HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	接触の機構に着目した摩擦の法則の教育内容の設定と教材の構成
Author(s)	工藤，保広
Citation	教育学の研究と実践，4，55-64
Issue Date	2009-02
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/66197
Type	journal article
File Information	Yasuhiro Kudo_4.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道教育学会誌『教育学の研究と実践』 第４号（2009年２月刊行）掲載

接触の機構に着目した摩擦の法則の教育内容の設定と教材の構成

A Study on Structures of Educational Content and Teaching Materials of Friction Law Set up by Considering Contacting Mechanism

工 藤　 保 広
（(財) 北海道科学技術総合振興センター）

１．はじめに

摩擦は日常的によく使われる言葉であり、２つの接触している物体の間にある、物体の動きを妨げるものとして認識されている [1]。このような摩擦についての素朴な理解から出発して力学を学習することを考えた場合、力学教育においては次の３つの観点からの課題が挙げられる。

① 摩擦力の指導における課題
② 運動の法則の指導における課題
③ 力学教育カリキュラムにおける課題

本論では、このうちの①の観点から、課題を明らかにし、その解決の方策を論じる。②、③については、本論の最終章で論点を指摘し、詳細の議論は別稿にゆずる。

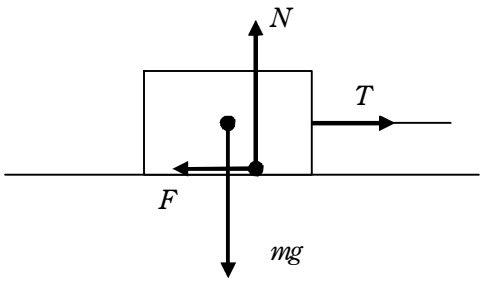
摩擦は、自然科学においては摩擦力を意味する。摩擦力は、接触する二つの物体が、外力の作用の下で相対運動をするとき、あるいはしようとするときに、その接触面においてそれらの運動を妨げる方向に生じる力 [2]である。日本の自然科学教育で摩擦力は、高等学校の物理分野における教育内容の一つとして位置づけられている。

これまでの摩擦力の教育内容は、粗い水平面に載せた物体には摩擦力が働くという現象を説明した上で、摩擦の法則であるクーロン・アモントンの法則が成り立つことを説明するものである。クーロン・アモントンの法則は、見た目には滑らかな物体どうしを摩擦する場合に成り立つ次の法則である [3]。

① 摩擦力（最大静止摩擦力及び動摩擦力）の大きさは、荷重に比例し見かけの接触面積に依存しない(図１)。
② 動摩擦力の大きさは、すべり速度に依存しない。
③ 動摩擦力は、最大静止摩擦力より小さい。

しかし、この教育内容は、単に摩擦力があるという現象やクーロン・アモントンの法則が成り立つという事実のみを説明するものであり、摩擦力の発生機構に基づいた説明が与えられていない。

摩擦の研究では、２０世紀に入り、摩擦力の発生機構においては、平らで滑らかな面にも細かな凹凸があり、それらの凸部どうしが接触していることが明らかとなった。また、クーロン・アモントンの法則が接触の機構から説明できるようになった。



N : 垂直抗力　T : 物体を引っ張る力
mg : 物体に働く重力　F : 静止摩擦力
T の大きさがある値を超えると、物体がすべり始める。そのときのFを最大静止摩擦力（F_0 ）と言い、$F_0 = \mu N$が成り立つ。(μ : 静止摩擦係数)

図１　クーロン・アモントンの法則（最大静止摩擦力に関するもの）

そこで本論では、摩擦力の教育内容における課題を解決するため、現代科学の成果である摩擦力の発生機構を教育内容とし､摩擦力の指導のうちのクーロン･アモントンの法則の教育内容の設定と教材の構成を行う。

２．摩擦力の教育内容の動向

第二次世界大戦後の日本で、摩擦力は高等学校の物理分野において学習されている。教科書における摩擦力の教育内容の一例 [4]を挙げると次のとおりである。

① 粗い面の上にある物体を考える。
② 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。
③ 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。
④ 物体を動かすために加えている力と静止摩擦力の大きさは等しい。
⑤ 物体がすべり出す直前の静止摩擦力を最大摩擦力

[5]という。

⑥　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。

⑦　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。また、$\mu=\tan\theta_0$が成り立つ。

⑧　粗い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。

⑨　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、$F'=\mu' N$の関係が成り立つ。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、接触し合う面の種類や状態で決まる。

⑩　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。

調査した教科書[6]には、共通する点として次の２点が挙げられる。

ア　教育内容はいずれも、静止摩擦力、最大摩擦力、クーロン・アモントンの法則、摩擦角、動摩擦力である。

イ　教育内容の配列はいずれも、摩擦力があることとその他の摩擦力に関係がある力（垂直抗力、全圧力）があることを説明した上で、摩擦力について、クーロン・アモントンの法則が成り立つことを説明する順序である。

