

中学校理科の力学台車を用いて等速直線運動を観察する方法

塚田真也* 小林 誠** 増村元希***

Shinya TSUKADA, Makoto KOBAYASHI, and Motoki MASUMURA
Methods for Observing Constant Velocity Linear Motion with a Cart in Junior High Schools

ABSTRACT

中学校第3学年では、力学台車と記録テープを用いた実験を通して等速直線運動を学習する。しかし、いくつかある運動を阻害する要因により等速直線運動を実現することは難しい。本稿では、センサで取得したデータをワイヤレスで送信する機能を有する台車を用いて効率的に実験データを取得し、台車が等速直線運動しない要因を①タイヤ内での摩擦による減速、②床の凹凸により運動エネルギーが振動へ散逸することによる減速、③記録テープが後方に引くことによる減速、の3つであることを明らかにした。そして、中学校で用いる力学台車と記録テープに①～③への対策をした結果、力学台車の等速直線運動を実現することができた。

【キーワード：中学校理科, 力学台車, 教材研究, ワイヤレススマートカート】

1. はじめに

中学校理科第3学年では、記録タイマーと力学台車を組み合わせることで、0.1秒間に力学台車が進む距離(cm)を記録テープの長さを測ることで求める。このように一定時間の移動距離を定量化することで運動の様子を表すことが可能となり、「速さ・速度」の概念を学習する[1]。中学校段階で速度を求める方法として、記録タイマーと力学台車を組み合わせる以外に、デジタルの簡易速度計やストロボカメラが用いられているが、自然の事物・現象を観察して定量化する取り組みができる教材は記録タイマーと力学台車の組み合わせだけであり、生徒の速度に関する概念形成に欠かせない教材として広く認識されている。

この記録タイマーと力学台車を用いる中学校第3学年の理科「運動とエネルギー」では、これらの機器を用いて「力と運動の関係」や「慣性の法則」を生徒に見出させる。また、ここで生徒が身に付ける記録タイマーと力学台車を用いて速度を求める実験技能は、後で学習する「力学的エネルギー保存則」や「等加速度直線運動」の導入にも用いることができる[2, 3]。このように、記録タイマーと力学台車を用いた実験は、運動の様子を定量的に表す重要な役割を担っている。しかし、力のはたらかない物体において、一定の速度で一直線上を進む「等速直線運動」が実験結果から見出しにくいという問題がしばしば指摘される。

図1に教科書に載っている等速直線運動を導入する際に行う実験の結果を示す[1]。力学台車に記録テープを取り付けて、水平な面上で台車をおし出す実験を行う。実

験後の記録テープが図1の中央に載っており、0.1秒に相当する5点毎に切り取って並べた様子を左図に示している。既習事項より作られる式

$$0.1\text{秒間の平均の速度}(\text{cm/s}) = \frac{0.1\text{sの移動距離}(\text{cm})}{0.1(\text{s})} \quad (1)$$

から、この運動は速度が時間によって変化しない、つまり、等速で動いていることを生徒は見出す。ここで、0.1秒間の平均を瞬間の速度として扱う。さらに右図に、0.1秒おきにテープの長さを測定した結果をプロットしている。時間と移動距離が直線の関係になっていて、次式で表せる比例関係

$$\text{移動距離}(\text{cm}) = \text{速度}(\text{cm/s}) \times \text{移動時間}(\text{s}) \quad (2)$$

で説明できることを学ぶ。

しかし、実際に我々が図2(a)の台車(機器の詳細は2章で述べる)を用いて教科書通りに実験を行ってみると、図1で示した等速直線運動が示すべき水平線と異なり、図2(b)のように右下がりの結果を示した。これは下がり方が一様なため、同じ割合で速度が減る「等加速度直線運動」を示してしまっている。また、図2(c)では直線に見えるが、上に凸の2次関数になっている。以上のように、図2(b)から等速で運動しているとは言いにくく、中学校の授業ではこの実験結果に各教員が説明を加えることで等速直線運動の概念を導入している。なお、図2(c)が直線に見えるのは、縦軸の目盛りが図2(b)に比べて粗いからである。図2

