SI 単位の定義改定をめぐる最近の動き*

Progress toward the Redefinition of the SI Units

藤井賢一**
Kenichi FUJII

Key words

International System of Units, kilogram, ampere, kelvin, mole, redefinition, Planck constant, elementary charge, Boltzmann constant, Avogadro constant

1. はじめに

物理量を表す単位系として現在広く用いられている国際単位系 (SI)¹⁾²⁾では、7つの SI 基本単位として秒 (s)、メートル (m)、キログラム (kg)、ケルビン (K)、アンペア (A)、モル (mol)、カンデラ (cd) が選ばれ、その他の単位は SI 組立単位として SI 基本単位のべき乗の積で表される。

SI の根幹を担っているのが SI 基本単位であり、その多くは普遍的な物理現象あるいは基礎物理定数³⁾に基づいて実現することができるようになってきたが、キログラムだけは人工物に頼る唯一の SI 基本単位として残っている。このため、キログラムをアボガドロ定数やプランク定数などの基礎物理定数を用いて再定義することが検討されてきた^{4)~6)}。特に最近ではキログラムだけではなくアンペア、ケルビン、モルの定義も同時に改定することが検討されるようになり、メートル条約にもとづいて 2011 年に開催された第 24 回国際度量衡総会 (Conference Generale des Poids et Mesures: CGPM) では、キログラム、アンペア、ケルビン、モルの 4 つの SI 基本単位をそれぞれプランク定数 h 、電荷素量 e 、ボルツマン定数 k 、アボガドロ定数 N_A に基づいて将来再定義することが採択された。早ければ 2018 年に開催予定の第 26 回 CGPM において新しい定義に移行することが採択される可能性がある。

わが国でもこのような国際的な動向に配慮し、知的基盤整備計画として策定された第二期計量標準整備計画 (2013~2022) の重点項目において、SI 基本単位の定義改定の方針に基づいて国家計量標準を整備すべきであることが明確に述べられている。

本稿では、キログラムを中心にこれまでに検討されてきた SI 単位の定義改定の動きについて紹介し、基礎物理定数に基づく SI 単位の再定義改定の意義について述べる。

2. キログラム再定義の動き

国際キログラム原器 (international prototype of the kilogram: IPK) は第 1 回 CGPM が開催された 1889 年以来、120 年以上経過した現在でも質量の単位として用いられている。白金にイリジウムを 10% 混ぜて作られたこの分銅はパリ郊外にある国際度量衡局 (Bureau International des Poids et Mesures: BIPM) に保管され、メートル条約加盟各国のキログラム原器は IPK との質量比較による定期校正によって値付けされ、これに基づいて世界の質量標準が維持されている。しかし、1988 年から 1992 年にかけて実施された定期校正のときに得られた知見によれば、表面汚染などの影響により IPK の質量の過去 100 年間にわたる長期安定性は約 $50 \mu\text{g}$ であると推定されている⁷⁾。これは 1 kg に対して相対的に 5.0×10^{-8} の変動幅に相当するので、より安定な基準に基づいてキログラムを再定義することが世界の幾つかの計量標準研究機関で検討されるようになった。

当初は多くの再定義方法が検討されたが⁸⁾、最終的には 2 つの方法が有力な候補として残った^{8)~10)}。ひとつはアボガドロ定数 N_A を不確かさのない定数として定義し、原子の数から質量を定義するという比較的古くからある考え方に基づくものである。アボガドロ定数 N_A の値は約 $6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ であり、現行のモルの定義から炭素 ^{12}C のモル質量は厳密に $M(^{12}\text{C}) = 0.012 \text{ kg/mol}$ なので、1 kg の炭素 ^{12}C に含まれる原子の数を $N_A/M(^{12}\text{C}) = 5.018 \times 10^{25} \text{ kg}^{-1}$ として定義することができる。

