

高等学校物理教育における多様な表象の一貫性の促進に関する事例的研究

川口 智史*・和田 一郎**

A Study on Promoting Multiple Representational Coherence Ability in High School Physics Education

KAWAGUCHI Satoshi* , WADA Ichiro**

1. 問題の所在と研究の目的

内閣府の第5期科学技術基本計画では、「国内外の課題が増大、複雑化する中で科学技術イノベーション推進の必要性が増している」(内閣府 2016)として科学技術政策推進の必要性が示され、未来の産業創造と社会変革をもたらす新しい価値やサービスが創出される「超スマート社会」を実現させ、更に深化させた我が国の目指すべき未来社会の姿として Society5.0 が提唱された。Society5.0 では、全ての人とモノが繋がる IoT (Internet of Things) によって、フィジカル空間 (現実空間) で得られた様々な知識や情報はサイバー空間 (仮想空間) で共有され、人工知能 (AI) が機械学習したビッグデータとなり、必要な時にリアルタイムに最適化されシステムやロボットなどを制御することで現代社会が抱える複雑な問題を解決できると考えられる。このような変化が激しく予測困難な社会の中では、国内外の様々な価値観や多様性を認め合いながら複雑な問題を協働的に解決し、そして新たな価値を創造し国内外へ発信していく人材の育成が求められている。学校教育ではこれまでのように知識を教えるだけにとどまらず、これからの知識基盤社会やグローバル化した時代において習得した知識を活用して持続可能な社会を構成する市民としての資質・能力の向上と、新たな価値を創造しイノベーションを起こす人材としての資質・能力の向上が求められている。

このような背景から令和4年度から施行された高等学校学習指導要領では、予測困難な社会を切り開くための資質・能力を育成するために、主体的・対話的で深い学びが実現される授業改善が求められている。高等学校理科は、これまでの生活体験や小中学校で習得した前概念 (preconception) を修正し、一貫した科学概念を育成させることで、知識基盤社会における基礎的な科学的素養を養うだけでなく、より多くの科学的能力が優れた人材を生み出し、上級学校へ接続させる立場にある。理科を学習する多くの生徒は、将来科学者になるわけではないが、科学知識を応用した技術を活用して生活を営む市民として、これからの変化が激しく予測困難な現代社会を構成していく一員になるのは間違いない。特に、自然の事物・事象を多角的に捉えて解釈し、科学的な思考に基づいて、自らの概念を振り返ることで、これまでの生活体験や小中学校で習得した生徒固有の概念と、実際の現象、写真や映像、図的な描画、表やグラフ、文章による記述、数学的記述などの多様な表象 (representaion) を一貫性がある科学概念として構築していく能力を促進させることの重要性は言うまでもなく明らかである。しかしながら、このような多様な表象を一貫性のある科学概念として構築させることは容易ではなく、特に抽象度が上がっていく高等学校物理においてはより困難になっている。

*神奈川県立城郷高等学校

**理科教育講座

本研究では、構成主義的学習論や認知科学理論を基に実践事例を分析し、高等学校物理における多様な表象の一貫性を促進についての実態を捉えることを目的とする。

2. 認知科学理論と多様な表象

2. 1 認知的マルチメディア学習理論 (CTML)

人間の認知構造の特性を生かして、言語と非言語である絵などを用いて学習することをマルチメディア学習と言い、言語だけの学習よりも言語と絵を用いた学習の方がより深く学ぶことができることが指摘されている(Mayer 2006)。Paivio(1986)は、人間の認知活動は2つのサブシステムとして、言語的に符号化された表象を扱う言語的システム (Logogens) と、イメージ的に符号化された非言語的システム (Imagens) の協調によって成り立っているとした二重符号化理論を主張した。これを踏まえ、Mayer は視覚と聴覚の2つのチャンネル (デュアル・チャンネル) から情報が処理されること、作業記憶の特性から各チャンネルの処理能力には限界があること、さらに学習には一連の情報処理の過程が協調して行われるといった側面から、認知的マルチメディア学習理論 (CTML) の原則として整理した (表 1)。

表 1 認知的マルチメディア学習理論 (CTML) における3つの原則(Mayer, 2006)

原則	説明
デュアル・チャンネル	人間は視覚と聴覚の情報を処理する別々のチャンネルがある。
限定容量	各チャンネルで一度に処理できる情報量には限界がある。
能動的な処理	人間は、関連する入力情報に着目し、選択した情報を首尾一貫した心的表現に組織化し、心的表現を他の知識と統合することによって、能動的な学習を行う。

