

令和元年6月11日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03901

研究課題名（和文）質量の単位「キログラム」を基礎物理定数によって定義するための研究開発

研究課題名（英文）Research to realize the definition of the kilogram based on the fundamental constants

研究代表者

倉本 直樹（Kuramoto, Naoki）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究グループ長

研究者番号：60356938

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：質量の単位「キログラム」は国際キログラム原器の質量として1889年に定義された。本研究では、人工物ではなく、普遍的な物理定数にもとづくキログラムの新しい定義を実現するために、シリコン単結晶の密度を高精度に測定するレーザー干渉計などを開発し、アボガドロ定数を世界最高精度で測定した。2017年、科学技術データ委員会は新たなキログラムの基準となるプランク定数の値を決定した。この決定に、本研究で決定したアボガドロ定数から導出したプランク定数も採用された。2019年5月からプランク定数にもとづく新たな定義が施行されており、本研究の成果は、130年ぶりとなるキログラムの定義改定に決定的な役割を果たした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、130年ぶりとなるキログラムの定義改定に直接大きく貢献した。科学技術分野の根底を支える単位系のはほとんどは、その多くが欧米を中心に構築されてきた。欧米以外の国が、世界共通の単位系の改定に決定的な役割を果たすのは、長い度量衡の歴史の中でも今回が初めてである。特に、本研究で実施したシリコン単結晶球体直径測定には、世界各国の国立標準研究機関が取り組んできたが、原子レベルの精度での測定に成功し、定義改定実施に決定的な役割を果たすことができたのは産総研とドイツ物理工学研究所のみであった。産総研による約130年ぶりとなるキログラムの定義改定への貢献は、正に歴史的な快挙である。

研究成果の概要（英文）：The unit of mass, the kilogram, was defined by the mass of the International Prototype of the Kilogram in 1889. In order to realize the new definition of the kilogram based on a fundamental constant, an optical interferometer and other measurement apparatuses have been developed in this study. The apparatuses were used to measure the Avogadro constant with the smallest uncertainty to date. In 2017, the CODATA determined a fixed value of the Planck constant used in the new definition. The value of the Planck constant deduced from the Avogadro constant determined in this study was used with those determined by other institutes. The new definition based on the fixed value of the Planck constant came into force on May 20th, 2019. The development in this study therefore made a crucial role in the realization of the new definition of the kilogram for the first time in 130 years.

研究分野：基礎物理定数測定

キーワード：キログラム プランク定数 アボガドロ定数 基礎物理定数

1. 研究開始当初の背景

世界共通の質量の単位「キログラム」は、国際キログラム原器(図1)の質量として1889年に定義され、それ以来、この世界に一つしかない分銅が世界中の質量の基準として用い続けられてきた。ただし、近年、この国際キログラム原器の質量が、表面の汚染などによってわずかではあるが変動していることが明らかになってきた。100年間での国際キログラム原器の質量の変動量は50 μg(相対値で 5×10^{-8})と見積もられ、無視できない問題となっていた。このため、将来、国際キログラム原器を廃止し、普遍的な物理定数であるプランク定数にもとづく定義に移行する方針が2011年に国際的に合意された。プランク定数はミクロな世界の現象を記述する物理定数の一つであり、原子の質量と関連づけられる。このため、1 kgをプランク定数によって表現することができる。そこで、世界各国の研究機関で新たな定義の基準となるプランク定数を高い精度で測定する試みが行われていた。



図1 フランス・パリ郊外の国際度量衡局で管理されている国際キログラム

2. 研究の目的

新たな定義に移行するためには、プランク定数を少なくとも国際キログラム原器の長期安定性を凌ぐ精度で測定する必要がある。そこで本研究では、プランク定数を 5×10^{-8} を凌ぐ精度で測定し、新たなキログラムの定義の基準となるプランク定数の値の決定に貢献することを目的とした。

