



Title	接触の機構に着目した抗力の教育内容構成
Author(s)	工藤, 保広
Citation	北海道大学大学院教育学研究院紀要, 108, 119-129
Issue Date	2009-07-15
DOI	https://doi.org/10.14943/b.edu.108.119
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/38813
Type	departmental bulletin paper
File Information	108-011.pdf



接触の機構に着目した抗力の教育内容構成

工 藤 保 広*

A Study on Structures of Educational Content of Frictional Force and Normal Force Set up by Considering Contacting Mechanism

Yasuhiro KUDO

【目次】

1. はじめに
2. 抗力の指導内容と課題
3. 抗力と真実接触点の関係
4. 抗力の教育内容構成
5. おわりに

【キーワード】 摩擦力, 垂直抗力, 真実接触, 力学教育, トライボロジー, つりあい

1. はじめに

高等学校の力学では、摩擦がある場合に物体が受ける力について学習する。

水平面においた物体に、水平方向に動かそうと力を加え未だ物体が静止している場合、この物体は次の力を受ける（図1参照）。

①水平方向～物体を動かそうとする力と静止摩擦力

②垂直方向～重力と垂直抗力

教科書の摩擦力の単元では、①の2力と②の2力がそれぞれ、大きさが同じで正反対の向きであることが説明されている。しかし、物体を動かそうと力を加えると垂直抗力の作用点が移動し、物体を動かそうとする力と重力の合力と、抗力（垂直抗力と静止摩擦力の合力）が、同一直線上に位置し正反対向きで同じ大きさとなることは説明されていない。

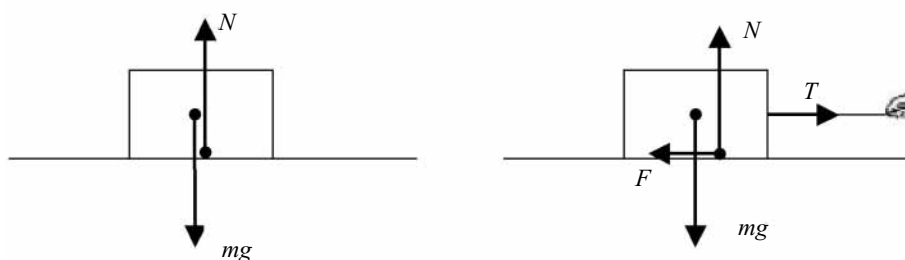
接触の機構についての研究成果から、物体を動かそうとする力を加えると、接触面に点正在している真実接触点は、加えた力の向きに移動すると言える。この点に着目し、真実接触点の移動と抗力の作用点の移動を関連づけ、物体を動かそうとする力、重力、抗力の関係を理解する教育内容を明らかにすることで、摩擦がある場合に物体が受ける力の関係を生徒がより容易に理解できる方策を示すことができる。