もう一方は、プランク定数 h を不確かさのない定数として定義し、アインシュタインの関係式によって光子のエネルギー E と質量 m とを関連づけるという比較的新しい考え方に基づくものである。プランク定数 h の値は約 $6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$ であり、光速の定義 $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ を用いれば、1 kg の質量 m と等価なエネルギーをもつ光子の周波数は $\nu = mc^2/h = 1.356 \times 10^{50} \text{ Hz}$ として求められる。これは光子の周波数によって質量を定義しようというものである。

*原稿受付 平成 26 年 4 月 14 日

** (独) 産業技術総合研究所計測標準研究部門 (茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第 3)

キログラムの再定義ではいずれの定義を選ぶかがしばしば議論されてきたが、 N_A と h との間には厳密な関係があるので、いずれの表現を用いてもキログラムを再定義することができる。電子の質量 m_e は基礎物理定数の関係式から

$$m_e = \frac{2R_\infty h}{c\alpha^2} \quad (1)$$

と表される。ここで、 R_∞ はリュードベリ定数、 α は微細構造定数である。 ^{12}C 単原子あたりの質量を $m(^{12}\text{C})$ 、電子のモル質量を M_e とすればモルの定義から $N_A = M(^{12}\text{C})/m(^{12}\text{C}) = M_e/m_e$ なので、 N_A は次式によって h へと関係づけられる。

$$N_A = \frac{c\alpha^2 M_e}{2R_\infty h} \quad (2)$$

式(2)右辺において h を除く基礎物理定数群 $c\alpha^2 M_e/(2R_\infty)$ は 7.0×10^{-10} の相対標準不確かさですでに求められているので³⁾、 N_A と h は IPK の質量の長期安定性よりも十分に小さい不確かさで関係づけられる。したがって、 N_A と h のいずれか一方を精密に測定できればキログラムを再定義することが原理的には可能である。しかし、信頼性を確保するためには、異なる測定原理で N_A と h をそれぞれ独立に測定し、両者の測定結果が不確かさの範囲内で一致することを検証することが重要である。

プランク定数 h からキログラムを実現する実験方法のなかで、現在最も精度が高いのはワットバランス法^{8)~11)}である。この方法は元々、ジョセフソン効果と量子ホール効果からプランク定数 h を測定するために開発されたものである。まず、磁場中の導体に電流 I を流すと力 F が発生する。この導体を同一磁場中で速度 v で移動させると電圧 U が発生する。このとき電氣的仕事率 UI は力学的仕事率 Fv に厳密に等しいので、時間、長さ、質量などの力学量の測定から電氣的仕事率を求めることができる。ここで、電圧 U をジョセフソン電圧 $U_J = nv/(2e/h) = nv/K_J$ で表し、電流 I を量子化ホール抵抗 $R_H = (h/e^2)/i = R_K/i$ とジョセフソン電圧で表せば、プランク定数は $h = 4/(K_J R_K)$ として求められる。ここで、 $K_J = 2e/h$ と $R_K = h/e^2$ はそれぞれジョセフソン定数とフォン・クリッツィング定数であり、電圧や電気抵抗の標準を実現するための基準として広く用いられている。現行の SI の定義では力学的仕事率 Fv の測定から電氣的仕事率 UI を求め、これをもとにアンペアの定義が実現されているが、再定義が実施されると、これとは逆に定義されたプランク定数 h から力 F を求め、これとつり合う重力 mg としてキログラムが実現される。ここで g は重力加速度である。2007 年に米国立標準技術研究所 (NIST) で 3.6×10^{-8} の精度が得られ、初めて基礎物理定数の測定精度が IPK の質量の長期安定性 (5×10^{-8}) を超えた¹²⁾。

一方、アボガドロ定数 N_A に基づいてキログラム実現する方法としては X 線結晶密度法が挙げられる。例えば、シリコン結晶の格子定数を a 、密度を ρ 、モル質量を M と

