

作図行動を含んだ問題解決の認知科学的研究
～幾何の証明問題からの考察～

伊 藤 毅 志

博士論文

作図行動を含んだ問題解決の認知科学的研究
～幾何の証明問題からの考察～

伊藤毅志

名古屋大学図書	
和	1168015

博士論文「作図行動を含んだ問題解決の認知科学的研究
～幾何の証明問題からの考察～」

～目次～

1章 序論	… 1
1.1 研究の背景	… 2
1.2 研究の意義	… 3
1.2.1 ヒューマンインターフェース	… 3
1.2.2 学習と教育工学	… 5
1.3 本研究の目標と論文の構成	… 7
2章 問題解決と作図行動	… 11
2.1 問題解決の認知科学的研究	… 12
2.1.1 認知科学の歴史的背景	… 12
2.1.2 認知科学的方法について	… 13
2.2 従来の研究	… 15
3章 作図を含んだ問題解決過程	… 21
3.1 まえがき	… 22
3.2 心理実験	… 24
3.2.1 目的	… 24
3.2.2 方法	… 24
3.2.3 実験の結果と分析	… 26
3.2.4 実験結果とその考察	… 28
3.3 認知モデル (DIP S)	… 32
3.3.1 DIP Sの概要	… 32
3.3.2 問題文の入力	… 32
3.3.3 初期作図過程	… 34
3.3.4 解法選択過程	… 37
3.3.5 シミュレーション	… 42
3.3.6 心理実験との比較	… 44
3.4 考察	… 46
3.5 あとがき	… 47
4章 作図の分類と問題解決スクリプト	… 49
4.1 まえがき	… 50
4.2 DIP Sの概要と問題点	… 52
4.3 作図の分類と問題解決スクリプト	… 54
4.3.1 作図の分類	… 54
4.3.2 問題解決スクリプト	… 57
4.4 心理実験	… 60
4.4.1 目的	… 60
4.4.2 方法	… 60
4.4.3 結果と考察	… 61
4.4.4 問題解決スクリプトと作図	… 65
4.5 考察	… 69
4.6 あとがき	… 72
Appendix-4.A 被験者に与えた問題例	… 73
Appendix-4.B 被験者の発話例	… 73

5 章 作図と問題解決の学習過程	… 75
5. 1 まえがき	… 76
5. 2 手続き的情報（知識）と宣言的情報（知識）	… 79
5. 3 心理実験	… 80
5. 3. 1 目的	… 80
5. 3. 2 方法	… 81
5. 3. 3 結果	… 82
5. 4 考察	… 92
5. 4. 1 知識ベースの変化	… 92
5. 4. 2 作図利用の変化	… 95
5. 4. 3 今後の課題	… 96
5. 5 あとがき	… 97
Appendix-5.A 実験に用いた問題	… 98
6 章 作図と理解	… 99
6. 1 まえがき	…100
6. 2 心理実験	…102
6. 2. 1 目的	…102
6. 2. 2 方法	…102
6. 2. 3 結果	…103
6. 2. 4 考察	…104
6. 3 知識ベースモデル	…105
6. 3. 1 P C S (Problem Concern Space)	…106
6. 3. 2 実験との比較	…108
6. 4 今後の課題	…108
6. 5 あとがき	…109
Appendix-6.A 実験に用いた問題	…110
7 章 結論	…111
参考文献	…113
謝辞	…122

1 章 序 論

1. 序論

1. 1 研究の背景

近年、コンピュータグラフィックスや画像処理技術の発達にともない、視覚情報を含んだヒューマンインターフェースの研究が盛んになりつつある。C S C W (Computer Supported Cooperative Work) や C A I (Computer Assisted Instruction) などのシステムの開発は、その応用例である。技術の進歩と人間のニーズによって、このように視覚情報を含んだヒューマンインターフェース機器が、世の中に溢れるようになる日は近いと思われる。

人間の思考活動を観察してみると、確かに言葉や数式による言語的思考(論理的思考)によるものもみられるが、図を使ったりグラフに表したり、具体的なイメージを絵にして表現したりという非言語的思考(ここでは特に図的思考)も多く観察される。自分が幾何や物理などの問題を解くときの体験を思い起こして見れば分かるように、視覚情報を用いた図的思考が人間の意志決定や問題解決にとって重要な意味を持っていることは、直観的には理解される。

しかし、心理学や認知科学などの人間の「知」を研究する学問からみると、人間のこのような図的思考が具体的にどのように思考活動に影響を与えているのかという論理的思考と図的思考の関係は、未だ説明されていないというのが現状である。これからの(人間とのインタラクションが含まれる)工学的なヒューマンインターフェース機器の開発の分野では、人間の基本的な認知的特性を考慮に入れて、機器の内部にそのモデル(メンタルモデル)を持たせること

が必要となるだろう⁽¹⁾。

本研究では、人間の**図的思考**が問題解決の中で、どのように機能しているのかを心理実験を通して観察し、その認知的特性を詳細に調べ、考察を加えて人間の行動を説明する「認知モデル」を構築していく。

1. 2 研究の意義

1. 2. 1 ヒューマンインターフェース

ヒューマンインターフェースの歴史は、「マン・マシン・インターフェース」に遡る。人間工学と呼ばれる分野で、「人間にとって如何に機械を使いやすくするのか」という観点から研究が進められてきた。研究の目標は、「人体に無理がかからずに、使いやすい機械をどのように設計するか？」であった。そこでは、人間-機械系（マン・マシン・システム）の最適解を見つけるという人間工学的観点からの研究が主流であった。

しかし、1960年頃から、心理学にコンピュータサイエンスが影響を与え、人間の思考活動を情報科学的に解明しようとする研究の流れが出てきてから、ヒューマンインターフェースの分野にも変化が現れるようになった。人間の高度に専門化された技術を機械に代行させるエキスパートシステムの全盛期に入る。そこでは、「如何に人間の代わりに機械に知的な仕事（計算）をさせるか？」ということに目標は移ってきた。

さらに、1980年頃から、コンピュータは、パーソナル化の方向へ変化してきた。安価で高度な処理のできるコンピュータの普及

によって、今までは専門家だけが扱えば良かったコンピュータが一般家庭に入り込むようになってきた。それにともなって、誰にでも使える「使いやすさ」「理解しやすさ」「学びやすさ」が、表面化して、新しいヒューマンインターフェースのパラダイムが求められつつある⁽¹⁾。

最近の研究の動向では、様々な情報をいろいろな表現形式（音声や画像など）で提供し、思考支援や発想支援に役立てようとするマルチメディア、ハイパーメディアなどの研究が見られる⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。さらに、CSCW⁽⁵⁾やCAI⁽⁶⁾などの応用研究も盛んになってきた。コンピュータがマルチメディア化し、様々な情報を多様な表現形式で表現することが可能になってきて、人間の視覚や聴覚の情報処理能力をフルに活用した五感に訴える情報処理技術は進歩してきている。

コンピュータなどの機械と人間との間の自然で円滑なコミュニケーションを作り出すためには、「人間にとって理解しやすい表現とは？」という問いに対する何らかの評価基準を示す必要があるだろう。人間は、問題状況を把握し理解するために、メモを取ったり表や図を描いて表現を変化させ、有効に利用している。同様に、人間の思考支援や行動支援用のコンピュータやロボットなどの機械は、状況に応じた直観的に分かりやすい表現を人間に提供することが望まれるだろう⁽⁷⁾⁽⁸⁾。ヒューマンインターフェースを考えると、「人間の理解を助ける図的表現とは何か」という観点で研究を進めることは有意義であると考えられる。本研究は、その基礎研究として、人間の問題解決と作図行動の関係を調べていくことにする。

1. 2. 2 学習と教育工学

学習は、従来、心理学や教育学の分野で、様々な研究が行われてきた。科学的な心理学の研究は、20世紀前半のPavlovによる条件付けの研究に始まると言えるだろう⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。20世紀前半は、心理学の分野では行動主義が全盛期で、人間を内部は観察できないブラックボックスであるとして、厳密に統制のとれた実験室の中で、「刺激に対する反応」を調べるという方法論がとられた。この考えのもとに、般化、弁別、強化、消去などの様々な条件付けの研究がなされた。意識などの曖昧なものは、研究の対象から外され、行動のみが直接観察可能で心理学の扱うことのできるテーマであるとされた。このような心理学の研究の影響を受けて、教育の分野でも、プログラム学習などの、いわゆるドリルの学習方法が良しとされる風潮が形成された。こういった教育では、発想とか意識、理解のような思考内部の問題は殆ど扱われず、反復練習による強化や学習効率を高めるためのプログラムされた行動ということだけが問題にされるようになった。

しかし、行動主義が結局、ブラックボックスの内部について明らかに出来ずに、思考内部で起こっていることを扱わなければならなくなると、ゲシュタルト心理学や認知心理学が台頭してくるようになると、教育の分野もその影響を受けて、徐々に変化が生じて来つつある。人間の発想や意識、理解などに目を向け始め、「如何に憶えさせるか？」から「如何に理解を助けるか？」に変化してきた。理解を助ける可能性を持つ道具として、コンピュータがパーソナル化、マルチメディア化すると、コンピュータを教育の分野へ応用しようとする研究が盛んになってきた。

知的 C A I (Intelligent Computer Assisted Instruction) の研究は、そういった流れから現れた。学習や知識工学や人工知能の研究が成果を収め始め、様々な理論的知見が得られるようになってきた。そして、多くの C A I 研究者が、その知見をコンピュータに実装し、人間の学習へと応用しようとしてきた⁽¹¹⁾。初期の C A I 研究は、学習者に対する明確なモデルを持たずに、試行錯誤的に教材を与えていくものが多かったが、研究が進むにつれ、学習者がどの程度理解しているのかを把握することが重要であることが分かってきた⁽¹²⁾。学習者の学習程度を測るために、どうしてそうなったのかという原因帰属や帰納推論の研究が盛んに行われ、成果が見られるようになったが、一方で、学習者がどのような理解をするのかを、予めモデルとしてコンピュータに持たせておこうというアプローチも見られるようになった⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。これは、突き詰めると、「人間はそもそも学習過程で、どのように理解力を身につけていくのか？」という問題に行き着く。「人間の問題解決における理解」は、このように C A I などの教育工学の分野でも重要な課題となっている⁽¹⁵⁾。コンピュータへの応用とは直接結びつかないが、基礎研究と臨床研究の融合を目指す立場から、「人間の学習における理解の研究」として、臨床的なケース報告をしているグループもみられ⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾、近年、注目を集めている研究テーマである。

本研究では、学習過程に対応して人間の問題解決行動がどのように変化していくのかを作図行動に注目しながら追跡し、その学習モデルを提案し、考察を加えた。

1. 3 本研究の目標と論文の構成

本研究では、まず、以下に示す大目標を設定し、そして、その大目標から切り出した小目標も設定した。研究は、この小目標にしたがって行い、本論文もこの小目標の構成にしたがっている。

(大目標)

人間の言語的思考と非言語的思考（特に、図的表現をもとにした思考）との関係を明確にし、人間の思考や理解にとって図的表現がどのような影響を与えているのかを説明する認知モデルを構築する。

Polanyi は、非言語的な知、さらには、言語的な知も含んだ包括的な知を「暗黙の知」と呼び、物事の体得や創造的な思考などの源になっていることを指摘している^(1*)。本研究では、特に人間の視覚的（図的）思考のメカニズムについて、以下の小目標に分けて研究を進めてきた。

<小目標 - 1 >

人間の問題解決過程で、図的思考が外に行動として現れる作図行動を観察し、その生成・利用過程をモデル化する。

→本論文中の3章で、人間の作図過程を観察し、モデル化した研究を紹介した。

<小目標 - 2 >

さらに、細かく作図の役割を分類し、各々の作図がどのような状況で使われているのかを調べる。

→本論文中の4章で、「作図の利点による分類」、「行動による分類」を行い、各作図が解決過程のどの段階で現れるかを調べた。

<小目標 - 3 >

作図行動を制御している思考のメカニズムをモデル化する。

→本論文中の4章で、「問題解決スクリプト」という問題解決行動を制御している概念を提案し、作図行動との関係を考察した。

<小目標 - 4 >

作図を含んだ問題解決能力は、どのように学習されるのか？その学習過程を調べる。

→本論文中の5章で、実際の中学生が幾何の証明問題を学習する過程を追跡調査した実験を示し、学習が進むにつれて作図利用がどのように変化するのかを調べた。また、その変化が表れる原因を知識ベースの変化という観点からモデル化して、説明を試みた。

< 小目標 - 5 >

作図によって理解のもとになる知識はどのように想起されるのか？
を調べる。

→本論文中の6章で、作図の有無による心理実験をもとに知識がどのように想起されているのかを調べ、作図の有無が思考過程にどのような影響を与えているのかを知識ベースのモデルを提案して考察した。

したがって、本論文の構成としては、1章で、序論と研究の背景を述べ、2章では、認知科学の歴史的背景&方法論と関連研究について説明する。そして、3章から6章までで、上記に示したような小目標に対応して行った研究について説明し、7章で結論を述べる。

2 章 問題解決と作図行動

2. 問題解決と作図行動

2. 1 問題解決の認知科学的研究

2. 1. 1 認知科学の歴史的背景

認知科学の歴史は、1950年代に遡る⁽¹⁹⁾。厳密には、1956年に誕生したとする説が有力となっている⁽²⁰⁾。何故、1956年がそれほど注目されるのかというと、この年に情報処理の新しいパラダイムの出発点となる幾つかの論文が発表されたからである。

Millerの短期記憶の容量の限界について有名な「魔法の数七」の研究⁽²¹⁾、Chomskyの変形文法に関する研究⁽²²⁾、Newell & Simonによる計算機上で初めて実行された定理証明システム“Logic Theorist”の発表⁽²³⁾、さらに、Bruner, Goodnow, & Austinによる「思考の研究」⁽²⁴⁾など、これ以後の人間の思考研究に大きな影響を与えた論文が相次いで発表された。

認知科学の成立に影響を与えた学問領域は幅広い。実験心理学、認知心理学、人工知能、情報科学、言語学、哲学、神経科学、さらには、人類学、経済学、社会心理学などの諸分野が、その成立の一翼を担っている。20世紀前半の行動主義の全盛期には、心理学の分野では、人間の研究は「行動のみを調べるもの」とされ、心的プロセスを議論する認知研究はタブー視された。とりわけ、人間固有の概念形成や問題解決などの複雑な認知過程に関しては、殆ど新しい進展は見られなかった。

そのような歴史的背景の中で、上述の1950年代は、学問の各領域では、ちょうどパラダイム変革の時期にあり、その変革に一役

買ったのがコンピュータの出現であると言えるだろう。50年代から60年代にかけての情報処理革命*1とともに、新しいパラダイムとして「思考とは記号の操作である」という考え方が現れ⁽²⁵⁾、人間の思考を情報处理的アプローチで解明しようとする動きが見られるようになった。このように”人間の知”のメカニズムを情報处理的な観点から研究する領域を、幅広く”認知科学”と呼ぶようになった。

本研究は、この”認知科学”の流れを受けており、認知科学の情報处理的アプローチで、人間の問題解決における図的思考過程を考察したものである。

2. 1. 2 認知科学的方法について

認知科学は、1章で述べたようにヒューマンインターフェースの分野の基礎研究として期待されているが、前節でも述べたように、その歴史はまだまだ浅く「こうすれば人間の思考過程は分かる！」というような決定的な研究方法が確立されているとは言いがたい。実際のところ、前節で認知科学の成立に寄与した（している）学問領域を、心理学、人工知能、情報科学、神経科学、等々、幾つも挙げたように、「人間の知（思考活動など）を調べる方法論（切り口）は、いろいろある」というのが真の答えなのかもしれない。

*1 計算機が発明されて、しばらくしてメモリーも大型化してきた。計算速度の高速化、記憶量の拡大化の傾向から、コンピュータは人間の思考の代用となるのではないかという発想（幻想なのかも知れないが）から人工知能研究が爆発的に起こった。

しかし、いわゆる伝統的な認知科学的アプローチと呼ばれている方法として、発話プロトコル分析を用いた方法が Simonらによって提案されていて⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾、多くの業績を残しつつある。本研究も、この方法に則って行われた研究であるので、発話プロトコル分析をもとにした認知科学的アプローチについて説明する。

この方法では、まず、人間の思考過程を観察するために発話プロトコル分析と呼ばれる心理実験を行う。発話プロトコル分析とは、被験者に課題を解かせ、その最中に思考内容を発話させ、その発話内容を記録し発話記録として文字にして、内容を分析して思考過程を調べる方法である。思考している最中に発話させる方法は**思考発話(thinking aloud)法**と呼ばれ、19世紀、心理学で構成主義と呼ばれるヴント一派らが用いた**内観法**とは区別される。内観法は、訓練された内観報告者が、自分の思考を反芻し「なにを考えていたのか」を報告し分析する方法であるが、どんなに訓練された報告者の報告でも、客観性、再現性が低く、批判が多かった。一方、思考発話法とは、課題遂行と同時に被験者に発話させる方法*2で、主観的感想などの内観報告が入り込まず、その場で考えていないことは発話されないことが指摘されている⁽²⁶⁾⁽²⁸⁾。

