

倒れるかまぼこ板

— 目的意識をもって解決しながら学ぶために —

先端教育研究センター

特別研究員 川角 博

広がりをもってはたらく力の作用点の誤解と問題点を明らかにし、これを解決する具体的な一連の教材・授業として「倒れるかまぼこ板」に至る授業を提案する。これは、中学理科の知識だけで、広がりをもってはたらく力の作用点が理解に至る授業である。2枚のかまぼこ板を使って、二力のつり合い条件を演繹的に活用し、目的意識をもって解決しながら重心、垂直抗力など広がりをもってはたらく力の作用点の理解を深める。さらに、発展課題を通して、仮説を立て検証することで、理解の確信ができる。

〈キーワード〉 力 ニ力のつり合い 作用点 重心 抗力 垂直抗力 摩擦力

I 作用点の指導の現状

1 中学校理科の先生の悩み

現職教員研修をしていると、中学理科の先生から様々な質問を受ける。その一つに、広がりをもってはたらく力の作用点の指導をどうすべきかという悩みがある。ある中学校の先生によると「中学校1年で力を矢印で表すことを学ぶ。その授業で重要なのは、矢印を書くときには力の3要素をしっかりと押さえること。すると、作用点をどこにするかはとても重要となるところが、中学理科では、この作用点を確定し難いので困る」というのである。これについては、物理基礎でも同様なことが言える。中学理科・物理基礎で垂直抗力や摩擦力のような広がりをもってはたらく力の矢印を描かざるを得ない学習場面は少なからずある。その一方で、「その作用点を描かせるための根拠に基づく指導ができないで困っている」というのである。これに対して、中学・物理基礎のつり合いでは並進運動しか考えないし、この作用点を扱えないので矢印を適当に描かせるしかない、とりあえず面や物体の中央に描くことにするしかないだろう、という意見もある。私は、いい加減に描くよりも、分からないことは分からないとはっきり示した上で扱わないか、その段階で可能な限り正しいことを教えるべきだと考える。根拠もなしに、作法として面の中央に描くというやり方は、科学的ではない。科学的に間違っただけを描くくらいなら、描かないほうが良いと考える。

2 入試問題から

図1は、ある高校入試問題である。これを見て、中学校理科の先生の悩みの深刻さに気付いた。

力のモーメントまで学んだ高校生にとって、この問題は難し

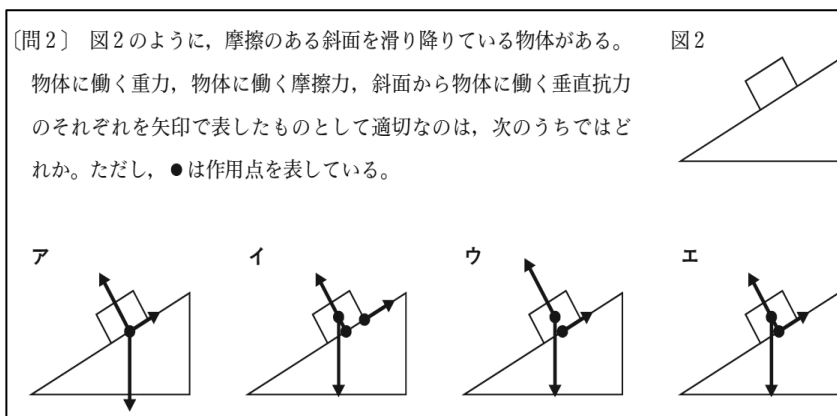


図1 高校入試問題

い。というより、正解がないので答えることができない。この問題点を次に示す。

重力(重心)を除いて、広がりを持って働く力の作用点を問うことは、学習指導要領上の中学理科の範囲を超えている。しかも、正解としているものが間違っており、この問題に正解はないのである。

- (1) 摩擦力や垂直抗力の作用点の位置を中学生は学んでいない。
- (2) 正解とされているエの場合、摩擦力成分による重心のまわりの力のモーメントが0とならないので回転してしまう。
- (3) 摩擦が加わりながら滑っている物体に働く抗力(このうちの面に垂直な成分が垂直抗力、面に平行な成分を摩擦力という)の作用点の決定は、高校生にも難問である。
- (4) 垂直抗力と重力の作用線が重心で交わっている。この物体が回転しないためには、抗力の作用線がこの重心を通らなければいけない。

