

## 量子電気標準の現状と研究開発動向

大江 武彦\*

(平成19年2月21日受理)

## Current status and perspective of quantum electric standards

Takehiko Oe

## Abstract

The current electric standard of DC or low-frequency region is based on two quantum effects: the Josephson effect for the DC voltage standard and the quantum Hall effect for the DC resistance standard. As the next-generation DC electric standards, it is carried out to study programmable Josephson junction arrays, serial-parallel quantized Hall resistance (QHR) arrays and so on. As for AC quantum electric standards, AC-QHR and pulse driven Josephson junction arrays have been under investigation.

This report overviews the present system of quantum electric standards, and research trends of the next-generation quantum electric standards.

## 1. 緒論

電気量標準供給により、産業界は品質の安定した、信頼の置ける製品の製造が可能となり、産業は大いに活性化することが可能となった。また、ほぼ全ての計測量は、最終的には電気量に変換されて測定されるため、電気量標準の持つ役割は非常に大きいといえる。

現在の直流電気標準は、ジョセフソン効果と、量子ホール効果という二つの量子電気標準を起点としている。直流電圧標準は、常伝導体もしくは絶縁体の非常に薄い膜を二つの超伝導体で挟んだ構造のジョセフソン接合に電磁波（通常マイクロ波領域）を照射した場合に、接合部に量子化された電圧ステップが現れる交流ジョセフソン効果を用いている。接合に照射する電磁波の周波数を  $f$  とすると  $n$  番目のステップの電圧  $V_n$  は以下の式で表される。

$$V_n = \frac{h}{2e} f n \quad (1)$$

ここで、 $h$  はプランク定数、 $e$  は電荷素量、 $n$  は整数である。この量子化電圧と周波数との関係は、多くの実証実験により、場所や時刻、温度、接合材料、接合の形状などの諸条件に依存せず、場合によっては  $10^{-16}$  の桁に及ぶほどの普遍性を持っていると考えられている<sup>1),2)</sup>。各

国の標準研究所で実現されたジョセフソン電圧標準も、 $10^{-10}$  の桁まで一致することが実験的に確認されている<sup>3),4)</sup>。このジョセフソン効果が理論的に発見されたのは1962年であり、その後の研究を経て1977年前後より、世界の主要な標準研究所において、従来のカドミウム標準電池に換えてジョセフソン効果を使用しての電圧標準の維持、供給がなされるようになった。

直流抵抗標準は、二次元電子系を低温、高磁場下に置いた場合に、量子化されたホール抵抗が観測されるという量子ホール効果によって実現されている。通常のホール効果の場合、磁場の増加に対してホール電圧は線形に増加するが、量子ホール効果の場合、磁場に対するホール電圧の変化は非線形になり、ホール抵抗  $R_H$  は以下の式で表される。

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

ここで、 $h$  はプランク定数、 $e$  は電荷素量、 $i$  は0以外の自然数である。量子ホール効果が実験的に発見されたのは1980年のことであり<sup>5)</sup>、その後の研究を経て1990年1月より、世界の主要な標準研究所において、従来の標準抵抗に換えて量子ホール効果を使用しての抵抗標準の維持、供給がなされるようになった。

このように、現在の電気標準は2つの量子効果を起点としており、非常に高い精度で実現可能である。しかし、プランク定数  $h$ 、電荷素量  $e$  などの基礎物理定数は、

\* 計測標準研究部門 電磁気計測科

CODATAにより定期的に再調整が施される<sup>6)</sup>ため、世界的に整合性のとれた電気標準を供給する上で混乱を招きかねない。そこで、1988年に、国際度量衡委員会（CIPM）により、 $2e/h$ の代わりにジョセフソン定数  $K_J, h/e^2$  の代わりにフォン・クリッツィング定数  $R_K$  という表記記号が新たに定義された。各々の値は、

$$K_J = 483597.9(1 \pm 4 \times 10^{-7}) \text{ GHz/V} \quad (3)$$

$$R_K = 25812.807(1 \pm 2 \times 10^{-7}) \Omega \quad (4)$$

である。また、これらの値から不確かさを除いた定義量であるジョセフソン定数の協定値  $K_{J-90}$  およびフォン・クリッツィング定数の協定値  $R_{K-90}$  も以下のように定義された。

$$K_{J-90} = 483597.9 \text{ GHz/V} \quad (5)$$

$$R_{K-90} = 25812.807 \Omega \quad (6)$$

1990年1月1日より一斉に、世界各国で統一されたこの協定値を元に電気標準の供給がなされるようになり、世界的に整合性の取れた高い精度の電気標準供給体系が確立された<sup>7),8)</sup>。

本報告では、これら電気標準の起点となる2つの量子効果について述べると共に、現在取り込まれている研究開発の動向について概観する。

## 2. 量子電気標準の現状

### 2.1 ジョセフソン効果による直流電圧標準

#### 2.1.1 ジョセフソン効果

絶縁体もしくは常伝導体の非常に薄い膜を超伝導体で挟んだ構造をジョセフソン接合という。図1は、酸化アルミニウムの膜をニオブで挟んだジョセフソン接合であり、現状の電圧標準においては、この材料の素子が使用されている。超伝導体で挟む結合領域の厚みが大きい場合には電流は流れないが、結合領域が数nm以下になると、超伝導体間に超伝導電流が流れる。これが直流ジョセフソン効果であり、接合部を介して流れる超伝導電流は、次式で表される。

