シリーズ「発掘！東工大の研究と社会貢献」第２回

絶対零度への挑戦

絶対零度は −273.15 ℃と習った。この値を決める際に決定打を放ったのが東工大です。

絶対零度（-273.15 ℃）の小数点以下２桁目を決めたのは東工大だ。温度の精密測定は，種々の測定の中でも最も難しい。本学が蔵前の地から大岡山に移転して間もない頃，物理学教室の木下正雄と大石二郎が絶対零度の決定に挑み，見事に成功した。しかも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。舞台となった本館が今も美しい姿を保っているのと同様に，その数値は今も温度の基準値として使われている。

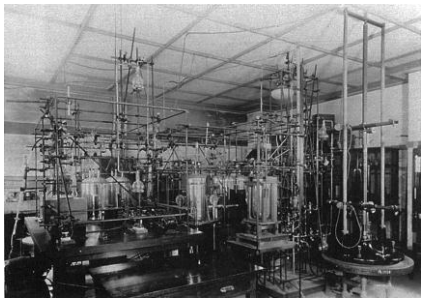
❶ T_0 への挑戦を綴った大石さんの著書

温度に下限はあるか

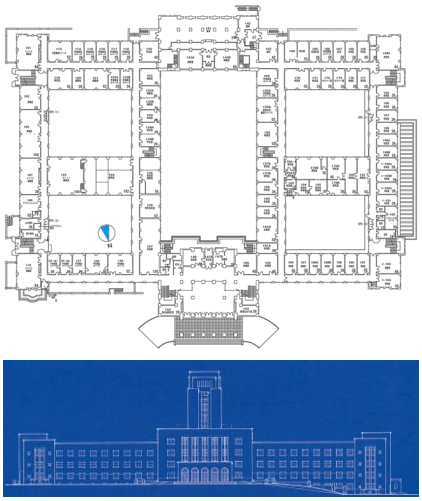
特殊犯罪潜入捜査（ドラマ）の題名にもなった「絶対零度」だが，実際には実現が難しい極寒の世界だ。絶対零度は，熱力学の理論上の最低温度で，そこでは熱による運動がすべて止まる。最近では かなりの超低温が作り出され，絶対零度付近では，驚くような物理現象が起きることが明らかになりつつある。ひょっとすると宇宙の加速度的膨張や暗黒物質の正体なども説明できるようになるのでは？と期待したくなる。ややこしい空想はさておき，高校の理科を思い出してみよう。絶対零度は，-273.15 ℃と習った。この温度を決める際に決定的役割を果たしたのが東工大であることは余り知られていない。

舞台となったのは新営まもない本館

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（℃，Celsius）ではマイナス何度になるか？逆にいえば，０℃（氷点）は絶対温度では何度になるのか？ すなわち氷点の絶対温度（T_0）を決めるのが，大問題だった。成功すれば一躍有名になるが，失敗すれば一生を棒にふりかねない。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。本学以外の 3 つのグループは設備的にも資金的にも恵まれていた。本学の木下正雄（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，図❷）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。場所は大岡山の本館１階の実験室（29 号室，図❸）で，昭和 10 年（1935）のことだった[1]。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）[2]。あまりお金をかけずにこれだけのことを成し遂げたのは驚異的なことで，世界から称賛されるとともに，本学でも語り継がれることになった。



❷ 気体温度計の全貌（本館 1F-29 号室）



❸ 大岡山キャンパスの本館と１階平面図

できたばかりの物理学教室の教授に着任した木下さんに呼ばれて 助手になったのが大石さんだ。本学が大正 13 年（1924）に大岡山に移転し，昭和４年（1929）に大学に昇格したといっても，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。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，資材の調達だけではなかった。「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。

