

改定国際単位系における電気標準

金子 晋久

産業技術総合研究所計量標準総合センター物理計測標準研究部門首席研究員

1 まえがき

国際単位系 (SI) は、量子力学に基づき、かつ器物に依存しない形へと改定され 2019 年 5 月 20 日から適用された。電流の単位であるアンペアは、改定前の SI においては 2 本の平行電流間に働く力の大きさにより定義されていたが、改定後の SI においては、電気素量と周波数により定義されている。また、この電気素量に加えてプランク定数が定義値となったことにより、これまで国際的に合意された「協定値」をもとに電気標準として利用されてきたジョセフソン効果電圧標準、量子ホール効果抵抗標準も完全に SI に準拠することとなった。これらについて解説し、さらにそのメリットと改定の具体的な手続きについて述べる。

2. SI 基本単位の電流と関連する基礎物理定数

国際単位系 (SI) は 2018 年 11 月に国際度量衡総会において改定が決議され、その改定 SI は 2019 年 5 月 20 日から適用された。改定 SI においても電流の単位「アンペア」は引き続き、7 つの基本単位の一つである。ここで改定 SI では単位の定義が出发点となるのではなく、真空中の光の速さなどに加え新たに定義されるプランク定数、電気素量、アボガドロ定数、ボルツマン定数が基本となり、それらの基礎物理定数に基づき単位が定義される。

まず、改定前のアンペアについて説明する。その定義は、

アンペアは、真空中に 1 メートルの間隔で平行に配置された無限に小さい円形断面積を有する無限に長い二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 メートルにつき 2×10^{-7} ニュートンの力を及ぼし合う一定の電流である。

と表現されている。この定義は、1948 年の第 9 回国際度量衡総会 (CGPM) で採択され、その後、1954 年の第 10 回 CGPM で電流の基本単位として正式に承認されている。この定義を簡単に示したのが、図 1 である。

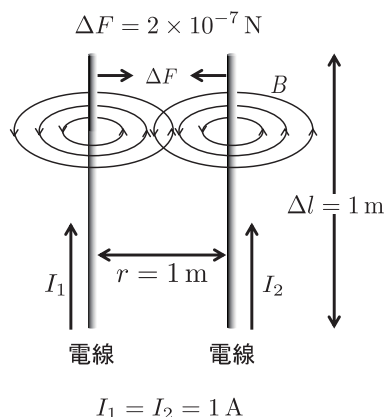


図 1 理想化された状態での 2 つの電流線の単位長さあたりに働く力を図示したもの: Δl は単位長さ、 ΔF はその単位長さあたりの線間に働く力、電流 I_1, I_2 は共に 1 A、 B は電流によって発生する円状磁界。

図 1 で示される、同じ (反対) 方向に電流が流れている 2 本の導体つまり電線間に働く引力 (斥力) はアンペールの法則で表現でき、実際に数式で記述すると下式のようなになる。

$$\Delta F = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r} \Delta l$$
$$2 \times 10^{-7} = \frac{\mu_0 \times 1 \times 1}{2\pi \times 1} \times 1$$

この式から、直接

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2 \quad (1)$$

が導かれる。つまりアンペアの定義は実体として磁気定数 (真空の透磁率) μ_0 を式 (1) で定義していることと同義である。この表現は採択当時の修辭・表記上他の定義との統一性も考慮すべきとの考えからできたものである。仮に改定 SI でこの定義を使うとすると、「磁気定数が式 (1) となるように、アンペアを定める」という表現になるであろう。しかし、改定 SI ではこの定義は破棄された。

この改定前のアンペアの定義の字義通りに実験を行い、十分小さな不確かさでアンペアを実現することは困難に思われるが、実際このアンペアの定義を直接利用して電流を実現する方法は電流天びんと呼ばれる装置を用いることにより可能で、1930 年代から 1940 年代初めまでにアメリカ、ドイツ、フランス、

日本で盛んに研究が行われた^{1),2)}。

磁気定数 μ_0 、電気定数（真空の誘電率） ϵ_0 、および真空中の光の速さ c の間には

$$\frac{1}{c} = \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \quad (2)$$

