

スキーマ活性化モデルに基づく幾何の知識構造モデル

三宅 芽雄

淀川 英司

(電電公社 武藏野電気通信研究所)

I まえがき

人間の高度な問題解決能力は長い学習過程の結果獲得される。一つの分野の専門家となるには、何千、何万時間にも達する學習時間が必要とされることが珍らしくない。このような學習過程の中で多くの知識が積み上げられ、その結果高度の問題解決能力が形成されると考えられる。

そこで積み上げられていく知識の中には、何を学んだか學習者が明確に意識している知識とともに、學習者自身も意識せずに知らず知らずのうちに獲得されていく知識もある。實際、一人の人間がどのような知識をもち、それをどのように組織することによって問題解決能力を実現していかのか、その実態は必ずしも十分理解されていないのが現状である。我々は初等幾何の問題解決能力を取り上げ、それを分析することによって知識の構造、知識の獲得の問題を調べていくことにした。ここではその基本となる考え方を報告する。

幾何の知識構造、又その知識の獲得過程を調べる基本的な方法として、實際に幾何の學習者が何を知識として持っているのか、どのように學習していくのかを観察することがある。例えば

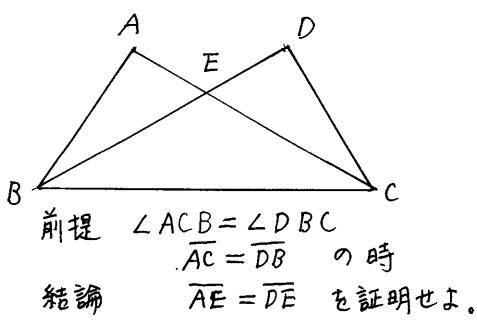


図 1

図1のような問題を与え、實際にどのようにして解答するのか、思考過程を報告させ、その発話記録を取る。このような発話記録や學習者の内観、行動の観察などによつて學習者の内部で起こっていることのすべてが解る訳ではないが、一つの貴重な情報源でありその有効性が認められている。(Ericsson & Simon, 1980)

発話記録を中心とする観察とともに問題解決の内部過程を明らかにする上でよく行なわれることは、問題解決の内部過程の詳細なシミュレーションモデルを構成することである。記号処理を中心とする具体的なモデルを構成することを目標とすることによって、問題解決の過程の明確な概念化が達成できる。

我々も上記の學習者の発話を記録することと、シミュレーションモデルを構成することを二本の柱として、人間の知識構造を明らかにしていく。

知識構造を明らかにする上で、知識構造をどのような基礎の上に論じればよいのかは必ずしも明確であるとは言えない。問題解決の過程や學習過程のシミュレーションモデルはプロダクションシステム(例えば Larkin, 1981)やスキーマ(Anderson et al, 1981)に基づいていることが多いが、必ずしも明確な根拠の上にそうされているわけではない。むしろ、いろいろな基礎となるシステムを試めすことによってどのようなシステムが基礎として妥当であるのか明らかにしようとしているのが現在の段階であろう。

知識とは何か、認識をどのように把えうべきかは、古くから認識論の中で、哲学者達が問題にしてきたことである

が、知識構造を問題にする時、このような基本的なことがどうを問題にする必要が出てくる。最近の認知心理学では知識や認識を説明する時に、スキーマという概念がよく用いられるが、このスキーマに関する議論（例えば、Rumelhart, 1980）も一つの新しい認識論だと見ることができる。しかしこのような認知心理学の中での新しい認識論も十分整理されたものとはちていいない。

人工知能の研究においても知識や認識をどのように考えるのかは基本的な問題であるが十分な合意があるわけではない。人工知能の教科書にも知識や認識をどのように扱えるのが必ずしも明確にされてはいない。知識構造の研究の結果として知識や認識が何であるかが理解されてくると考えることもできる。しかし、出発点として知識や認識が何であるかをできるだけ整理しておくことは議論の見通しをよくする上に役立つであろう。

ここでは、まず知識構造のモデルを構成する準備として、基本的な概念を整理する。次に、人間の知識構造が、「状況」のような大きな知識のまとまりを中心化組織されていくことを述べ、スキーマの活性化モデルを説明する。最後にそのような枠組みのもとで知識の獲得を論ずる。

