

1 はじめに

ここ数年のセンサー技術の発達には目を見張るものがある。スマートフォンやゲーム機には様々なセンサーが搭載されており、それらを利用したゲームやアプリケーションもある。

これらのセンサーは、物体の運動や温度、気圧等をリアルタイムにとらえることができるため、記録タイマーなどの従来型の実験装置よりも、手軽にデータを取得して応用することができる。そのため、各社からセンサーとコンピュータを組み合わせたデジタル計測機器が販売されているが、比較的高価であり、予算の制約上必要な種類のセンサー等を入手できないのが実情である。また、スマートフォンを利用するという実践例もあるが、基本的には生徒や教員の個人所有のものであり、実験中の破損などのリスクを考えると利用し難い。市販の実験装置ではなく、小型マイコンとセンサーを組み合わせ装置を自作することも可能であり、今までに様々な事例が発表されているが、製作の難易度が高く容易に作ることはできない。

しかし、最近、安価な小型マイコンボードとセンサーを組み合わせることにより、デジタル計測機器が比較的手頃かつ安価に製作できるようになった。その結果、今まで手頃な機器がなく、測定することが難しかった様々な現象を、生徒の目の前で測定して、結果を表示することができるようになった。しかも、この小型マイコンボードは、扱いが容易であり、初歩的な電子工作の知識とコンピュータプログラミングの知識があれば、比較的簡単に使うことができる。

また、生徒にマイコンボードや電子回路について学習させ、自分でセンサーを使った装置をくみ上げて、物理現象を計測させることもできる。その過程において、ブラックボックス化しているセンサー技術等への理解や、ものづくりの難しさや楽しさを学ばせることもできる。

今回、小型マイコンボードの1つであるArduinoとセンサーを用いて、授業で利用できる実験装置を製作し、授業で活用した。その結果について報告する。

また、生徒の探究活動の一環として、小型マイコンボードとセンサーを利用した物体の運動解析の試みについても併せて報告する。

2 研究方法

- (1) 使用機器について
- (2) 計測装置の製作
- (3) 授業への活用と生徒の反応
- (4) 生徒の探究活動への実践

3 研究内容

- (1) 使用機器について

ア 小型マイコンボード「Arduino」

Arduino(図1)とは、2005年にイタリアで開発されたものであり、小型マイコンボード

(Arduinoマイコン)と統合開発環境 (Arduino IDE) からなっている。ボード上には、デジタル入出力端子やアナログ入出力端子及び、シリアル端子(USB端子)がある。これらの入出力端子に、センサー等のデバイスを接続することによって、制御できるようになっている。

Arduinoはオープンソースハードウェアであり、その仕様やソフトウェアが全て公開されている。そのため、開発元以外からも様々なタイプの互換品が数1000円程度で販売されている。また、いくつかの電子部品とブレッドボード等を購入すれば、非常に安価に自作することも可能である。

Arduinoを動かすためには、制御プログラム(Arduinoでは「スケッチ」と呼ぶ)を書き込まなければならない。このスケッチはパソコン上でArduino IDEを用いて開発し、USB端子を介して書き込む。実験データを取得するためのデジタル計測機器としての用途であれば、スケッチの作成は比較的簡単であり、用途によってはセンサーの販売元が公開しているサンプルスケッチをそのまま利用できる。

センサーやその他電子パーツとArduinoとの配線は、ブレッドボード(図2)で行うと便利である。ブレッドボードとは電子パーツや配線のためのジャンパー線を差し込むだけで回路が組めるようになっているものである。パーツの抜き差しで配線ができるので、組み替えることによって様々な回路を1つのボードで組むことができる。

イ センサーについて

Arduinoをデジタル計測機器として利用するには、センサーが必要になる。センサーの価格は高くても数1000円程度であり、比較的安価に入手できる。また、これらのセンサーをArduinoで利用するためのスケッチは、販売元等がサンプルスケッチを公開しているため、プログラムの開発に時間を取られることはない。以下に授業で利用できそうな主だったセンサーを挙げる。

(ア) 距離センサー

赤外線や超音波を照射し、その反射波が返ってくるまでの時間から対象物との距離を測定する。力学台車などを運動させた時の、移動距離の時間変化等を求めることができ

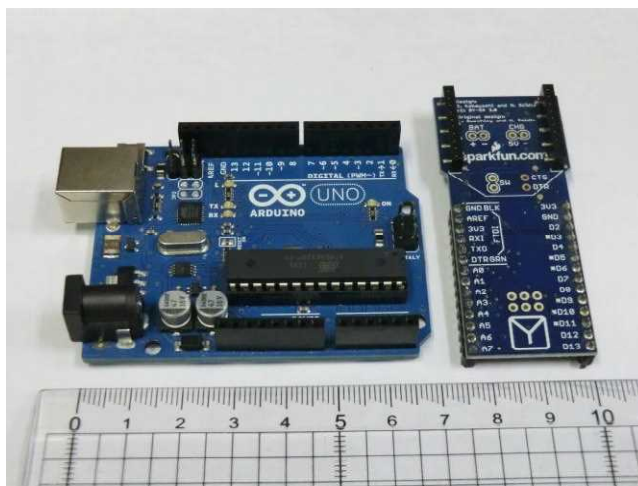


図1 Arduino UNO(左)とArduino FIO(右)

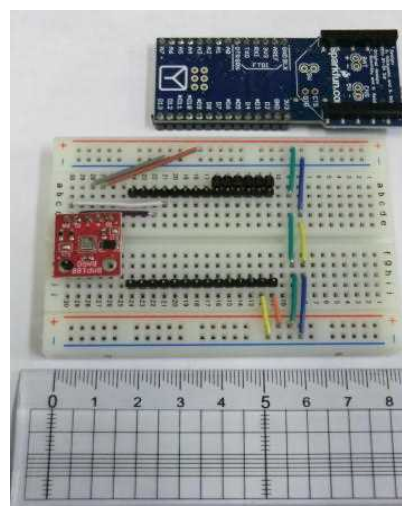


図2 ブレッドボード

る。赤外線タイプより、超音波タイプの方が測定レンジも広く使いやすい。HC-SR04超音波距離センサーモジュールか、Maxbotic社のLV-EZシリーズが、Arduinoのサンプルスケッチも入手しやすく、数100～数1000円程度で販売されている(図3)。これらは、相対的な距離であれば1cm程度の精度で測定が可能である。しかし、測定レンジ内に超音波を反射する物体が複数あったりすると、目的の数値を得られないので、使用する際には注意が必要である。

