HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	高校生を対象としたトライボロジー授業の提案
Author(s)	工藤, 保広
Citation	トライボロジスト, 52(10), 705-710
Issue Date	2007
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/66311
Type	journal article
File Information	Yasuhiro Kudo_2007.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

解 説　特集・楽しく学ぶトライボロジー

高校生を対象としたトライボロジー授業の提案

工　藤　保　広
北海道経済部 労働局人材育成課
〒060-8588　札幌市中央区北3条西6丁目

原稿受付　2007年3月19日
"トライボロジスト"　第52巻　第10号　(2007)　705～710

1. はじめに

現在の日本の高等学校の物理教育では，摩擦力に関しては，静止摩擦力，最大静止摩擦力，動摩擦力，クーロン・アモントンの法則，摩擦角を学習する内容となっている．この内容は，戦後現在に至るまで変わっていない[1]．一方これまで，学校現場の教員や研究者によって，摩擦力についての授業プランが提案されてきた．

生徒に，ある科学的概念や法則をわかりやすく教えるためには，教えようとする科学的概念や法則を分析し，生徒が理解できる教育内容を明らかにしたうえで，生徒の理解の道筋を考慮して発問を配列することが必要である[2]．

摩擦力についての授業内容の現状は，教科書の記述から，多くの場合，摩擦力があるということと，最大静止摩擦力は垂直抗力に比例するという法則などを説明し，法則を実験で追試し確認することにとどまっているものと考えられる．しかし，生徒が摩擦力についての理解を深めるためには，これらの事実や法則が成り立つ前提となっているよりミクロの概念に着目し，それを手がかりとして，摩擦力や関係する法則を理解する道筋を検討していく必要があると考える．質量保存の法則を例に挙げると，物質は原子で構成されている，という内容を理解したうえで，物質の形が変わっても原子の数が変わらなければ質量は変わらない，と生徒が考える場合，生徒が理解している質量保存の法則は，物質が原子で構成されている，というミクロの概念が前提となっているといえる．このように，自然の階層性に着目し，あるマクロの法則をよりミクロの概念と関連づけて理解していくことが，自然現象を理解するうえでの一つの方策であると考える[3]．

本論では最初に，高等学校の物理分野における摩擦力についての教育内容を概観するため，教科書の内容を紹介する．そして，学校教員や研究者の提案した授業プランである，摩擦力と摩擦仕事を学習する授業プランと接触面の凹凸を取り上げた授業プランを紹介する．最後に，筆者が研究している真実接触に着目した授業プランの方向性について説明する．

2. 教科書の記述

現在の高等学校の教科書で，摩擦力は運動と力の単元で扱われており，おおむね次の順で扱われている[4]（図1）．

①接触している面から物体に，面と垂直上向きに働く力を垂直抗力という．

②静止した物体が動き出すのを妨げるように働く摩擦力を静止摩擦力という．

③物体がすべり出す直前の静止摩擦力を最大摩擦力という．

④実験によると，接触しあう面の種類や状態が同じならば，最大摩擦力の大きさ F_0 は，垂直抗力の大きさ N に比例し，接触面の面積にほとんど関係しない．

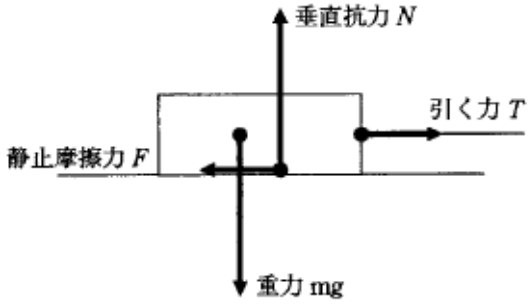
この関係は $F_0=\mu N$ と表され，μ は静止摩擦係数と呼ばれる．

⑤板の上に質量 m の物体を置き，板を徐々に傾けていくと，傾きの角がある角 θ_0 を越えると物体がすべり始める．この θ_0 を摩擦角という．

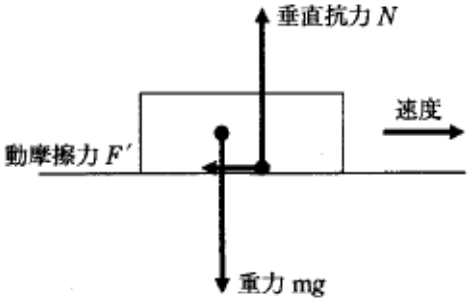
Proposal for a Tribology Class for High School Students

