

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360037

研究課題名(和文)二次元ダークフリッジ法による球体直径測定原理開発とアボガドロ定数精密決定への応用

研究課題名(英文) Development of a two-dimensional dark fringe method to measure sphere diameters and an accurate determination of the Avogadro constant by using a  $^{28}\text{Si}$  crystal

研究代表者

倉本 直樹 (KURAMOTO, NAOKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：60356938

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,400,000円

研究成果の概要(和文)：現在、質量の単位である「キログラム」は金属製の分銅「国際キログラム原器」の質量により定義されている。この人工物による定義を基礎物理定数に基づき改定することを目的として、二次元ダークフリッジ法に基づく高精度シリコン球体直径測定技術の開発および $^{28}\text{Si}$ 同位体濃縮結晶を用いたX線結晶密度法によるアボガドロ定数の高精度測定を行った。 $^{28}\text{Si}$ 単結晶球体の体積測定、表面分析、質量測定を実施し、 $2.0\text{E}-8$ の精度でのアボガドロ定数決定に成功した。これは実験的に直接決定されたアボガドロ定数としては最も精度の高いものであり、キログラムの定義の基礎物理定数による改定の2018年実施を確実なものとすることができた。

研究成果の概要(英文)：The kilogram is currently defined by the international prototype of the kilogram. To redefine the kilogram based on fundamental constants, a two-dimensional dark fringe method to measure diameters of 1 kg Si spheres has been developed and a  $^{28}\text{Si}$ -enriched crystal has been used to determine the Avogadro constant by the X-ray crystal density method. The volume and mass of two 1 kg  $^{28}\text{Si}$  spheres have been measured by using a laser interferometer and a vacuum balance, respectively. The surface of the spheres has been analyzed by a spectroscopic ellipsometer calibrated by X-ray reflectometry. The Avogadro constant has been determined with a relative uncertainty of  $2.0\text{E}-8$ . This is the most accurate value directly determined experimentally to date, resulting in a strong trigger to conduct the redefinition of the kilogram based on the fundamental constants in 2018.

研究分野：応用物理学(基礎物理定数の超精密測定、レーザー干渉技術による幾何形状精密計測)

キーワード：基礎物理定数 標準 アボガドロ定数 光周波数制御 超精密計測

1. 研究開始当初の背景

現在では、長さ、時間、電圧、抵抗といった重要な物理量の単位は、普遍的な自然現象あるいは物理法則に基づいて定義されている。一方、質量の単位であるキログラムは、約120年前に人工物である国際キログラム原器が質量の単位として承認されて以来、その定義は変わっていない。しかしながら、国際キログラム原器の質量は歳月とともにわずかに増加することが報告されており<sup>①</sup>、キログラムの定義を普遍的な物理定数を基準とする新しい定義へ改定することが強く望まれている。アボガドロ定数は1 molの物質に含まれる原子や分子の数を示す基礎物理定数である。この定数を正確に決めることができれば、現行の定義を原子の質量を基準にして、例えば「キログラムは  $5.018 \dots \times 10^{25}$  個の炭素原子  $^{12}\text{C}$  の質量に等しい」と改定することができる。このため、人類史上初となる人工物に頼らない基礎物理定数に基づく質量標準の実現を目的として、アボガドロ定数高精度化の研究が世界各国で進んでいる<sup>②</sup>。

アボガドロ定数は、X線結晶密度法により求められる。この方法では、シリコン単結晶の密度、格子定数、モル質量を測定する。自然界のシリコンには3種類の安定同位体  $^{28}\text{Si}$ 、 $^{29}\text{Si}$ 、 $^{30}\text{Si}$  が存在し、通常のシリコン結晶を用いた場合、モル質量(同位体存在比)の測定精度が制約となり高精度にアボガドロ定数を決定することができなかった。このため、我々は世界の七つの計量標準研究機関と協力して  $^{28}\text{Si}$  だけを濃縮した結晶を開発し、アボガドロ定数を高精度測定する国際研究協力「アボガドロ国際プロジェクト」を実施した。 $^{28}\text{Si}$  単結晶を用いることで従来より一桁小さな相対不確かさ ( $3 \times 10^{-8}$ ) でのアボガドロ定数決定に成功したが、キログラムを再定義するためには、さらに高い精度でアボガドロ定数を測定する必要があった<sup>③</sup>。

