

ニュートンの冷却法則（その1）

Newton's Law of Cooling, Part 1

円山 重直（東北大学）

Shigenao MARUYAMA (Tohoku University)

e-mail: maruyama@ifs.tohoku.ac.jp

1. はじめに

アイザック・ニュートン(1642-1727)は、今から約300年前の江戸時代に活躍した科学者です。彼は、リンゴが落ちたことで発見したといわれる万有引力の法則など、多くの科学的発見をしています。これらの科学的功績が認められ、彼の遺体はウエストミンスター寺院に葬られ、昔の1ポンド紙幣の裏面には彼が発明したといわれる反射望遠鏡と共に図案化されています。

ニュートンは多くの法則を生み出しました。ニュートンの力学法則で代表される古典力学の体系化や光の性質など、近代の科学に欠かせない多くの発見をしました。理論的考察から音速の推定も行っています。ニュートン力学は近代科学の基礎となり、飛行機やロケットの飛行だけでなく機械の設計には欠かせない大事な科学となっています。また、国際的な単位系であるSI単位では力の単位としてN（ニュートン）が使われています。



図1 旧1ポンド紙幣に描かれているアイザック・ニュートン

ニュートンは熱科学にも興味を持ち、その研究成果が1701年に英国王立協会の科学雑誌に発表されました[1], [2]。この論文の一部が伝熱の分野では良く知られている「ニュートンの冷却法則」です。本稿では、ニュートン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)」[1]と当時の熱科

学の実情について述べたいと思います。

2. ニュートンの論文

図2に示す、論文はニュートンの熱科学に関する論文として知られています。しかし、論文はラテン語で書かれ、かつ匿名（著者不明）として出版されました。その中には、「ニュートンの冷却法則」の基となる記述も含まれています。図2中の注釈は、論文の英語訳[2]を基に著者が記入したものです。

この論文はたったの6頁で、しかもその半分が表で占められている短いものです。論文の中には図が無く、数式が一本も出てきません。しかも、著者は匿名なので、本当にニュートンが書いた論文か疑っている科学者もいるほどです[3]。ニュートンは当時、国会議員に選出されるほどの有名人だったので、ちょっと自信のない論文は自分の名前を出したくなかったのかもしれませんが。この論文は多くの科学者が検証しています。

18世紀では温度を測ること自体が重要な科学でした。ニュートンも温度計測に興味を持ちこの論文を書いたようです。温度計測には基準となる温度定点が必要ですが、比較的よく使われた水が凍る温度（0度）と体温（12ニュートン度）を基準として温度目盛りを作っています。

彼の興味は水が沸騰する沸点（100°C、約34ニュートン度）より高い温度計測に興味があったようで、スズや鉛が溶ける温度を基準としてより高温の温度を測っています。そのため、高温まで沸騰しないアマニ（亜麻仁）油の熱膨張現象が温度計に使われました[3]。

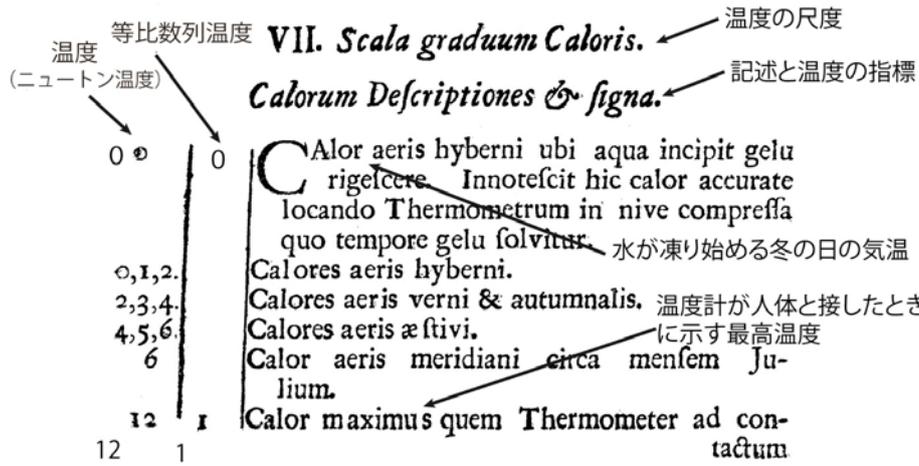


図2 1701年に英国王立協会から出版された熱科学の論文[1]

