

# 物理学における誤概念と答案分析

徐 丙鉄\*, 安部 保海\*\*, 道上 達広\*

## Misconceptions and Answer Analysis in Physics Education

Byon Chol SO\*, Yasumi ABE\*\* and Tatsuhiro MICHIKAMI\*

### はじめに

人間はどのように学習して知識を構成するのか, 学習はどのような状況で効率的にすすむのか, などの科学的教育知に基づいて物理教育の改善を目指すことを先の論文<sup>1)</sup>で宣言し, その第1歩を報告した。本論文では近畿大学工学部学生の力学的誤概念の状況を分析する。

### 1. 素朴概念と物理教育

学習理論における構成主義の主張によると, 知識とは現象との相互作用や社会的な経験を通して学習者自らが構成するものである。自然現象に関しても, 学校での学習以前に, 幼いころからの日常生活における経験を通して, 多くは無意識の内に, 推論パターンを既に構成している。例えば, 机の上に静止した本を指でそっと押せば本はその力の方向へ動き, 押すのを止めると直ちに止まる。このような経験から, 人は「物体の運動は力によって強制され続けなければいづれ減衰し止まるものだ。運動している物体には運動方向に必ず力が働いている。」と一

---

\* 近畿大学工学部教育推進センター

Center for the Advancement of Higher Education, Faculty of  
Engineering, Kindai University

\*\* 広島大学 教育・国際室

Education and International Office, Hiroshima University

一般化して推論する。しかし、この一般化は間違っている。例えば、重力下での物体の投げ上げでは、はじめ物体は上へ動くが、働いている力は下向きに重力のみで、その大きさと向きは一定である。

このように学生は物理学を学ぶ以前に既に何らかの推論パターンや概念(素朴概念)を身につけている。素朴概念は自らの経験に基づいており、しかも単純で直観的でもあるので、変容させることは難しい。これらを無視して物理学の考え方と概念(科学的概念)を教授しても、素朴概念が科学的概念により修正、精緻化され、克服されとは限らない。従って、テストで学生は公式を適用して正答できていても、実は素朴概念を持ち続けていることがある。物理学学習後も、学生は素朴概念と科学的概念を分離共存させ、日常では素朴概念で判断し、教室内では科学的概念で答える(教室知)といったことになりかねない。

このような学習結果は、物理学が自然認識の学問であることを考えると、教育の失敗と断定できる。

## 2. 誤概念

誤概念<sup>2)</sup>とは、素朴概念の内、特定の状況では正しい判断を導くこともあるが、一般的には間違っている概念である。

最も有名な例は、J.Clement<sup>3)</sup>が報告した Motion Implies a Force (MIF) と呼ばれる誤概念である。MIF とは「物体の運動方向には必ず力が働いている」という認識である。MIF は、物体に働く摩擦力が大きい場合には成立しているように見えるが、一般には成立しない。ガリレオによって物体の運動における慣性が認識されるまで、アリストテレスが「物体の運動の本性は静止であり、運動している物体には絶えず力が働いている」と主張したように、力学を正しく理解しないで MIF 誤概念を保持し続けている人が相当数いるものと推測される。

MIF 誤概念を持つ学生は、「重力下の物体の投げ上げでも、物体が上昇している間は重力に勝る上向きの力が働いており、下降する際には上向きの力が徐々に減少した結果、重力が勝って下向きに力が働いている」と考える。また、「動いている物体が止まるのは物体に力が働かなくなるからだ」と考えがちである。

学習過程で誤概念を克服することが物理学学習の核心であり、この点を考慮して講義手法を検討する必要がある。しかし、誤概念は強固で中々修正されない<sup>4)</sup>ことが知られており、また、誤概念の克服は通常の知識伝達型講義では困難である<sup>3)4)</sup>ことも報告されている。

本論文では、近畿大学工学部での初年次物理学講義での事前テストと期末試験の答案の分析を通して、本学部学生の誤概念の状況を明らかにし、学生がどのように間違っているかに基づいて、本学部物理教育改善を今後検討する際の礎とする。

### 3. 近畿大学工学部学生の誤概念

学習者の持つ MIF に代表される誤概念の傾向を確認するため、本学部化学生命工学科 1 年生向けの 2015 年度前期開講科目「物理学 I」の履修者 106 人を対象に、誤概念を持ちやすいと思われる現象について問うテストを二つ行った。一つは学習前の状態を確認するため第一回目の授業の冒頭に行った事前テストであり、もう一つは学習の成果を含めた傾向を確認するために期末試験で行った一部の問題である。

以下ではまず 3.1 節において事前テストの結果を通して学生の授業前の状態について検討する。3.2 節では、それらの誤概念を訂正するために授業でとった対応を述べ、これによる改善状況を期末試験の関連問題の解答結果から確認する。次に 3.3 節では、関連するその他の問題の解答状況から、誤概念以外の問題点について検討する。3.4 節では、これらの結果から浮かび上がる、物理学のスムーズな理解の障害となる要因について仮説を述べる。

#### 3.1 事前テスト分析

まず学習前の状態を確認するために行った事前テストの解答結果を検討する。学生に実際に解答させた質問用紙を資料 1 に提示する。それぞれの質問に対する解答結果を表 1 に集計した。解答者数は第一回の授業の出席者 104 名であり、履修者と未履修者は高校で物理を履修したか否かを意味している。

まず全体の解答傾向について見ると、第 2 問を除く全ての質問について履修者の方が未履修者よりも高い正答率を示しており、高校での学習においてある程度誤概念が克服されている様子が窺える。しかしながら履修者においても正答率が 5 割を超えているのは 8 問中 4 問、6 割を超えているのはわずか 2 問であり、十分には誤概念が克服されているとは言い難い。高校での物理履修者は、物理現象の正しい理解を得ないまま、公式を機械的に当てはめる形で問題に対処してきたことが推察される。