図2は、この物体にはたらく力の矢印の一例である。

物体が斜面上を等速度で降下している時には、重力 W と抗力 R の作用線は一致するので、抗力の作用点は、重力の作用線が斜面と交わる A 点にある。

速度が増している時には、抗力と重力の合力は、斜面下向きに0ではない値となる。なおかつ、物体が回転しないから、抗力は重心を通る。したがって、図2のように抗力 R の作用点は A 点と重心 G を通って斜面に垂直な線が斜面と交わる B 点との間のどこかになる。摩擦が無ければ、選択肢エから摩擦力をなくしたものとなる。

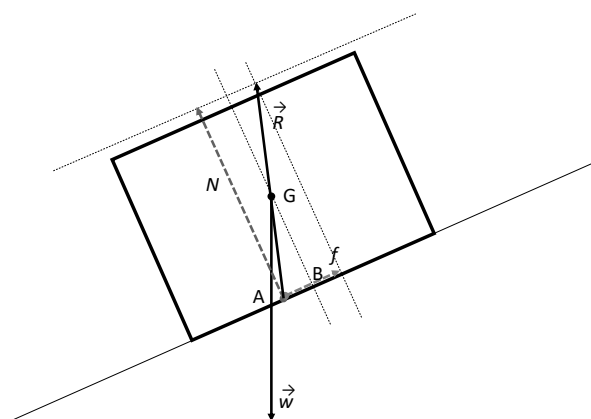


図2 摩擦力を受け斜面下方に加速している

物体が減速しているときは、重力と抗力の合力は、斜面に平行に斜面上向きになる。このためには、重力の作用線が斜面と交わる A 点よりも斜面下側に抗力の作用点があり、抗力は重心を通る。

このように、出題条件の自由度のため抗力の作用点は一つに定まらない。

II 抗力の作用点を理解する授業の必要性

1 誤解の原因

図1のエがなぜ正解になっているのかについて疑問に思い、中学理科の先生に尋ねた。この原因は、一部の中学教科書指導書の説明にあるらしい。中学校の先生によると、使っている教科書指導書に【指導のポイント】力の描き方として次のようにあるという。

「点で触れあっている力は接点、面で触れあっているときは面の中央(中心)を作用点とする」

もちろん、このように作用点を描くという約束も物理学的な根拠はない。しかし、どうもこのような教え方が中学理科のローカルルールになっている気配がある。とりあえずの対応として使うくらいのルールならば害は少ないが、入試問題にまで扱われると問題がある。私は、これを深刻な問題と感じ、解決策を示す必要があると考えた。

これを解決するためには、中学1年「身近な物理現象 力の働き」の学習の重要性を認識する必要がある。この単元に関して、一見簡単そうで、ばかばかしそうで、教えるべきこともほとんどない、と感じる先生が少なからずいるのではないかと。少し勉強ができる生徒も、同様に感じているかもしれない。

ここの学習を確認しておく。

①力は筋肉の緊張として感じる。②ピッチングマシンには筋肉はないが、ボールに力を与えている。③なぜそう思えるか。ヒトがボールを投げると同じ現象をピッチングマシンも生じさせているからだ。④そこで、筋肉の緊張を感じながら生じる現象と同じ現象をいろいろ見つけてみる。⑤そこから帰納的に力の特徴

を抽出する。⑥それは、運動の様子を変える、物体を変形させる、である。⑦まとめれば、筋肉の緊張も、機械も必要なく、⑥が生じているときは、力がはたらいていると解釈し、力がはたらくと⑥が生じると理解する。

力がはたらいているかどうかは見えなくても、現象から力の存在が分かる。物理学の考え方は、自分がどう考え感じているかではなく、純粋に現象の分析にあることを中学理科で学ぶのである。

このような考え方を育てることこそが、中学理科のこの単元の最大の目標である。これが不十分だと、高校でも勝手な力を自分で想定してしまい、正しい力を見抜けない。中学理科は、哲学的に難しく、きわめて重要である。しかし、ここで学んだ力の働きを活用する場面の多くが3年の単元にあるため、力の働きを学んでいながら、これを使って「目的意識をもって解決しながら学ぶ」学習場面を作りにくい。一方、作用点は面の中央に描くとする作法だけは、根強く残っている。これが、現行学習指導要領では3年で学ぶ二力のつり合いに影響し、図1の問題の工を正解としてしまう。