3. 研究の方法

プランク定数の測定にはX線結晶密度法を用いた。この方法では、まずアボガドロ定数を測定する。アボガドロ定数 N_A とプランク定数 h は次式によって結び付けられる。

$$h = (cM(e)\alpha^2)/(2R_\infty N_A) \quad (1)$$

ここで、 c は真空中の光の速さ、 $M(e)$ は電子のモル質量、 α は微細構造定数、 R_∞ はリュードベリ定数である。(1)式右辺の物理定数群 $(cM(e)\alpha^2)/R_\infty$ の不確かさは十分小さい。このため、アボガドロ定数の測定値から、精度を落とすことなくプランク定数を導出することができる。

X線結晶密度法では、シリコン単結晶試料中のシリコン原子を数え、1 molあたりの原子数であるアボガドロ定数を測定する。実際には、質量約1 kgのシリコン単結晶球体の格子定数 a 、密度 ρ 、モル質量 M を測定し、アボガドロ定数 N_A を

$$N_A = 8M/(\rho a^3) \quad (2)$$

として求める。自然界のシリコンには同位体 ^{28}Si 、 ^{29}Si 、 ^{30}Si がそれぞれ約92%、5%、3%の割合で存在し、試料中の同位体の存在比を測定することでモル質量 M を求めることができる。通常のシリコン結晶を用いた場合、モル質量測定の精度は 10×10^{-8} が限界であり、アボガドロ定数高精度化のボトルネックとなっていた。この問題を克服するために、 ^{28}Si の存在割合を99.99%以上に高めた特殊な ^{28}Si 単結晶から研磨された球体を測定に用いた(図2)。これによってモル質量を 1×10^{-8} よりも高い精度で求めることができる。格子定数 a はX線干渉計を用いて求めることができる。密度 ρ は球体の体積と質量をそれぞれレーザー干渉計と天びんで測定することで求められる。研究代表者らは2011年すでに ^{28}Si 単結晶球体を用いアボガドロ定数を測定しているが、その主要な不確かさ要因は球体体積測定であった^①。そこで本研究では、特に、球体体積測定用レーザー干渉計の高精度化に注力しながら、アボガドロ定数の測定を実施した。



図2 ^{28}Si 単結晶球体

4. 研究成果

(1) ^{28}Si 単結晶球体体積測定

本研究で開発した ^{28}Si 単結晶球体の体積を測定するためのレーザー干渉計を図3に示す。球体は真空容器内に設置された二枚のガラス製のエタロン板の間に置かれる。レーザー光は球体の両側からエタロン板を介して球体に照射され、球体表面からの反射光とエタロン板からの反射光の干渉によって同心円状の干渉縞が観測される。球体の両側で観測される二つの干渉縞(干

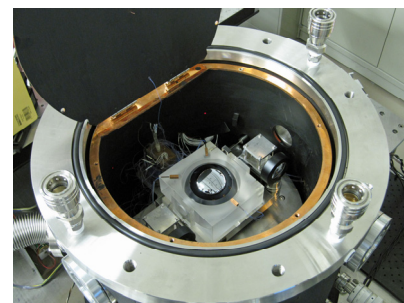


図3 シリコン球体の直径をサブナノメートルの精度で計測するレーザー干渉計(上図)とその原理図(下図)

渉縞 1、干渉縞 2) を解析することで、球体とエタロン板とのギャップ d_1 および d_2 をそれぞれ決定できる。干渉縞の解析には、光源であるダイオードレーザーの光周波数の高精度な計測・制御技術に基づく位相シフト法を用いた。また、球体下方に格納された機構によって球体を持ち上げ光路から取り除き、一方のレーザー光をシャッターによって遮ることで、二枚のエタロン板からの反射光によって干渉縞が形成される。この干渉縞を位相シフト法で解析することで、エタロン板間の間隔 L を決定できる。球体の直径は $D = L - (d_1 + d_2)$ として求められる。

