

抵抗標準 (Resistance Standard)

基礎計測部

中西正和, 木下攘止, 坂本 泰

1. 単位と標準

単位と標準については物理学会誌の小特集等の色々な解説が出ていて、著者の説明よりもそれらが遥に判り易いのは言うまでもないが、電総研の抵抗標準を概観するのが本稿の目的なので簡単に触れたい¹⁻⁷⁾。

単位と標準, 物理量の測定というとなりに難しく聞こえるが、中国の半ば伝説の時代である三皇五帝の一人の黄帝が長さを測る尺と容積を量る枡と重さを計る秤を統一した故事からも明らかな様に日常生活には必要不可欠である^{*1}。現在でも使われている枡何杯という量り方は一見単純であるが、内壁が濡れているか乾いているかで入る量が変わるので最初の一杯目と二杯目で量が変わり、更に木製枡では木に染み込んでいく量があるので、より正確に量るには細かく手順を決めなければならない。司馬遼太郎作「国盗り物語」には若き日の齋藤道三が銭の穴を通して油を注ぐ話が出てくる。枡から容器にゆっくりと最後の一滴まで移し、公明正大に油の容積を量っている事を買手にアピールしていると見ることもできる。逆に言うと方法によっては同じ枡を使っても容積を誤魔化すことが出来る訳で、正確な測定には測定方法が大切である。この例を引用するまでもなく測定には基準(単位)と正

しい測定方法が必要である^{*2}。

容易に判るように長さの単位と容積の単位を別々に決めるよりも縦横高さが長さの単位に等しい立方体を容積の単位にする方が統一性が高い^{*3}。物理量毎に単位を決めることが出来るが、夫々の単位が相互に統一的に決められている方が使い易いのは言うまでもない。その点で現在あらゆる分野で広く世界的に使われているSI(Systeme International d'Unites)は、単位間の変換係数が出来るだけ1になるように作られていて統一性が高い^{9,10)}。理科年表等にも引用されているが「SIは、4種の基本量、すなわち長さ、質量、時間、電流に対してそれぞれに、メートル(m)、キログラム(kg)、秒(s)、アンペア(A)を基本とし、これに温度の関連している分野で基本量である熱力学的温度の単位ケルビン(K)、物理量を表す単位モル(mol)、および測光の分野で基本量である光度の単位カンデラ(cd)を加えた7個を基本単位とし、平面角ラジアン(rad)、立体角ステラジアン(sr)の2個を補助単位として構成されている単位系である。」と定義されている^{*4}。SIの4種の基本単位夫々に4つの標準が対応する。すなわち、長さ標準、質量標準、時間標準、電流標準である。一般的な言葉ではないが、これらをS I 基本標準と呼ぶこともある。著者達のグループに最も関係の深い電流標準はSIでは「ア

-
- *1 標準とはほぼ同じ意味で使われる言葉に「度量衡」がある。「度」は長さ「量」は容積「衡」は重さを意味し、黄帝が統一したと言われる尺と枡と秤に由来する。
 - *2 単位が基準となるある一定の物理量と見なせるかについて人によって意見が別れるので、詳しくは文献を参照して欲しい⁸⁾。本稿ではSIの定義を愚直に解釈して単位を一定の物理量に等しいとした。
 - *3 平面を隙間無く占める事の出来る同形の正多角形は正三角形、正方形、正六角形の三種類である。通常は一辺が長さの基準に等しい正方形を面積の基準にするが、一辺が長さの基準に等しい正三角形や正六角形を面積の基準にすることも出来る。同様に空間を隙間無く占める事の出来る同形の正四面体や正八面体等の正多面体を容積の基準にする事も可能である。論理的には辺の長さを決めれば形状が一意に決まる正三角形の方が正方形よりも面積の基準に相応しいし、正四面体の方が立方体よりも容積の基準に相応しい。同じ面積を囲む為に必要な辺の長さの和は正六角形が正方形よりも短いので、効率の点からは正六角形の方が正方形よりも面積の基準に相応しい。蜂が度量衡を作るなら正六角形が面積の基準になるだろう。S F 映画で三角形を基本とした宇宙船を見ると理屈抜きで異星人の船だと直感するのは殆どの人が無意識に正方形や立方体を基準にする方が自然だと感じるからだろう。三角形や六角形を基準にするのは人間の本能に逆らうのかもしれない。
 - *4 標準関係の仕事に従事している人の発表や書いた本でも未だに「絶対温度」と言う言葉を見る事があるが、少なくともSIでは絶対温度は定義されていないので使用は避けた方が良い。

