

京都教育大学

2020 年度 修士論文

p-prims 理論を用いた概念理解を支援する教育的介入の検討

—質量概念の形成を目指して—

教科教育専攻 理科教育専修

渡邊里佳

指導教員 谷口 和成

指導教員 梶原 裕二

目次

第1章	諸言	3
第2章	これまでの概念研究と p-prims 理論.....	6
2.1	概念研究に関する諸理論	6
2.1.1	素朴概念(native conception)について	6
2.1.2	従来の概念研究とその課題	6
2.2	p-prims 理論.....	7
2.2.1	p-prim とは.....	7
2.2.2	p-prim のマッピング	9
2.2.3	p-prim の発達と洗練	10
2.2.4	教育的示唆.....	12
2.3	p-prim に関連する教育研究.....	13
2.3.1	p-prim と相性がよいとされる教育研究	13
2.3.2	日本での p-prim 研究	14
第3章	各分野で活性化する p-prim の把握	15
3.1	力学分野で活性化する p-prims	15
3.1.1	題材について	15
3.1.2	方法.....	16
3.1.3	評価方法.....	17
3.1.4	授業中の発話記録と p-prim による分析	18
3.1.5	アンケート結果.....	24
3.1.6	小括.....	26
3.2	電気分野で活性化する p-prims	28
3.2.1	題材について	28
3.2.2	方法.....	28
3.2.3	評価方法.....	32
3.2.4	事前・事後アンケートの結果と考察.....	33
3.2.5	授業中の発話記録およびワークシートの記述	34
3.2.6	小括.....	41
3.3	第3章のまとめ.....	42
第4章	p-prim を活用した授業の開発	44
4.1	p-prim 発達の課題	44
4.1.1	p-prim の発達と未分化概念の分化	44
4.1.2	「質量」概念の分化と仮説の立案	44
4.2	p-prim 発達のための授業開発.....	45

4.2.1	題材の選定	45
4.2.2	中学校学習指導要領における「斜面を下る運動」の取り扱い.....	46
4.2.3	中学校および高校における課題	48
4.2.4	授業開発.....	49
4.3	評価方法①	55
4.3.1	事前・事後調査の内容.....	55
4.3.2	アンケート実施のタイミングについて	58
4.4	評価方法②	59
4.4.1	介入の仕方についての検討	59
4.4.2	追加調査の内容.....	59
第5章	授業実践の結果と考察	61
5.1	授業による介入効果.....	61
5.1.1	事前調査の結果と考察.....	61
5.1.2	事後調査の結果と考察.....	77
5.1.3	小括.....	88
5.2	授業展開の違いによる介入効果の比較	89
5.2.1	授業展開と実際の授業の様子.....	89
5.2.2	事前調査の分析結果	91
5.2.3	事後調査の分析結果	92
5.2.4	追加調査の分析結果	97
5.2.5	考察.....	101
5.2.6	新たな基準での評価	103
5.3	慣性質量的な思考をした生徒の特徴.....	107
5.3.1	事前調査の結果と考察.....	107
5.3.2	事後調査の結果と考察.....	108
5.3.3	追加調査の結果と考察.....	109
5.4	第5章のまとめ.....	110
第6章	総合考察	112
6.1	各章の総括	112
6.2	p-prim の視点からのさらなる考察.....	114
6.3	p-prims 理論を用いた教育的介入の検討.....	115
6.4	質量概念の形成を促す授業の提案.....	116
第7章	結言	118
参考資料		119
謝辞		122
付録		123

第1章 諸言

近年の科学技術の発展は著しく、ビックデータや人工知能（AI）を活用した技術革新が起こるなど、社会の構造が大きく変化している。このような予測困難な社会では、変化を前向きに受け止め、社会や人生を人間ならではの感性をはたらかせてより豊かなものにしていくことが期待されている。また、個々人の創造力と行動力次第で子どもの頃に夢描いたことが何でも実現できるようなこれからの社会では、私たちは自他を尊重し、一人一人がもつ個性を最大限に引き出す必要がある。そのため、学校教育では知識の詰め込み的教育から社会で通用する「資質・能力」を育成する教育への転換が図られた。学習指導要領 [1]において、この「資質・能力」は、「何を理解しているか、何ができるか（知識・技能）」、「理解していること・できることをどう使うか（思考力・判断力・表現力等）」、「どのように社会・世界と関わり、より良い人生を送るか（学びに向かう力・人間性等）」の3つの柱で整理された。そして、これらを育成するために“主体的・対話的で深い学び”の実現を目指した授業改善が必要であることが示された。

“主体的・対話的で深い学び”は子どもの主体性を重要視しており、子どもの個性を伸ばすためのよい方法であると考えられる。2017年に実施された「高校生の心と体の健康に関する意識調査—日本・米国・中国・韓国の比較—」 [2]では、日本人の自己肯定感の低さが指摘されている。これは、協調性を重んじ謙虚さが美德とされる日本人の文化的な特徴なのかもしれないが、このように自分を肯定できずに個性を押し殺してしまうと個々人が持つ能力が十分に発揮できない。そのため、“主体的・対話的で深い学び”には、子どもを肯定し個性を最大限に伸ばせるような支援として機能することも期待される。

平成28年の中央審議会答申 [3]では、“主体的・対話的で深い学び”について、『質の高い深い学びを目指す中で、教員には、指導方法を工夫して必要な知識・技能を教授しながら、それに加えて、子供たちの思考を深めるために発言を促したり、気付いていない視点を提示したりするなど、学びに必要な指導の在り方を追究し、必要な学習環境を積極的に設定していくことが求められる。そうした中で、着実な習得の学習が展開されてこそ、主体的・能動的な活用・探究の学習を展開することができると考えられる。』

と記しており、“主体的・対話的で深い学び”の実現には教員のはたらきかけが重要な役割を果たすことを示した。しかし、多くの教員がこのはたらきかけ方に困難を示す。主体的・対話的で深い学びの実現のためにはどのような問いを設定すればよいか、授業をどうファシリテートしていくかなど、様々な課題が浮かび上がる。そして、このような子どもを主体として展開される授業では、教員が子どもの発言の意味や意図を理解できない、または理解したつもりになっていることがよく起こり、本当に子どもが主体となっている授業を成立させるのは難しい。ここで、子どもの発言の意味や意図を教員が理解できれば、“主体的・対

話的で深い学び”の実現に一步近づくことができると考えられる。子どもが行う推論や連想の筋道がわかると、それぞれの子どもが抱えている本質的な問題が何なのかを探る手掛かりとなる。そのため、教員は子どもの思考について理解を深める必要がある。

学習者の思考に関する教育研究としては、物理教育では素朴概念が扱われることが多い。学習指導要領（平成 30 年告示）解説理科編 [1]物理 内容の取扱いにおいても、『物理現象を扱う際には、生徒が経験的にもっている素朴な概念に留意して指導をすることが大切である。そのためには、学習課題に関する生徒の考えを引き出し、物理学の基本となる原理・法則との整合性を議論させ、他の生徒や教師との関わりを通して、自らの考えの正しかった部分、誤っていた部分等について振り返らせることが重要である。』と示されており、学習者の思考を重視した授業デザインや学習支援が求められている。これに該当する例として、日本では板倉らが実施している仮説実験授業 [4] [5] [6]が挙げられる。仮説実験授業とは、多くの子どもが持っている素朴概念などを活用して、予想、討論、実験をベースとして展開される授業である。仮説実験授業では、誰もが実施できるような授業書が作成されており、教員がこの授業書通りに進めればほとんどの生徒はこの授業の流れにそって科学的な概念を獲得するようになっている。しかし、仮説実験授業では、授業書で想定されていない学習者の思考を扱うことができないという課題がある。このため、仮説実験授業で扱われる素朴概念などよりも生徒の思考の多様性を扱うことができる新たな枠組みが必要となる。そこで、本研究では、学習者の思考の多様性を扱える新たな枠組みとして期待されている p-prims 理論 [7]に着目し、それに基づいて学習者の思考を捉えなおし、新たな視点から教授方法や学習支援の提案を行うこととする。

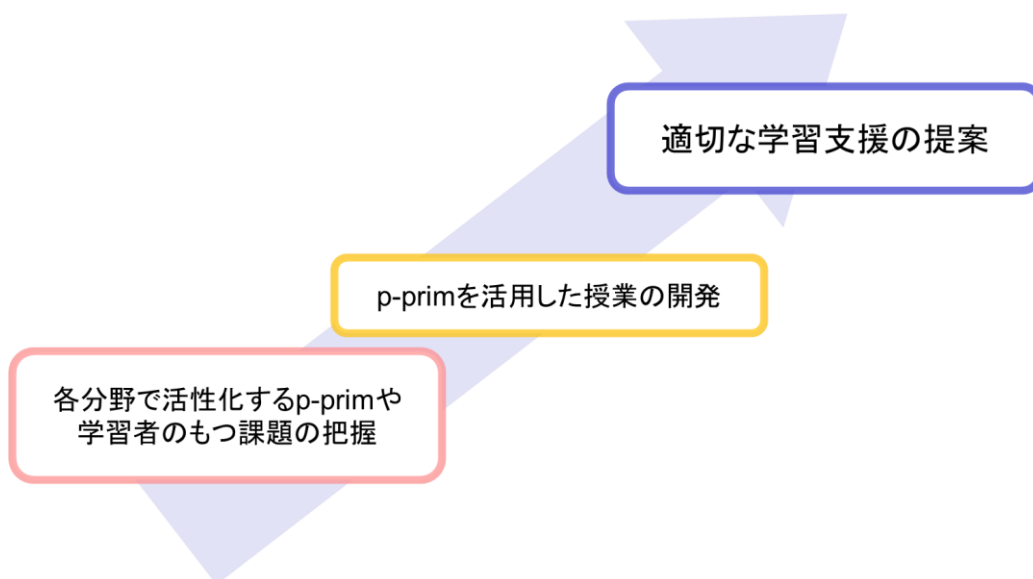
p-prims 理論とは、diSessa が学習者の思考を p-prim(phenomenological primitives)と呼ばれる直観的メカニズム感覚を用いて解釈し、それを日常的な感覚と科学的思考をつなぐものとして位置づけた理論である。p-prims 理論は、“整合説”を否定した Toulmin の流れをくむ“断片説”の立場をとる。ここで、整合説と断片説について述べる。整合説とは、Kuhn [8]のパラダイム論の影響を受け、学習者が持っている素朴概念は一貫性・体系性を持っているとする立場である。そのため、新たな概念を獲得するためには、学習者のもつ素朴概念を否定して新たな概念に置き換えなければならない。一方、断片説とは、学習者がもつ素朴概念は一貫性・体系性を持たずに局所的であるとする立場である。素朴概念は断片的な知識の集合であり、この断片的な知識は新たな概念獲得のための原材料であるとしている。そして、それらを再編成することによって新たな概念を形成するとされている。そのため、断片説の立場をとる p-prims 理論は、知識構造の多様性を扱える枠組みとして期待されている。また、学習者の思考の断片的な要素を「科学的概念を獲得するための材料」とするため、学習者の思考を肯定しながら展開する授業への足掛かりとなると考えられる。よって、本研究ではこの p-prims 理論を用いて学習者の思考について理解を深め、適切な教授方法や学習支援について検討することとする。

本論文の章立てについて概観する。第 2 章では、これまでの素朴概念に基づく教授モデル

の課題について述べ、その課題に対処できる可能性のある新たな枠組みである p-prims 理論とそれに関連した教育研究について述べる。第 3 章では、力学分野や電気分野における学習者の思考を p-prims 理論に基づいて捉えなおし、p-prims による分析ならではの特徴を明らかにする。ここでは、p-prims 理論を用いると素朴概念に該当しない思考を分析できることがわかり、学習者の多様な思考を分析できることが明らかになった。また、学習者の思考の中から、特定の物理量（質量）への気づきを促すなど科学的推論を手助けする p-prim の存在が明らかになり、学習者の思考を肯定しながら展開する授業の可能性が示唆された。

第 4 章では、第 3 章で明らかとなった p-prims の特徴をもとに、p-prim を活用した授業を開発し、第 5 章においてその授業効果について分析した。授業内容としては、「質量」という変数への気づきが難しいとされる「落下運動」を学習する際、意図的に「質量概念への気づきを促す p-prim」を活性化させ、生徒の直観を肯定しながら質量概念の獲得を目指す展開とした。授業の効果については、授業前後で行う質問紙によって調査を行い、通常授業を行った他校と比較して評価を行った。また、適切な介入方法について検討するために、授業中に意図的に「質量概念への気づきを促す p-prim」を活性化させるタイミングを変えた 2 パターンの授業実践を行い、授業効果を比較した。

第 6 章では、第 3 章から第 5 章までの内容について、総合的な考察を行った。



第2章 これまでの概念研究と p-prims 理論

本章では、本研究の基盤となる p-prims 理論の概要について述べる。具体的には、科学史における学習者の概念研究とその課題について述べ、課題の解決策として期待されている p-prims 理論とそれに関連する教育実践の例について述べる。

2.1 概念研究に関する諸理論

2.1.1 素朴概念(native conception)について

私達は物理を学習する前から、物体の運動に関して何らかの規則性があることを認識している。例えば、キャッチボールにおいてはボールの落下地点をなんとなく予測することができ、カーブした道を運転する際には体が外側に投げ出される感覚を認識している。これらの個別の運動現象に関する記憶は、経験を積む中でまとめられていき、共通の性質をもつ概念が形成される。これが素朴概念(native conception)となるのである。例として、John Clement [9]や Roger Osborn [10]によって報告された“運動は力と同じ意味を持つ (Motion implies force)”という素朴概念について述べる。これは、運動している物体には必ず力がはたらいており、その物体を動かし続けるためにはそれに力を加え続けなければならないという思考である。この思考は、水平面を等速直線運動している物体にはたらく合力がゼロであることと相反するだけでなく、他の現象を考える際も思考の妨げとなるとされている。素朴概念は力学分野に限らず他の分野にも存在する。例えば、Osborn らは電気分野でにおいて“電流は回路で消費される”という素朴概念が存在することを報告した。このように、素朴概念は現象に対して誤った推論を与えうる。そのためか、教育学研究において素朴概念は、誤概念(misconception)や代替概念(alternative conception)、先入観(preconception)などと呼ばれている。

しかし、これらの概念は誤った推論を与えるだけでなく、科学的な推論の理解を促すともされている。そこで本研究では、正しいまたは間違っているという意味を含まず、ニュートラルなニュアンスを与える素朴概念という表現を用いることとする。

2.1.2 従来の概念研究とその課題

従来の認知科学研究では、学習者がある行動を説明するにはそれに対応した知識構造を必要とし、行動と知識構造が 1 対 1 に対応づけられることが多かった。このため、知識構造の粒度はかなり大きかった [11]。科学の文脈では、行動＝現象と置き換えると、現象とそれを説明する知識構造が 1 対 1 に対応している。多くの概念研究では素朴概念を学習者の知識構造であるとしており、現象と素朴概念が 1 対 1 に対応しているとして解釈されていた。

しかし実際には、学習者の思考は多様であり、現象と素朴概念は 1 対 1 に対応しているとは言い難い。私の体験をもとに例を挙げると、「振り子の周期は何によって決まるか。」と

いう問いに対し、学習者は「坂道を自転車で下る運動」や「野球のバットを振る動作」、「水の入ったバケツを回す動作」などの様々な実体験を根拠に「振り子の運動」を説明しようとする。これより、同じ現象について考える際に想起するシチュエーションは人それぞれ異なり、人それぞれの見方・考え方をしていると考えられる。つまり、1つの現象に対応する知識構造は多数であり、この知識構造について従来の素朴概念研究で説明することは難しい。このため、このような知識構造の多様性を扱えるような枠組みが必要となる。そこで、diSessa が提唱する p-prims 理論 [7]に着目する。

2.2 p-prims 理論

diSessa [7] [12]は、人々が力学的な因果で捉えられる状況を考える際に用いる直観的メカニズム感覚である p-prim を提唱し、それらが学校物理を理解する際にどのように役立ち発達するかについて述べた。ここでは、そもそも p-prim とは何なのか、その性質や発達の仕方について説明する。

2.2.1 p-prim とは

p-prim とは、現象論的プリミティブ (phenomenological primitives) の略称である。経験された現実の表面的な解釈に起源をもつことから“現象論的”であり、認知メカニズムの最小の記憶要素であることから“プリミティブ”である。個々の p-prim の内容は単純であり、保有している人にとっては直観的でそれ以上説明ができないものである。もっと簡潔に説明するならば、p-prim とは「そうなるもんだ」としか説明できない感覚的な直観である。学習者は日常生活での経験や観察を通して数百～数千の p-prim を形成しているといわれている。私たちがある現象を見ると、その刺激からその状況に応じた p-prim が活性化される。その状況に応じて活性化された p-prim やそれらの関連付けにより、人それぞれの概念が想起されるという構造である。単振動に関連する p-prim である *Heavier implies slower* と *Stiffer means faster* の活性化を例に説明する。前者は、「重い物はゆっくり動く」ことを意味する p-prim であり、後者は「硬いものは速く動く」ことを意味する p-prim である。例えば、厚さが異なるいくつかのミュージックベルがあったとする。なぜ厚さによって音の高さが異なるのかという質問をすると、ベルの“厚さ”から直感的に“重さ”を連想する人もいれば、“硬さ”を連想する人もいる。“重さ”を連想する人は、*Heavier implies slower* を活性化させるため、重い物すなわち厚みのあるベルの方がゆっくりと振動して低い音が出ると考える。一方、“硬さ”を連想する人は、*Stiffer means faster* を活性化させるため、硬い物すなわち厚みのあるベルの方が速く振動して高い音が出ると考える。このように、同じ状況でも活性化される p-prim は人それぞれである。

状況に対して活性化する p-prim は一つではなく、活性化した複数の p-prim を組み合わせることによって概念が想起する仕組みとなっている。つまり、p-prim は概念などよりも粒度が小さく、それらが組み合わさることによって概念のようなものとして機能するとされている。diSessa らはこの概念のようなものを coordination class (以下、CC) [13]と呼ん

であり、CC を概念の代替物として扱っている。

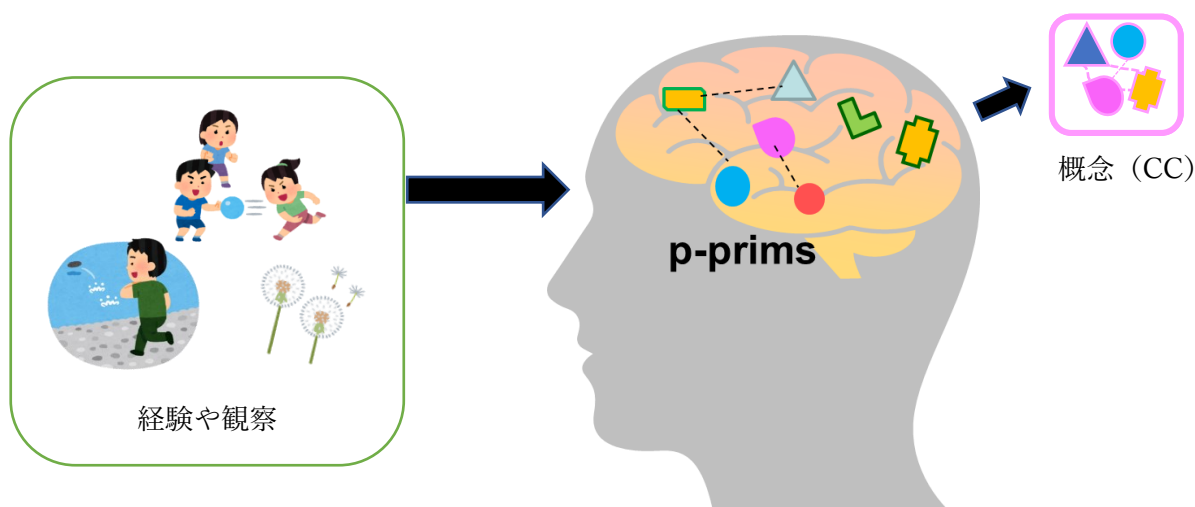


図 1.2.1-1 p-prim の活性化と p-prim によるネットワーク

p-prim によるネットワークの具体例として、ボールの投げ上げの解釈 [14]について述べる。図 1.2.1-2 の吹き出し内に示すのが、各 p-prim である。ボールの投げ上げという現象を p-prim によって解釈すると、「まず手からボールへ“動かすものとしての力 (*force as a mover*)”が加わってボールは上昇する。そしてボールには“動かし続ける力 (*Continuous force*)”が上向きにはたらくから上昇を続ける。“次第にその力は弱まり (*Dying away*)”，重力とそれが“つり合う (*Balancing*)”と頂点で停止。その後、重力が上向きの力に“打ち勝つ (*Overcoming*)”ために落下する。」となる。このように、学習者では1つの現象に対して複数の p-prim が活性化し、それらを組み合わせて現象を理解していると解釈できる。

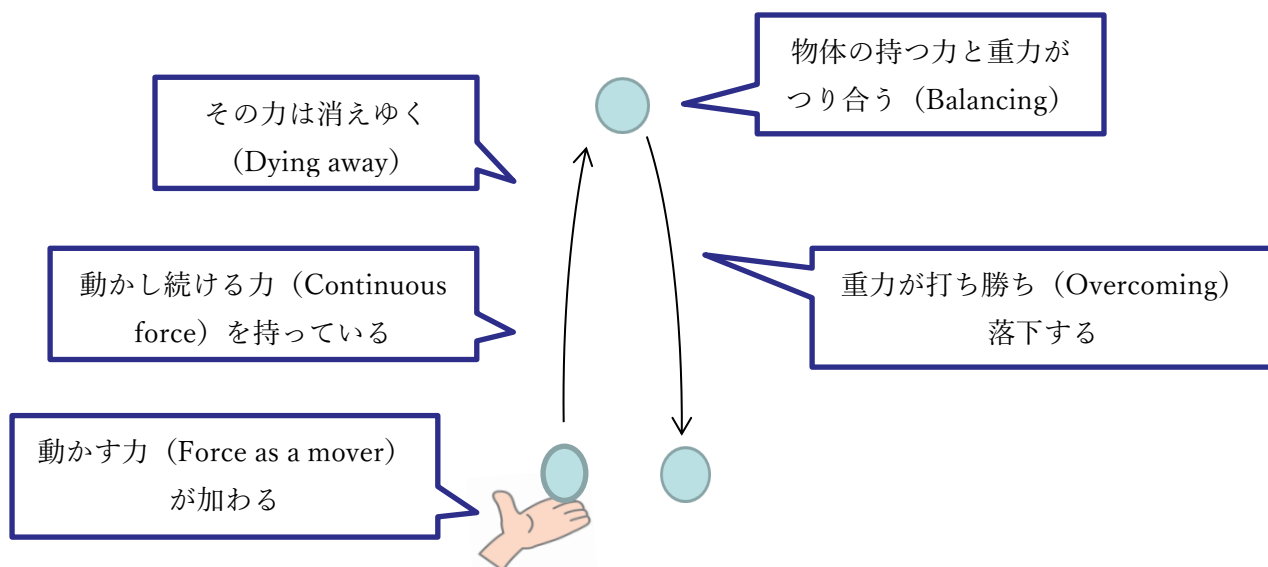


図 1.2.1-2 p-prim を組み合わせて現象を解釈した例

図 1.2.1-2 では、複数の p-prim を組み合わせて誤った思考をしているが、p-prim それ自体が誤っているというわけではない。p-prim それ自体が正しいまたは誤っているのではなく、活性化した p-prim が状況に対して適切か不適切かということしかない。誤概念の多くは、p-prim を適用範囲を超えて使用したために形成されたものとして解釈できる。また、現象に対して適切な説明を与えることができるかは、p-prim の組み合わせ方によっても決まる。

2.2.2 p-prim のマッピング

上に示したように、とても単純な p-prim もあるが、「A が大きくなれば B も大きくなる」といった量的な因果関係についての推論を行う p-prim もある。代表的なものが、Ohm の p-prim である。Ohm の p-prim は、作用（努力）が大きければそれによって得られる成果も大きく、干渉や抵抗するものが大きければ成果は小さくなることを意味する。そして、この両効果は補償し合うこともできる。作用として電圧、抵抗として電気抵抗、成果として電流を当てはめた場合、電流の大きさ I は電圧の大きさ V に比例し抵抗の大きさ R に反比例する ($I=V/R$) といったオームの法則と同じ量的関係にあることから、Ohm の p-prim と呼ばれる。Ohm の p-prim は電気分野だけでなく様々な文脈で使われる。例えば、作用として力 F 、抵抗として質量 m 、成果として加速度 a を当てはめると、運動方程式 ($a=F/m$) の理解につながる量的関係を与える。このように、適切な物理量をマッピングすることができれば、適切に現象を説明することができる。（ここで、各物理量を作用、抵抗、成果などに当てはめることをマッピングという。）しかし、不適切なマッピングをしてしまうと不適切な説明を与えてしまう。例えば、作用として力、抵抗として質量、成果として速さをマッピングすると、「速さは力に比例し質量に反比例する」といった誤った解釈を与えてしまう。すなわち、現象を見た際に適切な p-prim が活性化するだけでなく、適切なマッピングが行われなければ現象を正しく説明することはできない。

Ohm のような推論に用いる p-prim は、思考操作を行う際の鍵となる点で、ピアジェが提唱するシェマ（科学的な思考操作）[15]と類似する。Redish [16]は、ピアジェにおける「補償のシェマ」は“Ohm の p-prim”に相当すると解釈した。「補償のシェマ」とは、伴って変わる 2 つの量の比が一定であるという関係を用いて思考する能力である。例えば、図 2.2.2 の容器 A から容器 B へ水を移し替えた際に水の量が変化しないことを説明するためには、底面積と高さという 2 つの量の比が一定であるという思考操作を必要とする。

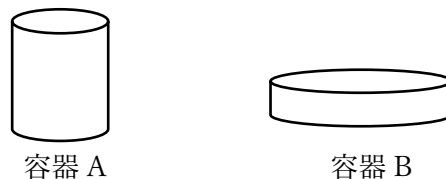


図 2.2.2 水が入った 2 種類の容器

これを Ohm の p-prim と照らし合わせて考える。Ohm の p-prim において、成果 I はそれを増加させる作用 V と減少させる抵抗 R によって決まる。容器 A から B へ水を移し替える場合、水の量を成果 I とすると、それを増加させる作用として底面積が広くなること、減少させる抵抗として高さが低くなるのが当てはまる。そのため、「底面積は広がったが、高さは低くなったので、水の量は変わらない」という思考操作ができる。また、Ohm の p-prim は「比例」や「反比例」のシェマ（思考操作）も含まれると考えられる。このように、p-prim の中には、ピアジェが言うシェマ（思考操作）に類似したものも存在する。

以上より p-prim の特徴をまとめると、p-prim には単純な p-prim だけでなく思考操作を与える p-prim がある。そして重要なのが、p-prim にはそれ自体が正しいまたは誤っているということではなく、その状況で活性化するのが適切か不適切か、また適切な組み合わせ方やマッピングの仕方をしているかである。

2.2.3 p-prim の発達と洗練

diSessa [7] [12] は、p-prim によるネットワークを“メカニズム感覚”とも呼んでおり、メカニズム感覚の発達と洗練によって、学習者の科学的理解が深まるとしている。メカニズム感覚の発達と洗練は、主に「優先度の変化」として記述される。発達には新たな p-prim の獲得も含まれるが、すでに存在している p-prim のネットワークを再構成することが主として取り上げられる。

p-prim の優先度には、「呼び出しの優先度」と「信頼性の優先度」がある。まず、呼び出しの優先度とは、現象を見たときの各 p-prim の呼び出しやすさであり、文脈に依存する。初学者が文脈によって様々な推論をするのは、この呼び出しの優先度が影響している。次に、信頼性の優先度とは、呼び出された p-prim を使うか決定するものである。ある現象を見ることによって呼び出された p-prim が推論において適切であるかを判断することや、次にまたその p-prim を使うかを判断する際は信頼性の優先度を用いる。信頼性の優先度が高くなれば、p-prim によるネットワークは組織化されていき、現象に対して安定して同じ p-prim を適用できるようになる。このように、これら 2 つの優先度によって推論の仕方がコントロールされている。

次に、初学者と熟達者がもつ p-prim の違いについて説明する。素朴な考えをするような初学者は、構造化されていない p-prim のコレクションを持っている。それらは広範な現象に対して様々な p-prim が「そういうものだ」といった浅い説明として機能する。例えば、落下した物体がはね返る」という現象を見た際、初学者では**跳ね返る (Bouncing)** という p-prim が活性化する。これは、大きな物体や不動の物体と衝突した物体は跳ね返ることを意味する p-prim である。跳ね返るという現象そのものが p-prim となっており、「そういうものだ」としか説明することができない。他の例として、「テーブルの上に本が置いてある」という現象を見た際、初学者では**支える (Supporting)** という p-prim が活性化する。これは、安定的な下の物体（テーブル）はその上に触れあっている他の物体（本）をその場に留

めておくことを意味する p-prim である。この p-prim は、テーブルが本に対して力を加えているなどといった思考は含まず、テーブルが本を支えている現象そのものを自明のこととして捉えている。一方、物理学者などの熟達者がもつ p-prim は数が少なく、機能的な符号へと再利用・統合されている。つまり、熟達者は少数の p-prim が安定して活性化し、それを幅広い文脈に適用している。例えば、「落下した物体がはね返る」という現象を見た際、熟達者は**弾力性 (Springiness)** の p-prim が活性化する。これは、物体は圧迫的な力によって凹み、凹みの大きさは力に比例することを意味する p-prim である。ニュートン力学的な説明にはこの p-prim が含まれており、これを用いてあらゆる現象を説明することができる。例えば、先ほど例に示した「テーブルの上に本が置いてある」という現象に対しても熟達者は**弾力性 (Springiness)** を適用する。そのため本はテーブルに対して力を加えているという思考をもたらし、ニュートン力学的な説明の一部となる。p-prim の発達と洗練における最高レベルの到達水準では、物理法則だけがそれ以上には還元されない説明の役割を担うのだが、熟達者でも毎回基本法則にさかのぼって考えるわけではなく、その人なりの現象論を構成している。例えば、光、スペクトル、ラジオ波などはすべてマクスウェル方程式で説明できるが、熟達者ですらそれらを独立に理解している。

これらのことを踏まえて、p-prim の発達の仕方について述べる。上述のように、p-prim によるネットワークの発達は各 p-prim の優先度の変化によって記述される。優先度の変化を考える際には、その p-prim のはたらきにどのような変化が生じるかに着目する必要がある。初学者のもつ p-prim は現象自体が p-prim となっており、「そういうものだ」という浅い説明しか与えない。しかし、学習によって現象の詳細な分析ができるようになると、活性化する p-prim の優先度が変化し、より上位の p-prim が活性化するようになる。そして、それらの p-prim は徐々にクラスターをなし、組織化されて分散符号化される。ここで分散符号化とは、直観的な p-prim を、熟達者の知識の一部（物理法則そのものもしくはその一部）として再利用することを意味する。すなわち、p-prim が発達・洗練するには、より少数の基本的な p-prim を、より確信をもって適用できるように、知識システムに深みと広がりを与えなければならない。熟達者の思考における p-prim の役割としては、法則それ自体を知ることの基盤になるここ（分散符号化）と、適切な状況で教えられた考え方を引き出すこと、日常的な状況の複雑さと一般的物理法則のギャップを埋める正統な現象論として機能することが挙げられる。

p-prim の発達と洗練すなわちメカニズム感覚の育成は、概念発達に直接的に役立つばかりでなく、概念が発達する上での出発点を与えて安定性をもたらす背景になる可能性があるとしてされている。つまり、学習者が問題状況のモデリングを手早くまた科学的に行う能力を徐々に洗練させるのにも役立つとされている。

2.2.4 教育的示唆

アインシュタインは科学に対して、「科学とは日々の思考を洗練させることに他ならない」という見方を示している。しかし実際には、多くの学習者にとって学校で習う科学は机上の空論にとどまり、日常体験とつながっていない。ここで、日常体験から得られる直観によって形成される p-prim は、日常体験と科学とを連続して考えるための 1 つの手段として期待できる。diSessa [7] [12] は、熟達者が適用しているような専門性の中になんとか多くの素朴な知識が含まれると主張している。つまり、素朴な知識は正統的な科学理解にとって中心的な寄与をする。学習者がもっともらしく感じてなじみ深い状況と関連付けた概念を構築するといったメカニズム感覚の発達・洗練を行うことで、学習者は自分で誤りを見つけ出し、拡張していくことがかなり容易になる。このことから、p-prim は日常体験と科学とを結ぶ架け橋的な役割を果たすことが示唆される。これまでの概念研究では、学習者の素朴な知識を誤概念としてみる立場が多かった。この立場では素朴な知識の存在は認識されているものの、一般的にそれらが熟達者の思考においてどのような役割を果たすかについては言及されていない。これより、p-prim のように正しい直観に焦点をあてて分析することは、これまでの誤概念研究には無い新しい視点である。

また、多くの概念変容研究では、学習者が抱える問題を少数の誤概念に局在化し、それらを個別に取り上げて修正すればよいとしていた（例えば McCloskey, 1983b [17]）。これらの教授方法については、日本でも高い授業効果が報告されているが、中には概念変容しない学習者もいることが課題として挙げられている [18]。その原因の 1 つとして、その学習者は誤概念に該当しない思考をしていることが考えられる。この課題について、p-prim による解釈では、学習者の思考を誤概念よりも細かい粒度で解釈できるので誤概念に該当しない思考を扱うことができたり、1 つの思考に対して複数の解釈ができたりするなど、学習者の思考の多様性を扱うことができる。また、これらの概念変容研究では、正しい概念を獲得するには、既存の概念を否定し、まったく別物の新たな概念と置き換えなければならない。そのため、学習者はこれまでの自分の思考をすべて否定しなければならず、学習者の動機づけを低下させてしまうことが懸念される。これに対して p-prim を用いた教育的介入では、学習者の思考をすべては否定せずに部分的に肯定して概念を再編成することができる。日本で p-prim について研究している山田ら [19] も、このような p-prim を使った授業のメリットについて言及しており、学習者の思考の中から科学的推論との共通要素を見出して価値づけながら再構築することができることを評価している。

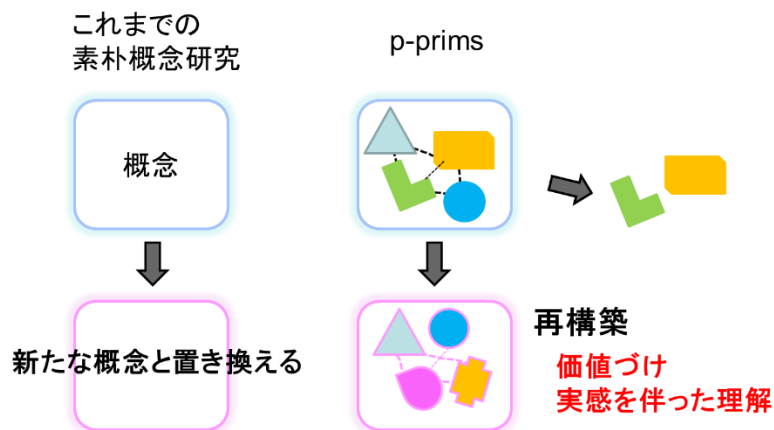


図 2.2.4 p-prim を使った教授方法の特徴

ただし、初学者の素朴なメカニズム感覚を熟達者の感覚に変えるには、しばしば広範かつ調整された変化が必要である。このため、メカニズム感覚の発達と洗練には長い時間がかかるとされている。メカニズム感覚を発達・洗練させるためには、あらゆる文脈で継続的なはたらきかけを行う必要があると考えられる。

2.3 p-prim に関連する教育研究

diSessa は p-prim を提唱し、学習者の知識構造を新たな枠組みで捉えなおした。しかし、p-prim を用いた教育実践はいまだに少ない。ここで、p-prim と同じく断片説の立場をとる教育研究など p-prim と相性がよいとされる研究について述べる。また、日本での p-prim 研究の現状についても述べる。

2.3.1 p-prim と相性がよいとされる教育研究

Minstrell は diSessa と同様に断片説を支持し、概念という言葉では概念変化を説明できないという立場からファセットを導入した。ファセット [20]とは、彼が学生たちの物理現象に対する推論を彼が整理したものである。彼も学習者の素朴な考えを教授のための資源と考え、ファセットを使った教育的な介入を行った。そして、それをベンチマークレッスン [21]として位置づけている。(ベンチマークとは登山の際に基準となる標高のように、未知の現象などについて考える際の基準点となるものを指す。そしてベンチマークレッスンとは、学習者の思考の基準点すなわち拠り所となる授業のことである。) ベンチマークレッスンの目的は、学生が学習の本質や物理学を広く理解するための参考となる“経験”をすることである。学生はあらゆる現象を考える際、その経験を基準として思考を展開する。

Elby らが開発した Open Source Tutorial (OST) [22]も、学習者の直観に焦点を当てている点で p-prim と類似する部分があると考えられる。特に、学習者の思考をすべて否定するのではなく部分的に肯定しながら直観を洗練させ、概念変容を促すという点で p-prim と

相性がよいと考えられる。例として、自動車とトラックの衝突を考える授業を紹介する。学習者は、トラックよりも自動車の方がより速いスピードで遠くへ飛ばされる現象を見て「衝突によって受ける力は自動車の方が大きい」と解釈したとする。OST ではその解釈をすべて否定するのではなく、「衝突後の加速度は自動車の方が大きい」と捉えなおさせ、衝突によって受ける力を加速度へと洗練させる。

Clement が開発した“橋渡し方略” [23] も、学習者の直観を学習理解のための材料として捉えている点で p-prims 理論と相性が良いと考えられる。橋渡し方略では、学習者がもつ直観を出発点（アンカー）とし、獲得させたい科学的な概念（ターゲット）への補完的なステップとして橋渡し概念を用いて概念変容を促す。例えば、机の上に本が静止している状況に対して理解する際、「机は本を上向きに押す」ことを獲得させたいとする。橋渡し方略では、出発点として「縮んだばねは手を上向きに押す」、橋渡し概念として「たゆむ板は本を上向きに押す」を設定し、学習者の直観からスタートして段階的に科学的な概念の獲得を狙う。Clement は、学校教員が垂直抗力の説明によく用いる「自分の手が本を支える」よりも、「ばねが本を押す」の方がよい出発点となることを報告している [24]。

2.3.2 日本での p-prim 研究

日本での p-prim 研究について、いくつか例を挙げる。村山 [11] は、教育心理学の視点から p-prim を含む断片的知識論についてまとめている。物理教育の視点からは、新田 [25] が p-prims 理論などいくつかの概念研究を参考に、力学分野でみられる素朴概念についてまとめている。また、山田 [19] は、電気分野での p-prim を中心とした基礎研究を行い、詳細な分析結果を報告している。山本 [26] は、教員養成系大学 1 年生を対象として、手回し発電機の手応えについて考察する場面で性化する p-prim について分析を行った。そして、学生には *Ohm* やもっと頑張る (*Working harder*) といった p-prim が活性化したことを報告し、マッピング方法などについてもより詳細な分析を行っている。また、山本らは p-prim を用いた概念変容方略の開発と実践も試みている。“橋渡し方略”や“Open source Tutorials (OST)”の知見を取り入れながら授業を開発し、授業実践を行い、授業中の学生の対話やワークシートの記述などから学生の思考が変容する過程について分析している。実践の評価としては、対象者 24 名中 8 名に概念変容が見られたことから、学習者の概念変容に一定の効果があると結論づけていた。そして、実践の長所としては、橋渡し推論にほとんどの学生が共感でき、論点が整理されたことを挙げている。しかし、課題として、OST のように直観を洗練させることができなかった学生がいたことを挙げており、p-prim の基礎的なデータ収集と他の文脈や他のアプローチでの概念変容研究の必要性についても述べている。

日本での研究は他にもいくつかあるが、ほとんどが学習者の思考を p-prim の枠組みで捉えなおすことに留まる基礎研究 [27] [28] ばかりで、p-prim が教育実践に活用された例はほとんどない。

第3章 各分野で活性化する p-prim の把握

本章では、学習者の思考を重視した授業デザインや学習支援を行うための足掛かりとして、力学分野や電気分野における学習者の思考を p-prim 理論に基づいて捉えなおす。力学分野では「振り子の運動」、電気分野では「電気回路」を題材として扱う。

3.1 力学分野で活性化する p-prim

3.1.1 題材について

diSessa [7]は、主として力学を学習する際の思考について p-prim の枠組みを適用させて分析を行った。その中の一つに、振り子の糸を切った際のおもりの挙動に関する学習者の思考分析がある。学習者の思考は、次の A～C の 3 通りであった。(A) 振り子は揺れている方向へ飛んでいく。(B) おもりが真下に落ちる。(C) おもりは張力の反対方向に飛ばされる。

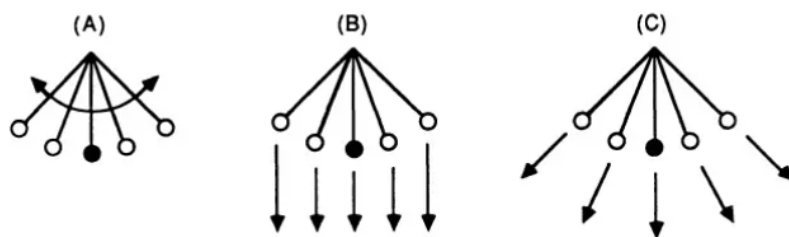


FIGURE 7 (A) The string is cut on a pendulum at various stages of its swing. What happens? (B) The pendulum falls down. (C) The pendulum falls “away.”

図 3.1.1 振り子の糸を切った際のおもりの挙動についての思考

diSessa はこれを、動かすものとしての力 (*Force as a mover*) や物は離すと落ちる (*Released objects fall*) などの p-prim によって解釈した。Hammer [29]は、振り子の減衰に関する学生の議論について誤概念と p-prim の両方の観点から分析した。彼は、重力と摩擦力に関する学生の発言について p-prim による解釈を行った。これらの研究より、振り子の運動は学習者の多様な思考を引き出す現象であることが伺える。このため本研究では、振り子の運動について、まだ分析されていない振り子の等時性などに関する p-prim について分析することとする。

また、『振り子の運動』ではいくつかの素朴概念 [30]が報告されており、学習者が困難を示しやすい单元である。よって、学習者が示す困難にどのような p-prim が関与しているか調べることは、適切な学習支援の仕方を探る手掛かりになると考えられる。

さらに、『振り子の運動』の学習において周期に関与する変数を調べるためには、振り子の長さ、おもりの質量・体積・形、振れ幅など多くの変数を制御しなければならない。このため、SRTs (科学的推論問題) [31]の TaskIIIにおいて、変数制御のシエマを評価する課題

として設定されている。SRTs とは、CASE を開発したシェイヤーらロンドン大学チェルシーカレッジ研究チームによって開発された、一斉授業の中で大勢の子どもたちの発達段階を評価できる課題である。第 2 章でも述べたように、p-prim の中にはシエマに類似するものも存在する。このため、シエマが鍵となる振り子の運動を題材として扱うことで、シエマと p-prim の関係性についての知見が得られる可能性があると考ええる。

3.1.2 方法

国立大学附属小学校 5 年生 36 名を対象とし、『ふりこの運動』を学習する際に活性化する p-prims について調査を行う。小学校学習指導要領解説（理科編）[32]における「振り子の運動」の学習のねらいは、『児童が、振り子が 1 往復する時間に着目して、おもりの重さや振り子の長さなどの条件を制御しながら、振り子の運動の規則性を調べる活動を通して、それらについての理解を図り、観察、実験などに関する技能を身に付けるとともに、主に予想や仮説を基に、解決の方法を発想する力や主体的に問題解決しようとする態度を育成すること』である。一般的な教科書の展開としては、「ふりが 1 往復する時間は何によって決まるか。」という課題に対して、おもりの重さ、ふりこの長さ、振れ幅をそれぞれ変えた実験を行い、その結果について考察する展開となっている。一般的な展開では、考察の時間は長く設定されているものの、予想の時間は短く、子どもが学習前の自分の考えを認識する機会がほとんどない。学習前の自身の考えを認識することは、学習前後の自身の変容に対するメタ認知をするのに必要であるのにも関わらず、一般的には「予想」の段階は軽視されがちである。ここで本実践では、この単元の最初の 1 時間を子どもが予想する（自らの予想について討論する）時間とし、子どもが学習前の自身の思考を認識できるようになることを目指す。そして研究としては、引き出した学習者の素朴な考えについて p-prim の観点から分析する。授業展開としては、「ふりこの 1 往復する時間は何によって決まるか」という課題に対して、個人で予想し、班や全体で意見交流するという展開とした。詳しい展開は表 3.1.2 に示す。ただし、子どもの思考を支援するため、各班に 1 つずつ実際の振り子を用意した。振り子に触って考えてもよいが、ストップウォッチなど時間が計れるものは準備しなかった。

表 3.1.2 授業展開

導入	演示実験により、周期の異なる 2 つのふりが 10 往復する時間を計る。ここでは、ふりこによって 1 往復する時間が違うことに気づかせる。
展開①	ふりこによって 1 往復する時間が異なるの理由について個人で予想し、ワークシートに記入する。
展開②	班で「予想」について討論する。
展開③	全員で「予想」について討論する。

3.1.3 評価方法

評価方法としては、授業中の全体討論と班活動の様子を記録し、その際使用したワークシートの記述や児童の発言をもとに p-prim の観点をふまえながら考察する。

さらに、児童の振り子の運動に対する考え方の変容を見るため、授業前後と単元後に選択式のアンケート調査を行うこととする。

表 3.1.3 アンケート実施のタイミング

事前アンケート
本実践：「振り子の運動」について予想
事後アンケート
通常授業：「振り子の運動」の実験と考察
単元後アンケート

アンケート内容は、ふりこの運動と文脈を変えて、日常生活でふりこの運動と関係のあるブランコの間を設定した。各問ではブランコに乗った人の体重、ブランコの長さ、揺らし方について質問し、おもりの重さ、ふりこの長さ、ふれはばが周期とどう関係すると考えているかについて調査した。実際の問いを以下に示す。

★ 正しいと思うものに○をつけてください。

1. 体重の軽い人と重い人がブランコに乗ったとき、1 往復する時間が短いのはどちらか。
(軽い人 ・ 重い人 ・ 同じ)
2. 短いブランコと長いブランコでは、1 往復する時間が短いのはどちらか。
(短いブランコ ・ 長いブランコ ・ 同じ)
3. ブランコを大きく揺らしたときと小さく揺らしたときでは、1 往復する時間が短いのはどちらか。
(大きく揺らしたとき ・ 小さく揺らしたとき ・ 同じ)

図 3.1.3 事前・事後アンケートの内容

3.1.4 授業中の発話記録と p-prim による分析

ここでは、授業中の児童の発言や授業で使用したワークシートの記述をもとに、振り子の運動について考える際にどのような p-prim が活性化するかについて分析する。「ふりがが1往復する時間は何によって決まるか。」という発問に対し、児童は主にふりの長さ、振れ幅、おもりの重さが関係すると予想した。それぞれの予想を一つずつ紹介し、分析した結果について以下に示す。

はじめに、ふりの長さに関する生徒の発言について分析する。ワークシートの記述や授業中の発言では、「短いふりの方が移動距離が短いから速い」と答える児童が多くみられた。ある生徒のワークシートの記述を図 3.1.4-1 に示す。

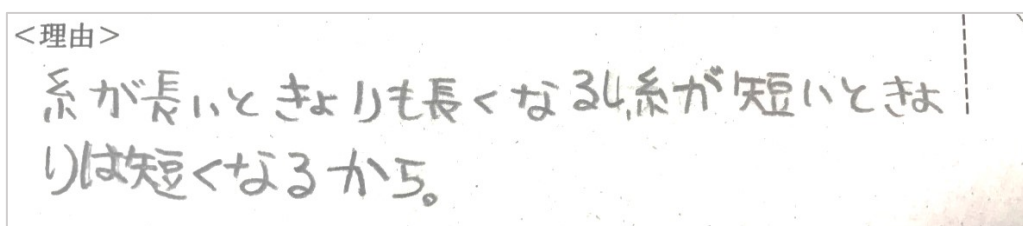


図 3.1.4-1 振り子の長さに関するワークシートの記述

これを p-prim の視点から分析すると、**短い距離は短い時間でいける (Less distance covered means less time)** という距離に依存した p-prim が活性化したと考えられる。ふりの長さが周期に関係すること自体は正しいが、「移動距離が短いから周期も短い」という思考は科学的に正しくはない。このため、この p-prim の活性化がこの状況で適切であると判断することは難しい。

また、上の思考に量的な因果関係についての思考を加えて、「ふりの長さが2倍になれば1往復する時間も2倍になる」という意見もあった。これを p-prim によって分析すると、**オーム (Ohm) ($I=V/R$)** が活性化し、作用 V として振り子の長さを、成果 I として1往復する時間を当てはめたと解釈できる。無意識のうちに比例を意識するのは、この p-prim が関係すると考えられる。これより、第2章でも述べたような、比例のシェマ(思考操作)と Ohm の p-prim が類似している例が示せた。

