

## ニュートンの冷却法則（その 2）ニュートンの温度スケールについての考察

*Newton's Law of Cooling, Part 2, Consideration on Newton's Temperature Scale*

圓山 重直 (八戸高専), 守谷 修一, 岡島 淳之介 (東北大)

*Shigenao MARUYAMA (Hachinohe College, NIT), Shuichi MORIYA, Junnosuke OKAJIMA (Tohoku Univ.)**e-mail: maruyama-o@hachinohe-ct.ac.jp*

## 1. はじめに

前報[1]では, アイザック・ニュートン(1642-1727)の熱科学に関するラテン語の論文「Scala graduum Caloris. (A Scale of the Degree of Heat, 温度の尺度)」[2]と当時の熱科学の実情について述べました. ニュートンの6頁のラテン語論文は, 半分が温度と物理現象を記述した表で占められています. 伝熱学会の諸氏になじみ深いニュートンの冷却法則は, ほんの一部で触れられているにすぎません.

前報[1]では, 金属の融点など 100°C より高温の温度記述について考察しましたが, ニュートンは 100°C 以下の温度についても詳細に観察しています. 本報では, 100°C 以下の低温領域の温度スケールについて考察し, 当時の気象と現在の地球温暖化にも触れてみたいと思います.

## 2. ニュートンの温度スケール

18世紀では, 温度を測ること自体が重要な科学でした. 華氏温度を確立したファーレンハイト(1684-1736)[3]や摂氏温度のセルシウス(1701-1744)以前に, ニュートンも温度計測に興味を持ち, この論文[2]を書いたようです.

表1は, 水の沸騰温度以下の温度と物理現象についての英語訳[4]を転載したものです. 表中にはニュートンの温度(°N)と共に, 2種類の推定温度(°C)も記してあります.

温度計測には基準となる温度定点が必要ですが, ニュートンは, 当時比較的好く使われた水が凍る温度(0°N)と体温(12°N)を基準として温度目盛りを作っています. ニュートンの論文では, この温度を等分温度(Equal Part of Heat)としか記述していませんが, 本報では, ニュートン度(°N)として定義します. Grigullは, この基準点を0°Cと37°Cとして, ニュートン温度を次式で定義し

ました[5]. 他の研究者も, 体温を37°Cとしてニュートンの温度を評価しています[6]. その定義でニュートン温度を評価すると, ニュートン度は次式で定義できます.

$$T [^{\circ}\text{C}] = \frac{37}{12} T [^{\circ}\text{N}] \quad (1)$$

この定義の換算温度(°C)を表1に示していますが, 幾つかの矛盾点が見いだされます.

まず, 表の記述では33°Nで水が沸騰し始めると記述されています. 式(1)による評価温度は101.7°Cで水の沸騰点とあまり矛盾しないように思われます. しかし, 鍋に水を入れて沸騰させるとき, 鍋底から気泡が出て, 他の水はサブクール状態で100°C以下の場合が多いのです. 水が100°Cとなる場合は, 1気圧下で鍋の水が激しく沸騰し, 蒸気と水が平衡状態に達したときに限ります.

表1中No.13では水が激しく沸騰していますが, この温度は34°Nで, 式(1)の換算温度では104.8°Cとなり, メモリ間隔が約3°Cのニュートン温度でも誤差が大きすぎます.

もし温度基準がずれているとすると, どの基準温度が異なっているのでしょうか. まず, 水が凍る温度ですが, 「雪を砕いて温度計を入れ, 雪が溶ける」温度としていますので, 空気と氷, 水が共存する温度である0°Cをある程度正確に計っていると考えられます. 当時, 空気汚染はあまりなかったと考えられますから, ニュートンがこの実験を行ったケンブリッジでは, 雪はほぼ純水と考えても良いのではないのでしょうか. 現在, 都市部に降る雪は, 空気中の汚染物質を吸着してとても汚いので, 都市部の雪を直接食べないことを勧めます.