* 高根大学学術研究院教育学系

** 鳥根県立江津工業高等学校

*** 真庭市立蒜山中学校

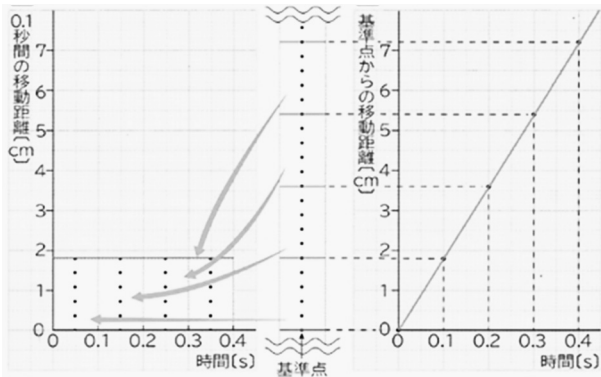


図1. 東京書籍「新編 新しい科学3」に載っている力学台車をおし出したときのグラフ。中央に記録テープが載っており、0.1秒ごとに切り分けて貼り付けた様子を左図で示している。また右図では、各時刻におけるテープの長さから読み取った移動距離の時間依存性を示している。

(c)から(2)式を見出すことは可能であるが、図2 (b)の右下がりとは矛盾して論理的な説明ができない。そこで、図1のような理想的な実験結果を得るための方策が必要となる。本研究では、ワイヤレス接続でデータ(移動距離・速度・加速度)が転送可能なスマートカートを用いて、水平な面上で台車をおし出す実験を効率的にたくさん行い、大量の実験結果の中から減速する理由を明らかにした。そして、力学台車でそれらの対応を行った結果を報告する。

2. 実験方法

Bluetoothで移動距離・速度・加速度を同時にスマートフォンやタブレットに送信するPASCO社 Wireless Smart Cart (以下、スマートカート)を用いて実験を行った[4]。外観を図3 (a)に示す。スマートカートを用いることでテープを切り貼りする手間が省けて、効率的に実験を実施できる。また、図3 (b)のように速度データに加えて加速度や移動距離のデータも同時に確認できる点が実験条件の制御に有効である。図3 (b)では、2.1~2.9秒に力を加えて、等速直線運動し、5.1~5.8秒で減速し静止し

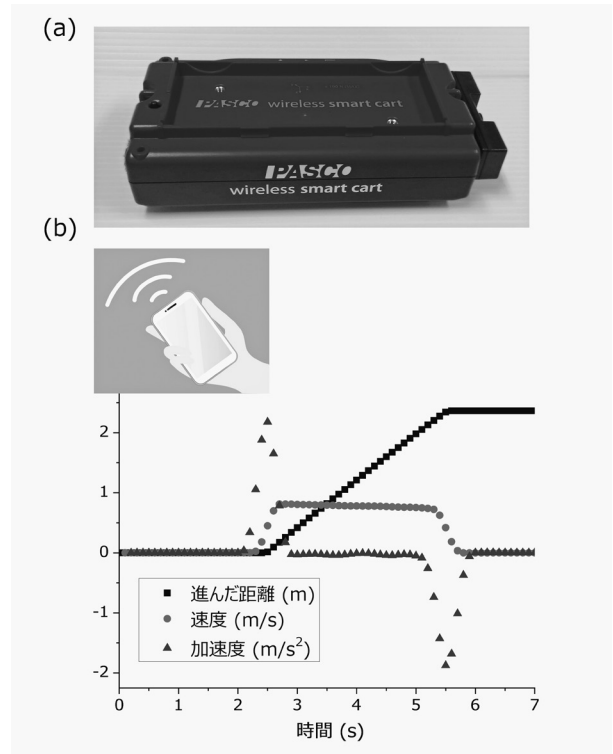


図3. (a) PASCO Wireless Smart Cart (スマートカート)の外観。(b) スマートフォンやタブレットとBluetoothで接続し、移動距離・速度・加速度を実験しながら確認できる。

