

国際単位系(SI) kg再定義の舞台裏

メートル

条約*の最高議決機関である国際度量衡総会(CGPM)*は、2019年5月に国際単位系(SI)*の4つの単位 kg, mol, A, K の再定義を予定している。そのために日本が提出した高精度な定数値は、国家計量標準機関 計量標準総合センター(NMIJ)*の半世紀近い研究の成果だった。日本の研究成果がSI基本単位の定義決定に直接関与するのは初めてのことだ。測定はNMIJだけでなく共同利用機関等も協力して進められ、物構研のフotonファクトリー(PF)での実験データも最終データ算出に寄与した。

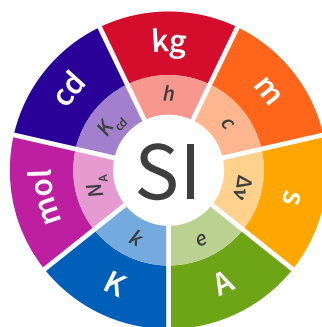
今回の再定義への取り組みは、人類がもつ知見を集めた挑戦であると同時に、各国の計量学者たちの威信をかけた技術戦でもあった。

* メー

トル条約：1875年
にパリで締結された「メートル法を国際的に確立し、維持するために、国際的な度量衡標準の維持供給機関として、国際度量衡局(BIPM)を設立し、維持することを取り決めた多国間条約」。日本は1885年に加入。2018年8月現在で加盟国は60カ国、42の国と地域が準加盟。

* 国際

度量衡総会
(Conférence générale des poids et mesures, CGPM)：メートル条約のすべての条約締約国の代表により構成され、ほぼ4年に1度開催される。度量衡とは計測の古い表現で、度は長さ、量は体積、衡は質量を指す。



©BIPM

* 国際

単位系 (Système international d'unités, SI)：メートル法による単位系の統一を目的として、1960年、第11回国際度量衡総会で採択された単位系。基本単位は、質量 kg、長さ m、時間 s、電流 A、温度 K、モル質量 mol、光度 cd。



日本国キログラム原器 ©NMIJ/AIST
茨城県つくば市の産総研中央第3事業所内の建物地下に保管されている。内部の様子を写した映像は産総研公式 YouTube「日本国キログラム原器紹介」で視聴できる。
https://www.youtube.com/watch?v=stR--tsxh_0



* 計量

標準総合センター

(National Metrology Institute of Japan, NMIJ)：日本の計量標準機関。1903年 東京・銀座に創立された「中央度量衡器検定所」の後身で、現在は経済産業省が所管する産業技術総合研究所(産総研, AIST)の一領域となっている。計測技術の開発研究、計量標準の維持管理・整備・普及を行う。

J-PARC MLF BLOG
VIN ROSE にて
スピンエコー観測に成功！

国際単位系(SI) kg再定義の舞台裏

■ みんな同じ「ものさし」使ってる？

「はかる」ことも、測定値を使うことも、現代の私たちにとっては日常のことになっている。私たちはみんなが同じ「ものさし」を使っていることを疑わず日々の生活や仕事をしているが、時計が狂うように、はかりも狂わないとは限らない。体重や家庭にある食材の量なら多少数字が違ってても許されるけれど、取引や証明に使われているはかりには正確さが求められる。この肉屋の100 gはよそより多めとか、あのガソリンスタンドの1 Lは他より少ないなどということがあったら問題だ。

正しい計量ができる技術を保つことは、社会の信頼関係に関わる大切なこと。日本では、計量の基準を決め適正な計量を行うために「計量法」という法律があり、経済産業省が所管している。

例えば、取引や証明に使われるはかりは、各都道府県にある計量検定所等で、決められた期間ごとに検査を受け合格しなければならない。検査では、はかりに基準となる分銅を載せ、誤差が許容範囲に収まるかどうかを調べる。

それらの基準分銅を検査するのが国家計量標準機関であるNMIJだ。NMIJには質量の基準となる分銅「日本国キログラム原器」(表紙の写真)がある。

■ 1 m と 1 kg はどこからきたか

ヨーロッパでは18世紀末のフランス革命まで、統一された単位系は存在せず、ときの君主が自分の定めた単位を使わせたがり、人々は必要に応じてバラバラの単位を使っていた。その状況は不便だけでなく、不正や不平等を生むことは容易に想像できる。度量衡の改革は、民主化・近代化のための要請でもあった。

そこで、パリ科学アカデミーとイギリスの王立協会が協力し、すべての国が納得し採用するような基本単位創設を目指した。自然界に存在するものを標準

とし、1 mを「北極点から赤道までの子午線の弧の1000万分の1」、1 kgを「水1立方^{デシメートル}dm(つまり1 L)に相当する質量」と新しく提案した。実際には白金製のものさしと分銅で1 mと1 kgが再現された。新度量衡体系の完成時には、欧州各国の科学者がパリに招かれたという。メートル法は科学者が成し遂げた革命だった。

1875年、メートル条約が締結され、メートル法は当初の目標通り、世界中で使われるものとなっていく。

1889年、第1回国際度量衡総会(CGPM)は1 mと1 kgを白金イリジウム合金で再現したものさしと分銅を、世界で唯一の「国際メートル原器」「国際キログラム原器」とした。同時に製作された原器はメートル条約加盟各国に分配された。NMIJにある日本国メートル原器(2012年 重要文化財指定)および日本国キログラム原器などは、これを実費相当を支払い譲り受けたものだ。当時、キログラム原器は、 10^{-9} の比較精度をもち、10万年もつと言われた。校正*のため、約30年毎に持ち寄ってお互いを比較することとなった。

