

解 説

絶対零度の決定に挑んだ日本の科学者

広瀬 茂久

東京工業大学 博物館 資史料館部門

(受取日 : 2014 年 4 月 25 日, 受理日 : 2014 年 6 月 20 日)

Contribution of Japanese Scientists to Assigning -273.15°C as the Zero Point of Thermodynamic Temperature

Shigehisa Hirose

Archives Division of Tokyo Tech Museum, Tokyo Institute of Technology

(Received April. 25, 2014; Accepted June 20, 2014)

The challenge of determining the last two digits of absolute zero temperature attracted several groups of researchers around the world in the first half of the 20th century. It is little known that Japanese researchers, Jiro Oishi and Masao Kinoshita, were the ones who successfully settled the dispute over these two digits. Their work played a key role in defining the zero point on the thermodynamic temperature scale, and thus later in defining the unit of thermodynamic temperature, the kelvin, in terms of the absolute zero and the triple point of water. This current definition of kelvin is scheduled to be redefined based on the Boltzman constant. On the occasion of this turning point of the definition of the kelvin, it may be timely to reflect on the historic milestone work of Oishi and Kinoshita. The background and current status for changing the definition are also described.

Keywords: history of concept and measurement of temperature, unit of temperature, absolute zero, triple point of water, redefinition of kelvin.



広瀬 茂久
Shigehisa Hirose
E-mail: shirose@bio.titech.ac.jp

1. はじめに

私が所属する大学の歴史を調べる中で、本稿のテーマと出会ったが、私自身は「温度」の概念を正確には理解できていない。ものに触った時に熱いや冷たいという感覚を持つので、それは体温より温度が高いあるいは低いからだといわれ、なんとなく納得してきた。私たちの体に埋め込まれた温度センサーの分子実体も明らかになっているので、¹⁾ 生物学的には、ほぼ「温度」を理解したことになり、安心していい。

ところが、「温度標準の現状」と題する山澤と丹波の解説により、²⁾ 熱力学温度の単位 (kelvin, K) の定義が、現在の水の3重点 (273.16 K; 0.01 °C) を基準にするものから、ボルツマン定数 (k_B) によるものに変更するべく準備が進められていると知って、本稿の執筆を思い立った。氷点 (0 °C) を基準に絶対零度 (0 K = -273.15 °C) を推定し、現在の定義を確立するために貢献した人たちに、舞台の幕間でもう一度スポットライトを当てて労に報いたいと思ったからだ。

近い将来に導入される見込みの新定義は、水という特定の物質の性質に依存せず、自然界の定数に基づくので、「教えるににくい」という難点はあるが、科学的には望ましいとされているので、この新しい流れも紹介したい。

2. 絶対零度への挑戦

温度の精密測定は、種々の測定の中でも最も難しいとされている。この技術的な壁に挑み、絶対零度 (-273.15 °C) の小数点以下2桁目を決める際に、決定打を放ったのは我が国の木下正雄と大石二郎だ。今からおおよそ100年前の仕事になるが、ガラス細工を駆使した手作り装置による快挙だったので世界が驚いた。その数値は今もセルシウス温度の基準値として使われている。

2.1 絶対零度の存在に気付いたのはいつ頃で誰か？

絶対零度は、熱力学の理論上の最低温度で、そこでは熱による運動がすべて止まる。最近ではかなりの極低温が作り出され、絶対零度付近では、驚くような物理現象が起きることが明らかになっているが、絶対零度は実現が不可能である。最初に、絶対零度の概念がどのようにして生まれたかを簡単に見ておこう。

絶対零度の着想は意外と早い。フランスの G. Amontons (1663~1705) は、空気の体積が温度によって変化することを利用して温度計 (空気温度計、ガリレオの温度計の改良版、Fig.1) を作った。この温度計を冷やすにつれ、内部の空気の圧力が下がることに気が付き、圧力がゼロになる温度があるのではないかと考えた (いわゆる絶対零度の存在を着想したらしい; しかし、簡単なメモしか残っておらず断定は難しい)。³⁻⁶⁾ これを基準にすると、パリの最低と最高気温の比 (空気温度計の圧力比) は5:6になるとした。当時は温度目盛りが確立されていなかったが (°F の提案は1724年で、°C の導入は1742年)、これを現在の基準で換算すると-240 °C が最低温度と予測したことになる (1702)。天才ともいべきアモントンの肖像画は長い間確認できなかったようだが、最近 Wikipedia に掲載された (Fig.1)。⁷⁾