次に、発話プロトコル分析で整理された思考過程（心理データ）をもとに、その思考過程が説明できる思考のモデル（認知モデル）

*2 思考発話法は、オンラインのプロトコルと呼ばれている。それに対して内観法はオフラインのプロトコルと呼ばれ、客観的でない情報が入り込む恐れがあると指摘されている。

を構築する。認知モデルは、論理的整合性を確認するために、コンピュータモデルとしてコンピュータ上にインプリメントできるような形に記述するのが定例となっている。

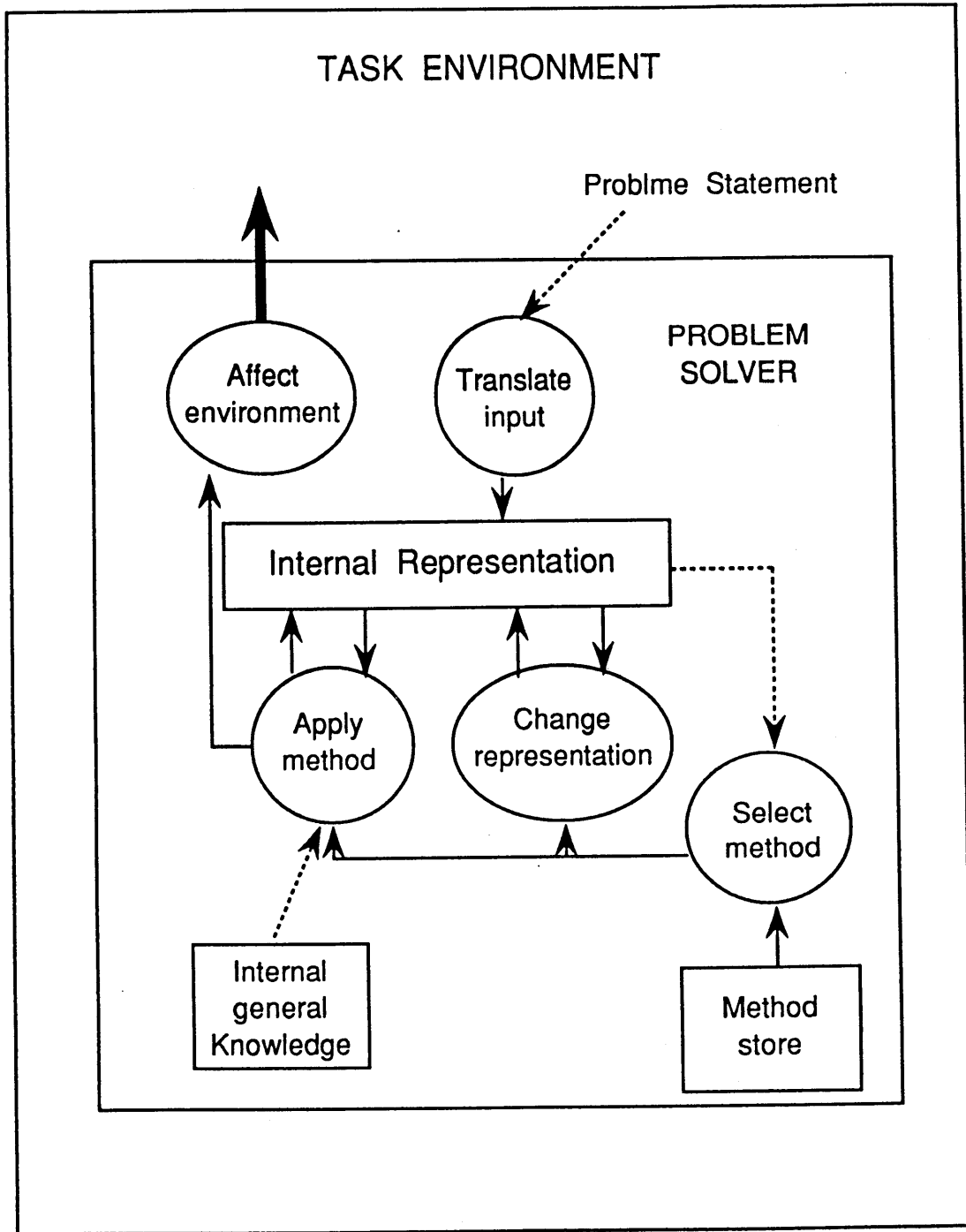
このように、心理的なデータから思考の論理的モデルとしての認知モデルを構築する研究が、認知科学的アプローチに基づく研究である。本研究は、このアプローチに則って進められた。

2. 2 従来の研究

本研究では、初等幾何の証明問題を題材にして、人間が思考過程でどのように作図を活用しているのかを調べた。関連研究としては、問題解決を認知モデルを構築して説明する研究と、問題解決において表現がどのように人間の”理解”に影響を与えているのかという研究の2種類が見られる。以下では、2種類に分けて、紹介する。

<問題解決の認知モデル研究>

認知科学的問題解決の研究では、先駆的研究として Simonらの G P S (General Problem Solver) が有名である⁽²⁹⁾。G P S は、問題解決の過程を問題解決空間という概念を用いて捉え、その中で初期状態から目標状態への状態変化モデルの形で思考過程を表現したもので、後の研究に大きな影響を与えた。Simon はその著作の中で、一般的な問題解決システムの構造の概略を、図 2-1 のような形で表現している⁽³⁰⁾⁽³¹⁾。外部から入力された問題は、まず問題解決システムにとって扱いやすい内部表現 (Internal Representation) に変換される。変換された内部表現を表現変換器 (Change



.....→ observation → action

図 2 - 1 問題解決器の一般的構造 ⁽³¹⁾

Representation) や選択された解法の適用 (Apply Method) によって変換して徐々に変化させ解決状態を導いていく。その際、システムの外部にもいろいろな操作を与えて、問題解決器 (Problem Solver) をとりまく状況を変化させたりする。このように考えると、外部に現れる作図行動は、外部表現を変化させる表現変化の過程と捉えることができる。これについては、3章以降で著者が提案した認知モデルにも、その考えが生きている。

幾何の問題解決を扱った研究では、Anderson らによる A C T の研究が挙げられる⁽³²⁾⁽³³⁾。A C T は、もともと、人間の認知過程のモデルを記述するための認知的情報処理システムとして提案されたものである。Andersonらは、このシステムを用いて、幾何の証明問題を解くプログラムを考察した。A C T の基本的概念は、知識を意味ネットワークで表現するデータベースと、システム操作のプロダクション群と、それらプロダクションを起動し制御するインタープリタ部の3つに分かれる。

彼らは、幾何で現れる視覚的情報を論理的命題としての意味ネットワークの中で表現した。幾何の視覚的情報は、要素と節点という2つの概念で結びつけられていて、要素は、点、線分、角、三角形などに相当し、ネットワークの節点は、合同、対頂角、錯角などの関係を表している。このように図的情報を論理形式に変換して、論理的推論の世界で問題解決を行った。この結果、問題としては解決されたが、幾何問題を解く際に人間特有の視覚的な(非言語的な)情報処理と論理的な(言語的な)情報処理の間の有機的な結びつきを説明するには至っていないというのが実状である。

Greenoも、A C T の影響を受け、幾何の証明問題の研究を行った

が、同様に視覚的な問題を論理的な問題へ置き換えて処理しようとするもので⁽³⁴⁾、視覚的情報の有効性を積極的に利用した研究とは言えない。また、物理の力学の問題などについても同様の研究が見られる。作図図形に対応する物体の位置的情報を、物体と物体間の関係という形で表現し、その表現を用いて問題解決を図る認知モデル研究である⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾。

本研究では、視覚的な情報を、なるべくそのままの座標情報として捉え、図形解釈の過程でPrologの関数を使うことによって、論理的推論と融合させることにした。

< (視覚的) 問題表現と問題理解に関する研究 >

問題の表現が問題の理解に影響を与えることを示す研究は、問題解決における”構え”の研究などで、心理学の分野でも古くから行われてきた。Luchins の水瓶の問題(表2-1参照)は、問題解決における”構え”の研究の例としては有名である⁽³⁷⁾。この問題では、1~7のすべての問題は、「Bにためた水をAで1回、Cで2回くみ出す」という操作をすればよいのだが、実は6、7の問題には、もっと簡単な解法がある。1~5までの解き方が一つの固定的なイメージを形成し、解決に対する”構え”を作る。これが問題解決に影響を与えている。

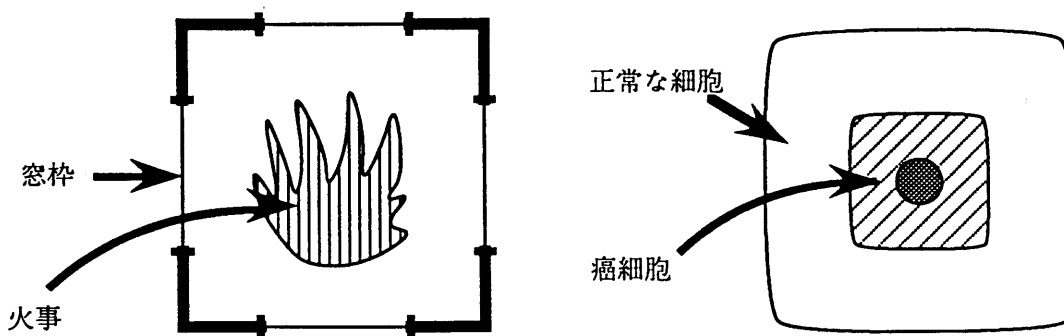
また、Millerらは、「問題発見(把握)は、問題解決に必要な吟味を行うために、状況の明確なイメージを構成することである。実際の問題解決場面においては、(解決すべき)問題についての豊富で明確なイメージを構成すればするほど、問題が明確になり把握しやすいものとなる」と述べてイメージの役割を強調している⁽³⁸⁾。

表 2 - 1 Luchinsの水瓶の問題

問題：「三つの様々な大きさの水瓶を使って指定された量の
水を計り取るには、どのようにすればよいか？」

問題番号	A	B	C	計り取る量
1	2 1	1 2 7	3	1 0 0
2	1 4	1 6 3	2 5	9 9
3	1 8	4 3	1 0	5
4	9	4 2	6	2 1
5	2 0	5 9	4	3 1
6	2 3	4 9	3	2 0
7	1 5	3 9	3	1 8

(A、B、Cは水瓶の容量)



火事の問題：
窓枠を壊さないように火事を消すには
どうすればよいか？
→窓枠を壊さない程度の水量で四方か
ら水をかける。

癌の問題：
正常細胞を殺さないように放射線を当てて
癌細胞だけを殺すにはどうすればよいか？
→正常細胞を殺さない程度の放射線量で四
方八方から照射する。

図 2 - 2 火事の問題と癌の問題

近年になっても、視覚的イメージの影響を含んだ問題表現と問題解決との関係を調べる心理的な実験は続けられている。安西らは、Duncker の放射線で癌細胞を殺す問題の実験⁽³⁹⁾を発展させて、火事の問題が癌の問題を解くのにどのような類推的推論効果を持っているのかを調べ(図2-2参照)、人間は問題解決の際に、類推よりも問題表現の影響の方を強く受ける傾向が見られ、ヒントなしでは類推は起こりにくいことを示した⁽⁴⁰⁾。

問題解決の際に、問題表現が解決に与える影響を調べる研究では、「3囚人問題」とその問題表現の研究が盛んに行われている。問題の表現として、ベイズの定理を使った論理的解法と、図やルーレットのような視覚的な表現を使う直観的解法では、後者の方が「問題理解」が深まるという報告があり、分かりやすい図などの表現を使うことが問題理解や問題解決に大きな影響を与えていることが指摘されている⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾。さらに、この問題を巡って人間の問題理解過程を説明する認知モデル研究が行われるようになってきた。また、実際の被験者を使って作図過程を調べ、作図のように積極的に問題表現を変化させることが問題解決に効果的であることを示唆する研究も見られる⁽⁴³⁾⁽⁴⁴⁾⁽⁴⁵⁾。しかし、どれもまだ、決定的な認知モデルを提供しているとは言えないのが現状である。

本研究は、上述のような従来の研究を踏まえて、1章でも述べた「人間の言語的思考と非言語的思考(図的表現をもとにした思考)との関係を明確にして、人間の思考や理解にとって図的表現がどのように影響を与えているのかを説明するモデルを構築する」ことを大目標として研究を行った。

3 章 作図を含んだ問題解決過程

3. 作図を含んだ問題解決過程

3. 1 まえがき

従来、認知科学において問題解決の過程を扱った研究は数多く行なわれてきた。Simon による先駆的な研究である G P S (General Problem Solver) では⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾、問題解決を初期状態から目標状態への状態変化の過程として捉え、後の研究に大きな影響を与えた。本研究もその影響を受け、問題解決の過程を問題表現変化の過程として捉えた。

その後、初心者 (Novice) と熟達者 (Expert) の推論の違いに関する研究や⁽⁴⁴⁾⁽⁴⁶⁾⁽⁴⁷⁾、自己観察 (self-monitoring) が問題解決の学習に重要な役割を持っていることに関する研究などが行なわれてきた⁽⁴⁸⁾。

本研究のような、視覚的情報を扱う認知科学研究は、大きく分けて2つの観点に分類される⁽⁴⁹⁾。1つは、イメージ的な表現に関する研究で、これは、図形処理の「内部表現」、即ち、人間の頭の中でどの様に図形が表現され処理に供されているのかという点の解明を目的としている。それに対して、人間の外部に現われる作図行動などに関する研究も行なわれている。これは、前者のものに対して「外部表現」ということばが当てはまると思われるが、一般には、作図や描画といった行動に関する研究である。現実的には、「内部表現」を直接観察することが困難であるために、前者の研究は、殆ど行なわれていないというのが現状である。他方、後者の研究に関しては、近年行われるようになり、いくらかの研究成果も見られる

ようになってきた⁽⁴³⁾。

外部表現（ここでは、作図された図形のような図的表現）を問題表現の変化という観点から捉え、作図図形に対応する別の表現を提供して、その表現を用いて問題解決を行う研究も見られるようになった。たとえば、物理の力学の問題を対象にして、作図図形に対応する物体の位置的情報を物体と物体間の関係という形で表現し、その表現を用いて問題解決を図る認知モデル研究などが、それである⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾。

幾何の問題を扱ったものでは、GreenoやAndersonらの研究などが挙げられる⁽³³⁾⁽³⁴⁾。彼らの研究も、作図の過程を一種の適切な中間表現の一つであるとして捉え、その過程を通して解決に到達する方略的知識を設定して問題解決をするモデルを考案した。

しかし、これらの研究では、問題の文的表現を単に他の（図的表現に対応する）表現に変換して、位置関係を導くものばかりであり、図的表現から得られる新しい情報を利用するという点に関しては、あまり積極的であるとは言えなかった。

本章では、1. 3節で述べたように、<小目標-1>「人間の問題解決過程で、図的思考が外に行動として現れる作図行動を観察し、その生成・利用過程をモデル化する」ために、発話プロトコル実験を行い、人間の作図を含んだ問題解決過程を観察し、その問題解決過程をシミュレートする認知モデルDIPSを提案し、コンピュータ上にインプリメントした。さらに、コンピュータ上でのパフォーマンスと心理実験の結果を比較して、考察を加えた^{(52)~(56)}。

3. 2 心理実験

3. 2. 1 目的

実際に人間の行なう幾何の問題解決過程を調べることによって、どの様に図的情報が利用されているかを考察する⁽⁴⁹⁾。被験者の自由な問題解決過程の中から、特に、作図生成の過程と、作図図形からどのような情報を得ているのかを中心に観察する。

3. 2. 2 方法

従来、このような問題解決の研究において、被験者の思考過程を調べる方法として、発話プロトコルと呼ばれる方法が用いられてきた。この方法は、まず被験者に問題を解かせて、解決の過程で考えた内容をすべて発話させ、その音声をテープ・レコーダー等で記録する。そして、実験者が発話内容すべてを紙面上に再生して思考過程を分析するものである。

しかし、幾何の問題解決のように視覚的情報処理過程を含んだ思考過程では、発話の困難な思考内容が多く、被験者の発話量が減少してしまうといった問題点が指摘されていた⁽⁵⁰⁾⁽⁵¹⁾。そこで本章の研究では、発話の減少や停滞した部分の被験者の思考過程を推論するために、被験者の発話だけでなく行動をも記録して分析を行なう方法をとった。

具体的な実験は以下の手順で行った。

- 1) 問題解決時の被験者の発話と作図行動をビデオに記録する。
- 2) 発話内容を紙面に記録する。
- 3) 被験者の行動をビデオを見ながら再生し、発話内容と重ねて整理する。

被験者は、本大学の工学部4年生と大学院生の計6名。問題は、中学校レベルの初等幾何の証明問題で、作図過程と思考過程の関係を調べるために、問題に図が添えられていないものを選んだ。問題数は、一人あたり6題である。

「被験者が幾何の問題に関する知識をどのくらい持つか」、「問題を解かせる際の教示」などが、結果に影響すると思われるが、前者については、理系の大学生と大学院生であるので、当然、中学校レベルの問題は解いた事があり、問題解決に関する必要な知識を有していると考えられる。また、後者については、問題を与える前に、特にこれらの問題に類似する問題を解かせたり、実験に関する予備知識を与えるような事はしなかった。問題自体は、教科書程度のレベルの問題なので、被験者にとっては容易に解ける問題であるが、一部定理等を忘れていて解決に手間取る部分もあった。しかし、おおむねスムーズに問題を解決した。

被験者には、草稿用紙を与えて自由に思考させて、答案用紙に答案を作成するように指示した。また、実験者は、被験者が思考内容の現れとなる発話や行動を促進するようにした。

以下では、実験の結果とそこから導かれる被験者の問題解決の認知的な構造を考察していく。

3. 2. 3 実験の結果と分析

図3-1(a)のような幾何の問題に対する被験者の発話例は図3-1(b)の通りである。図中で、発話の右横に記したアルファベットは被験者の発話(talk)や行動(action)を表わしたプロトコルコードである。プロトコルコードの分類と内容を、図3-2に示す。ビデオを用いてプロトコルデータを収集することによって、作図(Dd)や図への描き込み(Di)といった行動が観察された。

図3-1の発話内容をコード別に表にしたものが表3-1である。表は、縦方向に被験者の発話順に発話番号が並び、横方向に発話内容がとってあり、被験者がどのように思考内容を変化させていったのかが表現されている。表中の最初(1~6)は、問題文を読みながら最初の作図(○で表わした所)をする段階で、次の(7~14)で、条件を確認して描き直し(□で表わした所)を行なっている。描き直した図をもとにして、(11, 12)のように解法の候補を選択して、(13~22)でその解法の吟味を行なう。しかし、この被験者はここまで来て、違う解法についての吟味も行なった。これが(23~29)の部分にあたる。結局、(27~29)の部分で最初の解法と比較を行ない、再度、最初の解法を吟味して解法を決定した(30~38)。

○や□をつないでいる線や破線は、推論(Ss, Es)の際に利用している図形と対応している。例えば、(23~30)の推論は、(1~5, 24~26)の作図を利用して行なった推論であることを表わしている。

解法に関する言及(Ss, Es)の○や□は、それぞれどちらの作図上で解法を考えたかを表わす。また、●は、問題文をそのまま読んだり、自分の知っている知識をそのまま発話している部分を表わす。

<Problem>

There is a $\triangle ABC$. Now, M is the middle point of BC . Let $AM=BM=CM$.
Prove that $\triangle ABC$ is a right-angled triangle.