2 大学生に対する調査結果

2017年度の「中等理科教育法Ⅲ」(東京学芸大学で中学・高校理科教員免許取得のための講座)受講者に「斜面上に静止する一様な物体にはたらく力」を尋ねたところ、以下のような結果が得られた。調査プリントの提出者は132名であった。

無回答	5名(4%)
図3の回答	113名(86%)
図4の回答(正解)	8名(6%)
それ以外の回答	6名(5%)

なお、「中等理科教育法Ⅲ」第1回授業でのアンケート調査によると、物理に関する授業を受け

ている状況は以下の通りであった。このときの調査プリント提出者は119名であった。

高校での物理関連授業の履修	
物理Ⅰまたは物理基礎のみ履修	46名(39%)
物理Ⅱまたは物理まで履修	66名(55%)
無回答または履修無し	7名(6%)

大学で物理と名の付く科目(物理学概論、物理学入門、物理実験、物理学演習、力学、電磁気学など)を3科目以上履修していると答えた学生は105名、無回答14名であった。

上記の履修状況からすれば、正解者6%の原因が力のモーメントを学んでいないからではないことは、明らかである。中学(物理基礎)での「作用点は面の中央に描く」という指導の影響は大きい。

Ⅲ 作用点を理解する授業「倒れるかまぼこ板」の提案

中学理科の次期学習指導要領から二力のつり合いが3年から1年に移動する。二力のつり合い条件をもとに、面にはたらく力の作用点を考えさせる授業がやり易くなる。これにより、中学理科や物理基礎では扱えないような(工夫次第では扱えるとは思いますが)作用点の位置も、なぜその作用点が確定できないのかも含めて、分かるようになる。特に、二力のつり合い条件を演繹的に使う場面として「倒れるかまぼこ板」の授業を用意した。この授業では、広がりをもってはたらく力の作用点について目的意識をもって解決しながら学ぶことができる。

1 学習の芽を出させ思考の過程を歩ませる授業とするために

広がりを持ってはたらく力を代表する作用点を、中学理科の水準での理解に至る授業を目指すだけではなく、「知っていること・できることをどう使うか(思考力・判断力・表現力)」を、この授業を通して新たな知識・技能を身につけ、また「学びに向かう力」を育てる授業としても開発したいと考えた。

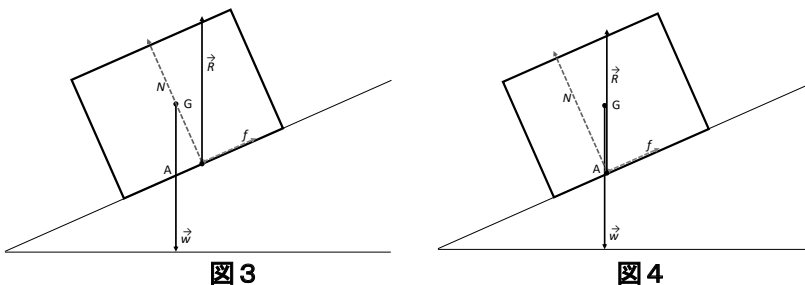


図3

図4

授業の基本構造として、次のことに留意した。

「分かっていることから始める」「分からないことに気付かせる」「分からないことを自分で解決したいと思わせる」「自分で分かったかどうかを確認させる。自分で検証する癖をつける(自分で納得しないと気持ち悪いと思える生徒を育てる)」。このためには、当たり前と思える現象から始めて、分かっていないことに気づかせ、解決の道をたどる授業が必要である。

ここで扱うのは、広がりをもってはたらく力の作用点に気付かせる実験である。この学習は、中学理科の次期学習指導要領では、中学1年 (1) 身近な物理現象 (イ) 力の働き (ウ) 力の働き に該当する。この作用点は、中学・高校の理科教員免許取得を目指す大学生ですらよく分かっていないのだから(図4の正解6%)、高校の物理基礎でも同じ展開で使う価値がある。