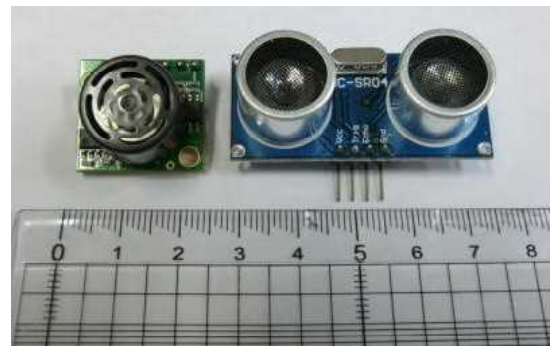


図3 超音波距離センサー
(左)LV-EZ1 (右)HC-SR04

(イ) 温度センサー

温度センサーには、半導体、サーミスタ、熱電対等がある。特に熱電対は、測定範囲が広範囲(K型熱電対で -200°C ～ 1000°C 液体窒素や炎の温度も測定可能)であり、なおかつ時間応答が半導体やサーミスタに比べて速いという特徴を持つ。そのため、比較的短時間に温度変化が起きる現象(断熱膨張・圧縮等)をとらえることができる。入手しやすいのはMaxim社のMAX31855熱電対温度センサー(図4)を利用したモジュールである。価格は3000円程度である。ただし、このモジュールは $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 程度の誤差があるため、常温付近の測定では注意が必要である。

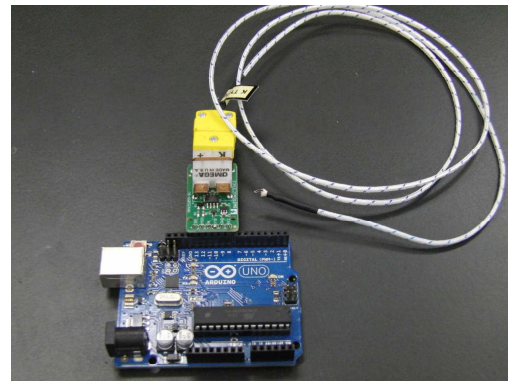


図4 熱電対温度センサー

(ウ) 大気圧センサー

安価で入手しやすいセンサーは、ほとんどがデジタルセンサーであり、校正をすることなしに大気圧の値を直接得ることができる。また、温度センサーを内蔵しているものが多い。Bosch社製BMP180を搭載したセンサーモジュール(図5)は、 300hPa ～ 1100hPa まで精度 $\pm 0.12\text{hPa}$ で測定できる。また、温度センサーも内蔵しており $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ の精度で測定可能である。価格は1200円程度である。本来ならば、気象観測などに使うセンサーであるが、このセンサーと後述のXBee、及びArduino FIOを組み合わせ、密閉された容器内の気圧が測定できるため、ボイル・シャルルの法則の演示実験に利用できる。

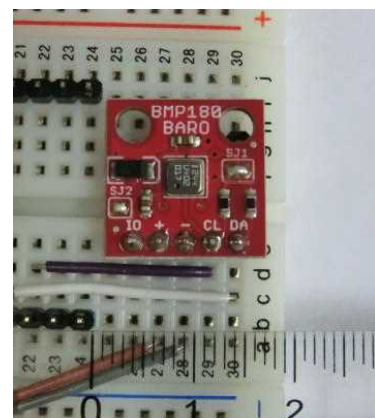


図5 大気圧センサー

(エ) 加速度センサー

生じた加速度を重力加速度を単位として出力するセンサーである。2014年現在、比較的安価で入手が容易である加速度センサーは、FreeScale社製のMMA7361アナログセンサー(測定レンジ $\pm 1.5\text{G}$, 6G)と、MMA8452Qデジタルセンサー(測定レンジ $\pm 2\text{G}$, 4G , 8G) (図6)である。双方ともArduinoで使いやすいようにモジュール化されており、価格は1000～2000円程度である。なお、測定レンジの単位である「G」は、重力加速度のことであり、 $1\text{G}=9.8\text{ m/s}^2$ である。

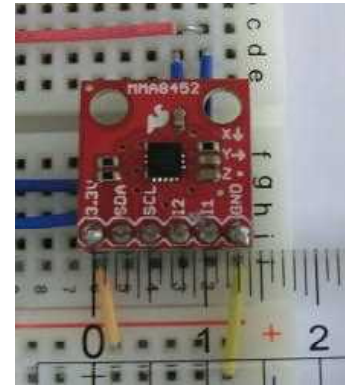


図6 加速度センサー

各センサーともX, Y, Zの3軸に対してそれぞれ重力加速度を1とした場合の加速度の値を出力する。通常、Z軸(鉛直下向き)は重力を検出して1Gを出力するので、これを使って各軸の値の校正を行う。なお、実際のセンサーの出力値は、静置状態で常に $\pm 0.02\text{m/s}^2$ 程度のふらつきがある。

ウ XBee

XBee (図7) は、BluetoothやWi-Fiと同じ無線通信方式の1つであるZigBeeという規格で動作するデバイスである。小型軽量かつ低電力で動き、伝送速度は最大250kbps、伝送距離は30m(XBee)～1.6km(XBeePro)と比較的長いため、室内だけでなく、屋外でも利用することができる。

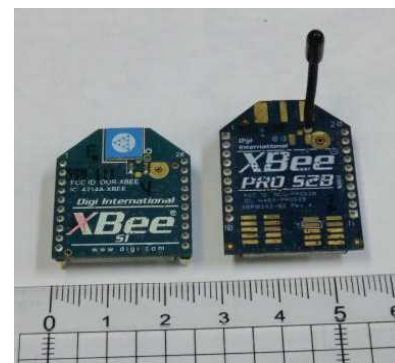


図7 XBee(左)とXBeePro(右)

XBeeは、Arduinoとの接続も容易であるため、このXBeeとArduinoを組み合わせることによって、Arduino-PC間の通信をワイヤレス化することができる。後述するように、運動する物体に加速度センサーを付けた小型のArduinoとバッテリーを載せ、加速度の変化や、密閉された容器内の気体の圧力や温度の変化をリアルタイムで見ることができる。