(a) 実験に用いた問題

<number>	<protocol>	<code>	
		talk	action
1.	there is $\triangle ABC$	Rp	
2.	now, M is the middle point of BC	Rp	Dd
3.	let $AM=BM=CM$	Rp	Dd
4.	prove that $\triangle ABC$ is a right-angled triangle	Rp	Dd
5.	$AM=BM=CM...$	Rp, Rc, Ed	
6.	$AM=BM=CM...$	Rp, Rc	
7.	there are A, B, C		Dd
8.	AB equal		Dd
9.	$AM=BM=CM$		Dd
10.	prove that $\triangle ABC$ is a right-angled triangle	Rp	
11.	well, right-angled triangle	Ss, Rp	
12.	circumcircle?	Ss, Cd	
13.	yeah	Es	
14.	if it's a circumcircle, here is right-angle...	Es	Di
15.	OK	Es	
16.	if they are all radii, that will do	Es	
17.	I can prove it	Es	
18.	well,	Es	
19.	but it is difficult to answer this	Es	
20.	let me see...	Es	
21.	well, it is true, isn't it?	Es	
22.	but, we can draw only one circumcircle?	Es, Pk	
23.	there seems to be another answer	Ss, Pa	
24.	by adding this angle and this angle, we get this angle ($\angle MAC + \angle MCA = \angle AMB$)	Es, Id	Di
25.	this and this and this are all equal ($AM = BM = CM$)	Es, Id	Di
26.	this angle is 180 degrees	Es, Id	
27.	it's a kind of troublesome	Es	
28.	well...	Es	
29.	so...	Es	
30.	now there is a triangle	Es	
31.	and M	Es	
32.	and A	Es	
33.	and B	Es	
34.	and C , then	Es	
35.	well, all three are equal	Es, Id	
36.	by making M as a center	Es, Id	
37.	we can draw a circumcircle of $BAC...$	Es, Id	
38.	well...	Es	

(b) 問題(a)に対するプロトコルデータ

図 3 - 1 問題例とそれに対するプロトコルデータ

reading problem content	
Rp (Read problem without condition)	talking about strategy
Rc (Read condition)	Ss (Search strategy)
	Es (Examine strategy)
drawing	
Dd (Draw diagram)	others
Di (Draw in diagram)	Pk (Propose knowledge)
	Pa (Propose action)
inference and cognition	Ca (Calculation)
Ed (Examine diagram)	
Ud (Understand diagram)	
Id (Infer diagram)	

図 3 - 2 プロトコルコード

表 3 - 1 図 3 - 1 のプロトコル分析結果

	Rp	Rc	Dd	Di	Ed	Ud	Id	Il	Ss	Es	Ca	Pk	Pa
1	●												
2	●		○										
3	●		○										
4	●		○										
5	●	●	○										
6	●	●	○										
7			□										
8			□										
9			□										
10	●												
11	●								□				
12						□			□				
13										□			
14				□						□			
15										□			
16										□			
17										□			
18										□			
19										□			
20										□		●	
21										□			●
22										□			
23										○			
24				○			○			○			
25				○			○			○			
26							○			○			
27										○			
28										○			
29										○			
30										□			
31										□			
32										□			
33										□			
34										□			
35							□			□			
36							□			□			
37							□			□			
38										□			

3. 2. 4 実験結果とその考察

問題解決の過程では、被験者間の個人差が見られたり、同一被験者においても問題による違いも見られた。しかし、本実験において被験者の問題解決行動には、以下のようないくつかの注目すべき共通点がみられたので、ここでは代表的な被験者の例（図 3 - 1）に基づき、被験者間に共通に見られた特徴的なプロトコル内容について述べる。

(1)問題解決過程には、次の三段階が観察された。

①初期作図過程 (Initial Drawinig Process)

…問題文を読んで、問題文に対応する作図を行なう段階。図3-1では1~11の辺りで、「問題文の読み(Rp)」と「作図行動(Dd, Di)」が観察される段階。

②解法選択過程 (Strategy Selecting Process)

…解法の候補を設定して、図上で吟味して正しい解法を選択する段階。図3-1では11~37の辺りで、「解法に関する言及(Ss, Es)」が観察される段階。

③答案作成過程 (Answer Generating Process)

…選択した解法にしたがって答案を作成する段階。

図3-1では38~の辺りで、発話がほとんど観察されなくなり、答案用紙に書き込んでいる段階。

(2)初期作図過程における作図は、問題文の逐語的な処理で行なわれる。たとえば図3-1の問題のように、問題文の途中で「 $AM = BM = CM$ 」のような条件が現われ、最後に三角形の形状「直角三角形」が分かるような問題においては、最初の部分ではこの三角形が直角であるかどうか分からないので、被験者は図の描き直しを行なう(図3-1では7~10の辺り)。このような図の描き直しは、この問題のように後で形状に関する条件が分かるような他の問題でも観察された。このことは、問題文を基に作図を行なう場合、問題文を先頭から読んで逐語的な処理を行なっていることを示唆している。

すなわち、この過程では、問題文の逐語的な作図、その作図の吟味、条件にあわない場合の描き直しの3つの処理が行なわれる。

(3)解法選択過程においては、描かれた図の解釈の際に何を証明すればよいかというような解決の鍵になる情報(以下、キー情報と呼ぶ)の発話の後に、図形解釈の発話が見られた。これに対応する発話は、図3-1の被験者の例では、12,13あたりの発話で、被験者は「外接円」というキー情報を基に作図を観察して、「直角三角形の外接円」という図形的解釈を生成している。この後、この被験者は「直角三角形の外接円」に注目して、この図形を基にした推論を展開している。以下では、ここで行なった図形的解釈によって生成された図形部分(この被験者の場合は「外接円」)を注目図形と呼ぶことにする。

したがって、この過程は、解決者が持っているトップダウン的知識としてのキー情報を基に注目図形を設定して、その注目図形上で問題の解決を行なっていく過程であると考えられる。

(4)問題文中には陽に現われない情報を用いて推論を行なっている。図3-1の問題では、文中では三角形のどの頂点が直角であるのかは明かではないので、被験者は一回、2~4で直角ではない三角形を描いて、その後、 $\angle A$ が直角であることを条件と図から推測して、正しい図を描いて解答に活かしている。作図を用いる利点の一つとして、このような陽に現われない情報が図を描くことによって得られるという点があるといえる。この様な情報が問題解決の際に、あ

たりをつけたり、推論したりする時に役立っていることが分かる。

(5)答案作成過程においては、発話はほとんど現われない。現われたとしても、解答用紙に記入する内容と同一の内容を発話しているに過ぎないものとなっている。これは、被験者にとっては問題解決は解法選択過程で実質的には終了していて、あとは答案として解答用紙に記入するだけの状態になっているためであると思われる。

(6)全体として、問題解決の過程は、情報の変化の過程として捉えられる。最初は問題文として「文的情報」で与えられた表現を作図という行為を通して「図的情報」に変化させ、これらの情報から解決の鍵となる「キー情報」を導いて、このキー情報という観点から「注目図形情報」に注目を集めて探索空間を狭めている。このように、問題解決の過程は人間にとって扱い易い情報に問題を変化させ処理していく過程と捉えることができそうである。これは、従来の研究とも一致する。

3. 3 認知モデル (D I P S)

3. 3. 1 D I P S の概要

心理実験の結果をもとにして人間の幾何の問題解決をシミュレートした認知モデル D I P S (Diagramatic Problem Solver) を提案する。

3. 2 節の心理実験の結果から、問題解決の過程が「初期作図過程 (Initial Drawing Process)」、「解法選択過程 (Strategy Selecting Process)」および、「答案作成過程 (Answer Generating Process)」の三段階からなることが示された。

初期作図過程においては、問題文の「文的情報」を逐語的な処理によって「図的情報」に変換する。そして、次の解法選択過程においては、「図的情報」から得られた、文的情報に陽に含まれなかった情報をを利用して「キー情報」を導き、それに対応する「注目図形部分」を決定して探索空間を狭める。答案作成過程は、問題解決というよりは、自然言語生成の過程であると考えられるので、本研究では最初の二つの過程についてのみモデル化した。

3. 3. 2 問題文の入力

問題文を理解してコンピュータの扱えるような形式的表現に変換することは、自然言語理解の研究領域に入り、本研究の範囲を逸脱すると考える。したがって、自然言語で書かれた問題文の表現をあらかじめ整理して、論理的な形式に直して入力することにした。ここでは、使用言語として Prolog を用いているので、リスト表現を用

いて表わした。

中学校レベルの初等幾何の証明問題の表現は、一般に以下のような三つの情報が含まれた形をしている。すなわち、作図情報 (Diagram Information;DI)、条件情報 (Condition Information;CI)、証明情報 (Proof Information;PI) の三つである。これら三つの情報の内容と入力時の表現は以下の通りである。

(1)作図情報(DI)

…問題中の図形の位置関係についての記述に相当する。この表現のみで、作図の一例が得られるだけの情報が含まれている。

<入力表現>

図中の二つの作図要素 (例えば、線分、点、三角形など) とそれらをつなぐ関係表現 R (例えば、平行、垂線、中点など) を用いて下記のように表現する。

$[[(\text{作図要素 } E1), (\text{E1とE2の関係 } R), (\text{作図要素 } E2)], \dots]$.

(2)条件情報(CI)

…問題中の作図情報には含まれない作図要素に関する記述に相当する。

<入力表現>

入力表現は、作図情報の場合と同様の形式で表現する。

(3)証明情報(PI)

…問題の証明すべき内容の記述に相当する。

<入力表現>

初等幾何の証明情報はいくつかのパターンに分類できると考えられる。今回は、以下の三つのパターンに分類した。

①「〇〇形であることを証明せよ」

…二等辺三角形、正方形、直角三角形、平行四辺形, etc.

→ [〇〇形,[,... ,]].

②「-と-の長さは等しいことを証明せよ」

…線分の長さが等しいことを証明する場合。

→ [[線分,[,]],等長,[線分,[,]]].

③「-と-の大きさが等しいことを証明せよ」

…角の大きさが等しいことを証明する場合。

→ [[角,[, ,]],等大,[角,[, ,]]].

([_,_,_]などのブランク部分には、P.42の図3-7(a)の問題入力例のように、図上の図形の頂点や点が入る。)

上述の三つの形式にマッチしない証明問題（例えば、「中点であることを証明せよ」など）は、扱わないことにした。しかし、同様な方法で問題のパターンをさらに厳密に分類することによって、扱える問題を拡張することは可能である。

3. 3. 3 初期作図過程

初期作図過程は、3. 2. 4節の心理実験の結果(2)から、作図を生成し、吟味し、描き直す三段階が観察されたので、ここでも図3-3のように三段階に分けて表現した。三段階とは、「初期作図生成部 (Initial Diagram Generator)」と、「作図検討部 (Diagram Condition Checker)」と、「再作図生成部 (Re-drawing

Diagram Generator) 」である。

この三段階を通して、問題文として入力された三つの情報 (DI, CI, PI) を作図の一例としての図的表現に変換する。

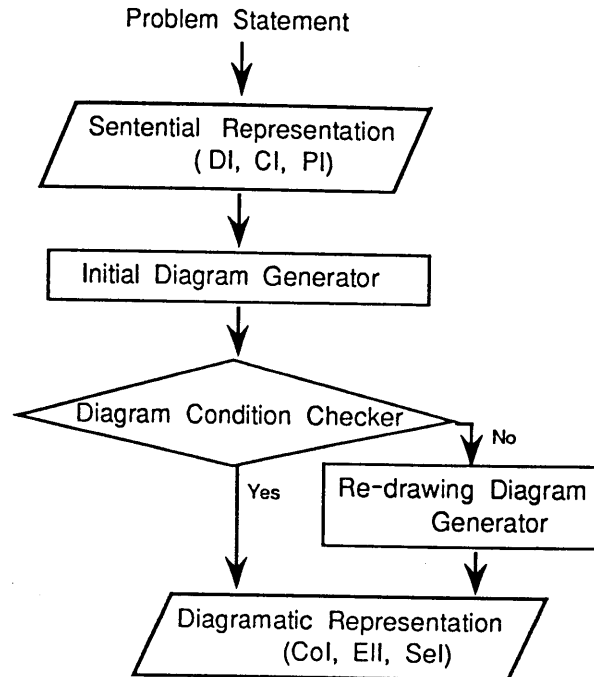


図 3 - 3 初期作図過程の処理の流れ

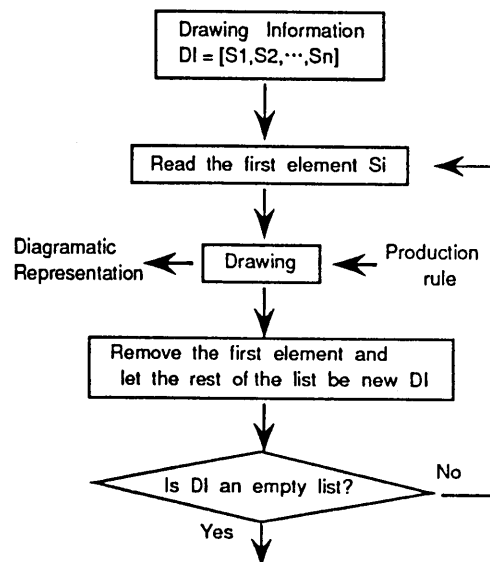


図 3 - 4 初期作図生成部の処理の流れ

初期作図生成部

この過程では、問題文の文的表現を読んで、図 3 - 4 のような作図過程を経て作図が行なわれる。問題が 3. 3. 2 節で述べたような形で入力されると、作図情報 (DI) が読み込まれる。作図情報は、Prolog のリスト形式で入力されるが、その先頭のリスト S_i を読んで、図 3 - 5 のように要素 (E1, E2) とその関係 (Rn) によって分類された作図規則を適用して座標値を生成し、図的表現 (Diagrammatic Representation) が得られる。このとき、たとえば、「三角形 ABC」のような文に対しては、いくつもの三角形が考えられるが、モデル中にあらかじめ与えられた典型的な三角形の一例を図的表現として返すことになっている。この処理を繰り返し作図情報のリストが空になった時、作図の一例としての図的表現が得られ、この段階は終了する。

ここで図的表現とは、作図を構成している点を座標値で表した座標情報 (Co-ordinates Information; Col)、構成されている図形の要素を表現した要素情報 (Elements Information; E11)、そして構成されている線分の情報を表現した線分情報 (Segments Information; Sel) の三つのことである (具体例は、図 3 - 7 に示すシミュレーション結果の②③④参照)。