図1 FZ (浮遊帯域) 法で引き上げられた濃縮度 99.99%、質量約 5 kg の ^{28}Si 同位体濃縮単結晶¹⁴⁾¹⁵⁾

すれば、アボガドロ定数は $N_A = 8M/(\rho a^3)$ として求められる。従来は自然同位体比のシリコン結晶が用いられてきたのでモル質量 M の測定精度に限界¹³⁾があったが、最近になり ^{28}Si 同位体濃縮単結晶から N_A を高精度化するためのアボガドロ国際プロジェクトが実施された¹⁴⁾¹⁵⁾。この国際プロジェクトには産業技術総合研究所の計量標準総合センター (NMIJ)、ドイツ物理工学研究所 (PTB)、イタリア計量研究所 (INRIM)、オーストラリア連邦計量研究所 (NMIA)、欧州標準物質計測研究所 (IRMM)、BIPM、NIST、英国物理研究所 (NPL) などが参加した。遠心分離法による同位体濃縮、化学精製、多結晶化などを経て 99.99% まで同位体濃縮された 5 kg の ^{28}Si 同位体濃縮単結晶¹⁶⁾が得られた (図1 参照)。この結晶の格子定数、密度、モル質量の測定から N_A が求められた。特に密度の精密測定のために、この結晶から直径 94 mm、凹凸の最大値 70 nm、質量 1 kg の球体を 2 個研磨し、NMIJ のレーザ干渉計 (図2 参照) を使ったサブナノメートルの精度での直径測定などが行われた¹⁷⁾。このようにして求められた N_A の相対標準不確かさは 3.0×10^{-8} であり、ワットバランス法を超える精度のデータが X 線結晶密度法によって得られるようになった¹⁴⁾¹⁵⁾。

ワットバランスや ^{28}Si 同位体濃縮単結晶から得られたプランク定数の値の比較を図3に示した。NIST が 2007 年にワットバランスから求めた値と、IAC プロジェクトによって 2011 年に ^{28}Si 同位体濃縮単結晶から得られた値の精度が最も高いが、両者の間には 1.8×10^{-7} の相対的な隔りがある。科学技術データ委員会 (CODATA) では統計的な整合性が得られるまでこれらのデータの不確かさを拡張し、それらの重み付け平均からプランク定数 h の 2010 年推奨値を決定した³⁾。その相対標準不確かさは

図2 シリコン球体の直径（約 94 mm）をサブナノメートルの精度で測定するレーザー干渉計¹⁷⁾

図3 異なる原理で測定されたプランク定数の比較³⁾。バーは標準不確かさを表す。NML (豪)-1989: 水銀電圧計によるジョセフソン定数の測定, PTB (独)-1991: 電圧天びんによるジョセフソン定数の測定, NIST (米)-1998: ワットバランスによるプランク定数の測定 (空气中), NIST (米)-2007: ワットバランスによるプランク定数の測定 (真空中), CODATA-2006: CODATA による 2006 年の推奨値, METAS (スイス)-2011: ワットバランスによるプランク定数の測定, IAC (日独伊など)-2011: X 線結晶密度法による ²⁸Si 同位体濃縮結晶についての測定, NPL (英)-2011: ワットバランスによるプランク定数の測定, CODATA-2010: CODATA による 2010 年の推奨値。

4.4×10^{-8} である。質量関連量諮問委員会 (CCM) では、キログラムを再定義するためには、より多くの独立した高精度な測定結果が必要であると考えられている。

3. アンペア再定義の動き

SI はメートル、キログラム、秒にアンペアを加えた MKSA 4 元単位系に属し、CGS 3 元単位系（センチメートル、グラム、秒）に比べて電気量の単位を極めて簡素に表現できるのが特徴である。現在のアンペアは、2 本の無限に長い平行な導線に電流を流したときの単位長さあたりの

