

「新 SI 単位と電磁気学」の正誤表

ver.2.1, 2020 年 2 月 17 日

初版第 1 刷, 2018 年 6 月

- 23 ページ, 8 行目 :
(誤) 「物象の状態の量」について定めている. その数は「SI 単位を基準にするもの」72 とその他 17 である. 「使用義務」は前者の 72 の量について重く定められている
→ (正) 「物象の状態の量」について定めている. それらは「SI 単位を基準にするもの」72 と, その他 17 に分けられ, 「使用義務」は前者の量について重く定められている.
- 26 ページ, 5 行目 :
(誤) 計量法には法定計量単位としてつぎの 17 量が含まれている.
→ (正) 計量法には次の物象の状態の量 17 が含まれている.
- { ページ, 2 : 6 } { 10 行目 }
(誤) SI 単位がある量の法定計量単位 72 である.
→ (正) SI 単位がある 65 量の法定計量単位である.
- 43 ページ, 10 行目 :
(誤) 新 SI で電流を基準現象から排除したことで必要になる代替として登場するのが
→ (正) 新 SI において, 力に依らない電流の基準として新たに登場するのが
- 43 ページ, 11 行目 :
(誤) これは単一電子トンネル効果による測定で, 素電荷の測定精度が大きく向上したことで可能となった. → (正) すでにジョゼフソン効果と量子ホール効果により, 力に依存しない電氣的標準が事実上達成されており, ワットバランス法を介して, 力や質量が電氣的に決定できることを踏まえ, K_J , R_K を定義値化, すなわちプランク定数と素電荷を定義値化することとなったのである. 今後は単一電子素子で電子を 1 つずつカウントすることで, 電流の直接的実現が可能となる.
- 46 ページ, 9 行目 :
(誤) 音響共鳴をマイクロ波で測り, → (正) 音響共鳴を測定し,
(注: 球の大きさはマイクロ波共鳴を用いて測定される.)
- 46 ページ, 22 行目 :
(誤) ジョセフソン結合 → (正) ジョセフソン接合
- 47 ページ, 16 行目 :
(誤) 20 年に 1 度改定される. → (正) 1968 年国際実用温度目盛 (IPTS-68) に次ぐものである.
- 55 ページ, 6 行目 :
(誤) 視覚での光度と仕事率 (ワット W) を結ぶ発光効率 (luminous efficacy) K_{cd}
→ (正) 視覚での光束 (単位はルーメン lm) と放射束 (単位はワット W) を結ぶ視感効果度 (luminous efficacy) K_{cd}
(注: 放射束は光源のパワーに関係づけることができるが, その場合には K_{cd} は光源の発光効率と見なすことができる.)
- 55 ページ, 12 行目 :
(誤) 光度が cd, 単位面積当たりの照度が lx → (正) 光束が cd, 単位面積当たりの光束が lx
- 141 ページ, 5 行目 :
(誤) 2009 年には秒の 2 次標準 → (正) 2006 年には秒の 2 次表現



2018 年版 CODATA に基づく追加修正, 2019 年 12 月

本書の出版後に, 新 SI を反映した物理定数の推奨値 (2018 CODATA) が発表されたことを承けて, 以下の修正を施す. いくつかの表の差し替えが必要であるが, 最後にまとめて掲載する.

