

107 摩擦とはどんな現象か（物理）

(1) 研究開発の概要

名古屋大学工学研究科機械理工学専攻教授梅原徳次先生の「摩擦とはどんな現象か - 機械工学と摩擦 -」の講演を聞いた後に、班毎に実験内容を定めて測定方法も工夫させる形の生徒実験「摩擦係数の測定」を行い、摩擦について深く考えさせると同時に自らの問題意識に従って実験を進める体験をさせた。また、初めての物理実験であるので実験前には、実験レポートの書き方や有効数字の扱い方についての事前指導を行った。

(2) 研究開発の経緯

名古屋大学工学部に進学した本校卒業生より、物理分野のSSH授業で梅原先生に講義をお願いするのが有意義であるとの声があり、平成20年5月に梅原先生にご講演を依頼し快諾を頂いた。初めに研究室に伺って内容について打ち合わせ、講演の一部でスターリングエンジンの演示実験をすることになった。その後は、講演会の詳細についてメールで打ち合わせた。また、特に講演に興味を持った生徒については名古屋大学創造工学センターが実施するものづくり市民公開講座「夢工作・スターリングエンジン」への特別参加を許可していただいた。

(3) 仮説（ねらい、目標）

本特別研究のねらいは以下のア～エの通りである。

- ア 摩擦現象に関する体系的な知見を学習する。
- イ 実験の目的や方法を自分たちで決定する様式の実験を実施し、実験を企画し測定を工夫する体験をさせる。
- ウ レポートの作成を通して科学的な考え方や表現力を養う。
- エ 生徒に理論と実際の違いを体感させる機会とする。

(4) 研究の方法および内容

ア 対象生徒

2学年理系物理選択者 166名

イ 実施内容

(ア) 講演会

日時 平成20年7月9日（水） 13:25～15:30

場所 アイプラザ一宮（一宮勤労福祉会館）

演題 「摩擦とはどんな現象か - 機械工学と摩擦 -」

講師 名古屋大学工学研究科機械理工学専攻教授 梅原徳次先生
名古屋大学全学技術センター技術職員 千田進幸先生

(イ) 生徒実験

事前授業 レポートの書き方、有効数字の扱い方

生徒実験1 「摩擦係数の実験」（65分）

生徒実験2 「摩擦に関する自由実験」（65分+希望者は放課後に自由実験）

ウ 講演「摩擦とはどんな現象か - 機械工学と摩擦 -」の要旨

(ア) 機械工学と摩擦

理学は自然科学の真理の探究を目的としているが工学は科学の人類への有用な応用を目的としている。そのため工学では複雑な現象を取り扱うことが必要となり、工学部には多くの学科が存在し高度化と多様化がなされている。その1つの分野である機械工学では、動く事の特徴とする機械が対象となるので摩擦の制御



摩擦のメカニズムを説明する梅原先生



千田先生によるスターリングエンジンの演示

は重要な位置を占め、摩擦を制御する学問分野はトライボロジーと呼ばれている。

例えば、スターリングエンジンは理論上最も熱効率の高い外燃機関であるが、その実現のためにはピストンとシリンダーの間に空気漏れを起こさず摩擦が小さいことが大切である。これらの条件を保つことができれば、太陽熱で動くスターリングエンジンも作ることもできるが、この企画・設計・創製を支えるのが材料力学（壊れないようにする）、熱力学（熱からエネルギーを効率よく回収する）、流体力学（流体の抵抗を制御する）、機械力学（機構と振動による損失を考える）、制御工学（速度等を制御する）、トライボロジー（摩擦を制御する）、加工学（各種の素材を高精度で加工する）などの機械工学の各分野である。

(1) 役立つ摩擦と困った摩擦
摩擦には増やしたい摩擦と減らしたい摩擦がある。例えば、自動車のタイヤと路面の間の摩擦は増やしたい摩擦の

代表で、通常のゴムとアスファルトの摩擦では摩擦係数 μ は10くらいであるが、レーシングカーのタイヤでは暖めると摩擦係数が上がるゴムの性質で μ は100くらいになっている。これはもうべたべたと柔らかいタイヤで路面に張り付いて進むような感覚である。クラッチやブレーキ、糸や釘、マッチ、布の例も増やしたい摩擦の例である。一方、減らしたい摩擦の例にはエンジン、ギヤ、軸受け、スキー、スケートがすぐに思い浮かぶ。氷の摩擦係数は結晶方向により違うので、結晶方向を揃えてやることによって摩擦の小さいスケートリンクを作ることができる。また、面白い例ではブラシと髪の毛の間の摩擦も減らしたい摩擦の例である。これに関しては静電気がおこり摩擦が大きくなると枝毛が発生しやすくなるので静電気を逃がすブラシが開発された。