導線に働く力によって定義されている。その結果、真空の透磁率はアンペアの法則から厳密に $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$ となる。しかし、この定義を実現するためにはワットバランスのような大掛かりな実験が必要なので、利便性の観点からジョセフソン定数とフォン・クリッツィング定数についての協定値 ($K_{\text{J-90}}$ と $R_{\text{K-90}}$) を決めて電圧と電気抵抗を実現することが 1988 年の国際度量衡委員会 (CIPM) で勧告された¹⁾²⁾¹⁸⁾¹⁹⁾。これらの量子効果に基づいて現在の電気標準は実現されている。

ジョセフソン効果と量子ホール効果には IPK の長期安定性を上回る極めて高い再現性があるが、協定値に頼る限り SI の定義にトレーサブルであるとはいえない。そこで、第 24 回 CGPM では h だけでなく e も定義し、将来は 1 秒間に流れる電子の数でアンペアを再定義することが採択された。このとき、再定義に必要な電荷素量 e の値は基礎物理定数の関係式から以下のようにして求められる。

$$e^2 = \frac{2\alpha h}{\mu_0 c} \quad (3)$$

ここで、微細構造定数 α の精度は十分に高いので、 e は h の約半分の不確かさで求められる³⁾。キログラムは h と N_A のいずれを用いても再定義することができるが、現在の再定義案で h が選ばれている理由は、ジョセフソン効果と量子ホール効果によってすでに実現されている電気標準の利便性を生かすためである。

最近では電荷素量 e によるアンペアの定義を直接的に実現するために単電子トンネル (SET) 効果デバイス²⁰⁾²¹⁾の開発も進められている。これは変動するゲート電圧の周波数として電子の数をカウントするものであり、電流を周波数に直結する技術として注目されている。

4. ケルビン再定義の動き

現在のような水の三重点によるケルビンの定義は 1954 年に開催された第 10 回 CGPM で決められた。その後、1968 年国際実用温度目盛 (IPTS-68) によって定義定点の温度と、定義定点の間を補間するための方法が決められ、現在用いられている 1990 年国際温度目盛 (ITS-90) に至っている。水の三重点は人工物ではないので誰もが利用することができるが、その温度は同位体組成の変動の影響を受ける。このため現在の SI では標準平均海水 (SMOW) に等しい同位体組成を有する純水を用いることになっている。しかし、定義定点の熱力学温度を決め、補間の精度を確かめるためには熱力学温度の測定による検証が不可欠である。このため温度諮問委員会 (CCT) では、メートルやキログラムのように基礎物理定数に基づいてケルビンを再定義することが検討されてきた。例えば、理想気体の音速 w の 2 乗は熱力学温度 T に比例するので、そのモル質量を M 、比熱比を γ とし、ボルツマン定数 k を不確かさのない定数として定義してしまえば、音響法によって熱力学温度を

表 1 2011 年に開催された第 24 回国際度量衡総会（CGPM）で採択された SI 基本単位の定義改定案

SI 基本単位	記号	現行の定義	再定義案
キログラム	kg	国際キログラム原器（IPK）の質量	プランク定数 h を定義 ワットバランス法や X 線結晶密度法などによってキログラムを実現
アンペア	A	間隔 1 メートルの二本の導体を通り、長さ 1 メートルにつき 2×10^{-7} ニュートンの力を及ぼす電流 真空の透磁率： $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$	電荷素量 e を定義 協定値 (K_{J-90} と R_{K-90}) を用いることなくジョセフソン効果と量子ホール効果から電圧と電気抵抗を SI の定義にもとづいて実現 電流を $I = ef$ （ここで f は 1 秒間に流れる電荷の数）として単電子トンネル（SET）効果などからアンペアを実現することが可能 真空の透磁率 μ_0 ：微細構造定数 α から求められる測定量 $\mu_0 = 2\alpha h / (ce^2)$
ケルビン	K	水の三重点における熱力学温度の $1/273.16$	ボルツマン定数 k を定義 例えば、理想気体の音速を w 、モル質量を M 、比熱比を γ とすれば $T = w^2 M / (\gamma k N_A)$ として熱力学温度 T を実現
モル	mol	結合していない静止した 0.012 キログラムの炭素 ^{12}C 中に存在する原子の数に等しい要素粒子を含む系の物質質量 ^{12}C のモル質量： $M(^{12}\text{C}) = 12 \text{ g/mol}$	アボガドロ定数 N_A を定義 ^{12}C のモル質量 $M(^{12}\text{C})$ ：リュードベリ定数 R_∞ 、炭素 ^{12}C と電子との質量比 $m(^{12}\text{C})/m_e$ 、微細構造定数 α から求められる測定量 $M(^{12}\text{C}) = 2N_A h R_\infty (m(^{12}\text{C})/m_e) / (\alpha^2)$