以下に知識構造を論ずる上で、人間に限らず動物や人工知能など知能を持つシステム一般を対象とし、これを知能システムと呼ぶことにする。知能システムは、世界に働きかけ自らの目標を実現することによって特徴づけられる。

II 知識構造の基本概念

A. 表象システム

知能システムが実現される上で最も基本的な役割を果すのが表象である。表象とは知能システムが内部に持つ互

いに区別できるパターンである。知能システムは、この表象によて今までまなものを表現しそれを操作することにより問題を解決する。表象を操作するシステムを一般に表象システムと呼べば、人間、動物、計算機はすべて表象システムになる、といふ。表象システムを図示すれば図2のようになる。

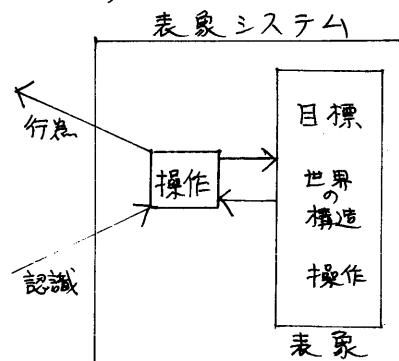


図 2

表象の中には、知能システムの対象とする世界の構造だけでなく知能システムの持つ目標や知能システムの行う操作も表現される。

Simon (1982) や Newell (1980) は表象システムのことを Physical Symbol System と呼んでいる。また知能が表象システムに基づいているという仮説を Physical Symbol System Assumption と呼んで、知能のメカニズムを論じる出発点としている。

B. 認識

認識は表象によって以下のように実現される。認識を言い換えれば、与えられた対象が何であるかを知ることである。例えば与えられた図形を三角形であると知ることが認識である。認識を理解する上で重要なことは、認識の前提として、認識の主体である知能システムは、認識の対象をその中に同定する集合をあらかじめ持っていることである。与えられた図形を三角形であると認識する時、知能システムは三角形、四辺形、円その他のものがうなる

集合を持ち、その集合の中で与えられた図形を同定していく。対象を認識する前は与えられた対象はその集合のどの要素であるのか限定されておらず、対象が何であるかの可能性は集合の要素すべてにわたる。与えられた対象を認識することによって、その対象が何であるかの可能性が限定されたことになる。

認識において、認識の対象がその中に限定される集合を認識空間と呼ぶことにする。認識は認識空間を前提にしてはじめて成立する。

認識の成立は次のような表象の操作に対応する。知能システムの内部で認識空間を構成する要素に対応してそれぞれ異なった表象が対応づけられている。この表象の集合を表象空間といふことにする。与えられた対象に対してそれにに対応する表象が取り出される操作が存在している。認識空間の中に対象を同定することは、与えられた対象に対応した表象が表象空間の中から取り出されたことによって実現される。

C. 構造

知識や認識を以下に述べる「構造」の概念によって基礎づけることができる。ここでいう「構造」は集合の概念をもとにして構成される数学的構造の考え方に基づいている。

知能システムが認識する対象は多くの部分から構成されたものであることが普通である。一つの対象は多くの側面を持ち、それぞれの視点からそれぞれの側面を認識することが可能であることが多い。三角形が認識の対象である時、各辺の長さはどうか、それぞれの角の大ささについてはどうか、面積はどうか等、多くの側面を認識の対象とすることができる。又それらの辺や角の間にどのような関係があるかも認識の対象となる。例えば二つの辺が等しいかどうか、さらには一般的に

辺の長さと角の大ささとの間にどのような関係があるのかを問題にする。さらに対象を拡大して二つの三角形を対象にすればその間の関係（合同、相似など）を問題にする。

一つの対象がいくつもの側面から認識される時、その対象は構造を成すといふこととする。

一つの構造が多くの側面から認識可能であることは、一つの対象に対して多くの認識空間を設定することができるることを意味している。一つの認識空間を定めることは対象に対して一つの認識の視点を設定することである。一つの視点から見て対象の一側面が認識された時、その結果をその対象の他の側面の性質といふこととする。対象の性質は対象の視点の数だけ問題にできる。

