

【 論文 】

断片的知識論とその教授活動への示唆

村山 功

静岡大学

要旨

断片的知識 (KIP) 論は、認知の文脈依存性や知識構造の獲得・移行を重視した、知識表現モデルの一種である。KIP コミュニティにおける先導的な研究者である diSessa は、物理に関する直観的な推論を説明するために p-prims 理論を構築した。p-prims は小さな要素知識であり、呼び出しの優先度と信頼性の優先度によって相互に結びついている。形式的知識と素朴概念の共存、およびそれによる推論は、これらの結合の変化によって説明される。Lawler は自然な状況における自分の娘の加算の学習を、彼流の KIP 理論であるマイクロワールドによって説明した。どちらの研究者も、知識の文脈依存性や KIP 間の関連付けの重要性を強調している。このことは、学習者の知識が文脈に依存しない一般的な構造であり、容易に組み合わせて新たな知識構造を作ることができるとする、教育上の仮定に対する再考を促す。

キーワード

断片的知識、知識構造、文脈依存性、学習、教授

本稿の目的

断片的知識 (knowledge in pieces) 論における知識観・学習観について、diSessa の p-prims 理論を中心に紹介する。これに基づいて通常の教育活動が前提とする知識観・学習観を検討することにより、教授活動をとらえ直す手がかりを探る。

1. 認知科学における知識理論と断片的知識

認知科学の初期における思考の研究は、パズルやゲームなどの問題解決を対象としていた。そこで扱われる「問題」は〔初期状態、目標状態、オペレータ〕の3つ組からなる問題空間として表現され、問題解決とはその空間の探索と考えられた (Newell, Shaw, & Simon, 1958)。この枠組みにおいては、より効率のよい探索アルゴリズムがより知的であることを意味した。

しかし、1970年代になると、思考を含む認知行動における知識の重要性が広く認識されるようになった (Chase & Simon, 1973; Chi, 1978 など)。このような認知行動を説明するために、階層的ネットワークモデル (Collins & Quillian, 1969)、フレーム (Minsky, 1975)、スキーマ (Rumelhart, 1980)、スクリプト (Shank & Abelson, 1977)、プロトタイプ (Rosch, 1973; Rosch & Mervis, 1975) メンタルモデル (Gentner & Stevens,

1983) など、知識構造を記述する方法がいくつも提案された。それまでの探索アルゴリズムとは異なり、これらの知識表現はそれ自体として動作するものではなく、知識構造と知的行動とは研究者が対応づけていた。¹⁾

当時の認知科学においては、対象とする認知行動を知識構造に基づいて説明することが重要であった (Chi, etl. al, 1981)。知識構造は説明項であり、被説明項である行動がうまく説明できるように、後づけで想定されることも多かった (Collins, Brown, & Larkin, 1980)。これと比較して、知識構造を被説明項とするような研究は少数派であった (Nelson, 1973; Rosch & Mervis, 1975 など)。

このような説明項-被説明項関係があるため、知識構造の粒度もかなり大きいものであった。認知主体による行動の違いを、それぞれの認知主体の持つ知識構造の違いで説明するのであれば、説明対象となる行動群と知識構造が対応していればよい。このため、行動群と知識構造が1対1に対応づけられることが多く、説明すべき行動群がある程度複雑であれば、結果として知識構造も複雑なものとならざるを得なかった。

このように、想定される知識構造が大きいことから、その知識構造がどのように作られたか、ある知識構造がどのようなプロセスを経て新しい知識構造に変化する

か、を説明するのは困難であった。また、知識構造は一般性を持たされることが多いため、その結果として認知行動の文脈による多様性を扱いつらかった。

Minsky を筆頭とする MIT の研究者グループでは、このような流れとは異なる知識の扱いを提唱していた。スキーマやスクリプトが、その知識構造一つで一群の認知行動を説明できるような粒度の大きい知識であるのに対し、それ単独では行動を説明できないような小さな要素知識を想定し、それが組み合わされることによって知的行動が生み出されるとした (Minsky, 1975, 1986)。そのような小さな要素知識を採用したメリットとしては、(1) 知識の起源を経験に求めやすいこと、(2) 小さな知識の結合によって認知行動を説明できれば、知識構造の漸進的な変化を扱えること、(3) 認知行動の文脈依存性・多様性を扱えること、などが挙げられる。

2. 自然科学の学習に対する diSessa のアプローチ

科学学習の分野で断片的知識論を精力的に研究したのが diSessa である。物理学のように体系的な理論は、教育機関において体系的に教えられ、体系的に学ばれることがほとんどである。そのため、教える人間も学ぶ人間も、知識が基礎から順序よく積み上げられ、体系的な知識構造が形成されると考えがちである。しかし diSessa は、物理学を学んでいる人間の思考は一貫した体系的なものではなく、日常的な思考と混在していると考えていた (diSessa, 1982)。科学的思考を日常的思考と分けて個別に説明するのではなく、日常的思考から連続した思考として一貫して説明するために、diSessa は p-prim と呼ぶ断片的知識によるネットワークを提唱した。