By Yasuhiro KUDO, Human Resources Development Division, Hokkaido Government (Nishi 6-chōme, Kita 3-jō, Chuo-ku, Sapporo-shi, Hokkaido 060-8588, *E-mail*: gzq05637@nifty.com)

Key Words: *tribology, friction, real contact, mechanics, education, didactic*



(a) 物体が静止している場合



(b) 物体が運動している場合

図 1　表面に載せた物体が受ける力

また，$\mu=\tan\theta_0$ が成り立つ．

⑥平面上をすべっている物体にも，接触面で運動を妨げる摩擦力が働く．これを動摩擦力という．

⑦動摩擦力の大きさ F' も，垂直抗力の大きさ N に比例しており，次の関係が成り立つ．$F'=\mu' N$，μ' は動摩擦係数と呼ばれ，物体の動く速さや接触面の面積にほとんど関係せず，接触しあう面の種類や状態で決まる．

⑧一般に，動摩擦係数は，静止摩擦係数よりも小さい．$\mu'<\mu$ である．

①～⑧の内容は，粗い面の上にある物体で考えている．

また，実験として，平面の上に載せたブロックを動かすために必要な力とブロックの重さを計測し，ブロックを動かすために必要な力（最大摩擦力）と垂直抗力の関係をグラフに表し，これらの関係が比例することと静止摩擦係数を算出することなどを扱っている．

3. 摩擦力と摩擦仕事を学習する授業プラン

板倉らは，摩擦力と摩擦力のする仕事を学習する授業プランを提案している[5]．この授業プランでは，直方体の木片を引っ張って動かすために必要な力をばねの伸びで計ることによって，次の点を学習する．

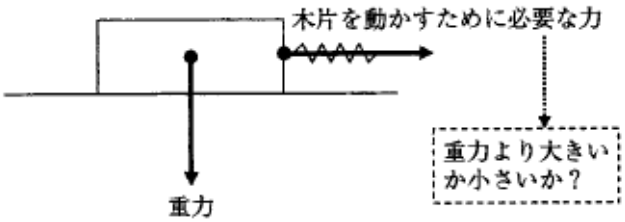


図 2　木片を動かすために必要な力の大きさについての発問

・直方体の木片を動かすために必要な力の大きさが木片に重りを載せることで大きくなり，木片の置き方を変えても変わらない．

・木片と木片をすべらせる面の間に紙やすりやころを挟むことで，直方体の木片を動かすために必要な力の大きさが変わる．

その後に，トラックがある距離を摩擦力と空気からの抵抗力を受けながら走ったときの仕事量や荷物を積んだ場合と積まない場合のガソリン消費量の違いを計算させる．

このプランの特色は，導入で，直方体の木片をばねで吊り下げ，その伸びを測ることで，木片が受ける重力の大きさを調べ，その後に，平面に置いた木片をばねで引っ張って動かすために必要な力が，木片が受ける重力に比べて大きいか，小さいかを問うことである（図 2）．

この問いは授業記録から，相当数の生徒が木片を動かすために必要な力は，木片が受ける重力よりも大きいと解答することが知られている．しかし，実際に実験で検証すると，その結果は，木片が受ける重力よりも小さい力で引っ張れば動く，というものである．このように，生徒が予想した内容と実験結果が異なることによって，生徒の認識を大きくゆらぐことになる．このことが出発点となって，発問を重ねることで，生徒が科学的認識を形成していく．

