

付属平安高校高大連携科目「理数研究」 2019年度研究報告

小 熊 龍
Ryu OGUMA



先端理工学部機械工学・ロボティクス課程 2年
2nd-year student, Mechanical Engineering and Robotics Course

1. 研究概要

1.1 はじめに

龍谷大学付属平安高等学校には、プログレス理系クラスの生徒が数人で班を組み、自由なテーマで学術研究を行う探求型授業「理数研究」がある。本記事は「理数研究」2019年度の研究報告である。

本研究の最大の特徴は、機械学習ソフトを用いて実験データの解析をした点である。機械学習ソフトを用いることで、データの解釈から個人の裁量、主観を排除できるため、データの客観的な傾向分析が可能になる。そして機械学習を用いたデータ解析は主に大学等での専門的な研究に用いられる手法であるため、高等学校における理科実験のみならず、本研究のような古典力学の実験において機械学習を用いる試みは、極めて稀であると思われる。なお、機械学習ソフトの使用は龍谷大学理工学部情報メディア学科（当時）の奥健太先生のご指導の下に行った。

2019年12月14日、理数研究で得られた成果を龍谷大学瀬田学舎2号館102講義室にて行われた上記の発表会にて「機械学習で解析する、物質の跳ね返りやすさ」と題して発表した。発表時の様子を図1に示す。

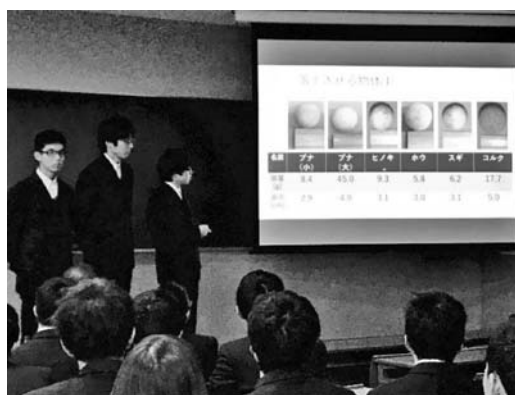


図1 発表時の様子

1.2 科目「理数研究」について

付属平安高校理数専修クラスの3年次で受講する「理数研究」は、週1回2時間連続の授業である。我々は1年かけて研究を行ったが、現在平安高校は3学期制であり、1学期に基本的な研究方法やデータの扱い方を学ぶための「ミニ研究」を行い、2,3学期に大学の先生より提示されたテーマについて研究する。

研究では、龍谷大学に直接赴いて実験機器を使用したり、大学教員とオンラインミーティングやメールのやり取りを行ったりして研究を進めているため、高校生の間から大学での研究活動を体験できる

科目となっている。

授業最終日には、研究成果のプレゼンテーションを高校または大学で行うのみでなく、オンラインでライブ配信も行う。研究成果の発表会には龍谷大学の先生方も参加するため、高校生は研究テーマ設定から発表時の質疑応答までの研究活動の一連の流れを学ぶことができる。

1.3 研究の背景

理数研究 2017・2018 年度は反発係数について研究が行われた。『物理 改訂版』で反発係数の記述を見ると、「反発係数は、衝突におけるはね返りの度合いを表す量である。その値は、物体や壁の材質などによって決まり、衝突する速さにほとんど関係しない。」とある。高校での先輩が反発係数を研究していたことに加え、反発係数は材質以外の他、何に関係するのか、また反発係数はどのようなメカニズムで材質による差が生まれているのかという点に興味を抱いたため、反発係数について研究を開始した。

2. 研究内容

2.1 緒言

物質は、物質ごとに特有の物理量を持っている。その物理量の一つに、反発係数がある。反発係数とは、物質の跳ね返りやすさを表す無次元の物理量で、物質によって異なる。その値は 0 から 1 の間であり、1 に近づくほど跳ねやすい性質をもつ。そこで物質ごとの反発係数を調べ、その差を比較することによって、反発係数が物質によって異なる理由が明らかになると考える。

仮に反発係数が近い値をとる物質があれば、性質に何らかの類似点があると考えている。そこでは、客観的に共通点を探し、物質の性質を評価すべきである。

本研究では、類似するデータを分類する機械学習ソフトを用いてデータを処理し、反発係数の性質を評価した。

2.2 実験手法

実験には、9 種の異なる物質を用意する。物質の形状は全て球である。これは、着地した際の接触面が常に円形（相似）であるため、衝突時の角度について考慮する必要がないためである。

