

高校物理でのニュートンの運動の第2法則の 検証実験に関する考察

力センサーと加速度センサーを同時使用する方法に照らして

角島 誠*

(平成29年9月5日受付)

A Study on Verification Experiment of Newton's Second Law of Motion in High School Physics

In light of the simultaneous use of force sensor and acceleration sensor

Makoto KADOSHIMA

(Received Sep. 5, 2017)

Abstract

About the verification experiment of Newton's second law of motion, we can easily demonstrate $F=ma$ in a short time by the measurement using graphing calculator which uses simultaneously force sensor and acceleration sensor with hanging a mass body in the vertical direction. On the other hand, in Japan, the experiment which uses dynamics trolley and ticker-timer has continued for half a century since PSSC.

In this study, the former method is called a one-shot method, and the latter method is as a standard method. Based on the features of both methods, we extensively examined experiments of second law of motion, and examined from various viewpoints the problems and the essence of each. Based on these examinations, we propose an example of lesson plan using the one-shot method in the lesson of second law of motion.

Key Words: Newton's second law of motion, force sensor, acceleration sensor, ticker-timer, graphing calculator

1. はじめに

運動の第2法則 $F=ma$ を検証する実験といえば、PSSC 物理以来、 $a \propto F$ 、 $a \propto 1/m$ の2つの関係を求めるべく水平面上で力学台車をばねはかり(あるいはゴムひも)で動かし、記録タイマーで運動を測定して第2法則を検証する方法が定番(以下、定番法と称す)であろう。

これに対し、力学台車を用いることなく、グラフ関数電卓にインターフェイス経由で加速度センサーと力センサー

を同時使用して運動の第2法則 $F=ma$ を極めて短時間に実証する実験方法(以下、一発法と称す)を、筆者は2003年に T³ Japan 第7回年会(Teachers Teaching with technology)において教材開発の実践例として発表した⁽¹⁾。そして、当時の勤務校では、物理の授業はグラフ関数電卓とセンサーを標準使用する前提で全ての単元で可能な限りの教材化と独自のテキスト編集とを行い⁽²⁾、この第2法則も17世紀に唱えられた法則を21世紀のテクノロジーを用いて短時間で確かめる検証実験と題して行っていた。クラスの生徒全員

* 初等中等教育研究センター, ICTセンター

分のグラフ関数電卓、2人1組でセンサーを利用した計測ができる物理的環境という勤務校の特殊な環境下で可能であった実験方法であったとしても、その後、パソコン価格は益々下がり、IT活用等を後押しするかのようになり、タブレットが教育の世界に入り込んできている。教材会社から発売されている各種データロガーやセンサーキットの充実は当時の比ではない。

しかしながら、グラフ関数電卓を使わないとしても、第2法則の指導において一発法のような2つのセンサーを同時使用した計測方法の研究や報告は見当たらない。現場の実践の中で開発されている様々な工夫も、研究・報告されることなく消費されていくことが多いが、果たしてこの一発法は、グラフ関数電卓等が存分に使用できた特殊な環境下にあっただけのことだったのか、あるいは第2法則の指導という点で今日的にも示唆をもたらすものだったのだろうか。

このたびは、一発法、定番法双方が持つ特徴を踏まえながら運動の第2法則の実験を広く吟味し、それぞれが抱える課題やそれら課題を排除した場合の本質を多角的に考察し、運動の第2法則の指導における一発法を用いた展開例を提案する。

2. 一発法についての概略と特徴

実験方法 ※注1

- ・写真のように加速度センサーに木片（質量体）をとりつけたものを一つの物体として力センサーに吊るす。
- ・吊るした状態で各センサーの0点調整をする。（質量体にかかる重力をキャンセル）
- ・サンプリングタイムを0.05秒ごととし、5秒間、力センサーごとランダムな上下運動を行う。

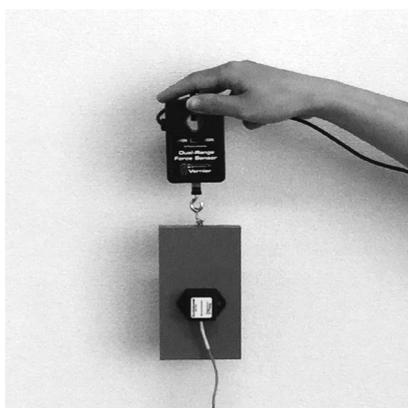


図1 一発法の実験方法

出力・回帰分析

- ・縦軸に力、横軸に加速度を画面にプロットとする。
※単位はそれぞれ [N] [m/s²] で計測される。
- ・回帰機能で線形回帰を行う。
- ・直線の傾きの数値を確認する。

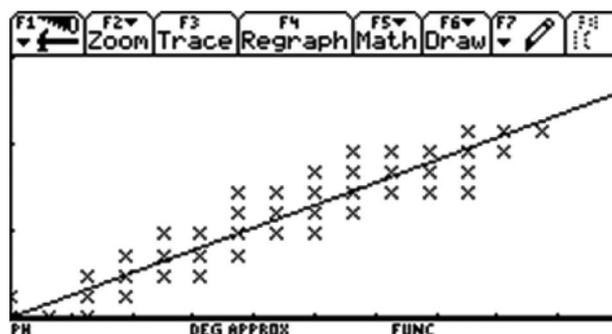


図2 プロットの線形回帰 縦軸 [N], 横軸 [m/s²]