*校正：ものさしが正しいか、定期的に基準に照らして確認すること。

■ 原器が揺らぐ

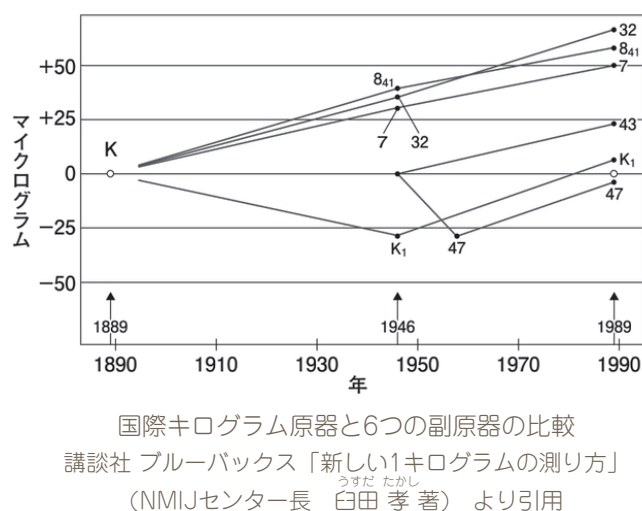
メートル原器は熱膨張などの問題が看過できなくなり1960年に廃止された。現在では、光の速さ*が $2.997\,924\,58 \times 10^8$ m/sと決められ、真空中を光が進むのにかかる時間を計れば長さが分かることになっている。特定の人工物による定義から、基礎物理定数による定義への変更だ。

各国に配られたキログラム原器の兄弟たちは再び集められ、決められた手順で洗浄後、天秤で比較された。その結果が右上のグラフである。国際キログラム原器を0として大方の原器はそれより重くなっ

*光の速さ：1983年定義。ここで必要となる時間は、1967年にセシウムの安定同位体 ^{133}Cs 原子の振動に基づいて再定義されている。同位体とは原子核に含まれる陽子数の等しい同じ元素だが、中性子の数が異なり質量数が違う原子同士のこと。

ているのがわかる。推定で50 μg 程度(指紋一つ分の油脂に相当)の差が出た。

1 kgで指紋一つ分! 指紋の質量という概念がないから驚きでしかないが、通常行われている質量比較の不確かさが 2×10^{-8} 程度という計量学者たちにとって、この 5×10^{-8} のずれは許容できない揺らぎだ。ナノテクノロジーの時代、世界中のすべての質量計測の基礎となる量が右肩上がりグラフを描く事態は放っておけなかった。



■ kg の再定義へ2つの手法

計量標準が人工物の場合、厳重に管理されていても原器そのものが安定ではないことが明らかになったし、天変地異によって失う可能性もある。また、普遍的な定義を求める声は以前からあった。

2011年の第24回CGPMでは、SI改定の方角性が示され、質量の定義についても改定されるべきとされた。

質量の再定義にも、長さの定義と似た考え方が使われる。現在の定義に基づいて関連した基礎物理定数を正確に決め、逆にその定数を使って質量の単位を定めようというものだ。その基礎物理定数の候補は2つあった。

● アボガドロ定数 N_A を求める方法

モルの定義*に質量が使われていることから、1 mol あたりの原子・分子の個数であるアボガドロ定数を正確に決め質量を表現する方法である。教科書にも、 6.02×10^{23} 個と載っているが、実

*モルの定義:「モルは0.012 kg の ^{12}C の中に存在する原子の数に等しい要素粒子を含む系の物質質量であり、単位の記号はmolである」(1971年CGPM)

はその数字は正確に定義されておらず、測定によって求める定数である。

● プランク定数 h を求める方法

量子論創成期の1900年、ドイツの物理学者 マックス・プランクはエネルギーの量子化という概念に思い至り、5年後アルベルト・アインシュタインが光が粒の性質を持つことを示した。この考えによれば、光子1個のもつエネルギーは、光の振動数*に比例するとびとびの値を持つという。この比例定数がプランク定数 h で、量子力学ではよく使う定数だ。

* 振動数：1秒間に振動する回数。光の振動数を ν 、光の波長を λ 、光の速さを c として $\nu=c/\lambda$ の関係がある。「波長の短い光(例えば、可視光に比べて紫外線・X線...)ほどエネルギーが大きい」という表現なら聞きなじみがあるという方も多いかもしれない。

1975年にイギリスのブライアン・キップルによりプランク定数と質量を仕事率の関係でつなぐ「ワットバランス(キップルバランス)法」という実験法が開発され、複数の計量標準機関が挑戦した。

プランク定数とアボガドロ定数には以下の関係式が成り立つ。

$$N_A h = c M_e \alpha^2 / 2 R_\infty$$

ただし、

c : 真空中の光速度、
 M_e : 電子のモル質量、
 α : 微細構造定数、
 R_∞ : リュードベリ定数

詳細については割愛するが、上式の右辺は既に不確かさ

4.5×10^{-10} で決定されているので、 N_A あるいは h のいずれか一方を測定すれば、ほぼ同じ精度で、もう一方を算出できる。つまり、質量には2つの手法でアプローチできるということになる。

■ 日本が選んだXRCD法

実は日本でも1970年代前半から、アボガドロ定数を正確に求める研究が進められていた。

正確に ^{12}C を12 g量りとり、含まれる原子の数(6×10^{23} 個以上)を数える!...のは無理なので、もう少し巨視的に、結晶の規則性を使って原子数を数えようというのが、日本が取り組んだX線結晶密度(X-ray crystal density, XRCD)法である。

結晶を測定するなら、物質としては炭素よりもケイ素 Si が適している。Si は半導体産業の要請から、現在最も結晶化技術が進んでいる元素であり、純度の高い材料も入手しやすい。表面が酸化膜で覆われることで安定であることも利点だ。