の厳密な関係式がある。改定前の SI では μ_0 と c は定義値であるので、この厳密式を通じ ϵ_0 も含めこの三つの基礎物理定数は全て不確かさ零として扱われている。ただし、 $c = 299\,792\,458$ m/s は有限の桁数、 μ_0 は式 (1) で定義されているが、それらから式 (2) を通じて導出される電気定数は、

$$\epsilon_0 = 8.854\,187\,817 \cdots \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

となり、形式的には無限の桁数を持つことになる。

改定 SI では磁気定数 μ_0 （および電気定数 ϵ_0 ）は定義量でなくなり不確かさを持つ被測定量である。その不確かさは、微細構造定数 α 、真空の特性インピーダンス Z_0 、真空の特性アドミッタンス Y_0 と同じ（改定時点で拡張相対不確かさ 2.3×10^{-10} ）である。このことは、上式 (2) に加え厳密式、

$$\begin{aligned} Z_0 &= \mu_0 c = \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{1/2} \\ Y_0 &= \frac{1}{\mu_0 c} = \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} = \frac{1}{Z_0} \\ \mu_0 &= \alpha \frac{2h}{ce^2} \end{aligned}$$

から即導くことができる。ここで h はプランク定数、 e は電気素量、つまり電子の電荷の符号を変えたものである。一方、 c は改定 SI においても長さ、メートルの基準でありその値は定義値として維持される。

3. 改定 SI における電気標準

電流天びんの研究が一段落した後、いくつか他の絶対測定の手段が開発されたが、1962 年のジョセフソン効果の理論的導出³⁾とその後の検証実験、1980 年の量子ホール効果の発見⁴⁾により、電気関係量の具体的な実現にはこの二つの量子効果を用いたジョセフソン効果電圧標準と量子ホール効果抵抗標準を用いることがほとんどとなっている。アンペアの「実現」においては、これら「ボルト」と「オーム」の 2 つを用いて逆に「組み立て量」として「アンペア」を導く。つまり、アンペアの改定前の定義は実態としては電気標準には利用されていなかった。多くの場合、これら 2 つの量子効果を利用し、必要に応じて電流を実現する方が不確かさが小さいという現実

の問題によるからである。すなわち、アンペアは SI 基本単位にも関わらず、その実現においては直接的な一次表現は行われてきていない。一方、後で述べるように上記二つの量子効果による電圧、抵抗標準は極めて安定であり、比較的容易に実現できる。

しかし、改定前のアンペアやその他の SI の定義（国際キログラム原器によるキログラムの実現など力学量の定義など）からプランク定数と電気素量を測定し、それらに基づきジョセフソン効果電圧標準と量子ホール効果抵抗標準を実現すると、その不確かさはそれらの量子効果の普遍性と比較して大幅に大きく、産業界の要求を満たさなかった。具体的には改定前の SI において他の SI 量にトレーサブルにする場合、ジョセフソン効果を利用した電圧測定では 4×10^{-7} ($k=1$ 、ここで k は包含係数)、量子ホール効果を用いた抵抗測定では 1×10^{-7} ($k=1$) の不確かさを付加的に付与する規則^{6),8)}になっていた。電気標準では、他の物理量の測定に起因するこのような不確かさの影響を避けるため、厳密な意味では他の SI 単位から離れ、それら二つの量子効果を記述する特徴的基礎物理定数であるジョセフソン定数とフォン・クリツィング定数の不確かさを零として定めることとなった。それらの値は「協定値」⁹⁾と呼ばれ、その協定値をもとに 1990 年より 2019 年改定時まで標準の実現・供給がなされていた。このことは 1987 年の第 18 回 CGPM にて決議されメートル条約加盟国間で合意されたものである。つまり、電気標準は純粋な意味では SI とのトレーサビリティを失ったことになっていた。このことは、実用的には電気標準、電気計測業界に大きな利益をもたらした反面、改定前のアンペアの定義には直接的には従わない方法であることは自明であった。ジョセフソン定数とフォン・クリツィング定数の協定値は、

$$\begin{aligned} K_{J-90} &\equiv 483597.9 \times 10^9 \text{ HzV}^{-1} \sim \frac{2e}{h} \equiv K_J \\ R_{K-90} &\equiv 25\,812.807 \, \Omega \sim \frac{h}{e^2} \equiv R_K \end{aligned} \quad (3)$$