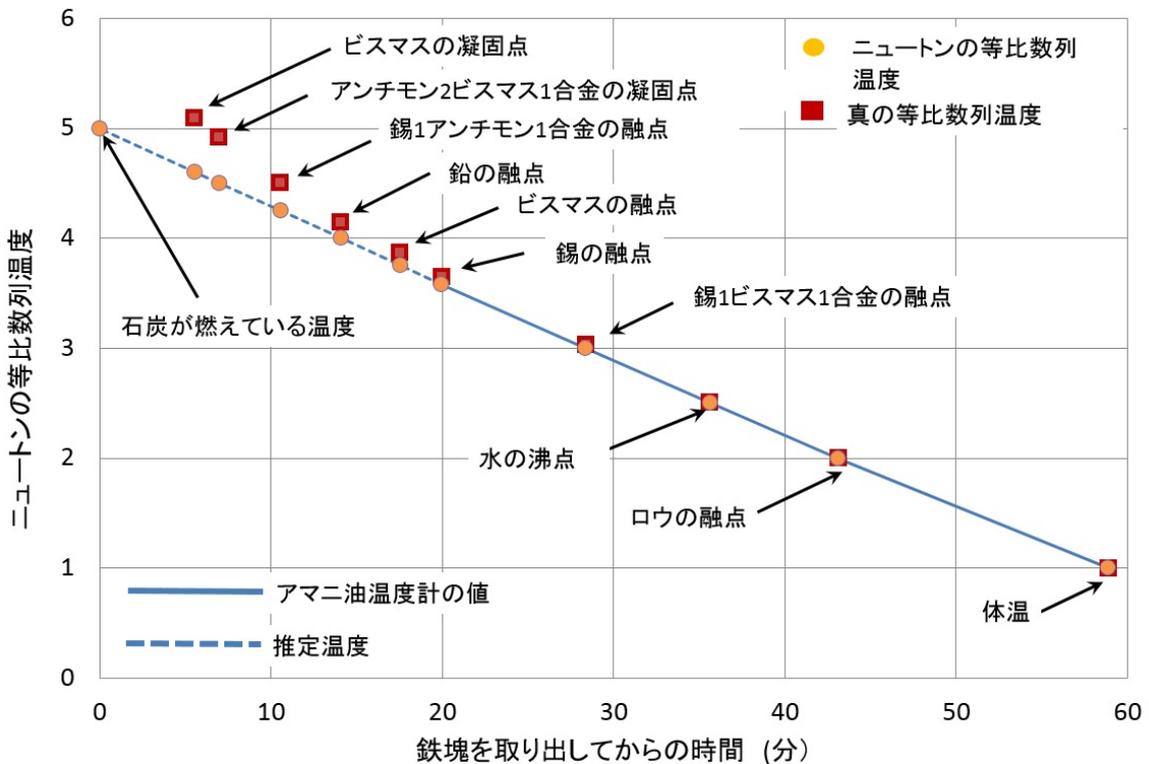


図3 1701年の論文を再現したニュートンの温度と冷却時間の変化

3. ニュートンの冷却法則

ニュートンはさらに高い温度の測定にチャレンジしています。つまり、台所のコンロで赤く燃えている石炭の温度です。さすがに、ニュートンの温度計でも燃えている石炭の温度を測ることは出来ません。温度計で測れない温度を測るために、ニュートンは一計を案じました。

まず、鉄のかたまりをコンロの中に入れて赤く

燃える石炭と同じ温度になるまで加熱します。その鉄のかたまりをコンロから取り出して空気中に置き、その冷え方を調べたのです。鉄の上には鉛や錫を置いて、それが冷えて固まる時間を測定しました。比較的低温で固まる金属の温度は、ニュートンの温度計であらかじめ測っておきます。つまり、鉄が冷えて温度計測が可能になってから温度と、鉄をコンロから取り出してからの時間を測定したのです。この、鉄の冷える速度を理論的に

考察すると、はじめに鉄の温度が何度なのかを推定出来ます。ニュートンの推定ではその温度は 192 ニュートン度 (592°C) と推定されました。

温度計で測れない高温を測るためにニュートンは仮定をおきました。つまり、物体が冷却する速さは物体と周囲の空気温度の差に比例するとしました。また、物体は風が吹いている状態で冷やしたという記述があります。この2つの文章が「ニュートンの冷却法則」の起源と考えられます。現在では、熱流束 q 、流体と物体の温度差 $T - T_\infty$ 、熱伝達率 h としたとき、次式の関係がニュートンの冷却法則として使われています。

$$q = h(T - T_\infty) \quad (1)$$

4. 高温物体の冷却特性

図3は、ニュートンの等比級数温度を使い、鉄塊の冷却時間を計ることによって、当時の温度計では測ることの出来ない高温を測定できることを示しています。この温度は、ニュートン温度を $T(N)$ として次式で定義されます。

$$T' = \log_2(T/12) + 1 \quad (2)$$

物体の温度は時刻で変化します。そのため、現在の対数目盛りにあたる「等比級数温度(degree of heat in geometrical progression)」を使いました。図3は、その目盛りで赤熱した鉄のかたまりを冷やしたときのニュートン温度の変化を時間に対してプロットしたものです。アマニ油を使った温度計はせいぜいで錫が溶ける温度(232°C)までしか測れませんが、それを延長することによって鉄の最初の温度を推定することが出来ます。

