

運動の法則についての因果操作と概念変化

Causal Operation and Conceptual Change on the Laws of Motion

鷲見 拓哉* 猪本 修**
SUMI Takuya INOMOTO Osamu

物理に関する前概念の一つに, Clement によって提起された力と運動に関する問題がよく知られている。本研究では運動の法則についての理解を, 数値操作・関係操作・因果操作に分けて検討した。調査1では, 教員養成課程に在籍する大学生15名の自由記述から, 因果操作の困難性を明らかにした。調査2では, 他の大学生6名を対象に因果操作についての授業を行い, 授業前後の自由記述を分析した。学生一人ひとりの思考の分析から, 運動の法則の因果操作が実行可能となることに伴って, 概念変化とMIF前概念の解消が達成される可能性があることが分かった。

キーワード: 運動の法則, 因果操作, 概念変化, MIF前概念, SCATによる分析

Key words: laws of motion, causal operation, conceptual change, mif preconception, Steps for coding and theorization

I. 問題の所在

学習者が日常生活や学習から獲得してきた科学的に誤った考え方は, 数値演算ができるようになったとしても, 保持されたままであることが, これまでに指摘されている(塚本ほか, 2005)。例えば, 運動し続けている物体には常に運動する向きに力がはたらくという概念を, 多くの学習者が保持している。この誤った考え方は, Motion Implies a Force preconception (MIF前概念)と呼ばれている(Clement, 1982)。

上記のような科学的概念の学習過程における問題の原因のひとつとして, 科学的概念の中核である法則などの命題に対する操作的思考が十分でないことが指摘されている(小林, 2019)。麻柄(2008)は学習者の法則の理解を, 法則に対する数値操作, 関係操作, および因果操作の3つの操作に基づいて分析した。ここで数値操作とは, 法則に対して通常の計算問題のように具体的数値を代入して答えの数値を算出する操作である。また関係操作とは, 法則に対して数値を代入することなく, 法則を構成するある変数の値が変化したときに別の変数の値の変化を把握する操作である。さらに因果操作とは, 法則を因果関係として把握する操作である。

麻柄(2008)は, 定電圧電源に抵抗をつないだ回路を流れる電流に関するオームの法則について, 調査対象とした大学生は, 数値操作と関係操作の課題には9割程度が正しく解答したが, 電圧と電流についての因果操作の課題には2割程度しか正しく解答しなかったことを明らかにしている。一方で, 著者らは運動の法則についても, 数値操作の課題には正しく解答できるが, 関係操作や因果操作の課題には正しく解答できない傾向があることを明らかにした(鷲見ほか, 2020)。

そこで本研究では, 第1に, 因果操作の困難性を明らかにすること, 第2に, 概念理解の変化を探索すること

を目的とする。具体的に調査1では, 水平方向に一定の力がはたらく場合(水平方向の運動)と, 鉛直方向に一定の力がはたらく場合(鉛直方向の運動)における学生の考え方を, 自由記述から詳細に分析する。さらに調査2では, 水平方向の運動についての授業を行ったときに, それによって学生の考え方はどのように変化するかを, 学生の問題に対する解答および振り返りの自由記述から詳細に分析する。

II. 方法

1. 対象者

a 調査1

対象は, 中高理科の教員免許取得を志望する教員養成課程の大学生15名(学生A~Oと呼ぶこととする)であった。対象者の高校物理科目の履修状況は表1のようであった。

b 調査2

対象は, 中高理科の教員免許取得を志望する教員養成課程の, 調査1とは異なる大学生6名(学生P~Uと呼ぶこととする)であった。その内2名(学生TおよびU)は, 授業第2日目のみ参加した。対象者の高校物理科目の履修状況は表2のようであった。

なお, 両調査の対象者に対しては, 回答結果を匿名化し統計的に処理することとして調査を依頼した。また, 回答結果が成績評価に反映しないことを説明した。

表1 調査1の対象者の高校物理科目の履修状況

履修状況	学生
物理基礎と物理を両方履修した	A, C, E, H, I
物理基礎を履修した	B, D, F, G, J, K, L, N, O
どちらも履修していない	M

* 西大和学園中学校高等学校

令和4年7月12日受理

** 兵庫教育大学大学院学校教育学研究科教育実践高度化専攻理数系教科マネジメントコース 准教授

表2 調査2の対象者の高校物理科目の履修状況

履修状況	学生
物理基礎と物理を両方履修した	Q, R, U
物理基礎を履修した	S, T
どちらも履修していない	P

2. 調査問題・質問項目

a 調査1

調査問題は大きく2つに分けられる。第1に、運動の法則についての数値操作・関係操作・因果操作に関する調査問題である。この問題を用いて、これら3つの操作の理解度を調べた。麻柄(2008)に基づき、第1問では数値操作を、第2問では関係操作を、第3問では因果操作を必要とする問題を出題した(図1)。

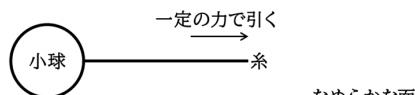
第2に、因果操作についての理解度を詳細に調べるために、力と運動の関係の理解度についての問題を出題した。まず第4問は、水平方向に一定の力を加えた物体の運動のようすを、記号選択と自由記述で問うた(水

運動の法則における因果関係(原因と結果の関係)の説明として正しいものには○、間違っているものには×、分からないものには?とそれぞれ答えなさい。

- (1) 物体に力がはたらくと、それが原因で物体は力の向きに加速する。
- (2) 物体に力がはたらくと、それが原因で物体は質量をもつ。
- (3) 物体に力がはたらくと、それが原因で(質量)×(加速度)の大きさの力がはたらく。
- (4) 物体が加速すると、それが原因で加速した向きに力がはたらく。
- (5) 物体が加速すると、それが原因で物体は質量をもつ。

図1 因果操作について尋ねる問題(第3問)

- (1) なめらかな面上に静止している小球がある。この小球につないだ糸を一定の力で引き続けるあいだ、小球はどのような運動をするでしょうか。小球の運動の説明として正しいものを、次から1つ選びなさい。



- ア. 一定の速度で運動する
 イ. 最初は加速し、その後は一定の速度で運動する
 ウ. 加速し続ける
 エ. 静止し続ける
 オ. 分からない

- (2) あなたが(1)のように考えた理由を答えなさい。

図2 水平方向の運動に関する問題(第4問)

- (1) ビルの屋上から小球を静かに放すと落下した。落下しているあいだの、小球の運動として正しいものを、次から1つ選びなさい。ただし空気抵抗はないものとする。
 ア. 一定の速度で運動する
 イ. 最初は加速し、その後は一定の速度で運動する
 ウ. 加速し続ける
 エ. 静止し続ける
 オ. 分からない
- (2) あなたが(1)のように考えた理由を答えなさい。

図3 鉛直方向の運動に関する問題 その1(第5問)

ビルの屋上から小球を静かに放すと落下した。落下しているあいだの、小球にはたらく力の大きさを表すグラフとして正しいものを、次のア～ウから1つ選び記号で答えなさい。ただし空気抵抗はないものとする。

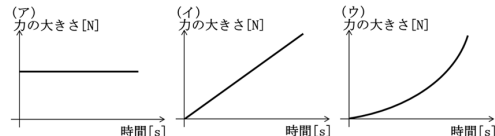


図4 鉛直方向の運動に関する問題 その2(第6問)

平方方向の運動に関する問題(図2)。なお本問題は、板倉(1971)、滝川(1983)、飯田(1992)で扱われている同様の問題を大学生向けに言いかえた問題である。次に第5問では、自由落下する物体の運動のようすを、記号選択と自由記述で問うた(図3)。第6問では、自由落下する物体にはたらく力の大きさの時間変化を、図を選択させる形式で問うた(図4)。第5問と第6問はどちらも鉛直方向の運動について問うており、それらの解答から、自由落下における力と運動の関係についての理解を調べた。

b 調査2

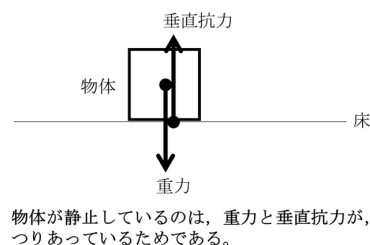
授業による学生の考え方の変化を探索するため授業前後に調査を行った。

具体的に調査問題は、調査1と同じ問題と、それに追加して、物体にはたらく力に関する調査問題(図5)を実施した。運動の法則とMIF前概念との関連を調べるためである。

調査1の水平方向の運動については授業前後で尋ね、調査1のその他の問題は授業前でのみ尋ねた。図5の小問1では、水平面上で等速直線運動する物体にはたらく力を、作図と自由記述で問うた。また小問2では、Clement(1982)に基づき、鉛直上向きに投げ上げた小球に、(1)上昇中、(2)最高点、(3)下降中のそれぞれ

- 次の各場面について、
 ① 各物体にはたらく力のベクトル(矢印)を、それぞれ図中に記入せよ。このとき作用点を明示すること。
 ② また、例にならって、**それぞれの力の説明**を矢印の横に記入せよ。
 ③ さらに、それらの力による**運動の説明**を記入せよ。
 ただし空気抵抗は無視する。

例) 床の上に置いた静止している物体



- (1) ビリヤードにおいて棒に押された後、右向きに等速直線運動をしている球



- (2) 手から投げ上げられ、AからEのように、鉛直方向に運動する鉄球

①B地点の鉄球 ②C地点の鉄球 ③D地点の鉄球

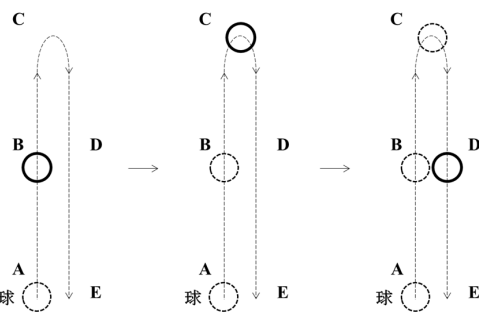


図5 物体にはたらく力についての問題(MIF問題)

