ 、横は $22.86 \text{ cm} - 2.54 \text{ cm} = 20.32 \text{ cm}$ となる。A4判は縦29.7 cm、横21.0 cmと決まっている。手をひろげて計ると10%ほどの不確かさがあるが、およそその大

きさはわかる。

面積・体積

面積は、日本の単位では歩、畝、段(反)、町が基本となっていた。歩は、長さの単位である歩からつくられる面積である。歩は、左右の足を一歩ずつ踏み出した長さで6尺とされた。1尺は10/33 m(約30.3 cm)なので、6尺は約182 cmとなる。歩は、歩を一辺とした正方形である6尺平方(約3.31 m²)を意味する。歩は、坪ともいう¹⁾。30歩を1畝、300歩を1段、10段を1町という。町は、推古6年(606年)から使われていて、大宝令以前からの単位である。耕地面積を表すことが重要であったためであろう。この事情は西洋のエーカー(acre)も同様である。エーカーは、2頭1組の雄牛が1日に耕すことのできる耕地面積として、エドワードI世(在位1272～1307)の時代に決められた。1エーカー = 40.469 a = 4046.9 m²である²⁾。

体積の単位は、日本でも、西洋でも、穀物や水の量を量ることから生まれた。日本では、現在でも1升瓶などで使われている升は、田んぼ1坪から収穫出来得る米の量から生じている。その量は、大宝令、豊臣秀吉(1537～1598)による太閤検地(1582年)と時代とともに変わってきたが、現在では1升 = 1.80 L (1 L = 1000 cm³)とされている。西洋でも農作物の嵩を量るために使われたものから始まった。クア(qa)は、BC2450年頃のシュメル人が使っていた容器のことで小麦や水を量る標準器とされ、約0.4 Lである。またガロン(gallon)は、ヘンリーVII世(在位1485～1509)の時代に「麦100トロイオンズを1ガロン」とされた。100トロイオンズは約3.1 kgである。現在では、ガロンは英ガロンと米ガロン(約0.833英ガロン)があり、イギリスには1ワインガロン(=231立方インチ)、1ビールガロン(=282立方インチ)、それに1穀物ガロン(=272立方インチ)がある。1立方インチは、6.387 cm³である。

例題1.2 鎌倉末期の書『潤背』によると、当時の升の大きさは4寸四方・

- 1) 1坪は、尺貫法の面積の基本単位で、およそ畳2枚の広さである。しかし、団地畳は1坪より狭く、京間畳は1坪より広いので目安にしかならない。
- 2) メートル法の地積単位はアール(are)で、記号はaである。1 a = 100 m² $\approx$ 30.25坪である。

深さ2寸(当時)であった。秀吉は、太閤検地の際に量制の統一も試み、升の大きさを5寸四方・深さ2.5寸として制定した。これを京升という。京升は、以前の升に比べて、何割大きくなったか。また、何Lか。ただし、寸は尺の補助単位で、1寸=1/33mである。

解 以前の升は32立方寸(890 cm³)、京升は62.5立方寸(1739 cm³)なので、京升は、以前の升の1.95倍、すなわち9.5割分大きい。また、およそ1.74Lである。現行の升は、4.9寸四方・深さ2.7寸なので、64.827立方寸(1803.9 cm³)で約1.8Lである。 ■

重さ

重さ(質量)の単位として、中国には、輸送量の基準であった駄馬1頭に積む品の重さで決められた駄があった。日本も同じである。駄馬に載せるため、体積や品物を載せる入れ物に依存し、また流通業であるため載せる品物の価格にも依存した。このため、その重さは30貫から50貫の幅があった。米1駄は2俵(1俵は約57kg)、糸1駄は48貫(180kg)、綿1駄は28貫800匁(108kg)と載せる荷物によって異なっていた。江戸期に1駄は36貫(112.5kg)と定められたが、実際は45貫ほど積んだ。馬を酷使したが、流通業はこれで潤ったのかもしれない。また、明治の開拓使時代(1869年～1882年)に流通したハッカ取卸油を入れた缶(25斤)8個を駄馬に載せて運搬したため、1駄は200斤(120kg)となり、これが取卸油の価格の基準にもなった。

1貫は3.75kgである。1貫は、唐の武徳4年(621年)に初鑄された開元通宝に紐を通して1000枚まとめた重さである(飛鳥池遺跡で発見(1999年)された富本銭は、開元通宝と同一規格でつくられている)。この紐のことを‘銭刺し’といい、この銭刺しで1000枚の銭貨を貫くことから‘貫’という。また、1000枚をひとまとめにしたため1000分の1も単位となって、これを匁という。この呼び名は、1文銭の目方(重さ)から派生した(匁は文とメ(目)の合字)。1匁は、メートル法が施行した昭和41年(1966年)の計量法においても、真珠の質量を計量する補助単位として1匁=3.756gと定められた。1斤は、大宝令より前から使われていた重さの単位である。商品の種類・大きさ、それに取引場所によって異なっていたが、明治期に

