

操作的思考課題を用いた学習活動の研究

2017

兵庫教育大学大学院
連合学校教育学研究科
学校教育実践学専攻
(鳴門教育大学)
植原俊晴

目次

1	緒論	4
1.1	問題の所在	4
1.2	先行研究の整理	6
1.2.1	操作的思考	6
1.2.2	操作的思考の不十分さ	7
1.2.3	操作的思考の促進	10
1.3	研究の目的と論文の構成	12
1.3.1	研究の目的	12
1.3.2	論文の構成	12
2	科学的知識の獲得を促す学習モデル	15
2.1	「知識検証学習」モデルの提案	15
2.1.1	問題と目的	15
2.1.2	科学教育における推論形式の特徴	17
2.1.3	問題解決のプロセス	18
2.1.4	演繹推論を促す学習活動	21
2.2	まとめ	24
3	知識検証学習モデルによる授業の効果	25
3.1	操作的思考課題の解決を含む学習活動がルール獲得に及ぼす効果とそのプロセス	25
3.1.1	問題と目的	25
3.1.2	方法	27
3.1.3	結果と考察	30
3.1.4	総合考察	38
3.2	まとめ	42
4	修正版知識検証学習モデルによる授業の効果	43
4.1	科学的知識と既有知識の相互作用	43
4.2	科学的知識と既有知識を意図的に相互作用させる学習活動の効果	47
4.2.1	問題と目的	47
4.2.2	方法	48

4.2.3	結果と考察.....	52
4.2.4	総合考察.....	64
4.3	まとめ.....	67
5	修正版知識検証学習モデルによる授業が効果を及ぼす知識水準.....	68
5.1	知識水準を評価する問題.....	68
5.2	学習モデルと課題の種類が学習成果に与える効果.....	71
5.2.1	問題と目的.....	71
5.2.2	方法.....	72
5.2.3	結果と考察.....	77
5.2.4	総合考察.....	81
5.3	まとめ.....	84
6	操作的思考を促す教授的働きかけの汎用性についての検討.....	85
6.1	公式に関する学習活動.....	85
6.2	操作的思考課題を導入した学習活動が公式の数的処理に及ぼす効果.....	87
6.2.1	問題と目的.....	87
6.2.2	公式理解の実態調査.....	90
6.2.3	関係処理を促す介入実践.....	96
6.2.4	総合考察.....	103
6.3	まとめ.....	105
7	結論及び今後の課題.....	106
7.1	本論文の研究で得られた知見.....	106
7.1.1	科学的知識の獲得を促す学習モデルの検討.....	106
7.1.2	知識検証学習モデルによる授業の効果.....	107
7.1.3	修正版知識検証学習モデルによる授業の効果.....	108
7.1.4	修正版知識検証学習モデルによる授業が効果を及ぼす知識水準.....	109
7.1.5	操作的思考を促す教授的働きかけの汎用性についての検討.....	109
7.2	結論.....	111
7.3	教育実践への示唆.....	113
7.4	今後の課題.....	117

引用文献.....	119
謝 辞.....	123
本研究に関する論文.....	125

1 緒 論

1.1 問題の所在

授業で学ぶ内容（科学的知識）とは別に、学習者が自然現象や社会現象について自分なりの考え（既有知識）を持つことはよく知られている。したがって、授業では、学習者が既有知識を科学的知識の枠組みに統合することで、既有知識に制限されることなく科学的知識に基づく推論を実行し、その帰結を受け入れられることを目指す必要がある。つまり、学習者が科学的知識を獲得すれば、既有知識の制限を受けずに科学的知識を用いることができるようになると言えよう。しかし、通り一遍の授業では、学習者が科学的知識と既有知識をそれぞれ独立した知識として構造化してしまい、科学的知識の獲得には至らず、適切に当該の知識を用いて問題解決をできないことが指摘されている（麻柄, 1996）。

学習者の既有知識は、プリコンセプションや誤概念、素朴概念など様々に概念化されている（Hashweh, 1986, 1988; Clement, 1993; 村山, 1994）。また、学習者が経験から自力で獲得したものであるため誤ったものも多く含まれていると指摘されており（麻柄ら, 2006）、それを修正するための教授的働きかけに関する研究が盛んに行われている。そこでは、例えば概念変容モデル（Hashweh, 1986）や橋渡しモデル（Clement, 1993）、相互教授モデル（Palincsar & Brown, 1984）などの教授モデルが提案されている。これらの教授モデルは、そのプロセスが異なるものの、学習者の既有知識を学習の出発点としている点や、最終的に科学的知識と既有知識を関連づけるという点で共通していると考えられる。

一方、最近になって知識表象の変形に着目した研究が盛んに行なわれている（例えば、進藤・麻柄, 1999; 工藤, 2003; 立木・伏見, 2008; 佐藤, 2008; 麻柄・進藤, 2011 など）。これらの研究では、上述の教授モデルのように、既有知識に積極的な働きかけを行って誤った知識の修正を目指すのではなく、むしろ科学的知識を学習の出発点とし、学習者の科学的知識に基づいた論理変換操作を促すことで、学習者に科学的知識を構成する概念間の関係性を適切に理解させ、既有知識を科学的知識の枠組みに統合させることを目指しているという点で、従来の研究と異なっていると言える。

これらの研究の結果は、学習者が科学的知識に基づく論理変換を行うことは容易ではなく（進藤・麻柄, 1999; 工藤, 2003）、論理変換操作を実行できる程度が、学習者の既有知識へのこだわりよりも、学習成果に大きな影響を及ぼすこと（立木・伏見, 2008）を明らかにしている。一方、佐藤（2008）や麻柄・進藤（2011）は、学習者の論理変換操作を促すことにより、科学的知識の適用が促進されることを示唆している。また、中島（1995）は、

科学教育の役割を、問題解決場面で科学的知識を適切に使用できるように、科学的知識を構成する概念間に潜在的なリンクを形成することであるとしている。その上で、このようなリンクを形成するためには、概念間の関係性を明確にする積極的な教授的働きかけを行うことが重要であると指摘している。

以上の議論を踏まえると、学習者が科学的知識を効果的に獲得する教授的働きかけの1つとして、学習者の論理変換操作を促す教授方略を挙げることができる。つまり、論理変換操作を促すことで、学習者は科学的知識を構成する概念間にある関係性を理解できると考えられる。その結果、学習者は既有知識を科学的知識の枠組みに統合し、既有知識を置き換えたり、変化させたりして科学的知識として一般化することが可能になると想定される。

しかしながら、麻柄・進藤（2011）が「学校教育では取り上げられる様々な法則の学習に際しては、論理変換操作はあまり行われていない」と指摘しているように、学習者の論理変換操作を促す教授方略は、これまであまり注目されてこなかった。したがって、この想定に基づいた学習活動について検討することは、授業改善に寄与する示唆を与え得ることから、教育実践学的な意義が大きいと考えた。

1.2 先行研究の整理

1.2.1 操作的思考

工藤 (2010a) は、知識表象の形を変えること (科学的知識からの論理変換操作) を「操作」と定義し、知識表象の操作に関わる思考を「操作的思考」と呼び、Table1-1 に示すように、大きく「変数操作的思考」、「関係操作的思考」、「抽象度操作的思考」の3種類に分ける案を提案している。これら3種類の操作的思考について「企業間の競争により価格は変化する (経済学ルール)」という科学的知識に即して具体的に説明する。なお、本論文では、学習場面で操作的思考を促すために用いる操作的思考を要する課題を「操作的思考課題」と呼ぶことにする。

まず、変数操作的思考は、経済学ルールの前件「企業間の競争」の変動値を固定 (変動方向を仮定) し、命題化するような思考である。例えば、「企業間の競争」を「ある」と仮定すれば、「企業間の競争があるので価格は下がる」という命題を導き出すような思考のことである。また、このルールにおいて、「企業間の競争が激しい」のように変動幅を変化させたり、「企業間の競争がない」と変動値を逆転させたりすると、それぞれ「企業間の競争が激しいので価格はもっと下がる」や「企業間の競争がないので価格は上がる」という命題を導くことができ、これらの思考も変数操作的思考であると言える。したがって、変数操作的思考は、科学的知識を構成する概念や変数間の量的関係の操作に特化した思考と捉えることができる。

Table 1-1 操作的思考の分類

操作的思考	操作の分類	内 容	操作的思考課題
変数操作的思考	裏操作	変数値ないし値の変動方向の逆転	裏操作課題
	変動値操作	変動方向を維持した変数値の変動幅の変化 (量的ルール)	変動値操作課題
	固定値操作	変動方向を仮定した命題化 (特に数式)	
	特異値操作	変数値の固定 (量的ルール) 変数値の固定による命題化 (特に数式)	固定値操作課題
関係操作的思考	逆操作	変数値の極端な変動 (量的ルール)	特異値操作課題
	逆操作	関係項の方向の逆転	逆操作課題
	手続き化操作	関係項の方向の逆転	逆操作課題
	手がかり化操作	目的-手段関係の表現	手続き化課題
抽象度操作的思考	因果操作	判断の証拠や手がかりの表現	手がかり化課題
	因果操作	因果関係の表現	因果操作課題
	代入操作	変数項への具体例の代入	代入操作課題
	上位ルール化操作	複数のルールの組み合わせによる上位ルールの生成	上位ルール化課題

注) 工藤 (2010a) を改変し、「操作的思考課題」の分類名を筆者が加筆した。

次に、関係操作的思考は、経済学ルールの前件「企業間の競争」と後件「価格は変化する」を入れ替えて命題化するような思考である。例えば、「安価である」という事実があれば、「企業間の競争により価格は変化する」を論理変換して、「安価であれば企業間の競争がある」という命題を導く操作のことである。ただし、この場合、当該の命題が双条件文でなければ、科学的に正しい「金属は電気を通す」に対して「電気を通すものは金属である」というような後件肯定の誤謬を犯してしまう恐れもあることに留意する必要がある。その他にも、「企業間の競争があるかどうかは、価格を調べれば分かる」や「価格が下がる原因は、企業間の競争によるものである」などの命題を導く思考も関係操作的思考と言える。つまり、関係操作的思考は、「企業間の競争」と「価格の変化」の数量的関係を操作するのではなく、概念や変数間の因果関係などの関係性そのものを操作する思考であると言え、「種子植物なら花が咲く」のような数量的関係を含まない命題についても操作することが可能である。

最後に、抽象度操作的思考は、命題の変数項に具体例や数値を代入することで、「競争相手が1店舗増えたので、価格が10円下がった」というような抽象度の低い具体命題を導いたり、先に述べた具体命題と「競争相手が1店舗減ったので、価格が10円上がった」という具体命題を組み合わせて、抽象度の高い「企業間の競争により価格は変化する」というような命題を導いたりする操作と言える。前者の操作は、代数の式や公式を用いて、未知の値を求める処理でよく使われており、後者の操作は、自然科学や社会科学において、いくつかの事例から帰納的に知識を一般化する過程で用いられている。

このように操作的思考は、科学的知識を構成する概念間の関係に係る思考であるため、操作的思考を促すことのできる科学的知識は「企業間の競争により価格は変化する」や「金属は電気を通す」などのように命題化し得るものに限られると考えられる。つまり、「価格」や「金属」のような概念名辞はその対象に含むことはできないことに留意が必要である。

1.2.2 操作的思考の不十分さ

工藤（2003）は、科学的知識の一般化が当該の知識の教示過程で用いられた事例によって影響を受ける現象（事例効果）について、学習者による教示情報の解釈という観点から検討している。具体的には、大学生を対象に「花を咲かせる植物はタネで子孫を残す（種子植物ルール）」という科学的知識を教示した後、種子植物ルールを説明するためにチューリップを事例とした読み物教材を与え、教材の内容をどのように解釈しているのかを調べ

ている。その結果、事例であるチューリップについては「タネができる」と約9割の者が回答しているものの、チューリップと同じく球根を植えることが多いヒヤシンスでは7割台、花が咲くことに疑いの余地のないサクラについては5割台の者しか「タネができる」と回答できていない実態から、多くの大学生が種子植物ルールを構成する「花を咲かせる植物」と「タネで子孫を残す」という概念間の関係性を適切に捉えられていないことを明らかにしている。このことは、科学的知識を当該の知識に関わる事例を用いて単純に教示しただけでは、学習者がこの科学的知識を構成する概念間の関係性を理解することは困難であることを示唆している。

また、進藤・麻柄（1999）は、科学的知識を日常現象に適用することを可能にするための教授要因について検討している。具体的には、「企業間に競争があれば価格は低くなる（経済学ルール）」という科学的知識を取り上げ、大学生を対象にして、「ある駅間の運賃が同距離の他の駅間より低いのはなぜか」という価格の差の理由を問う問題を出題し、経済学ルールの適用について調べている。その結果、上述の問題を解決するために求められる推論の方向と、経済学ルールの記述の方向が一致するように、このルールの前件と後件を入れ替えた「価格が低いのは競争がある証拠」と教示すれば、「運賃が低い」という情報に基づいて「企業間に競争がある」ことを導き出すことは容易であるが、推論の方向（運賃が低い→企業間に競争がある）と経済学ルールの記述の方向（企業間に競争がある→運賃が低い）が一致していない場合では、経済学ルールから「運賃が低い」という情報に基づいて「企業間に競争がある」ことを導き出すことが難しいことを明らかにしている。このことは、大学生であっても、「運賃が低い」という情報に基づいて「企業間に競争があれば価格は低くなる」を「運賃が低ければ企業間に競争がある」のように論理変換を行うことが容易ではないことを示唆している。

さらに、立木・伏見（2008）は、学習成果に与える要因の1つとして、学習者の操作的思考の不十分さに着目し、テスト得点の伸びの抑制と学習者の操作的思考の不十分さとの関連を検討している。具体的には、まず、金属であることを明示された12種類の事例について、電気を通すかどうかを問う事前テストを行っている。次に、金属に関する科学的読み物を大学生に与え、読み物の内容から言えることかどうかを問う課題（ここでは、「操作課題」と記す）と、読み物の内容について大学生自身がどのように考えているかを問う課題（ここでは、「信念課題」と記す）及び事前テストと同じ内容の事後テストを行わせている。また、操作課題には正答しているが、信念課題には誤った者（ここでは、「正誤群」と

記す)を論理変換操作はできるものの誤概念に対するこだわりを持っている者、両方の課題に誤った者(ここでは「誤誤群」と記す)を論理変化操作ができず、誤概念に対するこだわりを持っている者とそれぞれ見なしている。その上で、事前テストから事後テストにかけてのテスト得点の伸びについて、正誤群と誤誤群で比較したところ、誤誤群の得点有意に低いという知見を得ている。これらのことから、立木・伏見(2008)は、科学的読み物に示された科学的知識を適切に操作できない大学生が存在することや、事後テストの得点には、読み物内容からの操作的思考の不十分さが関わっていることを示唆している。

ところで、科学的知識を構成する概念 p と q の関係について、学習者が十分な論理的検証を行わないまま、概念 p と q との間に共変関係がないにもかかわらず誤って共変関係があると判断したり(関係の過大評価)、共変関係があるにもかかわらず誤って共変関係はないと判断したり(関係の過小評価)することが知られている(Gilovich, 2008; Jennings et al., 1982)。佐藤(2008)は、「 p ならば q である(ただし、双条件文)」という科学的知識が提示されても、学習者は概念 p と q の間に密接な共変関係があると解釈しないため、「 p であっても q でない場合もある」など、本来妥当性を付与されるべきでない誤った知識にも一定の妥当性を付与してしまう可能性について検証している。具体的には、大学生に「企業間に競争があれば商品の価格は下がる(経済学ルール)」という科学的知識を示した読み物を与え、経済学ルールに対する信頼度を調査したところ、知識を提示した直後の調査でも、これを支持しない誤った知識にも一定の妥当性を付与すること(判断の不確定性)が示唆されている。

これらの研究の知見から、次の2つのことが言えよう。1つめは、例えば「チューリップが種子をつくる」ことを事例に「花を咲かせる植物は種子で子孫を残す(種子植物ルール)」という一般化された科学的知識を教示しても、「チューリップが種子をつくる」という事例のみを知識として構造化してしまう学習者が存在するということである。この段階で学習が留まっていれば、「サクラは種子をつくるか」という質問に対して、「サクラは花を咲かせる」ことを情報として与えても、学習者にとってこの情報は意味を持たず、サクラが種子をつくることを知っているかどうかで、学習者はこの質問に対する結論を導き出すと考えられる。

2つめは、仮に学習者が種子植物ルールを知識構造の中に持っていたとしても、このルールを構成する「花を咲かせる」と「種子で子孫を残す」という概念間に潜在的なリンクを形成しているとは限らないということである。つまり、このような概念間のリンクが形

成されている場合、ある植物について「種子ができる」という情報があれば、潜在的に形成されている概念間のリンクが顕在化し、「種子ができる」ことから「花を咲かせる」という推論が容易にでき、「花を咲かせる植物でも種子をつくらないものもある」というような誤った知識に妥当性を与えないと言えよう。しかしながら、実際には上述の推論が容易に実行されないことや誤った知識に妥当性を与えることが示唆されており、これらの要因の1つとして、科学的知識に即した操作を学習者が十分に実行できないことが考えられる。

1.2.3 操作的思考の促進

前節で述べた通り、佐藤 (2008) は、科学的知識を構成する概念 p と q の関連について、学習者が十分な論理的検証を行わないまま、関係の過大評価や過小評価をするために、「 p ならば q である (ただし、双条件文)」という科学的知識が提示されても、学習者は概念 p と q の間に密接な共変関係があると解釈せず「 p であっても q でない場合もある」など、本来妥当性を付与されるべきでない命題にも一定の妥当性を付与してしまうことを指摘している。

その上で、佐藤 (2008) は「企業間に競争があれば商品の価格は下がる (経済学ルール)」という科学的知識に関して、このルールを支持しない「競争があっても価格が下がらない場合がある」のような命題に対して、その妥当性を低減させる情報を与えてみた。具体的には、「複数の会社が競争関係にあるにもかかわらず価格が下がっていないとすれば、会社どうしの談合により価格協定が結ばれているか、生産制限が行われているかであって、このような行為は違法性が高く、市場から排除されるべき対象となる」のような読み物を示した後、提示した経済学ルールの信頼度や適用について調査している。その結果、「企業間の競争」と「価格の変化」の関係性について積極的に判断させることで、教示した科学的知識の信頼度が上昇し、経済学ルールの適用も促進されるという示唆を得ている。

また、麻柄・進藤 (2011) は、「日本海を通過するとき季節風は、その距離に応じた量の水蒸気を吸い込み、日本海側に雪を降らせる (降雪量ルール)」という科学的知識を取り上げ、このルールに関わる操作的思考を促し、それが問題解決場面における降雪量ルールの適用に及ぼす影響について大学生を対象に検討している。具体的には、「季節風が、大陸との距離がとても長い日本海の上空を通過して日本にやってくる場合」のあとに続く語句を「降る雪の量は、多くなる・少なくなる・ほとんど変わらない」の中から選択するような、降雪量ルールに関わる操作的思考課題を行わせている。その結果、大学生の場合には、こ

のような課題を実際に行わせたり、その課題の結論を示したりすることにより、問題解決場面で降雪量ルールの適用が促進されるという知見を得ている。

これらのことから、「 p ならば q である」という命題が成立するとき、佐藤(2008)では、単に $p \rightarrow q$ を教示しただけでは考慮されにくい、 $p \rightarrow \text{非}q$ や $\text{非}p \rightarrow q$ 、 $\text{非}p \rightarrow \text{非}p$ などの命題に $p \cdot \text{非}p \times q \cdot \text{非}q$ の4つのセルからなる論理操作マトリクスを用いて着目させるとともに、「 p ならば q である」を支持しない命題の妥当性を減じることで、また、麻柄・進藤(2011)では、概念 p と q の対応関係を導く経験を積むことで、概念間の関係性が明確になったと考えられる。その結果、学習者の科学的知識に対する信頼度が上昇したり、問題解決場面において科学的知識の適用が促進されたりしたと推察される。

したがって、前節の議論も踏まえると、学習者が事例のみの学習に陥ることを避け、科学的知識を一般化するために、当該の知識に即した操作的思考を促す教授的働きかけを授業に導入することには意義があると考えられる。

1.3 研究の目的と論文の構成

1.3.1 研究の目的

立木・伏見（2008）や佐藤（2008）、麻柄・進藤（2011）のいずれの研究においても、彼ら自身、これらの研究を実験室的であることを認めた上で、学校で行われる実際の授業において検討する必要があることを述べている。つまり、これらの研究で示された学習者の操作的思考を促進することによる学習成果に与える効果が、様々な要素が複雑に入り組んだ日常的な授業実践の場で同様に得られるかどうかは定かではないと言える。したがって、実際の授業を対象として、操作的思考を促す教授的働きかけが科学的知識の獲得に及ぼす効果や、当該の知識の獲得プロセスを検討する必要があると考えられる。

以上のことを踏まえ、本論文の目的は、次の3つである。1つめは、科学的知識の獲得に対し、操作的思考を促す教授的働きかけが効果的に作用する学習モデルを検討することである。2つめは、提案した学習モデルに基づく授業を行い、この授業実践が科学的知識の獲得に及ぼす効果を検証し、当該の知識が獲得されるプロセスを明らかにすることである。3つめは、操作的思考を促す教授的働きかけの汎用性について検討することである。なぜならば、先行研究では数学や社会科学の領域を対象とした研究は若干あるものの、主に理科の領域における学習内容が対象とされているからである。

1.3.2 論文の構成

ここで、本論文の構成について述べる。Figure1-1は本論文の構成の概略を示したものである。1章では、操作的思考に関する先行研究を整理し、操作的思考について説明するとともに、操作的思考の不十分さや操作的思考の促進が学習成果に及ぼす影響についての知見をまとめた。

2章では、小・中学校の授業で用いられている推論形式の特徴や、学習者の操作的思考を促すことと演繹推論の実行可能性との関連についての検討を踏まえ、操作的思考を促す教授的働きかけが科学的知識の獲得に対し効果的に作用する学習モデルについて、パースの科学的探究の過程（米盛, 2007）に基づき具体的な提案を行う。

3章では、提案した学習モデルに基づく授業を実践し、知識の想起や適用という観点から、その学習成果の測定を試みる。また、授業で生じた発話を分析することで、科学的知識を構成する概念間の関係性を理解するプロセスについて検討する。

4章では、3章で得られた示唆に基づき、操作的思考を促す教授的働きかけをより効果

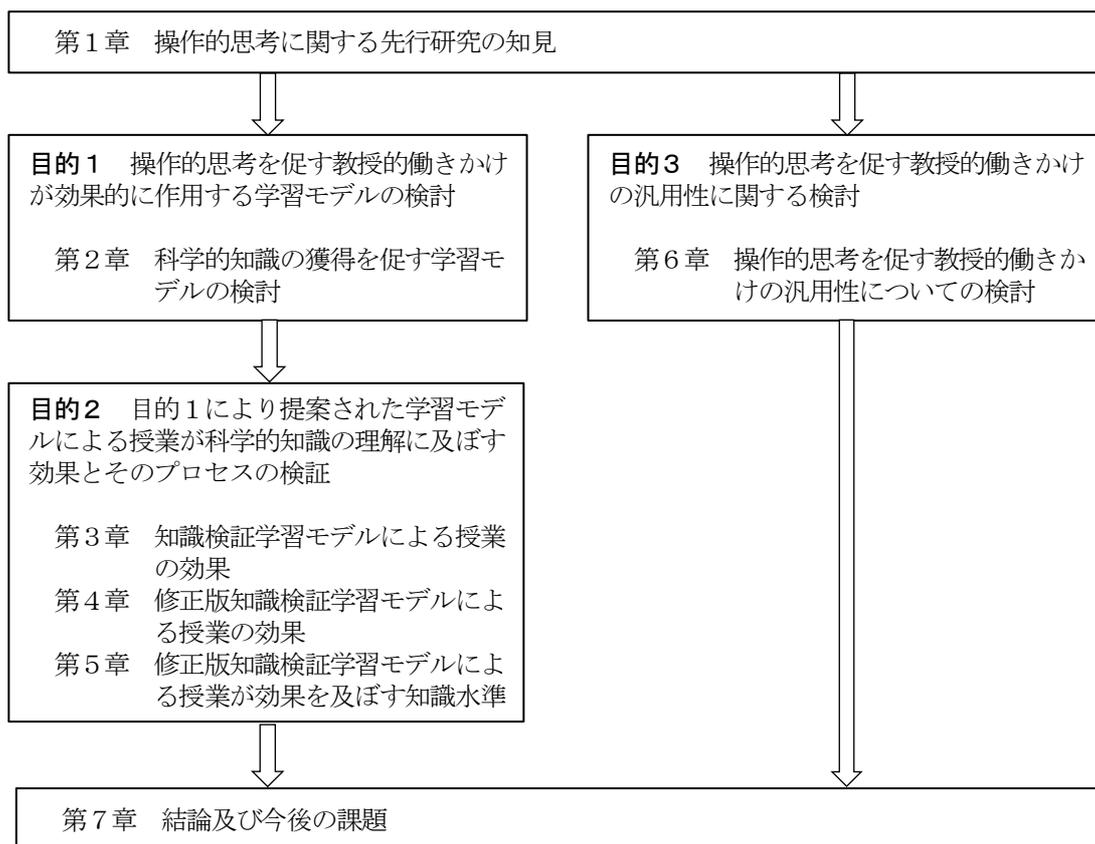


Figure 1-1 論文構成の概略

的に作用させるために、2章で提案した学習モデルの修正を試みる。そして、修正された学習モデルに基づく授業を実践し、この授業が科学的知識の想起と適用に与える効果と当該の知識が獲得されるプロセスについて検討する。

5章では、知識の想起や適用という観点で学習成果を測定することは、その枠組みが限定的であるとする批判 (Tessmer & Wedman, 1990) に応えるため、上述の修正した学習モデルに基づく授業が学習成果に及ぼす影響を知識の直接的適用、操作的適用、制御的適用の観点 (工藤, 2008) から測定し検討を行う。具体的には、同じ学習内容について、学習プロセスの異なる4種類の授業を行い、学習成果に与える効果を比較して、上述の提案した学習モデルが学習成果に対して有効に作用することを明らかにする。

6章では、操作的思考を促す教授的働きかけの汎用性について検討する。具体的には、公式の学習に関する授業を実践し、数値を代入せずに公式を使用できるかどうかという観点から、その学習効果について評価を行う。

7章では、2章から6章で得られた知見の概略を述べ、これらの知見が小・中学校における学習活動の改善に寄与する点や本研究の課題や限界について、教育実践学的視点から

考察する。

2 科学的知識の獲得を促す学習モデル

1章から、学習者に科学的知識を論理変換させる教授的働きかけを授業に導入し、当該の実践が学習成果に与える影響を検討する必要性が示唆された。また、授業における推論活動の形式的特徴を調べることで、論理変換させる教授的働きかけを効果的に授業に導入する方法について示唆が得られると考えられた。

そこで、本章では小・中学校における科学教育の課題について、学習活動で行われている推論に焦点を絞り、科学的探究能力の育成という観点から検討する。そして、ここから得られる示唆に基づいて、科学的知識の獲得を促す学習モデルの提案を行う。

2.1 「知識検証学習」モデルの提案

2.1.1 問題と目的

パスによると、科学的探究の過程は演繹、帰納、アブダクションの各推論から成り立っており、これらの推論は科学的探究の過程における3段階を形成するとされており、アブダクションこそ科学の諸観念や理論を生み出す唯一の論理操作であるとしている(米盛, 2007)。具体的には、第1段階がアブダクション、第2段階が演繹推論、第3段階が帰納推論である。したがって、科学的に探究する能力を育成することを目的とする学習活動は、ある現象がなぜ起こったかについて説明可能な仮説を考え出すことから出発し(アブダクション)、その仮説から論理的必然性のある帰結を導出した後(演繹推論)、それらの帰結が経験的に正しいことをテストし、その蓋然性を確認する(帰納推論)段階を経ることが望ましいと考えられる。

しかしながら、アブダクションは、①意外な事実 q に関してそれを説明し得ると考えられる仮説 p を提案し、②そして仮説 p と意外な事実 q の間に「 p が真であれば、 q は当然の事柄であろう」と言える関係が成り立つならば、③仮説 p は真らしいと考えなくてはならない推論であるとされており、探究中の問題の現象について考えられ得る説明を推測して列挙し、十分に熟慮して、その中から最も正しいと思われる仮説を選び出す過程であるとされる(米盛, 2007)。つまり、アブダクションを行うには、その前提として、それを行う者に十分な科学的知識が準備されている必要があると言え、小・中学校の児童・生徒にそれを期待するには無理があると思われる。むしろ、児童・生徒には、そのために必要な十分な科学的知識を獲得させる必要があると考えられる。

一方、アブダクションの①や③の段階は帰納的であり、②の段階は演繹的であると思われる。したがって、アブダクションは演繹推論と帰納推論を内包しており、その発達には演繹推論と帰納推論の熟達化が必要であると考えられ、小・中学校における科学教育では、主に演繹推論と帰納推論の発達を目的とすることが必要であると思われる。

ところで、小学校学習指導要領（文部科学省、2008）や中学校学習指導要領（文部科学省、2008）によると、社会科の内容として、例えば「地域の人々の生産や販売について、次のことを見学したり調査したりして調べ、それらの仕事に携わっている人々の工夫を考えるようにする」（小学校）や「我が国の歴史上の人物や出来事について調べたり考えたりするなどの活動を通して、時代の区分やその移り変わりに気付かせ、歴史を学ぶ意欲を高めるとともに、年代の表し方や時代区分についての基本的な内容を理解させる」（中学校）などが列挙されており、見学や調査を通して理解を図るという点でその多くが共通している。

また、理科についても、「物を燃やし、物や空気の変化を調べ、燃焼の仕組みについて考えをもつことができるようにする」（小学校）や「生物の体は細胞からできていることを観察を通して理解させる」（中学校）など、観察・実験を通して理解を図るという内容の記述が多い。

さらには、算数・数学科でも、「図形についての観察や構成などの活動を通して、図形の構成要素及びそれらの位置関係に着目し、図形についての理解を深める」（小学校）や「観察、操作や実験などの活動を通して、円周角と中心角の関係を見いだして理解し、それを用いて考察することができるようにする」（中学校）などあり、図形を扱う領域において、観察・実験を通して理解を図るという点で共通している。また、関数の領域でも「二つの数量の変化や対応を調べることを通して」（中学校）という記述が見られた。

これらの事実は、小・中学校における学習活動に対して、学習指導要領が帰納的手続きによる方法を求めていることを意味している。このことより、小・中学校の科学教育では帰納推論に基づく学習活動が多く行なわれていると推察される。

以上の議論を踏まえ、ここでは、まず小・中学校の科学教育における推論形式の特徴を教科書の記述を手掛かりに捉える。なぜなら、実際の小・中学校の学習活動は教科書に基づいてデザインされているからである。そして、推論の形式的特徴が上記の推察通り帰納的手続きに偏っていることが明らかになれば、科学的に探究する能力を育成する観点から、小・中学校の科学教育において演繹推論と帰納推論をともに発達させる学習モデルについて考察することを試みる。

2.1.2 科学教育における推論形式の特徴

小・中学校で行われている科学教育の学習活動において、学習者が働かすと考えられる推論の形式を理科や算数科、社会科の教科書の記述内容（毛利・黒田, 2015; 一松・岡田, 2015; 林ら, 2016）に基づいて検討する。

まず、小学3年生の理科における「電気を通すもの」についての学習では、クリップやはさみ、下じきなど様々なものが電気を通すかどうかを調べた上で、電気を通すものとそうでないものに区別し、Figure2-1に示すような推論を経て「金属は電気を通す」という結論を導くことを想定していると思われる。

事例1	クリップは電気を通す。
事例2	はさみの刃の部分は電気を通す。
帰結	金属でできているものはすべて電気を通す。

Figure 2-1 「電気を通すもの」における推論

また、小学5年生の算数における「三角形の角の大きさの和」についての学習では、まず、1つの角の大きさを 90° に固定した三角形で、残りの角の一方を 60° 、 50° 、 40° と順に小さくしていくときの最後の角の大きさを分度器で測り、3つの角の大きさの和をそれぞれの場合について求めさせている。

次に、1つの角の大きさを 60° に固定した三角形で、同様に 80° から順に小さくしていくときの最後の角の大きさを測り、3つの角の和をそれぞれ求めさせ、Figure2-2に示すような推論を経て「どんな三角形でも、3つの角の大きさの和は 180° である」という結論を導くことが想定されている。

事例1	1つの角が 90° の三角形の3つの角の大きさの和は 180° である。
事例2	1つの角が 60° の三角形の3つの角の大きさの和は 180° である。
帰結	どんな三角形でも、3つの角の大きさの和は 180° である。

Figure 2-2 「三角形の角の大きさの和」における推論

さらに、中学3年生の「市場のしくみと価格の決まり方」についての学習では、旅行代金カレンダーが示してある海外旅行のパフレットやきゅうりの入荷量と平均価格、薄型テレビの出荷台数と平均単価を示したグラフ、野菜の価格の変化を示した新聞記事から価格の変化を読み取り、「需要と供給により価格は決まる」という一般法則へ導くことが想定