個別の質問について見ると、最も正答率が高いのは静止した物体に働く力に関する第 4 問であり、逆に最も正答率が低かったのは作用・反作用に関する第 7 問であった。

第 4 問について、床の上の物体に垂直抗力が働くことは高校物理でも教えられ、試験で問われることも多いと思われるので、履修者で正答率が高いことはある程度予測できた結果である。しかし未履修者についても 7 割近くが正しい解答を選択しており、これは未履修者だけで見た場合でも最も高い正答率である。

一方第 7 問については、作用・反作用の法則の正しい理解がないと間違えやすいと考えられる問題であるが、高校での履修者においても正答率は 4 割を切っている。これについては高校物理において、作用・反作用の法則について問う問題

があまり見られないため、法則自体があまり認識されていない状態にあるのではないかと考えられる。

また履修者と未履修者で最も差が小さかったのはMIFに関する第2問であり、履修者と未履修者の正答率はほぼ同じであった。単純に言えば高校の学習においてMIFは全く克服されなかったことになり、MIFがいかに関固な誤概念であるかが窺える。

その他の問題として、自由落下に関する第1問について見ておく。これは物体の落下速度は重さによらないという、重力による運動の基本的事実に関する質問であり、ガリレオとピサの斜塔の有名なエピソードも存在するものであるが、半数近くの学生が間違った解答を選択している。この誤った考えはガリレオに至るまでは「常識」であったことからわかるように、何の学習も行っていない者が陥りやすい誤概念ではあるが、工学部に進学してきた理系の学生の半数が、初中等教育を含め大学に至るまで一度も訂正される機会を得なかったことは非常に驚きである。

次にMIFに関わる第2問と第3問に注目して分析を行う。第2問と第3問は運動する物体に働く力の方向と大きさをそれぞれ確認する質問である。まずこれらの問いに対する解答者の内訳(表1参照)を見てみると、第2問の不正解者で「力は働いていない」を選択した学生は一名であり、(複数解答者を除く)それ以外の不正解者は「①」または「②」を選択している。「①」と「②」はその方向にわずかな違いはあるが、どちらにせよ物体の運動方向に働く力をイメージした結果の間違いであると推測される。一方第3問の不正解者では「どちらのボールにも力は働いていない」を選択した学生は一名であり、それ以外の不正解者は「ボール1にはボール2の2倍の力が働いている」を選択している。これよりほぼ全ての不正解者は「速い物体にはより強い力が働く」と考えていることがわかる。

次にこれらの問題の解答の関係をみるため、第2問とそれ以外の問題の正解・不正解者の関連を統計的に分析した結果を表2に示す。表2における $\phi$ 係数は、データが間隔尺度の場合の相関係数に対応するもので、 $-1$ から $1$ の間の値をとり、 $0$ が解答傾向に連関なし(独立)、 $+1$ に近いほど同時に正解(または同時に不正解)となる傾向あり、 $-1$ に近いほど一方の正解者はもう一方で不正解となる傾向あり、と解釈される数値である。また独立性検定結果は $\phi$ 係数の有意性検定(「 $\phi$ 係数がゼロである」とする帰無仮説に対する $\chi^2$ 乗検定)の結果得られる値であり、大まかに言えば「本来 $\phi$ 係数はゼロであるが、ばらつきによりたまたまゼロでない $\phi$ 係数の値が出てしまった」確率で、通常は5%または1%以下であれば $\phi$ 係数はゼロではなく有意な連関がある(それ以上であれば判断でき

表 1 事前テスト（物理クイズ1）の解答結果

第1問	解答番号	1	2	3	正答率	
	全体	1	50	53	51.0%	
	履修者	1	26	34	55.7%	
	未履修者	0	24	19	44.2%	
第2問	解答番号	1	2	3	4	正答率
	全体	49	14	47	1	39.4%
	履修者	27	10	27	1	39.3%
	未履修者	22	4	20	0	39.5%
第3問	解答番号	1	2	3	正答率	
	全体	64	39	1	37.5%	
	履修者	34	26	1	42.6%	
	未履修者	30	13	0	30.2%	
第4問	解答番号	1	2	3	4	正答率
	全体	5	18	80	1	76.9%
	履修者	4	7	50	0	82.0%
	未履修者	1	11	30	1	69.8%
第5問	解答番号	1	2	3	正答率	
	全体	51	47	3	44.2%	
	履修者	28	32	1	50.8%	
	未履修者	23	15	2	34.9%	
第6問	解答番号	1	2	3	正答率	
	全体	6	57	37	54.8%	
	履修者	4	37	19	60.7%	
	未履修者	2	20	18	46.5%	
第7問	解答番号	1	2	3	4	正答率
	全体	60	6	33	1	31.7%
	履修者	34	2	23	1	37.7%
	未履修者	26	4	10	0	23.3%
第8問	解答番号	1	2	3	正答率	
	全体	43	18	40	38.5%	
	履修者	25	7	28	45.9%	
	未履修者	18	11	12	25.6%	

注1：各質問における正答番号と選択した学生数の欄をグレーで示している。

注2：一つの質問において複数選択した場合は、解答者にはカウントしているが正答率の算出では不正解者として扱っている。

表 2 第 2 問解答との連関

	$\phi$ 係数	独立性検定結果
第 2 問—第 1 問	0.04	65.7%
第 2 問—第 3 問	0.55	0.000002%
第 2 問—第 4 問	-0.12	22.7%
第 2 問—第 5 問	0.03	72.7%
第 2 問—第 6 問	-0.10	31.9%
第 2 問—第 7 問	0.04	66.9%
第 2 問—第 8 問	0.03	79.6%