用意した球は表 2.2.1 の通りである。表 2.2.1 の物質は、ホームセンターで取り扱っていたものを選んだ。ブナ・鉄については、直径の異なる球を用意できたため、それぞれ（大）、（小）として区別した。実験環境は図 2.2.1 に示す。

図 2.2.1 のように、机に花崗岩の板とスタンドを置いた。花崗岩の板は床材に使用する。スタンドは、球を落とす高さを固定するために使用した。反

表 2.2.1 実験に使用した球

名称及び材質	直径[cm]	質量[g]
ブナ（大）	4.90	45.0
ブナ（小）	2.90	8.90
ヒノキ	3.40	9.00
ホウ	3.00	6.00
スギ	3.10	6.00
コルク	5.00	17.7
熱可塑性ゴム	5.00	58.0
天然ゴム	4.14	58.0
スーパーボール	2.45	8.80
鉄（大）	3.30	150
鉄（小）	2.85	94.7



図 2.2.1 実験環境

発した高さの計測用に、メジャーをスタンドと平行に置いた。球をスタンドの高さに合わせた際に、球の衝突面と落とす高さが等しくなるようにスタンドを固定し、そこから球を落下させた。球を落下させる高さは、実験器具の都合上 30 cm から 70 cm までに制限された。落下させる高さは 10 cm おきに設定した。球が花崗岩と衝突して跳ね返る様子をビデオカメラで撮影・記録し、スロー再生して床から球の底面までの高さを計測した。反発係数は落とした高さとして跳ね返った高さの比を用いて算出した。算出方法は以下の通りである。

落とした高さを h 、跳ね返った高さを h' とおく。球を自由落下させるので、落下時の球の速さは $v = \sqrt{2gh}$ …①、跳ね返った球の速さは $v' = \sqrt{2gh'}$ …②である。反発係数 e は、反発前後の速度の比、すなわち $e = \frac{v'}{v}$ で表されるので、これに①、②式を代入して、 $e = \frac{\sqrt{2gh'}}{\sqrt{2gh}}$ となる。分母分子から $\sqrt{2g}$ を消去し、 $e = \sqrt{\frac{h'}{h}}$ を得る。これに値を代入し、反発係数を算出した。

実験 1：落下させる高さ・回数の決定と反発係数の算出

実験に際して、球を落下させる高さとお数を決定するため、予備実験を行った。

①落下させる高さとお標準偏差

30 cm から 70 cm まで 100 回ずつ物体を落下させ、高さごとの標準偏差を球毎に求めた。その結果を図 2.3.1 に示す。

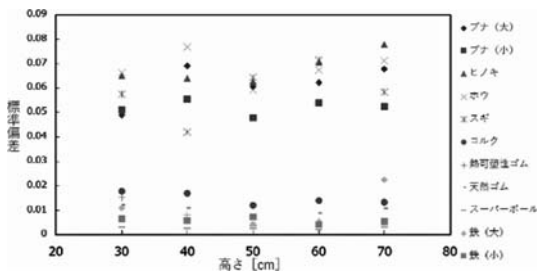


図 2.3.1 高さごとの標準偏差

図 2.3.1 より、全体の標準偏差が最も小さかった 50 cm を落とす高さとした。

②落下させる回数とお標準偏差

50 cm の高さから 100 回落とした際の 10 回おきの標準偏差を図 2.3.2 に示す。

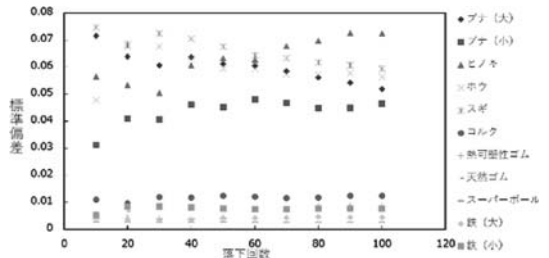


図 2.3.2 落下回数とお標準偏差

図 2.3.2 より、落下回数 60 回で木製の球の標準偏差が集約していることがわかる。回数を重ねるとヒノキの標準偏差が増大することから、落下回数は 60 回とした。

