

市販の空気入れを用いた広報用真空科学おもちゃの製作

○小笠原舜斗^{A)}、西脇 みちる^{A)}、平木 雅彦^{B)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設、^{B)}高エネルギー加速器研究施設 機械工学センター

1.はじめに

KEK では、広報・アウトリーチ活動の一環として、イベント「ニコニコ超会議」^[1]へ 2023 年から 3 年連続でブース出展^[2]している。2025 年は、「真空チャレンジ」と題したオリジナルの科学おもちゃを出展した。これは、加速器の要素の一つである「真空」を体験者に体感してもらうことを趣旨とした企画で、市販の空気入れを改造した手動真空ポンプを使って体験者に真空容器を排気してもらうというものである。ゲーム性を高めるため、体験者が真空容器の排気を始めると同時に油回転ポンプで別の真空容器を排気し、体験者と油回転ポンプで制限時間内の到達圧力を競う形式とした。このとき、制限時間の設定や油回転ポンプ側へのハンディキャップの付与で難易度を調整することで、体験型のゲームとして成立するように工夫した。

2.全体構成および体験の流れ

図 1 に、今回製作した装置全体の概要を示す。

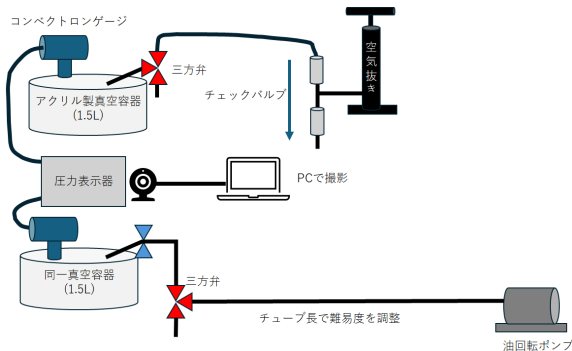


図 1 「真空チャレンジ」システム概要

体験装置は、手動真空ポンプ、2 つの真空計付き真空容器、2ch 真空計コントローラ、油回転ポンプ (ULVAC G-25SA、実効排気速度 20L/min)、web カメラと PC で構成される。体験者は手動ポンプを使い、制限時間 10 秒間で真空容器のうち一つを排気する。開始の合図と同時に、油回転ポンプでもう一つの真空容器も排気する。10 秒経過後、2 つの真空容器の圧力を比較し、体験者側の真空度が油回転ポンプよりも高ければ(到達圧力が低ければ)「勝利」として、到達圧力を記録した認定証を贈る。

3.手動真空ポンプの製作

改造のベースとした空気入れ(Captain Stag Y-7881)は、シリンダの直径が約 30 mm、長さが約 300 mm で、容積はおよそ 200 ml である。シリンダ内のピストンに収まっている O リングは、わずかに上下に動くことができるように設計されている。ピストンの動きに合わせて O リングが上下に動くことで、ピストンに設けられたスリットが閉鎖または開放され、ピストンの気密が一方のみ保たれる仕組みであった。また、シリンダの底にもボールを用いた逆止弁構造が設けられていた。

改造では、まず後述のようにピストン形状を変更し、吸気・排気のいずれの場合でも常に気密が保たれるようにした。次に本体から伸びるチューブ(直径 8 mm)を切断し、適合するワンタッチ式のティー分岐とチェックバルブ (CVPU8-8、最低作動圧 1×10^4 Pa) 2 つを取り付けた。チェックバルブにより、真空容器から吸気して大気へ排気する一方の排気経路を構成することで手動真空ポンプとした。

ピストンは、スリットが無く O リングも固定されるような形状のものを 3D プリンタで製作し、オリジナルのピストンと交換した。図 2 に試作した改造ピストンを示す。ピストンは光造形式 3D プリンタ製、FFF 式 3D プリンタ製(PLA 樹脂)、旋盤加工(アルミ合金)の 3 種類製作した。このうち光造形で製作したものは、ピストンをロッドに固定するためのネジ穴周辺の強度が弱く、数回の試行で破損してしまった。他の二つは強度に問題はなかったものの、重量が異なるために実際に装着したときのハンドルの手応えが大きく異なった。最終的には FFF 式 3D プリンタ製のピストンを採用している。