- 20 ページ, 表 2.6 :
(誤) $1 \text{ eV} = 1.6021766208(98) \times 10^{-19} \text{ J} \rightarrow$ (正) $1 \text{ eV} = 1.602176634 \times 10^{-19} \text{ J}$
- 20 ページ, 表 2.6 :
(誤) $1 \text{ u} = 1.660539040(20) \times 10^{-27} \text{ kg} \rightarrow$ (正) $1 \text{ u} = 1.66053906660(50) \times 10^{-27} \text{ kg}$
- 77 ページ, 下から 6 行目, 式 (4.30) :
(誤) $Z_0 = 376.730313538(87) \Omega \rightarrow$ (正) $Z_0 = 376.730313668(57) \Omega$
- 78 ページ, 5 行目, 式 (4.33) :
(誤) $\alpha^{-1} = 137.035999139(31) \rightarrow$ (正) $\alpha^{-1} = 137.035999084(21)$
- 90 ページ, 5 行目, 式 (4.65) :
(誤) $\mu_0 = 12.5663706169(29) \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2} \rightarrow$ (正) $\mu_0 = 12.5663706212(19) \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$
- 184 ページ, 表 8.2 : 差し替え
- 184 ページ, 4 行目 :
(誤) u_r の数値は CODATA の正式なものではなく, 文献 [2] の推計によるものである.
 \rightarrow (正) 新, 旧 u_r の数値はそれぞれ 2014 年, 2018 年の CODATA によるものである.
- 185 ページ, 表 8.3 : 差し替え
- 185 ページ, 下から 3 行目 :
(誤) 2014 年版である. \rightarrow (正) 2018 年版である.
- 186 ページ, 表 8.4 : 差し替え
- 186 ページ, 3 行目 :
(誤) 2018 年の新 SI に応じて, 不確かさの調整をして次回の改訂が行われる. ここに載せてある不確かさの数値は旧 SI のものである. 新 SI に変わることによって, 「旧」と「新」でこの欄がどう変わるかを対比したのが先ほどの表 8.2 である.
 \rightarrow (正) 前回 (2014 年) 以後の測定データを反映し, さらに新 SI に応じて不確かさの調整をした推奨値 (2018 CODATA) が, 2019 年 5 月に発表された.
- 187 ページ, 表 8.5 : 差し替え
- 187 ページ, 下から 4 行目 :
(誤) $(1/12)m(^{12}\text{C}) = 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}/N_A \rightarrow$ (正) $(1/12)m(^{12}\text{C}) \approx 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}/N_A$
- 188 ページ, 表 8.6 : 差し替え
- 189 ページ, 参考文献 [2] : 以下のように変更
[2] E. Tiesinga, P.J. Mohr, D.B. Newell, and B.N. Taylor: The 2018 CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants (Web Version 8.0, 2019). J. Baker, M. Douma, and S. Kotochigova によって開発されたデータベースが NIST (National Institute of Standards and Technology) の WEB サイトで公開されている: <http://physics.nist.gov/constants>

表 8.2 主要物理定数の新, 旧 SI での相対不確かさ (2014, 2018 CODATA)

| 物理定数 | 記号 | 旧 SI $u_r \times 10^9$ | 新 SI $u_r \times 10^9$ |
|------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|
| キログラム原器 | $m(K)$ | 0 | 44 |
| 真空の透磁率 | μ_0 | 0 | 0.15 |
| 真空の誘電率 | ϵ_0 | 0 | 0.15 |
| 真空のインピーダンス | Z_0 | 0 | 0.15 |
| 水の3重点 | T_{TPW} | 0 | 570 |
| 炭素 12 のモル質量 | $M(^{12}C)$ | 0 | 0.30 |
| プランク定数 | h | 12 | 0 |
| 素電荷 | e | 61 | 0 |
| ボルツマン定数 | k | 570 | 0 |
| アボガドロ定数 | N_A | 12 | 0 |
| モル気体定数 | R | 570 | 0 |
| ファラデー定数 | F | 6.2 | 0 |
| ステファン・ボルツマン定数 | σ | 2300 | 0 |
| 電子質量 | m_e | 12 | 0.30 |
| 原子質量 | m_u | 12 | 0.30 |
| 炭素 12 の質量 | $m(^{12}C)$ | 12 | 0.30 |
| ジョゼフソン定数 | K_J | 6.1 | 0 |
| フォン・クリツィング定数 | R_K | 0.23 | 0 |
| 微細構造定数 | α | 0.23 | 0.15 |
| $E = mc^2$ | $J \leftrightarrow kg$ | 0 | 0 |
| $E = hc/\lambda$ | $J \leftrightarrow m^{-1}$ | 12 | 0 |
| $E = h\nu$ | $J \leftrightarrow Hz$ | 12 | 0 |
| $E = kT$ | $J \leftrightarrow K$ | 570 | 0 |
| $E = eV$ | $J \leftrightarrow eV$ | 61 | 0 |