D. 認識空間の構成

対象の構造の性質を定める認識空間は基本的な認識空間を基に構成されたものである。認識空間は次のようにして構成される。

基本となる認識空間が複数存在する時、その間の関係を認識の対象とすることができる。関係はそれぞれの認識空間の直積集合の部分集合であるとみなせる。どのような関係があるかを認識の対象とすることは、上記の直積集合のベキ集合を認識空間としてその中に対象を同定することに他ならない。

一つの対象が認識される時、その対象が認識空間の要素の一つに完全に同定できず、対象の可能な範囲が限定されるだけのこともある。例えば、認識空間が直角三角形、二等辺三角形、正方形等からなる時、対象が直角三角形か二等辺三角形に限定された場合である。対象の範囲が限定されたことは認識空間の部分集合が定まることに他ならない。このことは基本となる認識空間のベキ集合を一つの認識空間とし

て設定しその視点から対象を認識することに他ならぬ。ところそのような部分集合が固定されず、部分集合の範囲が限定される場合も考えられる。例えば、(二等辺三角形、直角三角形)が又は(正方形、円)が認識される場合もあり得る。この時、基本となる認識空間のベキ集合のベキ集合が認識空間になる、といふ。

このようにいくつかの基本となる認識空間が直積集合やベキ集合を構成する操作を繰り返し行うことによつて、無数の認識空間を設定することができる。このことより認識空間によつて対象とする世界が見えられた時、知能システムが無数の認識の「問題」を作り出せることを示している。

E. 構造の構成

対象のいくつかの性質を定めれば、対象の構造が定まることになる。三角形は一つの構造であるがその側面をさうに定めることにより、さうに具体的な構造が定まる。例えば、三辺の長さを定めれば一つの特定の三角形が定まり、二辺が等しいといふ関係が定めれば二等辺三角形が定まる。

一つの構造が定められた時、特定の性質がその構造によつて定まる場合がある。例えば三角形であれば、辺と角の間の関係が一つの認識の視点となるが、その性質として余弦定理などが定まる。このように一つの構造を形づくる性質の間には関係が存在する。性質の間の関係をもつてして一つの性質が他の性質を導びくことをわざと推論が可能となる。例えば三角形において一つの角が直角であることが定まれば辺の間に

$$a^2 + b^2 = c^2$$

という関係が定まる。

E. 目標の表象

目標は知能システムが行為による実現しようとする世界の状態である。目標も又一つの構造であり知能システムの中の表象で表現されている。

F. 手続系の表象

知能システムは表象によつて対象世界の構造ばかりではなく自分の行為も表象することができる。行為の列を手続系といふことにする。幾何の世界では一つの性質をえられた性質から導びくことが目標になり、含意関係と前提とを結びつけて結論を導びくことが一つの行為になる。このような行為を組み合わせて手続系とし証明が構成される。手續系も又一つの構造となる。

目標の実現によりたす手続系を方法といふことにする。方法の表象を持つことによつて目標の実現が容易になる。有効な方法は知能システム自身も含めた世界の構造を正しく認識した後に依頼することによつて始めて構成できる。

F. 知識とスキーム

ここでは知能システムの表象によつて表現されているものを知識と呼ぶことにする。表象によつて表現しうるもののは、知能システム自身の構造を含んだ世界全体の構造である。また目標を実現するのに自分も含めて世界をどのように組織化すればよいかは表象可能な知識である。

知能システムの持つ表象を全体としてみれば、大きな構造を表す表象から小的な構造を表す表象まで個々の表象が組織されたものとみることができる。このような個々の表象をスキームと呼ぶ。スキームの表わすものは「概念」に相当すると言つてよいだろう。

また操作を含めて、スキーム全体の組織を知識構造と呼ぶこととする。

III. スキーマ活性モデル

A. 世界の構造

知能システムの対象とする世界は個々の基本的な構造から構成されている。初等幾何の世界では、三角形、円、等の基本的な图形、合同条件、三平方の定理などがあればれば現われる基本的な構造である。知能システムの対象とする世界には単にこのような基本的な構造だけでなく、基本的な構造が組み合わされたより大きく複雑な構造が存在する。この個々の基本的な構造から構成されたより大きな構造をさして特に状況といふことにする。人が毎日生活できる場所は一つの状況を形成する。幾何の世界では、与えられた問題が一つの状況を形成する。問題は三角形等、基本的な構造を組み合わせて構成されたより複雑な構造になっている。