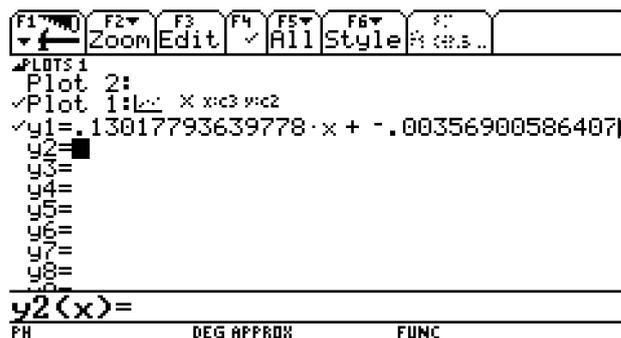


図3 1次関数式の表示

※この場合、y1の0.13が傾きに相当する。

5秒の計測時間、そして縦軸F、横軸aのグラフ出力や回帰分析の出力などわずか2分程度の出来事である。

そして、加速度センサーと共に質量体の重さをはかりではかる。この場合、0.13 [kg]であった。

定番法と比べたときの特徴

- ①グラフ関数電卓の使用
- ②データのプロットと回帰分析機能の使用
- ③2つのセンサーの同時使用
- ④力学台車、記録タイマー、ばねはかりの不使用
- ⑤極めて短時間での実施
- ⑥普通教室での教師演示実験として容易に実施可能

3. 第2法則検証実験周辺の先行研究等

現在の定番法の指導方法は現代化を推進したPSSC物理からであり、吉本・奥沢（1963）は、今日という力の誤概念（吉本はアニミズムの思考と表現）を持つ生徒に対し、直観的に正しく理解したという段階に至らせるには「力と加速度の関係も実験を通して経験的に正確にとらえさせる必要がある。そのためには、これを生徒実験として自身の直接経験に訴えなければならない、また、力としては生徒自身の筋肉的感觉となんらかの形で結びつけた方が、直観的につかまえやすい。…力学実験用車をゴム紐で引っ張って加速度をつけ、その加速度をタイマーから算出という実

験は重要な意味を持っている⁽³⁾と評したが、定番法が今日まで続いていることの基軸となる見解であろう。また、運動の第2法則の検証実験においては、記録タイマーの利用が一般的になっているが、記録タイマーの活用も現代化のPSSC物理からである。現代化では実験の厳密さより、原理の直接的な理解に重きが置かれた。加藤一八(1968)は、重力加速度の測定で記録タイマーを使った研究報告において「決して良い値は得られない」としながら、「原理を認めさせるための実験としての価値を認める」⁽⁴⁾と表現したが、今日一般的となった現代化以後の教材観の本質であろう。その後、教科書での扱いや理科教育振興法により教材が普及したことから定番法が一般化してきたものの、厳密さの観点からは、満足のいく実験方法ではなかった。斜落均(1979)⁽⁵⁾は、不安定になりがちなばねはかりに代わって定力をどうやって確保するか装置の開発を行った。その後、台車定加速装置が商品化されもした。馬目秀夫(1982)は、「台車定加速装置を使って生徒実験を行ってみたが、ばねの伸びと台車を引く力の関係が、生徒達には、今ひとつピンとこなかったようで、満足できる成果はあげられなかった」として、「比例関係だけでなく、定量的な関係まで証明できる簡単で安定した方法を工夫し、運動方程式から運動を予測し、その通り行くかどうかを実験で確かめるという方法」⁽⁶⁾の開発を行った。ただ、時代もあって運動の分析のために記録タイマーを使っている。その後、こういった教材改良型の文脈での教材開発は、Excelでのデータ処理の仕方等々、個人のホームページなどで散見される程度となった。

また、滝川(1986)は、「今まで、教科書などに取り上げられていた運動の第2法則の学習では、「力・加速度・質量」の定量的な関係を求める実験により $F=ma$ という式を定式化していた」が、自らの授業分析から、「生徒にとってみれば質量が関係するかどうか第1の問題である」⁽⁷⁾とし、生徒の認識の形成過程を明らかにした。同様に、力学指導における生徒のつまづきや誤認識に対する現場の実践からの試行錯誤から導き出された集大成が、川勝ら(1992)によってまとめられた「学ぶ側からみた力学の再構成」⁽⁸⁾である。このあたりからの力学周辺の研究の潮流としては、沖野・山岡・松本(2016)⁽⁹⁾がまとめているように80年代以降ではいわゆるMIF(Motion implies a Force)誤概念、素朴概念に対する研究や理解のプロセスに関する研究が占めてきた。沖野・松本(2011)の研究⁽¹⁰⁾は、 $F=ma$ を学習した後に、MIF的素朴概念の克服を行うというもので、 $F=ma$ そのものを証明する実験ではなく、 $F=ma$ を前提として行う補足の演示実験を扱っている。ここではモーションセンサーとデータロガーが用いられた。

IT活用という観点からは小林・笠原・村田(2003)が、

「素朴概念を克服して科学的概念に転換するような感動的な実体験をもたらすには、力学授業におけるリアルタイム又は準リアルタイムでITを活用することが非常に効果的である」⁽¹¹⁾とした事例報告をおこなっている。運動の第2法則については、定力装置としてミニ扇風機を用い、動きの分析にはVideoPointないしは距離センサーを用いるというもので、定番法の延長にある方法である。同じくIT活用として嶋田(2013)⁽¹²⁾は、力学センサーを用いた第3法則の指導の効果とともに、限られた時数の中でのIT活用の有効性を報告している。沖野・山岡・松本(2016)⁽⁹⁾は、メタ認知に対する支援によって第3法則の作用・反作用の概念構築に対する教育手法として、力センサーのパソコン計測を用いた衝突実験を用いている。その他、ITという表現より、PC計測という表現での教材と授業実践については筒井和幸・本管正嗣(2010)⁽¹³⁾ならびに筒井和幸(2013)⁽¹⁴⁾(2014)⁽¹⁵⁾の一連の研究があり、普及のためには発問や課題を整理した指導用資料の作成の必要を説いている⁽¹⁴⁾。そして、第2法則についても扱っているが、力学台車を用いた定番型の形で計測をセンサーで行い、データ処理を表計算ソフトに入力してパソコン活用を行うものであった⁽¹⁵⁾。

他方、PSSC物理を生み出した米国においては、大学での物理教育研究からのものとはいえ、1980年代、1990年代の諸々の研究成果に基づき、認知科学等も踏まえ、更にはセンサーによるパソコン計測、瞬時のグラフ化といった教材を用いるなども含め、The physics suiteという一連の教材枠組みが展開されている⁽¹⁶⁾。ただ、そのThe Physics Suiteで用いられる相互作用型演示実験講義(ILD)でも力学台車を用いた実験方法であって一発法ではない⁽¹⁷⁾。