本論文では、接触の機構から言える真実接触点の挙動と抗力の作用点との関係を明らかにし、抗力の教育内容構成について論じる。

* 北海道上川支庁

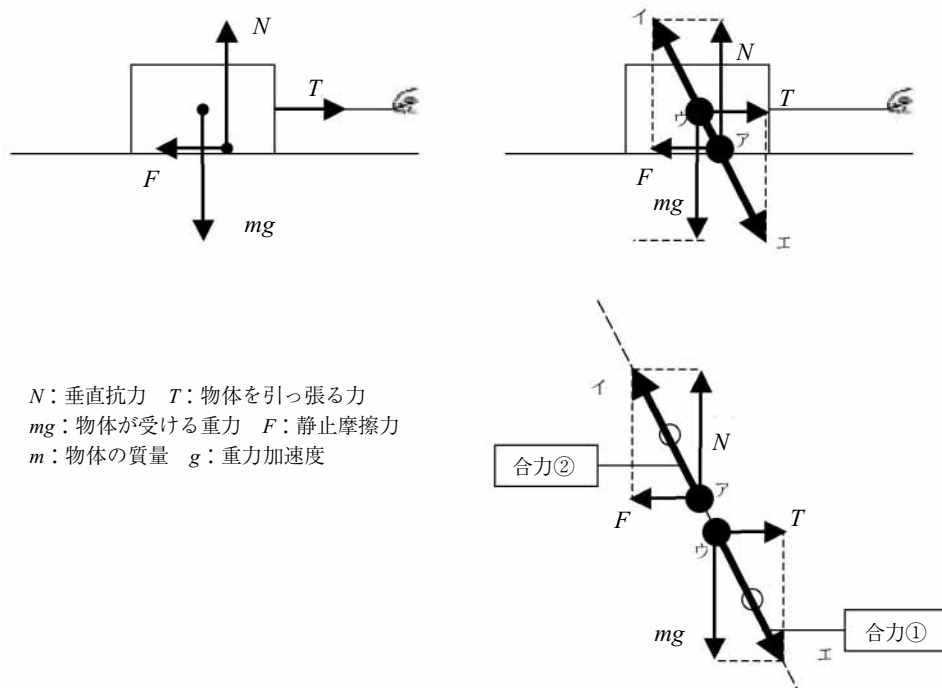
2. 抗力の指導内容と課題

現在の高等学校の教科書¹⁾では、物体に働く抗力は、図1のとおり表記されている。



N : 垂直抗力 T : 物体を引っ張る力 mg : 物体が受ける重力 F : 静止摩擦力
 m : 物体の質量 g : 重力加速度
 力の大きさについては、 $F=T$, $mg=N$ が成り立つ。

図1 垂直抗力と静止摩擦力



N : 垂直抗力 T : 物体を引っ張る力
 mg : 物体が受ける重力 F : 静止摩擦力
 m : 物体の質量 g : 重力加速度

物体が受ける重力 mg と物体を引っ張る力 T の合力①は線ウエで記され、物体が水平面から受ける垂直抗力 N と静止摩擦力 F の合力②は線アイで記される。合力①（線ウエ）と合力②（線アイ）は同一直線上にあり、互いに正反対の向きで同じ大きさの力であることから、この2力はつりあっている。したがって、物体が受ける重力 mg 、物体を引っ張る力 T 、物体が水平面から受ける垂直抗力 N 、静止摩擦力 F はつりあっており、物体は静止している。

図2 物体が静止摩擦力を受ける場合の力のつりあい

図1の左図は、水平面に質量 m の物体を置いた場合に物体が受ける力を図示したものであり、右図は水平方向右側に引っ張った場合に、物体が受ける力を図示したものである。

左図では、物体は、垂直方向下向きに地球から重力を、上向きに水平面から垂直抗力を受けている。重力は物体の重心を作用点として、垂直抗力は、水平面と物体の接触面の中心を作用点として、それぞれ図示されている。なお、重力と垂直抗力は同一直線上にあり、正反対の向きで同じ大きさであることから、力はつり合っている。したがって、物体は静止している。

右図の場合、垂直抗力と重力に加え、水平方向右向きには引く力を、左向きに水平面から静止摩擦力を受ける。右図では、重力は左図と同様に物体の重心を作用点として図示されている。しかし、垂直抗力と静止摩擦力の作用点は接触面の中心よりも右側に位置して図示されており、静止摩擦力と物体を引く力は同じ大きさと説明されている。この場合も物体は静止しているが、重力、垂直抗力、物体を引く力、静止摩擦力の間にどのような関係が成り立っているかは説明されていない。

教科書などで記されていないこの点は図2のとおり説明できる²⁾。

このように、抗力の指導内容では、図1のように抗力を図示して説明はされているが、図2に記したその根拠が説明されていないという課題がある。また、図2の説明内容は、物体が静止しているという事実から、静止しているためには物体が受けている力がつりあっている必要があり、そのためにはこのように説明されるというものであり、生徒にとっては容易に理解しにくいものである³⁾。生徒にとっては、物体の挙動に着目して、抗力の作用点などがどのように変化していくかを考えることができれば、図2の力のつりあいの内容はより理解しやすくなると考える。

