

自然事象の理解におけるイメージのはたらきの分析

松原 道男

Analysis of the Function of Images in Understanding Natural Phenomena

Michio MATSUBARA

I はじめに

認知科学においてイメージは、「表象の形態であり外的世界を心の中に表示するシステム」¹⁾と定義される。イメージは、問題解決において重要な役割を果たし、学習において変容し、論理展開にも影響を与えると考えられる²⁾。ところが、イメージの解釈や役割は、その存在の有無も含めて議論されてきた経緯がある。20世紀初頭においては、刺激の近親度の高い単純なものは自動化した判断が行われ、イメージは必ずしも必要としないとされた。一方、期待、信念、意図の構え、意味、理解などに向けた思考過程では必ずイメージをとめない、イメージをもとにした概念操作が行われるとされた。1940年代から1960年代の行動主義心理学の全盛の20年間は、イメージの研究は少なくなっていた。そして、1970年代においては、イメージは絵か命題かといったイメージ論争が起き、知識の表現をめぐる問題に発展した³⁾。

この論争において、イメージの存在を主張する研究としては、映像の連続的動きが頭の中で行われていることや、頭の中の動きが眼球の動きと同調すること、さらに映像化により記憶が促進化されるといった研究があげられる⁴⁾。一方、必ずしも映像的なイメージを必要としない研究としては、ピリシン (Pylyshyn)⁵⁾の研究があげられ、映像的なイメージを仮定する必要はなく、命題的に説明するだけで十分であるとした。このイメージ論争に対して、アンダーソン (Anderson)⁶⁾は、内部表現が絵画的であるか命題的であるかを立証することは不可能であると

している。そして、アンダーソン自身は、認知的な処理は、宣言的知識と手続き的知識によるプロダクションシステムによって実現できるとしている。この処理過程においては、イメージの存在を必要としない。また、アンダーソンの研究に基づき、脳全体の機能をとらえていく研究⁷⁾も見られる。そして、イメージ論争については、どちらがよいかといった問いは、意味がないといった主張もされた⁸⁾。

以上のイメージ論争においては、イメージと命題である言語・記号の処理を、それぞれ独立した処理としてとらえて議論しており、両者の処理の関係や両者の処理を複合した視点からは十分に議論されていない。また、アンダーソンにおけるプロダクションシステムは、当時においては人工知能を構築するための一つの考え方であったが、構築されたものは人間の思考や判断とはほど遠いシステムであり、期待されるようなものはできなかった。このことから、人間の思考や判断が、記号的な知識のみで表現できるかについては、疑問が残るところである。

現代においては、再び人工知能のブームを迎えている。従来よりも人間の処理に近づき、人間の代わりやそれ以上の処理ができるようになってきている。これは、アンダーソンのプロダクションシステムとは異なり、ニューラルネットワークに基づいたディープラーニングによるところが大きい。ディープラーニングによる画像認識については、googleの通称cat paper⁹⁾などで注目された。そこでは、ニューラルネットワークにおいてラベリングによらない画像の特徴量

検出が行われ、猫や人の顔の特徴量が検出されたことが発表されている。ここでの画像の特徴量は広い意味でのイメージである。このことは、人間の情報処理においては、特徴量、広い意味のイメージが重要であることを示唆するものである。以上のことから、教育においては、現代のディープラーニングなどの研究の知見から、人間の認識や思考についてとらえ直していく必要があると思われる。

II 研究の目的

以上のことから、本研究においては、ディープラーニングなどの現代の人工知能の研究を参考に、まず、イメージに関わる特徴量検出の考え方をとりあげる。次にその考え方から、学習者の自然事象を対象にした認識や思考の特徴を明らかにするとともに、理解との関係について明らかにし、理科の学習における指導上の示唆を得ることを目的とした。