Si 結晶の基本単位である単位胞は立方体で、そこに含まれる原子数は 8 だから、単位胞あたりの質量を考えると、アボガドロ定数は以下の式で表される。

$$N_A = 8 M_{Si} / \rho a^3$$

ただし、 M_{Si} ：モル質量、 ρ ：結晶の密度、 a ：格子定数

密度 ρ は質量と体積から計算する。格子定数 a は格子面間隔 d_{220} から算出する。

$$d_{220} = a / \sqrt{8}$$

Si結晶の単位胞

格子定数 a

結晶面間隔 $d_{220} = a / \sqrt{8}$



レーザー干渉計のための鏡面をつくりこんだマッハ・ツェンダー型 X線干渉計

X 線の回折は、よく知られたブラッグの条件式を満たす。

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (n=1,2,3,\dots)$$

ただし、 θ ：回折角、 λ ：X 線の波長

しかし、 λ を独立に正確に知ることとはできないから、この式を用いて d を求めることはできない。

d の測定には同じ結晶から平行な 3 つの面を切り出した試料（X 線干渉計）を使う。一方から X 線を当て、結晶の 1 片をわずかずつ平行移動させると、透過 X 線と回折 X 線が干渉し、 d に対応して干渉縞が周期的に変化する。結晶の移動距離はレーザー干渉計で測り、結晶が平行移動した距離と、その間に現れた干渉縞の数から d_{220} を導出する。

国際プロジェクトへ

初めは、計量標準機関ごとに「普通の」Si を使って測定が行われていた。

Si にはいくつも同位体がある*。同位体同士は、化学的性質が似ているので分離が難しく、自然の同位体比のまま半導体デバイスになるのが普通だ。

しかし、精密測定の場合は、同位体比を使ったモル質量算出の精度が問題になっていた。ひとつの同位体 ^{28}Si だけの結晶を使った実験が必要だっ

*Siの主な安定同位体の天然存在比は
 ^{28}Si ： ^{29}Si ： ^{30}Si ≒92：5：3である。

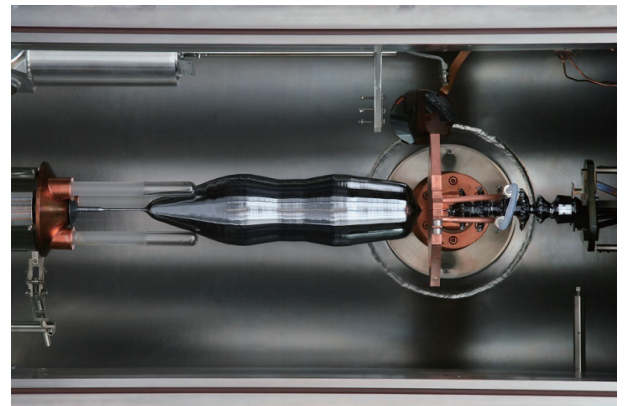
た。しかし、Si の同位体濃縮ができる施設は世界でも限られている。

そんなとき、ロシアの核燃料施設が、かつてウラン濃縮に使っていた遠心分離機を使い Si の濃縮を引き受けてくれるという話が持ち上がった。作業には手間がかかるので、当然、費用もかかる。

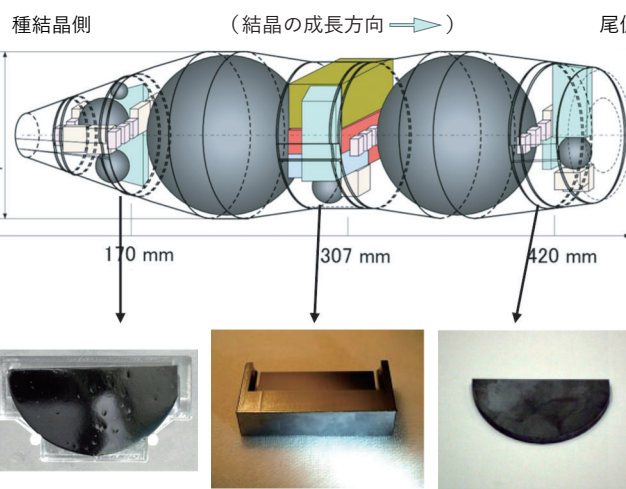
これまでも連携してきた各国の計量標準機関が負担を分担し、技術を持ち寄って、共同でアボガドロ定数を決めようと考えたのは当然のことだったろう。2004 年、アボガドロ国際プロジェクトが立ち上がり、日本・ドイツ・イタリア・国際度量衡局（BIPM）などの計量標準機関が参画した。

こうして作られた ^{28}Si 99.985% の単結晶 5 kg から 2 つの 1 kg の真球と、モル質量その他測定用の試験片が切り出された。球状にしたのは体積が求めやすいからである。

日本、つまり NMJJ にも球と試験片が運ばれ、質量・体積・結晶評価・表面分析の測定が行われた。



B. Andreas et al., Phys. Rev. Lett. (2011)



^{28}Si インゴットの写真と模式図
7ページのグラフのデータは IAC-15 と NMJJ-17 に用いられたのが、この結晶の測定結果である。
PF では、 ^{28}Si インゴットのうち、下の写真で示された 2 つの球を挟んだ 3 か所の試料が測定された。準主役級の仕事をしたところだろうか。

PF での精密測定

極めて純度の高い結晶でも結晶成長法の特徴により、尾（左下図インゴットの右端）に近いほど不純物が多くなる傾向がある。一部を測って全体の数を算出するためには、結晶全体が一樣だということが大前提だから結晶の一樣性の評価は欠かせない。

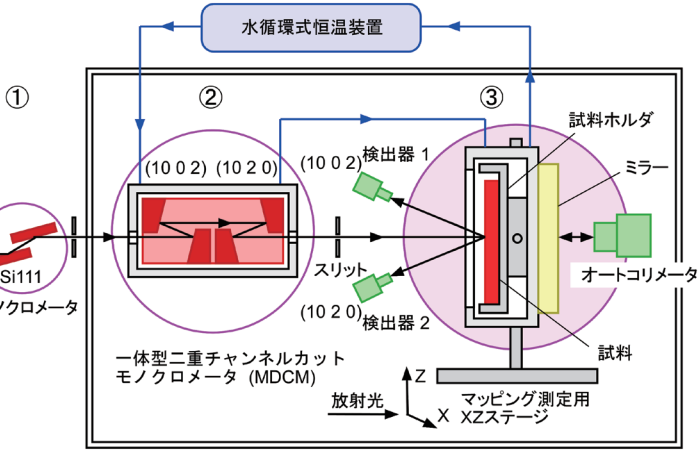
NMJJ は、結晶評価に関して X 線コンパレータ法を採用した。コンパレータとは比較器という意味である。試料結晶の格子面間隔の違いを 10^{-9} のオーダーで測定できる手法だ。高速で測定ができる、より強い X 線を求めて、大型加速器を使って発生させる X 線「放射光」の利用が検討された。PF の放射光のもつエネルギー帯が、Si の測定に適していた。