19世紀初めごろまでに J.H. Lambert (1728~1777), J.A.C. Charles (1746~1823), J. Dalton (1766~1844), J.L. Gay-Lussac (1778~1850) らは、多くの気体の熱膨張係数がすべて同じ値であることを確かめ、以前からアモントンや W. Irvine (1743~1787) らが推測していた温度の下限、すなわち気体から熱が完全に奪われて圧力が0になる温度

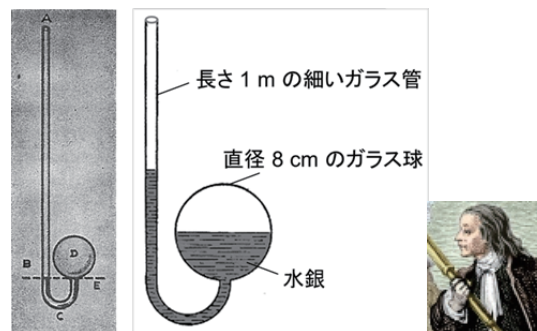


Fig.1 A thermometer devised by Guillaume Amontons (right). He became almost deaf during adolescence, which may have motivated him to dedicate his career on science.

の値が -273 °C 近辺であると推定した。

2.2 舞台背景とストーリーの概要

1900年代前半 (大正から昭和への変わり目の頃) は、-273 °C 近辺の値をより正確に決める必要に迫られていた。熱力学上の0度 (0 K, kelvin) は私たちが日常使い慣れているセ氏温度 (°C, Celsius) ではマイナス何度になるか? 逆にいえば、0 °C (氷点) は絶対温度では何度になるのか? すなわち、当時温度標準となっていた氷点の絶対温度 (T_0) を小数点以下2桁程度まで決めるべく度量衡学者が奮闘していた。成功すれば一躍有名になるが、失敗すれば一生を棒にふるかねない。実験には精度の高い気体温度計を用いることになるが、その製作、実際の測定、及びデータ処理の一連の作業には10年近い年月を要したからだ。世界では4つのグループがこの精密測定に挑んだ。日本以外の3つのグループは設備的にも資金的にも恵まれていた。我が国の木下正雄 (1883~1966) と大石二郎 (1905~1997) は、ガラス細工の技術を生かして手作りした装置 (気体温度計、Fig.2) に真空ポンプをつないで、氷点 (純水が1気圧下で凍る温度) が 273.15 と 273.16 K の間にあるという測定結果を得た (昭和10年, 1935)。⁸⁾ その後、より精度の高い等温線法 (Isotherm method) を開発し、この方法によっても、同じ結論に達した (1938)。⁹⁾ あまりお金をかけずにこれだけのことを成し遂げたことは特筆に値する。この間のいきさつを大石が自らの手でまとめ、傘寿 (80歳) の記念に自費出版しているが (Fig.3), ¹⁰⁾ 広く知られるところとなっていないので、以下に紹介させていただく。

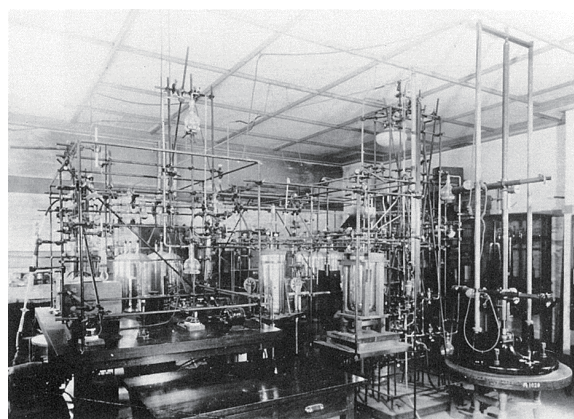


Fig.2 The gas thermometer constructed by Oishi and Kinoshita, in the main building of Tokyo Institute of Technology in 1934, and used for the determination of the absolute temperature of 0 °C (T_0).



