ISSN 2189-6097

産総研 LINK

技術を社会へつなげるコミュニケーション・マガジン

11
2018
NOVEMBER

NO.21

CROSS LINK P02

国際単位系の定義改定に
産総研が総合力で貢献

単位の基準は
原器から物理定数の時代へ

Takashi Usuda / Kenichi Fujii / Akiko Takatsu
Yoshiro Yamada / Nobu-Hisa Kaneko

NEW TECHNOLOGY P08

科学を支える「はかる」技術
～フロントランナーたちの活動を紹介します～

環境レベルの放射線を
正確にはかる
Tadahiro Kurosawa

タンパク質、アミノ酸を
高精度に測定する
Megumi Kato

シリコンウエハの厚さを
非接触で精密測定
Akiko Hirai

高精度で安定性の高い
量子電圧源を開発
Michitaka Maruyama

単位の基準は原器から物理定数の時代へ

国際単位系の定義改定に産総研が総合力で貢献

計量標準総合センター
工学計測標準研究部門
首席研究員
藤井 賢一
Kenichi Fujii

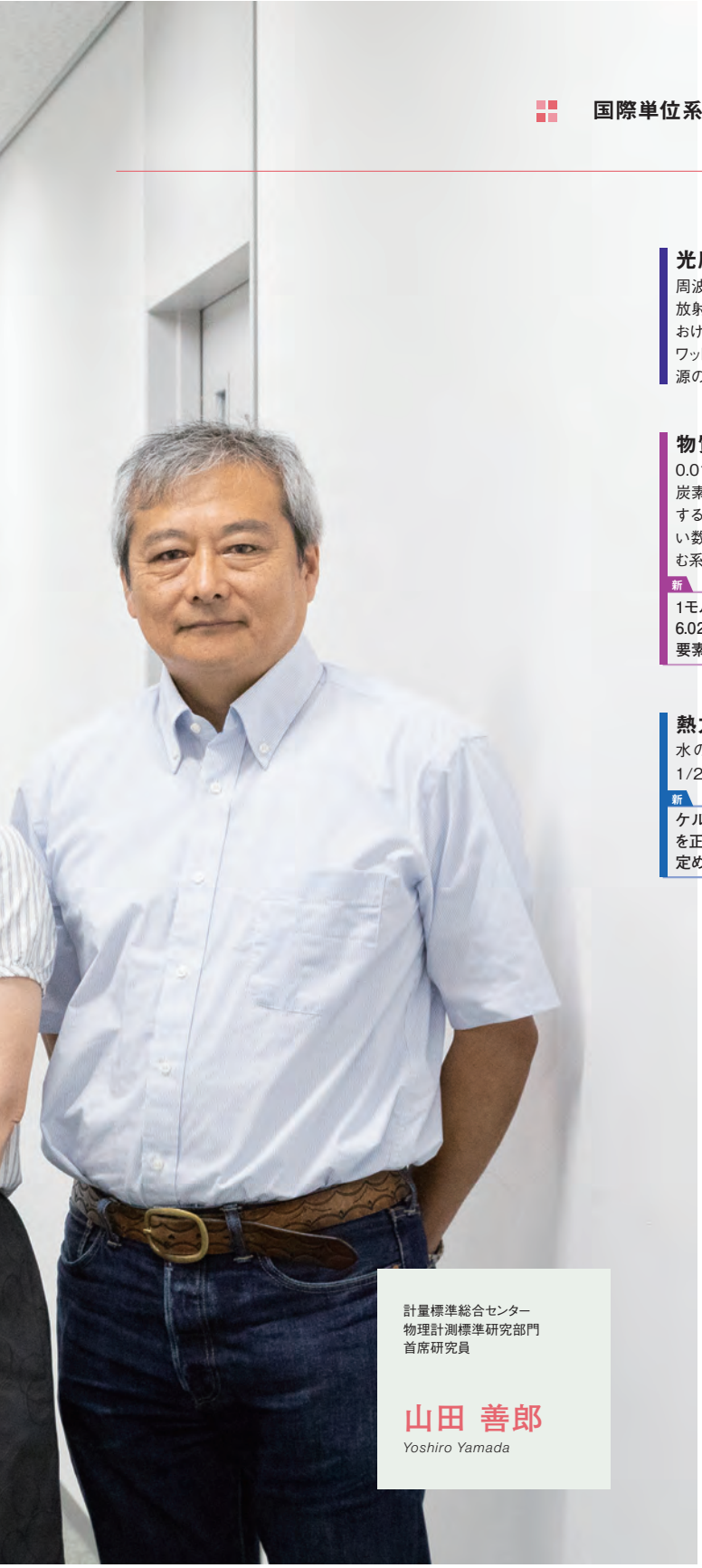
計量標準総合センター
物理計測標準研究部門
首席研究員
金子 晋久
Nobu-Hisa Kaneko

計量標準総合センター
総合センター長
国際度量衡委員
臼田 孝
Takashi Usuda

計量標準総合センター
物質計測標準研究部門
研究部門長
高津 章子
Akiko Takatsu

KEY POINT

2018年11月、国際単位系(SI)(*1)の7つの基本単位のうち、4つの単位質量(キログラム:kg)、温度(ケルビン:K)、電流(アンペア:A)、物質量(モル:mol)の定義が改定される。このうち質量の定義改定に、産総研の計量標準総合センター(NMIJ)が直接的な貢献をした。単位の定義改定とはどのようなもので、日常生活や未来の社会にどのような影響があるのだろう。国際度量衡委員を務めるNMIJセンター長と、NMIJでそれぞれの定義改定にかかわるリーダーたちによる座談会を開催した。



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

山田 善郎
Yoshiro Yamada

光度: カンデラ
周波数540テラヘルツの単色放射を放出し、所定の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。