また、教科書によって異なる点は次のとおりである。

ア　物体を載せる平面の状態について、特に記述がないもの[7]と、粗い面にある物体を考えるとしているもの[8]がある。

イ　クーロン・アモントンの法則に関して、最大摩擦力は全圧力に比例するとしているもの[9]と、最大摩擦力は垂直抗力に比例するとしているもの[10]がある。

教科書記述の分析から、次の３つの課題が挙げられる。第一に、例に挙げた教科書では粗い面にある物体を考えるとしている。しかし、最大摩擦力が垂直抗力に比例することは、見た目には、平らで滑らかな面同士の摩擦について検証されてきたことである[11]。したがって、見た目には平らで滑らかな面であっても摩擦があって、その場合にクーロン・アモントンの法則が成り立つことを教育内容とすることが必要である。

第二に、摩擦力があるという現象とクーロン・アモントンの法則が成り立つという事実のみを説明しており、これらの現象と法則の成立について、摩擦力の発生機構からの説明が与えられていない。

第三に、クーロン・アモントンの法則について、最大摩擦力が、全圧力に比例するとしているものと、垂直抗力に比例するとしているものがある。全圧力は、物体が平面を押す下向きの力であり、垂直抗力は、平面が物体を押す上向きの力である。大きさは同じであるが、向きと受けるものが異なっている。生徒にとっては、全圧力に比例すると理解する方が容易である。その理由は、生徒にとって、物体が平面を押す力が大きくなれば、物体は動きにくくなると考えることは、日常の経験から容易に想像できるからである。しかし垂直抗力は、物体を面から離そうとする方向に働く力であり、そのような力が大きいほど最大摩擦力が大きくなると言うことは一見妙なことである。また垂直抗力は、物体が平面を押す力を把握した上で、作用・反作用の法則により平面から物体が受けるという考察を経て理解しなければならない[12]。

次に、これまでに接触の機構に着目して作成された摩擦の授業プランを２点挙げる。これらの授業プランは、いずれも表面の凹凸に着目して、実際に接触している表面の凸部で摩擦力が起きていることを説明している。しかし、いずれも接触の機構からクーロン・アモントンの法則を説明する内容ではない。

閏間は、摩擦力、クーロン・アモントンの法則、摩擦角の順序で学習した後に、接触する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という説明に至る授業プランを提案している[13]。この授業プランでは、プランの最終部分で、平らで滑らかな面に凹凸があり、それらの頂上同士が圧力でおされてくっつき、摩擦が起きることを説明している。この授業プランは、見た目には滑らかな表面にも細かな凹凸がありその凸部どうしが接触しそこで摩擦力が生じることと、２つの物体を押しつける力が大きいほど実際の接触面積が大きくなり摩擦も大きくなることを説明している点が評価できる。しかし、クーロン・アモントンの法則が、実際の接触面積との関係から説明できる点には触れられていない。

クレメントらが作成した学習プラン[14]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。この学習プランでは、アスファルトの上にある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に、静止摩擦力の生じる方向を生徒に問うことから始まり、最終的に、表面の凹凸がかみ合っている部分で、作用・反作用の法則により摩擦力が、接触す

る２つの物体の双方に働くことを学習する内容となっている。この学習プランは、単に摩擦力があることを現象として教えるのではなく、接触する２つの物体の表面には凹凸があることを生かし、こ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用いて、摩擦力の発生を生徒に認識させようとしている点が評価できる。しかし、このプランは、見た目には明らかに凹凸がある粗い面での摩擦を考えるものである。

３．摩擦の研究動向

クーロン・アモントンの法則は、１７世紀にアモントンが[15]、１８世紀にクーロン[16]が、物質の組み合わせ、荷重、接触面積、すべり速度などの条件と摩擦力との関係を調べ、成り立つことを明らかにした。

摩擦の発生要因については、アモントン、クーロンらが主張した表面の凹凸の噛み合いが原因とする説[17]とデザギュリエらが主張した表面どうしが接触によりくっつくためだとする説[18]があった。

しかし２０世紀に入って、バウデンらの研究[19]によって、平らで滑らかな面にも細かな凹凸があり、表面の凸部どうしが接触し高い圧力を受けるために起こることが明らかにされた。またバウデンらは、接触する２つの物体の間で表面の凸部どうしで接触している点を、真実接触点と定義し、最大静止摩擦力の大きさが真実接触点の面積の合計（これを真実接触面積と言う。）に比例することを明らかにした。

近年は、原子レベルでの摩擦を原子間で生じる斥力に起因するという立場で、摩擦力の起源についての研究が進んでいる[20]~[22]。

これまでの研究成果によって、クーロン・アモントンの法則は、接触の機構から次のとおり説明される（図２）[19]、[23]。なお、接触の機構から説明できる法則は、「最大静止摩擦力の大きさは、荷重に比例し見かけの接触面積に依存しない」（以下、この法則を最大静止摩擦力（最大摩擦力）に関するクーロン・アモントンの法則と言う。）である。

① 見た目には平らなものにも細かな凹凸がある。（５章の説明Ｂの図を参照されたい。）
② 見た目には平らなものどうしが接触していても、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どうしである。（接触しているところを真実接触点という。５章の説明Ｂの図を参照されたい。）
③ 摩擦力は、真実接触点で起きている。
④ １個の真実接触点は、直径数μm～１０μmの円形とみなすことができる。
⑤ 押しつける力が著しく大きくなければ、２つの物体の間にある真実接触点の面積の合計（真実接触面積）は、２つの物体の見かけの接触面積に比べて極めて小さい（一般に見かけの接触面積の１％未満である。）。また、真実接触点に加わる圧力は極めて高い。
⑥ 真実接触面積は、物体が平面を押す力の大きさに比例し、見かけの接触面積に依存しない。
⑦ 最大静止摩擦力の大きさは、真実接触面積の大きさに比例する。
⑧ ⑥、⑦から、最大静止摩擦力は、物体が平面を押す力の大きさに比例し、見かけの接触面積に依存しない。
⑨ 各々の真実接触点の大きさを比べるとほぼ同じと見なすことができる。したがって、⑥、⑦の真実接触面積は、真実接触点の数に置き換えることができる。

