

制約の動的緩和による概念変化

鈴木宏昭 (青山学院大学文学部)

[この論文について](#)

発達研究において、ここ10年の間に「制約」と「理論」の役割が強く主張されるようになった。このアプローチは、それ以前には無視されてきた、あるいはないものとされてきた乳児、幼児の秘められた能力に光を当て、発達研究の新しい地平を切り開いてきた。

こうした成果にもかかわらず、このアプローチでは未だ理解できない部分もある。その中でも特に重大と思われるのは、ある理論体系から別の理論体系への概念的変化(conceptual change)のメカニズムである。

本報告では、制約・理論アプローチの問題点を克服しつつ拡張し、概念的変化の計算メカニズムを明らかにするための予備的な考察を報告する。まず、1では、制約・理論アプローチの概念規定を行い、次に2でその問題点を指摘する。3では、概念的変化を制約の動的な緩和過程と見る理論の概要を述べ、これについて行われたいくつかの予備的分析を報告する。最後に、4では、今年度の成果の基盤の上に行われる次年度の研究計画について述べる。

1 発達における理論と制約

Early competenceと領域固有性

発達心理学、特に人の知的機能の発達を扱う認知発達研究においては、長年に渡って、Piagetの段階的発達理論が支配的な地位を占めてきた。1970年代に入ると情報処理的アプローチを採用する研究者らによって、Piaget課題の組織的な再検討が始められた。これらの研究が明らかにしたのは、1) early competence、2) 領域固有性の2点にまとめることが出来る。子どもは、Piagetが仮定したよりもかなり早くから、さまざまな知的技能を獲得し、利用することが出来る。そして、これらの知的技能は領域に固有な性質を持っている。つまり、ある課題領域でのコンピテンスは、別の領域のコンピテンスとは相互に独立であり、前者での達成は後者での達成を必ずしも意味しない。ここでは、さまざまな領域に適用可能な汎用的な知能が否定され、領域に固有な知能を持つものとして、子ども(大人も)を捉えることが主張されているのである。

制約・理論アプローチ

上記の成果をまとめ、認知発達研究を次の世代へと導く展望はCareyはによってなされた(Carey 1985)。彼女によれば、人間の知能はおおよそ大学での学科に対応するようなレベル(たとえば、物理学、生物学、心理学、社会学等々)で組織化されており、これらを支える知識は相互に独立しているというものである。そして各々の領域についての理解を構成する知識は、寄せ集めのものではなく、相互に支持的な関係にある一貫した体系=理論として考えられるべきであるという主張を行なった。さらに、彼女の説に従えば、発達的变化は、個々の領域内で生

じる、理論の再構造化となる。ここで、再構造化とは、単なる知識の複雑化ではなく、その理論が扱う対象の根本的（存在論的）な変化を指している。

Careyにおいては、理論という用語は詳細な特定化がなされないままであったが、Wellman & Gelman(1992)は理論は次の3つ要件を満たすものとした。

存在論

各々の理論は独自にそれが扱う世界内の対象、および説明のための基本概念を持つ。

因果メカニズム

存在論によって決められた対象間の相互作用のあり方を決める独自のルールを持つ。

一貫性

理論を構成する個別の知識は一貫している。

このような定義の下、彼らは子どもの物理現象についての理論、生物現象についての理論、心理現象についての理論を特定するために行なわれた研究を総括した。これらの領域では、それ以前に考えられていたよりもはるかに早期から、そして十分な経験もなしに、子どもが高度な知識の体系を獲得することが明らかにされている。

制約

こうした不十分な経験から、高度に洗練された抽象的知識の獲得を説明するために援用されたのが、「制約(constraint)」という概念である。子どもが学習する環境には、原理的には無限の情報が含まれている。こうした中から、一般性の高い、抽象的な知識を獲得するには、無限回に近いほどの学習が必要となる。しかしながら、子どもは多くの場合、限られた経験の中から、迅速に抽象的知識を獲得することが出来る。このためには、子どもの中に特定の種類の情報に対して選択的に注意を向けさせ、探索を方向づける、何らかの内的機構が必要となる。この内的機構を制約と呼ぶ。