KEY WORD: 直流低周波電気標準, 抵抗標準, 量子ホール効果, 抵抗比測定装置, 標準抵抗器

ンペア(A)は、真空中に1 mの間隔で平行に置かれた、無限に小さい円形断面積を有する、無限に長い2本の直線状導体の夫々を流れ、これらの導体の長さ1 mごとに 2×10^{-7} Nの力を及ぼし合う一定の電流である。」と定義されている。下線は著者が引いた。この部分から判るように電流標準は実現不可能である。しかし、この様な条件を仮定しているので、電磁気の法則から次の式を簡単に導くことが出来る。

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ mkg} / \text{s}^2 \text{ A}^2 \quad (1.1)$$

つまり、SIのアンペアの定義は、真空の透磁率(μ_0)を定義したと捉える方が良い。

実現不可能なSI基本標準の代わりに、通常は電磁気量測定のための実用的な標準を用いる。実用的な標準は時間標準、長さ標準、電圧標準、抵抗標準の4つである。我々のグループが関係しているのは電圧標準と抵抗標準である。電圧標準はジョセフソン効果を利用して実現されており、本特集でも説明されているので詳しくはそちらを参照して欲しい。本稿では量子ホール効果を利用した抵抗標準について説明する。

2. 量子ホール効果

量子ホール効果は1980年にvon Klitzingにより発見された¹¹⁾。シリコン電界トランジスタのチャンネルやGaAs/AlGaAsヘテロ構造の界面の様に深さ方向に電子が移動できる距離が電子の波長程度以下だと電子伝導層は事実上二次元となる。二次元伝導層に垂直に磁場を掛けると磁場にも電流にも垂直な方向に電圧が発生する。発生する電圧をホール電圧、ホール電圧と電流の比をホール抵抗と呼ぶ。10 T程度の磁場を掛け、素子を1 K程度以下に冷却するとホール抵抗が量子化し、

$$R_H(i) = \frac{h}{ie^2} = \frac{c\mu_0}{2i\alpha} \quad (2.1)$$

となる。ここで h はプランク定数、 e は素電荷、 i は量子数(正の整数)、 c は光速、 α は微細構造定数である。SIでは c と μ_0 は定義量なので、ホール抵抗($R_H(i)$)の測定は α の測定と等価である。特に

$$R_K = \frac{c\mu_0}{2\alpha} \quad (2.2)$$

をvon Klitzing定数と呼ぶ¹²⁾。CODATA(Committee on Data for Science and Technology, International Council of Scientific Unions)の1998年の調整では

$$R_K = 25812.807572 \times (1 \pm 3.7 \times 10^{-9}) \Omega \quad (2.3)$$

である¹³⁾。この調整での R_K の相対的不確かさは 3.7×10^{-9} である。 α の相対的不確かさも 3.7×10^{-9} で、調整値は

$$\alpha = 7.297352533 \times 10^{-3} \times (1 \pm 3.7 \times 10^{-9}) \quad (2.4)$$