2.3 結果

用意した球を 50 cm から 60 回落として得られた反発係数の値は表 2.3.1 の通りである。

表 2.3.1 各球の反発係数

名称及び材質	反発係数
ブナ (大)	0.549
ブナ (小)	0.524
ヒノキ	0.532
ホウ	0.490
スギ	0.521
コルク	0.644
熱可塑性ゴム	0.889
天然ゴム	0.580
スーパーボール	0.801
鉄 (大)	0.803
鉄 (小)	0.767

表 2.3.2 落とす高さ別の反発係数

名称	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm
ブナ大	0.511	0.569	0.549	0.481	0.495
ブナ小	0.541	0.524	0.524	0.520	0.511
ヒノキ	0.512	0.521	0.532	0.489	0.465
ホウ	0.523	0.466	0.490	0.483	0.451
スギ	0.556	0.605	0.521	0.525	0.512
コルク	0.657	0.651	0.644	0.645	0.635
熱可塑性 ゴム	0.896	0.891	0.889	0.867	0.872
天然ゴム	0.555	0.577	0.580	0.580	0.568
鉄小	0.803	0.806	0.803	0.813	0.797
鉄大	0.733	0.757	0.767	0.762	0.759
スーパー ボール	0.811	0.802	0.801	0.800	0.801

表 2.3.1 より、鉄（大）が最も反発係数が大きいことがわかる。なお、高さの比を基に反発係数を算出する場合、落とす高さによって球が受ける空気抵抗が異なるため、得られる反発係数の値が変化する（梶山, 1999）⁽¹⁾。表 2.3.2 に本実験で得られた、落とす高さ別の反発係数の値を示す。

表 2.3.2 をグラフ化したものを図 2.3.2 に示す。ここでの誤差は、30～70 cm まで 60 回落下させた値の標準偏差を平均したものである。

表 2.3.2 における 30 cm と 70 cm の値より、鉄大と天然ゴム以外の球で 30 cm よりも 70 cm から落下させた方が反発係数が小さい。鉄は 30 cm から

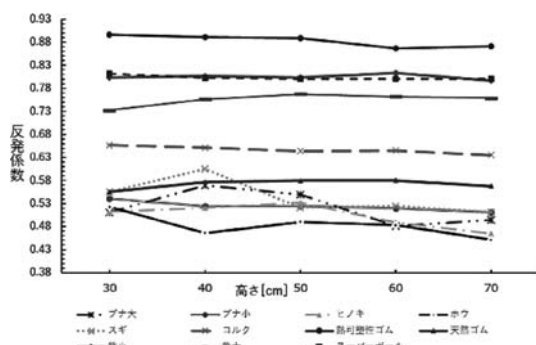


図 2.3.2 表 2.3.2 をグラフ化

50 cm までの間で増加傾向が見られた。梶山（1999）はテニスボールによる実験で、40 cm より高い地点から落下させた反発係数の値は漸次減少する結果を得ている。しかし、その減少割合は小さい。図 2.3.2 において木材は値が減少しているが、その変化は小さく、さらに誤差範囲内で値が推移しているため、梶山（1999）の得た結果に適合するのか、誤差であるのか判断が難しい。

また、金属試験片（ステンレス鋼・アルミニウム合金）では衝突速度が速くなるにつれて反発係数が減少することがわかっている（西村ほか, 2010）⁽²⁾。本実験では、鉄球は大きさに関わらず 60 cm まで反発係数は増加傾向にあり、60 cm と 70 cm との間にのみ減少傾向にある。これは、西村ほか（2010）において金属片を使用したのに対し、本研究では球体を使用した点や、鉄がステンレス鋼やアルミニウム合金とは異なる性質を持つ可能性があることが影響していると考えられる。

2.3.1 密度と反発係数の平均値の関係

表 2.2.1 より求めた球の密度を表 2.3.3 に示す。有効数字は密度に合わせて 2 桁である。

密度と反発係数の平均値との関係は不明瞭である。球の密度と実験で得られた反発係数の相関係数

表 2.3.3 球体の密度と反発係数

名称及び材質	反発係数	密度[g/cm ³]
ブナ（大）	0.549	0.091
ブナ（小）	0.524	0.087
ヒノキ	0.532	0.055
ホウ	0.490	0.053
スギ	0.521	0.048
コルク	0.644	0.034
熱可塑性ゴム	0.889	0.111
天然ゴム	0.580	0.195
スーパーボール	0.801	0.143
鉄（大）	0.803	1.00
鉄（小）	0.767	0.977