図 4 異なる原理で測定されたボルツマン定数の比較³⁾。バーは標準不確かさを表す。NPL（英）-1979：円筒共鳴器による気体の音速測定、NIST（米）-1988：球共鳴器による気体の音速測定、CODATA-2006：CODATA による 2006 年の推奨値、NIST（米）-2007：気体の誘電率測定、NIST（米）-2010：雑音温度計測、INRIM（伊）-2010：球共鳴器による気体の音速測定、NPL（英）-2010：球共鳴器による気体の音速測定、LNE（仏）-2010：球共鳴器による気体の音速測定、CODATA-2010：CODATA による 2010 年の推奨値。

$$T = \frac{w^2 M}{\gamma k N_A} \tag{4}$$

として実現することができる。

現在、球共鳴器を用いた音響法による熱力学温度の測定が NIST、フランス計量研究所（LNE）、INRIM、NPL、NMIJ などで行進中である^{22)~24)}。その他にまだ不確かさは大きいですが、電気抵抗が発生する雑音（noise）を用いた熱力学温度計測による実験値も報告されている（図 4 参照）。

現在までに報告されているボルツマン定数 k の値のなかで最も精度が高いのは LNE の quasi-spherical resonator による測定²²⁾であり、その相対標準不確かさは 1.2×10^{-6}

である。他の値も含め、重み付け平均から求められるボルツマン定数の相対標準不確かさは 9.1×10^{-7} であり³⁾、ようやく 100 万分の 1 の壁を突破した。これは室温付近の温度に換算すると約 0.3 mK の標準不確かさに相当する。

CCT では、気体の誘電率測定（DCGT）による実験など、多くの異なる測定原理によるボルツマン定数の測定結果が得られ、実験データの信頼性が十分に確保された段階で、ケルビンの再定義を実施することが検討されている。

5. SI の定義改定がもたらすもの

計測技術の進歩によって、第 1 回 CGPM が開催された 1889 年以来、ようやくプランク定数やアボガドロ定数の測定精度のほう IPK の質量の長期安定性よりもよくなってきた。その結果、メートル条約にもとづいて 2011 年に開催された第 24 回 CGPM においてキログラム、アンペア、ケルビン、モルの定義改定案が審議され、将来はプランク定数 h 、電荷素量 e 、ボルツマン定数 k 、アボガドロ定数 N_A を基準として質量、電流、温度、物質の単位の定義を改定することが採択された。これらの新しい定義の特徴を表 1 にまとめた。これは、基礎物理定数を基準として SI 基本単位の定義を改定するという方針を CGPM が示したものであり、歴史的にも極めて画期的である。

メートルの定義が 1983 年に光速へ移行したことによって、2005 年のノーベル物理学賞に輝いた光周波数コム²⁵⁾などの新しい計測技術が完成し、便利よく光周波数が測れるようになった。SI 単位の定義改定が科学技術の進歩や社会に貢献するには歳月を要するが、定義改定が幾つかのブレークスルーを生み、より新しい計測技術の誕生を促す効果のあることを過去の事例は物語っている。