2. 研究の目的

X線結晶密度法によるアボガドロ定数決定に必要なシリコン結晶密度は、通常、質量1 kgのシリコン単結晶球体の体積および質量の精密測定から求められる。密度測定の主要な不確かさの要因は体積測定であり、アボガドロ定数高精度化のボトルネックとなっている。球体体積は、レーザー干渉計による多方位からの球体直径測定に基づき決定される。本研究では、二次元ダークフリンジ法による高精度球体直径測定原理を新たに開発し、これまで  $4.4 \times 10^{-8}$  であったシリコン単結晶球体体積測定精度を  $1.5 \times 10^{-8}$  にまで高精度化する。

図1は質量1 kgの  $^{28}\text{Si}$  単結晶球体であり、本研究ではこの球体の体積測定、表面分析、質量測定および格子定数均一性評価を実施し、「アボガドロ国際プロジェクト」で得られたデータと組み合わせて、これまでで最も良い精度 ( $2 \times 10^{-8}$ ) でアボガドロ定数を決定

する。

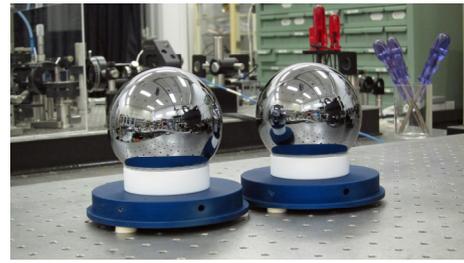


図1 1 kg  $^{28}\text{Si}$  単結晶球体：直径は 94 mm であり、 $^{28}\text{Si}$  の濃縮度は 99.99% である。

3. 研究の方法

図2はシリコン単結晶球体体積測定用レーザー干渉計のブロック図を示す。球体は間隔  $L$  のエタロン板の間におかれる。外部共振器型ダイオードレーザーからのビームを二分割し、それぞれのビームをエタロン板に垂直入射させる。球体とエタロン板から反射したビームにより形成される同心円状の干渉縞を CCD1 及び CCD2 で撮像し、ダイオードレーザーの光周波数の掃引による干渉縞の解析から球体とエタロン板とのギャップ  $d_1$  および  $d_2$  を決定する。エタロン板の間隔  $L$  の測定では、ビーム1をシャッターで遮り、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く。機構に設けた穴を通過したビーム2によって二枚のエタロン板からの反射光により形成される干渉縞を CCD3 で観測し、ダイオードレーザーの光周波数の掃引による干渉縞の解析から  $L$  を決定する。球体の直径は  $D = L - (d_1 + d_2)$  として求められる。球体の下部には方位制御機構があり、様々な方位からの直径を測定できる。 $L$ 、 $d_1$  および  $d_2$  を決定するための干渉縞の解析