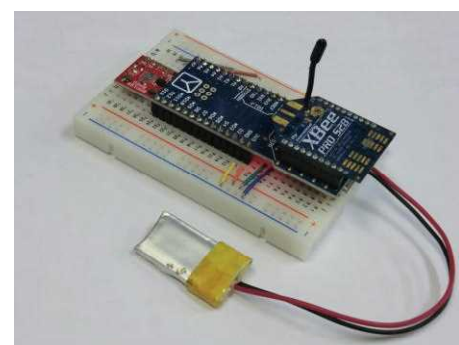


図8 XBeeを載せたArduino FIO

エ Processing

Arduinoからは、シリアル通信でデータが送られてくる。その値を見るためにはターミナルソフトで直接見るか、あるいは表示用のソフトを自作しなくてはならない。今回、表示用ソフトの開発にはProcessing (図9) を用いた。Processingは無料で使えるオープンソースのプログラミング言語である。統合開発環境(IDE)が用意されており、グラフィック機能が簡単に利用できたり、視覚的なフィードバックが即座にあるので、プログラミング未経験者でも比較的容易にプログラムの開発を行うことができる。なお、Processingには64ビット版と32ビッ

ト版があるが、シリアル通信をサポートしているのは32ビット版のみであるため、Arduinoとシリアル通信でデータをやり取りするためには、32ビット版を使用する必要がある。

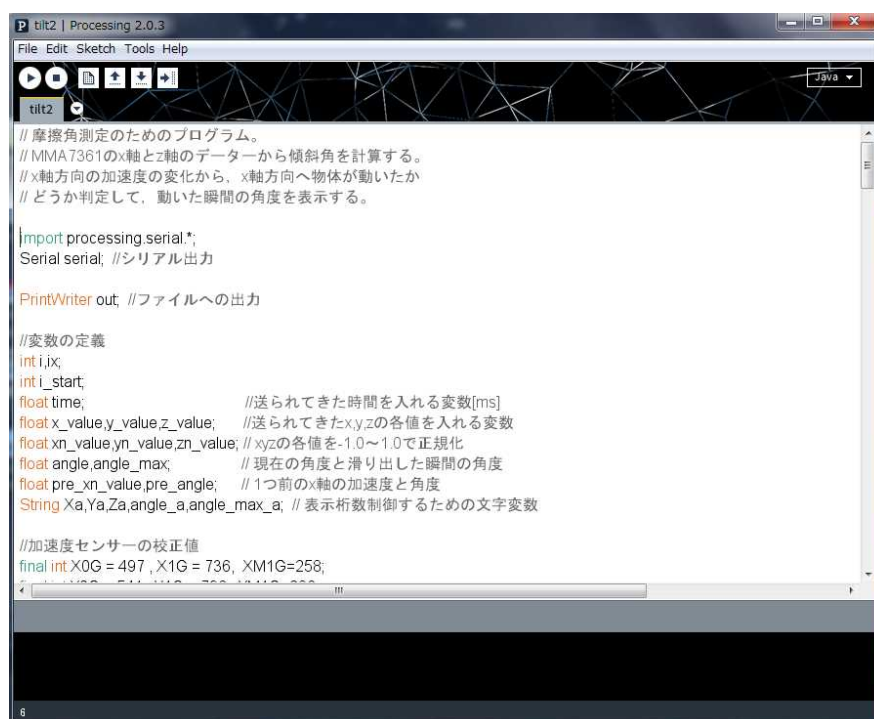


図9 Processing

オ 必要な機器について

Arduinoを利用したデジタル計測をするために必要な機器をまとめると、以下の通りである。

(ア) 最低限必要なもの

- ①Arduino 本体 Arduino UNO が一般的(3000～4000円程度)
- ②ブレッドボードとジャンパー線，USBケーブル 配線等に必要(それぞれ数100円程度)
- ③計測するものに合ったセンサー(前述したものを表1にまとめた)

表1 センサーとその用途

センサー	品名 (モジュール)	参考価格	用途
超音波距離センサー	HC-SR04	1000円程度	運動体(力学台車等)の距離の時間変化の測定
	LV-EZ1～4	3500円程度	
熱電対温度センサー	MAX31855	3000円前後	温度の時間変化が速い現象の測定
大気圧(温度)センサー	BMP180	1200円程度	ボイルーシャルルの法則の検証
加速度センサー	MMA7361	1000～	物体の加速度の直接測定
	MMA8452Q	2000円程度	

(イ) ワイヤレス化するために必要なもの

- ④XBee 2個(PCとArduino) (XBee シリーズ1なら4000～5000円程度)

XBeeには様々な種類(シリーズ)があり，同じシリーズを2つそろえる必要あり

⑤XBeeエクスペローラUSB PCとXBeeの接続用 (3000円弱)

⑥Arduino XBeeシールド もしくは Arduino FIO (2000～3000円程度)

⑦バッテリー (数100～2000円程度)

Arduino UNOなら9Vの積層乾電池(006P型)と接続用のコード

Arduino FIOなら3.7Vリチウムポリマー電池が便利

(ウ) ソフトウェア

⑧Arduino IDE <http://www.arduino.cc/> より入手可能

⑨Processing等のプログラム言語

Processingは <https://www.processing.org/> より入手可能

①～⑦については、スイッチサイエンス(<http://www.switch-science.com/>)、秋月電子通商(<http://akizukidenshi.com/>)等から容易に入手できる。

(2) 計測装置の製作

(1) に挙げたセンサーとArduinoを利用すると、様々な物理現象を測定することができる。以下にいくつかの応用例を示す。なお、各図に示してある表示画面は、Processingを用いて作成した。

ア 超音波距離センサーを用いた装置

超音波距離センサーとArduinoを用いると、力学台車を運動させた時の距離の時間変化の様子を、リアルタイムで $x-t$ グラフに表示させることができる。ここで使用したセンサーは、HC-SR04超音波距離センサーモジュールである。スイッチサイエンスから800円程度で入手できる。Arduino用のサンプルスケッチや接続方法も載っているの、比較的簡単に装置を組むことができる。

