

# 液体窒素で消しゴムを破裂させるために 必要な冷却時間の測定

寺 嶋 容 明・浦 鷹 貴・大 崎 隼・加 藤 健 一

## **Measurement of cooling time to explode plastic eraser by liquid nitrogen**

Hiroaki TERASHIMA, Takaki URA, Shun OHSAKI and Kenichi KATO



# 液体窒素で消しゴムを破裂させるために 必要な冷却時間の測定

寺 嶋 容 明・浦 鷹 貴・大 崎 隼・加 藤 健 一

群馬大学共同教育学部理科教育講座

(2024年10月16日受理)

## Measurement of cooling time to explode plastic eraser by liquid nitrogen

Hiroaki TERASHIMA, Takaki URA, Shun OHSAKI and Kenichi KATO

1) Department of Science Education, Cooperative Faculty of Education, Gunma University

Maebashi, Gunma 371-8510, Japan

(Accepted on October 16th, 2024)

### 1. はじめに

液体窒素で冷却した消しゴムは、取り出してからしばらく放置しておくことで破裂する。しばしば一般向けに「爆発する」と表現されることも多いが、炎や熱を伴うわけではないので「破裂する」と言った方が実際のイメージに近い。このようなダイナミックな演示実験を子どもたちに見せることによって、日常とは異なる低温世界への興味・関心をより高めることができると考えられる。

冷却することで消しゴムが破裂する理由は以下の通りである<sup>1,2)</sup>。消しゴムを液体窒素の中に入れると、外側はすぐに冷えて硬くなり、収縮しようとする。対して内側は、消しゴムの熱伝導率が非常に低いために冷えるまでに時間がかかる。その結果、収縮しようとする外側との間に大きな応力が発生し、耐え切れなくなったところで破裂するとされる。ただし詳細はよくわかっておらず、液体窒素が消しゴムに染み込み<sup>3)</sup>、内部で急激に気化することで破裂する

とする説<sup>4)</sup>もある。

この実験を成功させるには、液体窒素で冷却する時間を適切な長さにすることがとても重要である。短すぎると不発に終わってしまうし、長すぎると冷却中に液体窒素の中で破裂してしまう。その適切な時間は、消しゴムの大きさや種類などによって異なるはずである。

しかしながら、その冷却時間に関する詳しいデータを見つけることができなかった。1分程度という目安がよく挙げられるが<sup>1)</sup>、使用する消しゴムによっては、それでは確実に長すぎる。また、程度の範囲も不明である。先行研究はあったものの<sup>3, 4)</sup>、学会講演の概要であったため、詳細まではわからなかった。

そこで本研究では、消しゴムのサイズを変えながら、成功させるために必要な冷却時間の測定を行った。その結果、必要な冷却時間は消しゴムの体積や表面積に比例するのではなく、サイズを表すあるパラメーターに比例することがわかった。さらに、取

り出した消しゴムが破裂するまでの時間や、消しゴムの種類を変えたときの違いについても調べた。

## 2. 測定

測定方法はとても単純である。消しゴムをトングで挟んで液体窒素の中に入れ、決められた冷却時間が経過したら取り出して机の上に置き、破裂するまでの待機時間を計測するというものである。なお、待機時間は消しゴムが液体窒素の外に出てからの時間であり、机に置かれてからの時間ではない。また、破裂が何回かに分けて起こることもあるが、そのときは最初の破裂までの時間を待機時間として計測した。

もちろん必ず破裂するというわけではない。取り出してから1分経過しても破裂しない場合は不発として扱った。実際、今回測定した限りでは、1分以上経過してから破裂したものはなかった。さらに、破裂までいかに亀裂が入るだけのときもあったが、この場合も不発として扱った。これは、演示実験であれば失敗とみなせるからである。

逆に、冷却している最中に液体窒素の中で破裂してしまうこともある。そのような場合は待機時間を負の量として扱った。すなわち、例えば冷却終了予定の2秒前に液体窒素の中で破裂した場合には、待機時間は-2秒とした。