図 4 に 2 個の ^{28}Si 単結晶球体について様々な方位から実施した直径測定の結果を示す。球体表面にはほぼ均一に分布する約 2000 方位から測定を実施し、平均直径から球体体積を 2.0×10^{-8} の相対標準不確かさで決定した。球体直径測定の不確かさは 0.6 nm であり、原子サイズの精度で球体直径を測定することに成功した。この世界最高レベルの精度での測定の実現には、本研究で開発した高精度な光周波数チューニング技術が大きく貢献した。アボガドロ定数の精密測定を目的とするシリコン球体体積測定用レーザー干渉計の開発は、ドイツ物理工学研究所、米国標準技術研究所、イタリア計量研究所、オーストラリア計量研究所、韓国標準科学研究所、中国計量科学研究院などでも行われたが、国際キログラム原器の質量の長期安定性である 5×10^{-8} を凌ぐ精度での体積測定に成功したのは、産総研とドイツ物理工学研究所のみであった。

(2) ^{28}Si 単結晶球体質量測定

球体の質量は日本国キログラム原器を基準として測定した。測定には真空中での質量比較が可能な特殊な天びんを用い、球体の質量を $6 \mu\text{g}$ の世界最高レベルの精度で測定した。

(3) ^{28}Si 単結晶球体表面分析

アボガドロ定数を正確に決定するためには、球体中のシリコン原子のみを数える必要がある。しかし、シリコン単結晶球体は厚さ数ナノメートルの自然酸化膜などからなる表面層で覆われている (図 5)。そこで、本研究では分光エリプソメーター (図 6) などを用い、表面層の化学組成、厚さ、質量などを評価した。これらの評価結果を 4 (1) および 4 (2) で記述した球体の体積・質量測定の結果と組み合わせ、純粋なシリコン部分 (シリコンコア) の質量と体積を決定した。

(4) アボガドロ定数・プランク定数の決定

決定したシリコンコアの質量と体積から (2) 式を用いてアボガドロ定数を決定した。格子定数とモル質量には以前に測定された値を用いた。さらに決定したアボガドロ定数から、(1) 式を用いてプランク定数を導出した²⁾。プランク定数の測定精度は 2.4×10^{-8} であり、 1 kg に換算すると $24 \mu\text{g}$ である。これは国際キログラム原器の質量安定性である $50 \mu\text{g}$ を凌ぐ。

(5) 新たなキログラムの定義

図 7 に、2017 年 7 月 1 日までに世界各国の研究機関によって測定されたプランク定数を示す。NMIJ-17 が、本研究で研究代表者らによって測定された値である (NMIJ は研究代表者らが所属する産総研 計量標準総合センター (National Metrology Institute of Japan) の略称)。この値は産総研を含む八ヶ国の研究機関による国際研究協力「アボガドロ国際プロジェクト (IAC)」の測定値 (IAC-11、IAC-15、IAC-17) と良く一致した。また、米国標準技術研究所 (NIST)、カナダ国立研究機構 (NRC)、フランス国立計量研究所 (LNE) がキップルバランス法で測定した値 (NIST-15、NIST-17、NRC-17、LNE-17) とも良く一致した。2017 年 10 月、科学技術データ委員会は、上記の 8 つの高精度な測定値に基づき次のプランク定数 h の調整値 (CODATA 2017) を報告した³⁾。

$$h = 6.626\,070\,150(69) \times 10^{-34} \text{ J s} \quad (3)$$

括弧内の数値は最後の 2 桁の不確かさを表す。2018 年 11 月 13 日～16 日にパリ郊外のヴェルサイユで開催された第 26 回国際度量衡総会では、この調整値の不確かさをゼロとした値を定義値とする次の新たな定義への移行が審議された。