(1) なぜ球は転がりやすいのか

直方体は転がりにくいが、球は転がりやすい。頭でっかちの物体と末広りの物体では、前者の方が倒れやすい。これらは経験的には当たり前であろう。つまり知っていることである。しかし、それはなぜか、普遍的な説明はできるのかとなると、よく分からない。

当たりの現象とは何か、そこには、気まぐれではなくぶれない法則性がある、ということである。直方体と球のどちらが転がりやすいかという断片的な知識ではなく、そこにある普遍的な考え方を理解したほうが、アプローチの仕方も含めて、未来の自分に役立つ。それこそが科学教育の在り方である。

(2) 不思議に気づくポイント

当たり前だと思ふことを説明してみると、分かっていないことに気付いていなかった自分に気付く。続いて、そもそも「倒れるか倒れないかの違いはなんだ？」という疑問が現れる。それは、何らかの「つりあい」が成立していないからだ。ところで、つりあうってなんだ、その条件は?となる。そこで、力とは何か、力のつり合いの条件は何かとなり、これを解決するために学習が始まる。

(3) 力の理解の流れ(中学1年)

力のはたらきの授業における授業展開の概要は以下を想定している(力の表し方や力の単位なども入ってくるが、省略してある)。

- ①力とは何か・・・力のはたらきから帰納的に定義する。
- ②力が働いているのに力のはたらきが無いように見えることがある・・・力のつりあいを意識する。
- ③二力のつり合い条件を見つける・・・二力のつり合い条件を実験から探る。
- ④二力のつり合い条件を演繹的に活用する。

ア 見えない力の発見

イ 広がりをもってはたらく力の作用点の理解

①では、力を筋肉の緊張で感じていたものから出発し、力によって現れる現象の特徴を抽出して帰納的にとらえる。ここから抽出された力のはたらきとして、中学理科の教科書に次の三つが示されている。

a 物体の形を変える b 物体の運動の様子を変える c 物体を支える

「物体を支える」に、高校(実は中学でも)の教師は違和感を覚える。これは、何のためにあるのだろうか。現行の中学学習指導要領理科では、力のはたらきは中学1年、二力のつり合いは中学3年にある。このため、物体を支える力を重力と釣り合う力として扱えず、「物体を支える」として力のはたらきの一つとせざるを得なかった。しかし、次期学習指導要領からcは必要ないはずである。

2 二力のつり合い条件を探る

(1) 実験器具を作る(図5)

- ・厚紙に都道府県などの地図を貼る

- ・ハサミで切り抜く
- ・糸をつけたいところに画鋲で穴をあける
- ・ゼムクリップに短い方の糸を縛る(二つ)
- ・長い糸の一方の端を縛って輪を作る
- ・糸の他方の端にクリップを挟む

(2) 二力のつり合い条件の実験

水平面上で、図6のように糸にばねはかりをつけて引いたとき、最終的に釣り合うときの力の条件を探る。この実験は、中学1年の理科で最もつまらない実験と言われている。この実験から得られる条件は、「大きさが等しい」「逆向きである」「一直線上にある」である。これに対して生徒(実は先生も)の反応は、当たり前の結果じゃないか、そんなことくらい知っているよ、と思考停止となる。

この条件がいかに役立つかを体験させるために、二力のつり合い条件を演繹的に使って、問題を解決させる。

3 重心を見つける

切り出した都道府県の地図の一点を指で支えることができる。地図にはたらく重力は広がりを持っているが、一点で支えることができることから、そこにすべての重力が集まって働いているのと同じように扱えることが想像できる。これが重心である。地図の一点に糸をつけてつるしてみる。図7の張力の向きは明らかであるから、この力とつり合い条件を満たす力は、図7の破線上にある。つるす位置を変えて同様になると、図8のように破線が一点で交わる。すべてのつり合い条件を常に満たすためには、重心はこの交点にあることが分かる。

4 倒れるかまぼこ板の教材化・授業

(1) 実験材料(図9)

- ・同じ大きさ・形のかまぼこ板：一班あたり2枚。
- ・はがせる強力両面テープ：それぞれのかまぼこ板の一つ

の短辺に貼っておく

- ・薄い板：一班あたり1枚。厚さは1～2 mm、幅はかまぼこ板の厚さ程度、長さはかまぼこ板の長さ程度(いろいろな長さのものがあってよい)