であり、この値は 1989 年当時、最も確からしくかつ近い将来大きな変更をする必要がないように慎重に決定されていた。この式において「 \sim 」の記号は、数値的には近いがプランク定数 h と電気素量 e への直接的なトレーサビリティを喪失していることを意味する。逆にいうと、科学・測定技術の発展で h と e の値がより小さい不確かさで決定できても、改定前の規則ではその恩恵を享受できる論理的構造を取っていなかった。

改定 SI では、ジョセフソン効果、量子ホール効果を用いた電圧標準と量子ホール効果抵抗標準と電気素量が定義値となる

ため、それら量子効果を用いた標準は厳密な SI トレーサビリティを取り戻すことになった。つまり、電圧、抵抗標準は SI の改定後も改定前と同じ様にジョセフソン効果、量子ホール効果をもとに実現できる。そして改定後は完全な SI トレーサビリティを持つとともに、これらをもとにオームの法則を通じて SI トレーサブルな電流標準を作ることも自然に可能である。

さらに改定 SI では、単位時間に流れる電子の数でもアンペアは実現可能である。改定前の SI では被測定量であった電気素量 e が定義値となるためである。つまり別に定まる周波数標準と組み合わせ一秒間に f_{SET} 個の電子を移送、つまり f_{SET} (1/s) の周波数で移送することで、

$$I = e \cdot f_{\text{SET}} \quad (\text{C/s}) \quad (4)$$

の電流が得られる。これはまさに改定されるアンペアの定義、

アンペア（記号は A）は、電流の SI 単位である。これは、単位 C（As に等しい）による表現において、電気素量 e を正確に $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ と定めることによって設定される。ここで、秒は $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ により定義されている。

と同じ意味を持ち、そのまま実現方法の一つとなっている。ここで、電流の単位は $\text{C/s} = \text{A}$ となる。また、 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ は時間・周波数標準に利用されているセシウム 133 原子の基底状態の超微細準位の周期であり、正確に $9\,192\,631\,770$ Hz である。

これ以外にもアンペアの実現方法が提示されており、まとめると、

- オームの法則、つまり単位間の関係式 $A = V/\Omega$ としてジョセフソン効果と量子ホール効果による SI 組立単位であるボルト V、オーム Ω を用いて実現。
- 単一電子移送（single electron transport, SET）あるいは同様の素子と単位間の関係式 $A = C/s$ 、アンペアの定義において与えられる電気素量 e の値、そして SI 基本単位である秒 s を用いて実現。
- 関係式 $I = C \cdot \frac{dU}{dt}$ と $A = F \cdot V/s$ 、SI 組立単位であるボルト V とファラド F そして SI 基本単位の秒 s を用いて実現。

の三つである。この二つ目の実現方法つまり、電気素量 e と周波数 f を用いる方法は SI に忠実な手段として、特に微小電流を発生する手段として各国で盛

んに研究が行われている。しかし、発生できる電流はナノアンペア程度と比較的小さく今後の研究が待たれている。この研究はナノテクノロジーおよび量子ナノ構造、キュービット、量子コンピューティングなど物性物理の最先端の技術と親和性が高く周辺技術の発展とともに飛躍的な電流増大が期待されている。この課題については 5.3 節で取り扱いたい。

ここで、改定 SI におけるプランク定数と電気素量の値^{10),11)}を示しておく。

$$\begin{aligned} h &\equiv 6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s} \\ e &\equiv 1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C} \end{aligned} \quad (5)$$

これらは、2017 年の基礎物理定数 CODATA 特別調整値¹⁰⁾

$$\begin{aligned} h &= 6.626\,070\,150(69) \times 10^{-34} \text{ J s} [1.0 \times 10^{-8}] \\ e &= 1.602\,176\,6341(83) \times 10^{-19} \text{ C} [5.2 \times 10^{-9}] \end{aligned}$$

から決定されたものである（[括弧内]は相対不確かさ）。式 (5) から、改定 SI で利用されるジョセフソン定数、フォン・クリッツィング定数が計算される。

$$\begin{aligned} K_J &\equiv \frac{2e}{h} = 483\,597.848\,416\,984 \text{ GHz V}^{-1} \\ R_K &\equiv \frac{h}{e^2} = 25\,812.807\,459\,3045 \text{ } \Omega \end{aligned} \quad (6)$$

勿論、桁数はいくらかでも取ることは可能だが、多くの研究開発、標準での利用において、実用上問題のない桁数として 15 桁を取ることを原則とする。しかしそれ以上の桁数が必要であれば、 h および e の式 (5) の定義値を用いて桁数を追加することは自由である。