図10は、装置の外観である。センサーをブレッドボードに差し、ジャンパー線でArduinoと接続してある。図11は、図10の力学台車(おもりを入れて質量約2kg)を、0.5 N の一定の力で引いて等加速度運動させた時(左)と、等速度(慣性運動)させた時(右)の $x-t$ グラフである。測定間隔は、使用するコンピュータの処理速度と測定する距離にも依存するが、記録タイマーとほぼ同じ約20～25ms毎に測定が可能である。また、同時にcsv形式のファイルにデータを保存すれば、表計算ソフトでより見やすい形にグラフ化することも可能である。

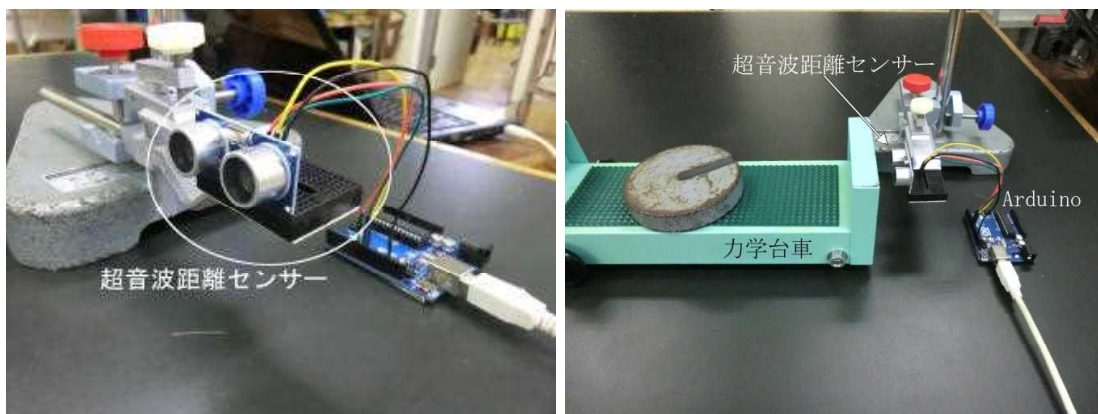


図10 超音波距離センサーによる力学台車の運動の測定

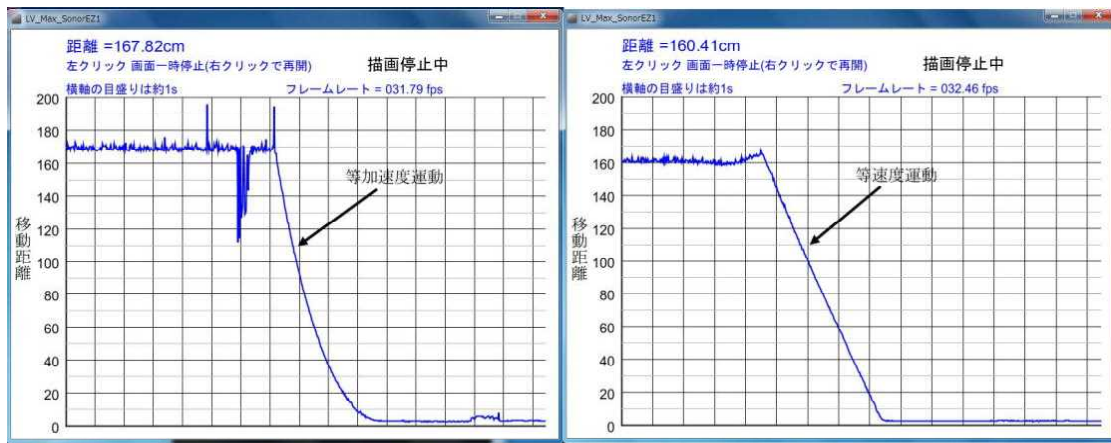


図11 超音波距離センサーで計測した力学台車の運動の $x-t$ グラフ
横軸は時間(1目盛り1秒), 縦軸は距離(1目盛り20cm)である

イ 熱電対温度センサーを用いた装置

熱電対温度センサーは、熱容量が比較的小さいので、短時間の温度変化をとらえられるため、断熱膨張や断熱圧縮の時の温度変化の様子を見ることができる。使用したセンサーは、Maxim社のMAX31855温度センサーモジュールであり、スイッチサイエンス等から3000円程度で入手できる。サンプルスケッチも同社のサイトから入手できる。

図12は、熱電対をペットボトル内にエポキシで封入し、ペットボトルロケット発射装置の空気弁を使って、内部の気圧をポンプで約2気圧に加圧後、弁を開け圧力を一気に下げた時(断熱膨張)の温度変化を表している。

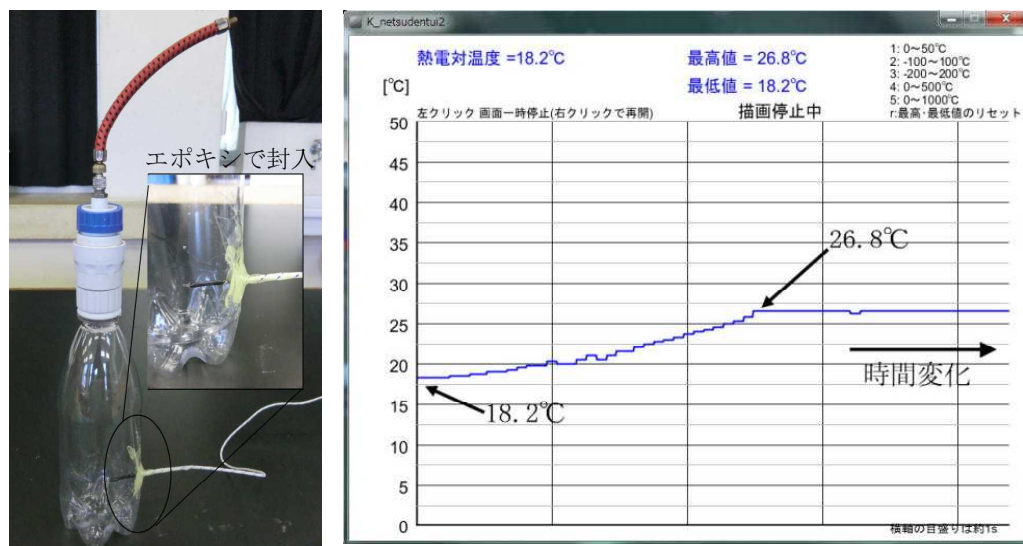


図12 断熱膨張の温度変化

ペットボトル内を約2気圧に加圧後に弁を開放した 約9°C程度下がる様子が確認できる

また、図13は、市販の圧縮発火器のシリンダー内に同じように熱電対を封入し、断熱圧縮させた時の様子を示している。圧縮発火器は、綿などが発火するため、内部温度は瞬間的にはかなり高温になっていると思われるが、図13から分かるように、綿を発火させた時の温度変化を計測したところ、発火温度(綿の場合数100°C)まで上昇している様子を計測すること