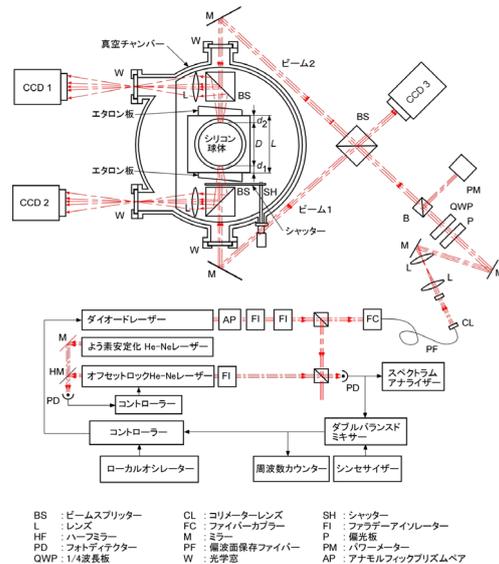


図2 シリコン単結晶球体直径測定用レーザー干渉計：球体回転機構を備え、多方位からの直径測定が可能である。

には、位相シフト法を用いる。この方法では、ダイオードレーザーの光周波数を掃引し、干渉縞の位相を一定間隔で変化させる。この光周波数の変化に伴う干渉強度の変化の測定から干渉縞の各点における位相を決定する。我々はすでにこの位相シフト法により球体直径を 1 nm の精度で測定できることを報告しているが、本研究では更に高精度な直径測定のために二次元ダークフリンジ法に基づくシステムを構築する。この干渉縞解析手法は干渉縞を完全にダーク（暗）になる光周波数を検出する方法であり、高い精度で実施可能な光周波数測定から球体直径を測定する。また、干渉計構成光学部品間の多重反射が干渉縞のノイズとなり、直径測定精度を低下させる。多重反射の影響は、光学部品に比較的大きなウェッジ角を持たせることで除去できる。最適なウェッジ角をもつ光学部品を導入することで、球体直径精度の向上をはかる。

シリコン単結晶球体の表面は厚さ数ナノメートルの自然酸化膜で覆われており、アボガドロ定数を正確に決定するためには、純粋なシリコン単結晶の部分の体積と質量から密度を求める必要がある。そこで、分光エリプソメトリー、X線反射率法などの表面分析技術を用いて球体表面に存在する物質の化学組成、厚さ、質量などを評価する。

シリコン単結晶球体の質量測定は我が国の質量の国家標準である日本国キログラム原器を基準として実施する。さらにアボガドロ定数の高精度測定に不可欠なシリコン結晶中の格子定数の均一性を、放射光を利用した自己参照型格子比較器を用いて評価する。

以上の結果を「アボガドロ国際プロジェクト」により得られるシリコン  $^{28}\text{Si}$  単結晶の格子定数、モル質量などの測定結果と合わせて、 $2 \times 10^{-8}$  の相対不確かさでのアボガドロ定数決定を決定する。

#### 4. 研究成果

##### (1) $^{28}\text{Si}$ 単結晶球体体積測定

二次元ダークフリンジ法による球体直径測定システム構築のためには、干渉縞を低ノイズかつ高速度にとりこむカメラが必要であった。高速度カメラおよび最適なウェッジ角を持つ光学部品を導入し、予備的な直径測定を行った。しかし、直径測定の妥当性検証を完了する前に、 $^{28}\text{Si}$  単結晶球体が我々のもとに輸送されてきた。 $^{28}\text{Si}$  単結晶球体は「アボガドロ国際プロジェクト」参加研究機関の共有財産であり、我々が体積測定を実施できる期間は限られていた。このため、二次元ダークフリンジ法ではなく、すでに十分な妥当性の検証および国際的同等性の確認を実施済みの位相シフト法による球体直径測定を実施せざるを得なかった。図3に様々な方位より行った直径測定の結果を示す。ほぼ均一に分布した約 1000 方位から測定を行い、平均直径から体積を決定した。球体体積の相対不確かさは  $2.0 \times 10^{-8}$  であった。本研究実施

前の球体体積測定の相対不確かさは  $4.4 \times 10^{-8}$  であり、大幅に精度を向上することができた。主要な精度向上の要因は、本研究で実施した最適なウェッジ角をもつ光学部品の導入による干渉縞ノイズの低減である。

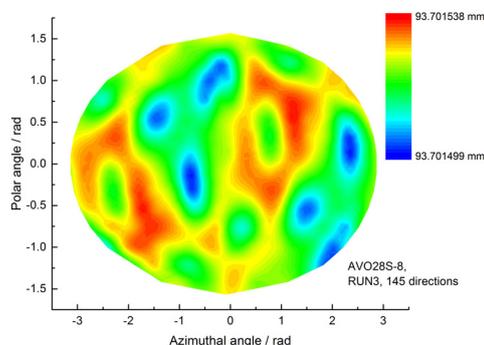


図3 20 °C、真空条件で測定された球体直径分布のモルワイデ図法による表示:最大直径と最小直径の差は 38 nm。

##### (2) 1 kg $^{28}\text{Si}$ 単結晶球体表面分析

図4は表面分析に用いた分光エリプソメーターを示す。エリプソメトリーは薄膜の膜厚測定に広く用いられている手法であるが、不確かさの評価が困難である。本研究ではX線反射率法により  $\text{SiO}_2$  膜の厚さを 0.1 nm の不確かさで値付けしたシリコンウェハーで分光エリプソメーターを校正することで、国家計量標準にトレーサブルな球体表面分析を可能とした。図5に球体全面にわたる酸化膜厚さの分布を示す。



