

物体運動についての解釈能力の育成に関する研究

ー 位置・速さ・力や時間変化の意識を促す理科指導法ー

理科教育専攻 犬塚 創太

【要約】

子供が物体の運動を説明する際、運動方向と力を直接関係づけた MIF 素朴概念が確認される。運動と力の概念の関係が扱われる中学校第3学年の学習後でも、この素朴概念は保持されることが多い。物体の運動に関する子供の素朴概念の転換を理科指導で促すことを目的に、本研究ではまず起因を探るため、歴代教科書の「力と運動」に関わる説明テキストや、中学生の学習前後の認識変容を分析した。その結果、運動と力の正しい関係認識には、力や速度の大きさ変化の関係を理解する必要がある、速度変化に焦点を当てた分析的な指導を講じることで、概念転換が促進される可能性が示唆された。その後、速度変化から運動解釈を行う授業の導入可能性を検証するため、小学校第5学年「振り子の運動」でストロボ写真や円弧状の斜面を用いた授業を追加して試行し、効果を探った。学習前に児童が振り子運動で示した誤った解釈の、科学的な認識への学習後の移行が確認できたことから、位置や速さの時間変化についての指導で、運動方向と力を関係づける素朴概念を転換するきっかけを与えて一助とすることを提案した。

1. はじめに

(1) 研究の背景

子供は、科学理論とは異なるが日常でうまく機能する個人的な理論やモデルを保持していることが多い。子供の持つ理論と矛盾する事実が理科の授業で示されても、子供達は自らの理論を擁護しようと、理論の細分化や孤立化を図る傾向がある。物理学で教えられるニュートンの考え方よりも、アリストテレス的な考え方の要素をもった運動理論を子供は典型的に物理学の授業へ持ち込んでくる¹⁾。Clement は、以下の性質を持つ MIF 素朴概念の存在を指摘している²⁾。

- ①運動物体には運動方向の力が働いている。
- ②一定速度の運動にはその向きの力が必要である。
- ③運動方向の力は、運動が続く間に残っている。

国内でも指摘されるが、運動方向の力の大小は多くの場合、速度の大小と比例して考えられると報告している³⁾。さらに、義務教育段階で学齢が高まるほど、力が速度に依存する素朴概念を形成する割合が高くなると示唆している⁴⁾。日常で子供達が目にする運動中の物体は運動方向に力が働き続けない限り、摩擦により減速や静止をするため、このような素朴概念が形成されるのは自然なことである。力と運動について学習する以前から徐々に生活の中で形成されていく理論であり、子供は

その理論に信念持って固執するため、転換させることは甚だ難しい。

義務教育段階で平成 20 年改訂版学習指導要領における運動や力に関わる理科学習単元は、まず、小学校で第3学年「風やゴムの働き」、第5学年「振り子の運動」、第6学年「てこの規則性」がある。これらが育成する力や運動といった概念は、児童の観察事象の個別解釈内に潜在するだけで、これらが公に概念定義化されて議論に用いられることはない。そして、中学校で力概念を扱うのは第1学年の「力と圧力」、運動概念を扱うのは第3学年「運動の規則性」からである。「運動の規則性」の学習内容である「力と運動」では、斜面上の等加速度運動や自由落下、水平面状の等速運動における力と速さの関係を扱うため、力の大きさと速さとが比例していると解釈している生徒にとって、教科書内容と自身の解釈の矛盾が生じる可能性を持つ。この学習後に、斜面と水平面を運動する物体に働く力を正しく記述できたのは5%未満で、速度依存の回答を示した者は約40%と、学習以前の学年での回答率約35%から上昇したという報告もある⁵⁾。つまり、理科学習で力と運動に関する科学的な知識に触れた後も、自身の解釈を保持し続ける傾向が高い。この状況は、物理基礎において運動の法則($ma=F$)を学習した後も同様に見られる。

(2) 研究の目的

力や運動の素朴概念が学年をおって形成され、かつ、概念転換が困難であるという状況を鑑み、本研究は物体の運動に関する子供の素朴概念の転換を理科指導で促すことを目的とする。この目的を達成するため、①運動の関わる学習内容に目を向けて MIF 素朴概念の起因を探り、理科授業の課題を明らかにした上で、②学習内容や指導方法の改善による運動解釈の進展を図る理科授業の可能性について試行実践を通じて検討する。

