

IIII 航空機を用いた学生無重力実験コンテスト IIIII
(原著論文)

物理学教育で使用できる無重力下ループ・ゴールドバーグマシンの作製

窪田 美紀^{1,2}・岡本 優輝³・柿本 嵩人³
柳瀬 綾花³・吉永 恭平³

Rube Goldberg Machines under Zero-Gravity that can be used in Physics Education

Miki KUBOTA¹, Yuki OKAMOTO², Takahito KAKIMOTO²,
Ayaka YANASE² and Kyohei YOSHINAGA²

Abstract

There are still many students who are not familiar with science, especially physics. It might be because physics mostly use symbols and numbers, and is not easy to apply the knowledge into everyday lives. Also, the difficulty to observe the phenomenon itself can lead to aversion. Feeling that physics is difficult to understand can lead to discouragement, and therefore makes it more difficult to correct the misconceptions developed in daily lives, and this might take part in the vicious circle.

In order to overcome this problem, we have developed a Rube Goldberg machine that shows several phenomena in physics. By linking several experiments together, we assume that it will attract students' interests, as well as be useful in physics class. Our goal is to record this machine under zero-gravity, and actually use it in physics class after the experiment, and test its effectiveness.

Keyword(s): Physics education, Rube Goldberg machine, Science education

1. はじめに

教育において、より良い教材・教育法を模索することはいつの時代も重要なことであり、今後も絶えることなく続いていくものだと考える。小学校理科教育において「実感を伴った理解」が重視され、中学校理科でも実験や観察が推奨されつつある現在、児童・生徒が自ら興味を持って積極的に学ぶことは非常に重要である。かつて「理科離れ」が叫ばれたが、未だに理科に苦手意識を抱く生徒は少なくない。特に物理学は現象を数式や文字で表すことが多いため誤概念を生みやすい教科であると言える。生徒が内容を理解できないことからさらに物理学に対して苦手意識を持つ、という悪循環に陥る可能性もある。このような状況を緩和するためには、現象自体を目の前で観察しながら、理論的な数式や公式に当てはめるという方法を取ることが考えられる。

本実験テーマでは、物理学の中でも力学に着目し、基

本的な現象を無重力下で行い、その現象をビデオクリップ教材として記録することを目的とする。無重力下で実験を行うことにより、物理学現象についてより深く考え、理解することが可能になると期待できる。また、複数の実験を連動させ、ループ・ゴールドバーグマシンとして一つの装置に組み込むことにより、視覚的に生徒たちの興味を引き出すことができると考えた。実験で取得したビデオは、編集し、物理学の授業において使用できるようにした。また、ビデオクリップ教材を用いて高等学校の生徒に実践を行った。

2. 装置説明

2.1 ループ・ゴールドバーグマシンとは

ループ・ゴールドバーグマシンとは、アメリカ合衆国の Rube Goldberg が発案した表現手法である。一つの目的を達成するために、いくつかの装置を組み合わせ、本

1 東京学芸大学大学院教育学研究科 〒184-0015 東京都小金井市貫井北町 4-1-1

Graduate School of Education, Tokyo Gakugei University, 4-1-1, Nukuikita-machi Koganeishi, 184-0015 Tokyo, Japan

2 東京学芸大学教育学部 〒184-0015 東京都小金井市貫井北町 4-1-1

Department of Science Education, Tokyo Gakugei University, 4-1-1, Nukuikita-machi Koganeishi, 184-0015 Tokyo, Japan
(E-mail: mik.schoir@gmail.com)

来ならば必要のない工程を連続させるからくり装置のことを指し、一般的にはNHKの「ピタゴラスイッチ」などでよく知られている。

2.2 素材の選定

装置を作製するにあたって、実感を伴った理解と視覚的理解を促せる実験を選んだ。それらは、振り子の運動、質量と加速度の関係、等速直線運動を観察する実験の3つである。

振り子の運動実験をセクション A、質量と加速度の関係の実験をセクション B、等速直線運動の実験をセクション Cとした。

以下に各セクションの基本原則と μg 下での挙動の予想を示す。

2.2.1 セクション A の原理と予想

地上で振り子は、重りが振り出されるとき位置エネルギーを持つ。おもりは重力によって引っ張られ、加速し、運動エネルギーが増加する。この運動エネルギーは最下点で最大となる。また、振り出したときと反対の方向に振れるとき、位置エネルギーが増加し、やがて停止する。その後これらの運動を繰り返す。これが振り子の基本原則である。