このように、第2法則関連では、素朴概念の物理量の理解を促すという観点の研究はあるものの、 F 、 m 、 a の間の関係である運動の第2法則を導く実験方法ということについては、定番法とその改良型といった力学台車と記録タイマー(あるいはその代用としてのセンサー)という原型から離れたものは見当たらない。

4. 内外での第2法則の指導方法

4.1 日本の教科書での扱い

表1にて、定番法と一発法の観点比較を踏まえ、現行学習指導要領での教科書における第2法則の扱いについて6つの観点でまとめた。※注2

観点1：教科書でストロボ写真説明の有無

観点2：第2法則の学習以前での記録タイマーを用いた実験の有無

観点3：第2法則に関する生徒実験の分類

・(検証)：定番法での検証実験

・(活用)：第2法則を前提とした運動方程式の活用実験

- 観点4：力学台車を引く（動かす）方法
 観点5：コンピュータ活用についての記述
 観点6：パソコン計測についての記述

表1 教科書での扱いの比較

	観点1	観点2	観点3	観点4	観点5	観点6
A社	○	○	検証	ばね	○	なし
B社	○	○	検証	ばね	○	なし
C社	○	○	活用	(斜面)	なし	なし
D社	○	○	活用	おもり	なし	なし
E社	○	○	検証	ばね	△	なし

ストロボ写真

全ての教科書において、第2法則の説明は、ストロボ写真での説明となっている。m一定で、Fを変化させての台車の動きのストロボ写真と、F一定で、mを変化させるストロボ写真を掲載し、ドライラボ的なプロットとグラフから $a \propto F$ 、 $a \propto 1/m$ の関係が成立しているという扱いである。

記録タイマー

記録タイマーの使用の要領を得ていると、第2法則の実験が比較的容易に進む。定番法の段階で記録タイマーを初めて扱うとなると操作や処理作業に比重が移ってしまう。

全ての教科書において、第2法則の学習の前に記録タイマーを用いた実験が扱われている。

直接検証型か活用型（間接検証）か

B、Eの2社が、ばねばかりで力学台車を引いて行う定番型の検証実験を探究実験（活動）として扱っている。

A社は、定番法と同じ機材を用いる活用型の探究実験「力学台車に力を加えるときの運動」を主に扱い、その関連実験として定番法を小さく扱っている。

これに対し、C社は、斜面上の物体の運動を運動方程式から予測し実測値との比較を行うものであり、D社は、滑車経由のおもりで力学台車を引くもので、これも運動方程式から予測し実測値との比較を行うという第2法則を前提に、第2法則を活用するものである。

運動を調べる実験装置はいずれの社も記録タイマーである。

コンピュータ活用、パソコン計測

コンピュータの活用について言及しているのは2社のみであった。探究活動の進め方の一般論として、A社が「探究活動を進めるうえでコンピュータの利用は大変有効である。データの整理やデータを視覚化して行うプレゼンテーションなどに活用できる」と記述し、B社が「多量のデー

タを処理する必要がある場合には、コンピュータを利用することが考えられる」と記述し、報告書の作成において「データの処理など、必要に応じてコンピュータを利用する」としてある。E社が、放物運動を表計算ソフトの数値計算でシミュレーションをすることを扱っているが、その他の使用については扱われていない。

センサーの活用ならびパソコン計測の言及は全社でない。

4.2 センサー等を販売する教材会社の扱い事例

4.1で示したように教科書での扱いは全く無いものの、国内でパソコン計測教材販売を行う5社：

- ・ナリカ（英国の Data Harvest Group 社の Easy Sense を販売）
- ・ケニス（台湾のプロジェクターメーカーの Boxlight 社によって作られた GlobiSens 社の labdisc を販売）
- ・島津理科（米国の PASCO 社の Spark を販売）
- ・ウチダ（イスラエルの fourier education 社の Einstein, Multi labo を販売）
- ・Naoco（米国の Vernier 社の LabQuest を販売）

は、各社ともセンサーキットや専用のタブレットやデータロガーを販売し、また、学校事情に合わせての iPad やパソコンに接続対応していく仕様を用意している。

これら5社について、パソコン計測に関わる商品の説明等において、第2法則周辺実験がどのように扱われているか各社のホームページから確認した。

ナリカでは、力センサーの実験例として力学台車の衝突時の力の変化を例として示している⁽¹⁸⁾。

ケニスでは、ばねの単振動の計測として力センサーとモーションセンサーを同時使用した事例がある⁽¹⁹⁾。

島津理科は、パソコン計測の物理実験集として様々な活用事例を紹介しているが、第2法則検証そのものについての事例はない。おもりで力学台車を引くC社の活用型の実験で、力センサーと滑車として機能する回転センサーを同時計測する事例が紹介されているが、分析においては、力センサー単独の出力で定力があることの確認と、回転運動センサーからの単独出力で加速度運動となっていることの確認である⁽²⁰⁾。つまり、2つセンサーを活用しながらも出力を別物としている。これは、記録タイマーの代用の延長にある実験といえる。

ウチダと Naoco では、販売のみで具体例は示されなかった。(2017年8月4日現在)

いずれの社のホームページにおいても、定番法とは根本的に異なる指導法を見いだせなかった。

4.3 海外の扱い事例

日本におけるセンサー関連の教材がすべて他国の教材の

輸入販売である実態が示しているように、海外では民間による教材開発が進んでいる。背景には、日本と比べて教育制度や教科書の持つ拘束力等々が違い、教材会社がさまざまな教材や教案、手引書を開発し、教員がそれを利用している事情がある。各社のホームページではそれら教材や使用例、手引き書が確認できる。その他、教員が教材を求めるサイトも参考となる。

