

ニュートンの冷却法則（その3）
—強制対流実験—

Newton's Law of Cooling, Part 3,
Experiment on Forced Convection

圓山 重直 (八戸高専), 守谷 修一 (東北大学)
Shigenao MARUYAMA (INT, Hachinohe College), Syuichi MORIYA (Tohoku University)
e-mail: maruyama-o@hachinohe-ct.ac.jp

1. はじめに

アイザック・ニュートン (1642-1727) の冷却法則についての論文「Scala graduum Caloris. (A Scale of the Degree of Heat, 温度の尺度)」[1][2]について、前報 (その1) [3]では、高温物体の温度計測について議論しました。前報 (その2) [4]では、水の沸点以下の温度について、ニュートン温度の精度や、当時のイギリスの気温について議論しました。

伝熱工学の教科書で、対流熱伝達の基礎式として使われているニュートンの冷却法則は、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、

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

で記述されています。ニュートンの論文[1]では、物体の温度計測が中心で、式(1)は論文中には出てきません。

ニュートンは、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。

私たちは、ニュートンの論文を強制対流熱伝達のよりどころとしていますが、論文では風の速度は明示されていません。本報では、ニュートンがこの実験をしたとき、どのような風が吹いていたのかを解明するために、風洞実験を行いました。その結果から、ニュートンの実験を再現することを試みました。

2. ニュートンの実験結果

ニュートンは独自に温度計を作り色々な現象の温度を計測しました。低温の温度計測は前報 (その2) [4]に、高温の現象は前報 (その1) [3]に記載しています。それらを纏めたものを本報の最後に記している表1に示します。表には、ニュートンの論文

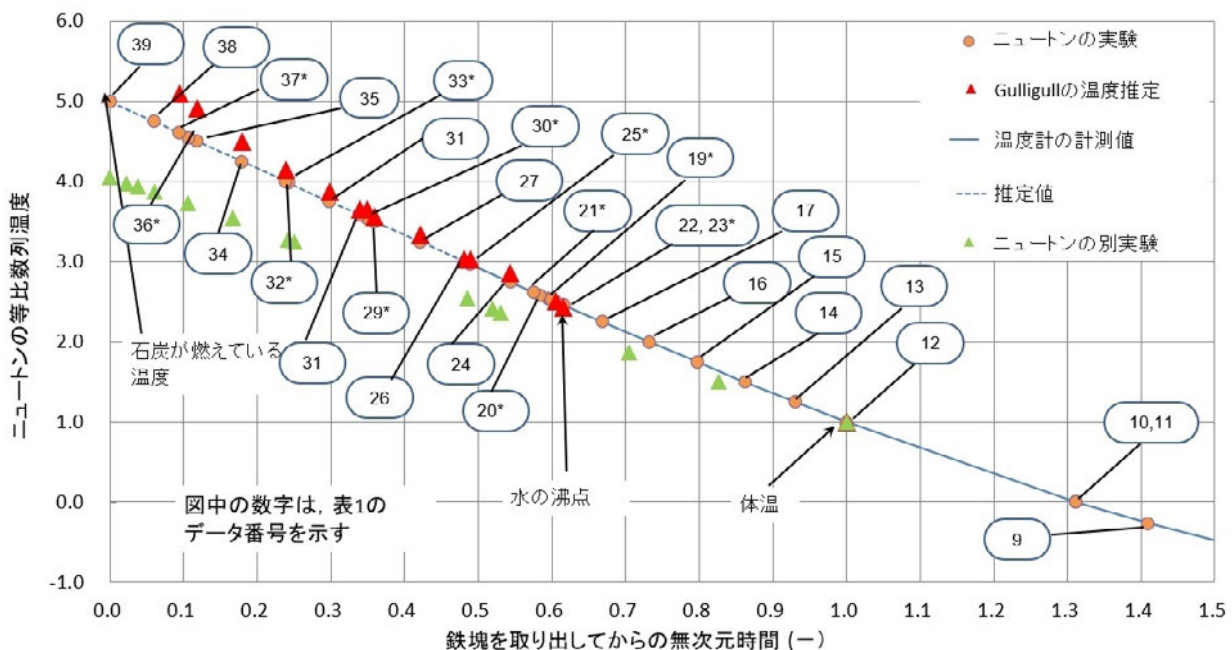


図1 等比数列温度 (表1) を無次元時間で表したニュートンの実験結果。

図中の番号は表1のデータ番号を示します。

中の表で示された値に加えて、文章で記述された温度も記載しています。

ニュートンは、重さ 4.25 lb の厚い板状の鉄塊を台所のコンロで燃えている石炭の中に投入し赤く加熱しました。その赤熱した鉄塊を取り出して、冷たい場所に置きました。鉄塊の上には種々の金属や合金の粒を置き、それが凝固する時間を測定しました[2]。このようにして測定した温度を表 1 に示しています。