4. SI の改定による校正サービス、トレーサビリティへの影響

前節で、ジョセフソン定数とフォン・クリッツィング定数の協定値と改定 SI での値を述べた。その差が、改定 SI による電気標準への影響である。実際に式 (3) と式 (6) の値の差を取る。

$$\begin{aligned} \frac{K_J - K_{J-90}}{K_J} &= -106.7 \text{ ppb} \\ \frac{R_K - R_{K-90}}{R_K} &= +17.79 \text{ ppb} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで「ppb」は相対値 10^{-9} を表す。これらの相対変化量は、式 (6) あるいは式 (5) に応じてより多くの桁数を取ることも可能である。改定後の SI で使用されるジョセフソン定数は協定値の値と比較し、約 106.7 ppb (= 0.1067 ppm, ppm は 10^{-6}) 減り、フォン・クリッツィング定数は約 17.79 ppb (= 0.017 79 ppm) 増えることになる。

日本では国際的な合意と決議に則り、この改定 SI

への移行が2019年5月20日に実行された。また、対応する計量単位令を改正する政令も同日に合わせて施行された。この対応状況は各国により異なる。

つまり日本においては「厳密」にいうと、改定 SI の使用が開始される2019年5月20日以降の校正値 V_{SI} 、 Ω_{SI} はその直前の校正値 V_{90} 、 Ω_{90} から、

$$\begin{aligned} V_{SI} &= V_{90} + 106.7 \text{ ppb} \\ \Omega_{SI} &= \Omega_{90} + 17.79 \text{ ppb} \end{aligned} \quad (8)$$

の調整が必要である。ここで電圧に関して式(7)と符号が逆転しているのは、式(6)の単位や後に説明する式(9)から自明に分かるように、電圧は K_V の逆数で表現されるからである。整理すると改定後、電圧の SI トレーサブルな校正値は改定前の $K_{V,90}$ を基準にした校正値に比べ 106.7 ppb だけ大きくなり、抵抗の SI トレーサブルな校正値は $R_{K,90}$ を基準にした校正値に比べ 17.79 ppb だけ大きくなることを意味する。これは、単位の視点から見たときに「1 V」が 106.7 ppb だけ小さくなり、「1 Ω 」が 17.79 ppb だけ小さくなることによる。

例えば、量子化ホール抵抗とそれと同じ値を持つ抵抗器、つまり抵抗比「1」の校正を考えるとわかりやすい。抵抗ブリッジでその比を測定するとき、改定に関わらず物理現象は変化しないので、改定前後でその比「1」は変化しない。よって抵抗器の値は改定前は $R_{K,90}$ で改定後は R_K である。つまり、ある基礎物理定数にある相対変化量が与えられるとき、対応する物理量に換算して正の相対変化量を生じることになる場合、その分その物理量の校正値は増え、負の相対変化量があればその分校正値は小さくなる。

この調整について2019年5月20日以降の校正で取るべき対応¹²⁾を記載しておく。校正事業者で宣言している拡張相対不確かさ ($k=2$) を U 、式(7)、(8)で示す相対変化量を d とすると、下記の2つの分類に整理できる。

$2.5d \leq U$ 次回の参照標準器の校正まで、相対変化量の調整なしに校正作業を継続しても良い。電圧関連量では 2.5×10^{-7} 以上の不確かさ、抵抗関連量では 5×10^{-8} 以上の不確かさの場合がこの分類に対応する。ほとんどの校正事業者の対応、あるいは電力など多くの組み立て量の校正はこの分類に当てはまる。

$U < 2.5d$ 参照標準器の校正値をこの相対変化量の分だけ数値的に調整して校正を行うか、改定 SI に基づいた参照標準器の再校正を

行った上でそれを基準にした校正作業をおこなう。

産業界や様々な研究開発現場で利用されている標準電圧発生器や標準抵抗器は極めて高い安定度を有する。例えば、ツェナーダイオード電圧標準は 2 ppm/year 程度以下、標準抵抗器は 1 ppm/year 程度以下の経年安定度がある。これらの標準器を利用した測定・校正の不確かさは当然標準器自体の安定性からくる不確かさより大きくなるが、それでもほとんどの分野で十分な性能である。ここで、これらの安定度の値を式(7)、(8)で示す SI の改定による値の相対変化量と比べると、相対変化量はかなり小さいことがわかる。つまり、ほとんどの校正事業者や研究開発現場での校正は上記の $2.5d \leq U$ の分類に当てはまり、実態として SI の改定による校正値への影響はないと考えられる。