である。

電磁気量測定のための実用的な標準として量子化ホール抵抗を用いる場合、国際度量衡委員会(Comite International des Poids et Mesures, 略称CIPM)の下部組織である電気諮問委員会(le Comite Consultatif d'Electricite et Magnetisme, 略称CCEM)の1990年勧告値に基づく協定値(Conventional Value of von Klitzing Constant: R_{K-90})が使われる¹⁾。 R_{K-90} は厳密に 25812.807Ω に等しい。

$$R_{K-90} = 25812.807 \Omega. \quad (2.5)$$

1990年時点でのvon Klitzing定数の調整値は

$$R_K = 25812.807 \times (1 \pm 2.0 \times 10^{-7}) \Omega \quad (2.6)$$

である。式(2.5)と式(2.6)を比べれば判るが R_{K-90} は当時の R_K の調整値から不確かさを除いた値である。SI基本標準との違いを出来るだけ小さくしているが、 R_{K-90} を用いた実用的な抵抗標準で使う抵抗の単位 Ω とSIの組み立て単位である Ω とは厳密には異なる。しかし、当時の R_K の測定の不確かさ(2.0×10^{-7})の方が抵抗比測定の相対的不確かさ 10^{-8} 台よりも大きかったので、 R_{K-90} を使うことにより相対的不確かさが 10^{-8} 台の実用的な抵抗標準を実現できた^{14,15)}。

実用上の標準を組み合わせて作られる標準の例として、電総研の静電容量標準について簡単に説明する。本特集でも静電容量標準が解説されているので詳しくはそちらを参照して欲しい。先ず抵抗標準システムを用い(次節参照)、交流-直流差が計算可能な10k Ω 抵抗器の直流抵抗を測定する。次に交流抵抗比測定ブリッジやquadrature bridgeを用いて静電容量を測定する。これらのブリッジによる測定には時間標準(周波数標準)を使うので、抵抗標準と時間標準の二つを組

み合わせて静電容量標準が実現されている。

3. 電総研の抵抗標準

1990年以降電総研では量子化ホール抵抗を基準とし、公称 $1\ \Omega$ と $10\text{k}\ \Omega$ の標準抵抗器の校正を行っている^{*5}。現在の抵抗測定手順を Fig.1 に示す¹⁶⁾。抵抗比測定には極低温電流比較器を用いた抵抗比測定ブリッジ(CCC bridge)を用い、抵抗比測定の相対的不確かさの典型値は、 $R_H(2) : 100\ \Omega$ が約 4×10^{-9} 、 $100\ \Omega : 1\ \Omega$ が約 2×10^{-9} 、 $100\ \Omega : 100\ \Omega$ が約 2×10^{-9} 、 $100\ \Omega : 10\text{k}\ \Omega$ が約 3×10^{-9} である¹⁷⁾。CCC bridge では余り大きな抵抗比は測定できないので、仲介用抵抗器($100\ \Omega$ transfer resistor)を用いる。 $100\ \Omega$ transfer resistor は TEGAM 社製 SR102/DC 型製造番 A2010397SR102D である。この抵抗器の抵抗値の変化率は $+5.4 \times 10^{-10}/\text{day}$ と小さく、変化は滑らかなので、夫々の測定日の違いによる影響は補正可能である。抵抗測定の不確かさは夫々の抵抗比測定の不確かさの root sum squares で与えられ公称 $1\ \Omega$ 、 $100\ \Omega$ 、 $10\text{k}\ \Omega$ 標準抵抗器の抵抗測定の相対的不確かさは約 5×10^{-9} である。CCC bridge と測定手順の詳細は文献を参照して貰いたい。

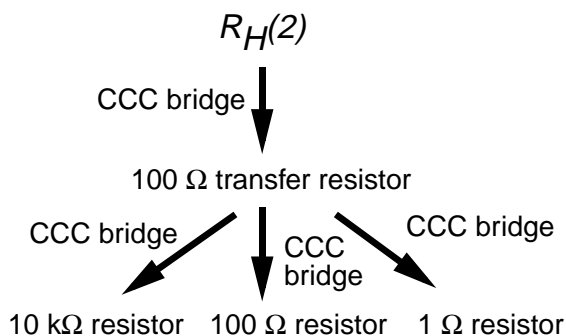


Fig.1 電総研の量子ホール効果抵抗標準の抵抗測定手順。
量子化ホール抵抗の2番目のプラトー($R_H(2)$)を基準に、極低温電流比較器を用いた抵抗比測定ブリッジ(CCC bridge)で抵抗比を測定する。 $100\ \Omega$ transfer resistor (TEGAM社製SR102/DC型 $100\ \Omega$ 標準抵抗器、製造番号A2010397SR102D)を仲介抵抗器として使用。