一方で、運動している振り子が μg の状態になると、重力加速度を無視できるため、おもりに働く力は振り子の中心方向の力だけである。振り子の中心方向の力によってその方向の加速度が生じる。おもりの速度はその加速度に対して常に接線方向である。これらは円運動を引き起こす関係であるので、円運動が観察できると予想される。

2.2.2 セクション B の原理と予想

物体の加速度の大きさは $a=F/m$ (a :加速度, F :物体に加わる合力, m :物体の質量) で表される。

この式より、加速度の大きさは質量の大きさに依存することになる。そのため、 μg 下で同時に同じ力を物体に加えたとき、質量の小さな物体の加速度は大きくなり、質量の大きな物体の加速度は小さくなるので、質量の小さい物体から順に動き出すと予想される。

2.2.3 セクション C の原理と予想

運動の第一法則より、外部から力を受けないか、あるいは外部から受ける力がつりあっている場合には、静止している物体はいつまでも静止をし続け、運動している物体は等速直線運動をし続ける¹⁾。しかし、地上でそれらを観察する実験を行うことは難しい。そこで、 μg 下で、等速直線運動を観察できる装置を作製した。

2.2.4 レゴブロック®の使用について

装置を作製するにあたって、限られた実験スペース内で装置を展開することや様々な方向に動かす必要があった。そこで、レゴブロック®の積み上げることによって高さを変えられる点や複数の部品を組み合わせることで自

由度の高い動きを実現できる点に注目し、装置全体を主にレゴブロックで作製することにした。加えて、児童・生徒の興味を引くことができる点も選定した理由である。

2.3 3つのセクション

2.3.1 セクション A の装置概要

セクション A は、 $1g$, $2g$, μg での様子を観察するセクションである。また、一番奥の振り子には天井からゴムをつなげ、 μg でセクション B につながるリボンを取り巻くようにセットした。実験時は、 $1g$ の段階で振り子を振り始めた。

2.3.2 セクション B の装置概要

セクション B は、4つの腕の挙動から、質量と加速度の関係を観察するセクションである。質量が異なる4つの分銅を用意し、質量がだんだん大きくなるように配置した。4つの腕には等しい大きさのゴムの弾性力を与えてあり、腕が動き出さないようにレバーを用いて固定している。レバーが外されると、腕はゴムの弾性力によって同時に動き出し、鉄琴にぶつかることで音が出る。

これらの運動を示した概略図を下に示す。(Fig.1)

また、4つのうち1つの腕は次の装置につながる鉄球を打ち出す役割をしている。この鉄球がセクション C の運動へとつながる。

2.3.3 セクション C の装置概要

セクション C は、2つの鉄球を同時に発射し、それぞれのレール上での等速直線運動を観察するセクションである。

長さが等しい2つのレールが、一つは上り坂、もう一方は下り坂になるように設置されている。各々のレール上を質量・大きさの等しい鉄球が移動する。また、レールの最後の部分には磁石があり、磁石に鉄球が接触することでボタン電池とモーター、LED からなる回路が完成する。上り坂のレールではボタン電池とモーターの回路が完成し、地球儀が回る。下り坂のレールでは LED を含む回路が完成し、LED が点灯する仕組みになっている。

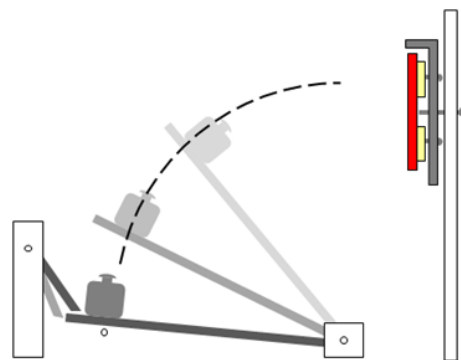


Fig. 1 Schematic diagram of Rube Goldberg machine Section B

2.4 記録方法

映像教材の製作が最終目的であるため多くのカメラを設置した。実験全体の様子を撮影する俯瞰カメラを装置真上の天井に1台、装置の細部の様子を撮影するカメラを4台設置した。照明には装置ラックの天井にApture社のアマランLEDライトAL160を2台取り付け付けた。

以下は細部カメラの配置場所である。

3. 結果

3.1 セクション A

2g の間に振り始めていた振り子は、 μg に突入するとほぼ等速で回転する様子が観察できた。また、一番奥の振り子はゴムの復元力の影響を受け、回転し、次のセクションへつながる様子も観察できた。

