IV. 計 測

——計測技術の現状と将来——

正 員 横 島 一 郎 (計測技術委員会委員長)

1. ま え が き

計測は“対象から客観的な情報を抽出する行為”と考えられ、科学・技術の分野はもとより、すべての人間活動における基盤技術である。近年の自然科学の発達と電子技術の進歩は、計測技術にも極めて大きな影響を及ぼしている。ところで計測には、人間の感覚器官による観察から、高度の計測機器を用いた精密計測に至るまで幅広い技術が存在する。各分野における計測技術については、分野ごと記述されると考えられるので、ここでは共通的な事項として単位系と計測標準、電子計測技術および今後の課題について述べる。

2. 単位系と標準

2.1 国際単位系 (SI) ⁽¹⁾

計測の基本は対象とする現象を量として表すこと、すなわち定量的な測定である。定量的な測定は対象となる量の単位を定めて、その単位の何倍かを数値で表すことである。単位の国際的な統一を目的として、我が国を含む47箇国が加盟しているメートル条約の下に国際度量衡総会 (CGPM)，その下部機関としての国際度量衡委員会 (CIPM)，また事務局として国際度量衡局 (BIPM) が設けられている。

1960年のCGPMにおいて国際単位系 (Le Systeme International d'Unites', 略称 SI) が採択された。SI単位系は、基本単位、組立単位、補助単位 (ラジアン、ステラジアン) および10の整数乗倍を表す接頭語から構成されている。基本単位には、現在、表1に示す7つの単位が定められている。

2.2 基本単位に関する標準の動向⁽¹⁾

(1) 時間と周波数 基本単位の中で最も精度の高い標準が実現されている量は時間 (秒) である。単

表 1 SI 基本単位

量	名 称	記 号	定 義
長 さ	メートル	m	(a)
質 量	キログラム	kg	(b)
時 間	秒	s	(c)
電 流	アンペア	A	(d)
温 度	ケルビン	K	(e)
物質質量	モ ル	mol	(f)
光 度	カンデラ	cd	(g)

- (a) メートルは、1秒の299 792 458分の1の時間に光が真空中を伝わる行程の長さである。
- (b) キログラムは質量の単位であって、それは国際キログラム原器の質量に等しい。
- (c) 秒は、セシウム133の原子の基底状態の二つの超微細準位の間の遷移に対応する放射の9 192 631 770周期の継続時間である。
- (d) アンペアは、真空中に1メートル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メートルごとに 2×10^{-7} ニュートンの力を及ぼしあう一定の電流である。
- (e) 熱力学温度の単位、ケルビンは、水の三重点の熱力学温度の $1/273.16$ である。
- (f) 1. モルは0.012キログラムの炭素12の中に存在する原子の数と等しい数の要素粒子を含む系の物質質量である。
2. モルを用いるとき要素粒子が指定されなければならないが、それは原子、分子、イオン、電子、その他の粒子またはこの種の粒子の特定の集合体であってよい。
- (g) カンデラは、周波数 540×10^{12} ヘルツの単色放射を放出し、所定方向におけるその放射強度が1/683ワット毎ステラジアンである光源の、その方向における光度である。

位の定義に基づいたセシウム原子時計により 10^{-13} の精度が得られている。また、短期的には水素メーザにより 10^{-15} の安定度が得られる。更に原子時計の高精度化に関する研究が活発に進められており、セシウム原子時計についてはレーザー冷却による原子の熱運動の抑制により、 10^{-17} の精度の実現が予想されている⁽²⁾。

(2) 長さ 長さの単位メートルの定義は、上記のような高精度の時間標準と周波数安定度の極めて高いレーザーの出現を基盤として1983年より、真空中の光速に基づく定義に変更された。すなわち、光速が299,792,458 m/sと定義されたことになる。現状における長さの単位の実現精度はレーザー周波数の安定度に

IV. Instrumentation and Measurement — Review of Measurement Technology. By Ichiro Yokoshima, Member (Chairman of The Technical Committee on Instrumentation and Measurement).