現在の抵抗標準システムは1997年から稼働している。1990年から1997年迄は、著者の一人である木下攘止が作製した量子ホール効果抵抗標準システムを使用していた^{18,19)}。測定装置は現在のCCC bridgeとほぼ同じ原理で動作するCCC bridgeと直流電流比較器を用いた抵抗比測定装置(DCC bridge)で、測定手順も多少異なり公称 $1\ \Omega$ と $10\text{k}\ \Omega$ 標準抵抗器の抵抗測定の相対的不確かさは約 3×10^{-8} であった。

先に物理量の測定には基準と測定装置が必要であると書いたが、抵抗測定にはこの他に仲介用に標準抵抗器が通常必要である。電総研で所有する標準抵抗器で最も数が多いのは1960年代後半から1970年代に掛けて製作された横河電機製2781型標準抵抗器である。2781型標準抵抗器は抵抗線材を密閉した缶の中に入れた二重壁型で、殆どが公称値 $1\ \Omega$ 、 $10\ \Omega$ 、 $100\ \Omega$ 、 $1\text{k}\ \Omega$ 、 $10\text{k}\ \Omega$ である。1980年代まで抵抗標準を担当していた村上氏が総数100個弱の中から選別した抵抗器の中には経時変化率が $1 \times 10^{-7}/\text{年}$ 以下の物がある^{*6}。1990年以前の抵抗標準はクロスキャパシタであった。クロスキャパシタについては本特集の静電容量の項で詳しく説明されると思うので、詳細は省略する。クロスキャパシタが使用される前は長さ太さ等の形状を精密に作ったガラス管内の水銀の抵抗値(水銀抵抗原器と呼ぶ)を基準にしていた。記録が散逸しているため詳しい事は判らないが、第二次世界大戦以前にドイツのPTRから送られた水銀抵抗原器が残っている^{*7}。測定は困難で精度もそれ程高くないクロスキャパシタや水銀抵抗原器を基準とし、相互比較等の手法も併用し安定な抵抗器を選別した先人の努力には頭が下がる。

4. 抵抗標準の今後

抵抗標準の今後の展開についても簡単に触れる。今後の展開が必要な分野は抵抗標準の維持・供給に関係した分野、量子ホール効果に関係した分野、他の標準と関係した分野の三分野に大きく分けることが出来る。勿論三分野は相互に関係しているが、一応別々に説明する。

- *5 測定の不確かさが多少増えるが公称 $1\ \Omega \sim 13\text{k}\ \Omega$ の標準抵抗器の校正が可能である。しかし、これまで公称 $1\ \Omega$ と $10\text{k}\ \Omega$ の標準抵抗器以外校正を依頼されたことは無い。
- *6 著者の経験では同型の標準抵抗器でも経時変化等の特性は個々のばらつきが大きいので、使用には十分な選定が必要である。
- *7 PTRは現在のPTBの前身。

4.1 抵抗標準の今後

現在電総研で校正している標準抵抗器は公称 $1\ \Omega$, $100\ \Omega$, $10\text{k}\ \Omega$ である。抵抗値範囲を高抵抗側へ広げるために、高抵抗用抵抗比測定装置の開発をほぼ終え、現在は高抵抗用恒温恒湿槽と高抵抗器を開発中である²⁰⁾。ここ1~2年以内に公称 $10\text{G}\ \Omega$ 以下、更に数年以内に $10\text{T}\ \Omega$ 以下の抵抗器の校正を開始する予定である。

現在の電総研のCCC bridgeの抵抗比測定の相対的不確かさは $2\sim 4\times 10^{-9}$ である。原理的にはCCC bridgeよりも低雑音の抵抗比測定装置は現時点では無いので、供給する抵抗標準の質をより良くするためには相対的不確かさが 1×10^{-9} より良いCCC bridgeを開発する必要があるだろう。