は 0.52 であった。相関係数は -1 から 1 までの値をとるため、0 以上の値を正の相関とすると、今回の結果は正の相関があるため、反発係数は密度によって左右される可能性が示唆される。

2.4 実験 1 のデータ分析

これまでで得られたデータを機械学習ソフトで解析する。使用する機械学習ソフトは、ワイカト大学で開発されたフリー機械学習ソフト「WEKA」である。WEKA は入力された球の情報を基に、球の種類ごとの関係性を見つけ、似ていると判断した球をクラスターと呼ばれるグループに区別・大分する。そこで、同一のクラスターに分類された球同士の共通点を調べ、球の性質が明らかになると期待される。

WEKA に、実験 1 の結果と、球の密度を入力してクラスタリングを行った。WEKA が分類した実験 1 のデータを可視化した図を図 2.4.1 に示す。分類には、データを最も細分化できた EM 法を適用した。図 2.4.1 中同一色で着色されている点が、同一のクラスターに分類されたことを表している。

図 2.4.1 では、木材の一部、熱可塑性ゴムとスーパーボール、鉄（小）・鉄（大）が同一色に塗られている点から、同じクラスターに分類されている。ここで、木材についてヒノキ・ホウ・スギのデータが上下に分割されて別のクラスターに分類されている。これより、木材には似た性質または共通の性質があると考えられる。



図 2.4.1 WEKA で分類した結果 (WEKA で表示された画面に球の説明を追加)

ここで、木材の種類によって反発係数が異なったことより、木材に共通する性質を、衝撃の吸収のしやすさと仮定し、実験 2 を行った。

2.5 物質による反発係数の違い

2.5.1 木材の衝撃の吸収のしやすさについて

実験 2：木材の耐衝撃実験


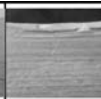
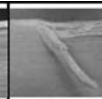
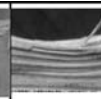
角材（ブナ、ヒノキ、ホウ、スギ）に鉄球を落下、衝突で生じた凹みを測定する。また、落下させた角材の側面をカンナで削り、その切片を顕微鏡で観察する。

実験は、実験 1 で用いた花崗岩の上に角材を置き、鉄球を 50 cm の高さから落下させ、角材に衝突させた。そして、衝突時に生じた凹みの深さを測定した。実験 2 の結果を表 2.5.1 に示す。

表 2.5.1 にあるように、生じた凹みの深さの差は、ホウ・スギ間で 0.2 mm であったが、ホウ・ヒノキ間の差は 0.1 mm となり、凹みやすさはホウ・ヒノキ間のほうがホウ・スギ間よりも近いという結果になった。そして実験を行ったブナ・ヒノキ・ホウ・スギの 4 種の木材ではブナが最も凹みが小さかった。これを表 2.3.3 と照らし合わせると、ヒノキ・ホウ・スギの間では凹みの値に 0.3 mm の差が存在するが、ブナとの差は 0.8 mm 以上ありかつブナの密度が木材 4 種中最も大きい。これより、密度が大きいほど変形しにくいといえる。そして密度の大きいブナの反発係数が 4 種の木材中反発係数が最も大きい。密度と反発係数との相関係数が 0.52 という結果を踏まえると、反発係数は衝撃の吸収のしやすさも関係していると考えられる。