ない) とする判定に使う数値である。

表 2 からわかるように、第 2 問と第 3 問の解答傾向の間には他の問題と比べて強い正の連関があることが確認できる。つまり第 2 問と第 3 問は同時に正解または不正解となる傾向が強い。これよりこれらの問題の不正解者は「運動方向を向いた速度に比例した力」をイメージする傾向にあり、力と速度の概念が未分化であるか、または速度の直接の原因としての力の概念を持っていることが推察される。

表 2 において第 2 問と第 8 問の連関が低い点にも注目されたい。第 8 問は地球の周りを周回運動する宇宙船内で働く力についての質問であるが、物理的には選択肢も含め第 2 問とほぼ同じ質問であるといつてよく、解答傾向に関連があつてしかるべきであるが、分析結果は連関がほとんど見られないことを示している。これは第 2 問の正解者であっても、宇宙空間の運動が身の周りの運動の延長線上にあることが正しく理解されておらず、地上と宇宙空間の運動を別現象として捉えているのではないかと考えられる。もしそのような認識を持っていれば、力学法則の普遍性を理解する上での障害になることは想像に難くない。

### 3.2 誤概念の訂正学習と期末試験解答分析 1: 事前テストとの比較

事前テストで確認された誤概念を訂正するため、授業で扱う機会のあつた問題については、集計結果と正答を示し、誤概念と正しい概念を明確に意識させるよう配慮した。授業で触れた問題は第 5 問と第 6 問以外の 6 問である。それぞれの具体的な取り扱いは以下の通りである。

#### 第 1 問: 重さの異なる物体の落下

事前テストを行った次の授業 (第 2 回目の授業) の冒頭で、特に授業内容と関

連させることなく一種の常識として説明した。また実際に実験を行い同時に落ちることを示した動画をいくつか紹介し、正しい結果をより強く印象付けるよう試みた。

#### 第2問、第3問、第8問：運動する物体に働く力

力学の基本法則の授業の際、慣性の法則「物体に働く合力がゼロの場合、物体は等速度運動を続ける」<sup>(註1)</sup>と関連付け、物体が運動しているからと言って力が働いているわけではないことを説明した。またボールを投げる速度を上げていけばやがて周回軌道をとることを説明し、宇宙空間の運動でも地上と同じ仕組みで起こることを強調した。

#### 第4問：静止する物体に働く力

力のつり合い（静力学）の授業の際に、授業と並行して説明を行った。

#### 第7問：作用・反作用の法則

力学の基本法則の授業の際、作用・反作用の法則の紹介後に説明を行った。またその後の授業でも折に触れ、地球と人が同じ大きさの力で引き合っていることを述べ、法則を印象付けるよう試みた。ただし作用・反作用の法則の説明自体は、時間の都合上説明を急いだこと、また説明の手順が多少混乱したこともあり、学生にはわかりにくい印象を与えたものと思われる。

また第一回の授業で行った事前テストとは別に、単振動の授業の際、振り子の等時性を印象付けるため、やはり授業に先立って振り子の周期について問うテストを行った（対象者 85 人）。実際の質問用紙と解答結果については資料 2 と資料 3 に示す。これについても授業中に解説を行い、実際に条件を変えながら周期を確認する動画を紹介し正しい結果を印象付けるよう試みた。

これら授業の効果を確認するため、一部の問題（資料 1：第 1 問、第 2 問、第 7 問、資料 2：振り子第 2 問）についてその類題を期末試験に出題した。関連する期末試験問題部分を資料 4 に提示した。事前テストと期末試験での問題の対応を表 3 に示す。各問題の解答結果を表 4 に示す。全解答者数は 98 人である。以下、各問題の結果について事前テストの問題番号順に見ていく。

#### 重さの異なる物体の落下（事前テスト第 1 問、期末試験 2.1.(1)、2.1.(2)）

事前テストでは自由落下の問題であったが、期末試験では水平投射の問題に変更し、2.1.(1)では落下するタイミングを、2.1.(2)では落下までに移動する水平距離について質問した。どちらの質問も重力による運動が質量によらないことを理

表 3 事前テストと期末試験問題の対応

事前テスト (資料 1)	期末試験
第 1 問	2.1.(1)及び 2.1.(2)
第 2 問	2.1. (3)
第 7 問	1.(3)
振り子第 2 問(資料 2)	3.(1)

表 4 期末試験における事前テスト関連問題の解答結果

	(a)	(b)	(c)	(d)	正答率
1.3.	11	38	43	8	41.8%
2.1.(1)	1	8	87	2	88.8%
2.1.(2)	9	34	36	19	36.7%
2.1.(3)	3	4	51	40	52.0%
3.(1)	36	2	60		61.2%

注 1 : 正答番号 (全て(c)) と選択した学生数の欄をグレーで示している。

注 2 : 一つの質問において複数選択した場合は, 解答者にはカウントしているが正答率の算出では不正解者として扱っている。

解していれば, 正しく答えられる問題であるが, 事前テスト第 1 問との類推でいえば, 2.1.(1)の方がより近い問題であるといえる。実際の正答率を見ると 2.1.(1)は 88.8%であり, 事前テストの 51.0%と比較して著しく上昇しており授業の効果が窺えるが, 2.1.(2)は 36.7%となっており正答率は下がっている。ただし 2.1.(2)については, 問題文の冒頭に二つの物体が水平方向の同じ初速度で飛び出すことを記しておいたが, 2.1.(2)の問題文中には入れなかったため, 初速度が異なってもよいと勘違いし「(d) どちらが遠くに着地するかは飛び出す速度で変化する」を選択した学生がいた可能性も考えられる。この点は問題の不備である。しかしながら(d)を選択した全ての学生を入れても, 正答率は 2.1.(1)には及ばない。このことから学生は「重力による運動が質量によらない」という正しい認識を得たというよりも, 事前テストの問題と解答のペアを一種のパターンとして記憶し, 問題間の類推により解答している可能性が示唆される。このため事前テストの問題により近い 2.1.(1)で正答率が高く, より遠い 2.1.(2)で正答率が低くなってい

