

液体窒素を使った演示実験の提案：ピンポン玉の空中浮揚

A proposal for demonstration experiment by liquid nitrogen: Levitation of a ping-pong ball.

伊藤昌和¹, 甲斐慶太², 桑原脩人¹, 松隈秀憲¹,
末廣 渉², 重田 出¹, 廣井政彦¹

¹鹿児島大学理工学研究科, ²鹿児島大学理学部

Masakazu ITO¹, Keita KAI², Shuto KUWAHARA¹, Hidenori MATSUGUMA¹,
Sho SUEHIRO², Iduru SHIGETA¹, Masahiko HIROI¹

¹Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University.

²Faculty of science, Kagoshima University.

Abstract: We introduce an attractive demonstration experiment, "Levitation of a ping-pong ball", by cold liquid nitrogen. Liquid nitrogen in a PET (polyethylene terephthalate) plastic bottle evaporates rapidly by being heated from the tap water around the bottle, and the nitrogen gas flows from a pipe which is attached to the bottle cap. A ping-pong ball floats above the pipe when the ball is put into the nitrogen-gas stream, due to the Bernoulli principle. We give some tips and important points for this demonstration, based on the experiences of scientific outreaches.

Keywords: Liquid nitrogen, Levitation, Floating, Ping-pong ball, Bernoulli principle

I. はじめに

“科学”に興味を持ってもらうきっかけとして、演示実験が強力な手段の一つであることに異論はないと思う。我々の研究室でも「低温」をキーワードとして、液体窒素を利用した演示実験を行う機会が多々ある。液体窒素は、 -196°C の極低温の液体であり、産業・医療の場においては広く活用されているが、一般的には“非日常的な液体”として認識されているようである。それ故、液体窒素を使用した一般向け演示実験はとても人気が高い。

2007年頃の話になるが、鹿児島大学で液体窒素を使った演示実験を行うに当たって、それまで行っていた高温超伝導体による浮き磁石（マイスナー効果）の実験、酸素の液化実験等に加え、ピンポン玉の浮揚実験を取り入れた。ペットボトルに取り付けられたパイプから窒素ガスが勢いよく吹き出し、その気流を利用してピンポン玉を浮揚させるというものがある（図1）。窒素ガスの生成は液体窒素の気化に伴う体積増加を利用しており、液体窒素を温める高温熱浴として水道水を使用する。この実験は見た目がとても派手であり、これまで多くの参加者の方々に興味を持ってもらえた。現在ではこの演目が我々の演示実験の“目

玉”の一つとなっている。

本稿では、我々が行っているピンポン玉の浮揚実験の概要を紹介するとともに、実験道具の作製方法、実験を行うにあたっての注意点、並びに物理実験教材としての教育的効果等について記していきたい。



図 1. 液体窒素を使ったピンポン玉の空中浮揚実験.

II. 実験

1. 実験道具製作

ここで使う実験道具は、安価で簡単な手製のものである。基本的な構成は、500 mL の空きペットボトル、穴をあけてパイプを通したボトルキャップ、ピンポン玉、水道水を入れるカップである。我々は使用するペットボトルとして炭酸飲料系のボトルを使用している。これは液体窒素が気化したときのボトル内の圧力増加に対応するためである。また最近のペットボトルは、適度な強度を持ちながらも肉薄であるため、中に入れた液体窒素とボトル外側の水道水が十分に熱交換（液体窒素を水で温める）してくれる。

この実験で唯一工作を行わなければならない箇所は、ボトルキャップと窒素ガス吹き出し用パイプの接続部分である。ボトルキャップにハンドドリル等で穴をあけパイプを通す。パイプの材質はなんでもかまわない。我々は、実験室にあった銅パイプの廃材を利用した。またポリプロピレン製の硬質パイプであればホームセンターで安価に手に入り、切断も簡単であろう。パイプとボトルキャップの接続は弾性型接着剤を用い、図 2 のように接着する。完全硬化型の接着剤では低温の窒素ガスがパイプを通り抜けたとき、熱収縮に耐えられずひび割れることが多い。このためパイプとボトルキャップの接続の強度が弱くなるばか

りでなく、パイプの外面とボトルキャップの間の気密性も失われてしまう。

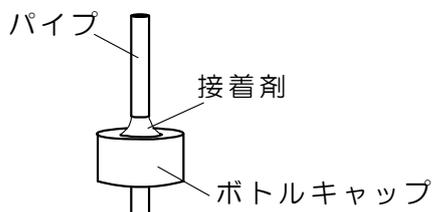


図2. ボトルキャップとパイプの接続.

