



「倒立振り子のおもちゃづくり～おもちゃの科学シリーズ④～」

令和5年6月11日（土）10:00～12:30、トップガンの課外講座「倒立振り子のおもちゃづくり～動くおもちゃの科学シリーズ④～」が、静岡大学教育学部附属浜松中学校西館2F授業研究室で行われました。受講者は、静岡大学附属浜松小学校17名（小学校5年生12名、6年生5名）、附属浜松中学校6名（中学校1年生5名、3年生1名）計23名でした。講師の先生は、静岡大学教育学部教授 松永 泰弘 先生 並びに、同 研究室学部生 久保宗士朗さん、杉山龍さん、奥原滉太さん、上村聡大さんです。



左から講師の久保さん、奥原さん、上村さん、杉山さん

講座の概要

振り子や機械式時計の探求を行い、倒立振り子の動くおもちゃをつくりまします。倒立振り子は、小学校5年の時に学ぶ「振り運動」応用の学習内容に位置付けられています。棒の先端触れながら動く様子を観察し、その動作について探求します。部品として用意された材料を組立て、自分だけのおもちゃを完成させてから、あそび、観察し、動作原理を深めます。

活動レポート

「動くおもちゃの科学シリーズ」4回目となる本講座は、松永研究室の学部生の皆さんが担当しました。はじめに、振り子の等時性を発見したガリレオ・ガリレイについて、クイズを交えて楽しく学びました。映像資料を抜粋して紹介します。

クイズ この人はだれでしょう

- 16世紀、17世紀のイタリア、フィレンツェで活躍した自然哲学者、天文学者、数学者
- 振り子の等時性を発見
天体観測における発見、望遠鏡の改良
- 地動説を支持し、キリスト教の異端審問で有罪となる
「それでも地球は動いている」

A. ガリレオ・ガリレイ



ピサ大聖堂で揺れるシャンデリアを見て、同じ長さの振子が大きく揺れているときも小さく揺れているときも、往復にかかる時間は同じであることを発見した。

振り子の等時性

振り子について探究しよう

ガリレオの優れた学才

1589年

侯爵の推薦で数学教授に任命される
2年間、大学で仕事をする間に研究に着手



自由落下の法則を実験によって確かめた

科学は自然の事実に基づか
なくてはいけない！

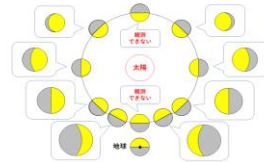


ガリレオと天体観測

望遠鏡を星を見ることに使用した



金星の満ち欠けや月のクレーターを発見する



続いて、小学校5年生の学習内容である「振り子の運動」について、五円玉と糸を使って1秒で振れるようにする活動を行いながら確認した後、2つのおもちゃづくりの活動に入りました。

小学校学習指導要領の内容（理科） 第5学年の内容 A物質・エネルギー （2）振り子の運動
振り子の運動の規則性について、振り子が1往復する時間に着目して、おもりの重さや振り子の長さなどの条件を制御しながら調べる活動を通して、次の事項を身に付けることができるようにする。
ア 次のことを理解するとともに、観察、実験などに関する技能を身に付ける。
(7) 振り子が1往復する時間は、おもりの重さなどによっては変わらないが、振り子の長さによって変わる。
イ 振り子の運動の規則性について追究する中で、振り子が1往復する時間に関する条件についての予想や仮説を基に、解決の方法を発想し、表現すること