ると考えられる。これは事前テスト第1問を授業内容と関連付けず、一種の常識として解説したことが影響している可能性も考えられる。

#### 運動する物体に働く力（事前テスト第2問，期末試験 2.1.(3)）

2.1.(3)の正答率は52.0%であり、事前テストの結果39.4%と比較すると一定の効果があつたことが伺えるが、依然半数近くの学生が正しく答えられていない。解答者の内訳をみるとほとんどの不正解者は(a)「①」、(b)「②」ではなく、(d)「①と③」を選択していることから、物体に重力が働くことは理解しているが、運動方向に力が働いているというMIF誤概念を訂正しきれていないことがわかる。

#### 作用・反作用の法則（事前テスト第7問，期末試験 1.(3)）

期末試験 1.(3)と事前テスト第7問は、どちらも作用・反作用についての問題であるが、問題の構成が異なるため正答率の直接の比較は難しいと思われる。しかしながら事前テスト31.7%、期末試験41.8%という数字はいずれにしても高い正答率とは言い難い。特に授業で解説を行った後の結果である期末試験41.8%は低い数値であるといえる。これは上でも述べたように、授業における作用・反作用の法則の解説で、説明が混乱したことが影響したと考えられる。これについては前年度（2014年度前期）の同一授業（対象者の専攻、学年ともに同じ）の期末試験においてほぼ同じ以下の問題を出題しているため、こちらの解答結果と比較してみる。

作用・反作用の法則についての説明で正しいものを以下の(a)～(d)から選択せよ。

- (a) ボールを宙に投げると重力を受けてやがて地面に落下するが、この重力に対する反作用の力は存在しない。
- (b) 床の上の物体には重力と垂直抗力が働く。この二つの力が作用・反作用の関係になっている。
- (c) 人が壁により掛かっている場合、人は壁を押しているが、この力の反作用の力として壁は人を押し返している。
- (d) 風船を水に沈めると浮力を受けて浮き上がる。この場合、風船にかかる重力と浮力が作用・反作用の関係になっている。

(2014年度前期 物理学 I 期末試験問題より)

2014年度の授業では作用・反作用の法則の解説に今年度よりも多くの時間を割き、学生には簡単な練習問題も解かせる形で対応したが、その結果上記問題の正答率は87.8%（対象者91人）と非常に高い値を示した。違う年度であるため

対象者が異なることに注意は必要であるが、授業での説明の要領や問題を解かせるなどの授業方法が学生の理解に大きく影響を与えていることが確認できる。

### 振り子の等時性 (振り子に関する事前テスト第 2 問, 期末試験 3.(1))

振り子に関する事前テスト 3 問中最も正答率の低かった第 2 問とほぼ同じ問題を期末試験において出題した。その結果正答率は 41.2% から 61.2% に上昇しており、授業に一定の効果があつたことを伺わせる。

## 3.3 期末試験解答分析 2 : 答案分析

次に期末試験の答案内容から学生の解答傾向や理解状態を観察してみる。

### 3.3.1 運動方程式

期末試験問題 2.2.(資料 4) は水平投射の運動方程式を立て、初期条件をみたくす解を求める問題である。このうち出発点となる運動方程式を立てる問題(1)についての正答率は、 $x$  方向の運動方程式 15.3%,  $y$  方向の運動方程式 34.6% と著しく低いものであつた。特に MIF に直接の影響を受けるとされる  $x$  方向の正答率が低い、不正解者 83 名の答案内容を観察すると、以下の 2 つのタイプの特徴を持つ解答が多く見受けられた。

#### I. $x$ 方向の力を想定した解答 (60 名程度)

本来 0 であるはずの  $x$  方向の力を何らかの量で表したと思われる解答が約 60 あつた。特に  $x$  方向の初速度  $u_0$  など、速度と思われる記号を含んだものが 40 名程度存在した。典型的な解答は

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = u_0, \quad \text{や} \quad m \frac{d^2x}{dt^2} = mu_0,$$

とする解答である。速度を含まない解答としては  $g$  や  $h$  など問題中のその他の記号を用いたものや、次の II にも当てはまる解答で問題に存在しない記号を用いたものが見受けられた。

#### II. 他問題・他公式からの類推による解答 (15 名程度)

水平投射とは無関係の他の問題の解答や高校での学習で記憶したと思われる無関係の公式や公式の一部を含んだ解答である。これらの式は使われていた記号とともに丸暗記されているためか、問題中に全く現れない記号が使われることがこの解答の特徴である。特に授業中に解説した問題や演習に用いた問題に斜面の運動が多かつたためか、斜面を想定したと思われる解答が 9 名存在した。その典型的な解答は

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = mg \sin \theta, \quad m \frac{d^2y}{dt^2} = mg \cos \theta,$$

とする解答である。

ただし全ての解答がそれぞれどちらかに当てはまるわけではなく、2つの特徴を併せ持つ解答やどちらにも当てはまらない解答も存在した。また特徴の判断が困難な解答もあるため、それぞれの人数は大まかなものである。またこれらに当てはまらないその他の不正解としては、空欄解答、力のみを解答するなど運動方程式として意味をなさないもの、記号を羅列しただけの意味不明なものなどが存在した。