シリンダ底部と空気入れの土台は接着されているため、当初は底部の逆止弁を非破壊で分解することは困難と思われた。調査したところ、逆止弁を構成する部品にねじが切られており、シリンダ底部のねじ山に勘合して固定される構造であることが分かった。そこで、シリンダよりも長いアルミ丸棒の先端をマイナスドライバーのような形状に加工して即席のドライバーとし、ねじを回して取り外すことで、シリンダを破壊することなく逆止弁を撤去できた。



図2 試作したピストン(左)と元のピストン(右)

大きなリークが無い場合、最終的な到達可能圧力はチェックバルブの最低作動圧力で制限されることとなる。真空容器とシリンダとの圧力差がチェックバルブの最低作動圧力を下回ると、ピストンを引き上げてもチェックバルブが開かず吸気できなくなるためである。今回の場合はリークを最小限に抑えたとしても、 10^4 Paがこの真空ポンプの到達圧力の限界となる。

なお、ピストンは常に大気から押され、その力は真空容器を減圧するたびに増大していくため、体験者は排気すればするほどハンドルを重く感じるようになる。真空容器圧力が 1×10^4 Pa のとき、ピストンを引き上げるために必要な力は約 63 N である。

図3に、完成した手動真空ポンプの写真を示す。

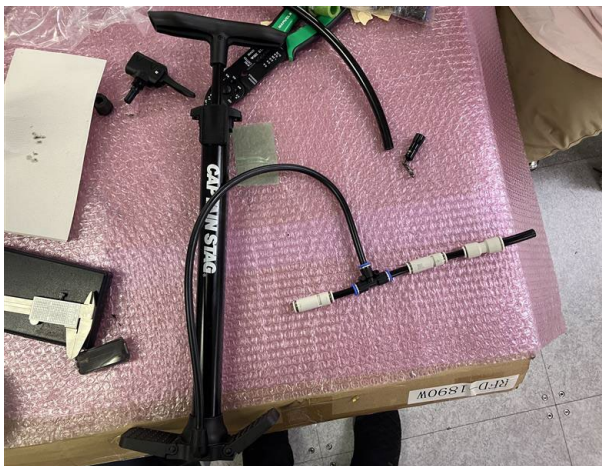


図3 製作した手動真空ポンプ

4. 真空容器の製作

排気する真空容器は、市販の科学実験用アクリル容器(アズワン VCP-15L、容量 1.5 L)をベースに製作した。図4に、製作した真空容器の写真を示す。

当該製品の蓋には、ブルドン管真空計と専用のハ

ンドポンプが付属している。ブルドン管真空計はコンパクトロンゲージ(MKS Granville Phillips 275)に置き換えた。ゲージは KF25 フランジで固定されるため、これと適合するアタッチメントを旋盤加工で内製し、真空容器へ取り付けした。コンパクトロンゲージの測定結果は、対応する 2ch コントローラ(Granville-Phillips 358 Micro-Ion Vacuum Gauge Controller)で表示する。

ハンドポンプの取付口はアクリルにねじが切られているので、これを利用してワンタッチ継手のアタッチメントを取り付けた。このワンタッチ継手の先に、エアチューブを介して真空ポンプを接続することになる。真空容器内には適当な個包装の菓子や風船を入れ、容器内の減圧の様子が視覚的にわかるようにした。これらの改造を施した容器を図4に示す。



図4 改造した真空容器とコントローラ

真空容器は2セット製作し、それぞれ手動真空ポンプまたは油回転ポンプにチューブで接続する。図1に示すように、それぞれのチューブの途中には手動の三方弁を設け、大気を導入できるようにしておく。油回転ポンプに繋ぐチューブには、三方弁の他に通常の手動弁も挿入する。

5. 難易度調整

体験時間がわずかに 10 秒なので、時間内の到達圧力はポンプと真空容器の間のチューブ長に影響を受ける。これを利用して、チューブ長の設定を通じて 10 秒間での到達圧力(ひいては手動ポンプで油回転ポンプに勝つ難易度)を制御することとした。難易度設計にあたっては、筆者(運動習慣のない 20 代後半男性)を平均的な体験者像に近いものと想定し、「基本的にギリギリ勝てないが、5~10 回に 1 回は勝てる」程度の難易度を目標とした。なお、体験時間の 10 秒は体力的に無理のない時間として設定した。