1) p-prim 理論

a. 研究のスコープ

1970年代はじめまでは、パズルのように主として洞察を必要とし、特定の知識獲得を前提としない領域 (knowledge lean domain) における問題解決が、主たる研究対象であった。しかし、問題解決や学習における知識の役割が明らかにされたことにより、豊富な知識の獲得を前提とする領域 (knowledge rich domain) における問題解決や学習の研究が重視されるようになった。このため、1970年代後半から1980年代前半にかけて、自然科学、特に初等物理学を対象とした学習研究が精力的に行われた (Simon & Simon, 1978; Larkin, McDermott, Simon, & Simon, 1980; Chi, Feltovich, & Glaser, 1981 など)。初等物理学は、一定量の学習が要求され、かつ学習される知識が明確であるという点で、このような研究の対象として適していた。

ここから生まれてきた研究が教科書に載っている例題のような定型的な問題解決を扱っていたのに対し、diSessa (1983) が扱ったのは「直観」である。問題解

決研究の主流が、公式をいかに適切に利用して問題を解くかであったのに対し、diSessa は無意識かつ自然に行われる概念の適用についての説明を試みた。

具体例で説明しよう。初等力学を学んでいない人にとって、机の上に置いた本が動かないのは当たり前であり、あえて説明するとすれば、「机があるから (なかったら落ちる)」「机がしっかりしているから (脆かったら壊れて本が落ちる)」となる (Ogborn, 1985)。これが素人の直感である。初等力学を学ぶことにより、「机の上の本が動かないのは、運動法則に従って考えれば、本に働く重力と大きさの等しい逆方向の力が机から加わっているから」と考えられるようになる (Anzai, 1991)。このような思考が、当時の学習研究の対象である。これに対し、diSessa が扱った直観とは、このような場面で「垂直抗力があるから」と自然に考えることである。「運動法則に従って推論すれば、そういう力が働いていざるを得ない」のではなく、「考えるまでもなく、最初からそうとしか見えない」ということである。これは、「机があるから」と同様の思考形態である。このような学習前から学習後までの状態を同じ方法で説明することが、diSessa の目標であった。

diSessa による直観の研究は、素朴概念研究とも強い関係を持っていた。1970年代の終わりから1980年代初頭にかけて、大学等における科学教育の研究において、教えたはずの概念が誤って理解されているという調査結果が報告された。初学者は、科学的概念を言葉としては理解し、定型的な問題を解くことすらできるものの、基本的な概念を現実に適用することに困難があることが、運動学や力学の分野で様々な課題を使って示された (Trowbridge & McDermott, 1980, 1981 など)。それに続いて、このような誤った理解が、学習者が授業以前に持っていた、いわゆる素朴概念の影響であることが明らかにされた。このような学習した科学的概念と以前から持っていた素朴概念とが混在している状態での認知行動を説明するのに、断片的知識論は適していたのである。

b. 理論の道具立て²⁾

diSessa は、まず、phenomenological primitives (p-prims) という要素知識を想定する。これは、物理的世界の現象の観察を通して獲得される、単純な要素知識である。たとえば、バネを押すと縮み、放すと戻る。この現象を見ることで、人間は「弾性」という p-prim を形成する。弾性の p-prim 自体は、押し縮めたり引き伸ばしたりしても元に戻るといった現象を見たときに想起されるというだけの単純な要素知識である。このような要素知識は、観察に基づいて多様な現象から大量に作り出される。diSessa は弾性以外の p-prim の例として、「次第に弱まる (dying away)」といった変化傾向の p-prim や、「抵抗が強いほど力が必要である」という Ohm's

p-prim のような一見すると抽象的な p-prim も挙げている。これらも、深い理解プロセスによって形成された知識ではなく、日常経験からかなり直接的に抽出された断片的な知識である。その内容は単純であり、それを保有している人間にとっては直観的で、自明で、説明が不要なものである。p-prim は、経験や観察に基づくことから "phenomenological" であり、所有者には自明であり知識の最小単位であることから "primitive" なのである。

個々の p-prim 自体は単純なものであり、スキーマやスクリプトのように、それ単独で複雑な思考を説明するようなものではない。個々の p-prim よりも、p-prim 間の関係によって説明を行うのである。そのための仕組みが、呼び出しの優先度 (cuing priority) と信頼性の優先度 (reliability priority) である。

人間が自然現象を見たとき、それに関連すると思われる p-prim が呼び出される。これを司っているのが、呼び出しの優先度に基づくメカニズムである。観察された現象に関連する p-prim が複数あっても、呼び出されるのは優先度の高い p-prim である。このことから、持っている p-prim に変化がなくても、呼び出しの優先度が変われば、同じ現象を見たときに呼び出される p-prim は変わるようになる。これによって、現象がどのように認識され、どのような推論が行われるかが変わってくる。呼び出されなくなった p-prim は、その現象の呼び出し関係からいわば解雇されただけで、p-prim 自体は残っており、別の機会に使われる可能性はある。

p-prim の呼び出しは状況との単純なマッチングによって行われるため、呼び出された p-prim は必ずしもその状況に適切とは限らない。呼び出された p-prim を使うかどうかを決定するのが、信頼性の優先度である。落下した物体が跳ね返ったとき、弾む p-prim が呼び出されても、その現象についてさらに考える必要がある場合には、弾む p-prim からより上位の p-prim へのリンクをたどっていく。それが弾性 p-prim か剛性 p-prim か、あるいはそれ以外の p-prim かは、人によって異なる。弾性も剛性も物理学上の概念ではあるが、現象を説明するには弾性の方が強力であるため、学習が進めば弾性 p-prim が上位にくる。信頼性の優先度が高いものは、より基本的なものである。