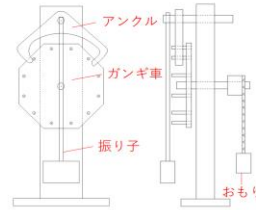
振り子の等時性

振り子がゆれる周期は

- ・ 振り子の重さに **関係しない**
- ・ 振れ幅に **関係しない**
- ・ 振り子の長さに **関係する**

同じ長さの振り子がゆれる周期は、振り子の重さや振れ幅にはよらず一定になる

機械式振り子時計



ガリレオは近代科学の方法論を確立した

一次性質：重さ、長さ、形
二次性質：音、色、味、手触り

構成的実験

自然界の現象をそのまま観察するのではなく、自らが観察しやすい条件を実験室の中で作り上げる

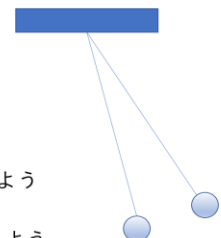
振り子の等時性→シャンデリアの揺れ
構成的実験を行うなら、どうする？

1秒を探究しよう！

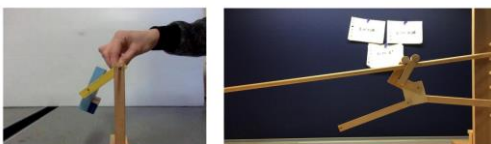
5円玉と糸を使った振り子
で1秒を探してみよう

糸の長さを変えて試してみよう

Point：実験の条件を整理しよう
ex) 糸の長さ：50mm…等



振り子のおもちゃ



倒立振り子のおもちゃ



1つ目に作ったおもちゃは、「わんすけ（木で作った犬の模型）」を使った「倒立振り子のおもちゃ」です。はじめに「わんすけ」づくりの工作に、マニュアルを見ながら取り組みました。続いて、「わんすけ」をおもりとした「倒立振り子」を使いながら、動作について探求しました。

おもちゃを探究しよう①

- 犬が回転するときはどんなときだろう？
- 逆に回転しないときはどんなときだろう？
- 振り子はどのように使われているだろう？
- 話し合いながら見つけたことを共有しよう！



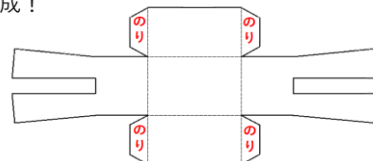
2つ目に取り組んだのは、「紙製4足受動歩行模型」を作り、坂道を歩かせたときの動きからの探究です。受講者は、設計図に基づいて制作した模型が歩く様子に、不思議さや面白さを感じていました。

斜面を模型が歩く???



斜面を歩くおもちゃを作ってみよう！

- ①点線をボールペンでなぞる。
- ②実線にそってはさみで紙を切る。
- ③点線で折り曲げる。
- ④のりをつけて組み立てる。
- ⑤完成！



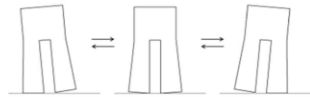
おもちゃを探究しよう②

坂道を歩かせて探究しよう

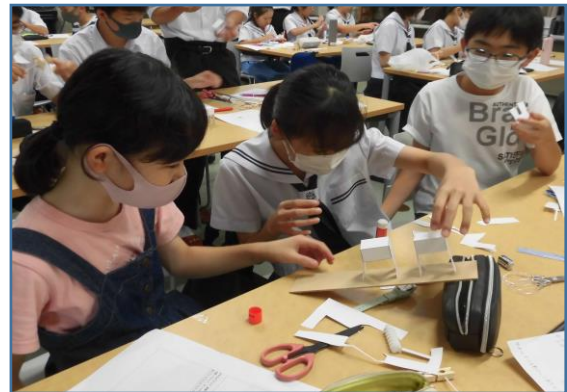
- ・ どうして歩くのかな…？
- ・ 坂道の角度を変えたらどうなるのかな…？
(例) 角度を大きくしたら歩行は…

安定して歩くことができる坂道の角度を見つけよう！

坂道を歩く仕組み



- ①おもちゃを傾けて手を離す。
- ②おもちゃの重さを支える脚が変形する。
(斜面についていない脚はまっすぐのまま)
- ③おもちゃが揺れることで重さを支える脚と斜面についていない脚が入れ替わる。
- ④このとき、2つの脚の変形量に差があるため、斜面についていない脚は重さを支える脚よりも前に一步を踏み出す。
- ⑤以上の動きを繰り返すことでおもちゃは斜面をあるくことができる。



【受講者の皆さんの感想（抜粋）】

今回、ふりこのおもちゃを作ってみて、「わんすけ」では、わんすけが上の方でゆれてふりこのようになっていて、歩くおもちゃの方では、片方ずつ歩いていることを初めて知って「これもふりこの動きなんだなあ」と思いました。私は「わんすけ」の方がふりこのように思ったけど、歩くおもちゃの方もふりこの動きが入っていることが分かりました。(小5 友利碧柚)

ものづくりをやって、振り子の仕組みが分かってとても楽しかったです。紙の工作では、動いたのでとてもおもしろかったです。振り子の等時性を発見したガリレオ・ガリレイはすごい人だと思います。(小5 横田光)

