

## 物理実験学（後半）

### 2. 単位系と基礎物理定数

2.1 単位系の定義

12月1日

2.2 基礎物理定数の測定

12月8日

### 3 & 4. 実験の基礎と各種の計測法

4.1 電気の測定

12月15日

4.2 磁気の測定

12月22日

4.3 放射線の測定

1月12日

4.4 光の測定

1月12日

4.5 回路・コンピューターの利用

1月19日

### 5. 誤差論

5.1 誤差の分類

1月27日

5.2 誤差伝播の法則

1月27日

5.3 最小二乗法

1月27日

## 2.1 単位系の定義

国際単位系 (S I 単位系) :

以下の7つの基本単位を組み合わせて物理量の単位を組み立てる。

時間 s	$^{133}\text{Cs}$ 原子のF=4とF=3間遷移の周期の9192631770倍 (Fは電子スピン1/2と核スピン7/2を合成した全角運動量)
長さ m	1 s の1/299792458の時間に光が真空中を進む距離
質量 kg	国際キログラム原器の質量 (Pt <sub>0.9</sub> Ir <sub>0.1</sub> の合金、直径39mm・高さ39mmの円柱)
電流 A	真空中に1mの間隔で平行においた無限に長い2本の直線状導体間に1mにつき $2 \times 10^{-7}\text{N}$ の力を及ぼしあう電流の大きさ
温度 K	水の三重点の熱力学温度の1/273.16
物質質量 mol	0.012kgの $^{12}\text{C}$ に含まれる原子数の構成要素を含む物質質量
光度 cd	$540 \times 10^{12}\text{Hz}$ の単色光源で放射強度1/683 W/srの光度

物理法則と基本単位から様々な物理量の単位を組み立てる

速度  $\text{m/s}$

加速度  $\text{m/s}^2$

運動量  $\text{kg}\cdot\text{m/s}$

力  $\text{kg}\cdot\text{m/s}^2 = \text{N}$  ニュートン

圧力  $\text{kg/m/s}^2 = \text{Pa}$  パスカル

仕事・エネルギー  $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2 = \text{N}\cdot\text{m} = \text{J}$  ジュール

仕事率  $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3 = \text{J/s} = \text{W}$  ワット

作用  $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s} = \text{J}\cdot\text{s}$

電荷  $\text{A}\cdot\text{s} = \text{C}$  クーロン

電位  $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{A}\cdot\text{s}^3 = \text{W}/\text{A} = \text{V}$  ボルト

抵抗  $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{A}^2/\text{s}^3 = \text{V}/\text{A} = \Omega$  オーム

静電容量  $\text{s}^4\cdot\text{A}^2/\text{m}^2/\text{kg} = \text{C}/\text{V} = \text{F}$  ファラド

磁束  $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{A}\cdot\text{s}^2 = \text{V}\cdot\text{s} = \text{Wb}$  ウェーバ

磁束密度  $\text{kg}/\text{A}\cdot\text{s}^2 = \text{Wb}/\text{m}^2 = \text{T}$  テスラ

インダクタンス  $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{A}^2/\text{s}^2 = \text{Wb}/\text{A} = \text{H}$  ヘンリー