次に、振れ幅に関する生徒の思考について分析する。振れ幅についても、振り子の長さについての予想と同様に「振れ幅が変わると移動距離が変わる」という発言が多かった。一例として、ある生徒のワークシートの記述を図 3.1.4-2 に示す。

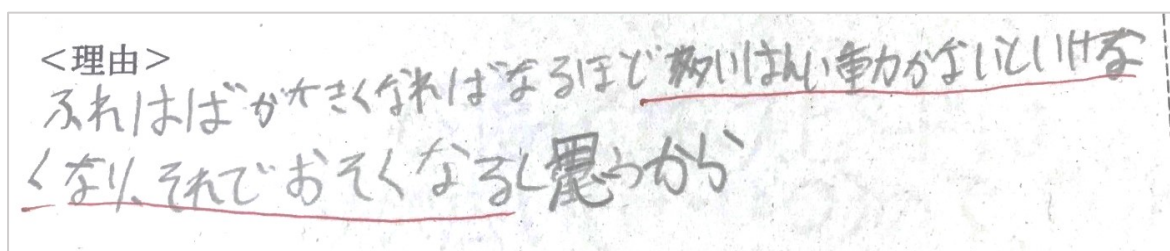


図 3.1.4-2 振れ幅に関するワークシートの記述

この生徒は、「ふれはばが大きくなるほど、多い範囲動かないといけなくなり、それでおそくなると思う。」と記述しており、ふれはばが小さいと移動する距離が短いから1往復する時間も短いと考えている。これを p-prim の観点から分析すると、振り子の長さについて考えるときと同様に、**短い距離は短い時間でいける (Less distance covered means less time)** が活性化したと解釈できる。

ふれはばに関連して、おもりを離す高さが影響していると考ええる児童もいた。児童らは「勢いをつけるには距離が必要だ」や「高い所から離れた方が勢いをつける時間が長くなる」と発言していた。そしてワークシートにも図 3.1.4-3,4 に示すような記述があった。

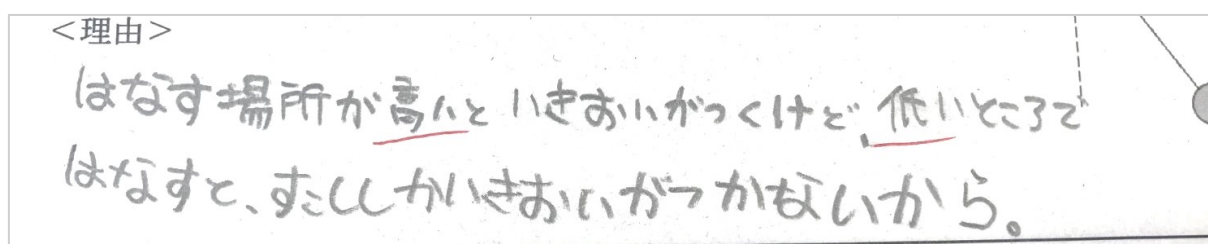


図 3.1.4-3 高さに関するワークシートの記述

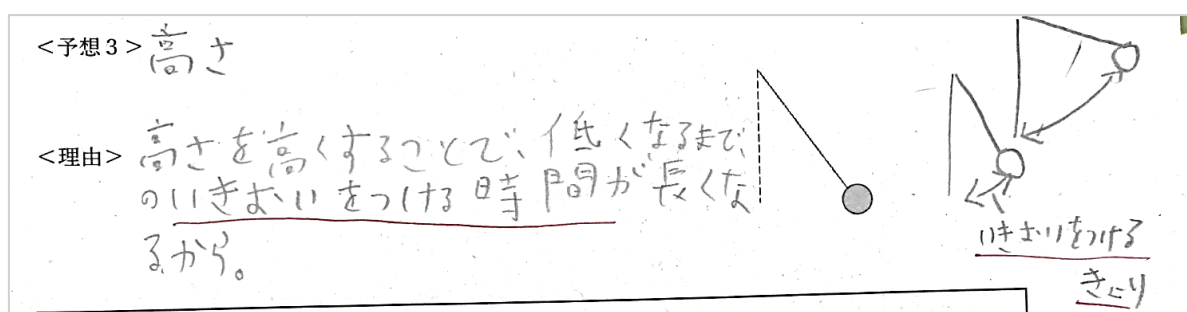


図 3.1.4-4 高さに関するワークシートの記述

これを p-prim の観点から分析すると、**変化には時間がかかる (Change takes time, Warming up)** が活性化したと考えられる。これは、変化はゆっくりと起こり、急激な変化には劇的な作用が必要であるとする p-prim である。おもりをある位置から静かに離すことは劇的な作用ではないため、おもりの運動はゆっくりと変化すると考えたと解釈できる。

最後に、おもりの重さに関する思考について分析する。ここでは、科学的な推論に近づくような思考が見られたため、特に注目してほしい内容である。ワークシートには、「重い方が動きにくい」または「軽い方が身軽で速い」といった記述が多く見受けられた。その一例を図 3.1.4-5 に示す。

<理由>

おもりの重さがおもい方がゆれにくいと思うから、軽い方がはやくなると思う

図 3.1.4-5 おもりの重さに関するワークシートの記述

ワークシートだけでなく、授業中にも「重さの抵抗があるから遅くなる」や「軽いと身軽だから速い」といった発言があった。これを p-prim の視点で考察すると、**内在的あるいは自発的抵抗 (Intrinsic or spontaneous resistance)** や **軽い物は速く動く (Lighter things go faster)** といった質量に関する p-prim が活性化したと考えられる。**内在的あるいは自発的抵抗 (Intrinsic or spontaneous resistance)** とは、特に重たい物や大きい物は運動に抵抗することを意味する p-prim である。**軽い物は速く動く (Lighter things go faster)** も同じような意味であるが、内在的抵抗よりも表面的な解釈を与える p-prim である。

一方で、他の児童のワークシートでは「重い物の方が速い」といった記述がみられた。図 3.1.4-6,7,8 に具体例をいくつか示す。

重い方が落ちる速度が早い
＜最後の予想＞

図 3.1.4-6 おもりの重さに関するワークシートの記述

<理由> 重さを重くすることによって、速くなるいきおい
が変える。

図 3.1.4-7 おもりの重さに関するワークシートの記述

<理由>

重いおががえるときに力が強いから。

図 3.1.4-8 おもりの重さに関するワークシートの記述

ここでは、「重い方が落ちる速度が速い」や「重い方がふれる勢いや返って来るときの力が強い」といった記述がみられ、授業中にも同じ発言があった。ここで、「勢い」とは「戻って来るときの力」であると表現する児童が多かったことから、勢いを運動方向の力と捉えていると解釈して分析をすすめた。これを p-prim の観点から分析すると、いくつかの p-prim

を組み合わせていると解釈できる。ここで適用されたと考えられる p-prim について述べる。1 つ目は、運動を重力に依存して考える **物は落ちる (Released objects fall)** である。これは、運ばれる物体には推進力がなく手放すと真っすぐ落ちるという、いくつかの運動に関するデータから見いだされる p-prim である。ここでは、振り子のおもりが落ちると表現していることから、この p-prim が活性化した可能性がある。2 つ目は、**動かすものとしての力 (Force as a mover)** である。これは、運動方向には力がはたらくことを意味する p-prim であり、「物体は押された向きに動く」という誤概念の原因となる。3 つ目は、量的な因果関係を示す **オーム (Ohm)** の p-prim ($I=V/R$) である。ここでは、作用 V としておもりの重さを、成果 I として振れる勢いや力を当てはめたと考えられる。児童らはこれらを組み合わせて、「おもりは離すと落ち、落ちる方向に力がはたらく。そして、おもりが重いほど運動方向にはたらく力も大きい。」と思考し、オームの p-prim において、作用 V として力を、成果 I として速さを当てはめ、「はたらく力が大きいほど速い。」という思考にたどりついたと考えられる。図 3.1.4-9 に、「重い方が速いから周期が短い」という思考を図式化した一例を示す。ただし、すべての学習者がこのような解釈をするわけではなく、あくまで上述の児童の思考を整理するためのものである。

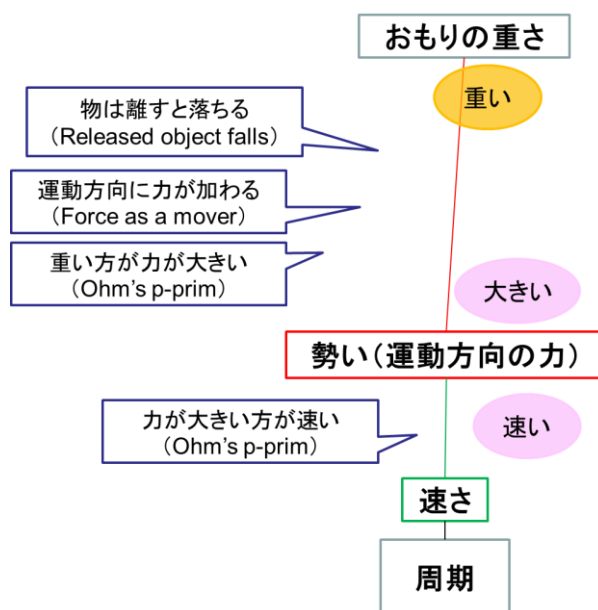


図 3.1.4-9 「重い方が速いから周期が短い」という思考を図式化した一例

また、おもりの重さに関して、上に示した両方の思考を組み合わせる運動の第二法則の理解につながるような思考をした児童も見受けられた。その児童は、「重い物は動きにくいけど、勢いがついて速くなるから、重さは関係ない」と発言した。他の児童のワークシートにもその児童と同じ考え方が記されていた (図 3.1.4-10)。

<理由> 重い場合 Xリット 勢いかX テXリット 重くて動きづらい
 軽い場合 Xリット 身軽 テXリット 勢いがかつかる

$$\begin{aligned} \text{重} &= 0+1-1=0 \\ \text{軽} &= 0+1-1=0 \end{aligned}$$
 なうほうで口たゆら変わらない。

図 3.1.4-10 おもりの重さに関するワークシートの記述

この思考について p-prim の観点から分析すると、**内在的あるいは自発的抵抗 (Intrinsic or spontaneous resistance)** だけでなく、**物は落ちる (Released objects fall)** や **動かすものとしての力 (Force as a mover)** などの p-prim も併せて活性化したと解釈できる。さらに、ある影響は逆向きの影響によって打ち消されることを意味する **打ち消し (Canceling)** も活性化したと考えられる。ここでは、「おもりの速さを遅くする影響と速くする影響が打ち消し合った」という思考をしたと解釈できる。学習者はこれらの p-prim を組み合わせて現象を説明したと考えられる。ここでは考えられる 1 つの例を図式化する (図 3.1.4-11)。ただし、すべての学習者がこのような解釈をするわけではなく、あくまで上述の児童の思考を整理するためのものである。

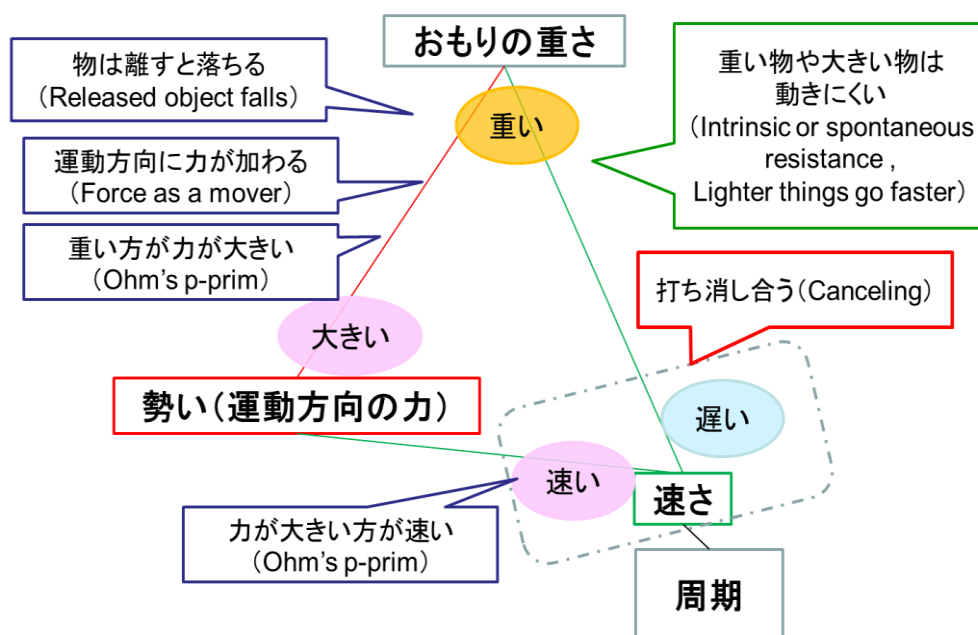


図 3.1.4-11 おもりの重さに関する思考を図式化した一例

また、図 3.1.4-11 に示した思考について、動力的な解釈をすることもできる。「重い物は動きにくいけど、勢いがついて速くなるから、重さは関係ない」と説明した生徒は、運動の第二法則にかなり近い思考をしている。つまり、以下に示す計算式と同じような思考操作をしたと考えられる。右図の振り子の運動について、おもりの重さを m 、振れ幅を θ 、振り子の長さを L として運動方程式を立てると、式 (1) が成り立つ。そしてこの式の両辺を m で割ると、式 (2) のように、おもりの加速度 a が求められる。

$$ma = mg \sin \theta \quad (1)$$

$$a = g \sin \theta \quad (2)$$

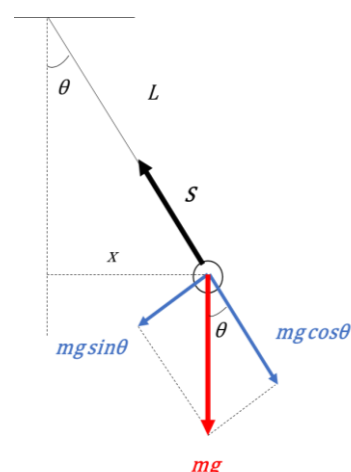


図 3.1.4-12 振り子にはたらく力

詳しく説明すると、「重い物は動きにくい」こと、すなわち **内在的あるいは自発的抵抗 (Intrinsic or spontaneous resistance)** は、式(1)の左辺の慣性質量 m が大きいことに相当する。次に、「勢いが速くなる」ことは、その理由として「力が強いから」と答えているため、右辺の復元力 $mg \sin \theta$ が大きいことに相当する。そして、これらが打ち消し合うという発想は両辺の m のキャンセルに相当する。このように、児童の直観的な思考が、運動の第二法則にかなり近づいた例が見受けられた。そのため、このときに用いられた p-prim は、学習者が直観に基づいて運動の第二法則を理解することに役立つことが示唆された。

また、ここでは *Ohm* や打ち消し (*Canceling*) といった推論 p-prim が、思考操作の軸となった場面が見受けられた。そしてこの推論 p-prim は、第 2 章で述べたシエマ [15] と類似する部分がある。これより、シエマや推論を与える p-prim が軸となり、それに適切な p-prim をマッピングすることで科学的な推論ができることが示唆された。それをあえて図式化するとすれば図 3.1.4-13 のようになると考えられる。また、推論 p-prim はシエマと類似しているというよりも、シエマ (思考操作) を支える直観であるという見方ができると考えられる。

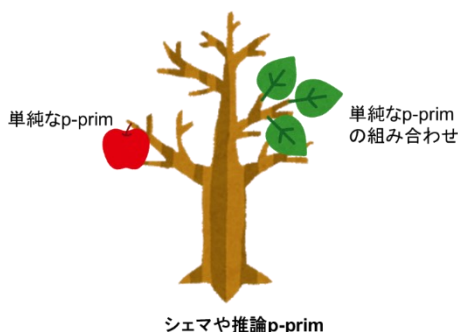


図 3.1.4-13 シエマや推論 p-prim が思考の軸となることの図式化

3.1.5 アンケート結果

児童の考え方の変容を見るため、授業前後と単元後（合計3回）にアンケート調査を行った。問いごとにその結果を図 3.1,5 に示し、p-prim の優先度の変化などについて考察を行う。回答人数は36名であった。グラフの横軸には各選択肢の回答率を示し、授業前・授業後・単元後の順に並べて示した。

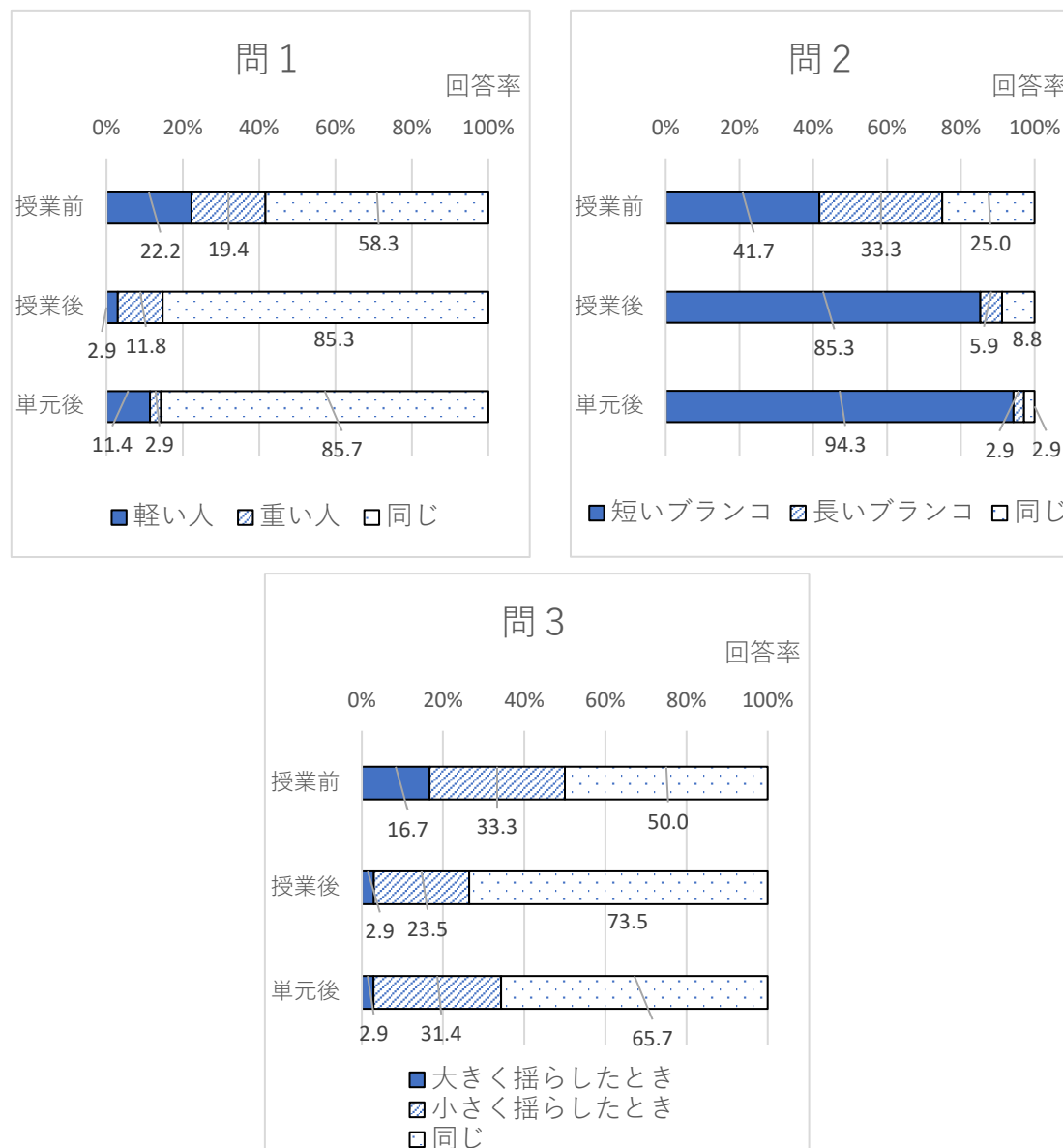


図 3.1.5 問いごとの各選択肢の回答率の変容

問1では、「体重の重い人と軽い人がブランコに乗ったとき、1 往復する時間が短いのはどちらか。」について問い、振り子の運動における「おもりの重さ」についての思考の変容をみるために設定した。この問いの正答は「同じ」であり、学習前から学習後、単元後と正答率が上がっている。誤った選択肢「軽い人」と「重い人」を選んだ生徒の割合について述

べる。「軽い人の方が1往復する時間が短い」と答えた児童の割合は、授業前から授業後にかけては減少しているものの、単元後に再び増加した。これより、**軽い物は速く動く (Lighter things go faster)** や **内在的あるいは自発的抵抗 (Intrinsic or spontaneous resistance)** といった慣性質量に関する p-prim は児童に根強く残り優先度が高いと考えられる。「重い人の方が1往復する時間が短い」と答えた児童の割合は、学習を通して減少している。このことから、「重い物は動きにくいこと」を意味する **物は落ちる (Released objects fall)** や **動かすものとしての力 (Force as a mover)** などの p-prim は振り子の運動の学習を通して、それらのみで活性化することはなくなったと考えられる。ただし、「同じ」と答えた人の中には、これらの p-prim も活性化させた可能性がある。

問2では、「短いブランコと長いブランコでは、1往復する時間が短いのはどちらか。」について問い、振り子の運動における「ふりこの長さ」についての思考の変容をみるために設定した。この問いでは「短いブランコの方が周期が短い」と答えるのが正答であり、この回答率は上がり続けている。これは、授業における実験結果を単に覚えているからだという可能性も否定できないが、**短い距離は短い時間でいける (Less distance covered means less time)** といった距離に依存した p-prim がその思考を裏付けていると解釈することができる。よって、ふりこの長さを考える際、**短い距離は短い時間でいける (Less distance covered means less time)** が活性化することは振り子の運動の学習の理解を助けていると考えられる。ただし、これは科学的に正しい思考であるとは言えないため、他の p-prim で代替する必要がある。

問3では、「ブランコを大きく揺らしたときと小さく揺らしたときでは、1往復する時間が短いのはどちらか。」について問い、振り子の運動における「ふれはば」についての思考の変容をみるために設定した。この問いでは「同じ」と答えるのが正解であり、正答率は授業前から後にかけて増加しているものの、単元後には減少している。逆に、「小さく揺らした方が周期が短い」の回答率は授業後から単元後にかけて増加している。これより、振り子の長さについて思考する児童と同様に、距離に依存した p-prim である **短い距離は短い時間でいける (Less distance covered means less time)** の活性化が影響しているのではないかと考えられる。よって、振れ幅を考える際、この p-prim は学習の理解を妨げていると考えられる。振れ幅が周期に関係ないことについて理解するためには、おもりの加速度など、移動距離以外の変数に気づく必要がある。そこで、おもりを離す高さについて言及していた児童らの意見を取り入れれば、おもりの加速度についても着目できるのではないかと考えられる。ただし、これは科学的に正しいとは言えないので、振れ幅が関係しないことを裏付けるための一つの方法としてのみ提案する。

3.1.6 小括

ここでは、「ふりこの運動」を学習する際に活性化しうる p-prim について明らかにすることができた。活性化した p-prim について表 3.1.6 に示す。ただし、これは一つの解釈の仕方にすぎず、すべての児童がこの p-prim に該当する思考をしたと断定できるものでない。

表 3.1.6 「振り子の運動」の学習で活性化した p-prim

p-prim	意味	児童の思考
オーム (<i>Ohm</i>)	作用 (努力, 駆動力) が大きければ, 疎の結果として得られる成果も大きくなる。逆に, 抵抗が大きければ成果は小さくなる。 ※この量効果は補償し合うことができる。	「ふりこの長さが 2 倍になれば 1 往復する時間も 2 倍になる。」「はたらく力が大きいほど速い。」
短い距離は短い時間でいける (<i>Less distance covered means less time</i>)	短い距離は短い時間で行ける。 ※幼少の頃に見られる p-prim。	「移動距離が短いから周期も短い。」「ふれはばが大きくなるほど, 多い範囲動かないといけなくなり, それでおそくなると思う。」
物は落ちる (<i>Released objects fall</i>)	運ばれる物体には運動力がなく, 手放すと真っすぐ落ちる。	「おもりは離すと落ちる。」
動かすものとしての力 (<i>Force as a mover</i>)	力 (駆動力) を与えると, 物体は力の向きに動き出す。	「落ちる方向に力がはたらく。」
内在的あるいは自発的抵抗 (<i>Intrinsic or spontaneous resistance</i>)	特に重たい物や大きい物は運動に抵抗する。	「重い方が動きにくい。」「軽い方が身軽で速い。」「重さの抵抗があるから遅くなる。」
軽い物は速い, 重い物は遅い (<i>Lighter things go faster, Heavier things go slower</i>)	軽い物は速く動き, 重い物はゆっくり動く。※幼少の頃に見られる p-prim。 内在的抵抗 p-prim よりも表面的な解釈。	「重い方が動きにくい。」「軽い方が身軽で速い。」

変化には時間がかかる (<i>Change takes time, Warming up</i>)	変化はゆっくりと起こり、急激な変化には劇的な作用が必要である。	「勢いをつけるには距離が必要だ。」「高い所から離れた方が勢いをつける時間が長くなる。」
打ち消し合う (<i>Canceling</i>)	ある影響は、逆向きの影響によって打ち消される。	「おもりの速さを遅くする影響と速くする影響が打ち消し合う。」

学習者の思考の中には、一つの p-prim だけで説明できる思考もあったが、複数の p-prim を組み合わせた思考も多くみられた。その中には、学習を妨げるものだけでなく、学習の理解を助ける p-prim (の組み合わせ) も存在した。特に、いくつかの p-prim を組み合わせて、運動の法則につながるような思考をした児童がいた点に着目したい。この実践記録より、その状況に対して適切な p-prim を適切な形で適用できれば、p-prim が科学的推論を裏付けることができる例を示せた。このことは、p-prim を用いた学習支援ができる可能性を示唆するものとなった。また、推論を与える p-prim が思考操作の軸となることも示唆された。そして、これらの p-prim がシエマ [15]を支える直観であるという見方ができることから、シエマや推論 p-prim が軸となり、それに適切な p-prim をマッピングすることで科学的な推論ができることが示唆された。

3.2 電気分野で活性化する p-prims

3.2.1 題材について

電気分野の中でも特に『電気回路』の学習の際に活性化する p-prim を調べることにする。『電気回路』分野では、Osborne [33]らによって「電流消費」や「定電流電源」などいくつかの誤概念が報告されるなど、学習者が困難を示しやすい単元である。それらの誤概念を克服するための教授方法としては、相互作用型演示実験授業（以下、ILDs）[34]やチュートリアル型授業 [35]などが実施されている。ILDs とは、講義ベースのアクティブラーニングである。いくつかの課題に対して、予想→演示実験→結果の考察という流れで行われる。予想や結果の考察の際は学習者同士で徹底的に討論を行う。学習者が議論を重ね、自身の思考を振り返る中で、自らの誤概念に気づいて科学的な概念を獲得することを目指した授業である。チュートリアルとは、演習ベースのアクティブラーニングである。ILDs と同様に、いくつかの課題に対して予想→演示実験→結果の考察という流れで行われる。ただし、チュートリアルでは日常感覚や身近な現象とのつながりを大事にしていることや、直観に対する信頼を損なわない概念変容を目指していることなど、スタイルや目的に差が見られる。

これらの教授方法では、多くの学習者に概念変容がおこり、科学的な概念を獲得することができたと報告されている。しかし課題として、概念変容が起こらないままの学生が一定数いることが挙げられる。その原因の 1 つとして、概念変容が起こらなかった生徒は、誤概念に該当しないような思考をしていることが考えられる。そのため、誤概念に該当しないような生徒の多様な思考を分析するための枠組みが必要となる。そこで、概念よりも粒度が細かい p-prim を用いて分析することで、誤概念に該当しない思考についても扱える可能性がある。また、p-prim を用いることで、学習者がどのようにして誤概念を克服するのかといった思考プロセスの分析ができる可能性がある。このため、このセクションでは『電気回路』の学習の際に現れる p-prim について分析することにする。

3.2.2 方法

公立高校 3 年生 4 名を対象とし、『電気回路』の学習における誤概念の克服を目指した ILDs 型の授業実践を行い、授業中の生徒の思考をプロトコルやワークシートの記述より分析する。高等学校学習指導要領[1]における『電気回路』の学習のねらいは、『電気回路に関する実験などを行い、電気回路における基本的な法則を理解させること』である。学習内容としては、電池などの内部抵抗やキルヒホッフの法則を扱う。しかし、電気回路分野の学習において生徒らは 3.2.1 で述べたような誤概念を持っているため、内部抵抗やキルヒホッフの法則を学習するための基盤ができておらず、学習内容について十分に理解できないことが懸念される。そのため、本実践では電気回路分野での誤概念の克服を目指した授業を実施し、学習内容定着のための基盤づくりをすることとした。そして、電気回路分野における誤概念について p-prim の観点から捉えなおしたり、誤概念に該当しない思考を p-prim によって分析したりすることにする。活性化する p-prim について調べるためには、生徒が自らの思

考をより詳しく発言するという機会が必要である。このため、学習者らの議論によって展開される ILDS 型授業は、生徒の思考を探る手段としても適当であると考えられる。

授業展開としては、『電気回路』の ILDS 型授業で使用される問題からいくつか問題を厳選し、各課題に対して予想→実験→結果の考察という流れで討論をすすめる。実験は、実物を用いて実際に豆球の明るさや電流、電圧を測り、予想の段階でも回路のつなぎ方など実際にやって見せる。詳しい授業展開（全 4 時間）を以下に示す。

授業展開

時	指導内容	学習活動	備考
1	豆球の明るさ 中学校の復習	・豆球の明るさは電流と電圧によって決まることを確認する。 ・オームの法則について確認する。 ・複合回路の事前アンケートに回答する。 ・直列回路では電流が一定であることを理解する。(実験 2-1,2)	・豆球は抵抗であることもおさえる。 ・これから行う授業を理解すれば、最終的に複合回路のアンケートが解けるようになることを伝える。 ・実験により、※電流消費説を解消する。
2	直列回路	・並列回路では電圧が一定であることを理解する。(実験は時間があれば行う。) ・直列回路では抵抗が大きい方がかかる電圧が大きいことを理解する。(実験 2-3) ・直列回路での豆球の明るさについて議論する。(実験 3-1) ・直列回路での豆球の電流について議論する。(実験 3-2)	・実験により、※定電流電源説を誘発する。

3	並列回路	・並列回路での豆球の明るさについて議論する。(実験 4-1,2) ・並列回路での豆球の電圧について確認する。(実験 4-3) ・並列回路全体を流れる電流について議論する。(実験 4-4)	・実験により, 再び定電流電源説を誘発する。 ・実験により, 定電流電源説を克服させる。
4	複合回路	・並列回路全体の抵抗について議論する。(実験 4-5) ・複合回路の事後アンケートに回答する。 ・授業の振り返りを行う。	・事前アンケートと比較して, 自分の考えの変容に気づかせる。

実際の授業で使用したワークシートの形式を図 3.2.3 に示す。本実践では「予想シート」と「結果シート」の2種類のワークシートを使用する。予想シートでは、問い（実験）ごとに自らの予想を記入するものとし、学習前の自分自身の思考への認識を促す。結果シートでは、実験の結果と考察、大事だと思ったこと、すっきりしなかったことを記入するものとし、生徒が思考を整理したり科学的な推論をしたりすることを促す。特に、「すっきりしなかったこと」について記入する欄を設けることで、生徒に自身が納得できていない点を認識させて自らの問題を明らかにさせることを狙う。2種類のワークシートを用いることで、生徒の思考を手助けすること、学習前後の自身の変容についてメタ認知を促すことができると考えられる。

物理 電気回路 <予想シート>
名前 ()

下の回路図のように、豆球 A、B、C が新品の電池につながれている。豆球の抵抗はすべて同じものとする。

以下の問に対して、自分の考えを回答し、「なぜそう考えたのか」といった理由を、図を用いたり具体例を示したりしながら、説明してください。

※成績とは関係ありませんので、直感で答えても構いません。

2-1、図3において、豆球 B と豆球 C のどちらが明るいですか。それとも同じですか。

[豆球 B ・ 豆球 C ・ 同じ]

<理由>

問 2-1

図3

2-2、図4において、豆球 B と豆球 C のどちらが明るいですか。それとも同じですか。

[豆球 B ・ 豆球 C ・ 同じ]

<理由>

問 2-2

図4

2-3、図4において、豆球にかかる電圧が大きいのは豆球 B と豆球 C のどちらですか。それとも同じですか。

[豆球 B ・ 豆球 C ・ 同じ]

<理由>

問 2-3

図4

物理 電気回路 <結果シート>
名前 ()

下の回路図のように、豆球 A、B、C が新品の電池につながれている。豆球の抵抗はすべて同じものとする。

以下の問に対して、実験結果を回答し、「なぜそうなったのか」といった理由を考えて、図を用いたり具体例を示しながら、説明してください。

2-1、図3において、豆球 B と豆球 C のどちらが明るいですか。それとも同じですか。

[豆球 B ・ 豆球 C ・ 同じ]

<理由>

問 2-1

図3

2-2、図4において、豆球 B と豆球 C のどちらが明るいですか。それとも同じですか。

[豆球 B ・ 豆球 C ・ 同じ]

<理由>

問 2-2

図4

2-3、図4において、豆球にかかる電圧が大きいのは豆球 B と豆球 C のどちらですか。それとも同じですか。

[豆球 B ・ 豆球 C ・ 同じ]

<理由>

問 2-3

図4

★私が大事だと思うこと★

私が大事だと思うこと

私がすっきりしなかったこと

私がすっきりしなかったこと

図 3.2.3-1 ワークシートの形式（左：予想シート，右：結果シート）

3.2.3 評価方法

授業中の発話記録やワークシートの記述を用いて、生徒が電気回路を学習する際に活性化する p-prim について分析を行うものとする。

また、生徒の思考にどのような変容があるか調べるため、授業の前後で以下に示すアンケート調査（1-1,1-2）を実施した。

- 1－1．図1において、豆球Aと豆球Bのどちらが明るいですか。
それとも同じ明るさですか。

[豆球A ・ 豆球B ・ 同じ]

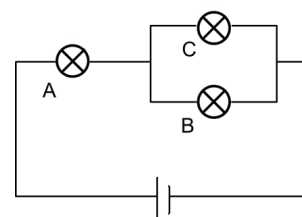


図1

- 1－2．図2のようにスイッチを開くと、豆球Aと豆球Bの明るさはどうなりますか。

豆球A

[明るくなる ・ 暗くなる ・ 変わらない]

豆球B

[明るくなる ・ 暗くなる ・ 変わらない]

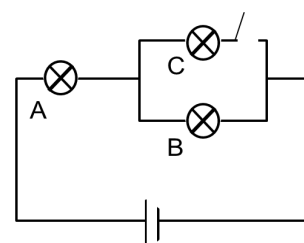


図2

これらの問いは、チュートリアル型授業で用いられている課題を参考にして作成した。各問は選択肢を選ぶだけでなく、選んだ理由も併せて記述するものとした。

多くの学習者は、1-1 について「B は C と電流を分け合うから、A が明るい。」と答えることが予想できる。そして、1-2 では、「A に流れる電流は変わらないから、A の明るさは変わらない。」、「B に流れる電流は増加するから、B は明るくなる。」と答えることが予想できる。しかし実際には 1-2 において豆球Aは暗くなり、この結果を知った生徒は驚く。授業の導入では、1-1 及び 1-2 の実験結果を見せて（実験結果の解釈は行わずに）この授業を受ければこの結果が説明できるようになるという展開とするため、生徒らは実験結果を知っている。よって、アンケートでは選択肢よりも記述内容の変化に重点を置いて分析を行うこととした。また、1-1 と 1-2 の結果について正しく説明するためには、豆球の抵抗の大小と電圧の関係についての理解（さらには、定電流電源の克服）が必要となる。アンケートの記述内容の分析には、これらの理解度についても評価を行う。

3.2.4 事前・事後アンケートの結果と考察

1-1, 1-2 豆球 A, B について, 生徒 3 名 (S1~S3) の事前・事後アンケートの結果を示し, p-prim の観点を交えながら考察する。対象生徒 4 名のうち 1 名はすべての授業を受けていないため, 考察対象からは外すことにする。

1-1 結果

1-1 では, 事前・事後ともに 3 名全員が正答の「豆球 A が明るい」を選択した。事前・事後アンケートにおける記述内容を以下に示す。

表 3.2.4-1 生徒ごとの問 1-1 の回答理由

	事前アンケート	事後アンケート
S1	並列になってないから。	B と C で電力が分かれるから, その分 B は暗くなる。
S2	豆球 B は豆球 C 並列つなぎになっているので弱い。それに対して A は電源から直接つながっていて分かれる電力がないので弱い。	A に流れる電流がそのまま C と B に流れるので, 半分になるから, A の方が明るい。
S3	B, C は並列だから暗くなりそう。	(未記入)

事前アンケートでは, 全員がつなぎ方のみに注目して単に「並列だから」と答えている。また, S2 は, 電流は回路を流れるうちに弱まる, もしくは抵抗で消費されるという「電流消費説」のような考え方をしている。これを p-prim の観点から分析すると, *消えゆく (Dying away)* が活性化したと解釈できる。これは, すべての運動は徐々に消えゆくことを意味する p-prim であり, 振幅の減衰や, 摩擦力や空気抵抗によって運動が弱まる状況で適用される。(ここでは S2 が言う「電力」は「電流」的なニュアンスで使っていると解釈した。)

一方, 事後アンケートでは, 電流や電力などといった物理量に着目してより具体的に説明できるようになっている。また, *消えゆく (Dying away)* に関する記述がないことから, この状況でこの p-prim は活性化しなくなったことがわかる。これは電流消費説を克服したと言い換えることもできる。S2 が, 「A に流れる電流がそのまま C と B に流れる」と回答しているように, 豆球 A で電流が消費されるという思考はしなくなったことがわかる。しかし, 電圧に関する発言はないことから, 抵抗の大小と各豆球にかかる電圧についてまでは思考していないことが伺える。S1 は“電力”を用いて説明しているが, 電圧に着目したというより, 電力と電圧が未分化であると評価する方が妥当だと考えられる。

1-2 結果

1-2 豆球 A の正答は「暗くなる」、豆球 B の正答は「明るくなる」である。豆球 A について、事前アンケートでは 1 名が正答し、2 名が誤った選択肢「変わらない」を選んだ。事後アンケートでは全員が正答した。豆球 B については、事前アンケートでは 2 名が正答し、1 名が「暗くなる」を選んだ。事後アンケートでは全員が正答した。生徒それぞれの記述内容を以下に示す。

表 3.2.4-2 生徒ごとの問 1-2 の回答理由

	事前アンケート		事後アンケート
S1	A 変わらない B 明るくなる	豆球 C の <u>分</u> が B にいきそうだから。	<u>直列の状態</u> になり, A,B にかかる <u>電圧</u> , 電流が同じになるから。
S2	A 暗くなる B 暗くなる	豆球 A は電力は電源の+から-に向かって 1 周するので、スイッチを開くと、次は弱まってしまうので弱い。豆球 B も豆球 A と同じ理由。	A と B の <u>直列回路になる</u> と思うから、明るさが同じになるので、明るかった A が暗くなり B が明るくなる。
S3	A 変わらない B 明るくなる	なんとなく。	(未記入)

事前アンケートでは、2 名の生徒が誤答の「変わらない」を選んだ。これは、豆球 A と並列部分を別々に考えたからだと考察できる。記述内容としては「豆球 C の分が B にいきそうだから」「なんとなく」といった曖昧な表現が見受けられた。また、正答している S2 に選択理由を尋ねると、「スイッチを開くと、次に弱くまわってくるから豆球 A も図 1 よりは暗くなる」と答え、電流が 2 周目には弱くなって回ってくるという誤った思考をしている。これを p-prim の観点から分析すると、1-1 と同様に **消えゆく (Dying away)** が活性化していると考えられる。

一方、事後アンケートでは全員が正答しており、具体的に電流や電圧といった物理量に着目することができるようになっている。特に、“電圧”に関しては事前アンケートには無い視点である。また、回路を部分的に考えるのではなく、回路全体に着目した説明ができるようになっている。そして、この状況において **消えゆく (Dying away)** は活性化しなくなったと考えられる。しかし、これらの記述からは定電流電源説が克服したかどうかは判断できない。そこで、授業中の発話記録より、生徒の思考の変容を、定電流電源説などの誤概念が克服されたかという視点も含めて分析する。

3.2.5 授業中の発話記録およびワークシートの記述

本項では、授業の発話の一部（発話記録 1～4）を示し、生徒の思考について p-prim の観点を取り入れながら分析する。発話記録は時系列順に示す。発話記録 1, 4, 5 では、「電流

消費」や「定電流電源」といった誤概念に該当するような思考について扱う。

はじめに、電気回路分野での誤概念「電流消費説」に関する生徒の発言を**発話記録 1**に示す。「電流消費説」とは、抵抗によって電力が消費されるのではなく電流が消費されるという思考である。そのため、この誤概念をもつ生徒は、抵抗の下流を流れる電流は上流よりも小さくなると考えている。(T：教員, S1~3：生徒)

発話記録 1

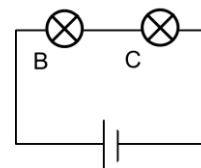
問 2-1. 右図の回路では、豆球 B と豆球 C のどちらが明るいですか。

(R大) (R小)

S2「ここ(豆球 B)で抵抗が大きいから電流が小さくなる。」

T「これ(豆球)の前と後ろの電流の大きさはどう？」

S2「違う。と思う、、、けど、、、」

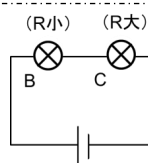


発話記録 1 に示すのは、抵抗値の異なる 2 つの豆電球を直列に接続した際の明るさの大小について考えている生徒の発言である。直列回路では流れる電流の大きさは豆球の前後で変化しないが、生徒 S2 は上のように「直列回路に流れる電流が豆球の前後で異なる」という誤った思考をしている。これを p-prim の観点から分析すると、**オーム (Ohm)** の p-prim が活性化したと考えられる。これは、努力 V が大きいほどその結果として得られる成果 I は大きく、抵抗 R が大きいほど成果 I は小さくなる ($I=V/R$) といった量的な因果関係についての p-prim である。ここでは、抵抗 R として豆球の抵抗の大きさを、成果 I として電流の大きさをマッピングし、「抵抗が大きいので、電流は小さくなる」と考えたと解釈できる。この生徒は、大小の豆球の位置を入れ替えた問 2-2 でも同じ誤りをしている。そして、ワークシートの[すっきりしなかったこと]を書く欄に以下のような記述をした。

私がすっきりしなかったこと

問 2-2*の、先につながっている B が弱いこと。

(*問 2-2. 豆球 B と C では、どちらが明るいかな。)



これより、電源に先につながっている（上流の）B の明るさが弱いことに納得していないことが伺える。つまり、下流より上流の豆球の方が明るいという思考をしている。この生徒は、実験後に「電源の＋－を入れ替えた実験をしたい」と発言した。このことから、上流の方が明るいという思考をしていると判断できる。これを p-prim の観点から分析すると、**消えゆく (Dying away)** が活性化した結果であると解釈できる。**消えゆく (Dying away)** とは、すべての運動は徐々に弱まるということを意味する p-prim である。これに運動として電流を当てはめると、流れる電流は徐々に弱まるという思考になる。

以上より、単に「電流消費説」として扱われていた学習者の思考は、**オーム (Ohm)** と **消えゆく (Dying away)** の二通りの p-prim によって解釈することができた。

次に、p-prim が学習者の理解を促した例を発話記録 2 に示す。

発話記録 2

問 2-3. 右図の回路で、豆球にかかる電圧が大きいのは豆球 B と豆球 C のどちらですか。

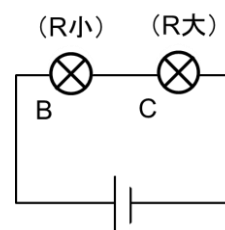
(全員が豆球 C の方が明るいと回答)

S2 「式($I=V/R$)で考えたときに、<中略>

こっち(豆球 C)の方が明るかったから、電流とか強いかなって。

(豆球 C は)抵抗だけ大きくなったら、I は小さくなるかなって。

で、V も大きくしひんかったら、I も大きくならへんかなって。」



T 「何か質問はない？」

S1 「こんな理論的に考えてなかった。なんとなく抵抗が大きい方が電圧大きいかなって。」

S3 「直感、、、。」

発話記録 2 に示すのは、抵抗の大きさが異なる 2 つの豆球を直列に接続した際に、それぞれの豆球にかかる電圧について考えている生徒の発言である。この問いの正答は、「抵抗の大きい豆球 C にかかる電圧の方が大きい」であり、生徒 S1～3 は正答しているが理由は三者三様であった。S2 はオームの法則を用いて、問 2-2 の実験結果(明るさ)と辻褄が合うように推論した。詳しく説明すると、S2 は豆球の明るさを電流の大きさによって考えていると解釈できる。問 2-2 において豆球 C の方が明るかったという結果を踏まえて、豆球 C に流れる電流が大きいと判断し、抵抗の大きい豆球 C では $I=V/R$ で R が大きくて I が小さくなってしまうのを補償しておつりがくるくらいに V が大きくなっていなければならないはずだと考えたと解釈できる。これを p-prim の観点から分析すると、量的な因果関係を示す **オーム (Ohm)** が活性化し、努力 V として電圧を、抵抗として豆球の電気抵抗を、成果として電流(明るさ)をマッピングしたと考えられる。これは、おおむね適切なマッピングであるが、電流と明るさが未分化であることに課題が残る。

また、ここでは S1 の発言にも注目したい。S1 は理由として「なんとなく」と答えており、まさに直観的な発言であると考えられる。学習者の直観を扱う p-prim によって解釈すると、**オーム (Ohm)** が活性化し、S2 と同じマッピングの仕方をしていると考えられる。S1 は、努力として電圧を、抵抗として豆球の電気抵抗をマッピングし、電流を一定に保つためには、抵抗が大きければ作用も大きくなくてはいけないといった補償の考え方をしたと解釈できる。これは、「抵抗が大きい豆球には大きな電圧がかかる」という正しい思考につながる推論である。

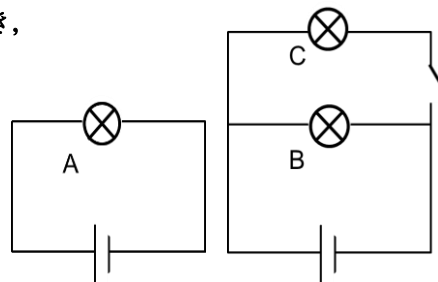
この状況で **オーム (Ohm)** が活性化しこのようにマッピングされるためには、努力として豆球にかかる“電圧”を当てはめることが必須条件となる。そのためには、学習者は電圧の定義を適切に理解して意識しておかなければならない。(ここでの電圧の定義は「電流を流そうとするはたらき」である。はたらきという表現は努力または作用としてのイメージをもたせやすいと考えられる。) このことから導かれる教授方法としては、電圧の意味理解に重

点を置くこと、電圧を使って考える問いの設定など、電圧を意識するような授業デザインや学習支援を行うことなどが有効だと考えられる。

次に、誤概念に該当しない思考について p-prim の観点から分析した結果を発話記録 3 に示す。

発話記録 3

問 4-1. 右図のようにスイッチが開いているとき、
豆球 A と B のどちらが明るいですか。



T 「(生徒の回答をみて) 同じが 2 人で A の方が明るいが 1 人。

同じになるっていうのは、なんで同じになると思いますか。」

S2 「スイッチがつながってないから。C はつながってないから考えないものとしたら、

A と B は同じ回路になるから、明かりの強さも同じになるんじゃないかな。」

T 「うんうん。繋がってなかったらまったく同じ回路？」

S2 「やと思う。」

T 「じゃあ、A の方が明るくなるとしたらなんでやと思う？」

S2 「なるとしたら、C の方にも流れてるんじゃないかなって。返ってこうへんだけで

C の方にも流れてるんじゃないかなって。」

T 「どうですか。C の方にも流れてるんじゃないかなってのは、なんかそんな気もする？」

S1 「うーん。ちょっとは流れてそうな気もする。」

発話記録 3 に示すのは、スイッチが開いている方につけられた豆球 C に電流が流れているかどうかについて話している様子である。生徒の回答をみると、3 名中 1 名は豆球 A の方が明るい」と回答しており、豆球 C に電流が流れたと考えた可能性がある。S1 と S2 の発言からも、豆球 C にも少しは電流が流れるという考えもありうるということが伺える。この討論の後、もう一度生徒らの意見を聞いたところ、3 名中 1 名が豆球 A の方が明るい、2 名が同じと答えた。これより、生徒 S2 最初の意見よりも豆球 C に電流が流れるという意見を支持した生徒がいたことがわかる。これを p-prim の観点から分析すると、**ガイドする (Guiding)** が活性化したと考えられる。これは、決められた経路が直接物体をそれに沿って動かすことを意味する p-prim であり、ルールの上を転がるボールに対してこの p-prim が適用されることがある。豆球 C の方にも導線は繋がっているので、それに沿って電流が流れると考えたと解釈できる。これは誤概念に該当するような思考ではないが、この問いに引かかる生徒がいることも事実である。今回は示すことができなかったが、この他にも誤概念には該当しないような生徒の思考を p-prim によって解釈できる例があった。