次の温度定点は, 「ヒトが温度計に触れたときに示す最高温度」です. ヒトの最高温度は体内の

表1 ニュートンの温度(°N)とその記述[4]

表中\*のついているものは、No.13より引用した温度とその記述を示す。

No.	Descriptions and Degrees of Heats [4]	Equal parts of heat, Newton's Temperature (°N)	Equivalent Celcius' Temperature Eq(1), (°C)	Equivalent Celcius' Temperature Eq(2), (°C)
1	Heat of the air in winter when water begins to freeze. This heat is determined accurately by placing the thermometer in crushed snow when it is thawing.	0	0.0	0.0
2	Heats of the air in winter.	0, 1, 2	0, 3.1, 6.2	0.0, 2.9, 5.9
3	Heats of the air in spring and in autumn.	2, 3, 4	6.2, 9.3, 12.3	5.9, 8.8, 11.8
4	Heats of the air in summer.	4, 5, 6	12.3, 15.4, 18.5	11.8, 14.7, 17.6
5	Heats of the air at midday about the month of July.	6	18.5	17.6
6	Greatest heat which the thermometer reaches in contact with the human body. This is approximately the same as the heat of a bird hatching its eggs.	12	37.0	35.3
7	Heat of a bath near the maximum which one can bear for a considerable time with the hand immersed and constantly moving. This is about the same as that of blood freshly drawn.	14.27	44.0	42.0
8	Greatest heat of a bath which one can bear for a long time with the hand immersed and remaining immobile.	17	52.4	50.0
9	Heat of a bath at which molten wax floating on it begins to solidify and lose its transparency.	20.18	62.2	59.4
10	Heat of a bath in which floating wax, on becoming hot, melts, and is kept liquid continuously without boiling.	24	74.0	70.6
11	Heat intermediate between that at which wax melts and that at which water boils.	28.55	88.0	84.0
12*	Water begins to boil at a heat of 33 degrees	33	101.8	97.1
13	Heat at which water boils vigorously, and a mixture of two parts of lead, three parts of tin and five parts of bismuth on cooling solidifies. Water begins to boil at a heat of 33 degrees and on boiling barely reaches more than 34 1/2 degrees. Iron, as it cools to 35 or 36 degrees of heat, ceases to cause any boiling when hot water is dropped upon it; the same if the iron is of 37 degrees of heat and cold water is dropped upon it.	34	104.8	100.0
14*	and (water) on boiling barely reaches more than 34 1/2 degrees.	34.5	106.4	101.5
15*	Iron, as it cools to 35 or 36 degrees of heat, ceases to cause any boiling when hot water is dropped upon it; the same if the iron is of 37 degrees of heat and cold water is dropped upon it.	35, 36, 37.	107.9, 111.0, 114.1	102.9, 105.9, 108.8

深部温度で、一日の内に変動しますが、ほぼ 37°C で一定とされています。この温度を測るときには、直腸温度で計測することが多いので、当時の温度計を直腸に入れることは考えにくいと思われます。口腔内温度では 35.2°C~37.3°C の値となると言われています[7]。現在の体温は脇の下に体温計を挟み測定することが多いですが、亜麻仁油を使った

ニュートンの温度計は、温度を測る油溜の直径が 38~51 mm だと言われているので[8]、これを脇の下に挟むことが出来たかどうかはかなり疑問です。

表1中のNo.13にある34°Nを水の沸点と仮定すると、ニュートンの温度定点である、12°Nは35.3°Cとなり、一般の体温に比べかなり低くなりますが、温度計を手で触り、一定温度にした温度

と考えると納得もいきます。34 °N を 100°C とすると、後で記述するように、その他の温度も比較的矛盾なく説明できます。

体温を修正した新たな温度定義は次式で表され、その値も表 1 に示しています。

$$T[^\circ\text{C}] = \frac{100}{34} T[^\circ\text{N}] \quad (2)$$

次項で述べるように、筆者らは、ガス加熱による水の沸騰実験を行いました。水が激しく沸騰した時は、温度計はほぼ 100°C を示しましたが、鍋の底から蒸気気泡が出始めるときの温度は、97°C 程度で、式(2)の温度定義と矛盾しませんでした。

ここで注意したいのは No.12~14 の温度は、液体の水の温度であり、沸騰実験で計測される壁面温度ではないことです。

壁面温度の実験は、熱した鉄塊に水を滴下した No.15 の温度で示されています。滴下した水の温度は大まかな記述しか在りませんが、後述するように、この温度も式(2)の定義で矛盾しません。