3. 抗力と真実接触点の関係

筆者は、既報で摩擦力の認識形成には、接触の機構を教育内容とすることが有効な方策であり得ることを指摘し、摩擦力の認識形成に先立って、摩擦の法則の学習の中で、平面に置いた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の大きさの関係を、真実接触点の数と関連付けて理解することを目指した教育内容と教材の構成を提案した^{4),5)}。

この章では、既報の提案を踏まえ、接触の機構に着目した抗力の教育内容構成を行うため、抗力の作用点と真実接触点の関係について論じる。

既報で論じた真実接触点と摩擦力の関係は、図3のとおりである^{6)~9)}。

前章の図2で記したように、水平面に置いた物体に、動かそうと力を加え、垂直抗力の作用点は加えた力の向きに移動し、静止摩擦力は垂直抗力の作用点と同じ点を作用点として図示される。このことは、真実接触点を用いて次のとおり説明できる(図4)。

- ① 物体を平面に置いたとき、真実接触点は接触面に概ね一様に点在している。水平面が物体を押し上げる力(垂直抗力)は、現実には真実接触点のそれぞれが作用点であるが、垂直抗力は、一本の矢印で図示することとし、作用点は接触面の中心とする。
- ② 物体を動かそうと力を加えると物体は回転しようとし、接触面の中心より物体を動かそうと加えた力の向きの側がより強く押しつけられる一方、その反対側は押しつける力が弱くなる。このため、真実接触点の分布は、接触面の中心より物体を動かそうと加えた力の