CTMLによる情報処理は、能動的に学習するために必要な「選択・組織・統合」の過程が、聴覚と視覚の2つのチャンネルで行われる。そこでは、言語的モデルと視空間的モデルに対応する要素がマッピングされた統合的なモデルとして出力され、長期記憶に貯蔵された前知識と結合される。この結合によって長期記憶からの関連する知識と調整される (図 1)。この過程は「言語とイメージの結合」と呼ばれ、非常に認知負荷の高い過程である。

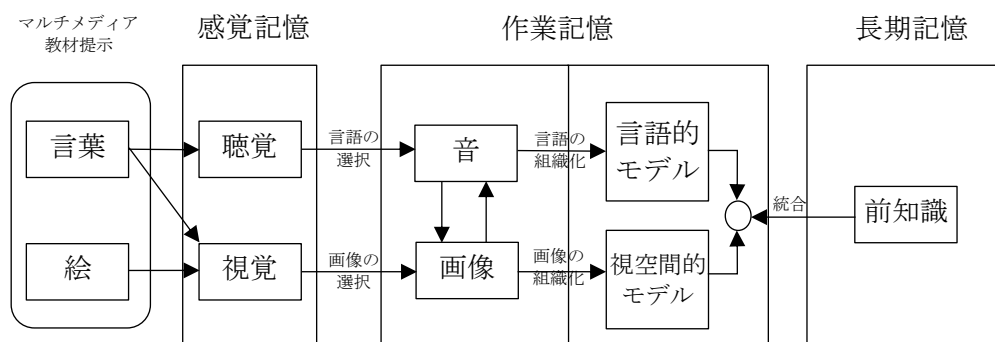


図 1 CTML による情報処理過程(Mayer, 2006)

このような作業記憶に対する負荷について、Swellerら(1991)は、マルチメディア学習における認知負荷は処理される情報の本質的な複雑さによって発生し、要素の相互作用によって大きさが決まる「課題内在性負荷 (Intrinsic cognitive load)」, 不適切な教材のデザインや配置によって発生する「課題外在性負荷 (Extraneous cognitive load)」, 知識の構築などの有益な活動によって発生する「学習関連負荷 (Germane cognitive load)」の3つに分類した。そして作業記憶の限界容量は、それぞれの認知負荷を加算したものであるとして認知負荷理論を示した(Chandler and Sweller 1991)。さらに、Mayer (2002) は、マルチメディア学習における教材の提示や授業のデザインにおいて、これらの認知負荷を軽減させる8つの原則を示した。具体的には課題外在性負荷の軽減に関しては、一貫性の原理、シグナルの原理、冗長性の原理、空間的近接の原理、同時提示の原理、また、課題内在性負荷の軽減に関しては、セグメントの原理、事前学習の原理、モダリティの原理として整理した。

2. 2 多様な表象のフレームワーク (DeFT)

こうしたマルチメディア学習において、認知負荷の軽減や多様な表象の機能に関する検討がなされている。例えば、Ainsworth(2006)は、複雑化したマルチメディアによる学習について研究し、教材に2つ以上の外的表象が使われた時、多様な表象の学習が起こるとした。ここでは DeFT と呼ばれる教材デザインの視点が示された。すなわち多様な外的表象を用いた学習特有の「デザインパラメータ (Design parameters)」(表 2), 多様な外的表象の「機能 (Functions)」(図 2), 学習者と多様な外的表象の相互作用による「認知的課題 (cognitive Tasks)」である。DeFT は、認知心理学・科学、教育、人工知能、カリキュラム研究などの視点から、幅広く実証研究を実施することで開発され発展してきた。このような開発背景から学習のパラメータは多岐に渡る。

表 2 DeFT のデザインパラメータ(Ainsworth, 2006)

パラメータ	内容
(a) 表象の数	多様な表象システムは、少なくとも2つの表象を用いる。
(b) 情報の分散	多様な表象システムは、情報を表象に柔軟に分散させ、情報の冗長性と各表象の複雑さに影響を与える。
(c) 表象システムの形式	写真、文章、アニメーション、音声、方程式、グラフなどを表示する。
(d) 表象の順序	表象を提示したり、構築したりする順序を、学習者もしくはシステムが決定する必要がある。
(e) 変換のための支援	学習者に対して学習環境が積極的に支援する。表層レベルか、深層レベルに対して支援する。