このように考えると、子どもの理論の獲得は制約充足の過程として説明できる可能性が出てくる。つまり、子どもは各領域について生得的な制約を持っており、それらの制約を充足するような情報を集め、それを制約に合致する形で組み合わせることにより、知識を獲得するというわけである。

2 制約・理論アプローチの問題点

制約によって、子どもの認知発達を説明しようという試みは、特に初期の迅速な知識体系=(素朴)理論の獲得については大きな成功を収めてきた。しかしながら、以下に述べるような問題を抱えている。

固定された制約

単純化を恐れずに言えば、制約によるアプローチが仮定するのは、次のような発達の様相である。子どもは生得的に(ここでの生得とは、「生まれつき」という意味とともに、「一定の経験が蓄積された後は普遍的に出現する」、の2つの意味で用いている)領域に対応した制約を持っており、その制約が働くことによって、膨大な情報の中から必要な情報を限られた期間のうちに抽出し、検討すべき仮説の範囲を狭め、科学的には誤りかもしれないが、多くの人間に共有された標準的な理論を獲得する、というものである。

ここで制約は、正しい理論、あるいは多くの人に共有された、標準的な理論の構築のための基盤と捉えられ、固定されたものとして扱われている。

しかしながら、制約はいつでも成り立つものではないどころか、絶えず修正や限定がつけられなければならないものでもある。たとえば、溶解、煙、影、光などは素朴物理学を構成する諸原理には一致していないが、これらは何も例外的に観察される現象ではない。また、反射、強制による行為、処理能力の限界から来るある種の行為(あるいは行為の実行不可能性)などは、素朴な心理学理論の説明が不適當な現象と考えられる。

むろん、素朴理論に一致しない上記のような現象の理解は、遅れる、あるいは困難であるという主張は正しいし、ここで制約は不必要であると主張したいわけでもない。しかし、子どもの経験の中で、これらは重要な一部を占めており、単に「うまく説明できないもの」としてindexが付けられるだけのものではないであろう。だとすれば、子どもはこうした現象に遭遇しつつ、既存の制約を調整する必要があると考えられる。

複数の制約の協調と競合

一般に制約・理論アプローチをとる研究では、単一領域で限られた(通常1つ)の制約が働くと思定される課題を用いて実験が行われることが多い。しかしながら、こうした状況は比較的稀であると思われる。

波多野・稲垣(1997)が指摘するように、制約は領域によってだけでなく、その起源についても、いくつかのものが区別される。彼らは、発達心理学で問題にされる、いわゆる生得的制約に加えて、先行する知識による認知的制約、社会的制約、文化的制約の存在を指摘している。

彼らの主張の中で本報告にとって特に重要な点は、これらが相互作用し、ある時には促進的、協調的に働くが、別の時にはこれらが競合するという指摘である。たとえば、人の振舞いはある時には心理学的に説明されるが、別の時には生物学的に説明されたり、物理学的に説明されたりもするし、社会学的に説明されることもあるだろう。とすると、心を持つ、生物学的物体としての人間を総合的に理解するためには、初期の素朴理論、あるいはそれを構成する制約の競合および促進関係を把握する必要がある。

このような初期の理論の変化の道筋を解明するには、領域毎の制約を挙げることに加えて、それらの相互作用がどのようになされるかを明らかにし、そしてその結果初期の制約がどのように変化するかを検討する必要があるだろう。

経験の役割

制約・理論アプローチをとる研究者は決して経験の役割を無視しているわけではない。しかしながら、限られた領域において、制約を固定して考える限り、経験は高々制約に合致するものとしなないものを区別する機会と捉えられるに過ぎない。

しかし、複数の制約の相互作用、およびその変化ということを経験のターゲットとした場合、経験はより重要な役割を果たしていると考えざるを得ない。各領域において同様に有効な制約が、ある現象について相反する場合、これを調整するのは経験としか考えられない。また、諸制約が協調する場合も同様で、どの制約をどのように協調させるかには、やはり経験からのフィードバックが不可欠であると思われる。