の地点ではたらく力を、作図と自由記述で問うた。

また、加速度についてと、力と運動の関係についての考え方が、どういった場面でどのように変化したかを、自由記述で尋ねた(付録図1,2)。

3. 調査方法

a 調査1

調査1は、連続した3週にわたって、物理学についての講義中に実施した。授業はオンライン形式で行った。第1～4回は第1週、第5回は第2週、第6回は第3週に実施した。授業内容は第1週において運動の法則、第2週と第3週では運動方程式と力学的エネルギー保存則についてであった。画面共有したホワイトボードに授業内容を書き込みながら授業を行ったが、実験または演示などは行わなかった。なおこの間、指導者から調査問題に関する解説やフィードバックなどの教育的介入は行っていない。調査はウェブ上のフォームを用いて解答させた。大問ごとに次のセクションに移って解答することとし、前に戻って答え直すことができないようにした。また解答の過程において資料閲覧や検索は認めなかった。各回の解答時間は解答に十分なものとし、対象者は各自のペースで最後まで取り組んだ。

b 調査2

調査2の目的は、第1に、学生どうしの話し合い、実験、そして教師からの講義のどの場面で、学生は運動の法則の因果操作を習得できるのか、第2に、授業前後での水平方向の運動およびMIFについての学生の考え方の変化を、個別具体的に探索し明らかにすることである。

運動の法則の因果操作に関する授業は、連続した2週にわたって、物理学についての講義中に実施した。調査は、第1日目の授業前、第2日目の授業後の講義時間内に行った。調査2では印刷した質問紙を配布し解答させた。各回の解答時間は解答に十分なものとし、対象者は各自のペースで最後まで取り組んだ。

授業は対面形式で行った。内容は、以下のようであった。まず第1日目は、水平方向の運動について学生どうし2人1組(学生PとR、学生QとS)で話し合いをした。具体的に学生Pは、当初、糸を引き続けると小球につながる糸が緩み張力がはたらかなくなり一定の速度で運動すると考えていたが、学生Rに説明している過程で、糸は引き続けるとまた伸びて張力がはたらし続け加速し続けるのではないかと考えた。また学生Qは一貫して学生Sに対し、力がはたらかない場合でもつり合っている場合でもないから、一定の加速度で運動すると説明していた。その後、水平面上で台車をバネの長さが一定になるように引いたときの運動を観察する学生実験を行った(金子ほか, 2009)。しかしこの実験だけでは学生らは一定の速度で運動するのか加速するのかを納得して理解することはできなかった。原因は、学生がバネの長さを一定にして台車を引くことが難しいからであった。そこで教師から、力が一定にはたらく状況は他にないかを尋ね、学生の意見から、今回は重力がはたらく場

合について実験を行うこととした。翌週の第2日目は、まず前時での実験について、再度上記のような振り返りを行った。次に、斜面上での台車の運動を観察および測定する学生実験を行った。観察にはアプリ(モーションショット)を用いた。これにより、一定の時間間隔でスナップショットが重ね合わせられ、1枚の写真の中で物体の位置の経時変化を見ることができた。測定には記録タイマー(島津理化, TI-9)を用いた。記録テープを0.05秒間隔で切り、グラフ用紙に貼り付け、速さの時間変化をみた。最後に、教師からの講義を行った。具体的には、アプリを用いて撮影した写真から台車の間隔が増していることの指摘、記録タイマーの測定結果から速さが直線的に増えていることの指摘、速さが増えることと力との関係についての指摘、そして最後に、斜面上での等加速度運動における力と対比して水平面上での等速直線運動における慣性についての指摘を行った。なお、観察者は授業補助者として学生実験に関わりながら、学生の活動を記録した。

4. 分析方法

本研究では、調査1と調査2ともに、得られた学生の自由記述などの解答に対して、SCAT (Steps for Coding and Theorization) による分析を行った(大谷, 2019)。SCATによる分析を行った理由は、第1に、テキストに含まれる各学生の個別で多様な考え方を拾うことができ、さらにそれらを再文脈化し、学生らの多様な考え方に基づいて理論を記述すること(以下では理論記述とする)が可能であるからである。第2に、小規模なサンプルのデータや、自由記述に対する分析手順が明示されているため、分析過程の客観化と分析の妥当性の検討が可能であるからである(大谷, 2011)。

SCATによる分析の手順は以下の通りであった。本研究では、各学生が解答した自由記述の他に、作図や選択した記号も含めた全解答を、分析の対象としてテキストに含めた。テキストを各問題の解答ごとに分割し、一つのセグメントとした。各セグメントに対して、着目すべき語句の抽出、自由記述や作図の内容の言い換え(ただし、物理用語などの一部はそのままである場合がある)、それを説明するテキスト外の概念や先行研究にある概念を検討したのち、セグメント間の関係を見通して各セグメントにおける学生の考え方やその背景にある思考や心象を見出し、構成概念として記述した。見出した全ての構成概念を関係づけてストーリー・ラインをまとめた。最後に、ストーリー・ラインから学生の考え方について理論記述を行った。

調査1では、水平面上の等加速度運動と自由落下運動に対する学生の考え方を調べるために、対象者全員の解答を水平方向の運動と鉛直方向の運動について別々に分析した。内容がほぼ同じなために構成概念が同一となったセグメントは、ひとまとまりにした。

調査2では、各学生の授業前後の考え方の変化を調べるために、学生ごとに調査問題および質問項目の回答を

分析した。これより、授業前後の文脈を考慮した学生の個別具体的な考え方を探索した。以下の結果では、各学生の分析結果として得られた理論記述を、授業場面と問題ごとに整理し直して記述した。これより、各授業場面が学生の考え方に及ぼす影響と、それによる各問題での学生の考え方の変化を探索した。

Ⅲ. 結果と考察

まず、数値操作・関係操作・因果操作についての学生の理解状況は以下のようであった。

1. 数値操作・関係操作・因果操作の理解状況について

数値操作(第1問)および関係操作(第2問)は、調査1および調査2ともに、全員が可能であった。因果操作(第3問)についての結果は表3のようであった。すなわち、物体に力がはたらくことが原因で、物体が加速することが結果であると同時に、逆の(4)も成立すると考えている学生がいる。また(3)が正しい(○)と答える学生がいる。これらの中には、物体が(質量)×(加速度)の大きさの力をもつ、あるいは物体に重力などとは別に(質量)×(加速度)の大きさの力がはたらくと運動方程式を解釈できると考える学生もいると推測される。なお調査2において、物体が加速することが原因で、物体に力がはたらくことが結果であると答えた学生がいるが、水平方向の運動についての自由記述では正しい考え方を記述していた。

次に、SCATによる分析の結果は以下のとおりであった。なお、以下文中の【 】は分析から見出された構成概念を表す。

表3 因果操作についての問題に対する学生の解答

調査	学生	第3問				
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
調査1	A	○	×	×	×	×
	B	○	×	×	×	×
	C	○	×	×	×	×
	D	○	×	×	×	×
	E	○	×	×	×	×
	F	○	×	×	×	×
	G	○	×	×	×	×
	H	○	×	×	×	×
	I	○	×	○	×	×
	J	○	×	○	×	×
	K	○	×	×	×	×
	L	○	×	×	×	×
	M	○	×	×	×	×
	N	○	×	○	×	×
調査2	O	○	×	○	×	×
	P	×	×	×	×	×
	Q	○	×	×	×	×
	R	×	×	×	○	×
	S	○	×	○	?	×

注) ○, ×, ?はそれぞれ、因果操作について尋ねる問題(図1)に対して、A~Sの各学生が正しい、間違っている、分からないと答えたことを意味する。

2. 水平面上で一定の力がはたらくときの運動についての考え方

水平方向の運動に対する学生らの解答をSCATで分析した過程と、その結果であるストーリー・ラインおよび

理論記述は付録表1のようになった。これらより、水平面上で一定の力がはたらくときの運動についての学習者の誤った考え方について、大きく3つのことが分かった。

第1に、学習者は【現実目にする馴染みある現象から理想的状況での運動の推論】を行い、【運動抵抗作用が運動を決定するという観念】を有する。あるいは、【現実起こる現象に対する科学的説明】を行い、【質量に運動抵抗作用が内在するという観念】を有する。

第2に、学習者は【運動の法則の関係操作の実行】が可能である。しかし、【加速度一定と速度一定の混同】または【加速度一定の意味の誤解】によって、【関係操作の結果に対する物理的解釈の間違い】をする。

第3に、学習者は【力が一定なら速度変化しないという心象】や【力の大きさが変化すると速度変化するという心象】を有する。なお、【力が一定なら速度変化しないという心象】を有する学習者は、【運動の法則の因果操作の不正確な実行】を行う場合がある。

一方、水平方向の運動を正答する学習者は、【運動の法則の因果操作の実行】が可能である。さらに、【運動の法則の因果操作を繰り返す思考】によって、【一定の力が作用し続けると速度変化し続けるという理解】をしている。

3. 自由落下運動についての考え方

自由落下問題に対する学生らの解答をSCATで分析した過程と、その結果であるストーリー・ラインと理論記述は付録の表2のようになった。

これらより、自由落下運動についての学習者の考え方について、大きく4つのことが分かった。

第1に、学習者は、【現実目にする馴染みある現象から理想的状況での運動の推論】を行い、【運動抵抗作用が運動を決定するという観念】をもつ。また【現実起こる現象に対する科学的説明】を行うが、【重い物体の方が速く落ちるという心象】をもつ。

第2に、学習者は【運動の法則の関係操作の実行】が可能である。しかし、【加速度一定の意味の誤解】がある場合、【関係操作の結果に対する物理的解釈の間違い】をする。一方、【加速度一定の意味の正確な理解】がある場合は、【関係操作の結果に対する正確な物理的解釈】をなす。

第3に、学習者は【力の大きさの変化によって加速するという心象】または【蓄積されるインパタスの大きさの変化によって加速するという心象】を有する。

第4に、学習者は【運動の法則の因果関係が逆転した思考】を行う。

4. 2つの等加速度運動についての考え方の比較

次に、水平方向の運動と鉛直方向の運動についての学習者の捉え方を比較した。その結果、どちらの問題でも共通の考え方をするのは、【現実目にする馴染みある現象から理想的状況での運動の推論】や【現実起こる

現象に対する科学的説明】をする学習者、【運動の法則の関係操作の実行】が可能な学習者であった。また水平方向の運動について【運動の法則の因果操作の実行】が可能な学習者は、鉛直方向の運動について【運動の法則の因果関係が逆転した思考】をしていた。