犬を作る工作が少しむずかしかったけど、仕組みが分かってとてもおもしろかったです。また、くらげみたいな紙の工作は動きがとても不思議でした。角度によっても動きがちがっておもしろかったです。(小5 樋口 世)

1回目の犬をつくる時に、くるくるまわっていて、ずっと同じようにまわっているように思えました。たけぐしがうまくささらなくて大変でした。2回目の紙とのりとはさみだけでできる工作がおもしろかったです。最初は上手に動かなかったけれど、足の角度をかえたら歩いて、おもしろかったです。(小5 堤谷柚希)

家に帰ってもっとじょうぶにしたり、絵をかいたりして、家族と一緒に遊びたいです。また、とめ具がうまくとまらず、大変でした。坂道を歩くのは、紙を少し丸めたら、よちよち歩きました。その時、とてもうれしかったです。次の企画もあつたら、ぜひおうぼしたいです。(小5 永井真奈)

ガリレオ・ガリレイの人生や、ふり子のおもちゃ、てくてく走る(歩く)工作を作ったりして、おもしろかった。また、知らない事もあつたので、自主学习で調べてみようと思った。家で、お父さん、お母さんといっしょにおもちゃで遊びたいです。(小5 大家凜恋)

ガリレオ・ガリレイという人が、振り子を見つけたことが分かりました。おもちゃ作りで、より振り子のことが分かりました。1つ目に作った犬が仕組みを知ると、とても楽しかったです。2つ目に作ったものは、少しずつ動くのがとても不思議でした。今回を通して、いろいろな事を知ることができました。とても楽しくいろいろなおどろきがありました。(小5 豊田真幸)

今日、ふり子の授業をやって、仕組みを知る事ができました。特に楽しかったのは、工作で、木にとめ具が上手くささらなくて大変だったけれど、完成してかわいいわんちゃんができる時は、うれしかったです。2番目にやったものは、アドバイスをもらってなめらかに歩いたので良かったです。今後も、習ったことを生かしていきたいです。(小5 富士田真織)

ふり子の運動には、いろんな仕組みがあつて、あらたに2こ目のおもちゃの足の数をふやしたら、へらしたらという疑問ができました。1こ目のおもちゃでは、犬の重さを変えたらどうなるか。せんとくバサミの動きをもっと強くしたら、弱くしたらとか、いろんなぎもんができました。なので、自分でもこういうおもちゃを作ったり、発見をしたりしたいなと思いました。(小5 山崎蓮太郎)

ガリレオ・ガリレイのことを知ったり、ふりこの動きを使っておもちゃを作ったり出来て良かったし、とても楽しかったです！ふりこの動きを使って、自分だけのおもちゃを作ってみたいです。(小6 増田いち花)

ガリレオの生涯や、振り子の仕組みを知ることができた。振り子時計の仕組みを考えるとところや、1往復で1秒の作り方、考え方、2往復で1秒の作り方はどうしたらいいのか、振り子の仕組みを知ることができた。(小6 朝比奈遙杜)

振り子は長さによって動く速度が変わってくることを改めて知った。紙を組み立てるだけで、坂道を歩くおもちゃに関しては、斜面にあしがついているかいらないかや、あしの角度によって歩く速度が変わってくるのが分かった。驚きと興味でいっぱい

の授業でした。次の課外活動も参加したいと思います。ありがとうございました。

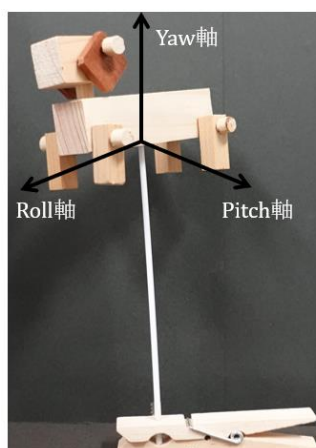
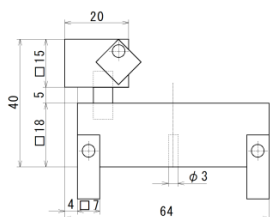
(中1 太田心葵)

今日の活動で振り子の仕組みについて今までよりも深く考えることができました。ガリレオ・ガリレイの説明とともに、おもちゃづくりに挑戦できて楽しかったです。特に歩く「おもちゃ」をつくり、どのように動いているのか、どうして動いているのかを知ることができて、興味深かったです。また、このような活動に参加してみたいと思います。(中1 伴真央美)