次に、切片を顕微鏡で観察した写真を図 2.5.1 に

表 2.5.1 角材に鉄球を衝突させた結果

衝突後の様子				
	ブナ	ヒノキ	ホウ	スギ
凹み [mm]	3.2	4.0	4.1	4.3

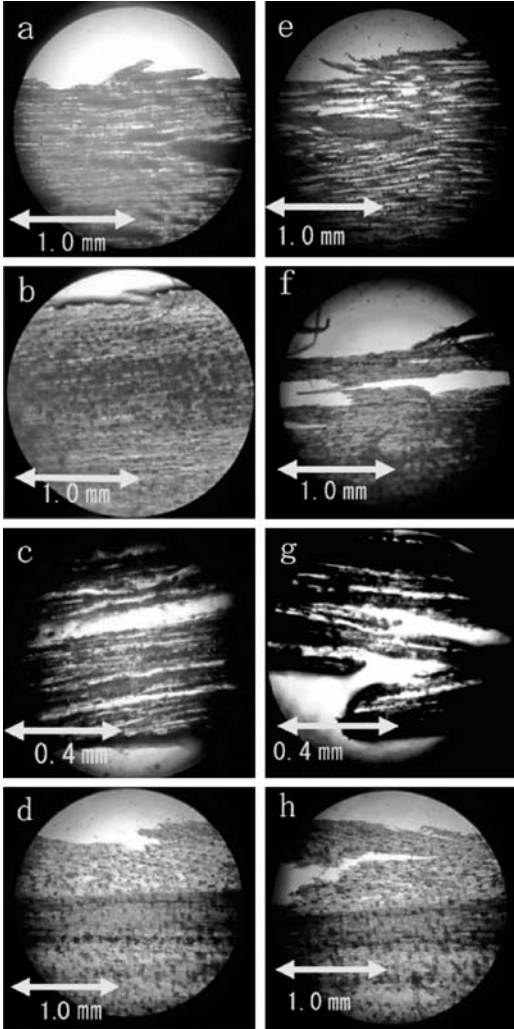


図 2.5.1 切片の顕微鏡写真

a, e: ブナ (40 倍) b, f: ヒノキ (40 倍)
 c, g: ホウ (100 倍) d, h: スギ (40 倍)
 a~d: 衝突前 e~h: 衝突後

示す。切片は実験前の角材の側面にペンで印をつけ、印のある個所に鉄球を落下させて実験後カンナで印ごと削り取って採取した。実験後カンナで印ごと削り取り、その切片を観察、鉄球の衝突前後で比較した。

図 2.5.1 において落下後の木材を顕微鏡で観察すると、組織の破断が確認できる。この現象は、落下直前の力学的エネルギーが着地時に組織の破断に使われたためといえる。よって、木材の反発係数が他



図 2.5.2 凹んだ深さのデータを WEKA に入力した結果

の材質の球よりも小さいのは、着地時に加えられたエネルギーが木材の組織の破断に使われたため衝撃が緩衝されたからだと考える。これはゴム・金属球は分子の集合であるのに対し、木材球は分子よりスケールの大きい、細胞で構成されているが故に生じる差だといえる。すなわち、反発係数は材質の構造も影響すると考えられる。

また、図 2.3.2 で木材は落下回数によって標準偏差が変化したことが明らかになったが、表 2.5.1 および図 2.5.1 より、落下時の衝撃で組織が破壊されたことで球が凹む等の劣化が生じ、反発係数の測定値にばらつきが出たため、標準偏差が変化したと考える。

図 2.5.2 において、実験 2 の結果を入力してもホウ・スギは同じクラスターに分類されている。なお、スギとホウの圧縮強度は共に 350 kgf/cm^2 である⁽³⁾が、WEKA にこの値は入力していない。よって、凹みやすさだけではなく、他の要素が関係していると推察される。そこで、未だ考慮できていない温度を変化させる実験（実験 3）を行った。

2.6 温度と反発係数

実験 3：温度による反発係数の変化

実験方法

①恒温槽で温度を一定に保った水の中に球を入れたビニールを浸け、温度を変化させる。温度を変化させた状態で落下させ、反発係数を求めた。

②常温時の球の温度を測定した後、 70°C に設定した湯にビニールごと浸け、それぞれ 10, 20, 30,

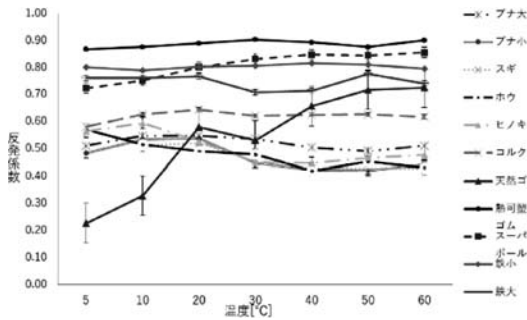


図 2.6.1 温度別の反発係数

40, 50, 60 秒間浸け続けた。設定した時間の経過後、ビニールから取り出して迅速に球体の温度をサーモグラフィーで測定、加熱前の温度との差を求め、球体ごとの温まりやすさを調べた。

実験で使用した機材は、恒温槽はアズワン株式会社製「Thermal Robo」TR-1 AR であり、サーモグラフィーは日本パーズ株式会社製 FLIR i5 J である。