消しゴムには、日本で最も有名なもの（トンボ鉛筆・モノ PE-01A）を用いた。MONO という文字と青白黒の3色柄で広く知られ、1969年の発売以来、高いシェアを維持し続けている。そこで、この消しゴムを基準として採用し、そのシリーズの一番小さいサイズのものを用意した。

実際の測定では、その消しゴムをカットし、写真1のような7通りのサイズ（A～G）にして使用した。サイズAが元々のサイズであり、それから横や縦に半分にカットしていったものである。それらの理論上の寸法をまとめたものが表1である。

これらのサイズについて、冷却時間を5秒刻みで変えながら、待機時間を1秒単位で計測していった。サイズA～Eに対する結果が表2～6である。1つの冷却時間について6回行い、結果を「冷却中」（冷

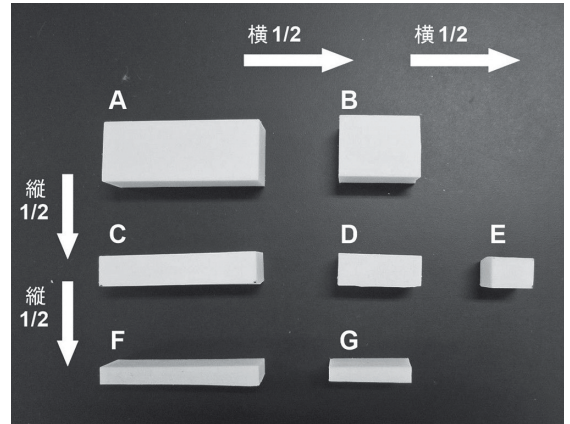


写真1 測定した消しゴム（サイズA～G）

表1 各サイズの寸法

サイズ	横 [mm]	縦 [mm]	高さ [mm]
A	43	17	11
B	21.5	17	11
C	43	8.5	11
D	21.5	8.5	11
E	10.75	8.5	11
F	43	4.25	11
G	21.5	4.25	11

却中に液体窒素の中で破裂した場合）、「成功」（取り出してから破裂した場合）、「不発」（破裂しなかった場合）に分類し、それらの回数をまとめたものである。「冷却中」は待機時間0秒以下とし、「成功」は待機時間1～5秒、6～10秒、11秒～の3つの区間に分けられている。さらに「不発」が3回以下の冷却時間については、「成功」と「冷却中」の回を合わせた待機時間の平均と標準偏差を横に示している。なお、測定時の室温は26～28℃であり、湿度は50～60%であった。

これらの表から、次のような傾向を容易に確認することができる。すなわち、冷却時間が長すぎると冷却中に液体窒素の中で破裂してしまうが、短くしていけば取り出した後に破裂させることができるようになる。さらに短くしていくと待機時間が長くなっていき、短くしすぎると最終的に破裂しなくなってしまう。

表2 サイズAでの結果

冷却時間	冷却中	成功			不発	待機時間 [秒]	
		1~5秒	6~10秒	11秒~		平均	標準偏差
50秒	6	0	0	0	0	-4.8	1.8
45秒	0	4	2	0	0	3.7	2.6
40秒	0	2	4	0	0	6.2	1.1
35秒	0	2	3	1	0	8.2	2.4
30秒	0	0	0	3	3	12.7	1.2
25秒	0	0	0	0	6	—	—

表3 サイズBでの結果

冷却時間	冷却中	成功			不発	待機時間 [秒]	
		1~5秒	6~10秒	11秒~		平均	標準偏差
50秒	6	0	0	0	0	-4.5	3.4
45秒	2	3	1	0	0	0.3	3.8
40秒	1	5	0	0	0	3.2	1.6
35秒	0	1	4	1	0	7.7	2.4
30秒	0	0	3	3	0	11.8	3.5
25秒	0	0	0	1	5	—	—

