

機関番号：13401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20500751

研究課題名（和文） 微小ビーズ球を用いる摩擦のない力学演示実験装置の開発と普及

研究課題名（英文） Development of frictionless equipments for teaching mechanics using fine plastic beads

研究代表者 香川 喜一郎 (Kagawa Kiichiro)
 福井大学・教育地域科学部・名誉教授
 研究者番号：90115296

研究成果の概要（和文）：高校の物理、特に力学は難しいとされている。その大きな理由は、通常、摩擦があるために、理論どおりに実験で示されないことにある。本研究では、虹ビーズとして使用されているプラスチックの球状微小ビーズ（直径約0.3mm）を用いることで、摩擦の無視できる力学実験装置を安価に作る方法を開発した。これによって、中学・高校の教科書に登場する殆どの力学、波動、およびそれに関連した現象を分かりやすく演示できる。実際にこの装置を使い教育効果を国内・国外で実証した。

研究成果の概要（英文）：

It is widely believed that physics is difficult subject, especially on mechanics. The main reason is that mechanics laws cannot be easily demonstrated due to the disturbance of friction. We have succeeded in constructing frictionless equipments for mechanics by utilizing fine plastic beads (diameter of about 0.3mm). We have proved this method can be applied to almost any items described in physics textbooks, including wave mechanics. We also confirmed the effectiveness of this equipment and method through many activities in schools in Japan and abroad.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：科学教育、教育工学

キーワード：力学演示実験法

1. 研究開始当初の背景

力学は理工学の基礎であり、高校の物理で力学の概念形成を十分行っておく必要がある。しかし、現状は、計算問題を解く練習のみ行っており、高校の物理はもっとも人気の無い科目となっている。その大きな理由は、摩擦

が影響する条件下では、理論どおり運動の様子を演示することが困難なことにある。また、重力による落下等の現象では、物体の運動がごく短時間で終了してしまうので、生徒が運動を十分観察することができない。現在、摩擦を減らした等速運動などの観察には、力学

台車、エアトラック、ドライアイスなどを使って実験を行うのが一般的である。しかし、こうした特殊な実験装置での実験では、生徒が一般的な法則・現象として理解するのは難しい。また、エアトラックの実験装置は、高価であり、また、直線運動のみしか演示できないという欠点がある。

2. 研究の目的

今回、我々は、安価な材料（微小プラスチック製ビーズ(直径約0.3mmの球)、ガラス板、ガラスシャーレ、アルミ円板等）を用いて、摩擦のない（無視できる）力学演示実験装置を考案した。これによって生徒は楽しみながら、教科書に登場する力学の法則・現象の殆どを、目で見て確実に納得しながら学習することができる。本研究では、この実験方法の完成度を上げ、国内外の高校・中学校に普及させることを目的とする。

3. 研究の方法

我々の方法では、ガラスなどの表面に微小なビーズをばらまく。このビーズがボールベアリングの役割を果たし、摩擦のない2次元面上の物体の運動を自然に近い状態で実現できる。図1はビーズ球の顕微鏡写真である。微小ビーズ球の直径は約0.3mmで、これは理科教材会社から、虹ビーズ(NaRiKa D-20-1406-01)として市販されている。ここでは微小ビーズをまいた基板を便宜上”ビーズ板”と呼ぶことにする(図2)。

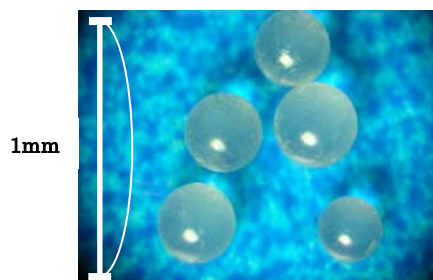


図1

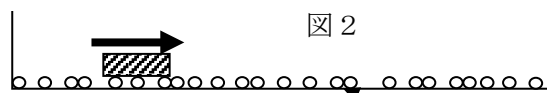


図2

微小ビーズ

ビーズの質量が非常に小さいため、ビーズは分子間力で面にくっつくことができ、5°程度の斜面であれば斜面上での実験も行うことができる。傾きの大きな斜面でも、プラスチックシートに静電気を帯びさせ、そこにビーズを付着させれば、ビーズは同様にボールベアリングの役割を果たし、凹凸面での摩擦のない演示実験も可能である。湿度が高くなるほど摩擦係数が大きくなるので、湿度の低い部屋で実験すること、またビーズは実験前に乾燥しておいたものを使用するなどの注意が必要である。この微小ビーズを使用する方法は、安価で簡便な方法であるが、ビーズが目に入らないように注意する必要がある。実験のあと、すぐ手を水で洗うなどすれば、全く問題はない。