(ウ) 摩擦の制御は非常に重要

自動車ではガソリンのもつエネルギーを100%とすると70%は空気を暖めるために使う熱となる。残りの30%がエンジンからの動力として使われるが、この30%のうち18%が摩擦で失われる。そして、残った12%のうち6%は空気

抵抗で失われてしまうので、たった 6 %だけが車を走らせるために使われていることになる。つまり、摩擦を低減すれば燃費が 4 倍になることがわかる。これは機械工学の大きな課題である。機械の寿命はほとんど摩擦（摩耗）が原因で起こっている。ほどほどに壊れる機械の方が利潤が上がると考えられた時代もあったが、21 世紀では製造者が製造物に対して責任を負うようになったこともあり、繰り返しリユースできる壊れにくい

講演会后にスターリングエンジンで盛り上がる生徒・教員

機械が良いとされようになった。

摩擦の絡む実際例をいくつかあげると、新幹線ではパンタグラフの設計が摩擦に関係して大変難しい。今では新幹線では 1 カ所で電気を取っているが、時速 300km 程度でこすれながら放電を受けながら安定して電気を受け取ることは難しい技術である。また、以前、地下鉄日比谷線で起こった脱線衝突事故も摩擦の制御ができなかった為の事故ということが出来る。この事故は、車輪の整備をした翌日の朝、雨の日の翌日の良く晴れた日に軌道の曲線部で起こった。いくつかの条件が重なり摩擦係数が想定以上に上がっていたために車輪のフランジがレールの上に乗り上がってしまった事故であった。このように、未だに車輪とレールの間の摩擦はうまく制御できていない。また、今後は宇宙空間での潤滑も大きな問題となる。宇宙空間では潤滑油が蒸発してしまうので潤滑油が使えない。たとえば、ウォークマンを宇宙に持ち出すとグリースが蒸発して動かなくなってしまう。

(I) 摩擦とはどんな現象か

エジプトの絵画には巨石や石像を運搬する様子を描いたものがあり、そこには潤滑剤を用いて摩擦を低減する様子が詳細に描かれている。この意味で、エジプトの人々は最初のトライボロジストということができる。

15 世紀末には、レオナルド・ダ・ビンチが鉄や木材を用いて実験をし、摩擦力の大きさが加重に比例することや接触面積の影響を受けないことを示している。摩擦力の大きさが分力成分を持たない加重に比例することは不思議な性質で、以後、摩擦力の発生のメカニズムについていろいろな研究がなされてきた。

18 世紀末にはクーロンが、アモントン・クーロンの摩擦の法則をまとめ、その性質を、(1) 摩擦力は荷重に比例する。(2) 摩擦力は接触面積に比例する。(3)

動摩擦は静摩擦より小さく速度に依存しない。とし、摩擦の原因を表面突起を乗り越える力と考えた（凹凸説）。しかし、この説は金属の表面をキレイに磨くと摩擦が小さくなることになり、摩擦係数が上がっていく実際の現象を説明できない。

現在、摩擦の発生メカニズムとして受け入れられているのは 20 世紀中頃の説で、摩擦の凝着説と呼ばれている。この説によると、物体表面には粗さがあるために 2 物体間の真実接触面積は見かけの接触面積に比べて非常に小さく、この接触点で物体は塑性変形・凝着し、この凝着部で発生する剪断力が摩擦の原因と考

える。そして真実接触面積は荷重に比例するので摩擦力と荷重が比例関係になるのである。

しかし、現実の現象はより複雑であり摩擦力には未解明な部分が多いといえ、実際には、凹凸説や凝着説などの説が混じり合って摩擦が起きていると考えられている。そして摩擦係数を小さくするには、(1) 突起の傾き角を小さくする(滑らかにする) (2) 真実接触面積を小さくする(表面を硬くする) (3) 硬いものの上に柔らかいものが付着する構造にする の手法が有効と考えられる。

静止摩擦力が動摩擦力よりも大きいためあるいは摩擦係数の速度依存性が負勾配であるために、実際の摩擦力が働く運動ではしばしばスティックスリップ現象が発生する。身近なスティックスリップ現象はチョークで黒板に字を書いたときに発生する異音やブレーキの鳴き、雨が少ないときの古い車のワイパーに現れる。

1980年頃はテフロンが固体潤滑で摩擦係数の最も低い物質とされ、その摩擦係数は低摩擦と呼ばれる 0.04 程度であった。現在では物質表面に炭素と窒素の膜を付けることにより窒素中で 0.001 の超低摩擦が実現されている。

エ 生徒実験の内容

(ア) 生徒実験「摩擦係数の測定」(65分)