向きの側に偏る¹⁰⁾。

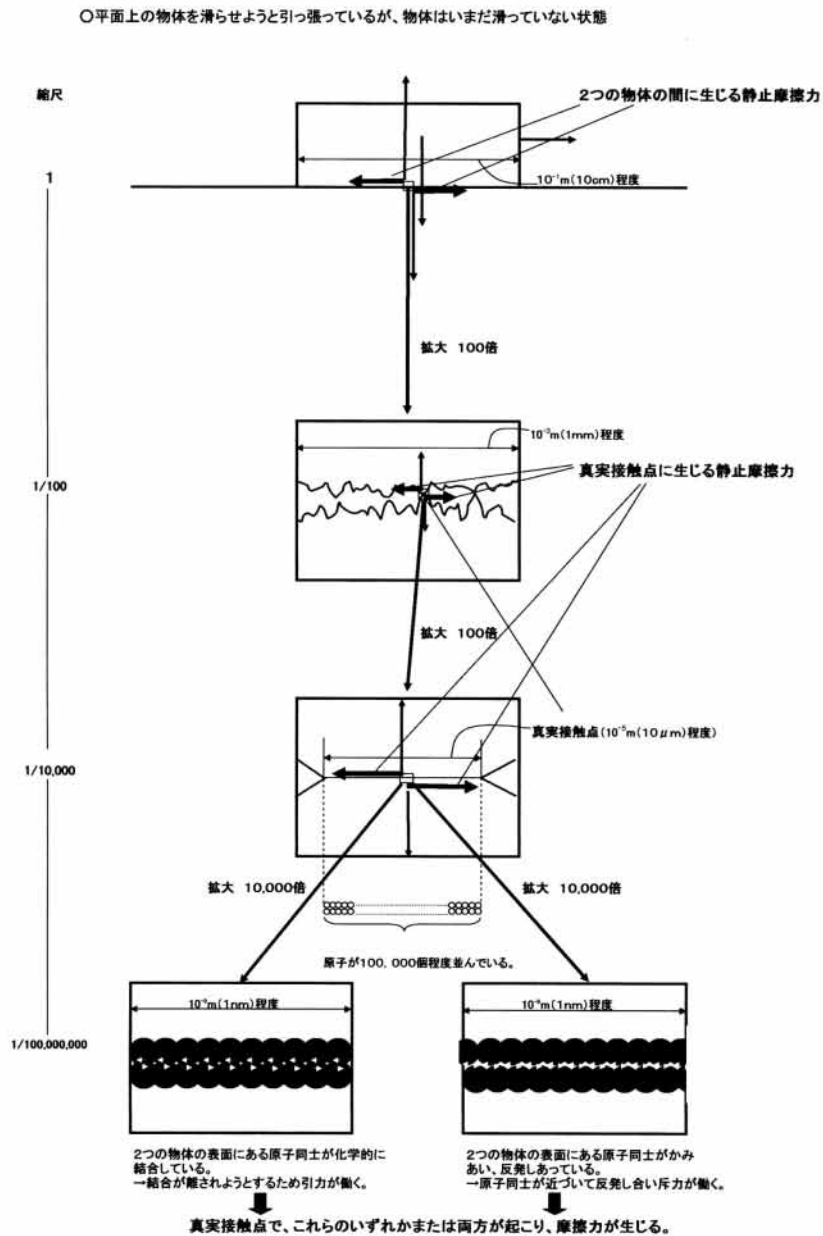
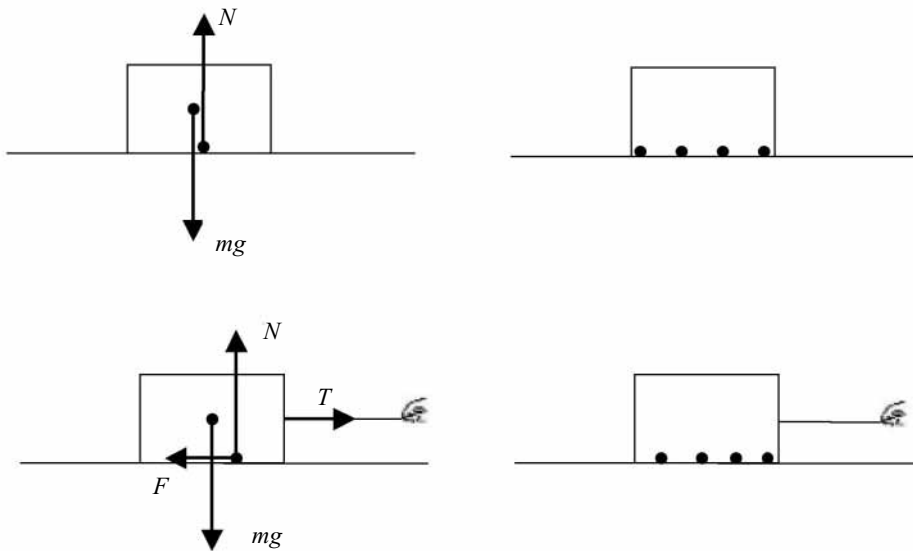


図3 真実接触点と摩擦力

- ③ ①の場合、真実接触点が接触面に一様に点在しているので、垂直抗力の作用点を接触面の中心とするとした。したがって、②の場合、垂直抗力の作用点は、真実接触点の分布が偏ることで、接触面の中心より加えた力の向きに移動する。真実接触点の数は、物体を動かそうと水平方向に力を加えても、接触面の中心より一方の側で増えて他方で減ることになり、変わらない。
- ④ ②の場合、物体は各々の真実接触点で水平面から静止摩擦力を受けるが、物体が受ける静止摩擦力は一本の矢印で図示する。この作用点は、水平面から受ける力であることから垂直抗力と同じ点とする。



N ：垂直抗力 T ：物体を引っ張る力 mg ：物体が受ける重力 F ：静止摩擦力
 m ：物体の質量 g ：重力加速度
 力の大きさについては、 $F=T$ 、 $mg=N$ が成り立つ。