図3に示すような周期的に点滅する発光ダイオードを入れたガラスシャーレを用い、デジタルカメラで運動を記録すると、定量的な実験も行うことができる。

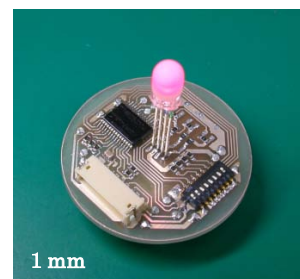


図3

4. 研究成果

本研究では、比較的安価に摩擦の無い装置を製作する方法についても検討を行った。また、力学、波動、電磁気学等の多くの分野で摩擦の無い装置を有効に用いる方法の研究、および、それらの実験を可能にさせる附属装置の開発にも勢力を注いだ。ここでは、紙面の関係上、その一部を述べる。

(1) 運動の第2法則

運動の第2法則は、力と加速度と質量の関係を示すもので、力学では最も重要な法則である。しかし、一般には摩擦があるため非常に演示しにくい。しかし我々が開発したビーズ板を用いて実験すると(図4)、見事に演示できる。これまでの高校の教科書では、台車を用いられているが、生徒には不評である。

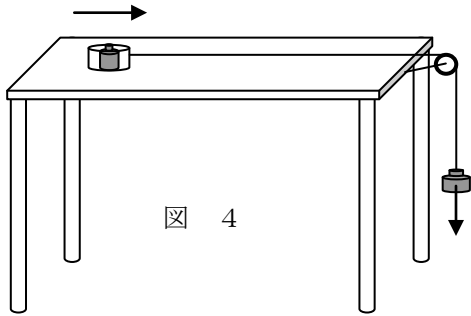


図5は実際の装置の写真である。2つの滑車を組み合わせて用いれば、垂直棒の高さ分だけ分銅の落下距離を伸ばすことができ、ビーズ板の端から端まで十分加速運動を観察することができる。



図 5

図6はビーズ板上を動くシャーレの中に発光ダイオードをとりつけ、その発光の軌跡を、質量53.4gの場合と(写真上)、質量153.4gの場合(写真下)で記録したものである。どちらも点と点の間の距離が徐々に長くなっていることから、速度がだんだん大きくなっていることが分かる。

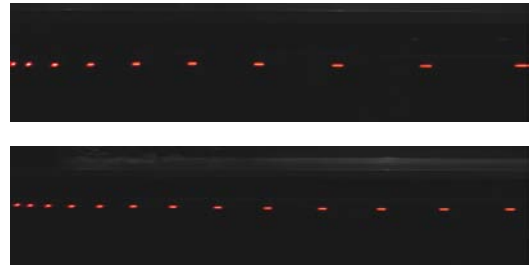


図 6

実際にグラフ化すると、速度は一定加速度で変化していることが確認できる。

(2) 運動の第3法則

作用反作用の法則ともいわれ、これも非常に大切な力学法則である。現状の高校の教科書では連結した2つのバネなどを用いてこの法則を説明しているが、生徒が一般的な法則として理解することはかなり難しい。

我々は、小さなボタン型のネオジウム磁石8個を、同極が外側を向くようにガラスシャーレ内に取り付け、円の外側がすべて同極となる2つの円形磁石を作製し、それを用いて作用反作用の法則を演示する方法を提案した。図7はストロボスコープを用いて記録したものである。静止していたシャーレ(ハートマークつき)にもう一方のシャーレを近づけると、同極同士の斥力を受け、静止していたシャーレは動き出す。それと同時に、動い