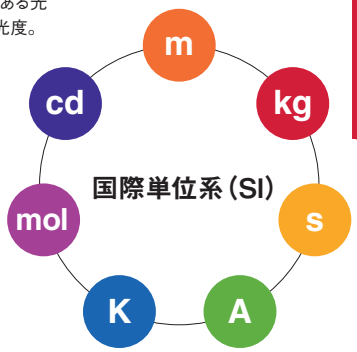
長さ：メートル
1秒の299 792 458分の1の時間に光が真空中を伝わる行程の長さ。

質量：キログラム
単位の大きさは国際キログラム原器の質量に等しい。

新
キログラムは、プランク定数 h を正確に $6.626\,070\,15\times10^{-34}$ J s と定めることによって設定される。

物質量：モル
0.012 キログラムの炭素 12 の中に存在する原子の数に等しい数の要素粒子を含む系の物質量である。

新
1モルは正確に $6.022\,140\,76\times10^{23}$ の要素粒子を含む。



時間：秒
セシウム133の原子の基底状態の二つの超微細構造準位の間の遷移に対応する放射の周期の 9 192 631 770倍の継続時間。

熱力学温度：ケルビン
水の三重点の熱力学温度の1/273.16。

新
ケルビンは、ボルツマン定数 k を正確に $1.380\,649\times10^{-23}$ J/Kと定めることによって設定される。

電流：アンペア
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。

新
アンペアは、電気素量 e を正確に $1.602\,176\,634\times10^{-19}$ Cと定めることによって設定される。

国際単位系の成り立ちと産総研の役割

臼田　2018年11月、国際単位系(SI)の7つの基本単位のうち、質量、温度、電流、物質量の4つの単位の定義が改定され、より高精度な定義が実現する見込みです。そして、私たち産総研の計量標準総合センター(NMIJ)もこの改定に大きな貢献をしています。そこで今回は、この4つの単位の日本の計量標準を支える皆さんにお話をいただこうと思っていますが、まずは私から基本的なことをまとめておきます。

今では当たり前の話ですが、単位は、ものづくりや商取引などあらゆる産業の根幹です。したがって、国際社会においては統一された単位を共有することが非常に重要となります。18世紀後半に、フランスでこの「単位を統一する」という発想が生まれ、それが各国に広がって1875年にメートル条約が締結されました。同年、国際単位系を維持管理する中立的な国際機関「国際度量衡局(BIPM)」も発足し、ここが単位の参照基準となるメートル原器やキログラム原器を管理することになりました。当時はこの原器が単位の唯一絶対の基準でしたが、計測技術の向上に伴い、次第に「原器」という器物を単位の基準とすることに限界が訪れ、長さの基準は1960年代には光の波長に、後には光の速さという物理定数(*2)を用いたものに変わりました。そして今年、いよいよ質量も、原器から物理定数を用いた基準に変わることになりました。

日本の計測技術の研究開発と計量標準の整備・維持・供給というミッションをもつNMIJは、1903年に前身の中央度量衡検定所が開所して以来、計量標準を支えるという役割に加え、これら国際的な単位の基準づくりにも積極的にかかわってきました。そして今回は、ついに質量の定義改定に大きな役割を果たすことができました。この辺は藤井さんに話をしてもらいましょう。

定義改定の意義
短期的・直接的意義
●原器が不要になる（不変性の向上、技術さえあれば誰でも実現が可能に、定義と実現の明確な分離） ●精度が高まる（同じ精度であればコストが下がる）
中長期的効果
●精度が高まるということはリソースが増えるということ（今までは誤差として捨てていたものが利用できる） ●精度が高まれば必ずそれを利用するビジネスが生まれる（例：原子時計によるGPSの実現）

質量単位の定義改定に貢献

藤井　私が質量の定義改定を意識したのは1983年、まだ産総研がなく、NMIJが計量研究所として独立していた時代のことです。就職の面接に来た私は、X線を使ってシリコン結晶の原子間距離を正確に測っているという話を聞きました。この時点でNMIJはすでにキログラムの定義改定に向けた研究を開始していて、そのためにアボガドロ定数（*3）の測定に着手していました。入所後は水の密度の絶対測定などを担当しましたが、1988年から高純度のシリコン結晶球の密度測定を開始し、私もアボガドロ定数の測定を始め、それ以来質量の単位の定義を変えるための研究を続けています。

臼田　SIの定義の中で、現在も原器が残っているのは質量のキログラムだけですね。

藤井　その理由は白金イリジウム合金製の原器の安定性が非常に高く（1億分の5）、20世紀の技術革新をもってしても、その安定性を超えられなかったからです。基礎物理定数に基づいてキログラムを再定義するためには、アボガドロ定数を高い精度で決定する必要があります。このとき必要なのが個々の原子が理想的に配置されている「完全結晶」です。このような結晶の作製に適している物質がシリコンでした。しかし、自然界で得られるシリコンから作製した結晶には限界があり、得られる測定精度は1億分の20程度だったので、定義改定には十分ではありませんでした。その時の気持ちを正直に言うと、自分が生きている間の改定は無理だと思っていました。1889年以来変わることのなかったキログラムの定義を改定するということはメトロロジー（metrology: 計量学）における永年の「夢」だと考えられていたのです。

臼田　それがいつ変わったのでしょうか?