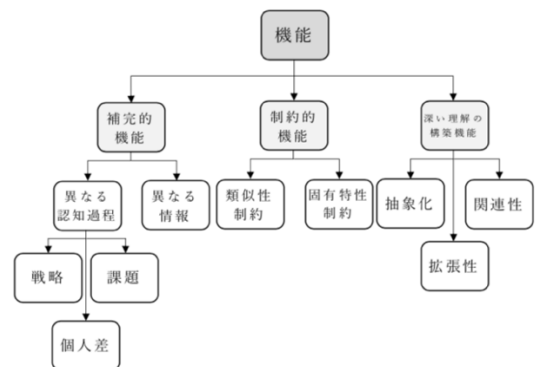


図 2 DeFT による表象の機能の分類

3. 理科学習における多様な表象の一貫性

3.1 表象の一貫性能力 (Representational Coherence Ability : RCA)

一般的に、理科教育において、実験や観察から科学概念を適切に理解するための領域固有の推論に不可欠な手段として、複数の相互に接続された表象を用いることはよく知られている。複数の表象を生成し、異なる表象形式間や同一表象形式内で情報を正しく関連付け、比較し、適用し、変換させる領域固有の思考ツールとして利用する能力は「表象能力 (Representational Ability)」と呼ばれる。しかし、複数の表象間で情報を変換することは、誤った解釈や失敗を引き起こす可能性があり、不必

要な矛盾や不一致を引き起こしかねない。したがって、表象能力の重要な点は、学習者の一連の多様な表象に一貫した接続を生み出すことができる能力である。これを「表象の一貫性能力 (Representational Coherence Ability : RCA)」という。これに関連して Müller ら(2017)は、物理における幾何光学の分野において、多様な表象間の一貫性を成立させるために、実行すべき認知的課題として次のように整理した。①表象を比較し、マッピングする。②整合性を保ち複数の表象を完成・修正する。③表象の間違いを見つけ修正する。④これらの活動の中で理由を文章や図で記述できる。

3.2 表象活動課題 (Representational Activity Tasks : RATs)

Scheid ら(2019)は、RCA を評価する尺度や運用に関する調査を行い、Ainsworth の DeFT を援用することで、RCA を評価する課題に関するデザインパラメータを示した (表 3)。これによって作成される課題は、「表象活動課題 (Representational Activity Tasks : RATs)」として、異なる表象形式間及び同一の表象形式内で、断片的な情報を「変換、関連付け、マッピング、比較、修正、変更、適合」させることが求められる。また解答における記述的表象形式として文章や数式など、描写的表象形式として、写真、模式図、線分図などから構成される。

表 3 RATs のデザインパラメータ

パラメータ	内容
(a) 表象の数	RATs は 2 つ以上の異なる表象と 1 つ以上の接続を含む。 異なる表象間 (参照接続) でも、同一の表象間 (連想接続) でも成り立つ。
(b) 情報の分散	表象に含まれる情報は、部分的に重複する内容を持つ補完的な役割 (部分的冗長性) がある。
(c) 表象の形式	表象の形式は、紙面に記述された文書であり、静的で視覚的にモノモーダルである。
(d) 表象の順序	固定された順序はなく柔軟である。課題の文章が追加的に他の表象を参照したり、問題解決に必要な異なる表象との接続のために順序が示されることがある。
(e) 変換のための支援	一般的な支援としては、学習課題として RATs を繰り返し解くなどがある。

DeFT が示す機能の分類によると、多様な表象を用いた学習は、抽象化、関連性、拡張性によって「深い理解の構築機能」があることが示されている。つまり、標準的な RATs (S-RATs) として表象の変換、関連づけに加えて、多様な表象の「比較、変化、修正、適用」が追加されることで、深い理解を構築する機能を持つ RATs (DU-RATs) となる。そこで文章、表、数式、図などの異なる表象の形式の数を N_{RF} 、またそれぞれ異なる表象の形式が学習過程において結合される数を N_{RFC} として、従来の課題と S-RATs と DU-RATs について比較したものを示す (表 4)。

表 4 $\overline{N_{RF}}$ と $\overline{N_{RFC}}$ の比較 (Scheid ら, 2019)

	従来の課題	S-RATs	DU-RATs
$\overline{N_{RF}}$	1.7	3.6	4.2
$\overline{N_{RFC}}$	0.66	3.1	3.9