大別すると、力センサーの使用の有無となり、使わない場合は、本質的には定番法ないし活用型と同じで記録タイマーの代わりに動きを捉えるセンサーを使用している。

例えば、英国の DataHarvest 社では、教師用の実験手引書において、台車を滑車経路のおもりで引く運動を光ゲートセンサーで行う複数例が扱われている⁽²¹⁾。米国の PASCO 社の Spark では、定番法でモーションセンサーを利用する方法が紹介されている⁽²²⁾。教員が教材例を求めるサイトの英国の物理の教材が参照できる Institute of Physics の Practical physics では、日本の D 社のような活用型であり、光ゲートセンサーの利用となっている⁽²³⁾。International Baccalaureate の教員が教材を求めるサイトでは、日本の D 社と同じように台車は滑車経路のおもりで引く形になっており、運動方程式の活用型であるが、力学台車の動きをモーションセンサーで測定し、コンピュータにプロットされるデータの線形回帰を行うものが紹介されている⁽²⁴⁾。

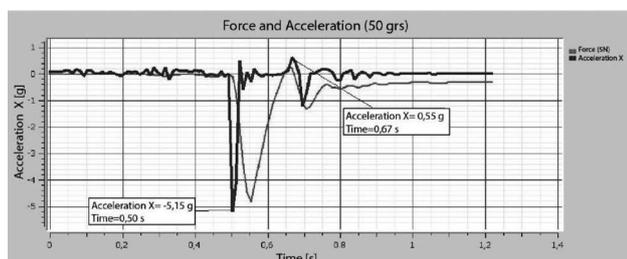


図4 Globisens 社 a-t グラフ

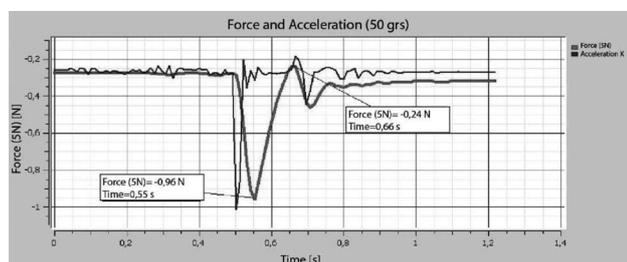


図5 Globisens 社 F-t グラフ

力センサーを使う台湾系の Globisens 社では、力と加速度が同時に測定できる Dymo labdisc force sensor を用いて、台車を滑車経路のおもりで引く運動を調べ、計測データから図4、図5のように F-t, a-t グラフを通して、第2法則の理解と応用が求められる発問と展開例が紹介されている⁽²⁵⁾。

米国の大手である Vernier 社では、水平運動する力学台車に力センサーと加速度センサーを同時使用し、Globisens 社のように F-t, a-t グラフを比較確認し、そのデータから F-a グラフを作成し、F, m, a の関係を分析するという、一発法と同じようなセンサーの使い方を紹介している⁽²⁶⁾。

その他、Web 学習で世界的に有名な Khan Academy では、ドライラボ的な説明等もなく、法則としての $F=ma$ の公式の解説という形となっている⁽²⁷⁾。

5. 論点

5.1 記録タイマーとパソコン計測について

定番法の特徴の一つには、記録タイマーの使用がある。

定番法の手間数の殆どはデータ処理も含めて記録タイマー関連の作業にある。飯田(1992)は「PSSC の登場以来、記録タイマーはあらゆる学校に浸透し切った。ところがこれが煩雑なデータ処理に解消されむしろ概念形成を妨げるような傾向さえ生み出した。概念形成に役立ち、法則がむき出しになって法則に対する信頼感がますます「速さのはかり方」はないものだろうか⁽²⁸⁾」とし、「命中式速度計」を開発したが、落下法則に用いるものであって、定番型の第2法則で用いることはできない。精度、手間数からしてセンサーに劣る記録タイマーがなぜ標準化されているのであろうか。中央集権的な教育制度で教科書の検定制度があるという日本の事情と他国を一概に比べることは難しいが、国内の教材会社ではセンサー等々に扱っているものの、教科書ではそのことは一切触れられず、しかもすべてが記録タイマーを用いるというのは、どのように解釈したらよいのであろうか。理振法によって記録タイマーが全国に普及している教材であるという公平性の原理からだろうか。

記録タイマーの事例だけにとどまらず、物理・化学・生物・地学の理科のどこかの単元1か所でもパソコン計測を教科書で標準化しようものなら、すなわちその時点で全体が標準化されることを意味し、総入れ替えに近いことと絡んでこよう。予算的な問題も然り、全国に行き渡るまでの時間然り、そういった事情からだろうか。この間にパソコン計測教材は益々海外で開発されて日本は輸入するだけの状況となっている。

日常生活では様々に IT 機器が浸透し、IoT の時代にあつて、加速度センサーや力センサーは日常生活に入り込み使用されているものであるのに対し、記録タイマーは、学校を離れると用いられない学校教育のための非日常の実験装置である。このような時代の文脈の中にあつても、約半世紀にわたって記録タイマー利用の実験が標準化されているというのは、統計的な背景を踏まえたものがないが、4.3 で見た海外の状況と比べると、かなり違和感のある状況である。

平成23年9月に理科教育等設備基準改訂のための検討会によって改訂された「今後の理科教育等設備の整備の在り方について」⁽²⁹⁾において、高等学校理科では、優先的に整備を行うべき設備の重点対象とはなっていないものの、パソコン計測インターフェイスが学校に1つ、簡易型実験計測インターフェイスセットが4人1組を1班とする4班セット、実験計測用センサーセットも同様に4班セットが、国庫補助対象となっている⁽³⁰⁾。(当該学校の学級数の合計が7学級以上の学校にあっては、当該学校における設備の数量は、数量の欄に掲げる数量に2を乗じて得た数量となる)。ちなみに中学校では、パソコン計測システムが、国庫補助対象の重点「B」、つまり標準的に備えておくことが望ましい設備とされ、数量においては、学校に2セットとされている⁽³¹⁾。

パソコン計測の環境整備については、現在進行形であって、装置があることが前提での教科書の記述とはならないということであろうが、やがてはその環境整備が整うということともいえる。