ボトルキャップ下側に位置するパイプはあまり長くしないように注意する。パイプの下端が液体窒素の液面に触れると、パイプ上端から液体窒素が吹き出してしまい、危険である。キャップにしっかり固定できれば十分である。パイプの内径は、吹き出す窒素ガスの流速および流量に関わってくる。内径が小さいと、流速は速くなるものの、ガスの流量が少なく、ピンポン玉を吹き上げるような気流が得られない。またペットボトル内の圧力が上がりすぎて危険でもある。一方内径が大きすぎると、ピンポン玉を吹き上げるだけの流速が得られない。したがって、適度な内径を持つパイプを接続することが重要である。経験的ではあるが、室温の水道水と液体窒素が熱接触したとき、窒素ガスがピンポン玉を吹き上げるのに十分な流速、流量を持つためには、パイプの内径を $\Phi 3 \sim \Phi 4$ mm 程度にするのが良いようである。

2. 実験・手順

実験手順は以下に示すようにいたって簡単である。

- ① 図3(a)に示すように、ペットボトルに液体窒素を少量入れる。プラスチック製の漏斗を利用すると液体窒素を比較的簡単にに入れることができる。
- ② パイプを通したボトルキャップを閉める。この時、液体窒素の液面が、キャップに取り付けられたパイプの下端よりも充分下側であることをよく確認する。上でも述べたがパイプの下端が液体窒素の液面に触れてしまうと、液体窒素が噴水のようにパイプ上端から吹き出して、大変危険である。
- ③ 水道水の入ったカップ（水道水を入れるカップは広口のカップラーメンの空きカップが便利である）に、液体窒素の入ったペットボトルをゆっくりつける。温度が -196°C の液体窒素にとっては、室温程度（ $\sim 20^{\circ}\text{C}$ ）の水道水も高い温度の熱浴となる。ペットボトルを介して周りの水道水と液体窒素が熱交換することで、液体窒素は一気に沸騰する。窒素が液体から気体に変化（相転移）すると、体積が約700倍に膨れ上がり、窒素ガスはキャップを貫くパイプから勢いよく吹き出ることになる。
- ④ パイプから吹き出る窒素ガスにうまくピンポン玉を乗せてやると、上下左右にふらつきながらも落ちることなく浮揚し始める（図3(b)）。

手順①で入れた液体窒素の量にもよるが、大体 30 秒程度ピンポン玉の浮揚は続く。液体窒素がすべて蒸発したころには、水道水に浸かっていたペットボトルの周りには氷が張り付いている。これは液体窒素と水道水が熱交換をしたためであるが、この氷を実験参加者の目の前で割って見せて、“液体窒素があまりにも冷たい液体なので、あっという間にまわりの水が凍ってしまった。”と液体窒素が極低温の液体であることをアピールするのもよい。

以上のように本実験は、液体窒素がガスになる過程の体積膨張を利用した簡単なものである。ただし本実験をおこなうに当たっては、液体窒素のような「寒剤」に関する知識を備えていないと大変危険な状況にも陥りかねない。具体的な注意点については後述する。

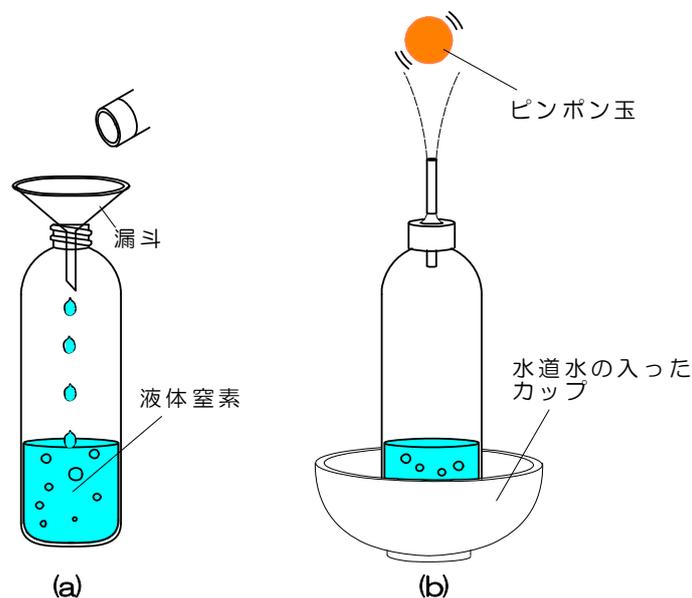


図 3. 実験手順.