⑥～⑨の内容について、図２の例より説明する。(b)は、(a)の直方体の物体を２つ重ねて平面に載せたものであり、(c)は、(a)の直方体の物体の置き方を変え、(a)に比べて見かけの接触面積を小さくしたものである。(b)と(c)の最大静止摩擦力の大きさを、(a)と比べると次のことが言える。(b)は、物体が平面を押す力の大きさが(a)の２倍となり、真実接触点の数も(a)の２倍となる。したがって、最大静止摩擦力の大きさも(a)の２倍となる。(c)は、見かけの接触面積が小さくなっても、物体が平面を押す力の大きさは(a)と同じである。したがって、真実接触点の数は(a)と同じであり、最大静止摩擦力の大きさも(a)と同じである。なお、最大静止摩擦力と物体を動かすた

めに必要な力の大きさは、物体が静止したままであることから等しい。

４．教育内容設定の視点

１、２章で挙げた課題と３章で挙げた摩擦についての研究成果を踏まえて、次の２つの方針により、摩擦の法則についての教育内容の設定を行う。

① 平面と物体の表面が、平らで滑らかな場合の摩擦についての教育内容とする。

② 真実接触点の数を媒介として、物体が平面を押す力と物体を動かすために必要な力の関係を理解する教育内容とする。

その理由は、次の３点である。

第一に、摩擦力は見た目には平らで滑らかな面でも生じ、クーロン･アモントンの法則は、この状況で検証されている。したがって、設定する教育内容の中で一貫して平らで滑らかな面どうしの摩擦における内容とすることが必要である。

第二に、物体を動かすために必要な力の大きさは、垂直抗力との関係で理解するよりも、物体が平面を押す力との関係で理解する方が、生徒にとって容易である。また、物体が平面を押す力と真実接触点の数の関係に着目することで、生徒は、最大静止摩擦力に関するクーロン・アモントンの法則を摩擦力の発生機構と関連づけて理解できる。

第三に、物体が平面を押す力との関係を考える力を、物体を動かすために必要な力とする理由は次のとおりである。最大摩擦力の接触面付近での計測が困難である[24]。このため、最大摩擦力と同じ大きさの力であり、計測が可能な物体を動かすために必要な力との関係を考える方が、生徒にとって理解しやすい。

本論の教育内容設定は、最大摩擦力に関するクーロン・アモントンの法則を接触の機構と関連づけて理解する教育内容を明らかにするものであり、摩擦力の認識形成を図る教育内容はこの後に位置づけられる。なお、摩擦力の認識形成を図る教育内容の検討は別稿にゆずる。摩擦力の認識形成を図る教育内容の前に、最大摩擦力に関するクーロン・アモントンの法則を接触の機構と関連づけて理解する教育内容を位置づける理由は次のとおりである。摩擦力そのものは抽象的な概念であり、接触面という直接目視することが困難な場所で起きている。力の認識形成には、しばしば力を受けた物体の変形を手がかりとする方策がとられる[25]。しかし、摩擦力は目視が難しい真実接触点で起きており、摩擦が起きる際の真実接触点の変形を観察することは困難である[26]。したがって、摩擦の機構から摩擦力の認識形成を図るためには、まず、摩擦が真実接触点で起きているということを生徒が理解するための教育内容を明らかにした上で、その後に位置づける教育内容を明らかにしていく必要がある。

本論では、教育内容設定の視点を検討する上で、実体的イメージの役割に着目した。生徒が取り組む具体的事実や現象が実体的イメージを介して、抽象的概念や法則へとつながる三段階の認識を採用し、教育内容を構成することを試みた。

高村は、人類の科学的認識の発展段階を現象論的段階(個別)、実体論的段階(半具体的特殊)、本質論的段階（抽象的普遍）の三段階で説明し、教授における科学的認識の形成も三段階間の上向過程、下向過程として理解できるという仮説を提唱した[27]。特に、実体論的段階に相当する実体的イメージを重視し、「科学的概念形成の全過程にわたって、実体的イメージの形成こそが、決定的な役割を担っている」と述べた。高村のいう実体的イメージとは、「認識対象の本質的な構造を正確に反映した感性的イメージであり、それをあくまでも感性的でありながら、対象の本質的認識を媒介する実体的特質をそなえたもの」である。

本論で設定する教育内容において、実体的イメージに対応する教育内容として、真実接触点を位置付ける。その理由は生徒が、物体を動かすために必要な力と物体が平面を押す力の関係を、真実接触点の数を媒介として理解でき、最終的に科学的概念である最大摩擦力に関するクーロン・アモントンの法則の認識形成に繋がるからである。