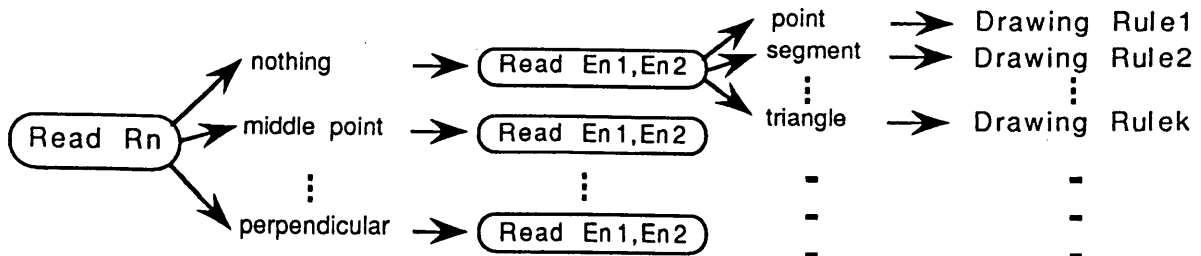


図 3 - 5 作図情報の先頭要素 S_n の分類

作図検討部

ここでは、生成された図的表現が問題の条件にあったものであるかどうかを、条件情報 (CI) と照らし合わせて吟味する。例えば心理実験で行なった図 3 - 1 (a) のような問題では、 $AM = BM = CM$ であるかを座標情報で長さを計算してチェックする。条件を満たす場合、図的表現の三つの情報 (CoI, Ell, Sel) を次の解法選択過程に渡してこの過程は終了するが、条件に合わない場合、再作図生成部に移る。

再作図生成部

ここでの図的表現の生成アルゴリズムは初期作図生成部のものと同じであるが、条件情報や証明情報を優先させて作図する。すなわち、条件情報と証明情報を作図情報のリストの先頭に付け足した新たなリストを作成し、図 3 - 4 のような処理をすることによって条件情報と証明情報を満たす図的表現を生成する。ここでも、条件を満たす、複数の作図が考えられるが、先頭要素から順番に作図規則に則して作図が行なわれるので、条件を満たす一通りの作図が得られ終了する。

3. 3. 4 解法選択過程

この過程では、問題文の文的表現とその位置関係を表わす図的表現を利用して解法の選択を行い、キー情報となる解法の候補を生成し、それに基づいて図形のトップダウン的解釈を行なう。その処理のフローチャートを図 3 - 6 に示す。この過程は、「条件拡張部 (Condition Extender)」と、「解法候補生成部 (Strategy Can-

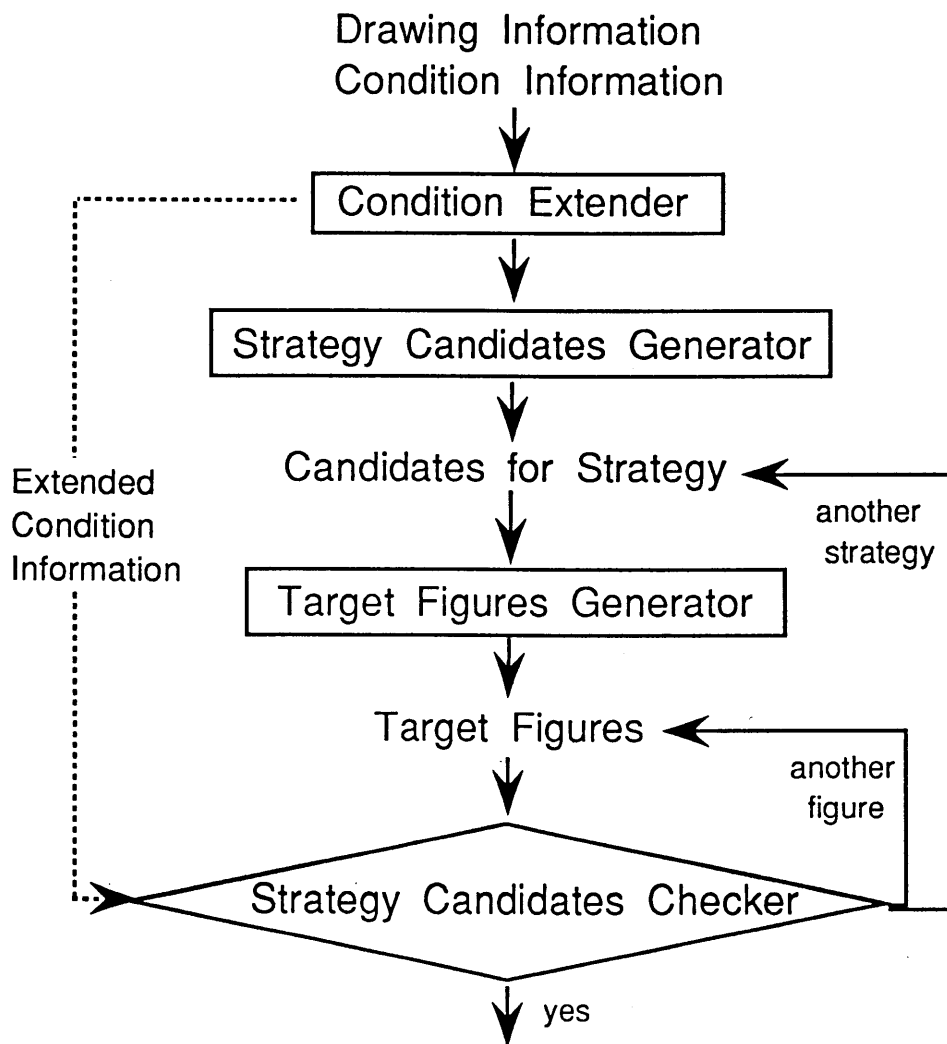


図 3 - 6 解法選択過程の処理の流れ

didates Generator) 」と、「注目図形生成部 (Target Figure Generator) 」と、「解法吟味部 (Strategy Candidates Checker) 」の四つの段階に分けられる。

この過程では、作図された図的表現を認識して利用する段階が多く含まれている。本研究では、人間の行っている図形の認識を、実際の図形に対応する座標値を計算して調べる方法でコンピュータ上にインプリメントしている。

条件拡張部

この段階では条件情報 (CI) と図的表現 (Col, Ell, Sel) から容易に導かれる条件 (例えば、「対頂角は等しい」とか「二等辺三角形の二つの底角は等しい」など) を求める。図的表現に基づいてプロダクションルールにマッチした位置関係にある角や線分を探し、それらについて成立する条件を追加する。本研究では、「対頂角は等しい」、「二等辺三角形の二つの底角は等しい」の二つのルールを記述したにすぎないが、「平行線間に出来る錯角は等しい」とか「同一円の半径はすべて等しい」などの関係も簡単に追加できる。

このような条件拡張を行なうことによって、問題文に陽には現われない条件を拡張することができ、解法の選択や吟味に利用できる。




解法候補生成部

この段階は、証明情報を手がかりにして、図的表現によって証明すべき要素の位置関係を調べ、その位置関係に基づいてプロダクションルールの形式で記述されたトップダウンの解法候補を得る。

ここでは、表 3 - 2 のような「線分の相等」を証明する場合のプ

表 3 - 2 「2 辺の長さが等しい」の証明における

2 辺の位置関係とそれに対する解法候補

RULE	CANDIDATES FOR STRATEGY
Rule1 	1) isosceles triangle 2) two radii of a circle 3) congruence of triangle
Rule2 	1) similar figures 2) theorem of the middle point connection 3) congruence of triangle
Rule3 	1) the opposite side of a parallelogram 2) congruence of triangle
Rule4 others	congruence of triangle

ロダクショナルルールを紹介するが、ほかの証明についても同様の形式で記述されている。表で示すように、証明すべき図形の位置関係に対応して、解法の候補が可能性の高い順にリスト形式で記述されている。したがって、証明すべき図形の位置関係を座標情報 (Co1) から座標値計算により調べ、マッチした位置関係に対応する解法候補 (複数ある場合が多い) を解法候補リストとして得る。表 3 - 2 で説明すると、証明したい二つの線分を座標情報から計算することによって、表の左の四つのどの位置関係にあるかを調べ、例えば平行の関係にあることが分かると、「平行四辺形の対辺」、「三角形の合同」の二つの解法を含んだ解法候補リストが生成される。ここで、証明したい内容の要素について「図的情報」中の座標情報を計算することによって、文中には陽には現われない位置関係が得られ、そのあたりをつけて解法の選択に利用することができる。

また、解法候補リストの順位は、実際は被験者の習熟度や個人差に応じて変化するものであると考えられるが、本研究では、ヒューリスティックに決定した。

注目図形生成部

この段階は、解法候補生成部で得られた解法候補リストの先頭（優先順位の高い順）をキー情報として、そのキー情報に結びついた注目図形候補を生成する。例えば、「二辺が等しい」ことを証明する際に、キー情報として「三角形の合同」が選ばれた場合は、証明すべき二辺を各々含んだ二つの合同そうな三角形をすべて選び（座標情報をもとに、Prologの関数で線分の長さを調べて合同の関係にある三角形のペアを選び出す）それらを注目図形候補リストとして生成して、次の「解法吟味部」に渡す。

解法吟味部

この段階では、選ばれた解法候補と注目図形を基にして、条件拡張部で作成した拡張条件情報から証明すべき内容が導けるのかという吟味が行われ、証明を導くことが出来ることが確認されれば、吟味終了となり解法と注目図形が出力される。しかし、証明が確認されない場合は、図3-6のようにバックトラックが起これば注目図形リストの次の候補が選ばれ、もう一度、解法吟味部で証明可能性を吟味する。この操作を繰り返して注目図形の候補のいずれによっても証明できないことが分かると、さらにバックトラックが起これば解法候補リストの次の解法候補が選ばれ、その解法候補に対応する新たな注目図形候補が選ばれる。このような操作を繰り返して、証明可能な解法と注目図形を探索していく。

3. 3. 5 シミュレーション

ここでは、これまで述べてきた認知モデルの論理的整合性を検証し、作図過程を含んだ問題解決のコンピュータモデルの動作を示すために、一つの問題例に対するDIPSの実行例を紹介する。

認知モデルは、言語として Prologを用い、作図は、使用ソフト Prolog-KABA に組み込まれているグラフィック関数を用いて行なった。図3-7(a)は、問題例とその入力例で、図3-7(b)は、コンピュータ上でシミュレートした出力例である。

初期作図過程では図中の①のような逐語的手順で、文的表現を②～④で表わされる図的表現に変換して、具体的な作図の一例として⑤を出力する。次の解法選択過程(⑥以下)で、 $AM = CN$ を証明すべき線分AM、CNの位置関係が平行である($AM // CN$)ことが図的表現の一つである座標情報(CoI)を用いた計算によって予想される。(この内容は、問題の文的表現中に陽に含まれない内容であるが、このモデルを用いることによって新しく得られた関係情報である。)したがって、この関係を利用して⑥のような解法候補リスト(「平行四辺形の対辺」、「三角形の合同」)を生成する。次に、そのリストの先頭要素⑦(AMCNが平行四辺形でAM、CNはその対辺)をもとにして注目図形を探索して、⑧の注目図形候補リスト(この場合、リストの要素は「四角形AMCN」の一つだけ)を出力する。そして、解法候補と注目図形(四角形AMCN)を拡張条件情報から吟味する。このように図的表現を利用して注目図形を設定することによって、AMCNが平行四辺形であるための条件を調べれば良いことが分かる。この場合、 $AM = CN$ であることを証明するので、平行四辺形であることの証明から、 $AN = CM$

<problem>

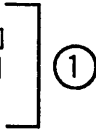
There is a parallelogram ABCD. Middle points of BC,DA are each M,N.
Link A to M and C to N. Prove AM = CN.

<input form>

DI: [[[parallelogram,[a,b,c,d]],nothing,[]],
[[point,[m]],middle_point,[segment,[b,c]]],
[[point,[n]],middle_point,[segment,[d,a]]],
[[segment,[a,m]],nothing,[]],
[[segment,[c,n]],nothing,[]]].
CI: [].
PI: [equal_length,[[segment,[a,m]],segment,[c,n]]].

(a) Problem and input form

Draw parallelogram [A,B,C,D]
Draw middle point [M] of segment [B,C]
Draw middle point [N] of segment [D,A]
Draw segment [A,M]
Draw segment [C,N]



Output all point information
[point,[x,y]] -> [A,[100,200]]
[point,[x,y]] -> [B,[80,100]]
[point,[x,y]] -> [C,[200,100]]
[point,[x,y]] -> [D,[220,200]]
[point,[x,y]] -> [M,[140,100]]
[point,[x,y]] -> [N,[160,200]]



↑ all point information
Output all element information
parallelogram [A,B,C,D]
[point,[M]],middle_point,[segment,[B,C]]
[point,[N]],middle_point,[segment,[D,A]]
segment [A,M]
segment [C,N]



↑ all element information
Output all segment information
segment [A,B] -> [[100,200],[80,100]]
segment [C,D] -> [[200,100],[220,200]]
segment [B,M] -> [[80,100],[140,100]]
segment [M,C] -> [[140,100],[200,100]]
segment [B,C] -> [[80,100],[200,100]]
segment [D,N] -> [[220,200],[160,200]]
segment [N,A] -> [[160,200],[100,200]]
segment [D,A] -> [[220,200],[100,200]]
segment [A,M] -> [[100,200],[140,100]]
segment [C,N] -> [[200,100],[160,200]]



↑ all segment information
---Strategy Selecting Process---

Parallel [A,M] and [C,N]
→ Strategies

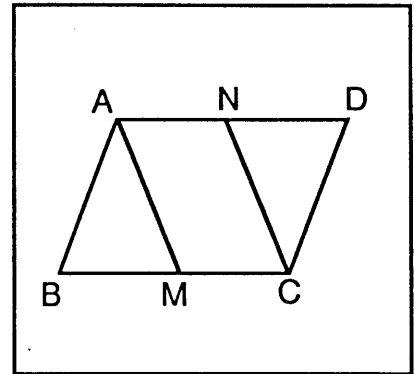
[the opposite side of a parallelogram],[[A,M],[C,N]]
[congruence of triangle],[[A,M],[C,N]]



Find target figures from [the opposite side of a parallelogram],[[A,M],[C,N]]
[[A,M,C,N]]



Attend the figure -> [A,M,C,N]



(b) Simulation

図 3 - 7 シミュレーション結果

かつ $AN // CM$ 、または、 $AM // CN$ かつ $AN // CN$ の高々 2 つを調べれば良いことが分かる。ここでは、拡張条件情報が現れないが、「 $ABCD$ が平行四辺形である」から「 $AB // CD$ 、 $AB = CD$ 」が得られ、さらに「 M は BC の中点、 N は DA の中点」から「 $AN = DN = BM = CM$ 、 $AN // CM$ 」の条件が拡張されているので、前者の条件（ $AN = CM$ かつ $AN // CM$ ）は容易に得られる。そして、⑨のような出力が得られて終了する。

3. 3. 6 心理実験との比較

シミュレーションの結果からも明らかなように、問題の一文一文に対応させて作図規則を適用していく手法を用いることによって、人間の行なうような、文的表現に対する図的表現の一例の生成を再現できた。そして、このシミュレーションを通して認知モデルの論理的整合性が確かめられた。

人間の行う図の認識を、モデルでは図的表現を座標情報のように数値的に表現し、座標表現により実現した。その結果、問題文中に陽には含まれていない位置的な関係の情報を積極的に利用することができ、解法の探索に役立てることができた。

また、解法選択過程においては、解法候補を先に設定して注目する図形を選ぶ方法を用いた。この方法を用いて、図的表現に対して解法というバイアスのかかった意図的な観察をすることにより、焦点を絞った図形解釈をすることができた。すなわち、意図的な観察が図の解釈には深く関わっていて、我々人間の行なう効率の良い探索は、図から受動的に情報を得ると言うよりは、能動的な視点を持って図を観察する事によって得られることがこのモデルによってシ

ミュレートされた。これによって、人間の行なうような図形や視覚の解釈を、ボトムアップによる解釈だけでなくこのようなトップダウンによる解釈といった形で実現できた。

心理実験の結果では、被験者特有の枠で図形を観察しているように思われる。すなわち、「まず最初に目がいく注目図形」といったパターンを持っていて、そういった枠を持って図形を観察しているように思われる。被験者間の個人差や習熟度による差もこの枠の違いにあるように思われる。中学生などが習ったばかりの幾何の問題を解くときに、作図することの重要性が理解されないのは、作図された図からどの様に有効に情報を得れば良いのかが分からないからではなかろうか。我々が図を描いて問題を解く際には、作図された図から得られるであろう情報を期待していると考えられる。この期待があるからこそ、図形の解釈が能動的に行えて、解決に有効な情報を焦点を絞って得ることができるのではなかろうか。本研究では、この過程をトップダウンの図形解釈の過程として、一連の「作図」「図形解釈」「解法を選択」という形でモデル上に実現することができた。

モデル全体の流れを考えると、問題文の文的な情報が初期作図過程を通して、座標情報のような図的表現に変化して、解法選択過程ではこれらの情報を基にキー情報を導いて、さらにこのキー情報を基に解釈図形としての注目図形を生成した。これは、3. 2. 4節の(6)の心理実験の考察「問題解決の過程を情報変化の過程と捉えること」とも一致している。