Iのタイプの解答者に推測される問題は、MIFの影響を受け正しい運動方程式を立てることができないことである。特に速度を解答に含んだ学生は、速度と力の概念の区別ができていない可能性がある。ではこのタイプの間違いを犯した学生は、直接的にMIFの有無を確認した2.1.(3)でどう解答しているだろうか。単純に考えれば2.1.(3)で不正解である学生が、このタイプの間違いを起こしていると予測されるが、実際には半数の30名程度が2.1.(3)の正解者であり、速度を解答に含んだ40名程度の学生に限っても20名近くが2.1.(3)の正解者であった。この原因として推測されることは、事前テストで行ったMIFについての問題と解答のペアを一種のパターンとして記憶しており、事前テストとほぼ同じ2.1.(3)のような問題では正答を導けるが、実際にはMIFが解消されているわけではないこと、または運動方程式の右辺は力という基本的事項が理解できていないということである。いずれにせよ、事前テストの段階では、MIFの解消が運動方程式の理解の促進につながるとの素朴な期待があったが、授業で行った対応だけでは期待通りの効果が得られなかったことは確かである。

IIのタイプの解答者に推測される問題は、現象の正しい理解を目指さず(またはあきらめ)、問題と解答のパターンや公式を暗記し類推により問題を解くことを目的とする学習姿勢である。このような学習姿勢では、同じ現象を扱った問題でも問題のタイプが異なれば全く答えられないため、現象を理解しないまま大量の問題を解いていくことになり、非常に非効率である。またそもそも問題を解くこと自体が授業の目的なのではなく、現象を理解した結果問題を解けるようになることが目的なのであり、授業においてそのような姿勢が改善されるよう誘導する必要がある。しかしながらこのような姿勢に至る原因の一端には、運動方程式を解かずさまざまな運動・現象を公式に近い形で教える高校物理のあり方や、大学に至るまで繰り返してきた受験勉強の影響もあると思われるため、これを解きほぐし学習姿勢を適切な方向へ導くことは容易ではない。

### 3.3.2 数式解釈による解の導出

2.1.(1)と2.1.(2)は異なる質量をもつ物体の水平投射の着地のタイミングと水平距離を問う問題であるが、これと同時に2.2.(4)と2.2.(5)において、物体が着地する時間と水平距離の表式を求める問題を出題している。つまり2.2.(4)と2.2.(5)に正しく答えられていれば、その解が質量によらないことから2.1.(1)と2.1.(2)の正答は自ずと導かれる形で出題を行った。これと同様に振り子の問題3でも、3.(3)が振り子の周期の選択問題であるのに対し、3.(1)は振り子の周期の初期位置に対する依存性について聞いており、3.(3)で周期の表式が正しく選択できていれば、3.(1)の正解はこれから判断できる形で出題している<sup>注2)</sup>。実際の解答状況は以下の通りである。

- ・ 2.2.(4)正解者 31名：うち2.1.(1)正解者 30名 (96.8%)
- ・ 2.2.(5)正解者 19名：うち2.1.(2)正解者 12名 (63.2%)
- ・ 3.(3)正解者 76名：うち3.(1)正解者 42名 (68.4%)

このうち水平投射された物体の着地のタイミングについて聞いた2.2.(1)はそもそもの正答率が高かったため(88.8%)、2.2.(4)の正解者中でもその割合が大きくなっているが、その他の二つの問題についてはいずれも1/3程度の学生が矛盾した解答を選択していることがわかる。

矛盾した解答をしてしまう原因としては、出題の順序が逆であることや対となる問題が離れていることも考えられるが、一つには数式で表された解と実際の現象が結びついておらず、解から情報を引き出せないことが推測される。特に振り子の周期3.(3)については、公式として扱われることも多いため、丸暗記され解積がおろそかになっているのではないかと考えられる。一方で着地の水平距離2.2.(5)については公式として扱われることはなく、丸暗記している学生はいなかったと思われる。また問題も選択式ではないため、これを正答した学生は自力で解答に到達したはずである。実際2.2.(5)正解者19名について、この解を導くために必要となる $x$ 方向の運動方程式2.2.(1)、 $x$ 方向の位置の変化2.2.(2)、物体が着地する時間2.2.(4)の正解・不正解の内訳を見ると以下のようにになっている。

- ・ 全問正解 13名 (うち2.1.(2)不正解者 3名)
- ・ 運動方程式2.2.(1)以外正解 5名 (うち2.1.(2)不正解者 3名)
- ・ 着地する時間2.2.(4)のみ正解 1名 (うち2.1.(2)不正解者 1名)

これからわかるように2.2.(5)の正解者は関連問題についてもほぼ正解してい

る。特に全問正解者は運動方程式を立てて解くことができおり、比較的優秀と言える。また運動方程式以外が正解であった学生は、水平投射の解を公式として暗記している可能性は伺えるが、これらの式を正しく扱い求めるべき解を導いていることから、数式の基本的取り扱いはできていると考えられる。これらの学生は、問題の順序を変更したり、問題文に他の解から導けることを示唆したりしておけば正しく答えられた可能性はあるが、少なくとも自発的に問題を結びつけ式の解釈に基づいて解を得ることはできなかったようである。

### 3.4 物理学学習が困難な要因

これまでに見た解答内容・傾向の分析から、物理学学習においてスムーズな理解を妨げる要因について考えられる仮説を立ててみる。

#### 誤概念起因要素

事前テストの結果からもわかるように、学生は実際の現象と矛盾する様々な誤概念を持っている。運動方程式を立てる問題において、MIFによる混乱から生じたものと思われる不正解が最も多かったことから、これら誤概念が内容の理解において非常に大きな阻害要因になっていることが推測される。一方で教える側にとっては、これら誤概念は遠い過去に訂正されて持っていたことすら忘れていくことが多い。このため初學者と対するときは、これら誤概念を改めて再認識し、配慮しながら教えることを意識する必要があるだろう。