藤井　状況が変わったのは2004年です。自然界のシリコンには複数の同位体が混ざっているため、そのままではシリコン原子1個当たりの質量を正確に決めることができないのです。そのため、シリコン28のみを濃縮して高純度の結晶をつくる国際プロジェクトが発足しました。巨費を要する困難な研究でしたが、同位体濃縮が実現した結果、1 kgのシリコン球に含まれる原子の数を正確に数えることによって、原器の安定性を超える精度でのアボガドロ定数の測定が実現しました。同じ頃、プランク定数（*4）を正確に計測する研究も海外で進み、最近、両者の結果が整合するようになって、いよいよ定義の改定に至ったわけです。この国際プロジェクトをドイツやイタリアなど海外の研究機関と協力しながら進めることによって、日本は初めて、直接的にSIの定義改定に貢献できたのです。夢の実現と言っても過言ではありません。

（キログラム原器を4K映像でご覧いただけます。
YouTube 産総研広報「日本国キログラム原器紹介」）

物質量測定もグローバルに共通化される時代

臼田　高津さんにはちょっと難しい物質量の話をお願いします。

高津　「モル」は、物質内の原子や分子の個数に関連した物質量の単位です。化学の授業で最初に学習するものなのですが、日常生活で耳にすることはまずありません。このモルの定義は、現在は質量にリンクしているため、質量の定義改定に伴って、こちらもアボガドロ定数を用いたものに変わります。

私自身は産総研の前身である工業技術院の化学技術研究

所で生化学標準物質の開発という研究で仕事をスタートさせましたが、2001年に産総研が発足し、物質量の標準もNMIJに組み込まれたことがターニングポイントとなりました。メートル条約のもとで物質量に関する諮問委員会ができ、生体試料や環境試料中の成分分析に関する国際比較実験に参加したとき、結果が予想よりはるかによく一致していたことに驚き、化学分析も計量的スタンスで論じられることを再認識しました。

臼田　はかる基準を必要とするコミュニティの大きさによって、その重要性は変わってきます。長さは、あらゆるところで使われるので、昔から単位の高精度化への要請が高く、以前から研究の国際分業が進んでいます。物質量についても、元素や化合物の量や濃度が生活や社会に大きな影響をもつようになったことから、精度への認識が高まり、海外との同等性が求められるようになりました。

高津　単位の定義の改定は、社会からの要請があっても、それを実現する技術がなくてはできません。物質量についても、計量技術の進展が改定につながった重要な要素といえます。

温度の定義は“水の三重点”から物理定数へ

臼田　温度に関しては山田さんからお願いします。

山田　温度の単位ケルビンは、現在は「水の三重点」(*5)により定義されていますが、今後はボルツマン定数(*6)に基づいた定義に変わります。キログラム原器から物理定数に基づいた定義に変わる質量と同様、温度の定義も水という物質を離れ、物理法則を使うようになるわけです。

とはいえ、定義が変わっても私たちの生活は変わりません。私たちが日常的に使っている「温度」はケルビンの定義に基づいていないためです。ケルビンに基づいて温度をはかるには大規模な設備が必要で、日常的にはかることはできないのです。しかし、今回の改定は、将来的にケルビンの定義に基づいた高精度な温度測定を進めていくための1ステップとして位置付けられるでしょう。

臼田　山田さんが今取り組んでいることはどんなことですか?

山田　私は以前、民間企業で鉄鋼製造プロセスの研究のために温度計測をしていましたが、温度には“質量をはかるときの分銅”にあたる基準がなく、再現性の難しさを感じていました。そこで温度の基準として金属の凝固温度などを用いていましたが、1000℃以上の高温の場合、指標がなかったのです。入所後はその問題を解決しようと、高温域の温度定点の開発に取り組んできました。

臼田　今後は山田さんの手がける高温域の温度標準の世界が、この分野のリーディングエッジになるでしょうね。

山田　入所当時は、ケルビンの定義の改定についてまだ議論も始まっていませんでした。今回の温度の単位の定義改定には惜しいところで間に合いませんでしたが、これからの高温域の標準設定では私たちの技術が生かせると期待しています。

電気標準もSIに仲間入り

金子　私のバックグラウンドおよび現在につながる興味は固体中の電子の動きや相互作用です。さらに私の前の職場には、量子ホール効果でノーベル賞を受賞したラフリン先生がいたことから、量子ホール効果の物理とその応用には特に関心がありました。そして、その量子ホール効果をもっとも産業に近いところで活用しているのが計量標準の分野で、とても興味深いと思いました。

そのようないきさつから産総研に入所し、量子エレクトロニクス

の研究をする一方で、電気関係量の標準の維持・管理にも責任をもって取り組んできました。校正証明書を初めて書くとき、緊張で手が震えたのを覚えています。

今回、いよいよ電流の単位、つまりアンペアの定義も改定されますが、これは長らく心待ちにしてきたものです。というのは、現行の電気標準は直接的にはSIに拠っていないからです。SIに定義づけられていたこれまでの電流の単位は質量と長さに紐づけられた複雑なものですが、実際の電気の世界ではプランク定数と電気素量(*7)の組み合わせを用いたより高精度の標準ができていたのです。今回、プランク定数と電気素量が定義されることによって、電気もしっかりとSIの仲間入りができるようになるわけです。

臼田　プランク定数の決定が、電気の世界でもブレークスルーになったわけですね。

金子　改定後には1秒間に流れる電気素量の数でアンペアが決まるというシンプルな定義になります。電子を一つ一つ移送するのは量子エレクトロニクスの基本回路で、単一電子トランジスタあるいは単一電子移送素子などと呼ばれていますが、私はその研究に取り組んできました。今後はその技術を利用して新しい標準に貢献できると考えています。

総合力がものをいう単位・標準の世界

山田　温度に関しては、高温域でケルビンの新しい定義に基づく測定が始まれば、いよいよNMIJが温度標準の最前線に立てるでしょう。ここに至るまで20年です。計量標準はやはり手強いですね。

藤井　質量計測の技術にも多様な分野の技術が必要で、今回、定義改定ができた背景には、高津さんのところでシリコンのモル質量や球表面の正確な測定が行えるようになったことも関係しています。私たちがプランク定数の決定につながる成果を出せたのは、NMIJの総合力があってこそだといえるでしょう。