本研究では、RATs のデザインパラメータを踏まえ、高等学校物理における表象の一貫性能力を評価し、促すための課題の開発およびそれを用いた授業を実践し、Müller ら(2017)の指摘する表象の

一貫性能力 (RCA) の実態について分析する。

4. 事例的分析

4.1 表象の形式数及び結合数の違いによる表象の一貫性の実態

調査時期は 2021 年 5～7 月, 学習単元は高等学校物理「光波」, 調査対象は神奈川県内の県立高等学校第 3 学年 17 名であった。授業は, 「光の速さ」, 「光の分散と散乱・偏光」, 「レンズ・鏡による像」, 「光の回折と干渉」の順で展開した。授業を実践するにあたり, 表 3 における Scheid らの指摘に基づき, RATs の表象の形式数, 表象間の結合数が異なる課題を開発した (表 5)。その解答には, 生徒の有する多様な知識表象が含まれる。理科学習における表象には観察, 実験などの具体的な活動を通じての事象把握である「活動的表象」, グラフやイメージ図などの視覚的要素による事象把握である「映像的表象」, そして数式や言葉による事象把握である「記号的表象」の 3 つの形式・レベルの表象が存在する。そして, これらの表象が学習過程において相互関連することによって, White (1988) が指摘する理科に関わる知識表象 (ストリング, 命題, 知的技能, イメージ, エピソード, 認知的方略) の有機的な結合と構造化を具現化する。これらは, 表象ネットワークとして図 3 のように模式化される (和田・森本, 2010)。本研究ではこの理論を活用することで, 多様な表象の接続を捉え, 表象の一貫性が促進される生徒の認知の実態を分析した。

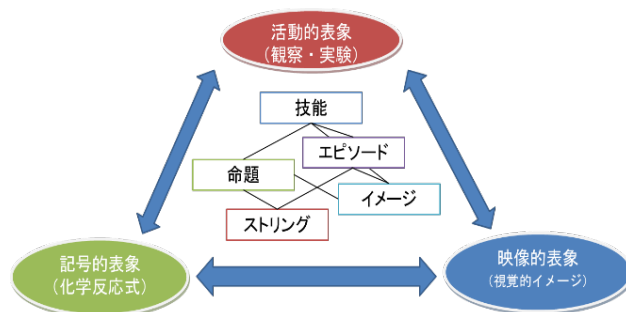


図 3 表象ネットワーク (和田・森本, 2010)

図 3 表象ネットワーク (和田・森本, 2010)

表 5 事例分析における RATs の概要

項目		N _{RF}	N _{FC}	外的表象の形式			
				文章	数式	図	現象
S-RATs	①	3	2	○		○	○
	②	3	2	○		○	○
DU-RATs	①	4	4	○	○x2	○	○x2

(1) 標準的な RATs (Standard-RATs : S-RATs) ①のワークシート分析

まず, レンズと鏡による像に関する学習について分析する。生徒はレンズや鏡について, これまでの生活経験に基づいた「経験」や「記憶」はあるものの, 適切な「科学概念」として構築できていない場合が多い。そこで, 凹凸レンズや凹凸面鏡の実験を併用しながら, 表象の形式数および結合数が標準的な RATs (Standard-RATs : S-RATs) を提示し, 観察や実験による活動的表象と, ワークシートの文章やレンズの式による記号的表象や, 光線の作図などの映像的表象を用いて, 多様な表象を活用した授業を実践した。

ここでは, S1 の S-RATs①に関するワークシート記述を取り上げる (図 4)。まず, この S-RATs ①は, 凸レンズの実像の生成における光線の進み方に関する課題である。凸レンズの実像の生成に関する光線の 3 つの特徴を表す説明文と, 物体, レンズ, そして像を生成するための光線などが含まれる幾何光学図から構成される。生徒は説明文中の空欄を記述して完成させることと, それらの内容を模式図に正しく対応させて, 図に色分けをして完成することを求めた。