3. 4 考察

本章では、作図の生成を逐語的な作図過程について扱い、すべての作図をこの作図過程だけで表現しようとしたが、問題解決の過程では、図中への描き込みや、描き直しなど多彩な図の利用も見られた。作図が問題解決に果たしている役割を考えると、このような様々な作図を詳細に調べ、問題解決とどのように結びついているのかを調べる必要があると考える。作図をさらに分類し、問題解決過程と結びつける研究は、次の4章で詳細に調べたので、そこで詳しく述べる。

また、本章では、被験者の学習や個人差については特に注目しなかった。心理実験の段階では、実験の前提として、被験者はExpertであるという前提のもとでデータを収集した。将来的には、作図処理過程を含む認知モデルを内蔵することによって、人間の状況を理解し、その状況に応じた円滑な対処をするヒューマンインタフェースの実現を考えているので、学習と認知モデルの変化についてより詳しく調べる必要があると考える。最近の研究で、被験者の問題に対する習熟度によって、作図やその作図の利用の過程が変化し、さらには作図に基づいた推論の過程が変化していくということを指摘した研究もある⁽⁴⁵⁾。このような学習過程に対する作図過程の変化についても調べる必要があると思われる。この点については、本論文の5章で、実際の中学生の学習過程を調べる心理実験を通して考察しているので、そこで述べることにする。

3. 5 あとがき

本研究では、心理実験を通して作図過程を含んだ人間の行なう問題解決過程を観察して、特に、問題文中に陽には含まれない情報を獲得する過程に注目して、認知モデルを構築した。

認知モデルとしては、シミュレータとしての視点で構築したので、人間の思考の内部でどのようなことが起こっているのかを示す、内部モデル (Internal Model) としての色あいは出せなかった。しかし、実際にモデルを作ってみることで、上記の考察のように、研究の問題点を指摘できて、研究の方向性を示せたという点では有意義であった。これは、認知モデルを作って考察する意義でもある⁽²⁷⁾。

また、具体的な座標値を割り当てる方法を用いることによって、その座標値から問題文中に含まれない情報を得て問題解決を導く解法の探索に利用することが示せた。このような作図の生成部と解釈部を切り放して考える方法を提案することによって、図生成用、解釈用の関数をPrologのプログラムとして継ぎ足すだけで、より複雑な処理もできる可能性があることが示唆された。

4 章 作図の分類と 問題解決スクリプト

4. 作図の分類と問題解決スクリプト

4. 1 まえがき

本章では、3章で紹介した認知モデル(DIPS)で明確にされていなかった部分を補って、より人間の作図行動を正確に説明するために作図行動を細分化して働きを詳細に調べていく。

DIPSでは、作図生成過程を、逐語的な行動であると捉え、すべての作図をこの逐語的な作図過程で説明しようとした。しかし、さらに細かく作図行動を観察すると、一度作成した図に必要な情報を描き込んだり、内容に応じて必要な図を描き直したりするような作図も見られる。これらの作図は、逐語的な作図過程とは目的も、得られる情報も違うのではないかと考えられる。

従来の研究では、人間の一連の図生成行動として捉えていた作図行動を、本章では、そのパフォーマンスの違いによって細かく分類し、その生成意図を探ることで、作図行動のメカニズムに迫ろうと試みた。さらに、作図の生成意図を作り出している行動の規範を「問題解決スクリプト」という概念を用いて説明する。

まず、作図を役割という観点から以下の3つに分類してみた。

(1) 内部記憶の外化 (以下、作図の「保持性」)

図形などの視覚的情報は、人間の短期記憶の容量では全ての情報をイメージとして完全に構成しきれないし、次の問題解決の過程に入った時にその視覚的情報を保持しておくことが困難である。した

がって、情報を外化して、記憶の負担を軽くするために、作図を行なっていると考えられる。このことは、安西もその著作の中で指摘している⁽⁸⁷⁾。

(2) 操作性の良さ (以下、作図の「操作性」)

式や文章などの文的表現を用いた推論では、順序立てて論理を組み立てなければならないことでも、作図図形すなわち図的表現上では、注目点を移動したり、補助線や描き込みなどによる簡単な図形の拡張を行なうことによって容易に推論できる場合がある。このことは、Simon らもその論文の中で指摘している⁽⁴³⁾。

(3) 隠れた情報の獲得 (以下、作図の「全体性」)

作図図形のような図的表現では、角度、線分長、平行性などの情報が空間的に関係づけられて表現されているので、文的表現だけでは容易に得られなかった副次的な情報(文的表現だけでは分かりにくい線分間の位置関係などの情報)が得られやすい。このことは、前章中で指摘し、認知モデル(DIPS)の中で実現した⁽⁸²⁾。

これら3つの利点は、お互いに密接に関係し合っていて、明確に区別されるものではないと考えるが、人間はこれらの利点を意識的にせよ無意識的にせよ状況に応じて使い分け、問題解決を行なっていることが推測される。しかし、具体的にどの様な場面でこれらの利点を必要とし、実際にどの様な作図を行なっているのかという点は明確にされていない。本章では、これら3つの作図利点を考慮に入れて、作図の分類と問題解決行動の規範を発話プロトコル実験をもとに調査し、考察した。

4. 2 D I P S の概要とその問題点

前章で行った研究で、筆者はD I P Sという認知モデルを提案してきた⁽⁵²⁾。このモデルでは、作図の解釈の過程をトップダウン的知識をもとにした行動であると捉えた。作図図形の解釈過程では、解法候補という知識を用いて注目図形を設定して解決に役立てる方法を提案した。一方、作図の生成過程では初期作図過程で逐語的な作図方法を提案した。

このモデルを問題情報の表現の変化過程という観点から捉えると、図4-1のように表すことができる。このように考えると問題文は、文的表現で表わされた一種の外部表現(External Representation)であると捉えることができる。このような外部表現が入力されると、外部表現を解釈して、問題解決システム内部にとって、理解し易い内部表現(Internal Representation)に変換する。ここで、内部表現だけですぐ解けてしまうような問題(例えば、暗算で解けるような計算問題)であれば、新たに外部表現を使うことなく、内部表現だけで解決し、そのまま答えを外部に示して終了する。しかし、本研究で扱うような幾何の証明問題などの問題では、理論を組み立てたり問題状況を確認するために、外部表現として作図や計算などを利用する。(4.1節で述べた作図の「保持性」「操作性」「全体性」を使うおうとする。)この外部表現からまた解釈が生じ、内部表現が変化する。このような流れを繰り返して、解決状態へと変化していくと考えられる。そして、この行動を制御するトップダウンの処理を行なっている部分があると考えてきた。これをここでは

制御部 (Controller) と呼ぶことにする。

図 4 - 1 のように考えると、従来の D I P S では、制御部の部分が曖昧であった。すなわち、人間の行動を「トップダウン知識を用いた行動である」としながら、具体的に問題解決のどの時点で、どのような目的を持ち、どのような作図行動と結びついているのかが明確にされていなかった。

したがって本研究では、人間の種々の作図行動を含んだ問題解決行動がどのように現われるかを、4. 3 節で提案する「作図の分類」と「問題解決スクリプト」で説明する。「問題解決スクリプト」は、図 4 - 1 の制御部に含まれていると考えられる。スクリプト中の各段階でトップダウン命令としての目的 (Intention) が形成される。そして、それに対応する作図を「作図の分類」で説明する。

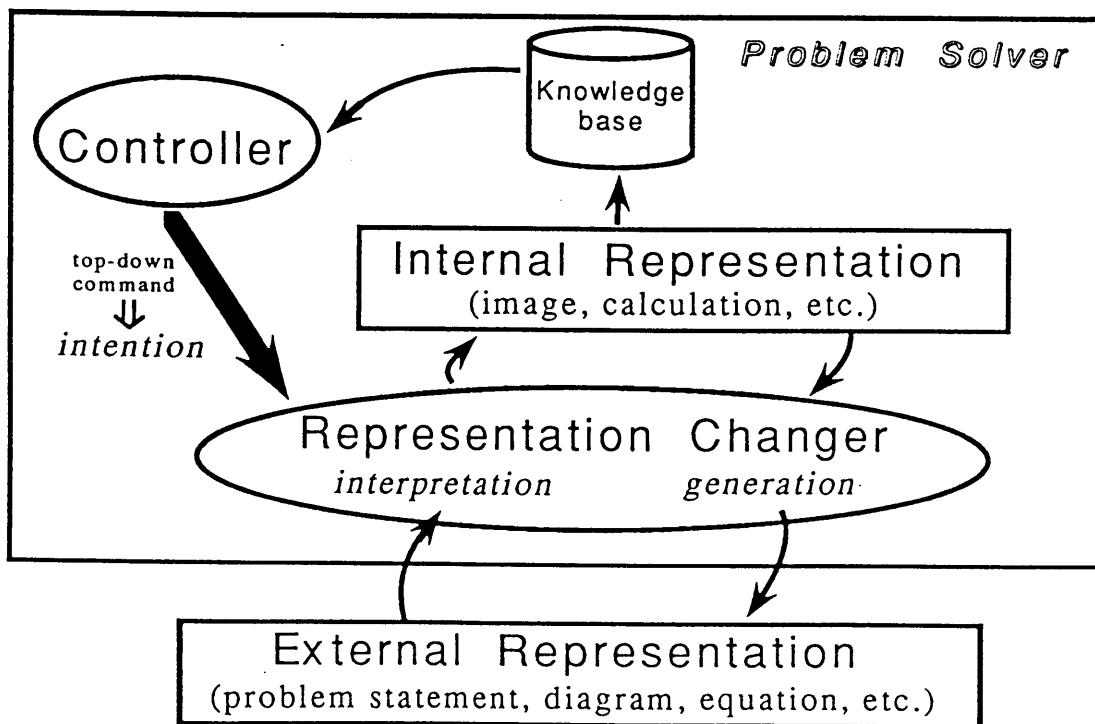


図 4 - 1 表現変換という観点から見た D I P S

4. 3 作図の分類と問題解決スクリプト

4. 3. 1 作図の分類

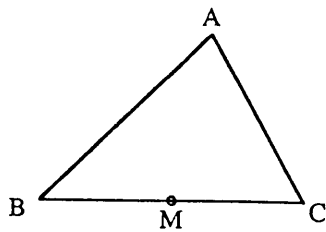
ここでは、これまでに行なってきた心理的研究を基に⁽⁵⁸⁾⁽⁵⁹⁾、作図の分類を試みた。従来の研究では、一般に、作図を一つの行動として捉える傾向があったが、問題解決過程の色々な段階で行われる作図には、違いがみられることは指摘してきた。しかし、実際に提案されてきた認知モデルでは、まだこれらの作図の明確な区別を行なってきたとは言い難い。作図には、いろいろな種類があり、それぞれの作図は、生成の目的も違えば、生成のされ方も当然違うと考えられる。問題解決過程で現われる作図行動の持つ意味を明確にして、それぞれの解決段階で現われる種々の作図行動を分類し整理することは、作図生成メカニズムを明らかにする上で重要であると考えられる。

そこで、ここでは、これまで行なってきた心理実験によって観察された作図を、8つに分類して仮説として提案することにする。これらの作図の典型例を、例題としてProblem(a)を挙げて説明した図が、図4-2である。

① 逐語的作図 (図4-2 ① Word-for-word drawing)

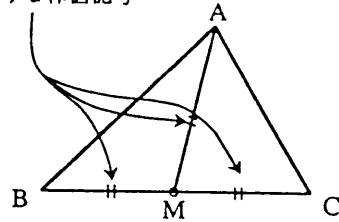
問題の文的表現を図的表現に単純に置き換えていく作図。一般に、問題解決の最初に現われる。(4.1節で挙げた作図の利点では「保持性」に当たる)

問題例 1：三角形ABCにおいて、辺BCの中点をMとする。ここで、 $AM=BM=CM$ ならば、この三角形は直角三角形であることを証明せよ。



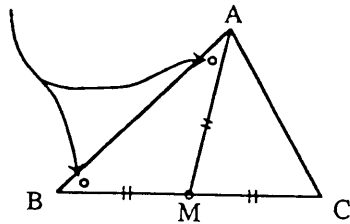
① 逐語的作図

このような作図記号



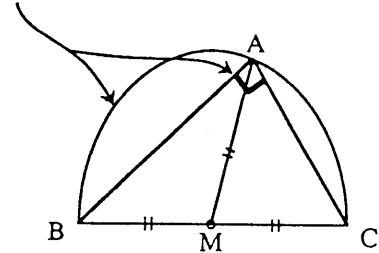
② 条件記入作図

このような作図記号

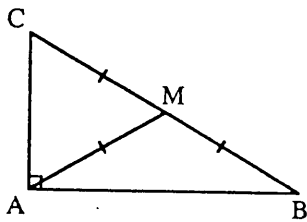


③ 条件拡張作図

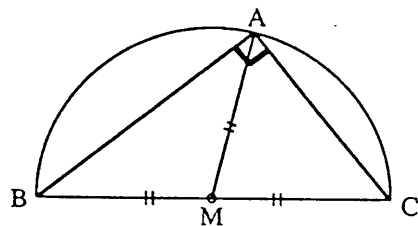
このような作図記号



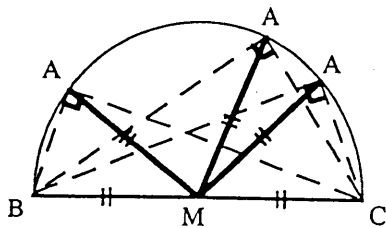
④ 推測的作図



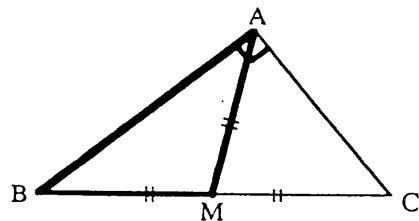
⑤ 状況考慮作図



⑥ 解法考慮作図



⑦ 実験的作図



⑧ 部分強調作図

図 4 - 2 「問題例 1」に対応する典型的な 8 つの作図例

②条件記入作図（図4-2② Condition drawing）

問題文中の条件を作図記号を用いて、①の作図上に描き込む作図。

①の作図の直後に引き続いて描かれる。（「保持性」）

③条件拡張作図（図4-2③ Extended condition drawing）

問題文中には現われない内容を、②の条件を論理的に拡張して描き込む作図。解法が見つからない場合や解法に則して解答を獲得する際に描かれる。②も③も図のような「直角記号や線分長は等しい」などの作図記号で描かれる場合が多い。（「操作性」）

④推測的作図（図4-2④ Inference drawing）

問題文中には現われない内容を、解法や終了条件からの後向き探索などによって予想し、作図記号などを用いて描き込む作図。解法によって導かれるであろう推測された内容を描き込む。③との違いは、③は論理的に導かれた内容であるのに対して、④はその時点では論理的に導かれた内容ではなく、予想から導かれた内容であるという点である。（「操作性」「全体性」）

⑤状況考慮作図（図4-2⑤ Drawing in view of situation）

⑤の作図は、②～④のような描き込む作図ではなく、①と同様、問題文の内容をそのまま描くという作図である（次の⑥も同様）。しかし①と違うのは、注目したい部分を強調して優先的に問題文の順に関係なく描くという点である。①②の作図終了後、それによって分かった問題文中の関係を考慮に入れて描かれる。（「保持性」）

⑥解法考慮作図（図4-2⑥ Drawing in view of method）

解決の過程まで考慮に入れて、解決に必要な内容は省いて描かれる。この作図を行なうとき被験者は、すでに一通り問題を解決していて、その解決した内容を解答にする際に、文的な表現を補足し

て説明する目的でこの作図を描く。（「保持性」）

⑦ 実験的作図（図4-2 ⑦ Experimental drawing）

問題に関係する条件や定理を、確かめたり吟味したりするために、極端な例や典型的な例を図を用いて確かめる作図。（「操作性」）

⑧ 部分強調作図（図4-2 ⑧ Part focus drawing）

問題解決者が注目する部分を強制的に描き足したり、作図記号を描いたりする作図。問題解決のいろいろな段階で現われる。（「操作性」、「全体性」）

ここで問題となるのは、これらの8つの作図がどのような状況で現われ、問題解決の中でそれぞれどのような役割を果たしているのかという点である。

そこで、これを説明する方法として、「問題解決スクリプト」という概念を提案する。

4. 3. 2 問題解決スクリプト

これまで、幾何の問題解決に関する種々のプロトコル実験を行なってきた⁽⁶⁹⁾。その結果から「被験者の問題解決過程はかなりルーチン化された行動である」ということが明らかになってきた。ここでは、このルーチン化した問題解決行動を説明する概念として、「問題解決スクリプト」という概念を提案し、後の実験で検証する。

ここで言う「スクリプト」は、自然言語処理で用いられるスクリプトの概念に非常に近い意味で用いている⁽⁷⁰⁾⁽⁷¹⁾。人間の作図行動を含む問題解決の各段階でみられる行動を、この「問題解決スクリプト」の概念で説明する。さらに、この研究の主題である作図生

成のメカニズムをこの概念を基に考察する。

問題解決の過程を以前に行なった心理実験等の観察から次の5段階に分類する。

第一段階：問題理解の段階 (1st step)