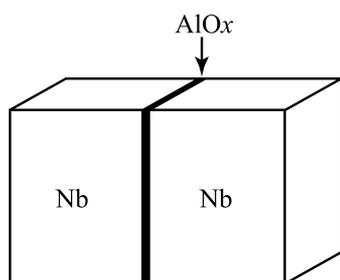


図1 Nb/AlOx/Nb ジョセフソン接合の模式図

$$J = J_c \sin \theta \quad (7)$$

$$\theta = \theta_0 + \frac{2e}{\hbar} \int V dt \quad (8)$$

ここで、 $J_c$ は接合部の特性により決まる臨界電流値、 $\theta$ は超伝導体の伝導電子対の位相差、 $V$ は接合部に印加される電圧である。接合部の電圧  $V$  がゼロであっても、直流ジョセフソン効果により、接合部には  $\pm J_c$  の範囲の直流電流が流れる。式(8)において、 $V = 0$  と置くと  $\theta = \theta_0$  となり、式(7)から、 $J_c \sin \theta_0$  の直流電流が流れることがわかる。

接合部に直流電圧  $V_0$  を印加すると、接合部を流れる電流は式(7)と(8)より、

$$J = J_c \sin \left( \theta_0 + \frac{2e}{\hbar} V_0 t \right) \quad (9)$$

となり、高周波の交流電流が流れる事がわかる。これが交流ジョセフソン効果である。例えば、 $V_0 = 100 \mu\text{V}$  の直流電圧を接合部に印加したとすると、

$$\omega_f = \frac{2e}{\hbar} V_0 \simeq 2\pi \times (48.4 \text{ GHz}) \quad (10)$$

となり、高周波の交流電流が接合部を介して流れることがわかる。

ここで、接合部に高周波の電磁波を照射し、接合部に直流電圧だけでなく、交流電圧も印加した場合を考える。照射した電磁波の角周波数を  $\omega_r$ 、照射により接合部に現れる交流電圧の振幅を  $v$  とすると、接合部の電圧は、

$$V = V_0 + v \cos \omega_r t \quad (11)$$

となる。式(7)~(11)より、接合部を流れる電流は次式で表される。

$$J = J_c \sin \left( \omega_f t + \frac{\omega_f v}{\omega_r V_0} \sin \omega_r t + \theta_0 \right) \quad (12)$$

式(12)をフーリエ・ベッセルの関係式により展開することにより、

$$\omega_f = \frac{2e}{\hbar} V_n = \pm n \omega_r \quad (13)$$

の関係を満足する場合に、接合部に直流電流が流れるという結論を得る<sup>9)</sup>。式(13)を変形すると、

$$V_n = \frac{\hbar}{2e} n \omega_r = \frac{\hbar}{2e} n f \quad (14)$$

となり、式(1)が導出される。このように、直流電圧  $V_0$  でバイアスすることで式(10)の高周波の電流を流しつつ、ジョセフソン接合に周波数  $f$  の電磁波を照射すると、周波数  $f$  の整数倍に対応する直流電圧が接合部に現れることがわかる。単一のジョセフソン接合の電流 - 電圧特性を図2に示す。この例では接合部に94 GHzの電磁波を照射しており、

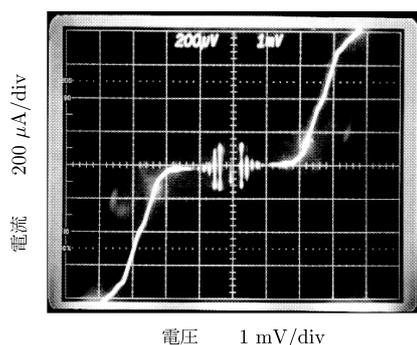


図2 単一のジョセフソン接合の電流 - 電圧特性

$$V_1 = \frac{h}{2e} \times 94 \cdot 10^9 \approx 194 \mu\text{V} \quad (15)$$

の間隔で電圧ステップが立っている様子がわかる。このステップ電圧を用いて、現在の電圧標準が供給されている。

### 2.1.2 直流電圧標準の供給

単一のジョセフソン接合が、図2に示したような電圧ステップを出力するのであれば、ジョセフソン接合を直列に接続すれば、その接合数に応じた電圧ステップを得られることは容易に想像できる。図3は、ジョセフソン接合アレイ (JJA) に77 GHzの電磁波を照射した場合の電流 - 電圧特性である。接合数を増やすことにより、接合数に応じた電圧ステップを得ることが可能である。

このJJAの両端に現れる電圧は、電流バイアス回路の負荷特性により決定される。図4は、バイアス回路と電圧ステップの関係を示している。JJAに印加する電圧を $V_s$ 、抵抗を $R_s$ とすると、図に示したような負荷直線が得られ、負荷直線と交わる電圧ステップの電圧 $V_{out}$ がJJAの両端に現れる。このように、バイアス電源の電圧 $V_s$ 、抵抗 $R_s$ を調整することにより、任意の電圧値をJJA両端に発生させることができ、その値は正確に $hf/2e$ の整数倍となる。

図5はツェナー標準電圧装置をジョセフソン電圧標準により校正する際のシステム構成である。ジョセフソン素子は液体ヘリウムに浸けられており、ミリ波源により電磁波が照射され、バイアス回路によりバイアス電流が供給されることで、ジョセフソン素子の両端には正確な電圧値が出力される。それに被校正対象のツェナー標準電圧発生装置およびナノボルトメータを接続し、ナノボルトメータの指示値を読み取ることで、装置の校正を行っている。図6は実際に使用しているジョセフソン素子である。現在、標準供給にはジョセフソン接合が20 208個配列された素子を利用しており、この素子に84 GHzの電磁波を照射し、10 V、1.018 V、1 Vを供給している。