５．教育内容の設定と教材の構成

本章では、教育内容を指導する順序に記述し、その根拠について論じる。各々の教育内容は太線枠の中に記載し、生徒に示す発問と説明の例は細線枠の中に記載した。

【教育内容１】

見た目には、平らで滑らかな平面の上に、表面が平らで滑らかな物体がある。

平面の上を運動している物体と平面の間に生じる摩擦について、次のことが言える。

・物体が平面を押す力があれば、摩擦は生じる。

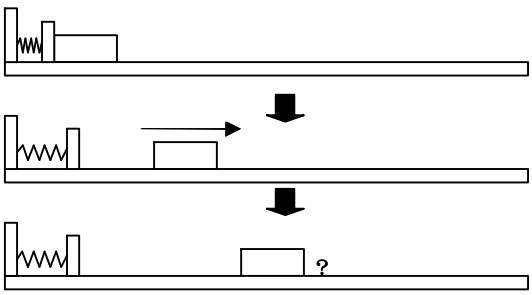
・物体が平面を押す力がなければ、摩擦は生じない。

この教育内容の発問の例は、次のとおりである。

【問題A】

平らで滑らかなアクリル板の上にアクリル板でできた箱（アクリル箱）を載せます。アクリル箱を押しバネではじくと，アクリル箱はしばらく進んで止まります。

それでは、この実験を無重量状態で行うと、アクリル箱はどのように動くでしょうか。



この教育内容を一連の教育内容の最初に位置づける理由は二つある。

第一に、前述した教科書の記述やクレメントの学習プランにも見られるように、これまでの教育内容で、摩擦は粗い面で起こるとされている場合が見られる。また、生徒は日常的な経験から、主に摩擦は粗い面で起こり、平らで滑らかな面では少ないという認識は持っているだろう。しかし、摩擦は平らで滑らかな面でも起こることが、科学的成果から言える事実であり、クーロン・アモントンの法則は、平らで滑らかな面で成立している。また、本論で設定する教育内容では、一貫して平らで滑らかな面における摩擦を内容とすることにしている。したがって、摩擦の教育内容では、平らで滑らかな面で摩擦が起きるということを冒頭で生徒に示す必要がある。

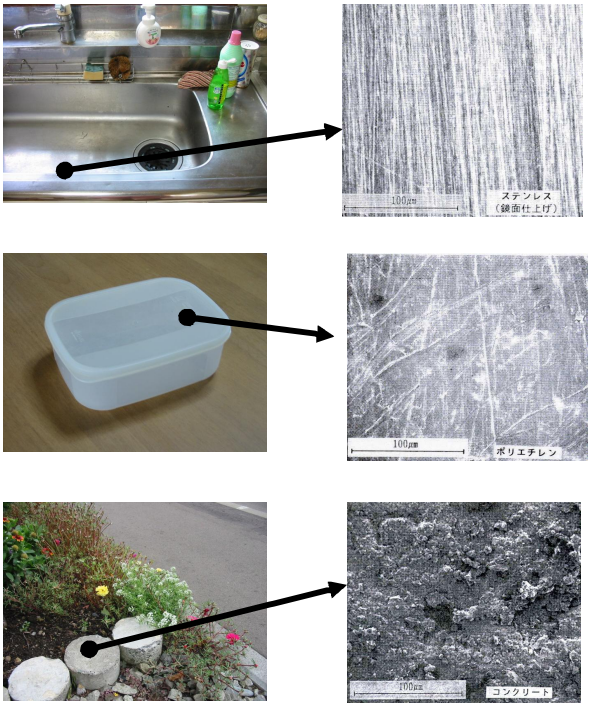
第二に生徒にとっては、一般的に使われる摩擦という言葉が、ものをこするという意味で使われることから[28]、物体と平面が接触しているので、摩擦があると考えることはできる。また、平面を押す力が大きくなれば、それだけ物体が動きにくくなると考えることは、日常経験からできる。しかし、これらを根拠にして、物体が平面を押す力がなければ、見た目には物体と平面が接触していても摩擦がないと予想することは容易ではないだろう。このため、この教育内容を最初に位置づけることで、物体と平面が見た目には接触していることよりも、物体が平面を押す力の方が、摩擦と関係があるということを生徒に着目させる。

この発問の例では、物体が重力を受けている場合と無重量状態で物体が重力を受けていないと見なせる場合の摩擦の有無を問い、無重量状態では摩擦が無いことを示して、物体が平面を押す力と摩擦の関係に着目することを意図している。

【教育内容２】
見た目には平らで滑らかな面にも細かな凹凸がある。

生徒に示す説明内容の例は、次のとおりである。

【説明 A】
私たちの身のまわりには、アクリル板の他にも、台所のシンク、プラスチックの容器、コンクリートブロックのシンクの表面のように、平らで滑らかなものがたくさんあります。しかし、これらを拡大して見てみると、細かな凸凹があることがわかります。（写真　文献 29））



この内容を二番目の教育内容とする理由は次のとおりである。教育内容１で、見た目には接触していても、面を押す力がなければ、摩擦がないことが明らかとなる。この理由は、見た目には接触しているように見えても、物体が平面を押す力がなければ、拡大して見ると実際には接触していないためである。実際の接触に着目して生徒が真実接触点のイメージを形成するためには、まず、物体が平面を押す力の変化に対応した、接触している面の状況の変化に着目しなければならない。このことから、平らで滑らかな面にも細かな凹凸があることを生徒に示し、この内容を手がかりに次の教育内容を考察できるようにする。