1990 年代後半から NMJJ の藤本 弘之 氏と 2015 年まで物構研の職員だった張 小威 氏が PF BL-3C で実験を始め、後に NMJJ の早稲田 篤 氏も加わった。産総研 つくばセンターから KEK PF までは車で 30 分ほど。研究の重要性が認められ S 型課題が通った 2012 年からは、春と秋に 3 週間ずつ PF に通った。

PF で独自に考案されたのが、自己参照型の格子コンパレータだ。結晶内では互いに線対称な 2 点に等価な反射を起こすことができるから、その 2 点間の回折角度の比較により結晶面間隔の相対変化を精密に測定できる。また、様々な波長の X 線を含む放射光から常に特定の波長の X 線だけを取り出す（単色化する）ため、特製の分光器を取り付けた。

この装置が確立するまで、高分解能測定に最適な光学系配置を決めるための試行錯誤が繰り返された。適切に切り出された結晶面に、放射光を絶妙な角度で反射させることが必要だった。張氏は可能性のある角度を計算から割り出し、現場で自在に Si の面方位を切り出して、メトロロジストたちの要請に応えた。

一連の測定のために、KEK 共通基盤研究施設機械工学センターが、 10^{-9} rad の回転分解能を持つ結晶格子ゴニオメータを製作した。弾性ヒンジを用いた微小角度回転機構とピエゾ素子による微動駆動を組み合わせた構造で、スムーズに微小な角度を動かせるようになった。設計者の高富 俊和氏は、この開発により平成 23 年度 KEK 技術賞を受賞している。この実験が PF で行われたことで、KEK の

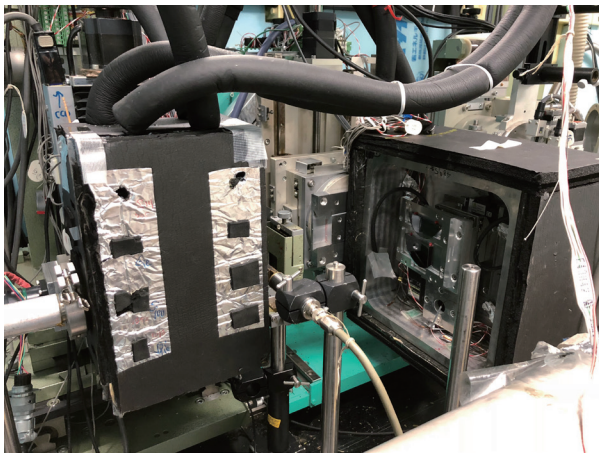


自己参照型の格子コンパレータ
リングから入射した放射光は①前置モノクロメータで粗く単色化され②MDCMで精密で単色性の非常に高いX線になり③試料に照射され一対の検出器で検出される。二重線の四角は実験ハッチを表す。

技術も磨かれたといえる。

装置は、実験していないときは可能なところだけ外し、主要部分は据え付けたまま、他の利用者の実験の妨げにならない場所にモーターで逃している。「装置本体の位置合わせから毎回セットアップしていたら、実験自体不可能だったかもしれない」と藤本氏は言う。ハッチの中はモノでいっぱいだが、PF の大らかさがこの実験を可能にした。

ビームタイムの初めには 1 日ばかりで装置をセットアップし、数日かけて温度を安定させる。工夫を重ねることで、実験準備にかかる日数は短くなった。残りの時間は、地震とビームの不調さえなければ、やりたい実験ができる。試料を変えるごとに 1 時間かけてアライメントをし、ステージを動かして自動測定に入る。一次元のグラフひとつを描くのには数時間、二次元マッピングでは数日かかる。繰り返し測定をやると 1 週間はあつという間だ。



MDCM（左）と試料部（右）
PF BL-3Cにて2017年12月撮影
(NMJJ 早稲田氏ご提供)

「不確かさ」を減らすための努力

様々な計量標準機関が、研究結果をまとめて一つの定数を提案するが、そのとき精度の高さを示すのはグラフに棒で示される「不確かさ」の小ささだ。誤差ではなく不確かさという言葉を使うところに、真の値は誰にも分からないという意味が込められている。

不確かさは繰り返し測定の中での値のばらつきである。PF での相対測定では、格子面間隔 d の差を、 10^{-9} rad オーダーの角度差で調べている。そんな小さな値が、わずかに 3×10^{-9} のばらつきで測れている。努力の積み重ねによって得られた精度だ。

温度のばらつきをなくす

「前回の測定と今回の測定の間、実験ホールの空調が更新された」ことが分かるほど、外気温の変動が測定結果に効いてくる。実験ハッチの内壁には一面に断熱材を貼り温度制御した。これにより、恒温性が上がりばらつきが減少した。