図4 静止摩擦力と真実接触点

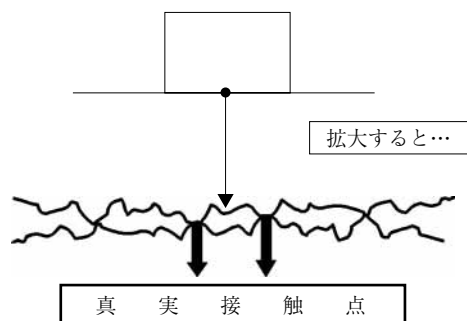
4. 抗力の教育内容構成

本章では、抗力の教育内容構成について論じる。この教育内容構成では、最終的に第2章の図2に記したように、物体が受ける力の間の関係を図示し理解できることを目標とする。なお、本論では、静止摩擦力を受ける物体に働く力のつりあいを学習するまでに留め、動摩擦力については、今後の課題とする。

以下に記す教育内容は、今後、この順序でそれぞれの教育内容に対応した発問や説明等を設定し、授業プランを作成することを想定している。

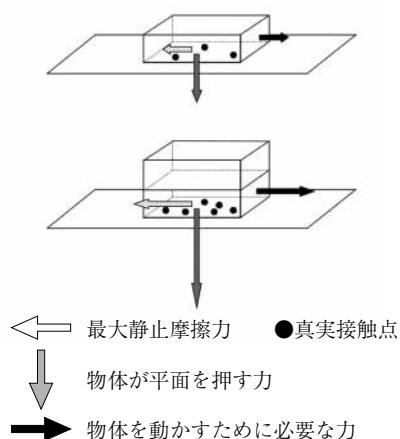
【教育内容 1】

- ・ 見た目には平らで滑らかな面にも細かな凹凸がある。
- ・ 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。



【教育内容 2】

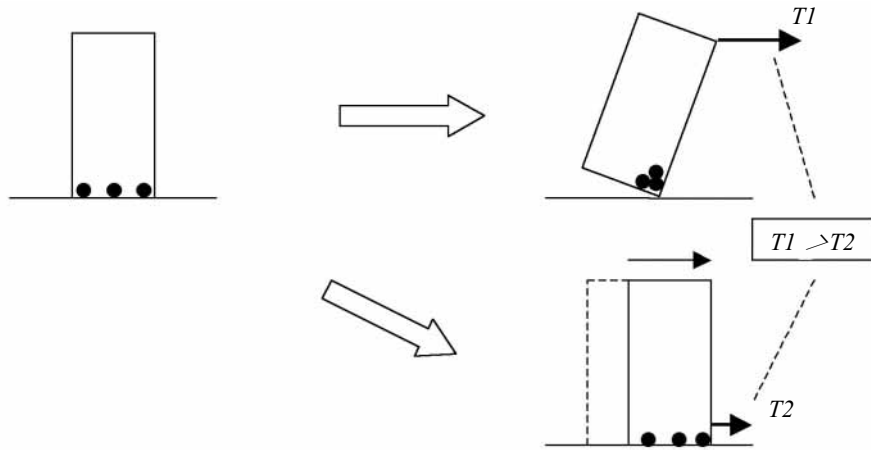
- ・ 真実接触点には，極めて高い圧力が加わる。
- ・ 真実接触点の数は，物体が平面を押す力に比例する。



教育内容 1，2 は，接触の機構に着目して抗力を理解する前提として必要となる内容である。このため，教育内容構成の冒頭に位置づけている。具体の発問，説明の例は，筆者の既報³⁾，⁴⁾ に記している。

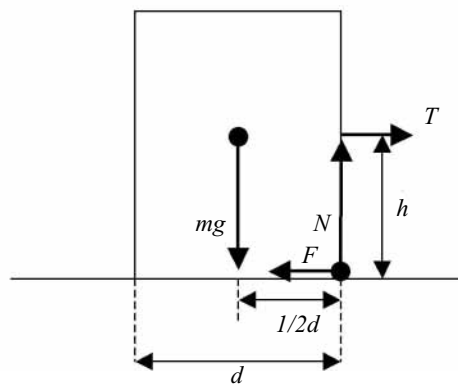
【教育内容 3】

- ・ 接触面の幅よりも高さが十分に大きい物体が，平面上にある。物体に対して，その頂部で水平方向に力を加える。すると，ある大きさの力で物体は倒れる。
- ・ この物体に力を加える場所を平面に近い場所になると，物体は倒れる力に達する前にすべり始める。
- ・ これらの場合のいずれも，真実接触点は力を加えた方向に移動する。