(a) 液体窒素の導入. (b) ピンポン玉の浮揚.

Ⅲ. 原理 (ピンポン玉が落ちずに浮揚?)

ピンポン玉が浮揚し続ける理由について簡単に説明したい。この現象は流体力学の言葉でいう「ベルヌーイの定理」で説明される。ベルヌーイの定理は、流体のエネルギー保存則から導かれる定理である。低速で流れる気体についてこの定理を当てはめると、気体の単位体積あたりの全エネルギーは、気体の流速 v 、気体の密度 ρ 、及び気体の圧力 p を用いて、

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p = (\text{一定}) \cdots \cdots (1)$$

のように表すことができる。式中の $\frac{1}{2}\rho v^2$ の項は (単位体積あたりの) 気体の運動エネルギー

ギーである。図 4 (a)のように、うまく気流に乗っていたピンポン玉が気流から外れそうになった場合を考えてみよう。図 4 (b)のピンポン玉では右側よりも左側の方が気体の流れ (v) が速い。したがって気体の運動エネルギー ($\frac{1}{2}\rho v^2$) も左側の方が大きい。式 (1) によれば、ピンポン玉の左側と右側で全エネルギーが等しくなければならないので、圧力 p は右側の方が左側よりも高くなり、圧力差が生まれる。この圧力差は、ピンポン玉を窒素ガスの気流の中へと引き戻す復元力としてはたらく。気流の中心に戻されたピンポン玉はより高く吹き上げられるが、中心からズレ始めると、(吹き上げられる高さは下がるものの) 再びベルヌーイの定理がはたらき、結果的にピンポン玉は上下左右へと不規則に振動しながらも、空中にとどまることになる。

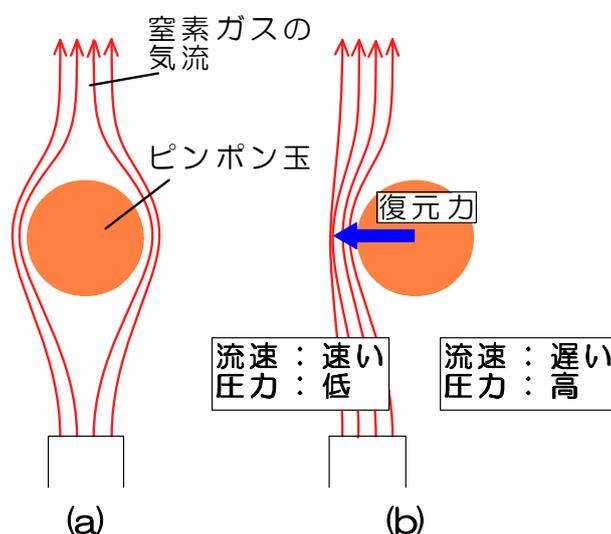


図 4. ベルヌーイの定理.

(a) ピンポン玉が気流の中心にあるとき. (b) ピンポン玉が気流の中心からはずれたとき.

本実験は窒素ガスを気流源としてベルヌーイの定理を利用した実験であるが、ドライヤーや落ち葉を吹き飛ばすのに使用されるリーフブロワー等を気流源として使った実験もある。またストローを吹くことによってピンポン玉を浮かせるおもちゃを連想される方もおられると思う。最近では、ベルヌーイの定理を利用した様々な科学実験をインターネット動画サイト等で見ることができるので、演示実験を行う立場としては大変参考になっている。

IV. 実験を行うにあたっての注意点

本実験を行うにあたっての注意すべきことは、液体窒素を取り扱う際の注意点と基本的には同じである^{1,2)}。以下に特に重要だと思われる事項について触れる。

① 凍傷に注意する。

上述のように、液体窒素は -196°C の極低温の液体であるので、その取扱いには十分注意する。液体窒素を扱うときは、市販の液体窒素用皮手袋を使用する。本実験では極低温の気流が吹き付けるため、気流への素肌の暴露にも気を付けないといけない。万一液体窒素を体に被ったときは、水道水や温めのお湯で温め、医師の診断を受ける。

