

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02630

研究課題名(和文)プランク定数にもとづくキログラムの新たな定義を利用した微小質量測定方法の開発

研究課題名(英文) Development of a method for small mass measurements using the new definition of the kilogram based on the Planck constant

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) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：2019年、質量の単位「キログラム」の定義が130年ぶりに改定された。新たな定義は普遍的な物理定数「プランク定数」にもとづく。この歴史的な定義の改定によって、これまで実現することが難しかった、微小な質量をキログラムの定義にもとづき高精度に測定することが原理的に可能となっている。本研究では、キログラムの定義改定という質量の基準に関する歴史的なパラダイムシフトを積極的に活用し、以下の項目を実施する。

- ・プランク定数を基準として、1ミリグラムから10マイクログラムの範囲の微小な質量を測定可能な電圧天びんの開発
- ・原子数計測にもとづき質量を測定した微小参照分銅を用いた電圧天びんの健全性検証

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果によって、電圧天びんを用いて微小な質量をプランク定数にもとづき直接測定することが可能となった。測定精度はまだ十分高くないが、精度向上に必要な改良点も明らかにしており、本研究の成果は今後の精度向上につながることを期待できる

研究成果の概要(英文)：In 2019, the definition of the kilogram, the unit of mass, was revised for the first time in 130 years. The new definition is based on the Planck constant. This historic revision of the definition makes it possible to measure very small masses with high precision based on the definition of the kilogram, which has been difficult to achieve in the past. In this research, we actively utilize the historical paradigm shift regarding the standard of mass, the revision of the definition of the kilogram, and carry out the following items.

- ・Development of a voltage balance capable of measuring small mass in the range from 1 mg to 10 ug on the basis of the Planck constant
- ・Reliability check of the voltage balance using a micro reference weight whose mass is calibrated on the basis of an atomic counting.

研究分野：基礎物理定数にもとづく質量標準の実現

キーワード：微小質量 プランク定数 キログラム 標準 シリコン単結晶 電圧天びん

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 $50\ \mu\text{g}$ (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を実施されていた。



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

図2は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、研究代表者らによって測定された値である^①(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) $h = 6.626\ 070\ 150(69) \times 10^{-34}\ \text{J s}$ を報告した。括弧内の数値は最後の2桁の不確かさを表す。2019年5月20日からは、この調整値の不確かさをゼロにした値を基準とするキログラムの定義が施行されている^②。

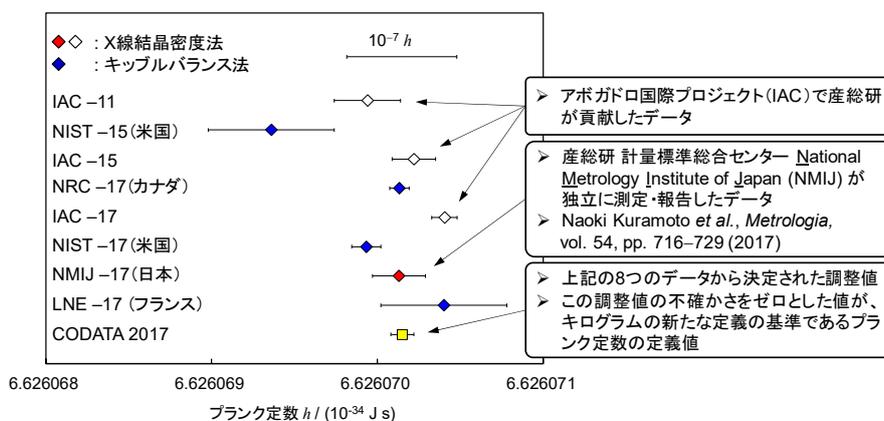


図2 キログラムの新たな定義の基準となるプランク定数の値の決定に採用された測定結果

2. 研究の目的

電子天びんなどの質量計測器で質量を正確に測定するためには、質量が試料とほぼ等しい参照分銅を用いて、天びんをあらかじめ測定しておく。以前のキログラムの定義の下では、1 kgという特定の質量が基準であった。このため、1 kgから離れるほど、参照分銅の質量測定精度は悪化してしまい、微小な質量を正確に測定することは非常に困難であった。一方、上述の歴史的なキログラムの定義改定によって1 kgはすでに特別な質量の基準点ではなくなっており、プランク定数の定義値を基準として微小な質量を直接高精度に測定することが可能となっている。そこで本研究ではこの歴史的なキログラムの定義の改定を活用して、微小な質量を正確に測定する電圧天びんを開発する。