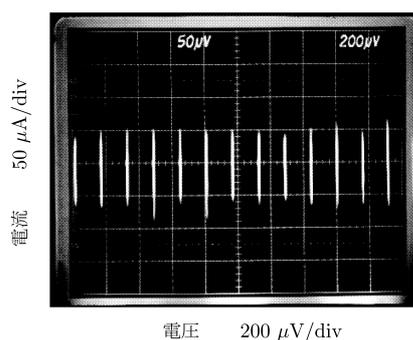


図3 ジョセフソン接合アレイ (JJA) の電圧ステップ

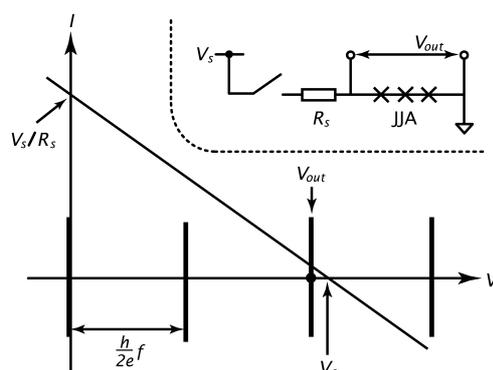


図4 バイアス回路による電圧ステップの選択

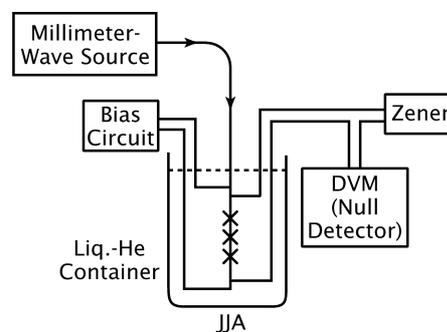


図5 ツェナー電圧校正時のシステム構成

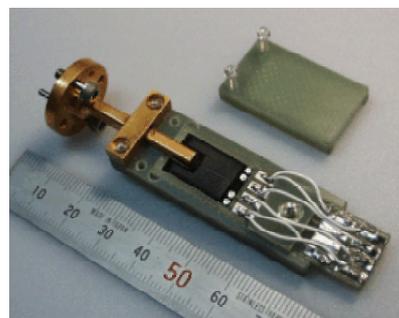


図6 ジョセフソン素子の外観

2.2 量子ホール効果による直流抵抗標準

2.2.1 量子ホール効果

2次元電子系を低温、強磁場下に置くと量子ホール効果が得られる。通常のホール素子の場合、ホール電圧は磁場 $B$ に比例するが、量子ホール素子の場合、ホール抵抗値は非線形となり、ある磁場に対して一定値（プラトー）となる性質を示し、その値は正確に

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

となる。この効果も、ジョセフソン効果と同様の高い普遍性を持ち、材料のサイズや質などの物理的な諸条件によらずに、 $10^{-9}$ の精度で直流抵抗値を実現可能であることが多くの傍証実験により確かめられている<sup>(3),(10)-(12)</sup>。世界の主要な標準研究所において実現された量子化ホール抵抗の値も、 $10^{-9}$ の桁で一致することが報告されている<sup>(13),(14)</sup>。

量子ホール効果の舞台となる2次元電子系は、電子が2次元内のみでの運動が許されるような非常に薄い電子層のことであり、MOSFETのゲート電極に電圧を印加した場合に形成される薄い反転層や、GaAs/AlGaAsなどのヘテロ接合デバイスなどによって得ることができる。一般的には、MOSFETに比べて比較的高温・低磁場で使用でき、ゲート電極を必要としないヘテロ接合デバイスが良く用いられる<sup>(15)</sup>。図7はGaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Asヘテロ接合デバイスの模式図である。GaAsのGaの代わりにAlを添加していくと、エネルギーギャップを広くすることができる。エネルギーギャップの異なる半導体を接合すると、エネルギーの低い方へ電子が流れ、バンドの曲がりが生じる(図7下)。これにより接合部に非常に薄い電子の層ができることになり、これを2次元電子系として用いる。

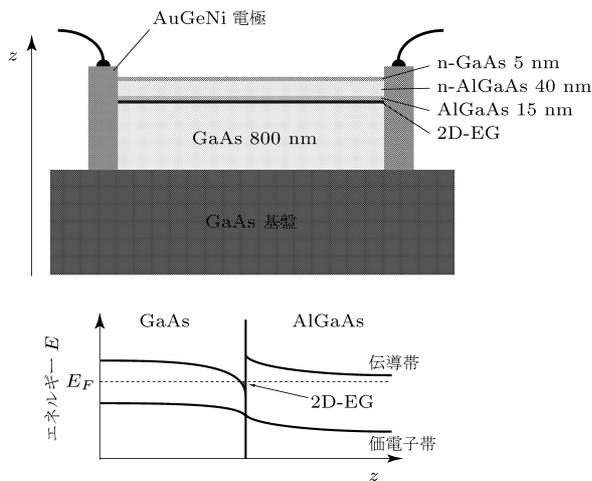


図7 GaAs/AlGaAsヘテロ接合デバイスの模式図

このような2次元電子系において、自由電子の状態密度は、スピン自由度を無視すると

$$D(E) = \frac{m}{2\pi\hbar^2} \quad (16)$$

と表され、1次元および3次元の場合と異なりエネルギーに依存しない一定値となる(図8(a))。この2次元電子系に磁場を印加すると、電子はサイクロトロン運動をし、図8に示すようにランダウレベルに分離する。磁場の増加と共にサイクロトロン半径が小さくなり、単位面積あたりに並べ得る電子の数が増加するのと同じように、磁場の増加によって各ランダウレベルの状態数は増える。よって、磁場の増加と共にフェルミレベル以下のランダウレベル数は減少する(図8(b)-(d))。磁場を変化させることはランダウレベルに対するフェルミ準位の相対位置を変化させることに対応する。