2. 歴代教科書「力と運動」説明テキストの比較

(1) 調査の概要

「力と運動」において、運動と力の2つの概念の関係性を初めて学習する。教科書は学習者や授業者に学習すべき科学用語や意味構造を与えることから、概念を理解するのに必要な事項がテキストに示されないなどの不備によっては学習者が素朴概念を維持し続ける可能性が否定できない。生徒に文章で提示される概念関係の状況を確認するため、教科書の説明テキストの分析を行った。現行教科書（採択率上位の D、T、K 社冊子）での状況の顕著な傾向を見出すため、比較対象に昭和 33 年改訂版以降の各学習指導要領に対応する検定済教科書を加えて、分析を行うこととした。

分析方法としては、説明テキストに該当する定義文やまとめの文を抜粋し、その中から科学用語を抽出した上で、科学用語間の関係性を概念地図により図式化し、教科書間で比較して共通点と差異点を明らかにした。特に、生徒が単純な大小関係を捉えてしまう「力」と「速さ」の関係性に着目して、素朴概念を維持させる要因について考察する。

(2) 結果と考察

「力」と「速さ」の間にあるラベルやリンクの用語の比較から、素朴概念を維持する要因の1つとして、「加速度」の有無が考えられた。平成元年改訂学習指導要領の内容削減のため、これ以降3社全ての教科書で「運動の法則」及び「加速度」が削除された。それ以前は、速さの時間変化として加速度を定義し、加速度と力が比例すると説明していたものが、改訂以降は「速さの変化」という表現を用いて力と運動の関係を説明するものへ変質した。図1のように、K 社の 1968 年検定済教科書では

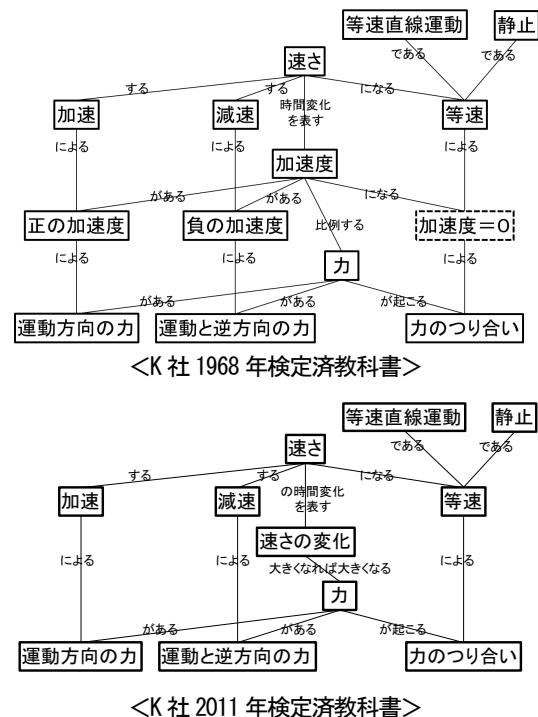


図1 K 社 1968 年・2011 年検定済教科書の概念地図

加・減速を正・負の加速度により説明した。また、慣性の法則を説明後、力が働かなければ加速度は 0 であるとの記述で等速直線運動も加速度によって説明したように、加速度系だけでなく静止や等速直線運動など慣性系の運動でも加速度による一貫した説明ができた。一方、2011 年検定済教科書では、加速度系は「速さの変化」を用いて運動を説明するようになり、慣性系での「速さ」は一定で変化を考慮する必要がないことから、生徒が「力」と「速さ」に意図しない関係を加える余地ができる。

MIF 素朴概念の保持者は運動を説明する際、「力」に「速さ」を直接関係づけるため、等速直線運動では一定の力が働くと考え、加速する運動では力が増加すると考える。「加速度」や「運動方程式」を扱うことで「力」に「速さ」だけでなく「加速度」も関係づけられるため、等速直線運動の説明において、「速さ」と関係し一定の力が働いているという考えと、「加速度」と関係し力は働いていないという考えの二つに違和感を覚えることになり得る。しかし、「加速度」でなく「速さの変化」を扱う教科書では、「速さ」と「速さの変化」の概念分化が難しく、生徒は「速さ」の大小にのみ着目し、「速さの変化」ではなく「速さ」を「力」に関係づけてしまう可