これら2つの優先度により、推論がコントロールされる。素人や初心者の推論が提示される現象によって大きく変わるのは、特に呼び出しの優先度が文脈に依存しているからである。日常生活の様々な場面において、その場面に特有の p-prim が作り出されるため、多様な状況に対応することができる。しかし、それは場面ごとに個別の対応であり、文脈に敏感な推論とならざるをえない。一群の物理現象を同じ理論によって統一的に説明するようなこととは異なるのである。その一方で、信頼性の優

先度が安定していくにつれて、p-prim 間の関係は組織化されていくことになる。これにより、文脈による多様性を保ちながら、体系性を示すことができる。

また、p-prim 自体も発展する。たとえば前述の弾性 p-prim は、最初は単に「押せば縮み、放せば戻る」という現象に対応した知識の断片に過ぎない。しかし、物理学の学習が進むことにより、個々の状況における具体的なメカニズムを省略した、マクロレベルのモデルとしても働くようになる。たとえば、「変形→力の蓄積→反発」という因果関係のモデルであり、「外部のエネルギーによる変形によって位置エネルギーが蓄積され、変形が戻るとエネルギーも外部に放出される」というエネルギーの流れのモデルである。

このような枠組みから、学習に関して3つの重要な示唆が導き出される。第一に、正しい知識の獲得を学習と呼ぶことが多いが、個々の p-prim 自体について正しいとか間違っていると言うのは意味がない。物理現象について問われたとき、正しく答えられたというのは、その現象を扱うのに適切な p-prim が呼び出されたことの結果であり、間違った解答は不適切な p-prim が呼び出されたことの結果である。呼び出された個々の p-prim が正しいわけでも間違っているわけでもない。

第二に、学習のどの時点においても、同じような p-prim を含んでいるということである。科学的概念の獲得によって、たとえ根本的な概念変化が起きたとしても、p-prim の総入れ替えは生じない。たとえば、運動方程式あるいはエネルギー保存則や弾性係数によって、物体の跳ね返りの運動が計算できるようになったとしても、弾むという現象を見たときに弾む p-prim が働くことに変わりはない。そうでないと、現象と科学的概念をつなぐものがなくなってしまふ。

第三の示唆は、科学的概念の獲得は学習の終了を意味しないということである。たとえば、ガラス板の上に鉄の玉が落ちる場合でも、そこに弾性は存在している。しかし、日常的な考え方では、この現象から「剛性」や「壊れる」という p-prim は呼び出されても、「弾性」や「弾む」という p-prim は呼び出されない。このことは、弾性についての科学的概念が獲得されていても、この場面には適用されないということの意味している。つまり、科学的概念を正しく獲得したとしても、それが必要な現象に適用されるためには呼び出しの優先度の変化が必要なのである。

Chi ら (1981) は、初等力学の問題文を読ませた場合、初学者は問題を解くために必要な情報を特定するだけなのに対し、熟達者は同じ情報を特定するだけでなく、そこから問題を解くために必要な二次的特徴を引き出していることを示した。たとえば、問題を解くための情報として、「摩擦がない」という部分を問題文から特定する

だけではなく、エネルギー保存の法則が適用できることを推論できるのが熟達者である。これは、diSessa の理論を使えば、熟達者の場合には「摩擦 p-prim」から「エネルギー保存 p-prim」への強固な信頼性のリンクがあると解釈することができる。

2) p-prims 理論の発展

a. 計算論的な洗練

Cognition & Instruction 誌の2号を合併して特集された diSessa の論文では、p-prims 理論の最終的な目標が、常識や直観的知識とその科学的理解への変化を説明する計算論的理論の構築とされ、理論自体にも進展が見られる (diSessa, 1993)。

まず、定義の修整が行われている。知覚から意識に至るネットワークが想定され、p-prims はその中間層に位置づけられている。このようなネットワークにおいて、呼び出しの優先度は、ある p-prim が他の p-prim によって活性化される結合の強さと定義し直されている。ここでは、負の活性化 (抑制) にも言及されている。また、信頼性の優先度は、ある p-prim から活性化が伝播し、そのフィードバックによってその p-prim が活性を保つ強さと定義し直されている。どちらも実体はネットワークの結合強度であり、この両者をあわせて構造化された優先度 (structured priority) と呼んでいる。

次に、p-prims 理論を用いて物理学の学習について説明している。最初は多くの p-prims が構造化されないままに存在しているが、学習の過程で p-prim の優先度は増減し、活性化される文脈は変化していく。新たな p-prims の獲得も行われるが、その機能の変化の方が重要である。物理学の知識を獲得することにより、p-prims は自明なものから形式的知識によって説明を受けるものへと変化し、このことが逆に p-prims に対して形式的な知識への発見法的な手がかり (heuristic cue) という機能を与えることになる。ここで、形式的知識は知覚システムから直接活性化されない、ということに注意しておく必要がある。形式的知識を実際に適用するときには、まず知覚システムによって p-prims が活性化され、そこから形式的知識が活性化されるのである。このように、形式的知識が p-prims を必要とすることを、diSessa は形式的知識の分散符号化 (distributed encoding) と呼んでいる。

b. 素朴概念研究における論争

p-prim 理論は (少なくとも物理学の) 学習を幅広く扱うための理論であるが、diSessa は主として初等力学の初学者における理解 (誤解) を対象とした研究を行った。このため、Chi や Vosniadou などの素朴概念研究者と、素朴概念についてのメタ理論的な対立を生じることとなった (村山, 2011)。これは素朴概念が、Chi (1992,