実験 3, ①の結果を図 2.6.1 に、②の結果を図 2.6.2 に示す。なお、図に示されている球の温度には $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 未満の誤差がある。

図 2.6.1 において試料中、 5°C から 20°C における天然ゴムの反発係数の変化が最も大きい。対して、鉄（小）は天然ゴムほどの変化はみられない。また、ブナ（大・小）、スギ、ホウ、ヒノキ、コルクの木材においては、著しい反発係数の変化はみられない。

ひずみ速度依存性を考慮する場合、反発係数は球直径の影響を受ける（感本ほか, 2014）⁽⁴⁾。本研究（実験 1・3）では、温度によらず、常にブナ球は直径の大きいブナ（大）のほうが、鉄球では直径の小さい鉄小のほうが反発係数が高いという結果が出ている。この結果は感本ほか（2014）の結果と合致する。

温度が変化すると反発係数が変化した（図 2.6.1）。天然ゴム・熱可塑性ゴム・スーパーボールは常温時（ 20°C ）に比べ、 40°C 、 60°C において反発係数が大きくなる。とりわけ天然ゴムは常温時

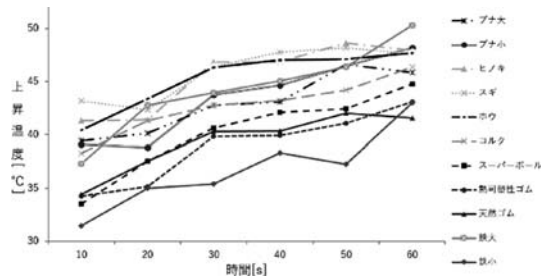


図 2.6.2 加熱時間と上昇した温度の関係

（ 20°C ）と 60°C とで $+0.145$ の差が生じた。このことからゴムは高温になると反発係数が大きくなるといえる。また、変化の度合いは球によって差があること、加熱して反発係数が下がった球があることも確認できた。

球によって 10 秒あたりに上昇する温度に差が見られる（図 2.6.2）。60 秒間加熱した際に最も温度が上昇したのは鉄（大）であり、次いでブナ（小）、ヒノキとなる。また、木材が鉄より温度が上昇している結果が見られる。ここで、時間によって温度が低下している数値が見られるが、2 度実験を行い、球の温度は上昇することを確認している。但し袋から取り出した際、木材の表面は湿っていたため、ポリエチレン製ビニール袋に入れていても木材が水を含むことを防ぎきれなかったと言える。温度はサーモグラフィーを使用して表面温度を計測したため、木材が吸った温水の温度を計測していた可能性が否定できない。この可能性は、鉄より木材の方が温まりやすかったという結果からも、高いと考えられる。

実験 3, ②で得られたデータより、10 秒ごとの温度の上昇率を求め、それを WEKA に入力し、分類する。EM 法を適用した分類結果を可視化したものが図 2.6.3 である。

スギとホウが異なる色で表示されている（図 2.6.3）ため、異なるクラスターに分類されている。また、熱可塑性ゴムと、天然ゴムが同じ色に分類されているため、同じクラスターに分類されている。



図 2.6.3 実験 3 の結果を入力した結果

ここで、実験 3 以前では両者は別のクラスターに分類されていたことから、熱可塑性ゴムと天然ゴムにおいて、熱の帯び方について似た性質がある可能性がある。

熱可塑性ゴムと天然ゴムは、加熱時間 30 秒から 50 秒にかけての温度の上昇度合い及び変化の仕方に類似点が見られる (図 2.6.2)。これによって両者が同一のクラスターに分類されたと考えられる。

2.7 結論

本実験では、物質ごとの反発係数を調べ、その差を比較し、反発係数が物質によって異なる理由を明らかにすることを目的にした。実験結果および考察より、以下の事項が明らかになった。

- 1) 反発係数は直径・質量・体積・密度に依存せず、物質固有の値がある。
- 2) 木材の種類によって変形のしやすさが異なる。
- 3) 材質の変形のしやすさが反発係数に影響を及ぼす。
- 4) 木材は組織の破断にエネルギーが使われ、他の球よりも反発係数が小さくなる。
- 5) 反発係数は温度によって変化する。