キーワード：計測、電子計測機、計測標準、SI単位、センサ

制約されて、約 10^{-10} である。この新しい定義により、長さの測定手段として適切な波長の電磁波を用いれば、その測定精度を周波数の測定精度まで向上できる可能性が与えられたことになった。

(3) 質量 質量の単位は唯一、物質標準であるキログラム原器により定義されている。これは原器自体が安定であり、天秤の比較精度が 10^{-9} に及ぶことに起因している。しかし、物質標準は損傷や摩耗による変化の可能性などの本質的な問題がある。そこで、原子標準や基礎定数に基づく標準を目指して、シリコンの密度からアボガドロ定数を定める研究や、電流の定義に結びつけるための研究が進められている。

(4) 電気量⁽³⁾ 電流の単位アンペアの定義は、もとより真空の透磁率を $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ と定めたことによる。この定義に基づいて単位を実現する絶対測定には極めて高度の技術を必要とする。そこで、従来、各国における絶対測定結果に基づいて、BIPM に保管されている標準電池と標準抵抗の値が基準として用いられてきた。その後、発明されたクロスキャパシタを用いて直流抵抗が 10^{-8} 程度の高精度で測定されるようになった。また、1962 年 Josephson により予測されたジョセフソン効果を用いた電圧標準が開発され、その再現性と安定度が 10^{-8} と極めて良いことが立証された。そこで、1972 年 CIPM 電気諮問委員会 (CCE) はジョセフソン電圧標準とクロスキャパシタによる抵抗標準の採用を勧告した。その際、ジョセフソン効果における周波数と電圧の比 $2e/h$ の値を 483,594 GHz/V と勧告した。この勧告値には異論があり、これと異なる値を採用した国もあった。

更に、各国で測定された基礎定数の値の調整の結果、上記の値は SI 単位の定義に対して、約 8 ppm ずれていることが指摘され、オーストラリアおよびイギリスにおける電圧、電流の絶対測定によりこの事実が裏付けられた。また、1980 年、K. von Klitzing により、二次元伝導を示す半導体素子を極低温・強磁界下に置くと、図 1 のようにホール抵抗が量子化されて h/e^2 の整数倍となり、その値が極めて安定であることが示された。

これらの結果を受けて、CIPM は 1988 年、概略以下の内容の勧告を採択した⁽⁴⁾。

(i) ジョセフソン効果における $n=1$ でのステップに対応する電位差で周波数を割った商をジョセフソン定数 K_J で表す。 K_J の協定値 K_{J-90} の値として 483,597.9 GHz/V を採用する。

(ii) 量子ホール効果におけるプラトー $i=1$ に対応する電流でホール電位差を割った商をフォン・クリ

図 1 量子ホール効果の特性

ツィング定数 R_K で表す。 R_K の協定値 R_{K-90} の値として 25,812.807 Ω を採用する。

(iii) 上記の値は 1990 年 1 月 1 日から採用し、それ以前には使用しない。

SI 単位の定義に対して、 K_{J-90} の不確かさは 4×10^{-7} 、 R_{K-90} の不確かさは 2×10^{-7} とされている。

(5) 温度 基本的には熱力学的温度目盛が定義されている。実用的見地から、複数の温度定点と標準温度計による補間方法が定められている。1968 年以来、国際実用温度目盛 IPTS-68 が用いられてきた。その後の研究結果に基づいて、1990 年より国際温度目盛 ITS-90 の使用が勧告されている。

3. 電子計測技術の動向

3.1 概要

計測の過程には、対象からデータの取得、そのために必要な対象および計測機器の制御、データや制御信号から所望の情報を得るための演算、得られた情報の表示・記録などが含まれる。初期の計測では、これらの計測過程はすべて人間の作業に委ねられていた。ところが電子技術、特に計算機をはじめとするデジタル技術の発達により、計測過程の機械による自動化が可能となった (図 2 参照)。更に、従来では想像できなかった高度の計測が実現されている。

3.2 基本的な電子計測機器

最近の多くの分野における計測は、何らかのセンサにより測定量を電気信号に変換して、その電気信号を測定する方法がとられている。そのため電圧、電流、電気抵抗、周波数などの測定機や発振器などは、すべての分野で共通的に用いられる汎用的・基本的な計測機器であり、その生産台数も他の電子計測機器よりはるかに多い。これらの電子計測機器の最近の特徴は、

図2 電子計測システム概念図

各種の技術開発ニーズを背景に、最新のマイクロコンピュータ、ADコンバータなどのデジタル回路技術、マイクロ波回路技術などを採用して周波数範囲の拡大、高速化、高分解能化、多機能化がますます進んでいる。以下、最近のトピックスについて述べる。