一方、上記2つの問題で別々の考え方をするのは、水平方向の運動について【力が一定なら速度変化しないという心象】など主観的な考え方を有する学習者であった。このような学習者は、鉛直方向の運動においても、【力の大きさの変化によって加速するという心象】などの主観的な考え方を有していた。あるいは、鉛直方向の運動でのみ、【自由落下は等加速度運動するとの理解を前提とした公式の運用】や【運動の法則の因果操作の実行】など定式的操作的な処理をしていた。

以上より、水平方向の運動は主観的な考え方をしやすく、運動の法則の因果操作の実行が難しいといえる。

5. 因果操作に関する授業前後の考え方の変化

授業前後の学生ごとの解答を SCAT で分析した過程と、その結果であるストーリー・ラインと理論記述は付録の表6～11 ようになった。考え方が変化したと学生が答えたのは、実験と教師からの説明の2つの場面であった。これより、全学生の分析結果を、上記の2つの場面と3つの問題（水平方向の運動、MIF 問題2問）に分けて、学習者の考え方の変化を整理し直した。それぞれについて、以下のようなことが分かった。

a 実験

斜面上での台車運動のアプリを用いた観察実験（図6）は、学習者に【台車の運動の可視化による加速度運動の確信】を与える。これによって学習者は、台車の運動について【一定の力が作用し続けると速度変化し続けるという理解】を得る。

また【勢いをつけると加速するという心象】を有する学習者は、【台車の運動の可視化による加速度運動の確信】を持つと、【勢いをつけると加速するという心象の解消】をする。しかし実験後も、【力の大きさが変化すると速度変化するという心象】を持ち続ける。

斜面上での台車運動の記録タイマーを用いた測定実験は、【速度と加速度の関係の可視化】ができる。そのため、授業前から【一定の力が作用し続けると速度変化し続けるという理解】が可能な学習者であっても、【加速度一定の意味の誤解】をすることがあるが、記録タイマーを用いた測定実験によって【加速度一定と加速度変化の違いの理解】を果たす。

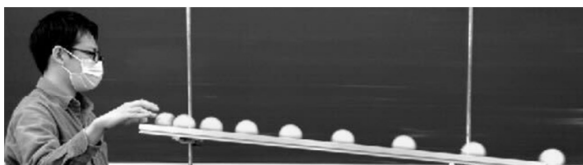


図6 アプリによる物体運動のストロボ撮影

b 教師からの説明

運動の法則と関連付けて慣性の法則を説明すること

は、【運動の法則と慣性の法則を関連付けた理解】を引き起こす。具体的に学習者は、【力がはたらかない状況に対する慣性の法則の適用】を理解する。つまり、学習者は【慣性の法則の適用範囲の適正化（拡大）】をなす⁽¹⁾。さらにこれによって、学習者は【力が一定なら速度変化しないという心象の解消】と【一定の力が作用し続けると速度変化し続けるという理解】を深める。

また【等速直線運動の原因の混乱】の状態にある学習者は【慣性の説明による混乱の解消】をなす⁽²⁾。

その他に、等速直線運動する物体は進行する向きに力がはたらかないこと（前概念であること）は理解しているが科学的に正しい説明ができない学習者は、【前概念に対する正しい科学的概念の不在による不安感】を有し、授業において【慣性の説明による不安感の解消】をなす。

次に、水平方向の運動を鉛直方向の運動と関連付けて説明することは、習得済みである【自由落下運動の例示による力と加速度の関係の想起】を引き起こす。これによって学習者は【一定の力が作用し続けると速度変化し続けるという理解】を得る。

以上のように、教師の説明によって台車は【一定の力が作用し続けると速度変化し続けるという理解】を得る一方で、【運動の法則の因果操作の認識不足】をしている学習者がいる。また概念変化の過程において、【瞬間的な力の作用と慣性の法則を関連付けた理解の未形成】である場合、運動開始時に瞬間的に力が作用すると等速直線運動が生じ、力が作用し続けると等加速度運動が生じるという【力の作用時間と速度変化の因果関係の形成】をしてしまう学習者がいる。

c 水平方向の運動についての考え方の変化

各学生の水平方向の運動についての解答は表4 のようであった。表4より、授業前において誤答した学生であっても、授業後には全員が正答していた。特に授業前には

表4 学生の水平方向の運動についての解答

学 生	ブレ		ポスト	
	(1)	(2)	(1)	(2)
P	イ	静止状態から動き出すまでは加速し、それ以降は、一定の力で引いているので、速度は一定だから	ウ	力を加え続けると、力がはたらき続けるから。速度が一定ということは、力がはたらいっていないことになるから。
Q	ウ	等加速度運動では、一定の力が加わり続ける運動のことを言うから。	ウ	力が加わり続けることで速さが増加するため。
R	イ	力を加えると小球には加速度が生じるが、糸がゆるむと小球にはたらく力がなくなるので、加速度が小さくなり、0になると等速運動すると考えたから。	ウ	一定の力を加えることの解釈を間違っていた。一定の力を加えると一定の加速度を生じるから。
S	ア	アカイのどちらかが正解だと思う。静止している物体が動き始めるためには、最初は加速するのかが分からない。	ウ	実験と友達との話し合いによって納得したから。
T			ウ	一定の力を加え続けられれば、小球の運動より速さも加わり続けるから。
U			ウ	重力では速度は大きくなり続けたから、授業内容よりウであると考えた。経験から考えるとイではないかと考える。

注) 記号（ア、イ、ウ）は、水平方向の運動に関する問題（図2）の（1）に対する、学生P～Uの解答である。

主観的な解答をしていた学生 P は、授業後には運動の法則の因果操作が可能となった。

SCAT による分析から、【力が一定なら速度変化しないという心象】を有する学習者であっても、授業後は、【一定の力が作用し続けると速度変化し続けるという理解】が可能となる。また、学習者は【慣性の法則と運動の法則の適用範囲の適正化】を果たす。

なお、授業後に【自由落下運動から水平運動の推論】が可能であっても、【推論と心象で答えが相違する当惑】を有する学習者がいる⁽³⁾。

d 等速直線運動する物体にはたらく力について

各学生の等速直線運動する物体にはたらく力についての解答は表5のようであった。表5より、特に学生 P は、授業前には力のつり合いを考え MIF 前概念を適用していたが、授業後は慣性の法則を正しく適用して解答していることが分かった。

SCAT による分析から、【力のつり合いによる等速直線運動の説明のための MIF 前概念の適用】をなしていた学習者は、授業後、【慣性の法則の適用】を行い【MIF 前概念の部分的解消】を果たす⁽⁴⁾。ただし、運動開始時に瞬間的に力が作用すると等速直線運動が生じるという【瞬間的な力の作用と等速直線運動の因果関係】に基づいて【MIF 前概念の部分的解消】を果たす学習者もいる。このことから、水平方向の運動に対して因果操作が正しく実行できることや、力がはたらかない状況に対する慣性の法則の適用が可能となることが、MIF 前概念の部分的解消に関係すると考えられる。

また、【等速直線運動の原因の混乱】を有する学習者は、授業で【慣性の説明による混乱の解消】をし、等速直線運動について【慣性の正しい理解】をする。

一方、【力が一定なら速度変化しないという心象】による MIF 前概念の適用をなす学習者は、授業後も、【MIF 前概念の保持】をする。学習者が【力の大きさが変化すると速度変化するという心象】を授業後も有し続けていたからであろう。このことから、学習者の主観的思考が

表5 学生の物体にはたらく力についての解答

学 生	ブレ 力とその説明	運動の説明	ポスト 力とその説明	運動の説明
P		等速直線運動は加速度が0であるため。右方向の力と摩擦力はつり合っている。		等速であることから、力は加わっていないため。球には、重力と垂直抗力しかはたらくていない。
Q		等速直線運動なので、水平方向はなし。鉛直方向は、重力と垂直抗力のつりあい。		等速直線運動は、力がつりあっているときにおこるから。
R		(垂直抗力) = (重力)より上下運動はないが、ビリヤードの棒より物体に力が加わって右方向に動いている。		棒によって力が加えられたから。
S		物体が等速直線運動をするので、ある一定の力がはたらき続ける。		重力と垂直抗力がつりあっているため垂直方向には動かないが、右向きに押された力があつたため動く。
T				棒に押された後右向きにはたらく力はないため。
U				横方向については等速直線運動をしているため特にはたらく力はないが、垂直抗力と重力がつり合っている。

弱まることも、MIF 前概念の部分的解消と関係すると考えられる。

e 投げ上げ運動する物体にはたらく力について

各学生の等速直線運動する物体にはたらく力についての解答は表6のようであった。表6より、特に学生 R は、授業前には上向きの運動を慣性の法則で説明していたが、授業後には運動の法則に基づいて説明していた。

SCAT による分析から、【重力と逆向きの運動を説明するための慣性の法則の誤適用】をする学習者は、授業において【慣性の法則と運動の法則を関連付けた理解】をすると、授業後に【進行方向逆向きにはたらく力に対する運動の法則の因果操作の実行】が可能となる。つまり、【運動の法則の適用範囲の適正化(拡大)】と【慣性の法則の適用範囲の適正化(縮小)】を果たす。

しかし、【力のつり合いによる重力と逆向きの運動を説明するための MIF 前概念の適用】をする学習者は、授業後も同じように考える。

なお、授業後に【力のつり合いによる重力と逆向きの運動を説明するために慣性を力とみなす誤解】をする学習者もいる。これは等速直線運動に対して適用した慣性を、投げ上げ運動に対して【慣性の過度に拡大された適用】をしたために生じたと考えられる。

表6 学生の物体にはたらく力についての解答

学 生	ブレ 力とその説明	運動の説明	ポスト 力とその説明	運動の説明
P		0地点で重力と上方向の力はつり合う。		①では重力より上向きの力の方が大きいため、上向きに動くが、②ではつりあっているため静止する。③では重力の方が大きいため落下する。
Q		力が接しているものから受ける。放射の場合、ボールは何ものにもふれていないので上記。		鉄球は何にもふれておらず、重力のみかかっているから。
R		物体には重力しか力がないが、慣性の法則により図のように運動している。		A~C: マイナスの加速度で運動 C: 速度0になる C~D: プラスの加速度で運動
S		投げられた力と重力の大きさによって運動の向きが変化している。		最初には手から投げ上げられた力が大きいので、重力とつり合い、最後は重力の方が大きくなる。
T				投げ上げられてから球が上へ上がる間は慣性の力が重力より大きいので、だんだん慣性の力が小さくなるため。
U				Cは静止している。Dは重力のみにより落下運動している。BはA時点での鉛直上向きの力が重力より大きいため鉛直上向きに運動している。