3. 研究の方法

電圧天びんは試料にかかる重力と静電力を釣り合わせる質量測定器である。静電力はプランク定数を基準とする電圧標準および電気容量標準を基準にして測定することができる。このため、試料の質量を参照分銅を用いずにプランク定数を直接基準にして測定することができる。測定原理の詳細はFujitaらによってまとめられている^③。

4. 研究成果

試料温度制御システムなどを導入し、電圧天びんの高精度化を進めた。電圧天びんによる質量測定の健全性確認のために、前もって図3に示すシリコン単結晶球体を用いた原子数計測法^④によって質量を測定済みの2 mgワイヤー分銅を用いた。電圧天びんによる質量測定精度は4桁であり、測定値は、原子数計測法によって測定した値と不確かさの範囲で一致した。これによって電圧天びんの健全性を確認することができた^③。



図3 ^{28}Si 単結晶球体

<引用文献>

- ① N. Kuramoto et al.: Determination of the Avogadro constant by the XRCD method using a ^{28}Si -enriched sphere, *Metrologia*, vol. 54, pp. 716–729 (2017)
- ② 産業技術総合研究所 質量標準研究グループウェブサイト,
<https://unit.aist.go.jp/riem/mass-std/>
- ③ K. Fujita et al.: Verifying the reliability of a voltage balance apparatus to measure small mass and force standards at NMIJ, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 70, pp. 1004205 (2021)
- ④ N. Kuramoto et al.: Reproducibility of the realization of the kilogram based on the Planck constant by the XRCD method at NMIJ, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 70, pp. 1005609 (2021)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Fujita Kazuaki, Fujii Kenichi, Zhang Lulu, Azuma Yasushi, Mizushima Shigeki, Kuramoto Naoki	4. 巻 71
2. 論文標題 Investigating Stability of Si Sphere Surface Layer in Ambient-Vacuum Cyclic Measurements Using Ellipsometry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement	6. 最初と最後の頁 1001409 ~ 1004109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIM.2021.3129229	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kuramoto Naoki, Mizushima Shigeki, Zhang Lulu, Fujita Kazuaki, Ota Yuichi, Okubo Sho, Inaba Hajime	4. 巻 18
2. 論文標題 Realization of the new kilogram by the XRCD method using 28Si-enriched spheres	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Measurement: Sensors	6. 最初と最後の頁 100091 ~ 100091
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.measen.2021.100091	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fujita Kazuaki, Kuramoto Naoki	4. 巻 18
2. 論文標題 Finite element simulation of the effect of surface roughness of coaxial electrodes on small mass and force measurements using a voltage balance apparatus	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Measurement: Sensors	6. 最初と最後の頁 100143 ~ 100143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.measen.2021.100143	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 KURAMOTO Naoki	4. 巻 37
2. 論文標題 New Definitions of the Kilogram and the Mole: Paradigm Shift to the Definitions Based on Physical Constants	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Analytical Sciences	6. 最初と最後の頁 177 ~ 188
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2116/analsci.20SAR08	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kuramoto Naoki, Mizushima Shigeki, Zhang Lulu, Fujita Kazuaki, Okubo Sho, Inaba Hajime, Azuma Yasushi, Kurokawa Akira, Ota Yuichi, Fujii Kenichi	4. 巻 70
2. 論文標題 Reproducibility of the Realization of the Kilogram Based on the Planck Constant by the XRC Method at NMIJ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement	6. 最初と最後の頁 1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIM.2021.3061805	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kuramoto Naoki, Mizushima Shigeki, Zhang Lulu, Fujita Kazuaki, Ota Yuichi, Okubo Sho, Inaba Hajime	4. 巻 35
2. 論文標題 Realization of the New Kilogram Using ²⁸ Si-Enriched Spheres and Dissemination of Mass Standards at NMIJ	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MAPAN	6. 最初と最後の頁 491~498
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12647-020-00393-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fujita Kazuaki, Fujii Kenichi, Yamamoto Yasuyuki, Ota Yuichi, Kuramoto Naoki	4. 巻 70