2008) や Vosniadou の理論 (Vosniadou & Brewer, 1994; Vosniadou, Vamvakoussi, & Skopeliti, 2008) のように一貫性のあるもの (coherence) なのか、p-prims 理論のように断片的なもの (fragmentation) なのか、という問題である。この対立は、理論が断片的知識か、などとも表現される。Chi も Vosniadou も、素朴概念を一貫性のある知識あるいは理論として扱っており、p-prims 理論のような断片的なシステムでは素朴概念に基づく一貫した反応を説明できないと批判している。

しかし、被験者に物理の問題を提示してインタビューを行った diSessa の研究では、素人や初心者の反応は文脈によってかなり異なり、問い返されただけで回答が変化することもあるなど、一貫性があるとは言えない。diSessa, Elby, and Hammer (2002) は、ある一人の被験者のこうした行動パターンをまとめているが、その中には「同じ現象に対して異なる機会に矛盾する説明を行う」、「文脈によって専門用語をまったく異なる意味で用いる」、「異なる専門用語を交換可能なものとして扱う」、「自分の文脈依存的理解を優先し、物理学の原理を否定したりする」といったものが挙げられている。反応の一貫性ではなく、こういう文脈に依存した多様性を説明することこそが、断片的知識論の目的の一つなのである (diSessa, 2008)。

概念という粒度の大きい知識単位を用いる限り、認知の文脈依存性や多様性を適切に扱うことはできないと考えた diSessa は、「概念」という概念についての検討を行い、従来の概念変化研究の問題点を指摘するとともに、coordination class と呼ぶ知識構造によって概念を置き換えることを提唱した (diSessa and Sherin, 1998)。

従来の概念変化研究においては、知識構造の強い変化と弱い変化とが対比される。学習の結果として、核となる概念が変化したかどうか、この両者の違いであるとされている。ここでは、概念変化の前と後という2つの時点において、概念のスナップショットが比較されている。しかし、概念が変化するとは、具体的には何がどう変化することなのか。diSessa らはこう問いかね、従来の研究が抱える3つの問題を列挙している。

まず、何を概念と見なすかが問題である。ある個人がある概念を持っていると、どうして記述できるのか。従来の研究では、これをきちんと説明しないまま、概念という用語を用いていた。概念あるいは素朴概念に関する実験においても、被験者の反応が本当に (多くの場合、単一の) 概念の働きによるものであるかどうかは、実は明らかではない。次に、従来の理論は、概念の幅の広さに対して無自覚である。犬や動物は概念であるが、力や数も概念だとされる。しかし、犬の知り方と力の知り方は、同じであると言えるのか。概念というたった一つの理論的構成物で、すべてを一括して扱ってよいのか。最

後に、これらの問題に答えられたとしても、概念とは何であるのかという理論がない。概念変化研究をこの観点から検討すると、各著者がどのような意味で概念という語を用いているか確定できない。

以上のような問題を踏まえて、diSessaらは概念の代替物として coordination class (以下、CC) を提案する。鳥の概念はある対象が鳥であるかどうかを同定するのに用いられるが、速度の概念はそれが速度であるかどうかを同定するのではなく、ある対象の速度が速いか遅いかを知るために用いられ、力の概念はそこに力が働いているかどうか、働いているならどのくらいの大きさであるかを知るために用いられる。このように CC の役割は、状況から必要な情報を読み出すことである。

このとき、CC は2つの異なる機能を果たす必要がある。まず、ある状況で得られる豊富な情報を組み合わせる必要な情報を読み出すこと、つまり統合である。もう一つは、多様な状況において常に同じ情報を読み出すこと、つまり不変性である。これを実現するため、CC は2つの構成要素を持っている。一つは読み出し方略で、状況の中から選択的に情報を抽出する。読み出し方略は状況によって異なり、そこから得られる情報も異なる。もう一つが因果ネットで、複数の情報から必要な情報を推論する。状況によって情報の組み合わせは異なっても、それを統合して同じ情報を作り出す。diSessa はこのような小さな知識の体系で、概念というひとまとまりの知識を置き換えたのである。

既に述べたように、多様な日常場面に対応して多様な p-prims が作られ、それらが呼び出しの優先度と信頼性の優先度で結びつけられている。これが、素朴物理学における因果ネットとして機能している。diSessa らが説明のために用いた例の一つは、机の上に置いた本を指で押して動かすという現象への、ある被験者の反応である。このとき被験者は、指が本を押す力と本が指を押し返す力が存在し、同じ大きさであると答えた。ところが、机が本に加える摩擦力は認めたが、本が机に対して水平方向に加える力は認めなかった。そこで、diSessa は本の下に紙を敷き、本を押すと紙も一緒に動く様子を見せたが、被験者は単に紙を引きずっているだけだ（力は存在していない）と答えた。このように、状況が異なると力の存在が読み出せなくなることは、よく観察される。

この例でわかるように、因果ネットは推論において理論と同じような役割を果たすが、p-prims の持つ、個々の単純さ、膨大な数、限られた組織化、観察に基づく性質といった特徴は、理論の特徴として思い浮かべるものとは明らかに異なっている。このため、異なる状況で同じ情報を読み出すという不変性の達成は困難である。そのためには、因果ネットの再編成が不可欠であり、それが概念変化が困難な主たる理由となっていると、diSessa