金子　総合力ということでいえば、質量の技術は量子エレクトロニクスにも関わっています。例えばシリコン28を使うと高い性能の量子ビット(*8)を作ることができるため、今後量子コンピュータ技術が発展すればシリコン28が安価になる可能性も出てきます。「高機能」の材料が安価になれば産業応用の範囲が広がり、他分野も発展していくでしょう。標準は総合力なので、そのような他分野の発展も期待できます。

臼田　単位の限界を突破する研究は、その時々の科学の限界にも関わります。そのため、単位に関わる技術はさまざまな派生効果をもたらすわけですね。

藤井　質量の分野で標準が重視されるようになったのは、2000年頃から適合性評価を対象とした相互承認(MRA)がスタートし、各国がきちんとした標準をもつ必要性が出てきたからです。欧州ではメトロロジーが文化でもあり、どの国も科学的に磨き上げられた標準をもっています。その中で日本の標準を認めてもらうのは大変でした。

臼田　今回、日本が定義の改定に貢献できたことには大きな意味がありますね。

藤井　日本で測定した基礎物理定数の値が、SIの定義改定というかたちで欧米にも認められるようになった、ということには歴史的にも大きな意義があると思います。私たちは新しい定義をつくると同時に、それに基づく産業応用を進める立場でもあります。質量がプランク定数に基づいたものになると、これまで不可能だった微小な質量の計測が可能になります。そこに金子さん

が取り組む技術を用いれば、究極の微小質量も測定できるようになり、将来的には光技術とも密接に結びついた微小質量の基準がつくれるようになるでしょう。そういった技術ができれば、新薬の開発段階での希少かつ高価なサンプルの質量測定、3次元デバイスや薄膜のナノグラムオーダーでの評価、インクジェット1粒の質量の均一化による「ものづくり」のさらなる高度化も可能になり、産業への貢献も期待できると思います。

標準からさまざまな技術が生まれる

臼田　単位に関わる技術は、ナノテクノロジー、バイオテクノロジー等のポテンシャルを高めていきます。ところで、私たちが一次標準(*9)を維持し、定義改定のフロントランナーでいる価値は、どのような点にあるでしょうか。

金子　現在、産総研では量子ホール素子もジョセフソン素子も、単一電子移送素子もすべて自製できます。実は、これらすべてを1つの研究所でつくれるのは産総研も含め世界で2～3の研究所しかありません。これにより海外からの共同研究の依頼が大きく増え、世界的なハブになりつつある実感があります。

臼田　原器が世界で唯一の標準だった時代は終わり、技術力があれば誰でも定義をつくれるようになりましたが、高い技術力をもつことで国際的な存在感は高まるわけです。それは日本が計量標準を維持する上で大きな意義があるといえます。

高津　単位のように不変と思われるものさえ、技術が進むと、より高精度化し、変わっていきます。その時、NMIJには多様な計測の専門家がいて、研究成果を多角的に検証できるので、高精度な標準をつくるときの強みになります。これを活かして、これからも新しい技術、必要とされる標準をつくり、社会に貢献していきたいですね。

臼田　標準を必要とする技術はダイナミックに変わっていくので、標準を最先端のものとして維持すること自体が、研究開発の大きな原動力となります。単位改定に貢献できた技術はその典型例であり、そこからさまざまな派生技術が生まれ、社会や産業への波及効果も生まれ、また海外との競争力も高まります。それが計量標準の世界なのです。

■ 計量標準総合センター(NMIJ)へのお問い合わせは9ページ右下をご参照下さい。

*1　メートル法の後継として国際的に定めた単位系のこと。基本単位は7つで文中のほか長さ(メートル:m)、時間(秒:s)、光度(カンデラ:cd)がある。
*2　自然現象を記述するための物理学の法則や方程式に不可欠な定数。
*3　今回、SIが改定される前の定義は「0.012 kg の ^{12}C に含まれる原子の数」。1モルの物質に含まれる原子や分子などの数のこと。これまでの定義ではその数は明示されていないが、新しい定義ではモルはアボガドロ定数によって定義される。
*4　プランク定数と光子の振動数との積は、光のエネルギーの最小単位を表す。アボガドロ定数とプランク定数との間には厳密な関係があるので、原子の数を測る技術を使っても、プランク定数から質量の基準をつくることができる。
*5　氷、水、水蒸気が共存し熱平衡にある状態。温度0.01 ℃、圧力611.7 Paの点をいう。
*6　気体の種類に関わりなく定まる比例定数である「気体定数」をアボガドロ数で割ったもの。分子の運動エネルギーと絶対温度との関係を示す尺度となっている。
*7　電子1個または陽子1個のもつ電荷(電気量)の絶対値をいう。
*8　従来のコンピュータで用いられるビットが「0か1か」の状態をとるのに対し、量子力学的重ね合わせにより「0でもあり1でもある」状態になるビット。
*9　計測のトレーサビリティの起点となる最も上位の標準。

速報！ 国際度量衡総会において新定義採択

11月13日～16日フランス・ベルサイユ国際会議場において、第26回国際度量衡総会が開催されました。

16日には本稿に紹介したキログラムを含む基本4単位の定義改定が審議され、新定義が採択されました。すべての計量単位が原器という器物から解放される、歴史的節目となりました。今後さらなる計測技術の発展が期待されます。新定義は2019年5月20日から適用されることも併せて決議されました。

また同総会では単位の新定義の他、メートル条約加盟分担金額、国際度量衡局の活動計画なども審議され、それぞれ承認されました。詳しくは次のサイトを参照ください。

URL：https://www.bipm.org/en/cgpm-2018/

▲ 会議場における国際度量衡総会の開催風景

NEW TECHNOLOGY

科学を支える「はかる」技術
～フロントランナーたちの活動を紹介します～

計量標準総合センター（NMIJ）
分析計測標準研究部門
放射線標準研究グループ
研究グループ長

黒澤 忠弘
Tadahiro Kurosawa

環境レベルの放射線を正確にはかる

自然放射線レベルの校正を実現したγ線線量標準の開発

KEY POINT

福島第一原発の事故をきっかけに、放射線の**空間線量**のモニタリングが盛んになった。このとき重要なのは、計測された数値が信頼に足ることだ。産総研は正確な計測・校正が難しかった**低線量率の線量標準を開発**し、測定の**信頼性向上**を実現。**国際規格への提案**も進めている。

低線量率をはかれる標準がない!