各ランダウレベルには非局在状態と局在状態とがある。局在状態の電子は半導体の格子欠陥や不純物に捕まり、その周りに局在している。非局在状態の電子は、素子の全系に広がっており、この電子が電気伝導に寄与する。フェルミ準位が非局在状態にある場合(図8(c))には、磁場変化に対し伝導に寄与する非局在電子が影響を受けるため、ホール抵抗は磁場に対して変化する。フェルミ準位が局在状態にある場合(図8(b),(d))には、磁場の変化に対し、伝導に寄与しない局在電子のみが影響を受けるため、ホール抵抗は磁場に対し一定値となる。図9(a)は量子化ホール抵抗の磁場に対する特性である。 $R_H$ はホール抵抗であり、図9(b)の $V_H/I$ である。磁場の変化に対して非線形な特性を示し、ある磁場に対して一定値をとる。 $R_{xx}$ は縦抵抗 $V_{xx}/I$ であり、 $R_H$ が一定値の時に $R_{xx} = 0$ となり、それ以外の際には高い抵抗値を示す。

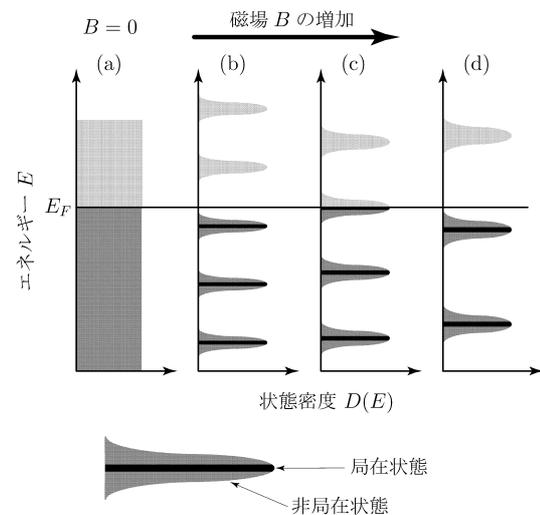


図8 2次元電子系状態密度の磁場依存性

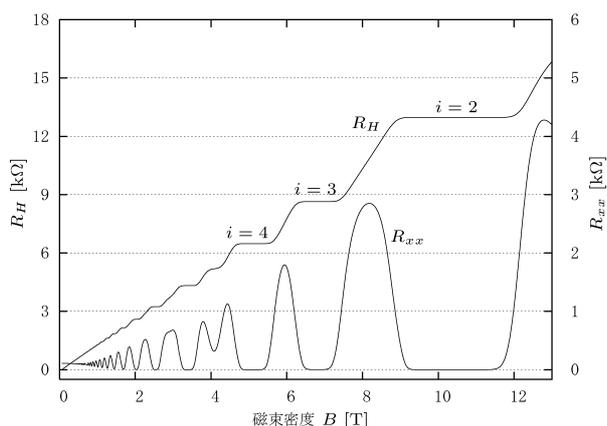


図9 (a) 量子化ホール抵抗の対磁場特性

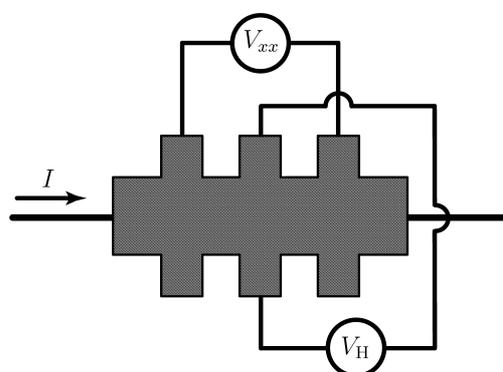


図9 (b) ホールバーの接続図

### 2.2.2 直流抵抗標準の供給

電圧標準の場合は、マイクロ波の周波数やバイアス回路を調整することにより、原理的には校正器が発生する任意の電圧にほぼ等しい出力電圧を得ることが可能であった。しかし、抵抗標準の場合、フォン・クリッツィング定数  $R_{K-90} = 25812.807 \Omega$  の整数分の1の抵抗値しか得られないため、そのような調整ができない。逆の見方をすると、他の量に依存しない量であるともいえる。実際の標準供給に際しては極低温電流比較器 (Cryogenic Current Comparator: CCC) を用い、公称値に非常に近い値を持ち、温度や時間変化に対し安定な標準抵抗器を校正する。

図10(a)はCCCの原理、図10(b)は実際のCCCの構成を示している。超伝導材料で作られた筒に電線を通し、電流を流すと、超伝導材料の表面には遮へい電流が流れ、筒の外側には磁束が発生する。図10(a)に示すように、大きさが全く同じで、逆極性の電流が流れている2本の電線を筒に通した場合、外側の磁束は発生しない。この磁束を超伝導量子干渉素子 (Superconducting QUantum Interference Devices: SQUID) を用いて検出することに

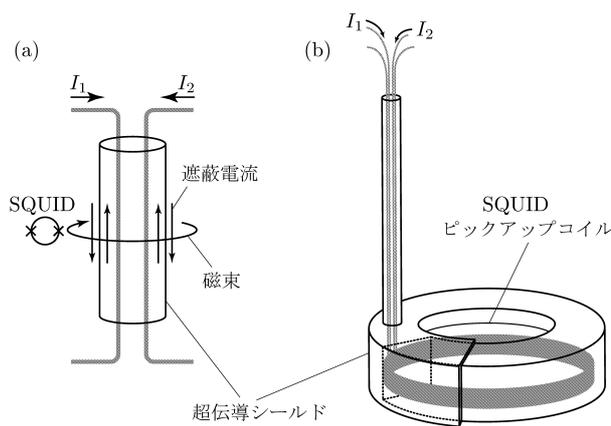


図10 CCCの構成

より、筒内の電流がバランスしたか否かを知ることができる。図10(b)はこの考えを多巻線に拡張した、サリバン型と呼ばれるCCCである。蛇が自身の尾を飲み込んだような構造をしており、超伝導体の表面を遮へい電流が流れるように、蛇の口と尾との間は電気的に絶縁が保たれている。