この段階では、問題解決者は問題文の意図の理解を目的とする。

第二段階：解法探索の段階 (2nd step)

この段階では、問題解決者は持っている知識ベースの中から問題に対応する解法を探索することを目的とする。

第三段階：解法適用の段階 (3rd step)

この段階では、問題解決者は解法を利用できる形に構成して適用することを目的とする。

第四段階：解法吟味の段階 (4th step)

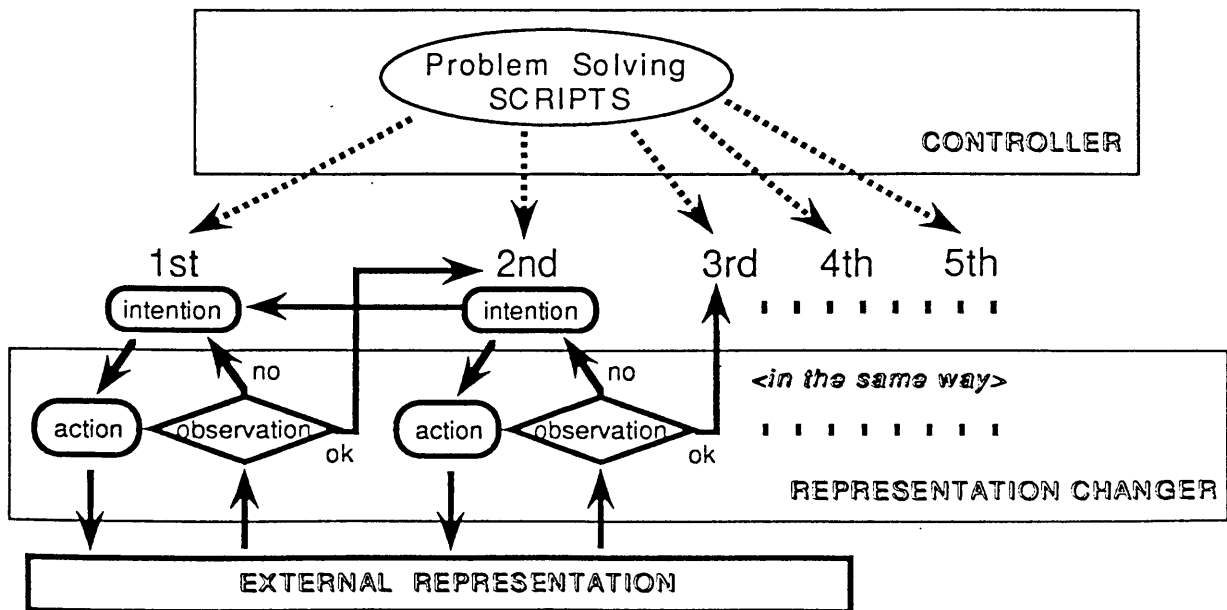
この段階では、選択した解法によって得られた解答が、問題の意図と合うかどうかを吟味することを目的とする。

第五段階：答案作成の段階 (5th step)

この段階では、第四段階までで得られた解法に沿って答案の作成が行なわれる。解答の作成がその目的となる。

「問題解決スクリプト」は、以上の5段階から構成され、問題解決過程でこの順序で現われ、人間の行動を制御していると考えられる。問題解決の各段階では、それぞれ目的 (intention) が存在し、その目的を充足すべく種々の行動 (action) が生成されるものとする。図4-3で説明すれば、各段階の目的が観察により充足されれば、次の問題解決の段階に進み、充足されなければ、バックトラックして前段階にさかのぼり別の行動をとる。第五段階まで充足されれば、

問題は解決され問題解決過程は終了する。



1st -5th : Each step of Problem Solving SCRIPT

図 4 - 3 問題解決過程スクリプトの解決アルゴリズム

4. 4 心理実験

4. 4. 1 目的

本実験は、4. 3節で提案した「作図の分類」と「問題解決スクリプト」の仮説を考察する手がかりを得るために行なった発話プロトコル実験である。ここでは、この仮説をより詳しく検証するための実験を計画した。この実験では、「作図の分類」や「問題解決スクリプト」が、幾何の問題のみに現われるものかどうかを調べるために、数学の文章題や物理の力学の問題をおりませず被験者に問題を解かせた。

したがって、本実験の目的としては二つ挙げられる。一つは、被験者に色々な問題を解かせて、4. 3節で説明した「問題解決スクリプト」のような問題解決の過程がみられるのかを観察することである。もう一つの目的は、「作図の分類」によって分けた8つ作図が問題解決のどの段階で起こり、どの様に解決過程に役立てられているのかを観察することである。これらの目的を検証するために、以下のような実験を計画した。

4. 4. 2 方法

本実験は、一般に認知科学の分野で用いられる発話プロトコル実験に則って行なった。すなわち、被験者に問題を与え、被験者が問題を解く際に考えている内容をすべて発話させ、その音声を記録して分析し考察する方法である。本研究では、被験者の作図行動も記録するためにビデオを用い被験者の行動も記録した。

被験者は、本大学の工学部4年生で計5名である。問題は、中学校レベルの幾何の問題を4、5問と、作図を必要とするであろう代数と物理の問題を2、3問の(一人当たり)計6問または7問とした(Appendix-4.A参照)。また、この問題に対する具体的発話の一例は、Appendix-4.Bに示した。

問題を解くにあたって、被験者に対して、前もってこれらに類似の問題を与えて解かせたり、実験に関する予備知識を与えるようなことはしなかった。

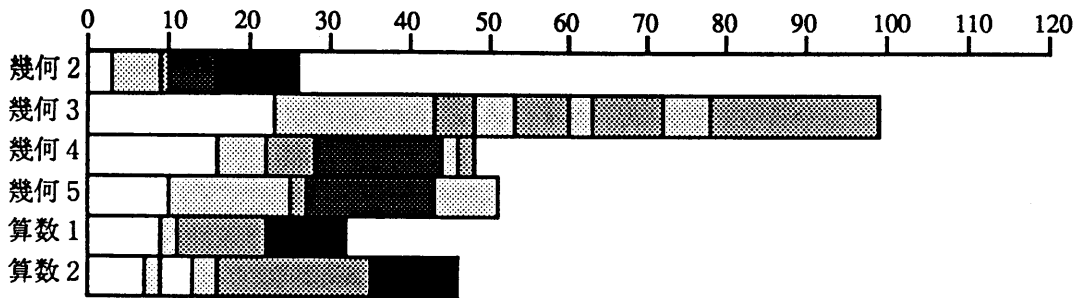
4. 4. 3 結果と考察

実際に取った発話データの中から、典型的で、特に発話のはっきりした被験者を2名例に挙げ、議論することにする。この2名の被験者のうち、被験者1は、解決に手間取った典型的被験者の例で、被験者2は、すらすらと問題を解決した典型的な被験者の例になっている。

図4-4は、これら二人の問題解決の過程を、4.3.2で述べた「問題解決スクリプト」により内容を分類して、図にしたものである。横軸は、発話内容を文節で切って番号付けした発話番号で、Appendix-4.Bの発話番号に対応している。縦軸は、問題番号に対応する。

表4-1は、問題解決の各過程において、4.3.1で予想した8つの作図がどの様に現われているのかを、表にしたものである。横軸は、5つの問題解決の段階で、縦軸は、8つの作図である。また、表中の数字は、被験者に与えられた全ての問題に対して、各段階で生成された各作図の出現回数を示している。たとえば、被験者

被験者 1



被験者 2

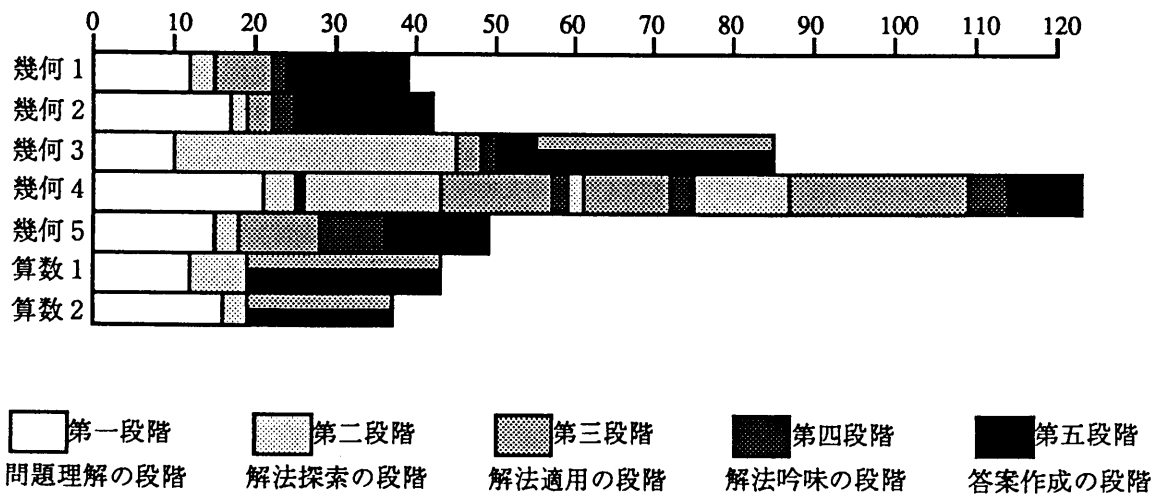


図 4 - 4 発話データの分析

表 4 - 1 解決段階に対する作図種類

被験者 1

	第一段階	第二段階	第三段階	第四段階	第五段階
逐語的作図	6		2	1	
条件記入作図	11	2	1	2	
推測的作図		4	1	1	
部分強調作図		6	2		
条件拡張作図		2	3	2	
状況考慮作図	2	1	2	1	
解法考慮作図					1
実験的作図			2		

被験者 2

	第一段階	第二段階	第三段階	第四段階	第五段階
逐語的作図	8	1			1
条件記入作図	8	6	3		
推測的作図	1	8	2		
部分強調作図	1	7	4		
条件拡張作図		2	7	3	
状況考慮作図	1	1	2		
解法考慮作図					3
実験的作図		1			

1では第一段階で、逐語的作図を6問中6回生成したことを表している。表中の2重枠部分は、各解決段階において比較的多くみられた作図種類を強調した部分である。

この図4-4、表4-1の分析から、分かったことを以下にまとめ、考察する。

結果(1)：問題解決の過程は、おおむね仮説で述べた「問題解決スクリプト」に沿って進んでいることが観察された。

図4-4を見ると、被験者1の幾何3～5や、被験者2の幾何4では、解決段階の逆転がみられるが、これは、バックトラックが起きているところと考えられ、進行した段階がうまく処理できない原因を、それ以前の段階にさかのぼり探索しているところと考えられる。

また、被験者2の算数の問題と幾何の問題3では、第三段階と第五段階が並列的に現われる現象がみられる。この部分は、算数の問題が簡単すぎたために、解法が見つかると同時に（吟味も行わずに）すぐ、解法の適用を行いながら解答作成の段階に移行している部分である。これは、おそらく被験者にとっては、十分に解決過程を知りつくしているような問題であったために、その解法で解決に至ることがあらかじめ分かっただけで、いきなり解答に移行したものと考えられる。同様の現象を、Andersonらは、その論文の中で、step-skippingと呼んでいる⁽⁶²⁾。彼らは、エキスパートでは、知識の集約や要約されたプラン（abstract planning）の獲得が進んでいて、それらの知識が手続き的処理を可能にして、step-skippingのような行動が生じると説明している。（ここで言う要約されたプラ

ンとは、解決過程で用いられる段階的な一連のプランを、よく使うプランとして一まとめにしたプランのことを言う。)

したがって、「問題解決スクリプト」も、常に第一段階から第五段階に順々に進んでいくものではなく、解決の過程や学習によって、進行が変化すると考えられる。この点については、5章で議論する。

結果(2)：8つに分類した作図は、問題解決の段階に対応して出現頻度に変化する。この傾向は、問題間に差はほとんど見られなかった。すなわち、幾何の問題でも、物理の問題でも、算数の問題でも、同様の傾向が観察された。

表4-1をみれば分かるように、問題解決の段階に応じて作図の利用が変化している様子がみられる。特に被験者2では、その利用の分布が顕著になっていて、第一段階では、逐語的作図、条件記述作図、第二段階では、条件記述作図、推測的作図、部分強調作図、第三段階では、部分強調作図、条件拡張作図、第四段階では、条件拡張作図、第五段階では、解法考慮作図がそれぞれ多くみられた。

ここに挙げなかったほかの被験者も、被験者1または、被験者2のどちらかのタイプに属していた。そして、同様に上記の結果(1)(2)の傾向が確認された。ただ、被験者2のタイプでは、結果(1)にも示したように、5段階の一部が並列的に行なわれたり、第四段階の「解法の吟味」をとばしたりする行動がみられた。

4. 4. 4 問題解決スクリプトと作図

被験者2の結果をもとに作図行動を含んだ問題解決の行動過程を、表わすと図4-5のように表わされる。これは、「問題解決スクリ

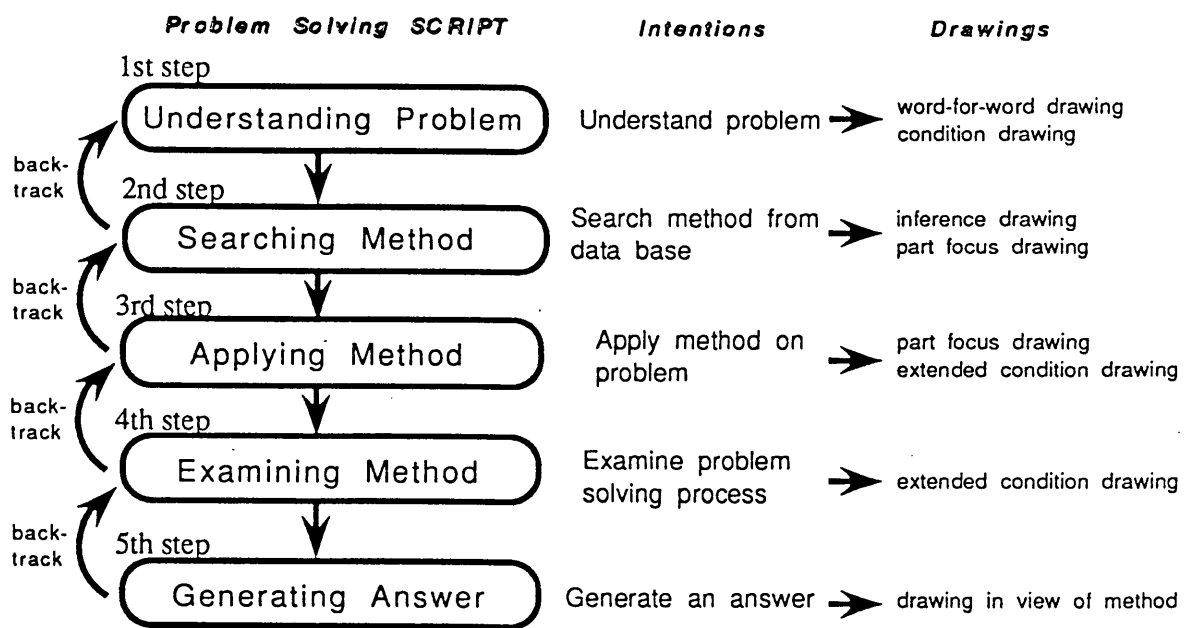


図 4 - 5 問題解決スクリプトと対応する作図

プト」と「作図の分類」とを、行動の目的（Intentions）で結びつけて表わした図である。問題が入力されるとスクリプトの過程にしたがって、問題解決行動が進んでいく。

まず、第一段階の「問題理解の段階」では、問題文を読んでその内容を理解しようとする。このとき、幾何の問題のような幾何学的表現の情報を必要とする場合、我々はしばしば作図行動をとって図的表現を得ようとする。この行為が逐語的作図や条件記入作図のような、問題文の内容を逐語的に図的表現に変換するといった作図行為として具現化すると考えられる。

次の「解法探索の段階」では、その問題の解決に適した解法の探索が起こり、適当な解法を見つけるために必要な情報を整理して構成しようとする。作図された図形上では、その中の特に解決に関係ありそうな部分に注目して、推測を行ない解法を見つけようとする。この行為が推測的作図や部分強調作図として現れるものと考えられる。

さらに、次の「解法適用の段階」では、前段階で見つけた解法を適用して解決の過程を生成しようとする。図形上では、解法の適用に関係の深い図形部分を注目して、解法にしたがって条件を拡張していく。この行為が、部分強調作図や条件拡張作図という形で現われるものと考えられる。

次の「解法吟味の段階」では、解法の適用がうまくいったかを吟味して、解決に至った過程をチェックしようとする。図形上では、前段階で辿ってきた解決への道筋を確かめて、適用に誤りがないことを調べていく。この行為が、条件拡張作図を始め多くの作図の生成を促していると考えられる。

最後の「答案作成の段階」では、解決に至った問題解決過程をもとに、その過程をまとめて分かりやすい答案を作成しようとする。この段階の作図では、新たに作図を答案上に描き直し、解決の過程で必要のなかった余分な線を省いて、解決の過程を分かりやすくする作図を行なおうとする。この行為が、解法考慮作図という形で実行されると考えられる。