手動ポンプ側のチューブ長は、実験により 4 m に決定した。これは、前述の通り手動真空ポンプの到達可能圧力が原理的に 1×10^4 Pa 程度であることから、

到達圧力がそれより少し高い値(2.3×10^4 Pa 前後)になるように調整した結果である。ポンプの取り回しの観点でも、十分な長さを確保することができる。

次に油回転ポンプ側のチューブ長を決定するため、同じくチューブ長ごとの 10 秒間の到達圧力を実験した。図 5 に実験結果を示す。図 5 上段(赤)のプロットが実際に使用した小型ポンプ、下段(青)のプロットは予備として用意した別のポンプ(ULVAC GVD-050A)の結果である。この結果より、油回転ポンプの到達圧力が手動ポンプの到達圧力を少し下回る(2.1×10^4 Pa 前後)長さとして、小型ポンプに対しては 10m、予備ポンプに対しては 15m の長さのチューブを採用することとした。

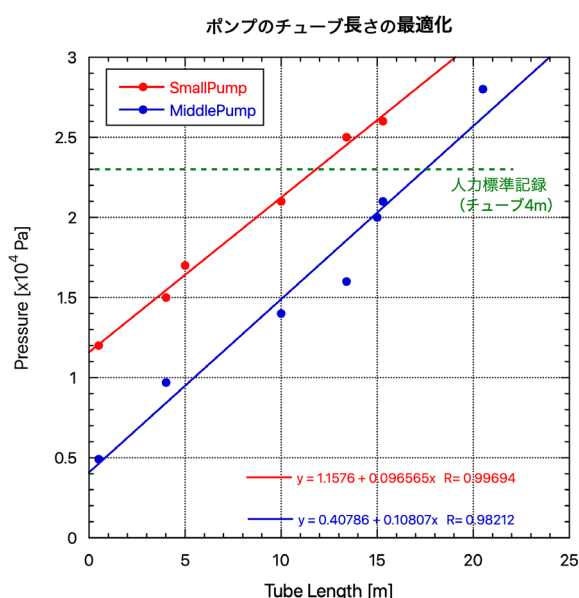


図 5 チューブ長と 10 秒間の到達圧力

6. ソフトウェアおよび勝敗判定

本企画の進行を補助するため、図 6 に示すようなソフトウェアを作成した。本ソフトウェアは以下の機能を有する。

1. 3 カウントの後、スタートの合図を合成音声で行う。
2. スタート合図の後、10 秒のカウントダウンを合成音声で行う。
3. 10 秒経過後、終了の合図とともに web カメラの画像を 0.1 秒間隔で 10 枚撮影する。
4. 撮影した任意の画像を表示する
5. 勝者数・挑戦者数を記録し、勝率を計算する



図 6 開発したソフトウェアの画面

コンパクトロンゲージでは、真空容器内の空気が静止した状態でなければ正確な圧力が表示されない。そのため、終了の合図でポンプを停止したとしても、正確な値が表示されるまで少し待たねばならない。そこで、PC に接続した web カメラでコントローラの圧力表示を常に撮影しておき、終了の合図と同時に圧力表示器の写真を複数撮影し、撮影された写真の中で最も良い値を記録として採用する運用とした。

出展するイベントの性格を考慮し、GUI デザインはニコニコ動画のゲーム実況分野で馴染みのある画面配置を模したものとした。また、合成音声もニコニコ動画で馴染みのあるもの(所謂ゆっくりボイス)を利用した。ソフトウェア自体の開発は Python3.12 で、GUI の構築は PyQt6 で行っている。

7. 当日の運用方法

当日の運営はスタッフ 2 名(説明係、バルブ係)で行うこととした。以下に体験の流れを説明する。

1. 説明係が体験者へ注意事項を説明する。
このとき、「終了の合図で動作を止めること」をしっかりと説明する。
2. バルブ係が両方の真空容器が大気圧であること、両方の三方弁が大気開放されていないこと、油回転ポンプ側のバルブが閉鎖状態であること、油回転ポンプが起動していることを確認する。
3. バルブ係が油回転ポンプのバルブに手を添え、説明係が PC のスタートボタンを押す。
4. 自動音声で 3 カウントの後、ゴングの効果音が流れる。ゴングと同時にバルブ係が油回転ポンプ側のバルブを開け、排気経路を開通させて排気を開始する。体験者も手動ポンプでの排気を開始する。
5. 10 秒の後、「終了」の合図が自動音声で流れると同時に、バルブ係がバルブを閉める。