図4 球体表面分析用分光エリプソメーター：球体回転機構を備え、球体表面全面にわたる  $\text{SiO}_2$  膜厚さの自動マッピングが可能である。

##### (3) 1 kg $^{28}\text{Si}$ 単結晶球体質量測定

図6に質量測定に用いた真空天びんを示す。真空中での質量測定が可能であり、空気浮力の影響を受けることなく、我が国の質量の国家標準である日本国キログラム原器を基準として、 $^{28}\text{Si}$  単結晶球体の質量を測定した。測定の不確かさは  $8 \mu\text{g}$  であり、世界最高レベルでの質量測定を実現した。

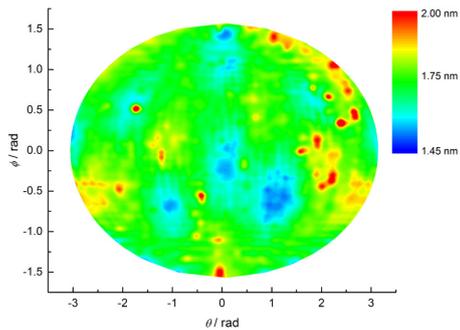


図5  $^{28}\text{Si}$  単結晶表面上の  $\text{SiO}_2$  膜厚さ分布  
モルワイデ図法による表示: ほぼ均一に分布する約 8000 点で膜厚測定を実施した。

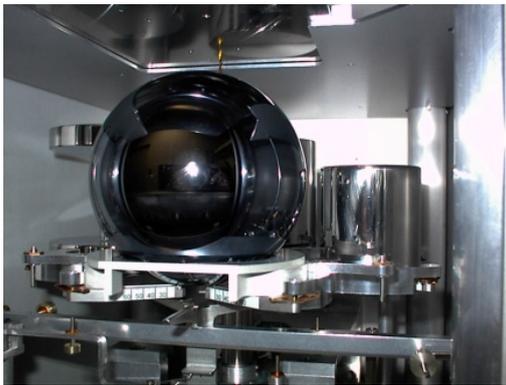


図6 真空天びんによる  $^{28}\text{Si}$  単結晶シリコン球体質量測定: 真空中での測定が可能であり、空気浮力の影響を受けることなく、高精度な質量測定が可能である。

#### (4) $^{28}\text{Si}$ 単結晶格子定数均一性評価

自己参照型格子比較器により  $^{28}\text{Si}$  単結晶における格子定数均一性を評価した。X 線源に放射光を用いることで、9 桁の分解能での評価が可能であった。 $^{28}\text{Si}$  単結晶における格子定数の均一性は極めて高く、アボガドロ定数を高精度に決定できることを確認できた。

#### (5) アボガドロ定数決定

本研究で得られたデータと「アボガドロ国際プロジェクト」参加研究機関による密度、格子定数およびモル質量などの測定値をまとめ、2015 年 4 月に新たなアボガドロ定数の測定値を報告した。測定の相対不確かさはこれまでで最も小さい  $2.0 \times 10^{-8}$  である。

#### (6) 決定したアボガドロ定数の波及効果

##### ① 基礎物理定数調整への採用

本研究で決定したアボガドロ定数は実験的に直接決定されたデータとしては最も不確かさが小さい。このため 2016 年に公開予定の科学技術データ委員会 (CODATA) による基礎物理定数調整に採用される予定であり、人類共通の科学技術情報である基礎物理定数の整備に大きく貢献する。