それらの相対変化量は当然量子効果を用いた一次標準の不確かさに比べると大きい。日本国家計量標準の場合、ジョセフソン効果電圧標準の不確かさは 10 V において 4.5 ppb ($k=2$)、量子ホール効果抵抗標準は 100 Ω の場合 56 ppb ($k=2$) (国際比較時などの場合に用いる実力値としてはこの値の数分の1か1桁程度小さい) である。つまり、国家計量標準機関を中心とした量子効果を用いて標準を維持している機関での校正作業は上記の $U < 2.5d$ の分類に当てはまり、これらの相対変化量を考慮して校正サービスなどへ対応する。

最後に、代表的な電気関係量について連動して発生する相対変化量を表1にまとめておく。

5. 量子電気標準の実現

前節で述べた様に、ジョセフソン効果と量子ホール効果が現在の電気標準の基準であり、改定 SI でも引き続き利用される。これらについて概説¹³⁾しておく。

5.1 ジョセフソン効果電圧標準

二つの超伝導体に挟まれた薄い絶縁層または金属層からなる接合素子をジョセフソン接合素子と呼ぶ。超伝導転移温度以下に冷却したジョセフソン接合素子に高周波を照射し、超伝導の電極間に適切なバイアス電流を流すと、超伝導電極間の電流-電圧特性上に楕状又は階段状の定電圧ステップが生じる。これをシャピロスステップと呼び、この効果を発見者の名前にちなみジョセフソン効果と呼ぶ³⁾。シャピロスステップの一例を図2に示す。これは超伝導とトンネル効果という二つの量子効果を同時利用した素子で

表1 SI改定における電気関係量の校正值の相対変化量

量	数式	相対変化量 (ppb)	$U_{\text{NMIJ}} / \text{AIST}$ ($k = 2$, ppb)	備考
電圧	$V_{\text{SI}} = V_{90} [1 + (106.7 \times 10^{-9})]$	+106.7	4.5 (10 V)	$V \propto 1/K_J$
抵抗	$\Omega_{\text{SI}} = \Omega_{90} [1 + (17.79 \times 10^{-9})]$	+17.79	56 (100 Ω)	$\Omega \propto R_K$
電流	$A_{\text{SI}} = A_{90} [1 + (88.87 \times 10^{-9})]$	+88.87		$A = V/\Omega \propto 1/(K_J R_K)$
電荷	$C_{\text{SI}} = C_{90} [1 + (88.87 \times 10^{-9})]$	+88.87		$C = A/\omega \propto 1/(K_J R_K)$
電力	$W_{\text{SI}} = W_{90} [1 + (195.5 \times 10^{-9})]$	+195.5		$W = AV = V^2/\Omega \propto 1/(K_J^2 R_K)$
キャパシタンス**	$F_{\text{SI}} = F_{90} [1 - (17.79 \times 10^{-9})]$	-17.79	72 (1000 pF)	$F = 1/(j\omega\Omega) \propto 1/R_K$
インダクタンス	$H_{\text{SI}} = H_{90} [1 + (17.79 \times 10^{-9})]$	+17.79		$H = \Omega/(j\omega) \propto R_K$

* 産総研の拡張相対不確かさ ** クロスキャパシタを用いる場合には改定で変化なし j 、 ω はそれぞれ虚数単位と角周波数

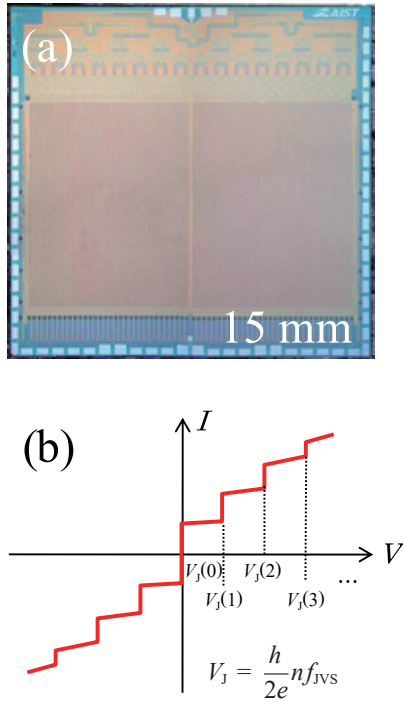


図2 集積したジョセフソン接合素子とシャピロステップ: (a) 524 288 個の NbN/TiN_x/NbN ジョセフソン接合を集積した素子。 $f_{\text{JVS}} = 16$ GHz で動作する。(b) シャピロステップの模式図。