### 3. ニュートン温度と物理現象

筆者は、テフロン加工したアルミ製鍋に 1 リットルの水道水を入れ、ガスコンロ加熱により十分沸騰させた後で、水温を下げてから沸騰実験を行いました。鍋底に気泡が出始めるのは、加熱速度にもよりますが、97~98°C で沸騰を開始しました。更に加熱を続け、気泡が激しく放出される状態の水温は、実験時の気圧の飽和蒸気圧と比較した温度差は +0.3°C であり、温度計の誤差範囲内で一致しました。

ニュートンの実験では、33 °N で沸騰が始まり、34 °N で激しく沸騰したとしています。式(2)による温度評価では、33 °N は 97.1°C であり、上記の観察結果と一致します。イギリスの水は一般的に硬水で、沸点が不純物で変化しているとも考えられますが、この変動は無視できるほど小さいと考えられます。

ニュートンは沸点が変動することを知っており [8]、No.14 で沸点は 34.5 °N 以上になることがあると記述しています。0.5 °N に相当する 1.5°C は沸点の変化は気圧変動で約 56hPa に相当し、気圧変動による沸点の変化とも矛盾しません。

以上の結果から、本報では式(2)によって評価し

た温度で、ニュートンの温度計測を評価します。

ニュートンは、高温計測に使用した、鉄ブロックに各種温度の水滴を垂らして沸騰実験を行い、No.15 の観察をしています。著者らも、ニュートンが使用したものと推定される鉄ブロックと同じ大きさの鋳鉄板に水滴を垂らして実験を行いました。鉄ブロックの表面温度は 102°C, 107°C, 114°C と設定し、滴下する水の温度は約 7°C の冷水および約 90°C の温水としました。

冷水を滴下したとき、鉄ブロックの表面温度が 102°C の時は、沸騰せず液滴を形成し、徐々に蒸発することが観察されました。107°C では、冷水温水共に核沸騰が確認されました。鉄ブロックが 114°C の場合、冷水温水にかかわらず 107°C の場合よりも激しく核沸騰が生じました。このことから、式(2)の温度評価の方が、実験結果を比較的良く記述している可能性があります。

No.7 では風呂の温度の記述があります。式(2)の評価では 42°C であり、日本の風呂の温度程度です。一般にヨーロッパ人は熱い風呂に入らないので、42°C でもかなり熱く感じたのではないのでしょうか。式(1)の評価だと、44°C となり、日本人でもかなりの高温です。No.7 の温度は、血が流れ出る温度とされています。これは、人間の血の温度と言うより、家畜の血の温度と考えられます。馬や羊の血液温度は、40 (牛) ~44°C (羊) とされており、血液流出時の温度低下を考慮すると、羊の血液温度と考えると矛盾しません。

No.8 は、腕をお湯に入れて動かさずに耐えられる最高温度としています。式(1)の評価による 52.4°C は、我慢できる温度より高いと考えられます。Silverman [5] は、日本の草津温泉は温度が高く最高で 57.8°C だとしています。現在、草津温泉の温度は湯もみにより湯温を 48°C に下げているので、17 °N を 50°C と評価した方が妥当と考えられます。

因みに、1990 年代にテレビのバラエティ番組で使用された熱湯は、50°C 程度だったと言われていました。式(1)の評価による 52.4°C は、我慢できる温度より高いと考えられるので、17 °N は 52.4°C より 50°C と評価した方が良いのかもしれませんが、どちらにしても、50°C のお湯はとても熱く感じるため、ニュートンは、この実験を召使いにさせたのではないのでしょうか。この召使いは、かなり我

慢強い人だったと想像されます。

次に No.9 と No.10 のワックス（蜜蝋）の融解実験を検証します。著者らは、ニュートンと同様にビーカー内に水と攪拌機を入れ、加熱しながら水に浮いた蜜蝋の融解を測定しました。しかし、条件により一定のデータが得られませんでした。

そこで、DSC (Differential Scanning Calorimetry, 島津製作所製 DSC-60Plus) を用い、国内で入手可能な 3 種類の精製蜜蝋の相変化を測定しました。その結果、平均 65.0°C で完全に融解し、61.2°C で凝固を開始しました。ワックスは多種の成分で構成され、成分もニュートン当時のものと異なると考えられます。しかし、ニュートンの実験でワックスの凝固が始まる温度 20.18 °N (59.4°C) と、著者らのデータが比較的良く一致していることは興味深いです。