知能システムがその対象とする世界について知るためにには、單にこの世界を構成する基本的な構造だけでなく、世界にどのような状況が存在するのかについても知らなければならぬ。状況はその中で知能システムが問題を解決する場であることが多い。知能システムが状況の中で効果的に問題を解決できるのは、その状況のスキームを持ち、それに基づいて問題解決にとて重要な性質や方法を知ることができるからだと考えられる。知能システムがこのように大きく複雑な構造を持つことが人工知能研究における Frame の考え方の基にある (Bobrow & Winograd, 1977)。

B. 問題解決

問題解決は知能システムが一定の手続基によって世界に働きかけ目標を実現する過程である。問題解決が困難なのは、可能な手続基の組み合わせは無限にあり、その中から目標を実現する手續基が簡単には見つからないことが多いからである。目標を実現する手續基を選ぶためには何らかの方針が必要である。

要である。means-ends-analysis (す、目標に近づくために中間目標を決定する) という方針であり、一般的に通用可能な方針である。しかし、このようないくつかの一般的な方針だけでは、複雑な状況における問題解決には普遍不十分であり、問題の状況に応じた方針を立てなければならぬ。例えば、幾何の問題で二つの線分の長さが等しいことを証明する時、これらを含む二つの三角形の合同を証明することを一つの方針にすることは有効である。

実際に物理学の専門家と素人の問題解決の過程を比較した研究があるところによれば (Larkin, et al., 1980) 初心者と means-ends-analysis のようないくつかの一般的な方針にとて問題を効果的に解決できないのに対し、専門家は問題から正しい手続基を即座につくり出すことが可能である。このことは専門家が問題を解くにあたり、状況に応じて適確な方針を立てられることがよりと考えられる。

C. 認識の過程

問題に対する状況の知識を持った時、問題解決の過程は、問題の状況を正しく認識して、その知識を取り出すことが中ばになる。

認識の過程これ自体も又、知識に依存している。複雑な状況を認識するには知識が必要になる。複雑な状況の認識では、どのように認識すればよいかという認識の方針が重要になる。状況をどのように分解すればよいか、どこが重要な場所かを知らなければならぬ。Chi, et al. (1981) は物理学の専門家が初心者に比べて問題を解答に役立つ手續的なしゃべりで分類することを示している。

認識は、スキームに基づいた漸進的な過程である。大きめの方針を示すスキームが取り去され、それが認識を導いて、より細かいスキームが取り去

され、それからさらに次の認識を導びいていく。

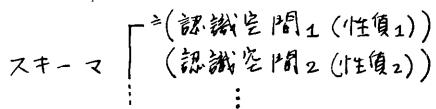
D. スキーマ活性化モデル

上記の過程は状況を中心にして組織されたスキーマが次々に活性化されてゆく過程であると見ることができます。問題解決の過程は認識の過程を中心にして活性化されたスキーマによって次の過程が並び、これ新たなスキーマが活性化されるという漸進的な過程である。活性化されたスキーマが手続を表わす時ににはその手続が実行されることになります。このようなくスキーマの活性化を基礎として認知過程のモデルが考察されている(Norman & Bobrow, 1976)。

E. スキーマの形式

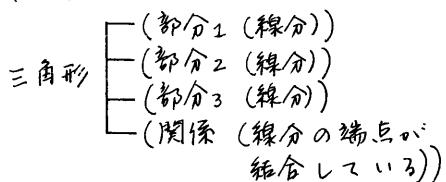
幾何の知識を表現するスキーマは、次のような形式を持つ。

スキーマは基本的には構造であり、認識空間との性質の対が集ま、下ものとして表わせる。



人工知能でよく用いられるFrameやSemantic Netがslotとvalue、ラベル付きの連合などを基にしているのも、構造を表現することからの当然の帰結である。