2. 論文標題 Verifying the Reliability of a Voltage Balance Apparatus to Measure Small Mass and Force Standards at NMIJ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIM.2021.3052020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mizushima Shigeki, Kuramoto Naoki, Ueda Takahide	4. 巻 70
2. 論文標題 Determination of Defect Concentrations in ²⁸ Si Crystals Using EPR for the Realization of the Kilogram	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIM.2021.3062186	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Zhang Lulu, Kuramoto Naoki, Kurokawa Akira	4. 巻 70
2. 論文標題 XPS Analysis of a 28Si-Enriched Sphere for Realization of the Kilogram	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIM.2021.3066190	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ota Yuichi, Okubo Sho, Inaba Hajime, Kuramoto Naoki	4. 巻 70
2. 論文標題 Volume Measurement of a 28Si-Enriched Sphere to Realize the Kilogram Based on the Planck Constant at NMIJ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIM.2021.3061249	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Stock M, Kuramoto N et al.	4. 巻 57
2. 論文標題 Report on the CCM key comparison of kilogram realizations CCM.M-K8.2019	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Metrologia	6. 最初と最後の頁 07030 ~ 07030
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/0026-1394/57/1A/07030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Okubo Sho, Kuramoto Naoki, Inaba Hajime	4. 巻 28
2. 論文標題 40 GHz continuous, precise, and low power-loss laser frequency sweep using an electro-optic modulator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 11956 ~ 11956
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.389297	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ota Y., Ueki M., Kuramoto N.	4. 巻 172
2. 論文標題 Evaluation of an automated mass comparator performance for mass calibration of sub-milligram weights	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Measurement	6. 最初と最後の頁 108841 ~ 108841
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.measurement.2020.108841	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 張ルウルウ	4. 巻 27
2. 論文標題 新しいキログラム定義を支える表面分析 高純度濃縮Si単結晶球体表面のXPS分析によるアプローチ	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Surface Analysis	6. 最初と最後の頁 2 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1384/jsa.27.2	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kuramoto Naoki	4. 巻 18
2. 論文標題 The new kilogram for new technology	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 720 ~ 720
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-022-01615-x	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kuramoto Naoki	4. 巻 -
2. 論文標題 Realization of the New Kilogram Based on the Planck Constant by the X-Ray Crystal Density Method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Handbook of Metrology and Applications	6. 最初と最後の頁 1 ~ 22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-19-1550-5_11-1	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 倉本直樹、藤田一慧、大田由一
2. 発表標題 新しいキログラムの作り方
3. 学会等名 第38回合同シンポジウム（第88回日本分析化学会有機微量分析研究懇談会、第116回計測自動制御学会力学量計測部会）、オンライン開催（2021年6月17日）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 倉本直樹
2. 発表標題 普遍的な物理定数にもとづく新しいキログラムの定義
3. 学会等名 2021年度 非破壊検査総合シンポジウム、主催：日本非破壊検査協会、オンライン開催（2021年6月22日）（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoki KURAMOTO, Shigeki MIZUSHIMA, Lulu ZHANG, Kazuaki FUJITA, Yuichi OTA, Sho OKUBO, Hajime INABA
2. 発表標題 Realization of the new kilogram by the XRCd method using ²⁸ Si-enriched spheres
3. 学会等名 IMEKO2021、主催：IMEKO（国際計測連合）、オンライン開催（2021年8月30日）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoki KURAMOTO