2011年に起きた東京電力福島第一原子力発電所の事故以降、環境中の放射線量（空間線量）が広く意識されるようになった。事故の後はNMIJのあるつくば周辺でも空間線量がわずかに（0.05 μSv/h程度）高くなったというが、当時は市場にさまざまな線量計が出まわり、インターネット上にはどれが正しいのかわからない、ばらばらな数値の情報があふれた。そのような状況を目にした放射線標準研究グループの黒澤は、これは自分たちの出番だと考えた。

「はかる装置にとって重要なのは、計測された数値の正確性と信頼性です。そこで、校正の難しい低線量をきちんと校正できる装置の開発を始めました」

線量計の校正は、自然放射線から遮蔽された装置の中に線量計を置き、一定量の放射線を照射して線量計から得られた測定値と、照射器から出力された正しい値とのズレを見ることで行う。問題は、それまで空間線量のような低い線量率を計測するニーズがなかったため、線量計の校正装置はそこまで低い値に対応しておらず、精度の高い計測が難しかったのだ。

バックグラウンド放射線の影響を抑える

さらに問題は、もう一つあった。放射線は自然界にも存在しているので、室内にいても値はゼロにならないし、除去することもできない。そのような自然の放射線をバックグラウンド放射線と呼ぶが、これは、産総研の実験室内でも0.1 μSv/h程度測定される。

「低線量率での照射試験を行うと、照射する放射線の線量率がバックグラウンド放射線と同程度の大きさになってしまい、安定したγ線線量の測定が難しいのです。そのためバックグラウンド放射線の影響をできるだけ抑える方法を考えなくてはなりませんでした」

バックグラウンド放射線の低い環境をつくるには、鉛などで放射線を遮蔽するのが一般的だ。海外の場合、宇宙線も届かない地下800 mの炭鉱跡に試験所を設置している例もある。しかし、校正試験を行う実験室全体を鉛で覆うというのは現実的ではないし、近くに地中深く下りられる場所があるわけでもない。

そこで黒澤が考えたのが、コンパクトな照射装置をつくり、その周囲を鉛で覆う方法だ。開発には企業と共同で取り組み、3 cm厚の鉛で周囲を覆った、60 cm×50 cm×100 cmの小型装置が完成。これにより装置内のバックグラウンド放射線を0.01 μSv/h以下にまで低減させることに成功した。

γ線線量標準を、日本発の国際規格に

現在、この装置は環境レベルのγ線の国内標準として用いられ、線量計の信頼性の向上に役立てられているが、海外の標準研究所もこれに興味を示しているという。

「これまで環境線量はそれほど問題にされてこなかったのですが、原発事故のインパクトは大きく、世界的に環境モニタリングの重要性が再認識されました。しかし、やはり低線量率の計測・校正は難しく、線量計の品質保証は世界共通の課題となっています。そこで現在、日本主導でISOに新規提案を行い、国際規格化を進めています」

近年は東南アジアをはじめとする開発途上国でも医療現場で放射線診断が導入され、放射線装置の台数は増えている。しかし、線量の計測に関しては、それらの国々にはまだ標準がないため、産総研は各国の標準開発においても貢献できると考えられる。

▲ 周囲を鉛で覆いバックグラウンド放射線の影響を抑えた低線量率校正システム

「標準の世界では歴史的に欧州がとても強いのですが、産総研が先導し、アジアでの標準のコミュニティを強くすることで、アジア全体の発言力を高めていけると考えています」

線量計が正しく校正され、国内ではかられる基準が統一された状態をつくっておくことは非常に重要だ。また、世界中で原子炉が稼働している中で、各国の線量測定レベルが向上し、測定値が信頼できるものになることが安全・安心に直結する。

「この技術の国際規格化を早く実現させ、国際社会に貢献すると同時に、計測のプロフェッショナルがそろっているNMIJの存在感を広く示していきたいと思っています」と黒澤は胸を張る。

お気軽にお問い合わせください

産総研　計量標準総合センター

分析計測標準研究部門：分析・検査産業を支える国家計量標準の整備・普及と先端計測・評価技術の開発

〒305-8563　茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第3

029-861-4346（計量標準調査室）

https://www.nmij.jp/　nmij-info-ml@aist.go.jp

NEW TECHNOLOGY

タンパク質、アミノ酸を高精度に測定する

医療、食品業界に新たな“標準”をもたらす

計量標準総合センター（NMIJ）
物質計測標準研究部門
バイオメディカル標準研究グループ
グループ長

加藤 愛
Megumi Kato

KEY POINT

臨床検査の対象物を正確に測定するには、生体関連物質の高精度な計測技術が必要だ。産総研ではタンパク質の分析を高精度に行うため、新たなアミノ酸分析法（IDMS-AAA法）を開発。アミノ酸分析法の基準物質である、17種類のアミノ酸の認証標準物質も整備した。

より高精度な新しいアミノ酸分析法を開発

医療機関での臨床検査には、コレステロールや尿酸、血糖値など、さまざまな測定項目があり、私たちはその値に一喜一憂する。しかし、その測定値が病院ごとに異なっているとは、誰も思ってもいないだろう。