今日の活動では、実際に物を作り、その仕組みや工夫を理解していく、というものでした。仕組みや工夫には、とても興味深いものがあり、理解していくのが楽しかったです。また、この活動を通して、これからも自分で物づくりをしようかと思いました。(中1 矢野誠英)

解説

今回は「倒立振り子のおもちゃづくり おもちゃの科学シリーズ④」というテーマで、動くおもちゃづくり、あそび、探求する活動を行いました。研究室で開発してきた動くおもちゃの中でも、棒の曲げ振動の先端で回転しながら揺れる犬のおもちゃ(図1)と斜面を揺れながら紙の変形で歩行する紙製4足受動歩行模型(図2)を取り上げました。どちらも重心が支点より上にある倒立振り子のおもちゃ(図3(a))です。おもちゃの研究(探究)には、研究は知的あそびの延長線上にあり、あそびは主体的で積極的なものであること、研究はすべてにおいて自由であること、などの思いが込められています。今回、仕事の都合で講座に参加できなかったのですが、研究室の学生たちが自分の研究に対する思いを込めて一生懸命説明し、たのしい講座であったことを、みなさんの感想文から感じ取ることができました。



(a) 犬型のおもちゃと組立て図 (b) 洗濯ばさみの開閉で作動

図1 棒の曲げ振動の先端で回転しながら揺れる犬のおもちゃ

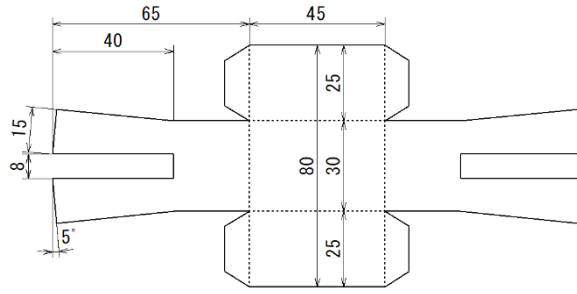
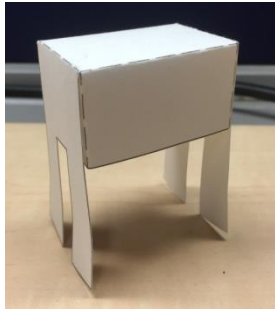
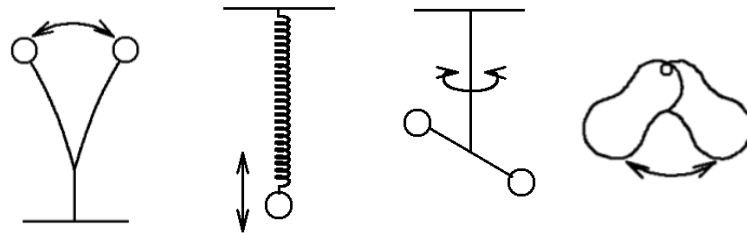


図2 紙の変形で歩行する紙製4足受動歩行模型



(a) 倒立振り子 (b) ばね振り子 (c) ねじり振り子 (d) 剛体振り子

図3 授業で取り扱う発展的な振り子の種類 (啓林館：教師用指導書5年)

小学生にとっては難しい言葉が使われているかもしれませんが、お父さん、お母さんに説明してもらいましょう。

最初に、みなさんの感想文に対してコメントしたいと思います。

講義とおもちゃづくりの講座を通して、「ガリレオ・ガリレイはすごい人」「仕組みがわかってとてもおもしろかったです」「動きがとても不思議でした」「角度によっても動きがちがっておもしろかった」「足の角度を変えたら歩いて、おもしろかったです」「知らないこともあったので、自主学习で調べてみようと思った」「家でお父さん、お母さんと一緒におもちゃであそびたいです」「驚きと興味でいっぱい授業でした」「どうして動いているのか・・・興味深かったです」などの感想が現れたことに注目しました。

日常の中のありふれた現象を見て、不思議さを感じ、振り子の等時性の発見に至ったガリレオ・ガリレイの偉大さを改めて実感していることがわかります。他の人が感じない、自分だけしか感じない不思議さ、そして、その仕組みや原理を突き詰めることが、科学の発展に大きく寄与したといえるでしょう。自分のこだわりや好きなことをとことん突き詰めることは、他の人がなしえない未知の発見につながります。自分の不思議をだいじにしてください。