III 特徴量検出の考え方とその特徴

ディープラーニングでは階層性のある多層のニューラルネットワークを用いる。図1に示した神経細胞に例えられる各ユニット(図1の「○」)が、隣接する層で連結しており、入力層のユニットから入力された情報が、出力層に向かって伝わる中で情報が処理される。視覚的な処理を例にあげると、入力層より入ってきた信号は、中間層によって、自動的に特徴量が検出される。特徴量検出は層によって異なる。たとえば下の層では、点やエッジといった模様が検出されるが、上へ行くほど丸や三角などの形が検出される。さらに上へ行くとそれらを組み合わせて複雑なパーツの組み合わせの特徴量が検出される。その結果、猫や人間の顔といったイメージに近い特徴量が検出される¹⁰⁾。

このようなネットワークの処理は、ネットワークの連結方法や連結の荷重を変えることにより、処理結果が変わる。それらの処理が異なる複数のネットワークの結果について、どの結果に

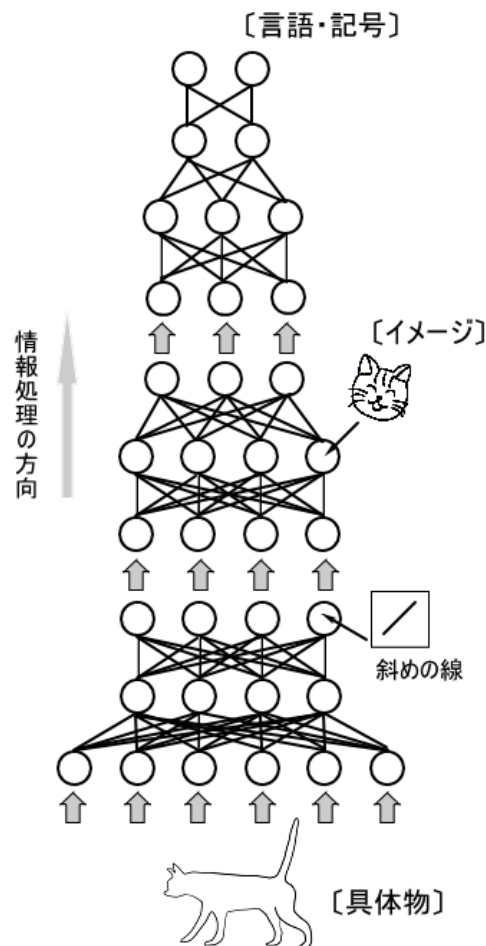


図1 ディープラーニングのモデル

重きをおくかといった重みづけや、結果の多数決をとるといった処理によって、最終的な結果が出される。このような多重の結果を合わせていく方法は、アンサンブル効果¹¹⁾と呼ばれて実際に成果をあげている。以上のような特徴量検出や複数の結果の処理は、人間のイメージの形成やそれに基づく認識や思考にもみられるものである。

一方、このようなモデルで論理的手続きはどう表現されるかということが問題となる。論理的処理はニューラルネットワークのモデルにおいても可能であるが、その処理過程は形式として見えにくい。人間においては、論理的手続きは

イメージよりも記号化されており、イメージと必ずしも一致していない。しかし、論理的手続きは具体的状況によって影響を受けることから、具体的な情報やイメージと全く独立しているわけではないと考えられる。そしてどちらの処理結果に重きを置くかについては状況によるため、他の特徴量検出と同じように一つの処理結果として扱ってよいと思われる。つまり、アンサンブル効果のように、最終的な結果に影響を与える一つの結果として見ていけるのではないかと思われる。その根拠は、人間の認識や思考においてもいろいろな観点から考慮して、結論を迷うことがある。その際、論理的に判断する場合もあれば、全体的なイメージで判断する場合もあるといえる。このように、論理的手続きも含めて、複数の特徴量検出についてお互いが矛盾するような場合は、迷ったり混乱したりすると考えられる。その場合は、その対象に対する認識や理解度などの低下が起きるのではないかと考えられる。

以上の特徴量検出と論理的手続きの特徴から、人間の認識や思考について、次のようなことが可能性として考えられる。

- ・特徴量検出に対応した人間のイメージは、対象の部分的なものから、部分が集まった構造をもつものまでである。
- ・論理的手続きによる結果は、イメージの結果と同じ一つの結果と見なすことができる。
- ・複数のイメージや論理的手続きの結果については、多数決や重みづけなどによって、最終的な結果が出される。
- ・複数のイメージや論理的手続きから導かれる結果がお互いに矛盾する場合は、理解度などに影響を与える。