3 制約の動的変化: 概念変化の計算レベルの定式化

2で指摘したように、制約・理論アプローチでは、

1. 制約が固定されている、
2. 複数の制約の相互作用が取り上げられていない、
3. 経験が過小評価されている、

という問題があった。これらの問題は組み合わされて、認知発達研究における、発達メカニズムの不在を生み出している。

本節では、上記の3点の問題を克服し、概念的変化のメカニズムについての理論を提案する。なお、この理論は開一夫(電子技術総合研究所)との共同研究によるものである(Suzuki & Hiraki, 1997)。

理論の概要

子どもの経験は心的に表象されるが、この表象は一般的に対象(object)、関係(relation)、ゴール(goal)から構成される。そして、この表象に内的、外的オペレータが作用することにより、望ましい形に表象が変化し、その結果経験の理解やそこから学習、発達が生じる。

我々の理論は、上記の3つの構成要素を各々制約として表現し、概念変化をこれらの制約の緩和プロセスと見なす。

制約：対象、関係、ゴール

対象レベルの制約

この制約は問題で与えられる対象の encoding のレベルを表現している。人は、対象を表象する際、それが属するカテゴリー階層の中の basic-level で encode することが知られている。これは、Wellman & Gelman の理論の定義における存在論に対応する。

関係の制約

この制約は問題で与えられる対象間の default の関係を表現している。対象にはその性質に応じて様々な機能があるが、基本的とみなされるような少数の機能が存在し、主にそれらの機能を通して他の対象と関係し合う。たとえば、鉛筆を考えてみると、「書く」、「指す」、「おもしろくなる」、「投げられる」など、その特性に応じて、いくつもの機能を持つ。しかし、鉛筆は、それが相互作用する別の対象との関係に応じて、優先的に選択される機能があり、たとえば紙のような対象に対しては「書く」という機能が選択される。これは、Wellman & Gelman でいうところの、因果メカニズムに相当すると思われる。

ゴールの制約

望ましい状態、ゴールに対するイメージであるとともに、現在の状態とそのイメージの間の適合の度合を評価する関数も含んでいる。この制約は、対象の制約と関係の制約を調整する役割を持つと考えられる。ただし、この制約は必ずしも明示的な形で存在するわけではない。

緩和メカニズム

認知発達において特徴的なのは、その変化が複雑であるということである。定常状態がしばらく続き、その後にある種の飛躍が生じたり（段階的特徴）、U shapeと呼ばれる、ある種の逆行現象も観察される。これらの特徴は、線形的で、漸進的なパフォーマンスの改善が見られる、単純なスキル学習とは大きく異なっている。

こうしたことからすると、認知発達の過程をルールベースシステムで仮定されるような単線的なものではなく、オペレータ適用についての制約がその他の制約と競合、協調しつつ、妥当な解を導き出す過程として捉えるべきであろう。アーキテクチャとしては、ニューラルネットワークに確率的緩和手法を用いるのが適当であると思われる。

発達において段階と呼ばれる定常状態は、上記の制約が互いに協調、競合などの相互作用を行なうことにより、局所的な平衡状態に陥っていると考えられる。その後経験を重ねることにより、ある時点で次の段階への発達が生じるが、これは上記の制約が徐々に緩和され、システムが新しい定常状態に移行することに対応していると考えられる。また、U Shapeの発達曲線に見られる逆行現象は、新たな定常状態に移行する際に起こる、システムの一時的なパフォーマンス劣化に対応する。これらの移行は、単に固定された制約の収束のみではなく、ゴールの制約の外的な変化によっても引き起こされると考えられる。ゴール制約の変化には、波多野らの述べるような社会的、文化的制約などが関与している可能性もある。発達過程の全体は、これらのサイクルが繰り返され、最終的に安定した状態(global minimum)に落ち着くことと考えることが出来る。

緩和と収束のアルゴリズムとしては、基本的にHopfieldあるいはBoltzman Machine型の緩和メカニズムが考えられる。これらのアルゴリズムでは、相互に協調・競合する制約が同時に働き、それらを最大限にソフトに充足する解を導くようになっている。

ただし、認知発達においては、それらの制約は固定されたものではなく、内的、外的に変更される、つまり外界と動的に相互作用していると考えられる。つまり、エネルギー関数がフィードバックによって変化するダイナミックな制約緩和メカニズムが働いていると考えている。