されている。ここでも、やはり Figure2-3 のような帰納推論によって一般化がなされていると考えられる。

事例1	旅行代金は年末年始や休日が高く、平日は安い。
事例2	きゅうりは入荷量の多い旬の時期が安く、入荷量の少ない時期は高い。
事例3	薄型テレビは出荷台数が多くなるにつれ、価格が下がっている。
事例4	白菜やナスは豪雨の影響で高くなっている。
帰結	需要と供給により価格は決まる。

Figure 2-3 「市場のしくみと価格の決まり方」における推論

このような例を挙げると、枚挙にいとまがないことから、小・中学校における学習活動は、実験や観察をしたり、資料などを利用したりすることで、獲得させたい科学的知識に関わる事例をいくつか集めること（場合によっては1事例のみ）から始まり、事例どうしを比較して共通点や異なる点を見つけることで、一般法則を導き出すようにデザインされることが多く、帰納推論に基づいた学習活動が主に行なわれていると思われる。つまり、小・中学校で行われている科学教育の学習活動は帰納推論に基づいたものに偏っている傾向があると考えられる。

したがって、科学的に探究する能力を育成する観点からは、小・中学校の科学教育においては、演繹推論と帰納推論をともに発達させる必要があると言え、帰納推論のみならず、演繹推論に基づいた学習活動を導入した授業をデザインし、実践する必要があると考えられる。

2.1.3 問題解決のプロセス

操作的思考を促すことにより、学習者の科学的知識に対する信頼度が上昇したり、問題解決場面において科学的知識の適用が促進されたりすることは、1章で述べた通りである。ここでは、1章で取り上げた佐藤（2008）と麻柄・進藤（2011）の研究における問題解決場面での科学的知識の適用プロセスについて考えてみる。

佐藤（2008）で教示された科学的知識は「企業間に競争があれば商品の価格は下がる（経済学ルール）」であった。それに対する問題は、札幌から小樽間はJRと並行して高速道路が通っているという情報を図で提示した上で、「札幌から余市までをJRで移動するとき、直通の切符を買うよりも、途中の小樽までの切符を買って下車し、小樽から余市までの切符を買い直して直した方が安くなるのはなぜか」を問うものであった。

この問の正答は、「札幌と小樽間で JR と高速バス等の競争が生起し、その区間の運賃が安くなっているから」とされており、このように記述できていれば、経済学ルールを学習者が適用できたとみなしている。この間に正答するには、経済学ルールを単純に適用するだけでは不十分であり、与えられた「JR と高速バスの間に競争がある」という情報に基づき、経済学ルールを操作することが必要である。つまり、学習者は問題解決の過程で、Figure2-4 に示すような演繹推論を働かせていると推察される。

知識	企業間に競争があれば商品の価格は下がる。
情報	JR と高速バスの間に競争がある。
帰結	ゆえに、JR の運賃は安くなる。

Figure 2-4 科学的知識に基づく演繹推論

また、経済学ルールを構成する「企業間の競争」と「商品の価格」との関係を適切に理解していなければ、これらの概念どうしは関係ないものとして扱われる。その結果、問題解決に必要な情報（JR と高速バスの間に競争があること）を与えられたとしても、この知識を操作できないので、「JR の運賃は安くなる」という帰結を導き出すことは難しいと考えられる。つまり、Figure2-4 のような演繹推論が可能となるには、当該の科学的知識を構成する概念間に潜在的なリンクが形成されている必要があると考えられる。

次に、麻柄・進藤（2011）で提示された知識の問題解決に対する適用過程を考えてみる。まず、取り上げられた「日本海を通過するとき季節風は、その距離に応じた量の水蒸気を吸い込み、日本海側に雪を降らせる（降雪量ルール）」という科学的知識は2種類の命題が入れ子になっていると考えることができる。つまり、この知識は、「季節風に含まれる水蒸気量により日本海側の降雪量は変わる」という高次の命題があり、その前件部分の「水蒸気量」が変化する要因の1つを「日本海を通過する距離により季節風に含まれる水蒸気量は変化する」という低次の命題で表されていると捉えることができる。

そして、この知識に対する問題は3種類あり、それぞれについて地名と季節風の方向を示した日本周辺の地図が情報として与えられていた。3つの問題解決の過程を、実際に用いられた問題に即して考えてみる。1つめの問題では、小樽と金沢の降雪量について、①「北海道で寒いから小樽が多い」、②「日本海でたくさん水蒸気を吸った季節風がやってくるから金沢が多い」、③「どちらも日本海側にあるから変わらない」から正しい考えを選択させている。正答は②であるが、この選択肢には「水蒸気量が多ければ、日本海側の降雪

量が多い」と同様のことが記述されており、この問題の解決過程において、学習者は必ずしも演繹推論を実行する必要はない。つまり、「水蒸気量」と「降雪量」の関係を適切に理解していない学習者でも、「季節風に含まれる水蒸気量により日本海側の降雪量は変わる」と似た内容が記されている選択肢を選べば、この問題の解決は可能と言える。

2つめの問題では、例えば、留萌と福井では降雪量が多いのはどちらかを尋ねており、正答は福井である。この時、地図から得られる情報をもとに、学習者は Figure2-5 に示すような2段階の演繹推論を働かす必要があると推察される。したがって、この問題を解決するために、学習者は「日本海を通過する距離」と「水蒸気量」、「水蒸気量」と「降雪量」という概念間に潜在的リンクをそれぞれ形成しておくことが必要であると考えられるのは、前述の通りである。

命題2	日本海を通過する距離により季節風に含まれる水蒸気量は変化する。
情報	季節風が福井まで来るとき、日本海を通過する距離は長い。
帰結1	ゆえに、福井に来る季節風に含まれる水蒸気量が多い。
命題1	季節風に含まれる水蒸気量により日本海側の降雪量は変わる。
帰結1	福井に来る季節風に含まれる水蒸気量が多い。
帰結2	ゆえに、福井の降雪量が多い。

Figure 2-5 2つの命題に基づく2段階の演繹推論

3つめの問題は、「雪まつりがあれば降雪量が多い」という誤った知識（誤前提）に基づいた質問に対して、どのように答えるかを尋ねており、正答はこの誤った知識を否定し、「日本海でたくさん水蒸気を吸った季節風がやってくる」とのように指摘できることとされている。確かにこの誤った知識に基づいて、Figure2-6のような演繹推論は可能であり、その帰結は論理的に誤りではない。しかし、このような演繹推論は、前提が真であれば帰結も真であると言えるが、前提が偽であれば帰結は真とは言えない。つまり、この問題では前提となっている知識が誤っていることを指摘し、Figure2-6のような推論そのものを抑制する必要がある。このような問題を工藤（2008）は「誤前提問題」と呼んでおり、知識

誤前提	雪まつりがあれば降雪量が多い。
情報	札幌で雪まつりが行われる。
帰結	ゆえに、札幌の降雪量が多い。

Figure 2-6 誤った前提に基づく演繹推論

どうしの関係づけを促進する教授の効果を鋭敏に検出できることを示唆している。

麻柄・進藤（2011）では、「季節風が、大陸との距離がとても長い日本海の上空を通過して日本にやってくる場合」のあとに続く語句を「降る雪の量は、多くなる・少くなる・ほとんど変わらない」の中から選択するような、当該の知識に関わる操作的思考課題を課した群とそうでない群を比較している。その結果、1つめの問題については正答者数に差はなく、2つめの問題では操作的思考課題を課した群で正答者数が多いという結果が得られている。この事実は、学習者の操作的思考を促すことで、科学的知識を構成する概念間の関係が明確となり、降雪量ルールを構成する概念間に潜在的なリンクを形成した結果と考えられ、学習者が演繹推論を行えるようになることを支持していると思われる。

また、3つめの問題では、操作的思考課題を課した群で有意に正答者数が多く、そうでない群では正答者数が少ないという結果が得られている。メンタルモデル理論（Johnson-Laird, 1983）によると、過去の習慣や経験によって自動的に構成されるモデルが優先されるとされており、この場合、「雪まつり＝降雪量が多い」というモデルが経験的に構成されやすいと考えられる。一方、メンタルモデルに反する推論ができるためには、自動的に構成されたメンタルモデルを抑制することが必要であるとされている（Markovits & Barrouillet, 2002）。つまり、「水蒸気量」を媒介として「季節風が日本海を通過する距離」と「降雪量」との関係を理解し、潜在的な概念間リンクを形成することで、経験的なメンタルモデルを抑制し、「雪まつり」と「降雪量」との関係が否定されると考えられる。したがって、操作的思考課題を課した群で正答者数が多いという結果は、操作的思考を促すことで、「季節風が日本海を通過する距離」と「水蒸気量」、「水蒸気量」と「降雪量」という概念間にそれぞれ潜在的なリンクを形成していることを支持している。

以上のことをまとめると、学習者は操作的思考を促されることにより、科学的知識を構成する概念間の関係を適切に理解し、概念間に潜在的なリンクを形成すると考えられる。そして、問題解決場面で概念間の潜在的なリンクが顕在化した結果、学習者は科学的知識を前提とする演繹推論を促され、その推論形式で問題解決を図ると推察される。

2.1.4 演繹推論を促す学習活動

前節より、操作的思考課題を用いて学習者の操作的思考を促すことにより、学習者は科学的知識を前提とした演繹推論を実行しやすくなることが示唆された。したがって、ここでは、上述の知見に基づき、小・中学校における科学教育の授業で操作的思考課題を導入

した学習活動を行い、その中で学習者の演繹推論を促し、科学的知識を構成する概念間の関係性を理解させる方法について検討する。なお、前節で考察した麻柄・進藤（2011）の結果は、2つめと3つめの問題では操作的思考課題を課した群で正答者数が多く、1つめの問題では群間で差がないことから、科学的知識を構成する概念間に潜在的なリンクを形成しているかどうかによって、科学的知識の理解水準が質的に異なることを示唆している。つまり、概念間に潜在的なリンクを形成した上で科学的知識を理解できる方が、より高次の水準であると思われる。したがって、ここで検討する方法は、より高次の水準での科学的知識の理解を目指すものである。その学習モデルを Figure2-7 に示す。

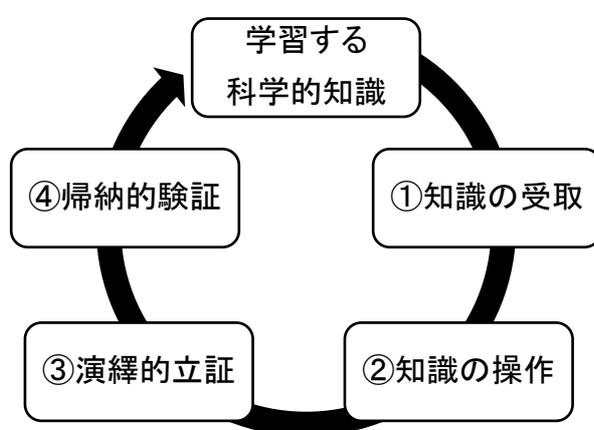


Figure 2-7 知識検証学習モデル(LVK モデル)

この学習モデルでは、まず、科学的知識が命題として教示されることから学習活動が始まる（①知識の受取）。しかしながら、学習者は多くの既有知識を持っているため、科学的知識を単に教示しただけでは、例外への懸念（麻柄, 2006）や判断の不確定性（佐藤, 2008）、概念名辞のまくら言葉化（麻柄・進藤, 2015）など、その要因は様々に概念化されているが、いずれにしても、科学的知識が学習活動で適切に使用される可能性は低いと考えられる。

例えば、ナトリウムやカルシウムは、これらが金属であると推察できる十分な情報を与えられた大学生でも、電気を通すと判断できないことが知られている（伏見, 2013）。この事実は、学習者が与えられた情報に基づいてナトリウムやカルシウムを金属に帰属できないことや、あるいは正しく金属に帰属できた場合でも、科学的知識を教示されただけでは当該の知識を操作できないことを示している。

そこで、操作的思考課題を導入した科学的知識の読み取りの段階を設定する（②知識の操作）。1章で述べた通り、操作的思考を促すことにより、学習者は科学的知識を構成する

概念間の関係性についての理解が促進され、概念間に潜在的なリンクが形成されると思われる。その結果、当該の知識に対する信頼度が大きくなるとともに、この知識を使用しない要因は小さくなると考えられる。この状態で、いくつかの事例について予想させれば、学習者は科学的知識を用いて演繹的にどのような結果になり得るかを推論できると思われる（③演繹的立証）。

最後に、実験や観察をしたり、資料を読み取ったりすることで収集された事実により、科学的知識の蓋然性を確かめる段階を設ける。この過程で、学習者は帰納推論を働かせることにより、当該の科学的知識が経験的にも正しいと言えることを確かめられる（④帰納的検証）。したがって、このようなプロセスを要する学習モデルは、科学的探究の過程で必要とされる演繹推論と帰納推論を促進すると考えられる。

ところで、ここで提案した学習モデルは、学習者の科学的知識に対する信頼度を高めた上で、その知識を演繹的、帰納的方法で検証することが主たる目的である。つまり、この学習活動では、科学的知識から導かれる必然的な帰結を、実験や観察そして調査などの結果と照らし合わせて当該の知識の蓋然性を検証していることから、知識検証学習モデル（Learning through Verification of Knowledge Model, 以下「LVK モデル」と記す）と呼ぶ。

この学習モデルにより、Figure 2-8 のような学習活動がデザインできる。これは、前述の小学校理科「電気を通すもの」に関する学習に即して示しているが、その他の学習活動への適用も可能であると思われる。このような学習活動を繰り返し行うことにより、学習者の帰納推論だけではなく、演繹推論も促進されると考えられる。

1. 金属が電気を通すことを教示する（知識の受取）。
2. 金属でできているかどうかという情報を示した上で、金属でできているものとそうでないものが、電気を通すか考えさせる（知識の操作）。
3. 実験で調べるものについて、電気を通すか予想させる（演繹的立証）。
4. 実験を通して、電気を通したものとそうでないものに分類させる（帰納的検証）。

Figure 2-8 「電気を通すもの」に関する学習活動デザイン

2.2 まとめ

以上、科学的に探究する能力を育成する観点から、学習活動で行われている推論を焦点化し、小・中学校における科学教育の課題について検討した。その結果、以下に示す知見が得られた。

- (1) 小・中学校の理科や算数科，社会科の教科書における記述内容を検討したところ，これらにおける学習活動は，帰納的なプロセスでデザインされている傾向が示唆された。そのプロセスは，次に示す2段階のプロセスであった。第1段階は，理解させたい科学的知識に関わる事例を実験や観察，資料を利用することでいくつか集めることである。そして，第2段階は，収集した事例の共通点や異なる点を比較し，そこから一般法則を導き出すことであった。
- (2) 上記(1)に比して，科学的探究の過程に必要な演繹推論が不十分な傾向にある実態が示唆された。
- (3) 学習者が科学的知識を使用しない要因を減じる方法の1つとして，操作的思考課題を学習活動に導入することが効果的であると示唆された。

これらの知見から，パースの科学的探究の過程を理論的背景とする，科学的知識を効果的に獲得させることを目的とした知識検証学習モデル（LVKモデル）の提案に至った。次章からは，ここで提案したLVKモデルに基づく授業実践を行い，この授業が科学的知識の想起と適用に与える効果と，学習者が当該の知識を構成する概念間の関係性を理解するプロセスに焦点を当てて分析を進めることとする。

3 知識検証学習モデルによる授業の効果

本章では、中学校理科において知識検証学習モデル（LVK モデル）に基づく状態変化の学習に関する授業を行い、この授業が科学的知識の想起と適用に与える効果を検討する。また、操作的思考課題の解決過程において、学習者が当該の知識を構成する概念間の関係性を理解するプロセスについても検討する。

3.1 操作的思考課題の解決を含む学習活動がルール獲得に及ぼす効果とそのプロセス

3.1.1 問題と目的

本実践では Table3-1 に示すような学習過程を通して、「粒子の動きが変化すれば、物質の状態は変化する（状態変化ルール）」という状態変化についての科学的知識を一般化し、その適用を促すことを目指した。

Table 3-1 本実践における学習過程の概要

学習過程	具体的な学習活動
1. 知識の受取	・状態変化ルールに関する説明を受ける。
2. 知識の操作	・変数操作的思考課題を行う。
3. 演繹的立証	・食塩を熱するときの変化を予想する。
4. 帰納的検証	・食塩を融解させる実験を行う。
5. 知識の再操作	・関係操作的思考課題を行う。

このルールの特徴は、「粒子の動き」と「物質の状態」という概念がたがいに関係づけられ、「物質の状態」が「粒子の動き」に規定されることを説明しており、また、「粒子の動き」も「物質の状態」に規定されるので、逆命題の「物質の状態が変化すれば、粒子の動きは変化する」も成り立つ双条件文ということである。

状態変化ルールの特徴を踏まえ、変数操作的思考と関係操作的思考を促す課題を学習者に行わせることが操作的思考を促すのに効果的であると考えられる。その理由を、本研究で行った授業実践を例にして具体的に述べる。

まず、「水を冷凍庫で冷やすと、水の状態はどのようになるか」という変数操作的思考課題を課すことで、学習者は「冷やされることにより粒子の動きが弱くなるから、水は固体になる」という推論をはたらかせることになる。つまり、学習者は「粒子の動き」に応じた「物質の状態」を導くことができ、これらの概念間の関係性を明確にできると考えられる。

また、状態変化ルールは双条件文で、「粒子の動き」と「物質の状態」は共変関係にある。

しかしながら、1章で述べた通り、このような共変関係がある場合でも、学習者が誤って共変関係はないと判断してしまうことが指摘されている (Jennings et al., 1982)。そこで、「炭酸ガスを冷やすことなく加圧すると、どうして炭酸ガスは液体になるのか」という関係操作的思考課題を課せば、学習者は「炭酸ガスが液体になる事実から、粒子の動きが弱くなる」ことを予想すると思われる。つまり、「物質の状態」に応じた「粒子の動き」を推論することで、教示する状態変化ルールの逆命題が成り立つことを、学習者が理解できると考えられる。したがって、学習者は「粒子の動き」と「物質の状態」の間に密接な共変関係があると解釈し、ルールを適用しない要因の1つが取り除かれるため、状態変化ルールの信頼性が高まると期待される。その結果として、当該の知識を構成する概念間にある関係性の理解が促され、この知識の想起や適用が促進されると考えられる。

授業では、Table3-1 に示したように、操作的思考課題を解決する学習活動だけではなく、実際に物質の状態変化を観察する実験を行った。具体的には、学習者が既有知識に基づき状態変化をしないと考えているような物質（抵触事例）を事例とした実験を行い、このような物質でも状態変化することを示した。ここでは、抵触事例として、食塩を用いた実験を行った。伏見（2013）によれば、さまざまな事例を当該の知識にあてはまる事例とあてはまらない事例とに分ける課題に対しては、抵触事例を焦点事例として用いる方が効果的であるとされている。つまり、抵触事例である食塩を状態変化する事例として示すことで、学習者は状態変化ルールを多くの物質に対して適用できるようになると考えられる。

また、仲間とともに協同して学ぶことには、学習の成果を促進する効果があるとされている（岡田ら, 2016）。高垣ら（2007）は、授業では個々の学習者が独立して学習活動を成立させている訳ではなく、学習者どうしの相互作用といった側面から授業における教授学習過程を捉えることが重要であると指摘している。したがって、本研究でも協同的に操作的思考課題に取り組みせることで、教室で生起する相互作用という観点から科学的知識を構成する概念間の関係性を理解するプロセスの観察を企図した。具体的には、操作的思考課題の解決過程において、このプロセスを検討するために、学習者間で生起する対話の分析を行った。

以上のことを踏まえて、具体的には、次の2つの項目について検討を行う。1つめは、中学生を対象にした状態変化に関する授業の中に、操作的思考課題として変数操作的思考課題と関係操作的思考課題の2種類の課題を設定し、その解決を含む LVK モデルに基づく授業が科学的知識の想起や適用に与える効果を明らかにする。2つめは、操作的思考課

題を協同で解決させる過程で生じた対話を分析し、学習者が科学的知識を構成する概念間の関係性を理解するプロセスを検討する。

3.1.2 方法

a 分析対象者

後述する3つのセッションに参加した中学1年生34名を分析対象者とした。

b 手続き

事前調査（約10分）、授業（約50分）、事後調査（約10分）のセッションを実施した。事前調査の翌日に授業を行い、授業の当日に事後調査を実施した。なお、事前及び事後調査開始前には、調査に参加したくなければ、その意思を尊重するとして、調査の結果を個人の成績には影響させないことや分からないことは素直に分からないと記述してもよいことを説明した。

c 各セッションの内容

(1) 事前調査

調査問題の構成は、問題1（状態変化ルールを想起できるかどうかを確かめる問題）と問題2（状態変化ルールを適用できるかどうかを確かめる問題）であった。調査問題の概要を、Figure3-1に示す。

<p>問題1 あるモノ(物質)が、温度や圧力によって「固体—液体—気体」と変化したとします。あるモノが、液体のとき、気体のとき、そのモノをつくる粒子どうしの関係は、それぞれどうなっているでしょうか。例(固体のときの粒子どうしの関係)にならって説明してください。わからないときは、「わからない」とかいてください。</p> <p>例) 固体のとき ひとつひとつの粒子の動きの強さよりも、粒子どうしを結びつける力の方がはるかに大きく、粒子どうしががっちり結びついている。</p> <p>問題2 次のモノの中で、温度や圧力を変えたら実際に存在するかもしれないものはどれでしょう。それぞれの()の中に、存在するかもしれないものには○印、存在しないと思うものには×印をつけてください。また、○や×にした主な理由を書いてください。</p> <p>① () 固体の銅 () 液体の銅 () 気体の銅 ② () 固体の食塩 () 液体の食塩 () 気体の食塩 ③ () 固体の窒素 () 液体の窒素 () 気体の窒素 ④ () 固体のエタノール () 液体のエタノール () 気体のエタノール ⑤ () 固体の水銀 () 液体の水銀 () 気体の水銀 ⑥ () 固体の酸素 () 液体の酸素 () 気体の酸素 ⑦ () 固体の水晶 () 液体の水晶 () 気体の水晶</p>
--

Figure 3-1 調査問題の概要

問題1（知識想起問題）では、物質が固体のときについて粒子どうしの関係を説明した状態変化ルールに拠る例文を示し、その例文を参考に、物質が液体や気体のときについて粒子どうしの関係を説明するように求めた。問題2（知識適用問題）では、8つの物質について、温度や圧力を変えたら実際に存在すると思う状態には「○」印を、存在しないと思う状態には「×」印のどちらかを必ずつけるよう求めた。また、学習者が状態変化について、あらかじめどのような既存知識を持っているのかを明らかにするため、上述の設定で「○」あるいは「×」印をつけた主な理由の記述を求めた。なお、調査問題は、伏見（1995）を参考に作成した。

(2) 授業の概要

本実践の学習過程の概要は Table3-1 に示したとおりである。なお、操作的思考課題による状態変化ルールを構成する概念間の関係性を理解するプロセスをとらえるため、知識の操作の段階に、変数操作的思考課題を協同で解決させる過程を導入し、グループの中で生じた対話を記録した。

知識の受取

本実践では、「粒子の動きが変化すれば、物質の状態は変化する（状態変化ルール）」を科学的知識と位置づけた。具体的には、まず、Figure3-2 に示すスライドを提示し、水の状態変化を事例にして、加熱して粒子の動きが強くなると固体→液体→気体、冷却して粒子の動きが弱くなると気体→液体→固体と物質の状態が変化することを説明した。

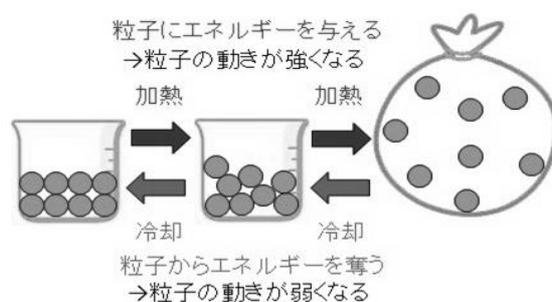


Figure 3-2 状態変化ルール

知識の操作

次に、Figure3-3 に示す課題を、3～4人のグループで取り組ませた。この課題は、状態

次の①～⑤の場合、下線で示した物質(モノ)の状態は、どのようになるでしょう。次のア～カから適切だと思う記号を1つ選んで、()に書き入れましょう。

ア)固体になる イ)液体になる ウ)気体になる エ)固体や液体になる
オ)液体や気体になる カ)変わらない

- ① 水を冷凍庫で冷やしたら、水は →()
なぜ、上の答えのようになるかという、水の粒子の動きが(a強くなる, b弱くなる, c変わらない)からです。
- ② お酒を温めると、エタノールは →()
なぜ、上の答えのようになるかという、エタノールの粒子の動きが(a強くなる, b弱くなる, c変わらない)からです。
- ③ ろうそくに火をつけると、ろうは →()
なぜ、上の答えのようになるかという、ろうの粒子の動きが(a強くなる, b弱くなる, c変わらない)からです。
- ④ 食塩の結晶をどんどん加熱したら、食塩は →()
なぜ、上の答えのようになるかという、食塩の粒子の動きが(a強くなる, b弱くなる, c変わらない)からです。
- ⑤ 鉄骨をどんどん加熱したら、鉄は →()
なぜ、上の答えのようになるかという、鉄の粒子の動きが(a強くなる, b弱くなる, c変わらない)からです。

Figure 3-3 変数操作的思考課題

変化ルールに即して、前件の値を「冷やす」、「温める」、「加熱する」などのように示した上で、後件の値である「固体になる」、「液体になる」、「気体になる」などを求める構造とした。これは、変動方向を仮定して別の命題を学習者に導かせていると言え、この課題を変数操作的思考課題と位置づけた。

演繹的立証と帰納的検証

状態変化ルールに従って論理的に考えると、すべての物質が状態変化すると学習者は推論できるはずであるが、特に日常生活の範囲内で状態変化しない物質については、実験で確かめるまで納得できない学習者が存在することも事実である。そこで、物質が状態変化をする1つの事例として食塩を取り上げ、食塩を加熱するとどのように変化するかを予想させた。その上で、食塩が固体から液体に変化することをグループごとに確かめさせた。

知識の再操作

最後に、Figure3-4 に示す課題に取り組み、知識の受取の段階とは異なる文脈でも状態変化ルールを学習者が適用できることを目指した。この課題は、「炭酸ガスが液体になる」ことを示した上で、加圧することにより、「粒子の動きの強さ」がどのように変化するかを問う構造とした。これは、状態変化ルールの逆命題の前件の値を与えた上で、後件の値を求めさせており、この課題を関係操作的思考課題と位置づけた。

●ドライアイスは、二酸化炭素の固体です。ドライアイスの製造方法は、気体の二酸化炭素（炭酸ガス）を冷やして液体にし、さらに冷やして固体にするものではありません。

●炭酸ガスを、およそ※₁130気圧前後に※₂加圧して※₃液化させた後、粉末状の固体にした上で、それを成形して製造しています。

●では、炭酸ガスを冷やすことなく、130気圧前後まで加圧すると、どうして炭酸ガスは液体になるのでしょうか。炭酸ガスを加圧する前と後で、「炭酸ガスの粒子の動きの強さ」が、どのように変化するのかに注目して、粒子のモデルを用いて、説明しましょう。

※₁「130気圧」:通常の130倍の大きさの気圧
 ※₂「加圧」:圧力を加えて大きくすること
 ※₃「液化」:この文章では、気体を液体にすること

Figure 3-4 関係操作的思考課題

(3) 事後調査

調査問題の構成は、事前調査の「状態変化すると考えた理由をたずねる部分」を省いた以外は、事前調査の構成と同じであった。

3.1.3 結果と考察

a 事前調査

問題1（知識想起問題）

問題1のあるモノをつくる粒子どうしの関係を記述することを求めた各問に対して、あるモノが液体のとき（問1）では、「粒子の動きの強さと粒子どうしを結びつける力の大きさがほとんど変わらない」こと、あるモノが気体のとき（問2）では、「粒子の動きの強さが、粒子どうしを結びつける力よりも十分大きい」ことを記述できていればそれぞれ正答とした。

事前調査における各問の正答者数は、問1が8人（23.5%）、問2が11人（32.4%）であった。事前調査の各問について、直接確率計算を行ったところ、問1で正答者数が有意に少なく（両側検定, $p<.01$ ）、問2では少ない有意傾向があった（両側検定, $p<.10$ ）。また、2つの問に正答した学習者（完全正答者）は7人（20.6%）と絶対的に少なく、「粒子の運動」と「物質の状態」という概念間の潜在的なリンクを顕在化し、「粒子の運動の動きが変化すれば、物質の状態は変化する」という知識を想起して状態変化について考えている生徒は少ないと考えられる。

問題2（知識適用問題）

事前調査の結果を、Table3-2 に示す。正答者数が最も少ないのは水晶の気体7人(20.6%)であり、反対に正答者数が最も多いのは食塩の固体30人(88.2%)であった。学習者の授

Table 3-2 問題2の正答者数(人)

問	固体		液体		気体	
	正	誤	正	誤	正	誤
銅	27(79.4%)**	7(20.6%)**	23(67.6%)	11(32.4%)	9(26.5%)**	25(73.5%)**
食塩	30(88.2%)**	4(11.8%)**	23(67.6%)	11(32.4%)	8(23.5%)**	26(76.5%)**
窒素	10(29.4%)*	24(70.6%)*	16(47.1%)	18(52.9%)	27(79.4%)**	7(20.6%)**
エタノール	10(29.4%)*	24(70.6%)*	27(79.4%)**	7(20.6%)**	18(52.9%)	16(47.1%)
水銀	19(55.9%)	15(44.1%)	26(76.5%)**	8(23.5%)**	10(29.4%)*	24(70.6%)*
酸素	11(32.4%)	23(67.6%)	10(29.4%)*	24(70.6%)*	29(85.3%)**	5(14.7%)**
水晶	29(85.3%)**	5(14.7%)**	18(52.9%)	16(47.1%)	7(20.6%)**	27(79.4%)**

** $p < .01$ * $p < .05$

業前における知識の状態を調べるために、事前調査の各問について直接確率計算（両側検定）を行った。

その結果、まず、固体が存在するかどうかについては、銅、食塩、水晶で正答者数が有意に多く、窒素とエタノールでは正答者数が有意に少なかった。次に、液体が存在するかどうかについては、エタノールと水銀で正答者数が有意に多く、酸素で正答者数が有意に少なかった。最後に、気体が存在するかどうかについては、窒素と酸素で正答者数が有意に多く、銅、食塩、水銀、水晶で正答者数が有意に少なかった。

全体的な傾向として、それぞれの物質について日常生活の条件下で観察できる状態に関する問の正答者が多く、日常生活の条件下では観察できない状態についての正答者は少なかった。具体的には、常温・常圧で固体の物質（銅、食塩、水晶）では固体が存在するかどうかという問、常温・常圧で液体の物質（エタノール、水銀）では液体が存在するかどうかという問、常温・常圧で気体の物質（窒素、酸素）では気体の状態が存在するかどうかという問に対する正答者数がそれぞれ有意に多かった。また、常温・常圧で固体の物質では気体が存在するかどうかという問、窒素については固体が存在するかどうかという問、酸素については液体が存在するかどうかという問に対する正答者数がそれぞれ有意に少なかった。

そこで、問題2で「○」あるいは「×」と判断した理由を分類すると、「○」の理由としては、「見たことがある」など学習者自身の実体験に基づく記述が12件と最も多かった。一方、「×」の理由としては、「見たことがない」など学習者の実体験に基づく記述が7件

と最も多かったが、次いで「想像できない」など学習者の推論に基づくと思われる記述が6件あり、さらに「酸素は目に見えないすごく小さなものなので、固体にはならない」というような粒子に関する記述が5件あった。

これらのことより、状態変化するかどうかについて実体験に基づいて判断している学習者が多く存在する一方で、「目に見える物質（固体と液体）と目に見えない物質（気体）とは、異なる粒子でできている」というような粒子に関する誤った既有知識を持つ学習者の存在を想定することもできる。つまり、この知識を適用して問題に答えた学習者は、状態変化について、「もともと気体の物質は固体や液体にはならない」や「もともと固体や液体の物質は気体にはならない」という考えに至るとと思われる。

b 事後調査

問題1（知識想起問題）

問題1について、問ごとに事前調査と事後調査の正答者数とのクロス集計を行った。その結果を Table3-3 に示す。

Table 3-3 問題1の正答者数の変化(人)

問	事前	事後	
		正	誤
1. 液体のとき	正	8 (23.5%)	0 (0%)
	誤	16 (47.1%)	10 (29.4%)
2. 気体のとき	正	11 (32.4%)	0 (0%)
	誤	12 (35.3%)	11 (32.4%)

問1の正答者数（事前8人→事後24人）、問2の正答者数（事前11人→事後23人）ともに増加していた。そこで、正答者数の変化について McNemar 検定を行ったところ、問1、問2ともに事前から事後にかけて誤答から正答に転じた数が有意に多かった（問1： $\chi^2(1)=14.06, p<.01$; 問2： $\chi^2(1)=10.08, p<.01$ ）。

また、完全正答者数の割合は、伏見（1995）の調査では2割程度であったが、本研究では6割を超えていること（事前20.6%→事後64.8%）からも、本実践が状態変化ルールの想起を促進したと考えられる。