この教育内容は、平面上にある物体に水平方向に力を加えた場合に、真実接触点がどのように移動するかを示すものである。生徒にとっては、物体のマクロの動きと加える力、そしてミクロの真実接触点の挙動を関連づけることが重要である。しかし、物体が静止している状態のみを示して、物体に加えた力と真実接触点の挙動を関連づけることは生徒にとって容易ではない。そこで、いわゆる坐りの悪い背の高い物体を用い、力を加えると物体が転倒することを生徒に示した上で、加える力と真実接触点の挙動を考えていく発問を設定することが必要である。

なお物体が転倒する際の力の関係は、図5のとおり説明される²⁾。

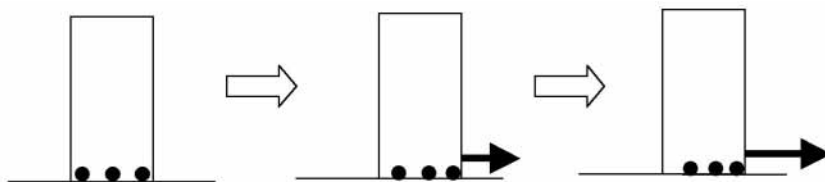


水平面と引っ張る力の作用点の距離を h 、接触面の長さ d とする。物体を引っ張る力 T を一定とし、 h を増やしていくと $h > (mg)/(2T)$ で物体は転倒する。ただし、 $h < d/(2\mu)$ (μ : 静止摩擦係数) の場合は、転倒する前に物体を引っ張る力 T が最大摩擦力 $F_0 (= \mu mg)$ の大きさに達し滑り始めるため、転倒しない。

図5 物体が転倒する際の力の関係

【教育内容 4】

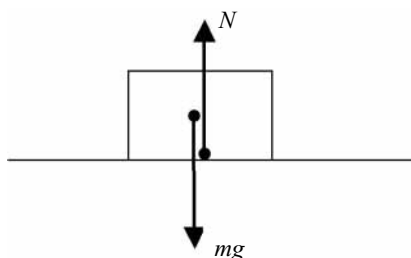
- ・平面においた物体に、水平方向に動かそうと力を加える。力の大きさを増やしていくと、真実接触点は力を加えた向きに移動していく。



教育内容 3 では、物体が倒れるかすべり出す際に、真実接触点が力を加えた向きに移動することを示した。この教育内容では、物体が倒れるかすべり出すまでの間に、物体に加える力を変化させると真実接触点がどのようにふるまうかを示す。生徒にとっては、教育内容 3 で物体が倒れるかすべり出す瞬間には、真実接触点は加えた力の向きに移動していることがわかっている。それを手掛かりにして、教育内容 4 を学習する発問に取り組むことで、物体に加える力の大きさの変化と真実接触点の移動を関連付けて動的なイメージとして認識できると考える。このことは、次の教育内容以降で示す、抗力の作用点の位置を理解するための手がかりとなる。

【教育内容 5】

- ・平面上にある物体は、下向きに重力を受ける。
- ・平面上にある物体は、平面から上向きに垂直抗力を受ける。
- ・重力と垂直抗力は、正反対の向きで同じ大きさである。
- ・重力は物体の中心を作用点とする。
- ・垂直抗力は接触面の中心を作用点とする。



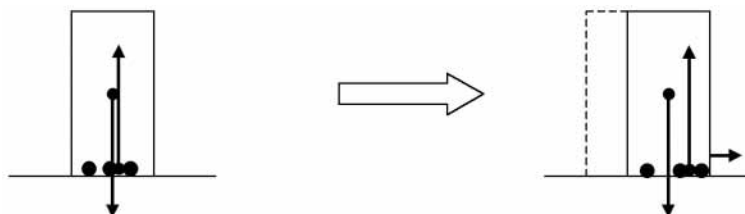
N ：垂直抗力 mg ：物体が受ける重力 m ：物体の質量 g ：重力加速度
力の大きさについては、 $mg=N$ が成り立つ。