木の平板、直方体の木片とばねばかりを利用して、木片の上に乗せる加重を変化させたりして、自由に静止摩擦係数と動摩擦係数を測定させた。平板は場所によって表面の様子が異なるので、精度の良い実験結果を得るためには測定に使用する場所を定めておくなど詳細な注意が必要になるが、このことには触れずに自由に実験させた。

摩擦角を測定する実験の様子

(イ) 生徒実験「摩擦に関する自由実験」(65分)

前時の実験の終了時に、次回は、できるだけ精度の良い実験となるように工夫することという条件の下に自分たちでテーマを決めて自由に実験することになる事を連絡し各班で事前に実験内容について相談させた。その結果、生徒達が行った主な実験テーマは以下の通りであった。

- ・接触面積は摩擦力の大きさに関係ないのか
- ・物質の違いによる摩擦係数の違い
- ・テフロンの摩擦係数を調べる
- ・摩擦角から本当に静止摩擦係数が求

静止摩擦係数の測定の様子

まるか

- ・敷居滑りは摩擦係数をどれだけ下げるか
- ・摩擦係数を小さくする工夫

- ・木片に力を加える場所を変えると摩擦力は変化するのか

オ ものづくり市民公開講座「夢工作・スターリングエンジン」

講演と実験を通して摩擦や機械工学に興味を持った希望生徒 10 名が、名古屋大学創造工学センターが実施したもののづくり市民公開講座に参加し、スターリングエンジンの工作等に挑戦した。

(5) 検証（成果と反省）

ア 講演・実験終了時の生徒の感想から

- ・講演を聞いて摩擦力はとても複雑で奥が深い物だと知り実験がより楽しくなった。
- ・講演会で摩擦係数が 0.01 の物質があると聞いたが、現在の研究は世の中の生活に役に立っていくのだと分かった。
- ・摩擦を小さくすることでエネルギーを 4 倍も有効に使えるようになることを知り摩擦の研究は大切だと思った。
- ・木片をまっすぐ同じ速度で引くのが難しく何度もやり直した。今度は、素材によって静止摩擦係数と動摩擦係数の比の値が変化するかどうかを実験したい。

市民公開講座に参加してスターリングエンジンを作る生徒

- ・自由実験で一番大きな誤差が出てしまって悔しかった。どこか一部でも違っていると異なる値が出てくるので、授業のような常に一定の摩擦係数というのは実際にはあまりないのではないかと思った。
- ・木の表面の状態の多少の違いがはっきり測定に現れたのが意外であった。
- ・実験を正確に行うことの難しさや手間がかかることを思い知った。工学部志望者として、進路決定の参考になる大変良い講演・実験であった。
- ・実験では頭で考えていたことをはるかに超えた複雑なことが起こっていて、丁寧さ正確さの重要性が確かめられた。労力は半端じゃないけど新発見があったときの感動は格別だと思う。
- ・実験はなかなか予想通りには行かなかったのでどこに不備があるのかと何度もやり直して原因の究明に努めた。楽しかったのでまた色々な実験をしたい。
- ・最初は簡単そうに見えたけど、実験をしていくうちに木くずが挟まったりしてフェルトの様子が異なり条件をそろえることの難しさを考えさせられた。
- ・（ネオプレン）ゴムどうしの静止摩擦係数が意外に小さくて驚いた。自動車はアスファルトの上を走るので問題がないのだろう。
- ・実験 1 ではばねばかりの数値を読み取るのが大変だったが、静止摩擦係数が同じような値に求まってとても楽しかった。
- ・実験をしているときは、普段、公式に当てはめたりして計算をしているときには気づかない素朴な疑問が浮かんできました。
- ・テフロンはたった 12 ° 傾けただけで木片が動き出したので驚いた。より低摩擦の実験をやってみたい。
- ・自由実験は慌ただしく行ったのでうまく測れず残念であった。

ウ 今後の特別研究に向けて

生徒の感想から、次年度以降の実施に関連して以下点が明らかになった。

- (ア) 摩擦現象は実際には大変に複雑な現象ではあるが、工学的にも社会的にも大変重要な課題であり、高校2年の物理を習い始めた生徒でも扱うことのできる意味深い教材であることが明らかになった。今後もSSH授業の中で扱っていきたい。
- (イ) 講演を聴いた後に実施する形式の生徒実験は、生徒がいろいろな問題意識を持った上で実験に取り組むことができ大変に有意義であった。
- (ウ) 生徒に実験テーマを設定させたり測定方法の工夫をさせることは、理論と実験の違いや研究の楽しさに気づかせることにつながり有意義であった。ただし、65分2コマで実施した今回の実験はやや窮屈であり工夫の余地を残した。