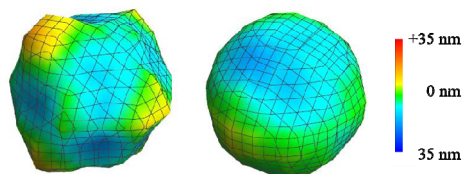


図 4 様々な方位からの直径測定値を、平均直径からの偏差を強調してプロットした球体形状三次元図: 平均直径は約 94 nm であり、直径の最大値と最小値の差は一方の球体 (左) では 69 nm 、もう一方の球体 (右) では 39 nm 。

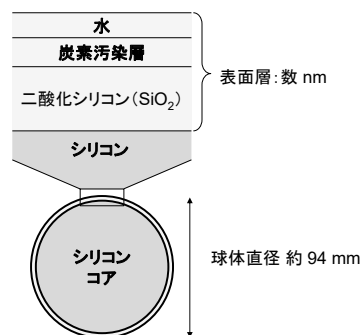


図 5 真空中での ^{28}Si 単結晶球体表面層モデル: 表面層は化学吸着水層、炭素汚染層、 SiO_2 層などからなる。

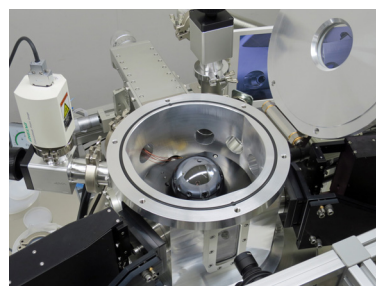


図 6 シリコン単結晶球体表面分析用分光エリプソメーター

キログラムは、プランク定数を単位 $J s$ で表わしたときに、その数値を $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ と定めることによって定義される。

メートル条約加盟国代表団による投票の結果、130年ぶりにキログラムの定義を改定する歴史的な決議が採択された。これをうけて、2019年5月20日の世界計量記念日からプランク定数に基づく新たな定義が施行される。これによって、歴史上初めて人工物ではなく普遍的な物理定数によって質量の単位が定義される。

図7中の8つのデータのうち、本研究で得られた測定結果はIAC-17とNMIJ-17の取得に貢献している。特に、NMIJ-17は研究代表者らがほぼ独立に測定したものである^②。科学技術分野の根底を支える単位のほとんどは、欧米を中心にこれまで構築されてきた。欧米以外の国が、世界共通の単位の改定に決定的な役割を果たすのは、今回が初めてのことであり、研究代表者らによる130年ぶりのキログラムの定義改定への貢献は、正に科学の歴史に残る大きな成果であると言える。

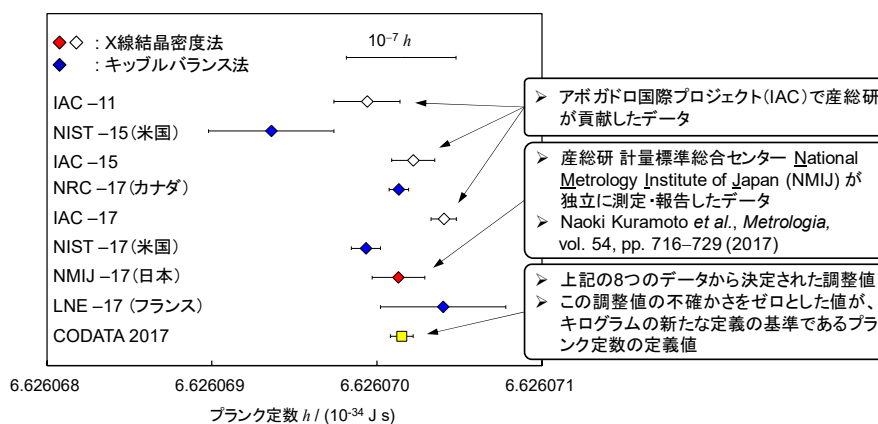


図7 キログラムの新たな定義の基準となるプランク定数の値の決定に採用された測定結果

<引用文献>

- ① B. Andreas et al.: Counting the atoms in a ^{28}Si crystal for a new kilogram definition, *Metrologia*, vol. 48, pp. S1–S13 (2011), DOI: 10.1088/0026-1394/48/2/S01
- ② N. Kuramoto et al.: Determination of the Avogadro constant by the XRCD method using a ^{28}Si -enriched sphere, *Metrologia*, vol. 54, pp. 716–719 (2017), DOI: 10.1088/1681-7575/aaed5
- ③ D. B. Newell et al.: The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI, *Metrologia*, vol. 55, pp. L12–L16 (2018), DOI: 10.1088/1681-7575/aa950a