パソコン計測の場合、センサーを接続するデバイスと一体で考えざるを得ない。コンピュータはOSの変化やソフトの対応、勤務校のコンピュータ環境というものも影響してくる。データロガーにしても電子機器であり、故障や劣化は免れない。また、パソコン計測を導入してしまうと、力学関連のセンサーのみならず他のセンサーの活用も含めてパッケージ的な導入とならざるを得ず、年間を通じた生徒実験全体の構成が変わってくるなど、大掛かりな変更となる。

記録タイマーの利用が標準化されているので、センサー使用(パソコン計測)は各現場の状況に応じた任意という位置づけとなり実態は不透明である。IT活用の小林・笠原・村田(2003)の研究⁽¹¹⁾であるが、これは新潟大学で行われたものであり、大学という環境において可能な環境であったともいえる。その後、十数年経た今日、環境整備は現在進行形とはいえ、優先的に整備を行うべき設備の重点対象となっていないので、SSHや大学教育学部附属学校、特色的なコースを有する学校、何らかの意図をもって投資された学校、あるいは財政措置がとれた自治体の学校や私学の一部でない限りはいかがだろうか。直近の沖野・山岡・松本(2016)の力学指導法の研究授業⁽⁹⁾ですら、その研究のためにセンサー機器の利用を教材会社の協力をえざるを得ないのが現場の実態である。

いうまでもなく、パソコン計測の場合、自ずとグラフ表示までがセットとなり、データ処理の作業が簡易化され、対象とする自然現象の関係性の把握や考察に時間をかけることが可能となる。仮に海外並みにパソコン計測が自由にできる環境になったとき、どのような展開が予想されるだろうか。

第2法則の実験の前までに記録タイマーの扱いに慣れることと同じように、パソコン計測システムの使用勝手に慣れることが求められる。第2法則より前の単元の運動の分析等は距離センサーや光ゲートセンサーの活用となるであろうし、重力加速度の測定では距離センサー、光ゲートセンサー、加速度センサーを活用することなどを通して、第2法則の時のパソコン計測をスムーズに使うこととなろう。

それでも記録タイマーは残るのだろうか。

記録タイマーは、テープの長さがそのままVtグラフになるなど、感覚的にわかりやすく、かつ物理的な破損は別としても基本的に劣化しにくく、長期安定的に使用可能な教材である点において優れている。データ処理のプロセススキルという観点からしても、まずは表データを作成し、関数等を組み込み、そしてグラフ化する操作を学ぶことができる。測定精度や煩雑さといった点でパソコン計測には劣るものの、データ処理のための元データの提供源として優れているともいえる。そして、データ処理で扱うExcelなどのソフトはパソコンの機種変更やOS変更があってもほぼ全国的に安定的に運用が可能である。そういったこともあつてか、コンピュータの活用はパソコン計測ではなく、データ処理の部分に向けられているとの推測があつた。

記録タイマーの使用が標準化されている定番法での教育的な意義を見出すなら、第2法則そのものとは関係のないこのデータ処理の部分となろうか。

5.2 対話の重要性～選択と集中

慣性の法則、慣性質量等も含めて運動の法則は様々な誤概念と対峙しなければならない単元である。この単元の展開のありようを先行研究等が示してきたことを踏まえて、俯瞰的にとらえるなら、生徒との対話を通したやり取りや討論といった言語化のプロセスが必要であろうこと、そして、問題演習を行いながら、力や慣性についての誤認識を持っていないかを確認しながら、必要に応じて補足的な実験を教師が演示実験などを組み込みながら行うことが望ましいことはいうまでもない。つまり、十分な対話ができる時間が欲しいところである。

一方で、Cook Book型の実験とは違い、難易度が上がり、かつ手間暇がかかるであろう「探究活動」が要求されている現行指導要領においては、年間の限られた時間数の中で、どういう指導方法を採用しどこに時間をかけるかという選択と集中が一層求められているともいえる。

5.3 第2法則の生徒検証実験は必要か

第2法則そのものは、Khan Academyのように「そういうものだ」と知識として教えられようと、実験して確認しようとも、物理量のF, m, aの間に成り立つ関係を記述す

るものであって、そこに求められるのは理解というより、自然界にそういう関係があるという事実として受け入れることである。そして、誤概念や本質理解等の対象は、Fそのものや慣性質量である m といった、各物理量であって、むしろ、 $F=ma$ を前提として再度各物理量を捉えなおすことについては、先行研究が示したとおりである。

定番法は、結局は $a \propto F$ 、 $a \propto 1/m$ をそれぞれ独立して検証するストロボ写真によるドライラボの追認である。教科書でストロボ写真等が扱われてしまっている状況で、定番法を帰納的な実験として位置づけることは難しい。馬目(1982)が定番法について、「これらの実験では比例関係しか求めることができず、これは実験しなくてもある程度予想されることでもあるので、生徒達にとっては、あまり興味を持てる実験とはいえないようである。」⁽³²⁾としたが、記録タイマーの処理の煩雑さを差し引いても、この指摘は定番法が本質的に抱えていたものではないだろうか。

つまり、A社やB社が唱えるようなデータ処理の部分でExcel等を用いたコンピュータ活用でのグラフ化を行おうとも、あるいは距離センサー等で力学台車の動きを計測したとしても、定番法の本質は、独立して比例関係を求める2つの実験を行うことといえる。

年間の限られた時間の中で、様々な演示実験や生徒実験の組み合わせを通して、知識・理解も含めて科学的な考え方や態度、スキルを生徒に養うことになるが、第2法則の定番法を実施する教育的な価値は、どこに見出されるであろうか。以下の3点と考える。

- ①吉本(1963)の言う直観的な理解。
- ②再現性、実証性という科学的な見方や考え方の強調。
- ③実験を通じたデータ処理のスキル、誤差原因の考察までの手続き、レポート作成といったプロセススキルの習得。