6. 因果操作の実行による概念変化について

以上より、特に水平問題での因果操作の実行による等速直線運動での MIF 前概念の解消の過程として、次のような場合が考えられる。すなわち、(i) 水平方向について運動の法則の因果操作が可能となることによって、一定の力がはたらく状況に対する運動の法則の適用が可能となる(運動の法則の適用範囲の適正化がなされる)。(ii) 力がはたらかない状況に対する慣性の法則の適用が可能となる(慣性の法則の適用範囲の適正化がなされる)。(iii) これらに伴って、一定の力がはたらくと一定の速度で運動するといった主観的な考えが解消される。(iv) MIF 前概念の部分的解消が達成される。つ

まり、水平問題に対する因果操作の実行によって、運動の法則と慣性の法則の適用範囲の相補的な適正化（概念変化）が行われ、学習者は主観的な考え方が誤りであることを自覚できるようになり、MIF 前概念を適用しなくなると考えられる。

IV. まとめと今後の課題

本研究の主要な結果は以下の通りである。

第1に、数値操作と関係操作ができても、運動の法則の因果操作ができず、運動方程式について多様な解釈が存在することが分かった。

第2に、水平方向の運動と鉛直方向の運動についての学生の考え方を詳細に明らかにした。関係操作については、力が一定ならば加速度も一定であると考えていることが可能であっても、加速度の解釈を間違い、速度が一定であると考えてしまうことが分かった。また因果操作については、一定の力が作用し続けると速度変化し続けるという理解を達成することが、水平方向の運動を正しく理解することにつながるということが分かった。その他に、さまざまな主観的な考え方をもち、問題ごとに異なる考えをしていることが分かった。

第3に、授業における実験と教師からの説明によって、学生の考え方が変化することが分かった。特にアプリを用いた観察実験は、一定の力がはたらくと加速することを学生に納得させることに役立つものであることが分かった。また教師からの説明では、慣性の法則や自由落下と関連付けた運動の法則の説明が、学生のそれらに法則についての考え方を変化させることに有効に機能することが分かった。

第4に、実験や教師からの説明は、水平方向の運動に対する因果操作の正しい実行を促し、MIF 前概念の部分的解消などにつながるということが分かった。

なお、本研究では大学生を対象とした理解度の調査を行ったが、本研究で対象とした学生一人ひとりの考え方を詳細に明らかにすることを主眼としており、多くの学習者に対してただちに本研究結果を一般化できるものではない。より広く、中学生や高校生における因果操作の理解度、および因果操作の習得と MIF 前概念を適用しなくなることとの関係については、今後の課題である。

注

(1) 概念の理解が高まるにしたがってより適切な場面に概念が適用されるようになるという「適用範囲の最適化（森藤, 2012）」を、調査2での SCAT による分析の分析的枠組みとして適用した。

森藤義孝（2012）：構成主義の学習論—その影響と課題—, 理科の教育, 61, 7S24, 5-8.

(2) 混乱とは、Berlyne (1965) を参考に、等速直線運動の原因にどの物理量を帰するのが適切であるか分からない状態のことを指す。

Berlyne, D. E. (1965) : Structure and Direction in

Thinking, John Wiley & Sons, Inc. バーライン著, 橋本七重, 小杉洋子訳 (1970) : 思考の構造と方向, 明治図書.

(3) 当惑とは、上記の Berlyne (1965) を参考に、推論と心象によって、等加速度運動と等速直線運動という、一組の相互に排他的な確信が生じ、どちらも正しいように思う状態であることを指す。

(4) MIF 前概念の適用と記したのは、力のつり合いに基づいて運動を説明するために運動する向きの力が誘導されているため、また逆に部分的解消と記したのは、授業後に MIF 前概念を鉛直方向の運動で適用しなくなっても、水平方向の運動で適用することがあるためである。

文献

Clement, J. (1982) : Student's preconceptions in introductory mechanics, *Am. J. Phys.*, 50, 1, 66-71.

飯田洋治 (1992) : 力学の見方考え方, 川勝博, 三井伸雄, 飯田洋治共著「学ぶ側からみた力学の再構成：物理教育「力学」の視点と実践」, 155-278, 新生出版.

板倉聖宣 (1971) : 授業書＜速さと距離と時間＞＜力と運動＞とその解説, 仮説実験授業研究会編集「科学教育研究 No. 6」, 157-229, 国土社.

金子健治, 小林辰至, 伊東明彦, 渡辺一博 (2009) : 中学生の「斜面上の物体の運動」の指導方法に関する研究—台車を水平面上で一定の大きさの力で引く実験を取り入れることの効果—, 理科教育学研究, 50, 2, 31-37.

小林寛子 (2019) : 理科教育に関わる心理学研究の展望—学びのプロセスから授業を考える—, 教育心理学年報, 58, 149-166.

麻柄啓一 (2008) : 法則理解における3段階モデル, 日本教育心理学会総会論文集, 50, 164.

大谷尚 (2011) : SCAT : Steps for Coding and Theorization—明示的手続きで着手しやすく小規模データに適用可能な質的データ分析手法—, 感性工学, 10, 3, 155-160.

大谷尚 (2019) : 質的研究の考え方, 名古屋大学出版会. 鷲見拓哉, 猪本修 (2020) : 運動の法則の意味の理解を測る因果操作, 日本科学教育学会研究会研究報告, 35, 3, 73-76.

滝川洋二 (1983) : 認識の形成過程をさぐる—「慣性の法則と力」を例に一, 理科教育学会研究紀要, 24, 2, 19-26.

塚本浩司・樋口幸江・加納誠 (2005) : 大学生の力学基礎概念, 日本物理学会誌, 60, 4, 294-297.

付録

(1) 今日の授業において、**力と運動の関係**について、あなたの考えや理解が深まったり変わったりした場面はありましたか。当てはまるものを、以下のア～オから選んでください(複数回答可)。またその場面を具体的に説明してください。

ア. 問題を解いたとき 例) ○○の問題を解いたとき

イ. 他の学生の意見を聞いたとき 例) ○○さんの□□という意見を聞いたとき

ウ. 実験をしたとき 例) ○○の実験をしたとき

エ. 先生の説明を聞いたとき 例) ○○という説明を聞いたとき

オ. その他

(2) (1)において、**力と運動の関係**についての理解が、どのように変化しましたか。また、どういった内容について疑問が残りましたか。具体的に記述してください。

図 2 授業後の学生の考え方を尋ねる質問紙 その2

学籍番号	氏名
------	----

(1) 今日の授業において、**加速度**について、あなたの考えや理解が深まったり変わったりした場面はありましたか。当てはまるものを、以下のア～オから選んでください(複数回答可)。またその場面を具体的に説明してください。