周囲からの批判
（今更 そんなことしても無駄では？）

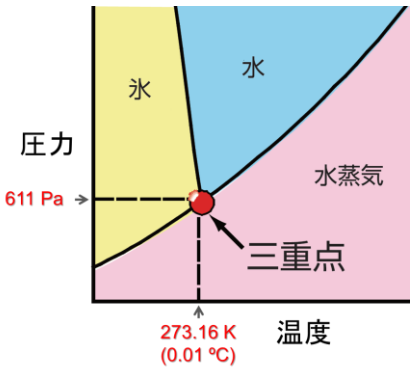
そのような批判が出るのも無理はなかった。木下・大石チームが研究を始めた時点では，すでに世界で 2 つのグループが精密測定用の気体温度計を作り上げ，暫定的な結果を出していた。一つはドイツの国立物理工学研究所（PTR）で，$T_0 = 273.16$ K という値を出していた。もう一つは，オランダのライデン大学で，$T_0 = 273.11$ K と推定していた。両者の差は 0.05 K で，気体温度計の測定精度を考えると小数点以下 2 桁目を確定するのは無理だと考えられていた。我が国の中央度量衡研究所の専門家でも「温度関係については，もう気体温度計でやる研究もないしナー」と言っていた。

氷点 & 沸点から T_0 へ

木下さんが 助手の大石さんに 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。「（目盛のふってない）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。木下さんも大石さん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”精神が重要なのだ。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（± 0.003°）をはるかにしのぐ，± 0.001° の安定性を実現することに成功した。沸点装置も，± 0.001 ° 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，本館の 1 階 29 号室（北側東翼，図❸）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 29 号室は気体温度計そのものという様相だった（図❶,❷）。それから 10 年がかりではあったが，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，図❷）。

温度の国際基準

しばらく前まで，温度の基準として「氷点を 0 ℃，水の沸点を 100 ℃」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[3]。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（図❹）。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 ℃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。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のようになる（図❺）：(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 ℃) 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 ℃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，木下さんと大石さんの努力で，国際的に合意される過程をもう少し詳しく見ていこう。



❹ 水の 3 重点（0 K と共に温度の基準点として用いられている））

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，$T_0 = 273.11$〜273.16 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，本学の木下・大石チームが T_0 研究を開始したわけだが，もう 1 つ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。大石さんの実験結果は $T_0 = 273.15$〜273.16 K だったのに対し，MIT グループは $T_0 = 273.16$〜273.19 K と高値を得ていた[4]。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で，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，大石さんの等温線法 [5]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 $T_0 = 273.15$ K，水の三重点 ＝273.16 Kとすることが決まった（図❺）。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。絶対零度は 273.15 ℃と習うが，小数点以下 3 桁目はまだ確定していないのだ(そのことにどれほどの意味があるかどうかは別として)。

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.

BIPM

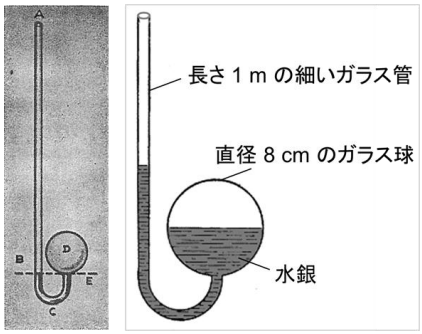
Resolution 3 of the CGPM (**1967/68**)
The unit of thermodynamic temperature is denoted by the name "kelvin" and its symbol is "K", instead of "degree Kelvin (°K)".

❺ 国際度量衡総会（1954 年）の決議 [一部改変]。木下・大石の値がこの決定に大きく貢献した。1968 年以降は，熱力学的温度は単に K と表記することになっている（°K は廃止）。

この間の委員会には，木下さんや大石さん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日の目を見なかったのは返す返すも残念だったらしい。

絶対零度の存在に 気付いたのは いつ頃で 誰か？

最後に絶対零度の概念がどう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た温度計（空気温度計，ガリレオの温度計の改良版，図❻）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）[6–9]。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，℃の導入は 1742 年），これを現在の基準で換算すると–240 ℃が最低温度と予測したことになる（1702）。



❻ アモントンの気体温度計のイラスト（左，定積温度計の雛形）と説明図（右）。このような簡単な装置で，最低温度（絶対零度）の概念に到達していたと思わせるメモが残っている。アモントンは まさしく天才だ。若くして聴覚を失ったことが彼を科学に没頭させたのかも知れない。

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 になる温度の値が –273 ℃近辺であると推定した。

天才ともいうべきアモントンさんの肖像画を探しているが見つからず，お見せできないのが残念だ。

木下さんのプロフィール [10]