次に、電気回路分野での誤概念「定電流電源説」に関する生徒の発言を示す。「定電流電源説」とは、電源から流れ出る電流は回路によって変わらず常に一定であると考えた誤概念である。これは、電流に対して起電力的な発想を抱いているような思考である。これについて、p-prim の観点から分析する。

発話記録 4

問 4-2. 図 8 のようにスイッチが閉じているとき、

豆球 A (図 5) と豆球 B (図 8) のどちらが明るいですか。

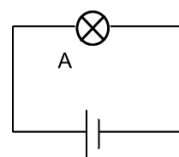


図 5

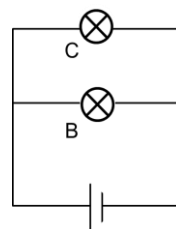


図 8

<予想>

S1 「B と C で 2 つある分、電流が弱くなる (A より光が弱そう)。」

S2 「B, C は並列なので電流の大きさが分かれると思うので、

A 方が強い。」

<実験後 (豆球 A と B の明るさは同じ) >

S2 「あ、そうか。なるほどな。」

T 「予想外でしたか？」

S2 「よくよく考えてみれば妥当。」

T 「何で同じ明るさになったと思いますか。」

S2 「はい！オームの法則に当てはめたら、まず同じ電池使ってるから電圧は 1.5 やろ。

で、こっちは全部電圧一緒やから、(A と B) どっちも電圧が 1.5。で、抵抗が一緒。

ということは、計算したら電流も一緒やから同じ。」

S1 「並列だったら電流とか分かれそうと思ってたけど、数増やしても一緒なら

電流も電圧も一緒？」

発話記録 4 に示した問いでは、授業に参加した生徒 3 名全員が豆球 A の方が明るいと予想した。その理由として、S1 も S2 も「電源に流れる電流はどの回路でも等しい」ことを前提として説明している様子が伺えた。

S1 は、並列回路において「豆球の数が増えるとそれぞれの豆球に流れる電流は小さくなる」と予想した。S1 はその後の発言でも豆球の数に着目した説明をしており、ワークシートには以下のような記述が見られた。

* 私がすっかりしなかったこと *

豆球の数で消費電力が変わらないこと。

これを p-prim の観点から分析すると、**オーム (Ohm)** が活性化したと考えられる。作用 V として電源の電流を、抵抗 R として豆球の数を、成果 I として明るさをマッピングし、「電源から供給される電流が一定の場合、作用を妨げる豆球の数が多ければ、その成果として得られる明るさは小さくなる」と考えたと解釈できる。ここでは、無意識のうちに作用が一定の場合という条件をつけ足していると考えられる。

S2 は、電源から流れる電流は図 5 と図 8 の回路で同じで、図 8 での電流が二手に分かれると考えた。ここでも、電源から供給される電流が一定の場合という前提条件がみえる。電流が二手に分かれることについて、p-prim の観点から分析すると、**ガイドする (Guiding)** が活性化したと解釈できる。これは、決められた経路が直接物体をそれに沿って動かすことを意味する p-prim であり、レールの上を転がるボールに対してもこの p-prim が適用されることがある。S2 は、経路である導線が二手に分かれているため、電流も二手に分かれると考えたと解釈できる。これは、電流の実体的なイメージを持たせるためには悪くない p-prim であると考えられる。

予想の段階では全員が定電流電源説を支持して以上のような思考をしていたが、実験後には何とか辻褄を合わせるための推論をしている。S2 はオームの法則を用いて、豆球それぞれに流れる電流について考えた。S1 は豆球 A, B の明るさが同じになるためには、同じ電圧がかかっている場合、電流も同じになる必要があるということに気づき、並列回路において電流が二手に分かれることを疑い始めた。両者とも各豆球について部分的に考えることはできているが、回路全体を考えることはできていなかった。また、電流の実体的なイメージが曖昧であることも課題として挙げられる。この対策として、S2 が予想の段階でだしていた**ガイドする (Guiding)** にはたらきかけることができれば、電流の実体的なイメージをもたせ、定電流概念の克服に近づくのではないかと考えられる。

生徒らが「定電流電源説」が誤っていることに気づいたのは、問 4-4 の予想を共有している途中であった。その様子を発話記録 5 に示す。

発話記録 5

問 4-4. 電源を流れる電流が大きいのは、図 5 と図 8 のどちらですか。

それとも同じですか。

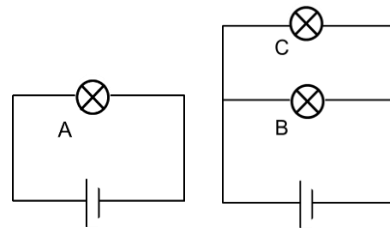


図 5

図 8

<予想>

T「全員、電源を流れる電流は同じと回答しています。

何でそうなるか話してみてください。」

S2「えー。A も B も C も明るかったら。

上（豆球）も一緒やったら下（電源）も一緒かなって思った。」

S1「うーん。回路内やったら電流はどこも同じなんかなって思って。

直列と並列ちゃうんかな、分からへん。」

T「直列だったら回路内を流れる電流どこも一緒。けど、並列だったら電流が二手に分かれます。」

*** 中略 ***

S2「じゃあ、電源からもし 1 しか流さへんかったら、B と C に分かれちゃうから 0.5, 0.5 に分かれちゃうから、それやったら A と一緒にならへん。それやったら、図 5 より図 8 の方が倍流さへんかったら、B と C は（明るさと電流が）一緒にならへんのやないかと思ひまして。図 8（の電源を流れる電流）の方が強いと思ひました。」

S1（うなずく。）

問 4-4 の個人の予想では、全員が電源を流れる電流は図 5 も図 8 も同じであると回答した。その理由としては、問 4-2 の結果の考察と同様に、それぞれの豆球に流れる電流の大きさは同じであることは分かっているが、回路全体として電流がそのように流れているかのイメージはついていない様子であった。ここで、教員が「並列回路では電流が分かれる」ことを伝え、S2 が自身の考えの誤り（定電流電源説）に気付いた。S2 は具体的な数値を用いて、豆球 B と C に豆球 A と同じ大きさの電流を流すためには、図 8 では図 5 の 2 倍の電流を流さなければならないという説明をした。この思考の背後には、電流の実体的なイメージがあるのではないかと考えられる。そしてそのイメージは**ガイドする (Guiding)**によって支えられているのではないかと考えられる。また、S1 もこの意見に対して納得している様子であり、ワークシートには以下のように記述していた。

＜実験結果（電源を流れる電流が大きいのは図 8）の考察＞

S1「C と B に同じ電流の大きさを流すためには、2 倍の大きさの電流を流さないといけないから。」

S2「A,B,C は電圧、抵抗が同じなので、式より、電流も同じじゃないといけない。しかし、B,C は並列回路なので途中で二手に分かれるので 2 倍の電流を流さないといけないから。」

これより、定電流電源説を克服するためには確信をもって説明できるための電流の実体的なイメージが必要となること、そのイメージを支えているのは**ガイドする (Guiding)**である可能性があることがわかった。

また、この問いにおいても、生徒の思考の中心となったのは**オーム (Ohm)**であると考えられる。作用 V として電源の電流を、抵抗 R として豆球の抵抗を、成果 I として豆球を流れる電流をマッピングし、「成果を一定に保つ（各豆球に同じ大きさの電流を流す）ためには、抵抗（豆球の数）が増えたら、作用（電源を流れる電流）も大きくしなければならない。」という思考をしたと考えられる。

3.2.6 小括

3.2 節では、電気回路を学習する際に活性化し得る p-prim について調査することができた。活性化した p-prim については表 3.2.6 に示す。ただし、これは解釈の仕方の一つであって、すべての児童がこの p-prim に該当する思考をしたと断定できるものでない。

表 3.2.6 「電気回路」の学習で活性化した p-prim

p-prim	意味	生徒の思考
オーム (Ohm)	作用（努力，駆動力）が大きければ、疎の結果として得られる成果も大きくなる。逆に、抵抗が大きければ成果は小さくなる。 ※この量効果は補償し合うことができる。	「抵抗が大きいので、電流は小さくなる。」 「電圧が大きければ明るく、電気抵抗が大きければ暗い。」 「電流の大きさは、電圧が大きければ大きく、電気抵抗が大きければ小さい。」 「抵抗が大きい豆球には大きな電圧がかかる。」 「豆球の明るさは、電源の電流が大きければ明るく、豆球の数が多ければ暗くなる。」

消えゆく (Dying away)	すべての運動は徐々に消えゆく。	「電流は回路を流れるうちに弱まる、もしくは抵抗で消費される。」
ガイドする (Guiding)	決められた経路が直接物体をそれに沿って動かす。	「導線に沿って電流が流れる。」

調査の結果、一見同じように捉えられがちな学習者の思考や誤概念なども、p-prim を用いた分析では複数の解釈が可能となった。また、学習者が誤概念を克服する際に活性化する p-prim とそのマッピングの仕方の違いなどについてもわかった。しかし、課題として、学習者の電流・電圧・電力・明るさなどの解釈が曖昧であることが挙げられる。「電力が流れる」という表現をしたり、「明るさは電流で決まる」と考えている場面が見受けられたりするなど、各概念が未分化であるような発言が多かった。これでは、p-prim の適切なマッピングは難しいと考えられる。これより、学習者が p-prim を用いて科学的な推論をするための第一歩として、「未分化である概念を分化すること」が必要であることがわかった。

正しい推論をした学習者の思考の特徴としては、「電圧」に着目することができるようになっていた点が挙げられる。これより、電圧が分化するとオームの法則に基づいて思考できることが示唆された。このことから導かれる教授方法としては、「電圧」の定義をしっかりと定着させること、教員が何度も生徒に「電圧」の定義に戻って思考するように促すことが考えられる。これより、学習者が理解に困難を示す法則を理解するためには、ある概念の分化が鍵となることが示唆された。

3.3 第3章のまとめ

本章では、力学分野と電気分野を学習する際に活性化し得る p-prim の存在が明らかとなった。2つの分野で共通して現れた p-prim は、**オーム(Ohm)**であり、これが多くの思考操作を支えていた。オーム (Ohm) をはじめとする推論 p-prims は、シエマを支える直観であるという見方ができるので、シエマや推論 p-prims が軸となり、それに適切な p-prim をマッピングすることで科学的な推論ができることが示唆された。

また、これまで素朴概念や誤概念として扱われていたものを p-prim の枠組みで捉えなおすことができ、p-prim による解釈ならではの特徴が明らかとなった。p-prim による解釈では、学習者の思考に対して複数通りの解釈をしたり、誤概念に該当しない思考の解釈をしたりすることが可能であった。これより、p-prims が学習者の思考の多様性を扱う枠組みとして機能することが見いだされた。このことは、従来の概念変容研究において誤概念に該当しない思考をして授業の流れから取りこぼされた学習者への支援にも活用できるのではないかと考えられる。また、p-prim による解釈では、学習者の思考の中から科学的概念を構築するための材料となる断片的な知識を見つけることができた。ここでは、学習者の思考の中から科学的推論の材料となる p-prim が見つかったことに価値があり、教員がこれらの材料をうまく組み合わせられるように授業をファシリテートできれば、学習者の思考を肯定しな

から議論を展開することができると考えられる。

課題としては、推論 p-prim にマッピングを行う際に必要な概念（物理量）が未分化であることが挙げられた。それと同時に、学習者が理解に困難を示す法則を理解するためには、ある概念の分化が鍵となることが示唆された。これについては第 4 章で詳しく扱う。

第4章 p-prim を活用した授業の開発

第3章では『振り子の運動』および『電気回路』の学習の際に活性化し得る p-prims を把握することができ、p-prim が学習者の多様な思考を分析する手段となることが示された。また、学習者の思考の中から科学的な推論の材料となる p-prim が見つかった。しかし、生徒が示す困難としては、「概念が未分化であること」などが挙げられた。本章では、この課題に焦点を当て、p-prim の発達を促す授業を開発することとする。

4.1 p-prim 発達の課題

4.1.1 p-prim の発達と未分化概念の分化

第2章で述べたように、初学者と物理学者の p-prim のネットワーク（メカニズム感覚）[7]は大きく異なる。初学者は、個々の現象に対して「そうなるもんだ」としか説明できず、個々の現象自体が p-prims になっている。そのため、物理量がまだ見えておらず未分化である。これは第3章でも見受けられた課題である。例えば、振り子の運動について説明する児童らの発言では「重さ・重力・質量」を同じものとして扱っており、「勢い・力・速度・加速度」などについても未分化であった。また、電気回路について説明する生徒らの発言より、「電流・電圧・電力・明るさ」などが未分化であることがわかった。

p-prims が発達すると、現象をみた際に活性化する p-prim が洗練され、あらゆる文脈でより少数の p-prim を適切にマッピングすることができるようになる。これは、現象を説明するときに物理量（概念）を特定し、適切な法則に当てはめることに相当する。すなわち、p-prim の発達には、「概念を分化すること」と「適切に当てはめること」が必要である。ここでは、p-prims を発達させるための第一歩として、前者の「概念を分化する」プロセスに着目した授業開発を行う。

4.1.2 「質量」概念の分化と仮説の立案

前項で述べたように、初学者は「重さ・重力・質量」などが未分化である。例えば、質量が異なる2物体の自由落下運動について、「木のボールと鉄のボールを同じ高さから落とすと同時に落ちました。その理由は何ですか。」と尋ねると、多くの初学者は「空気抵抗がないから。」という説明で済ませ、それ以上言及されても「そうなるもんだから。」としか答えられないことが多い。また、「重力が一緒だから。」と誤った回答をする生徒もいる。このような子どもの思考については滝川 [36]が指摘しており、本論文でも第5章に後述する。本来、自由落下運動は運動方程式で説明され、同時に落ちる理由については加速度を「質量」及び「力」という2つの物理量をもって説明する必要がある。しかし、多くの人々は「質量」という物理量について言及することはなく、重力と質量が未分化であるような発言をする。

一方で、本研究では「質量」と「力」を区別して現象を説明した事例に出会うことができた（第2章 § 1）。ある児童は、振り子の運動について説明する際、未熟者にとって未分化

である「質量」と「力」を別々に捉え、それらを適切に組み合わせて運動も第二法則につながる推論をした。すなわち、現象をみた際に物理量を区別して物理法則に基づく説明をすることができた。「質量」と「力」を区別できた要因の一つとして、“慣性質量”に着目したことが挙げられる。p-prim の観点から解釈すると、慣性質量への着目には“**内在的抵抗 (Intrinsic or spontaneous resistance)**”の活性化が起因していると考えられる。“**内在的抵抗**”とは、重い物や大きい物は自発的に運動に抵抗することを意味する p-prim である。つまり、この p-prim が活性化することは「質量が大きいものは動きにくい」といった直観がはたらくことである。

そこで本研究では、『学習者のもつ p-prim である“**内在的抵抗**”の活性化を促すことができれば、学習者は現象を見た際に“慣性質量”に着目し、“質量”という概念を分化させることができるのではないか』という仮説を立て、検証することとした。

4.2 p-prim 発達のための授業開発

4.2.1 題材の選定

前節で立てた仮説を検証するにあたり、“質量”を分化することに課題が見受けられる諸現象を題材として扱うこととする。質量が分化されにくい現象の代表例として、「自由落下運動」が挙げられる。未熟者は自由落下運動を説明する際、“力”だけを使って現象を説明しようとすることが多い。これは、慣性質量としての“質量”が分化していないからであると考えられる。一方で、質量が分化しやすい例としては、次に示す「水平面の運動」が挙げられる。私たちは、『おもりを乗せた台車と乗せていない台車に対して同じ力を加えて動かした場合、質量が大きいおもり有りの台車の方が動きにくいこと』をなんとなく認識しており、慣性質量に着目した現象の理解をしている。このことは、質量が分化しにくい現象においても質量を分化するための支援となることが考えられる。すなわち、同じの力を加え続けた「水平面の運動」と「自由落下運動」を連続して考えることができれば、自由落下運動において“質量”を分化することができる可能性がある。

ここで、水平面の運動と自由落下運動の理解をつなぐ補完的なステップとして「斜面を下る運動」を理解することが考えられる。斜面を下る運動も自由落下運動と同様に“質量”が分化されにくい現象の一つであるが、自由落下運動よりも水平面の運動とリンクさせやすい。このため、図 1.2.1 のように、水平面の運動→斜面を下る運動→自由落下運動という具合に、現象を連続して説明できれば、自由落下運動においても慣性質量に着目することができるのではないかと考えられる。そこで本研究では、題材として「斜面を下る運動」の授業を設定し、慣性質量に着目できるような介入を行うこととする。

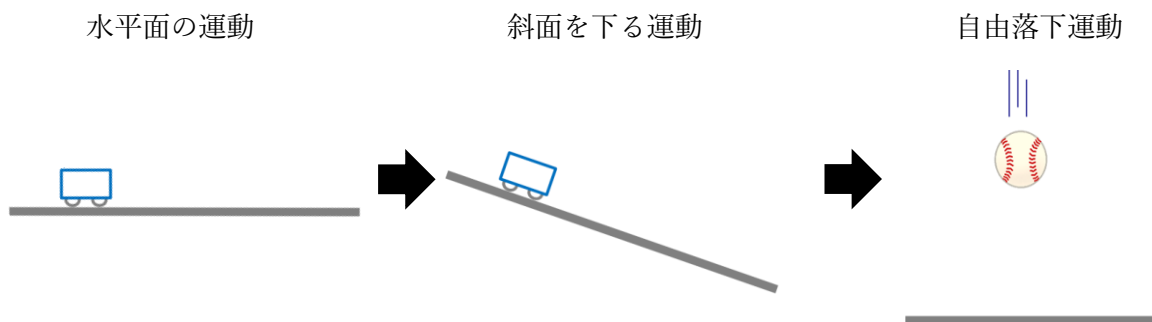


図 1.2.1 水平面の運動から自由落下運動への接続

4.2.2 中学校学習指導要領における「斜面を下る運動」の取り扱い

中学校学習指導要領 [37]では、第1分野の目標として『物質やエネルギーに関する事物・現象に関わり、それらの中に問題を見いだし見通しをもって観察、実験などを行い、その結果を分析して解釈し表現するなど、科学的に探究する活動を通して、規則性を見いだしたり課題を解決したりする力を養う。』ことが示され、探究的な活動を通して規則性を見出すことや課題を解決することを目標としている。斜面を下る運動は、第1分野の(5)運動とエネルギー(イ)運動の規則性 イ 力と運動において、「力が働く運動」として位置づけられ(表 4.2.2)、「力が働く運動」では、斜面を下る運動と自由落下運動について扱う。内容の取り扱いとしては、『落下運動については斜面に沿った運動を中心に扱うこと。その際、斜面の角度が90度になったときに自由落下になることにも触れること。』と示されており、斜面の運動と自由落下運動を一貫して理解できるようになることが求められている。また、『「物体の速さが変わること」については、定性的に扱うこと。』とも記されており、高校で扱う運動方程式のような数値的な関係については触れないこととなっている。

表 4.2.2 学習指導要領における「斜面を下る運動」の取り扱い

(5) 運動とエネルギー		
(ア) 力のつり合いと合成・分解	ア 水中の物体に働く力	
	イ 力の合成・分解	
(イ) 運動の規則性	ア 運動の速さと向き	物体の運動についての観察，実験を行い，運動には速さと向きがあることを知ること。
	イ 力と運動	物体に 力が働く運動 及び力が働かない運動についての観察，実験を行い， 力が働く運動では運動の向きや時間の経過に伴って物体の速さが変わること 及び力が働かない運動では物体は等速直線運動することを見いだして理解すること。
(ウ) 力学的エネルギー	ア 仕事とエネルギー	
	イ 力学的エネルギーの保存	

「力が働く運動」について，ある教科書 [38]での具体的な取り扱いについて述べる。はじめに，斜面を下る運動について，記録タイマーで台車の速さを測定し，「力がはたらき続ける運動では速さが一定の割合で変化する」ことを学習する。そして，斜面の角度を変えて同様の実験を行い，「斜面方向の力が大きいほど速さの変化の割合も大きくなる」ことを確認する。斜面の運動においては，傾斜を変える実験のみを扱い，質量に関しては扱わない。その後，斜面の角度を 90° にした場合の運動として自由落下運動について学習する。ここでは質量が異なるいくつかの砂袋を落下させて速さの変化を調べる実験を行い，「自由落下運動では質量が異なっても落ちる速さ（の変化）は変わらない」ことを学習する。教科書に記載されている実験の様子を図 4.2.2 に示す。

実験3 力がはたらき続ける運動
斜面を下る台車の運動を調べる

●力がはたらき続けると、台車の速さはどうなるか。
●斜面の角度によって力の大きさや速さはどうなるか。

■必要なもの
☐ 台車 ☐ ばねばかり ☐ 台紙
☐ 板 ☐ 記録タイマー ☐ ものさし
☐ 木片 ☐ テープ

1 斜面にそう力をはかる。
 斜面上の台車にはたらく斜面にそう力の大きさを、斜面上の3か所ではかる。

2 台車の運動を記録する。
 テープと斜面の長さをほぼ同じ長さにする。

3 斜面の角度を変えて、1, 2を行う。

結果の整理
 ●斜面にそう力は、斜面の場所や角度によって変わるか。
 ●p.26実験2と同じように、切ったテープを台紙に並べて貼り、テープの長さを表に記入する。

時間 (s)	0	0.1	0.2
テープの長さ (cm)			
速さ (cm/s)			

結果から考えてみよう
 1. 台車の速さは、斜面を下るにしたがってどのように変化すると考えられるか。
 2. 力の大きさと速さの変化のしかたにはどのような関係があると考えられるか。

やってみよう 自由落下運動のようすを調べてみよう

1 記録タイマーに通したテープを砂袋などのおもりにつけ、おもりを落下させる。

コツ テープがからまないように、テープの丸みはよくのばしておく。

2 記録されたテープを切ってグラフをつくる。
 切ったテープごとに平均の速さを求める。

3 おもりの質量を変えて、1, 2を行う。

記録タイマー
おもり

図 4.2.2 教科書での実験の取扱い（上：斜面を下る運動，下：自由落下運動）

4.2.3 中学校および高校における課題

4.2.2 で示した学習指導要領や教科書に沿った展開では、斜面の運動と自由落下運動はともに「力が働き続ける運動」とであると捉えることが出来ても、第1分野の目標である『規則性を見出すこと』は難しいと考えられる。具体的には、斜面を下る運動では「進行方向にはたらく力が大きいほど速さの変化の割合（加速度）も大きくなる」ことを学習しているが、自由落下運動ではそれが適用できず、加速度は質量に関係しない。そのため、これらの運動を別々の現象として独立に理解するしかなく、それぞれの現象に対して「そうなるもんだ」

と表面的な解釈しか与えない。そして、自由落下運動を斜面の運動と一貫した運動であるとして扱うと「質量が違って重力の大きさは同じだから」といった誤った解釈を与えてしまうことが懸念される。斜面の運動と自由落下運動の接続に限らず、中学校の学習内容は、それぞれの現象に対して「そうなるもんだ」という解釈しか与えず、その理由や規則性について扱わないものが多い。このため、運動の規則性を数量的に扱う高校物理とのギャップが生まれ、高校物理で苦戦することが考えられる。

また、高校物理における課題としては、授業時間の不足などの理由から実験をする機会が少ないという現状がある。山崎ら [39]は、2009 年理工学系大学の新入生 3787 名を対象とした調査において、その 20%が高校時代に物理実験の経験が全くなく、60%が5回以下の経験であることを報告している。このため、高校物理では実験から規則性を見出すという機会が少ないと考えられる。

本研究ではこれらの課題を踏まえて、誤解を生まずに各現象の規則性を見出すこと、高校物理への橋渡しとなるような実験を行うことをねらった授業開発を行うこととする。

4.2.4 授業開発

この授業の目的は、生徒が、力がはたらき続ける運動では「運動方向の力が大きくなれば加速しやすいこと」を理解するだけでなく、「質量が大きいほど加速しにくいこと」に着目して斜面を下る運動を慣性質量的な視点からも説明できるようになることである。（前時には、斜面を下る運動について、記録タイマーを用いて速さ-時間グラフを作成し、力がはたらき続ける運動では「速さが時間とともに一定の割合で変化すること」を学習している。）「質量が大きいと加速しにくいこと」について教科書では参考資料として扱われている程度であるが、本実践ではこのことについて扱うことで“質量”概念を分化することを目指し、自由落下運動などにおいて生徒が前項で述べたような誤解を生まないための支援として位置づける。また、この授業は高校で学習する運動の第二法則について定量的な解釈を与えるものである。この視点からも、中学校の授業において「斜面を下る運動」の実験をしておくことは、高校での運動の第二法則の理解を助けると考えられる。

上述の目的を達成するためには、通常授業の展開に加えて「質量が大きいほど加速しにくいこと」にも着目する展開が必要となり、実際の授業では表 4.2.4 で示す5つの演示実験を行う。このため、限られた時間の中で通常授業よりも多くの実験しなければならない。そこで本実践では、リアルタイムで速さ-時間グラフを可視化できるスマートカートを用いて実験時間の短縮を試みることとした。スマートカート [40]とは、タブレットや PC で力・速度・加速度などに関する実験ができる力学台車である。無線（Bluetooth）を使って台車に搭載されているセンサとタブレット端末や PC を接続することで、台車の運動をリアルタイムに可視化できる。記録タイマーを用いた実験では、何度も実験をして速度-時間グラフを得るためには時間がかかりすぎるが、スマートカートを用いるとこの弱点をカバーすることができる。

この授業では、水平面の運動に関する実験として実験ア、イを、斜面を下る運動に関する実験として実験 A, B, C を設定する。各実験の条件は表 4.2.4 に示す。実験に用いたスマートカートの質量は 250 g, おもりの質量は 250 g, レールの長さは 1.2 m であった。「水平面の運動」の実験では、台車に扇風機を取り付けて水平方向に一定の力を加え続けた。「斜面を下る運動」の実験では、傾斜がゆるやかな斜面と急な斜面を用意し、ゆるやかな斜面では机からレールの端までの高さを 8.2 cm, 急な斜面では 14.3 cm とした。スマートカートによって作成されたグラフは図 4.2.4-1~3 に示す。グラフの点は 1 秒間に 50 回プロットしており、グラフが最初に折れ曲がった点が運動の開始を、次に折れ曲がった点が運動の終了を示している。

表 4.2.4 各実験の条件

実験名		おもりの個数	斜面の傾斜
水平面の運動	実験ア	0 個	—
	実験イ	1 個	—
斜面を下る運動	実験 A	0 個	ゆるやか
	実験 B	0 個	急
	実験 C	1 個	ゆるやか

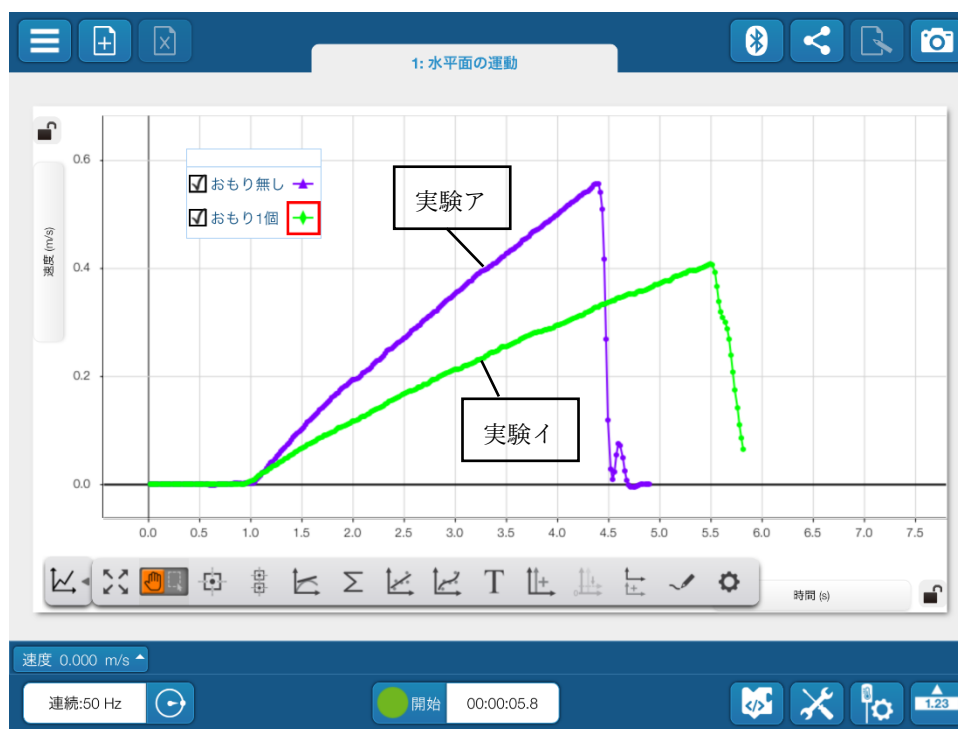


図 4.2.4-1 実験ア、イ（問0）速度-時間グラフ

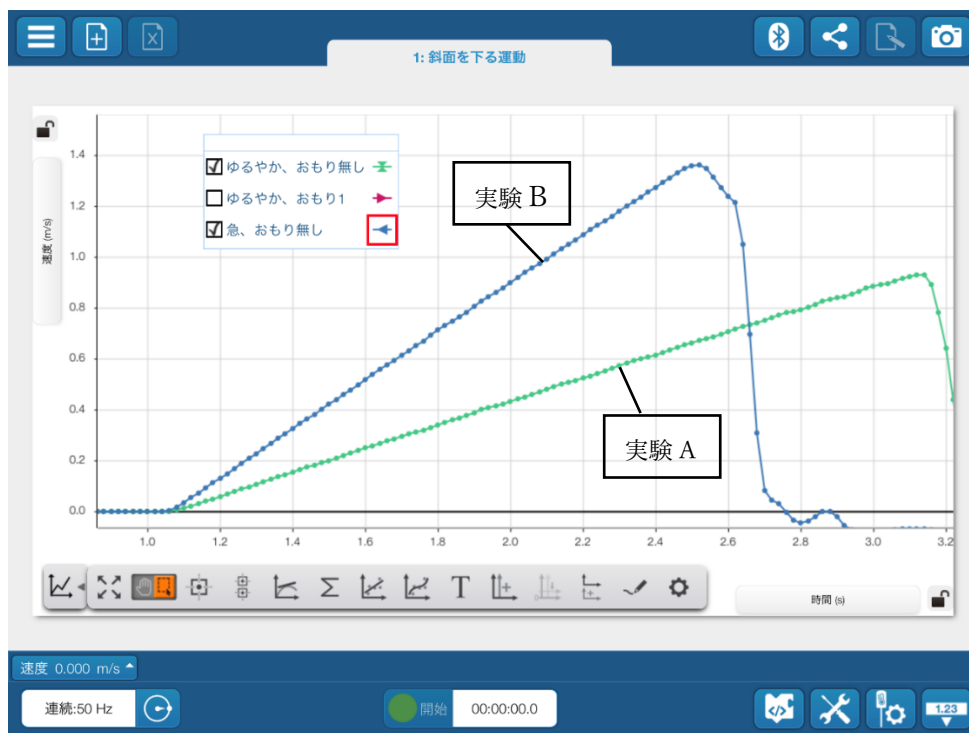


図 4.2.4-2 実験 A, B (問 1) の速度-時間グラフ

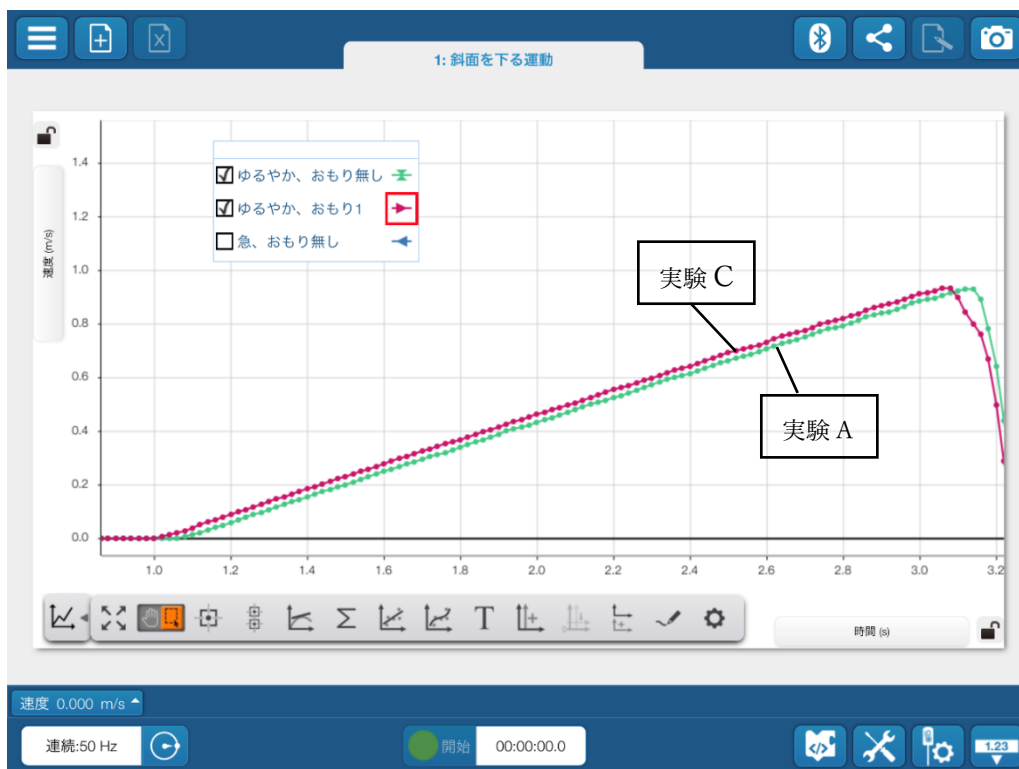


図 4.2.4-3 実験 A, C (問 2) の速度-時間グラフ

授業展開としては、問0～3に示す演示実験について速さ－時間グラフを予想し、その理由について全体交流し、その後演示実験による結果を見て、個人→班→全体で考察を行う。ただし問0については、演示実験ではなくすでに撮影した動画によって実験結果を見ることとした。なお、F中学校での介入は普段授業を担当している先生に実践内容を伝え、その先生に実施してもらった。

指導案や授業で用いたワークシートは付録に載せ、授業の概要と発問内容を以下に示す。

(1) 授業の概要

授業展開	授業内容と留意点
導入	斜面を下る運動は斜面方向に 力がはたらき続ける運動 であり、速さが時間とともに一定の割合で変化する運動であることを速さ－時間グラフと共に振り返る。この際、グラフの傾きが一定であることは、速さの変化の割合が一定であることを確認する。
展開①	問0について予想し、班及び全体で共有する。その後、動画によって実験結果をみる。この際、(扇風機によって)同じ力を加えた場合「質量が大きいと速さが変化しにくい」ことに着目させる。
展開②	問1、問2について予想し、班及び全体で共有する。
展開③	問1、問2の実験結果をみて、なぜそのような結果になったのか個人→班で考察する。問1の考察では、「斜面方向(運動方向)の力が大きい方が速さの変化も大きくなる」ことに気づかせる。問2の考察では、おもりをのせた台車は斜面方向の力は大きいが速さの変化は大きくならないので生徒が葛藤するポイントである。ここで、問0の「質量が大きいと速さが変化しにくい」ことを活用し、斜面の運動においても“力”だけでなく“質量”という変数に気づかせることをねらう。
まとめ	考察したことを全体で共有する。

(※ただし、C組のみ展開①を展開③の途中に行った。詳しくは評価方法②に示す。)

この授業では、力がはたらき続ける運動として「斜面を下る運動」を学習する際に、学習指導要領や教科書に即して斜面の傾斜を変える実験(問1)を行うだけでなく、“質量”を変える実験(問2)を追加した。質量が異なる2物体が斜面を下る運動について考える機会を設けることで、自由落下運動の学習への接続を図る。また、“質量”について着目しやすくするために、水平面での運動の実験(問0)も追加した。具体的には、水平面において質量の異なる2台の台車に同じ大きさの力を加えた場合“重い物の方がゆっくり動く”という現象に出会わせた。これは、慣性質量への着目を促す p-prim である“**内在的抵抗 (Intrinsic or spontaneous resistance)**”を意図的に活性化させることを目的とした。これに基づいて質量が異なる2つの台車が斜面を下る加速度(速さの変化の割合)が同じであることを考えると、

「質量が大きい台車にはたらく重力は大きいが、質量が大きい分運動に抵抗する（動きにくい）ので、相殺して速さの変化は同じである。」という具合に，“力”だけでなく“質量”にも着目して説明できるようになると考えられる。図 4.2.4-4 は授業の概要を図式化したものである。

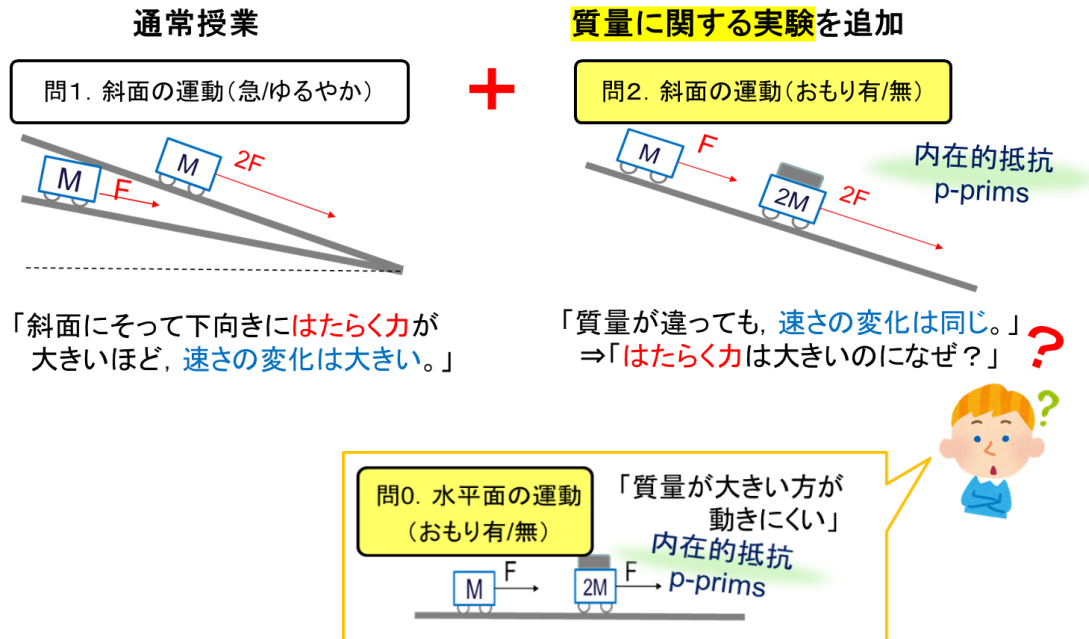


図 4.2.4-4 授業の概要

(2) 発問内容

問0. 台車に一定の力を加え続けて水平面を運動させると（実験ア）、速さ-時間グラフは次のようになった。台車におもりを乗せて実験アと同じ力を加え続けた場合（実験イ）、速さ-時間グラフはどのようなか。また、なぜそう考えたのか日常体験や既習内容などを用いて理由を書け。

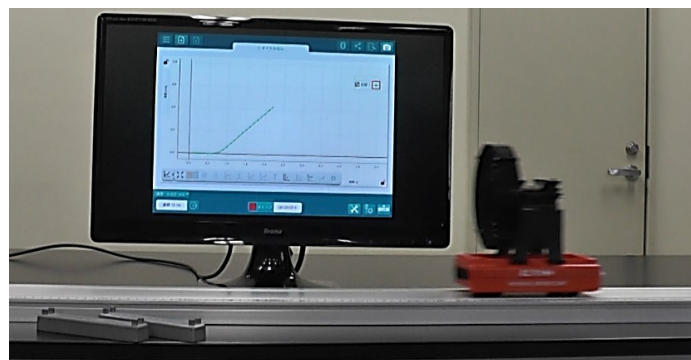
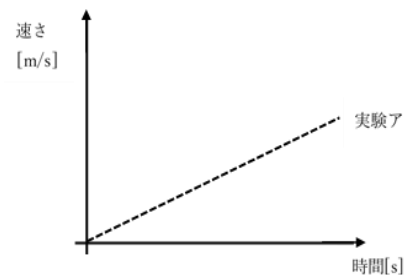


図 4.2.4-1 実験ア、イの様子（扇風機の力によって右向きに進む台車）

問1. 台車がゆるやかな斜面を下るとき（**実験A**），速さ-時間グラフは下グラフの点線のように表される。急な斜面を下るとき（**実験B**），速さ-時間グラフはどのようになるかグラフに記入せよ。また，なぜそう考えたのか日常体験や既習内容などを用いて理由まで書くこと。

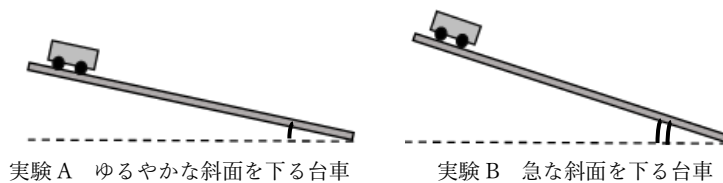
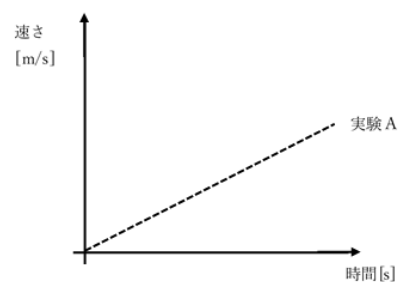


図 4.2.4-2 実験 A, B の様子（傾斜の異なる斜面を下る台車）

問2. 実験 A と傾斜が同じ斜面において，台車におもりを乗せた場合（**実験 C**），速さ-時間グラフはどのようになるかグラフに記入せよ。また，なぜそう考えたのか日常体験や既習内容などを用いて理由まで書くこと。

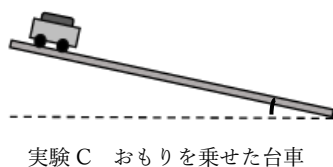
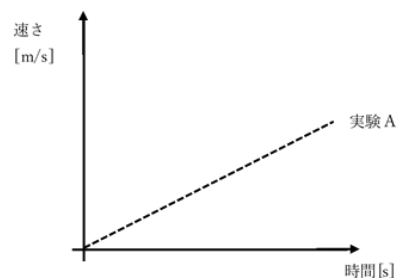


図 4.2.4-3 実験 C の様子（斜面を下るおもりを乗せた台車）

発問に用いた図には，生徒が本筋以外でつまづかないための配慮を行った。例えば，問1

(2つの台車が傾斜の異なる斜面を下る運動)の図は、斜面を図4.2.4-4のように三角形で示すのではなくレールで示すことで、新たな変数として台車が走る距離が現れないような工夫を行った。

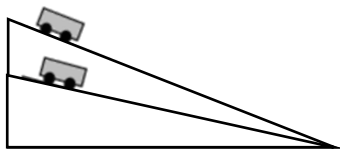


図 4.2.4-4 問1で台車が走る距離も変数となってしまう図の例

4.3 評価方法①

授業実践による介入を行ったF中学校と対照群のN, S中学校の思考の変容について、事前・事後アンケートによって評価を行うこととする。ここでは、事前・事後アンケートの内容と出題の意図、実施のタイミング等について述べる。

4.3.1 事前・事後調査の内容

授業の前後で(選択&)記述式アンケートをとり、その記述内容の変容をみることによって授業実践による介入効果を評価することとした。具体的には、介入群と対象群の記述について、「慣性質量的な記述がある生徒」の割合を比較する。また、その他に記述内容に特徴的なことがあれば、それについても評価を行う。

はじめに、事前アンケートの内容について説明する。ここでは、選択・記述式アンケートを実施した。各設問で指定した状況において、「ボールを同時に離した際にどちらが先に地面に着くか。」選択肢より選んで回答し、その理由を記述するものとした。問1では「木と鉄のボールが斜面を下るとき、どちらが先に地面に着くか。」問2では「ボールが傾斜の異なる2つの斜面を下るとき、どちらが先に地面に着くか(斜面の長さは同じ)。」問3では「木と鉄のボールを落下させたとき、どちらが先に地面に着くか。」について問うた。(詳しくは【付録】を参照)質量が変数となる状況を設定したのは問1と問3であり、この2問の記述内容の中に慣性質量的な発言があるかを評価することとした。問2については、斜面を下る台車にはたらく重力の分解ができるかを見るために設定した。

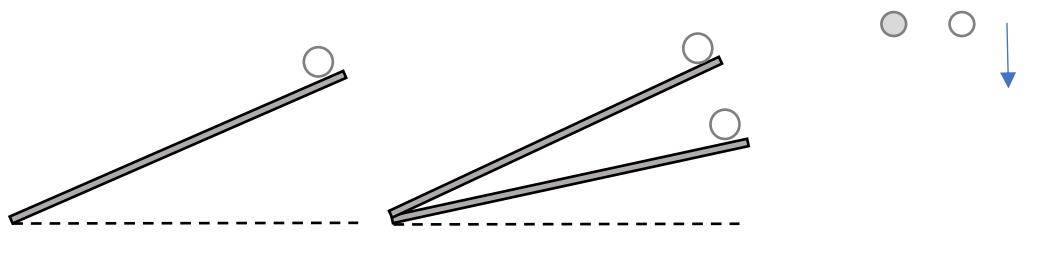


図 4.3.1-1 事前アンケートに用いた図(左から問1, 問2, 問3)

次に、事後アンケートの内容について説明する。ここでは、記述式アンケートを実施した。問1では「ボールが傾斜の異なる2つの斜面を下ると、同時に地面に着いた。その理由について答えよ。」、問2では「木と鉄のボールを落下させると、同時に地面に着いた。その理由について答えよ。」、問3では「木と鉄のおもりの振り子の1往復する時間は同じだった。その理由について答えよ。」という問いを設定した。事前アンケートのように選択肢は設けず、各状況設定をこちらが問題で与え、その状況について生徒が説明する問いとした。これは、授業で実際の現象を見ているため選択肢を設けてもほぼ全員が正答すると予想されることや、質量の異なる2物体の運動が同じことに対してどのように解釈したかを分析するためにこのような形式とした。

問1は事前アンケートの問2に対応しており、問2は事前アンケートの問3に対応している。問3は、運動方程式が適用でき、慣性質量に着目する必要がある他の文脈として「振り子の運動」に関する問いを設定した。振り子の運動については、小学5年生で「振り子の周期は長さによってのみ決まる」ことを学習している。また、中学3年生では力学的エネルギー保存則の学習時に少しだけ扱う現象である。そして、授業で習った知識として物語的に記憶するナラティブとなりやすい現象であるとも言われている。すなわち、問3は、力が働く運動として授業では扱っていない文脈、そしてナラティブの影響を受けやすい文脈でも「力」と「質量」を区別して慣性質量に着目した説明ができるかを調べるために設定した。ここで、質量が変数となる問いは問2と問3である。

また、事前・事後ともに、木と鉄のボール（おもり）の大きさ・形は同じで質量のみが異なり、摩擦や空気による影響は考えないものとして回答することとした。

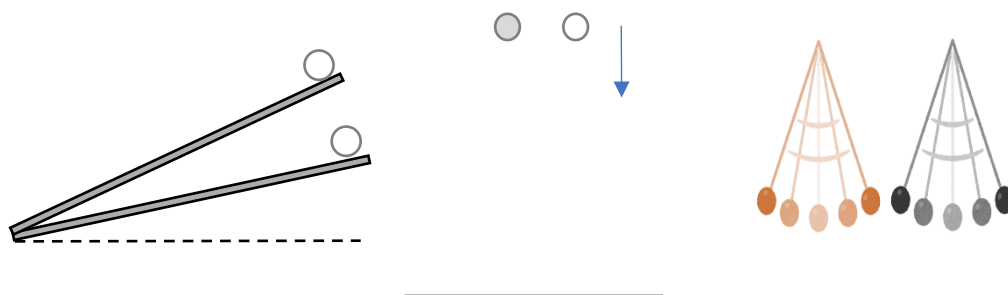


図 4.3.1-2 事後アンケートに用いた図（左から問1，問2，問3）

事前・事後アンケートの各問の質問項目と対応関係をまとめたものを以下に示す。

	事前アンケート質問項目		事後アンケート質問項目
問 1	木と鉄のボールが斜面を下るとき、 どちらが先に地面に着くか。		問 1 ボールが傾斜の異なる 2 つの斜面 を下ると、同時に地面に着いた。 その理由について答えよ。
問 2	ボールが傾斜の異なる 2 つの斜面を 下るとき、どちらが先に地面に着く か。	↗	問 2 木と鉄のボールを落下させると、 同時に地面に着いた。その理由に ついて答えよ。
問 3	木と鉄のボールを落下させたとき、 どちらが先に地面に着くか。	↘	問 3 木と鉄のおもりの振り子の 1 往復 する時間は同じだった。その理由 について答えよ。