(1) デジタルマルチメータ (DMM) 直流電圧・電流・抵抗、交流電圧・電流を測定できるDMMは最も広く用いられている電子計測器の一つである。上述の電気標準の進歩ともあいまって、6けたのDMMの需要が延びていると言われており、8 1/2桁の高分解のDMMが市販されている。

(2) 波形計測機器 様々な現象の時間的な経過を測定するオシロスコープも汎用性の高い測定機である。この数年オシロスコープのデジタル化が急速に進み、1989年には、いわゆるデジタル・ストレージ・オシロスコープの占める割合が50%を超えている。このデジタル方式の特徴は単発現象の観測と周波数分析などのデータ処理の容易さにある。現在、周波数帯域幅が500 MHzに相当する単発現象を観測できる製品が得られている。今後、ADコンバータの進歩とあいまって、更に高速化、高分解能化が進むものと考えられる。

アナログオシロスコープについては、超高速デバイス技術や光技術の開発に合わせて、ジョセフソン効果を利用した分解能5 psのサンプリングオシロスコープ、ストリーク管を用いた分解能2~10 psの光オシロスコープなど超高速の製品が市販されている。前者については将来0.1 psの分解能も可能とされている。

(3) 広帯域計測機器 ミリ波帯の計測器は従来、導波管系用に限られていた。ところがこの数年間、細径同軸線路と精密同軸コネクタの開発が進められ、Kコネクタ(40 GHz以下)、APC 2.4コネクタ(50 GHz以下)、Vコネクタ(60 GHz以下)などの直流からミリ波まで使用できる同軸コネクタが相次いで出現した。これらの同軸コネクタを用いて40 MHz~60 GHz帯用ネットワークアナライザなどの超広帯域計測機器の開発が進められている。

(4) 多機能化 安価なマイクロコンピュータと各種の小形部品の発達により、ソフト、ハードの両面から計測器の複合化・多機能化が進んでいる。これは単機能多品種より、多機能少品種の生産が経済的に有利と考えられていることによる。各種のデータ処理機能を搭載したいわゆるスマート計測器を始めとして、DMM、波形観測とスペクトル分析のできるデジタルオシロスコープ、更に複数の高感度ベクトル受信機をもつスペクトル・ネットワークアナライザなどが出現している。複数のAD・DAコンバータをもつ小形の計測機は、一種の汎用測定機である。ADコンバータの高分解能化、高速化により高周波領域の計測器の多機能化が進むものと予想される。

3.3 センサ⁽⁵⁾

センサは測定対象となる量を電氣量に変える変換器と考えられる。センサには測定対象からの放射などを検出する受動センサと対象になんらかの信号を送り、その反応を検出する能動センサがある。能動センサに用いられる信号源としては、特にコヒーレント電磁波源の役割が大きい。レーザの発達によりその発振波長域はX線領域にまで達しようとしている。また、紫外線からX線領域の強力な線源としてSOR(シンクロトロン軌道放射光)が注目されている。

センサの種類としては、SQUID(superconducting quantum interference device)、STM(scanning tunneling microscope)、バイオセンサ、光ファイバセンサなどの新しい現象を用いたセンサや、CCDセンサやインテリジェントセンサなどの高密度集積化半導体技術を用いたICセンサなど、従来になく高感度・高分解能のセンサが出現している。

3.4 計測システム^{(5)~(7)}

多様化・高度化する社会の情報ニーズを受けて、計測のシステム化が進んでいる。計測システムは次のように分類できる。

- (1) 多次元計測システム
- (2) 多項目計測システム
- (3) 大規模計測システム

多次元計測はレーダ、CT、STM(走査形トンネル顕微鏡)などに見られるように、測定対象量の空間的、時間的、あるいはその他のパラメータに対する分布を測定し、所望の情報を抽出するシステムである。通常、得られた分布を画像として表示させ、画像計測、パターン計測とも呼ばれる。

多項目計測システムは、LSIテストのように測定対象の各種のパラメータを同時に、または時系列的に測定するシステムである。

大規模計測システムには、製造工程の制御・監視システムから、VLBI（超長基線長電波干渉計）、GPS（全世界測位システム）、気象観測網、地震予知観測網など地球の宇宙的規模のシステムが出現している。