能性がある。よって、明確に「速さの変化」を概念の一つとして「速さ」と区別して扱うことで、素朴概念の転換に寄与できる可能性があると考ええる。

3. 中学生の力と速度の概念関係の実態調査

(1) 調査の概要

現行教科書で「速さの変化」と「速さ」の区別が力と運動の関係性の理解に必要とされたが、生徒は力と速度を直接関係づけていることが多く、教科書記述の通りに力と運動の関係を説明する可能性は高くない。生徒が構築している概念間の関係の実態を、力・速度・運動という用語（概念）を用いた彼らの記述文から分析して把握する調査を企画して実施した。実施時期は2016年5～6月で、対象は愛知県内の公立中学校の第3学年2学級の生徒65名である。「力と運動」の学習前後で質問紙法を用いて回答を求め、生徒の保持する概念の関係性の変化を分析する。質問紙には、「力」と「運動」、または「力」と「速度」の2つの用語を与えて両者の関係を表す説明を記述させる問題Ⅰと、斜面や水平面等で運動する物体に働く力を矢印で記入させ、理由を記述させる問題Ⅱを設けた。

(2) 結果と考察

問題Ⅰの回答とその学習前後の変容について、図2は「力」と「運動」の関係、図3は「力」と「速度」の関係を示す。アルファベット項目は凡例に示す関係構造を有しており、どちらも項目A～Cが正答項目となっている。

「運動」との関係に着目すると、学習前から項目E「力が大きくなると運動も大きくなる」が最も多

く、学習後さらに増加している。また、学習前の項目Eから学習後に正答項目A～Cに遷移した生徒は見られない。「速度」との関係に着目した時も「運動」と同様に、項目D「力が大きくなると速度も大きくなる」と大きさを直接関係付ける誤答が多く、学習後に増加している。生徒は「力と運動」の学習において「速度」と「速度の変化」を区別せずに学習し、「力」と「速度」とを単純に関係付けている可能性がある。しかし、「速度」においてはこの直接的な関係から正答項目への遷移が確認できた。運動概念を速度概念を用いた表現で見直し、力概念との関係を捉え直すことにより変容を促すことができる可能性がある。

問題Ⅱの力の矢印の記入では、学習前の半数近くの回答は速度に依存していた(図4)。斜面と水平面の問いで正答した生徒は他の問いの状況でも正答し、説明文では力と速度を単純な大小関係で記述していなかった。力と運動の説明文の記述で等速直線運動により正しく関係付けできた生徒でも、水平面上を等速運動する物体に力を示す矢印を記述させると誤った回答をするなど、いまだ限定的な理解に留まるものが少なくないと考えられる。

素朴概念の転換には力と速度変化の関係を理解する必要があるが、中学校段階で重視している生徒は少ない。運動を見る視点として速度変化へ焦点を当てた分析的な指導を講じることで、素朴概念の転換が促進されることが考えられる。

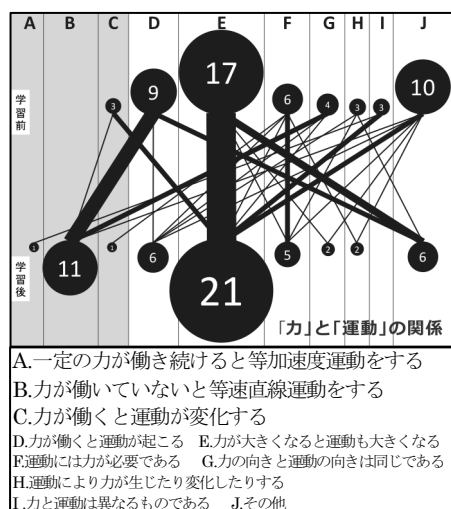


図2 力と運動の関係の分類と学習前後の遷移

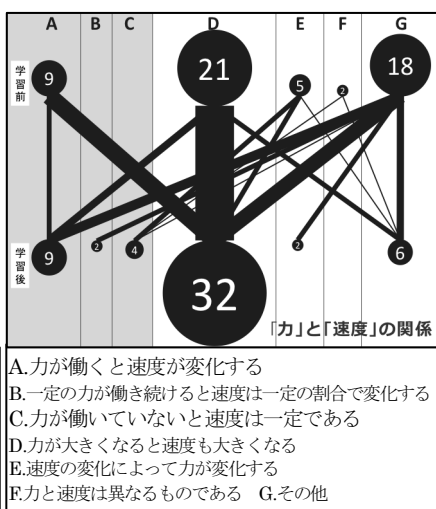


図3 力と速度の関係の分類と学習前後の遷移



図4 問題Ⅱの回答状況

4. 運動解釈能力を育む「振り子の運動」授業実践 (1) 調査の概要

「力と運動」の学習前にある小学校第5学年の「振り子の運動」は、振り子の周期を調べると同時に加速、減速に目を向けることで、速さ変化を扱うことが可能な单元である。「速さ」概念を用いた速さ変化を意識づけする授業によって運動の解釈能力を育てておくことで、中学校以降の物体運動の学習において力との関係構築に有用な影響を及ぼす可能性がある。この視点から振り子運動を解釈するための授業を愛知県内の公立小学校の第5学年1学級において計画、実践し、児童における運動解釈の変容を明らかにすることで、その後の学習へ寄与できる事項と問題点を明らかにする。