このように、解決の過程でなされる作図は、「問題解決スクリプト」にしたがって順々に現われ、それぞれの段階の「目的」を満たす行動と捉えることが出来よう。そして、「目的」が満たされないとき、前段階へのバックトラックが生じる。

一方、被験者1に関しては、被験者2ほどはっきりした傾向はみられないが、概ね被験者2の結果と一致する。被験者1の結果がはっきりしない理由としては、図4-4でも分かるように、解決に至った問題数が3問だけであったため、第四段階、第五段階の作図データが少なかったことが挙げられる。逆に考えれば、この被験者は明確な問題解決のプランを持っていなかったため、どの様な行動（ここでは、作図行動）をとってよいのかが分からず、その結果、はっきりした行動パターンが現われず、しかも解答率が低くなったとも考えられる。

4. 5 考察

ここでは、作図の生成、利用過程を説明するために提案した「問題解決スクリプト」と「作図の分類」の問題点と意義について述べる。

これまで行なってきた心理実験をもとに作った仮説を、比較的似通った実験で検証した形になっていて、そういった観点からは、妥当性が示せたと言えよう。

(A) 「問題解決スクリプト」の段階について

心理実験の結果(1)でも触れたように、5段階のスクリプトは絶対的なものとは言い切れない。解決過程では、この5つの段階が並列的に現われたり、段階が飛ばされたり(今回の実験では、第四段階が飛ばされる場合しか観察されなかったが)する場合がみられた。しかし、被験者間の違いはかなり大きく見られたが、同一被験者内の問題間の違いはあまり強く見られなかった。これは、「問題解決スクリプト」が「レストラン・スクリプト」のように社会的制約のもとで普遍化したタイプのスクリプトではなく、個人的な信念や癖のような性質のものであることを示している。「問題解決スクリプト」は、個人が独自に形成し獲得したものであろうと予想される。とは言え、並列的な段階、あるいはスキップされる段階があるにせよ、(画一的な学校教育の影響もあろうが)ほとんどの被験者でこの5つの段階に相当する段階が観察されたので、妥当な段階分けであると考えている。

(B) 作図の分類に関して

本章で行った作図の分類は、幾何の問題と他のいくつかの問題の解決過程をもとに行ったものである。行動の観察だけから、これらの分類は可能であり、実際に明確に分類できた（表4-1参照）。他の問題においても、人間の作図や描画の行動について同様の分類が当てはまると考えている。さらに、幅広い問題について調査する必要はあるが、今後の作図行動の研究を行う上で、規範となる分類であると考えている。

(C) 問題と被験者の能力について

本章でおこなった実験では、被験者に対して提示した問題が、同様なレベルの問題であった。問題の難易度や被験者の学習の程度によって、当然、被験者のパフォーマンスにも変化が現われると考えられる。問題が容易になれば、段階の飛ばしや並列化がみられるようになるだろうし、作図も単純化するだろう。問題の難易度の変化や学習過程と作図過程を含んだ問題解決過程との関係を調べていく必要があると考えている。

(D) 学習と問題解決スクリプト

人間の行っている問題解決過程が、常にこのスクリプトに沿っているわけではないと考えるが、理系の大学生が初等幾何の問題を解くような場合の問題解決行動過程を説明する考えとしては有用な概念であると考えている。この考えを基にして、人間の様々な学習過程における「スクリプト」の変化を考察していけば、幅広い人間の行動

を説明することも可能であろうと思われる。これが実現すれば、学習を考慮にいたれた知的 C A I やヒューマンインターフェース研究の基礎研究として有効であろう。すなわち、人間は、学習の過程の中で徐々に「問題解決スクリプト」という概念を獲得し、「スクリプト」を改善しつつ、作図行動を変容させていくのではないかと考えている。問題解決のエキスパートになると、その問題を解決する適切な「問題解決スクリプト」を持つようになり、その流れに沿って行動して、必要な情報を適切に獲得し解決に到達すると考えられる。

4. 6 あとがき

本章では、作図過程を含んだ問題解決過程において、人間が行なう作図行動を制御する過程を説明する認知モデルの構築を目指してきた。まず、従来の研究などから、作図利用の利点を3つに分類（保持性・操作性・全体性）して示した。さらに、これまでに行なった心理実験をもとにして、「問題解決スクリプト」と「作図の分類」を仮説として設け、これを検証するため被験者を用いた発話プロトコル実験を行なった。

「問題解決スクリプト」という概念を示すことによって、従来のDIPSでは内部モデル（特に行動を制御している部分）が不明確であったという問題点に対して、一つの行動規範となる内部モデルを提供することができた。また、「問題解決スクリプト」と「作図の分類」を結びつけることによって、人間の行なう作図行動をパターン化された行動として捉えることが可能になった。

Appendix-4.A 被験者に与えた問題例

(幾何1) 二等辺三角形ABCで、2つの底角 $\angle B$ 、 $\angle C$ の二等分線が対辺AC、ABと交わる点をそれぞれD、Eとすれば、 $BD = CE$ であることを証明せよ。

(幾何2) 三角形ABCにおいて、辺BCの中点をMとする。ここで $AM = BM = CM$ ならば、三角形ABCは直角三角形であることを証明せよ。

(幾何3) 等脚台形ABCDの2つの対角線ACとBDが、底辺BCに等しく、かつ辺ABの2倍に等しいとき、Aより辺DCに平行に引いた直線は、辺BCを1:3に分けることを証明せよ。

(幾何4) Cを直角の頂点とする直角三角形ABCの辺BC上に1点Dをとる。次に、三角形ABCの外側に $\angle BAE = \angle CAD$ である直角三角形BAEを作り($\angle ABE = 90^\circ$)、EよりCBの延長に垂線EFをおろす。このとき、 $BF = CD$ であることを証明せよ。

(幾何5) 正方形ABCDの辺BC上に点Eをとり、 $\angle EAD$ の二等分線が辺CDと交わる点をFとすれば、 $AE = BE + DF$ であることを証明せよ。

(物理1) 水平面に対する傾角が θ の滑らかな斜面を質量Mの物体が距離k滑り落ちる。初速を v_0 とするととき、終速vを求めよ。

(算数1) 180kmはなれたA、B二つの町があります。今、A町から、ある速さでB町に向かって走り、A町から60km離れたC町に着いたところで30分休みました。そして、はじめの速さの $\frac{3}{4}$ で再びB町に向かって走ると、A町から出発してからB町に着くまでに6時間かかりました。

さて、はじめの速さで、A町からB町まで走り続ければ何時間で着きますか。

(算数2) 目盛りのついた容器に水が入っています。最初Aのコップに、容器の4割より0.2l少ない量の水を注ぎ、続いてBのコップに、容器に残った水の半分より0.1l多い水を注いだところ、容器には0.3lの水が残りました。容器に入っていた水の量は、何lですか。

Appendix-4.B 被験者の発話例(問題:幾何2)

発話例:被験者1

(幾何2)

1. あ、まあ図を描きまして、
2. $AM = BM =$ 、 AM と BM と CM の長さが等しいならば、
3. 三角形ABCは直角三角形であることを証明せよ。
4. えーと、どうだったかな。
5. えー、だから、えーと、だから、
6. これとこれとこれの長さが等しいってことは、つまり円の中であって、
7. で、BCっちゃうのはひとつの、えーともので
8. 中心からえー、こういうふうにはBCに、こういうふうにあって、
9. それで円のすべて
10. この中の点は円の中の点だっていうふうに考えられるから、
11. 本当にそれでいいのかなと思ってもう一回確かめてみると、
12. まあ実際確かにそういうふうになって、
13. そんで、中点は当然Mで、
14. それで、BCの中点で一つの辺で、
15. それでなんか名前は忘れたけど、
16. 円の中の点だからここは当然直角になると。

< 答案用紙へ >

発話例：被験者 2

(幾何 2)

1. 三角形 ABC において、辺 BC の中点を M とする。
2. 図を書きながら考えていきます。
3. まず三角形 ABC を、
4. えーと、直角三角形になるらしいので、
5. まあ、とりあえず、適当な三角形を描いて、
6. どの角が直角になりそうかっていうのをまず、あたりをつけましょう、
7. A 、 B 、 C 、
8. BC の中点を M とする、
9. AM イコール BM イコール CM 、
10. これは、えーと、
11. 条件が AM と BM と CM しかないので、
12. まあ、 AM と BC の角度は、
13. A はどう動いても、直角三角形になるだろうということ、
14. えーと、直角になるのは、 A だろうと、
15. B と C は、うんと、角度が変化してしまうので、
16. まあ、これが常に直角三角形になるということであれば、
17. まあ、直角になるのは A しかないだろう、と④
18. ということで、これは、円の、 BC を直径とみたときに、
19. A がその円周上をうごくときに直角三角形になる。
20. まあ、これは、三角形を分割するか、
21. 分割して、で、角度のたしあわせで数式にもっていくと、
22. まあ、内角の 180 度をうまく使えば、
23. 結局、 BAC は 90 度になるというのがでてくるのではないかというも、
24. 計算をしてみましょう、
25. とりあえず、それじゃ、それぞれの角をおいて式を立ててみましょう。
26. えーと、まず最初は、 ABM の方から、

(答案記入)

27. 三角形 ABM は二等辺三角形、
 28. それぞれの角について、条件の方程式をいっぱい作れば、
 29. えーと、いいでしょう。
 30. BAM イコール $\angle ABM$ 、
 31. まあ、 AMC についても同様にして、
 32. で、角等しいで、 MAC イコール MCA と、
 33. これだけでは、条件がまだ足りない、
 34. えーと、まあ、内角の和が 180 度というのと、
 35. 三角形 2 つの間の変数をつなぐのに、
 36. えーと、 AMB と AMC をたして 180 度というのを
 37. 使えば何とかなるでしょうか
 38. 三角形のない角の和は 180 度、
 39. おんなじようにして式は、3 つできます
- (以下省略)

5 章 作図と問題解決の学習過程

5. 作図と問題解決の学習過程

5. 1 まえがき

我々の日常生活を考えてみると、手続き的な情報を教えられて、その情報をもとに行動し、実際にうまくいったという”実感”を持てると、それによって課題が理解され学習が進むということがある。

例えば自動車の運転を考えると、自動車学校では学科教程⁽⁶³⁾で自動車に関する宣言的情報(“Know What” Information: 例えば、「変速機は、エンジンで発生した動力を、ギアのかみ合わせを変えて、車の速度や力を変えたり、後退させたりするものである」とか「クラッチは、エンジンの回転を変速機に伝えたり、切り放したりするものである」といったそのものの働きを説明するような情報)や、手続き的情報(“Know How” Information: 例えば、「長い坂道や急坂路を降りるときには、エンジンプレーキを使用する」とか「発進するときには、ギアをローに入れ、エンジンをふかしつつ徐々にクラッチをつないでいく」といった「～のときには…する」という情報)は教わるが、それだけでは実際に運転することはできないし、本当に理解したことにはならない。当然のことであるが、自動車学校では学科の他に実技があり、実際に運転して自動車の性質を”実感”する。この”実感”が人間の理解や学習に大きな役割を果たしていることは理解されよう。

このような学習の流れでは、初めて実技に臨むときには、上記の情報のうち特に手続き的情報をもとに行動することが多いだろうと考えられる。「意味はよく分からないが、とりあえず言われたとお

りにやったらできた」という実体験を通じて学習は進み、ブレーキやクラッチの役割や意味を、その後に理解していくという学習の過程である。

このように学習の際に手続き的情報を優先して、手続き的情報を基に学習が進んでいく過程を、本論文では「手続き的情報先行型学習」と呼ぶことにする。

従来の認知科学や人工知能の学習研究においては、AndersonらのACTにおける知識のコンパイル⁽³²⁾⁽³³⁾や、Newellらのチャンキング⁽⁶⁴⁾に代表されるように、学習における遂行効率の向上を、知識の一般化や手続きの最適化で説明しようとしている。すなわち、「宣言的知識」から「手続き的知識」を導き、さらにその手続きを効率の良くなるように洗練させるという、いわゆる「手続き化学習」の流れである。しかし、人間の学習を観察すると、何度繰り返しても必ずしも効率化や手続き化が進まないということはよくあるし、上述の例のように必ずしも宣言的知識の学習が先行しない場合も多い。また、学習が進むと処理が早くなるだけでなく、うまく説明できるようになったり、他の領域の問題まで関連づけたりできるようになってくる。こういったことは「手続き化学習」だけでは説明がつかない現象であると言える。

こういった現象を説明するために、本章では、実際の中学生の作図を含んだ幾何の問題解決過程を観察し、得られた心理データをもとに考察を行うことにした。

前章までの研究では、問題解決行動を制御するものとして「問題解決スクリプト」という概念を提案し、作図とはこのスクリプトによって生成される目的を充足するための手続き的行動であると捉え

てきた⁽⁶⁵⁾⁽⁶⁶⁾。手続き的知識が明示的に含まれる初等幾何の問題は、作図行動として具体的な行動が観察されるので、手続き的情報先行型学習を調べるのに適した問題であると考えられる。

作図行動を含んだ学習過程の心理学的、認知科学的研究は、非常に数が少なく、代表的なものとしては、安西らの研究が挙げられる⁽⁴⁴⁾⁽⁴⁵⁾。しかし、作図生成能力や問題解決能力を有していると思われる大学生や一般の大人に関する研究が多く、作図生成能力と問題解決能力自体の学習過程を調べる研究としては、問題があるように思われる。

本章では、まず、実際に中学生の被験者を用いて、幾何の証明問題を学習していく過程を追跡して発話プロトコル分析を行なった。そして、その心理データを基にして、作図利用過程の変化と問題解決能力の学習過程との関係を分析した。この結果から、この学習過程では、必ずしも宣言的知識が先行しない「手続き的情報先行型学習」であることが認められた。以下の章では、まず、用語の定義を行い、そして、「手続き的情報先行型学習」の流れと作図利用に関する認知過程の変化について考察していく。

5. 2 手続き的情報（知識）と宣言的情報（知識）

本章で用いる「手続き的情報（知識）」と「宣言的情報（知識）」の関係を図示したのが図5-1である。定義としては、以下の通りである。

手続き的情報（知識）…「～するには、～すればよい」というような Know how の情報（知識）。

宣言的情報（知識）…「～は～である」というような Know what の情報（知識）。

「情報」とは、言葉で表せるような事柄についての事実や方法であり、「知識」とは、これらの情報を実体験を通じて、“（自然に）使えるようになったもの”と捉え区別することにする。我々人間は、他の人などから教わったり、本を読んだりして知った「情報」を実際に使ったり、自分の持っている他の知識などと結びつけることによって、その情報が「知識」へと変化し、定着すると考える。

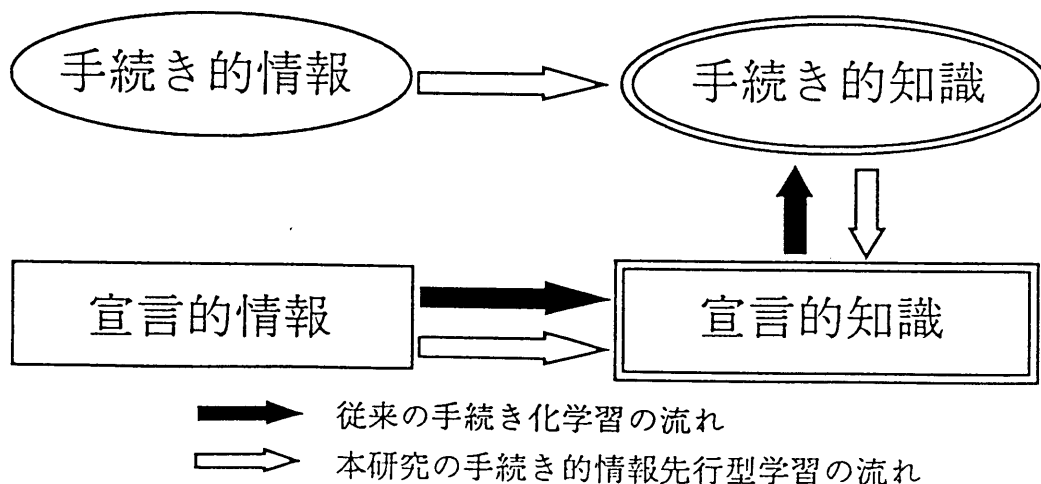


図5-1 手続き的情報（知識）と宣言的情報（知識）

この定義をもとに考えると、AndersonのACTは、宣言的情報をもとに宣言的知識、手続き的知識を形成していく、図5-1で言えば黒矢印の学習の流れであると考えられる。他の多くの効率化を求める学習研究もこの流れであると言える。本研究では、これとは逆に手続き的情報がもとになり、実際に解いてみる行動を通して、それが手続き的知識へと変化し、宣言的情報が手続きの中で意味あるものとして理解され、宣言的知識へと変化していく「手続き的情報先行型学習」の流れについて心理実験の結果に基づいて考察を行う。