表 8.3 よく使われる物理基本定数 (2018 CODATA 推奨値)

| 物理量 | 記号 | 数値 | 単位 | 相対的不 確かさ u_r |
|--|---------------|--|----------------------|-----------------------|
| 真空中の光速 | c, c_0 | 299 792 458 | $m s^{-1}$ | 定義値 |
| 真空の透磁率 | μ_0 | $1.256 637 062 12(19) \times 10^{-6}$ | $N A^{-2}$ | 1.5×10^{-10} |
| $\mu_0/(4\pi \times 10^{-7})$ | | 1.000 000 000 55(15) | $N A^{-2}$ | 1.5×10^{-10} |
| 真空の誘電率 $1/(\mu_0 c^2)$ | ϵ_0 | $8.854 187 8128(13) \times 10^{-12}$ | $F m^{-1}$ | 1.5×10^{-10} |
| 真空のインピーダンス | Z_0 | 376.730 313 668(57) | Ω | 1.5×10^{-9} |
| 重力定数 | G | $6.674 30(15) \times 10^{-11}$ | $m^3 kg^{-1} s^{-2}$ | 2.2×10^{-5} |
| プランク定数 | h | $6.626 070 15 \times 10^{-34}$ | J s | 定義値 |
| $h/(2\pi)$ | \hbar | $1.054 571 817 \dots \times 10^{-34}$ | J s | 0 |
| 素電荷 | e | $1.602 176 634 \times 10^{-19}$ | C | 定義値 |
| 磁束量子 $h/(2e)$ | Φ_0 | $2.067 833 848 \dots \times 10^{-15}$ | Wb | 0 |
| 量子コンダクタンス $2e^2/h$ | G_0 | $7.748 091 729 \dots \times 10^{-5}$ | S | 0 |
| 電子質量 | m_e | $9.109 383 7015(28) \times 10^{-31}$ | kg | 3.0×10^{-10} |
| 陽子質量 | m_p | $1.672 621 923 69(51) \times 10^{-27}$ | kg | 3.1×10^{-10} |
| 陽子と電子の質量比 | m_p/m_e | 1836.152 673 43(11) | | 6.0×10^{-11} |
| 微細構造定数 $e^2/(4\pi\epsilon_0\hbar c)$ | α | $7.297 352 5693(11) \times 10^{-3}$ | | 1.5×10^{-10} |
| | α^{-1} | 137.035 999 084(21) | | 1.5×10^{-10} |
| リドベルク定数 $\alpha^2 m_e c/(2h)$ | R_∞ | 10 973 731.568 160(21) | m^{-1} | 1.9×10^{-12} |
| アボガドロ定数 | N_A | $6.022 140 76 \times 10^{23}$ | mol^{-1} | 定義値 |
| ボルツマン定数 | k, k_B | $1.380 649 \times 10^{-23}$ | JK^{-1} | 定義値 |
| ファラデー定数 $N_A e$ | F | 96 485.332 12... | $C mol^{-1}$ | 0 |
| モル気体定数 $N_A k$ | R | 8.314 462 618... | $J mol^{-1} K^{-1}$ | 0 |
| ステファン・ボルツマン定数 $\pi^2 k^4/(60\hbar^3 c^2)$ | σ | $5.670 374 419 \dots \times 10^{-8}$ | $W m^{-2} K^{-4}$ | 0 |

SI で併用が認められている非 SI 単位

| | | | | |
|-----------------------|----|--|----|-----------------------|
| 電子ボルト (e/C)J | eV | $1.602 176 634 \times 10^{-19}$ | J | 0 |
| 原子質量単位 $m(^{12}C)/12$ | u | $1.660 539 066 60(50) \times 10^{-27}$ | kg | 3.0×10^{-10} |