Ⅳ イメージに関する調査

1. 調査の目的

先に示したディープラーニングにおける特徴量検出の観点から、学習者のイメージや論理的手続きについて推察される可能性を調べるため、次の3点について明らかにすることにした。

①複数の特徴量検出があるように、類似の事象に対してイメージや論理的手続きが複数存在する場合があるかどうか

②複数のイメージや論理的手続きがある場合、その重みづけなどが行われて、最終的な判断が行われているかどうか

③複数のイメージや論理的手続きがあり、しかもそれぞれの間で矛盾が生じる場合、その事象の理解度に変化が見られるかどうか

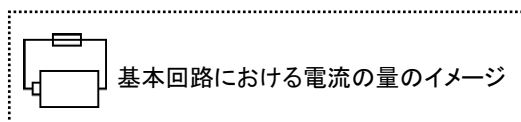
2. 調査問題

調査は、中学校の電気回路に関する事象を対象にした。電気回路については、これまでの研究において、学習者のもつ素朴概念が明らかにされている。たとえば、ドライヴァー (Driver)¹²⁾ やコーネン (Chonen)¹³⁾ は、乾電池から流れる電流が一定であるといった素朴概念を明らかにしている。また、гентナー (Gentner)¹⁴⁾ は、小動物モデル、ポンプモデルなどのメンタルモデルを学習者に形成させることによる学習効果を明らかにしている。そして、電気回路は、事象に関する法則を数式的に表現でき、論理的な手続きが明確である。

以上のことから、調査は電気回路を対象に、イメージを調べる調査 (調査 A)、イメージの解釈とともに論理的な手続きについて調べる調査 (調査 B)、理解度の自覚について調べる調査 (調査 C) の3つの調査を行った。その際、イメージによる判断は、短時間でされることを考慮した。一方、論理的手続きに関しては回路のきまりから説明できるように、十分な時間を与えた。理解度については、理解度のレベルを示し、当てはまるレベルを選択させることにした。

(1) 調査 A: イメージの調査

調査 A は、図 2 に示したように、乾電池 1 個と抵抗一つの単純回路において、電流の量を線の太さで示したものを基準にし、いろいろな回路の電流の量について、3~5 のイメージの中から適切なものを数秒で選ぶ問題である。問題は 6 問からなる。なお、乾電池は個数がわかりやすい



問題	問 1	問 2	問 3	問 4	問 5	問 6
①			※			
②	※					
③		※				※
④				※	※	
⑤						

図 2 調査問題 (「※」は科学的に正しいイメージ)

ように、回路図による表示ではなく、模式図的に示すことにした。また、調査対象者には、乾電池は一つ一つは同じ乾電池であること、抵抗一つ一つは同じ抵抗値の抵抗であることを説明しておいた。提示時間は、提示するイメージ数に対応させ、問 1～問 3 は 6 秒、問 4 と問 5 は 12 秒、問 6 は 10 秒とした。提示終了の 2 秒後にはチャイムが鳴るようにし、それまでに解答してもらうようにした。解答においては、自分のイメージ

に合った番号を答えるか、「当てはまるものがない」あるいは「わからない」と解答することとした。各問題は、次のようなイメージを調査するものである。

- ・問 1：抵抗が直列に一つ増え、抵抗が 2 倍になったときの電流の量のイメージ。
- ・問 2：乾電池が直列に一つ増え、電圧が 2 倍になったときの電流の量のイメージ。
- ・問 3：抵抗が直列に一つ増え抵抗が 2 倍になる

とともに、乾電池が直列に一つ増え電圧が2倍になったときの電流の量のイメージ。

- ・問4：抵抗が並列に一つ増え、抵抗が2分の1に小さくなったときの電流の量のイメージ。
- ・問5：抵抗が直列と並列に増え、全体としては抵抗の値に変化がなく、乾電池が直列に一つ増え電圧が2倍になったときの全体の電流の量と、並列抵抗一つ一つに流れる電流の量のイメージ。
- ・問6：抵抗が、並列と直列に増えるが、並列抵抗に一つの抵抗と二つの抵抗というように、抵抗が異なるときの全体の電流の量と並列抵抗一つ一つに流れる電流の量のイメージ。