問題2（知識適用問題）

問題2について、問ごとに事前調査と事後調査の正答者数とのクロス集計を行った。その結果を Table3-4 に示す。事前調査と比較すると、食塩の気体で正答者数の増加が最も多く（事前8人→事後29人）、酸素の気体では正答者数の増加が最も少ない（事前29人→事後30人）が、すべての問において正答者数の増加が見られた。そこで、正答者数の変化について McNemar 検定を行ったところ（Table3-4 中の χ^2 値）、銅の液体と気体、食塩の液体と気体、窒素の固体と液体、エタノールの固体と気体、水銀のすべて、酸素の固体と液体、

Table 3-4 問題2の正答者数の変化(人)

問	事前	事後					
		固体		液体		気体	
		正	誤	正	誤	正	誤
銅	正	25	2	23	0	8	1
		(73.5%)	(5.9%)	(67.6%)	(0%)	(23.5%)	(2.9%)
	誤	7	0	8	3	14	11
(20.6%)		(0%)	(23.5%)	(8.8%)	(41.2%)	(32.4%)	
		$\chi^2(1)=0.18$		$\chi^2(1)=6.13^*$		$\chi^2(1)=9.60^{**}$	
食塩	正	29	1	22	1	7	1
		(85.3%)	(2.9%)	(64.7%)	(2.9%)	(20.6%)	(2.9%)
	誤	3	1	11	0	22	4
(8.8%)		(2.9%)	(32.4%)	(0%)	(64.7%)	(11.8%)	
		$\chi^2(1)=0.25$		$\chi^2(1)=6.75^{**}$		$\chi^2(1)=17.39^{**}$	
窒素	正	7	3	16	0	25	2
		(20.6%)	(8.8%)	(47.1%)	(0%)	(73.5%)	(5.9%)
	誤	18	6	13	5	5	2
(52.9%)		(17.6%)	(38.2%)	(14.7%)	(14.7%)	(5.9%)	
		$\chi^2(1)=9.33^{**}$		$\chi^2(1)=11.08^{**}$		$\chi^2(1)=0.57$	
エタノール	正	8	2	26	1	17	1
		(23.5%)	(5.9%)	(76.5%)	(2.9%)	(50.0%)	(2.9%)
	誤	16	8	7	0	13	3
(47.1%)		(23.5%)	(20.6%)	(0%)	(38.2%)	(8.8%)	
		$\chi^2(1)=9.39^{**}$		$\chi^2(1)=3.13$		$\chi^2(1)=8.64^{**}$	
水銀	正	17	2	25	1	8	2
		(50.0%)	(5.9%)	(73.5%)	(2.9%)	(23.5%)	(5.9%)
	誤	11	4	8	0	18	6
(32.4%)		(11.8%)	(23.5%)	(0%)	(52.9%)	(17.6%)	
		$\chi^2(1)=4.92^*$		$\chi^2(1)=4.00^*$		$\chi^2(1)=11.25^{**}$	
酸素	正	9	2	9	1	27	2
		(26.5%)	(5.9%)	(26.5%)	(2.9%)	(79.4%)	(5.9%)
	誤	15	8	16	8	3	2
(44.1%)		(23.5%)	(47.1%)	(23.5%)	(8.8%)	(5.9%)	
		$\chi^2(1)=8.47^{**}$		$\chi^2(1)=11.53^{**}$		$\chi^2(1)=0.00$	
水晶	正	28	1	14	4	5	2
		(82.4%)	(2.9%)	(41.2%)	(11.8%)	(14.7%)	(5.9%)
	誤	4	1	11	5	16	11
(11.8%)		(2.9%)	(32.4%)	(14.7%)	(47.1%)	(32.4%)	
		$\chi^2(1)=0.80$		$\chi^2(1)=2.40$		$\chi^2(1)=9.39^{**}$	

** $p<.01$ * $p<.05$

水晶の気体の各問において、事前から事後にかけて誤答から正答に転じた数が有意に増加していた。一方、正答者数の上昇が少なかった問は、日常生活の条件下で観察可能な状態に関するものであり、事前調査における正答者数が多かったためと考えられる。

また、事前調査ではすべての問に正答した者（完全正答者）はいなかったが、事後調査の完全正答者数は15人（44.1%）に増加していた。調査の条件等が異なるので単純な比較はできないが、大学生を対象とした同様の調査における事前調査の完全正答者数の割合は1割程度であったこと（伏見, 1995）と比べると、状態変化をすでに学習している大学生よりも中学生の方が完全正答者数の割合が高かった。

以上のことから、本実践により、状態変化ルールの適用が促進されたと考えられる。しかしながら、事後調査においても完全正答者数が必ずしも多いとは言えないことに留意する必要がある。

問題1と問題2の関連

問題1（知識想起問題）と問題2（知識適用問題）の事後調査における完全正答者数の関連を調べた。その結果を Table3-5 に示す。

Table 3-5 問題1と問題2の完全正答者数の変化(人)

問題1 (知識想起問題)	問題2(知識適用問題)	
	正	誤
正	11 (32.4%)	11 (32.4%)
誤	4 (11.8%)	8 (23.5%)

両方の問題に完全正答した学習者を状態変化に関する知識を構成する概念間の関係性を理解できた者とみなすと、その数は11人（32.4%）であり、全体の3分の1ほどである。知識想起問題に完全正答した22人（64.8%）のうち、11人（32.4%）の学習者は知識適用問題に完全正答していない。このことは、これらの学習者が状態変化ルールを想起できているにもかかわらず、物質ごとにこのルールを適用したり、しなかったりしていることを示唆している。

一方、知識想起問題には完全正答していないが、知識適用問題に完全正答している学習者が4人（11.8%）いる。これらの学習者は、必ずしも教示した状態変化ルールを適用している訳ではなく、学習活動を通して「すべての物質は状態変化する」というような知識を構成したと推察される。つまり、この知識を適用することにより、「粒子の動き」と「物質

の状態」の関係性を理解していなくても、物質の状態についてあり得る状態を正しく答えられたと考えられる。

c グループ内討論の解釈的分析

Figure3-5 は、変数操作的思考課題を解決する過程におけるあるグループ内討論の記録である。佐藤 (2012) は、小グループをどう組織するのかについて、多様な個性や能力の子どもが偶発的に組織されることが好ましいとしている。このグループは、男子1人、女子2人の3人で構成されており、当該の中学校における理科の成績で上位層の者もいれば下位層の者もいた。このことより、学習者の多様性が担保されていると考え、このグループを分析対象とした。

討論の記録を概観すると、このグループの討論の焦点は、全体的に「食塩がとけて液体となるのか、それとも液体にはならず気体になるのか」にあるように思われる。また、

1 A男「とけるかこれ(食塩が)?」	24 A男「なんで、(粒子の動きが)強くなるからやろ。どんどんとけていくから、(粒子の動きは)強くなるのやろ。」
2 B子「だって塩(食塩), だって砂糖もとけるやん。」	25 B子「食塩は?」
3 A男「砂糖, とけている?」	26 A男「ろうは, ろうはとぼそう。」
4 C美「(砂糖は)とける, とける。」	27 B子「あー。間違えた。ろうのところをやっていた。ろうは?」
5 B子「砂糖, あつためたら, とけるやん。大学いも。」	28 A男「ろうは, あれやろ, 液体になっていく。」
6 A男「(砂糖を)水に入れている(とかしている)からやろ。」	29 B子「(粒子の動きは)強くなるの, 弱くなるの?」
7 B子「違って。違うやん。砂糖とけるやん。」	30 A男「強くなる, 粒子の動きはね。」
8 C美「ちょっと, (砂糖が)とけているのとちがう。」	31 C美「ふーん。」
9 B子「やんな。ほら。」	32 B子「で, 食塩(の粒子の動き)は?」
10 A男「砂糖と塩(食塩)は違うやろ。」	33 A男「食塩も, (粒子の動きが)強くなる。」
11 C美「なんか, どれもとけそうやもん。そんな感じじゃないの?」	34 B子「じゃあ, (食塩は)とけるの?じゃあ, 液体にする?」
(しばらく沈黙)	35 A男「(食塩は)気体じゃないの?」
12 B子「(粒子の動きが)強くなるとか, 弱くなるとかやろよ。1番は。」	36 B子「えー。食塩が気体になる?」
13 A男「1番, あれや, (粒子の動きは)弱くなる。」	37 A男「何で, こんな固体(食塩)から液体出てくるの。」
14 B子「(粒子の動きは)弱くなるの?」	38 B子「じゃあ, (食塩は)何になるのよ?」
15 C美「(粒子の動きは)弱くなる。」	39 A男「だから, (食塩は)気体って言ってるやん。」
16 A男「(粒子の動きは)弱くなる。」	40 C美「(食塩は)気体にならないよね?」
17 B子「2番は?」	41 B子「何で塩(食塩)が気体になるの?」
18 A男「あれ(温める)やから, なんていうか(粒子の動きは)強くなる。何してるの?」	42 A男「じゃあ, 何で(食塩が)液体になるの?」
19 C美「水, びっしょびっしょ。」	43 B子「だって, (食塩が)とける。」
20 B子「2番は?」	44 A男「えー, 水ないのに(食塩が)とけるはずない。」
21 A男「(粒子の)動きが強いから, 自由に動き回れるだけで, (粒子の動きが)弱いから凍っている(固体である)。」	45 B子「砂糖もとけるやん。砂糖もとける。大学いもは, 砂糖を最初に引くからね。」
22 B子「じゃあ, 気体になるのは何なの?(粒子の動きが)強くなるの?弱くなるの?変わらないの?」	46 A男「それは(砂糖が)水にとけているのとちがう?」
23 C美「(気体になるのは粒子の動きが)弱くなるのとちがう。」	47 B子「(砂糖は水に)とけてないよね。」
	(後略)

Figure 3-5 変数操作的思考課題の協同的解決過程におけるグループ内討論の記録

対話の特徴としては、A男とB子の発話を中心とし、C美がB子の意見に同調しながら討論が進んでいる点あげられる。また、事前と事後調査における問題1（知識想起問題）の正誤（完全正答したかどうか）と問題2（知識適用問題）の正誤（問ごとに完全正答したかどうか）の関連を調べた。その結果を Table3-6 に示す。

Table 3-6 知識想起問題と知識適用問題の正誤の関連

対象者	問題1	問題2						
		銅	食塩	エタノール	水銀	酸素	水晶	
A男	事前	×	×	×	×	×	×	×
	事後	○	○	×	×	×	○	×
B子	事前	×	×	×	○	×	×	×
	事後	×	○	○	○	○	○	○
C美	事前	×	×	×	×	×	○	×
	事後	○	×	○	○	○	○	×

A男について

この場面でA男は、食塩や砂糖はとけないということ（発話1, 3）と、とけるにしても食塩や砂糖は水にとけるもの（発話6）という既有知識を呼び出していると考えられる。一方で、状態変化ルールについては、粒子の動きの強さと物質の状態の関係について正しく指摘している（発話21）。したがって、エタノールを温めたり、ろうそくに火をつけたりすると粒子の動きが強くなり（発話24, 30）、エタノールやろうが気体や液体になると考えている（発話24, 28）。また、食塩の結晶を加熱した場合にも、粒子の動きが強くなることを指摘している（発話33）にもかかわらず、食塩が液体になることには同意せず（発話37）、気体になると主張している（発話35, 39）。

このように、A男の主張に一貫性が見られないことから分かるように、A男が呼び出した既有知識は、この場面では不適切であり、A男は状態変化ルールと適用した既有知識との間に矛盾を抱え、認知的葛藤を大きくしていると考えられる。このことからA男の中では、「粒子の動きが変化すると、物質の状態は変化する」という状態変化ルールと呼び出された既有知識がたがいに関係性のない独立した知識として構造化されていることが窺える。そして、問題の答えを得るにあたっては科学的知識と既有知識の両方を呼び出した上で、問題ごとに適用する知識を変えることで、認知的葛藤を解消させたと推察される。このことは、Table3-5 に示したように、事後調査でA男は問題1（知識想起問題）に完全正答しているにもかかわらず、問題2（知識適用問題）には完全正答せず、一貫して正答し

ている問が少ないことから分かる。

B子について

B子は、大学いもを調理した経験から砂糖を熱するととけることを知っていた(発話5)ので、食塩も同じようにとけると考えている(発話2)。ただし、これは状態変化ルールを適用している訳ではなく、砂糖に関する経験から類推した結果と考えられる。B子が粒子の動きの強さについて何度も問いかけている(発話12, 22, 29)ことから、状態変化についての知識を教示されただけでは、粒子の動きの強さと物質の状態との関係性を十分に理解できていないことが分かる。しかし、グループ活動の中で何度も問いかけた結果、B子は、砂糖を熱するととけることが状態変化ルールの範囲内で説明されることを理解し、食塩がとけて液体になるという考えに自信を深めたと思われる。

そこで、食塩がとけるかどうかについてA男との議論を試み(発話32)、A男から期待通りのことばを引き出すこと(発話33)に成功している。ここでB子は、すかさず食塩がとけて液体になることを主張する(発話34)が、A男はそれには同意しなかった。その後、砂糖を熱するととけること以外に、食塩がとけるという主張を補強できる別の事例を出せず(発話45)、A男との議論は平行線のまま終わった。

しかし、B子はA男との対話を通して、熱を加えると砂糖がとけることを状態変化ルールの一事例として組み入れたと思われる。つまり、教示された科学的知識の中に呼び出した既有知識を統合することで、状態変化ルールを一般化したと考えられるが、Table3-5に示した事後の正否パターンから「すべての物質は状態変化する」というような知識を別に構成し、砂糖がとけて液体になることをこの知識の一事例に加えた可能性も否定できない。

C美について

C美は、熱すると砂糖がとけるという経験をしていないと思われる(発話8)。また、粒子の動きの強さと物質の状態との関係性について、水のように状態変化が身近で見られる場合を除き(発話15)、状態変化についての知識を教示されただけでは、十分に理解しているとは言い難い(発話23)。その後、C美の発話はほとんど見られないが、A男とB子の対話を聞くことを通して、状態変化ルールに対する理解を深めていること(発話31)が推察され、食塩が液体を経ずには気体にならないという主張をした(発話40)と考えられる。

しかしながら、発話数が少ないため、C美がどのようなプロセスで状態変化ルールを理解したかについて、明確に述べることはできないが、Table3-5 を見る限り、状態変化ルールを正しく想起できているものの、A男と同様に問題2（知識適用問題）には完全正答していない。つまり、C美も呼び出した既有知識とは別に状態変化ルールを独立した知識として構造化していると思われ、既有知識を状態変化ルールの枠組みに統合したとは言い難い。

3.1.4 総合考察

本研究では、①中学生を対象にした状態変化に関する授業の中に、操作的思考課題として変数操作的思考課題と関係操作的思考課題の2種類の課題を設定し、その解決を含む知識検証学習モデルに基づく授業が科学的知識の想起や適用に与える効果を検討する、②操作的思考課題を協同で解決させる過程で生じた対話を分析し、学習者が科学的知識を構成する概念間の関係性を理解するプロセスを検討する、という2点を目的として行った。

上記①については、まず、事前調査から事後調査において、問題1（知識想起問題）では、両方の問について正答者数が有意に増加していた。また、問題2（知識適用問題）では、「銅は気体になるのか」のように日常生活では観察できない状態についての問で正答者数が有意に増加していた。一方、日常生活で観察できる状態についての問は、事前調査及び事後調査のどちらにおいても正答者数が多かった。このことから、変数操作的思考課題と関係操作的思考課題を解決することを通して、「粒子の動き」と「物質の状態」の共変関係を理解し、日常生活で観察可能かどうかにかかわらず、2つの概念間の関係性の理解を促され、学習者は概念間に潜在的なリンクを形成したと考えられる。そして、問題に答える場面で、概念間に形成された潜在的なリンクが顕在化し、その結果、学習者が状態変化ルールを想起することやこのルールを適用することを促進したと思われる。

また、本実践で行った学習活動には、操作的思考課題を解決するだけでなく、日常的には観察することのない食塩を溶解させる実験も含まれていた。伏見（2013）は、非日常的で一見しただけではルールが適用されないと捉えられてしまう事例を「抵触事例」と呼び、ルールの教示と教示する際に用いる事例の関係を検討している。その結果、抵触事例を用いてルールを教示すると、教示したルールが受け入れられやすくなるとする知見を得ている。授業で実験に使用した食塩は、抵触事例にあたりと考えられることから、状態変化ルールを教示する際の事例として用いた訳ではないが、本節で示唆された科学的知識の想起

や適用の促進に影響を及ぼしている可能性も否定できない。加えて、本実践では、4人グループを主とする協同的な学習活動を展開しており、このような学習形態が状態変化ルールの想起や適用を促した可能性も指摘できる。

しかしながら、状態変化ルールの適用や想起が促進されたとは言え、知識想起問題の完全正答者22人の半数しか知識適用問題には完全正答していなかった。このことから、全体の3分の1程度の学習者は状態変化ルールを正しく想起できるにもかかわらず、それを知識適用問題のすべての間に適用していないことが分かる。このとき、diSessa (1993) が知識は一貫した理論を成しているのではないと指摘しているように、これらの学習者は、状態変化ルールあるいは既有知識のどちらか一方を呼び出している訳ではなく、これらの知識をそれぞれ独立した別々の知識として呼び出していると考えられる。その結果、問題に答える段階で、学習者は状態変化ルールを適用するのか、あるいは既有知識を用いるのかという選択に迫られていると思われる。このように、授業後であっても、呼び出した既有知識と状態変化ルールとを関連づけた知識として構造化することは容易ではなく、多くの学習者が状態変化ルールを一般化した知識として獲得したとは言い難い。以上のことから、本実践における操作的思考課題の解決を含む学習活動は、状態変化ルールの適用や想起を促したが、このルールを構成する概念間にある関係性の理解（ルールを想起した上で適用できること）に対する促進的効果は限定的であったと結論づけられる。

次に上記②について、本実践における学習者の内的プロセスを推測しつつ考察する。それは概ね次のように考えられる。学習者は、変数操作的思考課題に対して、まずは、教示された科学的知識に基づく思考で解決しようとする。その一方で、学習者は状態変化に関わる知識を既に持っており、それが科学的知識に基づく思考を阻害する。その結果、学習者は教えられたことと知っていることとの間で自己矛盾を抱え、認知的に葛藤した状態に陥る。最終的に、このような認知的葛藤状態は、高垣・中島 (2004) が個人内の知識の変化について明らかにしているように、①日常生活の経験を通して獲得された知識に固執することで、ルールに含まれる情報と既有知識をそれぞれ独立した知識として構造化する(既有知識固執タイプ)、②既有知識の枠組みに合うような形で、科学的知識を解釈することで、既有知識の範囲内でルールを構成する知識を説明する(科学的知識のこじつけ的な取り込まれタイプ)、③科学的知識を枠組みとして既有知識を統合することで、科学的知識の範囲内で既有知識を説明する(科学的知識獲得タイプ)、のいずれかの様式で解消されると思われる。この枠組みでA男、B子、C美の発話を捉えてみる。A男は、食塩を加熱すると粒

子の動きが強くなることを正しく指摘しているが、食塩が液体になることには同意していないことから、既有知識固執タイプと考えられる。B子は、粒子の動きの強さについて何度も問いかけることを通して、科学的知識の範囲内で既有知識が説明されることを理解していることから科学的知識獲得タイプと思われる。そして、C美については明確に述べることはできないが、Table3-5 で示した事後調査の結果から、A男ほどの固執は見られないが、既有知識固執タイプと推察される。

では、なぜ、協同的に同じ課題に取り組んだにもかかわらず、個人内の知識の変化に、A男（あるいはC美）とB子の間に見られるような違いが生じたのであろうか。その1つの要因として、変数操作的思考課題の解決場面で、それぞれが質的に異なる既有知識を呼び出していることが考えられる。例えば、B子の呼び出した既有知識は、「熱すると砂糖はとける」だったのに対し、A男では、「食塩は水にとける」であった。つまり、B子の呼び出した既有知識は、状態変化ルールの一事例で問題に答えることを手助けする知識であるのに対し、A男の呼び出した既有知識は、知識そのものに誤りはないが、この場面で問題の答えを得るために用いるには不適當であった。

その結果、B子の認知的葛藤は呼び出した既有知識を科学的知識の枠組みの中に対話を通して統合することで解消されたと思われる。一方、A男の認知的葛藤は教示された知識を呼び出した既有知識とは異なる独立した知識として構造化することで解消されたと考えられる。これらのことは、麻柄（1996）が「仮にその情報が正しく取り入れられたとしても、その情報が既有知識と相互作用を持ち得ず、それだけで孤立した知識を構成してしまう」と指摘しているように、B子の場合には、呼び出した既有知識が状態変化ルールの一事例であったので、意図せず科学的知識と既有知識の相互作用が十分になされ、呼び出した既有知識を科学的知識の枠組みの中に統合できたが、A男の場合には、問題に答えるには不適當な既有知識を呼び出していたために、科学的知識との相互作用が不十分なまま打ち切られてしまい、状態変化ルールと既有知識をたがいに独立した知識として構造化したと思われる。

上述の対話分析による検討から示唆されたように、学習者の呼び出した既有知識と状態変化ルールが十分に相互作用した場合に、既有知識を状態変化ルールの枠組みに統合することが促進されていた。つまり、既有知識を科学的知識の枠組みに統合するには、当該の知識を構成する概念間の関係性を理解するだけでは不十分であり、科学的知識と既有知識の相互作用を生起させることも必要であると考えられる。したがって、既有知識を科学的

知識の枠組みに統合させるには、科学的知識と既有知識との相互作用を学習者任せにするのではなく、積極的に科学的知識と既有知識との相互作用を促す教授学習活動をデザインすることが重要であると考えられる。

また、本研究では、対話における各学習者の発話をもとに、学習者が科学的知識を構成する概念間の関係性を理解するプロセスを明らかにすることを試みたが、今回、分析対象としたグループは異なった個性や能力を持った学習者の集団と言え、多様な学習者が集まった教室で起こり得る学習プロセスの一端を表していると思われるものの、さらに詳細な分析を進めるためにも、多くの事例を蓄積する必要があると考えられる。

3.2 まとめ

以上、本章では、中学校理科においてLVKモデルに基づく状態変化の学習に関する授業を行い、この授業が科学的知識の想起と適用に与える効果と当該の知識を構成する概念間の関係性を理解するプロセスについて検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 事前調査から事後調査にかけて、問題1（知識想起問題）や問題2（知識適用問題）の正答者数が増加していることから、LVKモデルに基づく授業は、「粒子の動き」と「物質の状態」との関係性について、学習者の適切な理解を促すことが示唆された。
- (2) プロトコル分析から、科学的知識と既有知識の相互作用が十分になされた場合に、既有知識が科学的知識の枠組みに統合され、それが不十分な場合には、科学的知識と既有知識がたがいに独立した知識として構造化されることが示唆された。

しかしながら、知識想起問題に正答しているにもかかわらず、知識適用問題のすべての間に正答している者は多いと言うことはできなかった。その原因として、次の2つのことが考えられた。1つめは、知識適用問題において、学習者が想起した科学的知識を必ずしも適用するとは限らないということである。つまり、学習者は知識適用問題の間ごとに、科学的知識を適用したり、既有知識を適用したりすると考えられる。

2つめは、学習者が想起した科学的知識を知識適用問題に適用しているものの、与えられた情報に基づいた論理操作の帰結を受容できないことである。この場合、学習者は前提と情報を正しく認識しているが、論理操作の帰結と既有知識の間に認知的葛藤が生起し、論理操作による帰結を選択できなかったと考えられる。何れにしても、科学的知識を想起できた学習者の論理操作が既有知識による抑制的作用を受けたと言えよう。

これらのことから、科学的知識を効果的に獲得させるには、学習者の操作的思考を促すとともに、科学的知識と既有知識の相互作用を学習活動の中に組み込む必要があると考えられた。次章では、LVKモデルを見直し、科学的知識と既有知識の相互作用を生起させるプロセスを組み込んだ学習モデルを検討する。また、その学習モデルに基づく授業実践を行い、当該の授業が科学的知識の想起と適用に与える効果に焦点化して、分析を進めることとする。

4 修正版知識検証学習モデルによる授業の効果

3章の結果は、学習者の操作的思考を促すだけでなく、科学的知識と既有知識の相互作用を生起させることで、科学的知識の獲得が促進されることを示唆していた。

そこで、本章では、学習者がより効果的に科学的知識を獲得することを目的として、2章で提案した知識検証学習モデル(LVKモデル)に修正を加えたモデルを示す。その上で、修正されたモデルに基づく学習活動が科学的知識の想起や適用に及ぼす効果と、学習者が科学的知識を獲得するプロセスについて検討する。

4.1 科学的知識と既有知識の相互作用

科学的知識と既有知識の相互作用を生起させる学習モデルを検討するにあたって、麻柄(1999)の「二重推想法」と呼ばれる教授モデルを参考とした。二重推想法の具体的な手続きをTable4-1に示す。

Table 4-1 二重推想法の手続き (麻柄, 1999)

- | |
|--------------------|
| 1. 課題解決に必要な手がかりの学習 |
| 2. 課題の提示 |
| 3. 直感に基づく予想 |
| 4. 手がかりに基づく予想 |
| 5. 実験や観察 |

従来の学習モデルによる教授法では、既有知識では現象や事実をうまく説明できないという認知的葛藤を生起させる(Hewson & Hewson, 1984; Hashweh, 1986; 進藤, 1995)ことが、科学的知識の枠組みに既有知識を統合する条件とされている。しかしながら、生起させた認知的葛藤が過大であると、学習者は現象や事実を受け入れることを拒否したり、別の理由づけをすることで既有知識を科学的知識との矛盾から守ろうとしたりすることが指摘されている(Chinn & Brewer, 1993)。

一方、二重推想法では、課題解決に必要な手がかりの学習の段階で、科学的知識が学習者の知識構造の中に準備される。そして、提示する課題に対して、次のように質問の仕方を変えることで、学習者から複数の解答を引き出している。それは、直感に基づく予想の段階の「直感で答えるとどうなるか」と、手がかりに基づく予想の段階の「先に学習した手がかりに基づいて答えるとどうなるか」である。このように、課題に対する質問の仕方

を変化させることで、学習者が課題解決に適用する知識を、意図的に変化させているのである。

つまり、直感に基づく予想の段階では既有知識に基づく予想がなされ、手がかりに基づく予想の段階では科学的知識に基づく予想がなされるのである。そして、これらの段階で既有知識と科学的知識の相互作用が生起し、学習者が認知的葛藤を持つと想定されている。

しかし、課題解決に必要な手がかりの学習を通して、あらかじめ課題解決に必要な科学的知識が学習者の知識構造の中に準備されていることから、学習者の認知的葛藤は解消されやすい状況にある。このような状況に学習者を導くことで、学習者は既有知識と科学的知識をたがいに関係づけながら、実験や観察の結果を受け入れ、認知的葛藤が解消するとされる。その結果、科学的知識に既有知識が紐づけられた知識として構成され、学習者の誤った知識が修正されると考えられている。このように、二重推想法は学習者に適度な水準の認知的葛藤を生起させる教授モデルと言える。

では、二重推想法の手続きを教授学習場面に導入しさえすれば、科学的知識と既有知識の相互作用が生起し、そしてそれが活性化するのであろうか。二重推想法では、課題解決に必要な手がかりの学習（先行学習）を行ってから、課題に対して「直感で答えるとどうなるか」と質問することで、学習者に既有知識を認識させようと試みている。

しかしながら、この時点で、既に先行学習がなされているので、「直感で答えるとどうなるか」と質問されたところで、学習者によっては、既に先行学習の手がかり（科学的知識）に注意が向いていることも予想される。もし、このような状況が生じるとすれば、「直感で答える」という行為そのものが、既有知識に基づいた思考なのか、科学的知識に基づく思考なのか判然としない。

実際、筆者が Figure4-1 に示すような図を示して、「どちらの密度が大きいと思うか」と質問したところ、「物質の密度は、物質 1cm^3 あたりの質量である」という先行学習を行ったクラスでは、「直感的に答えるとどうなるか」と教示したところで「わからない」という

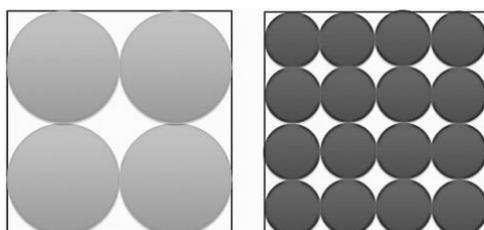


Figure 4-1 同じ大きさの塊の中にある原子のモデル

答えがなされた。一方、先行学習を行っていないクラスでは「右の図」という答えであった。

物質の密度を考えるときに、先行学習を行ったクラスでは原子の質量が焦点化され、先行学習を行っていないクラスでは原子の数が焦点化されているのである。つまり、先行学習は学習者の既有知識にも作用し、課題に対して「直感で答えるとうなるか」と問うたところで、既有知識を引き出せない可能性があると言える。このような状況では、科学的知識と既有知識との相互作用は抑制されると考えられる。

以上のことを踏まえ、修正した知識検証学習モデルを Figure4-2 に示す。学習過程の「知識の受取」(先行学習)の前に「結果の予想」を位置づける。こうすることで、先行学習によって、学習者が既有知識を引き出せなくなる事態を回避できると考えられる。つまり、麻柄(1999)のいう「直感(既有知識)」を学習者がより出しやすい状況であり、学習者の既有知識がより活性化するとと言える。

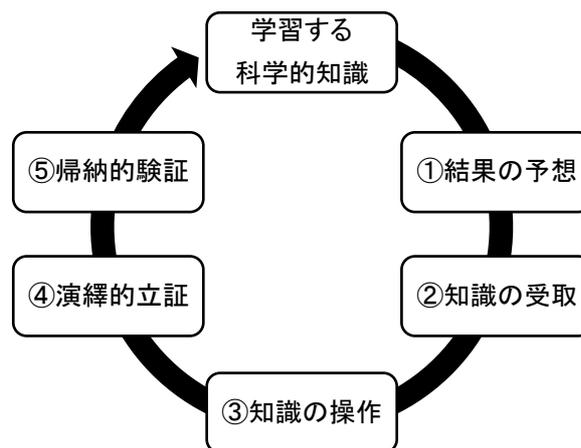


Figure 4-2 修正版知識検証学習モデル(M-LVK モデル)

また、二重推想法における先行学習は、誤った知識を修正することをねらいにしている。したがって、その性格上、先行学習は科学的知識に基づいて行われていることになる。しかし、二重推想法のように、先行学習を手続きの最初に位置づけると、この時点では、学習者の意識は既有知識に向いておらず、この間、学習者は既有知識と科学的知識を十分な相互作用を生起させられない。

それに対して、修正版知識検証学習モデル (Modified-Learning through Verification of Knowledge Model, 以下「M-LVK モデル」と記す) では、学習者の意識が既有知識に向いた状態で、課題解決に必要な知識の受取が行われるので、学習者は、この間も絶えず、既

有知識と科学的知識の相互作用を生起させることが可能になる。つまり、この学習モデルに基づく授業を行えば、科学的知識と既有知識の相互作用がより活性化すると考えられる。したがって、この手続きに基づく授業は、科学的知識が独立した知識となることを妨げるため、既有知識を科学的知識の枠組みに統合させるためのより効果的な方法であると考えられる。

4.2 科学的知識と既有知識を意図的に相互作用させる学習活動の効果

4.2.1 問題と目的

前節を踏まえ、M-LVK モデルに基づく中学校理科の金属の学習に関する授業を行い、この授業が科学的知識の想起と適用に与える効果と、学習者が当該の知識を獲得するプロセスの検討を行う。

具体的には、Table4-2 に示すような学習過程を通して、「金属は電気を通す」、「金属は光沢を持つ」、「金属は熱を伝える」、「金属はたたくと薄く広がる」という金属に関する科学的知識（金属ルール）を一般化することを目指した。

Table 4-2 学習過程の概要

学習過程	具体的な学習活動
1. 結果の予想	・どのような物が電気を通すかについて仮説を立て、それを根拠に水銀、ナトリウム、マグネシウム、カルシウムが電気を通すかどうかを予想する。
2. 知識の受取	・「ピカピカ光るものは、電気を通す」という知識について説明を受ける。
3. 知識の操作	・知識の操作を要するいくつかの事例に関する課題を行い、その事例について教示された知識があてはまるか確認する。
4. 演繹的立証	・教示された知識に基づいて、上記の4種類の物質が電気を通すかどうかを予想し直す。
5. 帰納的検証	・上記の物質が電気を通すことを確かめる実験を行う。
6. 知識の再操作	・教示された知識以外に、「ピカピカ光るもの」に続く属性やカテゴリーを考える。

教示した知識を正しく学習者の認知構造に取り込ませるために、「ピカピカ光るものは電気を通す」という知識を教示した上で、Figure4-3 に示した前件の値を空欄にした操作的思考課題を行わせた（3. 知識の操作）。このことにより、「ピカピカ光るもの」と「電気を通すもの」の対応関係の経験を積むことで、麻柄（2006）が指摘している「例外への懸念」や佐藤（2008）が明らかにしている「判断の不確定性」など、科学的知識の適用を阻害する要因を低減させることができると考えられる。