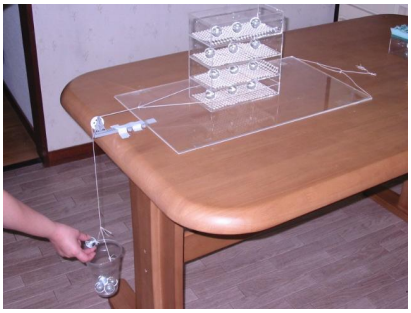
【教育内容３】
物体が平面を押す力の大きさが変わらなければ、見かけの接触面積が変わっても、物体を動かすために必要な力の大きさは変わらない。

この教育内容の発問の例は、次のとおりである。

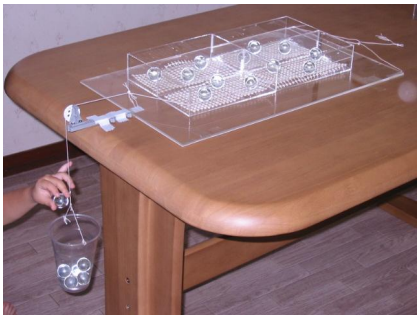
【問題B】
アクリル板の上に、ビー玉を３つ入れたアクリル板でできた箱（アクリル箱）を４つ、次の(a)、(b)のように載せます。そして。アクリル箱と糸でつないだコップに重りを１個ずつ入れていきます。すると、ある重りの数で箱が動きます。

(a)と(b)で箱が動き出す重りの数を比べると、どのようなことが言えるでしょうか。

(a)



(b)



この内容を３番目の教育内容とする理由は次のとおりである。前の教育内容で、見た目には平らで滑らかでも細かな凹凸があることを説明した。次に、この内容と関連づけて、クーロン・アモントンの法則を考察する教育内容とする。

本論で教育内容とするクーロン･アモントンの法則は、次の２点である。

① 物体を動かすために必要な力の大きさは、物体が平面を押す力の大きさに比例する。

② 物体を動かすために必要な力の大小は、見かけの接触面積に依存しない。

①について、生徒はその内容を問われた場合、日常経験から物体が平面を押す力の大きさが大きくなれば物体は動きにくくなると考えることで、解答を予想できるだろう。しかし、②については、生徒にとっては必ずしも自明ではない。例えば、見かけの接触面積が大きければ、それだけ実際に接触している面積も広いと考える生徒が相当数いる[30]。したがって、②を先に教育内容として位置づけて、発問により生徒が、日常経験から形成された認識と向き合うことで、物体を動かすために必要な力の大きさが実際の接触面積と平面が物体を押す力に関係するという新たな仮説を設定するよう促す。そして、①についての教育内容の前に、真実接触点の内容についての教育内容を配置し（後述する教育内容５～７を参照）、生徒が、真実接触点のイメージを用いて、物体を動かすために必要な力と物体が平面を押す力の関係を考えることができるようにする（後述する教育内容８を参照）。

また、問題Ｂの例では、生徒が真実接触点を直観的に認識することを意図して、アクリル板の中にビー玉を入れている。積まれたアクリル箱に入っているビー玉の数の合計が大きいほど、真実接触点の数が大きい。この後の発問例でも一貫してビー玉を教具として用いることで、実体的イメージに対応する内容を生徒に目に見える形で示し、実体的イメージの形成を促す。実体的イメージを教具化した例として、水道方式の自然数指導におけるタイルが挙げられ、この観点からは先に挙げたビー玉がこのタイルに対応している[31]。

【教育内容４】

物体が平面を押す力が変わらなければ、見かけの接触面積が変わっても、実際に接触している面積は変わらない。

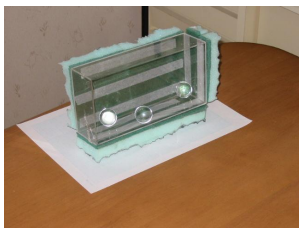
この教育内容の発問の例は、次のとおりである。

【問題Ｃ】

ビー玉３個が入ったアクリル箱の表面を拡大した模型があります。表面の凹凸はスポンジを適当に削ったものです。このアクリル箱を紙の上に(a)、(b)のように置きました。スポンジの凸凹と紙の接触している部分の面積は、(a)と(b)を比べると、どう言えますか。

なお、アクリル箱の底面の面積を比べると、(b)は(a)の２倍です。

(a)



(b)

解答を予想したら、スポンジにインクをつけて、方眼紙に載せて、色のついた方眼紙の数を数えて比べてみましょう。

この内容を４番目の教育内容とする理由は、教育内容３が成り立つ根拠が、実際に接触している部分の面積が変わらないことであることを示すためである。生徒は、教育内容３とこの教育内容の指導を経ることで、物体を動かすために必要な力は実際に接触している部分の面積に関係していることを認識できる。

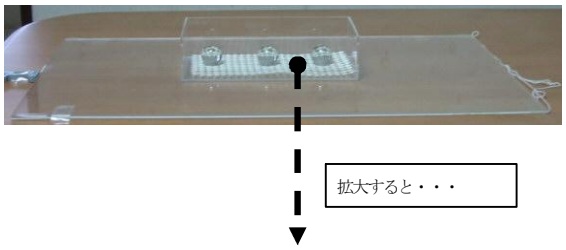
この教育内容に対応する発問では、実際に摩擦している物体の接触している部分を観察することが理想である。しかし、これまでの摩擦についての研究成果から、真実接触面積の観察には、相当の実験設備が必要であり、学校での授業を想定した場合には困難であると言える[26]。このため、発問の例として示した問題Ｃでは、スポンジによるモデルを用いている。このモデルは、アクリル板と箱との接触とは異なるものであるが、見かけの接触面積が大きく変わっても、実際に接触している部分の面積がほとんど変わらないことを観察できる。