「現状では、同じ対象を検査したとしても、必ずしも測定結果が同じになるとは限りません。そこで私たちバイオメディカル標準研究グループでは、いつ、どこで、誰がはかっても同じ結果になるように、各測定項目の標準物質や評価法を整備しています」

臨床検査の測定項目を評価するためには、核酸や代謝物、タンパク質などの生体関連物質に対応した高精度な分析法が必要となる。中でも加藤が注力してきたのはタンパク質関連の分析法だ。これまでタンパク質の濃度や純度の測定には、光が試料溶液を通るときに吸収される割合から分析する方法が用いられてきたが、この方法では、取り扱うタンパク質の種類によって結果が左右されるという問題があった。

「タンパク質を正確に定量するには、タンパク質をその構成単位であるアミノ酸まで分解して、化学量を正確に求める必要があります。そこで処理のプロセスを見直し、まずタンパク質の加

水分解が精度よく行えるようにしたのです。それで得られたアミノ酸を定量すれば、高精度な評価が可能だと考えました」

そうして加藤が新たに開発した分析法が、同位体希釈質量分析法を利用したアミノ酸分析法（IDMS-AAA法）だ。これにより、加水分解などの分析操作における影響を最小限に抑えた、高精度なアミノ酸分析が可能になった。このIDMS-AAA法は、これまで開発・供給を行ってきたいくつかのタンパク質・ペプチド認証標準物質の基盤技術になっている。

17種類のアミノ酸認証標準物質を開発

「IDMS-AAA法はもともと、タンパク質を高精度に定量したいという自分たちのニーズから開発したものです。その一方で健康志向の高まりによってアミノ酸そのものが注目され、利用されるケースが増え、アミノ酸自体の濃度をはかりたいというニーズが高いことに気づきました」

加藤らはIDMS-AAA法の開発と同時に、アミノ酸分析の校正に用いるためのより信頼性の高い認証標準物質の開発も行った。その結果、2012年から5年間で、17種類のアミノ酸認証標準物質を開発し、供給を開始することができた。これらの標準物質は、食品、飲料、医薬品メーカー等で、アミノ酸の高精度測定に用いられている。

アミノ酸単体の標準物質で、ここまでのラインナップを実現しているのは世界でも産総研だけだ。いずれも溶液ではなく固体（粉末）で供給しているが、これは水溶液よりもアミノ酸の安定性が高く確かな純度値を保証できることや安定供給が可能なこと、また、評価する対象の濃度に応じてユーザーが自由に濃度を設定できるようにして利便性を高めるためだという。輸送が容易なこともちろんだ。

しかし、いくら使いやすいといっても、水溶液を正確に調製するのはハードルが高いと感じるユーザーもいる。これらの標準溶液の製造・販売についてはすでに試薬メーカーに技術移転中だが、今後、産総研では、水溶液の調製ノウハウをユーザーに広く伝えていく予定だ。さらに、実サンプル標準など、現場における実サンプルの分析により役立つツールの提供についても可能性を検討していく。

▲ IDMS-AAA法に用いた高速液体クロマトグラフ-質量分析装置

「現在はアミノ酸の化学量は定量できても、分析の過程でタンパク質の配列情報が失われるため、直接的にタンパク質の種類そのものを見分けることはできません。将来的には配列情報を保ったまま定量する方法を確立し、タンパク質の種類の保証までできるようにしたいですね」

さらなる構想もある。酵素の活性はタンパク質の修飾や立体構造の違いによって変化するが、加藤は、試料中酵素の活性を、タンパク質の修飾や立体構造をもとに見分ける手法を見出したいという。これができれば臨床検査の測定項目の信頼性がさらに上がり、医療の世界に大きく貢献できるだろう。

「実現するのは数十年先かもしれませんが、そのための基礎づくりをしておきたいと思っています」と将来に目を向ける。

お気軽にお問い合わせください

産総研　計量標準総合センター

物質計測標準研究部門：材料・化学産業の基盤となる計量標準の設定、標準物質の整備・普及と計測・評価技術の開発

〒305-8563　茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第3

029-861-4346（計量標準調査室）

https://www.nmij.jp/　nmij-info-ml@aist.go.jp

NEW TECHNOLOGY

シリコンウエハの厚さを非接触で精密測定

半導体性能の向上に貢献する光干渉計

計量標準総合センター（NMIJ）
工学計測標準研究部門
ナノスケール標準研究グループ
グループ長

平井 亜紀子
Akiko Hirai

KEY POINT

シリコンウエハの厚さを**高精度**に測定する技術へのニーズが高まっている。産総研では国家標準にトレーサブルな**複数のレーザー光源**と**2台の光干渉計**を用いて、試料を**非接触**で精密に測定する装置を**開発**。半導体素子の**品質管理**や**性能向上**への貢献が期待されている。

シリコンウエハの厚さを正確に測りたい

長さ測定の基準器の校正を担当している平井の元にはシリコンウエハの厚さ測定についての相談がしばしばあった。

「半導体業界ではシリコンウエハの寸法の規格が決められており、ウエハの厚さは規格の一つですが、半導体の集積度をさらに向上させるために、薄いシリコンウエハを三次元積層する技術が進んでおり、ウエハの厚さ管理が一層重要になっています。半導体の高性能化に伴い測定結果の信頼性が重要になり、国家標準へのトレーサビリティに対する要求が高まっています」