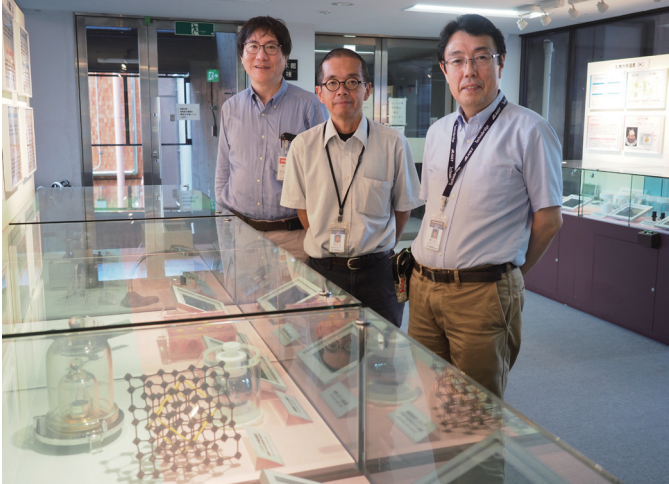
温度管理は mK オーダーで行われる。つまり、 24.000°C の桁まで考慮するという。そのために、各所に取り付ける温度センサーも、早稲田氏、藤本氏自ら水の三重点とガリウムの融点で校正して使う。もちろん、温度センサーの自己発熱も補正されている。一定温度で測定するのが基本だが、厳密に温度補正ができるので、仮に若干の変動があっても実験は可能だ。

試料の姿勢のばらつきをなくす

それぞれの測定の前には、試料をホルダーに固定して結晶面を合わせるという作業が必要だ。格子面の向きを比較したい 2 つの結晶同士でぴったりと揃えるために、左上図には示していないが、複数のアライメント用のステージとアライメント用の検出器が組み込まれている。

光のムラの影響を減らす

光源加速器の蓄積リングでは、電子がぐるぐる回りながら光を放出している。リング内の電子は、電子同士などの散乱で電子が壁に衝突し少しずつ失われる。電子を補うための運転方法は、一日に数回電子を注入する「蓄積モード」と、常時入射によってリング電流値を一定に保つ「トップアップモード」の 2 つがある。運転方法は PF の電力事情によるので、ユーザーが選ぶことはできない。



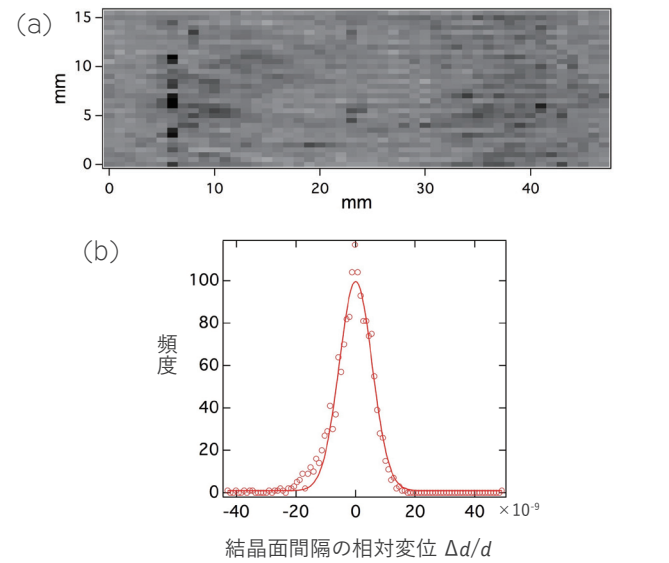
手前から産総研 計量標準総合センター 工学計測標準研究部門 藤本 弘之さん、早稲田 篤さん、中国科学院 張 小威さん（2018年8月 NMJJにて）

不確かさの値が各段に良くなったのは 2009 年からトップアップ運転が始まったから。早稲田氏は「トップアップのときは、データが非常に安定していて心穏やかでした」と話す。

蓄積モードでは入射によって一時的に電流値が上がり、上流の Si（左上図の①）の熱膨張が測定に影響した。試行錯誤によって、上流でビームを絞るという対処法を見つけ、測定を続行できた。

格子間隔のマッピング測定を行ったところ、同位体濃縮の効果は顕著で、 ^{28}Si 結晶の均一性が高いことが確かめられた。格子間隔の相対変位は 10^{-9} のオーダーで、インゴット中央の試料片は格子定数の測定に十分適していることが示された。

困難な状況にもめげず実験を継続した 3 人の会話からは、精密測定へのこだわりが感じられた。早稲田氏は、この後も各国と連携して実験を続けるつもりだ。



絶対測定にも使われたインゴット中央の試験片での格子間隔の相対変位測定結果
(a)マッピング測定 (b)度数分布

■ 質量の定義改定のための3つの条件

2014年の第25回 CGPMでは、質量を定義するための基礎物理定数をプランク定数と定め、以下の条件が満たされれば、質量の定義変更に踏み切ることが決まった。さらに、定義改定の時期を具体的に2018年とし、関係機関に研究加速を要請した。

- 1.異なる測定原理で測定した3つ以上の独立した機関での測定結果が、相対的な不確かさ 5×10^{-8} （国際キログラム原器の不確かさ）よりもよく一致すること
- 2.そのうちのひとつの不確かさは 2×10^{-8} （実際に天秤で行われている質量比較の不確かさの程度）より小さい値であること
- 3.最新の校正によって国際キログラム原器との整合性が取れたデータであること

2017年、アボガドロ国際プロジェクトは各機関から提出されたデータを使い、プランク定数を算出した（IAC-17）。また NMIJ も独自に最終データの算出に漕ぎつけた（NMIJ-17）。どちらの値にも PF の測定結果が使われている。