ある。この定電圧は、照射する高周波の周波数を f_{JVS} とすると、以下の式で表される。

$$V_J = \frac{h}{2e} n f_{\text{JVS}} = \frac{1}{K_J} n f_{\text{JVS}} \quad (9)$$

ただし、 n は整数であり、シャピロステップの次数と素子上のジョセフソン接合数(集積度)の積である。つまり、照射する高周波を正確に定めれば、あとは基礎物理定数であるプランク定数と電気素量(組み合わせるとジョセフソン定数)のみにより決まる普遍的電圧を得ることができる。ここでジョセフソン定数 $K_J \equiv 2elh$ は、1990 年から改定前までは3節の式(3)の協定値が使われ、改定後は式(6)の定義値が利用されている。ちなみに周波数の不確かさは極めて小さ

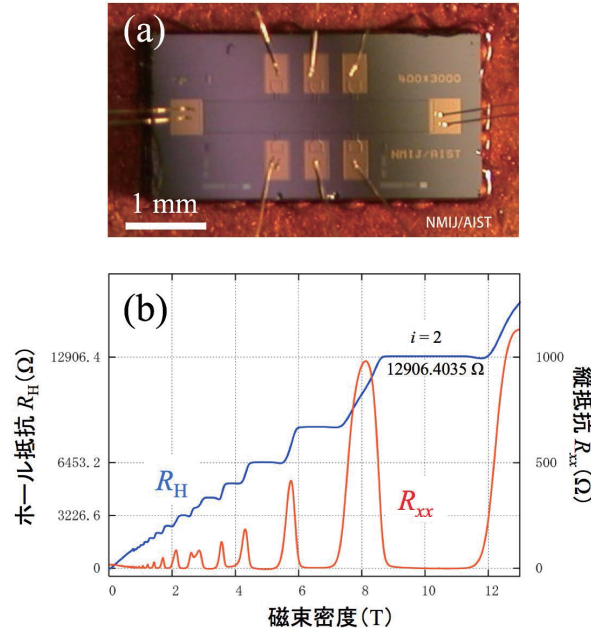


図3 量子ホール素子と量子ホール効果の様子: (a) 量子ホール素子。(b) 量子ホール効果。左側の軸がホール抵抗 R_H 、右側の軸が対応する縦抵抗 R_{xx} 。量子ホール状態を示すとき、縦抵抗は非散逸状態(抵抗ゼロ)となる。

いため、実際の標準供給や国際比較においては無視できるレベルである。このジョセフソン効果の普遍性は極めて高い精度で、ある場合には 10^{-19} のオーダーまで確認されている¹⁴⁾。

5.2 量子ホール効果抵抗標準

量子ホール効果は、磁場中の2次元電子系のホール効果が量子化される現象である。主には GaAs/AlGaAs ヘテロ構造基板や MOSFET の界面に形成される高い移動度を有する2次元電子系が用いられる。このような2次元電子系を1 K程度の低温に冷却し、磁場を印加すると、磁場に対するホール抵抗(ホール電圧を素子に流す電流で割った量をホール抵抗と呼ぶ)は、階段状に量子化される。この様子を図3に示す。ちなみに温度が高くなると、量子効果は喪失しホール抵抗は通常の3次元系と同じく磁場に対