表 8.4 自然単位 (natural units) (2018 CODATA から)

| 物理量 | 記号 | 数値 | 単位 | 相対的不 確かさ u_r |
|--------------------|-------------------|--|----------------------|-----------------------|
| 速度：真空中の光速 | c, c_0 | 299 792 458 | m s^{-1} | 定義値 |
| 作用： $h/2\pi$ | \hbar | $1.054 571 817 \dots \times 10^{-34}$ | J s | 0 |
| 作用 (単位 eV s) | | $6.582 119 569 \dots \times 10^{-16}$ | eV s | 0 |
| 作用 (単位 MeV fm) | $\hbar c$ | 197.326 9804... | MeV fm | 0 |
| 質量：電子の質量 | m_e | $9.109 383 7015(28) \times 10^{-31}$ | kg | 3.0×10^{-10} |
| エネルギー | $m_e c^2$ | $8.187 105 7769(25) \times 10^{-14}$ | J | 3.0×10^{-10} |
| エネルギー (単位 MeV) | | 0.510 998 950 00(15) | MeV | 3.0×10^{-10} |
| 運動量 | $m_e c$ | $2.730 924 530 75(82) \times 10^{-22}$ | kg m s^{-1} | 3.0×10^{-10} |
| 運動量 (単位 MeV/c) | | 0.510 998 950 00(15) | MeV/c | 3.0×10^{-10} |
| 長さ $\hbar/(m_e c)$ | λ_C | $3.861 592 6796 \times 10^{-13}$ | m | 3.0×10^{-10} |
| 時間 | $\hbar/(m_e c^2)$ | $1.288 088 668 19(39) \times 10^{-21}$ | s | 3.0×10^{-10} |

表 8.5 原子単位 (atomic units) (2018 CODATA から)

| 物理量 | 記号 | 数値 | 単位 | 相対的不 確かさ u_r |
|---|-------------------|--|---------------------------------------|-----------------------|
| 電荷：素電荷 | e | $1.602 176 634 \times 10^{-19}$ | C | 定義値 |
| 質量：電子の質量 | m_e | $9.109 383 7015(28) \times 10^{-31}$ | kg | 3.0×10^{-10} |
| 作用： $h/2\pi$ | \hbar | $1.054 571 817 \dots \times 10^{-34}$ | J s | 0 |
| 長さ：ボーア半径 $\alpha/(4\pi R_\infty)$ | a_0 | $5.291 772 109 03(80) \times 10^{-11}$ | m | 1.5×10^{-10} |
| エネルギー：ハートリー・ エネルギー $e^2/(4\pi\epsilon_0 a_0)$ $= 2R_\infty hc = \alpha^2 m_e c^2$ | E_h | $4.359 744 722 2071(85) \times 10^{-18}$ | J | 1.9×10^{-12} |
| 時間 | \hbar/E_h | $2.418 884 326 5857(47) \times 10^{-17}$ | s | 1.9×10^{-12} |
| 力 | E_h/a_0 | $8.238 723 4983(12) \times 10^{-8}$ | N | 1.5×10^{-10} |
| 速度 | $a_0 E_h/\hbar$ | $2.187 691 263 64(33) \times 10^6$ | m s^{-1} | 1.5×10^{-10} |
| 運動量 | \hbar/a_0 | $1.992 851 914 10(30) \times 10^{-24}$ | kg m s^{-1} | 1.5×10^{-10} |
| 電流 | $e E_h/\hbar$ | $6.623 618 237 510(13) \times 10^{-3}$ | A | 1.9×10^{-12} |
| 電荷密度 | e/a_0^3 | $1.081 202 384 57(49) \times 10^{12}$ | C m^{-3} | 4.5×10^{-10} |
| 電位 | E_h/e | 27.211 386 245 988(53) | V | 1.9×10^{-12} |
| 電場 | $E_h/(ea_0)$ | $5.142 206 747 63(78) \times 10^{11}$ | V m^{-1} | 1.5×10^{-10} |
| 電場勾配 | $E_h/(ea_0^2)$ | $9.717 362 4292(29) \times 10^{21}$ | V m^{-2} | 3.0×10^{-10} |
| 電気双極子モーメント | ea_0 | $8.478 353 6255(13) \times 10^{-30}$ | C m | 1.5×10^{-10} |
| 電気四重極モーメント | ea_0^2 | $4.486 551 5246(14) \times 10^{-40}$ | C m^2 | 3.0×10^{-10} |
| 分極率 | $e^2 a_0^2/E_h$ | $1.648 777 274 36(50) \times 10^{-41}$ | $\text{C}^2 \text{m}^2 \text{J}^{-1}$ | 3.0×10^{-10} |
| 1次超分極率 | $e^3 a_0^3/E_h^2$ | $3.206 361 3061(15) \times 10^{-53}$ | $\text{C}^3 \text{m}^3 \text{J}^{-2}$ | 4.5×10^{-10} |
| 2次超分極率 | $e^4 a_0^4/E_h^3$ | $6.235 379 9905(38) \times 10^{-65}$ | $\text{C}^4 \text{m}^4 \text{J}^{-3}$ | 6.0×10^{-10} |
| 磁束密度 | $\hbar/(ea_0^2)$ | $2.350 517 567 58(71) \times 10^5$ | T | 3.0×10^{-10} |
| 磁気双極子モーメント ($2\mu_B$) | $\hbar e/m_e$ | $1.854 802 015 66(56) \times 10^{-23}$ | J T^{-1} | 3.0×10^{-10} |
| 磁化率 | $e^2 a_0^2/m_e$ | $7.891 036 6008(48) \times 10^{-29}$ | J T^{-2} | 6.0×10^{-10} |
| 誘電率 ($4\pi\epsilon_0$) | $e^2/(a_0 E_h)$ | $1.112 650 055 45(17) \times 10^{-10}$ | F m^{-1} | 1.5×10^{-10} |