この教育内容は、垂直抗力と重力の図示方法を示すものである。今後、抗力と真実接触点を関連づけて理解するための前提となる。

【教育内容 6】

- ・平面上にある物体に、水平方向に力を加えると、垂直抗力の作用点は加えた力の向きに移動するが、向きと大きさは変わらない。理由は、真実接触点の分布が、加えた力の向きに偏るが、数は変わらないためである。

また、力を加える前後で、重力の作用点、向き、大きさは変わらない。



この教育内容は、垂直抗力の作用点と真実接触点の挙動の関係を示すものである。生徒がこの教育内容に対応した発問に対して解答を予想する際に、次のように考えることを期待している。

- ①教育内容 3 から、上図の場合であれば、力を加えると物体が時計回りに回転して、物体が平面を押しつけるので、真実接触点の分布が加える力の向きに偏る。
- ②教育内容 4 と①から、垂直抗力の作用点が上図の場合であれば、右向きに移動する。

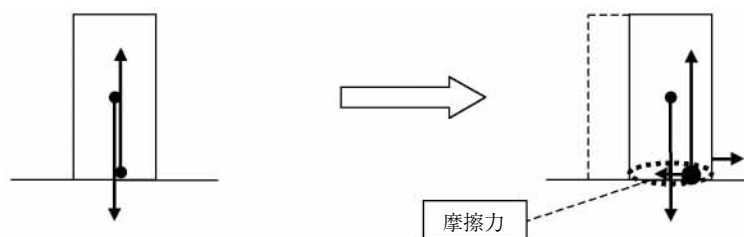
一方、生徒にとって、物体に水平方向に力を加えても、垂直抗力と重力の大きさが変わらないことは自明ではない。

したがって生徒は、この教育内容に対応した発問の予想を踏まえて実験で解答を明らかにすることで、物体に水平方向に力を加えた場合の、垂直抗力についての認識形成ができる。このことは、力学教育において大きな課題である、生徒の水平方向と垂直方向の力の混同を解決するための方策の一つとなりうると考える¹¹⁾。