これに対し、馬目(1982)やD社も用いたおもりで引く実験や、C社の斜面利用など、第2法則ありきで運動方程式を活用して運動を予測分析(間接的な第2法則の検証)する活用型の方が、未知なものを予測し吟味するだけに科学的な探究感に満ちている。そして、第2法則ありきということは、 $F=ma$ の導出はドライラボ等で済ませているということである。また、これらの活用型の実験の場合、自ずと③の内容は含まれ、間接的な検証という視点に立てば、②も含まれる。①の吉本がいう直観的な理解はどうだろうか。それは、 $F=ma$ の関係を分析的にデータで抑えたとともに、体感的に納得するということであるが、生徒側にたった理解ということで優先されることは、80年代以降の先行研究が示したように、むしろ各物理量を持つ概念の理解であり、これに対する指導は $F=ma$ を前提として利用することであった。そうすると、定番法は①の価値を強く唱えて

まで行々に値するだろうか。

活用型は実験内容の難易度の観点もあり、様々な生徒層に対して消化可能なことかどうかということもあり、生徒層に応じては、むしろ検証するという目的を明確にして手続きを強調するという意味で定番法を使うこともあろう。

PSSC物理以来、半世紀近くも当然視されてきたような定番法であり、ある意味物理の根幹の法則を実証する象徴的な実験であるが、かける労力に対しての学びの効果はどれほどあろうか。定番法は教科書会社5社の扱いの内、A、B、Eの3社である。ただし、A社は活用法と定番法の2つを示し、定番法は2番手の扱いとしているので、実質B、Eの2社となる。定番型の検証実験は絶対に無くてはならないというものではないことの証左ともとれる。

5.4 グラフ関数電卓の使用は特殊か

一発法ではグラフ関数電卓を用いているが、コンピュータ計測と比して理科でグラフ関数電卓を用いることはどのように考えられるだろうか。

このたび一発法で用いたグラフ関数電卓ならびに計測センサーは、中学校の数学において、国庫補助対象の重点「B」、数量においては、2人に1台を意味する「ベ」の扱いとされている⁽³³⁾。学習指導要領解説においても「こうした電卓の機能を使うことによって、例えば、関数の学習で、表、式、グラフの関連を有機的に示したり、センサーを取り付けて動的な事象に対する資料の収集に利用したり、あるいは日常生活や社会に関する問題解決において方程式の解を簡単に求めたりすることができる」⁽³⁴⁾と活用が取り上げられている。高校数学では、国庫補助対象において1学級分台数が重点対象となっているのは「関数電卓」の標記となっており⁽³⁵⁾、中学校のように「グラフ関数電卓」とは明記されていないながらも、学習指導要領解説において「社会生活における数理的な考察」の指導において、「コンピュータやグラフ表示などができる電卓、情報通信ネットワークなどを積極的に利用し、生徒の実態に応じた柔軟な指導を行うようにする」⁽³⁶⁾と言及されている。

中学校数学では予算的なバックアップまでがなされているデバイスとなっており、計画通りに物事が進むと仮定して生徒の視点に立ってみると、このデバイスが全く特殊であるということにはならない環境が近づきつつあるともいえる。ただ、高校数学においては、上記のような特殊な単元における活用であって、一般的な代数や解析の学習単元での活用までは言及されていないので、その普及については何とも言い難く、高校の現場の感覚からすると特殊ということになるだろうか。

5.1で示したように理科においては中学校、高等学校ともにグラフ関数電卓は取り上げられていない。世界的には数

学教育においてはグラフ関数電卓の使用が一般的であるということや、実験室を持たない数学にとって、場所を取らず持ち運びが容易で活動性に優れたデバイスということもあろう。これに対し理科は、実験室を有し、コンピュータ設置ができる環境があることや、センサー計測を行う実験装置が実験室にあることが前提であり、かつ同一校内においては物理のみならず化学や生物などの他科目との関係や共用といった面からコンピュータ利用が一般的となろう。

グラフ関数電卓は、データ表示型のデータロガーより汎用性は高いが操作性は計測に特化したデータロガーが勝り、汎用性はグラフ関数電卓とコンピュータでは、コンピュータが勝る。その中間的な性格からも、理科での使用は一般化しにくいと考えられる。また、国庫補助という予算的な後ろ盾という観点からしても理科におけるグラフ関数電卓の使用は、一般化しない特殊な状況といえる。

ただ、数学での使用が一般化されるようになった段階では、同じ校内で理科教師が演示実験用で利用することは、あり得ると考えられる。

6. 一発法を再考する

グラフ関数電卓の使用など、一発法は教材からして特殊な方法であったことは見てきたとおりであるが、では、パソコン計測等の物理的な環境が整っていればこの一発法はどのような位置づけとなるだろうか。

6.1 2つの関数関係を1つにまとめる操作

全ての教科書がドライラボのストロボ写真を扱い、 $a \propto F$ 、 $a \propto 1/m$ の独立した2つの関数を数学的な操作として1つにまとめることを行っている。高校1年生で物理基礎を習う場合、このような操作を行うのは数学ならびに理科の授業を通じて多くの生徒にとって初めてである。 m 一定とか F 一定の条件統制をして独立して求めた関係を同時に束ねるという操作が感覚的に馴染んでいない。さらに、そのプロセスで文字式として F と $1/m$ を乗じて F/m としてしまいが、乗じた F/m に実体の感覚は持ちにくい。そして、数学的操作で $F=ma$ が導かれると、実証していないのに、 $F \propto m$ がいえるとされてしまい、 F 、 m 、 a のいずれもが変数となりうる。更には、MKS単位系に沿って $a \propto F/m$ の比例定数が1となるよう力の単位を[N]とするなど、初学者には何か都合のいい後付感がある。 $F=ma$ を直接に求めたというより、操作して作り出した感覚である。単元配置上の学習の時期や生徒側の視点からしてみると、やや押し切っている部分があると思われる。とはいえ、 ∞ 記号を用いた関数関係の操作そのものは、物理においては本質的でもあり、力学の根幹の法則に迫るこの単元の醍醐味ではある。また、後の様々な単元でも求められる操作であり、そ