ニュートンは 2 つの温度表記を用いています。一つは、 T (N) で記載する通常の温度(Equal part of heat)[2]で、式(2)で表記します[4]。

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{N}) \times 100/34 \quad (2)$$

もう一つは対数温度に相当する等比数列温度(degree of heat in geometrical progression)[2]で、ニュートン温度を T' (N) として次式で定義します。

$$T' = \log_2(T/12) + 1 \quad (3)$$

表 1 中には、ニュートン温度、セルシウス温度、等比数列温度を示しています。さらに、Grigull が推定した温度[5]も示しています。Grigull の温度は、高温部分では冶金学的に推定した温度であり、ニュートンの温度より高くなっています。

図 1 は、表 1 の値を等比数列温度で表しています。ニュートンの論文では冷却時間が記載されていないので、図 1 は表 1 の温度を実験開始から体温に相当する 12 N になるまでの時間で無次元化しています。

ニュートンの実験では、鉄塊の大きさと、等価平均熱伝達率 \bar{h} から推定されるビオ数は 0.005 ~ 0.011 と小さいので、集中熱容量系が適用できて冷却曲線は次式で表されます。

$$c\rho V \frac{dT}{dt} = -\bar{h}S(T - T_{\infty}) \quad (4)$$

ここで、 c は鉄塊の比熱、 ρ 密度、 V 体積、 S 底面を除いた表面積、 t 時間です。初期温度が T_1 で、対流熱伝達率とふく射熱伝達率を合わせた等価平均熱伝達率が物体温度によらず一定の時、式(4)は次式で表されます。

$$\frac{\bar{h}S}{c\rho V} t = \ln(T_1 - T_{\infty}) - \ln(T - T_{\infty}) \quad (5)$$

$T_{\infty} = 0$ として、式(2)を式(5)に代入すると、

$$T' = T'_1 - \frac{\bar{h}S}{c\rho V \ln 2} t \quad (6)$$

となります。つまり、等比数列温度 T' を時間 t で表すと、図 1 に示すように直線となり、前報(その 1) [3]で示したように、温度計で測れない温度を推定することができるのです。そこが、ニュートン論文の重要なところであり、ニュートンの冷却法則はそれをサポートする仮定にすぎないのです。

ただし、集中熱容量系を反映させるためには、式(3)の温度は、周囲空気との温度差であるべきです。ニュートンが実験したときの環境温度は 2 N (5.9 $^{\circ}$ C) と推定され [6]、ニュートンが目指した高温物体の温度の推定には環境温度を 0 N としても大差ありませんでした。

前述したように、ニュートンの論文では、実験時に風が吹いていたという記述はありますが、その風の強さについては言及していません。物体の冷却速度は、ふく射伝熱も考慮した等価熱伝達率に依存するので、冷却時間が分からないと風速の推定ができません。Ruffner は冷却時間を 60 分と仮定し [7]、Grigull は 77 分と推定しました[8]。どちらも明確な根拠はありません。

ニュートンはこの実験の他にも、鉄塊の冷却実験を行っています。その時 100N から 12N に冷却するまでの時間は 132 分でした[6]。しかし、その実験がこの実験[1]と同じ風速下で行われたという証拠はありません。

そこで、ニュートンの実験を再現するために、簡易風洞を製作し、鉄塊の冷却実験を行いました。

3. 実験装置および実験方法

3.1 簡易風洞の製作 ニュートンの実験を再現するために吹き出し型の簡易風洞を製作しました。図 2 は、その簡易風洞と実験装置の概略を示しています。風洞は設置スペースを小さくするために、遠心ファンから放出された空気を L 字型に偏向して吹き出しノズルから噴出させました。L 字型風路にはアルミ製ハニカムを入れて整流し、角部には直径 120mm のビニールパイプを切断した円弧翼で構成される偏流板を設置しました。風路部の断面積は 450 \times 450 mm、ノズル出口断面積は 200 \times 200 mm でした。