##### ② キログラム再定義への貢献

アボガドロ定数の高精度化により、国際キログラム原器の質量として定義されているキログラムを基礎物理定数によって再定義することができる。2014 年に開催されたメートル条約の最高議決機関である国際度量衡総会 (Conférence Générale des Poids et Mesures : CGPM) において、キログラム、アンペア、モル、ケルビンの四単位の定義を 2018 年に基礎物理定数を用いて改定することを奨励する決議が採択されている。このため、国際キログラム原器の長期安定性をしのぐ精度での複数の測定手法によるアボガドロ定数決定が切望されていた。アボガドロ定数はワットバランス法により決定されるプランク定数から間接的に導出することもできる。図 7 に X 線結晶密度法とワットバランス法によって最近得られたアボガドロ定数の比較を示す。米 国 標 準 技 術 研 究 所 (National Institute of Standards and Technology : NIST) は 2007 年と 2014 年にワットバランス法による値を報告している。カナダ国立研究機構 (National Research Council Canada : NRC) もワットバランス法により、2011 年と 2014 年に測定値を報告している。本研究で  $^{28}\text{Si}$  単結晶を用いて決定された値 (IAC-15) を含む、最近報告された異なる方法による三つの独立した測定値 (IAC-15、NRC-14、NIST-14) の間で良い整合性が確認されており、また、いずれの測定の相対標準不確かさも報告されている国際キログラム原器の質量の長期安定性 (120 年間で  $50 \mu\text{g}$ 、相対値で  $5.0 \times 10^{-8}$ ) よりも小さい。これらの状況を勘案して、すでに国際度量衡委員会 (Comité International des Poids et Mesures : CIPM) 質量関連諮問委員会 (Consultative Committee for Mass and Related Quantities : CCM) は 2018 年にキログラムの基準を国際キログラム原器から基礎物理定数に移行できるよう準備を開始している。本研究で決定したアボガドロ定数は人類史上初の人工物に頼らない質量標準の確立を確実にするものであり、その波及効果は極めて大きい。

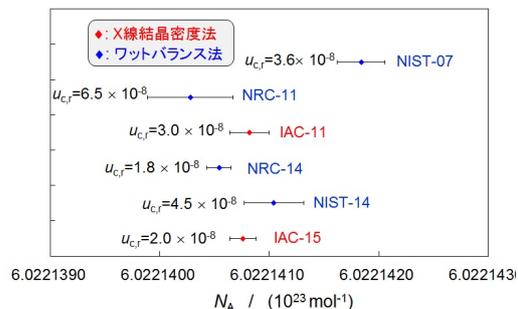


図7 異なる測定原理によって決定されたアボガドロ定数の比較: 各データ上のバーは標準不確かさを、左の  $u_{c,r}$  は相対不確かさを表す。

<引用文献>

- ① R. Davis, The SI unit of mass, *Metrologia*, vol. 40, pp. 299-305 (2003)
- ② M. Milton et al., Towards a new SI: a review of progress made since 2011, *Metrologia*, vol. 51, pp. R21-R30 (2014)
- ③ B. Andreas, N. Kuramoto et al., Determination of the Avogadro constant by counting the atoms in a  $^{28}\text{Si}$  crystal, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 106., pp. 030801 (2011)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計9件)