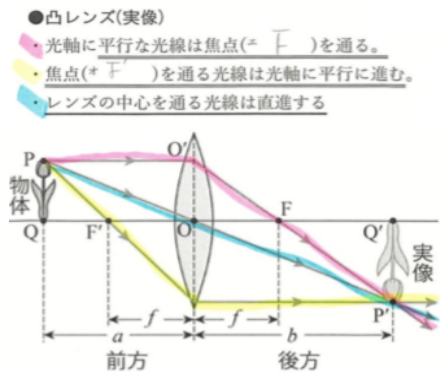


図 4 生徒 S2 の S-RATs①のワークシート記述

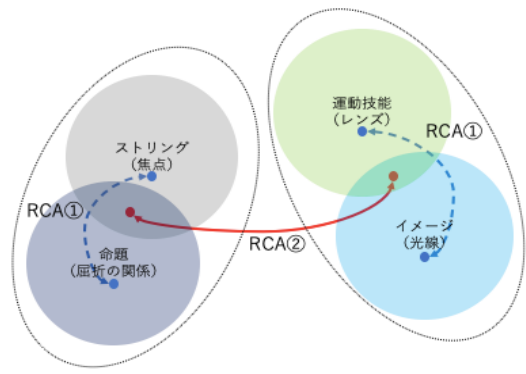


図 5 S-RATs①の表象ネットワーク

この学習過程について RATs のデザインパラメータ (表 3) を分析し、促進された生徒の RCA の種類を示したものを表 6 に示す。光線の進み方の特徴に関する説明文は、外的表象としては文章だけの形式であるが、説明文全体は「命題」、焦点 F、F' は「記号列 (ストリング)」として思考のはたらきを介した知識表象として捉えることができる。これら 2 つの表象を心的活動として関連付けることによって言語的システム内でそれぞれが接続され、言語的モデルが構成されたと考えられる。そして言語的反応として、記述的表象形式として文章を完成させた。これによって、先述した RCA①の「比較・マッピング」が成立したと考えられる。

また、前時までに実験したレンズの実験は「運動技能」、ワークシートの幾何光学図は「イメージ」として、非言語的な情報として入力された知識表象として捉えることができる。これらが機能することによって、非言語的システム内で連想接続が行われ、RCA①の「比較・マッピング」が成立したと考えられる。さらに、完成させた文章と想起した模式図を、光線と対応させて色を分けて描写したのは、言語的モデルの記号的表象と非言語的モデルの映像的表象の参照接続によって、それぞれの表象が重なっている部分の断片的な情報が接続され、表象の相互接続が成立し、表象ネットワークを構築したからであると考えられる (図 5)。これによって、一貫性のあるメンタルモデルとして統合され、RCA②の「完成」が成立し、レンズを通過する光に関する新たな概念が構築されたと考えられる。

表 6 S-RATs①における学習過程の分析

生徒の学習過程	RATs のパラメータ	表象の分類	RCA の種類
文章で説明される特徴に、用語をマッピングさせる。	(a) 1 (b) 文章	命題⇔ ストリング	RCA① 比較・マッピング
実験の様子を、模式図と対応させてイメージさせる。	(a) 2 (b) 現象, 図	運動技能⇔ イメージ	RCA① 比較・マッピング
完成させた特徴と模式図の整合性を保ち完成させる。	(c) 紙面 (d) 文章→図	記号的⇔ 映像的	RCA② 完成
ICT で学習履歴を記録する。	(e) 学習支援		

(2) 間違いを修正する標準的な RATs (S-RATs②) のワークシート分析

次に RCA として「前概念を想起してから課題に取り組み、学習内容を繰り返すこと」、「間違いを修正する能力を育成すること」を分析することを目的として S-RATs②を開発して実施した (図 6)。まず間違いを見つけるためには、前概念を想起する必要がある。ここでの前概念は「命題」が主体と

なると考えられるが、この学習段階では、既にイメージや運動技能を含んでコンパイルされた複合的なものと捉えることができ、様々な表象と素早く接続できると推察される。この過程では、前概念としての「命題」と、外部表象の図の「イメージ」が参照接続され、RCA①の「比較・マッピング」が成立すると考えられる。次に、それらの表象が重複する情報から、図に存在する間違いを見つけることができる。実際、ここでは生徒 S2 は光線の進み方が (1) では光軸に平行な光線は凸レンズを通過後に焦点を通り、(2) では焦点から出た光線は凸レンズを通過後に光軸に平行に進み、(3) では焦点に向かう光線は凹レンズを通過後に光軸に平行に進むように図を修正した (図 6)。この過程では、表象間の整合性を保つことが求められるため認知負荷が高くなったと考えられる。その結果、より強固な一貫性となることで、間違いを見つけ、映像的表象としてイメージを用いて図を修正したことによって、RCA③の「間違いを見つけ修正」が可能になったと考えられる。さらに、修正した理由を言語的表象形式の文章である「命題」として記述したことで、映像的表象と記号的表象の参照接続による表象ネットワークが構築されたと捉えられる。こうして RCA②の「完成」が成立し、より妥当な「命題」を含む物理概念が更新されたと考えられる (表 7)。