はできなかった。しかし、実際に数値で変化を見せることによって、断熱圧縮・断熱膨張時の温度変化を印象づけることができる。

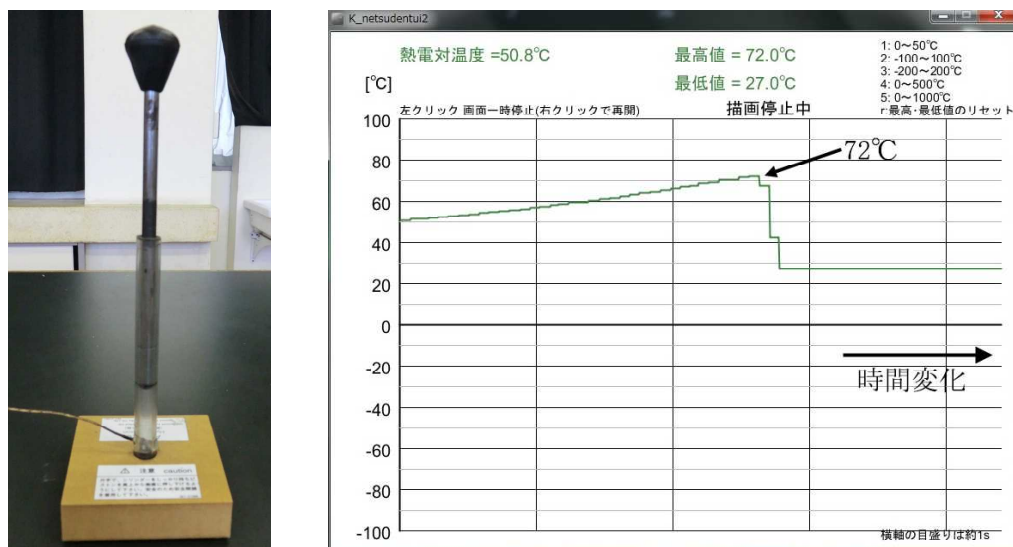


図13 断熱圧縮の温度変化

グラフは圧縮発火器内に綿を入れて発火させた時の温度変化

ウ 大気圧センサーを用いた装置

密閉した容器の中に、XBeeによってワイヤレス化したArduino FIOと温度センサー付きの大気圧センサー(BMP180大気圧センサーモジュール)を入れ、容器を冷やしたり温めたりすると、内部の圧力 P と温度 T の変化を測定できるので、気体の圧力 P 、体積 V 、及び温度 T の間の関係を示すボイル・シャルルの法則、 $\frac{PV}{T} = (\text{一定})$ 、の検証を演示することができる。

図14は、容積1Lの密閉できるビンの中に装置全体を入れ、氷水(温度約5°C)やお湯(温度約60°C)の中に入れて内部の温度の変化をさせた時の様子である。この場合、体積 V を一定とした場合の圧力 P と温度 T の関係を調べることができる。図15は、図14の実験をした時の、内部の気圧と温度の時間変化の測定値を、csv形式で保存した後、表計算ソフトで処理してグラフ化したものである。気圧の変化に対して、温度の変化がゆっくりに見えるのは、内部の温度が均一になるまでに時間を要することと、温度センサーの反応に時間がかかるためだと思われる。

また、表2は、代表的な温度と気圧における $\frac{P}{T}$ 、 $\frac{PV}{T}$ と理想気体の $\frac{PV}{T}$ を求めたものである。ただし、容器の体積を $V = 1.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 、空気の物質量を $n = \frac{1}{22.4} = 4.46 \times 10^{-2} \text{ mol}$ 、気体定数を $R = 8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ とした。