シリコンウエハの非接触厚さ測定には分光干渉方式が広く用いられている。これは赤外光を試料に照射し、試料の表面で反射した光と試料の内部を透過して試料の裏面で反射した光という、2面からの反射光の干渉を利用して厚さをはかる方法だ。しかし、この方法では、光が試料を透過するため、その試料の屈折率をあらかじめ知っていなければ、正確な厚さをはかることができない。ところが、屈折率はウエハの製造過程でばらつき、シリコン内の不純物の量によっても変わり、試料ごとの屈折率を正確に測定する技術はない。分光干渉方式の厚さ測定器を使用しているユーザーは、それぞれがシリコン屈折率の異なる文献値を使用している。そのため、厚さ測定結果の信頼性が保証できないことが大きな課題となっていた。

「内部の屈折率がどうであろうと、光を透過させないで、純粋に幾何学的な厚さを計測できれば問題がないわけです。そこで、国家標準にトレーサブルで、試料の厚さそのものを高精度で測定できる装置を開発しました」と言う平井は、今年、2台の

レーザー干渉計から構成される厚さ測定用両面干渉計を完成させた。

複数波長のレーザーで高精度な測定を実現

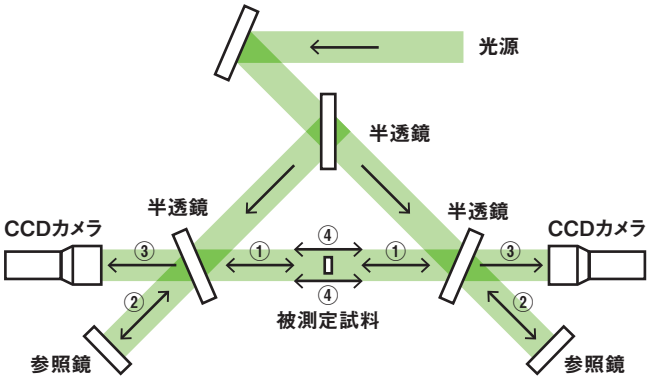
開発された厚さ測定用両面干渉計は、まず、レーザーを試料の両面から当て、表面で反射した光と、参照鏡で反射させた光によって干渉縞を生じさせる。それを2台のCCDカメラで撮影し、2つの干渉縞の画像をもとに、試料の両面それぞれの凹凸形状を計算によって求める。同時に、試料の周囲の何もない部分を通ってきた光と、参照鏡に反射させた光との干渉縞画像も計測し、厚さを測定する際の基準平面を求める。これらの結果を組み合わせて、試料の厚さ分布を算出するというわけだ。

「光の干渉縞を用いる場合、連続した凹凸のような相対的な形状は正確に測定できますが、干渉縞の周期性の関係で、光源の波長を超える大きな段差や絶対的な長さを高精度に求めるのは難しいという問題がありました。しかしこの装置では、光源に周波数（波長）の異なる3種類の周波数安定化レーザーを用いているため、波長ごとの測定結果の合致するところを見ることで絶対的な長さも求められます」

用いている周波数安定化レーザーは国家標準にトレーサブルなものであるため、この方法で測定した結果も、国家標準につながった信頼性の高いものとなる。

「この装置でウエハメーカーのウエハの凹凸形状を校正しておけば、そのウエハはその企業が備える厚さ測定装置を校正するための標準試料として使うことができます。国家標準にトレーサブルな高精度な校正が可能になることで、ウエハの品質向上や、半導体の性能向上に役立てられると考えています」

今後は異なる測定方式で多様な厚さを測定した場合の測定値との比較を行って、双方の測定方式の精度検証や試料の屈折率の影響を調べるという。また、現在は試料の表面で光を反射させているためにガラス等の透明な試料の正確な計測はできないが、今後は透明な試料についても計測する方法を模索していく。



▲ 今回開発した厚さ測定用両面干渉計

光源から出たレーザーを試料の両面から当て、表面で反射した光①と、参照鏡に反射させた光②によって干渉縞を生じさせる。それを2台のCCDカメラで撮影し③、2つの干渉縞の画像をもとに、試料の両面それぞれの凹凸形状を計算によって求める。同時に、試料の周囲の何もない空間を通ってきた光④と、参照鏡に反射させた光②との干渉縞画像も計測し、厚さを測定する際の基準平面を求める。これらの結果を組み合わせて、試料の厚さ分布を算出する。

さらに、この測定方法は試料の長さの温度変化や経年変化の計測にも応用できる。耐環境性材料などについての信頼性の高い測定は、特に航空宇宙分野でニーズが高まっており、貢献が期待される。

「私はもともと研究成果を社会に役立てたいという思いから計量研究所（NMIJの前身）に入所したので、こうして産業界に協力できるのはうれしいことです。長さをはかることはとても身近な計量で、国際的にも、また民間でも高い技術レベルを持っているところが多い分野です。それでもなお“産総研は頼りになる”“産総研に相談しよう”と思っていただけるよう、研鑽を積んでいきたいです」

お気軽にお問い合わせください

産総研　計量標準総合センター

工学計測標準研究部門：幾何学量・質量・力学量・流量などに関連する国家計量標準の整備と普及、計測・評価技術の開発

〒305-8563　茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第3

029-861-4346（計量標準調査室）

https://www.nmij.jp/　nmij-info-ml@aist.go.jp

計量標準総合センター（NMIJ）
物理計測標準研究部門
量子電気標準研究グループ
研究グループ長

丸山 道隆
Michitaka Maruyama

NEW TECHNOLOGY

高精度で安定性の高い量子電圧源を開発

国家標準の技術をより広く産業界で使えるものに!