#### 4. ニュートン時代の気温と地球温暖化

ニュートンは、季節の温度を No.2~5 に記述しています。近年の月別最高・最低温度の 10 年間の平均と表 1 に示すニュートンの温度による季節の温度指標を図 1 に示します。

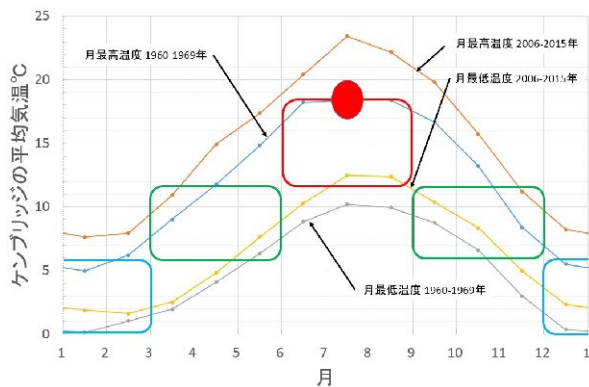


図 1 ケンブリッジにおける月別温度[9]とニュートンの四季温度の比較

図 1 は、英国ケンブリッジにおける気象データ [8] から作成した、近年 (2006-2015 年) の月別平均最高温度と最低温度および、1990-1999 年の同様なデータを示しています。図中には、表 1 にニュートンが記述した四季の温度範囲と真夏の最高温度を示しています。ニュートンの記述では、四季に応じて温度範囲が示されているので、図 1 では、その範囲を四角で示しました。ニュートンの

夏季最高温度は、誤差を考慮して示しています。

ニュートンの時代は、産業革命による石炭の消費が始まっておらず、化石燃料の使用による人類起源の地球温暖化はなかったと考えられます。

1990 年代のケンブリッジの気温はニュートン時代と大きく変化がないようにも思われます。

一方、近年の月別最高・最低気温の平均は、明らかにニュートン時代に比べて高くなっていることがわかります。

ケンブリッジの高温化は、地球温暖化の影響なのか、都市部のヒートアイランドの影響なのかは、このデータのみでは確定的な結論は導くことができません。

しかし、ニュートンの時代に比べてケンブリッジ地域の温度が上昇していることが、ニュートンの論文から推定できることは、興味深いことだと思われま

#### 5. おわりに

伝熱工学でなじみ深いニュートンの冷却法則が記載されている、ニュートンの論文について、ニュートンの温度尺度を検証してみました。0°C から水の沸点までの温度域では、34 °N を 100°C とすると、他の物理現象がほぼ説明できると考えられます。また、2006~2015 年の英国ケンブリッジの平均気温は、産業革命が始まる前のニュートンの時代より高かったと推定されます。

#### 参考文献

- [1] 円山重直, ニュートンの冷却法則(その 1), 伝熱, Vol. 54, No.229, pp.31-34, (2015).
- [2] “Scala graduum Caloris (A Scale of the Degrees of Heat)”, Philosophical Transactions, No. 270, pp. 824-829, (April 1701).
- [3] Grigull, U., Fahrenheit a Pioneer of Exact Thermometry, Proc. The Eighth International Heat Transfer Conference, San Francisco, Vol. 1, pp. 9-18, (1986).
- [4] “The Correspondence of Isaac Newton, Volume IV, 1664-1709”, Edited by J.F. Scott, Cambridge University Press, PP.357-365, (1967).
- [5] Grigull, U., “Newton’s Temperature Scale and the Law of Cooling,” Waerme und Stoffuebertrag, Vol. 18, pp.195-199, (1984).
- [6] Siliverman, M.P., Radiation, Conduction, and the

- Way Objects Cool: Newton's 'Hot Block' Experiment 300 Years Later, in *A universe of Atoms*, Springer, (2002).
- [7] Harmon, F.L., Evaluation of Oral Temperature Readings, *Science*, Vol. 118, pp. 719-720, (1953).
- [8] Simms, D. L., "Newton's Contribution to the Science of Heat", *Annals of Science*, Vol. 61, pp.33-77, (2004).
- [9] <https://www.metoffice.gov.uk/pub/data/weather/uk/climate/stationdata/cambridgedata.txt> (March 20, 2018).
-