木下さんは東大を卒業後，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）に本学教官予定者として帰国した。英語が堪能で，妻は英国人女性の Ivy Rose さん。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 [11]。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 [12]。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（大石さん）の単独著者となっている。木下さんの人柄が偲ばれる。参考までに，木下さんの父 木下広次（1851〜1910）は，一高の校長を経て初代京都帝大の総長を務めた人で，次のような逸話が残っている [13]。いつも羊羹色の洋服を破れているのも構わず着ていて，余り風采を気にしていなかった。そんなわけで，出張先では，いわゆる“行燈部屋”に入れられ，翌日 知事が会いに来て貴賓であることが分り，宿屋の主人が慌てて部屋を替えたこともあった。旅行の時は，宿帳にはよく「小学校教員」と書いていた。そんな父親の口癖は，

「卑怯な事をするな」,「損得を云うな」だったそうだ。「夕鶴」で有名な劇作家の木下順二とは従兄弟だ。

専門分野では，大石二郎（今回の主人公）と天野清（1907〜1945）を育てたことが最大の功績ともいわれている。天野清は日本における量子力学の草分けで，科学史にも強い興味を示した。将来を嘱望された若手だったが東京空襲の犠牲になり，39 歳で世を去った。遺品が，高田誠二（1928〜）によって整理された後に，縁の深い本学に寄贈されたのを機会に 2012 年に，本学の博物館で常設企画・新規収蔵資料公開『天野清の人と仕事』が行われたので，ご覧になった方も多いだろう。

木下さんには，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。

❼ 木下正雄（左）と大石二郎（1931）

大石さんはどんな人だったのか

大石さん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。大石さんは 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。

大石さん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，学生は大石さん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あと，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。結果については，当時学生だった末武国弘名誉教授の報告があるので参照されたい。[14)]

大石さんは，昭和 40 年（1965）に定年を迎え，青山学院大学に新設された理工学部に移り，教育研究に多忙な日を送った。以前は，青学大の教員に本学の出身者が比較的多かったのは何かの縁だったのかもしれない。

極低温センターの誕生（1981 年）

本学には 極低温センター（略称）が設置されている（図❽）。全国の低温センターの中で，唯一の研究センターとして設置された点で異色だ。木下さんと大石さん以来の伝統のなせる技だ。

❽ 通称“極低温センター”の場所。木下・大石らの低温物理学教室は，粟野満（1924〜2004）や大塚美枝子（1931〜）らに引き継がれ，今日の極低温物性研究センターの礎となった。航空写真の撮影日: 2012.5.13

参考文献

1) M. Kinoshita and J. Oishi, “Expansion and pressure coefficients of nitrogen, hydrogen, helium and neon, and the absolute temperature of 0 C”, Phil. Mag. 24, 52–62, 1937. 大石二郎，理研彙報 16, 241–257, 1937.

2) 大石二郎，「ヘリウム，水素，ネオン，アルゴン，空気及び炭酸瓦斯の 2 気圧以下に於ける 0℃及び 100℃等温線，及び 0℃の絶対温度値」，理研彙報 21, 1119–1133, 1942.

3) Giauque, W. F. A proposal to redefine the thermodynamic temperature scale. *Nature* 143, 623–626, 1939. 参考：Giauque（1895〜1982）は 1949 年にノーベル賞を受賞。

4) Beattie, J. A. The thermodynamic temperature of the ice point. *In* Temperature, its measurement and control in science and industry. Reinhold Pub. Co. 74, 1941.

5) 大石二郎，「絶対零度はいかにして決められたか」，MOL 昭和 42 年 9 月号，p77–81，1967.

6) Charles Coulston Gillispie (editor in chief), “Dictionary of Scientific Biography 1 & 2”, Charles Scribner's Sons, p138–139, 1970–1980.

7) 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.

8) 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.

9) クリチェフスキー，ペトリャノフ（金光不二夫 訳）「熱力学の話」，東京図書，p45–48, 1978.

10) 高田誠二，寄稿「木下正雄先生への追慕」，日本計量新報 2011 年 1 月 1 日（2852 号）。

11) 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.

12) 久保和子，自然 53（1978 年 12 月増刊号），p114–116.

13) 冨岡勝，1880 年代教育史研究会ニューズレター 29, 3–5, 2010.

14) 末武国弘，東工大クロニクル No 293（1995 年 10 月号），p3.

2013 年 9 月
東京工業大学博物館 資史料館部門
centshiryou@jim.titech.ac.jp