た様子が分かる。3つの物理量は、それぞれが微分・積分の関係で結びついているので同等の情報であるが、力の印加については加速度(▲)が見やすいなど、物理量ごとに事象の現れ方が異なるので、床の傾きや衝撃といった予期せぬ事象にも気づきやすい。初速度や質量、床の状態の条件を変化させて3つの物理量を記録した。

力学台車はヤガミDW-2・記録タイマーはヤガミDR-8Sを用いた。購入時期は分からないが、少なくとも購入後12年は過ぎている。台車の歪みや部品の欠損はなく良好な状態である。

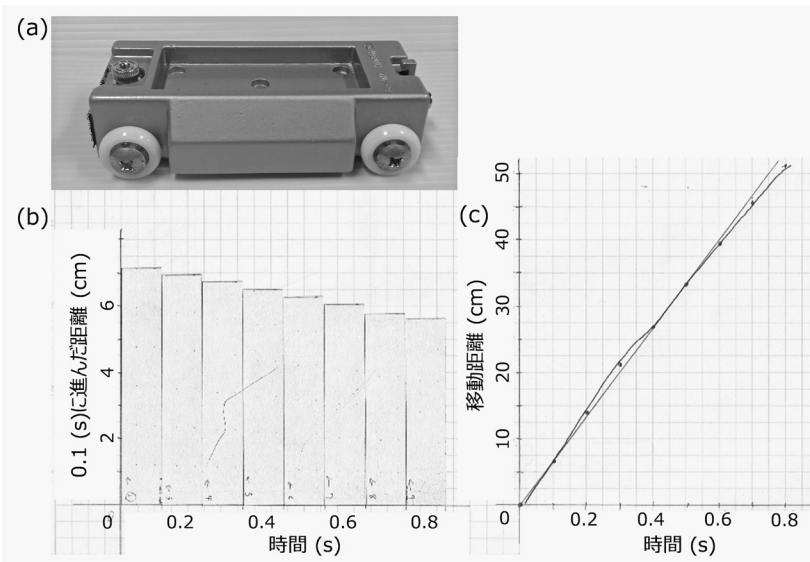


図2. (a) 実験で用いた力学台車。(b) 0.1秒間の移動距離の時間依存性。(c) 移動距離の時間依存性。

3. 実験結果と考察

3-1. 初速度が運動に与える影響

手で押す力を変えて、3条件でスマートカートの運動を調べた。図4に3つの初速度を与えた場合における速度の時間変化を示す。どの初速度でも速度は右下がりであり、手で押した後に減速しながら進む様子が見て取れる。加速度を最小二乗法で近似させて評価すると、初速度が大きいときから順に、(■) -0.035m/s^2 、(●) -0.026m/s^2 、(▲) -0.020m/s^2 となった。初速度が小さいほど減速が小さくなったが、どれも 0m/s^2 に近い値であり初速度が運動に与える影響は小さいと解釈した。

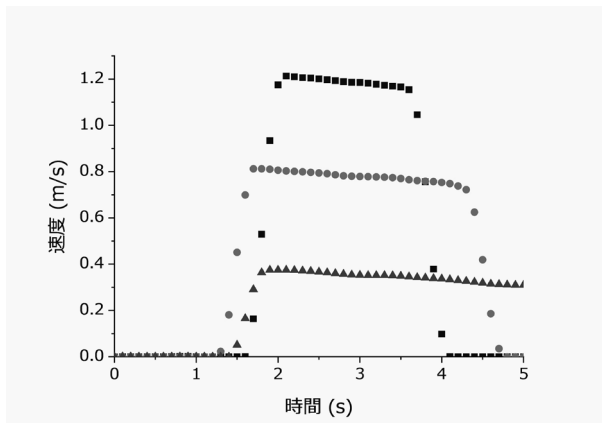


図4. スマートカートを押す力を変えて水平面を走らせた際の、速度の時間依存性。

3-2. 記録タイマーが運動に与える影響

力学台車は記録テープを引きながら走行するので、進行方向と反対に力を受けることは明らかである。その影響を評価するために、スマートカートに記録テープをつけて記録タイマーに通してから走行させた。その結果を図5に載せる。記録テープをつけていないときに比べて、減速が大きいたことが分かる。1次関数で近似して加速度を評価した結果、台車だけで走行させたとき(■)の加速度 -0.009m/s^2 が記録テープ(●)により -0.090m/s^2 になっ