気体の法則の単元は、定量的な実験がやりにくい単元であるが、このセンサーを用いれば、表2の様に検証実験を実施することができる。

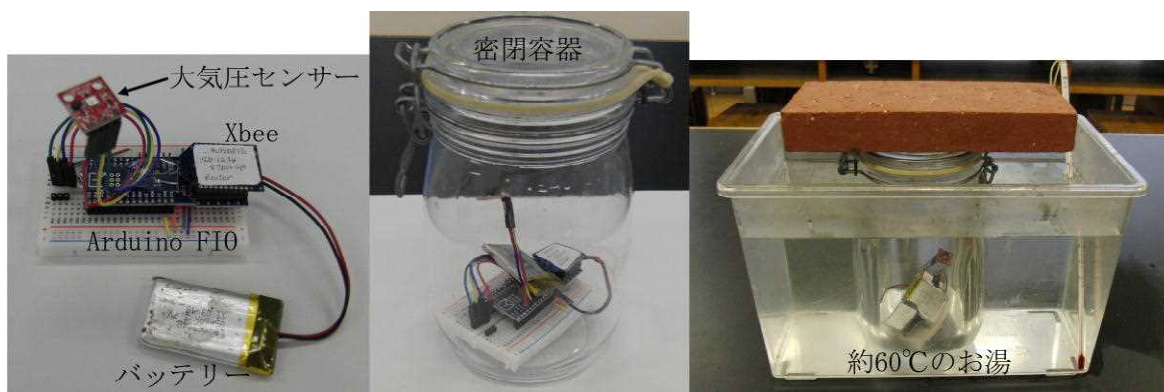


図14 大気圧センサーによる空気の圧力・温度変化の測定

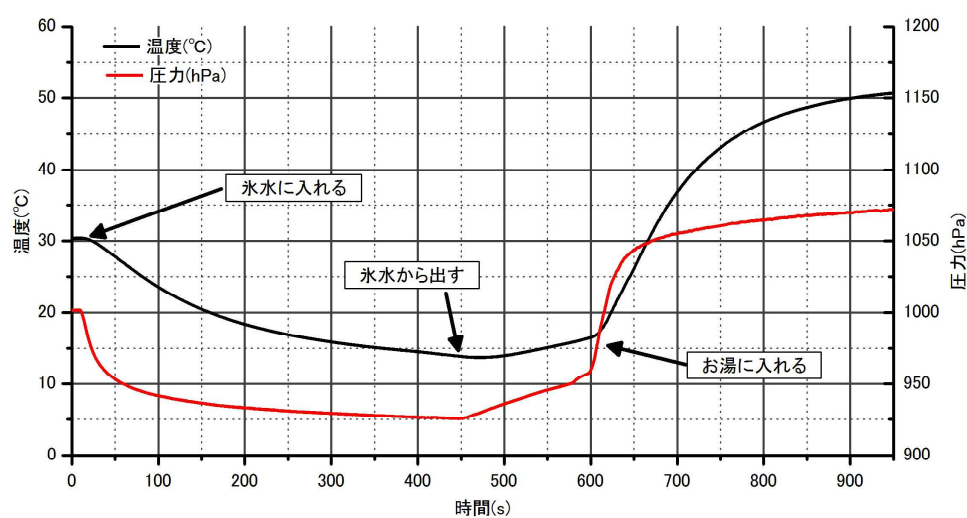


図15 気圧と温度の変化の測定結果

表2 気圧と温度の関係

時間(s)	温度(°C)	温度(K)	気圧(hPa)	$\frac{P}{T}$ (hPa/K)	$\frac{PV}{T}$ (J/K)	$\frac{PV}{T}$ (J/K) (理想気体)
0	30.4	303.4	1001.5	3.30	0.330	0.370
450	13.9	286.9	925.8	3.22	0.322	
950	50.7	323.7	1072.7	3.31	0.331	

エ 加速度センサーを用いた装置

加速度センサーは、物体の運動の加速度を直接測定できるため、物体の運動をより直接的にとらえることができる。最近はスマートフォンやタブレット等を実装されていて、値を表

示させるアプリケーションも多数あるため、知っている生徒も多い。しかし、ブラックボックス化してしまっている。Arduinoと加速度センサーを使うと、図16のようにセンサーが直接見られるので、より生徒の興味関心を引き出すことができる。

しかし、加速度センサーの測定値から、速度や移動距離を求めるには、大きな問題がある。図16の右側のグラフは、小型力学台車の上にブレッドボード上にArduinoと加速度センサー(MMA8452Q)、バッテリー及びXBeeを載せて、一瞬だけ手で押して慣性運動させた後、静止させた時の加速度の変化を表している。グラフの○囲み部分がその出力値である。大きな変化は、押した時や、止める時に生じた加速度をとらえたものであるが、細かい変動はノイズである。このノイズの影響が大きいと、加速度の検出値から積分して速度や距離を求めると、大きな誤差が現れてしまい正しい値を求められない。この問題に対する解決策は見いだせていない。

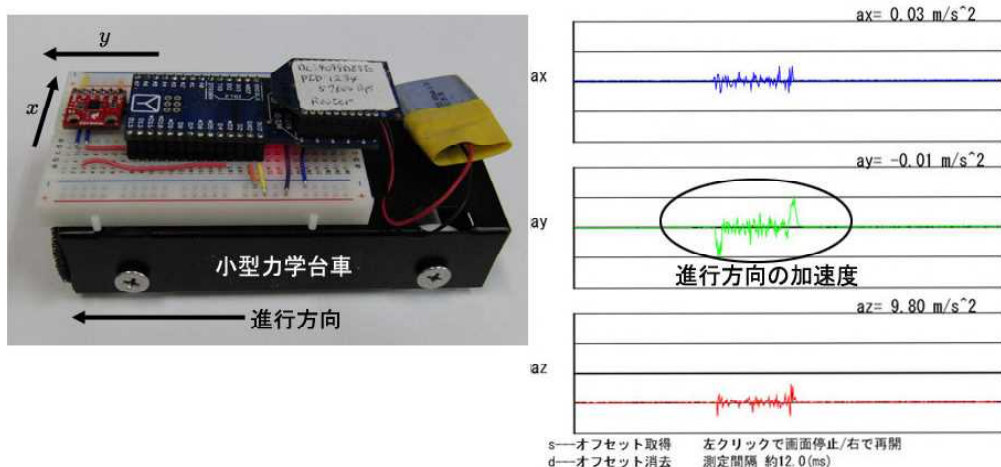


図16 3軸加速度センサーによる力学台車の加速度変化の測定

(3) 授業への活用と生徒の反応

(2)で紹介したセンサーの中で、超音波距離センサーによる $x-t$ グラフの表示と、熱電対温度センサーによる断熱圧縮・膨張の温度変化の表示について、物理基礎受講者2クラス81人に対して授業で実施した後、生徒の反応をアンケートによって調べてみた。

ア 超音波距離センサーによる物体の運動の演示実験

物体が一定の力を受け続けた場合の運動について、その時の $v-t$ グラフは、図17のグラフのどれになるかを選ばせた後、超音波距離センサーを用いて、実際に力学台車の運動 $v-t$ グラフを示した。その後、記録タイマーを用いた生徒実験を実施し確認させた。

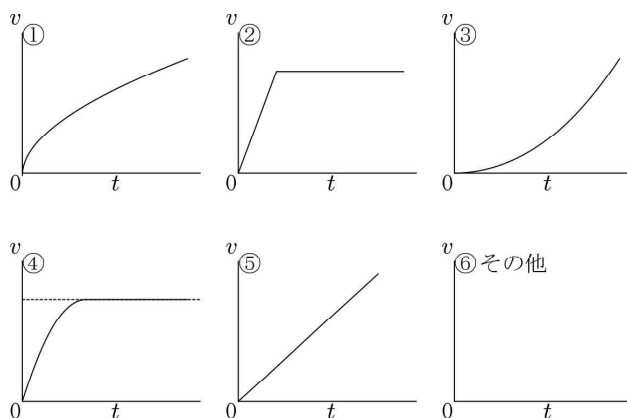
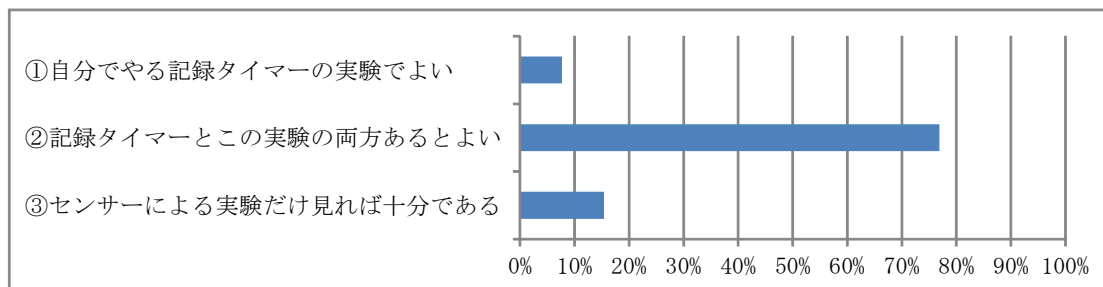


