The new and improved kelvin

再定義されるケルビン

Nature Vol.459(902)/18 June 2009

計測学者たちは今、温度の単位の再定義に取り組んでいる。これにより、氷点の定義は、これまでとは違ったものになろうとしている。Nicola Jones が報告する。

20 年あまり前のこと、Mike Moldover は、「アルゴンガスを満たした球体」で演奏した曲により、精密計測科学のロックスターのような存在になった。彼の研究チームは、この球体内で音が反響するようすを測定することで、それまでにない高い精度でボルツマン定数（分子の平均運動エネルギーと温度との関係を示す定数）の値を定義することに成功したのだ。この結果に強い自信をもっていた Moldover は、論文で、「万が一、我々が得た値が 10ppm 以上違っていることが示されたら、この実験装置を食べてみせましょう」という大胆な約束までしたのだ (M.R.Moldover et al. *J.Res. Natl Bur. Stand.* **93**,85.144; 1988)。だが、Moldover がアルゴンガスを飲むことは、今後しばらくはなさそうだ。

米国国立標準技術研究所 (NIST、メリーランド州ゲセズバーグ) に所属する Moldover らは、ボルツマン定数 (k_B) の値を $1.3806513 \times 10^{-23} \text{J/K}$ と決定した。その不確かさはわずか 1.8ppm であった。それから 20 年以上の歳月が過ぎた今も、この数値は研究者たちの目標となっている。英国国立物理学研究所 (ティントン) の Michael de Podesta は、「科学者たちは、Mike に畏敬の念を抱いているといってもよいでしょう」という。de Podesta は現在、各国の研究者を相手に、Moldover の実験の不確かさを 1ppm まで小さくすると同時に、その結果を確認するという競争を繰り広げている。国際委員会は、ボルツマン定数がこのレベルの精度で測定されたら、その値を基準として固定し、これを利用して温度の単位の定義を根本的に変えようと計画している。Moldover は、「ボルツマン定数が固定されれば、世界中の人々が温度測定について頭を悩ます必要がなくなります」という。

確かに、ボルツマン定数の値が定まっていないことが気になって夜も眠れないという人や、それにより実害をこうむる人は、ほとんどいないだろう。しかし、これは学問的には重要な問題なのだ。今日の国際

単位系 (SI) では、熱力学的温度の単位であるケルビンは、絶対零度と水の三重点 (固体、液体、気体の水が平衡して共存する温度と圧力) により定義されている。現在、水の三重点の温度は 273.16K と定められている。この定義には歴史的な理由があり、当初は論理的だと考えられていた。しかし、今日の計測学者の目には、エレガントでなく、非論理的で、まったくもってけしからぬものとして映っている。

「この定義のしかたは、ちょっとおかしいのです」と de Podesta はいう。計測学の倫理規範によれば、1 つの物質 (この場合は水) に特別な地位を認めることは不適切である。もっと悪いことに、ケルビンの定義ではこの「水」の種類まで決まっており、水素同位体と酸素同位体の比率が少なくとも小数第 7 位まで規定された「ウィーン標準平均海水 (VSMOW)」でなければならないのだ。それに、極低温の世界を研究する低温物理学者や超高温の恒星を研究する科学者が測定する温度が、理論上とはいえ、恣意的に選ばれた氷の塊との比較に基づいて決められているというのは、理にかなっているとはいえない。Moldover のかつての同僚であり、フランスのセブルにある国際度量衡局 (BIPM) に所属する Richard Davis は、「ケルビンは、再定義すべき時期に来ているのです」という。

単位に関する取りまとめを行う BIPM は、2011 年までにこの不安定な状況を正そうとしている。ボルツマン定数は、現在は若干の不確かさを伴う測定値であるが、「定数」という名にふさわしく、固定した数値が宣言される予定である。また、ケルビンは、平均並進運動エネルギーを $1.38065XX \times 10^{-23}$ ジュールだけ変化させるような熱力学的温度変化などとして再定義される予定である (現在、XX に入る数字を決定するための測定が行われている)。