次に、おもちゃの不思議な動きに対して驚きや興味を示していることがわかります。自分にとって新鮮な出会いであり新奇性を感じ、興味を持ち、そこから動きや仕組み、原理の探究につながります。観察して、条件を変えて実験して、わかった、もっと知りたい、家に帰って家族とあそびたいと、あそび・探究の活動は家庭での学び、教室での学びに発展します。研究室の教材開発では、みなさんの感想に見られる

ように、学びのたのしさを実感し、真に主体的で積極的な学びとなる教材の開発を目指しています。

学習内容の「振り子」については、「今日の活動で振り子の仕組みについて今までよりも深く考えることができました」とありました。既習の知識を活用して、応用的な内容、正解のない探究に取り組み、学習内容の奥深さを実感しています。探究すればするほど、新たな探究テーマを発見することでしょう。

新たな挑戦「振り子の動きを使って、自分だけのおもちゃをつくらしてみたい」「これからも自分でものづくりをしようかと思いました」もたのしみです。研究室で開発したものづくり教材を経験したみなさんが、近い将来、同じ分野での研究に関わり、研究で競争し合えることを夢見ています。

また、新たな疑問「犬の重さを変えたら、洗濯バサミの動きをもっと強くしたら、弱くしたらどうなるのか」「おもちゃの足の数を増やしたら、減らしたらどうなるのか」はとても重要な疑問です。研究室の研究テーマに加えることも考えられます。2つ目のテーマ「足の数の増減」については、4本の足を3本に減らしたモデルを開発し、授業実践を行い、学会論文としてすでに発表（「紙製3足受動歩行モデル教材の開発と授業実践」, 日本産業技術教育学会誌, 64/1, pp.1-8, 2022年）しています。自分の興味を膨らませていくことでもっとも疑問が生まれ、いまからでも研究に取り組むことができます。挑戦してみてください。

【棒の曲げ振動の先端で回転しながら揺れる犬のおもちゃ】

棒が振動するモデルの運動を明らかにするために、モデルを一つの物体と仮定して、単純化した問題を考えます。

棒の先端に質量 m [kg]の重りが取り付けられているとき、棒の振動の周期 T [second]は次式で与えられます。

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{ml^3}{3EI}} \quad (1)$$

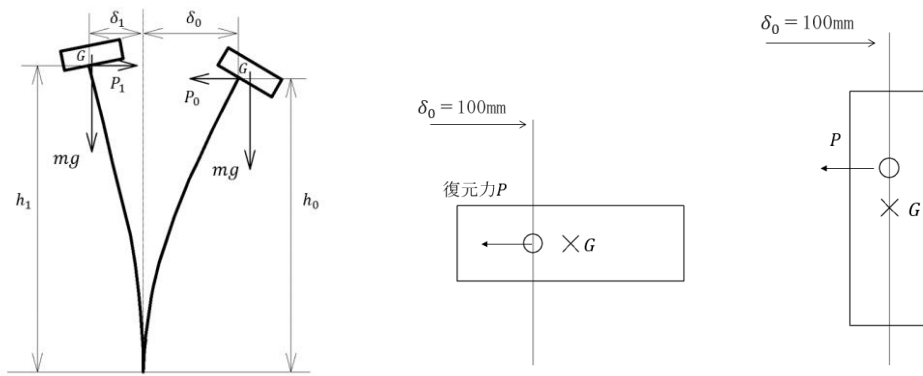
ここで、 l は棒の長さ[m]、 E は棒の材質の変形のしにくさ[N/m²]、 I は棒の断面形状の変形のしにくさ[m⁴]、 π は円周率です。分数を囲んだ記号($\sqrt{\quad}$)は平方根(ルート)を意味します。

棒の材質と形状(長さ)と断面形状、重りの質量がわかれば、棒の振動の周期は計算で求められる(設計できる)ことがわかります。中学校数学で学習する平方根は現実の問題でとても重要な道具となります。

この単純化により、棒の振動が明らかになりました。

次に、棒の先端に取り付けられた四角柱の物体と棒の振動の方向について考えることで、物体の回転運動を明らかにします。

図4(b)に示すように物体の重心(重さの中心)が振動方向と一致しているときには、物体は回転しません。物体の重心が振動方向にずれがある(図4(c))とき、回転の作用が働き、物体は回転します。物体の回転運動を、図5を参照して説明します。