Fig.3 The book “24 years of my dedication to T_0 research” written by J. Oishi to celebrate his 80th birthday (a self-published book).

2.3 研究室の立ち上げ

東京工業大学に新設された物理学教室の教授に着任した木下正雄（東大物理）は、卒業した後の後輩大石二郎（東大物理，1929 卒）を助手として迎え、研究室の整備に着手した。といっても当時は関東大震災（1923）の影響で、蔵前にあった校舎が消失し、大岡山に移転（大正 13 年，1924）したばかりで、実験室は仮設のバラック建てだった。物理学教室が入ることになる本館ができたのは昭和 7 年（1932）。本館にしっかりした実験室ができるまでは準備期間と考え、気体温度計に適した特殊ガラスをドイツに注文したり、ガラス細工の腕を磨いたり、バラック建ての実験室で予備実験をしたりした。今では考えにくいことだが、ドイツから特殊ガラスを輸入するのに 1 年近くもかかった。特殊ガラスだけに溶接や加工が大変で、日本一の熟練工といわれたガラス職人の力を借りても四苦八苦の連続だったそうだ。特に水銀圧力計のガラス管（2 cm×5 尺）は、切り口が真円で、径が揃い、まっすぐである必要があったが、このような厳しい条件を満たすものは 100 本注文しても 3 本しかなかった。ガラス表面をいかにクリーンにするか、超高純度の水銀をいかに調製するかも難題だった。とにかく、廊下を人が歩いただけで測定に影響が出てしまうような精密測定だった。本館に居を構えてから本格的な実験装置の組み立てに取りかかったが、大変だったのは、資材の調達ではなかった。「そんな研究をいまさら日本で始めて何の意味があるのだ？」という周りからの批判にさらされた。

2.4 周囲からの批判

今更そんなことしても無駄では？ そのような批判が出るのも無理はなかった。木下・大石チームが研究を始めた時点では、すでに世界で 2 つのグループが精密測定用の気体温度計を作り上げ、暫定的な結果を出していた。一つはドイツの国立物理工学研究所（PTR）で、 $T_0 = 273.16$ K という値を得ていた。もう一つは、オランダのライデン大学カマリオン オネス研究所（KOL）で、 $T_0 = 273.11$ K と推定していた。両者の差は 0.05 K で、気体温度計の測定精度を考えると小数点以下 2 桁目を確定するのは無理なのではないかと考えられ始めていた。我が国の中央度量衡研究所の専門家でも「温度関係については、もう気体温度計でやる研究もないしな」と言っていた。

2.5 氷点&沸点から T_0 へ

木下が助手の大石に 温度測定の研究をもちかけたのは、ドイツ滞在中に、悔しい思いをしたからだ。「（目盛のふつ

てない）温度計を各国に回送して、それぞれの国で値付けをして戻す、いわゆる国際比較をやったところ、日本の結果だけが大きくずれていた。日本では温度測定の仕事はどうなっているの？」と、暗にレベルの低さを指摘されたからだ。木下も大石も温度測定は専門外だったので、まず基礎の勉強から始めた（この“Educate Oneself”精神は注目に値する）。そんなわけで最初は、水の氷点装置を作製し、当時の安定性（ $\pm 0.003^\circ\text{C}$ ）をはるかにしのぐ、 $\pm 0.001^\circ\text{C}$ の安定性を実現することに成功した。沸点装置も、 $\pm 0.001^\circ\text{C}$ まで正確に測定できるものを作り上げた。

ここまで来ると、国際的な課題となっていた T_0 の決定は決して無謀な計画ではなくなる。かくして上述のように、新宮の本館内の実験室での挑戦が始まった。気体温度計は複雑なガラス配管から成る。気体主容器、圧力計、気体充填のための気体溜めや真空ポンプ、標準気圧計などをすべて配置すると部屋いっぱいになり、まさしく実験室全体が気体温度計そのものという様相だった（Figs.2,3）。それから 10 年がかりではあったが、木下と大石は T_0 の決定という歴史に残る偉業を成し遂げた。