は主張している。

3. Lawler の学習研究

diSessa の一連の研究は、学習について考える上で有意義なものであるが、学習のプロセスを直接扱ってはいない³⁾。断片的知識論によって、学習をどのような現象として記述できるかを示したのは、Lawler (1981) である。

通常の学習実験においては、処遇の前後にテストを実施し、処遇によるその変化によって学習を測定し、処遇の効果を検証する。この枠組みでは、学習のプロセスを扱う必要はなく、知識を記述する必要もない。これに対して Lawler が行ったのは、日常生活の中で生じている学習の研究である。妹ミリアムと兄ロビーという自分自身の2人の子どもを対象に、6ヶ月に渡って加算に関する学習を観察・記録し、それを断片的知識論に基づいて分析した。

1) マイクロワールド

単純に考えれば、加算についての知識とは数を加えることに関するひとまとまりの知識であり、様々な加算の問題をこの同一の知識を使って解いているように思える。しかし、Lawler は、加算に関する知識が断片的な知識のあつまりであると考えた。その根拠として、以下の現象を挙げている。

「75+26はいくつ」と尋ねると、ミリアムは「70, 90, 96, 97, 98, 99, 100, 101」と答えた。その直後に「75セントと26でいくつ」と尋ねると、「3クォーター、4と1ペニー、1ドル1」と答えた。後にこれを筆算で解かせると、右から左へ繰り上がりを使って計算した。

ここで、ミリアムは 75+26 という同じ問題に対して、数え上げ、お金の計算、筆算という3つの方法を使って答えている。しかも、問題の提示のされ方によってどの方法が適用されるかが変わるという、文脈依存性を示している。さらに、直前に求めた結果を別の形式の計算で使っていない。このことから、3つの方法が断片的で相互に独立した知識構造であると考えることができる。

つまり、どの問題にも加算という一つの知識を適用しているのではなく、お金の問題にはお金の加算専用の知識構造が、筆算の問題には筆算専用の知識構造が、それぞれ独立に働いている。この知識構造は diSessa の p-prim よりも粒度が大きいものの、加算というひとまとまりの知識よりも断片的である。こうした断片的な知識構造が相互に関連を持たず、競合して働いていると考える点で、これもまた断片的知識論の一つである。

Lawler は、これらの知識構造を、心の中の小宇宙という意味で、マイクロワールドと呼んだ。マイクロワールドは、perspective と functions という2つの手続きの

クラスを持っている。図1はCOUNTと命名されたマイクロワールドである。perspectiveは、図の○で表した要素からなっており、これが問題を解析する。functionsは、perspectiveの要素が問題からの値で埋められたときに活性化される。functionsには、暗記された答である「既知の結果」と、計算を行う「手続き」の2つの種類がある。COUNTにおける手続きは「数え上げ」であるが、数え上げられるのは1桁に限られている。このため、ミリアムは $89+7$ を指で数えて求めることはできるが、 $89+14$ は計算できない。

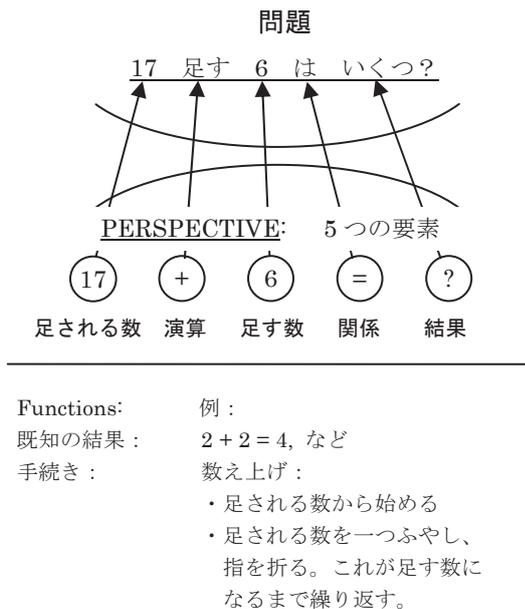


図1 COUNTのマイクロワールド

2) 経験に基づく知識の獲得

このようなマイクロワールドは経験から得られる、とLawlerは主張する。その根拠として、2つのマイクロワールドが挙げられている。

一つ目は、お金の加算を扱うMONEYである。MONEYはCOUNTから生まれたが、硬貨の単位(penny, nickel, dime, quarter, half, dollar)を含んでいるという違いがある。また、お気に入りのガム(15セント)は2個で30セントであるなど、MONEYの「既知の結果」はかなり特殊である。COUNTの「数えられる対象」に対して、硬貨の持つ不規則な単位を被せたものがMONEYのperspectiveであり、MONEYはCOUNTが経験によって精緻化された子孫であるとされる。

もう一つは、2桁同士の加算を扱うDECADALである。この観察期間中に、ミリアムはLogoというコンピュータ言語を習い始めた。子どもにとってのLogoは、亀ロボットやコンピュータ画面に表示された亀を、前進・回転・ペンの制御といった命令によって動かして、作図を行う道具である。これが子どもにとって他の経験