(2) 調査B：イメージの解釈および論理的手続きの調査

調査Bは、調査Aの後、調査Aの問1～問6の科学的に正しいイメージのみを提示して、そのイメージについて問う調査である。問題は、基本となる回路のイメージを基準にして、そのイメージがどのようなことを示しているか、また、それは科学的に正しいかどうかを口頭で説明させ、正しくない場合はどこが正しくないかを答えさせる問題である。このことにより、イメージをどのように解釈しているか、また、論理的手続きを用いて解釈しているかどうかを明らかにすることにした。

(3) 調査C：理解度についての調査

図3に示したように調査Aの前に、中学校の電気回路に関する学習の理解度について7段階で提示し、当てはまる数字を回答させた。また、調査Bの終了後にも同様の質問に回答させた。このことにより、電気回路についてのイメージを想起させたり、イメージや法則にもとづく論理的手続きについて説明をさせたりすることを



図3 理解度の調査

通して、矛盾が生じた場合の理解度の変化を明らかにすることにした。

3. 調査対象

調査対象は、電気回路の学習を行っており、イメージの形成や論理の手続きをもっていることを考え、教員養成の大学生15人を対象とした。おもに理科教員の免許取得を目指している学生である。

4. 分析方法

調査Aについては、イメージの選択肢から、回路の部分に対するイメージや回路全体のイメージを分析することにした。調査Bについては、イメージについての説明から、どのようなイメージをもっているかとともに、電気回路に関する論理的手続きを用いているかを分析することにした。調査Cについては、調査の前後の選択肢の変化を見ることにより、理解度の変化を分析することにした。

V 調査結果

1. イメージについての調査結果

調査Aにおいて、イメージの選択結果から、学生がもっている電気回路のイメージを表1にまとめた。学生は、M1からM5のイメージをもっていることが考えられた。M1は「電池からでる電流が一定」というイメージであり、コーネンの研究でも見られるものである。これは、とくに問1の直列抵抗や問3の並列抵抗で、電流の量が単純回路と変わらないといったイメージの選択から判断できる。M2の「電池が直列に増えると電流の量が増える」というイメージは、問2の乾電池を増やしたときに、電流量が増えるイメージを選択することから判断できる。M3の「分岐や合流において電流に変化がない」といったイメージは、問4、問5、問6において、分岐や合流によって電流の量が変化していないイメージの選択から判断できる。M4の「分岐や合流において電流が変化する」といったイメージは、同じ

く、問4、問5、問6において、電流の量が変化しているイメージの選択から判断できる。M5の「直列抵抗において電流が小さくなる」というイメージについては、問1と問3～問6において、乾電池が増えたことも考慮しながら、抵抗が直列に増えることによって電流の量が小さくなるイメージの選択から判断できる。

表1の「イメージ」の欄に「○」を示したのが、調査Aからそのイメージをもっていると考えられる学生である。また、調査Bのイメージについての説明をもとに、そのイメージをもっていると考えられる学生は「説明」の欄に「○」を示した。

これらのイメージの中で、M1とM3は科学的には正しくないイメージである。そして、M1とM5、またM3とM4はお互いに矛盾するイメージである。M1の乾電池から流れる電流は一定であると考えられる学生は、イメージの調査Aおよび説明

による調査Bを含めて10人である。つまり、3分の2の学生が乾電池から電流が一定に流れるといった科学的に誤ったイメージや考えをもっている。また、M2の電池が直列につながると電流が増えるという科学的に正しいイメージは、ほとんどの学生がもっている。

M3の合流や分岐で電流の量が変わらないといった科学的に誤ったイメージをもつ学生は7人で、約半数の学生である。一方、M4の合流や分岐で電流は2倍や2分の1になるといった科学的に正しいイメージをもつ学生は8人と約半数である。M5の直列抵抗で電流が小さくなるといった科学的に正しいイメージをもっている学生は13人であり、ほとんどの学生がもっている。