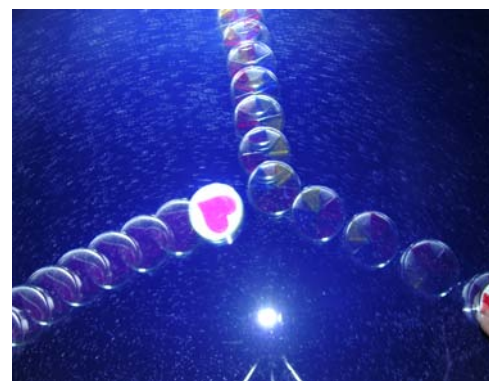


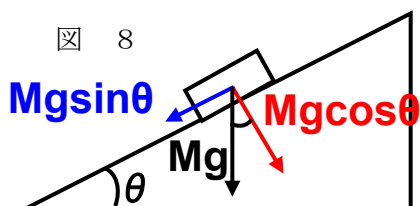
図 7

ていたガラスシャーレは反作用の力を受け軌道が曲がる。普通は摩擦があるため、力を受けてもガラスシャーレが動き出すことはない。このようにビーズ板を用いれば、普段

は見ることができない作用反作用の現象を目で見て納得することができる。

(3) ゆっくりした落下運動

物体の落下運動も大切な学習課題であるが、重力加速後 g は 9.8m/s^2 と大変大きく、現象が短時間で終わってしまうため、運動の様子をゆっくり観察することができない。しかし、摩擦のない斜面を使うと、図8が示すように斜面方向の力は $mg \sin \theta$ となり、加速度は $g \sin \theta$ となる。 $\sin \theta$ は1よりも小さい数であり、重力加速度 g に比べ、 $g \sin \theta$ は小さくなる。例えば、 $\theta = 1^\circ$ のとき、加速度は $1/60$ となる。摩擦のない斜面を用いれば、あっという間に終わってしまう落下運動現象がゆっくりと起きるので、目で見て納得でき、教育効果大きい。



ビーズ板をわずかに θ 傾けてガラスシャーレを斜面落下させ、デジタルストップウォッチ

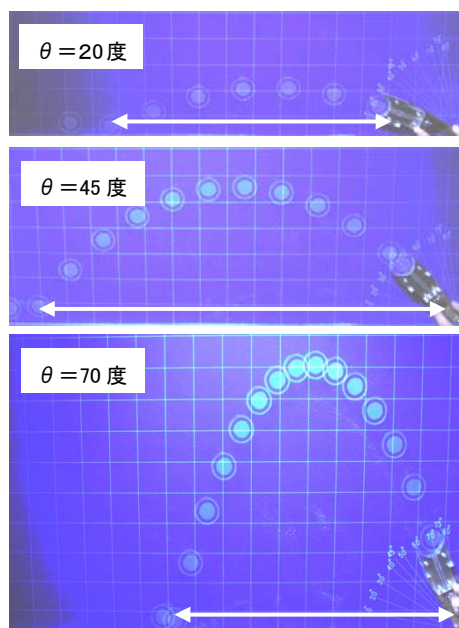


図 9

チを用いて、移動距離と時間の関係を調べ、グラフ化すれば、そのデータから重力加速度 g が求まり、生徒にとって良い課題となる。

図9は、傾けたビーズ板上で、ガラスシャーレを打ち出す速度は一定に保ち、打ち出す角度を変えて運動の様子をストロボ写真撮影したものである。45度に打ち出した場合が最も遠方に到達することをゆっくり観察することができる。

(4) モンキーハンティング

木の上にいるサルをめがけて石を投げたその瞬間、サルは枝から手を放し、落下する。このとき、石の速さ、また石の質量に関係なく、石は必ずサルに命中する。この現象はモンキーハンティングとして有名で、ほとんどの高校の教科書に載っている。また、それを演示する実験器具は、理科教材会社から販売されている。しかし、鉛直方向の重力を用い