【教育内容５】
平らで滑らかな表面を持つ二つの物体が接触するとき、それぞれの表面にある細かな凸部の頂部で接触している。この接触している部分を真実接触点と言う。

この教育内容の生徒への説明内容の例は次のとおりである。

【説明 B】
アクリル板の表面のように、一見平らで滑らかなものの表面でも､拡大してみると凸凹があります｡このため、実際に接触しているのは、山のてっぺんどうしになります。

この接触している部分は**極めて小さく「真実接触点**（しんじつせっしょくてん)」と呼ばれています。



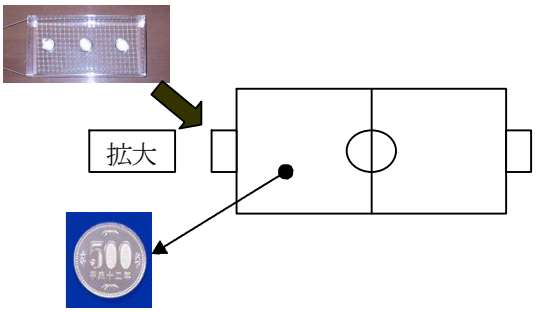
【教育内容６】
平面と物体の間にある各々の真実接触点の大きさは極めて小さく、その数の合計も極めて少ない。また、各々の真実接触点の大きさを比べると、ほとんど変わらないと見なせる。

この教育内容の発問の例は次のとおりである。

【質問】
ビー玉３つを入れたアクリル箱をアクリル板の上に載せます。

アクリル箱の底面の大きさを拡大して、サッカーコートと同じ広さとすると、凹凸で接触している点（真実接触点）は、５００円硬貨の枚数で何枚ぐらいになるでしょうか。

なお、サッカーコート全体を５００円硬貨で敷きつめるには、約９００万枚いります。

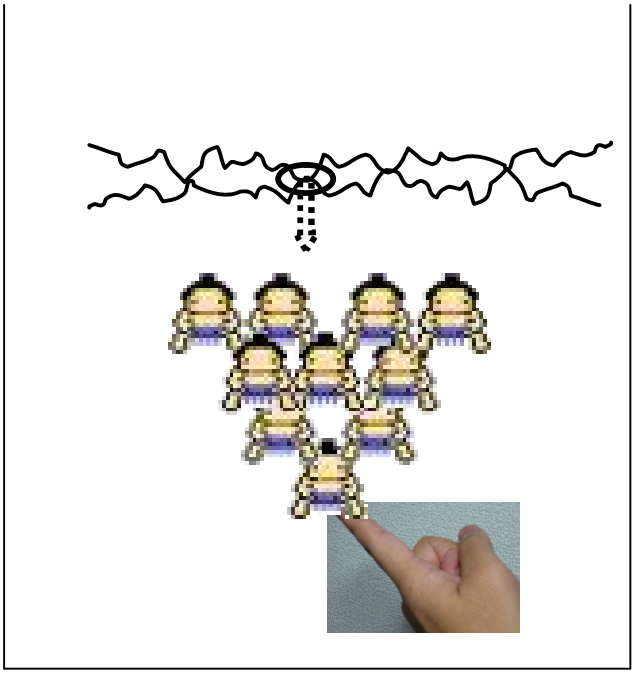


【教育内容７】
真実接触点には、極めて高い圧力が加わる。

この教育内容の生徒への説明内容の例は次のとおりである。

【説明 C】
接触しているものの間にできる真実接触点の数は、ゴムのように軟らかい物質の接触や、何トンもの大きな力で接触するもの同士を押しつけるような特殊な場合を除けば、ごくわずかです。質問の場合は数十個程度です。

真実接触点１個はとても小さく、その数もとても少ないために、真実接触点で接触しているものが受ける圧力はものすごく大きくなります。質問の場合では、１ｃｍ²当たり約１．３ｔ分、つまり人差し指の指先に、体重130kgの力士を１０人ほど載せた分の力を受けていると言えます。（アクリル箱が125gの場合）



教育内容５～７は、真実接触点についての教育内容である。これらの教育内容をこの位置とする理由は、次のとおりである。教育内容４までの教育内容では、実際に接触している部分の面積が物体を動かすために必要な力に関わっているという内容である。しかし、実際の接触している状況は、真実接触点が接触面に点在しているというものであり、教育内容４までにこの内容は説明していない。したがって、真実接触点についての内容を教育内容５～７に位置づける。

教育内容５は、真実接触点が表面の凸部どうしの接触で生じることを説明している。

教育内容６、７を挙げる理由は２つある。第一に、真実接触点に高い圧力が加わることは、摩擦力が起きる根拠に関わっている。摩擦についての研究から、真実接触点に高い圧力が加わるために、接触するそれぞれの物体の表面の原子が結合したり、反発し合っており、この状態で物体を動かそうと力を加えると、真実接触点において摩擦力が起きることが明らかとなっている[32]。