の学びのレディネスともなる。

この点、一発法であると、条件統制することなくランダムな動きであってもサンプリングごとの F と a の値を直接プロットするので、 F と a の間に成立する関係に違和感の持ちようがない。しかも、計測の単位が[N] [m/s^2]である。中学校や静力学において力の単位はすでに[N]として馴染んでいるので単位に違和感がない。そして、明らかに比例関係を認め、1次関数の傾きの数値が、物体の質量と一致することを容易に確認する。とても自然な形で $F=ma$ が一次関数のグラフとして現れ、 $F=ma$ が疑いのない関係であることを認めざるを得なくなる。数学的な形式上の操作をして導いたものが、現実の数値と一致するという「実際ちゃんとなっている」を確認するという使い方において優れているといえる。

ただ、このままであると、 m は1次関数の比例定数という意味合いで捉えられかねず、そこに、物理量としての慣性質量の意味は見出しにくい。それは、定番法であったとしても、あくまで F 、 m 、 a の関数関係として $F=ma$ が導かれるのであって慣性質量 m そのものの意味は出てこない。

慣性質量の意味は、むしろ第2法則が定式化されてからあらためてもたらされるものであって、この点では一発法も定番法も変わらないといえる。

6.2 0点調整の意味と慣性質量

一発法であると、慣性質量の意味をその実験プロセスを確認することで、説明しやすくなる利点がある。

計測前に加速度センサーと力センサーの0点調整を行う。これは、重力 mg をセンサーとしてキャンセルしたことを意味する。つまり鉛直方向にありながら無重力の宇宙空間で振るのと同じことを意味する。そこにあるのは慣性の大きさだけということを実物として確認ができる。重力がキャンセルされて0を示しているのに、動かすと（加速度を与えると）力センサーが何を力として計測したかと発問が可能となる。定番法では扱えなかった慣性質量について実験的にその意味を発問できることは意義深いと考える。そして、吉本（1963）がいう筋肉の感覚と結びつけるという意味を感じることも可能である。質量体をぶら下げた力センサーを手で持っている感覚は、0点調整しようとしまいと変わらないが、測定中に上下に振るときに慣性力として、重く感じたり軽めに感じたりするが、その重さ軽さをもたらしている慣性力をもたらす慣性質量を体感していることになる。

また、後の学習での話となるが、鉛直方向のばね振り子の学習の際にもこの実験の話を持ち出すことが可能になる。鉛直方向に吊るしたばねにぶら下げた物体の単振動については、自然長の位置ではなく、つりあいの位置からの変位

のみでつりあいの位置を基準として単振動を行う。つりあいの位置では鉛直方向の mg はばねの張力との合力 0 の状態となり、重力はかかっているがそのことは考えなくてよくなる。このときの単振動はつりあいの位置を 0 として無重力の宇宙空間で振るのと同じことを意味する。そして、慣性の大きさとしての質量 m の単振動となる。

単振動を扱うのはかなり後になるが、こういった説明が繰り返されていくことで、慣性質量という物理量の理解がより深まるであろうことは容易に想像できる。

6.3 一発法の長短所

パソコンのように OS 変化の対応等もなく、恒常的に安定使用できること、持ち運びが容易なこと、電灯線を必要とせず一般教室で手軽に使用可能なこと、教師の演示実験の手軽さなどの使い勝手の良さから、2003年当時行った一発法はグラフ関数電卓を用いた。

グラフ関数電卓を用いることのメリットはそれなりにあるものの、一発法の議論をグラフ関数電卓の使用を前提とすると、特殊かつ限定的な内容となりかねない。また、今日ではタブレットや簡易なデータロガーも含めて様々なものがあるので、グラフ関数電卓ということに限定せず、力センサーと加速度センサーの同時計測という側面で、一発法の利用価値について考える。

そして、グラフ関数電卓で行っていたパソコン計測という手法の理解や回帰分析機能の理解や操作スキルといった学びの効果は、他の機器を用いても同等に行えるものとしてあえて言及しない。

また、5.1で論じたように記録タイマー使用に伴ったデータ処理などの教育的効果が定番法の本質ではない。記録タイマーを使用する部分をパソコン計測とすることができた場合、力学台車を用いた2つの関数関係を求める方法が定番法の本質となる。

これらを踏まえて、定番法の本質に対する一発法の本質の長短所をまとめてみる。

長所

- ・計測からグラフ表示（線形回帰）までが短時間。
- ・討論や対話の時間が確保できる。
- ・討論や対話の途中で何回も再現できる。
- ・慣性質量についての実験的な発問ができる。
- ・慣性力や単振動の単元でも言及できる。
- ・数学的な操作の押し切り感を払しょくできる。

短所

- ・一つ一つの比例関係を追うといった、直観的なものに欠ける。
- ・指導を誤ると質量 m が比例定数との印象を与えかねない。

- ・現行のパソコン活用のデータ処理のスキルの機会を失う。

7. まとめにかえて 一発法を用いた展開例

様々な生徒層や現場の教育環境の実態もあろうが、これまでの考察や6.3の長短所を踏まえ、一発法を効果的に活用するなら、以下のような展開の組み合わせが望ましいと考えられる。

- ①すべての教科書においてストロボ写真が用いられていることから、入試や受験等を睨んだ観点からも、また関数の数学的な操作の学習という観点からもストロボ写真を経由したドライラボ的な操作から運動の第2法則を導出することは外せない。
- ②第2法則の実証として、生徒実験の定番法は用いず、教師演示実験として一発法を利用し、単元指導時間中の対話時間を確保する。対話の観点としては、先行研究の事例や6.3の長所で指摘した慣性質量や数学的な押し切り感なども生徒の理解度に応じながら盛り込む。必要に応じ、生徒に質量体をふらせるなど体感、再現をさせる。
- ③生徒実験としては、第2法則や誤概念に対する理解が進み、運動方程式がたてられるようになって、C社、D社のような第2法則を前提とした探究型の実験を行う。そして、パソコン計測が一般的になった段階では、より深い探究の事例として、Globisens社の事例のような海外の探究型の教材例も参考とする。

注 釈

※注1

Texas Instruments社のグラフ関数電卓 Voyage200を用い、インターフェイスは同社の CBL2を用いた。解析ソフトは Voyage200内蔵の Datamateである。センサーはそれぞれ Vernier社の加速度センサーと力センサーを用いた。これらセンサーの測定値はそれぞれ $[m/s^2]$, $[N]$ で出力される。