4.3.2 アンケート実施のタイミングについて

本調査では、国公立中学校3校（F中学校、N中学校、S中学校）の協力を得た。F中学校では慣性質量にはたらきかける授業を行い、介入効果について分析を行う。N中学校、S中学校の2校は対象群として設定し、通常授業を受けた場合の生徒の思考の変容について調べることとする。

事前アンケート実施のタイミングは、3校とも表4.3-1 学習指導要領の流れに示す（イ）運動の規則性 ア 運動の速さと向き の後に行った。すなわち、斜面上の物体にはたらく力の分解、速さの定義について学習した後である。

事後アンケート実施のタイミングは、介入群のF中学校、対照群のS中学校では（ウ）力学的エネルギー を学習した後に実施する。概念定着には時間がかかると考えたため、しばらく時間をおいてからの実施することにする。また、エネルギーを学習した後に行うことで、振り子の運動の問い（問3）においてナラティブが現れやすい状況設定とした。もう1校の対象群N中学校では（イ）運動の規則性 イ 力と運動において斜面を下る運動と自由落下運動を学習した直後に行うこととする。エネルギー学習前であるため、振り子の運動の問いでもナラティブが現れにくい状況設定とした。

表 4.3.2 学習指導要領の流れとアンケート実施のタイミング

(5) 運動とエネルギー	
(ア) 力のつり合いと合成・分解	ア 水中の物体に働く力
	イ 力の合成・分解
(イ) 運動の規則性	ア 運動の速さと向き
	事前アンケート（F, N, S 中学校）
	イ 力と運動
事後アンケート（N 中学校）	
(ウ) 力学的エネルギー	ア 仕事とエネルギー
	イ 力学的エネルギーの保存
事後アンケート（F, S 中学校）	

4.4 評価方法②

4.4.1 介入の仕方についての検討

慣性質量へのはたらきかけについてより詳細な支援方法を探るべく、介入群の F 中学校では、慣性質量にはたらきかけるタイミングを2パターン用意した。各クラスの授業展開（介入方法）について表 4.4.1 に示す。

表 4.4.1 各クラスの授業展開

A 組, B 組	C 組
導入	導入
展開①：予想→実験動画 問 0（質量が異なる台車の水平面の運動）	なし
展開②：予想→実験 問 1（傾斜の異なる斜面を下る運動） 問 2（質量の異なる台車が斜面を下る運動）	展開②：予想→実験 問 1（傾斜の異なる斜面を下る運動） 問 2（質量の異なる台車が斜面を下る運動）
展開③：問 1 と問 2 について考察	展開③：問 1 と問 2 について考察 展開①：予想→実験動画 問 0（質量が異なる台車の水平面の運動）
まとめ	まとめ

A 組, B 組では、表 4.2.3 に示す授業展開の通り、展開①で質量の異なる 2 台の台車に同じ力を加えた「水平面の運動」について考えさせ、慣性質量へに気づきを促した。すなわち、授業の初めに重い物は動きにくいという現象に出会わせて“内在的抵抗”の p-prim を活性化させることを狙った。C 組では、展開①を行わず、展開③の実験の考察段階で「水平面の運動」について考える機会を設け、生徒が行き詰ったタイミングで“内在的抵抗”の p-prim を活性化させることを狙った。

また、「慣性質量」の解釈の仕方は生徒らの議論の内容によってクラスごとに異なることが予想される。そのため、A 組, B 組, C 組それぞれの解釈を比較することによって、よりよい解釈の仕方についても検討する。各クラスの比較には、1.3 で示した事前・事後調査に加えて、次に示す追加調査の結果も用いた。

4.4.2 追加調査の内容

学習者の概念定着には時間がかかる。また、これまでの概念変容研究では授業直後には科学的に正しい概念を獲得したとしても、ある程度時間が経つと再び誤概念に戻ってしまうという事例も報告されている。このため、追加調査は「斜面の運動」の授業を実施したおよそ 3 ヶ月後に行い、時間が経過しても慣性质量的な思考ができるか調べることとする。

追加調査の内容は、事前・事後調査の内容を合わせて作問した。問 1、問 2 は選択のみ、

問2，問3は選択&記述式のアンケートを実施する。事前・事後・追加調査における各問いの項目については表4.4.2にまとめて示す。

表 4.4.2 各問いの項目まとめ

	斜面の傾斜	斜面（質量）	自由落下（質量）	振り子の運動（質量）
事前調査 （選択あり）	◎	◎	◎	
事後調査	△		△	△
追加調査 （選択あり）	○	○	◎	◎

（◎：選択肢＋記述，○：選択肢のみ，△：記述のみ）

問1では事前アンケートの問1と同様に、「斜面の傾斜がゆるやかな場合と急な場合では、どちらが早く地面につくか」について問うた。この問いは、斜面上の台車の力の分解ができ、力の大きさが加速度に関係することを理解しているかをみるために設定した。そして、問2，3，4には慣性質量に関する問いを設定した。問2では質量の異なる2つの物体が斜面を下る運動について、問3では質量の異なる2つの物体の自由落下について、問4では質量の異なるおもりをつけた振り子の運動について、地面に到着するまでの時間や周期を問うた。そして、これらの問いの正答率及び記述内容によって、各クラスの「慣性質量」の考えの定着度について評価を行うこととする。

第5章 授業実践の結果と考察

第4章では、質量概念の分化を目指すための授業開発を行った。そして、介入効果の評価方法として、事前・事後・追加アンケートを作成した。本章では、介入群と対照群の事前・事後アンケートの結果を比較し介入効果について分析する。また、よりよい介入方法を探るために、介入群各クラスの授業の様子やアンケート調査の結果について分析する。

5.1 授業による介入効果

介入群（F 中学校）と対照群（N, S 中学校）の事前・事後調査の結果を比較し、“質量”概念の分化を促す「慣性質量的な思考をしているか」を基準として、授業の介入効果について分析を行う（第4章の評価方法①に相当する）。

5.1.1 事前調査の結果と考察

事前アンケートの問1,問2,問3の各選択肢の回答率を,図 5.1.1-1 に示す。回答人数は, F 中学校 82 名, N 中学校 127 名, S 中学校 158 名であった。グラフの横軸（回答率）には, 各校の人数に対するその選択肢を選んだ人の割合を示す。

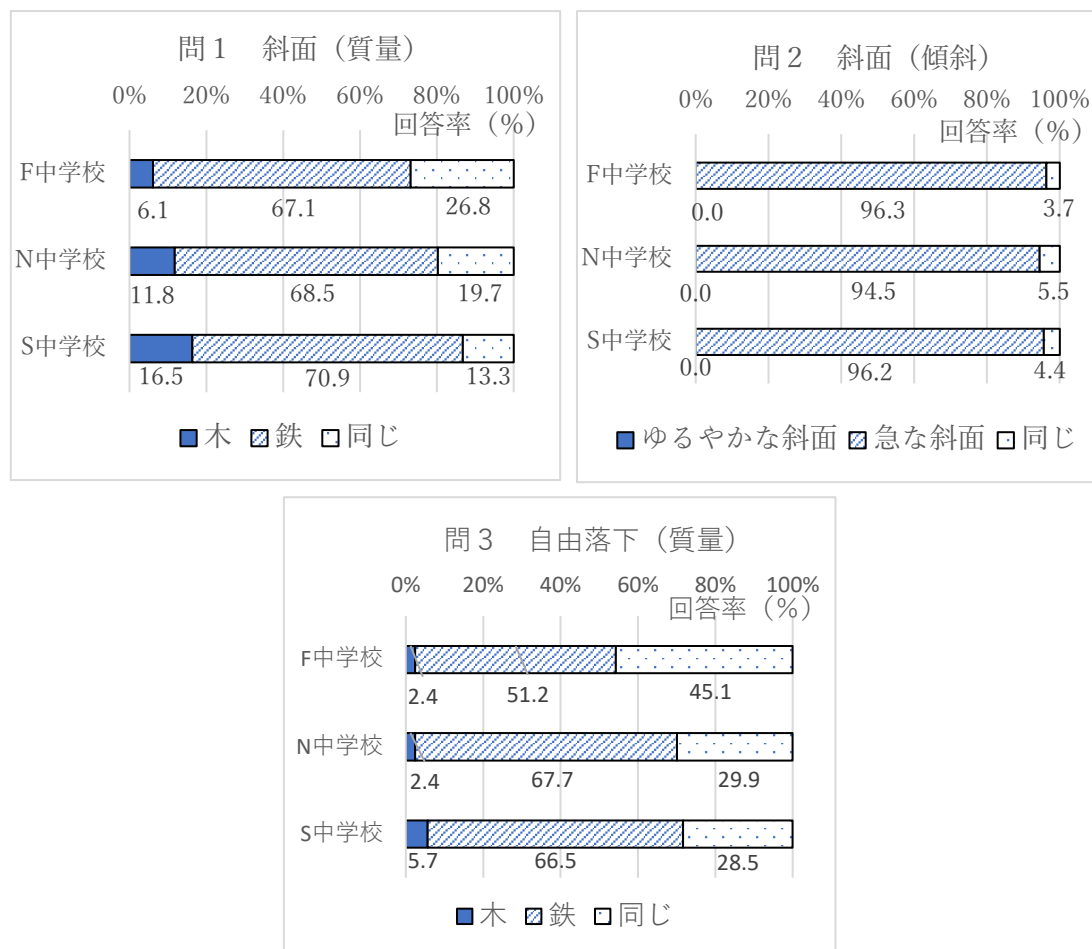


図 5.1.1-1 問1,問2,問3の各選択肢の回答率

問1では、「斜面で木のボールと鉄のボールを転がすとどちらが先に地面に着くか」について問うた。この問の正答は「同じ」である。3校とも、回答率が一番高いのは「(質量が大きい)鉄のボールの方が早く地面に着く」であり、F中学校で67.4%、N中学校で68.5%、S中学校で70.9%であった。この選択肢の回答率は3校ともあまり変わらない値となった。この問いで、内在的抵抗 p -prim の活性化が影響し得る選択肢は「(質量が小さい)木のボールの方が早く地面に着く」であるが、この回答率は低くF中学校で6.1%、N中学校で11.8%、S中学校で16.5%であった。F中学校とS中学校では10.4%の差が見られた。正答の「同じ」の回答率はF中学校で26.8%、N中学校で19.7%、S中学校で13.3%となり、F中学校が高い値を示した。この選択肢にも内在的抵抗 p -prim が関与する可能性はあるが、事前アンケートの記述内容からはその例が見つからなかった。

問2については、慣性質量とは関係がなく、斜面上の物体の力の分解ができるかを見るために設定した。3校とも95%程度の生徒が正答の「鉄の方が早く地面に着く」を選択したため、ここでは詳しく扱わないものとする。

問3では、「木のボールと鉄のボールを同じ高さから同時に落とした場合どちらが先に地面に着くか」について問うた。この問の正答は「同じ」である。3校とも「(質量が大きい)鉄のボールの方が早く地面に着く」の回答率が1番高く、F中学校で51.2%、N中学校で67.7%、S中学校で66.5%であった。これは、問2と同様に運動方向にはたらく力によって運動を決定した結果であると考えられる。内在的抵抗 p -prim の活性化が影響し得る「(質量が小さい)木のボールの方が早く地面に着く」の回答率は3校とも低く6%未満であった。正答の「同じ」の回答率はF中学校で45.1%、N中学校で29.9%、S中学校で28.5%となり、F中学校では半数近くの生徒が正答していた。

事前調査において慣性质量的な思考の有無について問うたのは、問1(斜面)と問3(自由落下)である。慣性质量的な感覚に近い「木のボールの方が早く地面に着く」の回答率は、回答率が高い学校でも問1斜面の運動で17%未満、問3自由落下運動で6%未満であった。どちらの問いにおいても回答率が1番高いのは「(質量が大きい)鉄が早く地面に着く」であり、事前調査において生徒は誤った認識をしていることが分かった。正答「同じ」の回答率は、N,S中学校では問1と問3であまり変わらない値であるが、F中学校では問1より問3の方が18.3ポイントも高い。これより、N,S中学校の生徒は斜面を下る運動と自由落下運動を一貫して考えているが誤っている生徒の割合が多く、F中学校では自由落下運動の問いは正答しているが斜面の運動と一貫した思考をしていない傾向があることが分かった。第4章で述べたように、この単元では斜面の運動と自由落下運動を一貫して理解できるようになることが求められているが、事前調査では3校とも「一貫して正しい思考」をしている生徒の割合は少ない結果であった。

次に、生徒が各選択肢を選んだ理由を明らかにするために、問1と問3の各選択肢(1)「鉄の方が早く地面に着く」、(2)「同時に地面に着く」、(3)「木の方が早く地面に着く」の記述内容について質的な分析を行う。分析方法としては、生徒の記述内容をフリーソフト

KHcoder [41]によってテキストマイニングし、そのデータもとに作成される共起ネットワークを使用した。共起ネットワークでは、対象とするテキストの中から頻繁に用いられる語句(抽出語)が抽出され、語句同士のつながりをもとに図 5.1.1-2 のような図が作成される。語句を囲む円が大きいほどその語句が頻繁に用いられていることを意味し、語句同士を結ぶ線が太いほどつながりが強いことを意味する。ここで、抽出語同士の距離はつながりの強さに関係しない。

(1)「鉄のボールが早く地面に着く」の回答理由

はじめに、3校ともに1番回答率が高かった「鉄のボールが早く地面に着く」の回答理由について、問1、問3それぞれを分析した結果を示す。問1（斜面を下る運動）において「鉄のボールが早く地面に着く」と答えた理由についてテキストマイニングした結果をF中学校、N中学校、S中学校の順に示す。図5.1.1-2に示すのはF中学校の生徒の記述内容をテキストマイニングして得られた共起ネットワークである。

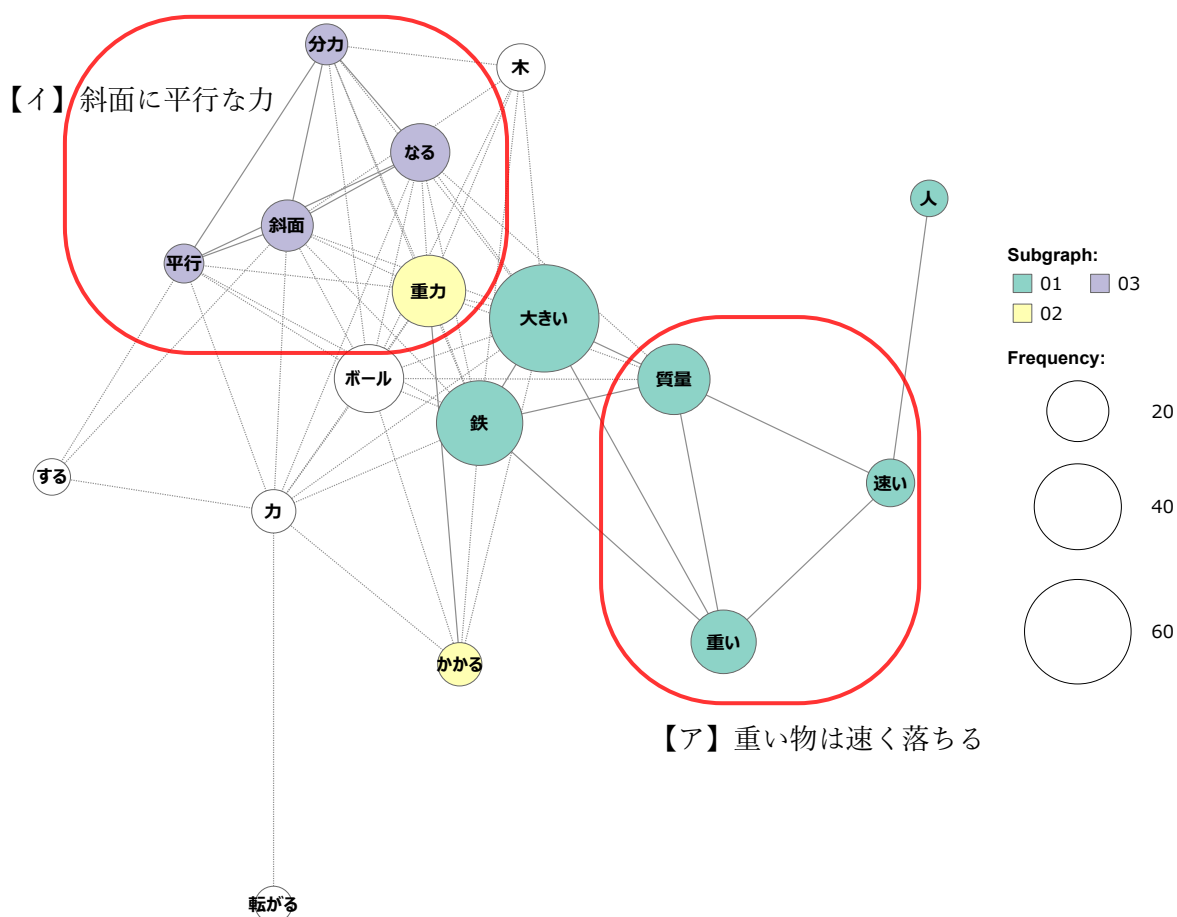


図 5.1.1-2 F 中学校 問1「鉄の方が早く地面に着く」の理由についての
共起ネットワーク（総抽出語数：952 語、最小出現頻度：7 語）

図 5.1.1-2 では『質量』と『大きい』につながりが見られる。記述内容をみると「質量が大きいから」とあり、質量が大きいと速いことを自明のことと捉えていると考えられる。これに関して、上図では『質量』、『重い』、『速い』につながり【ア】がある。記述内容をみると、「重い方が転がるのが速い」、「重い方が速く落ちる」といった記述が多くみられた。これより、振り子の運動（第 2 章）で紹介した児童らと同様に、「重い方が速く落ちる」といった**物は離すと落ちる (Released object falls)** と **オーム (Ohm)** の p-prim を組み合わせた思考をしたと考えられる。また、図 5.1.1-2 では『重力』と『分力』につながり【イ】がみられる。記述内容をみると「重力が大きいので、それを分解したときに斜面と平行な向きにかかる力が大きくなるから。」とあり、質量が大きいことから重力の大きさについてののみを考える生徒が多く、運動をはたらく力の大きさのみで考えていることが伺える。

次に、N 中学校の生徒の記述内容をテキストマイニングして得られた共起ネットワークを図 5.1.1-3 示す。図 5.1.1-3 では F 中学校と同様に『質量』、『重い』、『速い』につながり【ア】がみられる。記述内容も、F 中学校と同じような内容であった。これより、N 中学校でも「重い方が速く落ちる」といった**物は離すと落ちる (Released object falls)** と **オーム (Ohm)** の p-prim を組み合わせた思考をした生徒が多いことがわかった。また、図 5.1.1-3 では『質量』と『重力』につながり【ウ】がみられた。このことより、質量から重力を考える生徒が多いことがわかった。

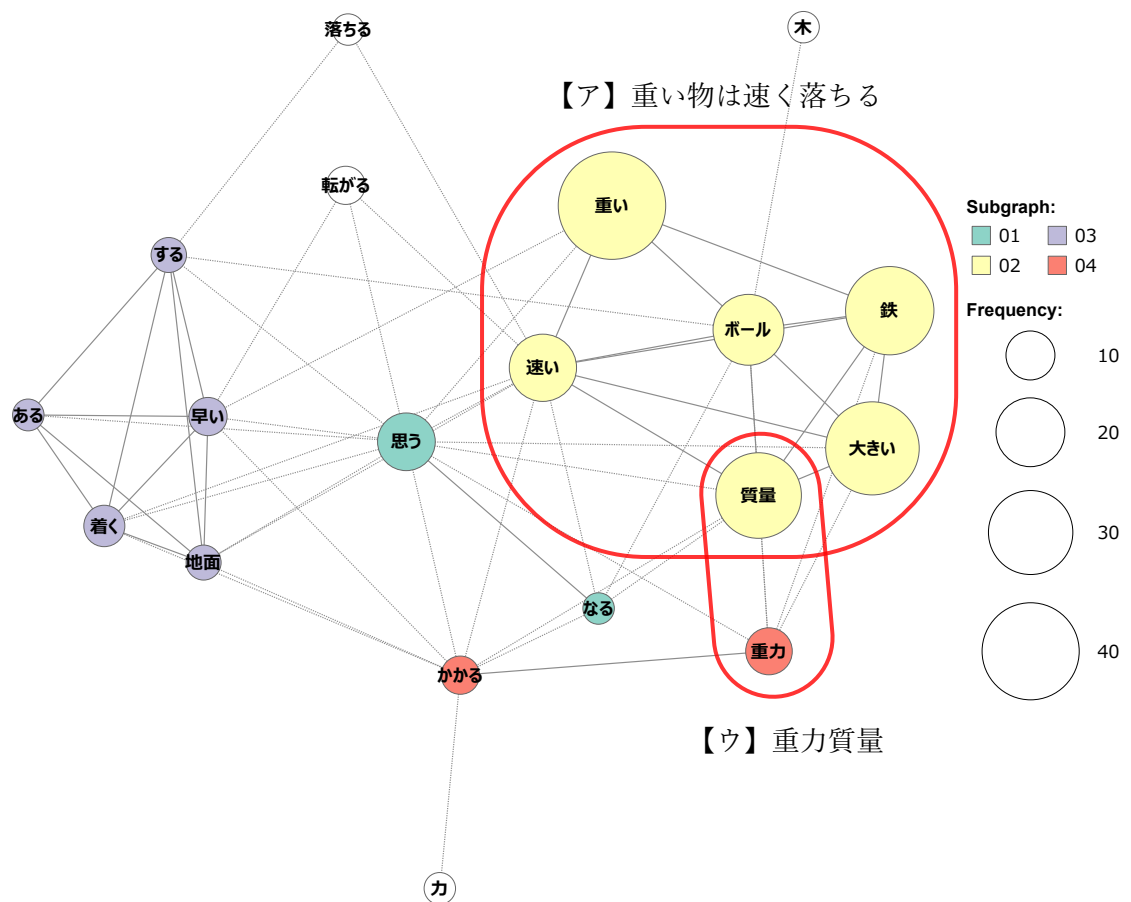


図 5.1.1-3 N 中学校「鉄の方が早く地面に着く」の理由についての
共起ネットワーク（総抽出語数：809 語，最小出現頻度：4 語）

次に，S 中学校の生徒の記述内容をテキストマイニングして得られた共起ネットワークを
図 5.1.1-4 に示す。図 5.1.1-4 では F 中学校，N 中学校と同様に『質量』，『重い』，『速い』
につながり【ア】がみられる。また，N 中学校と同様に『質量』と『重力』につながり【ウ】
がみられた。記述内容としても，F 中学校や N 中学校と大きく異なる特徴は見つからなか
った。

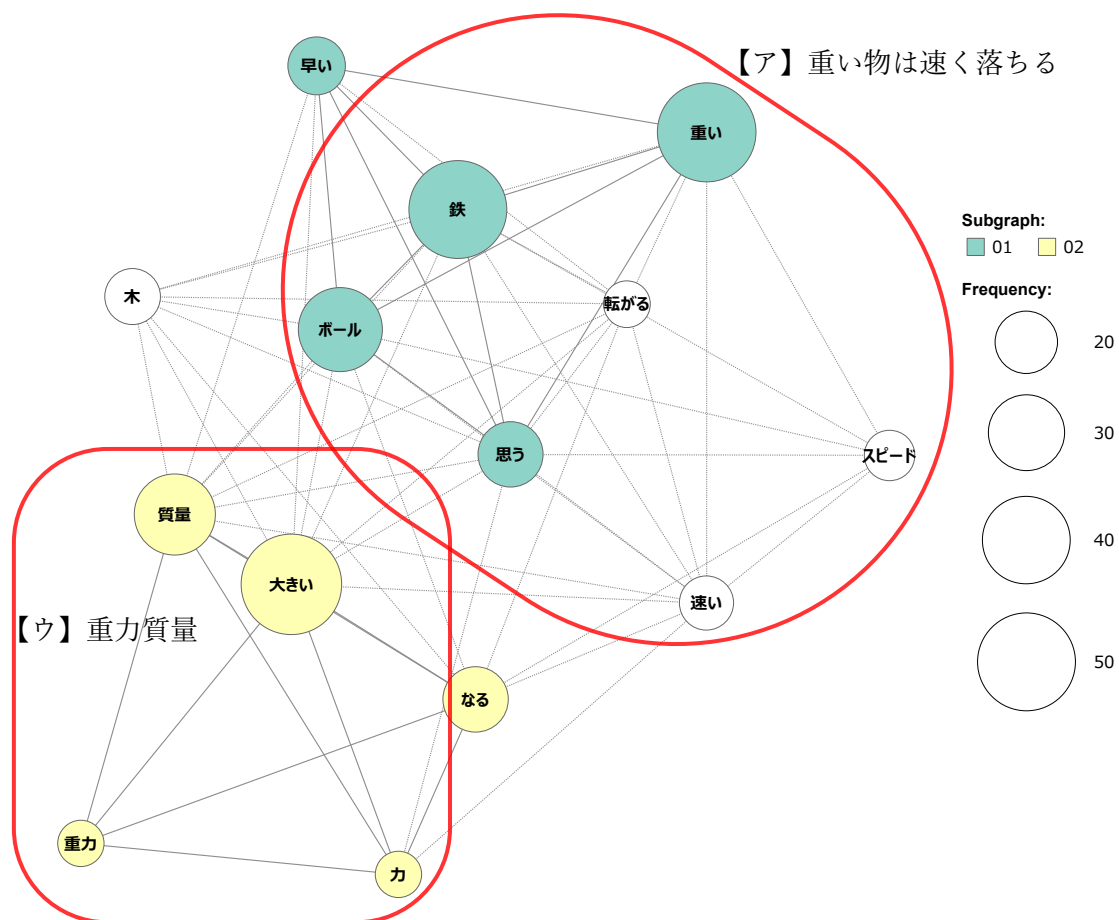


図 5.1.1-4 S 中学校「鉄の方が早く地面に着く」の理由についての
共起ネットワーク（総抽出語数：1337 語，最小出現頻度：11 語）

次に、問 3（自由落下運動）において「鉄のボールが早く地面に着く」と答えた理由について、テキストマイニングした結果を F 中学校，N 中学校，S 中学校の順に示す。図 5.1.1-5 に示すのは，F 中学校の生徒の記述をテキストマイニングして得られた共起ネットワークである。図 5.1.1-5 では、『質量』と『重力』、『質量』と『力』につながり【ウ】がみられた。実際の記述内容としては「鉄の方が質量が大きいため地面に向かおうとする力が強い」，「質量が大きいため、重みで下に落ちるスピードも速いと思った」といった発言がみられた。これより，生徒は重力や運動方向の力によってのみ運動を推測したと考えられる。また、『重い』と『早い』にもつながり【ア】がみられた。記述内容としては，単に「重いから早く地面に着く」と答えており，「重いものは速く落ちること」を自明のこととして捉えていると考えられる。N 中学校，S 中学校でもつながり【ア】，【ウ】が見られるなど同じような結果が得られ，記述内容にも大きな差は見られなかった。N，S 中学校の共起ネットワークも参考程度に図 5.1.1-6 に示す。

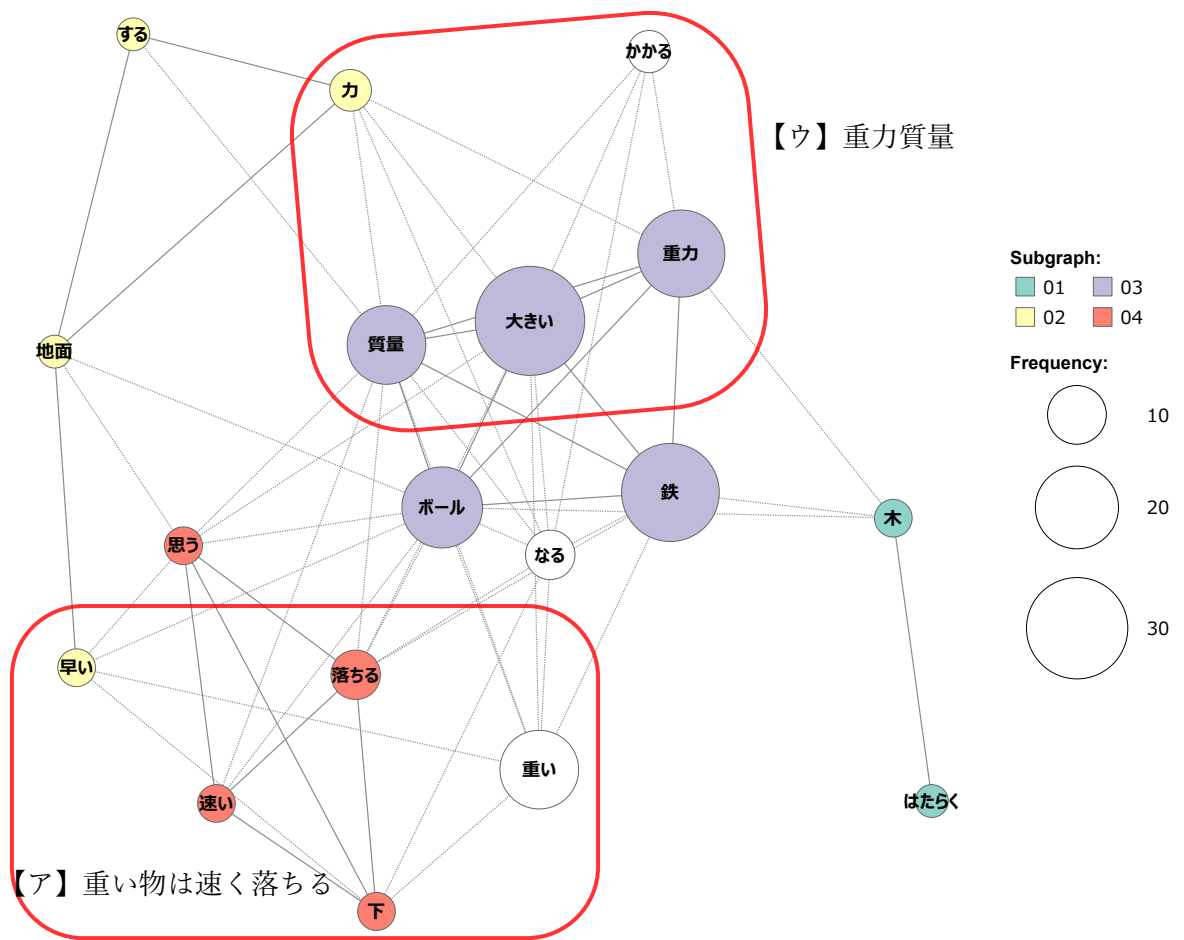


図 5.1.1-5 F 中学校 問3「鉄の方が早く地面に着く」の理由についての
共起ネットワーク（総抽出語数：532 語，最小出現頻度：3 語）

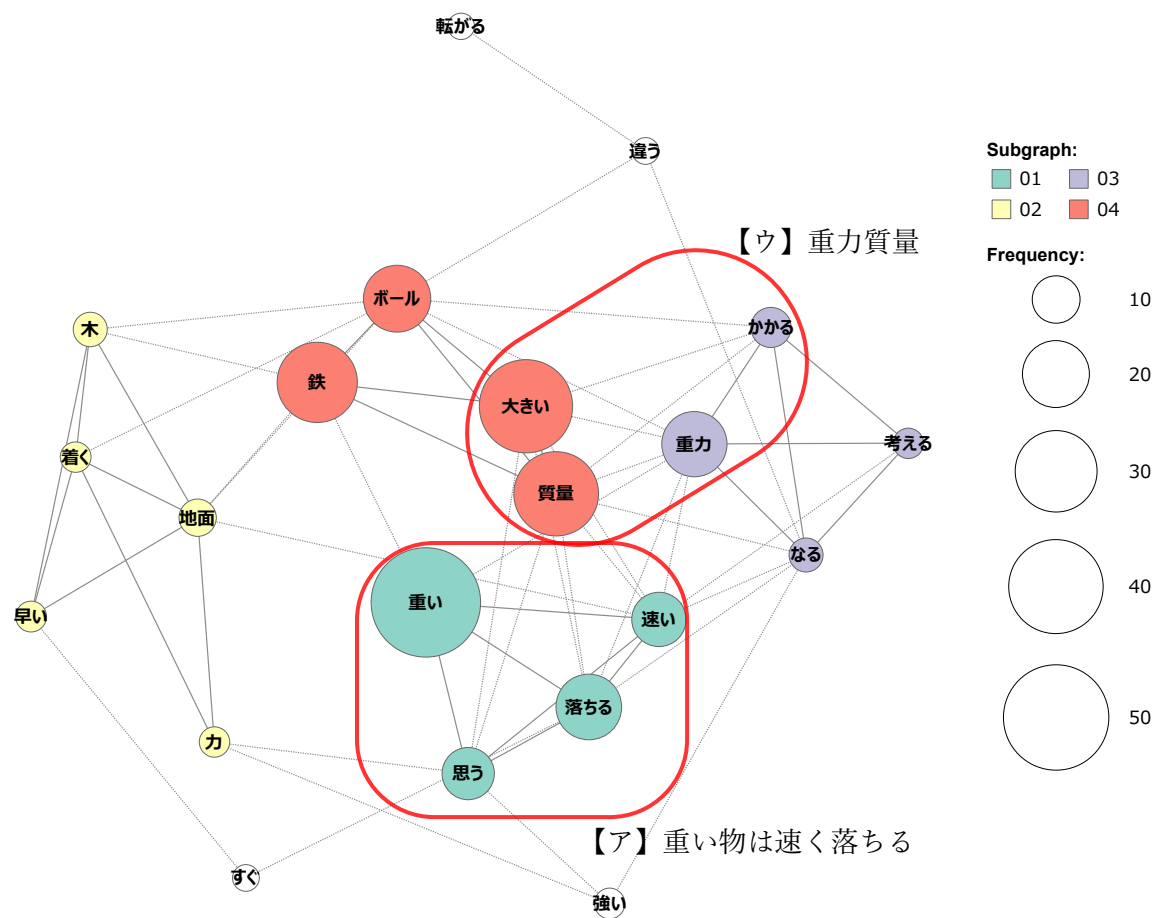


図 5.1.1-6 N 中学校 問3「鉄の方が早く地面に着く」の理由についての
共起ネットワーク（総抽出語数：860 語，最小出現頻度：3 語）

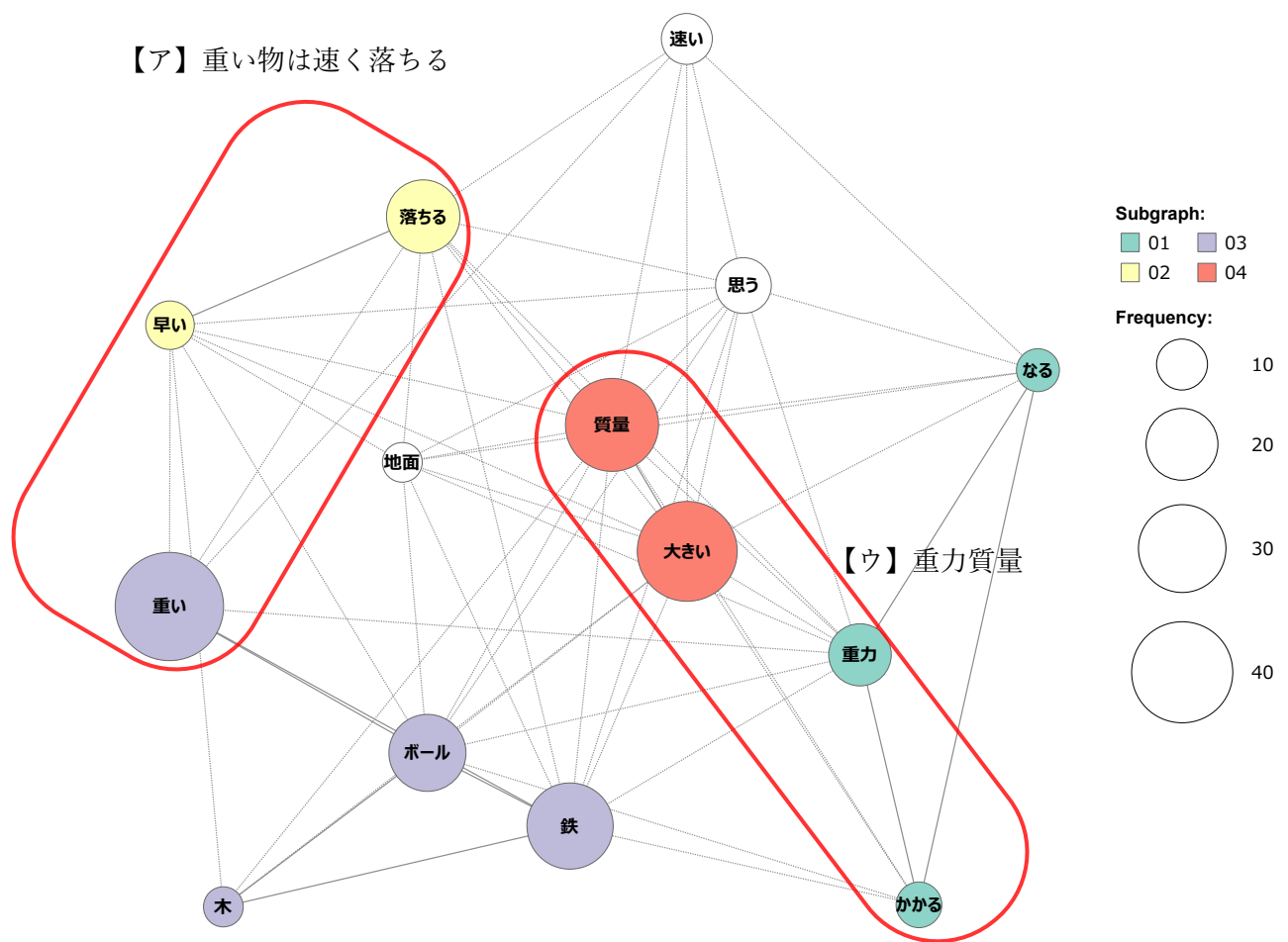


図 5.1.1-7 S 中学校 問3「鉄の方が早く地面に着く」の理由についての
共起ネットワーク（総抽出語数：938 語，最小出現頻度：6 語）

以上より，問1（斜面を下る運動）と問3（自由落下運動）において「鉄の方が早く地面に着く」を選択した理由記述の特徴をまとめる。

【ア】 「質量が大きい（重い）物は速く落ちる」ことを自明のこととして捉えている。
（※Released object falls と Ohm の p-prim を組み合わせた解釈。第2章参照。）

【イ】『質量』から『斜面方向の力』について考え，運動を力のみで解釈していた。

【ウ】『質量』から『重力』について考え，運動を力のみで解釈していた。

(2)「鉄と木は同時に地面に着く」の回答理由

正答「鉄と木は同時に地面に着く」の回答理由について、問1、問3それぞれを分析した結果を示す。問1において「鉄と木は同時に地面に着く」と答えた理由についてテキストマイニングした結果をF中学校、N中学校、S中学校の順に示す。図5.1.1-8に示すのは問1においてF中学校の生徒の記述内容をテキストマイニングして得られた共起ネットワークである。

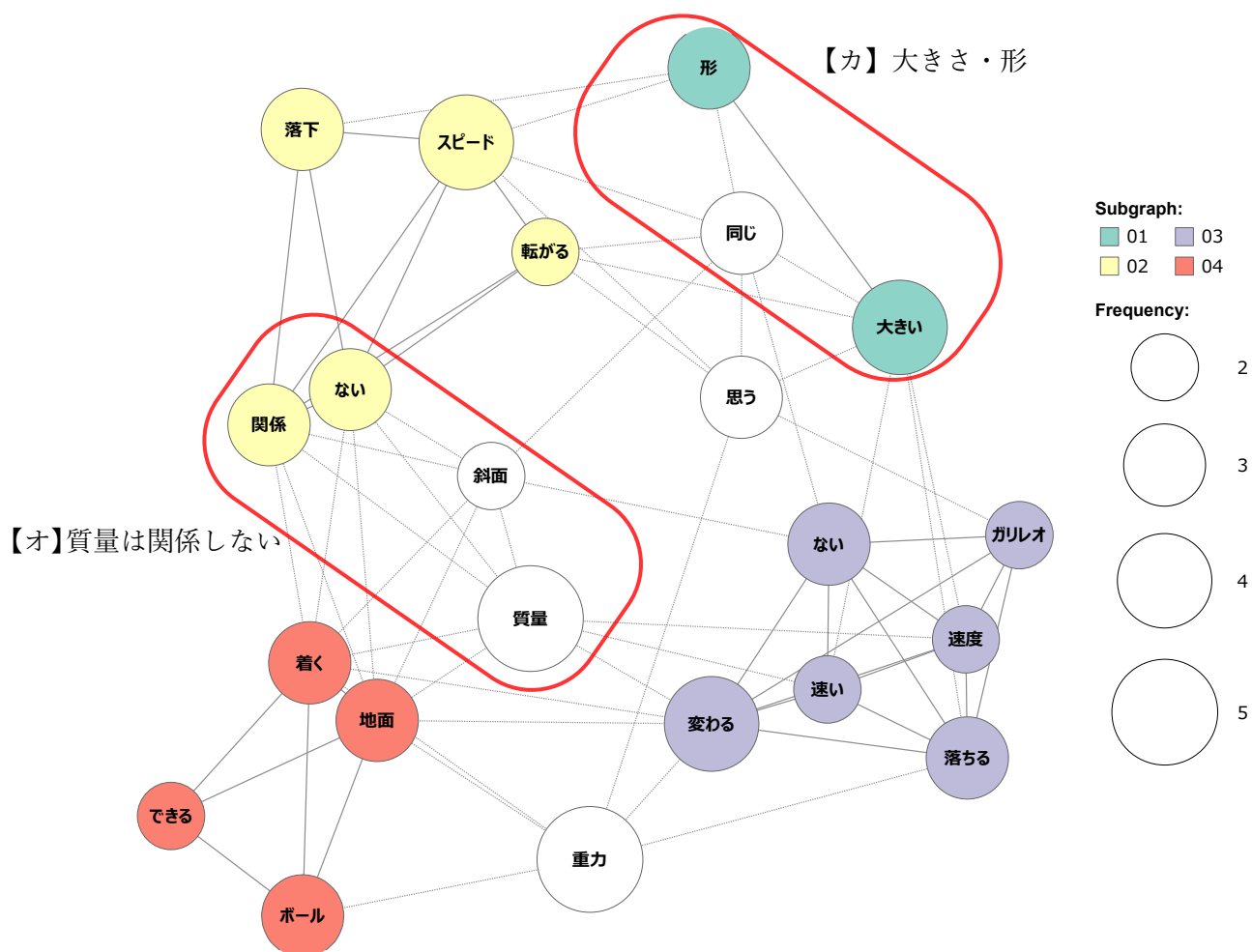


図 5.1.1-8 F 中学校問1「鉄と木は同時に地面に着く」の理由についての共起ネットワーク（総抽出語数：254 語，最小出現頻度：2 語）

図 5.1.1-8 では、『質量』と『関係（ない）』につながり【オ】が見られる。記述内容を見ると、「質量によって落ちるスピードは変わらない」といった記述が多かったが、なぜ関係ないのかその理由について言及しているものはなかった。また、回答理由に「直感。」と書いた生徒もいたことから、なんとなくそのような感覚をもっている生徒がいることがわかった。上図の『大きい』、『形』、『同じ』【カ】については、「大きさ・形が同じだから。」という記述が多かった。これは、問題文に引きずられた可能性もあるため、問題の提示の仕方

にも課題があると考えられる。また、上図では読み取りにくいですが、「2つのボールが受ける重力は同じだから。」といった誤った回答も見受けられた。また、ボールが斜面を下る運動を『落ちる』や『落下』といった言葉で表現しており、問1で「同時に地面に着く」を選んだ生徒は、斜面の運動と落下運動を同じように考えていることが考えられる。また、『ガリレオ』という言葉も抽出されたが、これについては次の問3で詳しく扱う。

N 中学校、S 中学校でも記述内容に大きな差は見られなかったが、『ガリレオ』という語句が頻出しなかった点では差が見られた。参考資料程度に、N、S 中学校の共起ネットワークを図 5.1.1-9 に示す。

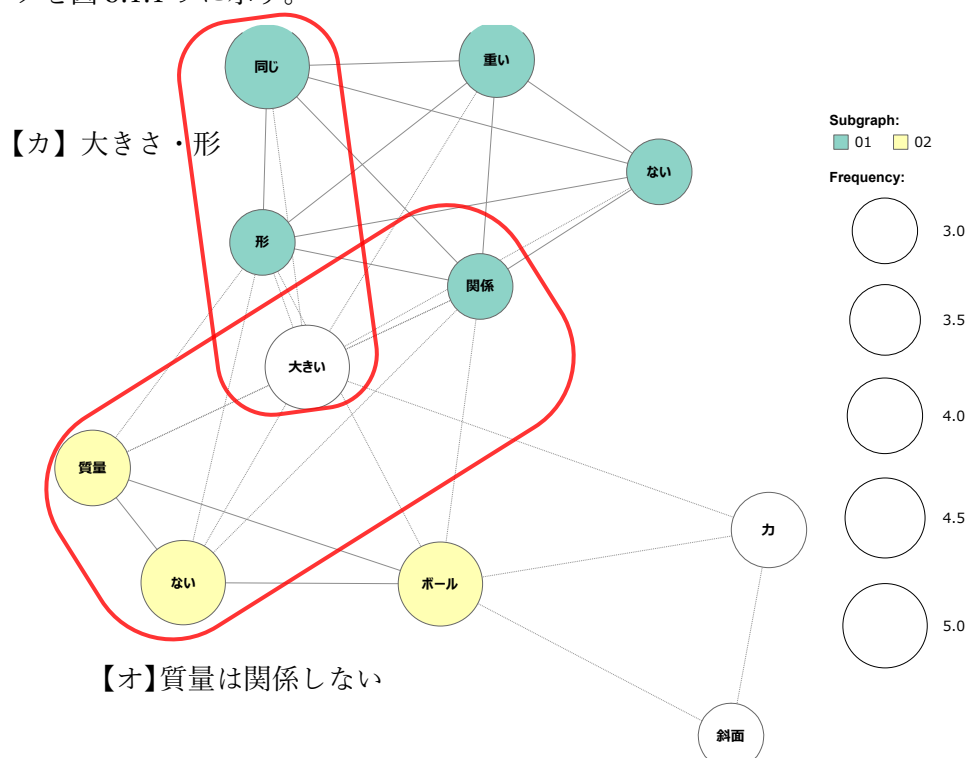


図 5.1.1-9 N 中学校問1「鉄と木は同時に地面に着く」の理由についての共起ネットワーク（総抽出語数：267 語，最小出現頻度：2 語）

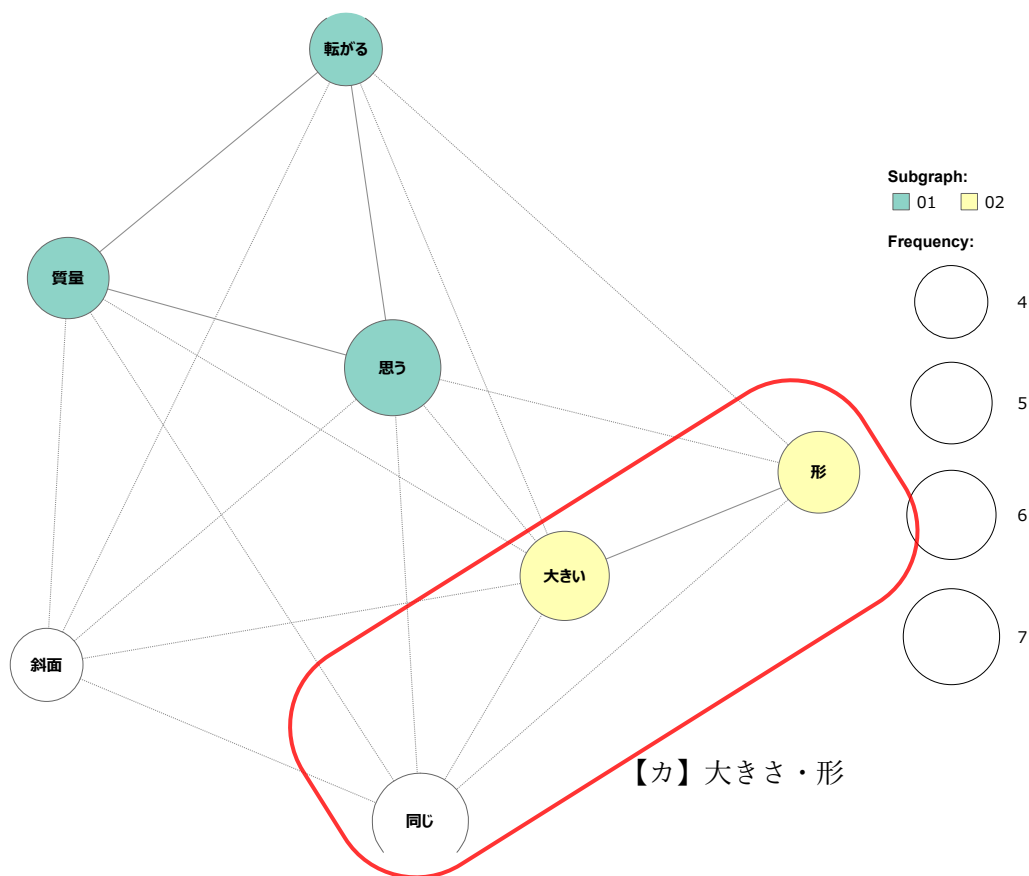


図 5.1.1-10 S 中学校問 1 「鉄と木は同時に地面に着く」の理由についての
共起ネットワーク（総抽出語数：225 語，最小出現頻度：4 語）

次に，問 3（自由落下運動）において「鉄と木は同時に地面に着く」と答えた理由について F 中学校の生徒の記述をテキストマイニングした結果を図 5.1.1-11 示す。図 5.1.1-11 では、『質量』と『関係（ない）』につながり【オ】が見られた。これは，実際の記述において単に「質量は関係ないから。」という理由が多かったことに起因していると考えられる。また，図より『質量』と『空気』，『抵抗』がむすびついている【キ】。実際には，「空気抵抗が同じだから。」や「空気抵抗がない場合は一緒に落ちる。」といった記述がみられた。斜面の運動においては空気抵抗についてはほとんど触れられなかったのにも関わらず，自由落下運動では空気抵抗を考慮する生徒が多いという結果となった。これより，自由落下運動において質量が異なる 2 物体が同時に落ちる現象は，空気抵抗がない特別な条件でないと成り立たないという認識があることが示唆される。また，『ガリレオ』という言葉も抽出されている。生徒の記述には「ガリレオの実験より，質量は落ちるスピードに関係ないと言ってた気がするから。」といった回答が見られ，ガリレオの実験をすでに知っており，それを根拠に回答したと考えられる。質量の異なる 2 物体が同時に落ちる理由までは分からないが，事実をそのまま受け入れて記憶していると考えられる。また，上図からは読み取りにくい，『重力』についての記述には，「重力は質量に関係なく同じようにかかると思うから。」や「ど