図11はCCCを用いた電流比較器であり、これにより標準抵抗器の校正を行う。QHRと被校正抵抗器の両端電圧を等しくし、かつCCC巻線の電流が平衡した場合、以下の関係が成り立つ。

$$R_1 I_1 = R_2 I_2 \quad (17)$$

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 + N_3 I_3 \quad (18)$$

これらの簡便な関係式より、

$$\begin{aligned} R_2 &= R_1 \frac{N_2}{N_1} \left( 1 - \frac{I_3 N_3}{I_1 N_1} \right)^{-1} \\ &= R_1 \frac{N_2}{N_1} \left( 1 - \frac{V_3 N_3}{R_3 I_1 N_1} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (19)$$

となり、被校正抵抗器の値付けを行うことができる。ここで、 $V_3$  は  $R_3$  の両端電圧であり、図11におけるDVMの値である。

図12に直流抵抗校正の流れを示す。初めにQHRからCCCを介して100 ΩのHamon抵抗器の校正をする。このHamon抵抗器は10個の10 Ωエレメントから構成されており、10個のエレメントを直列に接続した場合と並列に接続した場合の抵抗比（この場合1:100）が9桁のオーダーで理論値と一致するというものである。

次に、校正された100 Ω Hamon抵抗器の10 Ωエレメントを並列に組み替えて1 Ωとし、群管理された1 Ω抵抗器群を室温の直流電流比較器(Direct Current Comparator: DCC)を用いて校正する。群管理とは複数の抵抗器の平均値をもって維持するシステムである。現状は6器の1 Ω抵

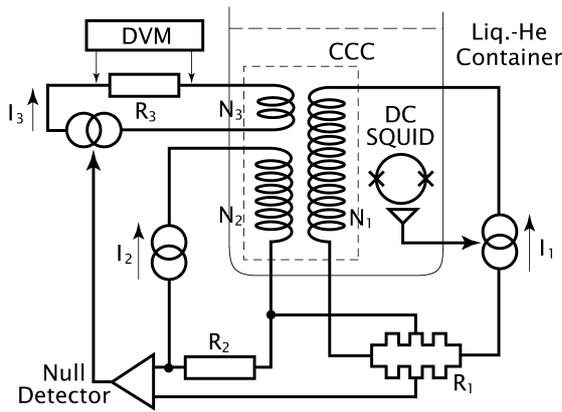


図11 CCCを用いた抵抗校正システム

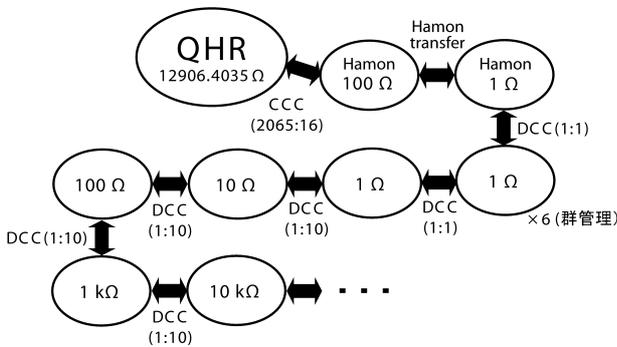


図12 直流抵抗校正の流れ

抗器で構成されており、経年変化が小さく、また一般的に温度特性にも優れている。CCC等の極低温の機器類は長期にわたる連続運転が困難であるため、通常はこれら1Ω抵抗器群を用い、DCCにより校正を行う。

3. 量子電気標準の研究開発動向

3.1 量子電圧標準の研究開発動向

現在の直流電圧標準は、図1に示したように、非常に薄い絶縁体を超伝導体ではさんだSIS (Superconductor-Insulator-Superconductor) 構造のジョセフソンアレーが用いられている。しかし、このSIS構造の素子は図3に示したように、電圧ステップの電流幅が数十 μAと狭いため、バイアス電流にノイズが混入した場合に出力電圧が安定せず、動作が不安定になる問題がある。また、図4に示した負荷曲線は、通常複数の電圧の櫛に交わるため、SIS構造の素子には、任意の電圧値を得るための電流バイアス回路の調整に手間がかかるという欠点もある。

そこで、絶縁体の代わりに常伝導体を挟んだ構造のSNS (Superconductor-Normal metal-Superconductor) やSINIS 構造のジョセフソンアレーが研究されている。SNSの場

合、V-I特性は階段状になり、図3に示したSIS素子のように櫛状にはならないため、任意の電圧値をSIS素子の場合に比べて素早く出力可能である。また、SIS素子に比べて電圧ステップの電流幅が広いこと、耐ノイズ性に優れた電圧標準システムを構築可能である。このSNS素子の特徴を活かし、現在プログラブルジョセフソンアレーとパルス駆動ジョセフソンアレーに関する研究が盛んに行われている<sup>16)</sup>。