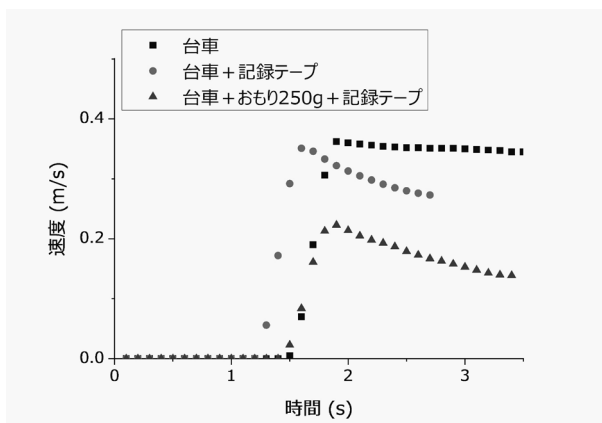


図5. スマートカートに記録テープを取り付けて走行させた際の、速度の時間依存性。スマートカートに付属しているバネで初速度を与えている。

た。次に、記録テープをつけた際の傾き(加速度)が一定であることから等加速度直線運動を仮定して、高校物理学の範囲で扱うニュートンの運動方程式(運動の第2法則)をもとに考察を行う[5]。

等速直線運動では力がはたらかないため、運動の様子を表す運動方程式は

$$F(t) = ma(t) = 0 \quad (3)$$

が成り立つ。ここで $F(t)$ はある時刻 t における力(N)、 m はスマートカートの質量(kg)で 0.25kg 、 $a(t)$ はある時刻 t における加速度(m/s^2)を表す。記録テープに引かれて走行するスマートカートの等加速度直線運動では、 $F(t)=F_0$ で引かれる力をして、加速度は次の式のように一定の値 a_0 になる。

$$a(t) = a_0 = \frac{F_0}{m} \quad (4)$$

この式から、質量が大きければ加速度が 0m/s^2 に近づくことが予想される。図5には、スマートカートに 250g の力学台車用のおもりを載せた結果(▲)も含まれている。 a_0 は -0.062m/s^2 となり、おもりを載せる前(-0.090m/s^2)に比べて 0m/s^2 に近くなった。

3-3. おもりが運動に与える影響

(4)式より、おもりを載せることで減速が小さくなると考えられる。一方で、おもりが余計な空気抵抗になったり、車体やタイヤを歪ませて減速が大きくなったりする可能性もある。そこで、スマートカートに $250\text{g} \cdot 500\text{g}$ の板状のおもりを載せて走行させた。図6に結果を示す。スマートカートについているバネで初速度を与えているため、重くなると初速度が小さくなる。また、載せていないとき(■)に比べておもりを載せたとき(●, ▲)の方が加速度は、 0m/s^2 に近くなった。以上より、 500g までの範囲では、重いほど減速が小さくなることが示された。