と異なるのは、亀への命令では、どれだけ前に進むか、どれだけ右に回転するかなど、数値化が求められるということである。特に、亀を的に当てるゲームSHOOTで、ミリアムはほぼ毎回10刻みの暗算をする経験を得た。この結果、DECADALというマイクロワールドが形成された。これは、72を70と2に分解するというように、2桁の数字を2つの数字に分解し、別々に加え合わせた結果を組み合わせて答を求めるものである。2桁同士の加算ができることから、これがCOUNTとは異なることは明らかである。

3) マイクロワールド間の関係づけと知識獲得

MONEYがCOUNTから生まれたように、経験によってあるマイクロワールドが精緻化されて別のマイクロワールドになるのも、学習の一つの形態である。詳細は省くが、Lawlerはこれ以外に2通りの学習メカニズムを紹介している。

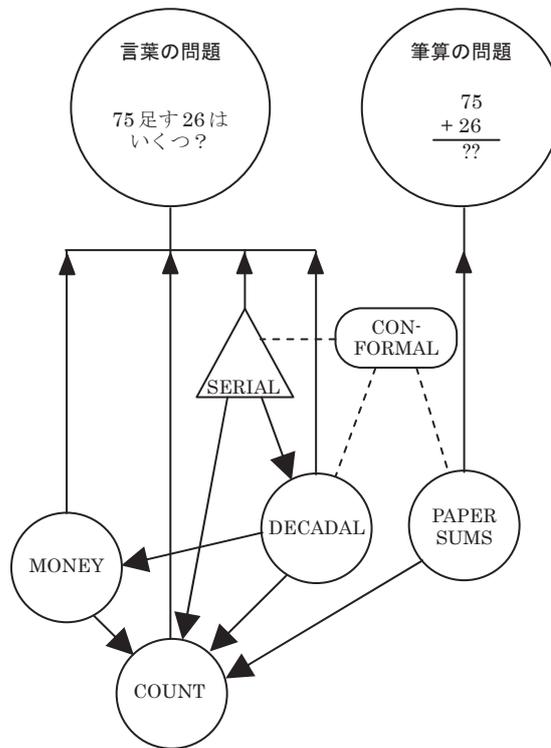


図2 加算のマイクロワールド間の関係

a. 制御の上昇 (elevation of control)

ミリアムはある時期には、12を10と2に分けるというように数の分解ができるようになっていた。これはCOUNTのperspectiveが改良されたことを意味する。37から12数え上げるのではなく、10を足した47から2つ数え上げるのである。これとDECADALの結果が一致することは我々にとっては当然だが、それに気づいたミリアムにとっては驚きであった。ここで生じた洞察を、Lawlerは制御の上昇 (elevation of control) と呼んだ。

それまで独立していたマイクロワールドの上位に、それらと呼び出すことのできる新たな制御要素が作られたからである。

DECADAL と COUNT の2つのマイクロワールドが同時に同じ答えを出すことで、無関係なものに関係が生じたが、これが新たな構造の生成に不可欠である。マイクロワールドの競合の代わりに協同が可能になり、DECADAL が計算を始め、COUNT が完成させることができるようになった。

b. perspective の相関 (correlation of perspective)

ミリアムは筆算について学ぶ中で、筆算の結果がこれまで使ってきた暗算の結果と同じで「なければならない」ことを理解した。Lawler はこの変化を、CONFORMAL というマイクロワールドの生成で説明している。CONFORMAL が持つのは、37の3は"三十七"の"三十"と同じであるというような、複数のマイクロワールドの対応関係についての知識である。これは perspective の相関 (correlation of perspective) と命名されている。CONFORMAL は、PAPERSUMS、DECADAL、SERIAL のという3つのバラバラなマイクロワールドを統合するために不可欠な知識を表現しており、構築はするが機能は持たない。

このように、Lawler は子どもの観察記録の中から学習が生じたと思われる場面を探し出し、そこで生じたことをマイクロワールドによって説明している。この説明は、マイクロワールドとその関連づけによって組み立てられており、学習のプロセスまで視野に入れれば、加算に関するひとかたまりの知識構造でこれを置き換えるのは不可能であろう。

4. 知識観・学習観と教育

断片的知識論に基づいて教授を考える際に有用なのが、Riley らと Lampert の研究である。Riley ら (Riley, Greeno, & Heller, 1983) は、加減算の文章題の難易度がどのような要因で決定されているかを検討した。たとえば、「太郎君はアメを3つ持っています。花子さんはアメを5つ持っています。合わせてアメはいくつでしょうか。」は簡単な問題であるが、「太郎君はアメを何個か持っていました。お母さんがアメを3個くれたので、いま太郎君はアメを8個持っています。太郎君は最初にアメを何こもっていたでしょうか。」はかなり難しい問題である。こうした難易度の違いは、未知数の位置や構文的な複雑さなどの問題文の表現では説明が不可能であり、問題文が表している状況自体の理解が問題であることが示された。つまり、問題を解くためには、彼らが行為スキーマと呼ぶ「解き方」だけでは不十分であり、「問題文を理解する」ための問題スキーマが必要である。そして、この問題スキーマは単一ではなく、2つの数の大小比較