3.2 セクション B

前のセクションと連動し、おもりのついた腕を押さえるレバーが外れ、ゴムの弾性力によっておもりの付いた腕が同時に弾かれた。運動方程式 $F=ma$ に従い、質量の小さいおもりの付いた腕の加速度の方が大きくなるので質量の小さなものから順に鉄琴をたたく様子を観察することが出来た。

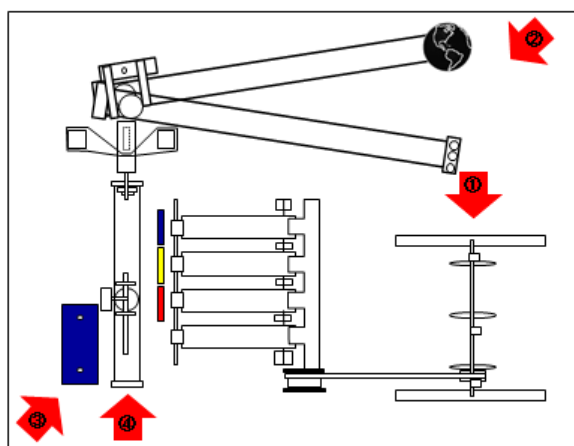


Fig. 2 Camera settings
 No.1 Section A recording
 No.2 Section B recording
 No.3 Section C recording
 No.4 Recording of the Section B/C connection point

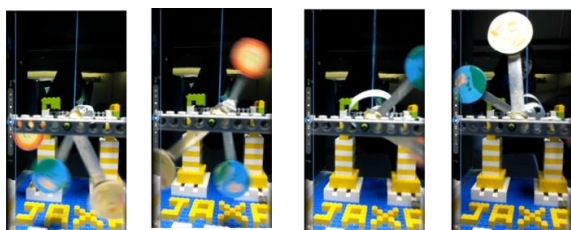


Fig. 3 Section A movement

3.3 セクション C

μg において、各レールの鉄球を当初の予定通り同時に発射させることはできなかった。しかし鉄球が等速直線運動し、回路を完成させ、LED・モーター共に作動する様子が観察できた。

3.4 装置全体を通して

振り子から始まり、質量と加速度の違いを認識できる教材、等速直線運動の教材と全てのセクションが連鎖して動き、ループ・ゴールドバーグマシンとしての挙動を観察することができた。本実験で得られた動画は、動画編集ソフトを用いて編集を行った。



Fig. 4 Section B movement

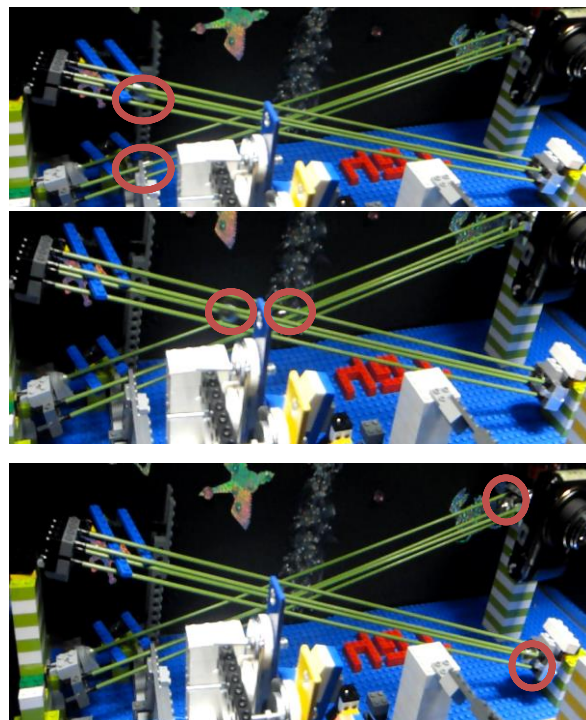


Fig. 5 Section C movement

4. 授業実践

2014年1月23日に東京学芸大学附属高等学校で、同年2月27日に東京都立国立高校で実践を行った。どちらの実践においても実際の装置を持ち込み、生徒に装置を触れさせた。

4.1 東京学芸大学附属高等学校

4.1.1 実践のねらい

私たちの作製した装置、映像が生徒の物理への興味・関心を惹くことができるかを検証するためのデータを得ることを目的とした。

4.1.2 調査対象と調査方法

実践は2014年1月23日に東京学芸大学附属高等学校において行った。昼休みと放課後に行われる In-Café という形式で実践を行い、アンケート調査で無重力コンテスト、実験装置についての感想・意見等を自由記述形式で調査した。アンケート結果を考察し装置と映像が生徒の興味・関心を惹き、物理学の授業に有効であるか検討した。参加者は附属生1~2年生有志であり、昼休み12名、放課後6名であった。なお、昼休み、放課後両方に参加した者もいる。