その頃、ワットバランス法と XRCD 法のデータに一致が見られるようになった。

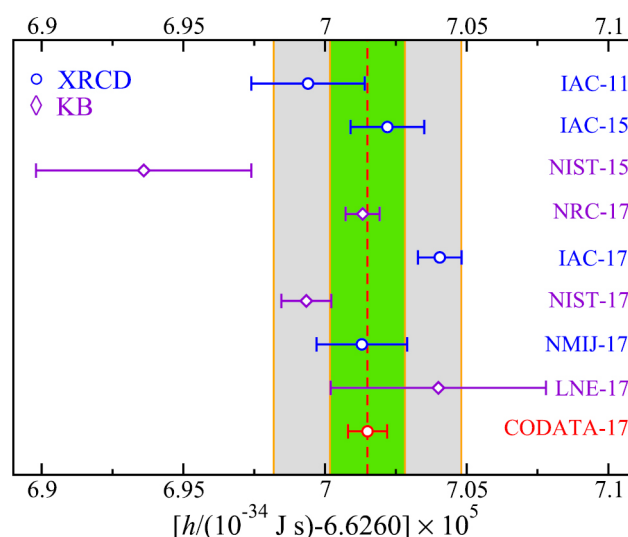
2018年1月、CODATA* が各機関から提出された定数値をまとめた論文を発表した。プランク定数は $6.626\,070\,150(69) \times 10^{-34} \text{ J s}$ 、その不確かさは 1.0×10^{-8} となっている。右上のグラフは、算出に使われたデータを発表順に並べ、その下に CODATA がまとめたデータ（CODATA-17）を加えたものである。CODATA-17 の値に対し不確かさ 2×10^{-8} の範囲が緑の帯で、 5×10^{-8} の範囲がグレーの帯で示されている。条件がクリアされたことが分かる。

*CODATA：国際科学会議の「科学技術データ委員会」。論文によって発表された基礎物理定数を、その利用者のため、数年に一度、不確かさの小ささに応じて重み付けをした平均値を発表している。

■ 研究成果が活かされるとき

2018年11月中旬、パリ郊外で第26回 CGPM が開かれる。ここで新しいキログラムの定義が承認されると、プランク定数の不確かさはなくなり、 $h=6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$ と定義される予定だ。

またアボガドロ定数が $N_A=6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ と定義されることによって、同時にモルの定義も変わり、炭素 ^{12}C は特別な元素ではなくなる。電



プランク定数の測定値と不確かさ

青はXRCD法(アボガドロ定数の測定値より換算)、紫はワット(キップル) バランス法、赤はCODATAが各データをまとめた値。右端の記号番号の下2桁は西暦の下2桁。

"The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI" Committee on Data for Science and Technology (CODATA) Task Group on Fundamental Constants
D B Newell et al 2018 *Metrologia* **55** L13
<https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa950a>

流の単位 A、熱力学温度の単位 K についての再定義も行われる予定で、承認後は2019年5月から世界中で基本単位の新定義が使われるという。

単位系が再定義されても、私たちの生活は変わらない。むしろ、正しい計量の標準が将来にわたって確保されるため、私たちの日常に影響を及ぼさないように、見えない努力が払われてきた。

20世紀に人類が手にした量子力学が発展するにつれ、計量標準の世界でもその考え方が取り入れられ、単位として最小といえる量子を計量標準として使う「量子標準」が生まれた。質量にも量子標準が適用されることで、1 kg よりもはるかに小さい質量をより正確に計測できるようになることは間違いのない。原子・分子が集まってできる構造体を研究している物構研にとって、喜ばしい知らせと言えるだろう。メトロロジストたちの尽力に感謝したい。

(執筆：深堀 協子)

論文情報：Atsushi Waseda, Hiroyuki Fujimoto, Xiao Wei Zhang, Naoki Kuramoto, Kenichi Fujii, "Uniformity Evaluation of Lattice Spacing of ^{28}Si Single Crystals", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.66, NO.6, 2017

産総研のプレスリリース：2017/10/24
質量の単位「キログラム」の新たな基準となる
プランク定数の決定に貢献

NMIJ 特設ページ：<https://www.nmij.jp/transport.html>
新時代を迎える計量基本単位
—国際単位系(SI) 定義改定—

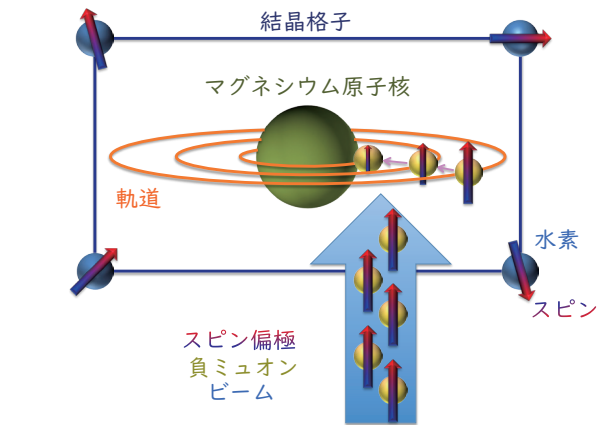
負のミュオン素粒子で見る物質内部
～世界最高計数速度の負ミュオンビームで長年の夢が実現～

2018/8/24 KEK、JAEA、J-PARC、大阪大学、国際基督教大学

豊田中央研究所、KEK 物構研、JAEA、大阪大学、国際基督教大学の共同研究グループは、J-PARC MLF の大強度ミュオンビームと高感度の高集積陽電子検出器システム（KALLIOPE）を組み合わせることで、世界で初めて、負ミュオンにより水素が物質内に作る微小磁場を検出しました。

多くのエネルギー材料・生体材料中では、水素を始め軽元素の運動が重要な役割を担っていることから、固体内の水素の運動を正確に検出できる新たな手法として期待されています。

この研究には、物構研 ミュオン科学研究系から、下村 浩一郎 教授、幸田 章宏 研究機関講師、竹下 聡史 特別助教、濱田 幸司 研究員（研究当時）が参加しました。



負ミュオンによるMgH₂内の水素が作る微小磁場検出のイメージ図（豊田中央研究所 杉山 純氏 提供）

Nuclear Magnetic Field in Solids Detected with Negative-Muon Spin Rotation and Relaxation
Jun Sugiyama, Izumi Umegaki, Hiroshi Nozaki, Wataru Higemoto, Koji Hamada, Soshi Takeshita, Akihiro Koda, Koichiro Shimomura, Kazuhiko Ninomiya, and M. Kenya Kubo
Phys. Rev. Lett. 121, 087202, 2018
Editor's Suggestion & Featured in Physics