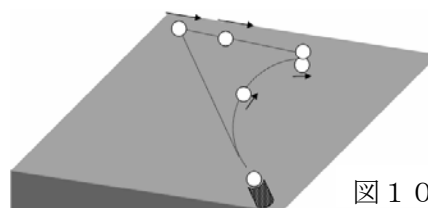


図 10

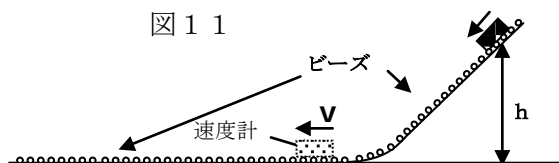
て行うこの実験は、あっという間に終わってしまうため、生徒は十分理解することができない。

図10に示すように、ビーズ板を少し傾け、2つのガラスシャーレを、1つはサルとし、もう1つを石と考える。1・2・3で2人がタイミングを取り、ガラスシャーレを手から放すのと、ガラスシャーレを狙って打ち出すのを同時に行うと、打ち出されたガラスシャーレの速度に関わらず、2つのガラスシャーレは必ず衝突する。この実験の場合は、打ち出してから衝突するまで、1-2秒間の十分な観察時間があり、生徒は完全に納得する。

(5) エネルギー保存の法則

位置エネルギーから運動エネルギーへの変換の実験は、レール上で球を転がして行うのが一般的である。しかしこの実験方法では、球の回転にエネルギーが使われてしまうため、15%から20%の誤差がでる。

プラスチックシートをこすって静電気で表面にビーズを付着させ摩擦のない急斜面を作り、これと摩擦のない平面を連結する。この装置を用いれば、位置エネルギーから運動エネルギーへの変換の実験が高い精度でできる。物体が水平面を駆け抜ける速度は速度計（ビースピ、NaRiKa）で測定する。これによると、理論と実験の誤差は4%程度におさまる。



(6) 実践授業・普及活動

比較的安価にできる摩擦の無い装置を完成させ、それを用いて、実践授業、海外ワークショップなど多数開催し、本実験法の高い有効性を確認することができた。紙面の関係上、ここでは福井県内の高校生、物理選択(SPP)の26人(2年生)を対象に行った実践授業に関連して、力学、波動等の実験に対するアンケート結果を示す。実践授業を受講しての満足度に関しては、①非常に満足②満足③ほぼ満足④不満足、の4つから選択させた。また、下の表の15項目に関して摩擦の無い装置を用いて実験を示し、その実験が生徒の理解度に変化をもたらしたかどうかを調べるために、①非常に理解が高まった②理解が高まった、③あまり変わらない、の内から1つを選択させた。表の1行目の数字①、②、③はこれらの番号を表している。

	実験項目等	①	②	③
1	満足度	19	7	0
2	等速直線運動	16	10	0
3	円運動	11	13	2
4	作用・反作用	19	6	1
5	運動の第2法則	21	5	0
6	モンキーハンティング	19	6	1
7	落下運動	16	9	1
8	エネルギー保存	10	15	1
9	運動量保存	15	11	0
10	弾性・非弾性衝突	14	9	3
11	水平バネ振動	10	12	4
12	波の伝播	21	4	1
13	波の反射	24	2	0
14	定常波	19	6	1
15	波の重ね合わせ	18	8	0
16	電流が作る磁場	9	14	3

<生徒の感想の中から>

- ・今まで“摩擦は無視する”と言ってもイメージがわかなかったが、今回の実験でイメージが実感できた。(4人)
- ・モンキーハンティングがとてよく理解できた。(4人)
- ・波の実験が最も印象に残り理解が深まった。(4人)
- ・運動方程式がよくわかった。
- ・円運動や波動のイメージが持てなかったが、今回の実験でよくわかった。