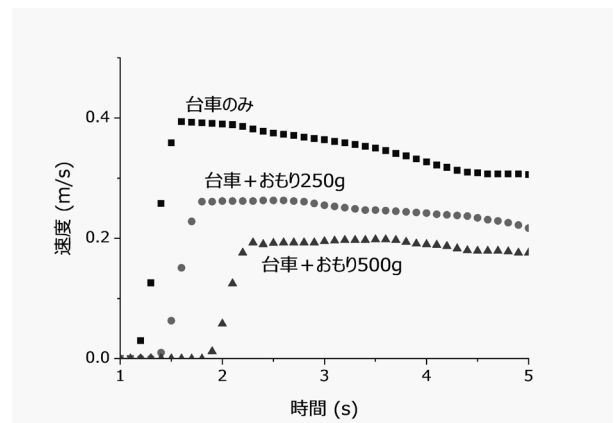


図6. スマートカートにおもりを載せて水平面を走らせた際の、速度の時間依存性。スマートカートに付属しているバネで初速度を与えている。

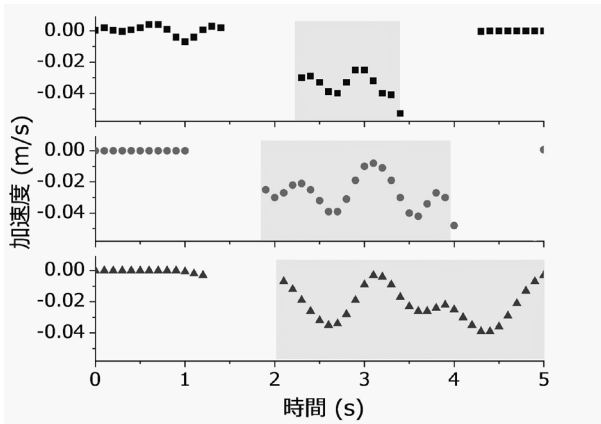


図7.スマートカートを押す力を変えて水平面を走らせた際の、加速度の時間依存性。図4のデータに対応している。水平面を走行している時間の背景に色を付けている。

3-4. 床が運動に与える影響

図7に初速度を変えて水平面を走行させた際における加速度の時間依存性を示している。等速直線運動の場合は常に0 m/s²を示すところで、下に凸が現れている。初速度により多少の誤差があるが、2.6sと3.5sで進行方向と反対向きに力がはたらき減速していることを意味する。3つのデータ取得時にスマートカートと同じ場所で走行させたので、このほぼ同時刻に減速する現象は同じ場所で減速することに対応しており、床にタイヤの回転を阻害するもの(キズかゴミ)が存在していたと考えた。実際、スマートカートが該当する場所を通るときにカタカタと音が発生していた。この床の影響は、図4の速度では傾きの変化として現れるだけなので気づきにくい。一方、加速度として見ることで、下に凸のピークが現れ認識しやすくなる。

3-5. 力学台車の改善

スマートカートで得られた知見をもとに力学台車を改善する前に、車輪に油(呉工業, Kure556)を差した。図8(a)に示すように、力学台車からプラスドライバーを用いて車輪を外しベアリング部分に油を差した結果、図8(b)(c)で示す通り傾きが0m/s²に近づき、減速が小さくなった。

そして、記録タイマーにつないだ力学台車に対して、力学台車を重くする(3-2,3-3節)、床を平らにする(3-4節)対応を行って、水平面を走行させた際の運動の様子を図9に載せる。力学台車を2台、3台と重ねたり、力学台車に付属しているおもりを250g, 500gと増やしたりした結果、500gのおもりを載せたときが最も減速が小さかった。床は、化学テーブルやガイドレール(島津理科)、アクリル板を用いて実験を行った結果、アクリル板を用いたときの結果が最も良好だった。また、走行時の音が小さい程減速が小さくなることが分かった。図9の結果はまだ少し減速しているものの図2(b)と比べるとわずかであり、この結果から等速であることに気づき、よりスムーズに等速直線運動の学習に入っていけると思う。