ア) 割りばしは、(ピカピカ光る・ピカピカ光らない)ので、電気を(よく通す・通さない)だろう。 イ) アルミホイルは、(ピカピカ光る・ピカピカ光らない)ので、電気を(よく通す・通さない)だろう。 ウ) 500 円玉は、()ので、電気を(よく通す・通さない)だろう。 エ) アラザンは、()ので、電気を(よく通す・通さない)だろう。 オ) 金色の折り紙は、()ので、電気を(よく通す・通さない)だろう。

Figure 4-3 操作的思考課題

また、教示した知識は、「金属は電気を通す」と「金属は光沢を持つ」という2つの金属ルールを関係づけた知識であり、光沢を持っていても電気を通さない物質（例えば、アル

ミナなど)が存在するので、科学的知識としては十分とは言えない。したがって、「金属は電気を通す」を教示し、それに即して学習者の操作的思考を促すことも考えられる。しかしながら、工藤(2010b)は、「金属は電気を通す」などカテゴリーの包含関係を表す知識を教示するよりも、「ピカピカ光るものは、電気を通す」のような属性の連合関係を示す命題を教示した場合に、学習者が操作的思考を行える可能性が高まることを示唆している。つまり、この命題に即した操作的思考課題を学習活動に導入することで、学習者の操作的思考はより促されると考えられる。

前節で述べた通り、麻柄(1999)は、実験結果や事実を説明し得る理由が学習者の知識構造の中にあらかじめ準備されていれば、実験結果や事実が予想と異なった場合に、学習者はそれを納得して受け入れ、誤った知識が修正される可能性が高まるとしている。

具体的には、ナトリウム、マグネシウム、水銀、カルシウム(実験金属事例群)の実物を観察させ、どのような物質が電気を通すのかという学習前の考えに基づき電気を通すかどうかを予想させる(1. 結果の予想)。そして、「ピカピカ光るものは、電気を通す」を教示した後に、実験金属事例群が電気を通すかどうかを予想し直させる(4. 演繹的立証)。

このような手続きを授業に導入することで、既有知識と科学的知識の相互作用が促され、科学的知識のみが独立した知識として構造化されることを妨げ(麻柄, 1996)、科学的知識を枠組みとして既有知識を統合することが可能になると考えられる(高垣・中島, 2004)。

これらのことを踏まえ、本研究では、操作的思考を促すプロセスや科学的知識と既有知識の相互作用を生起させるプロセスを導入した M-LVK モデルに基づく授業を行い、①当該の授業が科学的知識の想起や適用に与える効果を知識想起問題や適用問題の正答者数、②学習者が当該の知識を獲得するプロセスを授業で生起した発話に注目して検討することを目的とする。

4.2.2 方法

a 分析対象者

後述する3つのセッションに参加したA中学校とB中学校の1年生それぞれ32名が分析対象者である。

b 手続き

分析対象者に事前調査を実施し、A中学校とB中学校で金属に関する理科の授業を2単

位時間行った。その際、A中学校の授業でのみ介入実践を行った。その後、事後調査を実施した。ただし、事前調査及び事後調査の開始前に、調査に参加しないことも認められることや調査の内容を個人の成績に反映しないこと、調査で得られたデータは匿名化されることを説明した。

c セッションの内容

(1) 事前調査

事前調査は、銅、鉄、アルミニウム、ナトリウム、カリウム、マグネシウム、カルシウムについての簡単な説明文を読んでもらった。ただし、小学校3年生で「金属は電気を通す」ことを学習しているので、説明文中に当該物質が金属であることを明示した。そして、電気を通すと思えば「○」印、通さないと思えば「×」印をつけてもらった。また、そのように考えた理由を記述してもらい、学習済みの「金属は電気を通す」という科学的知識を適用して答えたかどうかを判断する基準とした。事前調査の概要を Figure4-4 に示す。

導線が電気をよく通すことは知っていると思います。導線は、金属を材料にしてつくられています。次のア～キの物質はすべて金属です。それぞれの金属に関する説明をよく読んで、導線に使われている金属のように、電気をよく通すと思う金属には「○」印、電気を通さないと思う金属には「×」印をつけてください。また、「○」や「×」にした理由もかいてください。

- ア) 銅 少なくとも1万年前から使用されている金属で、青銅器などに利用されてきました。ちなみに、10 円玉は銅でできています。
- イ) 鉄 日本では弥生時代から使われるようになった金属で、鉄器や刀などに加工して利用されてきました。現在でも、鉄骨や鉄筋などの建材として利用されています。
- ウ) アルミニウム 19 世紀になってから使われるようになった金属です。とても軽量で、また加工しやすいので、新幹線などの車体の材料として使われています。
- エ) ナトリウム 反応性の高い金属で、自然界では食塩などの化合物として存在しています。また、人体にも多く含まれ、神経のはたらきと関係しています。
- オ) カリウム 人体に不可欠な金属で、神経のはたらきに重要な役割を果たしています。また、植物にとっても重要な栄養素の一つで、肥料などにも多く含まれています。
- カ) マグネシウム 二酸化炭素を出さずによく燃える金属で、石油に代わる次世代のエネルギーとして注目されています。また、ワカメやヒジキなどの食品にも多く含まれています。
- キ) カルシウム 人体に最も多く含まれている金属で、主に骨や歯の材料になっています。カルシウムは、牛乳や小魚などの食品に多く含まれています。

Figure 4-4 事前調査問題

(2) 授業の概要

A 中学校における実践

A 中学校の実践では Table4-2 に示した通り、まず、鉄や 10 円硬貨、氷砂糖などを提示し、電気を通すものと通さないものがあることを確認させた。その上で、どのようなもの

が電気を通すのかを考えさせたところ、28人(87.5%)の学習者が「金属は電気を通す」というような記述をしていた。そして、この記述を根拠に実験金属事例群の物質が電気を通すかどうかを予想させたが、すべての物質について電気を通すと考えた者は11人(34.4%)に留まった(1. 結果の予想)。

次に、「ピカピカ光るものは、電気を通す」という命題を教示した(2. 知識の受取)。そして、明らかに光沢がなく電気を通さなさそうな事例や光沢があり電気を通しそうな事例、光沢はあるが電気を通すか疑わしい事例を提示し、操作的思考課題(Figure4-3 参照)を行わせた。その結果、割り箸やアルミホイル、500円硬貨では、すべての学習者が教示された命題に基づいて解答していたが、アラザンや金色の折り紙では、この命題を適用した者がそれぞれ12人(37.5%)と9人(28.1%)に留まった。その上で、物質を電極に触れさせると光と音で、電気を通したことが確かめられる「ピカ・ブー・テスター」と呼ばれる道具を用いて、それぞれの事例が電気を通すかどうかを確認した。そして、電気を通したアルミホイルや500円硬貨は金属でできていること、アラザンは表面が銀でコーティングされていること、金色の折り紙は、紙にアルミニウム箔が貼ってあり、オレンジ色のセロハンで覆っていることをそれぞれ説明した(3. 知識の操作)。

その後、実験金属事例群の実物を示し、これらの物質が電気を通すかどうかについて改めて予想し直させた。この段階では、すべての物質について電気を通すと予想した者は31人(96.9%)であった(4. 演繹的立証)。そして、「ピカ・ブー・テスター」で、実験金属事例群が電気を通すことを確かめさせた(5. 帰納的検証)。

ここまでは、金属が光沢を持つことと電気を通すことを中心にした学習活動であったので、「金属」と「電気を通す」や「光沢を持つ」、「熱を伝える」、「たたくと薄く広がる」などの概念間の関係性を明確にするために、金属に共通する性質(金属ルール)を教示した上で、「ピカピカ光るものは、熱を伝える」などの命題を新たに作り出す活動を行わせた。このように、いくつかの知識を組み合わせ、新たな知識を作り出すための思考も知識に関わる論理変換操作を含んでいるが、作り出された知識は必ずしも科学的には正しいとは言えない。しかしながら、工藤(2010a)は、操作的思考により判断に誤りが生じる可能性があることを認めた上で、その判断の検証過程を通じて、学習される科学的知識がより精密になることを指摘している。したがって、上述のような活動を通して学習者の操作的思考を促すことで、例えば、「ピカピカ光るものは、熱を伝える」ことを検証する過程で、「ピカピカ光るもの」と「熱を伝えるもの」は「金属」を媒介として関連づけられていること

を、学習者が理解すると期待される。つまり、「金属はピカピカ光る」や「金属は熱を伝える」などについて学習者の理解が促されると考えられる（6. 知識の再操作）。

このように本実践では、科学的知識の操作の過程を経て、「ピカピカ光るものは、電気を通す」という命題を用いて予想するようになった学習者が多くなった。また、「金属は電気を通す」と記述しているにもかかわらず実験金属事例群が電気を通すことを正しく予想できなかったり、操作的思考課題の解決過程で、「ピカピカ光るものは、電気を通す」という命題を適用した者が少なかったアラザンや金色の折り紙の間では、「ピカピカ光っているがチョコレートなので電気を通さない」や「ピカピカ光っているが紙なので電気を通さない」のような記述が多く見られたりした。これらのことから、本実践において操作的思考を促すプロセスや既有知識と科学的知識の相互作用を生起させるプロセスが効果的に機能していることが窺える。

B 中学校における実践

介入を行わなかった実践では、どのような金属を知っているのか尋ねたところ鉄やアルミニウム、金などの物質が金属の事例として出てきた。また、これらの金属に共通する性質について質問すると、電気を通すことや磁石につくこと、重たいこと、光沢があることを学習者は想起していた。次に、金属に共通する性質を調べさせた上で、錆びていない鉄を提示し、4つの金属ルールを教示した。その後、周期表から金属が何種類あるのかを読み取らせ、これらの金属も鉄と同じように4つの性質を持っていることを説明した。最後に、実験金属事例群を観察させ、「ピカ・ブー・テスター」で電気を通すことを確認した上で、これらの物質も金属であることを教示した。

(3) 事後調査

問題1（知識想起問題）

問題1（知識想起問題）を Figure4-5 に示す。この問題は、パラジウムについて金属であるという情報を与えた上で、パラジウムが金属として持つと考えられる性質を記述するこ

パラジウムという金属があります。天然に存在する量は少なく、いわゆるレアメタルですが、金属単体もしくは合金として、1つの鉱石に含まれて産出します。さて、このパラジウムという金属は、金属としてどのような性質を持っていると考えられますか。あなたが予想できる性質を、箇条書きで記入してください。

Figure 4-5 問題1（知識想起問題）

とを求めている。つまり、一般的に金属と知られていない事例に、「金属である」という情報を与えれば、金属に共通する性質を想起し、それを記述できるかを問う問題であるので、これを知識想起問題と位置づけた。

問題2 (知識適用問題)

問題2 (知識適用問題) を Figure4-6 に示す。この問題は、すべての物質が金属であると明示した上で、銅、鉄、アルミニウム、金、ナトリウム、カリウム、リチウム、マグネシウム、水銀、カルシウムについて、①電気を通す、②熱を伝える、③光沢を持つ、④たとくと薄く広がる、という4つの項目がそれぞれそうであると思えば「○」印、そうでないと思えば「×」印をつけることを求めている。つまり、金属と明示された10種類の物質に金属ルールを適用できれば正しく答えられるので、この問題を知識適用問題と位置づけた。

次の物質はすべて金属です。それぞれの金属が示す性質(①よく電気を通す、②よく熱を伝える、③ピカピカ光る、④たとくと薄く広がる)はどれでしょう。金属名のあとにかいてある①～④の()の中に、その金属が示すと思う性質には「○」、示さないと思う性質には「×」と書いてください。				
銅	①()	②()	③()	④()
鉄	①()	②()	③()	④()
アルミニウム	①()	②()	③()	④()
金	①()	②()	③()	④()
ナトリウム	①()	②()	③()	④()
カリウム	①()	②()	③()	④()
リチウム	①()	②()	③()	④()
マグネシウム	①()	②()	③()	④()
水銀	①()	②()	③()	④()
カルシウム	①()	②()	③()	④()

Figure 4-6 問題2(知識適用問題)

4.2.3 結果と考察

A中学校では操作的思考を促すプロセスや既有知識と科学的知識の相互作用を生起させるプロセスを導入した授業を実践した。一方、B中学校の授業にはそのようなプロセスを導入しなかった。その意味で、A中学校の学習者集団を実験群、B中学校の学習者集団を対照群と呼んで区別する。

a 事前調査

事前調査の各問について、群ごとに電気を通すと判断した人数とその根拠を正しく記述

できた人数の関連を調べた。その結果を Table4-3 に示す。電気を通すと判断された物質は、実験群で鉄が 26 人 (81.3%) と最も多く、カルシウムが 14 人 (43.8%) と最も少なかった。一方、対照群では鉄が 25 人 (78.1%) と最も多く、カリウムとカルシウムが 5 人 (15.6%) と最も少なかった。正しく判断した人数とそうでない人数について、問ごとに χ^2 検定を行ったところ、カリウムとカルシウムの間で分布の偏りが有意であった(カリウム: $\chi^2(1)=5.89, p<.05$; カルシウム:同上, $4.79, p<.05$)。残差分析によると、両方の間において実験群で正しく判断できた者が多かった(カリウム:調整された残差=2.70, $p<.01$; カルシウム:同上, 2.46, $p<.05$)。このことから、実験群の学習者の既有知識は、対照群の学習者のそれに比べ質的に高いことが窺える。

Table 4-3 通電性の判断と根拠の関連(人)

問	判断	根拠			
		実験群		対照群	
		正	誤	正	誤
Cu	正	3 (9.4%)	16 (50.0%)	2 (6.3%)	14 (43.8%)
	誤	0 (0%)	13 (40.6%)	0 (0%)	16 (50.0%)
Fe	正	2 (6.3%)	24 (75.0%)	3 (9.4%)	22 (68.8%)
	誤	0 (0%)	6 (18.8%)	0 (0%)	7 (21.9%)
Al	正	2 (6.3%)	19 (59.4%)	0 (0%)	19 (59.4%)
	誤	0 (0%)	11 (34.4%)	0 (0%)	13 (40.6%)
Na	正	1 (3.1%)	18 (56.3%)	1 (3.1%)	12 (37.5%)
	誤	0 (0%)	13 (40.6%)	0 (0%)	19 (59.4%)
K	正	1 (3.1%)	14 (43.8%)	1 (3.1%)	4 (12.5%)
	誤	0 (0%)	17 (53.1%)	0 (0%)	27 (84.4%)
Mg	正	2 (6.3%)	16 (50.0%)	2 (6.3%)	12 (37.5%)
	誤	0 (0%)	14 (43.8%)	0 (0%)	18 (56.3%)
Ca	正	2 (6.3%)	12 (37.5%)	1 (3.1%)	4 (12.5%)
	誤	0 (0%)	18 (56.3%)	0 (0%)	27 (84.4%)

しかしながら、小学3年生で金属が電気を通すことを学習しているにもかかわらず、電気を通すと判断した根拠を「金属である」と記述できている者は両群ともに極めて少ない。つまり、物質が電気を通すかどうかを判断するときには、それが「金属である」という情報はほとんど用いられておらず、学習者は問題文に記された「金属である」以外の情報を適用したり、電気を通す事例として認識している物質については、例えば「鉄は電気を通す」のような一事例にしか適用できない知識を用いたりして、各物質が電気を通すかどうかを判断していると考えられる。この点については、群間に差はないと言えよう。

b 事後調査

問題 1 (知識想起問題)

パラジウムが持つと予想される金属としての性質を記述できていれば正答とし、項目ごとの正答者数を調べた。その結果を Table4-4 に示す。

Table 4-4 知識想起問題の正答者数(人)

項目	実験群		対照群	
	正	誤	正	誤
①電気を通す	23 (71.9%)	9 (28.1%)	25 (78.1%)	7 (21.9%)
②熱を伝える	22 (68.8%)	10 (31.3%)	19 (59.4%)	13 (40.6%)
③光沢がある	20 (62.5%)	12 (37.5%)	28 (87.5%)	4 (12.5%)
④たたくと薄く広がる	20 (62.5%)	12 (37.5%)	23 (71.9%)	9 (28.1%)

各項目について χ^2 検定を行ったところ、項目③で人数の分布に有意な偏りがあった ($\chi^2(1)=4.08, p<.05$)。残差分析によると、対照群で「光沢がある」と記述した者が多かった (調整された残差=2.31, $p<.05$)。これは、金属ルールの教示方法が、対照群と実験群で異なっていたことと関係していると考えられる。対照群では、学習者が金属の1つと捉えやすい錆びていない鉄を事例 (非接触事例) に金属ルールの教示をした。伏見 (1995) は、共通特徴の想起再生に対しては、非接触事例を焦点事例として用いる方が効果的であると指摘している。つまり、対照群において、非接触事例を用いて金属ルールを教示したことが科学的知識 (金属は光沢を持つ) の想起に有効に働いたと思われる。

問題 2 (知識適用問題)

各問について正答者数を調べた。その結果を Table4-5 に示す。問ごとに χ^2 検定を行ったところ、アルミニウム - ③, 金 - ①, ナトリウム - ①, ③, ④, カリウム - ①, ③, リチウム - ①, ③, マグネシウム - ①, ③, 水銀 - ①, ②, ③, カルシウム - ①, ③, ④で人数の偏りが有意であった。残差分析によると、上述のすべての間で実験群の正答者数が有意に多かった (調整された残差 $>2.04, ps<.05$)。以上のことから、実験群では、「金属は電気を通す」などの金属ルールの適用が促進されたと考えられる。しかしながら、正答者数が少ない間もあることから、学習者が4つの金属ルールを同様に使用していないことに留意する必要がある。

一方、対照群では、金やナトリウム、カリウム、リチウム、マグネシウム、水銀、カルシウムの各問で学習後も正答者数が少ないことから、対照群の学習者は、依然として「鉄

は電気を通す」などの一事例にしか適用されない知識を用いていると思われる。つまり、カルシウムやカリウムなどの物質について、電気を通すことを知らない学習者は、「カルシ

Table 4-5 知識適用問題の正答者数(人)

問	①電気を通す				②熱を通す			
	実験群		対照群		実験群		対照群	
	正	誤	正	誤	正	誤	正	誤
Cu	31(96.9%)	1(3.1%)	27(84.4%)	5(15.6%)	30(93.8%)	2(6.3%)	26(81.3%)	6(18.8%)
	$\chi^2(1)=1.66$				$\chi^2(1)=1.29$			
Fe	32(100%)	0(0.0%)	30(93.8%)	2(6.3%)	31(96.9%)	1(3.1%)	31(96.9%)	1(3.1%)
	$\chi^2(1)=0.52$				$\chi^2(1)=0.52$			
Al	31(96.9%)	1(3.1%)	25(78.1%)	7(21.9%)	25(78.1%)	7(21.9%)	23(71.9%)	9(28.1%)
	$\chi^2(1)=3.57$				$\chi^2(1)=0.33$			
Au	32(100%)	0(0.0%)	26(81.3%)	6(18.8%)	30(93.8%)	2(6.3%)	28(87.5%)	4(12.5%)
	$\chi^2(1)=4.60^*$				$\chi^2(1)=0.18$			
Na	31(96.9%)	1(3.1%)	19(59.4%)	13(40.6%)	24(75.0%)	8(25.0%)	18(56.3%)	14(43.8%)
	$\chi^2(1)=11.06^{**}$				$\chi^2(1)=2.49$			
K	31(96.9%)	1(3.1%)	13(40.6%)	19(59.4%)	23(71.9%)	9(28.1%)	20(62.5%)	12(37.5%)
	$\chi^2(1)=21.02^{**}$				$\chi^2(1)=0.64$			
Li	28(87.5%)	4(12.5%)	18(56.3%)	14(43.8%)	23(71.9%)	9(28.1%)	18(56.3%)	14(43.8%)
	$\chi^2(1)=6.26^*$				$\chi^2(1)=1.70$			
Mg	31(96.9%)	1(3.1%)	20(62.5%)	12(37.5%)	27(84.4%)	5(15.6%)	20(62.5%)	12(37.5%)
	$\chi^2(1)=9.65^{**}$				$\chi^2(1)=2.88$			
Hg	32(100%)	0(0.0%)	21(65.6%)	11(34.4%)	27(84.4%)	5(15.6%)	16(50.0%)	16(50.0%)
	$\chi^2(1)=10.98^{**}$				$\chi^2(1)=7.09^{**}$			
Ca	31(96.9%)	1(3.1%)	16(50.0%)	16(50.0%)	24(75.0%)	8(25.0%)	20(62.5%)	12(37.5%)
	$\chi^2(1)=15.70^{**}$				$\chi^2(1)=1.16$			

問	③ピカピカ光る				④薄く広がる			
	実験群		対照群		実験群		対照群	
	正	誤	正	誤	正	誤	正	誤
Cu	30(93.8%)	2(6.3%)	28(87.5%)	4(12.5%)	31(96.9%)	1(3.1%)	27(84.4%)	5(15.6%)
	$\chi^2(1)=0.18$				$\chi^2(1)=1.66$			
Fe	32(100%)	0(0.0%)	30(93.8%)	2(6.3%)	30(93.8%)	2(6.3%)	31(96.9%)	1(3.1%)
	$\chi^2(1)=0.52$				$\chi^2(1)=0.00$			
Al	32(100%)	0(0.0%)	20(62.5%)	12(37.5%)	25(78.1%)	7(21.9%)	28(87.5%)	4(12.5%)
	$\chi^2(1)=12.41^{**}$				$\chi^2(1)=0.44$			
Au	32(100%)	0(0.0%)	32(100%)	0(0.0%)	32(100%)	0(0.0%)	27(84.4%)	5(15.6%)
	-				$\chi^2(1)=3.47$			
Na	28(87.5%)	4(12.5%)	13(40.6%)	19(59.4%)	23(71.9%)	9(28.1%)	15(46.9%)	17(53.1%)
	$\chi^2(1)=13.30^{**}$				$\chi^2(1)=4.15^*$			
K	27(84.4%)	5(15.6%)	9(28.1%)	23(71.9%)	19(59.4%)	13(40.6%)	15(46.9%)	17(53.1%)
	$\chi^2(1)=18.35^{**}$				$\chi^2(1)=1.00$			
Li	25(78.1%)	7(21.9%)	17(53.1%)	15(46.9%)	20(62.5%)	12(37.5%)	19(59.4%)	13(40.6%)
	$\chi^2(1)=4.43^*$				$\chi^2(1)=0.07$			
Mg	31(96.9%)	1(3.1%)	14(43.8%)	18(56.3%)	22(68.8%)	10(31.3%)	18(56.3%)	14(43.8%)
	$\chi^2(1)=19.16^{**}$				$\chi^2(1)=1.07$			
Hg	32(100%)	0(0.0%)	13(40.6%)	19(59.4%)	17(53.1%)	15(46.9%)	15(46.9%)	17(53.1%)
	$\chi^2(1)=24.25^{**}$				$\chi^2(1)=0.25$			
Ca	30(93.8%)	2(6.3%)	8(25.0%)	24(75.0%)	24(75.0%)	8(25.0%)	12(37.5%)	20(62.5%)
	$\chi^2(1)=28.57^{**}$				$\chi^2(1)=9.14^{**}$			

** $p<.01$ * $p<.05$

ウムは電気を通す」などの各問に対応した知識を持ち得ないので、これらの物質が電気を通すと判断できなかつたと考えられる。なお、実験群と対照群で正答者数に差の認められなかつた問では、対照群の学習者の多くが、「銅は電気を通す」のようにそれぞれの問には対応しているものの、その問にしか適用されない知識を持っていたと思われる。

科学的知識の想起と適用の関連

科学的知識を想起できた者と科学的知識を適用できた者の関連を調べた。ただし、例えば、「金属は電気を通す」という命題を10種類の金属すべてに適用できた者を、この科学的知識を適用できた者とした。「金属は熱を伝える」、「金属は光沢を持つ」、「金属はたたくと薄く広がる」も同様である。各項目における科学的知識を想起できたかどうかと科学的知識を適用できたかどうかについてクロス集計を行った。その結果をTable4-6に示す。

項目ごとに χ^2 検定を行ったところ、すべての項目で人数の偏りが有意であった(項目①:

Table 4-6 科学的知識の想起と適用との関連(人)

項目	想起	適用			
		実験群		対照群	
		○	×	○	×
①電気を通す	○	19 (59.4%)	4 (12.5%)	4 (12.5%)	21 (65.6%)
	×	8 (25.0%)	1 (3.1%)	0 (0%)	7 (21.9%)
②熱を伝える	○	16 (50.0%)	6 (18.8%)	5 (15.6%)	14 (43.8%)
	×	1 (3.1%)	9 (28.1%)	0 (0%)	13 (40.6%)
③光沢を持つ	○	18 (56.3%)	2 (6.3%)	3 (9.4%)	25 (78.1%)
	×	6 (18.8%)	6 (18.8%)	0 (0%)	4 (12.5%)
④たたくと薄く広がる	○	13 (40.6%)	7 (21.9%)	3 (9.4%)	20 (62.5%)
	×	1 (3.1%)	11 (34.4%)	0 (0%)	9 (28.1%)

$\chi^2(3)=33.76, p<.01$; 項目②: 同上, $24.36, p<.01$; 項目③: 同上, $33.34, p<.01$; 同上, $22.60, p<.01$)。残差分析によると、すべての項目において、実験群で科学的知識の想起と適用の両方をできている者が多かつた(項目①: 調整された残差= $4.10, p<.01$; 項目②: 同上, $4.68, p<.01$; 項目③: 同上, $5.22, p<.01$; 項目④: 同上, $4.69, p<.01$)。また、項目①と③では、対照群で科学的知識を想起できているにもかかわらず適用はできていないものが多かつた(項目①: 同上, $4.16, p<.01$; 項目③: 同上, $4.50, p<.01$)。その他、項目①では、実験群で科学的知識を想起できていないにもかかわらず適用はできている者が多く、さらに項目①と②の対照群で科学的知識の想起も適用もできていない者が多かつた(項目①: 同上, $2.72, p<.01$; 項目②: 同上, $2.92, p<.01$)。

まず、対照群の学習者が金属ルールを想起しているものの問題の答えを得るためにそれを適用できていないことと比べると、実験群の学習者では金属ルールの想起と適用がともにできている者が多いことから、介入実践により問題に答える場面で科学的知識の適用が促進されたと言えよう。また、実験群で金属ルールの想起に失敗しているにもかかわらず知識適用問題に正答している者が、項目①で多く見られた。これは、実験群で行われた授業が「ピカピカ光るものは、電気を通す」という命題を中心に行われたことに関係していると思われる。つまり、実験群の学習者の一部は、この命題を援用し、事後調査の問題文中に記された「電気を通す」や「ピカピカ光る」を手掛かりにして、問題に答えたと考えられる。

c A中学校の授業で生じた発話の解釈的分析

介入実践には、問題の答えを得るために必要な知識を正しく学習者の認知構造に準備することと科学的知識のみで独立した知識を構造化させないために、学習者の操作的思考や既有知識と科学的知識の相互作用を促すプロセスを導入した。その点を考慮し、ここでは知識の操作、演繹的立証、帰納的検証の各段階（Table4-2 参照）で生じた発話の分析を試みる。なお、上述の各段階では、主にグループで学習活動に取り組んでおり、事後調査でメンバー全員がすべての問題に正答したグループ（グループA）とそうでないグループ（グループB）を抽出して検討を行った。グループAはA太、B子、C美の3名、グループBはD雄、E奈、F代の3名をメンバーとするどちらも男子1名、女子2名のグループである。

(1) Aグループにおける発話の分析

知識の操作の段階

この段階における対話を Figure4-7 に示す。この対話は、「ピカピカ光るものは、電気を通す」という命題が教示され、Figure4-3 に示した操作的思考課題に取り組む場面で観察されたものである。

C美の根拠を示していない主張（発話1）に対し、A太が根拠を示して反論する（発話2）ことから対話が始まっている。そして、C美がすぐに同調する（発話3）ことで、グループ内で教示された命題に基づいて課題解決を行うという同意がなされたと考えられる。

- 1 C美 全部、(電気を)通すと思う。
- 2 A太 割り箸は光っているか？
- 3 C美 割り箸は光っていないと思う。
- 4 A太 え、これは仮説(を使うっていうこと?)
- 5 C美 光っていないよね。割り箸。
- 6 A太 これは、仮説に基づいて考えるっていうことかな？
- 7 C美 仮説って、あの「ピカピカ光る」というもの？それとも、自分の仮説かな？
- 8 A太 500円硬貨は？
- 9 C美 アルミホイルは、光ると思うよね？500円硬貨はどうなっているの。こういうのではないということ？
- 10 A太 自分で理由つけていいんだって。
- 11 A太 500円硬貨は何でできているの？
- 12 A太 金属やな。
- 13 A太 アラザンは何でできているの？
- 14 C美 ピカピカしているのは、ただのコーティングだと思う。だから、単純にチョコって考えた方がいいと思う。
- 15 A太 金色の折り紙は？
- 16 C美 金色の折り紙は。
- 17 A太 みんな、ピカピカ光るけどとか書いているの？
- 割り箸は電気を通さないこと、アルミホイルと500円硬貨は電気を通すことが演示実験で示され、次はアラザンを確かめる場面になっている。
- 18 C美 (豆電球)つくと思うよ。
- 19 B子 えー。
- 20 C美 折り紙も(ブザーが)なるっていうことかな？
- 21 A太 折り紙もなりますか。
- アラザンが電気を通すことを示され、金色の折り紙について確かめる場面になっている。
- 22 C美 えー。
- 23 B子 うそー。
- 24 A太 マジで。

Figure 4-7 知識の操作段階の対話

ところが、この課題は500円硬貨の問題から前件の値を自由に記述する形式になっている(Table4-2参照)。すると、C美は命題に基づいて課題を解決することに戸惑いを感じている(発話9)と思われるが、A太の助言(発話10)に納得した様子である。その後、A太の発話(発話11, 12)に対する応答はないが、グループ内での対話が成立していない訳ではなく、500円硬貨のようにピカピカ光っていて電気を通しそうな事例に対して、命題を適用することがグループ内で暗黙の了解になった結果と思われる。したがって、アラザンのようにピカピカ光っているものの電気を通すことが疑わしい事例に対しては、A太の疑問(発話13)にC美がすぐに応答している(発話14)。また、この発話は単純に応答を意味するだけではなく、「チョコレートだから、電気を通さない」という自分の主張に、C美が同意を求めていると捉えられる。A太が助言を求めている(発話17)ことに象徴されるように、ここで命題を適用して課題解決を行うとするグループ内の同意は崩れたと思われる。

C美はアラザンが電気を通さないと予想していたのであるが、アラザンの通電性を確か

める直前になって、電気を通すと主張している（発話 18）。実際にアラザンが電気を通すことを示されると、C美はすぐに反応し、金色の折り紙も電気を通すかもしれないことに同意を求めている（発話 20）。これを契機に、金色の折り紙も命題が適用できる事例なのではないかという合意がグループ内で形成されたと思われる（発話 21）。したがって、金色の折り紙が電気を通すという事実には驚きを示している（発話 22, 23, 24）ものの、この折り紙が特別な事例であるとは捉えず、「ピカピカ光るものは、電気を通す」という命題が多く事例に当てはまる蓋然性の高いものとして、知識構造の中に準備されたと考えられる。

演繹的立証の段階

この段階における対話を Figure 4-8 に示す。この対話は実験金属事例群について、実物を観察しながら電気を通すかどうかを予想し直している場面で観察されたものである。

(水銀について)
25 C美 この銀白色って。
26 B子 どこかに金属が。
27 A太 どこかに、金属が入っているっていいことでしょう。
28 B子 入っているよね。
(ナトリウムについて)
29 C美 光っているー。
30 A太 独特の。独特の。
31 C美 光っているよね？
32 A太 独特の。
(マグネシウムについて)
33 C美 光っている。
34 A太 おー。
(カルシウムについて)
35 C美 削ってみて。
36 A太 ちょっと光ってきた。
37 C美 光っているよー。
38 A太 光っている。
39 B子 光っているの？

Figure 4-8 演繹的立証の段階の対話

知識の操作の段階で、「ピカピカ光るものは、電気を通す」という命題は、多くの事例に適用できるとグループ内で同意が得られていた。したがって、実験金属事例群の物質について予想するために必要な情報は、その物質がピカピカ光っているかどうかには焦点化されている（発話 25, 29, 33, 36）。さらに対話は、ピカピカ光ることと水銀が金属であることとの関係性に及んでいる（発話 26, 27, 28）。このような対話は、水銀が電気を通すかどうかを予想し直している場面以外では見られない。しかし、この時点で「金属」と「光沢を持

つもの」の関係性を理解した上で、「金属は光沢を持つ」という知識がグループ内で共有されたと思われる。さらに、これらの物質が電気を通すと予想することを通して、「金属」と「電気を通すもの」との関係性の理解まで及んでいると推察される。

帰納的検証の段階

この段階における対話を Figure4-9 に示す。この対話は、実験金属事例群の物質が電気を通すことを確かめる場面で観察されたものである。

40	C美	水銀は電気を通した。
41	B子	水銀は電気を通したの？
42	C美	削らなあかんよ。
43	A太	削るの？削って。
44	C美	これ、何だった？
45	B子	マグネシウム。
46	C美	そうそう、マグネシウム。
47	B子	次、どうするの？
48	A太	柔らかい。
49	B子	はやく切って。
50	A太	そのまま。
51	C美	うわー。光っている。
52	A太	これが、金属ナトリウム。
53	C美	あ、(ブザーが) 鳴った。鳴ったよね？
54	B子	うん。
55	C美	鳴ったでしょ。すごい。
56	A太	鳴った。
57	C美	あれ？全部、電気を通した。
58	A太	全部、電気を通したな。