(2) 速度変化を焦点化するための授業計画

振り子の運動を見る視点として、1往復する時間だけでなく、振り子の速さに着目するための方策が必要である。また、中学校への意識付けを考えると、小学校での糸とおもりからなる振り子の運動と中学校での斜面上の運動とを関係付けるための方策が必要と考えられる。R. D. ナイトの運動の教授方法を参考に、以下の方策を考えた⁶⁾。

速さに着目させる方策として、今回はストロボ写真を用いる。一定時間ごとの物体の位置を示し、視覚的に移動距離の大小を判断できるストロボ写真を分析することで振り子運動の速度変化の様子を示す。暗室でストロボスコープを連続発光させ、ボールや人などの運動に照射することで、一定時間ごとの物体の位置をしていることを伝える。その後、ストロボ写真撮影用のタブレットを用いて、走る子供を撮ったストロボ写真は子供の間隔が広く、歩く子供を撮った写真は間隔が狭いことを確認する。一定時間内での移動距離が長いと速く、短いと遅いということを伝える。その後、体育館の2階から吊るした大きな振り子に合わせて動き、速さの変化を体感させたり、その動きをストロボ写真で撮影しておもりの位置の時間変化を観察させたりする。それにより、振り子のおもりは手を放した後、下へ向かうにつれ徐々に加速し、最下点で最も速くなり、上へ行くにつれ徐々に減速していくという、振り子運動における速さ変化について学習する。

児童がこの学習を、糸とおもりを用いた単振り子に限った速さ変化と捉える可能性があるため、斜面上の運動を関係付ける方策として、円弧状の斜面上を転がる球の運動を取り扱う。作成した円弧状斜面は図5の通りであり、斜面上を転がる球は長さ70cmの振り子のおもりと同じ軌跡を描く。

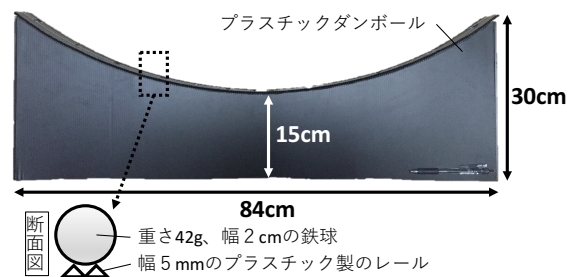


図5 作成した円弧状斜面

速さ変化が振り子の運動と円弧状斜面での運動で共通していることの確認のため、児童は、振り子のおもりと斜面を転がる球のストロボ写真の上に透明アクリル板を置き、おもりの位置に丸シールを貼る(図6)。各時点の運動物体の位置を記録すると、シールの位置が全て重なるため、円形斜面上の球は振り子のおもりと同様の速さ変化をしていると理解できると考えられる。

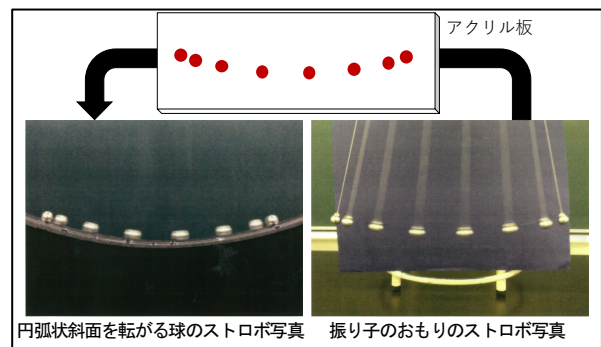


図6 ストロボ写真を使った位置変化の確認

これらの速さ概念や斜面上の運動が関わる内容を、D社の小学校理科教科書では「振り子の運動」単元の発展的な内容として掲載している。この学習ではそれに則り、条件を制御して調べる能力の育成や周期を変える要因の同定を单元前半で行い、本実践を発展的な内容として单元後半に組み入れることとした(表1)。授業実践以外の部分は、使用するD社教科書の内容記載に準じた通常通りの