表 8.6 エネルギーと等価な 8 つ量のあいだの換算表 (1) (2018 CODATA から)

| | 各々の単位で対応する数値 | | | |
|-------------------|---|---|--|--|
| | J | kg | m ⁻¹ | Hz |
| 1 J | (1 J) = 1 J | (1 J)/c ² = 1.112 650 056... × 10 ⁻¹⁷ kg | (1 J)/hc = 5.034 116 567... × 10 ²⁴ m ⁻¹ | (1 J)/h = 1.509 190 179... × 10 ³³ Hz |
| 1 kg | (1 kg)c ² = 8.987 551 787... × 10 ¹⁶ J | (1 kg) = 1 kg | (1 kg)c/h 4.524 438 335... × 10 ⁴¹ m ⁻¹ | (1 kg)c ² /h = 1.356 392 489... × 10 ⁵⁰ Hz |
| 1 m ⁻¹ | (1 m ⁻¹)hc = 1.986 445 857... × 10 ⁻²⁵ J | (1 m ⁻¹)h/c = 2.210 219 094... × 10 ⁻⁴² kg | (1 m ⁻¹) = 1 m ⁻¹ | (1 m ⁻¹)c = 299 792 458 Hz |
| 1 Hz | (1 Hz)h = 6.626 070 15 × 10 ⁻³⁴ J | (1 Hz)h/c ² = 7.372 497 323... × 10 ⁻⁵¹ kg | (1 Hz)/c = 3.335 640 951... × 10 ⁻⁹ m ⁻¹ | (1 Hz) = 1 Hz |
| 1 K | (1 K)k = 1.380 649 × 10 ⁻²³ J | (1 K)k/c ² = 1.536 179 187... × 10 ⁻⁴⁰ kg | (1 K)k/(hc) = 69.503 480 04... m ⁻¹ | (1 K)k/h = 2.083 661 912... × 10 ¹⁰ Hz |
| 1 eV | (1 eV) = 1.602 176 634... × 10 ⁻¹⁹ J | (1 eV)/c ² = 1.782 661 921... × 10 ⁻³⁶ kg | (1 eV)/(hc) = 8.065 543 937... × 10 ⁵ m ⁻¹ | (1 eV)/h = 2.417 989 242... × 10 ¹⁴ Hz |
| 1 u | (1 u)c ² = 1.492 418 085 60(45) × 10 ⁻¹⁰ J | (1 u) = 1.660 539 066 60(50) × 10 ⁻²⁷ kg | (1 u)c/h = 7.513 006 6104(23) × 10 ¹⁴ m ⁻¹ | (1 u)c ² /h = 2.252 342 718 71(68) × 10 ²³ Hz |
| 1 E _h | (1 E _h) = 4.359 744 722 2071(85) × 10 ⁻¹⁸ J | (1 E _h)/c ² = 4.850 870 209 5432(94) × 10 ⁻³⁵ kg | (1 E _h)/(hc) = 2.194 746 313 6320(43) × 10 ⁷ m ⁻¹ | (1 E _h)/h = 6.579 683 920 502(13) × 10 ¹⁵ Hz |