キログラムについては、その基準がプランク定数に移行すると、1 kg 以外の任意の質量標準の実現が可能になることが大きな利点であると考えられている。新しい計測技術さえ開発すれば、現在の質量標準で実用化されている最も小さい分銅である 1 mg よりもさらに小さい質量標準を

実現することが可能になる。このような研究事例としては、電圧天びん (volt balance) を使ったナニュートン (nN) 領域での力計測技術の開発²⁶⁾などが挙げられる。この質量測定は電気標準にトレーサブルなので、キログラムの定義が改定されれば、プランク定数に基づいて微小質量標準を実現することが可能となる。このような微小質量計測技術は例えば新薬の開発や環境計測、薄膜計測、MEMS やセンサーの開発、ナノテクノロジーなどに広く貢献するものと期待されている。

参考文献

- 1) The International System of Units, 8th edition, Bureau International des Poids et Mesures, (2006).
- 2) 「国際文書第 8 版 (2006)/日本語版, 国際単位系 (SI)」, 訳編者: 産業技術総合研究所計量標準総合センター, 第 1 版, 日本規格協会, (2007).
- 3) P.J. Mohr, B.N. Taylor and D.B. Newell: CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2010, Rev. Mod. Phys., **84** (2012) 1527-1605.
- 4) I.M. Mills, P.J. Mohr, T.J. Quinn, B.N. Taylor and E.R. Williams: Redefinition of the Kilogram, Ampere, Kelvin and Mole: A Proposed Approach to Implementing CIPM Recommendation (CI-2005), Metrologia, **43** (2006) 227-246.
- 5) P. Becker, P. De Bièvre, K. Fujii, M. Glaeser, B. Inglis, H. Luebbig and G. Mana: Considerations on Future Redefinitions of the Kilogram, the Mole and of Other Units, Metrologia, **44** (2007) 1-14.
- 6) 藤井賢一: キログラムの再定義—単位の普遍性をめざして—, 〈はかる〉科学, 第 2 章, 坂上孝・後藤武編著, 中公新書, (2007).
- 7) T.J. Quinn: The Kilogram: The Present State of Our Knowledge, IEEE Trans. Instrum. Meas., **40** (1991) 81-85.
- 8) 藤井賢一: 質量標準と基礎物理定数—質量の単位の定義をめぐる最近の動き—, 応用物理, **68** (1999) 656-662.
- 9) 藤井賢一, 大苗敦: 基礎物理定数の新しい推奨値—アボガドロ定数とプランク定数の決定をめぐる最近の動き—, 日本物理学会誌, **57** (2002) 239-246.
- 10) 藤井賢一: 質量標準の現状とキログラム (kg) の定義改定をめぐる最新動向, 計測と制御, **53** (2014) 144-149.
- 11) M. Stock: Watt Balance Experiments for the Determination of the Planck Constant and the Redefinition of the Kilogram, Metrologia, **50** (2013) R1-R6.
- 12) R. Steiner, E.R. Williams, R. Liu and D. Newell: Uncertainty Improvements of the NIST Electronic Kilogram, IEEE Trans. Instrum. Meas., **56** (2007) 592-596.
- 13) S. Valkiers, G. Mana, K. Fujii and P. Becker: Si Primary Standards for the Alibration of Ion-current Batteries in the Molar-mass Measurement of Natural Si Single Crystals, Metrologia, **48** (2011) S26-S31.
- 14) B. Andreas, Y. Azuma, G. Bartl, P. Becker, H. Bettin, M. Borys, I. Busch, M. Gray, P. Fuchs, K. Fujii, H. Fujimoto, E. Kessler, M. Krumrey, U. Kuettgens, N. Kuramoto, G. Mana, P. Manson, E. Massa, S. Mizushima, A. Nicolaus, A. Picard, A. Pramann, O. Rienitz, D. Schiel, S. Valkiers and A. Waseda: Determination of the Avogadro Constant by Counting the Atoms in a ^{28}Si Crystal, Phys. Rev. Lett., **106** (2011) 030801.