4. 表面の凹凸に着目した授業プラン

4.1 凸部同士の凝着に着目した授業プラン

関間は，表面の凸部の間に働く分子間力に着目し，それが摩擦力の起源であることを扱う授業プ

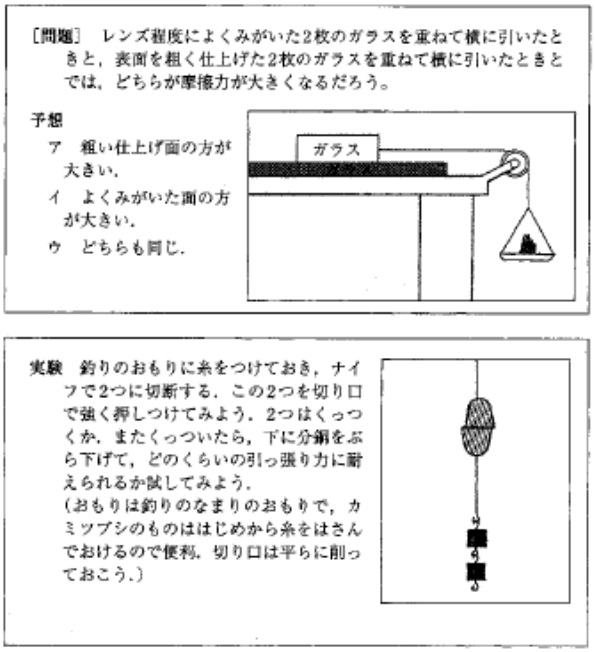


図3　凸部同士の凝着に着目した授業プランの問題の例〔出典：文献6)〕

ランを提案している[6]．

この授業プランの構成は，おおむね次のとおりとなっている．

(1)生徒との意見交換の中で，私たちが扱っている物体の表面には目に見えなくても必ず凹凸があり，物体同士の接触面ではその凸部同士が接触していることを説明する．

(2)レンズ程度によく磨いた2枚のガラスを重ねて横に引いたときと，表面を粗く仕上げた2枚のガラスを重ねて横に引いたときの摩擦力の大小を，生徒に予想させ実験で検証する．

(3)摩擦力の発生原因が歴史的にどのように説明されてきたかを，生徒に解説する．(凹凸説から凝着説への展開)

(4)釣りのおもりをナイフで切断し，この二つを切り口で強く押し付けるとくっつくこととどの程度の力で引っ張ればそれらを引き離すことができるかを実験で確認する．

この授業プランは，表面の凹凸に着目し，摩擦の凝着説を教育内容としている点が特徴である(図3)．

(2)の発問に対して生徒の多くは，日常的な経験などを元に，表面を粗く仕上げたもの同士の方が動かすために力が必要と解答すると予想される．しかし，実験で，表面をレンズ程度に磨き仕上げたもの同士の方が動かすために力が必要であることを示すことで，生徒は，最大静止摩擦力が表面の粗さが小さいほど大きくなるのではないか，と考えるだろう．そして，(3)の説明をし，(4)で鉛同士の凝着を見せることで，生徒が，摩擦力は物体同士の凝着で起きることを理解するのを期待している．

4.2 凸部同士のかみあいに着目した授業プラン

CLEMENTらが作成した授業プラン[7]では，静力学において作用・反作用の法則を学んだ後に，摩擦力を学習することになっている．授業プランの流れは，おおむね次のとおりである（図4）．

①静止摩擦力の学習として，
- 直方体のコンクリートブロックをトラクターが引っ張ろうとしている際の静止摩擦力の生じる方向を生徒に予想させる（図4のTargetの図）．
- 鉄製のブラシ同士をかみ合わせて引っ張った場合のブラシの変形と凹凸のある物体同士を摩擦した際に生じる力をイメージすることによって，接触面において接触するもう一方の物体から摩擦力を受けることを理解する（図4のAnchorsの図）．
- 先の摩擦力の生じる方向についての問いの結論を得る．
- 本を腕に載せて滑らせた場合の本と手に加わる力を予想し，実験して体験する（図4のDemonstrationsの図）．