## 基礎物理定数

産業技術総合研究所 計量標準総合センター

真空中の光速	$c = 299792458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	定義値
万有引力定数	$G = 6.6742(10) \times 10^{-11} \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$	精度 $1.5 \times 10^{-4}$
真空の透磁率	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} = 12.566370614 \dots \times 10^{-7} \text{ N}\cdot\text{A}^{-2}$	定義値
真空の誘電率	$\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2 = 8.854187817 \dots \times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$	定義値
電気素量	$e = 1.60217653(14) \times 10^{-19} \text{ C}$	精度 $8.5 \times 10^{-8}$
磁束量子	$\varphi_0 = h/2e = 2.06783372(18) \times 10^{-15} \text{ Wb}$	精度 $8.5 \times 10^{-8}$
コンダクタンス量子	$G_0 = 2e^2/h = 7.748091733(26) \times 10^{-5} \text{ S}$	精度 $3.3 \times 10^{-9}$
プランク定数	$h = 6.6260693(11) \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$	精度 $1.7 \times 10^{-7}$
微細構造定数	$\alpha = e^2/hc4\pi\epsilon_0 = 7.297352568(24) \times 10^{-3}$	精度 $3.3 \times 10^{-9}$
その逆数	$\alpha^{-1} = hc4\pi\epsilon_0/e^2 = 37.03599911(46)$	精度 $3.3 \times 10^{-9}$
リュードベリ定数	$R_\infty = m_e e^4/8ch^3\epsilon_0 = 10973731.568525(73) \text{ m}^{-1}$	精度 $6.6 \times 10^{-12}$
電子の質量	$m_e = 9.1093826(16) \times 10^{-31} \text{ kg}$	精度 $1.7 \times 10^{-7}$
陽子の質量	$m_p = 1.67262171(29) \times 10^{-27} \text{ kg}$	精度 $1.7 \times 10^{-7}$
陽子-電子質量比	$m_p/m_e = 1836.15267261(85)$	精度 $4.6 \times 10^{-10}$
アボガドロ定数	$N_A = 6.0221415(10) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	精度 $1.7 \times 10^{-7}$
気体定数	$R = 8.314472(15) \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	精度 $1.7 \times 10^{-6}$
ファラデー定数	$F = 96485.3383(83) \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$	精度 $8.6 \times 10^{-8}$
ボルツマン定数	$k = 1.3806505(24) \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$	精度 $1.8 \times 10^{-6}$
原子質量定数	$m_u = 1.66053886(28) \times 10^{-27} \text{ kg}$	精度 $1.7 \times 10^{-7}$
シュテファン-ボルツマン定数	$\sigma = 5.670400(40) \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$	精度 $7.0 \times 10^{-6}$
ジョセフソン定数	$K_J = 483597.879(41) \times 10^9 \text{ Hz}\cdot\text{V}^{-1}$	精度 $8.5 \times 10^{-8}$
フォン・クリッツィング定数	$R_K = h/e^2 = 25\,812.807\,449(86) \Omega$	精度 $3.3 \times 10^{-9}$

自然単位系：

特定の基礎物理定数に基づいて定義される単位系。

人為的な単位を避けるという意義と基礎物理方程式が簡潔になるというメリットがある。

プランク単位系： $c, G, h, 1/4\pi\epsilon_0, k$  を 1 とするように時間、長さ、質量、電荷、温度の単位を決めて、これらを基本単位とする単位系。

マックスウェル方程式、アインシュタイン方程式、シュレディンガー方程式などが簡潔になる。

ハートリー原子単位系： $a_0 = 4\pi\epsilon_0\hbar^2/m_e e^2, m_e, \hbar, e, E_h = \hbar^2/m_e a_0^2$  を 1 とするように長さ、質量、作用、電荷、エネルギーの単位を決める。これらのうちの4つが基本単位となる。時間の単位は  $\hbar/E_h$  となる。

$$1 \text{ a.u. (Hartree)} = 27.2114 \text{ eV} = 4.359 \times 10^{-18} \text{ J}$$

$$1 \text{ a.u. (Bohr radius)} = 0.5291772 \text{ Angstrom} = 0.5291772 \times 10^{-10} \text{ m}$$

リュードベリ原子単位系： $a_0 = 4\pi\epsilon_0\hbar^2/m_e e^2, m_e, \hbar, e, R_y = \hbar^2/2m_e a_0^2$  を 1 とするように長さ、質量、作用、電荷、エネルギーの単位を決める。これらのうちの4つが基本単位となる。時間の単位は  $\hbar/R_y$  となる。

$$1 R_y = 13.6057 \text{ eV} = 2.179 \times 10^{-18} \text{ J}$$

cgs単位系が使われる場合がある： 古い教科書、古い文献、現在でも磁性分野で活躍

cgs電磁単位系：

アンペールの法則から電荷Qの単位 (emu) を決める。

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} \longrightarrow d\vec{B} = \frac{Id\vec{l} \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} \longrightarrow \nabla \times \vec{B} = 4\pi \vec{j}$$

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \longrightarrow \vec{B} = \vec{H} + 4\pi \vec{M}$$

磁束密度Bの単位はG、磁界Hの単位はOe、磁化Mの単位は emu/cm<sup>3</sup>

cgs静電単位系：

クーロンの法則から電荷Qの単位 (esu) を決める。

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \longrightarrow F = \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \longrightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 4\pi\rho$$

cgsガウス単位系：上記の2つを併用する。連続の方程式などに c が入る。

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \longrightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \longrightarrow \nabla \times \vec{B} = 4\pi \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$