表4 サイズCでの結果

冷却時間	冷却中	成功			不発	待機時間 [秒]	
		1~5秒	6~10秒	11秒~		平均	標準偏差
30秒	6	0	0	0	0	-5.2	1.8
25秒	3	3	0	0	0	-0.7	3.2
20秒	0	6	0	0	0	3.8	1.1
15秒	0	0	3	1	2	10.3	4.1
10秒	0	0	0	0	6	—	—

表5 サイズDでの結果

冷却時間	冷却中	成功			不発	待機時間 [秒]	
		1~5秒	6~10秒	11秒~		平均	標準偏差
30秒	6	0	0	0	0	-6.5	2.0
25秒	4	2	0	0	0	-0.3	1.1
20秒	0	4	1	0	1	4.4	2.5
15秒	0	1	1	2	2	11.3	4.1
10秒	0	0	0	0	6	—	—

表6 サイズEでの結果

冷却時間	冷却中	成功			不発	待機時間 [秒]	
		1~5秒	6~10秒	11秒~		平均	標準偏差
25秒	6	0	0	0	0	-3.2	2.0
20秒	3	3	0	0	0	0.0	1.4
15秒	0	4	2	0	0	5.5	2.1
10秒	0	0	0	0	6	—	—

しかしながら、サイズFとGについてはそれが当てはまらず、破裂自体することはなかった。実際、冷却時間を5~25秒の間で変えてやってみたが、すべて不発であった。また、冷却時間を大幅に長くして180秒にしても、液体窒素の中で破裂することはなく、取り出した後もやはり破裂することはない。これは、消しゴムの厚さが薄すぎて、外側と内側で十分な温度差ができないためだと考えられる。

### 3. 考察

以上の結果を用い、成功させるために必要な冷却時間の平均や範囲を評価した。すなわち、成功する平均的な冷却時間（平均）、成功よりも冷却中の破裂の方が多くなり始める冷却時間（上側境界）、不発よりも成功の方が多くなり始める冷却時間（下側境界）である。そのために、冷却時間を適当な重みで加重平均することを考える。

計算方法は次の通りである。まず平均は、「成功」の回数で重みを付けて冷却時間を平均して求めた。それに対して上側境界は、前後の冷却時間における「冷却中」の回数の差を重みとした。例えば、表3の冷却時間45秒に対する重みは、50秒での6回と40秒での1回の差である5となる。つまり、この重みは自身を中心とした回数の変化の大きさを表しており、その重みを付けて平均することで、回数が大きく変化しているところを求めている。同様に下側境界は、前後の冷却時間における「不発」の回数の差を重みとした。なお、実際に測定した範囲よりも長い冷却時間では6回とも「冷却中」、短い冷却時間では6回とも「不発」と仮定した。

このようにしてサイズごとに計算した平均、上側境界、下側境界をまとめたものが表7である。この表と表1とを比べると、成功させるために必要な冷却時間は、消しゴムの体積や表面積とそれほど相関していないことがわかる。例えば、サイズBはAの半分の体積であるが、必要な冷却時間は同じくらいであり、Cと同じ体積であるが、必要な冷却時間は2倍くらい長い。

体積との関係をより見やすくするため、体積を横

表7 成功させるために必要な冷却時間 (単位は秒)

サイズ	A	B	C	D	E
平均	38.6	36.1	19.6	19.1	16.7
上側境界	47.5	45.0	25.0	24.2	20.0
下側境界	30.0	26.7	14.2	15.0	12.5