- ① G. Mana, K. Fujii, N. Kuramoto, S. Mizushima, T. Narukawa et al., The correlation of the  $M_A$  measurements by counting  $^{28}\text{Si}$  atoms, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 査読あり, accepted for publication in 2015
- ② Y. Azuma, P. Barat, G. Bartl, H. Bettin, M. Borys, I. Busch, L. Cibik, G. D'Agostino, K. Fujii, H. Fujimoto, A. Hioki, M. Krumrey, U. Kuetsgens, N. Kuramoto, G. Mana, R. Meess, S. Mizushima, T. Narukawa, A. Nicolaus, A. Pramann, S. A. Rabb, O. Rientz, C. Sasso, M. Stock, R. D. Vocke Jr. A. Waseda, S. Wundrack and S. Zakel, Improved measurement results for the Avogadro constant using a  $^{28}\text{Si}$ -enriched crystal, *Metrologia*, 査読あり, vol. 52, pp. 360-375 (2015)  
DOI:10.1088/0026-1394/52/2/360
- ③ L. Zhang, Y. Azuma, A. Kurokawa, N. Kuramoto and K. Fujii, Surface layer analysis of Si sphere by XRF and XPS, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 査読あり, vol. 64, pp. 1509-1513 (2015)  
DOI:10.1109/TIM.2015.2389352
- ④ S. Mizushima, N. Kuramoto, K. Ueda and K. Fujii, Mass measurement of 1-kg silicon spheres for determination of the Avogadro and Planck constants, *IEEE Trans Instrum. Meas.*, 査読あり, vol. 64, pp. 1527-1532 (2015)  
DOI:10.1109/TIM.2015.2389351
- ⑤ N. Kuramoto, Y. Azuma, H. Inaba, F.-L. Hong and K. Fujii, Improvements to the volume measurement of  $^{28}\text{Si}$  spheres to determine the Avogadro constant, *IEEE Trans Instrum. Meas.*, 査読あり, vol. 64, pp. 1650-1656 (2015)  
DOI:10.1109/TIM.2015.2401212
- ⑥ A. Waseda, H. Fujimoto, X. W. Zhang, N. Kuramoto and K. Fujii, Homogeneity characterization of lattice spacing of silicon single crystals, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 査読あり, vol. 64, pp. 1692-1695 (2015)  
DOI:10.1109/TIM.2014.2383091
- ⑦ T. Narukawa, A. Hioki, N. Kuramoto and K. Fujii, Molar-mass measurement of a  $^{28}\text{Si}$ -enriched silicon crystal for determination of the Avogadro constant, *Metrologia*, 査読あり, vol. 51, pp. 161-168 (2014)  
DOI:10.1088/0026-1394/51/3/161
- ⑧ N. Kuramoto, K. H. Chang, K. Fujii and Y. J. Lee, International comparison of volume measurement for a 1 kg silicon sphere, *Measurement*, 査読あり, vol. 49, pp. 187-195 (2014)  
DOI:10.1016/j.measurement.2013.11.038
- ⑨ B. Andreas, K. Fujii, N. Kuramoto and G. Mana, The uncertainty of the phase-correction in sphere-diameter measurements, *Metrologia*, 査読あり, vol. 49, pp. 479-486 (2012)  
DOI:10.1088/0026-1394/49/4/479

[学会発表] (計13件)

- ① 早稲田篤, 藤本弘之, 張小威, 倉本直樹, アボガドロ定数決定のための単結晶シリコン結晶評価, 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所第32回PFシンポジウム, 2015年3月17日, つくば国際会議場(茨城県・つくば市)
- ② N. Kuramoto, Realization of the mass standard based on fundamental physical constants, 14th Japanese-American Frontier of Science (JAFoS) Symposium, 招待講演, 2014年12月5日, ホテルニューオータニ(東京都・千代田区)
- ③ N. Kuramoto, Y. Azuma, H. Inaba, F.-L. Hong and K. Fujii, Volume measurements of  $^{28}\text{Si}$  spheres by an improved optical interferometer and ellipsometer to determine the Avogadro constant, Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2014, 2014年8月25日, リオデジャネイロ(ブラジル)
- ④ L. Zhang, Y. Azuma, A. Kurokawa, N. Kuramoto and K. Fujii, Surface analysis of Si sphere by XRF and XPS, Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2014, 2014年8月25日, リオデジャネイロ(ブラジル)
- ⑤ A. Waseda, H. Fujimoto, X. W. Zhang, N. Kuramoto and K. Fujii, Homogeneity characterization of lattice spacing of silicon single crystals, Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2014, 2014年8月26日, リオデジャネイロ(ブラジル)