図17 一定の力を受けた物体の運動のグラフの選択肢

【アンケートと回答】

(質問) 超音波距離センサーによる $x-t$ グラフについて、記録タイマーによる実験と比べてどう感じたか。



<生徒の感想より>

- ・記録タイマーの実験の後に、距離センサーのグラフをやるとよい。
- ・実験に使うのには無理があるが、事象を確認するなら十分だと思う。
- ・記録タイマーでもできる実験はやらなくてよい。

イ 熱電対温度センサーを用いた断熱膨張・圧縮の演示実験

熱力学第一法則より、気体に加えた仕事 W ，気体に加えた熱 Q ，及び、気体の内部エネルギーの変化量 ΔU の間には、

$$\Delta U = Q + W$$

の関係がある。よって、気体に仕事を加えると、内部エネルギー(温度)が増加し、気体が外部に仕事をする、内部エネルギー(温度)が低下する。このことを説明した後、(2)イで示した圧縮発火器やペットボトル内に熱電対を封入した装置で、断熱膨張、断熱圧縮の際の温度変化の様子を観察した(図18)。

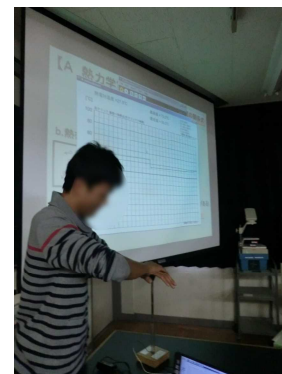
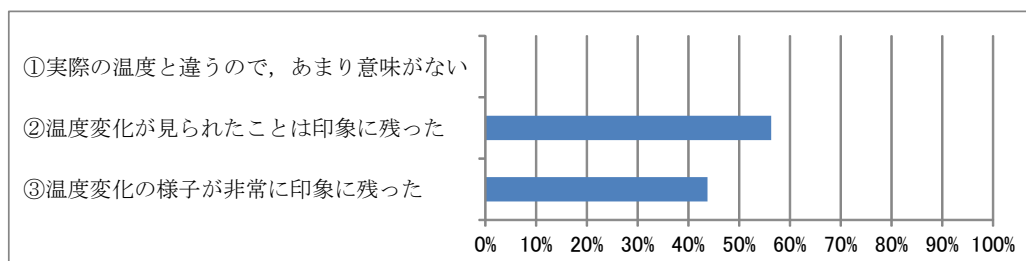


図18 授業の様子

【アンケートと回答】

(質問) 熱電対温度センサーを利用して断熱圧縮・膨張の温度変化を見た。実際の温度とは違った値であったが、このことについてどう思うか。



<生徒の感想より>

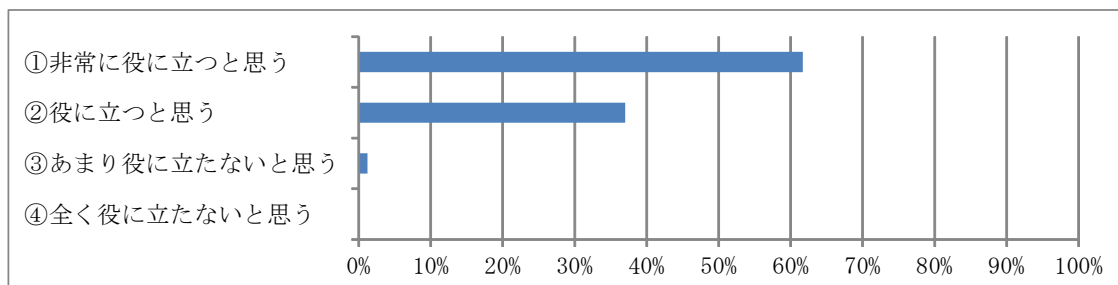
- ・言葉だけでなく、実際の温度変化をすることが見られたので印象に残った。
- ・数値が変化するグラフが見られるのはよい。
- ・表示の画面が見にくい。もう少し分かりやすい画面にして欲しい。