ニュートンの他の記述では鉄塊の重さは 4.25 lb (ポンド) で[4]、論文中[1]には「かなり厚い鉄片を赤く加熱した」という記述があります。鑄鉄の密度を考慮すると鉄片の大きさは 1×4×4 in (インチ) と推定できます。この大きさの鉄片を「板の上に置いて」冷やしたとしていますから、特性長さを計算し、ふく射も考慮した等価熱伝達率を 39 としてビオ数を求めると 0.011 となります。

ニュートンの実験は集中熱容量系の仮定が成り立っており、鉄片はほぼ均一温度で低下したことが分かります。幸いにして、ニュートンが用いた鉄のかたまりは大きくなかったため、この仮定を自動的に満足していました。もっと巨大な鉄のかたまりで実験していたら、正確な温度は出なかったかもしれません。

図3は、Ruffner の推定[3]によって「赤熱した鉄板が体温まで低下するまでに 60 分要した」という仮定に基づき、前述の熱伝達率を導いたものです。この冷却時間については諸説あるので、次報で検討したいと思います。

図3には、近代の金属工学を用い Grigull よって検証された同一成分の合金の融点から推定された正しい温度[5]も示しています。ニュートンはふく射伝熱による熱移動を知りませんでした。温度が低いとき、等価ふく射熱伝達率はほぼ一様ですが、温度が高くなるとふく射の寄与が大きくなり等価ふく射熱伝達率が一定という仮定が成り立たなくなります。そのため、ニュートンの高温の推定は実際より若干低めに見積もられています。しかし、高温の温度を再現するために、ニュートンは合金の成分を調整し、日本刀の刀鍛冶のように鉄の赤熱色と温度の関係も注意深く観察しています。

5. なぜニュートンは高温物体の温度を測ったのだろうか (筆者の推測)

当時の熱科学では、温度の基準を決めることが重要なテーマで、皆さんが使っている摂氏 (セ氏温度, °C) や米国で使われている華氏 (カ氏温度, °F) もニュートン温度と同じ頃に考案されました。ただし、これらの温度は水が沸騰する温度である 100°C が上限でした。

ニュートンは 100°C より高い温度に興味を持ち、実際にその温度基準を作っています。また、1701年に匿名の論文を出していますが、その温度 (ニュートン温度) を広めようとした形跡は見られません。なぜ、ニュートンは高温を正確に計ろうとしたのでしょうか。

ニュートンの論文の主要部分の実験と内容は、1693年頃に行われたとする説があります[3]。文献を丹念に見ると[6]、実験は 1692年か 1693年の冬におこなわれた形跡があります。この論文が出版される2年前の 1699年にニュートンは造幣局長に就任しています。ニュートンは、安い金属から貴金属 (特に金) を生み出そうとする錬金術 (れんきんじゅつ) に熱中していたと言われています。錬金術実験の一部は当時禁止されていたから、ニュートンはこっそり研究をやっていたのでしょうか。錬金術は金属工学ですから、金属が溶ける高温を計測することはすこぶる重要です。そのため

に、正確な温度を計測する必要に迫られたと考えられます。

ニュートンは台所で燃えている石炭の温度(595°C)と鉛などの重金属の融点と凝固点を明らかにしています。金の融点は1064°Cですから、それより融点の低い重金属の性質を明らかにして、金と同じようなものを作り出そうとしていたと考えるのは私だけでしょうか。

造幣局長になってから、にせ金作りを摘発して功績を挙げたと言いますから、そのための温度測定研究とも考えられます。しかし、錬金術の研究から出てきた温度測定方法を匿名論文として出版し、こっそり科学者の反応を見ていたと考えられなくもありません。

6. おわりに

伝熱工学でなじみ深いニュートンの冷却法則を検証してみました。本稿では歴史的背景と著者の私見を述べてみました。次稿では、図3の冷却曲線について伝熱工学的視点からさらに考察してみたいと思います。

参考文献

- [1] “Scala graduum Caloris (A Scale of the Degrees of Heat)”, *Philosophical Transactions*, No. 270, pp. 824-829, (April 1701).
 - [2] “The Correspondence of Isaac Newton, Volume IV, 1664-1703”, Edited by J.F. Scott, Cambridge University Press, pp.357-365, (1967).
 - [3] Ruffner, J. A., “Reinterpretation of the Genesis of Newton’s Law of Cooling,” *Archives of History of Exact Science*, Vol. 2, pp. 138-152, (1964).
 - [4] Simms, D. L., “Newton’s Contribution to the Science of Heat”, *Annals of Science*, Vol. 61, pp.33-77, (2004).
 - [5] Grigull, U., “Newton’s Temperature Scale and the Law of Cooling,” *Waerme und Stoffuebertrag*, Vol. 18, pp.195-199, (1984).
 - [6] Dobbs, B.J.T., *The Janus faces of genius, The role of alchemy in Newton’s thought*, pp.169-175, Cambridge University Press, (1991).
-