薬剤耐性の原因「薬剤汲み出しタンパク質」の排出メカニズムを解明
～多剤排出トランスポーター MdfA の分子機構～

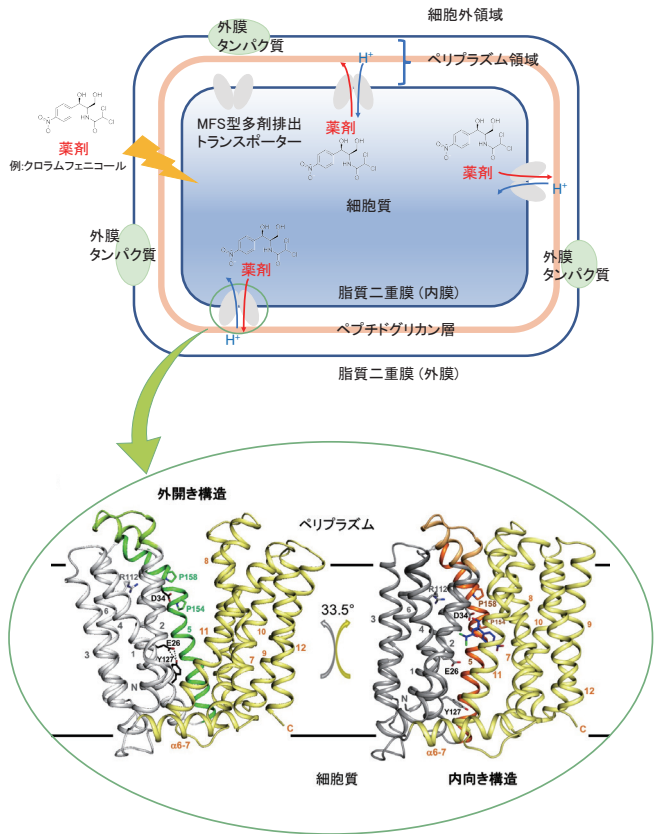
2018/10/1 KEK、京都大学、東京大学、岡山大学

集中治療室のような医療現場でも、私たちの身近に存在する耐性菌でも起こっている可能性がある「抗菌薬が効きにくくなってしまいう現象」について、物構研 構造生物学研究センターの田辺 幹雄 特任准教授らの研究グループがしくみを解明しました。

薬剤耐性の原因の一つは「薬剤汲み出しタンパク質」とも呼べる多剤排出トランスポーター MdfA です。MdfA は外開きから内向き構造に変化することで、プロトン H⁺を取り込む代わりに細胞内から薬剤を排出することが分かりました。

この研究は、日本及びドイツの多機関の研究者が協力し、生化学実験・結晶構造解析・輸送活性実験・分子動力学シミュレーションなど多数の手法を組み合わせることで実を結びました。

Outward open conformation of a Major Facilitator Superfamily multidrug/H⁺ antiporter provides insights into switching mechanism
Kumar Nagarathinam, Yoshiko Nakada-Nakura, Christoph Parthier, Tohru Terada, Narinobu Juge, Frank Jaenecke, Kehong Liu, Yunhon Hotta, Takaaki Miyaji, Hiroshi Omote, So Iwata, Norimichi Nomura, Milton T. Stubbs & Mikio Tanabe
Nature Communications volume 9, Article number: 4005, 2018

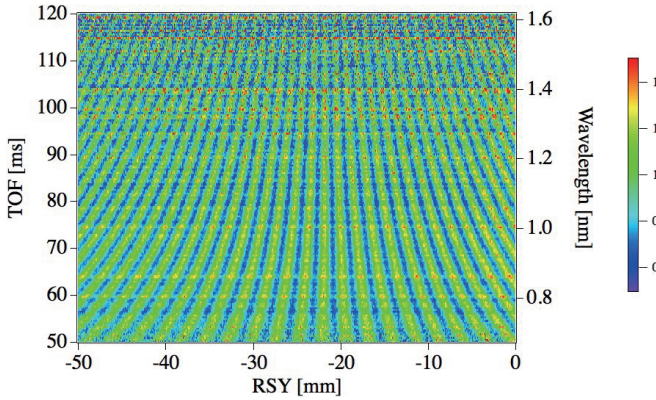


J-PARC MLF BL06
中性子共鳴スピネコー分光器群

Village of Neutron ResOnance Spin Echo spectrometers

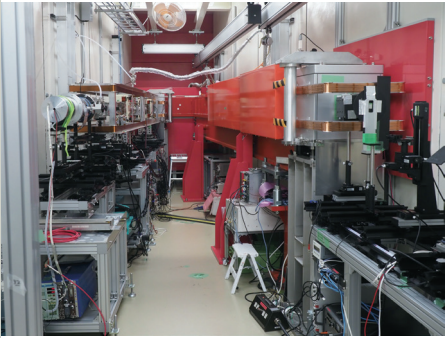
VIN ROSE にて共鳴型スピネコー観測に成功！

京都大学 複合原子力科学研究所の日野 正裕 准教授と小田 達郎 助教、物構研 中性子科学研究系 ソフトマターグループの遠藤 仁 准教授は、MLF BL06 において 2 種の中性子共鳴スピネコー分光器の製作を進めている。このたび、その1つの NRSE 型分光器で広い波長領域におけるエコー信号の観測に成功し、美しいグラフを描き出した。



NRSE型において観測された中性子スピネコー信号
縦軸は中性子の波長を表す。横軸に示すフリップパー周の距離を変えることでスピネコー信号の波が見える。

中性子スピネコー法は、磁場中での中性子スピンの歳差運動を利用して散乱過程における中性子速度の微妙な変化を測定する方法で、中性子の強度を下げずにエネルギー分解能を上げることができる。スピネコー法にはいくつかの方式があるが、共鳴型は高い技術が必要で世界でも例が少ない。VIN ROSE は共鳴型スピネコー分光器を世界で初めてパルス中性子源に設置するだけでなく、2つ作ってしまおうという野心的なビームラインだ。