学習過程によって指導を行った。

表 1 授業実践の単元内の位置づけ

体験的活動 第1・2時	振り子で遊びながら往復時間が変わる条件を考える。
定量的実験 第3～5時	おもりの重さ・振れ幅・振り子の長さの条件を制御し、1往復する時間を計測する。
まとめ 第6時	振り子の長さが長いほど1往復する時間も長くなるとまとめる。
発展 第7～9時	ストロボ写真の見方を学び、振り子運動の速度変化を学習する。

(3) 分析方法

速さの理解状況を調べるアンケートは図7のように、振り子のおもりまたは斜面を転がる球の軌跡上に7つの位置を示し、最も速いと考えられる球の位置を選択肢で回答させた。

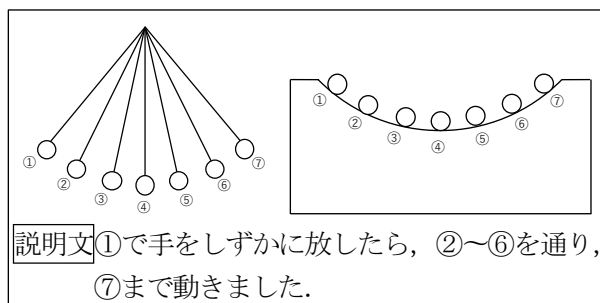


図7 質問紙で使用した図と説明

このアンケートを用いて、事前・事後・把持の3つのテストを行った。発展内容に入る事前のテストでは振り子を、終えた事後のテストでは円形斜面を、2週間経過後の把持テストでは両方を用いた。さらに、把持テストでは、①～⑦における速さ変化を文章で記述させる問いと、円弧状斜面に似せて2つの異なる傾斜面と水平面を組み合わせた合成斜面での球の運動における最も速い位置を答える問いを設け、事前・事後テストの回答傾向の確認と直線斜面への考え方適応を調査した。

(4) 結果と考察

テスト3回のアンケート回答の正誤をクロス集計し、Fisherの直接確率法で検定を行った結果、事前×事後、事後×把持(合成斜面)では有意差が認められず、事後×把持(振り子)、事後×把持(円弧状斜面)は有意差が認められた。学習後は正答率が上がるが、合成斜面の問いにまで速さ変化の考えを正しく適用できた児童は少ないことが分かる。

振り子運動する物体は最下点まで加速し、最大速度に達した後、減速する。典型的な誤答として、最大速度を加速区間に想定しながら区間境界の最下点に定めない回答が多かった。そのため、児童の回答を次の3つのカテゴリに分類した。

- A: 加速区間に最大速度があり、区間境界にないと考えている (図7における①～③の位置)
 B: 加速区間に最大速度があり、区間境界が最大と考えている (図7における④の位置)
 C: 加速区間に最大速度があると考えていない (図7における⑤～⑦の位置またはその他の回答)

分析結果の具体的な例として、事前(振り子)、事後(円弧状斜面)、把持(円弧状斜面)テストにおける児童の回答の遷移を図8に示す。速さ変化を扱う学習前では、カテゴリAに分類される回答が多く見られる。また、カテゴリCに属する児童のうち、振り子運動を等速だと答えた児童が3人見られた。通常の振り子の学習後、多くの児童は、振り子運動が速さ変化する運動だと考えているが、加速区間の境界点に最大速度を想定していない。速さ変化の学習直後は、円弧状斜面の問いにおいて加速区間の境界点で最大速度となる回答(カテゴリB)が多くなる。しかし、把持テストではカテゴリAへの振り戻しがやや見られる。児童は、速さ変化の学習によって区間境界に最大速度を想定するが、その考えは保持されにくいという一面を持つ。

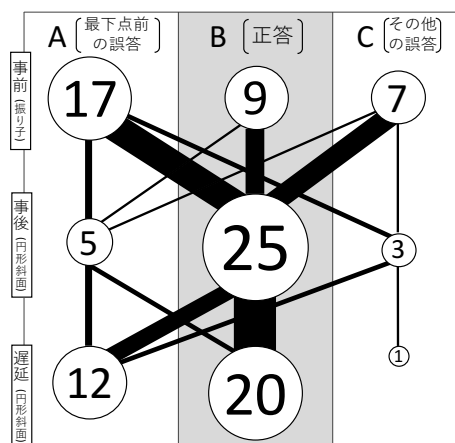


図8 児童の考えの遷移

さらに、把持テストにおいて、児童が振り子と円弧状斜面、合成斜面間で一貫した思考をしているか確認するため、振り子×円弧状斜面、振り子×合成斜面、円弧状斜面×合成斜面で回答の正誤