その後、この気体温度計を上野の科学博物館に保存する話もできたが、運搬手段がなく諦めざるを得なかった。せめてもということで、写真で残すことになったが、戦時下のことで写真機材の入手は難しく、特別に許可された機関（日本学術振興会）に頼んでようやく実現した（1943, Fig.2）。

3. 温度の国際標準

しばらく前まで、温度の基準として「氷点を 0°C 、水の沸点を 100°C 」と決めていた。一定の条件下でこの 2 点を正確に測定するのはかなり煩雑なので、1939 年に「水の三重点」を温度の基準にすることが提案された。¹¹⁾ 水の三重点では、水（液体）と氷（固体）と水蒸気（気体）の 3 つの状態が共存し、一定の温度が得られる。実際には、ガラス容器に純粋な水を入れ、排気した後に容器を密封し、一部分を冷やすと氷ができる。この状態が「水の三重点」で、氷点よりも 0.01°C 高い。水の三重点は、氷点よりも優れた精度で温度測定の基準になり得るゆえ、氷点の絶対温度（ T_0 ）が小数点以下 2 桁目まで決まれば、それに 0.01 を加えた値を「水の 3 重点」の温度とすれば、すべてうまくいくことになる。

Resolution 3 of the CGPM (1954)
Definition of the thermodynamic temperature scale by choosing the triple point of water as the fundamental fixed point, and assigning to it the temperature 273,16 degrees Kelvin.



Resolution 3 of the CGPM (1967/68)
The unit of thermodynamic temperature is denoted by the name "kelvin" and its symbol is "K", instead of "degree Kelvin ($^\circ\text{K}$)".

Fig.4 Current definition of the unit of thermodynamic temperature, which was approved at the 10th meeting of the General Conference on Weights and Measures (CGPM) and introduced in 1954. Note the expression K, not $^\circ\text{K}$.

結論を先に言えば、1954年に採用された温度目盛りの原則は以下になる (Fig.4): (1) 国際単位系 SI において、温度 (熱力学温度) の単位はケルビン (K) とする、(2) 1 K は水の三重点の熱力学温度の $1/273.16$ とする。すなわち、水の三重点の温度を 273.16 K (0.01°C) とする。こうして、より精度の優れた基準に移行するとともに、従来の $^\circ\text{C}$ 目盛との対応も維持した現在の方式が決まった。ここで、 273.16 は $273.15 + 0.01 = 273.16$ であることに注意。下線部の数値が、木下と大石の努力で、国際的に合意される過程をもう少し詳しく見ていこう。

3.1 国際度量衡委員会での採択までの道のり

ドイツ (PTR) とオランダ (KOL) のグループによって、 $T_0 = 273.11 \sim 273.16\text{ K}$ らしいことが報告され、これ以上正確な値を求めるのは技術的に無理ではないかと思われていた時に、木下と大石が T_0 研究を開始したわけだが、もう1組この問題に挑戦したグループがあった。それはマサチューセッツ工科大学 (MIT) の J.A. Beattie のグループで、熱測定では実績を有していた。大石の実験結果は $T_0 = 273.15 \sim 273.16\text{ K}$ だったのに対し、MIT グループは $T_0 = 273.16 \sim 273.19\text{ K}$ と高値を得ていた。¹²⁾ Kelvin 目盛による氷点の決定を迫られていた国際度量衡委員会の測温諮問委員会は1939年の第1回委員会で、 273.15 ± 0.02 という値を提案したが、第二次世界大戦の混乱で上部委員会 (国際度量衡委員会) が開かれず、正式な採択には至らなかった。第2回委員会 (1948) でも基本的に同じ答申をしたが、上部委員会では一部の国の意見に配慮し、具体的な数値の決定は見送られた。第3回委員会 (1952) では、MIT のグループが新しいデータをとっているの、その結果を待った方がいいということで先延ばしとなった。