ウ その他装置全般に対するアンケート

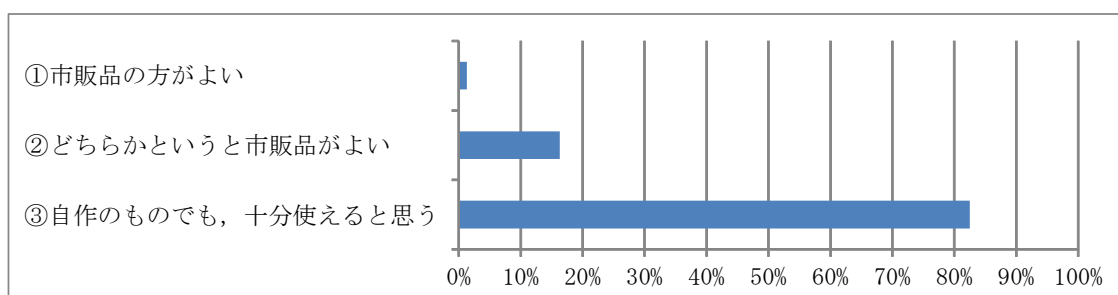
今回開発した装置や、このようなデジタル技術に興味があるかについて聞いてみた。

【アンケートと回答】

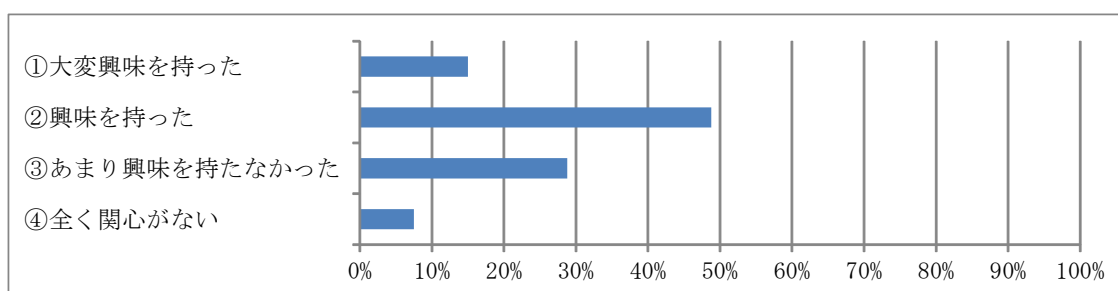
(質問) デジタル計測機器は授業理解に役立つと思うか。



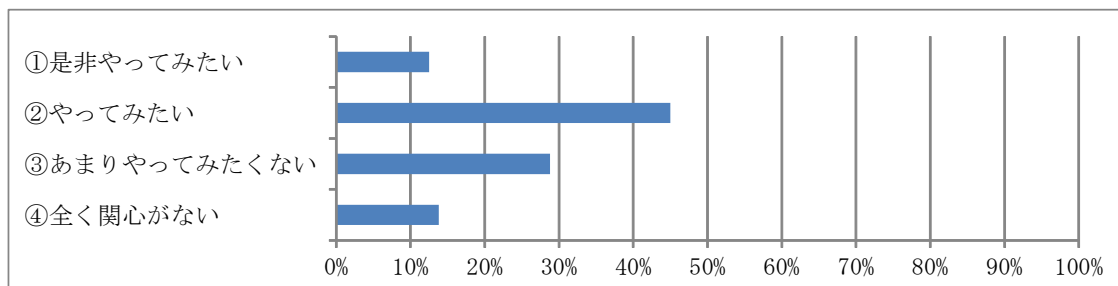
(質問) (高価な)市販の装置に比べて精度・見やすさともに見劣りするが、どう思うか。



(質問) センサーや電子回路に興味を持ったか。



(質問) 自分でもこのような装置を作ってみたいか。



＜生徒の感想より＞

- ・市販のものの方が見やすいと思うが、十分変化が分かったので理解しやすくなった。
- ・もっといろいろ作って授業に取り入れて欲しい。
- ・市販品の価格が高いから作るという考え方は好きである。
- ・装置そのものの仕組みについてもっと知りたい。

これらの結果より、完成度の高い市販の装置・ソフトでなく、簡易的な表示しかできなかったとしても、デジタル計測装置が生徒の興味関心を引く題材を提供することが改めて確認できた。価格面等を考慮すると、今回作った装置を授業に導入する価値は十分にあると考える。

一方、完成度の低い装置ならではの問題もあり、表示を見やすく分かりやすくすることや、精度を高める工夫が必要であることも分かった。また、力学台車の運動では、記録タイマーによる実験(生徒実験)もあった方がよいと答える生徒が多数いることから、従来の実験方法の重要性も確認できる。デジタル計測装置による実験は、従来の生徒実験に代わるものではなく、互いに補完するものであるということが分かった。

(4) 生徒の探究活動への実践

生徒にArduinoとセンサーを利用した測定装置の製作をさせることは、ブラックボックス化しているデジタル機器の仕組みや、ものづくりを体験することによって作る楽しさや難しさを学ぶよい機会となる。また、センサーから得られたデータから測定したい現象を導き出す過程は、物理現象の理解につながると考えられる。しかし、時間の関係上、通常の物理の授業内で実施することは困難である。

本校では、総合的な学習の時間として、週1時間「自由研究」と称する課題研究の時間がある。そこで、希望者を募り、この自由研究の時間を使って、現在、Arduinoと加速度センサーを用いた物体の運動解析(モデルロケットの運動解析)について取り組んでいる(図19)。

生徒のほとんどは、電子回路やプログラミングに関する知識は持っていないため、今年4月からスタートした取り組みであるが、なかなか思うようには進展していない。当初は、これをテストケースにして、通常の授業の中で実施できるように考えていくつもりであったが、現実にはかなり厳しいものがある。しかし、生徒はものを作る難しさと、楽しさを感じながら取り組んでおり、一定の成果は得られていると感じている。今後は、部活動や課外活動への発展を模索していく予定である。



図19 装置製作に取り組む生徒

4 おわりに

デジタル計測機器は、実験結果などをリアルタイムで示すことができたり、短時間の温度変化など、今まで測定することができなかった現象を測定することができるため、授業のツールとして非常に利用価値が高い。今回製作したArduinoとセンサーを利用した測定装置は、市販の製品と比べると、性能面で劣るが、安価で製作できるため、手軽に導入することができる。また、生徒に近年のデジタル技術に接する機会を与えることもでき、生徒の探究活動のテーマとしても適している。

今回、本研究で2年間にわたり装置開発を進めていて感じたことは、我々の身の回りにあるセンサーを利用したデジタル機器は、実によくできているということである。手作りの測定装置では、誤差の補正、ノイズの処理等、精度よく求めるためにはかなりの工夫や試行錯誤が必要である。現在、探究活動に取り組んでいる生徒も、製作を通してこのことを実感し、ものづくりの難しさがよく分かったようである。

参考文献

- ・Massimo Banzi, Arduinoをはじめよう, 船田巧 訳, 第2版, オライリージャパン, 2012
- ・小林茂, Prototyping Lab 「作りながら考える」ためのArduino実践レシピ, オライリージャパン, 2010
- ・Casey Reas ;Ben Fry, Processingをはじめよう, 船田巧 訳, オライリージャパン, 2011
- ・谷尻かおり, Processingによる画像処理とグラフィックス, カットシステム, 2012

Arduino, センサー等の入手先

- ・スイッチサイエンス <http://www.switch-science.com/>
- ・秋月電子通商 <http://akizukidenshi.com/>
- ・ストロベリーリナックス <http://strawberry-linux.com/>