(2) 課題の提示と実験

- ・図10の様にかまぼこ板をT字型に貼り合わせる。
- ・T字型かまぼこ板を横T字型に水平な机上に立てたいが、このままでは倒れる。



図5

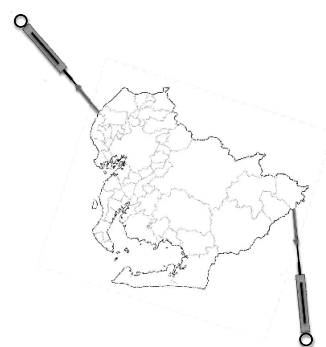


図6 二力のつり合い実験

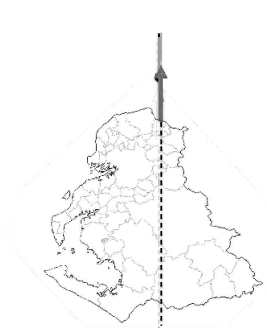


図7 張力の作用線

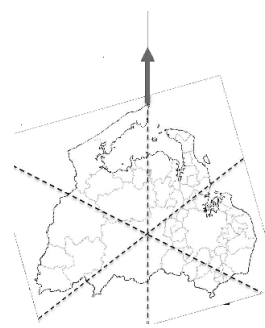


図8 一点で交わる張力の作用線が重心

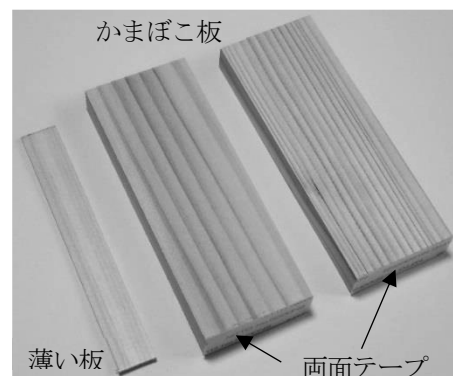


図9 実験材料

- ・机面に接する板に薄い板を足として貼り付けて立てる。
- ・横T字かまぼこ板が立つために最低限必要な足の長さはいくらか、これを見つけ出す。
- ・複数人で意見交換しながら答えを探す。
- ・できるだけこれまでの学習を生かして、論理的に答えを予測する(仮説を立てる)。
- ・検証実験をする。
- ・予測した答えを全体に発表し説明できるようにする。
- ・試行錯誤で見つけた場合も、そこからどんな特徴が分かるかを考え、全体に発表し説明できるようにする。
- ・異なる条件のかまぼこ板でも同様な特徴があるかを確認する。

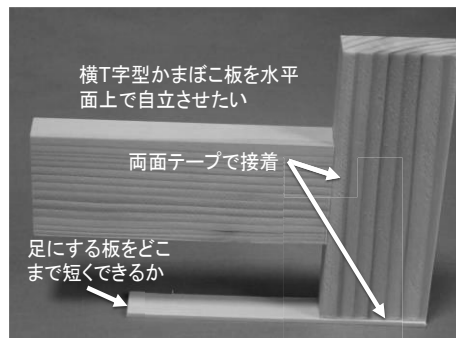


図 10

(3) 実験結果の分析

- ・2枚の板の重心の中央に全体の重心がある
- ・この重心を通る力が存在すれば釣り合う
つまり図 11 の様に、重心を通る重力の作用線上に横T字かまぼこ板を支える足があれば立つことになる。同時に、垂直抗力の存在を意識し、接触面の中央に垂直抗力の作用点があるとする誤解も解ける。

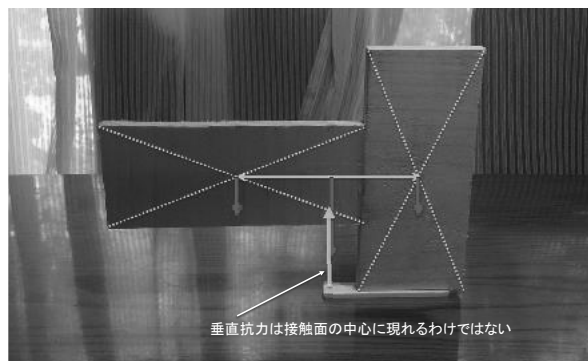


図 11

(4) 斜面上で静止する物体にはたらく力の理解

重力 W と釣り合う抗力 R とは、二力のつり合い条件(大きさが等しい、逆向き、作用線が一致する)を満たすべき、つまり図 12 のようになる。摩擦力 f と垂直抗力 N は抗力 R の成分である。二力のつり合い条件が役に立つことがよく分かる。