んな物でも重力は等しいから。」といった誤った解釈も見受けられた。これは、運動を力のみで説明しようとしたことが原因だと考えられる。

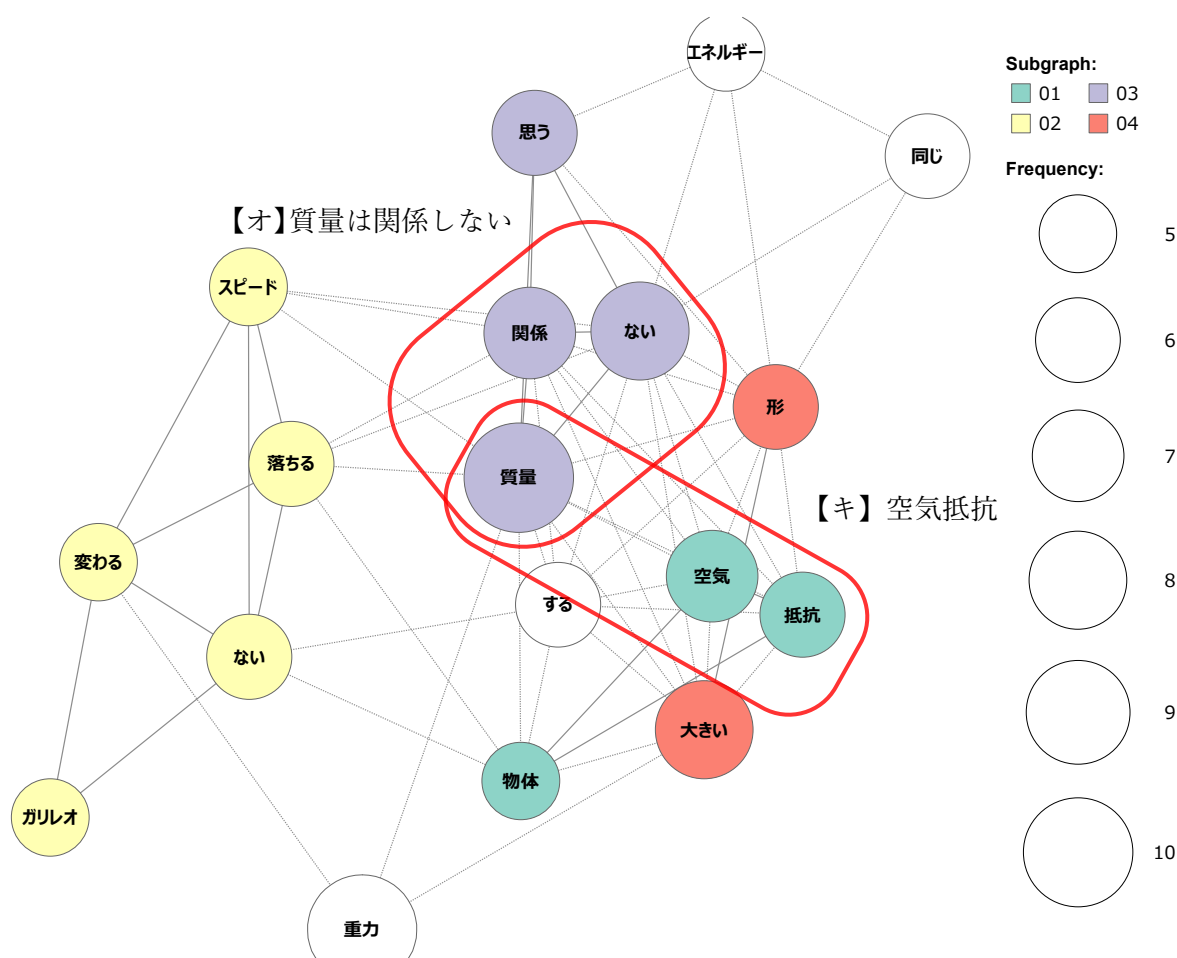


図 5.1.1-11 F 中学校 問3「鉄と木は同時に地面に着く」の理由についての共起ネットワーク（総抽出語数：539 語，最小出現頻度：5 語）

問3で「鉄と木は同時に地面に着く」と答えた生徒の記述内容について、N 中学校，S 中学校で大きな差は見られなかったが，若干の違いはあった。N 中学校の共起ネットワークを図 5.1.1-12，S 中学校の共起ネットワークを図 5.1.1-13 に示す。

図 5.1.1-12 に示した N 中学校の共起ネットワークでは，F 中学校の共起ネットワークに加えて、『重力』、『かかる』、『一緒』につながり【ク】が見られる。記述内容としては F 中学校と同様に，「重力は質量に関係なく同じようにかかると思うから。」や「どんな物でも重力は等しいから。」といった誤った解釈が見受けられた。

図 5.1.1-13 に示した S 中学校でも他の 2 校に見られた【オ】や【キ】のつながりが見られ，記述内容も同様のものがあつた。あえて特徴を挙げるとするなら，N 中学校では『高い』

が頻出後として現れた。記述内容としては、「同じ高さから落としたから同時に落ちる」というものが多かった。

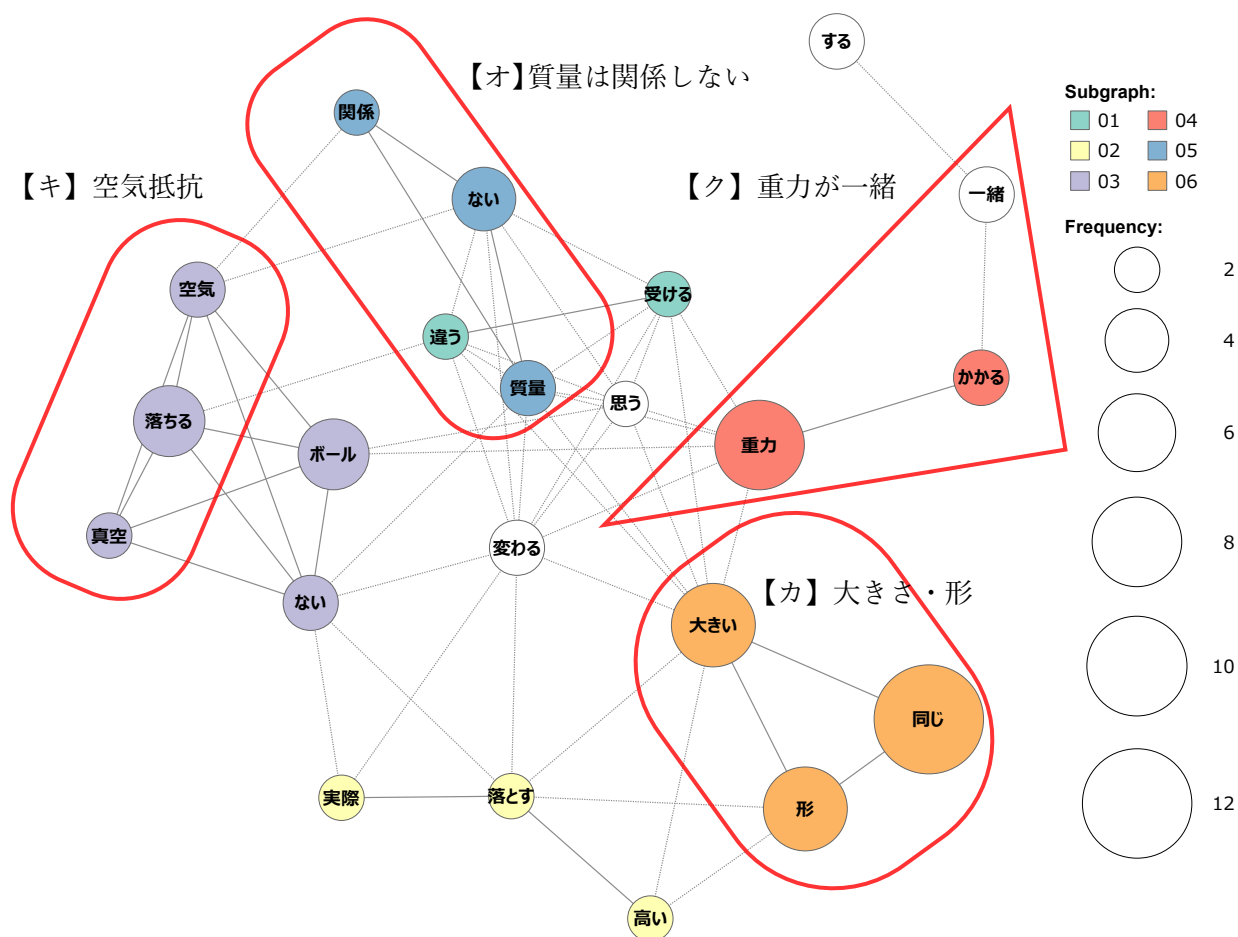


図 5.1.1-12 N 中学校 問3「鉄と木は同時に地面に着く」の理由についての共起ネットワーク（総抽出語数：315 語，最小出現頻度：2 語）

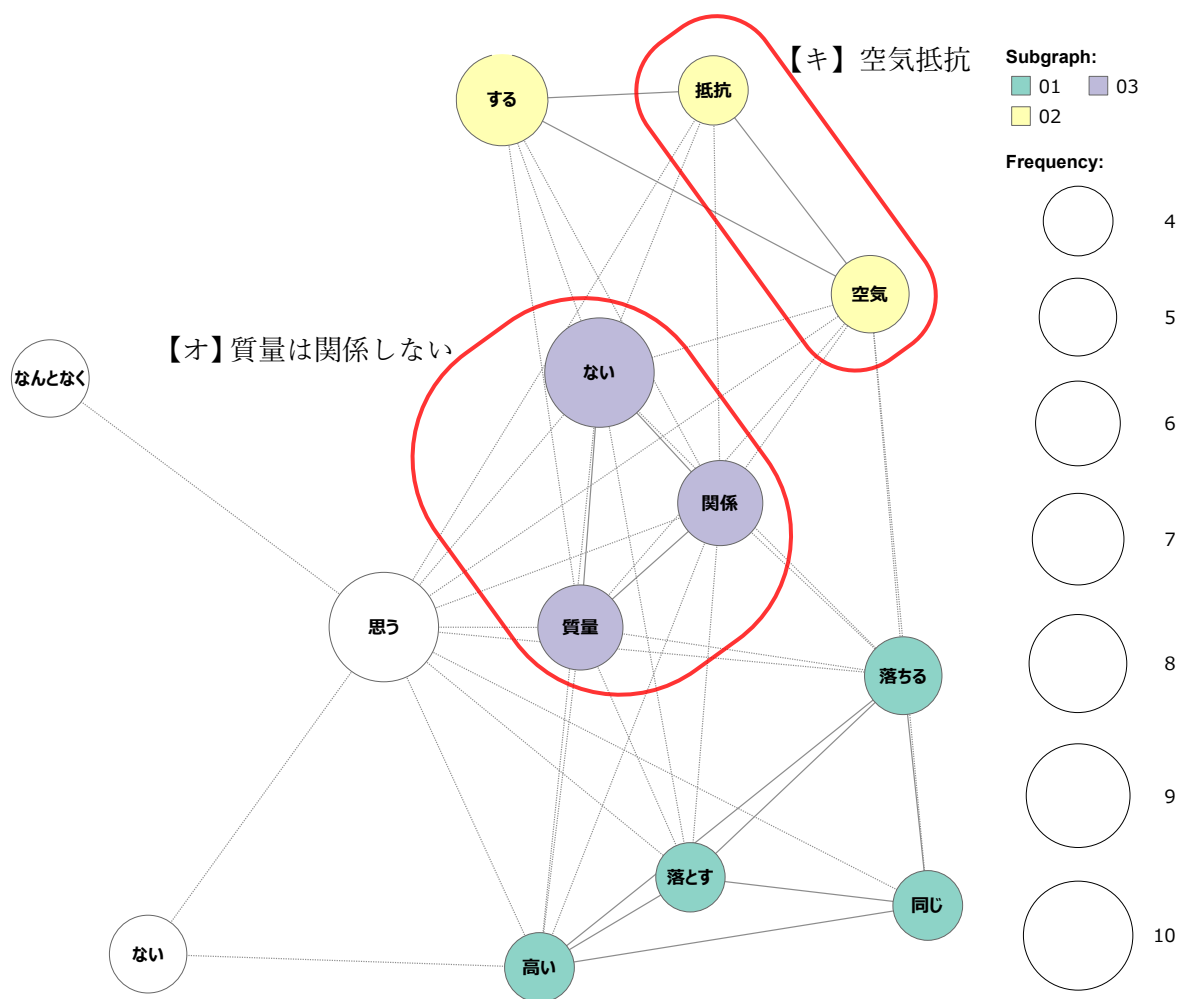


図 5.1.1-13 S 中学校 問3「鉄と木は同時に地面に着く」の理由についての
共起ネットワーク（総抽出語数：406 語，最小出現頻度：4 語）

以上より，問1と問3において「鉄も木も同時に地面に着く」を選択した理由記述の特徴をまとめる。

- 【オ】『質量』が関係しないことは知っているが，その理由までは言及していない。
- 【カ】大きさ・形が同じならば落下スピードも同じと考えていた。
- 【キ】問3自由落下運動では，空気抵抗について言及していた。
- 【ク】「重力が等しいから」という誤った解釈があった。
- 【その他】ガリレオの実験を根拠に回答していた。

最後に，「木の方が早く地面に着く」と回答した理由についてみていく。この選択肢を選んだ生徒は少なく，1 番回答率が高かったのは S 中学校の問1（斜面を下る運動）で 16.5% であった。このため，S 中学校の問1に限りテキストマイニングした結果を図 5.1.1-14 に示し，他の 2 校については代表的な記述をいくつか取り上げる。

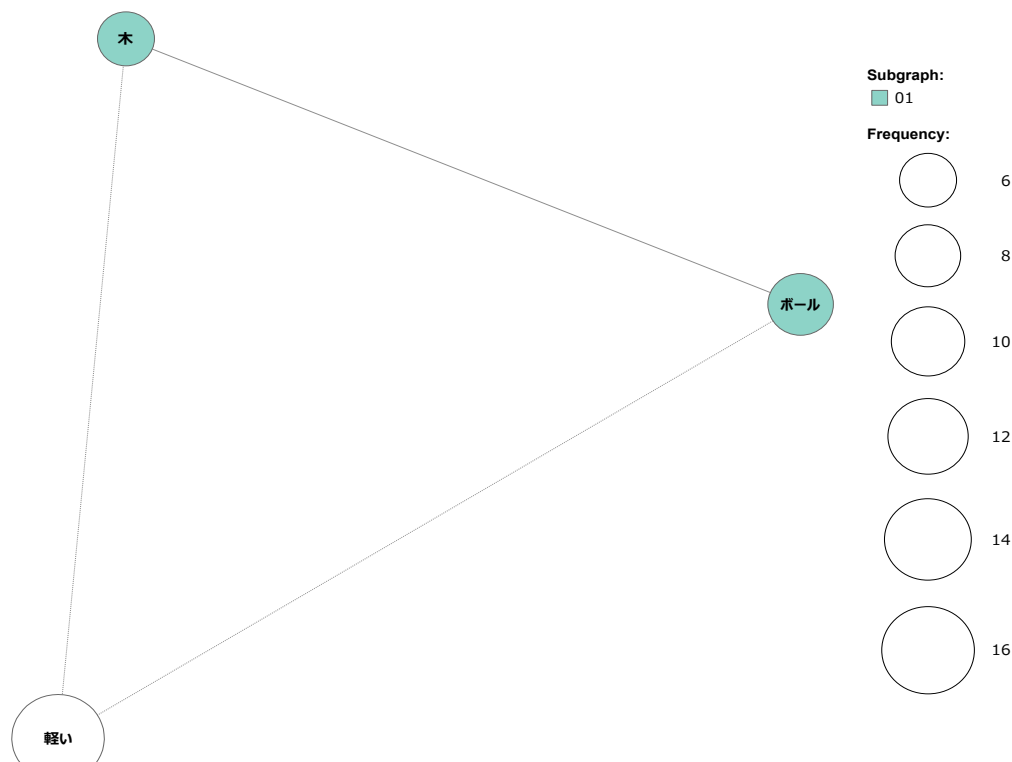


図 5.1.1-14 S 中学校 問 1 「木の方が早く地面に着く」の理由についての
共起ネットワーク（総抽出語数：226 語，最小出現頻度：5 語）

テキストマイニングするまでもなく，回答理由としては単に「軽いから。」という記述が多かった。これは，軽い物は速く転がる（運動する）ことを自明のこととしてとらえているからであると考えられる。p-prim の観点から分析すると，“**内在的抵抗**”が活性化したためである可能性が考えられる。これは，本研究で活性化を狙った p-prim である。F 中学校，N 中学校で「木の方が早く地面に着く」を選んだ生徒の記述内容も以上のようなものであり，大きな差は見られなかった。

以上より，どの学校でも慣性質量的な選択肢である「（質量が小さい）木の方が速く落ちる」を選んだ生徒は少なく，「同時に落ちる」と答えた生徒の中にも慣性質量に関する記述はほとんど見られなかった。これより，どの学校の生徒も，斜面の運動や自由落下運動という現象に出会った際，「重い方が動きにくい」ことを意味する p-prims である“**内在的抵抗**”を活性化させにくいと考えられる。

また，正しい選択肢である「同時に地面に着く」を選んでいる生徒はいたものの，その根拠は曖昧であったり間違っていたりした。その特徴としては，真空など特別な状況だけでしたか成り立たないと考えている，「ガリレオが言ったから」ということ以上は考えられずそういう現象として記憶していることが挙げられる。さらに，質量が違っても重力が同じだから一緒に落ちたという誤った解釈をしている生徒もいることが明らかとなった。

5.1.2 事後調査の結果と考察

事後アンケートの回答人数は、F 中学校 81 名、N 中学校 119 名、S 中学校 156 名であった。事後アンケートは選択肢を設けず、こちらが提示した現象（例：木のボールと鉄のボールを同じ高さから同時に離すと、同時に地面に着いた）に対する説明を記述する形式とした。このため、事前アンケートと比べて記述内容にどのような変化があったか質的な分析を行うこととする。本実践の目的は生徒が慣性質量に着目できるようになることであったため、「慣性質量に関する記述があるか」を基準として分析する。ここでは、「重い物は動きにくい」や「重い物は動かすのに大きな力（労力、エネルギー）が必要である」といった記述を慣性質量に関する記述であるとみなした。ここで慣性質量に関する問いは、問 2 の自由落下運動と問 3 の振り子の運動である。問 1 は慣性質量とは関係がないのでここでは扱わない。

はじめに、慣性质量的な記述をした生徒の割合について述べる。表 5.1.2 には、各校の慣性质量的な記述をした生徒の割合を示す。介入を行った F 中学校では問 2（自由落下）で 55.2%、問 3（振り子の運動）で 31.3%であった。介入を行わなかった N 中学校、S 中学校では問 2、問 3 ともに 0%であった。この 2 校では、事前調査で慣性质量的な記述をしていた生徒も事後調査では慣性质量的な記述をしなかった。これは、「同時に落ちた」という状況設定をしたため、「軽い物は速く動く」ことだけでは説明がつかず、状況に対する補足の説明ができなかったためだと考えられる。介入効果については、F 中学校では事前調査の自由落下の問いにおいて慣性质量的な記述をした生徒は 2.4%であったことより、一定の効果があったと考えられる。

表 5.1.2 慣性质量的な記述をした生徒の割合

	問 2 自由落下運動	問 3 振り子の運動
F 中学校	55.2%	31.3%
N 中学校	0%	0%
S 中学校	0%	0%

次に、問 2 と問 3 について記述内容について質的な分析を行う。事前アンケートと同様に記述内容をテキストマイニングし、共起ネットワークにより出現頻度の高い語句（抽出語）と、抽出語同士のつながりの強さについて分析する。問 2、問 3 それぞれの分析結果を F 中学校、N 中学校、S 中学校の順に示す。

問 2 (自由落下運動)について、介入を行った F 中学校生徒の記述内容をテキストマイニングして得られた共起ネットワークを図 5.1.2-1 に示す。

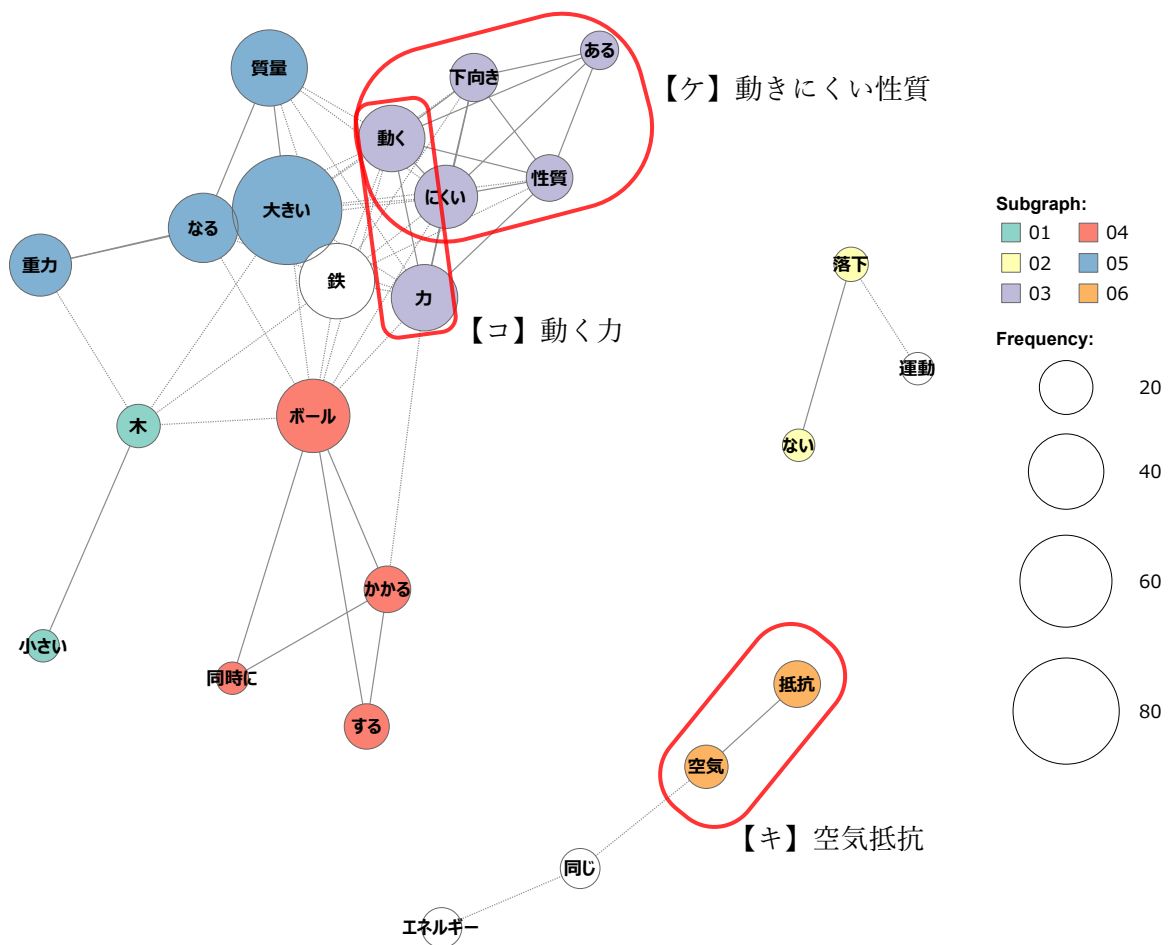


図 5.1.2-1 F 中学校 問2 自由落下運動（総抽出語数：1667 語，最小出現頻度：7 語）

図 5.1.2-1 では、『動く』、『にくい』、『性質』につながり【ケ】がみられ、これらが『力』や『質量』とつながっていた。実際の記述内容は、「鉄の方が重力が大きくなるが、その分動きにくいという性質も強くなるから。」「鉄球の方が下向きの力は大いだが、その分動きにくくなる性質があるから。」「質量が大きいほど動きにくいという性質をもち、鉄の方が下向きへの力は大いだが、その分動きにくいから。」というものであった。p-prim の観点から分析すると、**内在的抵抗**が活性化した結果であると解釈できる。これは、事前アンケートには見られなかった記述であり、学習を通して得られた思考であると考えられる。また、図 5.1.2-1 では『動く』と『力』につながり【コ】が見られる。実際の記述内容としては、「質量が大きいとかかる重力は大いだが、運動するために必要な力も大きくなる。」「平らな地面でボールを転がす実験から、質量が大きい物質を動かすためには、より大きな力が必要だとわかったから。」などといった記述が見られた。このように、F 中学校では**内在的抵抗**が活性化したとみられる、慣性質量的な発言が見受けられた。しかし、『空気』や『抵抗』といった語句も抽出されており【キ】、実際の記述内容を見ると、事前アンケートと同様に「自

由落下では空気抵抗がないなら、物体の質量は関係ないから。」と答えた生徒もいた。ただし、事後アンケートでは「木のボールにかかる空気抵抗は小さく、鉄のボールにかかる空気抵抗は大きく、その空気抵抗によって同時に地面に落ちた。」という記述も見受けられ、重力大きさの差をカバーする何かとして空気抵抗を当てはめた生徒が多かった。これは、「重い物の方が動きにくい」という現象を、物体がもつ内在的な抵抗ではなく、外側からの抵抗がはたらいたためであるという思考に還元した結果だと考えられる。これより、『空気』と『抵抗』という同じ語句が抽出されたものの、事前アンケートとは質的に異なる思考をしたことがわかる。

介入を行わなかった N 中学校では図 5.1.2-2 のような結果となった。

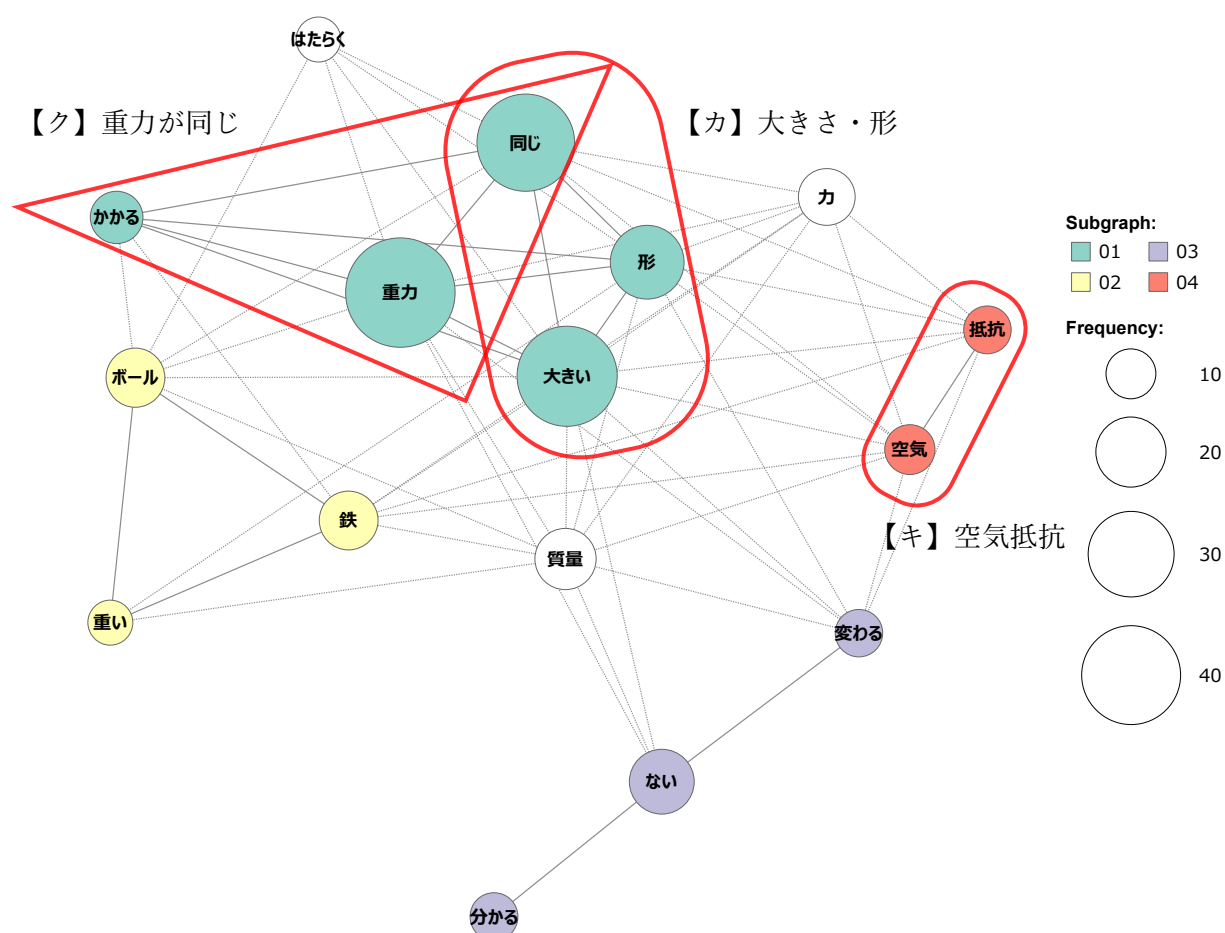


図 5.1.2-2 N 中学校 問2 自由落下運動（総抽出語数：1146 語，最小出現頻度：8 語）

図 5.1.2-2 では、『かかる』、『重力』、『同じ』につながり【ク】が見られた。記述内容としては、「両方のボールにはたらく重力が同じだから。」「質量が違ってても重力が同じなので同時に地面に着く。」といったものがあり、事前アンケートと同様に、運動を力のみで考えて誤った思考に陥ったと考えられる。『空気』と『抵抗』【キ】に関しては、「物体は空気抵抗

によって落下速度が変わるため、空気がなければ同じ速さで落ちる。」「空気の抵抗が同じだから。」といった記述がみられ、自由落下は空気が無い特別な状況でないとなり立たないと考える生徒や、なんとなく空気抵抗が関与していそうだと考える生徒が多かった。N 中学校では慣性質量的な記述は見当たらなかった。

介入を行わなかったもう 1 校の S 中学校では図 5.1.2-3 のような結果となった。事前アンケートと似たような意見が多く、単に質量は関係ない【オ】と答えたり、空気抵抗がないから【キ】と答えたりする生徒が多かった。また、問題文を無視して「重い鉄方が落ちるのが速い」【ア】と答える生徒もみられた。事前アンケートにはなかった特徴としては、『エネルギー』という言葉が抽出された【サ】点である。実際の記述内容としては、「位置エネルギーが同じだから。」というものが多く、誤った思考をしていた。エネルギーで考えた原因としては、エネルギーを学習した直後に事後アンケートを取ったことが影響していると考えられる。S 中学校についても、N 中学校と同様に慣性質量的な記述は見当たらなかった。

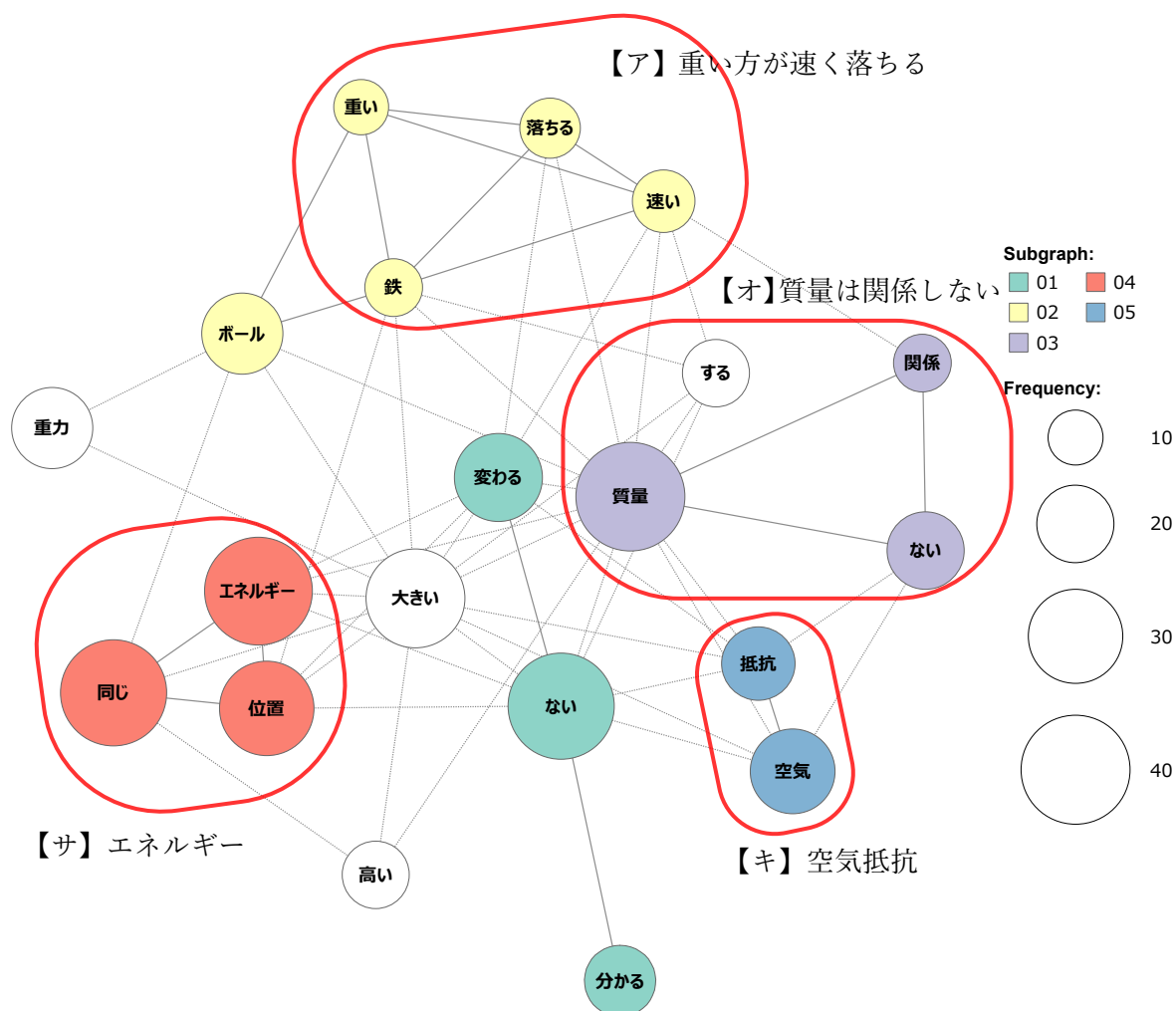


図 5.1.2-3 S 中学校 問 2 自由落下運動（総抽出語数：1562 語，最小出現頻度：10 語）

各校の特徴についてまとめると、以下のようになる。介入群はF中学校、対照群はN、S中学校であり、事後アンケート実施のタイミング（詳しくは第4章に記載）としては、N中学校のみ自由落下の学習後、F中学校とS中学校ではエネルギーの学習後に実施した。

F 中学校

- 【キ】空気抵抗について言及していたが、事前アンケートと捉え方が異なっていた。
- 【ケ】動きにくい性質という表現があった。
- 【コ】動かすのに必要な力という表現があった。
- 【サ】エネルギーについて言及していた。

N 中学校

- 【カ】大きさ・形が同じならば落下スピードも同じと考えていた。
- 【キ】空気抵抗について言及していた。
- 【ク】「重力が等しいから」という誤った解釈があり、運動を力のみで解釈したことが考えられる。

S 中学校

- 【ア】「質量が大きい（重い）物は速く落ちる」ことを自明のこととして捉えている。
- 【オ】『質量』が関係しないことは知っているが、その理由までは言及していない。
- 【キ】空気抵抗について言及していた。
- 【サ】エネルギーについて言及していた。

次に、問3(振り子の運動)について、介入を行ったF中学校生徒の記述内容をテキストマイニングして得られた共起ネットワークを図5.1.2-4に示す。図5.1.2-4では、『動く』と『にくい』には強いつながり【ケ】がみられ、これが『質量』や『力』とつながっている。記述内容を見ると、「質量の大きい鉄のおもりの方が下向きの力は大きいが、その分動きにくいという性質があるからから。」「問2(自由落下運動)と同じで、鉄の方が左右の向きの力は大きいが、その分動きにくいから。」といった記述がみられた。また、『動く』と『力』につながり【コ】がみられ、自由落下の文脈と同様に振り子の文脈でも慣性質量的な発言が見受けられた。しかしながら、慣性質量に着目できなかった生徒も多く、つながり【オ】では「周期に質量は関係ないから。」という説明で済ませたり、つながり【サ】ではエネルギーによって説明したりしていた。特に振り子の運動の文脈では位置エネルギーと運動エネルギーの和が一定であることを根拠に答える生徒が多く、直前に学習したエネルギーの学習の影響が大きいことが伺える。

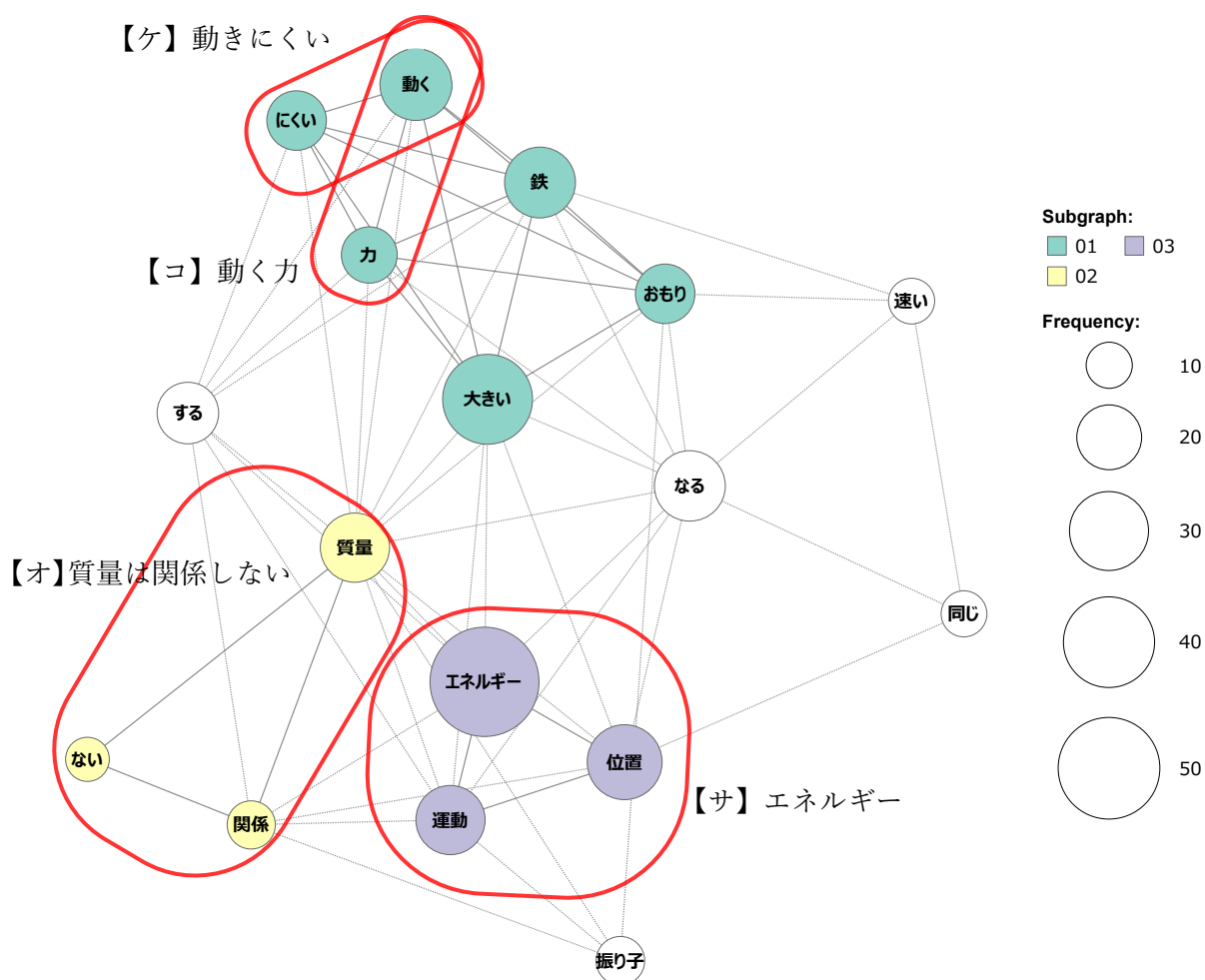


図 5.1.2-4 F 中学校 問3 振り子の運動 (総抽出語数：1463 語，最小出現頻度：9 語)

介入を行わなかった N 中学校では図 5.1.2-5 のようになった。N 中学校の事後調査は、自由落下運動を学習した直後に行った。図 5.1.2-5 では、『力』や『重力』と『同じ』につながり【ク】が見られる。記述内容としては、「両方同じ力がはたらいているから。」「大きさ・形が同じならば、はたらく力は等しいから。」といった誤った解釈が見られた。これは自由落下の問いでも見られた思考である。また、『質量』、『関係』、『ない』につながり【オ】が見られ、それが『ひも』、『長い』、『変わる』【シ】につながっていた。実際の記述内容をみると、「周期はひもの長さによって決まり、質量は関係ない。」と答えた生徒が多かった。これは、小学 5 年生で学習した振り子の運動の実験結果を覚えているためであると予想できる。また、『大きい』、『形』、『同じ』にもつながり【カ】がみられ、単に「大きさ・形が同じだから。」と答えた記述も多かった。N 中学校では、慣性質量に関する記述はなかった。

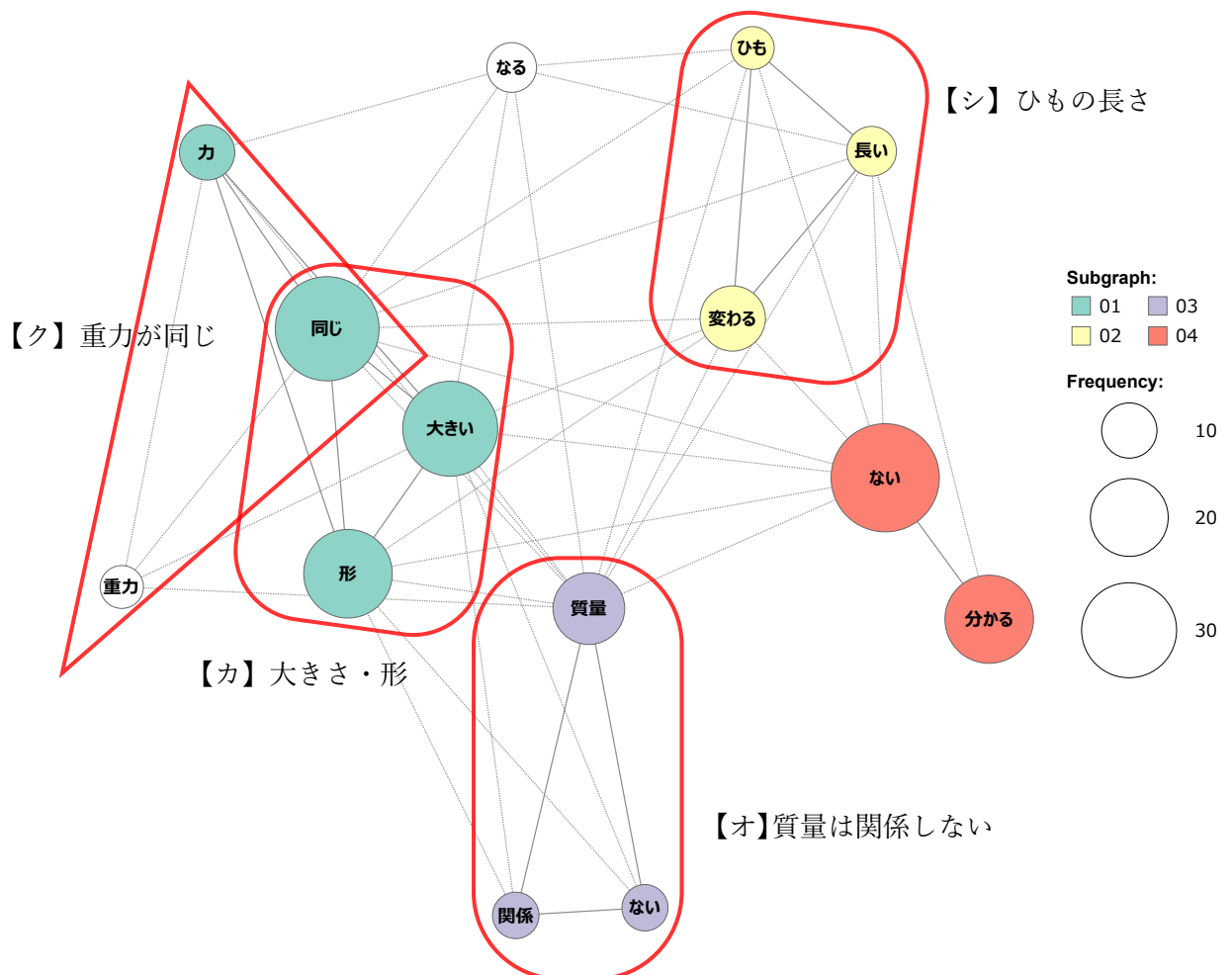


図 5.1.2-5 N 中学校 問3 振り子の運動（総抽出語数：899 語，最小出現頻度：6 語）

介入を行わなかった S 中学校では図 5.1.2-6 のようになった。S 中学校の事後テストは、F 中学校と同様にエネルギーを学習した後に行った。図 5.1.2-6 では『位置』、『運動』、『力学』、『エネルギー』、『同じ』につながりが見られた。実際の記述内容としては、力学的エネルギー保存則を根拠に説明するものが多かった。P-prim の観点から分析すると、**抽象的つり合い (Abstract balance)** が活性化した結果だと考えられる。さらに、振り子の運動について何でも力学的エネルギー保存則を用いて説明するのは、授業で習ったことをなんとなく記憶しており、違う文脈でもそれを適用してしまっただと考えられる。また、N 中学校と同様に、『質量』、『関係』、『ない』につながり【オ】が見られ、それが『ひも』、『長い』、『変わる』【シ】につながっていた。また、空気抵抗がないから【キ】と答える生徒も多かった。