- ⑥ S. Mizushima, N. Kuramoto, K. Ueda and K. Fujii, Mass Measurement of 1-kg silicon spheres for the precise determination of the Avogadro constant at the NMIJ, Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2014, 2014年8月26日, リオデジャネイロ(ブラジル)
- ⑦ T. Arnold, Y. Azuma, K. Fujii, H. Fujimoto, N. Kuramoto, S. Mizushima, A. Waseda et al., European Metrology Research Program: Advances on the realization of the kilogram definition, Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2014, 2014年8月27日, リオデジャネイロ(ブラジル)
- ⑧ 倉本直樹, 東康史, 稲場肇, 洪鋒雷, 藤井賢一, 次世代質量標準実現のためのシリコン結晶の密度測定と表面分析, 第34回日本熱物性シンポジウム, 2013年11月20日, 富山県民会館(富山県・富山市)
- ⑨ K. Fujii, Toward the redefinition of the kilogram from the <sup>28</sup>Si international research project, Asia-Pacific Symposium on Measurement of Mass, Force and Torque, 招待講演, 2013年11月20日, Taipei (台湾)
- ⑩ 早稲田篤, 藤本弘之, 張小威, 倉本直樹, アボガドロ定数決定のための単結晶シリコン結晶評価, 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所第31回PFシンポジウム, 2014年3月18日, つくば国際会議場(茨城県・つくば市)
- ⑪ 張ルウルウ, 東康史, 寺内信哉, 黒河明, 蛍光X線分析用フレキシブルな金属薄膜標準試料の作成, 2013真空・表面科学合同講演会, 2013年11月26日, つくば国際会議場(茨城県・つくば市)
- ⑫ N. Kuramoto, H. Inaba and K. Fujii, Uncertainty reduction in the volume measurement of Si spheres by an optical interferometer to determine the Avogadro constant, Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2012, 2012年7月3日, ワシントンDC (アメリカ合衆国)
- ⑬ H. Baumann, H. Bettin, F. Bielsa, A. Eichenberger, G. Geneves, N. Kuramoto, G. Mana, E. Massa, F. Pereira dos Santos, A. Picard, P. Pinot and A. Shindler, Realization of the anticipated definition of the kilogram, Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2012, 2012年7月3日, ワシントンDC (アメリカ合衆国)
- ① 倉本直樹, 東康史, 藤井賢一, 基礎物理定数に基づく新しいキログラムとモルの定義, ぶんせき, No. 6, pp. 229-236 (2015)
- ② 倉本直樹, 物質質量 (mol) についての基礎解説と最新動向, 計測と制御, vol. 53, pp. 368-373 (2014)
- ③ 藤井賢一, キログラムの定義改定に向けた質量標準開発の動向, 日本物理学会誌, vol. 69, pp. 604-612 (2014)
- ④ 藤井賢一, 正確なアボガドロ定数, 化学と教育, vol. 62, 368-371 (2014)
- ⑤ 藤井賢一, SI単位の定義改定をめぐる最近の動き, 精密工学会誌, vol. 80, pp. 625-629 (2014)
- ⑥ 倉本直樹, 藤井賢一, 物質質量の話ーモル、アボガドロ定数の現在と将来ー, ペトロテック, vol. 36, 482-486 (2013)
- ⑦ 倉本直樹, 藤田佳孝, 密度・粘度の話, vol. 36, pp. 551-556 (2013)
- ⑧ 藤井賢一, 「国際単位計 (SI)」ー普遍定数に基づく再定義の動きー, 数理科学, vol. 599, pp. 16-21 (2013)
- ⑨ 藤井賢一, 単位をめぐる最先端科学ー基本単位が変わるとどうなるのかー, vol. 6, pp. 6-9 (2013)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

倉本 直樹 (KURAMOTO, Naoki)  
産業技術総合研究所・計測標準研究部門。  
主任研究員  
研究者番号：60356938

### (2) 研究分担者

早稲田 篤 (WASEDA, Atsushi)  
産業技術総合研究所・計測標準研究部門。  
主任研究員  
研究者番号：20272172

東 康史 (AZUMA, Yasushi)  
産業技術総合研究所・計測標準研究部門。  
主任研究員  
研究者番号：30356365

藤本 弘之 (FUJIMOTO, Hiroyuki)  
産業技術総合研究所・計測標準研究部門。  
主任研究員  
研究者番号：30357917

藤井 賢一 (FUJII, Kenichi)  
産業技術総合研究所・計測標準研究部門  
首席研究員  
研究者番号：50357901

[その他]

[解説論文] (計9件)