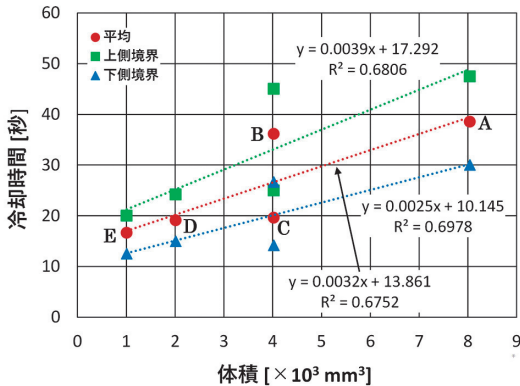


図1 冷却時間と体積の関係

軸にし、表7の冷却時間をプロットしたものが図1である。横軸の座標が同じであるサイズBとCが直線からそれぞれ上下に外れており、回帰直線の決定係数は0.68~0.70程度しかない。1本の直線に乗るのではなく、サイズA, BとサイズC, D, Eの2つのグループがあり、それぞれでほぼ一定であるかのようにも見える。このような傾向は消しゴムの表面積との関係でも同様であり、グラフの横軸を表面積にした場合は、回帰直線の決定係数は0.57~0.58程度とさらに低くなる。

そこで、表7の冷却時間がどのような量に関係するのかを考える。残念ながら、破裂に至るまでの過程は複雑であり、よくわかっていない部分もあるため、理論的にそのような量を見いだすことはできなかった。しかし様々な量で試してみた結果では、サイズを表すパラメータとして、次のような量を見ると一番良いことがわかった。

$$\chi = L_{\min} \left( \frac{V}{A} \right) \quad (1)$$

ここで、 $V$ は体積、 $A$ は表面積、 $L_{\min}$ は最短辺の長さである。そのため、 $\chi$ の単位は $\text{mm}^2$ になる。こ

のパラメータは概ね、消しゴムの中心付近における温度の下がりにくさの目安になっている。

パラメータ $\chi$ を横軸にし、表7の冷却時間をプロットした結果が図2である。なお最短辺 $L_{\min}$ は、サイズA, Bでは高さ方向(11 mm)になるが、サイズC, D, Eでは縦方向(8.5 mm)になるので注意する必要がある。この図から、3つの冷却時間がそれぞれ直線によく乗っていることが見て取れる。回帰直線の決定係数はいずれも高く、0.98程度である。また切片も小さいので、3つの冷却時間は $\chi$ にほぼ比例しているといえる。

ただし、図2の直線が原点付近までそのまま続くとは考えられない。サイズF( $\chi = 6.1 \text{ mm}^2$ )やG( $\chi = 5.7 \text{ mm}^2$ )では破裂しないので、どこかで途切れるはずである。その場所は $\chi = 6 \sim 14 \text{ mm}^2$ の範囲にあると考えられるが、それを正確に特定することは難しい。なぜならば、そのようなところでは上側境界と下側境界の差が小さく不安定であり、同じ冷却時間でも「冷却中」や「不発」が入り交じってしまい、正確な測定ができないためである。

一方、先行研究<sup>4)</sup>では、液体窒素が消しゴムに浸入することで破裂するという立場から、破裂までの冷却時間が $(1/A)^2$ に比例する可能性が指摘されている。そこでは針穴を開けた消しゴムを用い、液体窒素の中に入れたまま破裂させている。そのため今回とまったく同じ時間を測定しているわけではないが、3つの冷却時間のうちの上側境界に近いと考えられる。また、 $(1/A)^2$ は $\chi$ と形がよく似ており、同じ単位をもつ。

そこで、横軸を $(1/A)^2$ にして表7の冷却時間をプロットしてみた。その結果が図3である。このグラフでも3つの冷却時間はそれぞれ直線にある程度乗っているように見える。ただ、回帰直線の決定係数は0.91~0.92程度と $\chi$ のときよりも少し低い。単純には比較できないかもしれないが、少なくとも今回の測定結果に対しては、 $\chi$ の方がより良いパラメータだといえる。