エネルギーと等価な 8 つ量のあいだの換算表 (2)

| | 各々の単位で対応する数値 | | | |
|-------------------|---|--|---|--|
| | K | eV | u | E _h |
| 1 J | (1 J)/k = 7.242 970 516... × 10 ²² K | (1 J) = 6.241 509 074... × 10 ¹⁸ eV | (1 J)/c ² = 6.700 535 2565(20) × 10 ⁹ u | (1 J) = 2.293 712 278 3963(45) × 10 ¹⁷ E _h |
| 1 kg | (1 kg)c ² /k = 6.509 657 260... × 10 ³⁹ K | (1 kg)c ² = 5.609 588 603... × 10 ³⁵ eV | (1 kg) 6.022 140 7621(18) × 10 ²⁶ u | (1 kg)c ² = 2.061 485 788 7409(40) × 10 ³⁴ E _h |
| 1 m ⁻¹ | (1 m ⁻¹)hc/k = 1.438 776 877... × 10 ⁻² K | (1 m ⁻¹)hc = 1.239 841 984... × 10 ⁻⁶ eV | (1 m ⁻¹)h/c = 1.331 025 050 10(40) × 10 ⁻¹⁵ u | (1 m ⁻¹)hc = 4.556 335 252 9120(88) × 10 ⁻⁸ E _h |
| 1 Hz | (1 Hz)h/k = 4.799 243 073... × 10 ⁻¹¹ K | (1 Hz)h = 4.135 667 696... × 10 ⁻¹⁵ eV | (1 Hz)h/c ² = 4.439 821 6652(13) × 10 ⁻²⁴ u | (1 Hz)h = 1.519 829 846 0570(29) × 10 ⁻¹⁶ E _h |
| 1 K | (1 K) = 1 K | (1 K)k = 8.617 333 262... × 10 ⁻⁵ eV | (1 K)k/c ² = 9.251 087 3014(28) × 10 ⁻¹⁴ u | (1 K)k = 3.166 811 563 4556(61) × 10 ⁻⁶ E _h |
| 1 eV | (1 eV)/k = 1.160 451 812... × 10 ⁴ K | (1 eV) = 1 eV | (1 eV)/c ² = 1.073 544 102 33(32) × 10 ⁻⁹ u | (1 eV) = 3.674 932 217 5655(71) × 10 ⁻² E _h |
| 1 u | (1 u)c ² /k = 1.080 954 019 16(33) × 10 ¹³ K | (1 u)c ² = 9.314 941 0242(28) × 10 ⁸ eV | (1 u) = 1 u | (1 u)c ² = 3.423 177 6874(10) × 10 ⁷ E _h |
| 1 E _h | (1 E _h)/k = 3.157 750 248 0407(61) × 10 ⁵ K | (1 E _h) = 27.211 386 245 988(53) eV | (1 E _h)/c ² = 2.921 262 322 05(88) × 10 ⁻⁸ u | (1 E _h) = 1 E _h |

電子書籍, 2020年2月

- 33 ページ, 図 3.1(b) : kg から A への矢印を削除
- 189 ページ, 参考文献 [4] :
(誤) <https://www.nmij.jp/library> → (正) <https://unit.aist.go.jp/nmij/library/#si>