日本国内で抵抗比測定装置を自力で開発しているところは殆ど無く、市販された抵抗比測定装置を用いている^{*8)}。抵抗比測定装置の測定の不確かさの評価はISO9000の認定等に伴い、必要性が徐々に高くなっているが、残念ながら独力で適正な評価を行っている日本国内の機関は著者の知るかぎり無い。このような市販の装置の評価方法の確立は産業界への寄与は大きい。アメリカの計測器業界の集まりであるNCSLはNISTに対し毎年要望を出しているが、その中に市販の抵抗比測定装置の測定の不確かさ評価が含まれている。日本国内でも国立研究機関に対し同様の要望が今後出されると思う。

電総研から産業界へ抵抗標準を供給する場合には標準抵抗器を用いている。機器の高性能化に伴い、測温抵抗体による温度測定等分野によっては 10^{-7} 台の不確かさが必要になっている。そのためには通常半年~1年間隔で行う定期校正の間、抵抗値の変化が 1×10^{-7} 以下の標準抵抗器が必要である。先述したように、数十個から選別すれば経時変化が極めて小さい標準抵抗器を得ることは可能であるが、価格が数十万円~数百万円の抵抗器から選別するのは余り現実的ではない。線材や構造の改善により本質的に経時変化の小さい標準抵抗器の開発が必要である。国立研究機関が標準抵抗器を開発するのは難しいが、企業が開発する標準抵抗器の評価を通して開発を後援するのは可能だと思う^{*9)}。

4.2 量子ホール効果の今後

二次元伝導電子と磁場の相互関係は極めて魅力的であり、物理的には分数量子ホール効果と超伝導の関係等未だ未だ多くの課題が残っているが、著者のグループは直流低周波電気標準を担当しており、物理的な領域には深く立ち入らない事にする^{21,22)}。標準の立場から見ると、量子化ホール抵抗の普遍性の検証は極めて重要である。シリコン電界トランジスタや *GaAs/AlGaAs* 等試料依存性、ホールバーの幅長さ依存性について 10^{-9} 台の不確かさで普遍性が確かめられている²³⁾。普遍性をより高い精度で確かめるためにも相対的不確かさが 1×10^{-9} より良いCCC bridgeの開発が必要である。

SI基本標準での von Klitzing 定数 (R_K) の測定も重要な課題である。著者の一人である木下攘士等は量子ホール効果の発見直後から研究に従事してきたが、残念ながら R_K の測定値への電総研としての寄与は殆ど無い。原因は色々あるが、当時抵抗標準の基準であったクロスキャパシタを含む静電容量標準が事実上停止していた事が大きい。その後、我々のグループの中村氏が中心となって静電容量標準を建て直してきた²⁴⁾。近い将来クロスキャパシタを含む静電容量標準が再構築されると思う。その内容については本特集に報告されているので、参照して欲しい。1998年のCODATAの調整の R_K の相対的不確かさは 3.7×10^{-9} なので、今後測定するとしたら不確かさは同程度か小さくしなければならない。これは相当高い実力が必要で、近い将来に実現できるかどうか判らない。

1998年のCODATAの調整では $R_K = \mu_0 c / 2\alpha$ が成立するとした。しかし、本当に成立しているかどうかを今後も繰り返し確認することは重要である。その場合も 3.7×10^{-9} と同程度かより小さい不確かさの測定が必要で、近い将来可能かどうか判らない。

4.3 他の標準との関係

直流測定である量子化ホール抵抗から交流測定である静電容量標準への橋渡しに交流-直流差が計算可能な $10\text{k}\ \Omega$ 抵抗器を用いている。この抵抗器は抵抗線材の形状や遮蔽の構造から交流-直流差を計算している