複雑なスキーマはその部分がさらにスキーマとして構成されたものが多い。三角形のスキーマは線分のスキーマを部分として構成されていくと見ることができる。

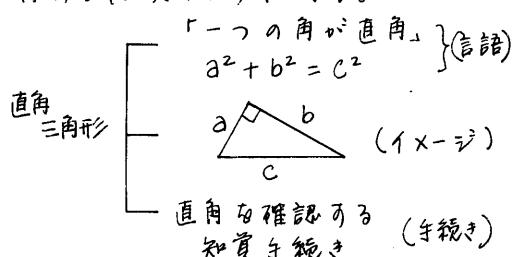


人間は一つの対象を視覚に起源をもつイメージ的な表象と言語的な表象で表わすことができる。上記の三角形のスキーマにも、「三つの線分の結合し

た图形」という言語的な表象によても、イメージ的にも表象され得る。

スキーマは手続的なものも表象される。線分のスキーマには「手続で图形を線分として知覚するスキーマ」が所属していると考えられる。三角形のスキーマにも、「端点が結合してい」るといふ關係を実際に手続で表わされた三角形で知覚する手続が入っていると考えられる。

上記の三つの表象は同時に存在し、互いに補うことができる。例えば直角三角形が(1)次のようにある。



IV. 学習の過程

知能システムは、今までの状況に對応したスキーマを持っていますが、このようなくスキーマは、知能システムがこのようなく状況を経験する中で形成していくものである。

A. 知識構造の発展

学習を単なる知識の断片の積み重ねと見るだけでは十分でない。手元られに知識は丸暗記されるのではなく、学習の過程での意味が理解され、実際に問題を解く過程で使える有効な知識になる。Rumelhart & Norman(1978)は学習に accretion, restructuring, tuning の三種を区別している。Anderson et. al. (1981), Larkin(1981)も学習の過程を論じ、プロトクルシステムを基にした学習のモデルを構成している。以下にいままで述べた構組みのものとて学習過程を表わしてみる。

学習の方向に二つを區別できる。一つは問題を効率よく速く解けるよう

になる効率化の方向である。一方、より広範囲の問題を解けるようになる一般化の方向がある。

特定の問題に繰り返し会うなら、その問題を効率よく解決する知識構造を作り上げるのがよい。そのようす方法の一つは、その問題に対して、解、又は解を得る手順を組みつけておけばよい。

一方で知能システムが出会う問題は過去の問題にはない新しい問題であることも多い。特殊な問題の解をそのまま記憶しておいても新しい問題には役立たない。新しい問題に対応できるためには特定の問題の背後にあるより一般的な性質を知ることが必要である。一つの特定の問題を解くするのに、單にその解を導くだけではなく、どのような一般的な性質からその解が導けるのかを検討することが大切であり、どうあることによって、より一般的な問題に対処できるようになる。

問題の背後にある基本的な性質を知ることとは、問題の本質を認識できることになることである。問題が複雑な時、それを正しく認識するには問題の基本的な性質に基づいたスキーマのネットワークが必要になる。このことは特定の問題のスキーマを多数持つてどのような問題にも応じられ、しかも効率のよい知識構造を作ろうとする場合にも、問題を効率よく認識するネットワークを構成するためには、問題の背後にある世界の基本的な性質に基づかなければならぬことを示している。

B. 多様な表象の形成

学習過程は新しいスキーマやすでにあるスキーマのネットワークの中に入組み込まれ、より有効なシステムになっていく過程だと見ることができる。

初等幾何の学習において教科書は基本的知識のみなものである。教科書では重要な概念、性質が言語で説明され

ている。一つの事柄を学ぶ時、言語による記述がそのまま内部に表象として貯えられるのではない。実際にほんの意味が理解されて保持される。教科書では、図で説明が補なわれることが多い。例えば、二辺夾角の合同条件での説明では、図によつて二辺とその夾角がどれがれ何を表ひ方のか解り易くなつてゐる。新しく二辺夾角のスキーマが形成される時には、言語表象とともにそのイメージが伴なう。

C. 手順的表象の形成

意味的、イメージ的な表象が形成されてもそれでいて二辺夾角の合同条件が効率よく使えるようになるとは限らない。一つには教科書にのつてゐる知識はいろいろな場合にあつてはまる一般的な知識であり、それを実際の問題に適用できる手順を知る必要がある。例えば、より複雑な图形に埋め込まれた三角形で、対応する辺を探し、対応する夾角の合同を確めるためには、一つの知覚的手順が必要な。