Figure 4-9 帰納的検証段階の対話

これまでの段階で、「金属」と「光沢を持つもの」との関係性を理解していたと考えられる。また、このグループにおいて、「金属」と「電気を通すもの」との関係性について合意がなされている可能性があることについては前述の通りである。このことは、改めてナトリウムを観察して、その光沢に驚きを示すC美（発話 51）に対するA太の応答（発話 52）として象徴的に現れている。つまり、A太はナトリウムが金属であると明確に述べている。このことは、当該のグループにおいて「ピカピカ光るものが電気を通すこと」を確かめているのではなく、水銀、ナトリウム、マグネシウム、カルシウムが金属であり、「これら金属が電気を通すこと」を確認しているという合意が形成されていると思われる。したがって、このグループ内では「金属」と「電気を通すもの」との間に潜在的なリンクを形成した上で、「金属は電気を通す」ことが理解されていると考えられる。

(2) Bグループにおける対話の分析

知識の操作の段階

この段階における対話を Figure4-10 に示す。E奈のつぶやき（発話1）や問いかけ（発話3）に、F代が積極的に「ピカピカ光るものは、電気を通す」という命題を適用する応答（発話2, 4）をしており、教示された命題を適用して課題解決を行うことがグループ内で合意されていると思われる。

しかし、アラザンの課題になると、アラザンの材料が話題の中心となり、E奈は「アラザンは砂糖でできているので、電気を通さない」と主張している（発話9）。この主張にF代は反論する（発話10）ものの、E奈の主張に押し切られ、それを受容している（発話12）。

- | | | |
|---|----|--|
| 1 | E奈 | ピカピカ光らないので。 |
| 2 | F代 | えっと、割り箸。光らないよね。 |
| 3 | E奈 | 電気を通さないだろう。アルミホイル。 |
| 4 | F代 | 通す。光る。通す。500円玉は？ |
| 5 | E奈 | 500円玉は。 |
| 6 | D雄 | 書いてないよ。 |
| 7 | E奈 | うん。 |
| 8 | F代 | ピカピカ光るので、とかそういうの。 |
| 9 | E奈 | 光るので。アラザンってさ、砂糖でしょ。 |
| 10 | F代 | 銀色のものとかピンクのものとか緑のものとか、コーティングしてあるよ。 |
| 11 | E奈 | でも、あれ実際砂糖でしょ？ |
| 12 | F代 | 砂糖やで。 |
| 13 | E奈 | えっと、ピカピカ光るが。 |
| 14 | D雄 | 光るが、ので。 |
| 15 | E奈 | 光るけど、砂糖でできているので。 |
| 16 | F代 | ここ、通さないってかいたらいいの？ |
| 17 | E奈 | でも、それだと仮説と。 |
| 18 | F代 | 違うよな。 |
| 19 | E奈 | 光るけど、砂糖だと。 |
| 20 | D雄 | 砂糖なん？ |
| 21 | E奈 | うん。電気を通さないの。金色の折り紙は。 |
| 22 | F代 | アラザンって、何て書いたの？ |
| 23 | E奈 | 砂糖、電気通さないでしょ。 |
| 24 | F代 | うん、ピカピカ光るけれど、砂糖は通さないの、みたいに。 |
| 25 | E奈 | 光るけど、紙でできている。 |
| 26 | F代 | 砂糖なので。 |
| 27 | E奈 | 砂糖は、電気を通さない。 |
| 28 | F代 | 砂糖は、電気を、え。通さない。ピカピカ光る。紙だからみたいに。とても光っているよ。でも、砂糖やから通さない。 |
| 割り箸は電気を通さないこと、アルミホイルと500円硬貨は電気を通すことが演示実験で示され、次はアラザンを確認する場面になっている。 | | |
| 29 | F代 | 次から、使えない。チョコなん。 |
| 30 | E奈 | あれで考えないといけない。 |
| 31 | F代 | えー。鳴る。光るので、ということ。 |
| アラザンが電気を通すことを示され、金色の折り紙について確認する場面になっている。 | | |
| 32 | F代 | えー。意味分からない。紙を金色で覆っているみたい。うそでしょ。 |
| 33 | E奈 | 違ったな。 |

Figure 4-10 知識の操作段階の対話

その結果、グループ内で「食品の材料は、電気を通さない」ということが合意されたと思われる（発話 13, 14, 15）。

ところが、E奈が教示された命題との矛盾を指摘し（発話 17）、F代もそれに同意している（発話 18）。E奈やF代の思考は、「ピカピカ光るものは、電気を通す」と「食品の材料は、電気を通さない」の間で葛藤していると言え、科学的知識と既有知識の相互作用が生起していると考えられる。その後、E奈は「食品の材料は、電気を通さない」をアラザンの課題に適用したり（発話 19）、「折り紙の材料は、電気を通さない」を金色の折り紙の課題に適用したり（発話 25）、事例ごとに適用する命題を変えて課題解決を行っている。

一方、F代はE奈の主張に同意している訳ではなく、同調している（発話 28）だけであることが窺え、アラザンがピカピカ光っていることにこだわっている。しかし、教示された命題が適用できる範囲は限定的であるという考えがグループ内で支配的になったと考えられる。

アラザンが電気を通すことを確かめた後、教示された命題への回帰が見られる（発話 31）。しかし、これはアラザンの課題について前件の値を「食品の材料」から「ピカピカ光るもの」に修正しただけであり、金色の折り紙が電気を通す事実を確認した後においても、教示された命題が多く事例に適用できる蓋然性の高い知識として準備されていないと思われる（発話 32）。

演繹的立証の段階

この段階における対話を Figure4-11 に示す。ナトリウムが電気を通すかどうかを予想し直す場面におけるD雄の気づき（発話 35）をきっかけに、「ピカピカ光るものは、電気を通す」という命題を適用して予想をし直せばよいことがグループ内で合意されたと思われる（発話 36）。さらに、E奈は「金属」と「光沢を持つもの」との関係性を主張しており（発話 37, 39）、F代も同意している（発話 40）。

ところが、カルシウムが電気を通すことに対するD雄の疑問（発話 43）に対し、E奈はヒトに雷が落ちることを根拠に反論している（発話 44）。E奈は、「ヒトが電気を通すこと」と「ヒトの体の一部がカルシウムでできていること」とに関係性を見出している（発話 46）と思われる。この主張に対してD雄は詳しく説明することを要請しており（発話 49）、その説明に肯定的である。一方、F代はE奈の主張に納得できない様子であったが（発話 54）、ここでもD雄の気づき（発話 56）をきっかけに、教示された命題を根拠にすることが合意

(水銀について)	
34	F代 わからない。ぜんぜんわからない。水銀。
(ナトリウムについて)	
35	D雄 光っている。
36	F代 光っているよ。
37	E奈 ピカピカ光っているってことは、金属が入っているってことか。
38	F代 あ、そういうことか。
39	E奈 光らせるには、金属が必要なんだ。
40	F代 あーなるほど。そういうことか。
(マグネシウムについて)	
41	F代 単純にピカピカ光っているから。見えない。光っている。
(カルシウムについて)	
42	F代 削るの？
43	D雄 こんなのに電気通したら、骨まで電気、いくのでしょ。
44	E奈 というか。人間に雷落ちるのって、電気、通すものが入っているからじゃないの？
45	D雄 どういうこと。
46	E奈 だから、カルシウムが入っていない？
47	D雄 入っているよね。
48	E奈 骨とか歯に。だから通すのではない？
49	D雄 電気、通すのだったら。
50	F代 木とかに落ちて、その下にいたら。
51	E奈 木って電気通すもの入ってないでしょ。
52	F代 入ってない。
53	E奈 だから、電気を通すものに反応する。
54	F代 だから、人間にもって？
55	E奈 だからだよ。たぶん。そうだって。
56	D雄 何となく、光っていない？
57	E奈 ぎゅうって、やってみて。
58	D雄 難しいな。これ削るの。
59	E奈 光った？若干、光っているよ。
60	D雄 若干な。
61	F代 光っている。
62	D雄 光っている。光っている。

Figure 4-11 演繹的立証段階の対話

されたと考えられ、E奈はカルシウムを磨くことを要請（発話 57）している。その結果、カルシウムが光沢を持つことを確認でき（発話 59, 61, 62）、電気を通すと予想されることに対してグループ内で合意されたと考えられる。しかし、「金属」と「光沢を持つもの」や「電気を通すもの」との関係性についての対話が一部で見られるものの、F代がそうであるように、その関係性の理解は十分ではないと推察される（発話 40, 54）。

帰納的検証の段階

この段階における対話を Figure 4-12 に示す。ここでは、「光沢を持つもの」と「電気を通すもの」との関係性しか認められず（発話 66, 77）、この対話からも「金属」との関係性の理解が十分ではないと考えられる。つまり、Bグループにおいては「ピカピカ光るものが電気を通すこと」を確かめることが、この段階における実験の主たる目的となっているよ

うに思われる。この点がAグループとBグループとの大きな違いであり、「金属」と「電気を通すもの」や「光沢を持つもの」などの概念間の関係性の理解に影響を及ぼしたと考えられる。結果として、Aグループの学習者は、これらの概念間に潜在的なリンクを形成したが、Bグループの学習者は、それに至らなかったと思われる。

63	E奈	水銀。
64	D雄	水銀ってこんなに重たいの。
65	F代	水銀ってどうやって、どうするの？あ、こことこくっつけるの。
66	E奈	これって、もう削られていない？
67	F代	チャブチャブしている。
68	E奈	うわ、やばい。
69	F代	どうしたの。あ、違う。これってどうすればいいの？
70	E奈	切って、そのまま、ほいって。
71	F代	汗気をちゃんととる。
72	E奈	おもしろい。
73	F代	楽しそう。
74	D雄	楽しいよ。これ何。ナトリウム？
75	F代	ナトリウム。
76	D雄	マグネシウム。通る。やすりかして。
77	E奈	まって。こっち光っていたから、こっちにしよう。はい、どうぞ。
78	D雄	カルシウムやりたい。
79	E奈	無理だね。
80	F代	音がとても低い。

Figure 4-12 帰納的検証段階の対話

4.2.4 総合考察

本研究の目的は、操作的思考を促すプロセスと既有知識と科学的知識の意図的な相互作用を生起させるプロセスを導入した授業を行い、①当該の授業が科学的知識の想起や適用に与える効果を知識想起問題や適用問題の正答者数、②学習者が当該の知識を獲得するプロセスを発話に注目して検討することであった。

上記①について、まず、事後調査の問題1（知識想起問題）の正答者数は全体的に対照群の方が多く、特に「光沢があるかどうか」を尋ねた問（Table4-4 参照）では、対照群の正答者数が有意に多かった。したがって、介入実践が科学的知識を想起できるかどうかについては促進的な効果を与えているとは言えない。このことは、対照群では「金属は光沢を持つ」などを覚えておきなさいと教示されていたが、実験群ではそのような教示がなかったことが影響した結果であると考えられる。

次に、問題2（知識適用問題）の正答者数は、実験群では問による正答者数の偏りがほとんど認められないが、対照群では、その偏りが顕著に見られた（Table4-5 参照）。このことから、実験群の学習者は、事例が何であれ、問に含まれる「金属」という情報に即して、例えば「金属は電気を通す」という知識を操作し、「カルシウムは電気を通す」など事例ごとに必要な知識を適用して問題に答えていると考えられる。一方、対照群の学習者は、「金

属」であるという情報を使用することなく、「鉄は電気を通す」などの一事例にしか適用できない知識を用いていると思われる。したがって、例えば、電気を通すことを知らない物質については、それが電気を通すと正しく判断することができなかったと考えられる。

最後に、知識想起問題と知識適用問題の正答者数の関連について検討する（Table4-6 参照）。対照群の学習者は、「金属は電気を通す」や「金属は光沢を持つ」という科学的知識を、実験群以上に想起することができていた。それにもかかわらず、対照群で科学的知識を適用できた学習者は少ない。このことから、実験群と対照群の学習者間で科学的知識の想起のされ方が異なると考えられる。つまり、実験群の学習者は、例えば、「鉄は電気を通す」という既有知識を「金属は電気を通す」という科学的知識に統合した上で、当該の科学的知識を想起しているが、対照群の学習者は独立した知識として、当該の科学的知識を想起していると考えられる。また、「金属は光沢を持つ」についても同様であると思われる。

次に、上記②について、「ピカピカ光るものは、電気を通す」という命題を教示した条件下で、知識の操作、演繹的立証、帰納的検証のプロセスを通して、「金属」と「光沢を持つもの」や「金属」と「電気を通すもの」の関係性を適切に理解していくことが推察された。特に、B子については、授業後に「光っているものは、電気を通すものが多いこと。紙でできている折り紙でも金属が使われていることがわかった。」と感想を記述していることから、「ピカピカ光るもの」と「電気を通すもの」とは、対象の物質が「金属である」ことを媒介として関係性が見出せることや「折り紙」と「金属ではない」の関係は必ずしも真ではないことを理解していると思われる。1章でも述べたが、メンタルモデル理論によれば、過去の経験によって自動的に構成されるモデルが優先され、このモデルに反する推論を可能とするには、自動的に構成されたメンタルモデルを抑制する必要があるとされている（Markovits & Barrouillet, 2002）。したがって、B子の場合、「金属」と「電気を通すもの」の関係などを理解し、2つの概念間に潜在的なリンクを形成することで、経験的に構成しやすいと思われる「折り紙＝金属ではないもの」というメンタルモデルを抑制していると考えられる。

これらのことにより、実験群の学習者の多くは、介入実践を通して、科学的知識を構成する概念間の関係性を適切に理解し、既有知識を科学的知識の枠組みに統合したと考えられ、当該の知識を獲得したと言える。したがって、カルシウムについて「金属である」という情報を与えられれば、その情報に即して「金属は電気を通す」という知識から演繹的に「カルシウムは電気を通す」という知識を導き出して適用したと考えられる。つまり、

実験群では、一般化された科学的知識から与えられた情報に基づいて演繹推論を行い、問題の答えを得るために必要な知識を導き出している学習者が多いと思われる。

このことは、実験や観察、調査などの結果から一般化された科学的知識を導き出す従来の科学教育の実践に示唆を与えるものである。つまり、帰納的に蓋然性のある科学的知識を導き出し、それを教示するだけでは、その知識が容易に多くの事例には適用されないが、本研究で行った介入実践はそれを可能にするという点で、授業の改善に寄与するものと考えられる。

しかしながら、教授的介入を行ってもBグループの学習者のように科学的知識と既有知識の相互作用は生起しているものの、科学的知識と既有知識がそれぞれ独立した知識として構造化している事例も確認された。これらのことから、教示する知識と既有知識の相互作用や科学的知識の操作に関する各種条件、グループ活動に対する支援の方法を検討することが、今後の課題である。

4.3 まとめ

以上、本章では、中学校理科において M-LVK モデルに基づく金属の学習に関する授業を行い、この授業が知識の想起と適用に与える効果と、学習者が当該の知識を獲得するプロセスについて検討した。その結果、以下の知見が得られた。

(1) M-LVK に基づく授業により、学習者が与えられた情報に基づいて演繹推論を働かせ、一般化された知識から問題の答えを得るために必要な知識を導き出すことができると示唆された。

(2) M-LVK モデルに基づく授業が、科学的知識を構成する概念間に潜在的なリンクを形成させることや、科学的知識の枠組みに既有知識を統合させることに有効に作用し、科学的知識の獲得を促すことが示唆された。

しかしながら、教授的介入を行っても科学的知識と既有知識の相互作用は認められるものの、既有知識が科学的知識に統合されるには至らない事例も確認されていることに留意する必要がある。

ところで、従来の学習研究の特徴として、その学習の効果を分類課題の解決によって測定する傾向があり、このような枠組みが限定的であるとする批判がある (Tessmer & Wedman, 1990)。3章、4章で用いた評価問題を捉え直すと、知識適用問題は当該の知識が当てはまるかどうかを問うており、分類課題の解決によって当該の授業の効果を測定していると言える。そこで、次章では、この批判への対処として、知識の想起や適用とは異なる観点に焦点を当て、M-LVK モデルに基づく授業が学習成果に及ぼす効果について分析を進めることとする。

5 修正版知識検証学習モデルによる授業が効果を及ぼす知識水準

3章で得られた知見に基づき、4章では修正版知識検証学習モデル (M-LVK モデル) による授業が学習成果に及ぼす効果を、知識の想起や適用ができるかどうかという観点で測定し、その効果を検討した。しかしながら、このような観点で学習成果を測定するのは、学習モデルの質の保証を求めることに対して、その枠組みが限定的であるとする批判がある (Tessmer & Wedman, 1990)。

そこで、本章では、工藤 (2008) の知識水準を測定する枠組みで、M-LVK モデルに基づく授業が学習成果に及ぼす効果を測定することで、上述の批判に応えることを試みる。また、M-LVK モデルとは異なるプロセスで操作的思考課題を導入した授業や操作的思考課題を導入しない授業とを比較し、M-LVK モデルが学習成果に対して有効に作用することを明らかにする。

5.1 知識水準を評価する問題

工藤 (2008) は、知識水準として3つの水準を想定しており、それぞれの知識水準で可能な知識の適用方法や制御可能な思考過程、それぞれの知識水準を評価し得る問題について論証している。これによれば、獲得された知識構造に大きな変更を加えることなく解決できる「再生問題」と知識構造に変形操作を加えて解決できる「転移問題」が、教授学習研究で広く使用されてきたとしている。そして、これらの問題を解決できる知識水準をそれぞれ「知識の直接的適用」と「知識の操作的適用」と呼び区別している。工藤 (2008) は、これらの問題に加えて「誤前提問題」と呼ばれる評価問題を教授学習研究で取り上げている。誤前提問題を用いた研究 (例えば、工藤, 1993, 1997; 小松・伏見, 2000; 進藤ら, 2006; 佐藤, 2006 など) では、誤前提問題の成績と再生問題や転移問題の成績が異なる傾向があり、誤前提問題の解決を可能とする知識水準が別に存在すると示唆されていることから、工藤 (2008) は、この問題を解決できる知識水準を「知識の制御的適用」と呼んでいる。

Table 5-1 知識の3水準

水準	可能な知識の適用方法	制御可能な思考過程	対応する問題
1	知識の直接的適用	知識の適用過程	再生問題
2	知識の操作的適用	知識の適用過程	転移問題
3	知識の制御的適用	推論過程	誤前提問題

注) 工藤 (2008) を筆者が一部改変している。

これらのことをまとめたものを Table5-1 に示す。

ここからは、知識の3水準について、後述の研究で用いた調査問題を例にして説明する。調査問題の内容を Figure5-1 に示す。

<p>問題1 (再生問題) 問1 粒子の動きが強くなると、液体は(ア. 固体になる イ. 気体になる ウ. 変化しない)。 問2 粒子の動きが弱くなると、液体は(ア. 固体になる イ. 気体になる ウ. 変化しない)。</p> <p>問題2 (転移問題) 圧力なべの中は圧力が高い(物質をつくる粒子を押さえつける力が大きい)ので、水は 100℃になっても沸騰しません。圧力が高いと水が 100℃でも沸騰しない理由をかいてください。</p> <p>問題3 (誤前提問題) 「粒子の動きと物質の状態変化には関係がない」と考えている太郎さんが、「岩石や空気などは、状態変化しないよね?」とあなたに質問しました。あなたならこの質問にどう答えますか。かいてください。</p>

Figure 5-1 調査問題の内容

後述する実践では、「粒子の動きが変化すれば、物質は状態変化する(状態変化ルール)」を教示するとき、その具体例として、「液体を加熱すると粒子の動きが強くなり、気体になること」や「液体を冷却すると粒子の動きが弱くなり、固体になること」が説明されていた。したがって、問題1(再生問題)の解決プロセスは、科学的知識を単純に適用する過程と言えよう。

次に、問題2(転移問題)の解答は、「水の粒子の動きがそれほど強くないから」であるが、その解決プロセスを考えると少し複雑である。この問題を解決するには、問題文中に記されている「水は 100℃になっても沸騰しない(状態変化しない)」という結果から、その原因を状態変化ルールに即して述べる必要がある。つまり、この問題の解決には、状態変化ルールに即した因果関係の操作が必要と言える。また、この操作の結果から得られる「水の粒子の動きがそれほど強くない」という原因が、圧力が高いという要因に矛盾しないかどうかを照合する必要もあろう。これらのことを踏まえると、転移問題の解決プロセスは単純な知識の適用過程ではなく、科学的知識の構造を変化させ適用させる過程と捉えられる。

最後に、問題3(誤前提問題)は Figure5-2 に示すような推論過程そのものを否定することが、その解答である。マグマや液体窒素などの存在は知られているが、岩石がとけたり、空気が固まったりする現象を経験することはないので、通常、「岩石がとける」や「空気が固まる」という知識を持つことはあまりないと考えられる。1章で述べたように、メンタ

誤前提	粒子の動きが変化しても、物質は状態変化しない。
情報	岩石を熱すと粒子の動きが強くなる。
帰結	粒子の動きに関係なく、岩石は状態変化しない。

Figure 5-2 誤った前提による推論過程

ルモデル理論 (Johnson-Laird, 1983) によると、過去の習慣や経験によって自動的に構成されるモデルが優先されるとされており、これに反する推論ができるためには自動的に構成されたモデルを抑制することが必要であるとされている (Markovits & Barrouillet, 2002)。したがって、この問題を解決するには、「岩石はとけない」や「空気は固まらない」というメンタルモデルの使用を抑制し、「粒子の動きが変化すれば、物質の状態は変化する」というメンタルモデルが使われる必要がある。つまり、この問題の解決プロセスは、工藤 (2008) が指摘しているように科学的知識を適用させる過程ではなく、推論そのものを制御する過程であると言えよう。

次節では、工藤 (2008) の枠組みにより Figure5-1 に示した調査問題を用いて、M-LVK モデルに基づく授業が学習成果に及ぼす効果とその知識水準について検討する。

5.2 学習モデルと課題の種類が学習成果に与える効果

5.2.1 問題と目的

2章で述べた通り、小・中学校の科学教育における学習活動は、①理解させたい科学的知識に関わる事例を実験や観察、資料を利用することで収集する段階（帰納的検証）、②収集した事例を比較検討し、そこから一般法則を導き出す段階（知識の受取）、という2段階の帰納的なプロセス（帰納的学習モデル）でデザインされている傾向があった。そこで、本論文では、科学的に探究する能力を育成する観点から演繹的に推論することも重要であると考え、①一般法則（科学的知識）を教示する段階（知識の受取）、②当該の知識が正しいとすれば、それに関わる事象の結果がどうなるかを予想させる段階（演繹的立証）、③予想され得る結果を確かめさせる段階（帰納的検証）、という3段階のプロセスを柱とする修正版知識検証学習モデル（M-LVKモデル）を4章で提案した。そして、M-LVKモデルに基づく授業が学習成果に与える効果について検討した結果、①当該の知識を構成する概念間に潜在的リンクが形成される、②既有知識を科学的知識の枠組みに統合させる、③科学的知識に基づく演繹推論を促進させる、という示唆が得られた。

ところで、麻柄・進藤（2011）では、大学生を対象に行った「日本海を通過するとき季節風は、その距離に応じた量の水蒸気を吸い込み、日本海側に雪を降らせる（降雪量ルール）」を取り上げた調査で、操作的思考課題を行わせる群（操作群）と、空欄に語句を当てはめることで、降雪量ルールに関する説明文の内容を再学習するような操作的思考を要しない課題（再生課題）を行わせる群（再生群）を設け、事後テストの成績を比較している。その結果、再生群よりも操作群で、事後テストの成績が高いという知見を得ている。しかしながら、1章で述べた通り、麻柄・進藤（2011）は、当該の研究が実験室的であることを認めた上で、学校で行われる実際の授業において検討する必要性を指摘している。つまり、学習活動に導入する課題の種類が学習成果に与える効果について、様々な要素が入り組んだ日常的な教育実践の場で同様に得られるかどうかは定かではないと言える。

また、本論文においても、M-LVKモデルに組み込んだ操作的思考課題を再生課題に置き換えた学習プロセスによる授業や、操作的思考課題を導入した上述の帰納的学習モデルに基づく授業が学習成果に及ぼす影響については、ここまで詳細な検討をしていない。したがって、学習成果に与える効果が、M-LVKモデルに基づく学習活動によるものであるのか、あるいは操作的思考課題を導入することそのものによる効果であるのか、それともその両方による効果であるのかは定かであるとは言えない。

これらのことを踏まえ、本研究では、4章で提案した通りの M-LVK モデルに基づく授業と M-LVK モデルに組み込んだ操作的思考課題を再生課題に置き換えた授業、操作的思考課題や再生課題をそれぞれ導入した帰納的学習モデルに基づく授業を行い、前節で述べた知識の3水準(工藤,2008)を枠組みとして、4章で示唆された学習成果に与える効果が操作的思考課題を組み込んだ M-LVK モデルに基づく授業によるものであることを明らかにすることを目的とする。

5.2.2 方法

a 分析対象者

後述する3つのセッションに参加した中学1年生146名を分析対象者とした。なお、授業は学習モデル(2)×課題の種類(2)の4群に分けて、Table5-2に示した学習過程で行った。なお、実施した授業ごとの分析対象者の内訳は、それぞれA群35名、B群37名、C群38名、D群36名である。

Table 5-2 各群の学習過程及び学習成果を評価する問題

学習モデル	M-LVK モデル		帰納的学習モデル	
群	操作的思考課題 (A群)	再生課題 (B群)	操作的思考課題 (C群)	再生課題 (D群)
学習過程	結果の予想	結果の予想	結果の予想	結果の予想
	知識の受取	知識の受取	帰納的検証	帰納的検証
	知識の操作	知識の再生	知識の受取	知識の受取
	演繹的立証	演繹的立証	知識の操作	知識の再生
	帰納的検証	帰納的検証	因果関係の操作	現象の再生
	因果関係の操作	現象の再生		
評価問題	再生問題 (知識の直接的適用を問う問題)			
	転移問題 (知識の操作的適用を問う問題)			
	誤前提問題 (知識の制御的適用を問う問題)			

b 手続き

事前調査(約15分)、授業(約50分)を2単位時間、事後調査(約15分)のセッションを実施した。事前調査の2ヶ月後に授業を行い、その1週間後に事後調査を実施した。なお、事前調査及び事後調査開始前には、調査に参加したくなければ、その意思を尊重するとして、調査の結果を個人の成績には影響させないことや分からないことは素直に分からないと記述してもよいことを説明した。

c 各セッションの内容

(1) 事前調査

事前調査の構成は、問題1（知識の直接的適用を問う問題）と問題2（知識の操作的適用を問う問題）であった（Figure5-1 参照）。

(2) 授業の概要

各群の授業では、Table5-2 に示した学習活動を通して、状態変化ルールを構成する「粒子の動き」と「物質の状態」との概念間の関係性を理解させることで、これらの概念間に潜在的リンクを形成させることや、既有知識を科学的知識の枠組みに統合させることを目指した。各段階における学習活動の詳細を以下に述べる。

ただし、学習活動に操作的思考を導入する群（A群とC群）では、「知識の操作」と「因果関係の操作」の各段階で操作的思考課題を導入した。一方、学習活動に操作的思考課題を導入しない群（B群とD群）では、「知識の操作」と「因果関係の操作」の各段階を設定せず、それらに代わる段階として「知識の再生」と「現象の再生」の段階をそれぞれ設定し、各学習段階において再生課題を導入した。

M-L V Kモデルに基づく授業

最初に、固体の食塩と固体の鉛を加熱するとどうなるかについてそれぞれ予想させた。具体的には、「液体になる・気体になる・変化しない」から予想される結果を選択し、その理由を記述させた（結果の予想）。

その後、「粒子の動きが変化すると、物質は状態変化する（状態変化ルール）」という科学的知識を教示した。そして、中学校理科の教科書に記述されているように、状態変化ルールの前件に変動方向を代入した「熱すと粒子の動きが強くなり、物質は固体→液体→気体に変化する」ことと、「冷やすと粒子の動きが弱くなり、物質は気体→液体→固体に変化

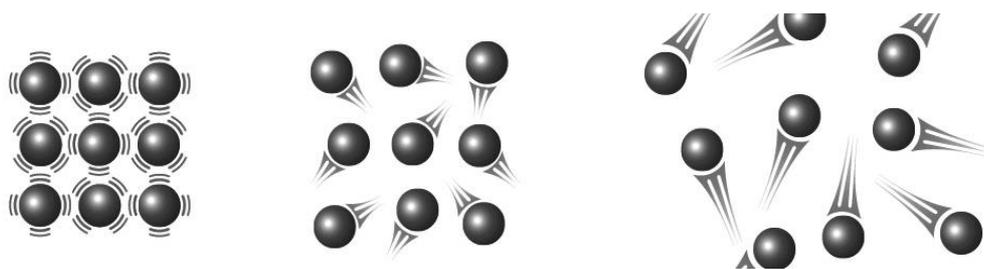


Figure 5-3 粒子の動きと物質の状態の関係を表したモデル

する」ことを（岡村・藤嶋,2016）、Figure5-3 で表されるような動画を用いて説明した。ここでは、主として加熱や冷却によって粒子の運動の様子が変化することを取り上げている（知識の受取）。

そして、A群では、状態変化ルールに即した操作的思考を促すために、Figure5-4 に示した操作的思考課題を行わせた。具体的には、問1で「粒子の動きが変化すると、物質は状態変化する」を教示したときに、「粒子の動きが変化しなくても、物質は状態変化する」や「粒子の動きが変化しても、物質は状態変化しない」、「粒子の動きが変化しなければ、物質は状態変化しない」の妥当性を判断させた。

1. 「状態変化のルール」が正しいとき、次の①～③のことは正しいかどうかかきましょう。

	粒子の動きが変化する	粒子の動きが変化しない
状態変化する 物質は	「状態変化のルール」 粒子の動きが変化すれば、物質の状態は変化する	①粒子の動きが変化しなくても、物質は状態変化する。 正しい・正しくない ●理由
状態変化しない 物質は	②粒子の動きが変化しても、物質は状態変化しない。 正しい・正しくない ●理由	③粒子の動きが変化しなければ、物質は状態変化しない。 正しい・正しくない ●理由

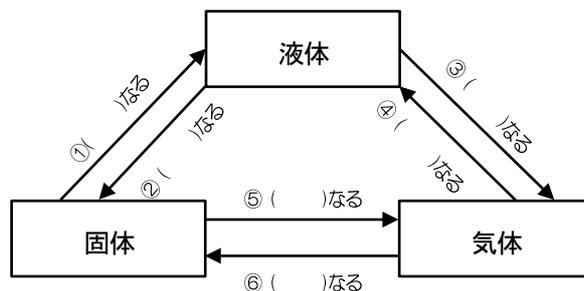
2. あとの問①～④に答えましょう。

- ①液体が固体になると、粒子の動きは（強くなる・弱くなる・変わらない）。
- ②固体が気体になると、粒子の動きは（強くなる・弱くなる・変わらない）。
- ③固体の食塩を熱すると、固体の食塩は（液体になる・変化しない）。
なぜならば、物質を熱すると粒子の動きが（強くなる・弱くなる・変化しない）からです。
- ④気体の酸素を冷やすと、気体の酸素は（液体になる・変化しない）。
なぜならば、物質を冷やすと粒子の動きが（強くなる・弱くなる・変化しない）からです。

Figure 5-4 操作的思考課題

また、問2では、状態変化ルールに即して、前件の値と後件の値を入れ替えた上で、前件の値を「液体が固体になる」などのように示し、後件の値を「強くなる・弱くなる・変わらない」から選択させたり、前件の値を「熱する」などのように示した上で、後件の値を「液体になる・変化しない」から求めさせたりした（知識の操作）。これらの課題には内容として、変動方向を仮定した命題化や関係項の方向の逆転が含まれているので、これらの課題を操作的思考課題と位置づけた（Table1-1 参照）。

1. 物質が状態変化をするとき、粒子の動きは強くなりますか、それとも弱くなりますか。①～⑥にあてはまる語句をかきましょう。



2. あとの問①～③に答えましょう。

- ①物質を熱すると、粒子の（ ）は強くなる。
- ②（ ）を冷やすと、粒子の動きは弱くなる。
- ③物質が状態変化するのは、粒子の動きが（ ）するからと言える。

Figure 5-5 再生課題

一方、B群では、操作的思考課題の代わりに Figure5-5 に示した課題を行わせた（知識の再生）。この課題は、状態変化ルールや説明された内容を想起するだけで、空欄に当てはまる語句を答えられるので、これらの課題を再生課題と位置づけた。

次に、状態変化ルールに基づいて考えることを教示した上で、固体の食塩と固体の鉛をそれぞれ加熱すると、どのように変化するかを再び予想させた。また、そのように予想した理由を記述させた（演繹的立証）。

その上で、固体の食塩と固体の鉛をそれぞれ少量ずつ試験管に取り、それらをガスバーナーで加熱させた。そして、固体の食塩と固体の鉛がそれぞれとけて液体に変化することを確かめさせた（帰納的検証）。