4.1.3 内容

昼に行った実践では、プレゼンテーション形式で無重力コンテスト・装置について説明を行い、作製した映像を見せ、アンケート調査を行った。

放課後に行った実践では、実際に装置を見せ詳しい説明を行い、新しいアイデアについてなど自由に議論した。最後にアンケート調査を行った。

4.1.4 アンケート結果の分析と考察

(1) 装置全体について

「無重力空間でピタゴラ装置を使うという発想がすごくおもしろいと思った」や「物理実験を組み合わせるとピタゴラ装置をしようという発想がとても良いと思う」など肯定的な意見が多く、装置が生徒の興味を惹くことが出来たと考えられる。実際、装置を目の前にすると、どのような構造になっているのか、どのように動くのかを積極的に装置に触れ考える様子からもこの装置が生徒の興味を惹くに十分であったと考えられる。

また、「レゴで実験するというのが身近に感じられて良かった」や「レゴを選択したのがすごく良かったと思います」など素材としてレゴを選択したことも生徒の興味を惹く要因の一つであると考えられる。

課題としては、地上実験との比較を映像化していなかったため重力下と無重力下での比較映像をとることである。

4.2 東京都立国立高等学校

4.2.1 実践のねらい

私たちの作製した装置、映像が生徒の物理への興味・関心

を惹くことができるか、コンテストの内容や装置、映像が無重力に興味を持たせられるか、物理学の授業に有効であるかを検証するためのデータを得ることを目的とした。

4.2.2 調査対象と調査方法

実践は、2014年2月27日に東京都立国立高校において行った。放課後に有志を募り1時間程度の実践を行い、アンケート調査を行った。アンケートでは、無重力コンテスト、実験装置についての感想・意見等を自由記述形式で調査した。アンケート結果を考察し、装置と映像が生徒の興味・関心を惹き、物理学の授業に有効であるか検討した。また、実践中に生徒にリアルタイムで実験結果に関する予想をさせ、予想がどのように変化するかや生徒の予想、話し合いへの意欲を確認した。

4.2.3 内容

放課後の約1時間を使い、プレゼンテーション形式で無重力コンテスト・装置について説明し、セクションごとに無重力下での挙動を予想させ、クリッカー(Audience Response Systems)を用いてそれぞれの予想を共有した。その後アンケート調査を行った。

4.2.4 アンケート結果の分析と考察

(1) 装置全体について

設問1「今回私たちは、無重力状態でも動くピタゴラススイッチをつくりました。ピタゴラススイッチなので、装置が途中で止まることなく最後まで自動で動きます。このことに興味は持てましたか。」に対して、アンケートを取った生徒全員が肯定的な回答を示した。このことから本装置が生徒の興味を十分に惹くことがわかった。また、自由記述においても「ピタゴラススイッチをレゴで作ったものなるほどと思った」や「無重力という環境でのピタゴラ装置という発想が斬新でよかった」など肯定的な記述が多くあった。各セクションの予想をさせる際どの生徒も積極的に装置に触れながら活発に議論がされていたことから、この装置が生徒の興味を十分に惹くことができたと考えられる。

クリッカーを用いて質量と加速度のセクションの挙動を予想させた。生徒の予想では1)軽い腕の方が先に上がる 2)4つの腕が同時に上がる 3)動かない 4)重い腕の方が先に上がる の4つが予想として挙がった。1回目のクリッカーの結果では、1)3名、2)5名、3)0名、4)1名となり回答にばらつきが出たため、生徒同士で議論させ再度予想をさせた。2回目のクリッカーの結果では、1)2名、2)7名、3)0名、4)0名となった。結果を Fig. 6 に示す。無重力下で装置が作動している映像を見ると、1)軽い腕が先に上がることを見ることができ、生徒にとって予想外であり、驚きを与えることができた。

(2) 無重力について

設問2「無重力(微小重力、 μg)に興味は沸きましたか。」に対して、アンケートを取った生徒全員が肯定的な

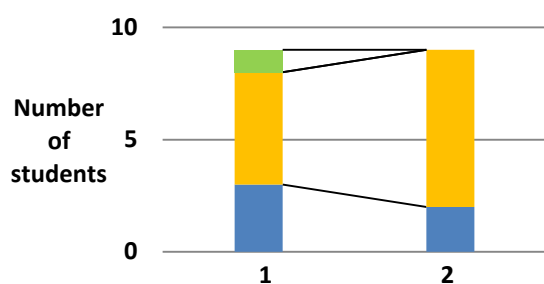


Fig. 6 Predictions by the students. The students who predicted that both arms will move at the same time increased after discussion (yellow). The students who predicted that the heavy arm will move first (green) and the light arm will move first (blue) both decreased after discussion.