(a) 棒の曲げ振動 (b) 振動方向と重心が一致 (c) 振動方向と重心にずれ

図4 模型の初期状態と棒の曲げ振動

Step①：初期状態として、棒は最大にたわみ、復元する力は最大値をとります。模型の重心は、棒がたわみを生じている方向(直線上)から最も離れた場所に位置します。棒・模型はともに静止した状態です。

運動開始直後、棒は復元する力により、徐々に加速しながらたわみが減少していきます。このとき、模型は棒が運動する直線上から最も離れた場所に重心が位置していたため、重心周りに回転の作用を生じ、時計回りの回転を始めます。その後、模型の回転はほぼ一定の回転の速さを保ちます。

Step②：丸棒のたわみが0になり、復元する力が0になった瞬間。

丸棒のたわみと復元する力は0となり、運動を続けます。Step①からStep②で生じていた方向とは逆のたわみを生じ、徐々に大きいたわみます。運動の向きと逆方向の復元する力が徐々に大きくなることによって、速さは減少していきます。模型は時計回りの回転を続けます。

Step③：棒のたわみが初期状態とは逆方向に最大になった瞬間。

これ以降、Step①からStep③の間の運動を向きを変えながら繰り返し、摩擦や空気抵抗、変形等により、棒の揺れ・模型の回転は徐々に小さくなり静止に至ります。

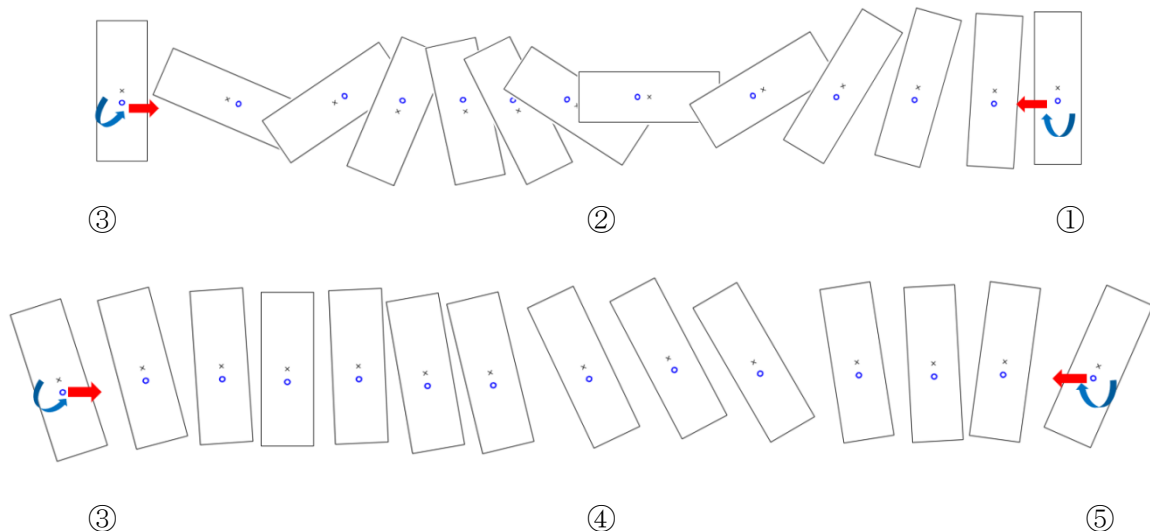


図5 模型の左右の揺れと回転 (上段：Step①～③の動き 下段：Step③～⑤の動き)

棒の振動方向と重心がずれているときは、1周期を過ぎたあたりから棒の変形は複雑になります。模型が回転しているため、模型の回転が棒のたわみ変形に与える影響が大きく、棒のたわみ振動が複雑な振動に変化するためです。

以上の説明は、みなさんが何回も振動させてみて体験し、観察し、わかったことと一致していると思います。つくった犬のおもちゃは足も振り子運動をするため、さらに複雑な運動となることでしょう。