3.1.1 プログラブルジョセフソン電圧標準

図13はプログラブルジョセフソンアレーの回路である。ジョセフソン接合を1,2,4,8,16,・・・とバイナリの刻みで並べ、それぞれに電流バイアス回路を接続した構成になっている。バイアス電流をスイッチでON/OFFし、電圧を出力するジョセフソン接合の数を制御することにより、任意の出力電圧を得られる。バイアス電流回路の切替速度は1秒間で10 000回に達しており<sup>17)</sup>、この方式により交流電圧標準を実現しようとする試みがなされている。

図5、図11に示したように、電圧および抵抗の絶対測定において、Null Detectorとして用いられるナノボルトメータは非常に重要な位置を占めており、正確な差電圧の検出が期待される。よって、これらナノボルトメータのリニアリティを事前に把握しておくことは肝要であるといえる。プログラブルジョセフソン接合列を用いることで、ナノボルトメータの校正を手早く行うことが可能となり<sup>18)</sup>、より高品質な標準供給が実現し得る。

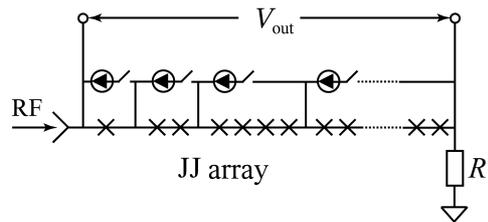


図13 プログラブルジョセフソンアレーの回路

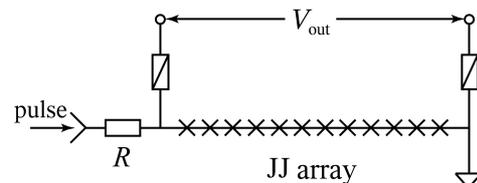


図14 パルス駆動ジョセフソンアレーの回路

### 3.1.2 パルス駆動ジョセフソン電圧標準

図14はパルス駆動ジョセフソン接合列の回路である。ジョセフソン接合にパルス電流を流すと、接合の両端には電流パルスの面積に応じて、磁束量子  $\Phi_0 = \frac{h}{2e}$  の整数倍に面積が量子化された電圧のパルスが生じる。この任意の量子化電圧を出力し得る特性を用いて、交流電圧標準を実現する試みがなされている。

上述のプログラマブルジョセフソン接合列は、出力電圧の振幅を瞬時に変化させることにより、任意電圧波形を実現しようというものであり、基本波以外の周波数成分が比較的低い周波数帯に現れる問題がある。しかし、パルス駆動方式では、パルス幅および振幅を変調して任意電圧を出力することにより、基本波以外の周波数成分をより高次に押しやるのが可能となる。これにより、高調波成分はローパスフィルタにより容易に除去され、基本波成分のみが出力されることとなる。

現在、交流電圧標準の実現に向け、変調方式の改善、光パルスとフォトディテクタを用いた駆動方式、ローパスフィルタの検討等の研究がなされている<sup>19)-21)</sup>。

## 3.2 量子抵抗標準の研究開発動向

### 3.2.1 直並列量子化ホール抵抗標準

図12に示したように、現在はQHRからCCCを介して100 Ω Hamon抵抗器の校正を行い、そこからHamon変換及びDCCを介して供給範囲を広げていっているため、低抵抗や高抵抗では測定の不確かさが増大してしまう。そこで、フランスBNM-LNEのグループを中心として考案されたのが直並列量子ホール素子による抵抗標準 (Quantum Hall Array Resistance Standard: QHARS) である。これは、複数の量子化ホール抵抗素子を直並列に組み合わせることで、任意の抵抗値を得ようというものである。図15は欧州のグループにより実際に測定された素子の写真である<sup>22)-24)</sup>。QHR素子を100個並列に接続することにより129 Ωを(図15a)、10個並列で1290 Ωを(図15b)、129個の並列と16個の直列を並列に並べることにより100.0012 Ωを(図15c)、100個直列に接続することで1.29 MΩを(図15d)それぞれ実現している。このように多数のQHR素子を組み合わせただけでも、個々の素子は非常に安定した特性を示し、(a)~(c)の素子については合成標準不確かさが $5 \times 10^{-9}$ 程度であることが報告されている。産業技術総合研究所計量標準総合センター(NMIJ)においても同様の試みがなされており、図16に示す10 kΩの直並列量子ホール素子が作製中である<sup>25)</sup>。

このように、直並列にホール素子を接続することによ

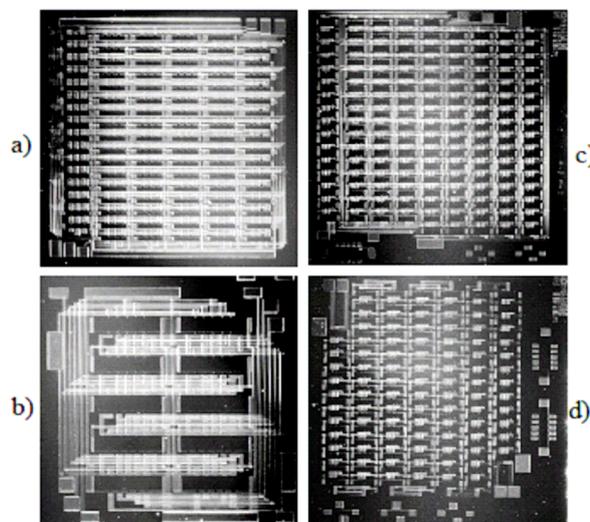


図15 QHARS a)129 Ω, b)1290 Ω, c)100 Ω, d)1.29 MΩ<sup>24)</sup>



図16 10 kΩ QHARS (NMIJ)<sup>25)</sup>

り、低抵抗・高抵抗の定義値が実現され、被校正抵抗器と量子標準との1:1比較が可能となり、不確かさの小さい測定が可能となる。また、比較的大きな電流で測定できるため、ノイズ耐性の高いシステムの構築が期待できる。