以上のような冷却時間に加え、取り出してから破裂するまでの待機時間についても解析を行った。横軸を冷却時間として、表2~6にある待機時間の平

均をプロットしたものが図4である。

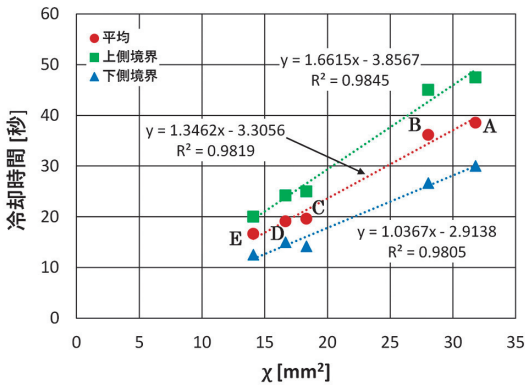


図2 冷却時間とχの関係

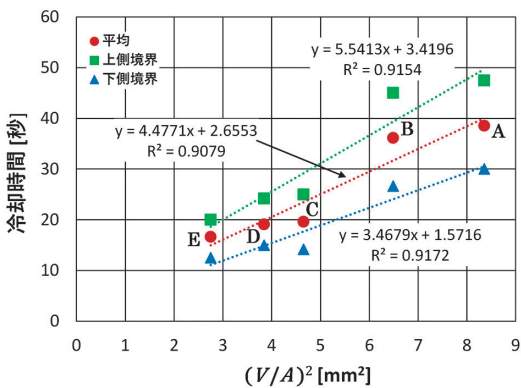


図3 冷却時間と(V/A)²の関係

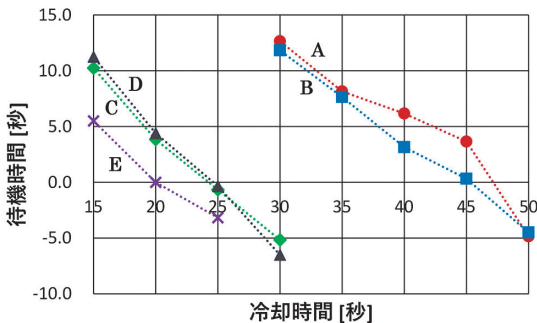


図4 待機時間と冷却時間の関係

どのサイズでもグラフは概ね直線である上、それらはほぼ平行になっている。このことを定量的に確かめるために回帰直線を計算した。その結果が表8である。確かに決定係数は高く、傾きも-0.8~-1.2であり、ほぼ-1とみなせる。

表8 冷却時間に対する待機時間の回帰直線

サイズ	A	B	C	D	E
傾き	-0.79	-0.80	-1.02	-1.16	-0.87
切片[秒]	36.8	35.7	24.9	28.3	18.1
決定係数	0.926	0.995	0.992	0.996	0.976

このように傾きが-1であるということは、冷却時間 $T_c$ と待機時間 $T_w$ の和が一定であることを意味する。

$$T_c + T_w = \text{一定} \quad (2)$$

すなわち、液体窒素に入れてから最終的に破裂するまでの時間は、途中で取り出すかどうかや取り出すまでの時間にはよらず、一定ということになる。直観的には、液体窒素に浸かっている時間が違うのに同じタイミングで破裂するというのは、意外な結果に思われるかもしれない。しかし先行研究<sup>3)</sup>でも定性的には指摘されており、本研究ではそれをより定量的に確認することができた。

ただし、そのような関係式が常に成り立つというわけではない。当然ながら、冷却時間が短すぎるとそもそも破裂しないので成立はしない。さらに、取り出した後の環境(気温や湿度、風など)によっては成立しない可能性がある。これを逆に用いれば、関係式がどれだけ成り立つかで、環境による影響を評価することができる。

#### 4. 比較

成功させるために必要な冷却時間は、消しゴムの種類によっても異なるはずである。一口に消しゴムといっても、メーカーによって製法は様々である。どのように異なるのかを確認するため、ここでは4種類の消しゴムをさらに用意して同様の測定を行った。前節までのものを消しゴム1とし、新しいものを消しゴム2(トンボ鉛筆・モノタフ EF-THS), 3(プラス・エアイン ER-060AN), 4(サクラクレパス・アーチ RAF60), 5(Amazon・ブロックイレイサー ER-01)とする。

その結果が図5である。消しゴムはすべて横に1/2もしくは1/3にカットして、消しゴム1のサイズB ( $\chi = 28.0 \text{ mm}^2$ ) と同じくらいの大きさにした。そのときの $\chi$ に対し、成功させるために必要な冷却時間の範囲を示している。ただし、用意できた個数が少なかったため、範囲は5秒単位のおおよそのものである。また、図中の点線は、図2における回帰直線を表している。