2. イメージの説明や優先についての結果

調査Bにおいては、M1からM5のイメージに関する説明のほかに、乾電池と抵抗の法則的な

表1 調査結果

イメージや説明		学生	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15
M1	電池から電流は一定	イメージ	○			○				○	○	○		○	○		
		説明		○			○	○		○		○			○	○	○
M2	抵抗一定で電池が直列に一つ増えると電流増(2倍増)	イメージ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		説明	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
M3	合流や分岐で電流の変化なし	イメージ	○		○							○	○	○	○	○	
		説明	○									○		○	○		
M4	合流や分岐で電流は2倍や1/2倍	イメージ	○			○	○	○	○	○	○						○
		説明	○														
M5	直列抵抗2つで電流1/2または電流減	イメージ	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○		○	○
		説明	○	○	○	○	○	○	○		○		○	○		○	○
法則など	電圧(乾電池)と抵抗の関係を説明		○	○	○	○	○	○	○		○		○	○		○	○
	ほとんどオームの法則の式で説明					○			○		○						
イメージや法則の優先関係 *1			M3<M5	M1<M4, M5	M3<M5	M1<M4, M5, 法則	M5<M1	M1	法則	M5<M2, M1	M5<M1, 法則	M3<M1, M2	(M3)	(M1)<M5	M1	(M1)<M2, M5	(M1)<M2, M5
理解度	調査前		2	1	3	2	2	2	2	2	0	1	1	1	3	-1	3
	調査後		1	-2	2	1	0	-3	3	-2	-1	0	-1	-1	-2	-2	2
	調査前後の変化		-1	-3	-1	-1	-2	-5	1	-4	-1	-1	-2	-2	-5	-1	-1

*1: 「()」は、イメージとしては弱いことを示している。「法則」はオームの法則を用いることを示す。

表 2 調査 B における学生の説明例

問題	S4	S6
問 1	抵抗の数が増えると流れる電流の値が小さくなる。 $V=RI$ の式に当てはめて考えると R が 2 倍になっているので、電流は $1/2$ になるので正しいです。	抵抗が 2 つになったので電池の電圧とかが変わらなくても抵抗が多くなっているから電流が減ったというのを表して正しい。
問 2	起電力の大きさが 2 倍になると流れる電流の値が 2 倍になることを示していて、これは $V=RI$ の式に当てはめて考えると、この場合 V が 2 倍になっているので、 R と I のどちらかが 2 倍になるんですけど、抵抗の数は増えていないので、電流が 2 倍になるはずなので正しいです。	電圧が 2 倍になって、抵抗は変わらない、で電流は 2 倍になったというのを表して正しいと思います。
問 3	起電力の大きさが 2 倍になっていて、抵抗の数も 2 倍に増えているので $V=RI$ の式に当てはめて考えると、その式が成立するので正しいです。	電位も 2 倍になって抵抗も 2 つになって電流は変わらない。
問 4	抵抗を並列で 2 つつないだ場合に回路全体に流れる電流の大きさは 2 倍になることを示しています。この場合、起電力の大きさは変わっていないで、抵抗の値が並列で 2 つつないであるので、和分の積により $1/2$ の半分になっていて、起電力の大きさは変わっていないので、 $V=RI$ にあてはまると全体に流れる電流の大きさは 2 倍になるので、正しいです。	電圧は変わらず並列で抵抗が並んでいて電池から出る電流は 2 倍になっているけど抵抗にかかる電流は左の図と変わらないということを表して、正しくない。同じ乾電池から出ているのに、電流が多くなるから。
問 5	この場合抵抗器を 2 つずつ並列につないでいて起電力の大きさも 2 倍にしてあるんですけど直列につないであるそれぞれの抵抗に流れる電流の値というのは、正しいですけど全体として流れる電流の値、(まってください)。正しいです。	乾電池が 2 倍になって並列に並んでそれぞれで抵抗が 2 つ、2 倍になっていて電流は、電池から出るものは 2 倍になっていてそれぞれはかわらないということを表して、わかりません。科学的に正しくない。こっちの太さが抵抗が 2 個になっているのに変わらない。
問 6	この回路の全体に流れる電流の値は、左のモデルよりも 3 倍になっていて電気抵抗の合成抵抗とか起電力の大きさを考えると全体を流れる電流の値はこの場合多分 3 倍の太さなので正しいです。それぞれに流れる抵抗の値を考えて、 $V=RI$ オームの法則に当てはめて考えると各抵抗に流れる電流の大きさは正しいです。	乾電池が 2 つになっていて、そこから出る電流は 3 倍になって、上の抵抗の方では、電流が 2 倍、下は抵抗が 2 個になって電流は変わらないということを示して、正しくないと思います。電流は 3 倍でなくて 2 倍で、あと、下の方はもうちょっと細くなるだろうし、上ももう少し細くなるけど太さ関係はいっしょかな。こっちの方が細くてこっちの方が太い。

