

シリコン球体体積の超高精度測定

質量の単位“キログラム”の原子質量に基づく再定義をめざして



倉本 直樹

くらもと なおき

n.kuramoto@aist.go.jp

計測標準研究部門 物性統計科
流体標準研究室
研究員
(つくばセンター)

1999年に計量研究所に入所し、固体および液体の密度標準に関する研究を行ってきました。開発した球体体積測定用レーザー干渉計は、密度の国家標準の校正にも利用されています。スペイン、スイスなど海外の密度国家標準の校正にも利用され、各国での信頼性の高い密度標準の確立に貢献しています。最近ではキログラムだけではなく、アンペア（電流）、ケルビン（熱力学温度）、モル（物質質量）の合計4つの基本単位の同時改訂の動きがあり、それらは密接に関連しています。密度の高精度絶対測定を通じて、より高い普遍性と再現性をもつ基本単位の再定義に貢献していきたいと考えています。

関連情報：

● 共同研究者

藤井 賢一、早稲田 篤、東 康史、水島 茂喜（産総研）

● 参考文献

[1] P. Becker et al., *Metrologia*, vol. 44, pp. 1 - 14, 2007

[2] K. Fujii et al., *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 54, pp. 854 - 859, 2005.

[3] N. Kuramoto and K. Fujii, *IEEE Trans. Instrum.*, vol. 56, pp. 476 - 480, 2007.

[4] P. Becker et al., *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 1854 - 1860, 2006.

キログラム再定義の必要性

現在では、長さ、時間、電圧、電気抵抗といった多くの物理量の単位は、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ます。一方、質量の単位であるキログラムは、依然として人工物である国際キログラム原器の質量に等しいと定義されたままです。人工物による定義は、事故などで失われると二度と再現できません。また、表面吸着ガスなどの影響で国際キログラム原器の質量は徐々に増加してしまうのです。このため、人工物に頼らないで質量を再現する一般的な方法を開発し、より正確なキログラムの定義を実現することが望まれています^[1]。

産総研では普遍的な基礎物理定数であるアボガドロ定数をX線結晶密度法によって決定し、原子1個あたりの質量を基準にしてキログラムを再定義する方法に取り組んできました^[2]。

光周波数チューニングによる球体体積の絶対測定

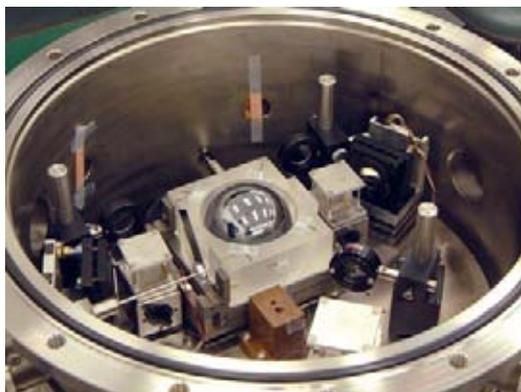
X線結晶密度法では、単結晶シリコンの格子定数、密度、モル質量を絶対測定します。高精度な密度の絶対測定に必要な不可欠なのが、非常に真球に近い1 kgの単結晶シリコンの球体です。この球体の体積の絶対測定のために光周波数制御型干渉計を開発しました(写真)。球体を2枚のガラス板(エタロン)の間におき、エタロンを介して球体に外部共振器型ダイオードレーザーからの光を入射させます。球体とエタロンからの反射光の干渉により、干渉縞が観測され

ます。この干渉縞の解析のために、ダイオードレーザーの光周波数チューニングシステムを開発しました(図)。このシステムにより、光周波数を20 GHzの範囲にわたって10 kHzの不確かさで計測・制御することが可能となりました。これは長さに換算すると 2×10^{-11} の相対不確かさに相当します^[3]。光周波数チューニングを用いた位相シフト法により干渉縞を解析することで、エタロンとシリコン球体の間隔およびエタロンどうしの間隔の光周波数に基づく測定が可能であり、これらの間隔から球体の直径を決定します。干渉計全体は球体の回転機構を備えた真空チャンバーに格納されており、さまざまな方位からの直径測定の結果をもとに体積を求めます。球体の体積測定の相対不確かさは 2.8×10^{-8} であり、世界最高精度での体積絶対測定を可能としました^[3]。

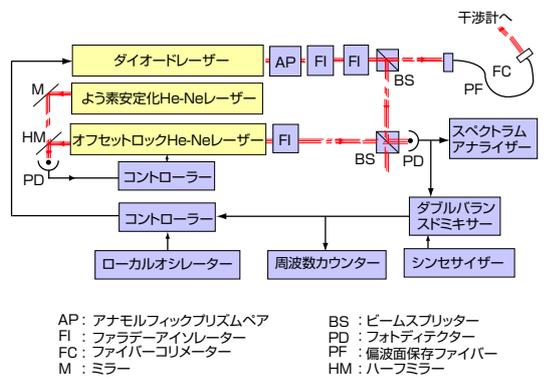
今後の展望

2004年には、アボガドロ定数の精密測定のための国際プロジェクトが開始されました^[4]。同位体濃縮シリコン結晶の利用により、8桁の精度でアボガドロ定数を決めることが目標です。産総研では、さらに高精度に球体体積を測定するために、干渉計の改良、球体表面上酸化膜の厚さの厳密な評価などを行っています。

各国の計量標準機関で進められている研究の結果に基づいて、近い将来、キログラムの再定義が現実のものになるでしょう。



単結晶シリコン球体の体積を測定する光周波数制御型レーザー干渉計（中央に設置されているのが直径約94 mmの単結晶シリコン球体）



外部共振器型ダイオードレーザーの発振周波数を20 GHzの周波数範囲にわたり10 kHzの不確かさでチューニングするシステム