* 8 量子ホール効果を研究している学習院大学の川路先生のグループ等では高精度の測定のために自力開発したCCC bridgeを使用している。

* 9 オーストラリアの国立標準研究所(CSIRO-NML)では高性能の $1\ \Omega$ 標準抵抗器を開発した。抵抗線材のNiCr合金は市販品を購入しているが、線材の加工から熱処理、標準抵抗器の設計・製作を独力で行った。開発には約20年掛かったとの事である。

が、直径約20 μm の極めて細い線材を用いており機械工作精度が必要で設計通りに製作されているか、製作後大きく変形していないか等が常に問題になる。この問題を避けるために、量子化ホール抵抗を交流で測定する試みが幾つかの国立研究所で行われている²⁵⁻²⁷⁾。交流測定をAC量子ホール効果と呼ぶが、AC量子ホール効果が直流量子ホール効果と同様ならAC量子化ホール抵抗を基準に静電容量標準を組み立てる事ができる。常温と1K以下の極低温との間で電気測定を行うためには色々なテクニックが必要であるが、AC量子ホール効果は必要な研究課題である。

SIの基本単位の一つであるキログラム(kg)は現在では唯一キログラム原器という「物」に依存している。これを電磁気の実用的な標準から決める試みが"replacing the kg"と称して行われている。現時点で最も有望な方法はアメリカのNISTとイギリスのNPLで行われているワットバランス法である^{28,29)}。NISTのワットバランス法の測定は既に何回か報告されており、不確かさが次第に改善されている。最終的には不確かさは 1×10^{-7} 程度以下になると言われている。NPLの測定の不確かさも同レベルになるだろうと言われており、replacing the kgが現実となる可能性が高い。計量研でも磁気浮上法が研究されているが、初代のシステムが稼働してから既に20年以上経つにも関わらず、部分的な改良の繰り返しで著者の知る限り完結した測定結果は一度も報告されていない。

2001年度に実施予定の独立行政法人化に伴い、計量研を中心に物工研と資環研と電総研の標準関係を統合し計測標準領域が発足する予定である。毛利元就の「三本の矢の教え」にもあるように、一つに束ねることにより力がより効果的に発揮できると言われているが、新組織でも同じように上手く行くかどうかは、これからの課題であることは言うまでもない。そのためには必要性・重要性に応じた研究資源の配分が大切である。最初に述べたように、測定は日常生活に必要な不可欠であり自然発生的に生まれ長い歴史を持つ。必要な物理量を必要な精度(不確かさ)で測定すると言うことは極く当たり前であるが、この極く当たりの事を当たり前に行うと言うことが本当は最も必要であり重要だと思う。電総研の抵抗標準の歴史でも、村上氏の退職後著者の一人である木下攘止が担当する迄の間、抵抗標準が決められた手順で供給されていたか

どうか資料が散逸している事もあり、定かではない。この事から、何時でも必要な時に抵抗を測定する/出来ると言うことは、簡単なようで意外と難しく誰でも出来る事ではないと言えるだろう。量子化ホール抵抗の普遍性の検証、von Klitzing定数や微細構造定数の測定、replacing the kg等はこの当たり前の事が当たり前に行われていて初めて可能になると思う。我々のグループ、温度など国立研究所の他の部門、産業界、物理化学の実験等で必要な精度、必要な抵抗値を必要とされる時に測定できる事が実は最も大切だと思う。そのために必要な研究を今後も続けていきたい。

謝辞

直流低周波電気標準の研究全般に渡り議論から予算獲得迄広範に支援していただいた遠藤忠基礎計測部長に感謝します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 遠藤忠：「電磁気量標準の成り立ち」, 日本物理学会誌, **54(10)** (1999) 787-792.
- 3) 大苗敦, 池上健：「周波数(波長)標準と物理学の出会いと」, 日本物理学会誌, **54(10)** (1999) 781-787.
- 4) 清水忠雄：「標準研究の現状と問題点」, 日本物理学会誌, **54(10)** (1999) 827-829.
- 5) 遠藤忠：「電気標準の変遷」, 電学誌, **120(1)** (2000) 31-34.
- 6) 高田誠二：「単位と単位系」, 共立出版 (1980).
- 7) 櫻井弘久：「温度とは何か」, コロナ社 (1992).
- 8) 中山貫：「単位は量である」, 日本物理学会誌, **55(3)** (2000) 222.
- 9) 工業技術院計量研究所, 日本規格協会訳編：「国際単位系, 国際文書第6版(1991年)日本語版」, 日本規格協会, (1992).
- 10) 国立天文台編：「理科年表」, 丸善, 毎年発行.
- 11) K. v. Klitzing, G. Dorda and M. Pepper : Phys. Rev. Lett., **45** (1980) 494.
- 12) B.N.Taylor and T.J.Witt : "New International Electrical Reference Standard Based on the Josephson and Quantum Hall