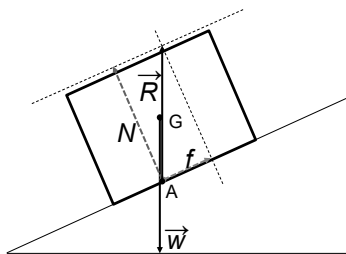


図 12

(5) 物体転倒の理解

「学習指導要領解説高校理科編」物理 (1) 様々な運動ア(ウ)には「日常生活とのかかわりの中で、防災などの観点から、物体の重心、関連して物体が転倒しない条件についても簡単に触れる」とある。物体が倒れることについても、横T字型かまぼこが倒れない条件から理解できる(図 13)。

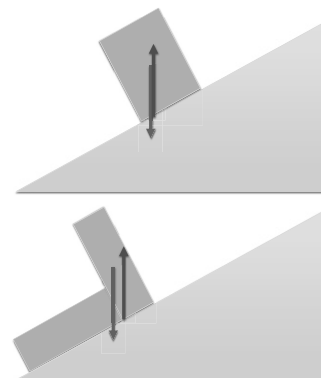


図 13

5 発展的実験による仮説と検証を通した理解の確信

二力のつり合い条件を演繹的に活用することで、横T字型かまぼこが倒れない条件を見出すことができるはずだが、この時点では、そこに気づけないことが多い。「中等理科教育法Ⅲ」の授業でも、40 班(3~4名で構成)のうち、二力のつり合い条件を演繹的に活用して答えを出せたのは、4 班しかなかった。このとき与えた時間は 15 分と短かった。中学や高校の授業では 30 分以上の実験と思考の時間を与えたい。ここまでの実験で、やっと二力のつり合い条件の理解が深まり、面にはたらく力の作用点が理解できたばかりである。この理解を確信に換えるには、さらに発展的な活用場を与え、仮説と検証の機会が必要である。

- (1) 横板を上下にずらす
自立するためには、足の長さをどうするべきか仮説を立て、検証する。
- (2) 横板の中央におもりを載せる
自立するためには、縦板のどこに同じおもりを載せるべきか仮説を立て、検証する。
- (3) T字かまぼこ板を斜面に置く
自立するためには、足の長さをどうするべきか仮説を立て、検証する(図15)。

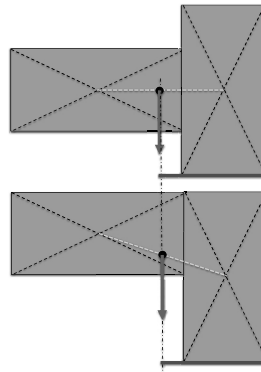


図14

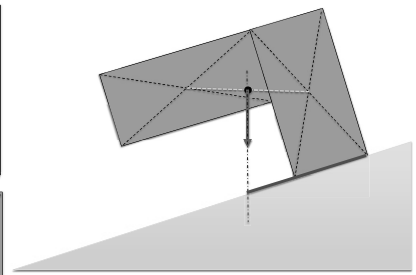


図15

(1)の場合、T字かまぼこ板の重心の水平方向の位置は変わらない。横板を上下に動かしても、足の長さを変える必要はない(図15)。「中

等理科教育法Ⅲ」の学生は、(1)を考えるにあたり、二力のつり合いからの理解と頭でっかちで倒れ易そうな直感とが交錯して、ややてこずっていた。実際にやってみるとつり合い条件通りの結果が得られ、驚き？の声が上がっていた。ここまでくると、(2)、(3)の理解は容易になり、自信をもって予測・説明でき、すべての班が容易に正解に至った。

謝辞 この教材開発にあたり、東京学芸大学附属世田谷中学校 教諭 宮崎先生の協力を感謝いたします。