### 3.2.2 交流量子化ホール抵抗標準

現在は、直流の量子化ホール抵抗から値付けされたGibbingsタイプのカルキュラブルレジスタを起点として、交流抵抗やインダクタンス、キャパシタンスの値が校正されており、より不確かさの小さい測定に向けて、交流の量子化ホール抵抗 (AC-QHR) の実現が期待されている。QHRに交流電流を流すと、電流値や周波数に依存してプラトーの抵抗値が変化する。図17はプラトー ( $i=2$ ) におけるホール抵抗の周波数依存性を示している<sup>26)</sup>。直流電流の場合、ホール抵抗はプラトーにおいて一定となるが、交流電流の場合は図のようにプラトーの両側が盛り上がった形の抵抗値を示す<sup>27)</sup>。

しかし、プラトーの中心の抵抗値は、周波数に対して線形に変化するため、任意の周波数におけるQHRの値は

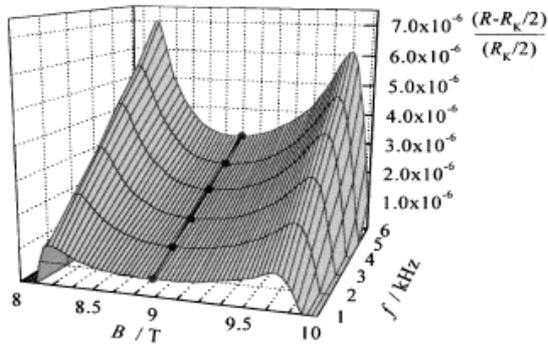


図17 ホール抵抗 ( $i=2$ ) の周波数依存性<sup>26)</sup>

計算により外挿できる。この特性を用いてGibbins タイプの抵抗器を0.1 ppmの不確かさで校正可能であることが報告されている<sup>28),29)</sup>。

また、バックゲートを用いて漏洩電流を防ぐことにより、周波数に対するホール抵抗の変化を打ち消す手法も研究されている。ゲート電圧を調整することで、ホール抵抗値のプラトーからのずれを相対値で $3 \times 10^{-8}$ 以下に抑制可能であることが報告されており、標準供給に充分な不確かさに達しつつあるといえる<sup>30),31)</sup>。

### 3.2.3 任意値抵抗標準

現在、NMIJにおいては10 mΩから1 TΩまでの範囲の直流抵抗標準をディケードの刻みで供給している。しかし、温度の分野において、抵抗温度計の線形性を校正するため、あるいはその校正に利用されている電流比較器の線形性の校正のため25 Ω等の中間値抵抗標準の供給が必要とされている。この実現の方法として、3.2.1で述べたQHRアレーが考えられる。前述したように、ホールバーを129個並列にしたものと16個直列にしたものを並列にすることで以下のように100 Ωが実現できる。

$$\frac{1}{\frac{129}{R_{K-90}} + \frac{1}{16 \frac{R_{K-90}}{2}}} = 100.0011893 \dots \Omega \quad (20)$$

これを4つ並列にすることにより、25 Ωが実現可能である。また、普段標準を維持・供給する上で必要となる可搬型の中間値抵抗器(図18)も開発中であり、2009年度末までに供給を開始する予定である。

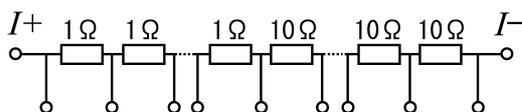


図18 中間値標準抵抗器の概念図

## 4. 結論

本報告では、現在の電気標準の基点である二つの量子標準、ジョセフソン効果による直流電圧標準、量子ホール効果による直流抵抗標準についてその原理、標準供給の手順を概観すると共に、研究開発動向について述べた。電圧標準においては、プログラブルジョセフソン接合列やパルス駆動ジョセフソン接合列を用いることによる交流電圧標準に関する研究が盛んになされており、抵抗標準においては、外挿法やバックゲート法による交流抵抗標準、QHRアレーによる任意値抵抗標準の実現に関心が寄せられている。

## 参考文献

- 1) 遠藤 忠 : 電磁気量標準の成り立ち, 日本物理学会誌, **54** (1999) 787-792.
- 2) Jaw-Shen Tsai, A. K. Jain, and J. E. Lukens: High-Precision Test of the Universality of the Josephson Voltage-Frequency Relation, *Phys. Rev. Lett.* **51** (1983) 316-319.
- 3) D. Reymann, A. Iwasa, H. Yoshida, T. Endo and T. J. Witt: Comparison of Josephson Voltage Standards of the Electrotechnical Laboratory and the Bureau International des Poids et Mesures, *Metrologia* **29** (1993) 389-395.
- 4) T. J. Quinn: Results of Recent International Comparisons of Measurement Standards Carried Out by the BIPM, *Metrologia* **31** (1994) 63.
- 5) K. von Klitzing, G. Gorda and M. Pepper: New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall Resistance, *Phys. Rev. Lett.* **45** (1980) 494-497.
- 6) Peter J. Mohr and Barry N. Taylor: CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2002, *Rev. Mod. Phys.* **77** (2005) 1-107
- 7) 遠藤 忠: 電気標準の変遷, *電学誌* **120**, 1 (2000) 31-34.
- 8) 遠藤 忠: 新しい電気の量子標準 - ジョセフソン効果電圧標準と量子ホール効果抵抗標準 -, *応用物理* **59** (1990) 712-724.
- 9) A. Barone, G. Paterno 共著, 菅野 卓雄 監訳, 太田 浩, 山下 努 共訳: ジョセフソン効果の物理と応用, 近代科学社, 1988.
- 10) B. Jeckelmann, A. D. Inglis and B. Jeanneret: Material Device, and Step Independence of the