関係から説明する学生が見られた。それらの学生は、「法則など」の欄に「○」で示した学生であり、12 人と多い。その中で、3 人は説明においてはイメージについては言及せず、オームの法則の式のみを用いて説明する学生である。そして、これらの法則を含め複数のイメージのどれを優先するかを学生の説明から分析し、表 1 の「イメージや法則の優先関係」に示した。

学生のこれらの説明について、S4 と S6 の学生を例にあげて表 2 に示した。S4 の学生は、イメージよりもオームの法則を用いて説明を行っている学生である。一方、S6 の学生は、乾電池から流れる電流が一定であるといったイメージを

中心にもっており、説明においてはそれを用いるが、途中でわからなくなるという例である。

3. 理解度の変化

表 1 の「理解度」の欄に、調査の前後で理解度について選んだ選択肢の数値、およびその差を示した。調査の前後で 2 以上の変化が見られたものを、理解度について変化があると見なした。その結果、7 人の学生に変化が見られ、全員が理解度は低下していた。この 7 人の学生のうち 6 人は、M1 の電流一定のイメージをもっている学生である。

VI 考察

以上の結果により、イメージや法則などの論理的な手続きの複数の存在とその関係、さらに理解度について、次のことが考察される。

まず、どのようなイメージをもっているかについてまとめると次のようになる。科学的に正しい M2 の「乾電池が直列に増えることによって電流が大きくなる」というイメージは、全員がもっている。同じく科学的に正しい M5 の「直列抵抗によって電流が小さくなる」というイメージも、ほとんどの学生がもっている。さらに、電圧と電流、抵抗との関係といった法則にもとづく論理的手続きも、ほとんどの学生がもっており、それによって説明を行っている。

次に、このイメージの中で、M1 と M2 のイメージ、そして電圧や抵抗の関係の論理的手続きは、互いに矛盾する場合があります、それらをもつ学生は、3 分の 2 の 10 人であった。このことから、互いに矛盾する複数のイメージをもっていることがわかった。また、このイメージや論理的手続きには優先順位があることが認められた。M1 と M5 の両方のイメージをもっている学生 10 人のうち、M1 を優先する学生は 4 人であり、M5 を優先する学生は 6 人である。また、それらのイメージをもっているのにもかかわらず、論理的手続きを優先し、論理的手続きのみを用いて説明する学生は 3 人であった。

次に、これらのイメージと理解度については、次のことが考察される。M1 のイメージやその考え方をもたない学生は、矛盾が生じにくいと考えられる。S1, S3, S7, S11, S14 の学生がこれに当てはまり、S11 は 2 ポイントの理解度の変化はあるが、それ以外の学生は理解度の変化はほとんど見られなかった。次に、M1 と M5 の両方のイメージをもつ学生の中で、S2, S5, S6, S8, S12 の学生は、理解度に変化が見られた。一方、S4, S9, S15 の学生には理解度にあまり変化は見られなかった。この中で S4 と S9 の学生については、オームの法則を優先し、イメージをともなった説明を行わない学生であった。このように、イメ