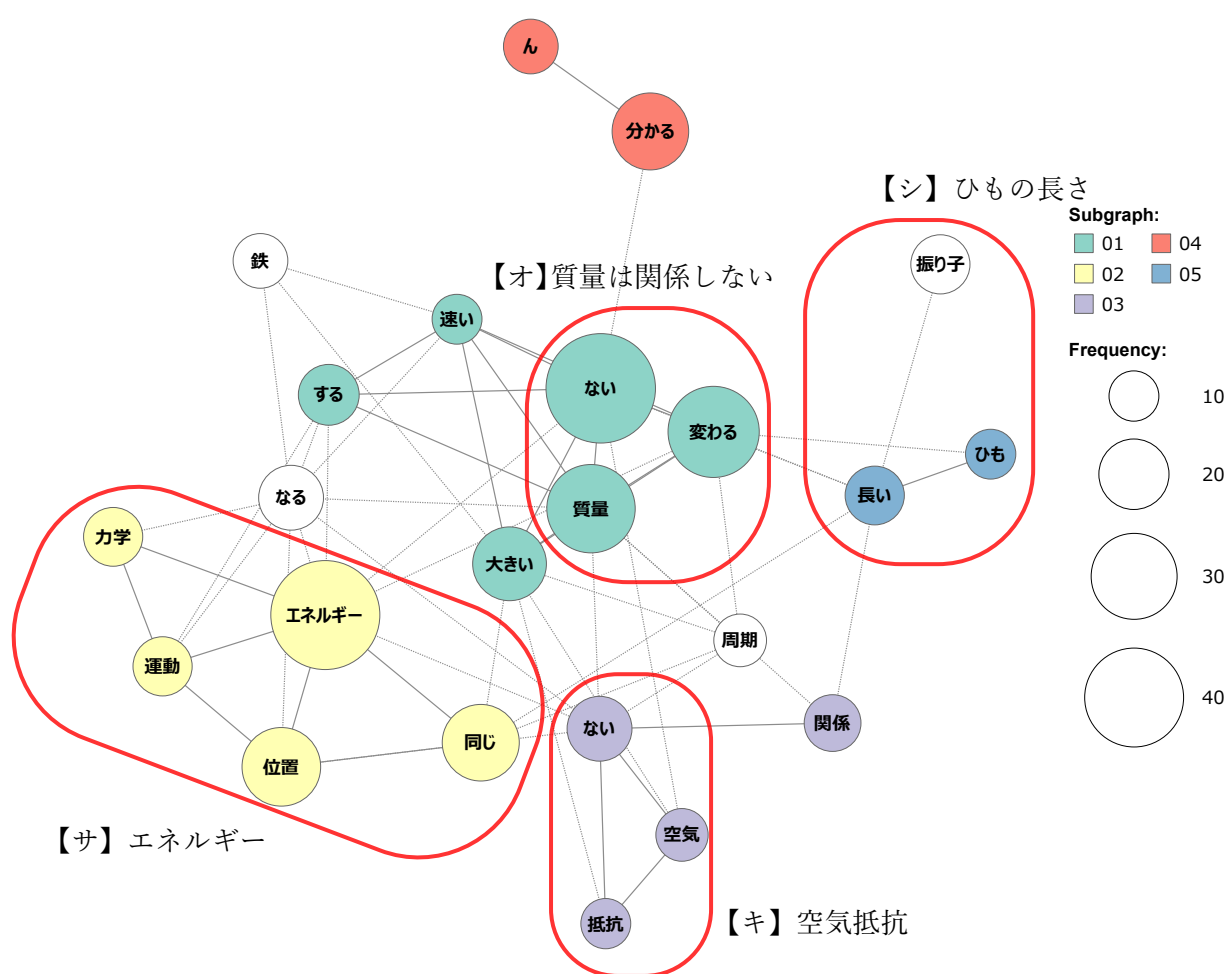


図 5.1.2-6 S 中学校 問 3 振り子の運動 (総抽出語数：1492 語，最小出現頻度：10 語)

各校の特徴についてまとめて以下に示す。ここで、介入群は F 中学校，対照群は N，S 中学校であり，事後アンケートのタイミングは，N 中学校のみ自由落下の学習後であり，F 中学校と S 中学校はエネルギーを学習した後に実施した。

F 中学校

【オ】『質量』が関係しないことは知っているが、その理由までは言及していない。

【ケ】動きにくい性質という表現があった。

【コ】動かすのに必要な力という表現があった。

【サ】エネルギーについて言及していた。

N 中学校

【オ】『質量』が関係しないことは知っているが、その理由までは言及していない。

【カ】大きさ・形が同じならば落下スピードも同じと考えていた。

【ク】「重力が等しいから」という誤った解釈があり、運動を力のみで解釈したことが考えられる。

【シ】「振り子の周期はひもの長さによって決まる」とだけ記述していた。

S 中学校

【オ】『質量』が関係しないことは知っているが、その理由までは言及していない。

【キ】空気抵抗について言及していた。

【サ】エネルギーについて言及していた。

【シ】「振り子の周期はひもの長さによって決まる」とだけ記述していた。

事後アンケート実施のタイミングが同じ F 中学校と S 中学校を比べると、F 中学校では「動きにくい性質」や「動かすのに必要な力」について言及して慣性質量的な記述をしていたが、S 中学校では見られなかった。S 中学校では、単に「空気抵抗がないから」と回答したり、「振り子の周期はひもの長さによって決まる」とだけ記述したりしている生徒が多かった。2 校の共通点としては、「質量は関係ない」とだけ回答している生徒や、力学的エネルギーを根拠に回答した生徒がいることである。これより、力学的エネルギー保存の法則の授業を適切に理解しておらず、誤って適用してしまう生徒の存在が明らかとなった。N 中学校では、エネルギーを学習する前に実施しているためか、エネルギーに関する記述は見受けられなかった。しかし、「重力が等しいから」という誤った解釈があり、第 4 章で指摘した通常授業の課題がここではっきりと示された。

次に、学習前の思考が同じ生徒の思考の比較するため、事前アンケート問3自由落下の問いにおいて、正答の「同じ」を選んだ生徒を対象として、各校の事後アンケートの記述内容について、共起ネットワークを用いて分析する。

はじめに、F中学校生徒の記述内容の共起ネットワークを図5.1.2-7に示す。この共起ネットワークでは、『質量』が『動く』、『にくい』、『性質』とつながっており【ケ】、すでに述べたように、「質量が大きいと動きにくい性質がある」といった慣性質量的な思考をしていることが伺える。また、『質量』と『下向き』、『力』にもつながりが見られることから、重力質量についても記述していると考えられる。その他の慣性質量的な記述としては、『必要』【コ】という語が抽出されていることから、「質量が大きいと動かすのに必要な力（労力）も大きい」といった記述があると考えられる。

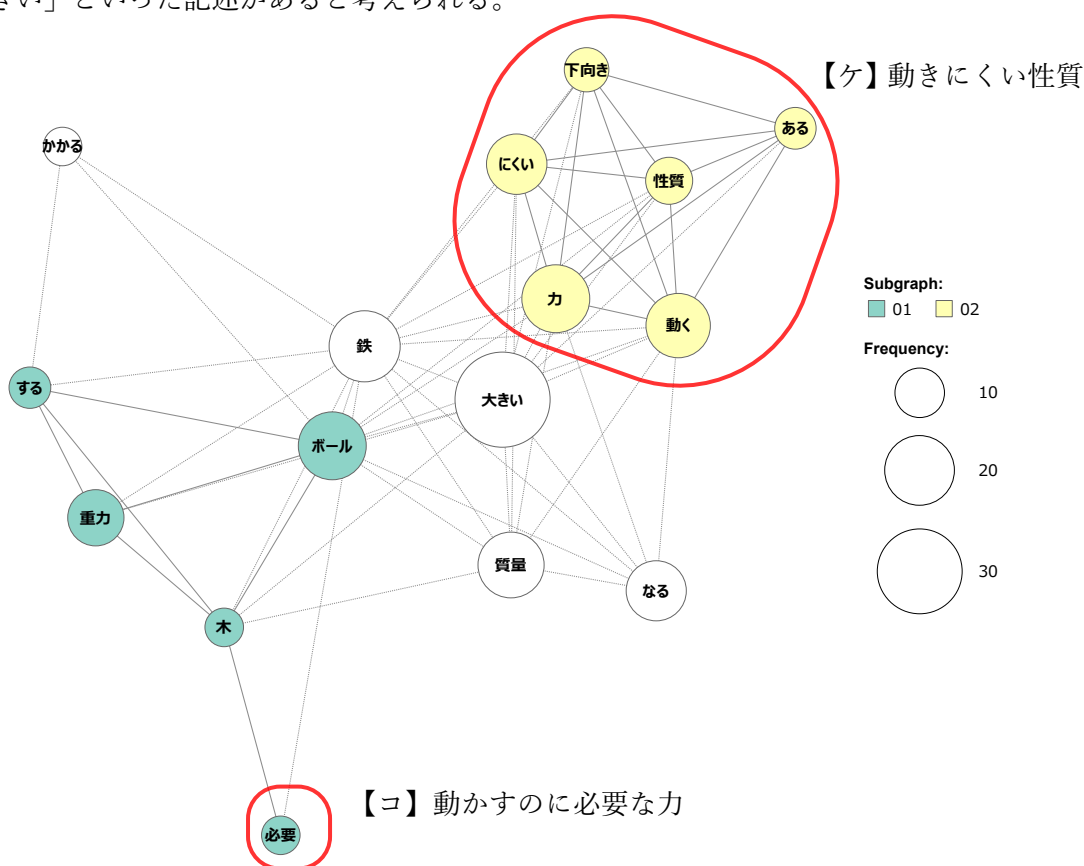


図 5.1.2-7 F 中学校 問2 自由落下運動（総抽出語数：815 語，最小出現頻度：6 語）

次に、N 中学校の記述内容の共起ネットワークを図5.1.2-8に示す。この共起ネットワークでは、『質量』が『空気』、『抵抗』、『変わる』、『ない』につながっている【キ】。これより、すでに述べたように「空気抵抗が変わらないから、木と鉄のボールは同時に落下した」と考えていると解釈できる。また、『質量』が『重力』、『同じ』につながっている【ク】ことから、「重力が変わらないから、木と鉄のボールは同時に落下した」と考えている生徒が一定数いることがわかる。

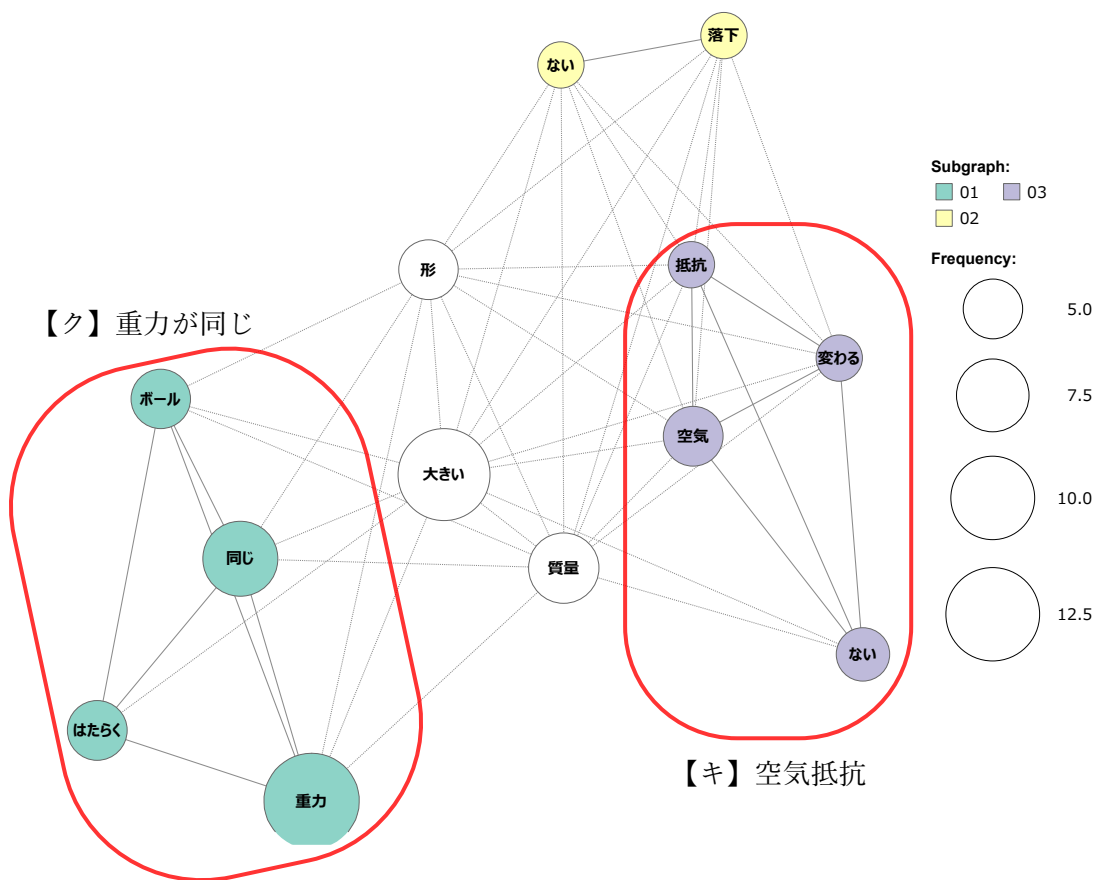


図 5.1.2-8 N 中学校 問2 自由落下運動（総抽出語数：325 語，最小出現頻度：3 語）

次に、S 中学校の記述内容の共起ネットワークを図 5.1.2-9 に示す。この共起ネットワークでは、『質量』が『空気』、『抵抗』、『ない』につながっている【キ】。これより、「空気抵抗がないため、同時に落ちた」という思考をしている生徒がいると考えられる。また、『質量』が『速い』、『変わる』、『ない』につながっている【オ】ことより、「質量は速さに関係ない」と記述した生徒もいることが考えられる。

以上より、事前調査で「同じ」を選んだ生徒を対象として各校の事後アンケートの記述内容を比較した結果、全員を対象とした分析と同じような傾向が見られた。これより、学習前の理解状況は同じでも、授業による影響で学習後の理解状況に差が見られることが示された。

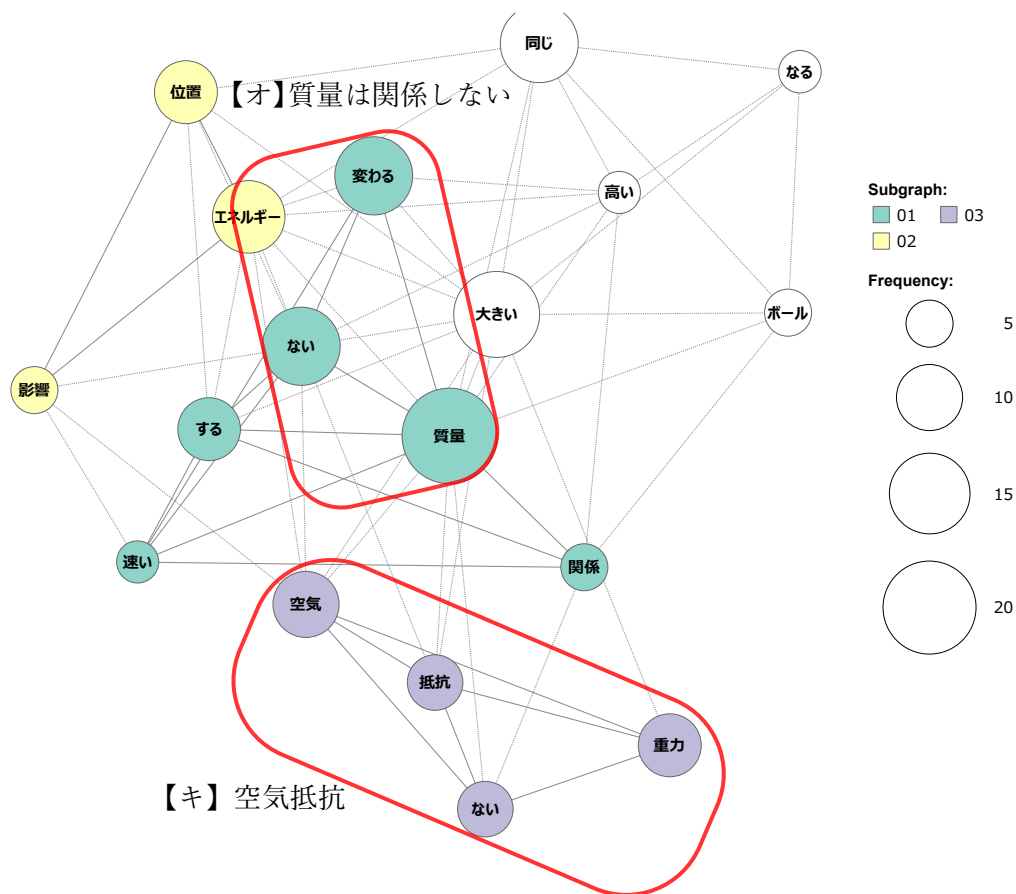


図 5.1.2-9 S 中学校 問2 自由落下運動（総抽出語数：595 語，最小出現頻度：4 語）

5.1.3 小括

事前アンケートでは、3 校とも慣性質量的な選択肢である「(質量が小さい) 木の方が速く落ちる」を選んだ生徒が少なく、「同時に落ちる」と答えた生徒の中にも慣性質量に関する記述はほとんど見られなかった。これより、学習前の生徒らは斜面の運動や自由落下運動という現象に出会った際、「重い方が動きにくい」ことを意味する“**内在的抵抗**”p-prim を活性化させにくいことがわかった。

事後アンケートの問2 自由落下運動では、対照群（N, S 中学校）では慣性質量に関する記述をした生徒は 0%であったが、介入群（F 中学校）では 55.2%であった。問3 振り子の運動では、対照群では慣性質量に関する記述をした生徒は 0%であったが、介入群では 31.3%であった。介入群では、自由落下運動だけでなく、授業で扱わなかった振り子の運動の文脈でも“**内在的抵抗**”を用いて「質量」と「力」を区別した推論をした生徒がいたことから、授業の介入効果があったと考えられる。ただし、実際に p-prim によるネットワークが発達したのかについて判断することは難しい。これは、概念などよりも粒度の細かい p-prim ならではの特性なのかもしれない。

5.2 授業展開の違いによる介入効果の比較

慣性質量へのはたらきかけについてより詳細な支援方法を探るべく、介入群の F 中学校では慣性質量にはたらきかけるタイミングを 2 パターン用意した。本節では、各クラスの授業展開や実際の授業の様子について述べた後、各クラスの事前・事後・追加調査の結果を示し、介入効果の違いがあるのか分析する。（第 4 章の評価方法②に相当する。）

5.2.1 授業展開と実際の授業の様子

本項では、各クラスの授業展開と実際の授業の様子について述べる。A, B 組と C 組の授業展開の違いは、内在的抵抗 p -prim の活性化を狙った「水平面の運動」と出会わせるタイミングであった。A, B 組では「斜面の運動」について考える前に内在的抵抗 p -prim の活性化を狙ったのに対し、C 組では「斜面の運動」について考えている最中に内在的抵抗 p -prim の活性化を狙った。授業展開について表 4.4.1 に示す。

表 4.4.1 各クラスの授業展開

A 組, B 組	C 組
導入	導入
展開①：予想→実験動画 問 0（質量が異なる台車の水平面の運動）	なし
展開②：予想→実験 問 1（傾斜の異なる斜面を下る運動） 問 2（質量の異なる台車が斜面を下る運動）	展開②：予想→実験 問 1（傾斜の異なる斜面を下る運動） 問 2（質量の異なる台車が斜面を下る運動）
展開③：問 1 と問 2 について考察	展開③：問 1 と問 2 について考察 展開①：予想→実験動画 問 0（質量が異なる台車の水平面の運動）
まとめ	まとめ

次に、実際の授業の様子について述べる。この授業は 1 時間授業として開発を行ったが、実際には生徒らによる議論が盛り上がるなどして 2 時間構成の授業となった。特に、C 組では議論が白熱して生徒らは休み時間まで討論していた。そして、この授業は生徒の議論を中心として展開したため、クラスごとに慣性質量に対する理解の仕方や表現が異なった。展開②の問 2 で、質量の異なる台車が斜面を下るとき 2 つの台車の速度-時間グラフが同じになる理由について議論している様子より、各クラスの違いを項目ごとに表 5.2.1 に示す。項目としては、内在的抵抗 p -prim の活性化による「慣性质量的な発言」にはどのようなものがあつたか、生徒の要望にそって追加した実験の種類など「展開の詳細」に違いはあるか、議論の際に「自由落下」について言及していたかについて示す。

表 5.2.1 各クラスの授業の様子

項目	A 組	B 組	C 組
生徒の慣性 質量的な発言	・ 労力 ・ 動かすのに必要な力 ・ 押すパワー	・ 動かすのに必要な力 ・ 力をより多く消費する。 ・ 重いほうが動きにくい。	・ (水平面の実験動画を見て) 重いほうが動きにくかった。
展開の詳細	おもり 2 個つけた実験の追加。	急な斜面でおもり 1 個の実験追加。 終盤に、水平面の運動について考える時間があった。	おもりを 2 個つけた実験の追加。 急な斜面でおもり 1 個の実験の追加。 終盤に、水平面の運動について考える時間があった。
自由落下	羽と鉄球が同時に落ちることと同じ考え方をしたと発言した生徒がおり、自由落下運動の動画(鉄球と羽、空気中とほぼ真空)を見せた。	ガリレオの自由落下について聞いたことがあり、それと同じ考え方をしたと発言した生徒がおり、全体共有した。	羽と鉄球が同時に落ちることと同じ考え方をしたと発言した生徒がおり、全体共有した。

各項目について、クラスごとの違いについて述べる。1 つ目の項目、「慣性質量的な発言」について比較する。A 組では『労力・動かすのに必要な力・押すパワー』などが挙げられた。実際の発話内容としては、「(おもり有りの台車は) 重力が大きい、動かすための力が大きい。労力大きい。だから相殺される。」「重いトラックと軽い車、重いほうを押すほうが力がある。これは問 0 (水平面の運動) からわかる。押すパワーが必要。」というものがあつた。B 組では、A 組と似ているが『動かすのに必要な力・力をより多く消費する。・重いほうが動きにくい。』となどが挙げられる。実際の発話内容としては、「質量が大きいものほど動かすのに必要な力は大きいので、力をより多く消費するみたいな感じなので。力だけ見たら速くなるかなと思ったけど、物体の質量も大きくなるのでそこで消費されて、動くのにはたらくことは変わらない。」「重さが減速させている。おもりがある分抵抗がある。」などがあった。C 組では、水平面の運動の実験動画について考えている生徒が発言した「重い(台車)の方が動きにくかった」という発言しか見受けられなかった。しかしそれと関連して、「水平面では横向きに同じ力がかかってた。おもり付きが遅くなる理由は下向きの力と

考えた。それを斜面に当てはめると、斜面に垂直な力はおもり有りのほうが大きい。だから加速・減速が相殺される。分からないのが、下向きの力は本当に横向きの運動に関係するのかということ。」という発言があった。これより、動きにくさの原因を重力に求めており、慣性質量の理解に困難を示している様子が見受けられた。

次に、「展開の詳細」について比較する。A組とC組では追加実験としておもりを増やした台車の運動が斜面を下る実験を行った。また、B組とC組ではおもりを増やした台車が急な斜面を下る運動の実験を追加した。C組では追加実験が2つであった。その他の特徴としては、B組とC組では授業の終盤に水平面の運動についても考えるように教員が促す場面が見受けられたことが挙げられる。これより、B組とC組では水平面の運動において「重い物は動きにくい」といった印象が強く残る可能性がある。

最後に、「自由落下」についてどれだけ扱ったかについて比較する。3クラスとも、生徒の口から「羽と鉄球が同時に落ちることを見たことがある。それと同じ考え方をした。」といった発言が見られた。違いとしては、A組のみ現象を共有するために実際の自由落下の動画を見せたことが挙げられる。ただし、自由落下の動画は3クラスとも「斜面を下る運動」後の授業で見せているため、このことがそれより後の実施する事後調査や追加調査の介入効果にどのように影響することは考えにくい。

5.2.2 事前調査の分析結果

各クラスの事前アンケートの結果を図5.2.2に示す。事前アンケートの回答人数は、A組25人、B組28人、C組28人であった。事前アンケートにおいて、慣性質量に関する問いは問1の斜面を下る運動と問3の自由落下運動である。(各問の内容は第4章参照) 問2については、どのクラスも「急な斜面の方が早く地面に着く」の回答率が1番高く、A、B、C組の順に96.2%、96.4%、96.4%であったこと、他の回答率にも大きな差は見られなかったこと、慣性質量には関係しない問いであることなどから、ここでは扱わないものとする。

図5.2.2より、問1斜面を下る運動では、どのクラスも「鉄の方が早く地面に着く」の回答率が高かったが、クラスごとに差が見られ、B組で64.3%、C組で57.1%であるのに対し、A組は80.8%と高かった。次に回答率が高いのはどのクラスも「木も鉄も同時に地面に着く」で、A組で15.4%、B組で21.4%、そしてC組では42.9%の生徒がこの選択肢を選んだ。この選択肢ではC組の回答率が高いことが特徴的であった。「木の方が早く地面に着く」の回答率は低く、A組とB組で数名ほど見られたが、C組では見られなかった。

問3自由落下運動では、どのクラスも「鉄の方が早く地面に着く」の回答率が5割強を占め、1番回答率が高かった。次に回答率が高かったのは「木も鉄も同時に地面に着く」で、この選択肢も4割強を占めた。「木の方が早く地面に着く」を選んだ生徒はB組に数名いたが、他の2クラスでは見られなかった。

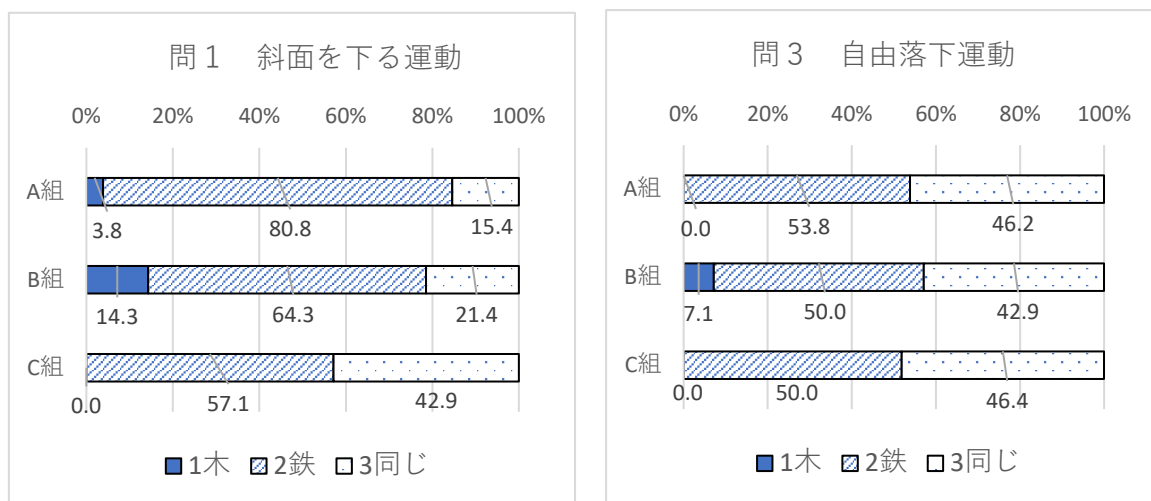


図 5.2.2 問 1 と問 3 の選択肢ごとの回答率

以上より、各クラスの特徴をまとめる。A 組は、斜面を下る運動において「鉄の方が早く地面に着く」と考える生徒が特に多かった。B 組は、斜面でも自由落下でも「木の方が早く地面に着く」を選んだ生徒が若干名いて、“重い物は動きにくい”的な感覚をもった生徒が数名いる可能性がある。C 組は、斜面を下る運動において「木も鉄も同時に地面に着く」を選択した生徒が特に多かった。また、「木の方が早く地面に着く」を選んだ生徒は一人もいなかった。

また、各問いの記述内容については、5.1.1 で述べた通りであり、各クラスに大きな差は見られなかった。また、本実践で意図的に活性化を狙う慣性質量的な記述は見受けられなかった。

5.2.3 事後調査の分析結果

事後アンケートの結果について述べる。事後調査では、慣性質量に関する問いは問 2 の自由落下運動と問 3 の振り子の運動である。問 2 と問 3 において慣性質量に関する記述があった生徒の割合を図 5.2.3-1 に示す。(問 1 は慣性質量に関与しないのでここでは扱わないこととした。) 図 5.2.3-1 より、事前アンケートの自由落下の問いにおいて、「重い物の方が動きにくい」といった慣性質量に関する記述は多いクラスでも 8 % 未満であったが、事後アンケート問 2 (自由落下運動) では A 組で 40.0%, B 組で 40.0%, C 組で 85.7% の生徒に慣性質量に関する記述が見られた。問 3 (振り子の運動) では、A 組で 20.0%, B 組で 24.0%, C 組で 50.0% の生徒に慣性質量的な記述が見られた。どのクラスも問 2, 問 3 とともに慣性質量に関する記述をした生徒の割合が増加したが、問 2, 問 3 とともに C 組が群を抜いて高い結果となった。また、3 クラスとも問 2 で慣性質量に着目できた生徒の半数ほどが問 3 でも慣性質量に着目することができた。

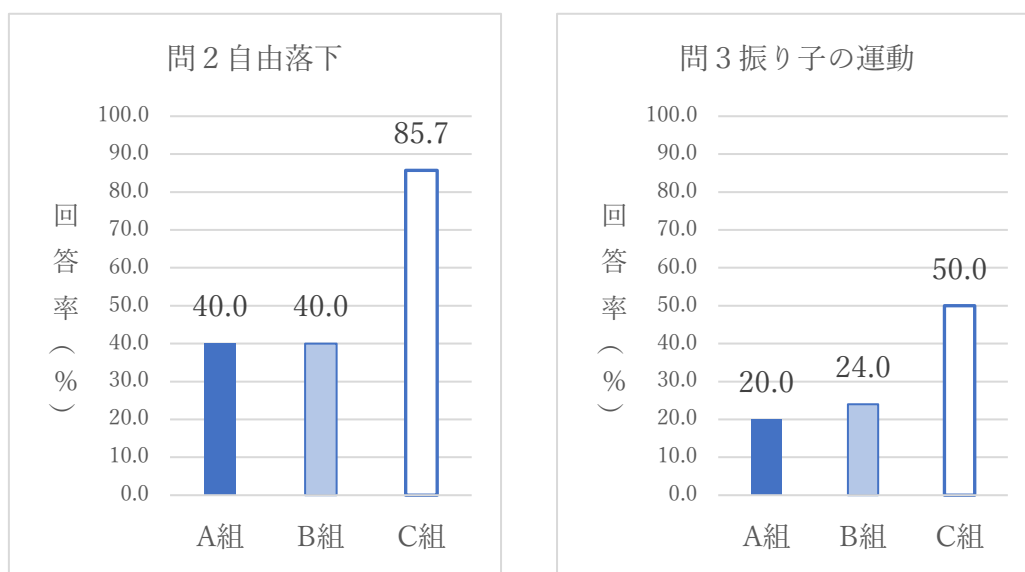


図 5.2.3-1 慣性質量に関する記述をした生徒の割合

慣性質量の解釈の仕方にどのような違いがあるのかを探るため、各クラスの具体的な記述内容を分析する。自由落下運動の問いに対する記述内容について共起ネットワークを示し、慣性質量に関する記述については表 5.2.3-1 にまとめてクラスごとの違いを示した。振り子の運動についてはテキストマイニングを行わず、記述内容についてのみ表 5.2.3-2 にまとめた。

はじめに、自由落下運動に対する記述内容についてテキストマイニングして得られた共起ネットワークを A 組, B 組, C 組の順に図 5.2.3-2~4 に示す。ここでは、記述内容の中でも慣性质量的な記述を中心に分析を行う。各クラスの共起ネットワークに現れた慣性質量に関する抽出語については枠で囲んで示した。

A 組での慣性质量的な記述は、枠で囲んだ抽出語『動かす』、『力』、『必要』などの組み合わせによるものが多かった。実際の記述内容としては、「質量が大きいとかかる重力は大きい、運動するために必要な力も大きくなる。」というものが多かった。

B 組での慣性质量的な記述は、生徒によって様々であった。共起ネットワークから見てとれるのは、枠で囲んだ語句『動く』『にくい』『力』の出現頻度が高かったことである。実際の記述内容としては、「質量が大きい鉄のボールの方が下向きの力は大い、質量が大きい物体は動きにくいので、結局どちらも下向きの力は同じになって落ちる速さも同じになる。」というものであった。

C 組での慣性质量的な記述は、枠で囲んだ抽出語『動く』、『にくい』、『性質』などの組み合わせによるものが多かった。実際の記述内容としては、「鉄のボールの方が重いので、その分動きにくいという性質もあるから。」というものが多かった。各クラス、他の記述内容については表 5.2.3-1 にまとめた。

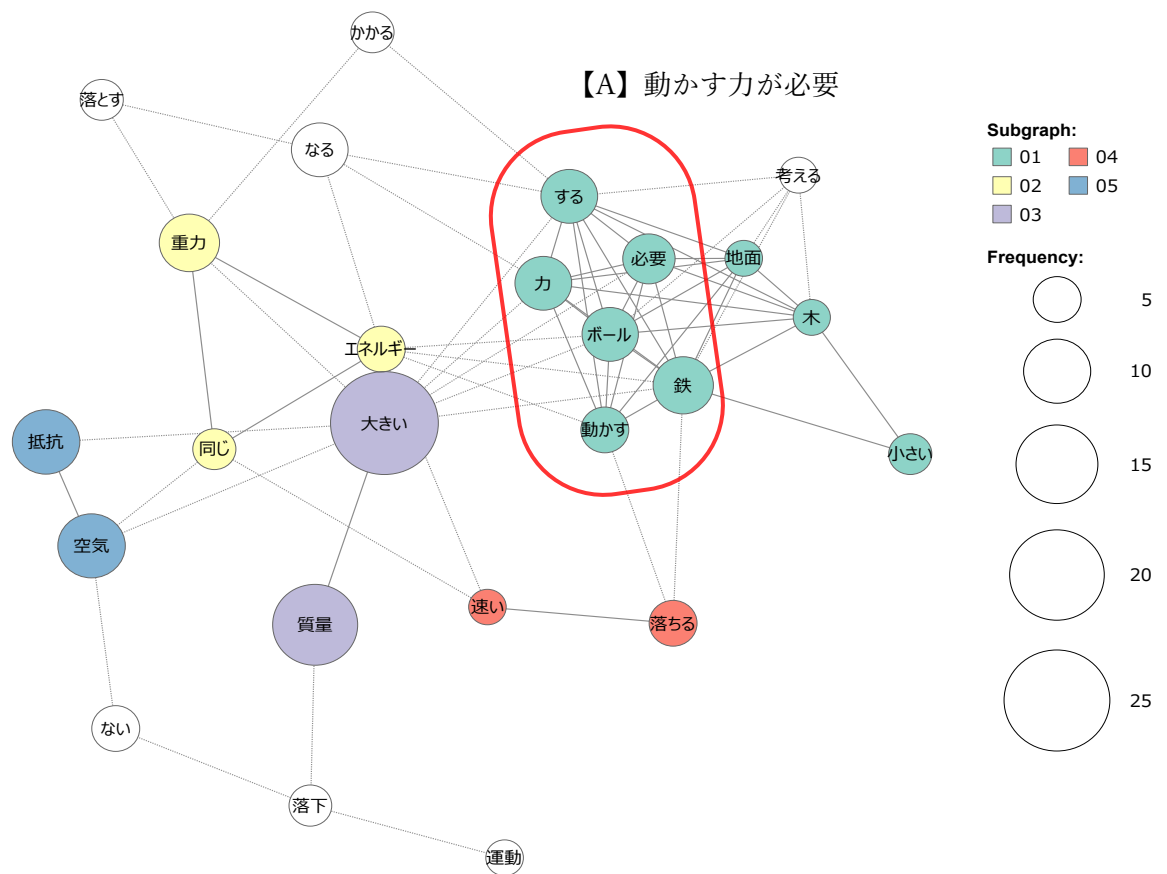


図 5.2.3-2 A 組の記述の共起ネットワーク（最小出現頻度：3 語）

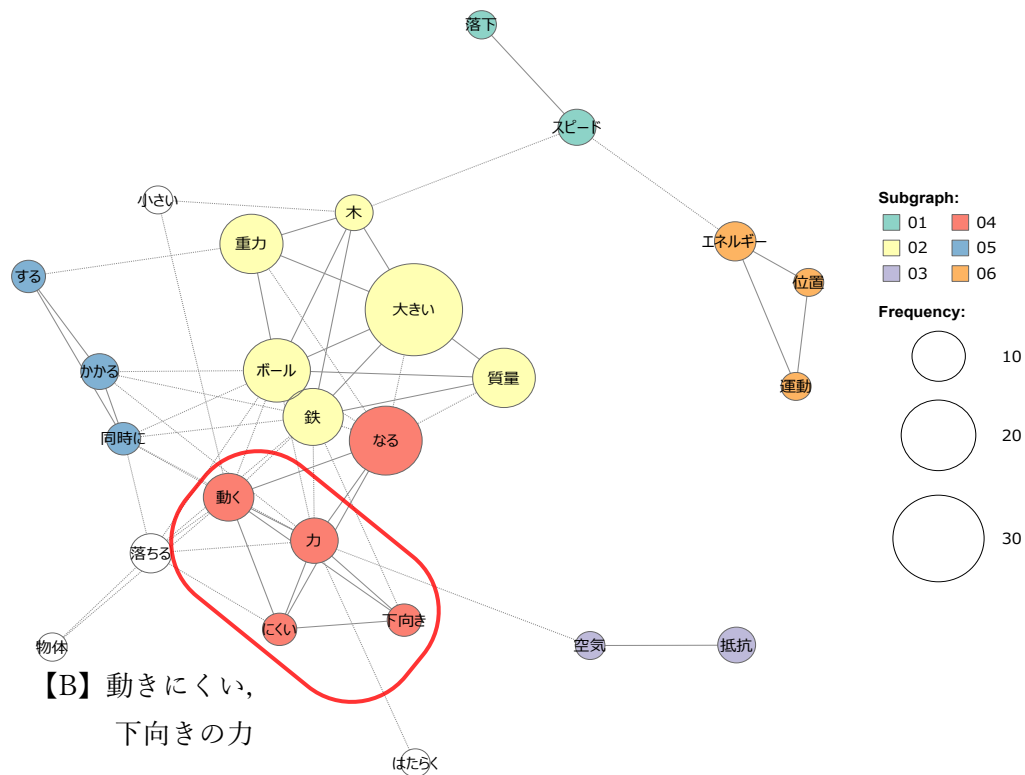


図 5.2.3-3 B 組の記述の共起ネットワーク（最小出現頻度：3 語）

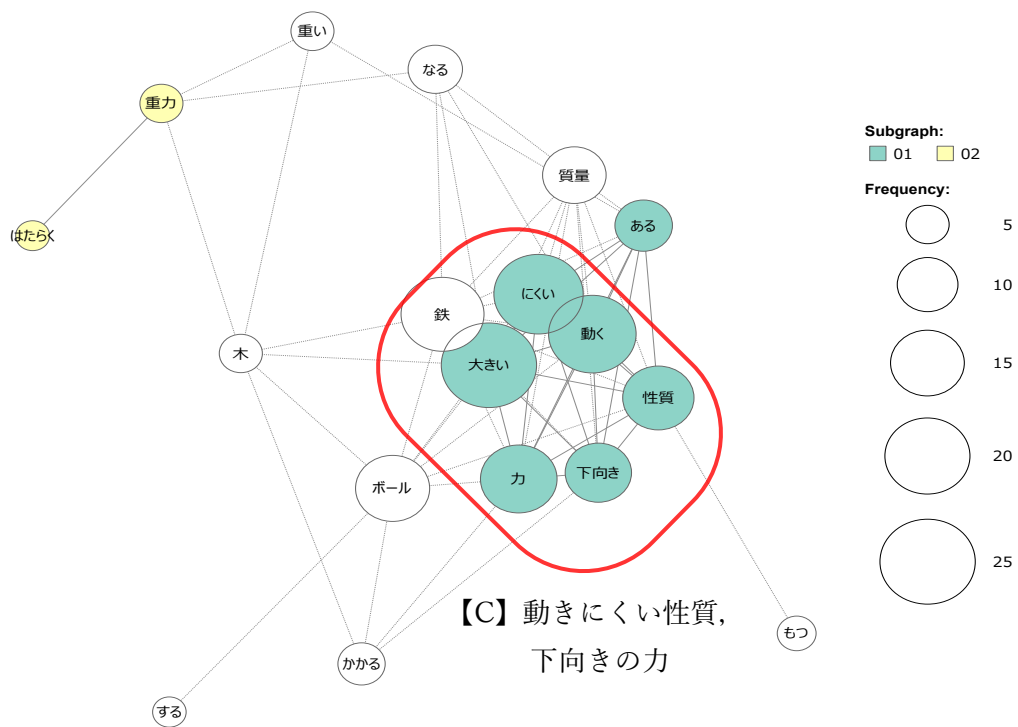


図 5.2.3-4 C 組の記述の共起ネットワーク（最小出現頻度：3 語）

各クラスの慣性質量的な記述をいくつか取り上げて表 5.2.3-1,2 にまとめた。表 5.2.3-1,2 より、各クラスの記述内容の違いについて述べる。A 組では、「重い物を動かすには“力が必要”」と捉えている生徒が多かった。これは、A, B 組の授業で議論された内容であり、授業による影響であると考えられる。一方で、C 組では「動きにくい“性質”」として捉えている回答が多かった。授業において「動きにくい性質」という表現は現れなかったことから、この表現は「斜面を下る運動」の後に続く授業の影響である可能性が高い。B 組は、A 組と C 組の思考が混在しており、さらに「動き出すまでの時間」に着目した *Worming up* 的な直観をはたらかせた生徒が複数名いた。*Worming up (Change takes time)* は、変化には時間がかかることを意味する p-prim である。

特徴的な A 組と C 組の違いに焦点化して考える。事後調査の結果より、C 組のように「動きにくい性質」として理解した方が、多くの生徒の共感を得やすく、多くの生徒の慣性質量的な思考を促すのではないかということが示唆された。

表 5.2.3-1 各クラスの「自由落下運動」についての記述内容

A 組	・質量が大きい方はその質量のボールを落とすための労力が軽いものより大きくなるから、プラスマイナスゼロになる。 ・質量が大きいとかかる重力は大きいですが、運動するために必要な力も大きくなる。 ・鉄のボールの方が下へ行こうとする力は大きいけど、大きい物を動かすにはより多くのエネルギーがあるので、差し引きして一緒になる。
B 組	・重い方は重力は大きい動きにくく、軽い方は重力は小さい動きやすいから。 ・質量が大きい鉄のボールの方が下向きの力は大きいですが、質量が大きい物体は動きにくいので、結局どちらも下向きの力は同じになって落ちる速さも同じになる。 ・質量が大きい分、重力も大きくなるが、抗力も大きくなる。 ・質量が大きいほど加速し始めるときが遅いから。
C 組	・鉄のボールの方が重いので、その分動きにくいという性質もあるから。 ・質量の大きい鉄球の方が下向きの力も大きくなるが、その分動きにくくなる性質もあるから。 ・鉄のボールの方が慣性が大きく、その場に留まろうとする力が大きいから。

表 5.2.3-2 各クラスの「振り子の運動」についての記述内容

A 組	・落下と同じで、質量が大きい方が位置エネルギーは大きい、その分労力も大きいから。 ・質量が大きいとかかる重力は大きい、運動するために必要な力も大きくなる。
B 組	・質量が大きい物体ほど動きづらい性質があるので、同じ位置からおもりを離すと位置エネルギーは鉄のおもりの方が大きいけど、動きづらいから、結果としては変わらないから。 ・質量が大きいと動くまでの時間もかかるから。
C 組	・鉄の方が左右の向きの力は大きい、その分動きにくいから。 ・鉄の方は木よりも質量が大きいけど、使うエネルギーの量も増えるから、木のボールと同じになる。

5.2.4 追加調査の分析結果

「斜面を下る運動」の授業で介入を行ってからおよそ3ヶ月経過した後に実施した、各クラスの追加調査の結果を示す。ここで、慣性質量に関与する問いは問1,3,4である。この結果により、慣性质量的な思考がどの程度定着したかを評価する。

まず、選択肢のみを設定した問1,2の結果を示す。問1では「質量の異なる2つのボールが斜面を転がる場合どちらが先に地面に着くか」、問2では「急な斜面とゆるやかな斜面でボールを転がした場合どちらが先に地面に着くか」について問うた。この2問は、生徒が「斜面を下る運動」の授業をどれだけ理解しているかについて分析する尺度とした。問1の正答は「同じ」、問2の正答は「急」である。図5.2.4-1より、どのクラスも問1,2両方の回答率が高かった。これより、「斜面を下る運動」の授業は、およそ8割の生徒にとって記憶に残る授業となったのではないかと考えられる。図5.2.4-1から読み取れる各クラスの特徴としては、C組は問2で全員正答しており、斜面上の物体の力の分解がかなり定着していることが伺える。B組は問1において「木の方が早く地面に着く。」と回答した生徒が7.1%であった。これより、「軽い物は動きやすい」という思考をした生徒が数名いることがわかる。これは、「重い物は動きにくい」とこと同義であり、本実践で意図的に活性化しようとした**内在的抵抗**のp-primの優先度が高いことが考えられる。ただし、B組では事前アンケートにおいても「木の方が早く地面に着く。」と回答した生徒がいたことから、学習前から思考が変容しなかったと捉えることもできる。そして、本実践が、学習前からもっていた「重い物は動きにくい」という直感をさらに強固にしたということも考えられる。

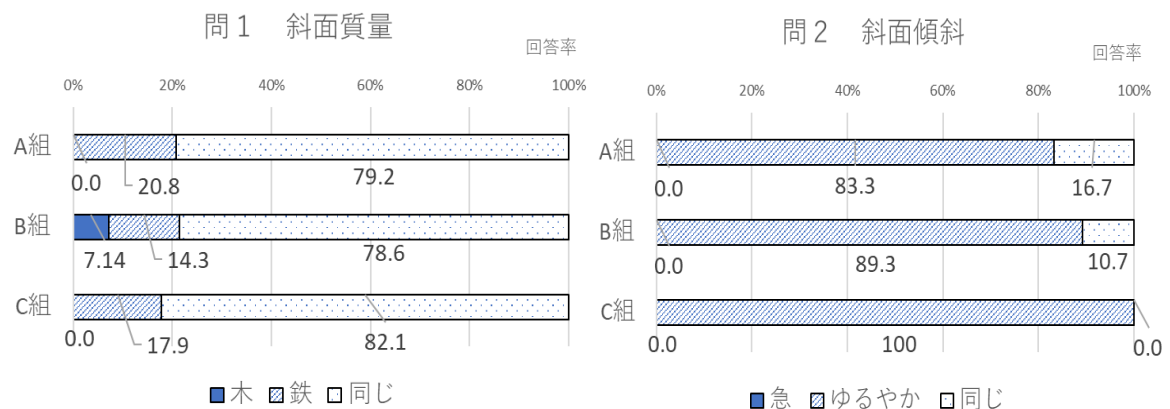


図 5.2.4-1 各クラス 選択肢ごとの回答率

次に、選択&記述式とした問 3,4 の結果を図 5.2.4-2 に示す。問 3 では「質量の異なる 2 つのボールを同時に離した場合どちらが先に地面に着くか」、問 4 では「質量の異なるおもりを付けた 2 つの振り子では、周期が短いのはどちらか」について問うた。この 2 問は、「斜面を下る運動」で学んだ慣性質量の思考を、自由落下運動や振り子の運動といった他の文脈にも適用するかを分析する尺度とした。問 3, 4 とともに正答は「同じ」である。問 3 については、ほぼ全員が正答したが、C 組の正答率が若干低かった。問 2 の結果をふまえると、C 組は「鉄の方が重力が大きいの」ことをより意識しているために力ばかりに着目したのではないかと考えられる。問 4 についても、80%前後の生徒が正答していた。また、どのクラスも「木の方が周期が短い」と回答した生徒が若干名いた。これより、「軽い物は速く動く」といった直観を支持した生徒の存在が明らかとなった。