【紙の変形で歩行する紙製4足受動歩行模型】

紙の模型は、足底が傾いていることにより、平地でも少し押すことで左右に揺れを生じます。左に傾くと、支点より右側に重心（重さの中心）があることにより、元に戻る揺れを生じます。また、傾いた時に接地している足は、模型の重さによりたわみ変形が発生します。したがって、模型を斜面におくと、足が変形した分だけ前に進み、斜面を下ることによりエネルギーが供給され、揺れが持続します。足の入れ替えにより移動する運動を歩行といいます。

足のたわみ変形について考えます。

足の先端でたわんだ量 δ は次式で与えられます。

$$\delta = \frac{Pl^3}{3EI} \quad (2)$$

ここで、 P は足にかかる模型の重さ[N]、 l は足の長さ[m]、 E は紙の材質の変形のしにくさ[N/m²]、 I は足の断面形状の変形のしにくさ[m⁴]です。

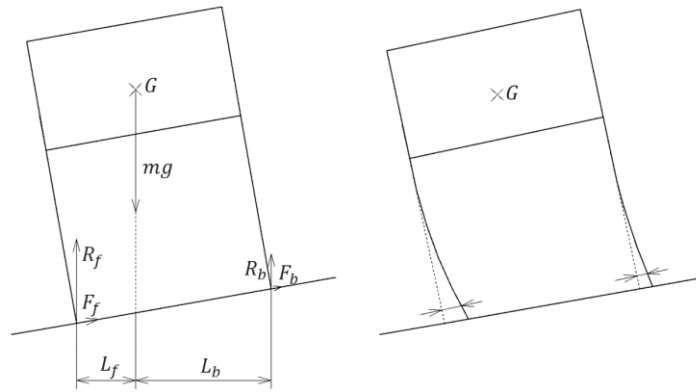
紙の材質と形状（長さ）と断面形状）、模型の質量がわかれば、足の先端のたわんだ量は計算で求められる（設計できる）ことがわかります。1つ目の模型の周期と一致している部分が見てわかります。これはどちらの模型もたわみ変形に関連する量を求めているからです。

研究では、模型の材料にアルミ缶を切り開いたアルミシートを用いて、歩行の速さへの影響を明らかにしています。式(2)を用いると、材質だけでなく、模型の大きさを変えたときの歩行の速さを推測することが可能です。

また、足にかかる重さは、図前足と後足の接地点で異なります。前後の足にかかる模型の重さとそれによるたわみ変形量の違いを図6に示します。前足に大きな力がかかり大きく変形し、浮いた足は変形が元に戻り、次に接地するとき前に大きく一歩を踏み出します。後足は変形が少ないので変形の差の分だけ、すべりを生じます。斜面上に粉末をまいて、足跡を調べる実験をしています。前足は大きな摩擦ですべらず、後足はすべっている様子が明らかとなりました（図7）。

さらに、左右の揺れに対する解析や実験を行っています。重心の位置が高いほど不安定になり、低いほど安定します。左右の揺れを維持しながら歩行するためには、倒れてしまわない程度の不安定性が必要となります。

運動を明らかにする場合には、いろいろな要素が関係してきます。首やしっぽ、羽を取り付けたときには、周期や速さなど大きく変化します。



(a) 重心の位置と力の大きさ (b) 重心の位置とたわみ変形量

図6 重心 G と接地点にかかる力 R_f , R_b とたわみ変形量

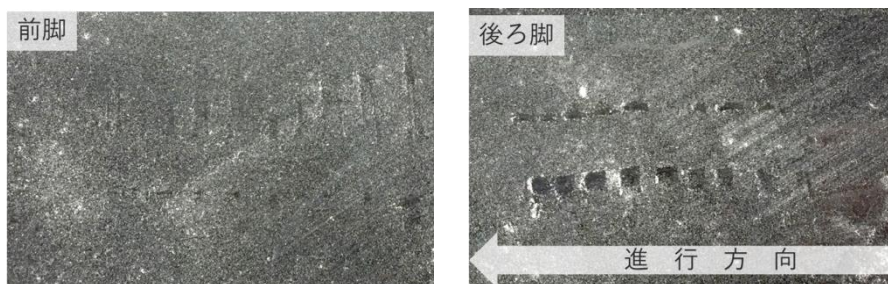


図7 前足と後足の足跡

紙製4足受動歩行模型は後足に滑りを生じながら歩行し、前足と比較して足としての振り出す機能が弱いため、後足を支える機能を主とした1本足に変更した模型を開発しました(図8)。詳細は省略します。