最後に、状態変化ルールを構成する概念間の関係性をより明確に捉えさせるために、A群で操作的思考課題を行わせた。具体的には、容器の中に赤く色をつけた湯を入れ、簡易ポンプで容器の中の空気を抜くと水が沸騰する様子を観察させ、「容器の中の空気を抜くと、容器の中の粒子を押さえつける力が小さくなる」ことを教示した上で、水が 100℃未満の温度で沸騰した原因を記述させた（因果関係の操作）。この課題は、状態変化ルールに即して、「水の粒子の動きが強くなりやすいことが原因で、水は 100℃未満の温度でも沸騰する」というような因果関係の表現を求めているので、因果操作を要する操作的思考課題と位置づけた（Table1-1 参照）。

一方、B群でも、上述の水が沸騰する様子を観察させ、この現象について「容器の中の空気を抜くと、容器の中の粒子を押さえつける力が小さくなるので、水の粒子の動きは強

くなること」と「水の粒子の動きが強くなりやすいので、水は 100°C未満の温度でも沸騰すること」を説明した上で、Figure5-6に示す課題に取り組みさせた（現象の再生）。この課題も、上述の現象について説明した内容を想起するだけで、空欄に当てはまる語句を答えられるので、再生課題に位置づけた。

温めた水を容器の中に入れ、容器の中の(①)を抜くと、水は100°Cになっていなくても沸とうします。これは、容器の中の(①)を抜くと、物質を(②)つけている力が弱くなり、粒子の(③)が強くなるからです。
--

Figure 5-6 現象の説明を再生する課題

帰納的学習モデルに基づく授業

最初に、固体の食塩と固体の鉛を加熱するとどうなるかについてそれぞれ予想させた。具体的には、「液体になる・気体になる・変化しない」から予想される結果を選択し、その理由を記述させた（結果の予想）。

次に、固体の食塩と固体の鉛をそれぞれ少量ずつ試験管に取り、それらをガスバーナーで加熱させた。そして、固体の食塩と固体の鉛がそれぞれとけて液体に変化することを確かめさせた（帰納的検証）。

その上で、状態変化ルールを教示し、状態変化ルールの前件に変動方向を代入した「熱すと粒子の動きが強くなり、物質は固体→液体→気体に変化する」ことと、「冷やすと粒子の動きが弱くなり、物質は気体→液体→固体に変化する」ことをFigure5-2で表されるような動画を用いて説明した（知識の受取）。

最後に、C群では、状態変化ルールに即した操作的思考を促すために、Figure5-4に示した操作的思考課題を行わせた（知識の操作）。加えて、状態変化ルールを構成する概念間の関係性をより明確に捉えさせるために、容器の中に赤く色をつけた湯を入れ、簡易ポンプで容器の中の空気を抜くと水が沸騰する様子を観察させ、「容器の中の空気を抜くと、容器の中の粒子を押さえつける力が小さくなる」ことを教示した上で、水が100°C未満の温度で沸騰した原因を記述させる因果操作課題を行わせた（因果関係の操作）。

一方、D群では、上述の操作的思考課題の代わりにFigure5-5に示した再生課題を行わせた（知識の再生）。加えて、上述の水が沸騰する現象を観察させ、この現象について「容器の中の空気を抜くと、容器の中の粒子を押さえつける力が小さくなるので、水の粒子の動きは強くなること」と「水の粒子の動きが強くなりやすいので、水は100°C未満の温度で

も沸騰すること」を説明した上で、Figure5-6 に示した再生課題を行わせた（現象の再生）。

(3) 事後調査

事後調査の構成は、事前調査の問題 1（知識の直接的適用を問う問題）と問題 2（知識の操作的適用を問う問題）に、問題 3（知識の制御的適用を問う問題）を加えたものであった（Figure5-1 参照）。

5.2.3 結果と考察

問題 1 は、両方の間に正答していれば正答とした。問題 2 は「粒子の動きが強くなりにくい」と同意の内容を記述できていれば正答とした。一方、「粒子の動きが弱くなる」のような場合、常圧で沸騰している水の粒子の動きより、加圧して 100°C に達している水の粒子の動きが弱いことを説明していないものについては、どの場合の粒子より動きが弱いのかを述べているのかが曖昧なので部分正答とした。また、明らかに記述内容が誤っていると判断される場合や記述されていない場合は誤答とした。問題 3 は「粒子の動きと物質の状態変化には関係がないことを否定し、岩石や空気も状態変化する」と同意の内容を記述できていれば正答とした。一方、「空気なども粒子の動きが弱くなったら液体になり、岩石もものすごく熱したらとける」のように、誤った前提を否定する記述がないものについては、岩石や空気は状態変化すると捉えているが、物質一般について状態変化すると考えているかどうか不明確なので部分正答とした。また、明らかに記述内容が誤っていると判断される場合や記述されていない場合は誤答とした。

問題 2 と問題 3 の採点は、理科担当の教員 2 名（2 名とも 10 年以上の教職経験がある者）で行い、判断が異なった場合は協議の上、得点を決定した。なお、一致率は、事前調査の問題 2 では 98.6%、事後調査の問題 2 と問題 3 ではそれぞれ 77.3% と 82.3% であった。

a 事前調査

(1) 問題 1（知識の直接的適用を問う問題）

問題 1 の群ごとの正答者数をそれぞれ調べた。その結果を Table5-3 に示す。クロス集計の結果に基づき χ^2 検定を行ったが、分布に有意な偏りは認められなかった ($\chi^2(3)=5.83, n.s.$)。

また、正答者数は A 群で 15 人 (42.9%)、B 群で 11 人 (29.7%)、C 群で 12 人 (31.6%)、D 群で 6 人 (16.7%) と状態変化ルールを学習する前であるにもかかわらず、一定数の学習

Table 5-3 問題1の正答者数(人)

群	正	誤
A群	15(42.9%)	20(57.1%)
B群	11(29.7%)	26(70.3%)
C群	12(31.6%)	26(68.4%)
D群	6(16.7%)	30(83.3%)

者が正答している。これは、当該のルールを学習する前ではあるものの、調査問題が三者択一式であったことや粒子概念を既に保有している学習者の存在が影響した結果であると考えられる。

(2) 問題2 (知識の操作的適用を問う問題)

問題2については、部分正答であっても、状態変化ルールに即した解答であり、問題に答える場面で、先述の曖昧な点を理解しているものの、それを記述しなかった者も含まれると思われるので、部分正答者を正答者数に加え、群ごとに正答者と部分正答者を合わせた人数を調べた。その結果を Table5-4 に示す。クロス集計の結果に基づき χ^2 検定を行ったが、分布に有意な偏りは認められなかった ($\chi^2(3)=1.93, n.s.$)。

Table 5-4 問題2の正答者数(人)

群	正	誤
A群	5(14.3%)	30(85.7%)
B群	3(8.1%)	34(91.9%)
C群	7(18.4%)	31(81.6%)
D群	4(11.1%)	32(88.9%)

部分正答者を合わせた正答者数は、A群で5人(14.3%)、B群で3人(8.1%)、C群で7人(18.4%)、D群で5人(13.9%)と少なく、「粒子の動き」と「物質の状態」を既に関連づけて物質の状態変化を捉えるような粒子概念を既に持っている学習者は少数であると考えられる。

これらの結果から、学習者の既有知識レベルでは、群間で差がないと考えられるので、4つの集団を等質であると捉え、以後の分析を進めた。

b 事後調査

(1) 問題 1 (知識の直接的適用を問う問題)

問題 1 の群ごとの正答者数をそれぞれ調べた。その結果を Table5-5 に示す。クロス集計の結果に基づき χ^2 検定を行ったが、分布に有意な偏りは認められなかった ($\chi^2(3)=0.10, n.s$)。

Table 5-5 問題 1 の正答者数 (人)

群	正	誤
A 群	27(77.1%)	8(22.9%)
B 群	28(75.7%)	9(24.3%)
C 群	32(84.2%)	6(15.8%)
D 群	29(80.6%)	7(19.4%)

次に、事前調査から事後調査における正答者数の変化を調べた。その結果を Table5-6 に示す。参考までに、正答者数と誤答者数に有意な差があるかどうかを検討するために、クロス集計の結果に基づき群ごとに McNemar 検定を行ったところ、群にかかわらず正答者数が有意に増加していた (A群: $\chi^2(1)=7.56, p<.01$; B群: $\chi^2(1)=13.47, p<.01$; C群: $\chi^2(1)=18.05, p<.01$; D群: $\chi^2(1)=21.04, p<.01$)。

Table 5-6 問題 1 の正答者数の変化 (人)

調査	正誤	事後調査							
		A 群		B 群		C 群		D 群	
		正	誤	正	誤	正	誤	正	誤
事前調査	正	13 (37.1%)	2 (5.7%)	10 (27.0%)	1 (2.7%)	12 (31.6%)	0 (0%)	6 (16.7%)	0 (0%)
	誤	14 (40.0%)	6 (17.1%)	18 (48.6%)	8 (21.6%)	20 (52.6%)	6 (15.8%)	23 (63.9%)	7 (19.4%)

これらのことから、知識の直接的適用を可能にすることを促進する効果は、授業に導入した課題が操作的思考課題か再生課題かにかかわらず認められたと言える。

(2) 問題 2 (知識の操作的適用を問う問題)

問題 2 の群ごとの正答者と部分正答者数を合わせた人数をそれぞれ調べた。その結果を Table5-7 に示す。クロス集計の結果に基づき χ^2 検定を行ったところ、分布の偏りが有意であった ($\chi^2(3)=11.50, p<.05$)。残差分析によると、正答者数が A 群で有意に多く (調整された残差=2.51, $p<.05$)、B 群で有意に少なかった (同上, -2.88, $p<.01$)。

Table 5-7 問題2の正答者数（人）

群	正	誤
A群	21(60.0%)	14(40.0%)
B群	8(21.6%)	29(78.4%)
C群	17(44.7%)	21(55.3%)
D群	15(41.7%)	21(58.3%)

次に、事前調査から事後調査における正答者数の変化を調べた。その結果を Table5-8 に示す。参考までに、正答者数と誤答者数に有意な差があるかどうかを検討するために、クロス集計の結果に基づき群ごとに McNemar 検定を行ったところ、A群、C群、D群で部分正答を含む正答者数が有意に増加していたが、B群ではそれは認められなかった（A群： $\chi^2(1)=12.50, p<.01$ ；B群： $\chi^2(1)=2.29, n.s$ ；C群： $\chi^2(1)=6.75, p<.01$ ；D群： $\chi^2(1)=7.69, p<.01$ ）。

Table 5-8 問題2の正答者数の変化（人）

調査	正誤	事後調査							
		A群		B群		C群		D群	
		正	誤	正	誤	正	誤	正	誤
事前調査	正	4 (11.4%)	1 (2.9%)	2 (5.4%)	1 (2.7%)	6 (15.8%)	1 (2.6%)	3 (8.3%)	1 (2.8%)
	誤	17 (48.6%)	13 (37.1%)	6 (16.2%)	28 (75.7%)	11 (28.9%)	20 (52.6%)	12 (33.3%)	20 (55.6%)

事後調査においてA群の正答者数が有意に多いことや事前調査から事後調査にかけて正答者数が有意に増加していることから、他の群と比べて、A群で行われた授業に知識の操作的適用を促進する効果があると考えられる。また、C群とD群でも事前調査から事後調査にかけて正答者数が有意に増加していることから、B群と比べると、C群やD群で行われた授業にも知識の操作的適用を促す一定の作用があると言えよう。

しかしながら、A群においても事後調査における正答者数は、部分正答者（9人）を含んだ人数にもかかわらず全体の6割に留まっており、A群で行われた授業には知識の操作的適用を促す効果があるものの、その効果は十分とは言えないことに留意する必要がある。

(3) 問題3（知識の制御的適用を問う問題）

問題3（誤前提問題）について、群ごとの正答者数（部分正答者を含む）を調べた。その結果を Table5-9 に示す。クロス集計の結果に基づき χ^2 検定を行ったところ、分布の偏りが有意であった（ $\chi^2(3)=16.25, p<.01$ ）。残差分析によると、A群で正答者が有意に多く（調

整された残差=2.91, $p<.01$), B群とD群で正答者が有意に少なかった (B群: 同上, -2.53, $p<.05$; D群: 同上, -2.00, $p<.05$)。

Table 5-9 問題3の正答者数 (人)

群	正	誤
A群	16(45.7%)	19(54.3%)
B群	4(10.8%)	33(89.2%)
C群	14(36.8%)	24(63.2%)
D群	5(13.9%)	31(86.1%)

事後調査において、A群の正答者数が有意に多いことから、他の群と比べて、A群で行われた授業に知識の制御的適用を促進する効果があると言える。一方、B群とD群では正答者数が有意に少ないことから、これらの群で行われた授業の知識の制御的適用を促進する効果は相対的に小さいと言える。

しかしながら、転移問題 (問題2) の正答者数と同様に、A群においても正答者数は、部分正答者 (2人) を含んだ人数にもかかわらず全体の5割弱に留まっており、知識の制御的適用を可能にすることに対して、A群で行われた授業の促進的効果が十分であるとは言えないことに留意する必要がある。

5.2.4 総合考察

本研究の目的は、操作的思考課題と再生課題をそれぞれ導入した M-LVK モデルに基づく授業と帰納的学習モデルに基づく授業を行い、ここまでに示唆された学習成果に与える効果が M-LVK 学習モデルに基づく授業によるものであることを、①知識の直接的適用、②知識の操作的適用、③知識の制御的適用、という知識の3水準 (工藤, 2008) を枠組みとして明らかにすることであった。

まず、上記①については、学習モデルや課題の種類によらず、事後調査における正答者数が多く、いずれの群においても有意に増加していた。前節で述べた通り、再生問題の解決プロセスは、教示された状態変化ルールを単純に適用する過程と考えられる。つまり、再生問題の解決には、当該ルールを構成する概念間の関係性を理解していることや既有知識を科学的知識の枠組みに統合することなどは必ずしも求められないと思われる。したがって、学習モデルや課題の種類によらず、いずれの授業においても、学習者の知識水準を知識の直接的適用を可能とする水準まで引き上げる促進的効果が認められたと考えられる。

次に、上記②については、事後調査における転移問題でA群の正答者数が有意に多かった。また、A群、C群、D群で事前調査から事後調査にかけて正答者数が有意に増加していた。前節で述べた通り、転移問題の解決には、状態変化ルールの構造を変化させて適用することが必要であると考えられる。一方、この問題の解決過程における推論の方向は、状態変化ルールによってあらかじめ定められており、推論のプロセスに変更を加える必要はなく、状態変化ルールの枠組みで、より多くの事例を説明できれば、転移問題に答えることは可能であると思われる。

4章で述べた通り、M-LVKモデルは、帰納的学習モデルで生起する科学的知識と既有知識の相互作用をより活性化したり、認知的葛藤を適度な強さに調節したりすることで、科学的知識と既有知識がそれぞれ独立した知識となることを妨げるモデルである。したがって、他の群と比べて、A群の授業により学習者の知識水準を知識の操作的適用を可能とする水準まで引き上げる促進的効果が認められたと考えられる。一方、B群の授業には操作的思考課題を導入しておらず、学習者が状態変化ルールを演繹的立証の段階で使用する可能性は低いと思われる。加えて、結果の予想と演繹的立証の各段階で既有知識に基づく予想を繰り返すことで既有知識が強化され、帰納的検証の段階において学習者の認知的葛藤はむしろ増大したと考えられる。その結果、科学的知識と既有知識の相互作用が十分に生起せず、科学的知識と既有知識はそれぞれ独立した知識として構造化してしまい、転移問題に答えられなかったと思われる。

最後に、上記③については、A群で誤前提問題の正答者数が有意に多かった。また、B群とD群では正答者数が有意に少なかったことから、他の群より、A群の授業に学習者の知識水準を知識の制御的適用を可能とする水準まで引き上げる促進的効果があると言える。

前節で述べた通り、誤前提問題を解決するプロセスは、与えられた情報に基づく推論そのものを制御する過程と言える。したがって、この問題を解決するためには、第1に、状態変化ルールを構成する概念間の潜在的リンクの形成が必要と思われる。このことにより、問題に答える場面で、この潜在的リンクが顕在化し、誤った知識に方向づけられた推論過程を抑制できると考えられる。第2に、科学的知識を前提とした演繹的帰結が自己の経験と矛盾した場合、その帰結を受容することが必要と思われる。換言するとこれは、科学的知識の枠組みに既有知識を統合させることを求めていると言えよう。このことにより、誤った前提そのものを明確に否定することが可能になると考えられる。

したがって、A群で行われたM-LVKモデルに基づく授業には、状態変化ルールを構成

する概念間の関係性の理解を促す教授的働きかけや、科学的知識と既有知識の相互作用を生起させることにより、既有知識を科学的知識の枠組みに統合するプロセスが組み込まれているので、他の群と比べて、A群の授業で知識の制御的適用の水準を高める促進的効果が認められたことは、当然の結果であると言える。

ただし、A群の授業で知識の制御的適用に対する促進的効果が認められたとは言え、誤前提問題の正答者数は、部分正答者を含めた人数にもかかわらず、A群でも5割弱と絶対的に少ないことに留意する必要がある。

今後の課題について、教育実践上と研究上の課題に分けて述べる。まず、教育実践上の課題は、知識の3水準という観点からM-LVKモデルに基づく授業(A群)を検討すると、知識の直接的適用・操作的適用・制御的適用のいずれの水準に対しても、その促進的効果は認められたものの、知識の操作的適用・制御的適用に与える促進的効果は限定的であった。このことから、科学的知識と既有知識の相互作用を一層生起させるプロセスや科学的知識の操作に関する各種条件を引き続き検討する必要がある。

次に、研究上の課題は、誤前提問題について、経験的に構成されやすい誤ったモデルを前提とするのと、経験的に構成されにくいと考えられる誤ったモデルを前提とするのでは、前者に基づく推論過程を抑制する方が困難であると思われるが、これについては推測の域を出ていない。したがって、誤前提問題を用いた学習成果の測定に対する妥当性や信頼性を高めるために、この点を検討する必要があると言える。

また、本研究では、操作的思考課題を授業に導入することで中学生が繰り返し状態変化ルールの変換を促すことを想定している。しかしながら、例えば、「液体が固体になると、粒子の動きは弱くなる」というような知識を中学生が予め持っており、知識の操作の段階に導入した操作的思考課題に上述の知識を適用したと考えれば、この課題は再生課題と捉えることもできる。つまり、中学生が持つ知識の状態によっては、学習活動に操作的思考課題を導入したからと言って、必ずしも知識の構造を変換させているとは限らないことに留意する必要がある。

5.3 まとめ

以上、本章では、中学校理科において、操作的思考課題と再生課題を学習活動に導入した M-LVK モデルと帰納的学習モデルに基づく状態変化の学習に関する授業を行い、それぞれの授業が「知識の直接的適用」、「知識の操作的適用」、「知識の制御的適用」に与える効果について検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 学習モデルによらず、すべての授業で知識の直接的適用については、それを促進する効果があることが示唆された。
- (2) 知識の操作的適用や制御的適用については、学習活動に操作的思考課題を組み込んだ M-LVK モデルに基づく授業で、他の授業より、促進効果があることが示唆された。
- (3) 上記の2点を総合すると、操作的思考課題を組み込んだ M-LVK モデルに基づく授業で、知識の直接的適用、操作的適用、制御的適用を促進する効果が認められた。したがって、これら3つのことをそれぞれ可能にするところまで学習者の知識水準が高められることに、帰納的学習モデルよりも M-LVK モデルに基づく授業が有効に作用すると示唆された。

しかしながら、操作的思考課題を導入した M-LVK モデルに基づく授業を行った後であっても、知識の操作的適用と制御的適用を問う問題の正答者数は、それぞれ6割と5割に留まっていることに留意する必要がある。また、本実践では、学習活動に操作的思考課題を組み込むことで知識の制御的適用が促されたが、この適用を問う問題で取り上げた誤った前提が、過去の習慣や経験から自動的に構成されるものであったとは考えにくいことを考慮すると、学習活動に操作的思考課題を導入するだけで、誤った前提がどのようなものであっても、それに基づく推論が抑制されると結論づけるのは早計であると考えられる。

6 操作的思考を促す教授的働きかけの汎用性についての検討

これまでの章では、例えば、「粒子の動き」と「物質の状態」などの科学的知識を構成する概念間の関係性を明確にする学習活動を検討したところ、操作的思考を促す教授的働きかけが、概ね学習成果に対してポジティブな影響を及ぼすことが示唆された。

そこで、本章では、操作的思考課題を導入した学習活動の汎用性について検討を試みる。具体的には、科学的知識を構成する概念間の関係性に類するものとして、公式を構成する変数間の関係性に着目し、その理解を促す操作的思考課題を導入した学習活動が公式を用いた数的処理に及ぼす効果を検証する。

6.1 公式に関する学習活動

公式に関する学習活動では、公式を暗記し、問題に対して機械的に適用するだけでは不十分であり、公式の意味を学習することが重要であると指摘されている（例えば、秋山・酒井, 2004; 澤・原田, 2011; 砂山ら, 2015 など）。

秋山・酒井（2004）は、面積を求める公式を導出する際に「面積の求め方が既知である図形に帰着させる」ことの重要性を述べている。また、澤・原田（2011）は、長方形や平行四辺形、三角形の求積について、「図形面積の公式の仕組み」までを一連の流れで学習できるコンテンツを制作している。このコンテンツにおける学習方略も、「面積の求め方が既知である図形に帰着させる」ことにあり、この方略は面積を求める公式の意味を学習する際に、よく用いられる方法と思われる。

また、砂山ら（2015）は、問題の構造をイメージしやすい図で表現し直感的に意味づけることを、問題と心理的に同型な図式で表現することと定義して、百分率や速さの公式がともに「比較量、基準量、割合」の3つの量で構成されていることを学習するシステムを開発している。

これらの研究では、取り上げている公式は異なるものの、具体的な図を繰り返し提示することで、公式の意味を学習者に理解させることを目的としている点で一致していると言えよう。しかしながら、進藤・麻柄（1999）や工藤（2003）が明らかにしているように、科学的知識を習得していたとしても、その知識に基づく論理変換操作を学習者が実行することは容易ではなかった。また、工藤（2005）によれば、正方形を変形させてできる平行四辺形の面積の変動方向を求める問題（等周長問題）に正答できるかどうかは、公式に関

する知識表象を論理変換できるかどうかによるとされる。つまり、等周長問題の場合、「底辺が同じで高さが小さくなる」という情報に基づき平行四辺形の求積公式である「面積 = 底辺×高さ」を論理変換すると「面積は小さくなる」という帰結が得られると考えられる。しかしながら、大学生であっても等周長問題に困難をきたす者が存在するという実態も報告されている。

したがって、公式についても、学習者が $y=ax$ という式を見て、「 y と x が比例している」と答えられるからといって、その知識表象である「 x の大きさに比例して、 y は大きくなる」を論理変換することは学習者にとって容易ではないと推察される。つまり、公式においても、その知識表象の論理変換を促すことで、学習者が公式を構成する変数間の関係性を明確に捉え、当該の公式の意味を理解することを促進できると考えられる。そこで次節では、公式を構成する変数間の関係性に着目し、その理解を促す操作的思考課題を導入した学習活動が公式を用いた数的処理に及ぼす効果について検討する。

6.2 操作的思考課題を導入した学習活動が公式の数的処理に及ぼす効果

6.2.1 問題と目的

公式がどのような知識表象で示されるのかを指摘できるからと言って、学習者にとって、その知識表象を論理変換することは難しいと考えられることは、前述の通りである。そこで、本節では、公式を構成する変数間の関係性に着目し、その理解を促す学習活動が公式を用いた数的処理に及ぼす効果について検討する。

公式を使用する上で、式に具体的な値を代入して未知の値を求められることも必要であるが、麻柄（2009）が指摘しているように、公式には事象あるいは概念が変数として示されており公式がそれら変数間の関係性を表しているという理解することは、式に値を代入して解を求められること以上に重要なことである。なぜなら、公式が変数間の関係性を表しているという理解は、例えば、「陸地に近づくと鳥を見かける」という命題における、前件の「陸地に近い」と後件の「鳥を見かける」の関係性の理解と関連していると思われるからである。加えて、公式や命題に対する上述のような理解の仕方は、「鳥を見た」という事実から、「陸地が近いだろうと考えることは確からしいことである」とのような推論を可能にすると思われるからである。2章でも述べた通りこのような推論は、パースによってアブダクションというタームで概念化されており、科学的探究の過程で重要な役割を果たすとされている（米盛, 2007）。つまり、科学的に探究する能力の育成において、公式を上述のように理解することは、重要な要素の1つと考えられる。

さて、麻柄（2009）は、公式に具体的な数値を代入しなければ、公式を用いることができないこと（代入処理）を問題視し、この原因について、小学5、6年生を対象に図形の面積の問題を用いた調査を行っている。その結果、具体的な数値を代入せず公式を用いること（関係処理）ができるようになるには、①図形の大きさの違いを「絶対把握（「例えば、1辺が2 cm と 4 cm の正方形の面積を比較するとき、後者の面積が前者よりも 12cm^2 大きい」のような把握の仕方）」ではなく「相対把握（「後者の面積が前者よりも4倍大きい」のような把握の仕方）」しようとする事、②面積差は保存されないが面積比は保存されること（例えば、底辺の長さが2 cm の2つの三角形で考えると、高さが2 cm と 4 cm, あるいは、5 cm と 10cm のように、「底辺が同じで、高さは片方が2倍」という条件が保持されていれば、高さの値がどのように変化しても「面積は2倍」という関係は保存される。一方、「底辺が同じで、高さは片方が2倍」という条件が保持されていても、前者の2つ三角形の面積差は 2cm^2 , 後者の面積差は 5cm^2 となり面積差は保存されない。麻柄（2009）

はこれを「差の非保存・関係保存」と呼んでいる)を理解することが必要であることを明らかにしている。しかしながら、本研究で対象とする中学2年生は、小学5、6年生よりも等式の性質や1次関数など、数と数の関係性についても多くのことを学習しており、関係処理ができるようになる要因として、麻柄(2009)と同様のことが言えるかどうかは定かではない。したがって、中学2年生が関係処理をできない原因を明らかにする必要があると考えられる。

ところで、岡田・麻柄(2013)は、麻柄(2009)の調査について、問題や対象者に偏りがあり、また、教育的介入を行っておらず教育実践上の意義が不十分であると指摘している。その上で、①調査問題に求積公式だけではなく、抽象的な代数の式を加えるとともに、対象を小学5年生だけではなく中学1年生を加えて、関係処理ができない学習者がどの程度いるのかを調査している。また、②中学2年生を対象に、求積公式に対する関係処理を可能にする教授的働きかけについて検討している。

その結果、上記①については、比例の単元を学習している中学1年生は、それを学習していない小学5年生程ではないものの、求積公式と代数の式の両方において関係処理に困難が生じている実態を明らかにしている。また、上記②については、長方形や平行四辺形、三角形の求積に関して、式変換に対応した図によって妥当性を示しながら(進藤・麻柄(2011)は、これを「実体化」と呼んでいる)、中学生の操作的思考を促す介入実践を行った結果、求積公式に対して関係処理を行える中学生が多くなるという知見を得ている。

「 p ならば q である」という知識が正しいとき、単に $p \rightarrow q$ を教示しただけでは考慮されにくい $p \rightarrow \text{非}q$ や $\text{非}p \rightarrow q$ などの誤った知識に着目させることや概念 p と q の対応関係の経験を積むことにより学習者の操作的思考を促すと、教示された知識の信頼度や有用感が上昇することや当該の知識の適用が促進されることは1章で述べた通りである(佐藤, 2008; 進藤・麻柄, 2011)。したがって、岡田・麻柄(2013)においても操作的思考を促すことで、学習者は求積公式に含まれる変数間の関係性を明確にでき、結果として関係処理を行える者が多くなったと考えられる。

しかしながら、岡田・麻柄(2013)では、公式の関係処理に関する調査問題の種類と学年を拡張し、教育的介入の方法を検討している点で意義はあるものの、以下の3点で不十分と考えられる。1つめは、関係処理の遂行結果が主な関心事であり、中学生が関係処理を行えない原因を明らかにしていないことである。2つめは、関係処理を可能にする教授的働きかけについて、「実体化」することを主な方略のひとつとしており、提案された教授

的働きかけの適用範囲は求積公式など「実体化」できる抽象度の低い式に限定されることである。3つめは、学校教育の現場における授業では、学習者にとって新規の事項が扱われているのがほとんどであるが、扱われている求積公式は中学2年生にとって既習事項ということである。つまり、既習事項を学び直す過程で有効とされる教授的働きかけが、新規事項を学ぶ過程において同様の効果を及ぼすかどうかは定かであるとは言えない。

以上のことを踏まえ、本研究では、中学2年生にとって初見であるオームの法則の公式について、①公式理解の実態をその原因を含めて明らかにすること、②関係処理を促す教授的働きかけについて検討し、その効果を検証することを目的とする。

なお、オームの法則の公式には、変数間の関係として比例と反比例の2つの関係が含まれている。つまり、固定する値によって学習者は、変数どうしを比例関係で結びつけたり、反比例関係で捉えたりする必要があり、関係処理を正しく行うことは容易でないと考えられる。このことは、麻柄（2008）でも示唆されている。また、測定機器を用いることで電圧の大きさなどを知ることはできるが、長さや面積などのように具体的なイメージを持つことは難しく、求積公式で底辺が2倍になれば図形の三角形や四角形の面積も2倍になることや底辺と高さがそれぞれ2倍になれば面積は4倍になることを「実体化」することは容易であるが、オームの法則の公式ではそれが困難であると思われる。このように関係処理が難しく、抽象度の高いオームの法則の公式の学習を対象とすることで、教育実践学的により意義のある知見が得られると考えられる。

6.2.2 公式理解の実態調査

a 目的

本研究では、比例や反比例を学習している中学2年生を対象に、初見のオームの法則の公式について代入処理や関係処理を行えるかどうか、公式把握の仕方、差の非保存や関係保存の理解の程度について、それぞれ検討する。

調査問題は、中学2年生で学習する $I=V/R$ (オームの法則) に即して、麻柄(2008,2009)を参考に作成した。なお、この調査では、電圧の大きさ (V) や抵抗の大きさ (R) が変化させた場合の電流の大きさ (I) について問うている。つまり、調査対象とする関係処理は、右辺の値が m 倍になったら左辺の値も m 倍になる比例関係と右辺の値が n 倍になったら左辺の値は $1/n$ 倍になる反比例関係の2つである。

b 方法

(1) 分析対象者

A中学校とB中学校の2年生それぞれ203名と142名の合計345名を分析対象者とした。

(2) 手続き

調査問題はA4判の冊子で出題し、問題の冒頭に、 I は電流、 V は電圧、 R は電気抵抗をそれぞれ示していると説明した上で、 $V=R \times I$ と $I=V/R$ で表される2つの式を併記して示しておいた。それに続いて、代入処理を問う問題2問(問題1)、関係処理を問う問題2問(問題2)、公式の把握の仕方を問う問題1問(問題3)、差の非保存と関係保存の理解をそれぞれ問う問題1問ずつ(問題4)を配置した。各問題の内容を以下で説明する。

なお、調査の実施にあたって、学校長の承諾を得るとともに、調査の結果が個人の成績に反映されないことや調査に参加したくない者は参加しなくてもよいことを説明した。

(3) 調査問題の内容

問題1の内容をFigure6-1に示す。この問題は、 $V=R \times I$ や $I=V/R$ の式に問題の中に示されている数値を代入して、未知の V や I の値を求めさせており、代入処理の遂行結果を問う問題である。

問題2の内容をFigure6-2に示す。この問題は、例えば、2つの回路における電流の大き

さと電気抵抗の大きさの関係についての情報をそれぞれ与え、電圧の大きさの関係を知るためには数値を代入する必要があるかどうかと、その遂行結果を問うている。この場合、 $V=R \times I$ の変数間の関係性を明確に理解していれば、与えられた電流の大きさと電気抵抗の大きさの関係についての情報を用いることで、数値を代入しなくても電圧の大きさがどのように変化するかを知ることができる。つまり、オームの法則の公式について、関係処

問題1 あとの問(1)と(2)に教えてください。

(1) 電気抵抗が 5Ω の抵抗器をつないだ回路で、電流の大きさを測定すると $2A$ でした。このとき、抵抗器に加えた電圧の大きさは何 V ですか。式と答えを書いてください。分からないときは、「分からない」と書いてください。

(2) 電気抵抗が 3Ω の抵抗器をつないだ回路に、 $6V$ の電圧を加えました。抵抗器を流れる電流の大きさは何 A ですか。式と答えを書いてください。分からないときは、「分からない」と書いてください。

Figure 6-1 問題1(代入処理問題)

問題2 下の回路アとイについて、あとの問(3)と(4)に教えてください。

回路ア

回路イ

(3) $I_A > I_I$, $R_A = R_I$ のとき、 V_A と V_I の関係は分かりますか。次の 1, 2 の中から選んで、○印をつけてください。分からないときは、5 に○印をつけてください。

1. 数値を代入すれば分かる 2. 数値を代入しなくても分かる 5. 分からない

上の選択肢で 1 または 2 を選んだ人 は、 V_A と V_I の関係を、次の 1 ~ 4 の中から選んで、○印をつけてください。

1. $V_A > V_I$ 2. $V_A = V_I$ 3. $V_A < V_I$ 4. 数値が示されていないので分からない

(4) $R_A > R_I$, $V_A = V_I$ のとき、 I_A と I_I の関係は分かりますか。次の 1, 2 の中から選んで、○印をつけてください。分からないときは、5 に○印をつけてください。