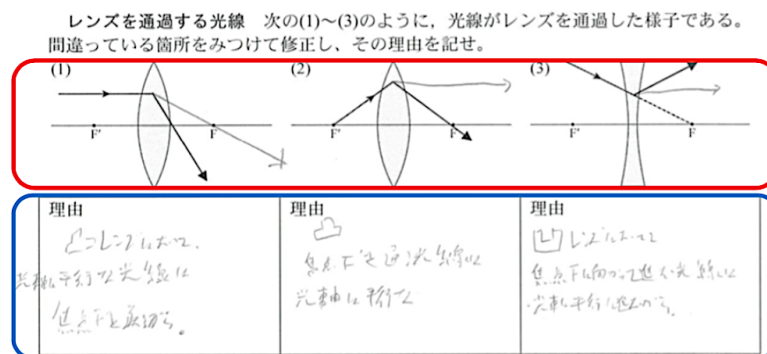


図 6 生徒 S2 の S-RATs②のワークシート記述

表 7 S-RATs②における学習過程の分析

生徒の学習過程	RATs のパラメータ	表象の分類	RCA の種類
前概念を想起する。		命題	
図から間違いを見つける。	(a) 2 (b) 図, 文章	イメージ ⇔命題	RCA① 比較・マッピング
図中の間違いを修正する。	(b) 図 (c) 紙面	イメージ	RCA③ 間違いを見つけ修正
修正した理由を文章で説明する。	(d) 図→文章	映像的⇔ 記号的	RCA② 完成
ICT で学習履歴を記録する。	(e) 学習支援		

(3) 深い理解を構築する RATs (Deeper Understanding-RATs : DU-RATs) のワークシート分析

次に、ヤングの実験や回折格子の原理など、現代物理の理論的、実験的側面につながる単元を取り扱った。扱う表象の形式や数も増えるため理解に困難さを生じる単元であることから、より深い理解を必要とする課題である DU-RATs (Deeper Understanding-RATs : DU-RATs) の構成を考えた。ただし、課題内在性の認知負荷を軽減するための CTML の「セグメントの原理」を援用して、いく

つかのセグメントに分割して課題を開発し、実施した。ここでは科学的探究の過程に準じて、「実験①」、「考察」、「結論」、「実験②」、「振り返り」に分割した（表 8）。

実験①では、知識表象として演示実験による回折現象を想起した「運動技能」、ワークシートの図からの「イメージ」の2つの表象を、レンズの学習で学んだ光線を描画する技能を適用して、RCA①の「比較・マッピング」を成立させたと考えられる。（図 7）。

表 8 DU-RATs における学習過程の分析

場面	学習過程	RATs のパラメータ	表象の分類	RCA の種類
実験①	実験と図を対応させる。	(a) 2 (b) 現象, 図	運動技能⇔ 図	RCA① 比較・マッピング
考察	図と数式を対応させる。	(a) 2 (b) 図, 数式	イメージ⇔ 知的技能	RCA② 完成
	既習事項を適用する。	(a) 2 (b) 文章, 数式	命題⇔ 知的技能	RCA② 完成
結論	数式で結論を導く。	(c) 紙面 (d) 図→数式	映像的⇔ 記号的	RCA② 完成
実験②	導いた結論を実験する。	(c) 現象 (d) 数式⇔現象	記号的⇔ 活動的	RCA② 完成
振り返り	ICT で学習履歴を記録する。	(e) 学習支援		

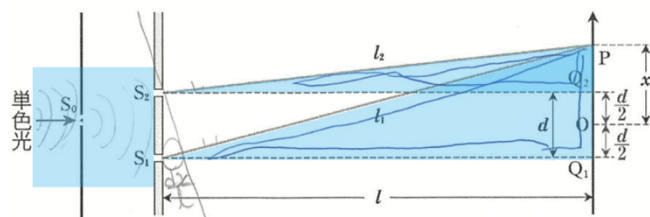


図 7 生徒 S2 の実験場面の記述

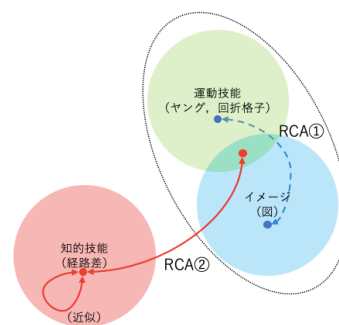


図 8 生徒 S2 の考察場面の表象ネットワーク

考察では、経路差を求めるために、図の「イメージ」と数学的に距離を求める「知的技能」として、幾何学的な計算をしていた。また、実験①で実施した光線を描画し、光線に対して垂線を書いたことで直角三角形を意識して、教師の支援によって三平方の定理を適用させていた（図 9）。