160匁(約600g)に統一された。

古代シュメル人が使っていた重さの単位であるシェケル(shekel)は、小麦180粒の重さ(8.3g)とされた。180としたのは60進法を使っていたためである(60は2, 3, 5を約数にもつ)。この重さの単位がそのまま銀貨の重さとなり、その貨幣もシェケルという。これ以後も穀物の粒は同程度の大きさ・重さなので基準として使われた。ヤード-ポンド法の単位となったグレイン(grain)は、小麦1粒の重さから生じている。7000グレインが1ポンド(=0.4536 kg)である。

1.2 メートル法

単位は、前節で述べたように、生活の中から生まれた。このため、そこで生まれた単位はその地域の人々にとっては身近で親しみやすい。しかし、その地域の王のような特定の人の指の太さや長さ、腕の長さなどにより決められているので、その地域外で決められた尺度とは異なり、商取引などの交渉ごとにも支障をきたす。このような単位では、いつでもどこでも、という一般性をもっていないし、地域性ゆえに局所的であって総体的ではない。それに、各地の文化や風習によるので知識どうしのつながりがはつきりせず、断片的で体系的でもない。すべての国・地域の人で通用する単位の設定には、一般性、総体性、それに体系性が必要なのである³⁾。

地域、時代、人、それに社会によって変わらず、より普遍的なものによって度量衡の標準が定められるべきだ、とメートル法が提案されたのはフランスの国会である。その時期はフランス革命期の1790年3月であった。地域ごとに異なるどころか、複雑であったフランス国内の統一を主導するものが国際的な統一を目指し、革命による平等を掲げてメートル法は考案された。基準となる単位は、人類にとって普遍なもの、どの国・地域の人にとっても身近なものでなくてはならない。このため、長さの基準は永久不滅とされていた地球、質量の基準は水とした。これがメートル法である。メートル(meter)は、‘計る’や‘計器’を意味するギリシア語metronに

3) 生活から得られる知識は、特殊的、局所的、それに断片的である場合が多い。単位だけではなく、科学の説明にも一般性、総体性、それに体系性が不可欠である。

由来している。

経線に沿った北極から赤道まで距離の1000万分の1の長さ(1m)を決定するために測量の旅は、1792年6月に始まった。フランス北端のダンケルクからパリを通りスペインの港町バルセロナまでの距離を、当時最先端であった機器を用いて三角測量を行った(図1.2)。図面製作と計算も含め、1mの長さを定めるために7年を要とした難事業となった。しかしながら、これは‘すべての人々、それにすべての時代のため’の決定と評されるほど大きな一歩であった。

図1.2を見ると、最北のダンケルクから最南のバルセロナまで三角網が描かれている。図1.3のように基点Aを決め(パリのパンテオン)、そこから見通しの良いところに2点B、Cを決め、その3点を結んで三角形ABCをつくる。距離ABを正確に測量し、それを基線とし、角A、B、Cも正確に測定する。距離BCとACは正弦定理より、

$$BC = AB \times \frac{\sin A}{\sin C}$$

$$AC = AB \times \frac{\sin B}{\sin C} \quad (1.1)$$

で求める。距離BCがわかれば三角形BCDにおいて角C、Bを測定することにより辺長を求めることができる。こうして三角網の各三角形の辺長は、順々に求まる。これが三角測量である。

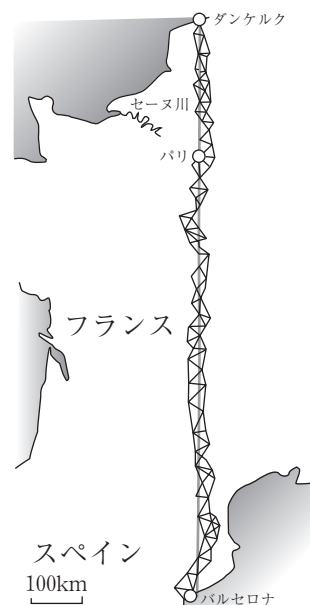


図1.2 三角測量の道のり

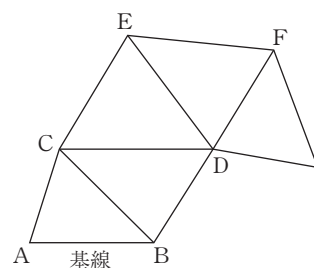


図1.3

質量

このメートルを基準にして、質量の基準も1立方デシメートル⁴⁾(1dm³は1リットル(1L)と同じ体積)の水の量を1kgと定めるべく努力した⁵⁾。貢献したのは、質量保存の法則の提唱(1774年)でも知られているパリの徴税官ラボアジエ(A.L. Lavoisier, 1743～1794)である。ラボアジエは、(長さを定める)→(体積を決める)→(物質を選んで質量を定める)という手順で行った。彼は、氷が融解する温度において、空気の入っていない水(蒸留水)1dm³の質量を定めた。フランス科学アカデミー会員が、1mの長さを定める旅に出た1792年のことである。これが発展して、1799年、4℃の純粋の水1Lの容積がもつ質量の基準となり、これと同じ質量の分銅を白金でつくったものがメートル法の質量標準器であるキログラム原器の第1号となった。