概念変化のminiture問題としての洞察

以上の理論が、実際の子どもの概念変化をどれだけ説明できるかが研究の最終目標であるが、実際の子どもの概念変化を観察することは以下の理由からきわめて困難である。第一に、概念変化のしにくさが挙げられる。2で述べたように、領域についての知識は確固とした理論となっている。したがって、科学理論同様、短期間の集中的な実験的トレーニング程度では変化しない。また、反例などを提出しても、これによってdrasticに理論が変化する可能性は極めて少ない。第二に、概念変化についての研究は、1年程度毎に被験者群をわけ、その間の違いをもとに報告されることが多いが、この方法では変化の引金となった要因が特定できない。当然、longitudinalな研究が必要となるが、これでは要因統制を厳密に行なうことが出来ない。第三に、子どもは、注意の持続、言語化、記憶容量、コミュニケーションなどの概念変化以外の能力が、大人に比べて一般的劣っているので、複雑な教示やトレーニングを長期間行なうことは困難である。したがって、上記の理論の検討は、ひとまずより要因統制がしやすく、短期で概念変化が生じるようなminiture課題で検討した方がよい。

こうした観点から、認知発達と共通性を持った認知領域を探すと、「洞察 (insight)」が浮かび上

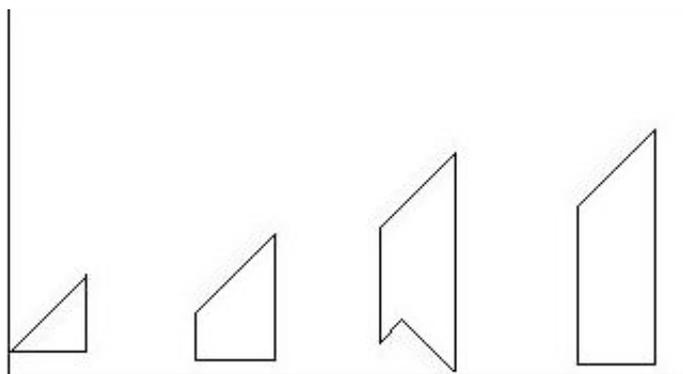
がる。洞察はいくつかの重要な点で、認知発達と類似している。第一に、洞察前の状態と洞察後の状態の間には非連続性がある。つまり、洞察問題解決では、洞察前と後ではCareyの言う「強い」再構造化、つまり概念変化が生じているとされる。洞察のこの性質は、概念変化のメカニズムの解明を行なおうとする本研究にとって極めて重要なものである。これと関連するが、第二に、どちらとも定常状態が長く続くと言うことが挙げられる。あることがうまくできない、あるいは不完全な状態が一定期間以上続き、その後に質的な飛躍が生じるケースが多い。これは認知発達、洞察では、失敗からの学習が生じにくいということを示している。ある方法がうまくいかないことがわかっているにもかかわらず、容易にそこから抜け出すことが出来ないのである。第三に、認知発達同様、洞察は主体的なコントロールが困難である。つまり、発達しようと思ったから発達できるわけではないのと同様、ひらめきを得ようと努力しても多くの場合ひらめきは訪れない。

洞察問題解決における概念変化

そこで、まず最初に、大人を被験者として、概念変化を容易に引き出せる課題を用いて、上記の理論についての検討を進めることにした。

Tパズルにおける概念変化

課題として用いたのは、Tパズルと呼ばれる図形パズルである。このパズルでは、図1の左側の4つのピースを用いて、Tの形をした図形を構成することが求められる。



予備調査から、このパズルはきわめて難しいことがわかっている。ヒントがない場合であれば、通常、10～40分程度の時間が必要であり、完成できない場合も少なくない。この原因は、Tという図形を横棒と縦棒に分解し、その各部分を作ろうとすること、および五角形を基準線と平行あるいは垂直に用いようとすることに起因する。