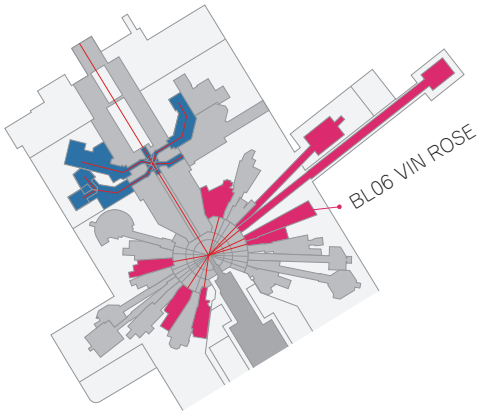


MIEZE

NRSE

一般に中性子スピネコー法では磁場中の試料の測定が難しいが、MIEZE 型では試料に強磁場をかけた偏極解析測

ヴァン ロゼ
VIN ROSÉとは
フランス語で
ロゼワインのこと

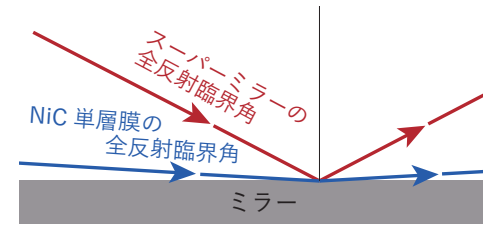


定等が可能である。

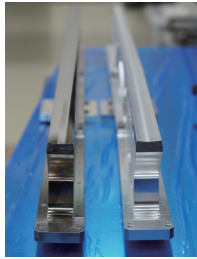
一方、NRSE 型は、エネルギー分解能を上げることで、高分子やタンパク質など比較的大きな分子のゆっくりした動きを解析できる。今回のスピネコー観測は NRSE 型分光器に、独自に製作したスーパーミラーを組み合わせたものだ。

🍷 スーパーミラーって？

中性子スーパーミラーとは、ニッケル炭素 NiC とチタン Ti を nm の精度で厚みを変えながら数千層



積層したものだ。ビームラインでは中性子を通る管の内面を鏡面にし、全反射を利用して中性子を運搬する。中性子のエネルギーが大きくなる（波長が短くなる）ほど全反射する角度範囲は狭くなるが、スーパーミラーを使うとその範囲を疑似的に大きくでき、多くの中性子を実験に利用することができる。スーパーミラーは中性子の輸送効率を劇的に向上させ、NRSE 型分光器のエネルギー分解能を上げるためのキーデバイスだ。曲面への精密な成膜は素人目にも難しく思えるが、京大 日野 准教授と理化学研究所、KEK 等の協力によって、回転楕円体に超精密加工した金属基盤表面を中性子スーパーミラー化することに世界で初めて成功した。



回転楕円体の形に削られた金属表面が鏡になっている

🍷 VIN ROSE で見たいもの

遠藤 准教授に今後調べてみたいものを尋ねると、MIEZE では磁性流体などでのスピンドナミクス、NRSE ではソフトマターにおけるスローダイナミクスを追求したいとのこと。新しい現象の開拓に期待しよう。



遠藤 仁 准教授

名古屋にて大学共同利用機関シンポジウム 2018 を開催

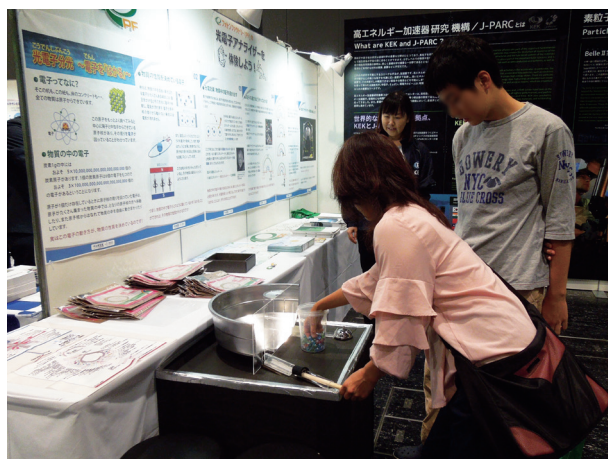


10月14日(日)、大学共同利用機関の日々の活動を広く一般の方々へお届けする「大学共同利用機関シンポジウム2018 ～最先端研究大集合～」が開催されました。例年秋に秋葉原での開催でしたが、今年は名古屋市科学館が会場です。

各機関の研究者によるトークイベントやブース展示があり、科学館を訪れた方や、各機関に興味のある方々など多数の参加がありました。



物構研 足立 伸一 副所長の講演のようす



光電子分光アナライザーを遊べる模型で紹介



2018 年度量子ビームサイエンスフェスタ 第 10 回 MLF シンポジウム / 第 36 回 PF シンポジウム

2019 年 3 月 12 日 (火) ～ 13 日 (水)

つくば国際会議場 (エポカルつくば)
茨城県つくば市竹園 2-20-3

3/12: 量子ビームサイエンスフェスタ

3/13: MLF/PF 各シンポジウムを並行開催

<http://qbs-festa.kek.jp/2018/> (12 月中旬公開予定)

お問い合わせ: qbs-festa-office@pfiaf.kek.jp



編集: 物構研 広報委員会 (小杉 信博 (委員長)、足立 伸一、安達 成彦、阿部 仁、岩野 薫、宇佐美 徳子、大島 寛子、木村 正雄、下村 浩一郎、瀬谷 智洋、本田 孝志、伴 弘司、深堀 協子、的場 史朗、山田 悟史)

発行: 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1 <https://www2.kek.jp/imss/>

TEL: 029-864-5602 e-mail: imss-pr@ml.post.kek.jp

禁無断転載 ©All rights reserved by High Energy Accelerator Research Organization (KEK)



IMSS Facebook

2021 年、KEK は創立 50 周年を迎えます