D. 状況のスキーマへの組み込み

一つのスキーマが効果的に使われるためには、それが状況のスキーマの一部として組み入れられる必要がある。例えば、二辺夾角の合同条件は三角形の合同を証明するというスキーマに組み込まれる。

E. スキーマの形成

新しいスキーマは常にすでにあるスキーマを基にして構成される。新しいスキーマの形成過程はいくつかに分類することによつて理解できる(Rumelhart & Ortony, 1977; Anderson, 1981)。

F. 特殊化

一つはもとにならるスキーマを特殊化することである。スキーマの一つの側面を特定することによつて、より特殊なスキーマが形成される。例えば、三角形のスキーマを基にして、一つの角を直角に特定することにより直角三角

形が構成される。三角形の辺の間の関係を $a^2 + b^2 = c^2$ と持つることにより、てもやはり直角三角形のスキーマが構成されます。

G. 一般化

一方特殊なスキーマから一般的なスキーマが構成される場合もある。二つの三角形の間に合同という関係のスキーマを一般化して相似という関係のスキーマを作り出すことができる。

一般化により対象の性質をより本質的に理解することができる。例えは二つの三角形が合同であるならば、対応する角は等しいが、この性質はより一般的な相似関係から導かれるものであり、相似のスキーマを持つことにより、より一般的な状況で二つの三角形の対応する角が等しいことを導き出せることができるようになります。

H. アナロジー

ここであるスキーマの性質を一部変更することにより、新しいスキーマを作り出すことができる。例えは、正三角形、正方形をもとに、角の数を5個に変え、正五角形というスキーマを作り出す過程がアナロジーになります。

I. 構成

ここであるスキーマを部分として、新しいスキーマを作り出すことができる。

このような新しいスキーマを形成する過程と、それをよりよいスキーマの構造の中に組み込んでいくことにつれて、学習が成立する。

V. 今後の課題

初等幾何の知識構造のモデルを作成し、上記の基本的な考え方を報告した。今後は、より具体的なモデルを構成し、さらに、実際の幾何の問題解決の過程を記録することにより明確な知識構造のモデルを作成する。

謝 評

日頃御指導、御討論戴く畔柳基礎研究部長、増田第二研究室長、第二研究室のみなさんに感謝いたします。

文 献

- Anderson, J. Tuning of search of the problem space for geometry proofs. *Proceedings of the 7th IJCAI*, 1981, 165-170
- Anderson, J. et al. Acquisition of problem-solving skill. In J. Anderson (Ed.) *Cognitive skills and their acquisition*, Erlbaum, 1981 3-46.
- Bobrow, D. & Winograd, T. An overview of KRL. *Cog. Sci.* 1977. 1.
- Chi, M. et al. Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cog. Sci.* 1981. 5. 121-152
- Ericsson, K. & Simon, H. Verbal reports as data. *Psych. Rev.* 1980. 87. 215-251
- Larkin, J. Enriching formal knowledge: A model for learning to solve textbook physics problems. In J. Anderson (Ed.) 前掲書. 1981
- Larkin, J. et al. Expert and novice performance in solving physics problems. *Science*, 1980. 208. 1335-1342.
- Newell, A. Physical symbol systems. *Cog. Sci.* 1980. 4. 135-183.
- Norman, D. & Bobrow, D. On the role of active memory processing in perception and cognition. In C. Cofer (Ed.) *The structure of memory*. Freeman, 1976.
- Rumelhart, D. Schemata: The building blocks of cognition. In R. Spiro et al. (Eds.) *Theoretical issues in reading comprehension*. Erlbaum, 1980.
- Rumelhart, D. & Norman, D. Accretion, tuning, and restructuring. In J. Cotton et al. (Eds.) *Semantic factors in cognition*. Erlbaum, 1978.
- Rumelhart, D. & Ortony, A. The representation of knowledge in memory. In R. Anderson et al. (Eds.) *Schooling and the acquisition of knowledge*. Erlbaum, 1977.
- Simon, H. Cognitive processes of experts and novices. In F.A.J.P. (Ed.) *Cahiers de la Foundation Archives Jean Piaget*, No. 2-3. 1982.