#### 暗記型学習起因要素

期末試験の解答からは、様々な問題と解答を記憶し、その類推で問題に対処しようとする傾向が至る所で見え隠れした。物理の学習でもある程度の暗記作業は必要であるが、暗記だけでは「自然界の基本法則を発見し、基本法則に基づいて自然現象を数学的に論証する」という物理学の基本的な構造を認識することは不可能である。しかしながら高校物理の影響もあり、物理は公式と公式の当てはめ方を記憶するものという認識が少なからず存在するようである。一方でこの要素が強く表れている学生は、授業や演習で出題された問題を、時間をかけて復習している様子も伺え、ある意味勉強熱心な面もあるといえる。このような学習意欲が無駄にならないためにも、適切な学習姿勢へ導くよう配慮が必要である。

#### 数式解釈能力起因要素

一部の解答からは、文字で表された数式と実際の現象をスムーズに結びつけられていない傾向が見受けられた。これは直接的には 3.2 節で述べたことである。

また 3.1 節において、一部の学生に速度と力の概念に混乱がある可能性を述べた。理解している者からすると、速度と力を混同することは考えられないことであるが、図の上ではどちらも矢印で表されるベクトル量であるため、これらと現実の速度・力の概念との結びつきが不十分な初学者では混乱が生じてしまうようである。数式を要領よく操作するためには、いったんその意味を捨象することは不可欠であるが、必要に応じて実際の現象と結びつけて考えることができる能力を身に着けさせることが重要であろう。

#### 4. まとめ

今回の試みでは、物理学の学習の障害となると推測される要素のうち、誤概念に起因する要素に注目し、授業においてそれら誤概念が訂正されるよう対応を行った。これは誤概念の訂正が力学法則のスムーズな理解につながることを期待してのものである。しかしながら期末試験の結果からは、知識伝達型の講義やパターン化した問題の学習（公式を適用する学習）だけでは、誤概念の克服は困難であることがあきらかになった。これは、3 節で確認した阻害要素がそれぞれ独立して働いているわけではなく、互いに組み合わさることで強め合っているためだと考えられる。たとえば速度と力の概念の混同は、MIF の克服を妨げるであろうし、誤概念による混乱が徒に物理を難解なものに認識させ、暗記型の学習姿勢へとつながっている可能性もある。一方で、授業で行ったように誤概念を訂正するため問題を解かせ解説しても、暗記型学習の習慣を持つ学生には、問題と解の一つのパターンと認識されるのみで、現象の正しい理解には必ずしもつながらない可能性もある。このように複数の要因が絡み合った状況の下で、学生を正しい理解に導くためには、誤概念に気付かせ、認知的葛藤を引き起こし、克服させる学習モデルが必要である。また、物理学は自然認識の学問であり、理解すべきは自然の認識の仕方を明らかにした基本法則であり、そのためには誤概念を克服しなければならないことを学生に認識させることも必要であろう。

また、力学の第 1 法則（慣性の法則）の意味をより深く理解させる機会を与えるために、この対偶を考えさせることは効果的かもしれない。さらに、第 3 法則（作用反作用の法則）の説明の際には、場による力を除くと、力は 2 つの物体間で働く 2 体力であることを意識させることで力の源である物体を具体的に考えるようになり理解が深まるかもしれない。誤概念克服のための教授手法の具体的検討が次の課題である。

## 「注」

- 注 1) これは正確には慣性の説明であって慣性の法則ではないが、授業のレベルに配慮し慣習的に使われるこちらの形で扱った。この「慣性の法則」が正確ではないことと、正しい慣性の法則については授業でも参考として簡単に触れている。
- 注 2) 実際には 3.(3)の選択肢には初期位置を含む式がないので、3.(3)の正解がわからなくても 3.(1)の正解を判断することは可能である。

## 「参考文献」

- 1) 徐 丙鉄, 道上達広, 安部保海: 物理教育の改善と物理答案分析 (近畿大学工学部紀要 **44**, pp.9-20, 2014)
- 2) 井田暁・越桐國雄: 物理教育における誤概念のデータベース化について (大阪教育大学紀要・第V部門・第59巻・第1号, pp.29-39, 2010)
- 3) J.Clement: Student's Preconceptions in Introductory Mechanics (Am. J. of Phys. **50(1)**, pp.66-71, 1982)
- 4) エドワード・F・レディッシュ: 科学をどう教えるか (丸善出版社, 2012)
- 5) 綿引隆文: 概念形成における実験の意義について (物理教育, **49(1)**, pp.55, 2001)

---

資料 1 : 事前テスト (第 1 回目授業の冒頭で実施)

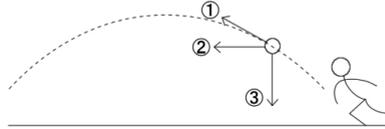
## 物理クイズ 1

高校で物理を  履修した  履修していない

**第 1 問 : 100g と 200g の物体を同じ高さから落とすとどうなるか。空気抵抗は無視して考える。**

1. 100g の物体が先に落ちる。
2. 200g の物体が先に落ちる。
3. 同時に落ちる。

第2問：ボールを投げたところ，下図に示した点線にそって飛んでいった。ボールが図の位置にあるときにボールに働いている力の方向はどれか。



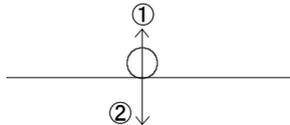
1. ①      2. ②      3. ③      4. 力は働いていない

第3問：二つのボールを並べて飛ばした。ただしボール1はボール2の2倍の速さで飛んでいるとする。このとき二つのボールに働く力はどうか。



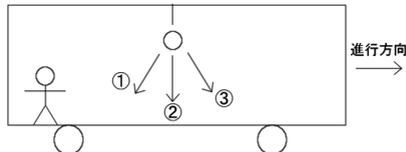
1. ボール1にはボール2の2倍の力が働いている。  
 2. どちらのボールにも同じ力が働いている。  
 3. どちらのボールにも力は働いていない。