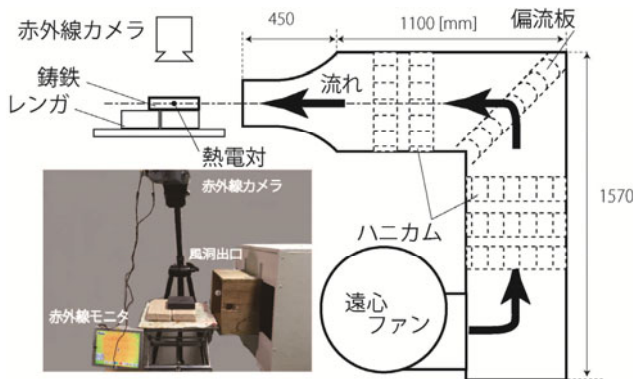


図2 簡易風洞による実験装置

計測部における風速分布は横方向 2%、縦方向 4%であり、ノズル中央近傍では一定でした。ノズル中央部の測定部での流れの乱れ強さは 1~2%でした。本風洞は遠心ファンの回転数をインバータで制御することにより、2~25 m/s の風速を得ることができました。

3.2 表面放射率の測定 高温物体の伝熱にはふく射が大きく寄与します。赤熱した鉄塊を取り出した直後は、ふく射伝熱量は対流熱伝達量に比べて 50 倍以上となります。

そこで、図2に示すように、実験中は放射率 ε を 1 に設定した赤外線カメラを設置して放射率の変化をモニターしました。赤外線カメラの測定温度を $T_{IR}(K)$ とすると、物体表面の放射率は次式で表さ

れます。

$$\varepsilon = (T_{IR}^4 - T_{\infty}^4) / (T^4 - T_{\infty}^4) \quad (7)$$

赤外線カメラの測定によると、風洞実験中の表面温度分布は铸铁板角の一部以外はほぼ一様であることが確認されました。

3.3 実験方法 大きさ $103 \times 107 \times 27$ mm (約 $4 \times 4 \times 1$ inch)、質量 1.93 kg (4.25 lb) の铸铁板を設定温度 $800^{\circ}C$ の加熱炉に入れ加熱しました。

風速を設定速度に調整した風洞の測定部にコンペバレンガを敷き、その上に铸铁板を置いて、铸铁中央に設置された直径 1.5mm の K 型熱電対により冷却温度を測定しました。その時、铸铁板上部に設置された赤外線カメラで表面温度をモニターしています。

铸铁板のピオ数が小さいので、内部に設置された熱電対の温度は、表面温度に近い値と推定されます。

4. 結果と考察

図3は、風洞実験とニュートンの実験による鉄塊温度を対数温度目盛りで示しています。表1に示すニュートン論文の実験は、時間が掲載されているニュートンの別実験[6]で体温となった時間(132分)となるように表示しました。

図中には、本報で作製した簡易風洞の測定部に

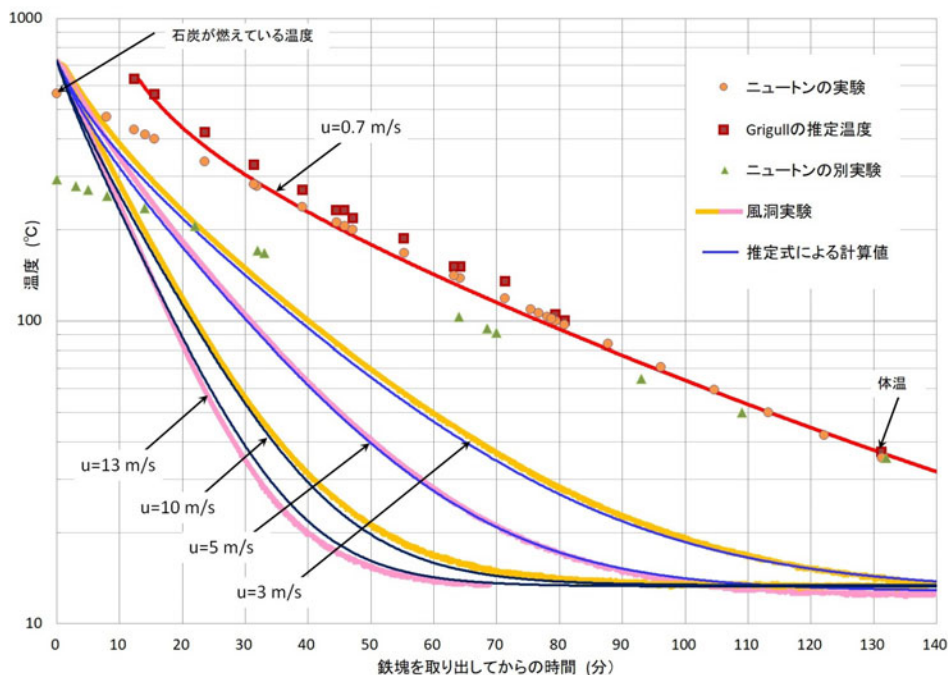


図3 風洞実験でニュートンの実験を再現した実験値と推定式の比較、および、ニュートンの実験データを再現する風速の推定

加熱した鉄塊をレンガ上に置いた場合の実験値を示しています。実験データは1秒ごとに取得し、鉄塊温度が空気流温度とほぼ一致するまで実験を継続しました。

鉄塊の冷却温度は次式で表されます。

$$c\rho V \frac{dT}{dt} = -S\{\bar{h}_c(T - T_\infty) + \varepsilon(T^4 - T_\infty^4)\} \quad (8)$$