- Effects", Metrologia, **26** (1989) 27-62.
- 13) P.J.Mohr and B.N.Taylor : "Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 1998", to be submitted.
- 14) A.Hartland : "The Quantum Hall Effect and Resistance Standards", Metrologia, **29** (1992) 175-190.
- 15) F.Delahaye : "Present State of Quantized-Hall-Resistance Metrology", Metrologia, **25** (1988) 73-79.
- 16) M.Nakanishi, J.Kinoshita and T.Endo : "Improvement of a Quantized Hall Resistance Standard at Electrotechnical Laboratory", to be submitted to Japanese journal of Applied Physics.
- 17) M.Nakanishi, J.Kinoshita and T.Endo : "Estimating Uncertainties of a Resistance Ratio Bridge based on a Cryogenic Current Comparator", to be submitted to Japanese journal of Applied Physics.
- 18) "Measurements of the Quantized Hall Resistance at ETL", IEEE Trans. Instrum. & Meas., **40(2)** (1991) 249-252.
- 19) "Self-Balancing Resistance Ratio Bridge Using a Cryogenic Current Comparator", IEEE Trans. Instrum. & Meas., **38(2)** (1989) 290-292.
- 20) J.Kinoshita and M.Nakanishi : "High value resistance standards at ETL", to be presented at CPEM2000.
- 21) B.I.Halperin : "The Quantized Hall Effect," 別冊日経サイエンス「凝縮系の物理」(1997) 84-94.
- 22) S.Kivelson, D.H.Lee and S.C.Zhang : "Electrons in Flatland", 別冊日経サイエンス「凝縮系の物理」(1997) 150-157.
- 23) B. Jeckelmann, W. Fasel and B. Jeanneret : IEEE Trans. Instr. & Meas. **44** (1995) 265.
- 24) Y.Nakamura et.al, to be presented at CPEM2000.
- 25) B.M.Wood, A.D.Inglis, M.Cote and R.R.Young : "Improved AC Quantized Hall Measurements", IEEE Trans. Instrum. & Meas., **48(2)** (1999) 305-308.
- 26) S.W.Chua, A.Hartland and B.P.Kibble : "Measurement of the AC Quantized Hall Resistance", IEEE Trans. Instrum. & Meas., **48(2)** (1999) 309-313.
- 27) F.Cabiati, L.Callegaro, C.Cassiano, V.D'Elia and G.M.Reedtz : "Measurements of the AC Longitudinal Resistance of a GaAs-AlGaAs Quantum Hall Device", IEEE Trans. Instrum. & Meas., **48(2)** (1999) 314-318.
- 28) R.L.Steiner, D.B.Newell and E.R.Williams : "A Result from the NIST Watt Balance and an Analysis of Uncertainties", IEEE Trans. Instrum. & Meas., **48(2)** (1999) 205-208.
- 29) I.A.Robinson and B.P.Kibble : "The NPL Moving-Coil Apparatus for Measuring Plank's Constant and Monitoring the Kilogram", IEEE Trans. Instrum. & Meas., **46(2)** (1997) 596-600.

関連ラボ

電子計測第3ラボ

(Electronic Metrology Lab.)

研究項目及び研究期間

量子電気標準及び低周波電気標準の高度化の研究
(平成6年度～11年度)

新しい直流・低周波電気標準の開発及び高度化の研究

(平成12年度～17年度)