音波を使ってボルツマン定数を決定する

この変更により、計測学の長年の課題は、

手品のように鮮やかに切り替わる。ボルツマン定数の測定値につきまといていた不確かさは、定義上きれいさっぱり消えてしまい、今度は、温度の測定値の不確かさへと移行する。新しい温度の不確かさは非常に小さいため、どの研究室もパニックになることはまずないはずだ。大部分の研究者は、変化に気付くことさえないだろう。だがその一方で、温度の再定義により温度スペクトルの両端での精度が高まる。さらに、ケルビンは水との不安定な関係から解放され、物理定数という知的で堅固な基盤に基づくものとなる。計測学者たちは、あらゆる測定単位について同様の改定を進めている。

ケルビンを再定義するためのボルツマン定数の測定には、気体を満たした球形容器中で、特定の温度での音速を測定する「音響温度計測」という手法が好んで用いられている。ボルツマン定数は、気体の運動エネルギー (E) を熱エネルギーと関係付ける方程式 ($E = 1/2mv^2 = 3/2k_B T$) から導かれる。ここで、 m は原子 1 個の質量、 v は原子の平均速度 (ガス中の音速に比例している)、 T は温度である。音速は、球形容器中で反響する音波の周波数の分析から導き出すことがで

きる。この手法の長所は、音波の周波数を高い精度で測定できることである。de Podesta の研究室には、誤差 10^{13} 分の 1 という高精度のルビジウム時計がある。一方欠点は、反響を正確に分析するためには、ガスを入れる球形容器の容積が高い精度でわかっているなければならないことである。Moldover が 1988 年に行った画期的な実験では、最初に 3 リットルの球形容器を水銀で満たして重さを量り、その容積を決定している。(ちなみに彼はこの論文で、自分の結果が間違っていることが立証されたら、この装置を食べてみせるとも約束している。)

容積の測定は、今日でも最も難しい問題である。球形容器に液体を満たして重さを量るという Moldover の測定法は、今でも十分通用する。けれども、もっとエレガントな方法もある。その詳細は、Moldover のかつての同僚だったデラウェア大学 (米国、ニューアーク) 名誉教授 James Mehl により最近になって考案された。この方法のポイントは、球形容器に微小なアンテナを入れて空洞内でのマイクロ波の反響を測定し、得られた測定値を使って球形容器の容積を決定することにある。球形容器は、3 本の軸の長さがわず

Michael de Podesta らのチームは、ボルツマン定数の測定における誤差を小さくしようとしている。

かずつ異なっているなど、意図的に歪ませている。完全な球形に近い容器を使うと、反響が重なり合って複雑なパターンを生じってしまうからである。

「容器は、極めて厳密に、球形でない形でなければならないのです」と de Podesta はいう。そのため、彼らの球形容器は、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡の鏡の製作にもかかわった業者により製作された。

Moldover よりも高い精度でボルツマン定数を測定することをめざして、英国国立物理学研究所、イタリア国立測定学研究所（トリノ）、フランス国立測定学研究所（パリ郊外）という 3 つの主要な研究所の間で友好的な競争が始まった。3 つの研究所は、いずれも音響温度計測によりボルツマン定数を測定しようとしているが、その装置はわずかに異なっている。彼らの研究は、あらゆる側面において、最大限の配慮を必要とする。イタリアの研究所の Roberto Gavioso は、「まずは、純粋な気体を購入します。気体は純粋であればあるほど好ましいです。それをさらに精製するのです」という。これは、延々と続く技術上の注意事項の 1 つにすぎない。2009 年末から 2010 年までの間に、い

ずれかの研究室がボルツマン定数の不確かさを 1 ppm まで小さくしていることだろう。現在 69 歳の Moldover は、ボルツマン定数の決定を若い世代の研究者たちに託し、自分は応援にまわっている。