このパズルの解決は概念変化を伴うものであるかを検討する必要がある。概念変化において重要なのは、その前後において、表現の全面的変化が生じているか否かである。

Tパズルはこの要請を満たしているだろうか。予備調査からすると、この答えは肯定的である。洞察前には、ほとんどの被験者が図1の五角形の凹部分を埋めることに大半の時間を費やしている。これは、Tは縦棒と横棒からなっているという信念から生じているように思われる。ここから、縦棒と横棒を作ろうとし、その際に五角形の凹部分をなんとか埋めなければならないという思い込みが生じているせいであると思われる。ここでは五角形は縦棒あるいは横棒の一部として意味づけられている。

一方、洞察の後には、こうした行為は観察されない。そして、五角形を中心にして、それを左

右及び下へと拡張しようとする。ここでは、5角形は縦棒かつ横棒であるという意味づけがなされている。

これらから明らかのように、洞察前と後では5角形のontologyが根本的に異なっており、問題表現が根本的に変化している。さらに、これに応じて、サブゴールやストラテジーも変化している。こうしたことからすれば、Tパズルは概念的変化を研究するには適切な材料であることがわかる。

実験およびその結果

Tパズルやそれに類似したパズルを解いた経験はない大学生5名(以下各々H, M, K, O, A)を被験者とし、このパズルを解くように指示した。約15分経過した後も、課題が解決できない場合は、「凹部(以降notchと呼ぶ)を埋めないように」というヒントを与えた。

表1: Solution time and the number of segments of each subject. Subjects K, O and A were given the hint when about 900 seconds had passed.

	H	M	K	O	A
Time(Sec.)	140	553	1025	1027	936
Segment	19	47	90	75	83

分析に際しては、問題解決過程をsegmentに分割した。概念的には、1つのsegmentは1試行に対応する。operationalには、segmentは「2つの図形を接続することから始まり、「その2つを分離することによって終了する」と定義される。

全体的な結果は表1の通りである。この中で、HとMは自発的に解決することができた。この表からわかるように、このパズルの解決は非常に個人差が大きい。segment数では、最小のHと最大のKでは、5倍に近い差がある。時間については、ヒントをもらったK, O, Aとヒントなしで解決したH, Mとは簡単には比較できないが、それでも7倍程度の差がある。

現時点では、我々の理論の妥当性を示唆する、以下のような知見が得られている。

- 問題解決初期には、対象レベルの制約(1つのピースの標準的な置き方)が強く働く。このため、洞察が妨げられる。
- また、これに応じて、関係レベルの制約(2つにピースの標準的な接続の仕方)から、凹部を埋める行為が延々と繰り返される。
- また、この状態がかなり長く続き、その間類似の失敗を何度も繰り返す。
- 対象レベル、関係の制約を逸脱した置き方が、プロセスの前半から数は少ないが観察される。しかしながら、そこから洞察へと一挙に至ることはない。これは、3つの制約の一部だけが緩和されても、他との協調がないために有効とはならないことを示している。
- このような非標準的な置き方、接続の仕方はプロセスが進むにつれて増加する。つまり、制約が他との関係によって、徐々に緩和されていくことを示している。

4 今後の展望

今後の課題は大きく2点に分けられる。一つは、Tパズルというminiture課題を用いた実験を続

け、制約の緩和過程を詳細に検討し、計算モデルをつくり出すことである。具体的には、各制約を緩和するようなヒントを与え、この過程をヒントなしの過程と比較する。これによって、個々の制約の働き方、他との協調のあり方がいっそう詳細なレベルで明らかになると思われる。

もう1つの課題は、モデルの認知発達への拡張である。Tパズルという洞察問題は、多くのしかも重要な点で認知発達と類似している。しかしながら、現実には子どもの中で生じる概念変化と完全に等価でないのも事実である。したがって、ここでの知見が認知発達メカニズムへ直接適用可能かどうかは実証的に検討する以外にはない。比較的短期間に自発的に概念変化を生じさせるような課題は決して多くはないが、Metz (1985)が行なった歯車課題では、幼児においてもはっきりとした概念変化が観察され、またTパズルのような図形パズルとの類似点も多いので、検討の対象となるであろう。

平成9年度文部省科学研究費 重点領域研究「心の発達」(代表: 桐谷滋) 報告集