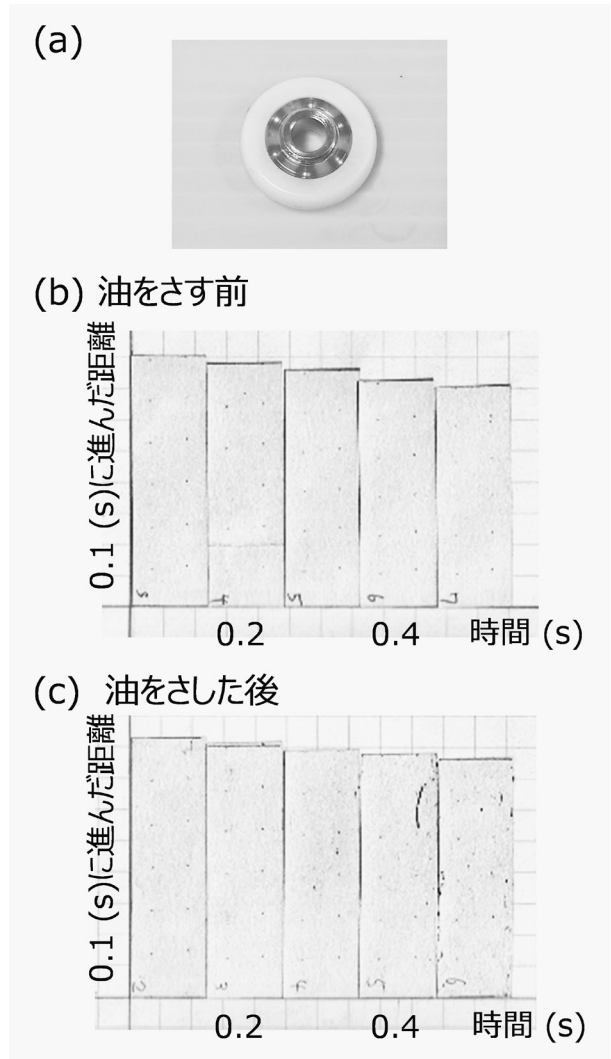


図8. (a) 力学台車についているベアリング入り車輪。(b) (c) 注油前後における力学台車の運動の様子。縦軸の1マスは、5mmを表す。

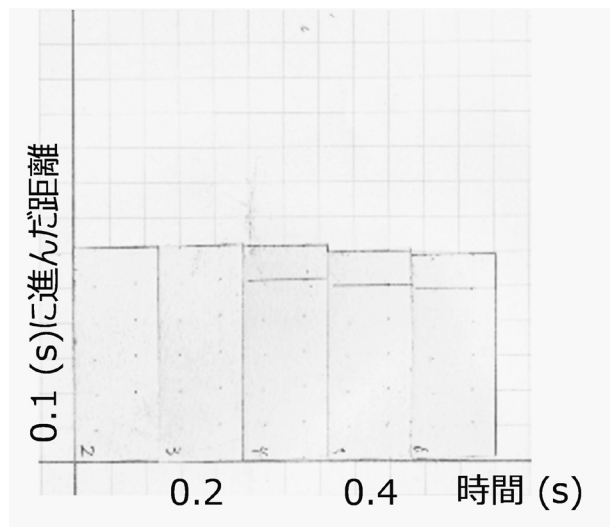


図9.車輪に油を差して、500gのおもりを載せて、水平なアクリル板上を走行させた際の、力学台車が0.1sに進んだ距離の時間依存性。縦軸の1マスは、5mmを表す。

4. まとめ

本稿では, 等速直線運動(中学校第3学年)を力学台車と記録テープを用いた実験から生徒が正確に理解できるように, 実験で改善すべき点をスマートカートで調べた。通常, 記録テープを切り貼りする作業を含む力学台車の実験は, たくさんの条件下で効率的にデータを得るのが難しい。しかし, スマートカートで移動距離・速度・加速度のデータをワイヤレスで取得できるので, 運動の様子を多面的に観察でき, さらに, 多くの条件下で効率的に実験の改善点を見つけることができた。得られた改善点をもとに, 力学台車の車体を重くして, 車輪に油を差して, 床を平らなアクリル板にすることで, 減速が小さくなり, 理想に近い実験データを得ることができた。

引用文献

- [1] 岡村定矩, 藤嶋昭, 他, 「新編 新しい科学3」(東京書籍, 2016).
- [2] 大山光晴, 米石達也, 物理教育 58, 16 (2010).
- [3] 溝上忠彦, 北海道立教育研究所附属理科教育センター研究紀要 29, 16 (2017).
- [4] PASCO Wireless Smart Cart <https://www.pasco.com/products/smart-cart> (参照 2020年4月8日)
- [5] 山本義隆, 「新・物理入門〈増補改訂版〉」(駿台文庫, 2012).