回答を示した。このことから装置や映像が生徒に無重力に対する興味を持たせることがわかった。また、自由記述においても「ふり子が無重力空間で回り出し、その運動が続いていくことがかなり興味深かったです」など無重力環境ならではの挙動に興味を示す記述が見られた。

(3) 物理について

設問 3「物理は面白い！と思えましたか。」に対して、アンケートを取った生徒の約 9 割が肯定的な回答を示した。このことから装置、映像が生徒の物理への興味を惹くことがわかった。

4.3 2 回の実践を通して

装置と動画をを用いて行った授業実践では、附属高等学校・国立高等学校の両高等学校の生徒から、「微小重力でのループ・ゴールドバグマシンには興味がある」との回答が得られた。また、レゴブロックが興味深いなどの意見もあった。このことから、レゴというなじみのあるおもちゃを使い作成したループ・ゴールドバグマシンは生徒の興味を惹くことができると考えられる。

附属高等学校の実践では、生徒と大学生が対話をしながらループ・ゴールドバグマシンについて考えた。生徒とは次回作るとしたら、を考えることにより知らず知らずのうちに物理について考えていた様子が見られた。

国立高校での実践では、物理学に対して「おもしろい」と感じたという意見を 9 割の生徒から得られ、ループ・ゴールドバグマシンは装置そのものだけでなく物理学への興味を引きつける効果もあると考える。実際に撮影した動画を見せる前に生徒に装置がどのような動きをするかを予想させたところ、概ね正しく予想できていたがセクション B については誤答が多く、生徒間の議論の結

果およそ 78%の生徒は腕が同時に上がると答えていた。これは無重力状態で運動方程式がどのように成り立つかが予想できていないからだと推測する。動画を見て私たちが解説した結果、「なるほど」など感嘆の声があがった。その他のセクション A, セクション C においても同様に、動画を見た後で解説、もう一度動画を見る、という流れにより「理解が深まった」という意見も得られた。映像の視聴前の誤概念を修復できるなど、物理学における教育効果が期待できる。しかし、今回対象生徒が 9 人という少数であること、学年が混合しており、2 年生は基礎物理を履修済みであったことなどから、もともと定着していた知識も多いと考えられる。実際に基礎物理の力学分野の授業での利用については、装置・動画の使い方を再検討する必要がある。

5. まとめ

私たちの製作したループ・ゴールドバグマシンは微小重力状態で期待通りの動きをした。また、映像の撮影にも成功し、微小重力状態での物体の運動の様子を動画に編集することができた。改善点としては、カメラの位置が悪かったことが挙げられる。

また、授業における使用方法に関しては、今後使用方法の改善を検討することでよりビデオクリップ教材としての価値を高めることができると考える。本装置を用いたビデオクリップ教材はさらに発展させることによって、効果的な物理学教材となることが期待できる。

謝辞

本実験を進めるにあたり、鎌田正裕教授には終始多大なご指導を頂きました。厚く御礼申し上げます。また、(独)宇宙航空研究開発機構、(財)日本宇宙フォーラム、(株)ダイヤモンドエアサービスの皆様にもたくさんの助言をいただきました。無重力実験という貴重な経験ができ、大変嬉しく思います。東京学芸大学附属世田谷高等学校の宮城政昭先生、都立国立高等学校の石原幸枝先生、板山裕先生、中島由貴先生には、高等学校での実践という貴重な機会を頂きました。生徒から装置やビデオクリップに対して様々な意見が得られ、生徒との交流は楽しいものでした。ここに記して皆様に厚く御礼申し上げます。ありがとうございます。

参考文献

- 1) 國友正和, 滝川昇, 牧島一夫, 河本敏郎, 黒田桶彦, 小林雅之, 田原輝夫, 橋本道雄, 増淵哲夫: 高等学校物理 I, p.166, 2006.

(2014 年 5 月 2 日受理, 2014 年 6 月 19 日採録)