②動摩擦力の学習として，トラクターがコンクリートブロックを引っ張りゆっくりと一定の速度で移動させた場合を①と同様の流れで，生徒に考えさせる．

③空気テーブルを利用した実験により，摩擦する二つの板に働く静止摩擦力と動摩擦力の働く方向や大きさを調べる．

④③の結果を踏まえて，②の問いの結論を得る．

⑤さらに複雑な摩擦のモデル（摩擦力の要因が化学結合による凝着や掘り起こしによるものであること）を紹介する．

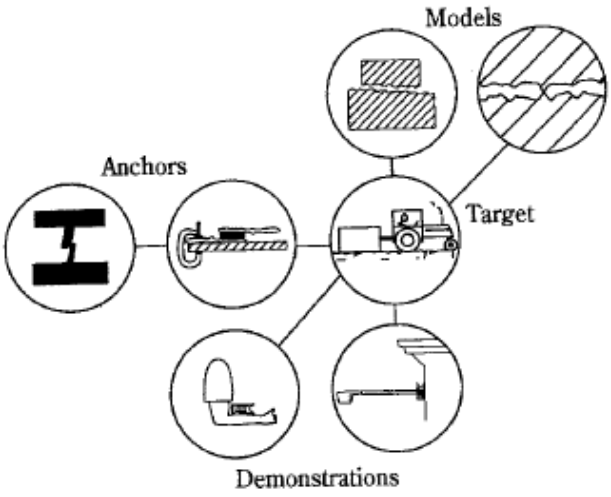


図 4　CLEMENT の授業プランの概念図〔出典：文献 7)〕

⑥壁に本を定規で押し当てた場合，本は落ちるかどうかを考える宿題を出す（図 4 の Demonstrations の図）．

この授業プランの特徴は，接触する二つの物体の表面には凹凸があることを生かして，それらの物体の双方に作用・反作用の法則により摩擦力が生じることを取り上げて，摩擦力の発生を具体的に生徒に認識させようとしている点である．

5. 真実接触の着目した授業プランの可能性

筆者は，これまで紹介した表面の凹凸に着目した授業プランの課題を踏まえて，真実接触の概念を手がかりとして摩擦を理解していくことを意図した授業プランの検討を行っている．

教育内容として真実接触の概念は，次のとおりである．

①見た目には平らなものにも細かな凹凸がある．
②見た目には平らなもの同士が接触していても，実際に接触しているのは，それらの表面にある細かな凸部同士である．（接触しているところを真実接触点という．）
③摩擦力は，真実接触点で起きている．
④1 個の真実接触点は，直径数十 μm の円形とみなすことができる．
⑤押し付ける力が著しく大きくなければ，二つの物体の間にある真実接触点の面積の合計（これを真実接触面積という）は，二つの物体の見掛けの接触面積に比べてきわめて小さい．

これらの真実接触の概念を，主に次の 2 点で生徒の摩擦力についての認識形成に生かそうとしている．

（1）最大静止摩擦力，ブロックが平面を押す力，見掛けの接触面積の関係の理解

最大静止摩擦力の大きさが，ブロックが平面を押す力の大きさに「比例」し，見掛けの接触面積に「依存しない」という関係は，一見矛盾しているように見える．このため，生徒にとって自明な内容ではない．しかし，この一見矛盾しているように見える関係は，真実接触の概念を用いることによって，次のように矛盾なく説明でき，この文脈に沿って教育内容を構成することで生徒は理解しやすくなると考える．

・真実接触点の数は，平面を押す力の大きさに比例する．
・真実接触点の数は，見掛けの接触面積に依存しない．
・最大静止摩擦力の大きさは，真実接触点の数に比例する．
・以上から，最大静止摩擦力は，平面を押す力の大きさに比例し，見掛けの接触面積に依存しない．

なお，ここでは，真実接触点の 1 個の大きさは，平面を押す力にかかわらず一定とみなしている[8]．

（2）摩擦力の認識形成

たとえば，図 5 のように，机（平面）の上に載せたブロックに動かそうと力を加え，まだブロックが運動していない状態を考える．この場合，個々の真実接触点において，平面からブロックは力を受けており，真実接触点で受けている力の合力が，ブロックが受ける静止摩擦力である．そして，ブロックが運動していないことから，ブロックを動かそうとする力とブロックが平面から受ける摩擦力の大きさは等しい．