第二に、教育内容６では、それぞれの真実接触点が一定の大きさの点と見なせることを示している。このことは生徒が、真実接触点の数に、物体を動かすために必要な力の大きさと物体が平面を押す力がそれぞれ比例していることを理解する上で必要である。

説明Ｂでは、表面の凹凸を拡大して図示し、実際に接触しているのは、表面の凸部どうしであることを説明している。質問では、前述したように実際に接触している部分を観察することが学校では困難であることから、生徒にとって身近であるサッカーコートに拡大した場合を想定し、各々の真実接触点を５００円硬貨と見なして、その数を質問する内容としている。説明Ｃでは、人差し指に相撲取りが 10 人乗っている例を示すことで、真実接触点における圧力が極めて高いことを説明している。

【教育内容８】

物体を動かすために必要な力は、物体が平面を押す力に比例する。このことは、次の２点より説明される。

・物体を動かすために必要な力の大きさは、真実接触点の数に比例する。

・真実接触点の数は、物体が平面を押す力に比例する。

この教育内容の発問の例は次のとおりである。

【問題Ｄ】

ビー玉を３つ入れたアクリル箱があります。この箱をアクリル板に載せて、箱に糸でつないだコップに、重りを１個ずつ入れていきます。すると、ある重りの数で箱が動きます。

アクリル箱を、１個、２個、３個、４個と積み重ねると、動かすために必要な重りの数はどのように変化するでしょうか。

一連の教育内容の最後に、クーロン・アモントンの法則のうちに未出だった、物体を動かすために必要な力の大きさが、物体が平面を押す力の大きさに比例することを位置づける。この教育内容で生徒が、これまでの教育内容で示した真実接触点の数と物体が平面を押す力の大きさに関係があることを手がかりとして、物体を動かすために必要な力の大きさと物体が平面を押す力との関係を理解する。

６．おわりに

本論では、摩擦についての現代科学の成果である、真実接触点の概念を教育内容として、最大摩擦力に関するクーロン・アモントンの法則を学習する教育内容を設定した。この設定した教育内容では、平らで滑らかな面にある物体の摩擦を内容とし、最大摩擦力に関するクーロン・アモントンの法則は、「物体を動かすために必要な力

の大きさは、物体が平面を押す力に比例する」という内容として学習する内容とした。また、生徒の認識形成における実体的イメージの役割に着目し、真実接触点を実体的イメージに対応する教育内容と位置づけた。そして、発問例において真実接触点に対応する教具としてビー玉を用い、教材構成の観点で実体的イメージの形成を促す方策を示した。その結果、摩擦力の教育内容の課題の一つである、摩擦力の発生機構と関連づけて最大摩擦力に関するクーロン・アモントンの法則を学習する教育内容を明らかにでき、摩擦力の教育内容における課題の一部を解決する方策を示した。

今後の課題として、本論で設定した教育内容に基づく指導の後に続く、摩擦力そのものの教育内容を設定することが挙げられる。また、第１章で挙げた、運動の法則の指導と力学教育カリキュラムにおける課題として、次の点が挙げられる。

運動の法則の指導では、生徒の慣性質量と摩擦力の混同を解消することが課題の一つである。運動の法則である$f=ma$（fは物体が受ける力、mは物体の質量（慣性質量）、aは物体の加速度）の指導で、物体が受ける力fが変わらない場合、物体の質量が大きいと摩擦が大きくなるから上記のmは大きくなるので、物体の加速度aは小さくなる、と生徒が理解している場合があることが指摘されている[33]。正しくは、摩擦は力であることから、物体が受ける力として摩擦を理解した上で、fの値を算出するという方法で、摩擦を運動の法則の中で適用していくものである。物体の質量が大きいと摩擦が大きいので上記のmが大きくなる、という理解の一因は、生徒が摩擦を力として明確に認識していないために、摩擦という接触した２つの物体の間にあるものと物体の質量を誤って関連づけて考えているためである。

したがって、運動の法則の指導を行う前に、摩擦が力であるということを明確に理解することが、運動の法則を正しく理解する上で重要である。

また、力学教育カリキュラムにおける摩擦力の単元の位置が、教科書を例にとっても、運動の法則の前に位置づけられる場合[34]と、後に位置づけられる場合[35]があり、どの位置づけがよいのかは明確になっていない。このことは今後、摩擦力と運動の法則の指導過程を明らかにする中で検討していくべき課題である。

【注釈・参考文献】

1) 例えば次の文献で、生徒の摩擦についての前概念に、「摩擦は力ではないが、運動を妨げる影響である。」が挙げられると指摘している。
・C.Camp,J.Clement:
Preconception in Mechanics,Kendall/Hunt(1994).

2) トライボロジー辞典,日本トライボロジー学会編,養賢堂(1995)250.

3) 出典は、曽田範宗:摩擦の話,岩波書店(1971)14.である。なお、摩擦の法則の呼び方は、クーロン・アモントンの法則の他に、アモントン・クーロンの法則、クーロンの法則と呼ばれることがあるが、本論ではクーロン・アモントンの法則とする。

4) 高等学校物理Ⅰ,啓林館(2004)92-95.