一方、ドイツ国立計測学研究所（ベルリン）のチームは、これとは別のアプローチでボルツマン定数を測定しようとしている。Bernd Fellmuth の測定装置は、温度を一定に保つために 1 立方メートルの水に取り囲まれた圧力室からなる。圧力室の内部にはコンデンサーが取り付けられており、ヘリウムガスが注入される前後の電気容量を測定できるようになっている。これにより、音響温度計測を行うグループとは別の方程式群を使ってボルツマン定数を導き出すことができる。この手法では高い精度で圧力を測定することが求められるが、実際の測定は困難である。現時点の精度は約 4 ppm にすぎず、求められるレベルに達するためにはチーム全体で取り組む必要がある。彼らは 2010 年 1 月に実験を開始し、同年末には 1 ~ 2 ppm の精度を達成する予定である。Moldover は、彼らの目標は楽観的すぎるが、2011 年までに結果を出すことができれば、音響温度計測の結果と照らし合わせることができ、好都合だと語っている。

ボルツマン定数の測定結果が得られたら、次は国際会議での投票になる。BIPM のメンバーである 53 か国が国際度量衡総会に代表を派遣し、そこで最終的な決定がなされるのだ。この総会は 4 年に 1 度開催されており、今回は 2011 年である。

このようにケルビンの決着を急ぐのはなぜだろうか。すべてはキログラムのせいである。キログラムは国際キログラム原器の質量として定義されているが、特定の物体により定義されている単位は、今やキログラムだけになっている。国際キログラム原器は、プラチナとイリジウムからなる合金の塊であり、パリ郊外の BIPM の金庫室に保管されている。特定の物体により定義されていることは、1 キログラムの値に

奇妙な影響を及ぼしている。1 キログラムの値は当然一定であるべきなのに、国際キログラム原器の表面に原子が付着したり、払い落とされたりするたびに、その値が変わってしまうのだ。もちろん、この値がどのくらい不安定なのかは誰にもわからない。比較するための基準がないからである。これでは、あらゆる質量の測定値の基礎として磐石であるとは到底いえない。

この問題を解決するために、さまざまな研究チームが、普遍的な量を基礎にしてキログラムを再定義しようと試みてきた。最も直観的な方法は、ケイ素 28 からなる完全な球体を作製し、その球体を構成する原子の個数を厳密に決定することである。こうすれば、決まった個数のケイ素原子の重さとして 1 キログラムを再定義することができる。しかし、これだけ完全な球体を作製するのは非常に難しいため、実現はほぼ不可能だと考えられている。

より現実的なのは「ワット天秤」を用いる方法である。ワット天秤は、地球の重力下で 1 キログラムのおもりと釣り合わせるために必要な電磁気力を測定する。この電気力を記載する方程式には、量子物理学の基本的なパラメーターであるプランク定数が含まれている。今のところ、ボルツマン定数と同様、プランク定数も測定によって決定しなければならない。しかし、プランク定数の値が固定されれば、その値に基づいてキログラムを再定義することができる。そのため、計測学者たちは国際キログラム原器にあると思われる不安定性よりも小さな不確かさでプランク定数を決定しようとしている。そうすれば、プランク定数の値を定めるための基準として使われた時代遅れの代物を引退させることができる。

どちらの方法による測定も積極的に進められており、それぞれの結果は他方の結果の確認に役に立つ。研究者たちは、できるだけ早く 1 キログラムの定義を変えたがっている。そうすれば、この値の「ふらつき」を止められるからだ。

著作権等の理由により画像を掲載することができません。

BIPM に保管されている国際キログラム原器

キログラムの再定義に向けた取り組みが進むにつれて、計測学者たちは、ほかの懸案事項もすべてけりをつけてしまおうと考えるようになった。2005年には、7つの基本単位のうち、ケルビン、キログラム、アンペア、モルの4つにつき再検討することが決まった（ちなみに、残りの3つの基本単位は、メートル、秒、カンデラである）。4つの基本単位は、いずれも定義に問題があり、再定義すべき時期に来ていた。このうち、アンペアとモルの再定義はキログラムの再定義とつながっているが、ケルビンはこれらとは関係がない。

そこで、温度測定の専門家たちは、測定学の世界における自分たちの管轄をさくっと片づけてしまおうと決めたのである。とはいえ、彼らの努力が世界に直接的な影響を及ぼす可能性はほとんどない。科学と産業の安定を乱さないために、当面は、定義以外なにも変えないことになっているからだ（下のコラム「万人のための温度」参照）。