6. 撮影された全ての写真を確認して、手動ポンプ・油回転ポンプそれぞれの最も小さい値を記録として採用する。
7. 認定証に到達圧力を記載して、体験者へ贈る。手動ポンプの圧力が油回転ポンプを下回っていれば、認定証にスタンプを押印する。バルブ係は記録確認後、両方の容器を大気開放してソフトウェアをリセットする。

8. 結果と反省

本企画はニコニコ超会議 2025 の会期二日間(15 時間)にわたって、KEK ブースにて実施された。二日間の体験者は合計 182 名、そのうち「勝者」は 38 名で、勝率は 20.1%であった。以下に、当日の主なトラブルや反省点を述べる。

当日は、手動真空ポンプの踏み板部分が次々に壊れてしまった。踏み板はゴム製のかんぬき状の構造でシリンダに固定されていたが、断続的に大きな力が繰り返しかかったことでゴム部分が断裂してしまった。予備を含め 4 台の手動ポンプを用意していたが、二日間で全て壊れる結果となった。この部分はオリジナル製品から無改造だったが、予め補強しておくべきであった。

二日目の途中で油回転ポンプも故障してしまった。布をかけた荷物に近接してポンプを置いていたため、ポンプが布を巻き込んでしまったことが原因である。予備の中型ポンプは持ち込んでいたものの、会期が残り数時間であること、予備ポンプが倉庫の奥にあり取り出しが困難だったことから、予備ポンプは使用しなかった。ポンプ故障後はその日の体験者の最高記録を掲示し、体験者単独でこの記録に挑む方式に変更した。

また、会期後半になるほど平均的な到達圧力が意図せず高くなっていた。大気開放と減圧を繰り返した結果、真空計の校正がずれたためと思われる。コンベクトロンゲージの測定原理上、周辺温度の変化も影響した可能性がある。いずれにせよ、会期中は校正を全く行っていなかったが、定期的な再校正が必要であった。

当日は油回転ポンプを常時稼働させ、バルブ係の操作で排気を制御する運用としていた。そのため、バルブ係が操作タイミングをわずかにずらす事で、油回転ポンプ側の記録を $\pm 0.1 \times 10^4 \text{ Pa}$ 程度の範囲で操作することが可能であった。当日この点が問題になることはなく、結果的に盛り上がりにも貢献できたものの公平性には欠けた。

本企画の体験者からは、「結局この数字(圧力)に何

の意味があるのか、すごいのかどうか分からない」という声があった。これに対しては標高と圧力の関係を示した図を用意し、「あなたは 10 秒間でエベレストに匹敵する圧力に到達したんですよ」等と説明し、更に加速器における真空度(10^{-8} Pa)が桁違いであることを説明した。

イベントの性質上、個性豊かなコスプレをした体験者も多く見受けられた。これらの体験者にとっては、適度に体を張った企画であることでユニークな写真を撮影して楽しんでいただくこともできたと考えている。

出展スタッフに向けては、4 ページにわたるスタッフマニュアルを作成したが、これはほとんど活用されなかった。代わりに養生テープにバルブの操作順を簡単に書いて貼り出したところ、こちらは分かりやすいと好評であった。

9. まとめ

ニコニコ超会議 2025 において、「真空チャレンジ」と題した科学おもちゃを製作・出展した。二日間で 182 名に体験していただき、好評をいただいた。ゲーム性と難易度設定を追求したことで、エンターテインメントイベントであるニコニコ超会議に馴染んだ形で広報活動に貢献できた。本企画で製作したシステムは、他のイベントでも流用可能なので、今後も活用していきたいと考えている。

謝辞

本企画の実施に当たって、KEK 物質構造科学研究所 大島寛子氏には、本企画のイメージキャラクター「バッキー」のデザインをはじめ、掲示物製作等で多大なご尽力を賜りました。KEK 機械工学センターの皆様には、部品製作やテストプレイで多大な貢献や助言を頂きました。他にも KEK 広報室 青木優美氏、物質構造科学研究所 成田千春氏をはじめ、たくさんの皆様からテストプレイや助言でご協力を頂きました。この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- [1] <https://chokaigi.jp/2025/>.
- [2] <https://www2.kek.jp/outreach/chokaigi/2025/>