をクロス集計し、Fisher の直接確率法で検定を行った結果、振り子×円弧状斜面と円弧状斜面×合成斜面に有意差が認められ、振り子×合成斜面は認められなかった。また、事後テストの回答カテゴリ（3 区分）や、事前・事後テストの正誤状況組合せ（3 区分）により振り分けた集団毎で把持テスト三題の正答問題数の平均値を求めて F 検定を行った結果、ともに有意差が認められた。児童は振り子と円弧状の斜面上の運動に関して、速さ変化の学習から最大速度についての誤った解釈を正すことができたが、合成斜面での運動の最大速度の判断に同じ考えを適用できるわけではない。合成斜面について、児童は、「速さの変化」学習前のように最下点以前の加速区間に最大速度を想定することが多い。直線や円弧といった球の軌跡の違いが児童の解釈や理解を隔てているため、中学校での「力と運動」の学習までに、斜面と円弧状斜面の共通点や差異点を取り上げるなどの手立てが必要と考えられる。

また、把持テストでの児童の速さ変化についての説明記述から、「速い」と「速くなる」の概念的意味が未分化である可能性が示唆された。運動に関わる概念の多くは交換可能であるかのように扱われるという報告がある⁷⁾。ある児童は最大速度を④の位置と回答したが、説明では「①から④までは速い。④から⑦まではおそい。」と「速くなる」の意味で「速い」と記述している。振り子運動の速さ変化の説明において有意味な回答をした 25 人のうち 7 人(約 3 割)にこの傾向が見られた。ある時間での速さと速さ変化との区別の困難性は、意識的に授業で取り扱っていく必要がある。

振り子の運動の発展的な授業実践により、児童に速さの変化を意識させ、加速現象における最大速度の誤った解釈を正すことができた。振り子における運動解釈を傾斜面の運動に適応するに至る児童が少ないことや、速さと速さ変化の説明区別に困難性が見られることを改善する手立てを講じることで、運動解釈をより育成し、「力と運動」の素朴概念を転換する一助となることが期待できる。

5. おわりに

本実践の成果として、加速区間と減速区間の境界で最大速度に達するという理解が学習後の児童

に確認できた。中 3「力学的エネルギーの保存」の学習では振り子運動が例示される場合が多く、小学校段階での最大速度の位置の解釈を正しておくことは、運動エネルギーの正しい理解に必要となるだろう。また、本研究で提案した発展的な授業の実践後に傾斜面上の運動を扱うことで、斜面を下降する物体においても各時点での速さが徐々に増大するという共通点へ気づくことができ、中学校理科での学習への足がかりとなることが期待できると考える。さらに、本研究の授業実践では「速さ変化」を意識化させることはできたが、「速さ」と「速さ変化」の分離はやや困難であったことが、児童の説明文から確認された。授業場面においても、「速くなる」物体のストロボ写真における各時点での位置を考えさせた際、各時点での物体の位置間隔がそれぞれ広いのか、次第に広がっていくのか判断するのに困難が見られた。運動概念に関する用語の使用や運動物体の図的表現に対してより精緻化を行っていくことで、児童生徒の学習支援の点から見て洗練された授業の考案が行えるようにすることを今後の課題としたい。

【引用・参考文献】

- 1) ショーン. M. グリン & ラッセル. H. イェーニィ & ブルース. K. ブリットン (武村重和監訳)『理科学習の心理学—子供の味方と考え方をどう変容させるか—』, 東洋館出版, 1993.
- 2) J. Clement「Students' preconceptions in introductory mechanics」, 『American Journal of Physics』 Vol.50, No.1, 1982, pp.66-71.
- 3) 相澤則行・蛭田幸太郎「力と運動についての初学者の直感的信念」, 『物理教育』, Vol.36, No.1, 1988, pp.38-41.
- 4) 加藤伸明・定本嘉郎・川村康文「『運動中の物体にはたらく力』の認識に関する実態調査—MIF 素朴概念が高学年ほど増加していくことについて—」, 『科学教育研究』, Vol.36, No.1, 2012, pp.53-60.
- 5) 上掲書 4) p.56.
- 6) R. D. ナイト(並木雅俊監訳)『物理を教える—物理教育研究と実践に基づいたアプローチ—』, 丸善出版, 2017, pp.9-38.
- 7) L. H. T. ウェスト & A. L. パインズ (進藤公夫監訳)『認知構造と概念転換』, 東洋館出版, 1994, pp.83-115.