しかし、研究成果が何にも影響を与えないということは、一部の科学者には実際、ストレスとなるかもしれない。de Podesta でさえ、「ときどき、こんな研究

をしていてよいのかと気がとがめることがあります。私の研究は、飢えに苦しむ子どもを助けたりする役には立たないからです」という。けれども彼は、温度の小数第何位の小さな数字に頭を悩ませ、温度測定に確固たる真の基準が与えられることを切望している人々の存在を強く感じている。いつの日か、精確な熱力学的温度を必要とし、ボルツマン定数の値が固定されていることで救われる人が現れるだろう。「そのとき、私のささやかな研究が、世の中の役に立つのです」と de Podesta は語っている。（三枝小夜子 訳） ■

万人のための温度

2011年までに熱力学的温度の単位を再定義するという努力は、ほとんどの科学者には影響を及ぼさない。なぜならこれは、ちょっと値が違ってものについての変更であるからだ。それは、 T_{90} とよばれる温度スケールである。

物質の熱力学的温度は、その原子の平均運動エネルギーである。これを正確かつ直接的に決定するためには、気体中の音波の反響を測定するなどの厳密な技術が必要とする（本文参照）。これは、一次温度測定と見なされている。しかし、ほとんどの研究室は、温度に応じて抵抗が変化する白金線などの単純な装置を使って温度測定を行っている。国立測定学研究所で較正を行えば、これらの温度計は非常に再現性の高いものになりうる（しばしば0.1ppmという驚異的な精度になる）。そこで、科学者たちは複数の決まった相転移について白金線の抵抗

を測定し、白金線全体の抵抗を温度と関連付ける方程式を導き出すのである。

そのためには、各国の国立測定学研究所は、主要な相転移の熱力学的温度を知っている必要がある。これらの値は、ありとあらゆる一次温度測定法を用いて何度も測定されているが、細かい数字が一致しないこともしばしばだった。そこで、各国の国立測定学研究所が同じデータを使用できるように、フランスのセーブルにある国際度量衡局（BIPM）が基準となる相転移温度をまとめた本を出版した。この本が1990年に出版されたことから、ITS-90（ITSは「国際温度スケール」の略）とよばれている。一般的な研究室の温度計を含めて、ITS-90を用いて較正された温度計は T_{90} スケールになっている。

けれども現在、ITS-90に掲載された温度の多くが間違っていることがわかってい

る。一次温度測定法の進歩により、いくつかの測定が不適切な方法で行われていたことが明らかになったのだ。例えば、金の凝固点はITS-90では1337.33Kになっており、複数の研究所で0.01K以内の精度で再現できる。しかし、より正確な一次温度測定により、実際の凝固点は1337.38Kに近いことが明らかになった。

再現性の高さは技術者を喜ばせるが、不正確さは計測学者を悩ませる。計測学者は、白金細線と同じくらい使いやすく、再現性が高く、現代最高の装置に匹敵する精度をもつ一次温度計が発明される日を夢見ている。そうすれば、ITSをお払い箱にできるからだ。この未来のシナリオでは、ケルビンの再定義を通じて計画されているとおりにボルツマン定数（運動エネルギーを温度と関連づける値）が固定されれば、温度測定の不確かさを最小限に抑えることができる。

ITS-90の誤差は、20K以下と1300K以上という両極端の温度で最大となる。こうした温

度領域で研究を行う科学者は一次温度測定法を用いることが多いため、ボルツマン定数を固定することは、彼らにとっては有意義な変更である。例えば、天文学者の研究とは大いに関係がある。恒星の温度を測定するために温度計を差しに行くわけにはいかないからだ。しかし、今日の天文学者の多くは1000分の1の精度で足りているため、これを100万分の1まで改善しても、事実上、なんのの違いも生じないだろう。一部の人は、ケルビンが再定義されようとしていることさえ知らない。*Journal of Low Temperature Physics*の共同編集者であるHorst Meyerも、*Nature*から聞くまで知らなかった。

「そこが重要なのです。一般の人々に気付かれてはならないのです」と、新しい定義の詳細について取りまとめを行っているBIPM委員会の事務局長Richard Davisはいう。「人々に気付かれるようになったら、プロジェクトはうまく行っていないことになります。」 N.J.