や2つの数の合併など状況の意味によって別々に獲得されており、その獲得の容易さが異なるとした。

また、Lampert (1986) は、算数の知識として、直観的知識、手続きに関する知識、原理的知識の3つを学習者が持っているとし、一つの知識が深まれば他の知識も深まるといように、これらの関係を維持・強化していくことが重要だと考えた。しかし、乗算を教える授業では、1桁×1桁の乗算の時には数えたり操作したりという活動を行うのに、2桁×2桁の乗算になるとそれが行われなくなってしまうことが多い。これでは3つの知識の関係が強化されず、それが多桁の乗算や筆算の学習を妨げている可能性がある。そこで Lampert は、まず2桁×2桁の乗算の式を示し、この式が立つような状況を作らせ、そこでの数え方を工夫させる授業を行い、3つの知識をお互いにつなぎながら深めていく学習活動を取り入れることで、乗算の理解が深まったことを示した。

どちらの研究も、教育について考える上で、獲得されるべき知識がひとまとまりのものとして考えられないこと、学習者が持っている知識の多様性が重要であること、そしてこれらの知識間の関連づけが必要であることを示している。これだけを聞けば当然のことを主張しているだけのように思えるかもしれない。その場合には、その対極にある知識観・学習観を考えてみればよい。知識が一般性を持っており、新たな知識を付加していくことによって、より複雑で体系的な知識構造を形成していく、というものである。もちろん、このような知識観・学習観を意識的に用いて教授活動を行っている教師は、ほとんどいないであろう。しかし、Lampert が指摘した、数が大きくなれば操作活動が省略されてしまう、ということは現実によく見られる。もう理屈はわかっているからいいだろうというのが、その根拠であろう。

断片的知識論の立場から考えてみることで、こうした無意識の前提を自覚することができる。すると、「教えるのはこの知識である。この学習者はここまではわかっている。だからその理解の上にこの知識を積み上げよう。そのためにこの例を使って教えよう。それが理解できたら、活用ができるようにしていこう。」という考え方の一つ一つに疑問が呈されることになるだろう。

もし、知識がひとまとまりのものであるならば、それを教えることを授業の目標とし、その知識を使って解ける問題で学習の結果を評価することができる。しかし、人間の理解が文脈に敏感な小さな知識のかたまりによるものとしたら、学習者がどうなったときに我々は「教えた」ということができるのだろうか。学習目標をどのように立て、どのような方法で評価すればいいのだろうか。

もし、知識がひとまとまりのものであるならば、学習者の理解状態を記述し、その上に新たな知識を積み上げ

ていくことができ、そのためにもっとも適切な例を選んで教えることができる。しかし、断片的知識論に基づけば、学習者の理解状態は小さな知識のネットワークであり、単なる知識の有無によって学習者を記述することはできないのではないか。また、知識を知識の上に積み上げるという比喻自体も、意味を持たなくなるのではないか。そして、ネットワークは局所的に漸進的に変化していくため、「ここまでわからせる」という教授行為を想定することもできなくなるのではないか。

もし、知識がひとまとまりのものであるならば、それを教えることが授業における一つの大きな区切りとなり、次はそれを使えるようにすることが目標となる。しかし、diSessa の分散符号化の考えに沿うならば、このような「まず習得、次に活用」という段階的な考え方はできないのではないか。

このように、断片的知識論を視野に入れることで、学習という現象の大きな捉え方だけではなく、学習目標の立て方、効果的な学習活動のプラン、児童生徒の実態や評価の方法など、より具体的な授業場面においても、これまでとは違った考え方が求められるのではないだろうか。

注

1) ACT* (Anderson, 1983) や Soar (Laird, Newell, & Rosenbloom, 1987) などのプロダクションシステムをベースにしたシステムや、シャンクのスクリプトベースのシステム (Schank, 1982) などの例はある。

2) この部分は、村山 (2011) を一部改変したものである。

3) diSessa (1982) では学習者の変化を扱っているものの、学習プロセスではなく発生的課題分析 (genetic task analysis) が主題となっている。

文献

Anderson, J. R. (1983). *Architecture of Cognition*.

Cambridge, MA: Harvard University.

Anzai, Y. (1991). Learning and use of representations for physics expertise. In K. A. Ericsson & J. Smith, (Eds.), *Towards a General Theory of Expertise*. (pp. 64-92). Cambridge: Cambridge University Press.

Chase, W. G., & Simon, H. A. Perception in chess. *Cognitive Psychology*, 1973, 4, 55-81.

Chi, M. T. H. (1978). Knowledge structures and memory development. In R. S. Siegler (Ed.), *Children's thinking: What develops?* (pp. 73-96). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.

Chi, M.T.H. (1992). Conceptual change within and across ontological Categories: Examples from learning and discovery in science: Vol.15. In R. Giere & H. Feigl (eds.), *Cognitive models of science* (pp. 129-186). Minneapolis, MN: University of Minnesota Press.

Chi, M.T.H. (2008). Three types of conceptual change: Belief revision, mental model transformation, and categorical shift. In S. Vosniadou (Ed.), *International handbook of research on conceptual change* (pp. 61-82). New York, NY: Routledge.

Chi, M. T. H., Feltovich, P. J., & Glaser, R. (1981). Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science*, 5, 121-152.

Clement, J. (1988). Observed methods for generating analogies in scientific problem solving. *Cognitive Science*, 12, 563-586.

Collins, A., Brown, JS, & Larkin, KM (1980). Inference in text understanding. In RJ Spiro, BC Bruce, & WF Brewer (Eds.), *Theoretical issues in reading comprehension*. Hillsdale, NJ: Erlbaum. pp.385-407.