ア. 問題を解いたとき 例) ○○の問題を解いたとき

イ. 他の学生の意見を聞いたとき 例) ○○さんの□□という意見を聞いたとき

ウ. 実験をしたとき 例) ○○の実験をしたとき

エ. 先生の説明を聞いたとき 例) ○○という説明を聞いたとき

オ. その他

(2) (1)において、**加速度**についての理解は、どのように変化しましたか。また、どういった内容について疑問が残りましたか。具体的に記述してください。

図 1 授業後の学生の考え方を尋ねる質問紙 その1

表 1 学生の水平方向の運動についての解答に対する SCAT による分析

番号	解答者	テキスト	<1>テキスト中の注目すべき語句	<2>テキスト中の語句の言い換え	<3>左を説明するようなテキスト外の概念	<4>テーマ・構成概念 (前後や全体の文脈を考慮して)
		(1)				
1	N	A	摩擦や傾斜がない面上を運動すると考えられるから	摩擦や傾斜がない	摩擦力がはたらく粗い面上での減速運動／斜面上での加速または減速運動	現実起こる現象からの推論／日常生活で馴染みある現象からの推論／実験条件による運動の分類
2	B	A	小球は質量を持ち、慣性力や摩擦力が働いているため糸が引く強る力に対し逆向きに働き小球は糸に引きずられるように一定の速度で動くと考えたため。	質量を持ち／慣性力や摩擦力が働いている／引きずられる	質量を持つ物体にはたらく運動を抑制する内力的あるいは外的な力の存在／地面にすれるという心象	質量概念の抵抗力の内包／質量は動きにくさを表す量／摩擦が必ずはたらく日常の現象についての説明
3	O	A	運動方程式に当てはめて考えると、 $ma=F$ の係数 m は、滑らかな面上に置いて一定であり、加わる力 F の値も一定の力で糸を引き続けている事から一定であると言える。したがって、 m と F はそれぞれ一定の値である事から、加速度 a の値は変わらないため、小球は一定の速度で運動すると考える。	運動方程式に当てはめて m はなめらかな面上に置いて一定／ m と F はそれぞれ一定／ a の値は変わらない／一定の速度	運動方程式の変数の関係／摩擦がないことが質量一定の根拠／加速度一定なら速度一定	摩擦は力ではなく質量に関係するという心象／法則の関係操作(麻柄2008)／加速度一定が速度一定であるとの誤解
4	J	A	$F=ma$ より m また a の値が変わると F も変わるが一定の力とあり、 F が変わることはないと分かるので加速度は一定である。	$F=ma$ より m また a が変わると F も変わる／ F が変わることはない／加速度は一定	運動方程式の変数の関係／加速度一定なら速度一定	法則の関係操作／速度と加速度が区別できない(新田2011)
5	L	I	静止している小球に力を加えた事で加速し、その後は摩擦の無い滑らかな面上を一定の力で引かれていくから。また運動方程式 $ma=F$ より、質量 m と加える力 F が一定なので、加速度 a も一定となるから。	静止している／加速／摩擦の無い／一定の力／ $ma=F$ より／質量 m と加える力 F が一定／加速度 a も一定	力が0からある値への変化による加速／力が一定なら速度も一定／運動方程式の変数の関係	力の変化による加速のイメージ／速度は加えられた力に比例する(新田2011)／法則の関係操作／加速度一定が速度一定であるとの誤解
6	M	ウ	一定の速さで引く張られているため	一定の速さで引く張られている	小球に接続する糸が等速直線運動する影響による小球の等加速度運動	速度と加速度の関係についてちぐはぐな説明
7	I	A	一定の力で引き続けるとあるので、加速度が0だから。	一定の力／加速度が0	力が一定なら速度も一定	加速度の正確な理解／速度は加えられた力に比例する
8	K	A	同じ力で引き続けていてもその力より大きい運動状態の変化が起こらないと考えたため	その力より大きい運動状態の変化が起こらない	力の大きさの変化による運動の度合いの変化	力が一定だとそれ以上速くならない限界があるという心象／力積と運動量変化の関係に連いイメージ／速度は加えられた力に比例する
9	H	A	最初、小球は静止しており、また因果律の原因である力が一定の大きさなので、結果である速さは一定の速度で運動すると考えました。	最初／静止／因果律／力が一定／一定の速度	運動の原因と結果に基づく思考／力が一定なら速度も一定	運動の因果関係の結果を速度と誤った理解／速度は加えられた力に比例する
10	F	A	物体の運動の原因となる力は、問題より常に一定の力で引かれ、小球の質量は常に変化しないので、結果として速度も変化しないので一定の速度で運動すると考えられるから。	運動の原因／一定の力／質量は常に変化しない／結果として速度も変化しない	運動の原因と結果に基づく思考／力が一定なら速度も一定	運動の因果関係の結果を速度と誤った理解／速度は加えられた力に比例する
11	G	I	小球ははじめ止まっていて、速さ0。そのあと糸に引っ張られて動き出す時に加速し、その後は一定の力で引っ張られることから、一定の速度で運動すると考えられる。	はじめ止まっていて／糸に引っ張られて動き出すときに加速／その後／一定の力／一定の速度	速度が0からある値に変化することは加速するということ／力が一定なら速度も一定	速度は加えられた力に比例する
12	D	I	止まっている状態から動かしているため最初は加速し、その後一定の速度になる	最初／加速／その後／一定の速度	速度が0からある値に変化することは加速するということ／力が一定なら速度も一定	速度の変化による加速のイメージ／速度は加えられた力に比例する
13	E	ウ	運動の法則より物体に力がはたらくと加速度が生じるので、力がはたらく間についても同様に加速度が生じ続けるから。	力がはたらく間／加速度が生じ続ける	運動の原因と結果に基づく思考／力の作用の継続による加速の継続	加速度は加えられた力に比例する／法則の因果操作(麻柄2008)／因果操作の反復
14	A	ウ	運動方程式より物体に力を加えると力の方向に物体は加速する。よって物体に力を加え続けられれば物体は加速し続けるはずだ。	力を加え続けられれば／加速し続ける	運動の原因と結果に基づく思考／力の作用の継続による加速の継続	加速度は加えられた力に比例する／法則の因果操作／因果操作の反復
15	C	ウ	摩擦がない面で話なので、物体を引く力と逆向きに力が働くことはない、力が釣り合うことはなくひたすら物体に図の方向に力が働き続ける。力が働くに加速度が生じ、速度が変化し大きくなる。そこへさらに力が働き、さらに正の加速度が生じ速度が大きくなる、ということが繰り返されていくと考えたから。	摩擦がない／ひたすら／力が働き続ける／力が働くに加速度が生じ／速度が変化／繰り返されていく	力の作用の継続／単位時間毎の因果律の適用／因果律適用の反復／結果の累積による速度の一定割合での増加	加速度は加えられた力に比例する／法則の因果操作／因果操作の反復
番号	解答者	テキスト	<1>テキスト中の注目すべき語句	<2>テキスト中の語句の言い換え	<3>左を説明するようなテキスト外の概念	<4>テーマ・構成概念 (前後や全体の文脈を考慮して)

ストーリーライン	<p>「ア：一定の速度で運動する」と考える学生の中には、【現実起こる現象に対する科学的説明】をしたり、あるいは、【現実目にする馴染みある現象から理想的状況での運動の推論】をしたりする学生であっても、【質量に運動抵抗作用が内在するという概念】あるいは【運動抵抗作用が運動を決定するという概念】を持っていた。</p> <p>「ア：一定の速度で運動する」と考える学生は、【運動の法則の関係操作の実行】が可能な学生であっても、【加速度一定と速度一定の混同】または【加速度一定の意味の誤解】があり、それらにより【関係操作の結果に対する物理的解釈の間違い】をしていた。また、【質量に運動抵抗作用が内在するという心象】を持っていた。</p> <p>「ア：一定の速度で運動する」と考える学生は、【加速度の正確な理解】をしていて、【力が一定なら速度変化しないという心象】があった。</p> <p>「ア：一定の速度で運動する」と考える学生は、【力が一定なら速度変化しないという心象】または【力が一定なら運動速度に上限があるという心象】を持つ。</p> <p>「イ：一定の速度で運動する」と考える学生は、【力が一定なら速度変化しないという心象】があり、【運動の法則の因果操作の正確な実行】をしていた。</p> <p>「イ：最初加速し、その後一定の速度で運動する」と考える学生は、【力が一定なら速度変化しないという心象】と【力が変化すると速度変化するという心象】をもち、【数学的処理としての運動の法則の関係操作の実行可能】であった。</p> <p>「ウ：最初加速し、その後一定の速度で運動する」と考える学生は、【力が一定なら速度変化しないという心象】によって、最初が加速すると考え、【力が一定なら速度変化しないという心象】によって、その後一定の速度で運動すると考えた。</p> <p>「ウ：加速し続ける」と考える学生は、【力が一定なら速度変化しないという心象】と【加速度と速度の混同】によって、【加速度と速度についてのちぐはぐな説明】をしていた。</p> <p>「ウ：加速し続ける」と解答した学生は、【運動の法則の因果操作の実行可能】で、【運動の法則の因果操作を繰り返す思考】を行い、それにより、【一定の力が作用し続けると速度変化し続けるという理解】、すなわち、【時間幅のある運動の法則の因果操作】が可能であった。</p>
	理論記述

表2 学生の鉛直方向の運動についての解答に対する SCAT による分析

番号	解答者	テキスト			<1>テキスト中の注目すべき語句	<2>テキスト中の語句の言い換え	<3>左を説明するようなテキスト外の概念	<4>テーマ・構成概念 (前後や全体の文脈を考慮して)
		(1)	(2)	(3)				
1	N	ア	空気抵抗が無視できる状態だから	ウ	空気抵抗が無視できる	空気抵抗による減速運動	空気抵抗が運動を決定するという心象／空気抵抗が運動を抑制するという心象	運動抵抗作用が運動を決定するという概念／現実を目にする馴染みある現象から理想的状況での運動の推論
2	B	イ	物体が落下する時質量に比例して加速度が増して行くが、時間とともに空気抵抗と釣り合いやがて速度はいつに一定になるため。	ウ	質量に比例して加速度が増して行く／時間とともに／空気抵抗と釣り合い	質量と加速度の比例関係／どんな重い物体でも終端速度一定	重い物体の方が速く落ちる(新田2011)／現実にかかる現象への固執／つり合いによる現実的現象の説明	重い物体の方が速く落ちるという心象／現実にかかる現象に対する科学的説明
3	H	ア	小球が落下している際に、小球の質量に変化はなく、また小球の外部から力が加えられた様子もないため、加速度は一定で運動する。	ウ	質量に変化はなく／外部から力が加えられた様子もない／加速度は一定	運動方程式の変数の関係／外部作用の確認／重力の未把握	質量に固有の重力(新田2011)／法則の関係操作(麻橋2008)／既知の変数の特定／加速度一定を速度一定と誤解	質量に運動抵抗作用が内在するという概念／運動の法則の関係操作の実行／関係操作の結果に対する物理的解釈の間違い／加速度一定の意味の誤解
4	J	ア	落下中に力(N)と質量の値が変化することはないから。	ウ	力(N)／質量／値／変化することはない	運動方程式の変数の関係	法則の関係操作／既知の変数の特定	運動の法則の関係操作の実行／関係操作の結果に対する物理的解釈の間違い
5	L	ウ	小球のmが一定であり、重力だけの力を受けているため、等加速度運動になるから。	ア	mが一定／重力だけの力を受けている／等加速度運動	運動方程式の変数の関係／作用する力の特定	法則の関係操作／既知の変数の特定／変数の時間変化の有無／加速度一定の理解	運動の法則の関係操作の実行／関係操作の結果に対する正確な物理的解釈／加速度一定の意味の正確な理解
6	D	ウ	常に重力が上乗せされていくため、加速し続けると思います	ア	常に重力が上乗せされていく	重力の大きさは一定／重力の物体内における蓄積	重力の大きさは一定／蓄積されるインベツタス(新田2011)／速度は蓄積された力に比例する	蓄積されるインベツタスの大きさの変化によって加速するという心象
7	G	ウ	力が加わり続けるから	イ	力が加わり続ける	重力の大きさの増加	物体の落下に連れて重力は大きくなる(新田2011)／速度は加えられた力に比例する(新田2011)	力の大きさの変化によって加速するという心象
8	M	ウ	重力によって小球に下向きの力が与えられ続けるため	イ	力が与えられ続ける	力の供給の継続	物体の落下に連れて重力は大きくなる／速度は加えられた力に比例する	
9	K	ウ	空気抵抗がない状態であれば常に重力の力が加わって加速すると考えたから	ア	空気抵抗がない／常に／重力の力が加わって	力の作用の継続	理想的状況の想定／重力の大きさは一定／加速度は加えられた力に比例する	運動の法則の因果操作の実行
10	I	ウ	$v=gt$ の式を考えた。	ア	$v=gt$ ／式	物理公式の思い出し	自由落下の物理公式の想起	自由落下は等加速度運動であるとの理解を前提とした公式の運用
11	F	ウ	自由落下運動は初速度0で、加速度は重力加速度であるので、一定値gであることから $v=gt$ で求めることができるから。	ア	初速度0／加速度／一定値g／ $v=gt$	物理公式の活用／物理公式の変形と自由落下への適用	自由落下は等加速度運動との理解	
12	O	ウ	重力加速度が時間毎に小球にかかり続けるから。	ア	重力加速度／時間毎／かかり続ける	単位時間における重力加速度の作用	因果律の原因と結果の混同／自由落下の加速度は重力加速度(定数)であるとの理解	運動の法則の因果関係が逆転した思考
13	E	ウ	重力加速度が常にはたらくから。	ア	重力加速度／常に／はたらく	重力加速度の作用	因果律の原因と結果の混同／自由落下の加速度は重力加速度(定数)であるとの理解	
15	A	ウ	常に重力加速度が小球には働いているため。	ア	常に／重力加速度／働いている	重力加速度の作用	因果律の原因と結果の混同／自由落下の加速度は重力加速度(定数)であるとの理解	
14	C	ウ	重力加速度が加速度として常に働き、また空気抵抗が無い場合、ブレーキとなるものがないから。	ア	重力加速度／常に／働き／空気抵抗が無い／ブレーキとなるものがない	重力加速度の作用	因果律の原因と結果の混同／自由落下の加速度は重力加速度(定数)であるとの理解／理想的状況の想定確認	
番号	解答者	テキスト			<1>テキスト中の注目すべき語句	<2>テキスト中の語句の言い換え	<3>左を説明するようなテキスト外の概念	<4>テーマ・構成概念 (前後や全体の文脈を考慮して)
ストーリーライン		「ア：一定の速度で運動する」と解答した学生は、【現実にかかる現象に対する科学的説明】あるいは【現実を目にする馴染みある現象から理想的状況での運動の推論】をしたが、【重い物体の方が速く落ちるという心象】あるいは【運動抵抗作用が運動を決定する概念】を持っていた。 「ア：一定の速度で運動する」と解答した学生は、【運動の法則の関係操作の実行】が可能であっても、【加速度一定の意味の誤解】のため、【関係操作の結果に対する物理的解釈の間違い】をしていた。 「ウ：加速し続ける」と解答した学生は、【運動の法則の関係操作の実行】し、【加速度一定の意味の正確な理解】を有したため、【関係操作の結果に対する正確な物理的解釈】をした。 「ウ：加速し続ける」と解答した学生は、【蓄積されるインベツタスの大きさの変化によって加速するという心象】または【力の大きさの変化によって加速するという心象】を有していた。その一方で、【一定の力が作用し続けると加速する理解】を有していた学生もいた。 「ウ：加速し続ける」と解答した学生は、【自由落下は等加速度運動であるとの理解を前提とした公式運用】を行っていた。 「ウ：加速し続ける」と解答した学生は、【運動の法則の因果関係が逆転した思考】を行う。			<1>テキスト中の注目すべき語句	<2>テキスト中の語句の言い換え	<3>左を説明するようなテキスト外の概念	<4>テーマ・構成概念 (前後や全体の文脈を考慮して)
理論記述		・【現実にかかる現象に対する科学的説明】あるいは【現実を目にする馴染みある現象から理想的状況での運動の推論】をする学生であっても、【重い物体の方が速く落ちるという心象】あるいは【運動抵抗作用が運動を決定するという概念】を有する。 ・小球が加速し続けると考えるのは、【蓄積されるインベツタスの大きさの変化によって加速するという心象】または【力の大きさの変化によって加速するという心象】からである。一方で、【一定の力が作用し続けると加速する】と理解している学生もいる。 ・【自由落下は等加速度運動であるとの理解を前提とした公式運用】を行う学生がいる。 ・【運動の法則の関係操作の実行】が可能な学生であっても、【加速度一定の意味の誤解】がある場合、【関係操作の結果に対する物理的解釈の間違い】をする。一方、【加速度一定の意味の正確な理解】がある場合は、【関係操作の結果に対する正確な物理的解釈】をする。 ・【運動の法則の因果関係が逆転した思考】を行う学生がいる。						