して線形に増加する。この量子化ホール抵抗 R_H は下式で表される。

$$R_H = \frac{h}{ie^2} = \frac{R_K}{i} \quad (10)$$

ここで、 i は自然数であり、「占有率」と呼ばれる物理量に対応する。つまり、適切に磁場を与えれば、基礎物理定数であるプランク定数と電気素量（組み合わせでフォン・クリツィング定数）のみにより決まる普遍的抵抗を得ることができる。ここでフォン・クリツィング定数 $R_K \equiv h/e^2$ は、1990 年から改定までは 3 節の式 (3) の協定値が使われ、改定後は式 (6) の定義値が利用されている。通常は $i=2$ の量子状態を利用するため、量子化ホール抵抗の改定前後の値はそれぞれ、

$$\begin{aligned} \text{(改定前): } & \frac{R_{K-90}}{2} = 12\,906.403\,5\,\Omega \\ \text{(改定後): } & \frac{R_K}{2} = 12\,906.403\,729\,652\,25\,\Omega \end{aligned} \quad (11)$$

となる。この値もジョセフソン効果の場合と同じく、基礎物理定数のみによって決定され、その普遍性は 10^{-11} のレベルまで確認されている¹⁵⁾。最近ではより高温で、より低磁場で利用できるグラフェンの量子ホール効果も研究が進んでおり、標準への応用研究も盛んである。

5.3 量子電流標準

前節までで説明したジョセフソン効果電圧標準と量子ホール効果抵抗標準を直接組み合わせ、電流標準が実現可能である¹⁶⁾。しかし、通常その形で電流の「校正」をすることは実施されておらず、何らかの適切な値の「標準器」を校正しそれらを組み合わせることで電流標準が実現している。いずれにせよこれらは 3 節で解説したアンペアの実現方法のうちの一つ目である。

これ以外に、二つ目の方法として、電気素量つまり電子を一つ一つ計数し、単位時間当りに移送される電荷でアンペアの実現が可能である。従来は被測定量であった電気素量が改定 SI で定義量となるため、この手段による電流の標準は SI に極めて忠実な実現方法として注目を集めている。以下にその原理について述べる。

単一電子（単電子）トンネリング効果は電子を孤立させ周囲の電位を適切に調整することにより、電子一つ一つを制御しながらエネルギー的な障壁を通過させる効果である。その素子の写真を図 4 に示す。

これから分かる様に、電子を一つ一つ量子ドットと呼ばれる、電位的に孤立した数十 nm オーダの微細構造へ導入する。ドットは極めて小さいため電子のエネルギー準位は離散的となる。つまり、ドットに電子が入ると自らのクーロン相互作用（キャパシティブな効果）で 2 つ目の電子は入らない。この状態をクーロンブロッケードと呼ぶ。その量子ドットの電位を対応するゲート電圧を用いて制御することでソースドレイン間で一つ一つの電子の移送を制御する。この単一電子移送素子の動作の様子を「ポンプ」に例え、単一電子ポンプと呼ぶこともある。

正確な周波数でこの動作を行うと、正確な電流が式 (4) の形で発生できるという仕組みである。ジョセフソン電圧標準の説で述べた様に、周波数標準は十分に小さな不確かさで決まる。

単一電子ポンプとして、金属による量子ドット構造を用いたもの、GaAlGa/GaAs ヘテロ構造基板の 2 次元電子系上の量子ドットを利用したもの、同じ 2 次元電子系上の微細構造と表面弾性波を利用したもの、超伝導ギャップを利用したもの、シリコン中の不純物準位を用いたものなど様々な単一電子ポンプが開発され研究されている¹⁷⁾。また、単一電子ポンプにより発生した量子電流とジョセフソン効果による量子電圧、量子ホール効果による量子抵抗をオームの法則を通じて比較するという、いわゆる量子メトロロジートライアングル（量子計測三角形）実験も勢力的に行われている。

6. まとめ

以上、電気標準における改定前の SI、改定 SI およびそれらにおける基礎物理量の取り扱いや相互関係の説明を行なった上で改定 SI の影響を述べた。また

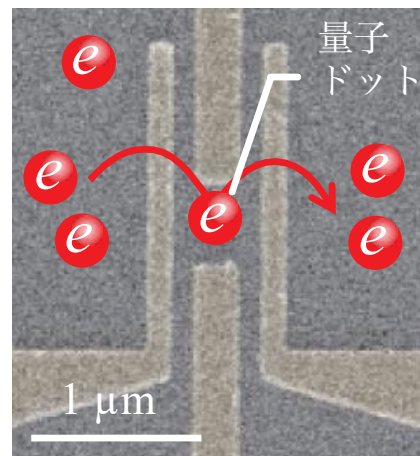


図 4 単一電子ポンプ：GaAlAs/GaAs ヘテロ構造の 2 次元電子系に形成された量子ドットを用いたもの。

3つの量子電気標準、すなわちジョセフソン効果電圧標準、量子ホール効果抵抗標準、及び単一電子トンネリング効果による単一電子ポンプを用いた量子電流標準を解説した。前者2つは、完全に確立した技術といっても良いが、量子電流標準は研究途上である。よって、実際の電流標準では、ジョセフソン効果と量子ホール効果を用いその組み合わせで電流標準が実現されている現在の状況が当面継承される。単一電子トンネリング効果はその関連分野も含め波及効果は大きいと期待される。