1. 数値を代入すれば分かる 2. 数値を代入しなくても分かる 5. 分からない

上の選択肢で 1 または 2 を選んだ人 は、 I_A と I_I の関係を、次の 1 ~ 4 の中から選んで、○印をつけてください。

1. $I_A > I_I$ 2. $I_A = I_I$ 3. $I_A < I_I$ 4. 数値が示されていないので分からない

Figure 6-2 問題2(関係処理問題)

理を行うかどうかとその遂行結果を問う問題である。

問題3の内容を Figure6-3 に示す。この問題は、2つの回路において、片方の回路の電気抵抗がもう一方の2倍であるとき、具体的な電気抵抗と電圧の値を示し、その結果として

問題3 下の図のように、種類の異なる抵抗器をつないだ回路ウとエをつくりました。回路エにつないだ抵抗器の電気抵抗は、回路ウにつないだ抵抗器の電気抵抗の2倍で、それぞれの抵抗器には、同じ大きさの電圧を加えました。

回路ウ

電気抵抗 R

回路エ

電気抵抗 2R

これを考えるために、回路ウには 2Ω の抵抗器をつなぎ、回路エには 4Ω の抵抗器をつなぎました。そして、それぞれの抵抗器に $8V$ の電圧を加えました。

回路ウの電流の大きさは、 $8 \div 2 = 4$ で、 $4A$ になります。

回路エの電流の大きさは、 $8 \div 4 = 2$ で、 $2A$ になります。

花子さんは、上の電流の大きさの値を使って、 $4A - 2A = 2A$ という計算をして、「回路ウの電流の大きさは、回路エの電流の大きさより $2A$ 大きい」と答えました。

太郎さんは、上の電流の大きさの値を使って、 $4A \div 2A = 2$ という計算をして、「回路ウの電流の大きさは、回路エの電流の大きさより 2 倍大きい」と答えました。

あなただったら、回路ウと回路エの電流の大きさを比べると、どちらの比べ方をしますか。次の1, 2から1つ選んで、○印をつけてください。分からないときは、5に○印をつけてください。

1. 花子さん 2. 太郎さん 5. 分からない

Figure 6-3 問題3(公式把握の仕方を問う問題)

問題4 下の回路図は、問題3と同じですが、回路オとカの抵抗器に加える電圧をさらに大きくしました。ただし、それぞれの抵抗器に加えた電圧の大きさは同じです。あとの問(5)と(6)に答えてください。

回路オ

電気抵抗 R

回路カ

電気抵抗 2R

(5) このとき、問題3と同じように、「回路オの電流の大きさは、回路カの電流の大きさより $2A$ 大きい」と言うことはできますか。次の1, 2から1つ選んで、○印をつけてください。分からないときは、5に○印をつけてください。

1. 言える 2. 言えない 5. 分からない

(6) このとき、問題3と同じように、「回路オの電流の大きさは、回路カの電流の大きさより 2 倍大きい」と言うことはできますか。次の1, 2から1つ選んで、○印をつけてください。分からないときは、5に○印をつけてください。

1. 言える 2. 言えない 5. 分からない

Figure 6-4 問題4(保存関係の理解を問う問題)

求められるそれぞれの回路の電流の大きさについて、「○A 大きい」と把握しようとするのか、あるいは「○倍大きい」と把握しようとするのかを確かめている。したがって、これは、2つの回路を流れる電流の大きさについて、その関係を絶対把握しようとするのか、あるいは相対把握しようとするのかを確認する問題である。

問題4の内容を Figure6-4 に示す。この問題は、問題3と同じ条件の2つの回路に加える電圧を大きくするとき、2つの回路に流れる電流の大きさを比較すると、問題3と同じように「○A 大きい」や「○倍大きい」が成り立つかどうかをそれぞれ確認している。つまり、2つの回路を流れる電流の大きさに関する差の非保存や関係保存の理解（保存関係の理解）を問う問題である。

c 結果と考察

問題1（代入処理問題）

各問の正答者数を Table6-1 に示す。直接確率計算によると、問1、問2ともに正答者数が有意に多かった（両側検定, $p < .01$ ）。このことから、初見のオームの法則の公式であっても、数値が示されていれば、式に値を代入して解を求められる者が多いことが分かる。したがって、公式一般について、中学2年生は、代入処理を適切に遂行できる者が相対的に多いと推察される。

Table 6-1 問題1の正答者数(人)

問1		問2	
正	誤	正	誤
220 (63.8%)	125 (36.2%)	201 (58.3%)	144 (41.7%)

問題2（関係処理問題）

学習者が行った処理とその遂行結果の関係を Table6-2 に示した。ただし、問3、問4ともにそれぞれの最初の選択肢で（Figure6-2 参照）、1を選択していれば「代入処理」、2を選択していれば「関係処理」、5を選択していれば「分からない」に分類した。「分からない」と回答した学習者が最も多く、全体の半数近くを占めていた。また、問ごとに「分からない」と回答した者を除いて χ^2 検定を行ったところ、問3、問4ともに分布の偏りが有意であった（問3： $\chi^2(1)=37.55, p < .01$ ；問4： $\chi^2(1)=7.23, p < .01$ ）。残差分析によると、両方の問で関係処理を行った学習者で、遂行結果も正しい者が多く（問3：調整された残差=6.27,

$p<.01$; 問4：同上, 2.84, $p<.01$), 代入処理を行っている学習者では, 遂行結果の正しい者が少なかった (問3：同上, -6.27, $p<.01$; 問4：同上, -2.84, $p<.01$)。

Table 6-2 問題2の解答者数の分布(人)

処理の種類	問3 (比例関係)		問4 (反比例関係)	
	正	誤	正	誤
関係処理	84 (24.3%)	15 (4.3%)	52 (15.1%)	32 (9.3%)
代入処理	43 (12.5%)	59 (17.1%)	40 (11.6%)	58 (16.8%)
分からない	144 (41.7%)		163 (47.2%)	

これらのことから, 関係処理を行えない中学2年生は, 数値が示されていない状況下では, オームの法則の公式をどのように扱えばよいのか分からない者が多く, また, それが分かったとしても, この公式が示す変数間の関係性を理解していなければ, オームの法則の公式を正しく使用できる者が少ないと言える。したがって, 公式一般についても数値が示されていないければ, その公式を使用することが困難であると推察される。

問題3 (公式把握の仕方を問う問題)

相対把握をしている学習者が148名(42.9%), 絶対把握をしている者が105名(30.4%), 「分からない」と解答した者が92名(26.7%)であった。 χ^2 検定を行ったところ, 分布の偏りが有意であった ($\chi^2(2)=14.94, p<.01$)。多重比較によると, 相対把握をしている学習者が, 絶対把握している者や「分からない」と解答した者よりも5%水準で有意に多いことが分かった。このことから, 中学2年生では, これまでの比例や反比例の学習を通して絶対把握から相対把握への移行が比較的進んでいると考えられる。

問題4 (公式における保存関係の理解を問う問題)

差の非保存を理解している者は126名(36.5%), 関係保存を理解している者は116名(33.6%)であった。直接確率計算によると, 差の非保存や関係保存を理解している者は少なかった (両側検定, $ps<.01$)。このことから, 比例や反比例の関係を表す公式について, 中学2年生は, 例えば電圧の大きさを2倍にすれば, もとの電圧の大きさにかかわらず, いつでも電流の大きさの差は一定になると誤った理解をしている者や片方の値が2倍になればもう一方の値も2倍になることを理解していない者が相対的に多いことが分かる。

問題2と問題3や問題4の関連について

問題2の両方の間で、関係処理を正しく行った学習者（45名）について、公式の把握の仕方（問題3）と公式における保存関係の理解（問題4）についてクロス集計をした。その結果を Table6-3 に示す。ただし、「○」印は公式における保存関係を理解していること、「×」印はそれを理解していないことをそれぞれ示している。

Table 6-3 関係処理を行った学習者における問題3と問題4の関連

問題3	問題4			
	問5（差の非保存の理解）		問6（関係保存の理解）	
	○	×	○	×
相対把握	21	4	21	4
絶対把握	8	8	9	7
分からない	2	2	1	3

まず、適切に関係処理を実行した者では、相対把握をしている者が25名、相対把握をしていない者が20名であった。これについて、直接確率計算を行ったが、相対把握をしている人数とそうでない人数に有意な差は認められなかった（両側検定, *n.s.*）。

次に、問5、問6それぞれについて χ^2 検定を行ったところ、どちらも分布の偏りが有意であった（問5： $\chi^2(2)=5.99, p<.05$ ；問6： $\chi^2(2)=7.45, p<.05$ ）。残差分析によると、問5では、相対把握をしている者で差の非保存を理解している者が多く（調整された残差=2.45, $p<.05$ ）、絶対把握をしている者では、差の非保存を理解している者が少なかった（同上, -2.03, $p<.05$ ）。また、問6では、相対把握をしている者で関係保存を理解している者が多く（同上, 2.45, $p<.05$ ）、問題3で「分からない」と答えた者で関係保存を理解している者が少なかった（同上, -1.99, $p<.05$ ）。

これらのことより、まず、関係処理を行える学習者は、概ね公式の変数間の関係を相対把握し、差の非保存や関係保存を理解していると言え、このことは、麻柄（2009）の結果を支持している。

一方で、関係処理を行える者でも相対把握をしていない者が相当数いることが明らかになった。加えて、これらの学習者では相対的に差の非保存や関係保存を理解している者が少ない。したがって、公式の関係処理を可能とするには、公式について相対把握をすることや差の非保存、関係保存の理解を促すために、変数間の関係性を適切に捉えさせる学習活動を検討する必要があると考えられる。

6.2.3 関係処理を促す介入実践

a 目的

前項の公式理解の実態調査から、中学2年生においても、公式について代入処理は行えても、関係処理問題（問題2）で「分からない」と解答している者の割合が最も高いことから（Table6-2 参照）、数値が示されていなければ公式を使用できない者が相対的に多いという実態が示唆された。また、公式について相対把握をしたり、差の非保存や関係保存を理解したりすることを促すことで、公式の関係処理が可能になると考えられた。これらのことを踏まえて、学習者の関係処理を促す教授的働きかけについて検討する。

オームの法則の公式において、相対把握をしたり、差の非保存や関係保存を理解したりすることを促すためには、学習者が公式に含まれる変数間の関係性を明確に捉える必要があると考えられる。なぜならば、 $I = V / R$ で V が2倍になれば I も2倍になることや、 R が3倍になれば I は $1/3$ 倍になるというような捉え方ができなければ、学習者は電圧を大きくする時の電流 I の変化について、「 $\bigcirc A$ ずつ大きくなる」という捉え方や電気抵抗の大きさに依らず電流の大きさの差はいつでも一定になると誤った理解をしてしまうと思われるからである。

前述の麻柄・進藤（2011）では、「日本海を通過するとき季節風はその距離に応じた量の水蒸気を吸い込み、日本海側に雪を降らせる」という命題に即した操作的思考を促すことで、「季節風が日本海を通過する距離」と「降雪量」の関係性が明確になることが示唆されていた。オームの法則の公式についても、例えば、 $I = V / R$ は「電流は電圧の大きさに比例して大きくなる」と「電流は電気抵抗の大きさに反比例して小さくなる」という2つの命題を式で表したものであると捉えられる。つまり、これらの命題に即して操作的思考を促すことができれば、学習者は「電流の大きさ」と「電圧の大きさ」や「電流の大きさ」と「電気抵抗の大きさ」の関係性を明確に理解できると考えた。

そこで、本実践では、操作的思考課題を学習活動に導入した教授的働きかけを行い、学習者がオームの法則の公式を用いるときに関係処理を適切に行えるようにすることを目的とする。

b 方法

(1) 分析対象者

A中学校とB中学校の2年生それぞれ198名と145名を分析対象者とした。

(2) 手続き

オームの法則を学習する理科の授業で、A中学校では介入実践（約50分×3回）、B中学校では介入を企図しない実践（約50分×3回）をそれぞれ行った。そして、授業後1週間以内に事後調査を実施した。なお、事後調査の実施については、学校長の承諾を得るとともに、調査の結果が個人の成績に反映されないことや調査に参加したくない者は参加しなくてもよいことを説明した。

以後、A中学校で介入実践を行ったという意味でA中学校の学習者集団を実験群、B中学校では介入実践を行っていないという意味でB中学校の学習者集団を対照群と区別して記す。

(3) 授業の概要

オームの法則に関する学習の標準配当時数は、基本的内容に3時間、応用的内容に1時間とされている（塚田ら, 2012）。本実践では、オームの法則に関する基本的内容の学習を

時	実験群	対照群
1	電流の大きさと電圧の大きさの関係 ・電圧を大きくすると、抵抗器を流れる電流の大きさはどのように変化しますか。 ・流れた電流の大きさと抵抗器に加えた電圧の大きさとの間にはどのような関係があると言えますか。そのように考えた理由もかきましよう。	電流と電圧の大きさの関係 ・電圧を大きくすると、抵抗器を流れる電流の大きさはどのように変化しますか。
2	電流の大きさと電流の流れにくさの関係 ・抵抗器アと抵抗器イに同じ電圧を加えると、流れる電流はどちらの方が大きいと言えますか。 ・課題1 抵抗器アと抵抗器イでは、どちらの電気抵抗が大きいと言えますか。[関係操作的思考課題] ・課題2 回路aでは豆電球が暗くなり、回路bでは豆電球の明るさが変化しないのはなぜでしょう。電気抵抗の考え方を使って説明ましよう。[関係操作的思考課題]	電流の大きさと電流の流れにくさの関係 ・流れた電流の大きさと抵抗器に加えた電圧の大きさとの間にはどのような関係があると言えますか。 ・抵抗器アと抵抗器イは、それぞれ何Ωですか。
3	オームの法則の利用 ・課題3 回路cと回路dで、それぞれ電圧の大きさや電流の大きさを求めましよう。[抽象度操作的思考課題] ・課題4 ①抵抗器に5Vの電圧を加えると0.4Aの電流が流れました。この抵抗器に、20Vの電圧を加えると抵抗器を流れる電流の大きさは何Aですか。②電源に電気抵抗が4Ωの抵抗器アをつなぐと25Aの電流が流れました。同じ電源に20Ωの抵抗器イをつなぐと、抵抗器イを流れる電流の大きさは何Aですか。[変数操作的思考課題]	オームの法則の利用 ・回路cと回路dで、それぞれ電圧の大きさや電流の大きさを求めましよう。

Figure 6-5 各群の学習内容と課題

取り上げているので、実験群と対照群それぞれで3時間の授業を行った。実験群と対照群の学習内容と課題を Figure6-5 に示す。

実験群と対照群で課題の数に違いがある。実験群では、電気抵抗やオームの法則について簡潔に教示をすることで、学習者が課題に取り組む時間を確保した。一方、対照群では、学習者がオームの法則の公式を用いて電流や電圧、電気抵抗の値を求められるように丁寧な説明をした。

実験群の学習活動

第1時では、抵抗器（電気抵抗がそれぞれ異なる2つの抵抗器を使用）に加える電圧を変化させ、電流の大きさを調べる実験を行わせた。そして、実験結果をグラフで示させ、電圧が大きくなると電流が大きくなることを確かめさせた。その上で、「電流は電圧の大きさに比例して大きくなる」ことを教示した。

第2時では、まず、電気抵抗が大きくなると、電流は小さくなることを説明した。次に、第1時で表したグラフを根拠に、2つの抵抗器に同じ大きさの電圧をそれぞれ加えると、流れる電流はどちらが大きいかを考えさせた。そして、それぞれの電流の大きさを根拠に、どちらの抵抗器の電気抵抗が大きいかを予想させた（課題1）。また、乾電池と1つの豆電球をつないだ回路に2つめの豆電球を、片方は直列につなぎ（回路a）、もう一方は、並列につないだ（回路b）上で、回路aでは豆電球が暗くなるのに対し、回路bでは豆電球の明るさが変化しない理由を説明させた（課題2）。最後に、「電流は電気抵抗の大きさに反比例して小さくなる」ことを教示した。

第3時では、電流が電圧の大きさに比例して大きくなることと電気抵抗の大きさに反比例して小さくなることを1つの式で示すと、 $I=V/R$ （オームの法則の公式）で表されることを説明した。そして、この式を用いて、電圧の大きさが分からない回路と電流の大きさが分からない回路の電圧と電流をそれぞれ求めさせた（課題3）。最後に、電流の大きさを求める課題を2問考えさせた（課題4）。ただし、課題4は、示された値を $I=V/R$ に代入してもしなくても電流の大きさを求められるようにした。

対照群の学習活動

第1時では、抵抗器に加える電圧の大きさを変化させると、電流の大きさがどのように変化するかを予想させた。その上で、電圧の大きさと電流の大きさの関係を調べる実験を

行わせ、抵抗器（電気抵抗がそれぞれ異なる2つの抵抗器を使用）に加えた電圧の大きさと抵抗器を流れる電流の大きさを記録させた。

第2時では、前時の実験結果をもとに、電圧の大きさと電流の大きさの関係をグラフで示させた。次に、グラフから分かることを考えさせた上で、「電流の大きさは電圧の大きさに比例する」ことを教示した。そして、2つの抵抗器について、電流を流しにくいのはどちらかを考えさせ、電気抵抗について説明した。その上で、電気抵抗 (Ω) = 加えた電圧 (V) / 流れた電流 (A) を使って、第1時の実験で用いた抵抗器の電気抵抗の大きさをそれぞれ求めさせた。

第3時では、 $V=R \times I$ または $I=V/R$ の式でオームの法則を表すことができることを教示し、電圧の大きさが分からない回路と電流の大きさが分からない回路の電圧と電流をそれぞれ求めさせた。

介入実践に導入した課題と操作的思考の関連

工藤 (2010a) が、操作的思考を操作の内容により大きく「変数操作的式思考」、「関係操作的思考」、「抽象度操作的思考」に分類する案を示していることは、1章で述べた通りである (Table1-1 参照)。この枠組みにより、本実践に導入した操作的思考課題について説明する。

課題1と課題2 (Figure6-5 参照) では、教示した「電気抵抗が大きくなると、電流は小さくなる」という命題の後件の値だけが与えられており、学習者はこの値を根拠に前件の値を求める必要がある。つまり、学習者は抵抗器を流れる電流が小さくなることや豆電球が暗くなる事象の原因を説明する必要がある。したがって、学習者は命題に即して2つの事象間の因果関係について操作する必要があると、関係操作的思考を促されていると言える。

課題3 (Figure6-5 参照) では、学習者は、オームの法則の公式の変数項に具体的な数値を代入する操作が必要であり、抽象度操作的思考を促されている。一方、課題4は、課題3と同様に数値を代入しても解決できるが、電流と電圧や電流と電気抵抗の関係性に注目すれば、数値を代入しなくても解決できる課題である。例えば、オームの法則の公式は、「電流は電圧の大きさに比例して大きくなる」ことを示していることを利用すれば、課題4の間① (Figure6-5 参照) では、電圧の大きさが5倍になっているので、電流の大きさも5倍になることを見出すことができる。つまり、学習者は片方の変数の変動方向により、もう一方の変数の変動方向を操作する必要があると、変数操作的思考を促されていると言え

る。

以上のことから、介入実践では3種類の操作的思考課題を行わせることにより、実験群では課題に応じて学習者の操作的思考を促していると考えられる。

(4) 事後調査

前項の公式理解の実態調査に用いた問題 (Figure6-1, 6-2, 6-3, 6-4 参照) と同じ構成であり、A4判の冊子で出題した。

c 結果と考察

問題1 (代入処理問題)

各問の正答者数を Table6-4 に示す。 χ^2 検定の結果、問1で分布に有意な偏りがあった ($\chi^2(1)=9.36, p<.01$)。一方、問2では分布に有意な偏りは認められなかった ($\chi^2(1)=1.31, n.s.$)。残差分析によると、問1で実験群の正答者数が多かった (調整された残差=3.26, $p<.01$)。これは、介入実践の課題3 (代入処理で解く課題) や課題4 (代入処理でも解ける課題) で、学習者が繰り返し代入処理を行っている可能性があり、それが影響していると考えられる。何れにしても、適切な代入処理の実行について、群間で差があると言える。

Table 6-4 問題1の正答者数(人)

群	問1		問2	
	正	誤	正	誤
実験群	190 (96.0%)	8 (4.0%)	182 (91.9%)	16 (8.1%)
対照群	125 (86.2%)	20 (13.8%)	127 (87.6%)	18 (12.4%)

そこで、以下では、実験群と対照群の差異を考慮して、代入処理を正しく行ったと見なせる者 (問題1で2問とも正答した者) を分析対象者とする。したがって、実験群182名 (実験群の93.3%)、対照群122名 (対照群の84.1%) が、以下における分析対象者である。

問題2 (関係処理問題)

問3と問4で、学習者が行った処理の種類と遂行結果について調べた。その結果を Table6-5 と Table6-6 にそれぞれ示す。ただし、問3、問4ともにそれぞれの最初の選択肢で (Figure6-2 参照)、1を選択していれば「代入処理」、2を選択していれば「関係処理」、5を選択していれば「分からない」に分類した。

Table 6-5 問3の正答者数(人)

群	問3 (比例関係)				
	関係処理		代入処理		分からない
	正	誤	正	誤	
実験群	85 (46.7%)	17 (9.3%)	37 (20.3%)	29 (15.9%)	14 (7.7%)
対照群	32 (26.2%)	13 (10.7%)	20 (16.4%)	36 (29.5%)	21 (17.2%)

Table 6-6 問4の正答者数(人)

群	問4 (反比例関係)				
	関係処理		代入処理		分からない
	正	誤	正	誤	
実験群	70 (38.5%)	22 (12.1%)	32 (17.6%)	32 (17.6%)	26 (14.3%)
対照群	29 (23.8%)	16 (13.1%)	13 (10.7%)	29 (23.8%)	35 (28.7%)

問ごとに χ^2 検定を行ったところ、問3、問4ともに有意な分布の偏りがあった(問3： $\chi^2(4)=20.73, p<.01$; 問4： $\chi^2(4)=16.21, p<.01$)。残差分析によると、問3では、実験群で関係処理を正しく行った者が多く(調整された残差=3.60, $p<.01$)、「分からない」と解答した者が少なかった(同上, -2.55, $p<.05$)。加えて、代入処理を行った学習者では、その遂行結果が誤っている者が少ない有意傾向があった(同上, -2.83, $p<.10$)。また、問4では、実験群で関係処理を正しく行った者が多く(同上, 2.68, $p<.01$)、「分からない」と解答した者が少なかった(同上, -3.07, $p<.01$)。加えて、代入処理で適切に遂行した者が多い有意傾向があった(同上, 1.67, $p<.10$)。

実験群では、正しく関係処理を行えている者が多い。また、問3で、代入処理を適切に行えない者が少なかった。加えて、問4では代入処理で適切な遂行結果を得ている者が多い傾向があった。ここで行われている代入処理は、任意の数値を代入する必要があり、問題に記された値を単純に代入するような処理ではない。つまり、関係処理で得られる結果に自信の持てない学習者の一部は、任意の数値を代入することにより、関係処理で得られる結果の妥当性を確かめていると考えられる。このような学習者の存在は、岡田・麻柄(2013)が想定している関係処理が可能となるまでの3段階プロセス(①与えられた数値を公式に代入して答をだせる段階、②任意の数値を自分で公式に当てはめて考える段階、③数値なしに処理が可能段階)を支持している。したがって、これらの者も含めて、実験群の学習者は介入実践により、オームの法則の公式に対して与えられた値を代入して答えを算出するような代入処理から関係処理を行える段階への移行を促されていると思われる。

問題3（公式把握の仕方を問う問題）

公式の把握の仕方について調べた結果を Table6-7 に示す。 χ^2 検定を行ったところ、分布に有意な偏りがあった ($\chi^2(2)=7.45, p<.05$)。残差分析によると、実験群で「分からない」と解答した者が少なかった（調整された残差=-2.73, $p<.01$ ）。また、相対把握をしていると見なせる者（同上, 1.05, *n.s*）や絶対把握をしていると見なせる者が多い（同上, 0.69, *n.s*）とは言えなかった。したがって、介入実践により相対把握あるいは絶対把握のいずれかをしようとする方向の促進的効果はあったと言えるが、絶対把握から相対把握への移行に及ぼす介入実践の効果を認めるには至らなかった。

Table 6-7 問題3の解答者数の分布(人)

群	相対把握	絶対把握	分からない
実験群	111 (61.0%)	59 (32.4%)	12 (6.6%)
対照群	67 (54.9%)	35 (28.7%)	20 (16.4%)

問題4（公式における保存関係の理解を問う問題）

差の非保存や関係保存を理解している者の数を調べた。その結果を表 Table6-8 に示す。ただし、「○」印は公式における保存関係を理解していること、「×」印はそれを理解していないことを示している。

Table 6-8 問題4の正答者数(人)

群	問5（差の非保存の理解）		問6（関係保存の理解）	
	○	×	○	×
実験群	110 (60.4%)	72 (39.6%)	107 (58.8%)	75 (41.2%)
対照群	55 (45.1%)	67 (54.9%)	59 (48.4%)	63 (51.6%)

問5と問6それぞれについて χ^2 検定を行ったところ、問5で分布の偏りが有意であった ($\chi^2(1)=6.34, p<.05$)。また、問6では、分布の偏りが有意傾向であった ($\chi^2(1)=2.80, p<.10$)。残差分析によると、問5では、実験群で差の非保存を理解している者が多かった（調整された残差, 2.64, $p<.01$ ）。問6では、実験群で関係保存を理解している者が多い傾向が認められた（同上, 1.79, $p<.10$ ）。これらのことから、実験群で行った介入実践は、差の非保存や関係保存の理解を促したと考えられる。

6.2.4 総合考察

本研究の目的は、オームの法則の公式に即して、①中学生の公式理解の実態をその原因を含めて明らかにし、②学習者にとって新規であり、抽象度の高い公式を学ぶ場面で、関係処理を促す教授的働きかけの効果を検証することであった。

①については、麻柄（2008）や岡田・麻柄（2013）でも明らかにされているように、関係処理を正しく遂行することは中学2年生でも困難である実態が示された。また、その原因については、麻柄（2009）が小学5年生について明らかにしているように、中学2年生では、特に差の非保存や関係保存の理解が十分でないことが示唆された。

麻柄（2009）や岡田・麻柄（2013）は、公式に数値を代入して解を求められれば、変数間の関係を理解できていると暗黙裡に考えられていると指摘し、それを問題視している。実際、本研究でも、公式を用いた代入処理を行えているからと言って、式の変数間の関係性を理解している者は多いとは言えなかった。つまり、学習者は、公式一般について変数の意味やその関係性について考えることなく、公式に手続き的知識を正確に適用するような定型的問題解決（藤村, 2012）を行っていると思われる。そして、そこには、学習とは「知識の増大や暗記と再生、適用」であるという浅い学習観（Marton et al., 1993）の存在が推察される。

また、廣瀬ら（2013）によると、「公式とは機械的に暗記するものだ」という公式観は、やがて「どの公式を使えばよいのかが分からなくなる」などの「公式への困惑」を強めるとされている。その上で、「公式への困惑」を感じることによって、学習そのものを行わなくなる可能性が指摘されている。

したがって、公式を学ぶ場面においても、学習者に「学習は意味を理解すること」であるというような深い学習観（Marton et al., 1993）を持たせ、継続的に学習に取り組ませるために、変数の意味を理解させ、公式における変数間の関係を意味づけることで、学習者が関係処理を行えるような教授的働きかけを実践することが必要であると言える。このことは科学教育における課題と思われる。

②については、実験群で関係処理問題を正しく遂行できた者が多いことや差の非保存・関係保存の理解が促されていることから、本研究で行った介入実践により、学習者は公式における変数間の関係性の理解を促進されることが示唆された。このことは、学習者の関係処理を促す教授的働きかけとして、操作的思考を促す方略が「実体化」できる具体的な公式だけではなく、学習者が新規に学習する抽象度の高い公式にも適用できることを意味

しており、学習者に上述した深い学習観を持たせるという点においても、継続して学習に取り組ませる点においても、本研究で得られた示唆は教育実践的に意義があると考えられる。

最後に、本研究の課題について2点述べる。1つめは、麻柄（2009）も既に指摘しているのだが、関係処理を可能とする要因として相対把握を行うことと差の非保存や関係保存を理解すること以外の要因を検討する必要があるということである。なぜなら、実験群の代入処理を正しく行えた者では、相対把握をしている者は111名（61.0%）、差の非保存と関係保存をともに理解している者は89名（49.0%）であるのに対し、問題2で2問とも関係処理で適切な遂行結果を得ている者は61名（33.5%）に留まっている。このことから、関係処理ができるようになるには、これまで知られている要因とは異なる別の要因が関与している可能性も否定できないと言える。

2つめは、公式における変数間の関係性の理解を促す操作的思考課題について、どのような種類の課題でどのように学習活動を行わせるのかなど、操作的思考課題を授業へ導入する際の各種条件について、引き続き検討していく必要があるということである。これらを工夫することで、公式の変数間の関係性をより明確に理解させることが期待できるであろう。

6.3 まとめ

以上、本章では、オームの法則の公式に即して、①中学生の公式理解の実態をその原因を含めて明らかにし、②学習者にとって新規であり、抽象度の高い公式を学ぶ場面で、関係処理を促す教授的働きかけの効果を検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 中学2年生は、比例や反比例を既に学習しているにもかかわらず、初見の公式に対して、適切に代入処理は行えるが関係処理を実行できない実態が示唆された。特に、中学2年生では、公式における保存関係の理解が十分ではなかった。
- (2) 公式を使った代入処理を適切に実行できているからと言って、公式の変数間の関係性を理解しているとは言えないことが示唆された。つまり、比例や反比例などの学習においても、学習者が変数間の関係性を深く学ぶ機会は少なく、「一方の数が2倍になれば、もう一方の数も2倍になる」ことなどを機械的に記憶し適用できれば良い、とする公式観を学習者が持っていることが推察された。
- (3) 操作的思考課題を授業に導入することで、公式の変数間における関係性の理解を促されることが示唆された。このことは、操作的思考を促す教授的働きかけが、新規に学習する抽象度の高い公式にも適用できることを意味している。
- (4) 操作的思考を促す教授的働きかけが、学習者に深い学習観を持たせ得ることが示唆された。

しかしながら、関係処理を促す介入実践を通して関係処理を適切に行える者が多くなったとは言え、そのような学習者は全体の3割強に留まっており十分とは言えない。また、学習者が代入処理から関係処理を実行可能になる3段階プロセスを支持する結果が得られたものの、そのプロセスの詳細は明確にはなっていない。したがって、これを明らかにすることで、操作的思考課題を授業へ導入する際の各種条件を見い出すことにつながり、公式の変数間の関係性をより明確に理解させる手立ての開発に結びつくと考えられる。

7 結論及び今後の課題

7.1 本論文の研究で得られた知見

本論文の目的は、①科学的知識の獲得に対し、操作的思考を促す教授的働きかけが効果的に作用する学習モデルの検討、②上記①で提案された学習モデルに基づく授業が科学的知識の理解に及ぼす効果とそのプロセスの検証、③操作的思考を促す教授的働きかけの汎用性に関する検討の3つであった。

1章では、操作的思考に関する先行研究を整理し、学習者の操作的思考の不十分さや操作的思考を促す教授的働きかけが学習成果に及ぼす影響についてまとめた。2章では、操作的思考を促す教授的働きかけが効果的に作用する学習モデルについて検討し、知識検証学習モデル（LVKモデル）を提案した。

3章では、LVKモデルに基づく状態変化に関する授業を行い、この授業が科学的知識の想起や適用に与える効果と当該の知識を構成する概念間の関係性を理解するプロセスを明らかにした。4章では、3章で得られた知見に基づいてLVKモデルを修正した修正版知識検証学習モデル（M-LVKモデル）を提案するとともに、M-LVKモデルに基づく金属に関する授業を行い、この授業が科学的知識の想起や適用に与える効果と学習者が科学的知識を獲得するプロセスを明らかにした。5章では、知識の想起や適用ができるかどうかという観点で学習成果を測定するのはその枠組みが限定的であるとする批判に応えるため、知識の直接的適用、操作的適用、制御的適用という枠組みで、M-LVKモデルに基づく状態変化に関する授業が学習成果に与える効果を明らかにした。また、M-LVKモデルに基づく授業と帰納的学習モデルに基づく授業を比較し、学習成果に対してM-LVKモデルが有効に作用することを明らかにした。

そして、6章では、操作的思考を促す教授的働きかけの汎用性について検討するために、操作的思考課題を導入した学習活動が公式の数的処理に及ぼす影響について調べた。具体的には、オームの法則の公式を取り上げ、中学生の公式理解の実態とその原因を明らかにした。また、操作的思考課題を導入したオームの法則に関する授業を行い、この授業が公式における保存関係の理解を促し、関係処理を促進することを明らかにした。各章で得られた知見を以下に整理する。