次回の委員会に向けて、関係者が各グループの測定の問題点や誤差の原因等について詳細な議論を行う過程で、大石の等温線法¹³⁾の利点がよく理解されるようになった。一方、MIT グループがガラス容器の代わりに採用していた鋼鉄の二重壁容器の熱伝導率の問題や大学院生によるデータ取得 (熟練を要するので初心者では信頼性の高い値が得にくい) などの問題点が明らかになった。こうしてようやく、第4回委員会 (1954) で水の三重点 = $273.16\text{ }^\circ\text{K}$ とすることが決まった (Fig.4)。木下・大石の測定がいかに大きな貢献をしたかがよく分る。

この間の委員会には、木下や大石も出席を要請されたが、戦後の貧しい時期で日本政府にお金が無く、書簡による意見陳述しかできなかった。紙不足から学術雑誌の発行にも困ったほどで、4頁以内の論文しか印刷して貰えなかったそうだ。何よりも Nature に投稿した論文がうやむやになったまま目の目を見なかったのは返す返すも残念だったそうだ。

3.2 木下正雄のプロフィール¹⁴⁾

木下は東大を卒業後、ドイツ、イギリス、オランダに渡り、熱伝導や低温の実験に従事し、昭和2年 (1927) に東工大の教官予定者として帰国した (理研の主任研究員を兼務)。英語が堪能で、妻は英国人女性 Ivy Rose。日本の英語教育の普及にも尽力した。英国人を招いて文部省に英語教授研究所を作る際の陰の立役者の一人でもあった。¹⁵⁾ 自分の弟子に限らず、若手研究者が英語論文を書くのを手伝った。頼まれると数日かけて仕上げてくれたそうだ。¹⁶⁾ 華やかな報道を好まなかったがゆえに、業績の割には一般に知られていない。

T_0 決定に関する最初の報告や論文は木下・大石の共著であるが、それ以降は実際に実験を計画・遂行した若手 (大石)

の単独著者となっており、木下の人柄が偲ばれる。木下には、器械体操の名手で球技もこなすという意外な側面もあったようだ。



Fig.5 Masao Kinoshita (left) and Jiro Oishi (1931).

3.3 大石二郎のプロフィール

大石自身はもう少し実験を続けたいと思っていたが、昭和16年 (1941) 12月8日の真珠湾攻撃のニュースを聞いて実験の継続を断念した。丁度その頃、肺結核と診断され病院で療養生活を余儀なくされていたことも、「 T_0 への挑戦はここまでにしておこう」と決めた遠因だった。大石はこの病気以来、健康には人一倍気を使うようになった。教え子の話では、「昼食にかける時間は驚くほど長く、蕎麦 (そば) までよくかんでから飲み込んでおられた」そうだ。

大石の授業はインパクトがあったらしい。はじめにデモ実験をしてからその日の講義を始めることが多かったので、学生は大石の授業を楽しみにしていた。こんな具合だ。ニクロム線を2本用意し、片方には数個のガラスの筒をかぶせておく。まず裸のニクロム線に電流を通して真っ赤にしてみせた後、ガラスの筒をかぶせた方を指し示しながら「これに同じ電流を流すとどうなるか?」と言って学生に考えさせた上で、おもむろにスイッチを入れ、予想外の結果にみんな驚いたところで、本題に入るという見事な講義だったようだ。¹⁷⁾ 本稿の読者には、結果の説明は不要かと思うが、聞いただけではすぐ忘れてしまう私自身のために記しておく: ガラスに熱が奪われるために、ガラス筒に覆われた部分は黒いままで、筒と筒の間のみが真っ赤な灼熱状態になる。

4. 熱力学温度の単位 kelvin の定義変更

水の3重点を基にした熱力学温度の単位は、1954年の提言では、degree Kelvin ($^\circ\text{K}$) を使うことになっていたが、1967/68年の提言で degree を削除しケルビンを小文字にして (略号は大文字)、単に kelvin (K) と表記することになり現在に至っている (Fig.4)。

近々 (早ければ2015年にも) 導入されようとしているのは、本質的な変更で、水の3重点を参照する現行方式を破棄し、ボルツマン定数によって kelvin を定義しようというものだ。ボルツマン定数 (k_B) は、エネルギー (E , joule) と温度 (T , kelvin) を結びつける定数であること ($E \leftrightarrow k_B T$) を考えれば理にかなっている。新定義では熱運動する粒子のエネルギーとの関連で kelvin 温度をあらわすことになる。ボルツマン定数は1 kelvin が何 joule のエネルギーに相当するかを教えてくれる (the number of joules per degree; the number of joules of energy that each molecule has at a particular temperature)。従って、新定義の導入に際しては、ボルツマ