OS, P=l₁, S₂P=l₂とする。三平方の定理を用いて、h, kを、d, l, xを用いてそれぞれ表せ。

$$S_2P=l_2 \quad \sqrt{l^2 + (x - \frac{d}{2})^2} = l \sqrt{1 + \left(\frac{x - \frac{d}{2}}{l}\right)^2} \quad \left(\frac{2x}{2l} + \frac{d}{2l}\right)$$

$$S_1P=l_1 \quad \sqrt{l^2 + (x + \frac{d}{2})^2} = l \sqrt{1 + \frac{2x + \frac{d}{2}}{2l}}$$

$$\Delta l = l_2 - l_1 = l \left(\sqrt{1 + \left(\frac{x - \frac{d}{2}}{l}\right)^2} - \sqrt{1 + \frac{2x + \frac{d}{2}}{2l}} \right)$$

○スリット S₁, S₂ から点 P までの経路差 |l₂ - l₁| を、d, l, x を用いて表せ。ただし、d, x は l に比べて十分に小さく、|h| < 1 のときに成立する近似式 (1+h)ⁿ ≈ 1+nh を用いよ。※√(1+h) ≈ (1+h)^{1/2} ≈ 1 + 1/2 h

$$\left| \frac{2xd}{4l^2} + \frac{2xd}{4l^2} \right| = \frac{4xd}{4l^2} = \frac{xd}{l^2}$$

図 9 生徒 S2 の結論場面の記述

この場面では、「イメージ」と「知的技能」から RCA②の「比較・マッピング」が成立していると考えられる。さらに近似計算を行うことで「知的技能」が繰り返し活性化されていることから、言語的システム内で過負荷が生じている可能性があるかと推察される（図 8）。

結論では、既習事項である干渉の条件から、干渉縞の明暗のできる条件式を求めた。そして、その結果から干渉縞の間隔について一般化する数式を導いた（図 10）。ここでは、既習事項である明暗の条件を「命題」として適用して、ここまでの考察で導かれた「運動技能」と「イメージ」と「知的技能」の表象のまとまりが繋がり、表象ネットワークを構築していると捉えられる（図 11）。

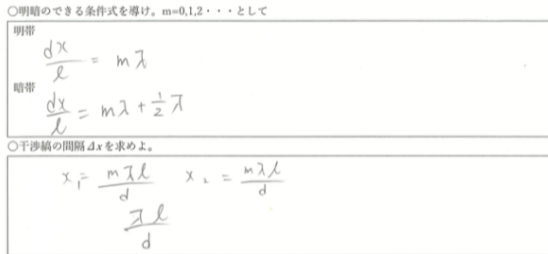


図 10 生徒 S2 の結論場面の記述

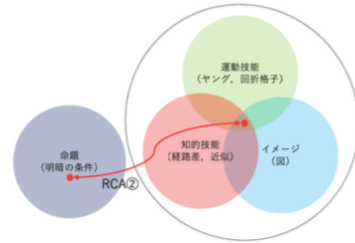


図 11 生徒 S2 の結論場面の表象ネットワーク

これまでの過程で示したように運動技能・イメージを起点とした映像的表象と知的技能・命題と関連付けられた記号的表象が、複雑に相互作用する表象ネットワークによって参照接続されることで、RCA②の「完成」が成立し、新たな概念が構築されたと考えられる。

実験②では、これまでの課題で導かれた結論における数式内の物理量に着目して、干渉縞の間隔を大きくするためには、どのような条件を制御すればよいのかを考え、実験計画を記述し3つの変数を制御することを示した（図 12）。



図 12 生徒 S2 の実験②場面の記述

表 9 発話プロトコル

発話プロトコル	
T	このLEDの色を変えます。(赤から)青にします この間隔はどうなるの？
S	狭くなる
T	赤の(波長) λ と青の(波長) λ はどっちが大きいの？
S	青
S	赤だろ？
T	空がなんで青い、夕焼けはなんで赤いって話したよね。
S	赤は遠くまで行くんだよ。
S	青弱い。
T	ということは、これ(数式)で考えたらどう？
S	小さくなる。
T	小さくなるでいい？
S	はい、行くよ。(LEDを青に変えて実験)
S	狭い。
T	君たちがみんなで求めた条件と、今実験してみたけどどうですか？完全にこれは一致して？
S	います！