5) 物理の教科書では、最大静止摩擦力を最大摩擦力と表記している。本論では、摩擦の研究成果に関する記述では最大静止摩擦力とし、教育内容に関する記述では、最大摩擦力とした。これらは同じ意味である。

6) 調査した教科書は、高等学校用物理（上巻・三省堂・昭和２７年度用）、物理（新訂版・三省堂・昭和４０年度用）、物理Ⅰ（三省堂・昭和５７年度用）、詳説物理（三省堂・昭和６３年度用）、高等学校物理Ⅰ（啓林館・平成１６年度用）である。

7) 高等学校用物理（上巻・三省堂・昭和２７年度用）、物理（新訂版・三省堂・昭和４０年度用）、物理Ⅰ（三省堂・昭和５７年度用）、がこの例である。

8) 詳説物理（三省堂・昭和６３年度用）、高等学校物理Ⅰ（啓林館・平成１６年度用）がこの例である。

9) 高等学校用物理（上巻・三省堂・昭和２７年度用）、物理（新訂版・三省堂・昭和４０年度用）、物理Ⅰ（三省堂・昭和５７年度用）がこの例である。

10) 詳説物理（三省堂・昭和６３年度用）、高等学校物理Ⅰ（啓林館・平成１６年度用）がこの例である。

11) 例えば、クーロンは検証の際に、物体を載せる平面を、長かんなで入念に仕上げた後、小鮫の皮で磨いている（文献 16）を参照）。また、接触の機構を研究する際の条件は、平らで滑らかな面どうしの摩擦で行っている（文献 23）を参照）。

12) この段落の記述の趣旨は、垂直抗力を摩擦力の単元で学習しようとする場合には課題があることを指摘するものである。垂直抗力を学習することそのものは、静力学の中で重要な内容である。

13) 閏間征憲: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)40-51.

14) C.Camp,J.Clement:

Preconception in Mechanics,Kendall/Hunt(1994).

15) アモントン:機械に発生する抵抗について,原典に見るトライボロジーの世紀,吉武立雄編訳,工業調査会(2000)56-72.

16) クーロン:簡単な諸機械の理論,吉武立雄訳,工業調査会(1996)80.

17) 文献 15),16)では、この観点での摩擦の機構についての説が述べられている。

18) デザギュリエの説については、次の文献を参照されたい。

・デザギュリエ:実験物理学講義,原典に見るトライボロジーの世紀,吉武立雄編訳,工業調査会(2000)140-151.

19) バウデン,テイバー:固体の摩擦と潤滑,曽田範宗他訳,丸善(1961)83-92.

20) 安藤泰久:トライボロジスト,51,11(2006)788.

21) 平野元久他:トライボロジスト,39,5(1994)393.

22) M.H.Musser,L.Wenning and M.O.Robbins:Phys.Rev.Lett.86(2001)1295.24)

23) バウデン,テイバー:固体の摩擦と潤滑,曽田範宗他訳,丸善(1961)21-27.

24) 最大静止摩擦力を接触点付近で計測しようとする場合、ひずみゲージを物体に貼る方法が考えられるが、学校での実験を想定すると容易ではない。現在の高等学校の教科書に記されている実験でも、物体を動かすために必要な力を計測して、最大摩擦力の大きさとしている。

25) 例えば、文献 14)では、摩擦する物体の表面の凹凸の変形から摩擦力の認識形成を図ろうと試みている。また、仮説実験授業の授業書「ばねと力」では、机に物体を置いた場合に物体が机から受ける力を指導する際に、机の上に物体を載せたときに、机が押し縮められており、もとに戻ろうとして物体を押し上げるという教育内容としている。授業書「ばねと力」については、次の文献を参照。

・板倉聖宣:仮説実験授業～授業書「ばねと力」によるその具体化,仮説社(1974).

26) 真実接触点の観察と真実接触面積の算定についての研究は、次の論文で紹介されている。

・河野彰夫:トライボロジスト,25,12(1980)809.

・河野彰夫:トライボロジスト,35,11(1990)779.

27) 高村泰雄他:物理教授法の研究,北海道大学図書刊行会(1987)44-47.

28) 例えば、三省堂版の国語辞典「大辞林 第二版」では、摩擦はこすること、すれ合うことと記述されている。

29) 吉田光則他:北海道立工業試験場報告,292(1993)13-22.

30) 仮説実験授業の授業書「まさつ力」の授業記録における生徒の発言から、このように考えている生徒が相当数いることがわかる。(例えば、板倉聖宣、上廻昭編著,仮説実験授業入門(明治図書)の P.169～171 を参照。)

31) 高村は、実体的イメージの例として、水道方式の自然数指導におけるタイルを挙げている。水道方式については、次の文献を参照されたい。

・新版水道方式入門整数編,遠山啓・銀林浩編,国土社(1992).

また、高村の文献については、次の文献を参照されたい。

・高村泰雄:教授学研究ノート,北海道大学教育学部紀要,25(1975)7-17.

32) 文献 19)～21)を参照されたい。

33) 滝川洋二:実践記録の分析と概念形成,理科教室 ,47,12(2004)18-25.

34) 物理(新訂版・三省堂・昭和４０年度用)、詳説物理(三省堂・昭和６３年度用)、がこの例である。

35) 高等学校用物理(上巻・三省堂・昭和２７年度用)物理Ⅰ(三省堂・昭和５７年度用)、高等学校物理Ⅰ(啓林館・平成１６年度用)がこの例である。