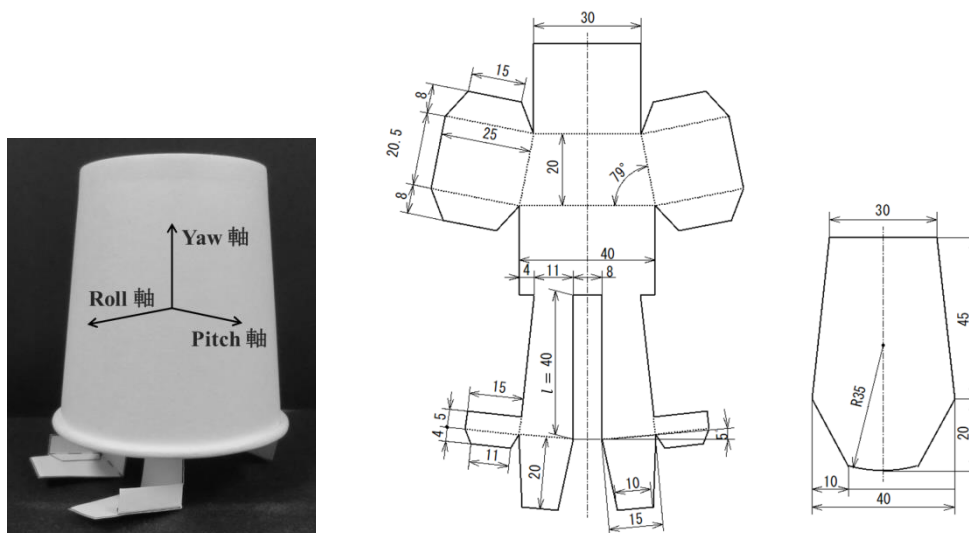


図8 紙製3足受動歩行模型(左)と脚部設計図(右)

今回の活動が、みなさんの大学での研究に生かしてもらえたら、さらに、10年後、20年後になるかもわかりませんが、みなさんの中から一人でも私と同じ研究者になってくれたらとてもうれしいです。

(松永泰弘)

コラム

「理科の見方・考え方」

本講座が始まったとき、講師の先生が「振り子が一往復する時間は、振り子の何によって変わるか知っていますか。5年生で習うので、まだ知らない人もいますが。」と尋ねました。学習する前は、「振り子はおもりの重さの勢いがつくので早く振れる」、「大きく振れる（振れ幅が大きい）と長い距離を動くのでゆっくり振れる」などと予想する子どもが多いのですが、本講座ではほとんどの受講者が「振り子の長さによって変わる」と正解を答えました。

「振り子の一往復する時間はおもりの重さによって変わる」など、子どもたちが感覚的にまちがって理解していることを「誤概念」と言います。「誤概念」には他にも「水を沸騰させたときに出る泡は空気」（正解は水が状態変化して気体になった水蒸気）となどがあります。こういう「誤概念」は、授業でいったん訂正されたとしても、しばらくすると間違った「誤概念」に引き戻されてしまうことが多いのです。ですから、大人でも、誤った認識をしている人がたくさんいます。「誤概念」を正しいものに変容するのに有効な手立てとして、子どもが自ら問いを持ち、問いを明らかにするために、自分が考えた方法で体験（感覚活用）を通して追究し、自ら問いに対する考えをつくるような学習をすることなどがあげられています。そして、平成29年に告示された現在の学習指導要領では、理科の学習について「理科の見方・考え方」を働かせた学習をすることの大切さが指摘されています。

「振り子の運動」は、5年生の「エネルギー領域」の学習です。ここでは、考え方として「条件を制御する」が大きく関わってきます。解決したい問題について、解決の方法を発想する際に、制御すべき要因と制御しない要因を区別しながら計画的に観察、実験などを行うことです。これにより、予想や仮説を基に、解決の方法を発想するといった問題解決の力の育成を目指しています。

本講座の受講者が、「誤概念」を持ちやすい「振り子の運動」について、正しい認識をしていたのは、理科の授業で、問いを自分事としてとらえ、主体的に解決する活動に取り組んだ証だと思えます。とてもうれしく思いました。これからの理科の授業でも、「理科の見方・考え方」を発揮しながら、主体的に取り組んでほしいと思います。

（金田裕之）