1875年、メートル条約が成立した。世界的に共通の統一単位を設定しようとしてから、80年以上の年数が必要であった(日本がメートル条約に加盟したのは1885年である)。なぜなら、普遍的単位の必要性は理解しても、それまで馴染んでいた単位を換えることには多くの抵抗があったからである(それほど、単位は生活に根付いていたわけである)。提案国である当のフランスですら、それまでの単位を変えるため、メートル法以外使用を禁止した強引な法律(1837年)を定めなくてはならなかったほどであった。この条約で定めたのは、長さ、面積(度)、体積(量)、それに質量(衡)のみであった。国際度量衡委員会が設置され、この委員会がこの条約に基づく事業を行うことになった⁶⁾。

4) 1 dm³ = 10⁻³ m³ = 1 L である。SI 単位系ではリットルの使用は推奨されていない。また、デシ(dec)は1/10を表し、記号はdである。同様に、センチ(centi)は1/100で記号はc、ミリ(milli)は1/1000で記号はmで分量を表す。デカ(deca)は10倍で記号はda、ヘクト(hecto)は100倍で記号はh、そしてキロ(kilo)は1000倍で記号はkで倍量を表す。

5) 当時は、キログラム(kg)ではなく、グラヴ(grave)が単位名であった。キログラムが使用されたのは、名称が決まった1795年以後である。

6) 決議機関は、6年に1度開催される国際度量衡総会である。この第1回総会(1875年5月)においてメートル条約が成立した。

1.3 国際単位系(SI)

1954年に開催された国際度量衡総会において、国際的な統一単位系が定められた。これが、国際単位系 (Le Système International d'Unités) である。SIと略される。この総会以後、1967年に温度のケルビン、1971年に物質量のモルが追加され、現在使われているかたちとなった。日本の計量法もこれに従っている。

SIは、基本単位、補助単位、それに組立単位から構成されている。基本単位と定められているのが、長さとしてメートル (m)、質量としてキログラム (kg)、時間として秒 (s)、電流としてアンペア (A)、温度としてケルビン (K)、光度としてカンデラ (cd)、それに物質量としてモル (mol) の7つである (表1.1)。補助単位⁷⁾は、角度の単位であるラジアン (rad) と立体角の単位ステラジアン (sterad あるいは sr) である (表1.2)。

表1.1 SI基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル (meter)	m
質量	キログラム (kilogram)	kg
時間	秒 (second)	s
電流	アンペア (ampere)	A
熱力学温度	ケルビン (kelvin)	K
物質量	モル (mole)	mol
光度	カンデラ (candela)	cd

表1.2 SI 補助単位(組立単位)

量	名称	記号
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

平面角のラジアンは、弧度法によって定義される。半径1の円において、長さ1の弧に対する中心角 θ を1 rad (ラジアン) といい、rad 単位で表した角度を弧度という (図1.4)。この中心角が 180° のときの弧の長さは π (半径が1なので円周の長さは 2π) であるので、中心角は π となる。す

7) ラジアンは円弧と半径の比とすることができるため、一般にはSI組立単位と分類されている。

なわち、角度 180° を弧度で表すと π となる。また逆に、1 rad は約 57.3° ($= 180/\pi$) である。

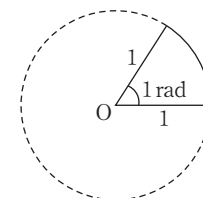


図1.4 1ラジアン の定義

円の半径を r として、より一般的に表現すると、 r に等しい弧に対する中心角を1 rad という。このため、長さ l の弧に対する中心角は、

$$\theta = \frac{l}{r} \quad (1.2)$$

で定義できる。すなわち、弧度 θ は、1 点が距離 r だけ離れた線 l に対して張る角を表している。

傘の開き具合など、錐体の頂点の部分がつま立体的な広がりを表す場合は、立体角 Ω を用いる。これは、

$$\Omega = \frac{S}{r^2} \quad (1.3)$$

で表される (図1.5)。式 (1.1) から類推すると、1 点がある距離 r だけ離れた面 S に対して張る角を立体角 Ω である。この Ω の単位が sr (ステラジアン) である。1 sr は、 $S = r^2$ となるときにの立体角である。半径1の球面上に面積1となる部分を S とすれば、球の中心 O から S をみるときの立体角を1 sr としてもよい。球の表面はその中心に 4π sr の立体角をはる。

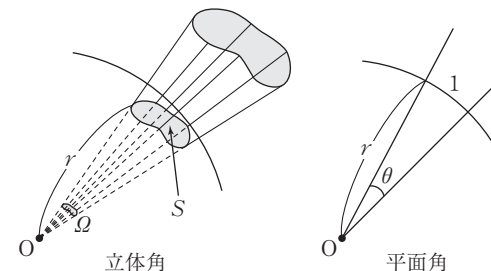


図1.5 立体角と平面角