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 16 件)

- (1) N. Kuramoto, L. Zhang, K. Fujita, S. Okubo, H. Inaba and K. Fujii: Volume measurement of a ^{28}Si -enriched sphere for a determination of the Avogadro constant at NMIJ, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 68, 1913–1920 (2019), 査読有, DOI: 10.1109/TIM.2018.2878072
- (2) S. Mizushima, N. Kuramoto, K. Fujii and T. Umeda: Electron paramagnetic resonance study on ^{28}Si single crystal for the future realization of the kilogram, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 68, 1879–1886, 査読有, DOI: 10.1109/TIM.2018.2884044
- (3) L. Zhang, N. Kuramoto, A. Kurokawa and K. Fujii: XPS study of silicon spheres as a density standard, *Sur Interface Anal.*, vol. 51, pp. 400–407 (2019), 査読有, DOI: 10.1002/sia.6594
- (4) D. Mari, E. Massa, N. Kuramoto and G. Mana: Self-weight effect in the measurement of the volume of silicon spheres, *Metrologia*, vol. 55, pp. 294–300 (2018), 査読有, DOI: 10.1088/1681-7575/aa77d1
- (5) K. Fujii, E. Massa, H. Bettin, N. Kuramoto and G. Mana: Avogadro constant measurements using enriched ^{28}Si monocrystals, *Metrologia*, vol. 55, pp. L1–L4 (2018), 査読有, DOI: 10.1088/1681-7575/aa9abd
- (6) D. B. Newell, F. Cabiati, J. Fischer, K. Fujii, S. G. Karshenboim, H. S. Margolis, E. de Mirandés, P. J. Mohr, F. Nez, K. Pachucki, T. J. Quinn, B. N. Taylor, M. Wang, B. M. Wood and Z. Zhang: The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI, *Metrologia*, vol. 55, pp. L12–L16 (2018), 査読有, DOI: 10.1088/1681-7575/aa950a
- (7) M. Stock, P. Barat, P. Pinot, F. Beaudoux, P. Espel, F. Piquemal, M. Thomas, D. Ziane, P. Abbott, D. Haddad, Z. Kubarych, J. R. Pratt, S. Schlamminger, K. Fujii, K. Fujita, N. Kuramoto, S. Mizushima, L. Zhang, S. Davidson, R. G. Green, J. Liard, C. Sanchez, B. Wood, H. Bettin, M. Borys, I. Busch, M. Hämpke, M. Krümrey and A. Nicolaus: A comparison of future realizations of the kilogram, *Metrologia*, vol. 55, pp. T1–T7 (2018), 査読有, DOI: 10.1088/1681-7575/aa9a7e
- (8) N. Kuramoto, S. Mizushima, L. Zhang, K. Fujita, Y. Azuma, A. Kurokawa and S. Okubo, H. Inaba