1辺 D の正方形断面角柱の対流平均熱伝達率 \bar{h}_c の推定は、Hilpert の経験式[9]

$$Nu_D = \bar{h}_c D / k = C Re_D^m Pr^{1/3}, \quad (9)$$

ここで $C = 0.102$, $m = 0.675$

を用いました。ただし、板状鉄塊は角柱とは形状が異なるので、 D を鉄塊の水力直径とし、定数 C を調整して実験値に合わせた結果、式(9)の C を 0.26 とすることで、実験値と良く一致しました。

鉄塊の放射率 ε は、赤外線カメラから式(7)で求め、 $100^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ のデータを平均して使用しました。

図 3 には各風速の風洞実験と式(9)の推定値を示していますが良く一致していることがわかります。

次に、この実験式を使って、ニュートン論文の実験結果を模擬する風速を推定しました。初期温度は Grigull の推定温度から始まり、ニュートンの実験の条件[6]と考えられる気温 5.9°C の環境下での鉄塊の温度低下を推定しました。この時、放射率は実験データから 0.75 と設定しました。

もし、鉄塊が体温 (12 N) まで、冷却するのに 132 分を要する場合、風速は 0.7 m/s となります。また、Ruffner[7]が仮定したように 60 分で冷却すると仮定すると、その時の風速は 5.0 m/s と推定されます。ニュートン論文の実験は、ニュートンの別実験と全く異なる条件で行ったことは考えにくいので、余り強い風は吹いていなかった可能性が考えられます。また、風速によって冷却時間が異なることを予備実験ですでに知っていて、ニュートンの論文[1]では、敢えて論文では時間を書かなかったのかもかもしれません。

もし、風速が小さい場合、自然対流熱伝達は無視できません。風が全くない場合でも同様な冷却曲線を得ることができます。

5. おわりに

簡易風洞を製作し、ニュートンと同様な実験を行

い、ニュートンが実験したときの風の速度を推定しました。

推定される風速は冷却時間で異なりますが、ニュートンの別実験と同じ時間を要した場合、推定風速は 0.7m/s となり、この領域では自然対流が無視できない範囲となります。また、自然対流のみによる冷却が起きていたことも否定できません。

ニュートンはなぜ、風が吹いていたことを敢えて記述したのでしょうか。また、どのようにして、等比数列温度を用いると高温が推定できることを思いついたのでしょうか。等比数列温度については、ニュートンの名著「プリンシピア」が関わっている可能性があります。

これらの疑問については、次報で議論したいと思います。

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] 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).
- [4] 円山重直, 守谷修一, 岡島淳之介, 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, 伝熱, Vol. 57, No. 240, pp.65-69, (2018).
- [5] Grigull, U., “Newton’s Temperature Scale and the Law of Cooling,” *Waerme und Stoffuebertrag*, Vol. 18, pp.195-199, (1984).
- [6] Simms, D. L., “Newton’s Contribution to the Science of Heat”, *Annals of Science*, Vol. 61, pp.33-77, (2004).
- [7] 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).
- [8] Grigull, U., *Das Newtonsche Abkuehlungsgesetz*, *Abh. Braunschweig. Wiss. Ges.* 29, pp.7-31, (1978).
- [9] Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L. and Lavine, A.S., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th Ed., John Wiley & Sons, pp.426-427, (2007).