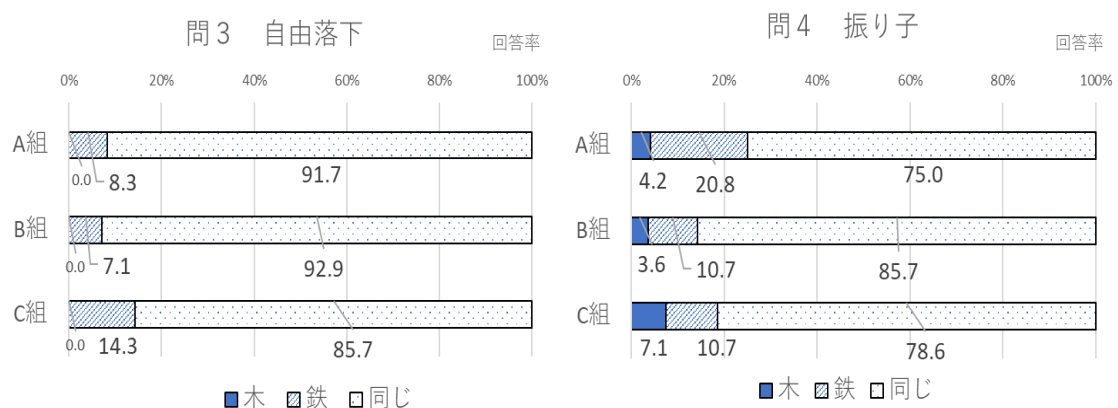


図 5.2.4-2 各クラス 選択肢ごとの回答率

次に、記述内容について慣性質量的な思考をしているかを基準とした分析を行う。図 5.2.4-3 には、慣性質量的な記述をした生徒の割合を示す。事後調査からの変容をみるため、事後調査の結果も併せて示す。

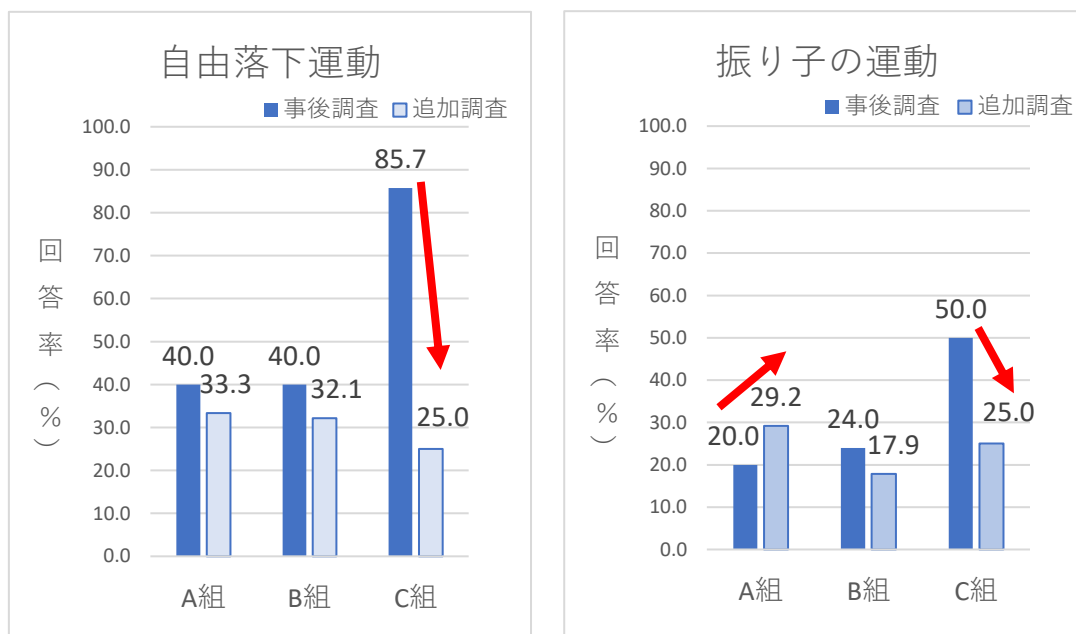


図 5.2.4-3 事前調査及び追加調査において慣性質量的な記述をした生徒の割合

図 5.2.4-3 より、追加調査の問 3 自由落下運動において慣性質量的な記述をした生徒の割合は、A 組で 33.3%、B 組で 32.1%、C 組で 25.0%であり、C 組が最も低い値となった。事後調査からの変容を見ると、C 組の割合は 60.7 ポイントも減少している。問 4 振り子の運動については A 組で 29.2%、B 組 17.9%で、C 組で 25.0%であった。事後調査からの変容を見ると、この問いでも C 組が 25.0 ポイントも減少していることが目立つ。逆に、A 組は慣性質量的な記述をした生徒の割合が 9.2 ポイント増加した。これより、C 組の理解の仕方よりも A 組の理解の仕方の方が定着しやすい可能性が考えられる。

ただし、追加調査での最終的な回答率は A 組と C 組で 4.2%の差しかないため、より詳細な分析が必要である。そこで、A 組と C 組について具体的な記述内容を分析し、慣性質量の解釈の仕方にどのような違いがあるかに探ることとする。

自由落下運動の問いにおいて正答の「同じ」を選んだ生徒の記述内容について表 5.2.4 に示した。正しい選択肢を選んではいらぬものの、誤った解釈をした生徒も多く見受けられた。特に、「(鉄は) 質量が大きい分、空気抵抗も大きいから。」といった意見が多く見られ、動きにくい原因は空気抵抗によるものであるとして解釈している生徒が多かった。

表 5.2.4 各クラスの「自由落下運動」についての記述内容

A 組	・鉄は重力が大きい、下から受ける空気抵抗も大きく、合力は同じため。 ・鉄は重力も大きい、その分動かす力も必要。
B 組	・質量が大きい分、空気抵抗も大きいから。 ・質量が大きい物ほど空気抵抗を受けやすく動きにくいから。
C 組	・鉄は重力が大きいかわりに動きにくいという性質があるから。 ・質量が大きいと空気抵抗も大きくなるから。 ・鉄は重力が大きい、その場に留まろうとする力である慣性が強いから。

振り子の運動の問いについては、A 組、C 組の記述から得られた共起ネットワークを示す。ここでは、慣性質量に関する抽出語と空気抵抗についての抽出語を別枠で囲んだ。A 組ではこの 2 つのクラスターにつながりが見られなかったが、C 組では弱いつながりが見られた。

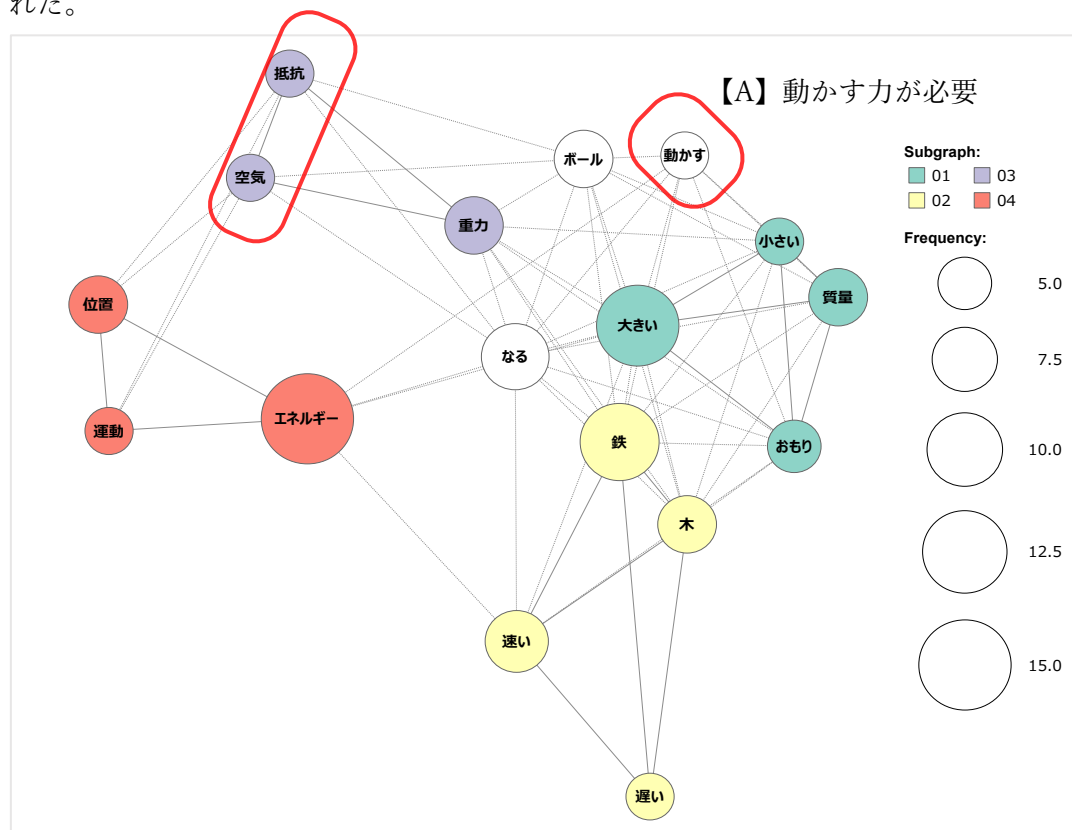


図 5.2.4-4 A 組で「同じ」を選んだ生徒の記述内容（最小出現頻度：4 語）

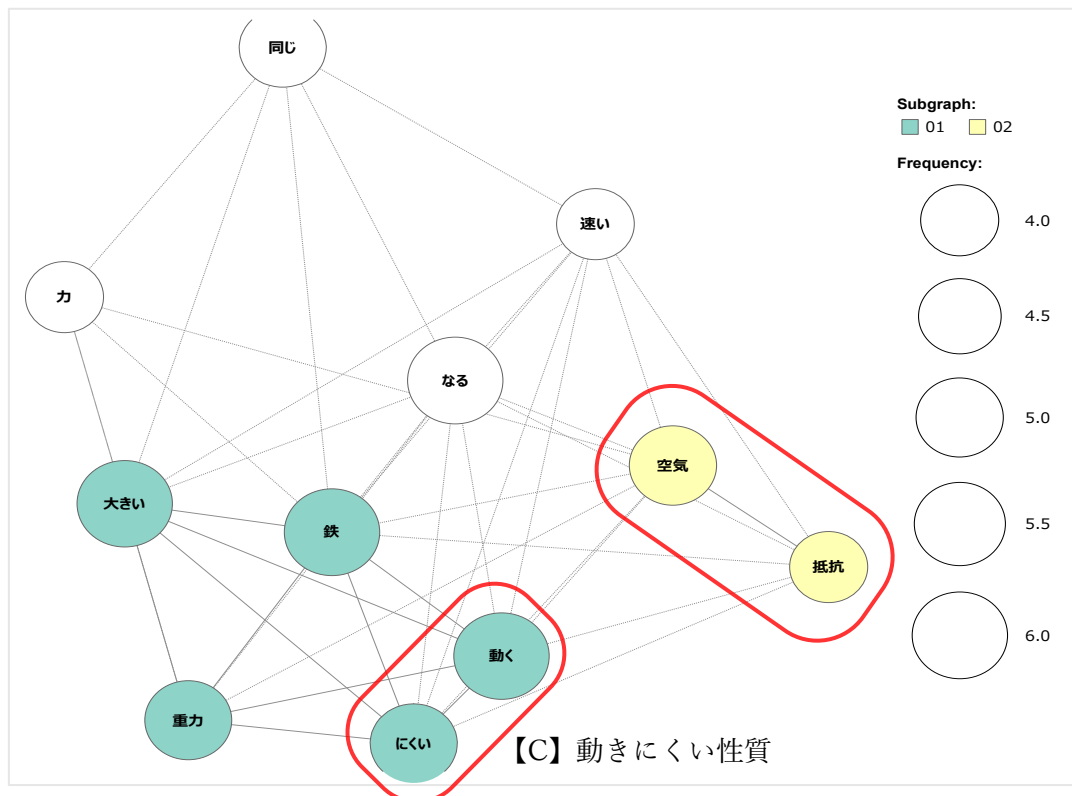


図 5.2.4-5 C 組で「同じ」を選んだ生徒の記述内容（最小出現頻度：4 語）

以上より，追加調査において正答を選んだ生徒でも，「動きにくさ」の原因は空気抵抗であるとしている生徒がいることがわかった。これは，物体そのものがもつ内在的な抵抗ではなく外側から運動を妨げる作用が働いているという解釈の仕方であると考えられる。

5.2.5 各クラスの介入効果の差についての考察

事前・事後・追加調査の結果より，各クラスにおいて「慣性質量的な思考」に違いが見られ，特に A 組では「質量が大きいほど動かすのに必要な力も大きい」，C 組では「重いものは動きにくい」という理解の仕方をしていることが分かった。また，事後調査の段階では C 組の理解の仕方が良かったように思われたが，追加調査では C 組の「慣性質量的な思考」は継続しないことが分かった。本項では，各クラスの解釈の仕方の違いとそれが事後・追加調査に与えた影響についてより深い考察を行うこととする。

はじめに，A 組と C 組の解釈の違いについて考察する。A 組，C 組の慣性質量に対する理解の仕方の一例を図 5.2.5-1 に示す。C 組の「質量が大きいものは動きにくい性質もつ」という理解の仕方は，“質量”から“動きにくさ”を連想しただけであると考えられる。一方で，A 組の「質量が大きいものは，動かすのに必要な力も大きい」という理解の仕方は，“質量”から暗黙の“動きにくさ”を連想するだけでなく，運動に“要する力”まで思考していた。このため，A 組の理解の仕方は少し難易度が高かったことが考えられる。A 組で慣性質量的な記

述をした生徒の割合が少なかったのは、このことが関係するかもしれない。

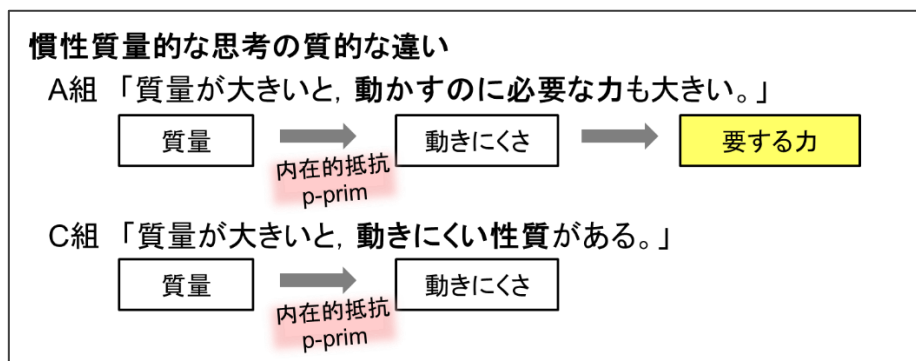


図 5.2.5-1 A 組と C 組の慣性質量的な思考の質的な違い

次に、各クラスの解釈の仕方の違いが生まれた原因について考察を行う。事前調査では、3 クラスとも本実践で意図的に活性化を狙う慣性質量的な記述は見受けられなかったため、各クラスで解釈の仕方に違いが生まれた理由は、本実践「斜面を下る運動」の授業中もしくはその後の授業の違いである可能性が高いと考えられる。

5.2.1 で示した授業展開や授業の様子から考察すると、C 組だけ内在的抵抗 p-prim の活性化を狙うために行った水平面の運動の実験を扱うタイミングが遅かったことが関係すると思われる。C 組では「水平面の運動」において質量が大きい台車の方が動きにくいという現象が強く印象に残り、それを現象として記憶したのではないかと考えられる。一方で、A、B 組は「水平面の運動」の印象が C 組ほどは強くなく、「斜面の運動」において“運動方向の力”が大きいことも説明しなければならないという意識も強かったため、「質量が大きいほど運動に要する力も大きくなければならない」という思考になったことが考えられる。また、B 組と C 組では授業の終盤に水平面の運動についても考えるように教員が促す場面が見受けられた。このことより、B 組と C 組では「水平面の運動」が現象として思い出され、重い物は単に動きにくいというイメージを与えやすかったことが考えられる。

最後に、各クラスの解釈の仕方の違いが事後・追加調査に与えた影響について考察する。C 組の理解の仕方は“質量”と“動きにくさ”のみを紐づければよいので比較的単純であり、事後調査において C 組の慣性質量的な記述の割合は群を抜いて高かった。しかし、単純であるがゆえに表面的な解釈に留まり、追加調査ではその記述が大幅に減少したのではないかと考えられる。一方で、A 組の理解の仕方は難易度が高く、事後調査の段階でも 40%程度の生徒しか理解できなかったが、その割合は追加調査でもそれほど減少しなかった。これは、“質量”と“動きにくさ”だけでなく“要する力”まで思考を及ぼせることで、運動の法則につながるような深い理解ができたからだと考えられる。

ここで、“動きにくさ”のみについて言及した生徒は本当に慣性質量的な思考をしたのかという疑問が生じる。追加調査の記述内容の中には、図 5.2.5-2 のように“動きにくさ”から“運

動に要する力”を考えるのではなく，“運動を妨げる力がある”と考えた生徒が多くみられた。

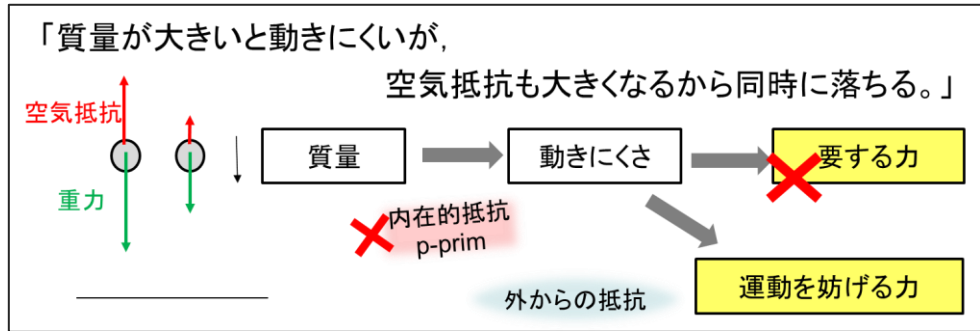


図 5.2.5-2 慣性質量的でない理由の一例

これより，単に質量が大きい物には「動きにくさ」があると記述しているだけでは，それが内在的な抵抗によるものなのか，外側から運動を妨げる空気抵抗などによるものであるか判断することができないと考えられる。

そこで，これまで慣性質的な記述であるとしていたものを，「要する力（労力も含む）について記述しているもの」と「単に動きにくいからと答えているもの」の2つに分類して再分析することにした。また，慣性質的でないとした記述についても，「動きにくさを運動を妨げる力として還元しているもの」と「その他」に分類し，これを新たな基準（表 5.2.4）として，次項で分析することとする。

表 5.2.4 新たな基準

慣性質的な思考	質量が大きいほど，運動に要する力（労力）も大きい。
	質量が大きいほど，動きにくい。
慣性質的でない思考	質量が大きいほど，運動を妨げる力も大きくなる。
	その他

5.2.6 新たな基準での評価

事前・追加アンケートについて，生徒の回答を新たな基準によって分類した結果を以下に示す。自由落下の問い，振り子の問いについて，事後・追加調査の変容をみる。事前アンケートでは「動きにくさ」に関する記述がほとんど見られなかったため，対象外とした。横軸には各記述内容の回答率を示す。各記述内容はグラフ帯びの左から順に，「要する力」，「動きにくさ」，「外からの抵抗（運動を妨げる作用）」，「その他」で分類して示した。

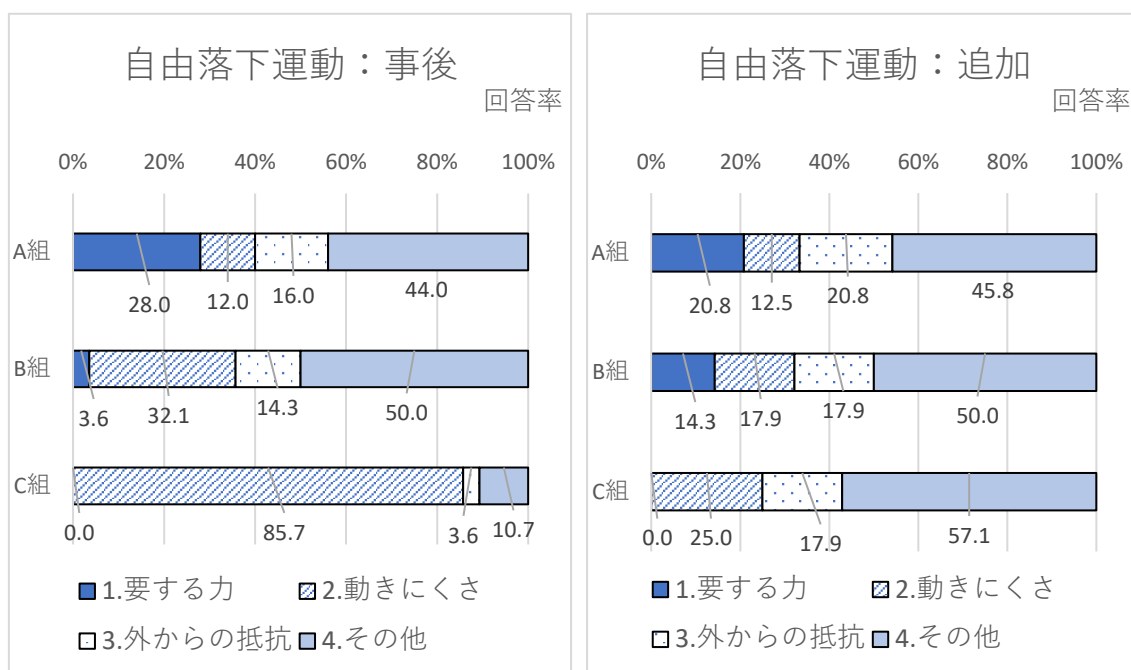


図 5.2.5-1 自由落下運動における記述内容の変容

はじめに、自由落下運動の問いについて図 5.2.5-1 の左側に事後アンケートの結果を、右側に追加アンケートの結果を示す。図 5.2.5-1 より、事後アンケートおよび追加アンケートにおける慣性質量的な記述の内容について詳しく分析する。まず、質量が大きいと「運動に要する力」も大きくなるという理解の仕方をした生徒の割合について述べる。事後調査では、A 組で 28.0%、B 組で 3.6%、C 組で 0.0%であった。そして、追加調査では A 組で 20.8%、B 組で 14.3%、C 組で 0.0%であった。この理解の仕方は事後・追加調査ともに A 組が高い値を示したが、追加調査では事後調査より 7.2 ポイントだけ減少した。逆に、B 組については回答率が 10.7 ポイント増加した。これより、「運動に要する力」まで考える理解の仕方は、時間が経ってもほとんど減少せず、むしろ B 組のように増加すること示唆された。

次に、質量が大きいと単に「動きにくさ」も増加するという記述をした生徒の割合について述べる。この回答は、「動きにくさ」については言及しているものの、その原因などについてまでは記述していないため慣性質量的な記述であるか判断しにくかった記述である。この記述の回答率は、事後調査では、A 組で 12.0%、B 組で 32.1%、C 組で 85.7%であった。そして、追加調査では A 組で 12.5%、B 組で 17.9%、C 組で 25.0%であった。変容をみると、B 組と C 組で減少している。B 組では、記述内容が「運動に要する力」へと変わった生徒もいることが考えられる。一方、C 組では単純に 60.7 ポイントも減少している。これより、質量が大きいと単に「動きにくさ」が増加するという考え方だけでは、時間が経過すると消滅する、または「外側からの運動を妨げる作用がはたらく」という思考として整理されてしまうことが考えられる。

ここで、質量が大きいと「(空気抵抗など) 外からの抵抗」も大きくなると答えた生徒の割合について述べる。事後調査では、A組で16.0%, B組で14.3%, C組で3.6%であった。そして、追加調査ではA組で20.8%, B組で17.9%, C組で17.9%であった。この誤った解釈の回答率はどのクラスも増加しており、この思考に陥らないための支援は教授方法に対する課題となった。その他の回答理由としては、「空気抵抗がないから」や「自由落下に質量は関係ない」とだけ回答しているものが多く、この回答率はC組が1番高く57.1%であった。これより、C組の事後調査において「動きにくさ」について回答していた85.7%の生徒の半数ほどは、「動きにくさ」については言及せずにその他に該当する思考をしたことがわかる。

次に、振り子の運動の問いについて図5.2.5-2の左側に事後アンケートの結果を、右側に追加アンケートの結果を示す。

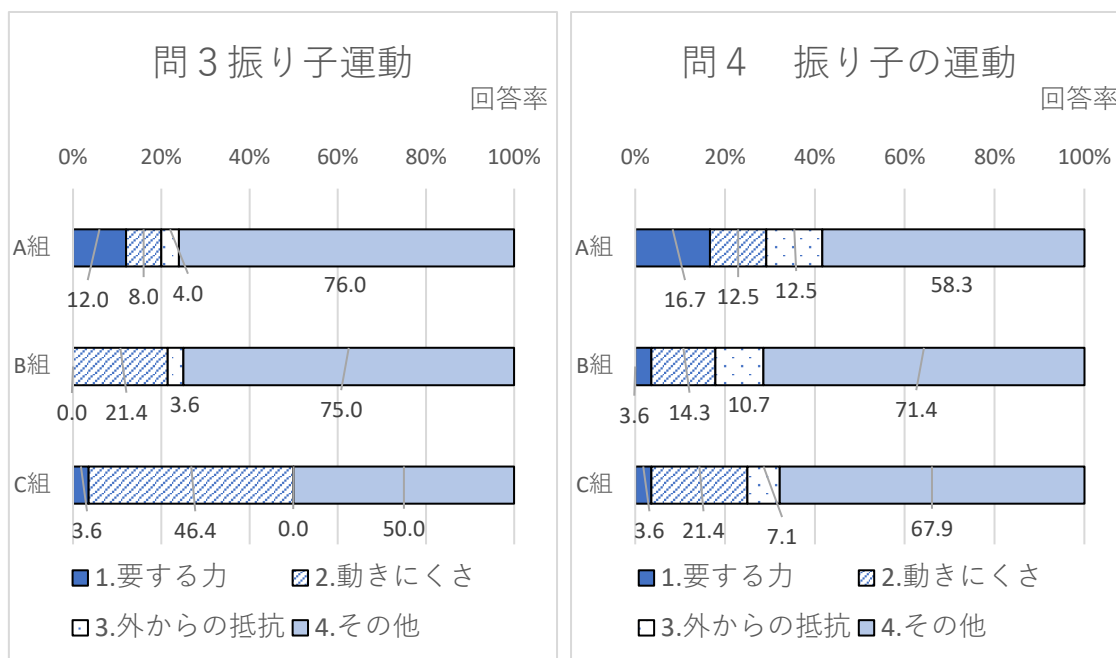


図 5.2.5-2 振り子の運動における記述内容の変容

図5.2.5-2より、事後アンケートおよび追加アンケートにおける慣性質量的な記述の内容について詳しく分析する。はじめに、質量が大きいと「運動に要する力」も大きくなるという理解の仕方をしている生徒の割合について述べる。事後調査では、A組で12.0%, B組で0.0%, C組で3.6%であった。そして、追加調査ではA組で16.7%, B組で3.6%, C組で3.6%であった。A組, B組では若干増え, C組では変化がなかった。これより、自由落下の結果と同様に「運動に要する力」まで考える思考方法はそこまで減少せず、むしろ増えることもあることが示唆された。次に、質量が大きいと単に「動きにくさ」も増加するという記述をした生徒の割合について述べる。事後調査では、A組で8.0%, B組で21.4%, C組

で 46.4%であった。そして、追加調査では A 組で 12.5%, B 組で 14.3%, C 組で 21.4%であった。変容をみると, A 組では増加しているが, B 組, C 組では減少している。また, 振り子の運動の文脈でも「外からの抵抗」が増加するという記述をした生徒の割合が増加しており, この思考に対する支援が課題として挙げられる。

以上より, 慣性質量に対する理解の仕方としては, 「運動に要する力」についても理解した方が思考が継続しやすいことが考えられる。ただし, 「動きにくさ」についてのみ記述している生徒の中にも, その思考が継続した生徒が一定数いたことから, この思考を否定することはできない。このため, 追加調査まで一貫して慣性质量的な思考をした生徒にはどのような特徴があるか分析する必要がある。この分析は 5.3 で行う。

課題としては, どのクラスでも「動きにくさ」を「外からの抵抗」によるものだと誤った解釈した生徒が増加したことが挙げられる。よって, このような誤解を与えないもしくは克服するための支援方法の必要性が示唆された。

5.3 慣性質量的な思考をした生徒の特徴

この節では、追加調査において慣性質量的な記述をした生徒の特徴について分析し、慣性質量を理解させるためのよりよい介入方法を探ることとした。方法としては、「(i 群) 追加調査において慣性質量的な記述をした生徒」, 「(ii 群) 事後調査では慣性質量的な記述をしたが追加調査ではそれがなくなった生徒」, 「(iii 群) 事後・追加調査ともに慣性質量的な記述をしなかった生徒」の 3 グループに分け、事前・事後・追加調査における回答内容について分析を行う。

5.3.1 事前調査の結果と考察

(i 群) 追加調査において慣性質量的な記述をした生徒, (ii 群) 事後調査では慣性質量的な記述をしたが追加調査では慣性質量的な記述をしなかった生徒, (iii 群) 事後・追加調査ともに慣性質量的な記述をしなかった生徒について、それぞれの事前アンケートの結果を比較する。回答人数は i 群 27 名, ii 群 24 名, iii 群 31 名であった。ここでは、慣性質量に関する問 1 (斜面を下る運動) と問 3 (自由落下運動) について扱う。各グループの選択肢ごとの回答率について図 5.2.1-1 に示す。

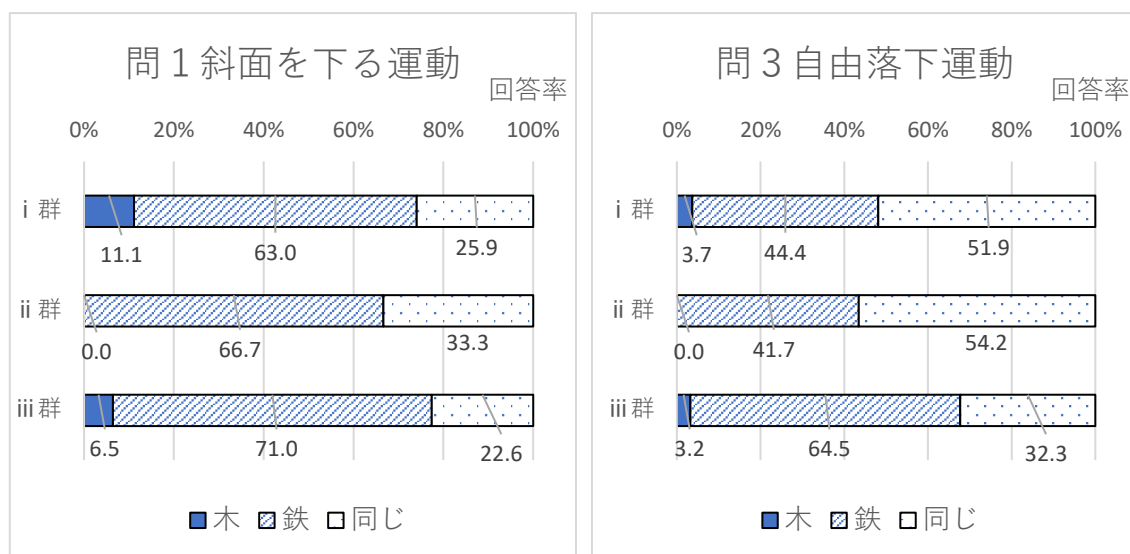


図 5.2.1-1 問 1 と問 3 における各グループの選択肢ごとの回答率

結論から述べると、図 5.2.1-1 より、事前アンケートではこの 3 つのグループの回答率に大きな差は見受けられなかった。また、事前アンケートでは正答を選び慣性質量的な記述をした生徒がいなかったことから、記述内容に大きな差がみられることも考えにくい。これより、事前調査の結果は、慣性質量的な思考ができてそれが定着することには関係しない可能性が高い。つまり、慣性質量的な思考の定着には、学習前の生徒の状況ではなく、授業などの学習過程が影響したと考えるのが妥当である。ただし、問 3 (自由落下運動) では、正答

の「同じ」と答えた生徒の割合が i 群で 51.9%，ii 群で 54.2%，iii 群で 32.3%と，iii 群だけ低い結果となった。そのため，学習前から「質量が異なる 2 物体が同時に落ちること」という思考をしている生徒の方が，慣性質量的な思考ができるようになる可能性が高いことが示唆される。

5.3.2 事後調査の結果と考察

i ～ iii 群の事後アンケートの結果を比較する。回答人数は i 群から順に 27 名，24 名，30 名であった。事後アンケートにおいて慣性質量に関係するのは，問 2（自由落下運動）と問 3（振り子の運動）である。図 5.3.2 に，問 2 と問 3 における各グループの記述内容を 4 つの基準（5.3.2 参照）で分類したグラフを示す。

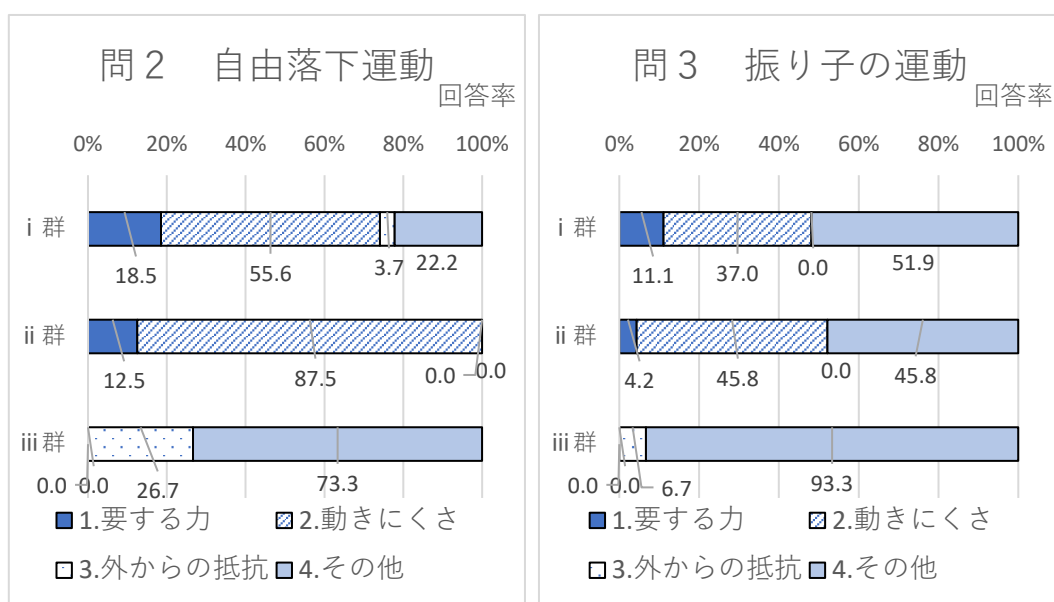


図 5.3.2 問 2 と問 3 における各グループの記述内容

ここでは，i 群と ii 群の違いを中心に分析する。図 5.3.2 より，問 3（振り子の運動）では両者に大きな差は見られないが，問 2（自由落下運動）では「動きにくさ」の項目で差がみられた。i 群では 55.6%であるのに対し，ii 群では 87.5%であった。これより，「動きにくさ」という解釈だけでは，慣性質量的な思考が定着しにくいことが考えられる。しかし，i 群の半数を「動きにくさ」と回答した生徒が占めることから，この解釈でも慣性質量的な思考が継続することは事実である。その他の特徴としては，事後調査では慣性質量的な思考をしなかったのに追加調査では慣性質量的な記述ができるようになった生徒がいることである。その生徒らを抽出して，事前・事後・追加調査の結果を分析したが，共通の特徴は見つからなかった。

5.3.3 追加調査の結果と考察

i～iii群の追加アンケートの結果を比較する。回答人数はi群から順に27名、23名、30名であった。追加アンケートにおいて慣性質量に関係するのは、問1（斜面を下る運動）、問3（自由落下運動）、問4（振り子の運動）であるが、これらの問いの各選択肢の回答率については、i～iii群で有意差が見られなかった。そのため、ここでは各群の記述内容の違いについて分析する。図5.3.3に、問3と問4における各グループの記述内容4つの基準で分類したグラフを示す。

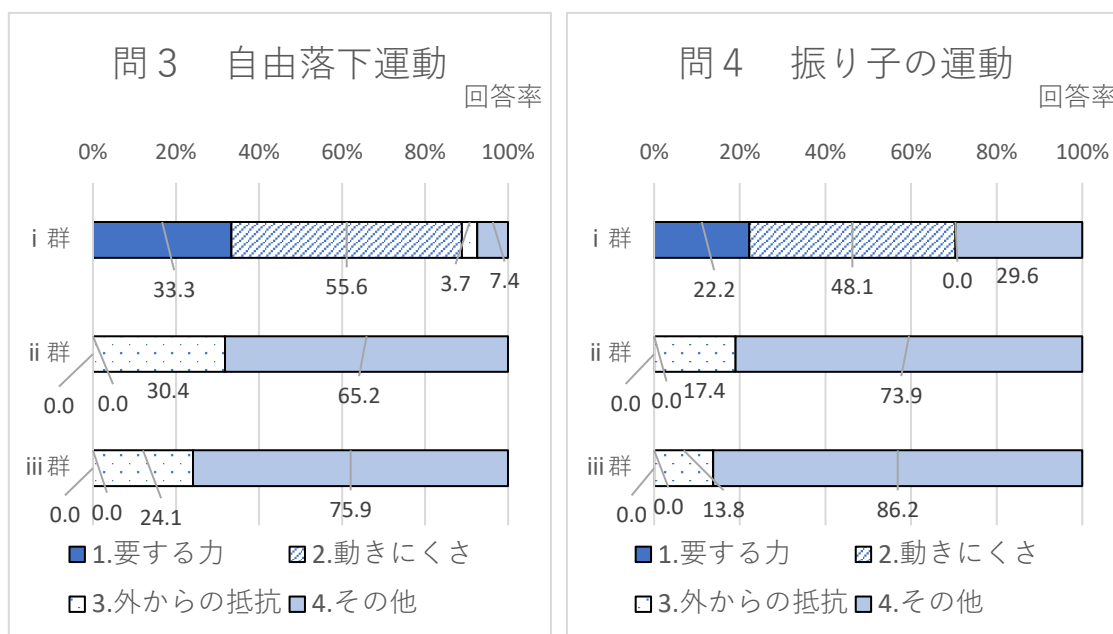


図 5.3.3 問3と問4における各グループの記述内容

図5.3.3より、ii群（事後調査では慣性質量的な記述をしたものの追加調査ではそれがなくなった生徒たち）の記述内容に着目して分析を行う。この生徒らは事後調査において「動きにくさ」についての記述が87.5%を占めた集団である。そして、追加調査ではそれが「外からの抵抗」と「その他」への記述へと変わった。質量が大きいと動きにくいのは「外からの抵抗」も大きくなるからだと答えた生徒が30.4%、単に空気抵抗がないからだと答えたリ、エネルギーが関係していると答えた「その他」の記述に該当するものが65.2%であった。これより、「動きにくさ」についての思考は「外からの抵抗」として誤って解釈されるよりも、単に答えられなくなるという確率の方が高いようである。この原因としては、「動きにくさ」という解釈の根拠が曖昧であったことが考えられる。

5.4 第5章のまとめ

第5章では、第4章で提案した「斜面を下る運動」の授業による介入効果について分析を行った。評価方法①としては、介入群のF中学校と対照群のN, S中学校を比較し、授業による介入効果や通常授業での学習者の思考の変容について分析した。評価方法②としては、介入群F中学校でクラスごとに“内在的抵抗”p-prim を活性化させるタイミングなどの授業展開を変え、各クラスの介入効果について比較し、よりよい介入の仕方について検討を行った。

はじめに、評価方法①からわかったことについて述べ得る。事前調査では、介入群、対照群とも慣性質量的に関する記述はほとんど見られず、学習前の生徒らは“内在的抵抗”p-prim を活性化させるににくい状態であったことがわかった。事後調査では、介入群では慣性質量に関する記述をした生徒が半数以上であったのに対して、対照群では誰も慣性質量的な記述をしなかった。また、介入群では「力がはたらく運動」の授業で扱わなかった振り子の運動の文脈でも慣性質量的な思考を適用させた。これより、介入群では授業の介入効果が見て取れた。一方で、通常授業を行った対照群では、事後調査においても自由落下運動において質量が異なる2つの物体が同時に落ちる理由を「重力が同じだから」と答える生徒が少なくなく、第4章で懸念していた誤った解釈が見受けられた。

次に、評価方法②からわかったことについて述べる。ここでも、慣性質量的な記述があるかを基準として授業効果について評価を行った。事前調査では、各クラスに大きな違いは見受けられなかったが、事後調査では、C組の授業効果が群を抜いて高く、A組、B組の介入効果は同程度であった。しかし、授業実践からおおよそ3ヶ月後に実施した追加調査について各クラスの慣性質量的な思考をした生徒の割合を比べると、どのクラスもそれほど変わらない結果となった。ただし、記述内容にはクラスごとに差が見られた。特に差ははっきりと差が見られたA組とC組について分析すると、A組では質量の大きい物体は「運動に必要な力」も大きいと記述しており、C組では重い物は「動きにくい性質がある」と記述する傾向があった。これは、授業展開や授業中に共有された言葉などが影響していると考えられる。そして、事後調査で慣性質量について「動きにくさ」にのみ言及している生徒の多くは、追加調査では「動きにくさ」を空気抵抗など「運動を妨げる力」によるものであると誤って解釈したり、単に「動きにくさ」への言及が無くなったりしていた。

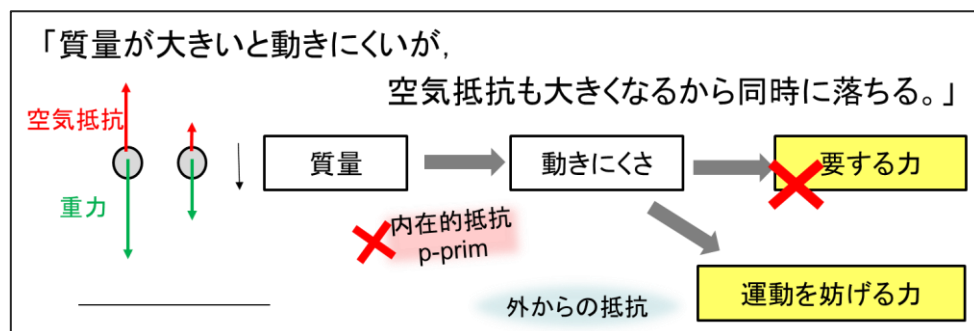


図 5.2.5-2 「動きにくさ」の誤った解釈の例

そのため、単に質量が大きい物には「動きにくさ」があると記述しているだけでは、それが内在的抵抗 p-prim に起因するものなのか、そうではなく外側から運動を妨げる空気抵抗などによるものだと捉えているのか判断が難しい。そこで、新たな評価基準を定めることとした。具体的には、これまで慣性質量的な記述であるとしていたものを「運動に必要な力について記述しているもの」と「単に動きにくいからと答えているもの」の2つに分類し、慣性質量的でないとした記述についても「動きにくさを外からの抵抗によるものだと解釈しているもの」と「その他」に分類した。

新しい評価基準で再分析したところ、「動きにくさ」として解釈するよりも「運動に要する力」として解釈した方が、授業を受けてから時間が経っても慣性質量的な思考が継続することがわかった。ただし、「動きにくさ」として解釈した生徒の中にも思考が継続した生徒がいることから、この解釈を否定することはできない。慣性質量的でない記述では、質量が大きいほど「(空気抵抗など) 外からの抵抗」も大きくなると答えた生徒の割合が、どのクラスも事後調査から追加調査にかけて増加しており、この思考に陥らないための学習支援が課題として浮かび上がった。

以上より、意図的に内在的抵抗 p-prim の活性化して慣性質量への気づきを促すことができれば、生徒は自由落下運動など“質量”と“力”が分化しにくい現象においても両者を区別して思考することができることが示唆された。また、慣性質量の理解の仕方としては、単に「質量が大きいほど動きにくい」と解釈するだけでなく、「質量が大きいほど動きにくく、運動に必要な力が大きい」と“力”についても併せて理解することで、慣性質量的な思考が定着しやすいことが示された。一方で、「質量が大きいほど動きにくい」ことの原因を外側から運動を妨げる作用として誤って解釈した生徒への支援方法が課題となった。

第6章 総合考察

第3章～第5章の総合考察を行う。第3章では、授業中の児童・生徒の発話記録などをもとに学習者の思考を p-prims の枠組みで捉えなおした。第4章では、第3章で得られた p-prim の特徴や課題をもとに p-prim を活用した授業開発を行い、第5章では、開発した授業の介入効果について分析した。本章では、各章の内容を整理して p-prim の視点から再分析し、それをもとに学習支援の在り方について検討する。

6.1 各章の総括

第3章では、学習者の思考を p-prims による新たな枠組みで捉えなおし、p-prim による分析ならではの特徴が明らかとなった。p-prim による解釈では、学習者の思考に対して複数通りの解釈をしたり、誤概念に該当しない思考の解釈をしたりすることが可能であった。これより、p-prims が学習者の思考の多様性を扱えることが明らかとなった。また、p-prim による解釈では、学習者の思考を p-prim の組み合わせとして捉えなおすことができ、その中から科学的概念を構築するための材料となる p-prim を見つけることができた。特に、いくつかの p-prim を組み合わせて、運動の法則につながるような思考をした児童がいた点に着目したい。ここでは、学習者の思考の中から科学的推論の材料となる p-prim が見つかったことに価値がある。これより、教員がこれらの材料をうまく組み合わせて授業をファシリテートできれば、学習者の思考を肯定しながら議論を展開できることが示唆された。

また第3章での分析結果より、推論 p-prims が思考操作の軸となることがわかった。そして、これらの p-prims がシエマを支える直観であるという見方ができることから、シエマや推論 p-prims が軸となり、それに適切な p-prim をマッピングすることで科学的な推論ができることが示唆された。課題としては、推論 p-prim にマッピングを行う際に必要な概念が未分化であることが浮かび上がった。

この課題をうけて、第4章では p-prims による科学的な推論を行うための第一歩として、「概念を分化する」プロセスに着目して授業開発を行った。ここでは、「質量」概念の分化に課題が見られる自由落下運動や斜面を下る運動において、質量概念を分化することを目的とした。そして、第3章で活性化した科学的推論を助ける p-prim のうち、**内在的抵抗 p-prim**を活用することとした。**内在的抵抗 p-prim**は、振り子の運動の学習の際に慣性質量への気づきを促し、質量概念を分化するものとして期待ができる p-prim である。題材としては「斜面を下る運動」を扱い、質量概念の分化に特に困難を示す自由落下運動と、質量概念の分化が比較的容易であると考えられる水平面の運動をつなぐ授業を開発した。

第5章では、授業による介入効果の分析と適切な介入方法の検討を行った。はじめに、介入群のF中学校と対照群のN、S中学校を比較し、授業による介入効果や通常授業での学習者の思考の変容について分析を行った。事前調査では、介入群、対照群とも慣性質量に関する記述はほとんど見られず、学習前の生徒らは“内在的抵抗”p-prim が活性化しにくい状態

であったものの、事後調査では介入群で一定の介入効果があった。一方、対照群では自由落下運動において質量が異なる 2 つの物体が同時に落ちる理由について「重力が同じだから」と答える誤った解釈が多く見受けられた。

また、第 5 章では適切な介入方法を探るため、介入群 F 中学校でクラスごとに“内在的抵抗”p-prim を活性化させるタイミングを変えるなどして、介入効果について比較した。各クラスの介入効果の違いとして明らかとなったのは、慣性質量への理解の仕方であった。慣性質量を単に「動きにくい性質」として捉えている生徒が多いクラスもあれば、それからさらに「質量が大きいほど運動に要する力も大きい」として“力”との関係についても考えている生徒が多いクラスもあった。この 2 つの考え方はともに慣性质量的な思考であると解釈できるが、質的に異なるため基準を設けて分類した。また、慣性质量的でないとしていた記述についても「動きにくさを外からの抵抗によるものだと解釈しているもの」と「その他」に分類した。この評価基準で分析したところ、「動きにくさ」として解釈するよりも「運動に要する力」として解釈した方が、授業を受けてから時間が経っても慣性质量的な思考が継続することがわかった。また、慣性质量的でないとしていた記述のうち、質量が大きいと「(空気抵抗など) 外からの抵抗」も大きくなると答えた生徒の割合は、どのクラスも事後調査から追加調査にかけて増加しており、この思考に陥らないための学習支援の必要性が示唆された。