通常，このブロックが平面から受ける静止摩擦力は，接触面の中心を作用点として，1 本の矢印で表記される．この表記方法を指導する際には，教える側が約束事として説明するにとどまっている[4]．

この授業プランでは，まず真実接触点を摩擦力

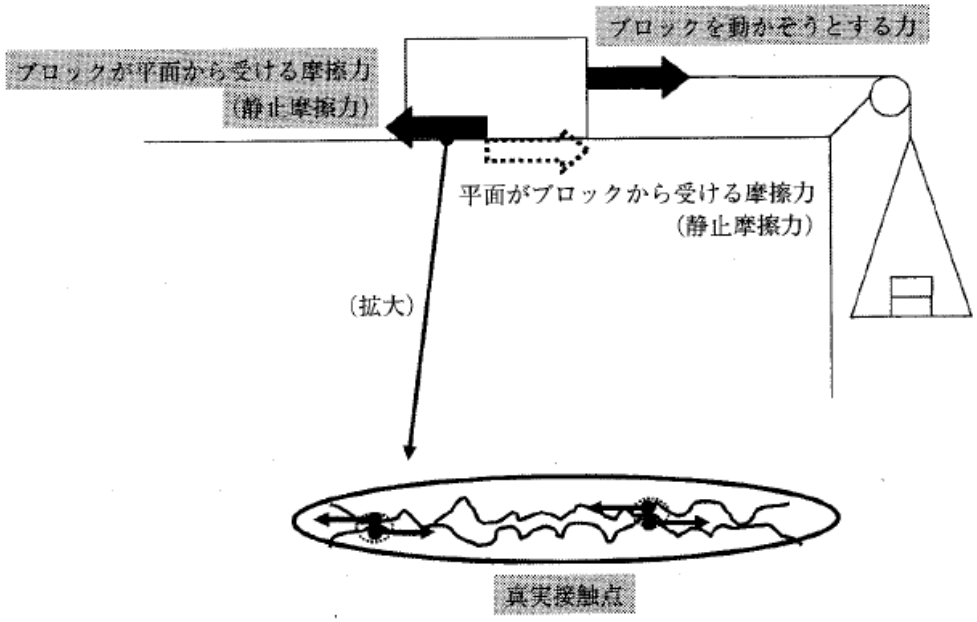


図5　静止摩擦力・物体を動かそうと加える力・真実接触点の関係

図6　真実接触点と摩擦力

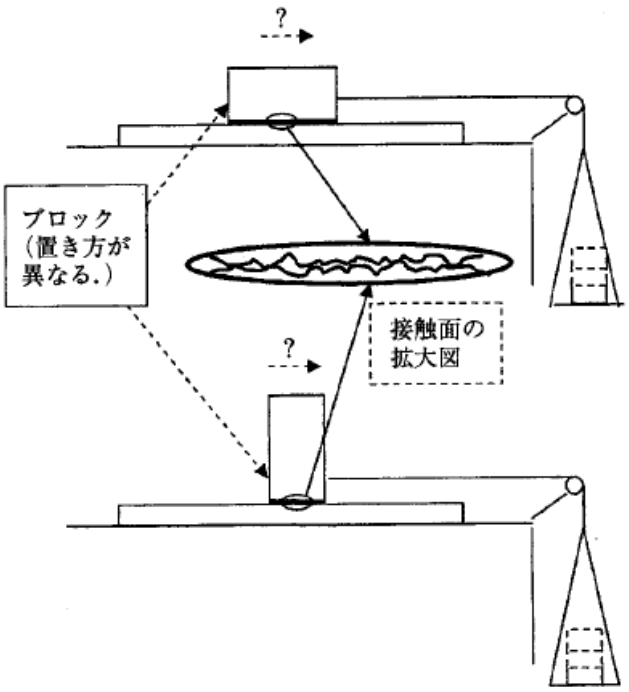


図7　ブロックの置き方の違いと動かすために必要な力の大きさの比較

の作用点とし，各々の真実接触点で物体が受ける力の向きを考え，それらの力と釣り合っている力の関係を了解する，という順序で教育内容を構成することで，生徒に納得しやすい方法を示したいと考えている（図6）．