なお、テキスト中の (1) と (2) は、第5問 (1) と (2) に対する学生の解答である。

また、テキスト中の (3) は、第6問に対する学生の解答である。

これ以降の付録表3～8中の鉛直方向の運動についてのテキスト3つは、付録表1, 2と同じ順で学生の解答を記述している。

表3 学生Pの解答に対するSCATによる分析

第1期	質問	テキスト	＜D＞テキスト中の注目すべき語句	＜D＞テキスト中の語句の言い換え	＜D＞を説明するようなテキスト外の概念	＜D＞テーマ・構成概念 (前後や全体の文脈を考慮して)
1	水平問題	イ	静止状態から動き出すまでは加速。それ以降は、一定の力で行っているので、加速度は一定だから	一定の力で行っているので、加速度は一定だから	力が一定なら加速度も一定	力の一定なら加速度変しないという心象
2	鉛直問題	ウ	等加速度運動だから	イ	重力の大きさの増加	力の大きさの変化によって加速度変する 心象
3	MF問題		等速直線運動は加速度が0であるため、右方向の力と摩擦力はつり合っている。	加速度が0／右方向の力／つり合っている	つり合いの関係が成立するとき加速度0／右方向の力と摩擦力のつり合い	等速直線運動での加速度の正しい理解 ／ベクトルと垂直力のつり合いによる運動の説明／MF前概念(Clement1982)
4	MF問題		C地点で重力と上方向の力はつり合う。	上方向の力／つり合う	重力の大きさの増加／上向きの方の減少／最上位における上向きの力と重力の大きさの等号成立	／ベクトルと重力の大きさの変化とつり合いによる運動の説明／因果スキーマ(第木2008)
5	理解の過程 変化について 力と運動との関係	変化の場面 説明: 合弁の実験からとき 説明: 実数値に力を加えるから仕事をするという説明を聞いたとき 変化の具体 一定の力を加えると速さが変わる→加速度は一定	合弁の実験／力を加えるから仕事をする 一定の力を加えると速さが変わる／加速度は一定	合弁の実験／力を加えるから仕事をする 一定の力を加えると速さが変わる／加速度は一定	実際にある加速度運動であることと理解 ／本様に加えられた力による仕事 力と速度変化の関係の理解／速度と加速度の関係の理解	正しい選択反応を指摘する証拠(バーフィ1995) 法則の因果操作(編納2008)
7	変化の場面 力と運動との関係	変化の場面 説明: 力を加えると仕事をします。 力を加えるのを止めると仕事はないが、慣性の法則で動き続ける。	仕事をします／慣性の法則で動き続ける	慣性の法則による運動の説明	概念の適用範囲(血藤2012)／適用範囲の最終性(血藤)	力がはたらかない状況に対する慣性の法則の適用／慣性の法則の適用範囲の最終性(血藤)
8	変化の具体	一定の力を加え続けると、速さも一定になると考えていたが、速さは増加していた。	一定の力を加え続けると、速さは増加していく	一定の力の作用の継続	力が一定なら加速度速さに比例が存在する心象 ／力と速度の比例関係	力が一定なら加速度変しないという心象の解消／一定の力が作用し続けると速度変性し続けるという理解
9	水平問題	ウ	力を加え続けると、力がはたらき続けるから、速度が一定という心象は、力がはたらいていない／上にもなる。 ／モーションセンサーに実際に動きを、合弁の間隔が広がっていたから。	力がはたらき続ける／力がはたらいていない／合弁の間隔が広がっていたから。	力の作用の継続／合弁間隔の時間変化の可視化／加速のようすの可視化／速度変化の可視化	正しい選択反応を指摘する証拠(バーフィ1995)／等加速度運動と等速直線運動の成立条件の明確化／適用範囲の最終性
10	MF問題		等速であることから、力が加わっていないため、速さは、重力と垂直抗力しかはたらいていない。	力は加わっていない	力が外部から作用しないとき加速度0	適用範囲の最終性
11	MF問題		①では重力より上向きの力の方が大きいため、上向きに動くが、②ではつり合っているため静止する。③では重力の力の方が大きいため下向きに動く。	つり合っている	重力の大きさ一定／上向きの力の減少／最上位における上向きの力と重力の大きさの等号成立	／ベクトルと重力のつり合い／因果スキーマ
第2期	質問	テキスト	＜D＞テキスト中の注目すべき語句	＜D＞テキスト中の語句の言い換え	＜D＞を説明するようなテキスト外の概念	＜D＞テーマ・構成概念 (前後や全体の文脈を考慮して)

後藤からの「力がはたらかない状況に対する慣性の法則の適用」の説明は、Aに於いて【慣性の法則の適用範囲の適用性(血藤)】を否定し、これよりAは、【力が一定なら加速度変しない心象の解消】と【時間のある運動の法則の因果操作の理解】を得た。また実際は、Aに於いて【合弁の運動の可視化による加速度運動の検証】を行う。これよりAは【運動の法則の因果操作の理解】を得た。

これらを通じて、では、水平運動について、では、【力が一定なら加速度変しない心象】を保持していたが、ボストでは、【合弁の運動の可視化による加速度運動の検証】から【時間のある運動の法則の因果操作の理解】の支持が可能となり、【慣性の法則と運動の法則の適用範囲の適用性】は消滅した。

次に、等速直線運動について、では、【力のつり合いによる等速直線運動の説明のためのMF前概念の適用】を消滅した。なお、では、自由落下運動について、【力の大きさの変化によって速度変する心象】を消滅した。

最後に、鉛直投げ上げ運動について、ボストとでは、【力のつり合いによる重力と向きの運動の説明のためのMF前概念の適用】を消滅した。なお、では、自由落下運動について、【力の大きさの変化によって速度変する心象】を消滅した。

「力がはたらかない状況に対する慣性の法則の適用」の説明により、学生は【慣性の法則の適用範囲の適用性(血藤)】を消滅し、【慣性の法則の適用範囲の適用性(血藤)】を消滅し、【力が一定なら加速度変しない心象の解消】と【時間のある運動の法則の因果操作の理解】の支持が可能となり、【慣性の法則と運動の法則の適用範囲の適用性】は消滅した。

次に、等速直線運動について、では、【力のつり合いによる等速直線運動の説明のためのMF前概念の適用】を消滅した。なお、では、自由落下運動について、【力の大きさの変化によって速度変する心象】を消滅した。