Collins, A., and Quillian, M. (1969). Retrieval time from semantic memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 9: 240-247.

diSessa, A. A. (1982). Unlearning Aristotelian physics: A study of knowledge-based learning. *Cognitive Science*, 6, 37-75.

diSessa, A. A. (1983). Phenomenology and the evolution of intuition. In D. Gentner & A. L. Stevens (Eds.) *Mental models*. Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates.

diSessa, A. A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, 10, 105-225.

diSessa, A. A. (2008). A bird's-eye view of the "pieces" vs. "coherence" controversy (from the "pieces" side of the fence). In S. Vosniadou (Ed.), *International handbook of research on conceptual change* (pp. 35-60). New York: Routledge.

diSessa, A. A., Elby, A., & Hammer, D. (2002). J's epistemological stance and strategies. In G. Sinatra and P. Pintrich (Eds.), *Intentional conceptual change* (pp.237-290). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

diSessa, A. A. & Sherin, B. (1998). What changes in

- conceptual change? *International Journal of Science Education*, 20, 1155-1191.
- Gentner, D. & Stevens, A. L. (1983). *Mental Models*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Laird, J. E., Newell, A., & Rosenbloom, P. S. (1987). SOAR: An architecture for general intelligence. *Artificial Intelligence*, 33(1), 1-64.
- Lampert, M. (1986). Knowing, doing, and teaching multiplication. *Cognition and Instruction*, 3(4), 305-342.
- Larkin, J. H., McDermott, J., Simon, D. P., & Simon, D. P., & Simon, H. A. (1980). Expert and novice performance in solving physics problems, *Science*, 208, 1335-1342.
- Lawler, R. W. (1981). The Progressive Construction of Mind. *Cognitive Science*, 5, 1-30.
- Minsky, Marvin. 1975. A framework for representing knowledge. In P. Winston (Ed.), *The Psychology of Computer Vision*. McGraw-Hill. 白井良明・杉原厚吉 (訳) (1979). 知識を表現するための枠組. 『コンピュータビジョンの心理』, 産業図書.
- Minsky, M. (1980). K-Lines: A theory of memory. *Cognitive Science*, 4, 117-133.
- Minsky, M. (1986). *The Society of Mind*. New York: Simon and Schuster. 安西祐一郎 (訳) (1990) 心の社会 産業図書.
- 村山功「概念変化の諸理論」, *心理学評論*, Vol.54, No.3, 218-231, 2011.
- Nelson, K. Some evidence for the cognitive primacy of categorization and its functional basis. *Merrill-Palmer Quarterly*, 19, 21-39, 1973.
- Ogborn, J. (1985). Understanding students' understandings: An example from dynamics. *European Journal of Science Education*, 7, 141-150.
- Riley, M. S., Greeno, J. G., & Heller, J. J. (1983). Development of children's problem solving ability in arithmetic. In H. P. Ginsburg (Ed.), *The development of mathematical thinking* (pp. 153-196), New York: Academic Press.
- Rosch, E. (1983). Natural Categories. *Cognitive Psychology*, 4, 328-350.
- Rosch, E., and Mervis, C. B. (1975). Family resemblances: Studies in the internal structure of categories. *Cognitive Psychology*, 7, 573-605.
- Rumelhart, D. E. (1980). Schemata: The building blocks of cognition. In R. J. Spiro, B. C. Bruce, & W. F. Brewer (Eds.), *Theoretical issues in reading comprehension* (pp. 33-58). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Schank, R. (1982). *Dynamic Memory: A theory of learning in computers and people*. New York: Cambridge University Press.
- Simon, D. P., & Simon, H. A. (1978). Individual differences in solving physics problems. In R. S. Siegler (Ed.), *Children's thinking: What develops?* (pp.325-348). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Trowbridge, D. E., and L. C. McDermott (1980). Investigation of student understanding of the concept of velocity in one dimension. *American Journal of Physics*, 48, 1020-1028.
- Trowbridge, D. E., and L. C. McDermott (1981). Investigation of student understanding of the concept of acceleration in one dimension. *American Journal of Physics*, 48, 242-253.
- Vosniadou, S., & Brewer, W. F. (1994). Mental models of the earth: A study of conceptual change in childhood. *Cognitive Psychology*, 24, 535-585.
- Vosniadou, S., Vamvakoussi, X., & Skopeliti, I. (2008). The Framework theory approach to the problem of conceptual change. In S. Vosniadou (Ed.), *International handbook of research on conceptual change* (pp. 3-34). New York, NY: Routledge.

【連絡先 村山 功

E-mail: murayama@certd.ed.shizuoka.ac.jp】

“Knowledge in Pieces” Theory and its Implication to Instruction

Isao MURAYAMA

Sizuoka University

Abstract

Knowledge in pieces (KIP) theory is one of knowledge representation models, which emphasize context-sensitivity of cognition and acquisition/transition of knowledge structures. diSessa, a leading researcher of KIP community, developed “p-prims” theory to explain human intuitive reasoning about physics. P-prims are small elements of knowledge and are linked each other by the cuing priority and the reliability priority. Coexistence of formal knowledge and naive conception and its resulting reasoning are explained by the change of these links. Lawler explained his daughter's learning of addition in natural settings by “microworld” that is his version of KIP theory. Both researchers emphasized the context-binded character of knowledge and the importance of constructing linkage between KIP. This leads us to reconsideration about our educational assumptions that students' knowledge is context-independent general structure and easily combined to create new knowledge structures.

Keywords

knowledge in pieces, knowledge structure, context-sensitivity, learning,