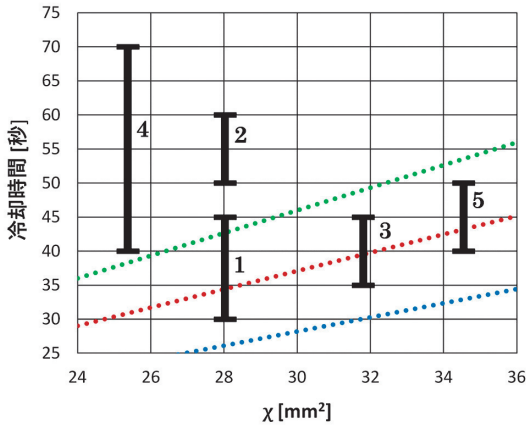


図5 種類が異なる消しゴムでの比較

この図において、消しゴム1と他の消しゴムとを比較すると、次のようなことがいえる。まず消しゴム3と5は、必要な冷却時間の範囲がやや狭いが、回帰直線には乗っている。したがって、サイズの違いを考慮すれば、これらは消しゴム1とほぼ同じといえる。それに対し、消しゴム2と4は回帰直線から上に外れてしまっている。すなわち、これらは例えば同じサイズであっても、消しゴム1よりも長い冷却時間が必要となる。

このように、消しゴム2と4において必要な冷却時間が長くなるのは、硬さが原因だと考えられる。実際、消しゴム2は消しゴム1と同じメーカーのものであるが、折れや割れに強いとされるものである。消しゴム4も指で押せば確かに硬いことがわかる。なお、どちらも勢いよく破裂して音も大きい、それも消しゴムが硬いためだと考えられる。

さらに消しゴム5には、冷却時間を長くしていったときに他とは異なる特徴があった。通常は冷却時間を長くしすぎると冷却中に破裂するようになるの

であるが、この消しゴムだけは再び不発になってしまった。例えば、冷却時間を180秒にしても冷却中に破裂することはなく、取り出した後もやはり破裂はしなかった。しかしそれでも、図5のように途中の40~50秒で取り出せば破裂するのである。このように他の消しゴムと異なるのは、詳細は不明であるものの、材質が原因である可能性が考えられる。実際、他の消しゴムは一般的な塩化ビニル樹脂製のものであるが、この消しゴムだけはTPR（熱可塑性ゴム）製のものである。

## 5. まとめ

本研究では、液体窒素で消しゴムを破裂させる実験を成功させるのに必要な冷却時間の測定を行った。いろいろなサイズの消しゴムを使って測定することで、必要な冷却時間が $\chi$ というパラメーターに比例することを実験的に見いだした。また、異なる種類の消しゴムでも測定し、必要な冷却時間を比較した。このようなデータに基づけば、実験の演示をより確実に成功させることができるようになると思われる。

しかしながら、冷却時間さえ守っていれば必ず成功するというわけではない。概ね成功するが、失敗することはどうしてもある。その要因の一つとして、取り出した後の環境による影響が考えられる。その点についてはもう少し詳しく検討し、それに対して工夫を行う必要がある。

## 引用文献

- 1) 長谷川裕也：「生活と化学」，“液体窒素の性質”，<http://sekatsu-kagaku.sub.jp/property-of-liquid-nitrogen.htm> (2024年6月3日参照)。
- 2) Saint Mary's University：「Saint Mary's Physics Demos」，“Making Erasers Explode with Liquid Nitrogen”，<https://demos.smu.ca/demos/thermo/79-exploding-erasers> (2024年6月3日参照)。
- 3) 今村賢司，岡村哲至：低温工学・超電導学会講演概要集 73 (2005) 170。
- 4) 渡邊誠，熊谷進，田口収：日本機械学会年次大会講演論文集 2007. 1 (2007) 195-196。