- and K. Fujii: Determination of the Avogadro constant by the XRCD method using a ^{28}Si -enriched sphere, *Metrologia*, vol. 54, pp. 716–729 (2017), 査読有, DOI: 10.1088/1681-7575/aaaed5
- (9) N. Kuramoto, L. Zhang, S. Mizushima, K. Fujita, Y. Azuma, A. Kurokawa and K. Fujii: Realization of the kilogram based on the Planck constant at NMIJ”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, pp. 1267–1274 (2017), 査読有, DOI: 10.1109/TIM.2016.2624878
 - (10) N. Kuramoto, Y. Azuma, H. Inaba and K. Fujii: Volume measurements of ^{28}Si -enriched sphere using an improved optical interferometer for the determination of the Avogadro constant, *Metrologia*, vol. 54, pp. 193–203 (2017), 査読有, DOI: 10.1088/1681-7575/aa5379
 - (11) G. Bartl, P. Becker, B. Beckhoff, H. Bettin, E. Beyer, M. Borys, I. Busch, L. Cibik, G. D’Agostino, E. Darlatt, M. Di Luzio, K. Fujii, H. Fujimoto, K. Fujita, M. Kolbe, M. Krumrey, N. Kuramoto, E. Massa, M. Mecke, S. Mizushima, M. Müller, T. Narukawa, A. Nicolaus, A. Pramann, D. Rauch, O. Rienitz, C. P. Sasso, A. Stopic, R. Stosch, A. Waseda, S. Wundrack, L. Zhang and X. W. Zhang: A new ^{28}Si single crystal: counting the atoms for the new kilogram definition, *Metrologia*, vol. 54, pp. 693–715 (2017), 査読有, DOI: 10.1088/1681-7575/aa7820
 - (12) S. Mizushima, N. Kuramoto, L. Zhang and K. Fujii: Mass measurement of ^{28}Si -enriched spheres at NMIJ for the determination of the Avogadro constant, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, 1275–1282 (2017), 査読有, DOI: 10.1109/TIM.2017.2653498
 - (13) K. Fujita, N. Kuramoto, Y. Azuma, S. Mizushima and K. Fujii, “Surface layer analysis of a ^{28}Si -enriched sphere both in vacuum and in air by ellipsometry,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, pp. 1283–1288 (2017), 査読有, DOI: 10.1109/TIM.2016.2634640
 - (14) L. Zhang, N. Kuramoto, Y. Azuma, A. Kurokawa and K. Fujii: Thickness measurement of oxide and carbonaceous layers on a ^{28}Si sphere by XPS, vol. 66, 1297–1303 (2017), 査読有, DOI: 10.1109/TIM.2016.2634678
 - (15) A. Waseda, H. Fujimoto, X. W. Zhang, N. Kuramoto and K. Fujii: Uniformity evaluation of lattice spacing of ^{28}Si single crystals, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, 1304–1308 (2017), 査読有, DOI: 10.1109/TIM.2016.2624838
 - (16) K. Fujii, H. Bettin, P. Becker, E. Massa, O. Rienitz, A. Pramann, A. Nicolaus, N. Kuramoto, I. Busch and M. Borys: Realization of the kilogram by the XRCD method, *Metrologia*, vol. 53, pp. A19–A45 (2016), 査読有, DOI: 10.1088/0026-1394/53/5/A19