本実験で反発係数が物質によって異なる理由は解明できなかったが、同様の実験を複数個の同一物質の球で行えば、より精度の高い結果が得られる可能性があり、また、今回実験できていない種類の木材・ゴム及び金属についても同様の実験を行うこと

で、物質のどのような差によって変形のしやすさが変わっているのかを明らかにできると考えられる。それによって、反発係数が何によって変化しているのか、すなわち物質によってなぜ反発係数が異なるのかを明らかにできると考えている。

そして、本実験において機械学習ソフト WEKA は、スギとホウを同一のクラスターに分類した。この分類結果より、我々はスギとホウに何らかの類似点があると解釈し、スギとホウをそれぞれ別のクラスターに分類し、違いを探るために温度を変化させる実験を行った。その結果、各物質が温度によって反発係数が増えるという結果を得た。これより、機械学習ソフトをデータの解析に用いることは、実験結果を客観的に分析することを可能にし、かつ新たな実験の余地を示唆できると言える。

したがって、物理実験のデータ解析及び分析に機械学習ソフトを用いることは、実験結果の解釈に客観性を持たせる手法として有効かつ、新たな実験の構想を練る手助けになると考えられる。

3. 研究・発表を通して学んだこと

科目「理数研究」においては研究テーマ、実験手法、データ処理、発表まで生徒が主体となって進める。このような生徒主体の研究を行ったのは初めてであったため、実験計画から発表までのプロセスを経験できた。実験手法を考える際は、どのような実験を行うことで、何が明らかになり、そこからどのような論理展開ができるかを意識した。発表用の資料作成においては、発表内容が物理と情報処理技術が融合しているため、どのように説明すれば専門外の人でも理解してもらえるかを特に考えた。ここにおいて、自分が聴衆だったときに何を疑問に思い、わかりにくく感じるだろうかという視点が大切だと学んだ。

研究発表での質疑応答では、応用化学課程の藤原先生より、得られた結果はこの実験 (環境) における結果であることを強調した方がよいとアドバイスを頂き、資源生物科学科 Wendakoon, S. K. 先生か

らは、実験結果は何に利用できるかと考えるかという質問を頂いた。事前に聴衆は何を疑問に思うかを考えて発表資料を作成したが、利用方法までは想定できていなかったため、より聴き手に立った説明を心がけるべきと学んだ。

研究を通して学んだ主体的な行動の重要性は、学校により定められた科目を受けるだけの高校生活では学ぶことができなかったはずである。研究活動によって、大学での研究活動の基礎となる経験ができた。

また、この発表を行った際、WEKAにおける「クラスター」の説明に苦勞した。発表では「集まり・グループ」として説明を試みたが、2019年当時、情報処理について詳しい方でなければ聞く機会のない言葉であった。それからほどなくして新型コロナウイルスに伴う各種報道で「クラスター」が使用されるようになり、多くの人がある意味を知った。専門用語は少しのきっかけで広く知られるようになり、かつ専門外の人でも理解できる言葉に言い換えられる知識を要することを学んだ。

謝辞

本研究に際して、高校時代よりWEKAの使用方法や機械学習についてご教授頂いただけでなく、本ジャーナルへの投稿を勧めて頂いた本学部知能情報メディア課程奥健太先生に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 梶山耕成 CBLシステムを用いた反発係数の測定 日本物理教育学会『物理教育』1999年47巻1号 p.9-12 https://www.jstage.jst.go.jp/article/pesj/47/1/47_KJ00005895358/_pdf-char/ja
- (2) 西村尚哉, 村瀬勝彦, 佐藤友哉, 東義章 反発係数の速度依存性 日本物理学会 M&M 2010 材料力学カンファレンス 2010年 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmemm/2010/0/2010_473/_pdf-char/ja
- (3) <https://www.toishi.info/sozai/woods/hoonoki.html> および <https://www.toishi.info/sozai/woods/sugi.html> より引用
- (4) 感本広文, 小野寺弘平, 河村庄造 球直径が球の反発係数に及ぼす影響 日本機械学会東海支部第63期総会講演会講演論文集 ('14. 3. 18-19) No.143-1 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmetokai/2014.63/0/2014.63_526-1/_pdf-char/ja
『物理 改訂版』植松恒夫・酒井啓司・下田正, 啓林館, 平成29年, pp.44, 1.17~18

WEKA: ワイカト大学

Weka 3-Data Mining with Open Source Machine Learning Software in Java (waikato.ac.nz)