ージが矛盾しており、イメージで判断する場合は、矛盾に気づきやすく理解度が低下することが考えられる。一方、イメージによらず論理的手続きのみで判断する場合はイメージの矛盾に気づきにくく、理解度の変化はあまり見られないのではないかと考えられる。これらの複数のイメージとは異なり、M1 のイメージのみ、あるいはその一つのイメージを中心にした学生である S6 と S13 は、そのイメージのみでは事象の説明ができなくなるため、大きく理解度が低下したと考えられる。

以上の考察をまとめると、次のようになる。

- ・電気回路に対してイメージや法則にもとづく論理的手続きは複数存在しており、それらが矛盾する場合がある
- ・複数のイメージや法則にもとづく論理的手続きについては優先順位が見られる。
- ・法則にもとづく論理的手続きの優先順位が高い場合は、イメージを考慮しないことがある。
- ・矛盾するイメージをもっている場合、その矛盾に気付くことがあり、その場合は理解度が低下する
- ・イメージが一つのみで、そのイメージで説明できない場合には理解度は低下する。

以上のことから、学習指導における留意点として次のことが指摘できる。学習者は、類似した事象に対して複数のイメージをもっていること、そしてそのイメージが互いに矛盾したり、論理的手続きと矛盾したりする場合があることに留意する必要がある。そこで、学習者自身がどのようなイメージをもっているかを表現させて自覚させるとともに、論理的手続きとの関係についても意識させるような学習活動が必要であると考えられる。その際、それぞれのイメージについて論理的な説明を求めたり、論理的な説明をイメージで表現させたりするなどして、そこに矛盾がないかどうかを確認させることなどを考慮する必要がある。

また、今回の調査でも明らかになった、乾電池から流れる電流が一定であるといった科学的に

誤ったイメージや考え方, さらに, 合流や分岐しても電流の量は変わらないといった科学的に誤ったイメージや考え方があり, このイメージや考え方は強固である。指導においてはこれらの素朴概念の存在に留意する必要があるといえる。

引用・参考文献

- 1) 大島尚編「認知科学」新曜社, 76-79, 1986
- 2) 吉田淳編:「学習とイメージ」, 初教出版株式会社, 1987
- 3) 佐伯胖編:「認知心理学講座 3 推論と理解」東京大学出版会, 35-37, 1982
- 4) 佐伯胖編:「イメージ化による知識と学習」東洋館出版社, 174, 1978
- 5) Pylyshyn, Z.W., What the mind's eye tells the mind's Brain: A critique of mental imagery, Psychological Bulletin, Vol.80, No.1, 1-24
- 6) Anderson, J.R., Arguments concerning representations for mental imagery, Psychological Review, Vol 85(4), 249-277, 1978
- 7) 寺尾敦:「認知アーキテクチャの理論による脳の構造と機能の解明」, 電子情報通信学会誌, Vol.98, No.12, 1083-1090, 2015
- 8) 宮崎清孝:「メンタル・イメージは絵か命題かー認知心理学でのメンタル・イメージ論争についてー」, 教育心理学年報, 第19巻, 112-124, 1980
- 9) Quoc, V. L., et Al., Building high-level features using large scale unsupervised learning, Proceedings of the 29th International Conference on Machine Learning, Edinburgh, Scotland, UK, 2012
- 10) 松尾豊:「人工知能は人間を超えるか ディープラーニングの先にあるもの」, KADOKAWA, 164, 2015
- 11) 山本一成:「人工知能はどのようにして「名人」を超えたのか?」, ダイヤモンド社, 161-163, 2017
- 12) R. ドライヴァー他編:「子ども達の実験理解と理科授業」東洋館出版社, pp.49-71
- 13) Chonen, R., Eylon, B. & Ganiel, U., Potential difference And current in simple electric circuits: A study of student's concepts, American Journal of Physics, Vol.51, No.5, 407-412, 1983
- 14) Gentner, D. & Gentner, D.R., Flowing waters or teeming crowds: Mental models of electricity, In Gentner, D. & Stevens, A.L. (Eds.), Mental Models, Lawrence Erlbaum Associates, 99-129, 1982