本研究で開発した微小ビーズを用いる摩擦の無い装置は、力学・波動・電磁気学等の多くの分野で応用でき、これまでの物理教育から、新しい物理教育へと大きな変革をもたらす可能性を持っている。今後、中学・高校の教育のみならず、理工系大学初年度の教育に広く導入されることが期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- 1) 香川喜一郎、Ali Khumaeni、田中覚、小林あかね、尾山和久、古田哲也、摩擦のない平面上をゆっくり進む波、福井大学大学院教育学研究科、教育内容・教材開発研究会年報、(査読なし)、2009年版、pp. 53-58.
- 2) S. Sawamoto, K. Hosotani, N. Idris, K. Ishii and K. Kagawa, Frictionless Demonstration Using Fine Plastic Beads for Teaching Mechanics, 科学教育研究, (査読有) Vol. 32, No. 2, 2008, pp98-102.
- 3) A. Khumaeni, S. Tanaka, A. Kobayashi, Y. I. Lee, K. Ishii and K. Kagawa, Demonstration of the Action and Reaction Law Using Fine Spherical Plastic Beads, Physics Education (査読有), Vol. 43, No. 6, 2008, pp637-643.
- 4) K. Kagawa, Physics Experiments to Stimulate Creativity and Logical Thinking, Workshop in International University Exchange Seminar 2008, (査読なし), 日本学生支援機構(JASSO)平成20年度国際大学交流セミナー(福井大学教育地域科学部理数教育講座—ジャクアラ大学理学部(インドネシア))、物理テキスト, pp1- 27.

[学会発表] (計 6 件)

<国際学会>

- 1) K. Ishii, K. Kagawa, A. Khumaeni, K. H. Kurniawan, Frictionless Demonstration Using Fine Plastic Beads for Teaching Mechanics, International Conference on Physics Education 2009, Oct. 2009, Thay Physics Society, Bangkok, Thailand.
- 2) K. Kagawa, Experimental Demonstration of Physics Using Easily Obtainable and Low cost Materials, (招待講演), International Conference on Natural Environmental Science, May, 2009, Syiah Kuala University, Indonesia

<国内学会>

- 1) 香川喜一郎、尾山和久、古田哲也、石井恭子、栗原一嘉、微小ビーズ球を用いる摩擦のない力学・電磁気演示実験、日本物理教育学会、2009年8月
- 2) 香川喜一郎、尾山和久、古田哲也、石井恭子、栗原一嘉、摩擦のない平面上をゆっくり進む波、日本物理教育学会、2009年8月
- 3) 小林あかね、田中覚、A. Khumaeni、石井恭子、香川喜一郎、微小ビーズ球を用いる摩擦のない力学演示実験 I、日本理科教育学会、2008年9月

4) 田中覚、小林あかね、A. Khumaeni、石井恭子、香川喜一郎、微小ビーズ球を用いる摩擦のない力学演示実験 II、日本理科教育学会、2008年9月

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 物理学の実験装置

発明者: 香川喜一郎、石井恭子

権利者: 福井大学

種類: 特許

番号: 特願 2008-34634

出願年月日: 2008年2月15日

(審査請求: 2009年12月17日)

国内外の別: 国内

[その他]

<教員研修会>

- 1) 香川喜一郎、微小ビーズを用いる摩擦のない力学演示実験装置、大阪府私立中・高等学校理科研究会主催、2011年1月
- 2) 香川喜一郎、身近な材料を用いた教材開発(力学・波動)、京都府木津川市教育委員会主催、2010年10月

<海外ワークショップ>

「微小ビーズを用いる力学・波動実験装置」
に関して海外でワークショップ開催

- 1) Jakarta State University (インドネシア、ジャカルタ)の理学部物理学科学生30名が参加、2009年5月
- 2) International School of Pelita Harapann (インドネシア、ジャカルタ)の高校生20名が参加、2009年5月
- 2) President International School (インドネシア、ジャカルタ)の高校生60名が参加、2009年5月
- 3) Chonbuk National University (韓国、全州市)において、中学理科教員20名が参加、2009年3月
- 4) Young Saeng High School (韓国、全州市)において、高校生30名が参加、2009年3月

<新聞取材>

- ・「「見える力学」理解促進」、県民福井、2009年8月24日
- ・「「力学演示実験装置」を開発」、中日新聞、2009年8月24日

6. 研究組織

(1) 研究代表者:

香川喜一郎 (Kagawa Kiichiro)

福井大学・教育地域科学部・名誉教授

研究者番号: 90115296

(2) 研究分担者: 石井 恭子 (Ishii Kyoko)

福井大学・教育地域科学部・准教授

研究者番号: 50467130