表 1 ニュートン温度とその記述（番号は後で付けたもの、*は文章による温度記述を示します。等比数列温度に†がついているものは筆者の計算値を示しています。）

データ番号	現象の記述と温度	ニュートン温度 (N)	等比数列温度式(3)	摂氏温度 (°C)	Grigullの推定温度 (°C)
1	水が凍り始める冬の気温。この温度は、温度計を砕いた雪の中に置き、それが溶ける時に正確に計測される。	0		0.00	0
2	冬の気温	0		0.00	
3		1	-2.58 †	2.94	
4		2	-1.58 †	5.88	
5	春と秋の気温	2	-1.58 †	5.88	
6		3	-1.00 †	8.82	
7		4	-0.58 †	11.76	
8	夏の気温	4	-0.58 †	11.76	
9		5	-0.26 †	14.71	
10		6	0.00 †	17.65	
11	7月の昼頃の気温	6	0.00 †	17.65	
12	温度計が人体に接触して達する最大温度。これは、鳥の卵が孵化する温度とほぼ同じである。	12	1	35.29	37
13	風呂のお湯に手を浸して、絶えず動いている状態で、かなりの時間耐えることができる最大温度。これは採血したばかりの血液とほぼ同じである。	14.27	1.25	41.97	
14	風呂に手を動かさず浸して長時間耐えることができる最高温度。	17	1.5	50.00	
15	お湯の上に浮かぶ溶融ワックスが凝固し始めてその透明度を失う時の温度。	20.18	1.75	59.35	
16	ワックスが浮遊しているお湯が加熱され、沸騰せずに液体を保つお湯の温度。	24	2	70.59	
17	ワックスが溶ける温度と水が沸騰する温度の中間の温度。	28.55	2.25	83.97	
18*	水は 33 度の温度で沸騰し始める。	33	2.46 †	97.06	100
19*	鉄が 35 または 36 度に冷えた時、お湯が上に落ちると沸騰が起きなくなる。鉄の温度が 37 度で、冷たい水が滴った場合も同じである。	35	2.54 †	102.94	
20*		36	2.58 †	105.88	
21*		37	2.62 †	108.82	
22	水が激しく沸騰する温度、および、鉛 2、錫 3、ビスマス 5 の合金が冷却時に固化する温度。	34	2.5	100.00	105

23*	沸騰するお湯は、34.5 度以上にはほとんど達しない。	34.5	2.52 †	101.47	
24	鉛 1, 錫 4, ビスマス 5 の合金が加熱され融解し、液体を保つ最低温度。	40.36	2.75	118.71	135
25*	この合金(錫 1, ビスマス 1 の合金)は冷却すると 47 度で凝固する。	47	2.97 †	138.24	151
26	錫 1, ビスマス 1 の合金が融解する最低温度。	48	3	141.18	151
27	錫 2, ビスマス 1 の合金, または錫 3, 鉛 2 の合金が融解する温度。しかし, 錫 5, ビスマス 2 の合金が冷却時にこの温度で固化する。鉛 1, ビスマス 1 の合金も同様である。	57	3.25	167.65	187
28	ビスマス 1, 錫 8 の合金が融解する最低温度。	68	3.5	200.00	218
29*	錫は冷却すると 70 度で凝固する。	70	3.54	205.88	232
30*	錫は 72 度で融解する。	72	3.58	211.76	232
31	ビスマスの融解温度, 鉛 4, 錫 1 の合金でも同じである。しかし, 溶けている鉛 5, 錫 1 の合金が冷却時にこの温度で凝固する。	81	3.75	238.24	271
32*	そして, 鉛は冷却時に 95 度で凝固する。	95	3.98 †	279.41	
33*	鉛が融解する最低温度。加熱された鉛は 96 または 97 度で融解する,	96	4	282.35	327
34	冷却しつつある高温の物体が, 暗闇の中でまったく光らなくなる温度。または, 逆に, 熱せられている場合には, 同様の暗闇の中で, 非常にかすかに光が知覚されるようになる温度。この温度で, 錫 1, アンチモン 1 の合金が融解し, ビスマス 7, アンチモン 4 の合金が冷却時に凝固する。	114	4.25	335.29	420
35	高温に加熱された体が夜間には光って見えるが, 薄やみではまったく目では確認できない温度。この温度で, アンチモン 2, ビスマス 1 の合金, ならびにアンチモン 5, 錫 1 の合金が冷却時に凝固する。	136	4.5	400.00	561
36*	そして, アンチモン 2, 銅 1 の合金は 140.5 度で凝固する。	140.5	4.55 †	413.24	
37*	アンチモンは 146 度で凝固する。	146	4.60 †	429.41	631
38	高温に加熱された物体が薄やみの中, つまり日の出の直前や日の入りの直後に, はっきり光って見えるが, 日中の晴天の光の中では全く見えないか, またはごくかすかにしか目視できない温度。	161	4.75 †	473.53	
39	ふいごを使わずに瀝青炭が燃える小さなコンロの石炭の温度。そのような火の中で, 強く輝く鉄は同じ温度である。木を燃やした小さなコンロの火の温度はもう少し高く, つまり 200 度か 210 度である。大規模な火の温度は, 特に, ふいごによって(燃焼が)促進される場合は, 更に高温になる。	192	5	564.71	