ン定数を正確に 7 桁近くまで決定する必要がある（相対的な不確かさが $< 10^{-6}$ ）。これは容易な仕事ではなかったが、最近ブレークスルーがもたらされた。

4.1 単位変更の背景

理論的に美しい形で単位を定義にしたいという科学者の強い思いが変更のドライビングフォースとなっている。自然界で不変の定数に基づいて温度の単位 kelvin を定義できれば理想的で、そのためにボルツマン定数 k_B の精密測定を目指して種々の試みがなされている。そのうちの有望なものについては、4.3 節で触れる。

変更のもう 1 つの理由は、水の 3 重点の温度を厳密に規定するためには、(i) 水の純度や同位体比率さらにはガラス容器の質などが問題となり、温度の基準点としては不都合な点がある上に、(ii) 現行法では、極低温 (< 20 K) や高温 (> 1300 K) 領域で正確な温度を知ることが難しくなるという欠点があるからだ。¹⁸⁾

4.2 熱力学温度の単位の新しい定義

2011 年の国際度量衡総会 (CGPM) の決議によれば、kelvin は次のように定義し直されることになっている：The kelvin, K, is the unit of thermodynamic temperature; its magnitude is set by fixing the numerical value of the Boltzmann constant to be equal to exactly 1.3806×10^{-23} when it is expressed in the unit $\text{s}^{-2} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{K}^{-1}$, which is equal to $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$. (小数点以下の 5 桁目の X は今後の研究により決まる数字である)。本 4 章の冒頭に記したボルツマン定数の意味が理解できていないと分りにくい表現だが、厳密さが求められる定義の世界ではやむを得ないのだろう。

専門家にとっては、新定義には大きなメリットがあるが、温度とは何か¹⁹⁾を教える立場の人たちには悩みの種になるかも知れない。温度の概念が難しい上に、その単位までが難解になるからだ。熱力学温度の単位 kelvin の定義が変わっても、体温計の目盛は変わらないし、氷点が 273.15 K であることも変わらないので日常生活の範囲では変更に気付くことはないだろう。教育上の困難という理由だけからではなく、「温度はマクロな系における物理量ゆえに、量子論的な定数に基づいて定義するのは望ましくないのではないか」と純粋に科学者としての立場から新しい単位系への移行に異議を唱えている人もいる（興味のある人は文献^{20,21)}を参照されたい）。

4.3 ボルツマン定数決定の現状

理想的なミクロの系における 1 粒子については、前述のボルツマン定数の意味どおり、 $E = k_B T$ となるが、現実のマクロの系における測定では、種々の工夫を凝らして、高校の教科書に出てくる $pV = nRT$ (R は気体定数で k_B のアボガドロ定数倍) や $E = 1/2 \cdot mv^2 = 3/2 \cdot k_B T$ などに関連付けた複雑な計算式によって k_B を求めることになる。²²⁾

熱力学温度の単位 kelvin の定義に使えるほど十分な桁数でボルツマン定数 k_B を決定できることを示したのがアメリカの国立標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology, NIST) の M. Moldover ら²³⁾で、1988 年のことだった。彼らは、精密な音響気体温度計 (Acoustic gas thermometer, AGT) を開発して、不確かさが 1.8×10^{-6} ($< 10^{-6}$ が望ましいとされている) の値を得た。それ以後、 k_B 決定競争は激化し、2011 年にフランスの国立計量標準研究所 (National Laboratory of Metrology and Testing, LNE) の L. Pitre ら²⁴⁾が、 $(1.380\,647\,74 \pm 0.000\,017\,1) \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ (不確かさ: 1.24×10^{-6}) という結果を報告。さらに、2013 年にはイギリスの国立物理学研究所 (National Physical