② 酸欠・窒息に注意する。

よく知られているように主に空気は約 80%の窒素と約 20%の酸素から成り立っている。この実験を閉めきった部屋で行うと、酸素濃度が急激に下がる危険性がある。酸素濃度が 18%を下回ると人体に影響が現れ、さらに低濃度では生命に危険が及ぶ状態となる。実験は、屋外または換気の行き届いた部屋で行わなければならない。

③ 爆発に注意する。

液体窒素が入っている容器を密閉してはならない。断熱性が良い容器であっても最終的には液体窒素は気化する。気化した窒素の体積は液体時に比べ約 700 倍に増える。したがって容器を密閉した状態にしておくと内部圧力の上昇により爆発をおこす危険性がある。本実験では、ペットボトルに液体窒素を入れる過程があるが、ガスの逃げ口のないボトルキャップを決して閉めてはならない。また吹き出し口のついているキャップをはめる際も、パイプの内側が氷で塞がれている場合があるので、気流の通り道が確保されているか、必ずその都度確認する。また繰り返し実験を行っているペットボトルでは、温度サイクルにより強度が脆弱になっている可能性もある。ペットボトルにキズ等の不具合を発見した場合は、使用を中止する。

以上の注意事項は、参加者の不用意な行動に対しても対応できるよう常に気を配っておく必要がある。

V. 本実験による教育的効果

本実験は低温物理の演示実験の一環として行っている。しかしこの中には上記したようにベルヌーイの定理の可視化といった、流体力学の基本的な事柄も含まれている。参加者にこの実験の原理・理由を丁寧に説明することで、以下に示す事項に対して教育的効果があると思われる。

① 液体窒素が (-196°C) 極低温の液体であることに対する認識を深める。

液体窒素にとっては、室温の水道水でも灼熱の液体であり、触れた瞬間に沸騰することから認識できる。また実験後ペットボトルの周りの水が短時間のうちに凍り付いていることから認識できる。

② 液体窒素が気化すると体積が (約 700 倍に) 増加することに対する認識を深める。

液体窒素を水道水につけた瞬間、パイプから激しく吹き出る窒素ガスにより認識できる。

③ ベルヌーイの定理に対する認識を深める。

吹き出す窒素ガスに乗ったピンポン玉が、しばらく空中に浮揚している様子から認識できる。ペットボトルを少し傾け、気流を斜め方向に吹き出してもピンポン玉が浮いた状態であることを確認させてもよい。

演示実験に参加する初等学校の児童にとっては、上記の事項をすべて認識することは不可能かもしれない。しかしこれまでこの実験を提供してきた経験から考えてみると、実は“見ていて楽しい、面白い”という強烈な印象が一番の教育的効果のような気がする。

VI. 終わりに

我々がかねてより、低温実験の一環として行っている液体窒素を使ったピンポン玉の空中浮揚実験について説明してきた。本実験は主としてオープンキャンパスや出張授業において中高生を対象に演示を行っているが、最近では、鹿児島大学理学部で行われている「コア・サイエンス・ティーチャー (CST) 養成スクール」や「教員免許更新講習」の場で初・中・高等教育に携わる現任教諭の先生方に対しても披露している。ピンポン玉が浮き上がる時、実験参加者から“おー!!”という歓声が少なからず上がる。この瞬間があるから演示実験はやめられない。

謝辞

出張講義では、当該校の担当教諭の先生方に大変お世話になりました。またオープンキャンパスや CST 養成スクール、教員免許更新講習会などで演示実験を披露する際には、鹿児島大学理工学研究科の関係教員及び大学院生、鹿児島大学理学部物理科学科の学部学生みなさんに大変お世話になりました。ここに感謝いたします。

補記

本稿は、既発表論文（鹿児島大学理学部紀要 Vol. 48: 1-5）が査読を経て、加筆・修正後に新たに掲載されるものである。

参考文献

- 1) 安全の手引, 鹿児島大学理学部.
- 2) 鹿児島大学理学部では教職員により組織された低温委員会が主催する低温講習会が毎年行われている。