発問の例としては，次のような内容が考えられる．最初に，表面には細かな凹凸があることを示した上で，ブロックの置き方を変えた場合でブロックを動かすために必要な力は変化するかどうかを問う（図7）．

この発問に取り組むことで，生徒の多くは，見掛けの接触面積と表面の凸凹の関係に着目して，見掛けの接触面積が大きければ，それだけ，凹凸で引っかかっている部分が多く，そのため，動かすために必要な力は，見掛けの接触面積の大きい方が大きいと考えると思われる．そして，実験で，ブロックの置き方を変えても，ブロックを動かすために必要な力は変わらないことを生徒に示すことで，なぜ，変わらないのか，ということを考えることになる．

その後で，表面の粗さを変えた場合のブロックを動かすために必要な力の変化を問い，接触の状況に着目しつつ生徒が考察していけるよう，発問を配列していく．

たとえば，先に示したガラス同士の摩擦で，表面を鏡面仕上げしたもの同士を摩擦した場合と粗く仕上げたもの同士を摩擦した場合では，前者の方が動かすために必要な力は大きくなる（図3参照）．このことを生徒に問えば，前の発問で着目

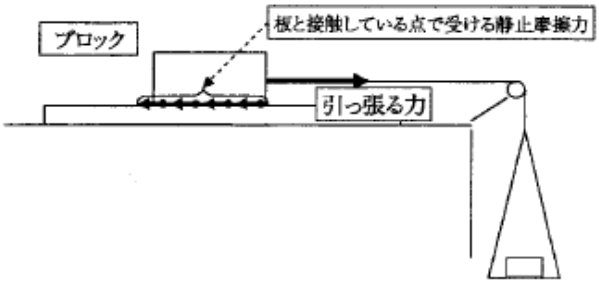


図 8　ブロックから受ける力（静止摩擦力）(ブロックが板と接触している点で受ける力の大きさの合計は，引っ張る力の大きさに等しい)

した接触の状況を考えることで，表面が平らなもの同士を摩擦した場合の方が，実際に接触している面積は大きいから，動かすために必要な力は大きくなるのではないか，と考えるだろう．

この後に，ブロックを重さと見掛けの接触面積を変えず，材質のみを変えた場合に，ブロックを動かすために必要な力が変化するかどうかを問うなどしたうえで，先に記した真実接触の概念を説明する．そして，真実接触点を摩擦力の作用点として，ブロックを動かすために必要な力と摩擦力の間の関係（力の向きや大小）を考察する発問を示していく（図 8）．

今後，このような発問の系列を具体化し授業プランを作成し，実践することで，その課題を明らかにしていきたいと考えている．

文　献

1）金原寿郎編：高等学校用物理上巻，三省堂出版（1951）218.
2）真船和夫：新訂理科教授論，明治図書（1973）93.
3）高村泰雄編：物理教授法の研究，北海道大学図書刊行会（1987）44.
4）兵藤申一他編：高等学校物理 I，啓林館（2003）92.
5）仮説実験授業研究第 3 巻，仮説実験授業研究会編集，国土社（1982）17.
6）関間征憲：たのしくわかる物理 100 時間・上，東京物理サークル編，あゆみ出版（1989）40.
7）C. CAMP & J. CLEMENT : Preconception in Mechanics, Kendall/Hunt (1994).
8）F. BOWDEN & D. TABOR：固体の摩擦と潤滑，曽田範宗他訳，丸善（1961）27.

著者プロフィール

工藤　保広

1968 年生まれ．北海道大学大学院教育学研究科修士課程修了．地方行政に携わる傍ら，子供向けの科学実験教室への参加等を通じ科学技術の啓発に取り組む．主な関心事は，摩擦の教育内容構成．他に NPO 法人 butukura 会員，北海道教育学会会員など．著書に「プラスチックの仕組みとはたらき」（桑嶋幹他編著，秀和システム），「地球環境の教科書 10 講」（左巻健男他編著，東京書籍）（いずれも共著）．