

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：82626  
研究種目：挑戦的研究（萌芽）  
研究期間：2021～2022  
課題番号：21K18900  
研究課題名（和文）新しいキログラムの定義を活用して分銅を用いずに質量を計測するキップル天びんの開発

研究課題名（英文）Development of a Kibble balance that measures mass by utilizing the new definition of 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） 5,000,000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。従来の定義は、世界に一つしかない分銅「国際キログラム原器」を基準とするものであった。一方、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。キップル天びんは、このキログラムの定義改定をトリガーとして開発が進んでいる新しい質量測定方法である。そこで本研究では、卓上サイズのキップル天びんを実現するための測定原理の開発を試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
考案した測定原理の健全性を確認するために、キップルバランス用レーザー干渉測長装置、ファンクションジェネレーター、デジタルオシロスコープ、レーザー干渉測長装置制御用PCなどからなるモックアップを作成した。モックアップによって、測定原理の健全性を一定のレベルで確認することができた。今後は、本成果を学会発表および研究論文の形で発信していく。

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 previous definition was based on the International Prototype of Kilogram. The new definition is based on the Planck constant. The Kibble balance is a new mass measurement method that has been developed with the revision of the definition of the kilogram as a trigger. In this research, we attempted to develop a measurement principle to realize a desktop size Kibble balance.

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：キップル天びん プランク定数 キログラム 標準 質量測定

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、研究者個人に帰属します。

### 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。プランク定数はマイ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<sup>①</sup>(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<sup>②</sup>。

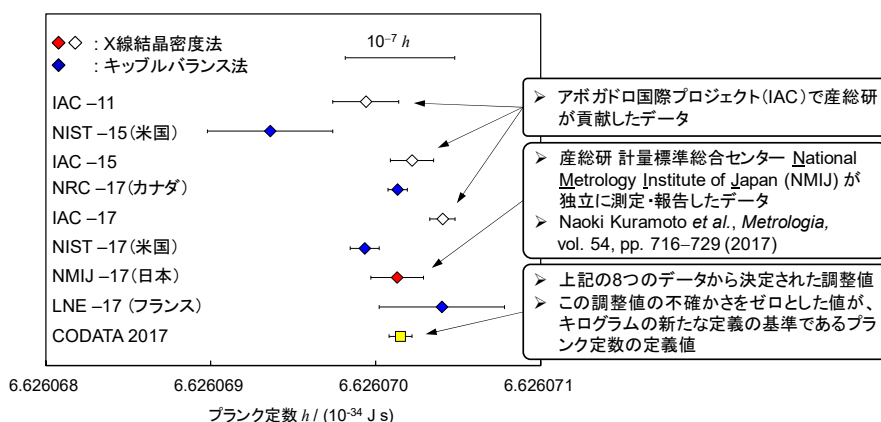


図2 キログラムの新たな定義の基準となるプランク定数の値の決定に採用された測定結果

### 2. 研究の目的

キップル天びんは、このキログラムの定義改定をトリガーとして開発が進んでいる新しい質量測定方法である<sup>③</sup>。この方法では、試料に作用する重力を電磁力と釣り合わせる。その電磁力をプランク定数を基準とする電気量(電圧、電気容量)標準にもとづき測定する。これによって、キログラムの定義にトレーサブルな形で試料質量を測定することができる。ただし、そのサイズは非常に大きく、通常の実験室全体を占有してしまう。そこで本研究では、卓上サイズのキップル天びんを実現するための測定原理の開発を試みた。

### 3. 研究の方法

キップル天びんによる質量測定は「力モード」と「速度モード」の二つのモードからなる。卓上サイズのキップル天びんを実現するために、これら二つのモードを従来の方法と比較して非常に小さなスペースで実現する新しい測定原理を考案した。

### 4. 研究成果

この測定原理の健全性を確認するために、キップルバランス用レーザー干渉測長装置、ファンクションジェネレーター、デジタルオシロスコープ、レーザー干渉測長装置制御用PCなどから

なるモックアップを作成した。キップルバランス用レーザー干渉測長装置は、レーザー光源、干渉信号受光器、レーザー干渉測長システムから構成される。本装置を用いることで、キップル天びんのコイル部の移動距離を  $0.3\text{ nm}$  の分解能で測定することができる。モックアップによって、測定原理の健全性を一定のレベルで確認することができた。今後は、本成果を学会発表および研究論文の形で発信していく。

<引用文献>

- ① N. Kuramoto et al.: Determination of the Avogadro constant by the XRCD method using a  $^{28}\text{Si}$ -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 I. A. Robinson and S. Schlamming: The watt or Kibble balance: a technique for implementing the new SI definition of the unit of mass, *Metrologia*, vol. 53, pp. A46-A74 (2016)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 倉本直樹
2. 発表標題 キログラムの新しい定義
3. 学会等名 京都府計量協会 計量士部会定時総会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 倉本直樹
2. 発表標題 プランク定数にもとづく新しいキログラムの定義
3. 学会等名 核物質管理センター 保障措置分析に係る精度の向上検討委員会（招待講演）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------