最後に、鉛直投げ上げ運動について、ボストとでは、【力のつり合いによる重力と向きの運動の説明のためのMF前概念の適用】を消滅した。なお、では、自由落下運動について、【力の大きさの変化によって速度変する心象】を消滅した。

表4 学生Qの解答に対するSCATによる分析

第1期	質問	質問	テキスト	「Q」テキスト中の注目すべき箇所	「Q」テキスト中の箇所の言い換え	「Q」を説明するようなテキスト外の概念 (前後や全体の文脈を考慮して)	「Q」テーマ・構成概念 (前後や全体の文脈を考慮して)	
1	水平問題	ウ	等加速度運動では、一定の力が加わりつづける運動のことを言うから。	一定の力が加わりつづける運動	一定の作用の継続	法則の因果関係(編2008)/等加速度運動の成立条件の理解	一定の力が作用し続けると速度変化し続けるという理解	
2	鉛直問題	ア	小球には、鉛直下へつねに重力が加わりつづけており、等加速度運動をしているから。	ア	つねに重力が加わりつづける	一定の作用の継続	法則の因果関係/等加速度運動の成立条件の理解	一定の力が作用し続ける→速度変化し続けるという理解/加速度一定の意味の理解
3	MF問題		等速直線運動なので、水平方向はなし。 鉛直方向は、重力と垂直抗力のつりあ。	等速直線運動なので	力ははたらいていないとき等速直線運動	等速直線運動の成立条件の理解	慣性の法則の適用	
	MF問題		力が働いているものから受ける。放物線の場合、ボールは何ものにもふれていないので上記。	働いているものから受ける	接触する物体から受ける力	接触力と場の力の区別	接触力と場の力を区別する思考	
5	加速度的変化の理由		実験：記録タイマーで速さと加速度の関係が視覚的に分かったとき。	速さと加速度の関係/視覚的に分かった	記録タイマーによる速さと加速度の関係の可視化	記録タイマーを用いることによる学習効果	速さと加速度の関係の可視化	
6	加速度的変化についての力と運動の関係		速さが加わると速さが変化する。加速度の変化につながるから。	速さが変化する/加速度の変化	速度変化の増加による加速度の増加	加速度が大きくなるという高校物理における定量的内容の理解	加速度一定と加速度変化の違いの理解	
7	加速度的変化の理由		説明：合弁に力を加えるのではなくエネルギーを加えていると先生がおっしゃったとき。	力を加えているのではなくエネルギーを加えている	力を加えることによる、合弁のエネルギーの供給	力がはたらかないことは理解しているが、力に変わるまじい科学的概念が不在であることに対する不安定感とその解消	近概念に対するまじい科学的概念の不在による不安定感/エネルギーの説明による不安定の解消	
8	加速度的変化の理由		合弁が振動が止まると、合弁には力がはたらかず、慣性の名残が続く。	慣性の名残が続く	合弁の慣性による等速直線運動の継続	力がはたらかないことは理解しているが、力に変わるまじい科学的概念が不在であることに対する不安定感とその解消	近概念に対するまじい科学的概念の不在による不安定感/慣性の説明による不安定の解消	
9	水平問題	ウ	力が加わりつづけることで速さが増加するため。	力が加わりつづける	一定の作用の継続	法則の因果関係/等加速度運動の原因	一定の力が作用し続けると速度変化し続けるという理解	
10	MF問題		等速直線運動は、力がついているときにおこるから。	力がついているとき	力ははたらかない、または、力がついているとき等速直線運動	等速直線運動の成立条件の理解	慣性の法則の適用	
11	MF問題		小球は何にもふれておらず、重力のみがかかっているから。	何にもふれておらず/重力のみ	接触する物体から受ける力	接触力と場の力の区別	接触力と場の力を区別する思考	
第2期	質問	質問	テキスト	「Q」テキスト中の注目すべき箇所	「Q」テキスト中の箇所の言い換え	「Q」を説明するようなテキスト外の概念 (前後や全体の文脈を考慮して)	「Q」テーマ・構成概念 (前後や全体の文脈を考慮して)	
ストーリー・ワン			10は、10に於いて、自由落下運動について、[時間間のある運動の法則の因果関係の実行]されていたが【加速度一定の意味の理解】が、10は、10で、[速度と加速度の関係の可視化]によって、【加速度一定と加速度変化の違いの理解】を得た。 また10は、[近概念に対するまじい科学的概念の不在による不安定感]が、10において、[エネルギーの説明による不安定の解消]と[慣性の説明による不安定の解消]がなされた。					
理論記述			・[時間間のある運動の法則の因果関係の実行]が可能な学生でも、【加速度一定の意味の理解】をすることがある。／実験での[速度と加速度の関係の可視化]によって、【加速度一定と加速度変化の違いの理解】を引き起こす。／[近概念に対するまじい科学的概念の不在による不安定感]は、教室において[エネルギーの説明による不安定の解消]と[慣性の説明による不安定の解消]がなされる。／「水平運動」について、[時間間のある運動の法則の因果関係の実行]をする。／「等速直線運動」について、[慣性の法則の適用]をする。／鉛直投げ上げ運動について、[接触					

[illegible]

表6 学生Sの解答に対するSCATによる分析

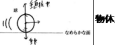

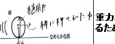

番号	質問	テキスト	①テキスト中の注目すべき箇所	②テキスト中の箇所の言い換え	③本を説明するようなテキスト外への概念	④テーマ・構成概念 (前後や全体の文脈を考慮し口)	
1	水平 問題	ア アのどのからかが正確とどう。静まっている物体が動きはじめるためには、最初に加 速するのどのからかが分らない。		アのどのからか／加速するのどのからか が分らない	一定の力がはたらくと一定の速度で運動 する	速度は加えられた力に比例する	力が一定なら速度変化するといふ心象
2	鉛直 問題	ア 勢いをつけて落とすわけではないので加速しない。	ア	勢い	最初に力を加えると加速する	インベータスの鉄筋(第2011)	力が一定なら速度変化するといふ心象 ／勢いをつけて落とすといふ心象
3	ブレ MMF 問題	 物体が等速直線運動をするので、ある一定の力がはたらき続ける。		等速直線運動をするので／ある一定の力 がはたらき続ける	一定の力がはたらくと一定の速度で運動 する	速度は加えられた力に比例する／MMF 前 概念	力が一定なら速度変化するといふ心象 によるMMF 前概念の適用
4	MMF 問題	 投げられた力と重力の大きさによって運動の向きが変化している。		投げられた力と重力の大きさ／運動の向 き	運動する向きに力がはたらく／運動する 向きにはたらく力は逆向きにはたらく／く り大きい／平なら水平に伝わる力	インベータスの鉄筋／力の折返が運動を決定 する(第2011)／MMF 前概念／因果系 キーマ	力のつり合いによる重力と異なる向きの 運動を説明するためのMMF 前概念の適用
5	加 速 度 に 関 する 変 化 に 関 する 質 問	変化の 場面 実験：前回の実験を回したとき、モーションショットの写真を見とろき。		モーションショットの写真	合力運動の可視化	まじい選択反応を指摘する証拠	合力の運動の可視化による加速運動の 確認
6	変 化 の 具 体 に 関 する 質 問	変化の 具 体 力が加わり続けるのと加速し続けるが、最初に力を加え続けただけでは等速運動をすること。		力が加わり続ける／最初に力を加え続け るとだけ	力の作用の継続時間の違いによる運動 の違い／日常において物体を動かすこと に最初に「グー」と力を入れて速く始める 感じ	運動の法則／慣性の法則	勢いをつけて加速するといふ心象の解 明／一定の力が作用し続けることで速 くし続けるという理解／瞬間的な力の作用 による運動と慣性の法則の未検証／力の 作用時間と加速の因果関係の形成
7	力 と 変 化 の 場 面 に 関 する 質 問	変化の 場面 実験：モーションショットの画像を見て、先生が間隔が大きくなっているとおっしゃっていました。		モーションショットの間隔／といふ心象が 大きくなっている	合力間隔の大きさの時間変換	まじい選択反応を指摘する証拠	合力の運動の可視化による加速運動の 確認
8	変 化 の 具 体 に 関 する 質 問	変化の 具 体 力の加わり方と加速の直ぐが違っていたが、力の大きさによって速さが変わり、力によって運動するといふ心 象があった。		力の加わり方／加速の直ぐ／力の大き さによって速さが変わり	力の大きさの変化による運動の直ぐの 変換	速度は加えられた力に比例する	力の大きさの変化によって速度変化する といふ心象
9	水 平 問 題	ウ 実験と友達との話し合いによって納得したから。		実験／話し合い／納得	実験や話し合いによって自分の考えが変 化した	速度は力と向きと力と向きと力と向きと で生じる	一定の力が作用し続けることで速くし 続けるという理解
10	MMF 問題	 重力と垂直抗力がつりあっているため垂直方向には動きがないが、右向きに押された力があるため 加速。		右向きに押された力があるため	斜から水平に伝わる力	MMF 前概念／加速度は力を与えるよりも 力と向きと力と向きと力と向きとで生 じることで生じる／最初に力を与えた だけでは加速しない	MMF 前概念の保持
11	MMF 問題	 最初は平から投げ上げられた力と重力の大きさが、重力とつり合い、最後は重力の力が大きくな る。		平から投げ上げられた力	平から水平に伝わる力	インベータスの鉄筋(第2011)	力のつり合いによる重力と異なる向きの運動 を説明するためのMMF 前概念の適用
番号	質問	テキスト	①テキスト中の注目すべき箇所	②テキスト中の箇所の言い換え	③本を説明するようなテキスト外への概念	④テーマ・構成概念 (前後や全体の文脈を考慮し口)	
ストーリーライン		これは、ブレについて、①「加速」の場面について、[力が一定なら速度変化するといふ心象]を保持しているが、友達との話し合いによって納得したから。また実験は、Dに示した「時間間隔のある運動の法則の因果関係の理解」を引き起こし、[瞬間的な力の作用による運動と慣性の法則の未検証]のために、[力の作用時間と加速の因果関係の形成]を促している。 ②「変換」の場面について、[力が一定なら速度変化するといふ心象]を保持しているが、友達との話し合いによって納得したから。また実験は、Dに示した「時間間隔のある運動の法則の因果関係の理解」を引き起こし、[瞬間的な力の作用による運動と慣性の法則の未検証]のために、[力の作用時間と加速の因果関係の形成]を促している。 ③「慣性」の場面について、[力が一定なら速度変化するといふ心象]を保持しているが、友達との話し合いによって納得したから。また実験は、Dに示した「時間間隔のある運動の法則の因果関係の理解」を引き起こし、[瞬間的な力の作用による運動と慣性の法則の未検証]のために、[力の作用時間と加速の因果関係の形成]を促している。 ④「慣性」の場面について、[力が一定なら速度変化するといふ心象]を保持しているが、友達との話し合いによって納得したから。また実験は、Dに示した「時間間隔のある運動の法則の因果関係の理解」を引き起こし、[瞬間的な力の作用による運動と慣性の法則の未検証]のために、[力の作用時間と加速の因果関係の形成]を促している。					
理論的記述		「慣性」の場面について、[力が一定なら速度変化するといふ心象]を保持しているが、友達との話し合いによって納得したから。また実験は、Dに示した「時間間隔のある運動の法則の因果関係の理解」を引き起こし、[瞬間的な力の作用による運動と慣性の法則の未検証]のために、[力の作用時間と加速の因果関係の形成]を促している。 ②「変換」の場面について、[力が一定なら速度変化するといふ心象]を保持しているが、友達との話し合いによって納得したから。また実験は、Dに示した「時間間隔のある運動の法則の因果関係の理解」を引き起こし、[瞬間的な力の作用による運動と慣性の法則の未検証]のために、[力の作用時間と加速の因果関係の形成]を促している。 ③「慣性」の場面について、[力が一定なら速度変化するといふ心象]を保持しているが、友達との話し合いによって納得したから。また実験は、Dに示した「時間間隔のある運動の法則の因果関係の理解」を引き起こし、[瞬間的な力の作用による運動と慣性の法則の未検証]のために、[力の作用時間と加速の因果関係の形成]を促している。 ④「慣性」の場面について、[力が一定なら速度変化するといふ心象]を保持しているが、友達との話し合いによって納得したから。また実験は、Dに示した「時間間隔のある運動の法則の因果関係の理解」を引き起こし、[瞬間的な力の作用による運動と慣性の法則の未検証]のために、[力の作用時間と加速の因果関係の形成]を促している。					