- Quantized Hall Resistance, *IEEE Trans. Inst. Meas.* **44**(1995) 269-272.
- 11) B. Jeanneret, B. Jeckelmann, H. -J. Buhlmann, R. Houdre and M. Ilegems: Influence of the Device-Width on the Accuracy of Quantization in the Integer Quantum Hall Effect, *IEEE Trans. Inst. Meas.* **44** (1995) 254-257.
- 12) S. P. Giblin, T. J. B. M. Janssen, G. R. Nash, P. D. Buckle, L. Buckle and M. T. Emeny: Indium Antimonide Quantum Hall Effect Devices, *CPEM 2006 Digest* 492-493.
- 13) F. Delahaye, T. J. Witt, B. Jeckelmann and B. Jeanneret: Comparison of Quantum Hall Effect Resistance Standards of the OFMET and the BIPM, *Metrologia* **32** (1996) 385-388.
- 14) F. Delahaye, T. J. Witt, E. Pesel, B. Schumacher and P. Werneke: Comparison of Quantum Hall Effect Resistance Standards of the PTB and the BIPM, *Metrologia* **34** (1997) 211-214.
- 15) F. Delahaye and B. Jeckelmann: Revised technical guidelines for reliable dc measurements of the quantized Hall resistance, *Metrologia* **40** (2003) 217-223.
- 16) S. P. Benz and C. A. Hamilton: Application of the Josephson Effect to Voltage Metrology, *Proceedings of the IEEE* **92** (2004) 1617-1629.
- 17) François Malettras, Pierre Gournay, Ian Robinson and Gérard Genevès: A Bias Source for Dynamic Voltage Measurements with a Programmable Josephson Junction Array, *CPEM Digest* (2006) 358-159.
- 18) Helko E. van den Brom, Roland van Bemmelen, Gert Rietveld, Ernest Houtzager and Oleg Chevtchenko: Voltage Linearity Measurements Using a Binary Josephson System, *CPEM Digest* (2006) 378-379.
- 19) A. M. Klushin, S. Solve, R. Behr, G. Wende, M. Schubert, A. S. Katkov, R. Otto, Ch. Buchal and V. A. Shumilov: A New Millimeterwave Synthesizer For Josephson Voltage Standards, *CPEM Digest* (2006) 368-369.
- 20) C. Urano, N. Kaneko, M. Maezawa, T. Itatani, S. Gorwadkar, H. Saitou, J. Maeda and S. Kiryu: Progress on the Development of Arbitrary Waveform Synthesizer at AIST, *CPEM Digest* (2006) 390-391.
- 21) M. Schubert, G. Wende, T. May, H.-G. Meyer, O. Chevtchenko, H. E. van den Brom and E. Houtzager: Pulse-Driven Josephson Junction Arrays for a High-Precision AC Voltage Synthesis of Unipolar and Bipolar Waveforms, *CPEM Digest* (2006) 388-389.
- 22) W. Poirier, A. Bounouh, K. Hayashi, H. Fhima, F. Piquemal and G. Genevès:  $R_H/100$  and  $R_H/200$  Quantum Hall Array Resistance Standards, *American Institute of Physics* **92** (2002) 2844-2854.
- 23) W. Poirier, A. Bounouh, F. Piquemal and J. P. André: A New Generation of QHARS: Discussion About the Technical Criteria for Quantization, *Metrologia* **41** (2004) 285-294.
- 24) R. Goebel, F. Delahaye, B. Jeckelmann, F. Schopfer and W. Poirier: Preliminary Investigation of the Use of Quantum Hall Array Resistance Standards as Traveling Standards, *CPEM Digest* (2006) 514-515.
- 25) N. Kaneko, C. Urano, T. Itatani and S. Kiryu: Development of a 10 k $\Omega$  Quantum Hall Array Resistance Standard, *CPEM Digest* (2006) 512-513.
- 26) J. Melcher, J. Schurr, K. Pierz, J. M. Williams, S. P. Giblin, F. Cabiati, L. Callegaro, G. Marullo-Reedtz, C. Cassiogo, B. Jeckelmann, B. Jeanneret, F. Overney, J. Boháček, J. Říha, O. Power, J. Murray, M. Nunes, M. Lobo and I. Godinho: The European ACQHE Project: Modular System for the Calibration of Capacitance Standards Based on the Quantum Hall Effect, *IEEE Trans. on Instrum. and Meas.* **52** (2003) 563-568.
- 27) J. Schurr, F.-J. Ahlers, G. Hein, J. Melcher, K. Pierz, F. Overney and B. M. Wood: AC Longitudinal and Contact Resistance Measurements of Quantum Hall Devices, *Metrologia* **43** (2006) 163-173.
- 28) B. Jeanneret and F. Overney: Phenomenological Model for Finite-Frequency Dissipation in the Quantized Hall Resistance, *CPEM Digest* (2006) 706-707.
- 29) F. Overney, B. Jeanneret, B. Jeckelmann, B. M. Wood and J. Schurr: The Quantized Hall Resistance : Toward a Primary Standard of Impedance, *CPEM Digest* (2006) 696-697.
- 30) F. Delahaye, B. P. Kibble and A. Zarka: Controlling AC Losses in Quantum Hall Effect Devices, *Metrologia* **37** (2000) 659-670.
- 31) J. Schurr, F.-J. Ahlers, G. Hein, K. Pierz: The AC Quantum Hall Effect as a Primary Standard of Impedance, *CPEM Digest* (2006) 702-703.