〔学会発表〕（計 13 件）

- (1) 倉本直樹: 新しいキログラムの定義, 平成 30 年度計量技術講演会, 東京都計量検定所, 2019 年 3 月, 招待講演
- (2) 倉本直樹: 新たなキログラムの定義を導くためのシリコン単結晶球体形状測定, 平成 30 年度長さクラブ講演会, 産業技術総合研究所つくば中央講堂, 2019 年 2 月, 招待講演
- (3) N. Kuramoto, L. Zhang, K. Fujita, S. Okubo, H. Inaba and K. Fujii: Volume measurement of a ^{28}Si -enriched sphere for a determination of the Avogadro constant at NMIJ, Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2018 (CPEM2018), 2018 年 7 月, パリ (フランス)
- (4) S. Mizushima, N. Kuramoto, K. Fujii and T. Umeda: Electron paramagnetic resonance study on ^{28}Si single crystal for the future realization of the kilogram, Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2018 (CPEM2018), 2018 年 7 月, パリ (フランス)
- (5) K. Fujita, N. Kuramoto, S. Mizushima and K. Fujii: Characterization of vapor adsorption on the surface of Si spheres by ellipsometry, Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2018 (CPEM2018), 2018 年 7 月, パリ (フランス)
- (6) 倉本直樹, 藤井賢一: 新たなキログラムの定義を導くためのプランク定数精密測定, 2018 年精密工学会春季大会, 中央大学後楽園キャンパス, 2018 年 3 月, 招待講演
- (7) 倉本直樹, 藤井賢一: 新たなキログラムの定義を導くためのシリコン単結晶球体形状測定, 第 61 回光波センシング技術研究会, 東京理科大学 森戸記念館, 2018 年 6 月, 招待講演
- (8) 倉本直樹, 水島茂喜, 成川知弘, 東康史, 藤井賢一: キログラムとモルの再定義のためのアボガドロ定数精密測定, 第 83 回日本分析化学会有機微量分析研究懇談会, いわて県民情報交流センター, 2016 年 5 月
- (9) N. Kuramoto, L. Zhang, S. Mizushima, K. Fujita, Y. Azuma, A. Kurokawa and K. Fujii: Realization of the kilogram based on the Planck constant at NMIJ, Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2016 (CPEM2016), 2016 年 7 月, オタワ (カナダ)
- (10) S. Mizushima, N. Kuramoto, L. Zhang and K. Fujii: Mass measurement of ^{28}Si -enriched spheres at NMIJ for the determination of the Avogadro constant, Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2016 (CPEM2016), 2016 年 7 月, オタワ (カナダ)
- (11) K. Fujita, N. Kuramoto, Y. Azuma and K. Fujii: Surface layer analysis of Si spheres both in vacuum and in air by an improved ellipsometer, Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2016 (CPEM2016), 2016 年 7 月, オタワ (カナダ)
- (12) L. Zhang, N. Kuramoto, Y. Azuma, A. Kurokawa, N. Kuramoto and K. Fujii: Surface layer analysis of a ^{28}Si -enriched crystal by XPS, 7th International Symposium on Practical Surface Analysis (PSA-16), 2016 年 10 月, テジョン (韓国), 招待講演

- (13) 倉本直樹, 張ルウルウ, 水島茂喜, 藤田一慧, 東康史, 黒河明, 藤井賢一: ^{28}Si 同位体濃縮結晶を用いた新たなキログラムの定義の実現, 計測自動制御学会第 33 回センシングフォーラム, 近畿大学和歌山キャンパス, 2016 年 9 月

[その他]

ホームページ等

- (1) 産業技術総合研究所ホームページ キログラム定義改定特設サイト
<https://www.aist.go.jp/taisaku/ja/kg/index.html>
- (2) 産業技術総合研究所 工学計測標準研究部門 質量標準研究グループ ホームページ
<https://unit.aist.go.jp/riem/mass-std/>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：大久保 章

ローマ字氏名：OOKUBO Sho

所属研究機関名：産業技術総合研究所

部局名：計量標準総合センター

職名：主任研究員

研究者番号（8桁）：30635800

研究分担者氏名：藤井 賢一

ローマ字氏名：FUJII Kenichi

所属研究機関名：産業技術総合研究所

部局名：計量標準総合センター

職名：首席研究員

研究者番号（8桁）：50357901

研究分担者氏名：水島 茂喜

ローマ字氏名：MIZUSHIMA Shigeki

所属研究機関名：産業技術総合研究所

部局名：計量標準総合センター

職名：主任研究員

研究者番号（8桁）：60358091

研究分担者氏名：稲場 肇

ローマ字氏名：INABA Hajime

所属研究機関名：産業技術総合研究所

部局名：計量標準総合センター

職名：研究グループ長

研究者番号（8桁）：70356492

研究分担者氏名：藤田 一慧

ローマ字氏名：FUJITA Kazuaki

所属研究機関名：産業技術総合研究所

部局名：計量標準総合センター

職名：研究員

研究者番号（8桁）：80759952

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。