これらの計測システムに共通する基盤技術は計算機による大容量のデータ処理と制御技術である。更に加えて、通信技術（長距離信号伝送技術）や人工衛星などの宇宙技術の発達に負うところが大きい。また、VLBI、GPS、STMなどは、第2章で述べた時間（周波数）および長さの測定精度の向上と単位系の進歩の直接的な成果と言える。

ところで、計測システムは多くの場合複合的な形態をとる。例えば、さきごろ海王星の観測に大成功を収めたボイジャー2号は、多項目計測用複合センサとしての衛星本体、データ伝送および制御用通信系、鮮明な画像を再生させるデータ処理系などから構成される史上最大の空間的広がりをもつ計測システムである。

4. 今後の課題

物理的過程および数学モデルが明確な現象に関する量を空間の一点で測定する場合には、精密な測定が実現可能である。ところが、空間的に広く分布したり時間的に複雑に変動する量や人間の感性に依存する量、異常状態の検出などのモデル化の困難な複雑な状態の計測や認識は困難を伴うことが多く、今後の研究課題である。具体的には、例えば大気圏や海洋などの地球規模の計測、EMCに関連する電磁環境計測、臭覚や味覚などの感覚量計測などが挙げられる。

多次元計測、特に不可視状態の可視化によって得られる画像情報は、機械による自動化が困難で人間による各種の調整や認識、診断を必要とする場合に極めて有用である。従来、計測が困難であった現象の計測技術の第一段階として、まず可視化技術が開発されるものと考えられる。またこれに関連して、いわゆるuser friendly interfaceの発達が目覚ましいところから計測技術の立場からも、かかるマンマシンインタフェースについて更に注目して行く必要がある。

計測技術の基盤である単位系と標準に関しては、前述の時間標準や質量の原子標準化をはじめ、諸量の標準の研究が、各国の国立研究所を中心に進められている。一方、国内における標準のトレーサビリティ体制の整備は着々と進められてきたが、未踏分野での新たな体制作りは経済的、社会的制約から次第に困難となりつつある。今後、社会体制と技術の両面からトレーサビリティ体制のあり方について検討する必要がある。

ところで、計測工学という名称がしばしば用いられるが、工学としての体系化は必ずしもなされていない。最近、計測の本質に関する論文が提出され、計測工学としての研究の必要性が指摘されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。現在の計測に関する教科書は、各分野で用いられる技術の各論に終始している場合が多い。計測を横断的に把握できる体系化は、計測技術の進展の基盤を与えると共に、技術変動が大きい時代における学生教育の観点からも重要であろう。今後、計測の体系化に関する研究が更に進展することを切望する。

5. あとがき

計測技術委員会では上記の課題について調査専門委員会により逐次調査を進めている。計測はすべての分野に関連するところから、課題ごとに関連分野との関係の基に調査研究を進める必要がある。今後とも、関係諸氏の御指導、御協力をお願い申し上げる。

（平成元年10月11日受付）

文 献

- (1) 国際単位系，国際文書第5版（1985年）日本語版，計量研究所編，日本計量協会発行（昭62）
- (2) 中段：「時間・周波数標準の新しい展開」，計測と制御，28，431（平元-5）
- (3) 電気・電子標準と校正システム調査専門委員会：「電気・電子標準と校正システム」，電気学会技報（I部），No.146，p.1（昭62）
- (4) 根本：「電気単位の現示方法の変更と電気基礎標準」，電気学会研究会資料，IM-88-29（平元-8）
- (5) インテリジェントセンサシステム調査専門委員会：「インテリジェントセンサシステムの現状と展望」，電気学会技報（II部），No.272（昭63-6）
- (6) マイクロ波装置調査専門委員会：「マイクロ波装置とデバイスの技術動向」，同上，No.279（昭63-8）
- (7) 海洋計測技術調査専門委員会：「海洋計測技術の現状と将来動向」，同上，No.293（平元-3）
- (8) 北森：「計測の本質と計測工学」，計測と制御，26，145（昭62-2）
- (9) 小林：「計測の数理的基礎」，電気学会100年史，p.217（昭63）

横 島 一 郎（正員）

昭和11年3月1日生。34年3月電気通信大学電波工学専攻卒業。同年通産省電気試験所（現在，電子技術総合研究所）入社。平成元年4月電気通信大学電子工学科教授。工学博士。主として，マイクロ波，ミリ波，光領域の計測技術と標準の研究に従事。IEEE，電子情報通信学会会員。