- 15) B. Andreas, Y. Azuma, G. Bartl, P. Becker, H. Bettin, M. Borys, I. Busch, P. Fuchs, K. Fujii, H. Fujimoto, E. Kessler, M. Krumrey, U. Kuettgens, N. Kuramoto, G. Mana, E. Massa, S. Mizushima, A. Nicolaus, A. Picard, A. Pramann, O. Rienitz, D. Schiel, S. Valkiers, A. Waseda and S. Zakel: Counting the Atoms in a ^{28}Si Crystal for a New Kilogram Definition, Metrologia, **48** (2011) S1-S13.
- 16) P. Becker, D. Schiel, H.-J. Pohl, A.K. Kaliteevski, O.N. Godisov, M.F. Churbanov, G.G. Devyatykh, A.V. Gusev, A.D. Bulanov, S.A. Adamchik, V.A. Gavva, I.D. Kovalev, N.V. Abrosimov, B. Hallmann-Seiffer, H. Riemann, S. Valkiers, P. Taylor, P. De Bièvre and E.M. Dianov: Large-scale Production of Highly Enriched ^{28}Si for the Precise Determination of the Avogadro Constant, Meas. Sci. Technol., **17** (2006) 1854-1860.
- 17) N. Kuramoto, K. Fujii, and K. Yamazawa: Volume Measurements of ^{28}Si Spheres Using an Interferometer with a Flat Etalon to Determine the Avogadro Constant, Metrologia, **48** (2011) S85-S95.
- 18) 遠藤忠: 応用物理, **59** (1990) 712-724.
- 19) 金子晋久: 国際単位系 SI の改定と量子電気標準の課題, JEMIC 計測サークルニュース, **41**, 2 (2012) 1-7.
- 20) 勝本信吾: 量子ドットの電子状態と電気伝導 (その 1), 固体物理, **44** (2009) 639-655.
- 21) N.M. ツイーママン, 藤井賢一 (訳): 量子電気標準, パリティ, **26**, 12 (2011) 48-50.
- 22) L. Pitre, F. Sparasci, D. Truong, A. Guillou, L. Risegari and M.E. Himbert: Measurement of the Boltzmann Constant k_B Using a Quasi-Spherical Acoustic Resonator, Int. J. Thermophys., **32** (2011) 1825-1886.
- 23) G. Sutton, R. Underwood, L. Pitre, M. de Podesta and S. Valkiers: Acoustic Resonator Experiments at the Triple Point of Water: First Results for the Boltzmann Constant and Remaining Challenges, Int. J. Thermophys., **31** (2010) 1310-1346.
- 24) R.M. Gavioso, G. Benedetto, P.A. Giuliano Albo, D. Madonna Ripa, A. Merlone, C. Guianvarc'h, F. Moro and R. Cuccaro: A Determination of the Boltzmann Constant from Speed of Sound Measurements in Helium at a Single Thermodynamic State, Metrologia, **47** (2010) 387-409.
- 25) 洪鋒雷: 光コム—光科学のイノベーション—, 応用物理, **79** (2010) 546-549.
- 26) J.R. Pratt, J.A. Kramar, D.B. Newell and D.T. Smith: Review of SI Traceable Force Metrology for Instrumented Indentation and Atomic Force Microscopy, Meas. Sci. Technol., **16** (2005) 2129-2137.

藤井賢一

1984 年慶應義塾大学大学院工学研究科修士, 工業技術院計量研究所入所。1994 年米国立標準技術研究所客員研究員, 2012 年計測標準研究部門力学計測科長を経て 2014 年同部門首席研究員, 博士 (工学)。CODATA などの委員, アボガドロ国際プロジェクトのコーディネーター。