ここで、クラス全体で行われた実験における波長 λ の条件制御に関する教師との発話プロトコルを示す(表 9)。この場面では、教師による「赤の(波長) λ と青の(波長) λ はどっちが大きいの？」の発問によって、波長の大きさが確認されている。生徒は「青」と「赤」のどちらも回答したため、教師は、生活経験や既習事項を想起させるために追加の質問をしている。すると生徒はそれぞれの記憶を想起し、共有しながら「赤」の波長が大きいという意見にまとまっていった。すなわち、波長 λ は「ストリング」としては単なる文字列であり、含まれる情報の捉えは生徒によって様々であるが、教師とクラス全体の議論を通じて、生徒の想起する「エピソード」や「命題」を含んだ一貫性のある表象となったと捉えることができる。さらに教師は、作業記憶の保持時間は短いことから、続けて「ということは、これ(数式)で考えたらどう？」と発問した。これによって一貫性を持ちコンパイルされた「ストリング」としての表象と、認知負荷の高い「知的技能」との接続を促した。ここでは、個人での活動ではなくクラス全体の議論により思考の抽象度が上がった。そのため、認知負荷の高い

「知的技能」を含むことになったが、これによって表象の一貫性が向上し、結果として DeFT の「深い理解の構築」機能を有する課題の開発を実現したと考えられる。

5. 研究のまとめ

本研究では、生徒の多様な表象の一貫性を促進するために、教師が認知的負荷を考慮した課題や学習の過程について RATs のパラメータを援用した課題を開発し、学習を行なった。結果として、以下の諸点が明らかとなった。

- (1) 学習の過程ごとに取り扱う表象のバランスを調整することは、認知負荷を軽減し、生徒の概念を構築させた。そのため課題において表象数などのパラメータを分析しておくことは重要であった。
- (2) 「間違いを見つけて修正」する課題では、生徒の前概念を想起させることで、認知的な活性化を生みだし、概念を更新させることができた。
- (3) 作業記憶に過負荷が生じないように CTML の「セグメントの原理」を援用して分割することは有効であった。科学的探究の過程ごとに分割することが重要であった。
- (4) 知識をコンパイルされた塊として扱えるかどうかは、認知負荷に大きく関わってくるため、接続を促す教師からの発問のタイミングは重要であった。
- (5) 結論を確認するために、導かれた数式を基に条件制御する計画を立て、対話をしながら実験で確認することは、DeFT の機能分類の視点からも抽象度が高い課題に対して有効であった。

参考・引用文献

- Ainsworth, S. (2006). DeFT: A conceptual framework for considering learning with multiple representations. *Learning and Instruction*, 16(3), 183–198.
<https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.03.001>
- Chandler, P., & Sweller, J. (1991). Cognitive Load Theory and the Format of Instruction. *Cognition and Instruction*, 8(4), 293–332. https://doi.org/10.1207/s1532690xci0804_2
- Mayer, R. E. (2006). *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*, Edited by Richard E. Mayer Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. (2002). Multimedia learning. *Psychology of Learning and Motivation - Advances in Research and Theory*, 41, 85–139. [https://doi.org/10.1016/s0079-7421\(02\)80005-6](https://doi.org/10.1016/s0079-7421(02)80005-6)
- Müller, A., Hettmannsperger, R., Scheid, J., & Schnotz, W. (2017). Multiple Representations in Physics and Science Education. In *Multiple Representations in Physics Education* (Vol. 10, Issue July). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58914-5>
- Paivio, A. (1986). *Mental Representations: A Dual Coding Approach*.
- Scheid, J., Müller, A., Hettmannsperger, R., & Schnotz, W. (2019). Improving learners' representational coherence ability with experiment-related representational activity tasks. *Physical Review Physics Education Research*, 15(1), 10142. <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducre.15.010142>
- White, R. T. (1988). *Learning Science*. In Basil Blackwell.
- 内閣府(2016). 第5期科学技術基本計画. <https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf>
- 和田一郎, 森本信也(2010). 「子どもの科学概念構築における表象の変換過程の分析とその教授論的展開

に関する研究－高等学校 科学「化学反応と熱」の単元を事例に－，『理科教育学研究』，
51(1)，117-127.