表7 学生Tの解答に対するSCATによる分析

第1	質問	テキスト	＜Q＞テキスト中の注目すべき箇所	＜Q＞テキスト中の箇所の言い換え	＜Q＞本を説明するようなテキスト外の概念	＜Q＞テーマ・構成概念（前後や全体の文脈を考慮して）
1	加速の場面について、加速の場面の具体	実験：斜面で車を走らせる実験をしたとき 説明：力が一定に加わり続け、速さも増わり続けるという説明を聞いたとき。	力が一定に加わり続け／速さも増わり続ける	力の作用の継続／加速の継続	法則の因果操作	一定の力が作用し続けると速度変化し続けるという理解
2	加速の場面の具体	今まで公式に登場する文字としての加速度のイメージが強かったが、実際に体験したり目で見て速さが変わっていくとことが分り、より日常生活に近い形で理解できた。	文字としての加速度のイメージ／目で見て速さが変わっていくところが分り	物体が加速していることが一目見てはつきりとなる	正しい置換反応を指摘する証拠	台車の運動の可視化による加速度運動の確信
3	力と運動の関係について、加速の場面	実験：加速度と同様 説明：力を与えて与えるのをやめた瞬間から力ははたらず、物体が動いているのは慣性という余いんがあるという説明	慣性	慣性によって等速直線運動が起こる	右向きに等速直線運動している原因が何か分からなかった／混乱（バリン1965）／正しい情報（バリン1965）	等速直線運動の原因の混乱／慣性の説明による混乱の解消
4	加速の場面の具体	（無記入）				
5	水平運動	一定の力を加え続けられ、小球の運動つまり速さも増わり続けるから。	一定の力を加え続け／小球の運動つまり速さも増わり続ける	力の作用の継続／加速の継続	法則の因果操作	一定の力が作用し続けると速度変化し続けるという理解
6	MS問題	 棒に押された後右向きにはたらく力はないため。	右向きにはたらく力はない	力がはたらかないため等速直線運動する	慣性の法則	慣性の正しい理解
7	MS問題	 斜げられただけから球が上へ上がる時は慣性の力が重力より大きいが、だんだん慣性の力が小さくなるため。	慣性の力	慣性力をと捉える／慣性の力と重力の大きさの比較	MS主題概念／力の折返が運動を決定する／速度に拡大された適用範囲（森谷2012）	力のつり合いによる重力と逆向きの運動を説明するために慣性を力とみなす正解／慣性の速度に拡大された適用
番号	質問	テキスト	＜Q＞テキスト中の注目すべき箇所	＜Q＞テキスト中の箇所の言い換え	＜Q＞本を説明するようなテキスト外の概念	＜Q＞テーマ・構成概念（前後や全体の文脈を考慮して）
ストーリーライン		授業は、Eが有する【等速直線運動の原因の混乱】に対し、【慣性の説明による混乱の解消】を引き起こした。また【時間幅のある運動の法則の因果操作の理解】を持た。さらに実験は、【台車の運動の可視化による加速度運動の確信】を与えた。それらを踏まえた本対では、水平運動において、【時間幅のある運動の法則の因果操作の実行】をした。また、等速直線運動について、【慣性の正しい理解】をしてい一方で、鉛直投げ上げ運動では、【慣性の速度に拡大された適用】と【力のつり合いによる重力と逆向きの運動を説明するために慣性を力とみなす正解】を提示した。				
理論的記述		授業は【慣性の説明による等速直線運動の原因の混乱の解消】を引き起こす。／授業は【時間幅のある運動の法則の因果操作の理解】を引き起こす。／実験は【台車の運動の可視化による加速度運動の確信】を与える。／水平運動について、学生は授業後、【時間幅のある運動の法則の因果操作の実行】をする。／等速直線運動について、学生は授業後、【慣性の正しい理解】をする。／鉛直投げ上げ運動について、学生は授業後、【慣性の速度に拡大された適用】を行い、【力のつり合いによる重力と逆向きの運動を説明するために慣性を力とみなす正解】をする。				

表 8 学生 U の解答に対する SCAT による分析

年	質問	テキスト	①テキスト中の注目すべき語句	②テキスト中の語句の言い換え	③本を説明するようなテキスト外の概念	④テーマ・構成概念 (前後や全体の文脈を考慮して)	
1	理解の深化について	変化する力 説明: 常に加わる力の例として、重力が挙げられたとき、力と加速の関係に改めて気付いた。	常に加わる力の例／改めて気付いた	合致な現象の例示／思い出した	既習事項	自由落下運動の例示による力と加速の関係の整理	
2		変化する力 力が加わり続けるとき、加速は一定であるということを再認識した。	力が加わり続ける／再認識	力と加速の関係／思い出して納得	知識の再体制化(波多野2006)	一定の力が作用し続けると速度変化し続けるという理解	
3		変化する力 実験: 台車の実験をしたとき	台車の実験	一定の力がはたらくと加速することを確認する実験	正しい解釈反乱を指摘する証拠(バーライン1965)	台車の運動の可視化による加速運動の確信	
4		変化する力 力を加え続けると速度が大きくなり続けるとを理性的に理解できた。	力を加え続ける／速度が大きくなり続ける	力の作用の継続／加速の継続	法則の因果操作	一定の力が作用し続けると速度変化し続けるという理解	
5	水平問題	ウ 授業内容(重力)では速度は大きくなり続けたりやうであると考えた。経験から考えるとではないかと考える。	授業内容より／経験から考えると	心象との相違に対する戸惑い	理想化した現象の結果と心象との相違と戸惑い(「意識(バーリン1965)」)と当惑が完全に解消されたわけではない	自由落下運動から水平運動の推論／推論と心象で答えが相違する当惑	
6	ポスト	MF問題 	横方向については等速直線運動をしているためにはたらく力はなく、垂直抗力と重力が釣り合っている。	等速直線運動をしているため	等速直線運動のとき力のはたからない	等速直線運動の成立条件の理解	慣性の法則の適用
7	MF問題		Cは静止している。Dは重力のみにより落下運動している。BはA点での鉛直上向き力が重力より大きいので鉛直上向きに運動している。	鉛直上向き力が重力より大きいので	手から小球に伝わる力／上向きの力と重力の大きさの比較	インベタスの散逸／力の折減が運動を決定する／因果スキーマ	力のつり合いによる重力と逆向きの運動を説明するためのMF 添概念の適用
番号	質問	テキスト	①テキスト中の注目すべき語句	②テキスト中の語句の言い換え	③本を説明するようなテキスト外の概念	④テーマ・構成概念 (前後や全体の文脈を考慮して)	
ストーリーライン		教師からの説明は、Fに対して【自由落下運動の例示による力と加速の関係の再生】を引き起こし、Fは【時間幅のある運動の法則の因果操作の理解】を得た。また実験は、【台車の運動の可視化による加速運動の確信】を生じさせ、【時間幅のある運動の法則の因果操作の意識的な実行】を可能にさせた。これらを踏まえたポストでは、水平運動について、【自由落下運動から水平運動の推論】を行ったものの、【推論と心象で答えが相違する当惑】をしていた。次に、等速直線運動について、【慣性の法則の適用】をしていた。最後に、鉛直投げ上げ運動について、力のつり合いによる重力と逆向きの運動を説明するためのMF 添概念の適用】をなしていた。					
理論記述		授業は【自由落下運動の例示による力と加速の関係の再生】を促す。／自由落下運動の例示による力と加速の関係の再生】をする。と、【時間幅のある運動の法則の因果操作の理解】をする。／実験は【台車の運動の可視化による加速運動の確信】を与える。／実験は【時間幅のある運動の法則の因果操作の意識的な実行】を可能にさせた。／水平運動について、学生は授業後、【自由落下運動から水平運動の推論】が可能だが、【推論と心象で答えが相違する当惑】をする。／等速直線運動について、学生は授業後、【慣性の法則の適用】をする。／鉛直投げ上げ運動について、学生は授業後、力のつり合いによる重力と逆向きの運動を説明するためのMF 添概念の適用】をなす。					