Laboratory, NPL) の M. de Podesta ら²⁵⁾が同様の方法で、 $(1.380\,651\,56 \pm 0.000\,000\,98) \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ (不確かさ: 0.71×10^{-6}) という値を得ることに成功し、kelvin の再定義に弾みをつけた。New Scientist 誌は、2013 年 7 月 13 日号で、アルゴン入りの音響共鳴装置を楽器に見立てて、“Musical argon is most accurate thermometer ever” と称賛しているが、本人たちは 6 年間にも及ぶ神経をすり減らす毎日だったと述懐している。

ここでは最有力視されている音響共鳴法^{22,26)}による結果のみを紹介した。この方法では、3 リッター程度の銅製共鳴器内にアルゴンガスを入れ、273.16 K に保ちながら、音響共鳴周波数を測定し、その値から音速 (アルゴンガスの速度) を求め、ボルツマン定数 k_B を算出するのが一般的である。他に、(i) Dielectric constant gas thermometer, (ii) Refractive index gas thermometer, (iii) Johnson noise thermometer, (iv) Doppler broadening thermometer を用いる方法などでも k_B の決定が試みられている。^{2,26)}

文 献

- 1) D. D. McKemy *et al.*, *Nature* **416** (6876), 52–58 (2002).
- 2) 山澤一彰, 丹波純, *Netsu Sokutei* **40** (4), 158–164 (2013).
- 3) C. C. Gillispie (editor in chief), *Dictionary of Scientific Biography I & 2*, Charles Scribner's Sons, p138–139 (1970–1980).
- 4) K. メンデルスゾーン (大島恵一訳), 絶対零度への挑戦, ブルーバックス 181, 講談社, p17–22 (1971).
- 5) F. ダンネマン, 安田 徳太郎 (訳・編), 新訳ダンネマン 大自然科学史, 復刻版, 三省堂, 6 巻, p120 (2002).
- 6) I. R. クリチェフスキー, I. V. ペトリアノフ (金光不二夫 訳), 熱力学の話, 東京図書, p45–48 (1978).
- 7) 17th-century people of Paris—Wikimedia Commons, Uploaded by G. Jeff on May 28, 2014.
- 8) M. Kinoshita and J. Oishi, *Phil. Mag.* **24**, 52–62 (1937); 大石二郎, 理研彙報 **16**, 241–257 (1937).
- 9) 大石二郎, 理研彙報 **21**, 1119–1133 (1942).
- 10) 大石二郎, 私の T_0 研究 24 年の記録, 自費出版 (1984).
- 11) W. F. Giaque, *Nature* **143**, 623–626 (1939); 参考: Giaque (1895–1982) は 1949 年にノーベル賞を受賞.
- 12) J. A. Beattie, *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry* (H.C. Wolfe ed., Vol.2), Reinhold Pub. Co., p74–88 (1941).
- 13) 大石二郎, *MOL* 昭和 42 年 9 月号, 77–81 (1967).
- 14) 高田誠二, 日本計量新報, 2011 年 1 月 1 日 (2852 号第 1 部) (2011).
- 15) 斎藤兆史, 日本人と英語: もうひとつの英語百年史, 研究社, p72, 2007.
- 16) 久保和子, 自然 **53** (1978 年 12 月増刊号), 114–116 (1978).
- 17) 末武国弘, 東工大クロニクル No. **293** (1995 年 10 月号), 3–9 (1995).
- 18) J. Fischer *et al.*, *Int. J. Thermophys.* **32**, 12–25 (2011).
- 19) 高田誠二, *Netsu Sokutei* **32** (4), 162–168 (2005).
- 20) V. V. Khrushchov, arXiv:1102.4831v1 [physics.atom-ph].
- 21) T. P. Hill, *Accredit. Qual. Assur.* **16** (8), 471–472 (2011).
- 22) M. R. Moldover *et al.*, *Metrologia*, **51**, R1–R19 (2014).
- 23) M. R. Moldover *et al.*, *J. Res. Natl. Bur. Stand.* **93** (2), 85–144 (1988).
- 24) L. Pitre *et al.*, *Int. J. Thermophys.* **32**, 1825–1886 (2011).
- 25) M. de Podesta *et al.*, *Metrologia* **50**, 354–376 (2013).
- 26) 三澤哲郎, 産総研計量標準報告 **9**, 75–98 (2014).