【教育内容 7】

- ・平面上にある物体に、水平方向に力を加えると、物体は平面から加えた力の正反対の向きで同じ大きさの力を受ける。この力を摩擦力と言う。

その理由は、真実接触点で物体が平面に高い圧力で押しつけられており、動かそうと力を加えると、物体は平面から、動きを妨げようとする力を受けるためである。



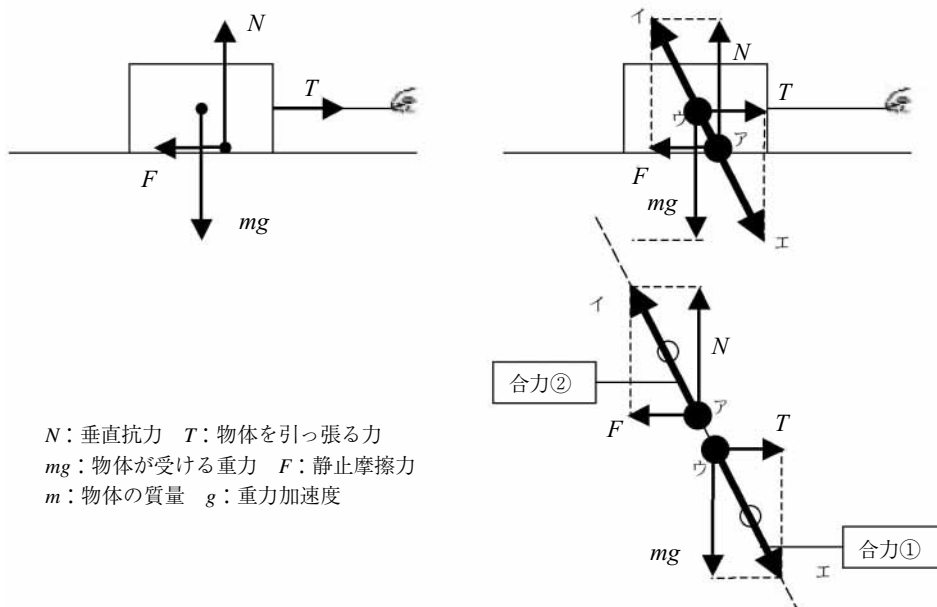


生徒が、(a)のように、真実接触点で受ける力の向きを考えた上で、ブロックの力のつりあいから(b)の理解へと進むことで、摩擦の機構に即して、作用点を考えることができ、生徒が納得しやすいと考える。

この教育内容では、生徒が教育内容2で示した、真実接触点で物体が平面に高い圧力で押しつけられていることを手がかりとして、摩擦力の認識形成を図ることを意図している。

【教育内容8】

- ・垂直抗力と摩擦力の合力（抗力）と、物体を動かそうとする力と重力の合力は、下図のとおりにつり合う。



教育内容6までの内容で、生徒は、平面に置いた物体に水平方向に力を加えると、抗力の作用点が増えた力の向きに移動することを理解できる。抗力の作用点が増えた位置に決まることを理解するためには、図2に示した力のつり合いについての説明を要する。そこで、最後にこの教育内容を挙げる。

5. おわりに

本発表では、接触の機構に着目して、真実接触点の挙動と抗力の作用点の関係を手がかりとして、平面上の物体が受ける力のつりあいを理解するための教育内容構成の一案を示した。今後の課題として、動摩擦力の教育内容構成を明らかにしていくことと、本論の教育内容構成についての検討を進めて、教材の構成と授業プランの作成をしていくことが挙げられる。

【参考文献】

- 1) 一例として次の文献がある。
 - ・高等学校物理 I，啓林館(2004)92-95.
 - なお、戦後の物理の教科書を概観すると、水平方向に力を加えても、垂直抗力の作用点が変わらないように図示しているものや、重力の作用点を接触面上に記しているものなどが見られ、抗力の図示方法は様々である。この課題は、次の文献で指摘されている。
 - ・石井信也：抗力の作用点は？，理科教室，27,8(1984)84.
 - ・加藤徹也：垂直抗力の作用点－物理入門におけるあいまいな図解－，千葉大学教育学部研究紀要 Ⅲ：自然科学編，52(2004)319.
- 2) 例えば、次の文献で解説されている。
 - ・渡辺久夫：親切的な物理（上），正林書院(1984)252-253.
- 3) 板倉聖宣氏は次の著書で、ひもに吊り下げられた物体に働く力を例に挙げ、抗力の学習方法の現状について同様の指摘をしている。この著書で板倉氏は、スポンジを平面と物体の間に挟んでおき、物体を取り除いた時にスポンジが上向きに戻ることを示して、生徒が上向きに抗力が生じていることを学習する方法を提案している。
 - ・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)106-110,142-144.
- 4) 工藤保広：真実接触に着目した摩擦現象の授業プラン，教授学の探究，北海道大学大学院教育学研究院教育方法学研究室，25(2008)1.
- 5) 工藤保広：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，教育学の研究と実践，北海道教育学会，4(2009)55.
- 6) バウデン，テイバー：固体の摩擦と潤滑，曾田範宗他訳，丸善(1961)83-92.
- 7) 河野彰夫：トライボロジーの新しい展開，日本物理学会誌，43,8(1988)579.
- 8) 安藤泰久：トライボロジスト，51,11(2006)788.
- 9) 平野元久他：トライボロジスト，39,5(1994)393.
- 10) 曾田範宗，河野彰夫：潤滑，22,1(1977)17.
- 11) 例えば、次の文献で指摘されている。
 - 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.