第4問：床の上に置かれているボールに働く力の方向はどれか。



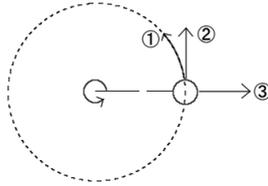
1. ①      2. ②      3. ①と②      4. 力は働いていない。

第5問：走る電車の天井にボールをつるした状態にしておき，走っている最中に糸を切った。電車の中の人から見てボールはどの方向に落ちるか。



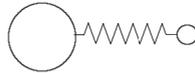
1. ①      2. ②      3. ③

第6問：糸におもりを結んで回転させる。回転中に下図の位置で糸を切った場合，おもりはどの方向に飛んでいくか。



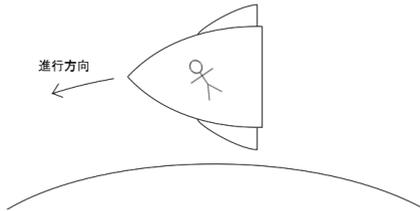
1. ①                      2. ②                      3. ③

第7問：全く重さの違うふたつのおもりをバネにつなげ引っ張った後、手を離れた。手を離れた瞬間で正しいものを答えよ。



1. 重いおもりが軽いおもりよりも強い力で引っ張る。
2. 軽いおもりが重いおもりよりも強い力で引っ張る。
3. お互いが同じ力で引っ張り合う。
4. どちらにも力は働かない。

第8問：地球の周りを回転する宇宙船の中の人に働く力について正しいものを答えよ。



1. 力は働いていない。
2. 宇宙船の進行方向に力が働いている。
3. 地球の方向に力が働いている。

資料2：振り子に関する事前テスト（単振動を学ぶ直前に実施）

### 物理クイズ2

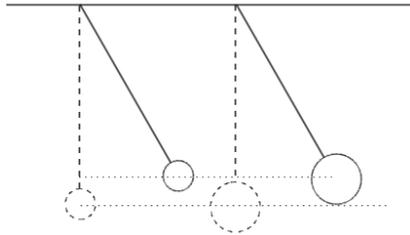
高校で物理を

履修した

履修していない

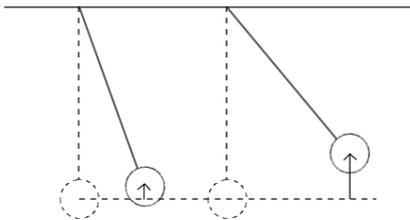
振り子が一往復して戻ってくるまでにかかる時間を周期と呼ぶ。このことに気を付けて以下の質問に答えよ。

1. 重さの異なる物体を同じ長さの紐に結びつけた振り子を用意し、同じ高さまで持ち上げて同時に手を放した。この時二つの振り子の周期について正しいものはどれか。



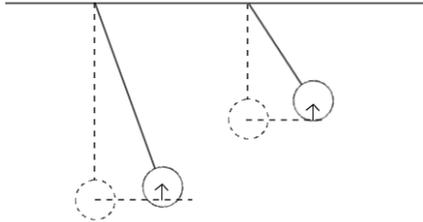
1. 重い振り子の周期は軽い振り子より短い（重い方が速く揺れる）
2. 軽い振り子の周期は重い振り子より短い（軽い方が速く揺れる）
3. どちらの振り子の周期も等しい（どちらも同じ速さで揺れる）

2. 同じ重さの物体を同じ長さの紐に結びつけた二つの振り子を用意し、異なる高さまで持ち上げて同時に手を放した。この時二つの振り子の周期について正しいものはどれか。



1. 高い位置で手を放した振り子の周期の方が短い（高い位置で手を放した方が速く揺れる）
2. 低い位置で手を放した振り子の周期の方が短い（低い位置で手を放した方が速く揺れる）
3. どちらの周期も等しい（どちらも同じ速さで揺れる）

3. 同じ重さの物体を長さの異なる紐に結びつけた二つの振り子を用意し、同じ高さまで持ち上げて同時に手を放した。この時二つの振り子の周期について正しいものはどれか。



1. 紐の短い振り子の周期は紐の長い振り子より短い（紐が短い方が速く揺れる）
2. 紐の長い振り子の周期は紐の短い振り子より短い（紐が長い方が速く揺れる）
3. どちらの振り子の周期も等しい（どちらも同じ速さで揺れる）

資料3：物理クイズ2の解答結果

第1問	解答番号	1	2	3	正答率
	全体	6	15	64	75.3%
	履修者	4	7	34	75.6%
	未履修者	2	8	30	75.0%

第2問	解答番号	1	2	3	正答率
	全体	14	36	35	41.2%
	履修者	6	19	20	44.4%
	未履修者	8	17	15	37.5%

第3問	解答番号	1	2	3	正答率
	全体	57	5	23	67.1%
	履修者	31	2	12	68.9%
	未履修者	26	3	11	65.0%

注：各質問における正答番号と選択した学生数の欄をグレーで示している。

資料 4 : 2015 年度前期 物理学 I 期末試験問題 抜粋

## 1.

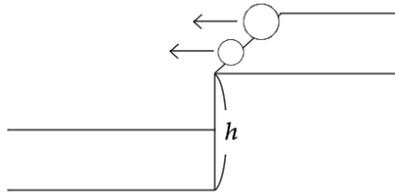
- (3) 以下の(a)~(d)の内から正しいものを選択せよ。
- (a) ボールを宙に投げると重力を受けてやがて地面に落下するが、この重力に対する反作用の力は存在しない。
  - (b) 床の上の物体には重力と垂直抗力が働く。この二つの力が作用・反作用の関係になっている。
  - (c) 地面に人が立っているとき、人と地球は同じ力で引っ張り合っている。
  - (d) 風船を水に沈めると浮力を受けて浮き上がる。この場合、風船にかかる重力と浮力が作用・反作用の関係になっている。

## 2.

高さ $h$ の段差の上から水平方向に飛び出す物体の運動を考える。空気の抵抗は考えず重力加速度を $g$ として以下の問いに答えよ。

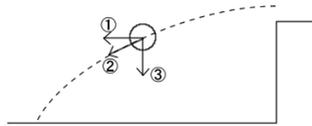
## 2.1.