7.1.1 科学的知識の獲得を促す学習モデルの検討

2章では、小・中学校における科学教育の課題について、学習活動で行われている推論

に着目して、学習者の科学的探究能力を育成するという観点から検討した。小・中学校の理科や算数、社会科の教科書の記述内容を検討したところ、これらにおける学習活動は、まず、実験や観察、資料を利用することで理解させたい科学的知識に関わる事例を集め、次に、収集した事例を比較して、そこから一般法則を導き出す帰納的な2段階のプロセスでデザインされている傾向が示唆された。

また、科学的知識を問題に適用するプロセスについて、その推論過程を中心に具体例を考察した。操作的思考に関する先行研究（佐藤,2008; 麻柄・進藤,2011）における科学的知識の適用プロセスを検討したところ、学習者が当該の知識を構成する概念間にある関係性を理解することで、その知識を前提とした学習者の演繹推論の実行可能性が高まることや、誤った知識に基づく推論が抑制されることが示唆された。このことから、操作的思考課題を学習活動に組み込むことは、学習者が科学的知識を使用しない要因を減じる方法の1つとして効果的であると示唆された。これらの示唆に基づき、パースの科学的探究の過程（米盛,2007）を背景とする科学的知識を効果的に獲得させることを目的としたLVKモデルを提案するに至った。

7.1.2 知識検証学習モデルによる授業の効果

3章では、中学校理科における状態変化の学習でLVKモデルに基づく授業を行い、この介入実践が科学的知識の想起と適用に与える効果と、操作的思考課題の解決過程において学習者が当該の知識を構成する概念間の関係性を理解するプロセスの検討を行った。

その結果、事前調査から事後調査にかけて、科学的知識の想起問題や適用問題の正答者数が増加していることから、介入実践が「粒子の動きが変化すれば、物質の状態は変化する」という科学的知識を構成する「粒子の動き」と「物質の状態」の間にある関係性の理解を促すことが示唆された。

一方、プロトコル分析から、科学的知識と既有知識の相互作用が生起した場合に、既有知識は科学的知識の枠組みの中に統合されるが、それが不十分であると科学的知識と既有知識は、たがいに独立した知識として構造化されることが示唆された。

また、知識想起問題の正答者22名（64.8%）のうち知識適用問題のすべての問に正答している者は11名（32.4%）に留まっており、絶対的に多いとは言えなかった。その原因として、科学的知識の適用問題において、学習者が問ごとに適用する知識を変化させることもあるということや、学習者は科学的知識（①温度が変化すれば、粒子の動きが変化する

こと、②粒子の動きが変化すれば、物質の状態は変化すること）と問題に答えるために必要な情報（温度を変えること）を正しく認識していても、既有知識により科学的知識に基づく論理操作の結果が制限され、正しい帰結を選択しないことが考えられた。

これらのことから、既有知識を科学的知識の枠組みに統合させるためには、科学的知識と既有知識の相互作用を生起させるプロセスを LVK モデルに基づく学習活動に組み込む必要があると示唆された。

7.1.3 修正版知識検証学習モデルによる授業の効果

4章では、まず、「二重推想法」と呼ばれる教授モデル（麻柄, 1999）を参考に、科学的知識と既有知識の相互作用を生起させるプロセスを組み込んだ M-LVK モデルを示した。そして、中学校理科における金属の学習において M-LVK モデルに基づく授業を行い、介入実践が科学的知識の想起や適用に及ぼす効果と、学習者が当該の知識を獲得するプロセスについて検討した。

科学的知識の想起や適用に及ぼす効果については、「金属は光沢を持つ」という知識を想起させる問の正答者数が、介入実践を行った実験群よりも対照群の方が多いという結果も見られたが、当該の知識の適用については、知識適用問題 40 問のうち 17 問で、対照群より実験群で正答者数が多かった。また、正答者数が 7 割を上回っている問は、対照群では 16 問に留まっているのに対して、実験群では 33 問と相対的に多かった。加えて、科学的知識の想起と適用の関連では、知識の想起と適用をできている者がすべての問について実験群で多く、対照群では知識を想起できているにもかかわらず、それを適用できていない者が多い問も 2 つあった。これらのことから、介入実践が金属に関する科学的知識を構成する概念間にある関係性の理解を促すことや、既有知識を科学的知識の枠組みに統合させることに対して有効に作用することが示唆された。

科学的知識の獲得プロセスについては、知識の操作、演繹的立証、帰納的検証のプロセスを通して、「金属」と「光沢を持つもの」や「金属」と「電気を通すもの」という概念間の関係性を理解すると推察された。ある学習者の授業後の感想から、対象の物質が「金属である」ことを媒介として、「光沢を持つもの」と「電気を通すもの」の間に関係性を見出せることや、「折り紙」と「金属ではない」の関係性は必ずしも正しいとは言えないことを理解していると思われた。つまり、この学習者の場合、「金属」と「電気を通すもの」の間に潜在的なリンクを形成していると考えられる。したがって、問題に答える場面において、

このリンクが顕在化した結果、科学的知識が経験的に構成しやすいと思われる「折り紙＝金属ではないもの」などのメンタルモデルを抑制していると考えられ、学習者は科学的知識を一般化していることが推察された。

7.1.4 修正版知識検証学習モデルによる授業が効果を及ぼす知識水準

5章では、従来からの学習研究の特徴として、その学習の効果を分類課題の解決によって測定する傾向があり、このような枠組みは限定的である（Tessmer & Wedman, 1990）とする批判に対処するため、工藤（2008）が想定する知識水準の枠組みについて考察した上で、学習成果をこの枠組みで評価することを試みた。具体的には、中学校理科における状態変化の学習で操作的思考課題と再生課題をそれぞれ学習活動に組み込んだ M-LVK モデルに基づく授業と帰納的学習モデルに基づく授業を行い、それぞれの実践が知識の直接的適用、操作的適用、制御的適用に与える効果を検討した。

その結果、学習モデルによらずすべての授業で知識の直接的適用を促進する効果があることや、他の授業よりも、操作的思考課題を組み込んだ M-LVK モデルに基づく授業で知識の操作的適用や制御的適用を促す効果があると示唆された。これらのことから、帰納的学習モデルよりも M-LVK モデルに基づく授業の方が知識の直接的適用、操作的適用、制御的適用に対して有効に作用することが示唆され、M-LVK モデルには、学習者が科学的知識を獲得することを促進させる効果があると考えられた。

7.1.5 操作的思考を促す教授的働きかけの汎用性についての検討

6章では、操作的思考課題を導入した学習活動の汎用性について検討した。具体的には、中学2年生を対象にして、初見のオームの法則の公式を用いる際の数的処理の実態調査を行った。次に、学習者の操作的思考を促すプロセスを導入した授業を行い、介入実践がオームの法則の公式を用いる際の数的処理に及ぼす効果を検討した。

実態調査では、初見のオームの法則の公式に対して適切に代入処理を実行できる者が6割程度認められた。しかしながら、適切に関係処理を実行できる者は2割程度に留まり、4～5割の者は「分からない」と解答していた。その原因として、公式における保存関係を理解している者は3割余りと少ないことが考えられた。これらのことから、公式を用いる際に適切に代入処理を実行できているからといって、公式を構成する変数間にある関係性まで理解しているとは言えないことが示唆された。また、比例や反比例について、「一方

の数が2倍になれば、もう片方の数も2倍になる」ことなどを機械的に記憶し適用できれば良いとする公式観の存在が推察された。

実践による検討では、授業後、対照群よりも介入実践を行った実験群で公式における保存関係を理解している者や関係処理を適切に実行できる者が増加していることから、本実践により、学習者が公式を構成する変数間にある関係性の理解を促され、関係処理を適切に実行することが可能になると示唆された。

7.2 結論

本論文の目的は、①科学的知識の獲得に対し、操作的思考を促す教授的働きかけが効果的に作用する学習モデルを検討すること、②上記①の学習モデルに基づく授業を行い、この授業実践が科学的知識の理解に及ぼす効果を検証し、そのプロセスを明らかにすること、③操作的思考を促す教授的働きかけの汎用性について検討すること、の3点であった。

上記①、②について検討した結果を最初に述べる。まず、小・中学校の科学教育における学習活動は帰納的なプロセスでデザインされており、科学的探究の過程で必要とされる演繹的なプロセスが不十分な傾向であった。また、学習者が科学的知識を構成する概念間の関係性を理解することで、当該の知識を前提とした演繹推論の実行可能性が高まることや、誤った知識に基づく推論が抑制されることから、操作的思考課題を学習活動に組み込むことは、学習者が科学的知識を使用しない要因を抑制する方法として効果的であると考えられた。これらのことを踏まえ、学習過程に「知識の受取」、「知識の操作」、「演繹的立証」、「帰納的検証」の各段階を有する知識検証学習モデル (LVK モデル) の提案に至った。

次に、LVK モデルに基づく授業を行い、科学的知識の想起と適用に与える効果と学習者が当該の知識を構成する概念間の関係性を理解するプロセスを検討したところ、介入実践の効果が明らかとなった。一方、既有知識を科学的知識の枠組みに統合させるためには、学習者の操作的思考を促すだけでは不十分であり、学習活動に科学的知識と既有知識の相互作用を生起させるプロセスを組み込むことが必要であったことから、LVK モデルの学習過程に「結果の予想」を加えた修正版知識検証学習モデル (M-LVK モデル) を提案した。

そして、M-LVK モデルに基づく授業を行い、科学的知識の想起と適用に与える効果と科学的知識が獲得されるプロセスを検討したところ、介入実践が科学的知識を構成する概念間にある関係性の理解を促すことや、既有知識を科学的知識の枠組みに統合させることに對して有効に作用することが明らかになった。また、学習者が経験的に構成しやすいと考えられるメンタルモデルを抑制したことから、介入実践により学習者は一般法則として科学的知識を構造化したと言える。

加えて、学習の効果を知識の想起や適用によって測定する枠組みは限定的である (Tessmer & Wedman, 1990) とする批判に対処するために、M-LVK モデルに基づく授業が知識の直接的適用、操作的適用、制御的適用 (工藤, 2008) に与える効果を検討した。その結果、帰納的なプロセスでデザインされた帰納的学習モデルよりも M-LVK モデルの方が知識の直接的適用、操作的適用、制御的適用を促進することが明らかとなった。これらの

ことから、科学的知識の獲得に対して、M-LVK モデルの有効性が示されたと言えよう。

上記③については、まず、公式を用いる際の数的処理の実態調査を行ったところ、代入処理を実行できるからと言って、公式を構成する変数間にある関係性を必ずしも理解している訳ではないことが明らかになった。次に、操作的思考を促すプロセスを導入した授業が、公式を用いる際の数的処理に及ぼす効果を検討した。その結果、公式における保存関係を理解している者や関係処理を実行できる者が増加していることから、当該の授業により、公式を構成する変数間の関係性を理解することで、関係処理を行えるようになることが示唆された。つまり、操作的思考を促進させる教授的働きかけが、科学的知識を構成する概念間にある関係性の理解を促すだけでなく、公式を構成する変数間の関係性を理解させることに対しても有効に作用することが明らかとなった。

7.3 教育実践への示唆

本論文の各研究で得られた知見から、小・中学校における学習活動に対する教育実践への示唆として、次の4点について考察する。

1つめは、従来、科学的知識を導出できれば、学習者は、当該の知識を構成する概念間の関係性を理解し、与えられた情報に合わせてその知識を論理変換して結論を導き出すことが可能であると考えられていることに対してである。

本論文では、小・中学校の理科や算数科・数学科、社会科の教科書の記述内容を検討したところ、①実験や観察、資料を利用することで理解させたい科学的知識に関する事例を集める、②収集した事例を比較して、そこから一般法則を導き出す、という2段階のプロセスで学習活動がデザインされている傾向が示唆された。通常、一般法則を導き出すことができれば、当該の学習活動は終了することから、学習活動の目的は科学的知識を導出することであり、科学的知識を構成する概念間の関係性を理解させることについては、あまり考慮されていないと考えられる。しかしながら、立木・伏見(2008)や佐藤(2008)は、学習者が科学的知識に基づく論理変換操作を十分にできないことや判断を依拠する科学的知識を1つに確定しないことを指摘しており、いくつかの事例から帰納的に科学的知識を導出したとしても、その知識を構成する概念間の関係性を理解し、当該の知識に基づく論理変換操作を実行することは簡単ではないと言えよう。

したがって、本論文で提案した修正版知識検証学習モデル(M-LVKモデル)のように、科学的知識に即した論理変換操作を行わせるプロセスを授業に導入することは、科学的知識を構成する概念間にある関係性の理解にまで学習活動を拡張できる可能性があると言えよう。藤村(2012)によると、小・中学生の科学的リテラシーの特質は、空所補充のような形式で手続き的知識や事実に知識を問われると正確に用語を再生できる一方、要因を探索し理由を説明する問題などによって概念的理解や因果的説明を問われると答えることが困難であることとされており、小・中学校の授業にM-LVKモデルに基づく学習活動を導入することで、このような科学的リテラシーに関する課題を解決することが期待される。

2つめは、科学的知識に働きかけるプロセスを学習活動に導入するだけでは、科学的知識と既有知識がたがいに独立した知識として構造化されてしまう可能性があると考えられることについてである。

小学校学習指導要領の総則には「基礎的・基本的な知識及び技能を確実に習得させ、これらを活用して課題を解決するために必要な思考力、判断力、表現力その他の能力をはぐ

くむことに努めなければならない」と記されている（文部科学省, 2008）。また、中学校学習指導要領の総則にも同様の記述があり（文部科学省, 2008）、これらは知識を活用することの重要性を述べたものであると言えよう。このことを受けて、知識の活用を促す学習モデルとして、演繹推論を重要視した「教えて考えさせる授業」（市川, 2013）や「演繹的問題解決学習」（江川, 2015）が提案され、多くの小・中学校で実践されている。

「教えて考えさせる授業」は、教師からの説明・理解確認・理解深化・自己評価の4段階を授業の基本的な構成要素としており（市川, 2013）、「演繹的問題解決学習」のプロセスは、教師の説明により学習する事項を理解する・学習した事項を実験によって証明する・学習した事項を利用する応用課題を行うこととしている（江川, 2015）。これらの学習モデルは、科学的知識を教示した上で、それを実験などで検証し、その知識を用いる発展問題に取り組みせよという部分で一致しており、科学的知識に積極的に働きかけを行う学習モデルであると言えよう。ところで、本論文で提案した知識検証学習モデル（LVK モデル）では、科学的知識に基づく論理変換を促すことで、当該の知識を構成する概念間の関係性を理解し、既有知識が科学的知識の枠組みに統合され、科学的知識の獲得が促進されるという前提があった。しかしながら、実際には、学習者の操作的思考を促すだけでは科学的知識を構成する概念間にある関係性の理解は促進されるものの、既有知識を科学的知識の枠組みに統合することは容易ではなかった。

したがって、「教えて考えさせる授業」（市川, 2013）や「演繹的問題解決学習」（江川, 2015）などの演繹的学習モデルに基づいた授業を実践する際にも、学習者の既有知識を考慮した上で、科学的知識と既有知識の相互作用を生起させる何らかのプロセスを導入する必要があると言える。

3つめは、従来、科学教育の学習活動において、実験などの結果を予想することが重要視されており、特に誤概念の修正という文脈では、学習者の予想とは一致しない事実や結果を示すことが有効とされてきた（Posner et al., 1982）ことに対してである。

本論文において、小・中学校の学習活動は帰納的なプロセスでデザインされていることが推察され、そのプロセスに基づく授業は、Table5-2 に示したような帰納的学習モデルを形成していると考えられた。そこで、M-LVK モデルと上述の帰納的学習モデルに基づく授業が学習成果に与える影響を、知識の直接的適用、操作的適用、制御的適用の観点（工藤, 2008）で比較すると、M-LVK モデルに基づく授業が学習成果に対して効果的に作用していた。つまり、Chinn & Brewer（1993）が、学習者の予想とは一致しない事実や結果を示して

も、通常の授業では学習者が科学的知識を既有知識の枠組みで都合よく解釈したり、科学的知識を何のかかわりももたない知識であると拒否しようとしたりすると指摘している通り、本論文で行なった実践の範囲内では、このような事実や結果を示すことよりも、学習者の操作的思考を促し、科学的知識と既有知識の相互作用を生起させることが有効であった。

したがって、科学的知識を学習する場面に M-LVK モデルに基づいた学習活動を導入することで、学習者は一般法則として科学的知識を構造化するので、学習者が科学的知識を都合よく解釈したり、拒否したりすることを抑制すると期待される。

4つめは、日本の子どもの学力やリテラシーの特質として、手続き的知識やスキルの適用の水準が高い一方、概念的理解や思考プロセスの水準が相対的に低いことについてである(藤村, 2012)。これは、例えば、 I (電流) = V (電圧) / R (電気抵抗) について、電圧や電気抵抗の値が示されていれば電流の値を求めることができたり、この式について電流と電圧は比例していることなどを指摘したりすることはできるものの、数値が示されていなければこの式を用いることができないことや、電流と電圧が比例していることを指摘できても、その関係性まで理解していないことを指摘していると思われる。

そこで、本論文では、この式について「電圧が大きくなると、電流は大きくなる」や「電気抵抗が大きくなると、電流は小さくなる」のように、公式を構成する変数間の関係性を命題化し、それを論理変換操作させる課題を学習活動に組み込むことで、変数間にある関係性の理解が促進された。このことから、学習者の操作的思考を促すことで、命題化された科学的知識のみならず、命題化し得る科学的知識であれば、当該の知識を構成する概念間の関係性を学習できる可能性があると言えよう。つまり、学習者の操作的思考を促す教授的働きかけが、より広範囲の学習に適用できることを示している。

したがって、学習者の操作的思考を考慮した学習活動を様々な場面で展開することを通して、単に暗記した知識を再生したり、適用したりできればよいとする「浅い学習観」(Marton et al., 1993)ではなく、知識の意味を理解することが重要であるというような「深い学習観」(Marton et al., 1993)を学習者に持たせ得ることが期待される。

以上のように、本論文においては、学習者が科学的知識を獲得することを促進させる方法の1つとして、操作的思考を促す教授的働きかけに着目し、この教授的働きかけが学習成果に与える効果や、この教授的働きかけの汎用性について、今後の小・中学校における

学習活動に対する教育実践への示唆を提供した。また、このような教授的働きかけを具体的な授業実践に導入する過程で、修正版知識検証学習モデル（M-LVK モデル）の提案に至った。この学習モデルは、科学的探究能力の育成を視野に入れつつ科学的知識の獲得を促進するという観点から、帰納的学習モデルに基づいてデザインされる傾向がある小・中学校における授業実践に対して、再考を促す一助となり得ると考えられる。

7.4 今後の課題

本論文には、次のような課題が残されている。第1に、科学的探究の過程は、演繹、帰納、アブダクションの各段階から成り立っているとされ（米盛, 2007）、修正版知識検証学習モデル（M-LVK モデル）に基づく授業で、学習者は科学的に探究する能力に必要とされる演繹推論や帰納推論を促されると推察された。これらの推論が科学的探究の過程で重要な役割を果たすことは間違いないであろう。しかしながら、このモデルには学習者のアブダクションを促すプロセスは組み込まれていない。これは、本研究では学習者のアブダクションを発達させるには、演繹推論と帰納推論の熟達化が必要であるという前提であったためである。したがって、科学的に探究する能力を育成するためには、学習者の演繹推論や帰納推論を促すだけでなく、アブダクションも促進できる学習モデルへと M-LVK モデルを拡張することが求められよう。

第2に、公式の数的処理について、「公式における変数間の関係性について相対把握をすること」と「公式における保存関係を理解すること」が関係処理を可能とする要因として既に指摘されている（麻柄, 2009）。しかしながら、関係処理を可能とする要因として、これまで知られていない別の要因がある可能性もあるが、その要因については明らかにできていない。また、学習者の数的処理が代入処理から関係処理へと発達する過程として、与えられた数値を公式に代入して答えを算出する段階、任意の数値を公式に当てはめて、式が示している関係性を見出す段階、数値を用いずにこの関係性を見出す段階というプロセスが想定されており（岡田・麻柄, 2013）、本研究においてもそれを支持する結果が得られているものの、このプロセスの詳細について具体的な検討はできていない。したがって、公式の数的処理が発達するプロセスや、その過程にどのような要因が関わっているかを引き続き検討する必要があると思われる。

第3に、M-LVK モデルによる授業や数的処理を発達させる学習活動においても、概念間や変数間の関係性を理解させることは難しかった。このことは、通常の授業でこれらの関係性を理解させることは、ことさらに困難であることを示しており、ともすれば学校の授業が「浅い学習観」（Marton et al., 1993）に基づいた知識の暗記や再生、適用ができることだけを学習者に求めることにつながると考えられる。したがって、さらに効果的に、これらの関係性を明確に理解させるために、どのような種類の課題でどのように学習活動を行わせるかなど、操作的思考課題を導入する際の各種条件、加えて M-LVK モデルに基づく授業では、科学的知識と既有知識の相互作用をより一層に生起させる具体的な手立てにつ

いて引き続き検討することが必要である。そうすることで、通り一遍の授業を知識の意味を理解することが重要であるというような「深い学習観」(Marton et al., 1993)に基づいた授業実践へと改善することが可能になると考えられる。

引用文献

- 秋山仁・酒井利訓 (2005). 算数から学ぶ中等数学 東海大学紀要教育研究所, 12, 1-19.
- Chinn, C. A., & Brewer, W. F. (1993). The role of anomalous data in knowledge acquisition: A theoretical framework and implications for science instruction. *Review of educational research*, 63, 1-49.
- Clement, J. (1993). Using bridging analogies and anchoring intuitions to deal with students' preconceptions in physics. *Journal of research in science teaching*, 30, 1241-1257.
- diSessa, A. A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and instruction*, 10, 105-225.
- 江川克弘 (2015). 「演繹的に問題を解決して学習する過程についての一考察」—小学校における理科の授業を通して 鳴門教育大学学校教育研究紀要, 29, 99-107.
- 藤村宣之 (2012). 数学的・科学的リテラシーの心理学—子どもの学力はどう高まるか 有斐閣
- 伏見陽児 (2013). ルール学習と提示事例 東北大学出版会
- Gilovich, T. (2008). *How we know what isn't so*. Simon and Schuster.
- Hashweh, M. Z. (1986). Toward an explanation of conceptual change. *European journal of science education*, 8, 229-249.
- Hashweh, M. Z. (1988). Descriptive studies of students' conceptions in science. *Journal of Research in Science Teaching*, 25, 121-134.
- 林敏彦・藤井譲治・水内俊雄 (2016). 中学社会公民的分野 日本文教出版
- Hewson, P. W., & Hewson, M. G. B. (1984). The role of conceptual conflict in conceptual change and the design of science instruction. *Instructional Science*, 13, 1-13.
- 廣瀬友介・中本敬子・蛭田政弘 (2013). 数学学習における学習観と学習方略の関係—大學生を対象とした分析 文教大学教育学部紀要, 46, 45-56.
- 市川伸一 (編著) (2013). 「教えて考えさせる授業」の挑戦—学ぶ意欲と深い理解を育む 授業デザイン 明治図書
- 一松信・岡田樟雄 (2015). みんなと学ぶ小学校算数5年 学校図書
- Jennings, D., Amabile, T. M., & Ross, L. (1982). *Informal covariation assessment: Data-based vs. theory-based judgments*. Harvard University Press.
- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness* (No. 6). Harvard University Press.

- 小松真紀・伏見陽児 (2000). 提示情報の関連づけが学習に及ぼす効果 おおみか教育研究, 4, 45-51.
- 工藤与志文 (1993). 科学読み物の読解に及ぼす誤った知識の影響 読書科学, 37, 68-76.
- 工藤与志文 (1997). 文章読解における「信念依存型誤読」の生起に及ぼすルール教示の効果 教育心理学研究, 45, 41-50.
- 工藤与志文 (2003). 概念受容学習における知識の一般化可能性に及ぼす教示情報解釈の影響 教育心理学研究, 51, 281-287.
- 工藤与志文 (2005). 概念的知識の適用可能性に及ぼす知識操作水準の影響 教育心理学研究, 53, 405-413.
- 工藤与志文 (2008). 「誤前提課題」を評価課題として用いた教授学習実験の概観と展望 教授学習心理学研究, 4, 40-49.
- 工藤与志文 (2010a). ルール学習と操作的思考—概観と展望 教授学習心理学研究, 6, 29-41.
- 工藤与志文 (2010b). ルールの関係構造が操作的思考と発見的推論に及ぼす影響—カテゴリールールと属性ルールを比較して 東北大学大学院教育学研究科研究年報, 58, 65-83.
- 麻柄啓一 (1996). 学習者の誤った知識はなぜ修正されにくいのか 教育心理学研究, 44, 379-388.
- 麻柄啓一 (1999). 学習者の誤った知識をどのように修正するか 科学教育研究, 23, 33-41.
- 麻柄啓一 (2006). 例外への懸念がルール学習に及ぼす影響 教育心理学研究, 54, 151-161.
- 麻柄啓一 (2008). 法則理解における3段階モデル—数値操作・関係操作・因果操作 日本教育心理学会総会発表論文集, 50, 164.
- 麻柄啓一 (2009). 数字がないと公式が使えないのはなぜか 教育心理学研究, 57, 180-191.
- 麻柄啓一・進藤聡彦 (2011). ルール命題の操作による問題解決の促進 教育心理学研究, 59, 1-12.
- 麻柄啓一・進藤聡彦 (2015). ルール表象はなぜ成立しにくいのか 教育心理学研究, 63, 267-278.

- 麻柄啓一・進藤聡彦・工藤与志文・立木徹・植松公威・伏見陽児 (2006). 学習者の誤った知識をどう修正するかールール・バー修正ストラテジーの研究 東北大学出版会
- Markovits, H., & Barrouillet, P. (2002). The development of conditional reasoning: A mental model account. *Developmental Review*, 22(1), 5-36.
- Marton, F., Dall'Alba, G., & Beaty, E. (1993). Conception of learning. *International journal of educational research*, 19, 277-300.
- 文部科学省 (2008). 中学校学習指導要領 東山書房
- 文部科学省 (2008). 小学校学習指導要領 東京書籍
- 毛利衛・黒田玲子 (2015). 新編新しい理科3年 東京書籍
- 村山功 (1994). 科学教育 日本児童研究所(編) 児童心理学の進歩 金子書房
- 中島伸子 (1995). 「観察によって得た知識」と「科学的情報から得た知識」をいかに関連づけるか 教育心理学研究, 43, 113-124.
- 岡田いずみ・麻柄啓一 (2013). 数字がなくても公式を使えるようにするにはどうすればよいかー中学生への操作的思考の援助 教授学習心理学研究, 9, 63-74.
- 岡田涼・中谷素之・伊藤崇達・塚野州一(編著) (2016). 自ら学び考える子どもを育てる教育の方法と技術 北大路書房
- 岡村定炬・藤嶋昭 (2016). 新編新しい科学1 東京書籍
- Palinscar, A. S., & Brown, A. L. (1984). Reciprocal teaching of comprehension-fostering and comprehension-monitoring activities. *Cognition and instruction*, 1, 117-175.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science education*, 66, 211-227.
- 佐藤淳 (2008). ルール適用の促進を意図した「判断の不確定性」低減方略の検討 教育心理学研究, 56, 32-43.
- 佐藤学 (2012). 学校を改革するー学びの共同体の構想と実践 岩波書店
- 佐藤康司 (2006). 関連づけの成立と認知的能動性が学習に及ぼす影響 教授学習心理学研究, 2, 49-58.
- 澤孝治・原田泰 (2011). Scratch を使った算数教材の制作 日本デザイン学会研究発表大会概要集, 58, 137-138.
- 進藤聡彦 (1995). 誤法則を明確化する先行課題が法則の修正に及ぼす効果 教育心理学研究, 43, 266-276.

- 進藤聡彦・麻柄啓一 (1999). ルール適用の促進要因としてのルールの方向性と適用練習
教育心理学研究, 47, 462-470.
- 進藤聡彦・麻柄啓一 (2011). 面積比の理解に及ぼす操作結果の実体化の効果 教育心理
学研究, 59, 320-329.
- 進藤聡彦・麻柄啓一・伏見陽児 (2006). 誤概念の修正に有効な反証事例の使用方略—「融
合法」の効果 教育心理学研究, 54, 162-173.
- 砂山渡・長田佳倫・川本佳代 (2015). 直感的な意味付けとその繰り返しにより問題の考
え方の理解と定着を促す学習システム 知能と情報, 27, 723-733.
- 高垣マユミ・中島朋紀 (2004). 理科授業の協同学習における発話事例の解釈的分析 教
育心理学研究, 52, 472-484.
- 高垣マユミ・田爪宏二・松瀬歩 (2007). 相互教授と概念変容教授を関連づけた学習環境
の設定による概念変化の促進 教育心理学研究, 55, 426-437.
- 立木徹・伏見陽児 (2008). テスト得点の伸びを抑制するのは本当に誤概念なのか?—「論
理操作の不十分さ」の可能性の検討 教授学習心理学研究, 4, 10-16.
- Tessmer, M., & Wedman, J. F. (1990). A layers-of-necessity instructional development model. *Educational
Technology Research and Development*, 38, 77-85.
- 塚田捷・山極隆・森一夫・大矢禎一 (2012). 未来へひろがるサイエンス2 新興出版社
啓林館
- 米盛裕二 (2007). アブダクション—仮説と発見の論理 勁草書房

謝 辞

本論文の執筆及び研究の遂行にあたり、多くの方々からご指導、ご支援を賜りました。特に、主指導教員の鳴門教育大学大学院教授 川上綾子先生には、これまで面識がなかったにもかかわらず、主指導教員となることを了承していただきました。その時から、本研究科の入学試験に必要な研究計画の書き方から、本論文の遂行に至るまでの長きに渡り、懇切丁寧なご指導を賜りました。

先生の質問に対して、十分な説明ができずご苦勞をかけたと思います。しかし、先生にはいつも私の言葉足らずの説明から意図を汲み取ろうと、お忙しいにもかかわらず予定していた時間を大きく超えて、粘り強く関わっていただきました。また、私の説明に疑問などを感じると、文献を検索したり、方法の妥当性を調べたりしていただきました。その間、実を言うと私は考えている素振りをして、研究室にある書籍をただ眺めているだけでした。この場を借りてお詫びいたします。

こんな私ですので、先生のご指導なしには、本論文の遂行はあり得なかったと感謝しております。いつか先生のように、研究者として、教育者として学生の模範となる教員になることが私の目標です。心から御礼申しあげます。

また、副指導教員の鳴門教育大学大学院教授 前田洋一先生、岡山大学大学院教授 寺澤孝文先生には、本研究に関する貴重なご意見をたくさんいただきました。前田先生には、多面的な視点から本論文に対する貴重なご助言をいただきました。正答者の分析だけでなく、誤答者の分析も重要なことなどをご教示いただきました。また、寺澤先生には、本論文の基礎となる面についてご助言をいただき、深く感謝申し上げます。集中講義の際には、夜遅くまで先生自身の研究の話しをしていただき、ただただ先生の研究に対する情熱に感服するばかりでした。

さらに、論文審査を引き受けていただいた、兵庫教育大学大学院教授 松本伸示先生、鳴門教育大学大学院教授 皆川直凡先生、鳴門教育大学大学院教授 田村隆宏先生には、専門的視点からの多くのご意見や本研究に対する発展的なご指導を賜りました。心よりお礼申し上げます。

加えて、修士課程の主任指導教員であった神戸大学大学院教授 渡邊隆信先生、指導教員であった兵庫教育大学大学院准教授 吉國秀人先生には、学会等でお会いする度に、研究の進捗状況などを気にかけていただいたり、励ましていただいたりして、とても勇気づけられました。

そして、本論文の調査研究にあたっては、多くの中学生の皆さんと中学校の先生方にもご協力をいただきました。特に、本研究科へ入学するにあたり承認をくださった宝塚市立御殿山中学校元校長 渡辺秀雄先生、授業等で調査を実施することに対して、快く許可をくださった宝塚市立光ガ丘中学校長 坊和也先生、宝塚市立御殿山中学校長 西澤健司先生に感謝申し上げます。また、調査や分析に協力いただいた宝塚市立御殿山中学校教諭 對中宏明先生、宝塚市立安倉中学校教諭 良澤 健先生にお礼申し上げます。本論文の知見が教育現場に少しでも寄与できれば幸いです。

最後に、博士課程に進学する機会を与えてくれ、応援し、見守ってくださったすべての皆様に感謝の意を表し、謝辞とさせていただきます。

本研究に関する論文

第2章

植原俊晴・川上綾子 (2017). 操作的思考による演繹推論の促進—「知識の検証による学習」モデルの提案— 鳴門教育大学学校教育研究紀要, 31, 119-125.

第3章

植原俊晴 (2016). 操作的思考課題の解決を含む学習活動がルール獲得に及ぼす効果とそのプロセス—中学校理科における状態変化の学習に着目して— 教育実践学論集, 17, 1-10.

第4章

植原俊晴 (2017). 科学的知識と既有知識を意図的に相互交渉させる学習活動の効果 教育実践学研究, 18, 13-25.

第5章

植原俊晴 (印刷中). 科学的知識の理解に対する操作的思考課題を導入した中学校理科の授業の効果—「知識の3水準」を観点として— 科学教育研究, 43.

第6章

植原俊晴 (2017). 操作的思考課題を導入した学習活動が公式の関係処理に及ぼす効果 教育実践学研究, 18, 27-38.