※注2

教科書比較には最新の以下のものを使用した。

- A社：数研出版 物基319 改訂版 新編 物理基礎
 B社：第一学習社 物基321 改訂 新物理基礎
 C社：東京書籍 物基312 改訂 新編物理基礎
 D社：新興出版啓林館 物基316 考える物理基礎
 E社：実教出版 物基313 高校物理基礎 新訂版

文 献

- (1) 角島誠「肩肘張らない物理でのワンポイント利用法」T³ Japan 第7回年会 pp. 100-103 (2003)
- (2) 角島誠「受験指導志向のカリキュラムでのグラフ関数電卓を学校導入した物理授業展開例」T³ Japan 第9回年会 pp. 78-81 (2005)

- (3) 吉本市・奥沢芳雄「運動領域における力の概念把握と PSSC の力学実験について」日本物理教育学会誌 第11巻 第1号 p. 20 (1963)
- (4) 加藤一八「PSSC 物理における実験の意義と、実験が原理解の思考過程に及ぼす効果について」名古屋大学教育学附属中高等学校紀要 Vol. 11 p. 109 (1968)
- (5) 斜落均 (1979) 「運動の第2法則に関する力の測定器」昭和54年度 東レ理科教育賞 佳作 (1979). http://www.toray.co.jp/tsf/rika/pdf/s54_11.pdf (2017年6月8日確認)
- (6) 馬目秀夫「運動の第二法則検証実験の工夫と検討」物理教育 第30巻 第2号 p. 70 (1982)
- (7) 滝川洋二「授業分析による「自然認識の過程」の研究 -2- 運動の法則の理解と質量概念の形成を事例として」国際基督教大学教育研究所 教育研究 第28号 pp. 180-181 (1986)
- (8) 川勝博・三井伸雄・飯田洋治『学ぶ側からみた力学の再構成』新生出版 (1992)
- (9) 沖野信一・山岡武邦・松本伸二「科学的概念の形成をめざした理科授業開発 -作用・反作用の法則に関する指導法に焦点化して-」理科教育学研究 Vol. 57 No. 2 pp. 103-114 (2016)
- (10) 沖野信一・松本伸二「科学の基礎概念の形成をめざした理科授業開発 -高等学校「物理 I」における MIF の素朴概念の克服のための指導法」理科教育学研究 Vol. 52 No. 1 pp. 1-12 (2011)
- (11) 小林昭三「力と運動の素朴概念を転換する IT 活用法の有効性」新潟大学教育人間科学部附属教育実践総合センター 教育実践総合研究 2, pp. 39-62 (2003)
- (12) 嶋田隆之「力センサーを用いた力学の授業」物理教育 第61巻 第2号 pp. 88-92 (2013)
- (13) 筒井和幸・本管正嗣「高校物理における PC 計測システムの活用方法について」大阪教育大学附属高等学校池田校舎研究部 研究紀要 pp. 35-40 (2010)
- (14) 筒井和幸「PC 計測システムを活用した対話型授業の実践」大阪教育大学附属高等学校池田校舎研究部 研究紀要 pp. 69-72 (2013)
- (15) 筒井和幸「対話を重視した授業展開の試み～「運動の法則」を主題として～」大阪教育大学附属高等学校池田校舎研究部 研究紀要 pp. 15-20 (2014)
- (16) E. F レディッシュ, 日本物理教育学監訳『科学をどう教えるか』丸善出版 (2012)
- (17) D. R. Sokoloff, R. K. Thornton, Interactive Lecture Demonstrations The Physics suite, John Wiley & Sons, Inc (2004)
- (18) 力センサ ±50N (イージーセンス用). http://www.rika.com/product/prod_detail1.php?catalog_no=E31-6990-16 (2017年6月8日確認)
- (19) 「ここからはじめるアクティブ・ラーニング ICT 教材」p. 18. http://www.kenis.co.jp/products/catalogue/pdf/ict_2016.pdf (2017年6月8日確認)
- (20) 台車の加速度運動 島津理科 物理実験集～パソコン計測～2007年4月 pp. 15.16. http://www.shimadzu-rika.co.jp/kyoiku/pc/images/butsuri_jikken.pdf (2017年6月8日確認)
- (21) GCSE Required Practical Activities pp. 35-48. Data Harvest Group 2016
- (22) Newton's second law, Advanced Physics Through Inquiry 1 Teacher Guide. <https://www.pasco.com/products/experiments/advanced-physics-through-inquiry-1/newtons-second-law.cfm> (2017年6月8日確認)
- (23) Investigating Newton's second law of motion. <http://practicalphysics.org/investigating-newtons-second-law-motion.html> (2017年6月8日確認)
- (24) Newton's Second Law. <https://www.thinkib.net/files/physics/files/practicals/Newtons%20second.pdf> (2017年5月10日確認)
- (25) Newton's second law. <http://www.globisens.net/sites/default/files/docs/sample-activities/PDF%20versions/Newton%27s%20Second%20Law.pdf> (2017年6月8日確認)
- (26) Newton's second law. https://www.vernier.com/experiments/pwv/9/newtons_second_law/%20-%20standards/ (2017年8月4日確認)
- (27) Newton's second law of motion. <https://www.khanacademy.org/science/physics/forces-newtons-laws/newtons-laws-of-motion/v/newton-s-second-law-of-motion> (2017年6月8日確認)
- (28) 前掲書 (8) p. 196
- (29) 「今後の理科教育等設備の整備の在り方について」理科教育等設備基準改訂のための検討会 文部科学省改訂平成23年9月 (2011)
- (30) 前掲書 (29) p. 38
- (31) 前掲書 (29) p. 23
- (32) 前掲書 (6) p. 70
- (33) 前掲書 (29) p. 28
- (34) 中学校学習指導要領解説 数学 p. 166 (2011)
- (35) 前掲書 (29) p. 43
- (36) 高等学校学習指導要領解説 数学 p. 62 (2012)