質量 $1\text{kg}$ の物体と質量 $2\text{kg}$ の物体が同時に、水平方向の同じ初速度で飛び出したとする。このとき以下の問いに適切な選択肢を解答せよ。



- (1) 二つの物体が飛び出してから着地するまでの時間として正しいものはどれか。
- (a)  $1\text{kg}$ の物体が $2\text{kg}$ の物体より速く着地する。
  - (b)  $2\text{kg}$ の物体が $1\text{kg}$ の物体より速く着地する。
  - (c) どちらも同時に着地する。
  - (d) どちらが先に着地するかは飛び出す速度で変化する。

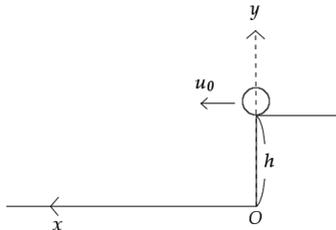
- (2) 二つの物体の着地点の段差からの距離について正しいものはどれか。
- (a) 1kgの物体が2kgの物体より段差に近い位置に着地する。  
 (b) 2kgの物体が1kgの物体より段差に近い位置に着地する。  
 (c) どちらも同じ距離飛んで着地する。  
 (d) どちらが遠くに着地するかは飛び出す速度で変化する。
- (3) 飛んでいる途中の物体に働く力として正しいものはどれか。



- (a) ①                      (b) ②                      (c) ③                      (d) ①と③

## 2.2.

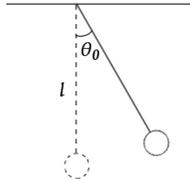
飛び出す物体の質量を $m$ とし、下図の様に水平方向を $x$ 方向、鉛直上向きを $y$ 方向とし、段差の下を原点とする $xy$ 座標をとるものとして以下の問いに答えよ。



- (1) 飛び出した物体の $x$ 方向の運動方程式と $y$ 方向の運動方程式をそれぞれ答えよ。
- (2) 飛び出す初速度を $u_0$ とすると、 $x$ 方向の運動の初期条件は  $x(0) = 0$ ,  $\frac{dx}{dt}(0) = u_0$  となる。これを利用して $x$ 方向の運動方程式を解いて $x$ 方向の速度 $v_x(t)$ と座標の時間変化 $x(t)$ を求めよ。
- (3)  $y$ 方向の運動の初期条件は $y(0) = h, \frac{dy}{dt}(0) = 0$ となる。これを利用して $y$ 方向の運動方程式を解いて $y$ 方向の速度 $v_y(t)$ と座標の時間変化 $y(t)$ を求めよ。
- (4) 物体が着地する時間 ( $y(t) = 0$ となる時間)  $t_0$ を求めよ。
- (5) 物体が着地するまでに進む水平距離 $x(t_0)$ を求めよ。

## 3.

長さ $l$ の紐の先に質量 $m = 0.10$  [kg]の物体を結びつけた振り子を考える。紐が鉛直方向となす角度を $\theta$ とする。時間 $t = 0$ のとき、振り子を角度 $\theta_0$ の位置から、初速度 $0$ で手を離したとする。このとき以下の間に答えよ。



- (1) 振り子の周期について述べたもので正しいものを選択せよ。
- (a) 手を離す角度 $\theta_0$ が大きいほど周期は長くなる。  
 (b) 手を離す角度 $\theta_0$ が小さいほど周期は長くなる。  
 (c) 手を離す角度 $\theta_0$ を変えても周期は変わらない。
- (2) 時間 $t = 0$ のとき、 $\theta_0 = \frac{\pi}{4}$ で手を離したものとする。このとき以下の文章を読んで空欄 a~e に適切な数式を答えよ。

振り子の運動方程式は

$$\frac{d^2\theta}{dt^2}(t) = -\frac{g}{l}\theta \dots \textcircled{1}$$

となる。この運動方程式の解は

$$\theta(t) = A \sin(\omega t + \delta) = A \sin \delta \cos \omega t + A \cos \delta \sin \omega t$$

という形をとる。初期条件 $\theta(0) = \frac{\pi}{4}$ と $\frac{d\theta}{dt}(0) = 0$ を使うと $A \sin \delta = (a)$ ,

$A \cos \delta = (b)$ と求まるので、初期条件をみたす解は

$$\theta(t) = (c)$$

となる。角振動数 $\omega$ は $l$ と $g$ で表すことができるが、これは解 $\theta(t) = (c)$ を元々の運動方程式に代入する事で求めることができる。つまり $\theta(t) =$

$(c)$ を2階微分すると $\frac{d^2\theta}{dt^2}(t) = (d)$ となるので、これらを運動方程式 $\textcircled{1}$ に代入して整理することにより、 $\omega = (e)$ となる。

- (3) この振り子の周期 $T$ として正しいものを以下から選択せよ。

(a)  $2\pi \sqrt{\frac{l}{mg}}$       (b)  $2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$       (c)  $\pi \sqrt{\frac{g}{l}}$       (d)  $\pi m \sqrt{\frac{g}{l}}$