KEY POINT

電子機器の開発には正確な基準電圧源が欠かせない。
量子電気標準研究グループでは国家標準と同じ技術を用い、原理的に経年変化のない、手軽で高精度かつコンパクトな量子電圧源の研究開発に取り組んでいる。

新しい国家標準は変化する社会ニーズに対応

量子電気標準研究グループの丸山は、産総研に入所以来、ジョセフソン電圧標準の高度化と応用に関する研究開発を行ってきた。

ジョセフソン電圧標準というのは、マイクロ波をジョセフソン素子（2つの超伝導体の間に起こる量子現象「ジョセフソン効果」を利用する素子）に照射したときに電流-電圧曲線に現れる階段状の定電圧ステップを利用して、電圧の単位（ボルト）を正確に実現する標準のことだ。原理は1960年代に発見され、日本でも約40年前から直流電圧の国家標準に採用されている。現在も基本原理は変わらないが、ジョセフソン素子の超伝導状態を維持するためには希少資源である液体ヘリウムが必要であり、運用コストや安定供給のリスクが生じること、動作方式が古く産業界の新しいニーズに対応できないことなどが課題となっていた。

「安心して暮らせる社会や産業のさらなる発展には、持続可能で高精度、かつ社会ニーズに対応できる国家標準が不可欠です。そこで私たちはこのジョセフソン電圧標準を、新しいシステムへとバージョンアップし、より使いやすい国家標準をつくることにしました」

新たなジョセフソン電圧標準のポイントは、従来より高い温度で動作可能な窒化ニオブ製の超伝導体素子と機械式冷凍機システムを採用することで、これまで冷媒として用いられていた液体ヘリウムを不要としたことだ。さらに、新しい動作方式とそれに

対応した素子設計の導入により、任意の電圧値を瞬時に設定可能で、交流電圧などへの応用可能性も広がった。

ここで用いた新方式の素子や冷凍機システムには、産総研内のナノエレクトロニクス研究部門が20年来研究してきた技術が使われている。丸山は、完成度は高いもののなかなか実用化に結びつかなかったこの技術を、NMIJの精密評価技術と組み合わせて、直流電圧の国家標準に応用したのだ。

「いわば研究所内で技術の“橋渡し”をしたわけですね。これにより、間接的とはいえ、高度な技術を社会に役立てる道を拓くことができました」

この標準に対する企業などからの関心は高く、丸山は、役立つ技術をつくれたと実感している。

企業が手軽に使える量子電圧源を目指して

さらにこの技術を発展させ、その先に丸山が思い描くのが、「普段、目に触れることのない国家標準として社会に貢献している量子技術を、目に見える形でより広く産業界で使ってもらえるものにしたい」ということだ。

そのような理念に基づいて産総研で生まれたのが、国家標準と同じ技術を用いて完成した、6桁の精度と超高安定性をもつ量子基準電圧源だ。最大2 Vまでの任意電圧を100万分の1以下の誤差で出力でき、国家標準同様、電圧出力に経年変化は起こらない。冷凍機を小型にしたことで一般的な計測器ラックに収納可能なサイズとなり、一般企業でも負担なく保有できる。スイッチ一つで動作温度まで冷却できる点、素子制御を自動化して専門知識がなくても操作できる点は、広く使ってもらえるものとしたい、量子エレクトロニクスを身近な技術にしたいという丸山の思いに通じる。

この電圧源はすでに産総研発ベンチャーから販売されたが、まだ広く使用されるには至っていない。国家標準の電圧が10 Vであるのに対し、こちらは1 ～ 2 Vであるからだ。

「10 Vの電圧にするとどうしても冷凍機が大きくなってしまうため、現在のものは小型化を優先しています。ただ、近年、冷凍機技術も進歩しつつあるので、今後はより高い電圧でも小型の冷凍機が使えるようになり、小型10 Vの量子電圧源ができるのはそう遠くはないでしょう。また、国家標準自体のさらなる高度化や、現在は直流電圧だけに対応している国家標準の交流電圧への応用展開も進めていきたいと考えています」

▲ 小型冷凍機（中央の円柱部分）を用いた新しいジョセフソン電圧標準

さらに一般企業向けの汎用基準電圧源を多機能かつ高精度化したツェナー標準電圧発生器を、国産技術で製品化することを目指して民間企業との共同開発を進めている。

「国家標準のための技術の向上に加え、開発した技術が社会実装されることで、NMIJの担う役割の重要性を社会に認識してもらい、理解してもらえるとよいと思っています」

それにより共同研究や技術コンサルティング制度の活用が増え、産業界の“困ったこと”へのソリューションを提供できるようになれば、産総研はより社会に貢献していけるだろう。丸山は国家標準から企業へのソリューション提供までを視野に入れている。

お気軽にお問い合わせください

産総研　計量標準総合センター

物理計測標準研究部門：産業基盤となる電気、時間・周波数、温度、光の計量標準・計測技術と、その応用技術の開発

〒305-8563　茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第3

029-861-4346（計量標準調査室）

https://www.nmij.jp/　nmij-info-ml@aist.go.jp

産総研

サイエンスと技術をLINKする産総研
科学技術とビジネスをLINKする産総研
人々と科学技術をLINKする産総研

LINKの先にあるのは「技術を社会へ」
そんな思いをのせたコミュニケーション・マガジン
「産総研LINK」をお届けします

産総研 LINK
技術を社会へつなげるコミュニケーション・マガジン

産総研LINK　No.21　平成30年11月発行

編集・発行　国立研究開発法人 産業技術総合研究所
問い合わせ　企画本部 広報サービス室 出版グループ
〒305-8560　茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第1
TEL　：029-862-6217
E-mail : prpub-ml@aist.go.jp

子育てサポートしています 2014年認定事業主
仕事と介護の両立支援
女性が活躍しています！
VEGETABLE OIL INK

■ 禁無断転載 ©2018 All rights reserved by the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
■ 所外からの寄稿や発言内容は、必ずしも当所の見解を表明しているものではありません。
■「産総研LINK」へのご意見・ご感想がございましたら、上記E-mailまでお寄せください。今後の編集の参考にさせていただきます。

産総研チャンネル　バックナンバー

AIST15-E00004-21