2. 発表標題 New definition of the kilogram and mass standards for industry
3. 学会等名 Strengthening ASEAN Mass, Density and Viscosity Metrology for Sustainable Development、主催：National Metrology Institute of Thailand (NIMT)、オンライン開催（2022年1月21日）（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 倉本直樹
2. 発表標題 新しい1キログラムの測り方 -さらばキログラム原器-
3. 学会等名 IMEKO2021 市民公開講座、主催：IMEKO（国際計測連合）、オンライン開催（2021年8月29日）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fujita Kazuaki, Kuramoto Naoki
2. 発表標題 Finite element simulation of the effect of surface roughness of coaxial electrodes on small mass and force measurements using a voltage balance apparatus
3. 学会等名 IMEKO2021、主催：IMEKO（国際計測連合）、オンライン開催（2021年8月30日）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 倉本直樹、藤田一慧、大田由一
2. 発表標題 新しいキログラムの作り方
3. 学会等名 第37回合同シンポジウム（第87回日本分析化学会有機微量分析研究懇談会、第113回計測自動制御学会力学量計測部会）、2020年6月11日、講演予稿集発行をもって発表成立
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 倉本直樹、藤田一慧、大田由一
2. 発表標題 新しいキログラムの作り方
3. 学会等名 第37回計測自動制御学会センシングフォーラム、2020年9月3日、オンライン開催
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naoki Kuramoto, Lulu Zhang, Shigeki Mizushima, Kazuaki Fujita, Yasushi Azuma, Akira Kurokawa, Yuichi Ota, and Kenichi Fujii
2. 発表標題 Reproducibility of the realization of the kilogram based on the Planck constant by the XRCd method at NMIJ
3. 学会等名 CPEM2020 (Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2020), August 2020, online virtual conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shigeki Mizushima, Naoki Kuramoto, Takahide Umeda
2. 発表標題 Determination of Defect Concentrations in ²⁸ Si Crystals Using EPR for the Realization of the Kilogram
3. 学会等名 CPEM2020 (Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2020), August 2020, online virtual conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Lulu Zhang, Naoki Kuramoto, Akira Kurokawa
2. 発表標題 XPS analysis of a ²⁸ Si-enriched sphere for realization of the kilogram
3. 学会等名 CPEM2020 (Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2020), August 2020, online virtual conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuichi Ota, Hajime Inaba, Naoki Kuramoto, Sho Okubo
2. 発表標題 Volume Measurement of a ²⁸ Si-enriched Sphere to Realize the Kilogram Based on the Planck Constant at NMIJ
3. 学会等名 CPEM2020 (Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2020), August 2020, online virtual conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuaki Fujita, Kenichi Fujii, Yasuyuki Yamamoto, Yuichi Ota, Naoki Kuramoto
2. 発表標題 Reliability Check of a Voltage Balance to Measure the Radiation Pressure for Small Mass and Force Standard at NMIJ
3. 学会等名 CPEM2020 (Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2020), August 2020, online virtual conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 倉本直樹
2. 発表標題 普遍的な物理定数にもとづくキログラムの新しい定義
3. 学会等名 日本学術振興会 将来加工技術第136委員会 令和2年度第1回研究会、2020年11月2日、オンライン開催 (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

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

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	藤田 一慧 (Fujita Kazuaki) (80759952)	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・研究員 (82626)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大田 由一 (Ota Yuichi) (60737237)	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・研究員 (82626)	
研究分担者	張 麓ルウ (Zhang Lulu) (50392634)	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・主任研究員 (82626)	
研究分担者	大久保 章 (Okubo Sho) (30635800)	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・主任研究員 (82626)	
研究分担者	稲場 肇 (Inaba Hajime) (70356492)	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 (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ	ドイツ物理工学研究所 (PTB)			
オーストラリア	オーストラリア計測研究所 (NMIA)			
イタリア	イタリア計量研究所 (INRIM)			