改定SIによる校正値の変化は産業界には多くの場合影響を与えないことを説明したが、現場での電気計測精度への要求が高まるにつれその技術も向上し、同時に量子効果を用いた標準もより簡便になりつつある。今回の改定は将来産業界で量子標準が積極的に利用される場合への重要な布石になっている。量子センシング・超精密リアルタイム測定の研究は電気計測に留まらず、全ての物理量へ波及する。改定前の協定値に基づく電気標準の閉じた体系から、改定SIでは他の物理量と調和した精密電気計測が確立することになる。今後の研究開発動向を見据えると、このSI改定は長期的に多大な恩恵を与えるであろう。

謝辞

本原稿は主には産業技術総合研究所内の研究者、そして国内外の標準研究所などの機関・大学での多くの研究員との研究・議論をもとにしている。各位のご協力に感謝する。

参考文献

- 1) H. L. Curtis: Review of recent absolute determinations of the ohm and the ampere. *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, **33**, 235/254 (1944)
- 2) 米田麟吉, 石橋勇一: 電流の絶対測定, 電気試験所彙報 1, 294/300 (1937)
- 3) B. D. Josephson: Possible new effects in superconductive tunneling, *Phys. Lett.*, **1**, 251/253 (1962)
- 4) K. von Klitzing, G. Dorda and M. Pepper: New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance, *Phys. Rev. Lett.*, **45**, 494/497 (1980)
- 5) B. N. Taylor and T. J. Witt: New international electrical reference standards based on the Josephson and quantum Hall effects, *Metrologia*, **26**, 47/62 (1989)
- 6) CIPM. Resolution 1, PV, 56, 1988:44. Available at <http://www.bipm.org/en/CIPM/db/1988/1/>
- 7) CIPM. Resolution 2, PV, 56, 1988:45. Available at <http://www.bipm.org/en/CIPM/db/1988/2/>
- 8) CIPM. PV, 68, 2001:101, following CCEM, 22, 90; b P. J. Mohr and B. N. Taylor: CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 1998. *Rev. Mod. Phys.*, **72**, 351/495 (2000)

- <https://www.bipm.org/en/committees/cipm/cipm-2000.html>.
- 9) T. J. Quinn: News from the BIPM, *Metrologia*, **26**, 69/74 (1989)
 - 10) P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor and E. Tiesinga: Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment, *Metrologia*, **55**, 125/146 (2018)
 - 11) D. B. Newell, F. Cabiati, J. Fischer, K. Fujii, S. G. Karshen-boim, H. S. Margolis, E. de Mirandés, P. J. Mohr, F. Nez and K. Pachucki: The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI, *Metrologia*, **55**, L13/L16 (2018)
 - 12) Documents are available at <https://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/>
 - 13) N.-H. Kaneko: Review of quantum electrical standards and benefits and effects of the implementation of the 'Revised SI', *IEEJ Trans.*, **12**, 627/637 (2017)
 - 14) A. K. Jain, J. E. Lukens and J.-S. Tsai: Test for relativistic gravitational effects on charged particles, *Phys. Rev. Lett.*, **58**, 1165/1168 (1987)
 - 15) F. Schopfer and W. Poirier: Testing universality of the quantum Hall effect by means of the Wheatstone bridge, *J. Appl. Phys.*, **102**, 054903 (2007)
 - 16) J. Brun-Picard, S. Djordjevic, D. Leprat, F. Schopfer and W. Poirier: Practical quantum realization of the ampere from the elementary charge, *Phys. Rev. X*, **6**, 041051(15)
 - 17) N.-H. Kaneko, S. Nakamura and Y. Okazaki: A review of the quantum current standard, *Meas. Sci. Technol.*, **27**, 032001 (2016)