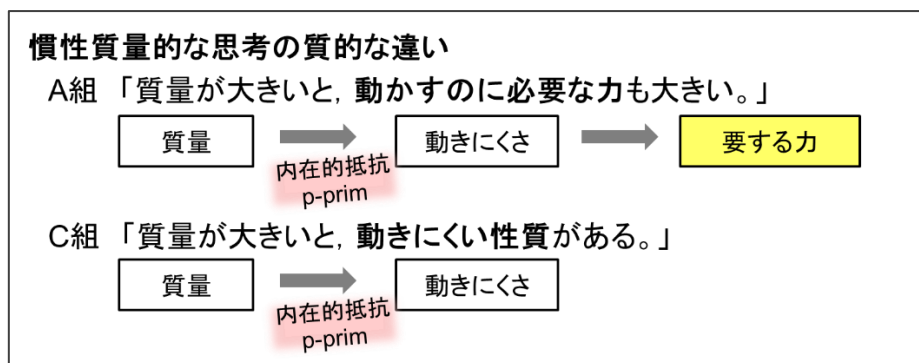


図 6.1-1 A 組と C 組の慣性质量的な思考の質的な違い

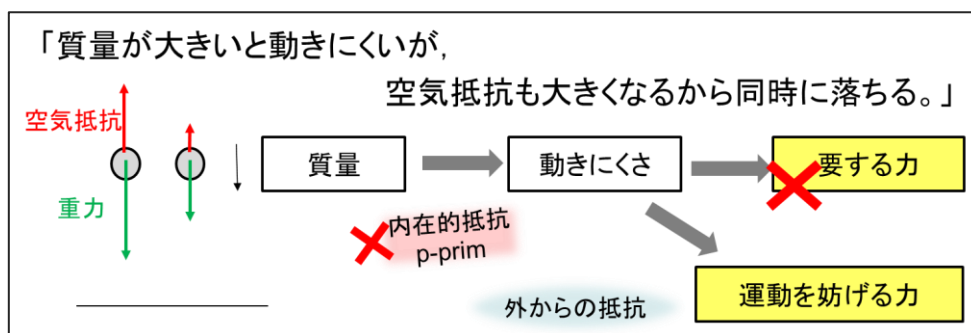


図 6.1-2 慣性质量的でない理由の一例

6.2 p-prim の視点からのさらなる考察

第5章までは、慣性質量的な記述の有無によって生徒の“内在的抵抗 p-prim”が活性化したかについて分析したが、ここでは生徒が思考の際に用いたと考えられる他の p-prim も併せて考察する。はじめに、A組でよく見られた「質量が大きいと動きにくい、その分運動するのに必要な力も大きくなる」という思考について p-prims の観点から捉えなおす。前半の「質量が大きいと動きにくい」については“内在的抵抗”が活性化した結果であると解釈でき、後半の「その分運動に必要な力も大きくなる」については、2通りの解釈ができる。1つ目は、Ohm の p-prim (成果＝作用/抵抗) の活性化し、作用として「運動に必要な力」、抵抗として「内在的抵抗(慣性質量)」, その結果得られる成果として「加速度(または速度)」を当てはめたと解釈できる。2つ目は、Dynamic imbalance と Overcoming の活性化が考えられる。Dynamic imbalance の意味は、2つの作用が葛藤状態にあるとつり合うことを意味する Dynamic balance が崩れている状態であり、Overcoming を呼び出す p-prim である。Overcoming とは、つり合っていた2つの作用のうち、一方がもう一方を上回り、その影響が加速することを意味する p-prim である。ここでは、2つの作用として「動きにくさ」と「運動するのに必要な力」を当てはめ、それらが拮抗して「運動するのに必要な力」が勝ったために物体は運動したという思考をしたと解釈できる。記述内容からは Ohm と Overcoming のどちらが活性化したか判断しにくかったこと、似たような考えでも生徒ごとに若干捉え方が異なることから、2通りの解釈をした。

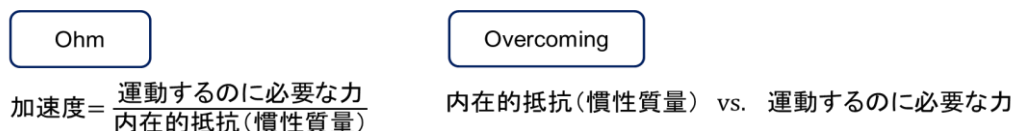


図 6.2-1 「質量が大きいと動きにくい、その分運動するのに必要な力も大きくなる」
という思考の2通りの解釈

次に、「動きにくさ」の原因が空気抵抗として還元された「質量が大きいと下向きの力が大きいけど、空気抵抗(運動を妨げる力)も大きい」という思考について、p-prims の観点から分析する。これは、質量が異なる2つの台車の水平面の運動という“重い物は動きにくい現象”に出会っても、“内在的抵抗”は活性化せずに、表面的な解釈に留まったと考えられる。そして、ここでは Dynamic imbalance と Overcoming が活性化し、2つの作用として「運動を妨げる力」と「運動方向の力」を当てはめたと解釈できる。また、この思考については比例・反比例的な思考が見受けられなかったことから、Ohm が活性化したとは考えにくかった。

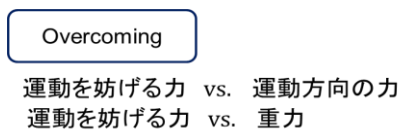


図 6.2-2 「質量が大きいと下向きの力が大きいけど、空気抵抗(運動を妨げる力)も大きい」
という思考の解釈

Ohm の p-prim は運動の第二法則の定性的な理解に中心的な寄与をするため、最終的にはこの p-prim によって、比例・反比例について思考できるようになることが理想である。しかし、Overcoming が Ohm に取って替わらなければならないのか、それとも徐々に移行するものなのかといった疑問が残る。また、この Overcoming から Ohm への移行期間もしくは別次元で、「交渉」の感覚が働いていると考えることもできる。Overcoming のようにどちらかの作用の結果のみが加速されるというより、2つの作用が交渉していると捉える方が適当かもしれない。

6.3 p-prims 理論を用いた教育的介入の検討

以上の結果をもとに、教授方法や学習支援の在り方について検討する。はじめに、本実践において介入群では慣性質量的な記述が見られたことより、授業において意図的に内在的抵抗 p-prim の活性化を行うことは、慣性質量の理解を促すことが示された。慣性質量を理解するためには“質量”と“力”を別々に考える必要があるため、慣性質量的な思考をした生徒は質量概念が分化していると判断した。そして、慣性質量を単に「動きにくさ」として解釈するよりも、動きにくいから「運動に要する力」も大きいとして解釈した方が、授業を受けてから時間が経っても慣性質量的な思考が継続することがわかった。一方で、この授業により、質量が大きいと「動きにくい」のは、「運動を妨げる力がある」からだという誤った解釈も与えてしまった。この原因の一つとして、「動きにくさ」という解釈の曖昧さが考えられる。このことから導かれる学習支援としては、授業中の議論において、単に「動きにくさ」についてのみ言及するのではなく、「運動に要する力」についても着目するように促して議論を展開することが考えられる。

しかし、「動きにくい」のは「運動を妨げる力がある」という誤った思考は、運動の法則を理解の途中段階と捉えることもできる。この思考について質量が分化しているかという観点で考察すると、学習前は自由落下運動において「重力が一緒だから」という記述をしていたが、介入群において学習後にはその記述が見受けられなくなった。このため、誤った解釈をしているものの、「質量」と「力」を区別することはできていると考えられる。これより、内在的抵抗を活性化させることを狙った授業による介入は、質量概念を分化することには役立ち、p-prims の発達を促す第一歩となることがわかった。

一方で、いくつかの概念が未分化であるという課題が残った。はじめに、「速度」と「加速度」が未分化な生徒がいることである。運動の法則を正確に理解するためには、加速度を考えなければならないが、生徒はしばしば加速度ではなく速度についてのみ言及していた。これより、今後の学習支援として、速度と加速度を区別する必要がある。次に、「質量」と「重さ」が未分化であることである。本実践で生徒は「重さ」という言葉を「質量」という意味で用いることがあった（例えば、「重いから重力が大きい」など）。これは、重力と質量（質量という意味で使っている重さ）は分化しているが、質量と重さの区別まではできていない。このため、これについても支援が必要である。

6.4 質量概念の形成を促す授業の提案

以上の成果と課題をふまえて、質量概念の形成を目指す授業を再編成して提案する。本実践で実施したものから大きな変更はないが、教員のはたらきかけ方など留意点を付け加えた具体的な指導案を巻末付録に載せる。新たに付け加えた留意点については、太字で示した。授業のねらいは、力がはたらき続ける運動では「運動方向の力が大きくなれば加速しやすいこと」を理解するだけでなく、「質量が大きいほど加速しにくいこと」に着目して斜面を下る運動を慣性質量的な視点からも説明できるようになることである。授業の概要について表 6.3 に示す。新たに付け加えた留意点について展開ごとに述べる。

導入では、「速さ」と「速さの変化」を区別して扱うように促すことに留意する」という項目を付け加えた。これは、生徒の発言や記述内容より、「加速する」と「速い」などを区別せずに使っていた場面が多く見受けられたためである。前時に一定の力がはたらき続ける運動では「速さが時間とともに一定の割合で変化すること」を学習しているので、「速さ」と「速さの変化の割合」について区別をするためには、前時の復習のタイミングが適切だと考えられる。

展開①では、「問 0 では、変数が“質量”のみであることに着目させる。」「2 つの台車に同じ力を加えたことを強調し、“力”という物理量への意識を促す。」「『質量が大きいほど加速しにくい』という発言を引き出す。」という項目を追加した。これは、展開③の考察において“力”と“質量”の 2 つの変数への気づきを促すための準備として、2 つの物理量に着目しやすい問 0 (水平面の運動)において“力”と“質量”の 2 つを意識させる必要があるからである。また、「“質量”と“重さ”を区別して使うように促す」ことも留意点として付け加えた。これは中学校 1 年生で学習しているが、“重さ”という言葉の方が馴染みがあるためか、“質量”という意味で“重さ”という言葉を使っている生徒も多かった。このため、余裕があればこれらを区別して扱うようなはたらきかけが必要であると考えられる。

展開③では、「質量が大きいほど動きにくいことの理解に留まるのではなく、質量が大きいほど運動に要する力も大きくなることを共通認識させる。」という項目を追加した。これは、本研究において、慣性質量を“動きにくさ”として理解するだけでは、動きにくい原因を空気抵抗の大きさによるものとして誤って解釈してしまう生徒が多かったためである。そのため、「空気抵抗や摩擦の影響は無視できるほど小さいことを意識させ、質量が大きいほど加速しにくいことの原因にはならないことを前提に議論を促す。」という項目も追加した。

表 6.3 授業の概要

授業展開	授業内容と本実践での留意点	新たな留意点
導入	斜面を下る運動は斜面方向に力がはたらき続ける運動であり、速さが時間とともに一定の割合で変化する運動であることを速さ－時間グラフと共に振り返る。 この際、グラフの傾きが一定であることは、速さの変化の割合が一定であることを確認する。	・“速さ”と“速さの変化”を区別して使うように促す。
展開①	問0について予想し、班及び全体で共有する。その後、動画によって実験結果をみる。 この際、(扇風機によって) 同じ力を加えた場合「質量が大きいと速さの変化しにくい」ことに着目させる。	・問0では、変数が“質量”のみであることに着目させる。 ・2つの台車に「同じ力を加えたこと」を強調し、“力”という物理量への意識を促す。 ・「質量が大きいほど加速しにくい」という発言を引き出す。 ・“質量”と“重さ”を区別して使うように促す。
展開②	問1, 問2について予想し、班及び全体で共有する。	
展開③	問1, 問2の実験結果をみて、なぜそのような結果になったのか個人→班で考察する。 問1の考察では、「斜面方向(運動方向)の力が大きい方が速さの変化も大きくなる」ことに気づかせる。 問2の考察では、おもりをのせた台車は斜面方向の力は大きいが速さの変化は大きくならないので生徒が葛藤するポイントである。ここで、問0の「質量が大きいと速さの変化しにくい」ことを活用し、斜面の運動においても“力”だけでなく“質量”という変数に気づかせることをねらう。	・「質量が大きいほど動きにくい」ことの理解に留まるのではなく、「質量が大きいほど運動に要する力も大きくなる」ことを共通認識させる。 ・空気抵抗や摩擦の影響は無視できるほど小さいことを意識させ、質量が大きいほど加速しにくいことの原因にはならないことを前提に議論を促す。
まとめ	考察したことを全体で共有する。	

第7章 結言

本研究では、“主体的・対話的で深い学び”を実現するためには、教員が学習者の思考を理解して授業デザインや学習支援をする必要があるとして、学習者の思考の多様性を扱える新たな枠組みとして期待されている p-prims 理論に着目した。そして、それに基づいて学習者の思考を捉えなおし、p-prims の視点から教授方法や学習支援の提案を行った。実践の結果としては、p-prim による解釈では素朴概念に該当しない思考を解釈できるなど思考の多様性を扱える可能性が示せた。また、学習者の推論の中から科学的な推論の材料となる p-prim を抽出し、学習者が従来からもっている直観である p-prim を使って推論を組み立てる授業デザインや学習支援の提案をすることができた。このような授業では、学習者の思考を肯定的に捉えることができるため、学習者の主体性を大事にした授業が展開できる。このことから、p-prims を用いた授業は、自己肯定感が低いことが指摘されている日本の子どもたちへの支援としても適しているのではないかと考えられる。

本研究では p-prims 理論を活用して授業提案を行ったが、授業内容については子どもの実態に応じて吟味し、適当に変更する必要がある。そのため、教員それぞれが子どもの思考を理解するための多様な枠組みを持っておかなければならない。p-prim 理論もその枠組みの一つとして重要な役割を果たす。しかし、p-prims 研究はまだ基礎研究の域を超えておらず、教育現場への活用はあまりなされていない。このため、さらなる基礎研究と多くの教育実践が必要である。この研究が少しでも多くの教員や研究者の目に留まり、子ども理解に対する多様な視点をもたらすことを期待する。そして、p-prims 研究が未来を担う子どもたちの可能性を最大限に引き出すことに貢献し、創造的で豊かな社会となることを切に願い、おわりとする。

参考資料

- [1] 文科省, “学習指導要領(平成 30 年告示) 解説理科編”.
- [2] 独立行政法人国立青少年教育振興機構, “高校生的心と体の健康に関する意識調査－日本・米国・中国・韓国の比較－,” 2017.
- [3] 文科省, “中央審議会答申,” 平成 28 年.
- [4] 板倉聖宣, “仮説実験授業の方法と理論,” 時事通信・内外教育版, 1962.
- [5] 仮説実験授業研究会板倉聖宣編, “授業書研究双書 力と運動・速さと距離と時間,” 国土社(p64-69), 1998.
- [6] 仮説実験授業研究会板倉聖宣編, “授業書研究双書 電池と回路,” 国土社, 1988.
- [7] Andrea.A.diSessa, Toward an Epistemology of Physics, Cognition and Introduction,10,105-225, 1993.
- [8] Kuhn, “The Structure of Scientific Revolutions,” 1970.
- [9] J. Clement, “Student's preconception in introductory mechanics,” Am.J.Phys50(1), 1982.
- [10] P. Roger.Osborn, “子どもたちはいかに科学理論を構成するのか,” 東洋館出版, 1988.
- [11] 村山功, “断片的知識論とその教授方法への示唆,” 教科開発学論集第 1 号,55-64, 2013.
- [12] A. A.diSessa, “A Friendly Introduction to "Knowredge in Pieces"Modeling Types Roles in Learning,” Invited Lectures from the 13th International Congress on Mathematical Education,65-84, 2018.
- [13] A.A.diSessa&B.Sherin, “What changes in conceptual change?,” International Journal of Science Education,20,1155-1191, 1998.
- [14] A .diScssa : in G.Fornman and P.Pufall(eds), Cons'tructivism in the Computer Age, (Hillsdale ,NJ,1988) 49－70.
- [15] J. ビアジェ, 子どもの物理的世界, 中垣啓訳, 芳賀純編訳, 発達の条件と学習, 誠信書房(原著 1972) , 1979.
- [16] F. Redish, “Teaching Physics with the Physics Suite,” 2003.
- [17] McCloskey, M, "Intuitive physics." Scientific Ametican,122-130,1983.
- [18] 山崎敏昭 他(2013). 高校物理に導入したアクティブ・ラーニングの効果と課題, 物理教育 61-1.

- [19] 山田吉英,他, “p-prims の活用事例-手回し発電機の手応えについての実践と研究を文脈として-,” 第 35 回物理教育研究大会発表予稿集,134, 2018.
- [20] J.Minsterell, “Facets of student's knowledge and relevant instruction”, In:Research in Physics Learning: heoretical issues and Emprical Studies, Proceedings of an International Workshop, Bremen, Germany, March, 4-8,1991,edited by R.Duit, F.Goldberg, and H. Niedderer 100-128.
- [21] Cultivating conceptual change with benchmark lessons DISESSA A. A. Thinking Practices in Mathematics and Science learning, 155-188, 1998
- [22] University of Maryland Physics Education Research Group,
“<http://www.physics.umd.edu/perg/>”.
- [23] Clement, “Overcoming Student's Misconceotions in Physics:The Role of Anchoring Intuitions and Analogical Validity,” 1989.
- [24] J.Clement, “Expert novice similarities and instruction using analogies,” 1998.
- [25] 新田英雄, “素朴概念の分類,” 物理教育第 60 巻第 1 号,17-22, 2012.
- [26] 山本修平, “p-prims 論を用いた誤概念解釈及び概念変容方略の開発—手回し発電機の手応えを考察する場面を中心として—,” 2019.
- [27] 飯塚祐介, 片平克弘, “「生徒の化学知識の理解における p-prims 論の活用に関する研究,” 日本科学教育学会研究会研究報告 Vol.30 No.6 pp.44, 2016.
- [28] 澤柿教淳, “生活科における断片的な知識 p-prims とラーニング・プログレッションズの検討,” 松本大学研究紀要 第 16 号, 2018.
- [29] D. Hammer, “Misconceptions or P-Prims :How May Alternative Perspectives of Cognitive Structure Influence Instructional Perceptions and Intentions ?,” 1996.
- [30] 中村美知生, 荒木紀幸, “「ものの動きとはたらき」に関する小学生から大学生に至る素朴概念の比較,” 兵庫教育大学教科教育学会紀要 (12), 22-27, 1999.
- [31] P. Adey, M. Shayer , C. Yates, “Thinking Science Professional Editon,” 2003.
- [32] 文科省, “小学校学習指導要領解説 理科編,” 平成 29 年.
- [33] P. Roger.Osbone, ““子どもたちはいかに科学理論を構成するのか,” 東洋館出版, 1988.
- [34] D. a. R.K.Thornton, “Assessing student learning of Newton’s laws: The Force and Motion Conceptual Evaluation and the Evaluation of Active Learning Laboratory and Lecture Curricula,” Am. J. Phys., 第 66 巻, pp. 338 -352, 1998.
- [35] L.C.McDermott, P.S.Shaffer and the Physics Education Group, Tutorials in Introductory Physics, 2002.

- [36] 滝川洋二, “授業分析による「自然認識の過程」の研究(II) — 運動の法則の理解と質量概念の形成を事例として —,” 国際基督教大学学報. I-A, 教育研究, 28 号, 157-186, 1986.
- [37] 文科省, “中学校学習指導要領解説理科編,” 平成 29 年.
- [38] “新版 理科の世界,” 大日本図書株式会社, 平成 27 年.
- [39] 山崎敏昭・井上賢・谷口和也・内村浩, “高校物理実験の実態 II — 2009 年大学新入生調査の分析 —,” 物理教育, 第 59 巻, 第 2 号(2011), 2011.
- [40] PASCO ワイヤレス力学台車スマートカート, (株) 島津理化,
“https://www.shimadzu-rika.co.jp/kyoiku/it/wireless_sensor/101_350.html”.
- [41] 樋口耕一(2018), “テキストマイニング用フリーソフト KH Coder 3
<http://khc.sourceforge.net/>”.

謝辞

本研究を進めるにあたり、お世話になりました全ての皆様に感謝申し上げます。特に、厳しくも温かい指導を賜りました谷口和成先生には、謹んで感謝の意を表します。

また、多くの知見と心優しいご助言をくださった山田吉英先生、福島和洋先生に深く感謝申し上げます。

同研究室の古結尚先生、石井哲夫先生、中東敏樹先生、角野強士先生、井ノ本浩子さん、杉原早紀さん、野原大輝さん、森彩香さん、片山稀さんには様々なアドバイスや意見をいただき、議論を重ねることができました。感謝申し上げます。同期の高橋幸太郎さん、貴方の研究への熱意に刺激を受け、実りのある大学院生活を送ることができました。これからも理想の教育を追い求め続け、切磋琢磨しましょう。

4 回生の荻原幸佑さん、白川仁也さん、野口啓吾さん、藤本滉二郎さん、三森雷大さん、研究室を賑やかで居心地が良いものにしてくれてありがとうございました。

また、本研究に協力してくださった生徒の皆様、先生方、そして日々の業務で忙しい中、実践についてご助言をいただいた松谷佳樹先生に、心から感謝申し上げます。

付録

第5学年2組 理科学習指導案

1. 単元名 10章「ふりこの動き」 (大日本図書 たのしい理科5年 p.150～152)

2. 本時の学習

(1) 目標

ふりこの運動について、日常生活や既存の知識と関連づけながら予想を立てることができる。

(2) 展開

過程	配 当	生徒の学習活動	授業 形態	教師の指導・支援	備考
導入	5 分	1. 周期の異なる2つのふりこが10往復する時間が違うことに気づく。	一斉	・ふりこについて簡単な説明をする。 ・おもり、ふりこの長さ、ふれはばのすべてが異なる2つのふりこを揺らし、10往復する時間を児童にストップウォッチで計らせる。	ふりこ ストップ ウォッチ ビデオカ メラ ボイスレ コーダー
展開	35 分	2. ふりこによって1往復する時間が異なるのはなぜか予想し、ワークシートに記入する。	個人	・児童が予想しやすいように、2つのふりこの違いはなにか整理させる。	ワークシ ート ふりこ
		ふりこの1往復する時間は、何によってかわるだろうか。			
		3. 予想をクラスで共有する。	一斉	・「おもりの重さ、ふりこの長さ、ふれはば」など大きく柱だてする。	
		4. なぜそのように予想したのか理由を明確にする。	数人	・児童が自分の考えを深めることができるように、意見が似ている人どうして話し合わせる。 ・多様な意見がでるよう促す。	
		5. 自分の意見を述べ、議論する。	一斉	・日常生活と関連づけながら話し合えるように、机間指導を行う。	
		6. 自由に議論する。	班		
まとめ	5 分	7. 最終的な自分の考えをワークシートに記入する。	個人		ワークシ ート

理科 学習指導案

1. 対象 第3学年7組 普通科特進エリア 理系 4名
2. 単元名 第2章「電流」 第2節 直流回路（数研出版）
3. 単元の目標
 - ・電気回路における基本法則を理解する。
4. 単元指導計画（全4時間）

時	指導内容	学習活動	備考
1	豆球の明るさ 中学校の復習	・豆球の明るさは電流と電圧によって決まることを確認する。 ・オームの法則について確認する。 ・複合回路の事前アンケートに回答する。 ・直列回路では電流が一定であることを理解する。（実験 2-1,2）	・豆球は抵抗であることもおさえる。 ・後程行う授業を理解すれば、最終的に複合回路のアンケートが解けるようになることを伝える。 ・実験により、※電流消費説を解消する。
2	直列回路	・並列回路では電圧が一定であることを理解する。（実験は時間があれば行う。） ・直列回路では抵抗が大きい方がかかる電圧が大きいことを理解する。（実験 2-3） ・直列回路での豆球の明るさについて議論する。（実験 3-1） ・直列回路での豆球の電流について議論する。 （実験 3-2）	・実験により、※定電流概念を誘発する。
3	並列回路	・並列回路での豆球の明るさについて議論する。（実験 4-1,2） ・並列回路での豆球の電圧について確認する。 （実験 4-3） ・並列回路全体を流れる電流について議論する。（実験 4-4）	・実験により、再び定電流概念を誘発する。 ・実験により、定電流概念を克服させる。

4	複合回路	・ 並列回路全体の抵抗について議論する。 (実験 4-5) ・ 複合回路の事後アンケートに回答する。 ・ 授業の振り返りを行う。	・ 事前アンケートと比較して、 自分の考えの変容に気づかせる。
---	------	--	---

※電流消費説 …「電流は抵抗で消費される」という考え方

※定電流概念 …「電源から流れる電流は常に一定である」という考え方

下の回路図のように、豆球 A, B, C が新品の電池につながれている。豆球の抵抗はすべて同じものとする。

以下の問に対して、自分の考えを回答し、「なぜそう考えたのか」といった理由を、図を用いたり具体例を示したりしながら、説明してください。

※成績とは関係ありませんので、直感で答えても構いません。

1-1. 図1において、豆球 A と豆球 B のどちらが明るいですか。それとも同じ明るさですか。

[豆球 A ・ 豆球 B ・ 同じ]

<理由>

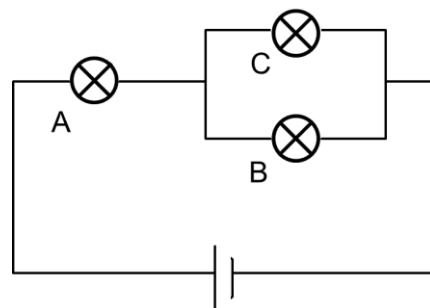


図 1

1-2. 図2のようにスイッチを開くと、豆球 A と豆球 B の明るさはどうなりますか。

豆球 A

[明るくなる ・ 暗くなる ・ 変わらない]

豆球 B

[明るくなる ・ 暗くなる ・ 変わらない]

<理由>

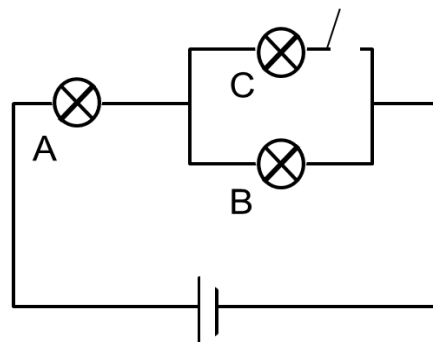


図 2

理科 学習指導案

1. 対象 京都教育大学附属 京都小中学校 第9学年

2. 日時 令和2年8月27日(木), 28日(金)

3. 場所 科学室

4. 単元1 運動とエネルギー

2章 物体の運動

5. 単元の目標

物体に力が働く運動及び力が働かない運動についての観察・実験を行い、力が働く運動では運動の向きや時間の経過に伴って物体の速さが変わること及び力が働かない運動では物体は等速直線運動することを見いだして理解すること。

6. 単元指導計画

時	指導内容	学習活動	指導上の留意点
1	運動の速さと向き	速さとは、一定の時間に物体が移動した距離であることを理解する。	
2	力がはたらき続ける運動	記録テープによる実験の結果を速さ-時間グラフに表し、その意味を理解する。 斜面を下る運動では、速さが時間とともに一定の割合で変化することを理解する。	区切った記録テープの長さが速さを表すこと、グラフにおける縦軸は速さを表すことをおさえる。
3 (本時)	力がはたらき続ける運動	同じ物体では、はたらく力が大きいほど、速さの変化の割合は大きいことを理解する。 質量を変えても速さの変化の割合が変わらない理由について、「質量が大きいと動きづらいから」という視点を持つ。	斜面の傾斜が急になるほど、斜面にそう力が大きくなることを確かめる。 水平面での運動について、質量が大きいほど加速しにくい(小さいほど加速しやすい)ことを示す。
4	力がはたらき続ける運動	斜面の角度を 90° にした場合、斜面にそう力は重力と同じになることを理解する。(自由落下運動)	
5	力がはたらいていない運動		
6	力を及ぼし合う運動		

理科 學習指導案

1. 対象 公立中学校3年生

2. 本時の目標

力がはたらき続ける運動において、運動方向の力が大きくなれば加速しやすいことを理解する。また、「質量が大きいと加速しにくい」ことに着目して斜面を下る運動を定性的に説明できる。

3. 本時の展開

過程	時間	学習内容	指導形態	指導上の留意点	備考	
導入	3分	・斜面を下る運動は斜面方向に 力がはたらき続ける運動 であり、速さが時間とともに一定の割合で変化する運動であることを振り返る。	一斉	・速度センサによって得られたグラフが、記録テープによって得られたグラフと一致することをおさえる。	スマートカート レール台車	
展開	37分	・本時の目的を理解する。				
		力がはたらき続ける運動について、物体の加速に関する条件を探る。				
		・実験アの速さ-時間グラフを見て実験イの速さ-時間グラフを予想する(問0)。	一斉	・実験動画をみせ、「質量が大きいと速度が変化しにくい」ことに着目させる。	実験動画	
		・実験 A の速さ-時間グラフを見る。 ・実験 B, C の速さ-時間グラフはどのようなになるか予想する。 ・実験 B の結果を見て、「質量が同じ場合、斜面にそう力が大きければ加速しやすい」ことを理解する。 ・実験 C の結果を見て、「質量が異なる物体では、速さが変化する割合が変わらない」ことについて、その理由を考え、議論する。	一斉 個人 一斉 一斉 一斉 一斉 一斉	・予想の根拠となる理由もきいておく。 ・生徒の考察の際に、「斜面の傾斜が急になるほど、斜面にそう力が大きくなる」ことを確かめる。 ・議論の際、「質量が大きいと速度が変化しにくい」ことに着目できるように、問0の結果を思い出させる。	ばねばかり (力センサ) おもり	
まとめ	10分	・力がはたらき続ける運動の特徴を整理する。 ・振り返りを行う。	一斉	・はたらく力が大きくなれば加速しやすく、質量が大きいと加速しにくいことをおさえる。		

事前調査

アンケート 組 番 班 名前 ()

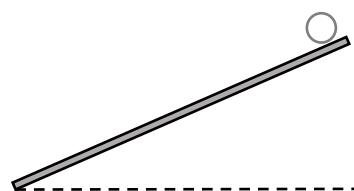
次の問いで、正しいと思うものに○をつけ、そのように考える理由を書いてください。
理科の学習や成績とは関係がありませんので、問いを読んだ直感で答えても構いません。

※空気による影響や摩擦^{まさつ}は考えないものとする。

1. 大きさ・形が同じ木のボールと鉄のボールを下図のような斜面で転がしたとき、どちらが早く地面に着くか。ただし、木のボールよりも鉄のボールの方が質量が大きいものとする。

【 木のボール ・ 鉄のボール ・ 同じ 】

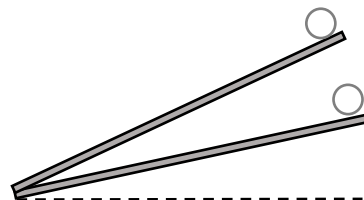
理由：



2. ゆるやかな斜面と急な斜面で同じボールを転がすとき、どちらが早く地面に着くか。

【 ゆるやかな斜面 ・ 急な斜面 ・ 同じ 】

理由：



3. 大きさ・形が同じ木のボールと鉄のボールを同じ高さから静かに離したとき、どちらが早く地面に着くか。ただし、木のボールよりも鉄のボールの方が質量が大きいものとする。

【 木のボール ・ 鉄のボール ・ 同じ 】

理由：



事後調査

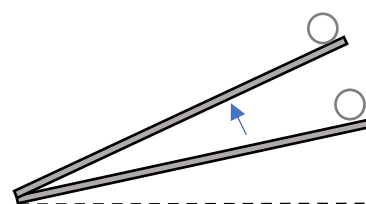
アンケート

組 番 班 名前 ()

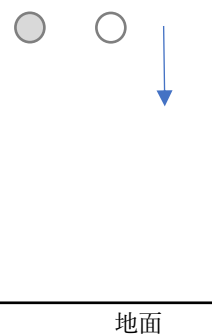
次の問いに答えてください。理科の学習や成績とは関係がありませんので、問いを読んだ直感で答えても構いません。

※空気による影響や摩擦^{まさつ}は考えないものとする。

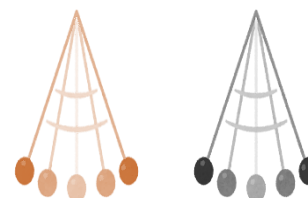
1. 斜面の傾斜を大きくすると、斜面を下るボールの速さの変化は大きくなった。
なぜそのようなになるのか答えよ。



2. 大きさ・形が同じ木のボールと鉄のボールを同じ高さから同時に離したとき、同時に地面に着いた。その理由を答えよ。
ただし、木のボールよりも鉄のボールの方が質量が大きいものとする。



3. 大きさ・形が同じ木のおもりと鉄のおもりを使った2つの振り子では、周期（1往復する時間）は変わらなかった。その理由を答えよ。
ただし、木のおもりよりも鉄のおもりの方が質量が大きいものとする。



追加調査

アンケート

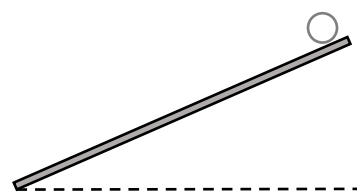
組 番 班 名前 ()

次の問いで、正しいと思うものに○をつけてください。問3，問4は、なぜそう考えたのか理由まで書いてください。理科の学習や成績とは関係がありませんので、問いを読んだ直感で答えても構いません。

※空気による影響や摩擦^{まさつ}は考えないものとする。

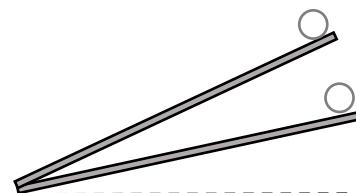
1. 大きさ・形が同じ木のボールと鉄のボールを下図のような斜面で転がしたとき、どちらが早く地面に着くか。ただし、木のボールよりも鉄のボールの方が質量が大きいものとする。

【 木のボール ・ 鉄のボール ・ 同じ 】



2. ゆるやかな斜面と急な斜面で同じボールを転がすとき、どちらが早く地面に着くか。

【 ゆるやかな斜面 ・ 急な斜面 ・ 同じ 】



3. 大きさ・形が同じ木のボールと鉄のボールを同じ高さから静かに離したとき、どちらが早く地面に着くか。ただし、木のボールよりも鉄のボールの方が質量が大きいものとする。

【 木のボール ・ 鉄のボール ・ 同じ 】

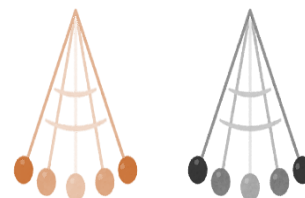
理由：



4. 大きさ・形が同じ木のおもりと鉄のおもりを使った2つの振り子では、周期（1往復する時間）はどちらが短い。ただし、木のおもりよりも鉄のおもりの方が質量が大きいものとする。

【 木のおもり ・ 鉄のおもり ・ 同じ 】

理由：



理科 学習指導案（改訂版）

1. 本時の目標

力がはたらき続ける運動において、運動方向の力が大きくなれば加速しやすいことを理解する。また、「質量が大きいと加速しにくい」ことに着目して斜面を下る運動を定性的に説明できる。

2. 本時の展開

過程	時間	学習内容	指導形態	指導上の留意点	備考
導入	3分	・斜面を下る運動は斜面方向に力がはたらき続ける運動であり、速さが時間とともに一定の割合で変化する運動であることを振り返る。	一斉	・速度センサによって得られたグラフが、記録テープによって得られたグラフと一致することをおさえる。 ・“速さ”と“速さの変化”を区別して使うように促す。	スマートカート レール台車
展開	37分	・本時の目的を理解する。 力がはたらき続ける運動について、物体の加速に関する条件を探る。 ・実験アの速さ-時間グラフを見て実験イの速さ-時間グラフを予想する(問0)。 ・実験Aの速さ-時間グラフを見る。 ・実験B, Cの速さ-時間グラフはどのようなになるか予想する。	一斉 一斉 個人 一斉	・実験動画をみせ、「質量が大きいと速度が変化しにくい」ことに着目させる。 ・問0では、変数が“質量”のみであることに着目させる。 ・2つの台車に「同じ力を加えたこと」を強調し、“力”という物理量への意識を促す。 ・「質量が大きいほど加速しにくい」という発言を引き出す。 ・“質量”と“重さ”を区別して使うように促す。 ・予想の根拠となる理由もきいておく。	実験動画 ばねばかり (力センサ) おもり

		・実験 B の結果を見て、「質量が同じ場合、斜面にそう力が大きければ加速しやすい」ことを理解する。 ・実験 C の結果を見て、「質量が異なる物体では、速さが変化する割合が変わらない」ことについて、その理由を考え、議論する。	一斉 班 一斉 一斉 班 一斉	・生徒の考察の際に、「斜面の傾斜が急になるほど、斜面にそう力が大きくなる」ことを確かめる。 ・議論の際、「質量が大きいほど速度が変化しにくい」ことに着目できるように、問 0 の結果を思い出させる。 ・「質量が大きいほど動きにくい」ことの理解に留まるのではなく、「質量が大きいほど運動に要する力も大きくなる」ことを共通認識させる。 ・空気抵抗や摩擦の影響は無視できるほど小さいことを意識させ、質量が大きいほど加速しにくいことの原因にはならないことを前提に議論を促す。	
まとめ	10 分	・力がはたらき続ける運動の特徴を整理する。 ・振り返りを行う。	一斉	・はたらく力が大きいほど加速しやすく、質量が大きいほど加速しにくいことを確認する。	

研究活動一覧

研究報告の題名	発表年	発表学会名	共同研究者
P-prims 理論による児童・生徒 の考え方の分析	2019	日本物理学会 秋季大会	福島和洋 谷口和成
P-prims 理論による電気回路分 野における生徒の思考の分析	2020	日本物理学会 春季大会	谷口和成 山田吉英
P-prims 理論による様々な運動 に対する生徒の思考の分析	2020	日本物理学会 秋季大会	谷口和成 山田吉英
p-prims 理論を用いた「運動の 法則」への気づきを促す授業の 開発と実践	2021	日本物理学会 春季大会	谷口和成 山田吉英

P-prims 理論による児童・生徒の考え方の分析

京教大物理, 熊大教育

渡邊里佳, 福島和洋, 谷口和成

Analysis of beginner's thought based on phenomenological primitives

Kyoto Univ. of Education (KUE)

R. Watanabe, K. Fukushima and K. Taniguchi

次期学習指導要領解説理科編における物理の内容の取扱い[1]では、「物理現象を扱う際には、生徒が経験的にもっている素朴な概念に留意して指導をすることが大切である」とされており、これからの物理教育では素朴概念など、生徒の思考を重視した授業デザインや学習支援が求められる。学習者の思考を理解するうえで、diSessa(1993)が提唱する P-prims 理論[2]は、これまでの素朴概念の研究に新たな視点をもたらすことが期待されている。ここで、p-prim とは体験や観察を通して獲得されるそれ以上単純化できない細分化された知識要素であり、p-prim によるネットワークを用いることにより、科学的思考を日常から連続した思考として説明できるとされる。つまり、学習者の思考を素朴概念よりも細かいレベルで解釈できるため、たとえば学習者の思考を分析する際に、誤概念に該当しない推論の解釈や意味理解、学習者の誤った推論の中から科学的推論との共通要素を見出して価値づけるなどの指導の手立てが可能になる[3]。

本研究では、学習者の思考を重視した授業デザインや学習支援を行うための足掛かりとして、物体の運動に対する児童・生徒の思考を P-prims 理論に基づいて分析した。小学 5 年生 70 名、中学 2 年生 150 名を対象とし、振り子の運動と斜面を下る物体の運動に関するアンケート調査を行った。そのうち小学 5 年生 36 名に対しては、「振り子の周期は何によって変わるか」について議論させ、児童の思考をプロトコルにより分析した。また、その変容をみるため、授業前後と単元後に同様のアンケート調査を行った。

調査の結果、物体の質量と運動に関する問いでは、授業前に「重い方が速く動く」と答えた児童は授業後および単元後に減少したが、授業前に「軽い方が速く動く」と答えた児童は、授業直後は考え方が変わっても、単元後には再び授業前と同じ思考に戻った。つまり、「*Lighter things go faster* (軽い物は速く動く)」という p-prim は優先度が高く、通常の学習ではこの p-prim に基づく思考は変化しにくい可能性がある。

講演では、振り子の運動を学習する際に児童・生徒が活性化させた、その他の p-prims および運動の捉え方や考え方について報告する。

[1] 文部科学省, 高等学校学習指導要領解説, 平成 30 年.

[2] Andrea A.diSessa, "Toward an Epistemology of Physics", *Cognition and Instruction* 10, 105-225(1993).

[3] 山田吉英, 他, 第 35 回物理教育研究大会発表予稿集, 134 (2018).

P-prims 理論による電気回路分野における生徒の思考の分析

京教大物理, 福井大院教育
渡邊里佳, 谷口和成, 山田吉英^A

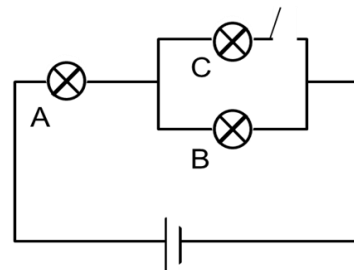
Analysis of beginner's thought about electric circuit based on phenomenological primitives

Kyoto Univ. of Education, Fukui Univ.^A

R. Watanabe, K. Taniguchi, Y. Yamada^A

次期学習指導要領解説理科編における物理の内容の取扱い[1]では、「物理現象を扱う際には、生徒が経験的にもっている素朴な概念に留意して指導をすることが大切である」とあり、これからの物理教育では素朴概念など、生徒の思考を重視した授業デザインや学習支援が求められる。ここで、学習者の思考を理解するうえで、diSessa(1993)が提唱する P-prims 理論[2]は、これまでの素朴概念の研究に新たな視点をもたらすことが期待されている。ここで p-prim とは「体験や観察を通して獲得される、それ以上単純化できない細分化された知識要素」であり、p-prim によるネットワークを用いることにより、学習者の思考を素朴概念よりも細かいレベルで解釈できる。このため、学習者の思考を分析する際に、誤概念に該当しない推論の解釈や意味理解、学習者の誤った推論の中から科学的推論との共通要素を見出して価値づけるなどの指導の手立てが可能になる[3]。

そこで本研究では、学習者の思考を重視した授業デザインや学習支援を行うための足掛かりとして、物理の各概念に対する生徒の思考を P-prims 理論に基づいて分析している[4]。今回は、公立高校3年生を対象とし、電気回路の学習における誤概念の克服を目指した ILDs 型の授業実践を行い、授業中の生徒の思考をプロトコルやワークシートの記述より分析した。また、電気回路をどのように認識しているかを調べるため、直列並列複合回路（右図）における各豆電球の明るさについてのアンケート調査を授業前後に行った。調査の結果、「スイッチを開閉した際、それぞれの豆球の明るさはどうなるか」という問いに対し、授業前は豆球Aの部分と豆球B、Cからなる並列部分を別々に考えていたが、授業後には各豆球にかかる電圧を考慮し、回路全体の変化を考えられるようになった生徒が複数いた。



講演では、上述のような生徒の考えの変容とその原因について、p-prim の観点からの分析と考察を報告し、その教授方法への提案をする予定である。

[4] 文部科学省、『高等学校学習指導要領解説』平成30年。

[5] Andrea A.diSessa, *Cognition and Instruction* **10**, 105-225(1993).

[6] 山田吉英, 他, 第35回物理教育研究大会発表予稿集, 134 (2018).

[7] 渡邊里佳, 他, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 12aB24-8(2019).

P-prims 理論による様々な運動に対する生徒の思考の分析

京教大物理, 福井大院教育
渡邊里佳, 谷口和成, 山田吉英^A

Analysis of beginner's thought about various types of motion based on
phenomenological primitives

Kyoto Univ. of Education, Fukui Univ.^A
R. Watanabe, K. Taniguchi, Y. Yamada^A

教員が学習者の思考過程を理解することは、授業デザインや適切な学習支援において重要である。次期学習指導要領解説理科編[1]では、「物理現象を扱う際には、生徒が経験的にもっている素朴な概念に留意して指導をすることが大切である」とあり、これからの物理教育では素朴概念など学習者の思考を重視した授業デザインや学習支援が求められる。しかし実際には、学習者の思考は多様であり、素朴概念では説明できないものが多い。ここで、学習者の思考を素朴概念よりも細かいレベルで解釈できる p-prim (diSessa,1993)[2]に着目する。p-prim とは「体験や観察を通して獲得される、それ以上単純化できない細分化された知識要素」であり、p-prim によるネットワークを用いることにより、素朴概念に該当しない推論の解釈や意味理解ができるほか、学習者の誤った推論の中から科学的推論との共通要素を見出して価値づけるなどの指導の手立てが可能になる[3]。

そこで本研究では、物理の各概念に対する学習者の思考を p-prim の観点から分析している[4]。これまでに、学習者の思考を細かく分析することにより、同じ誤りだと捉えられる思考でも複数の解釈ができたり、複数の p-prim を組み合わせて現象を解釈できたりするなど、p-prim が学習者の思考を解釈する手段となることを示した。また、学習の理解を助けるような p-prim が見出され、それが活性化しやすい状況設定を行うなどの教育的な支援の可能性が示唆された。特に、振り子の運動の授業では、*Intrinsic or spontaneous resistance* (重い物は運動に抵抗する) という p-prims の活性化により、学習者が慣性質量の視点をもって現象を定性的に説明した場面が見受けられた。慣性質量の視点をもって現象を解釈することは、振り子の運動に留まらず様々な運動の定性的な理解を促すと考えられる。

そこで今回は、斜面を下る運動と自由落下運動の解釈においても、慣性質量の視点に関連する p-prims が活性化されるか調べるため、中学3年生を対象として「力がはたらき続ける運動」分野の学習の前後で記述式のアンケート調査を行った。講演では、アンケート結果について p-prim の観点からの分析と考察を報告し、これを用いた教授方法の提案をする予定である。

[8] 文部科学省、『高等学校学習指導要領解説』平成30年。

[9] Andrea A.diSessa, *Cognition and Instruction* 10, 105-225(1993).

[10] 山田吉英, 他, 第35回物理教育研究大会発表予稿集, 134 (2018).

[11] 渡邊里佳, 他, 日本物理学会 2019 年 12aB24-8(2019), 同 2020 年秋季大会 17aK25-2(2020).

p-prims 理論を用いた「運動の法則」への気づきを促す授業の開発と実践

京教大物理, 福井大院教育
渡邊里佳, 谷口和成, 山田吉英^A

Development and practice of class promoting awareness of Newton's laws of motion based on phenomenological primitives

Kyoto Univ. of Education, Fukui Univ.^A
R. Watanabe, K. Taniguchi, Y. Yamada^A

教員が学習者の思考過程を理解することは、授業デザインや適切な学習支援において重要である。次期学習指導要領解説理科編[1]では、「物理現象を扱う際には、生徒が経験的にもっている素朴な概念に留意して指導をすることが大切である」とあり、これからの物理教育では素朴概念など学習者の思考を重視した授業デザインや学習支援が求められる。しかし実際には、学習者の思考は多様であり、素朴概念では説明できないものが多い。ここで、学習者の思考を素朴概念よりも細かいレベルで解釈できる p-prim (diSessa,1993)[2]に着目する。p-prim とは「体験や観察を通して獲得される、それ以上単純化できない細分化された知識要素」であり、p-prim によるネットワークを用いることにより、素朴概念に該当しない推論の解釈や意味理解ができるほか、学習者の誤った推論の中から科学的推論との共通要素を見出して価値づけるなどの指導の手立てが可能になる[3]。

そこで本研究では、物理の各概念に対する学習者の思考を p-prim の観点から分析している[4]。これまでに、小学校のふり子の学習における児童の活動を p-prim の観点で分析した結果、学習者の自由な思考の中に科学的推論の材料となるような p-prim が見出された。特に、話し合いの過程において、慣性質量の視点が芽生え「運動の第二法則」につながるような推論に至った子どもがいた。これは、*Intrinsic or spontaneous resistance* (内在的抵抗) という p-prims が活性化された結果と解釈することができる。一方、「力と運動」を学習前の中学3年生を対象に、異なる質量の物体が斜面を下る運動や自由落下する運動に関するアンケート調査を行った結果、「重力が同じだから同時に落ちる」という質量の違いに注目していない生徒が一定数いることが明らかになった[4]。そこで今回は、意図的に【内在的抵抗】の p-prim を活性化させ、慣性質量の視点を促すことにより、正しい理解(発展的には「第二法則」への接続)を目指す授業実践を行った。

本講演では、開発した授業の展開と介入の効果について報告し、その結果に基づいたより適切な介入方法の提案を行う予定である。

[12] 文部科学省,『高等学校学習指導要領解説』平成 30 年.

[13] Andrea A.diSessa, *Cognition and Instruction* 10, 105-225(1993).

[14] 山田吉英, 他, 第 35 回物理教育研究大会発表予稿集, 134 (2018).

[15] 渡邊里佳, 他, 日本物理学会 2019 年秋季大会 12aB24-8(2019), 同 2020 年秋季大会 8aN1-7(2020).