5. 3 心理実験

5. 3. 1 目的

前章では、幾何の問題解決過程を例に挙げ、作図の生成過程を説明するため、「問題解決スクリプト」という概念を提案した。問題解決スクリプトは、人間の問題解決行動を5つの段階に分け（問題理解、解法探索、解法適用、解法吟味、答案作成の5段階）、行動とは、それぞれの段階が持っている「目的」を「充足」するためのものであるという行動制御概念である。そして、作図行動もこのスクリプトに基づいた行動の一部であると捉えた。

本実験では「問題解決スクリプト」のような行動の規範が学習によってどの様に獲得され、具体的な問題解決行動とどの様に結びついて学習されていくのかを、実際の中学生の作図行動の学習に注目しながら観察していくことを目的とする。

5. 3. 2 方法

本実験では、これまでの我々の研究で扱ってきた幾何の証明問題を例に挙げて、被験者の学習過程を調べた。被験者は、中学校2年生の男子生徒1名、期間は1992年11月10日より、1993年1月23日までの間に、予備実験2回、本実験3回の計5回、発話プロトコルにより発話データをとった。なお、予備実験は、発話プロトコル実験の「思考しながら発話する」方法に慣れてもらう目的で、幾何の問題以外の文章題を解かせたものであるため、ここでは報告しない。

- 1回目 (11/25)… 三角形の合同条件を学校で習い、関連する問題を数問、学校で解いたことがある状態。
- 2回目 (12/21)… 学校の授業の進行に合わせて、実験者の与えた問題集で三角形の合同に関する問題を、宿題として一通り解かせた状態。
- 3回目 (1/23)… 授業がさらに進み、直角三角形、平行四辺形などの証明問題も習って、同じ問題集の関連する問題を宿題として解かせた状態。

基本的に学校の進行状況に合わせて、無理なく学習が進むように計画した。上記の日に、Appendix-5.Aに示す問題を解いてもらい、そのときのプロトコルデータをビデオを用いて記録した。結果は、発話内容によって整理して、分析を行なった。

5. 3. 3 結果

<問題1> (Appendix-5.A参照) は、3回に共通して出題しているので、各回の特徴を比較するのに適していると考えられる。被験者は、<問題1>を2回目、3回目にも解いているが、どちらの場合も前の実験で解いたことがあることを明確には記憶していなかった。実験後に本人に尋ねたところ、「同じような問題をどこかで解いたことがある」という程度の記憶しかなかった。<問題1>に対する、1回目から3回目までの「発話と行動の系列(プロトコル)」、と「行なった作図」は、図5-2～図5-4の通りである。図5-4には、結果の説明上必要と思われる<問題7>の作図も載せた。

これらのデータを例に挙げて、各回に見られた問題解決過程の特徴的な性質を整理する。

～1回目～

<問題解決過程に関して>

<1-a> この回は、被験者は自力でこの問題が解けず、実験者が助け船を出した。(図5-2のプロトコル4-3.)

<1-b> (<1-a>のように完全には自力で解くことはできないが、方針としては) 習った通りの手順で問題を解こうとする。

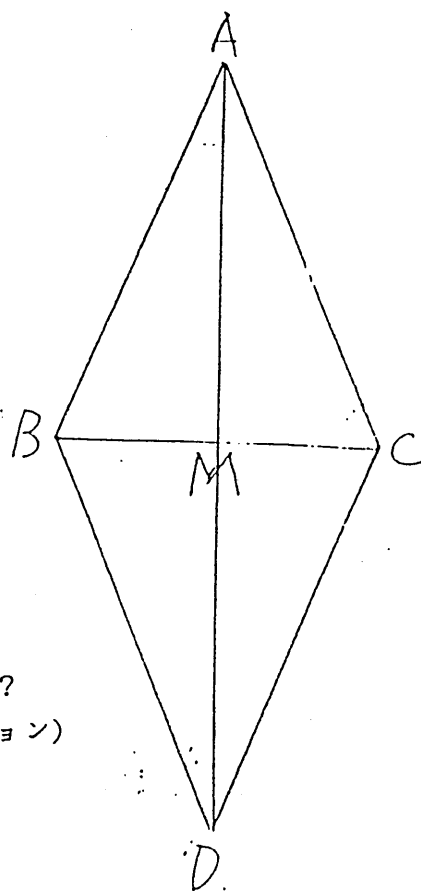
「1.問題文を読む→2.作図をする→3.(三角形の合同の証明に必要となる) 2つの仮定の探索→4.(証明段階に移行して) 3つ目の仮定を探索して、合同条件に照らして条件を3つ揃える→5.証明内容の記入」という覚えた通りの手続き的情報(手順)を、そのまま実行しようとする行動が、全ての問題に対して見られた。この手順

<実験結果>

問題1 : $\triangle ABC$ の辺BCの中点をMとし、AMを延長してその上に点Dをとり、
 $DM = AM$ とすれば、 $BD = CA$ であることを証明せよ。

～1回～

1. 問題文の読み
2. 問題内容の作図 (問題を読み終わらないうちから)
3. 仮定の探索
 - 3-1. 一つ目の仮定 ($DM = AM$) の発見
(作図の不適切な拡張、DCを結ぶ)
($\triangle ABC$ に注目)
 - 3-2. $\triangle ABC$ と $\triangle DBC$ の合同?
 - 3-3. $AB = AC$ から $\triangle ABC$ は二等辺三角形→棄却
(問題文に注目)
 - 3-4. 二つ目の仮定 ($BM = CM$) の発見
4. 証明の段階へ
 - 4-1. 問題文の読み返し
 - 4-2. 証明内容 ($BD = CA$) の意味把握
(問題文と描いた作図がなかなか対応しない)
 - 4-3. 証明内容 ($BD = CA$) は当たり前? ←二等辺三角形? ひし形?
(なにを証明してよいのか分からない状態、実験者のインストラクション)
 - 4-4. $\triangle ACM$ と $\triangle DBM$ の注目
 - 4-5. 三角形の合同条件の確認
 - 4-6. 仮定を集める (後ろ向き探索ではない)
 - 4-7. $\angle AMC = \angle DMB$ の発見
5. 証明内容の記入



▲発話内容

▲作図

図5-2 <問題1>に対する1回目の作図と発話内容の系列

「この通りにやらなければならない」と実験後、実験者に説明した。すなわち、被験者は、この手順を「丸暗記的に記憶」していて、意味は分からないが、手順通りになぞって解こうとした。このように、憶えた通りの手順に沿って問題を解こうとする解決手順を、以後「丸暗記手順」と呼ぶことにする。

<1-c> 問題の理解ができないうちから仮定だけを探す。

問題の意図を理解せずに、問題文の表面的な字面から、仮定を導こうとする。導いた仮定も、題意に沿ってない場合が多い。図5-2のプロトコル3-2., 3-3.のように、誤った推論から、 $AB = AC$ のような誤った仮定を導いたりする。この時点では、問題の意図を理解していないので、その後のプロトコル4-1.で、問題文を読み直して、次のプロトコル4-2.で問題の目標である($BD = CE$)をようやく把握している。

<1-d> 後向き探索ができない。

最終目標から、サブゴールを設定することができないので、知っている手順や、知っている知識を手あたり次第ランダムに適用していく。図5-2のプロトコル4-4.~4-7.では、三角形の合同条件から必要な条件を集めるのではなく、条件となりそうなものを集めて、組み合わせて合同条件と比較するという行動が観察された。

<作図の利用に関して>

<1-e> 不適切で無計画に作図していく。

図5-2の作図とプロトコルを見れば分かるように、三角形ABCを二等辺三角形で描いてしまったり、必要のない線DCを結んでしまうといった行動をとる。

<1-f> 図的意味と文的意味がなかなか結びつかない。

文字になってしまったプロトコルでは分かりにくいですが、ビデオに撮った行動を観察すると、問題文のような文的表現が作図によって表される図的表現上のどこに当たるのかが、なかなか対応がとれない。ひどい場合には、誤った対応をとってしまったたりすることがある。

<1-g> 作図記号が見られない。

<1-f>の結果とも関係があると思われるが、作図例を見ればわかるように、線分の相等や、角度の相等を表す作図記号が、全然見られない。この傾向は、この回の他の問題でも同様であった。

<1-h> 条件、定理、図中での推論が混乱している。

問題文中に含まれる条件や定理などで自明に導かれる内容のような「事実」と、図中から推測される「予想」との区別がつかない。図5-2のプロトコル3-3.のように、誤った作図から推測された $A = B = AC$ という予想を、問題文から言える仮定として扱おうとしている。

～ 2 回目～

<問題解決過程に関して>

<2-a> 1回目で用いようとしていた「丸暗記手順」に基づく解法が定着して自力で問題が解けるようになる。

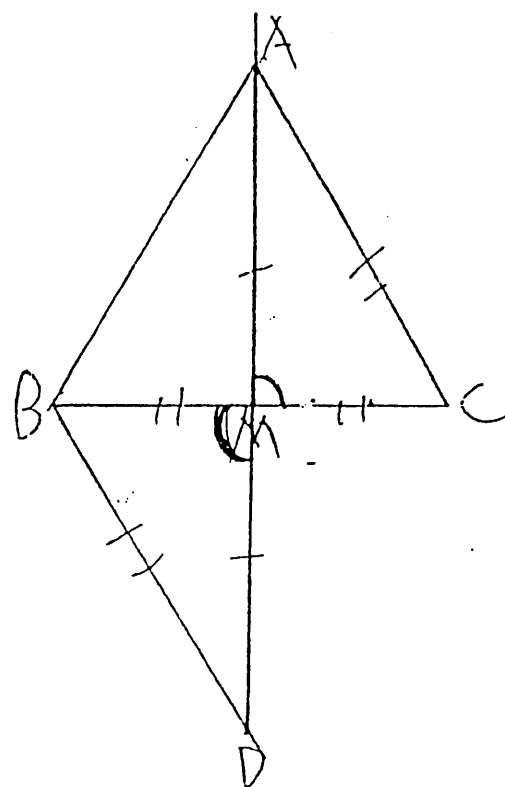
<2-b> 後ろ向き探索ができるようになる。

図5-3のプロトコル4-3.に見られるように、証明したい三角形に注目して、必要な条件を後ろ向きに探索できるようになる。

～2回目～

1. 問題文の読み
2. 問題内容の作図
3. 仮定の探索
 - 3-1. 一つ目の仮定 ($DM = AM$) の発見 (作図記号記入)
 - 3-2. 二つ目の仮定 ($BM = CM$) の発見 (作図記号記入)
4. 証明の段階へ
 - 4-1. $\triangle ACM$ と $\triangle DBM$ の注目
 - 4-2. $AC = BD$? (作図記号記入) → 棄却
 - 4-3. 三角形の合同条件の確認 (証明条件からの後ろ向き探索)
 - 4-4. $\angle BMD = \angle CMA$ の発見
5. 証明内容の記入

▲発話内容



▲作図

図 5 - 3 <問題 1> に対する 2 回目の作図と発話内容の系列

<作図の利用に関して>

<2-c> 作図記号が使えるようになり、問題に沿った部分に的確に注目できるようになる。

図5-3の作図を見れば分かるように、線分の相等、角の相等の作図記号が描かれるようになる。

<2-d> 相変わらず、不適切な作図をする。

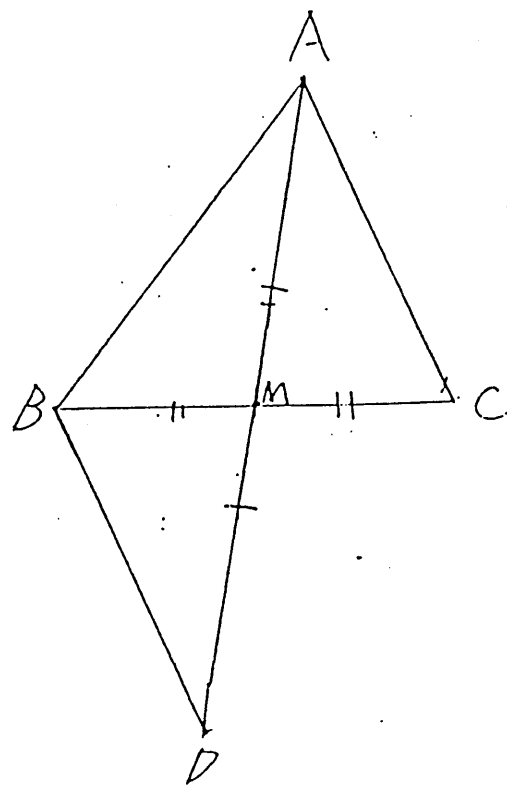
題意にあった作図ができない場合がある。図5-3では、1回目と同様に、三角形ABCを二等辺三角形で描いている。この被験者は、この回(2回目)まで、他の問題の三角形も二等辺三角形に描いた。

<2-e> 図的意味と文的意味が結びつくようになる。

<2-c>の結果とも関連が深いのが、1回目では、なかなか結びつかなかった図と文との関連がとれるようになり、文的表現から図的表現へ(問題文の条件をすぐに図上で見つけられる)、図的表現から文的表現へ(図上の情報をすぐに条件として得られる)とスムーズに表現変換ができるようになる。具体例では、図5-3のプロトコル3-1., 3-2.などに見られるように、仮定に対応する図形部分を作図記号として、スムーズに描き込めるようになる。

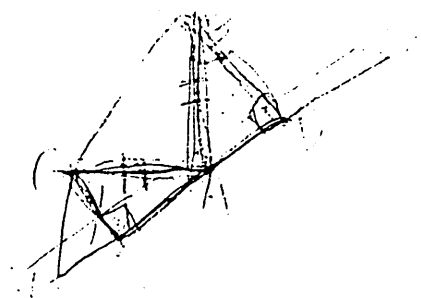
～3回図～

1. 問題文の読み
2. 問題内容の作図 (作図記号も記入 $DM = AM$)
3. 仮定の探索
 - 3-1. 一つ目の仮定 ($DM = AM$) の発見
(問題文の読み返し)
(中点Mの注目)
 - 3-2. 二つ目の仮定 ($BM = CM$) の発見 (作図記号記入)
4. 証明段階へ
 - 4-1. $\triangle ACM$ と $\triangle DBM$ の注目
 - 4-2. 二つの仮定の記入 (証明との関係がすぐに分かる)
 - 4-3. 三つ目の仮定として角が分かる
 - 4-4. 「対頂角」の言葉の思いだし
(「また、2辺とその間の角か」の発話)
 - 4-5. 三つ目の仮定 ($\angle BMD = \angle AMC$) の発見 (その部分をなぞる)
5. 証明内容の記入



▲問題1に対する作図

▲発話内容



▲問題7に対する作図

図5-4 <問題1>に対する3回目の作図と発話内容の系列

～ 3 回目～

< 問題解決過程に関して >

<3-a> 丸暗記手順の意味が分かってきて、手順通りに必要な情報を的確に得られるようになる。

スクリプト的な問題解決に近くなり、それぞれの手順の目的にあった内容を適切に探索して、充足していくようになる。

<3-b> 問題を大局的に見れるようになり、問題の分類と見られる発話が現われる。

図 5 - 4 のプロトコル 4-4. のように、「また、2 辺とその間の角か」というふうに問題を自分の中で、分類し、それに対応した条件を的確に予想して、プロトコル 4-5. のように正しい仮定を得られるようになる。

< 作図利用に関して >

<3-c> 適切な作図ができるようになる。

図 5 - 4 の作図に見られるように、この回になって初めて、三角形を二等辺三角形ではなく、適当な不等辺三角形として描いた。

<3-d> 作図記号を用いて、描き込みや強調ができるようになる。

図 5 - 4 の <問題 7 > の作図に見られるように、問題解決に関連する部分（この場合は、三角形 B A D と三角形 A C E）を強調するような描き込みを行なって、解決に役立てられるようになる。これによって、予測によって得られた内容と、仮定から導かれた内容との区別ができるようになり、さらに図の操作もできるようになっている。

上述の1回から3回までをまとめて、学習による行動の変化を表にしたのが表5-1であり、作図利用の変化を表にしたのが表5-2である。表5-2では、4章で分類した作図の8つの分類に対して、学習過程でそれらの作図の利用がどのように変わっているのかを調べた。

これら結果の中で特徴的な点が二つ観察された。一つは、1回目から2回目にかけて、作図記号などの操作的な作図が使えるように作図利用が変化したことに対応して、後向き推論ができるようになったという点である。作図記号が使えるようになったことと、推論過程には何らかの関係があると思われる。もう一つは、1回目、2回目では描けなかった不等辺三角形が、3回目になり描けるようになって、それにともなって、問題を大局的に見渡した発話が見られるようになったという点である。より一般的な作図ができる作図技能の獲得と、問題の大局的観察能力との間にも何らかの関係があると思われる。


これら2点に注目して、以下で考察を行なう。

表 5 - 1 学習による行動の変化

	問題解決行動	作図行動
1回目	<ul style="list-style-type: none"> 丸暗記手順の意味が分からず実行しようとする 後ろ向き探索ができない 	<ul style="list-style-type: none"> 不適切で無計画に作図していく 作図記号が描かれない 図的意味と文的意味が結びつかない
2回目	<ul style="list-style-type: none"> 丸暗記手順に沿って問題が解けるようになる 後ろ向き探索ができるようになる 	<ul style="list-style-type: none"> 相変わらず不適切な図が描かれる 作図記号が使われるようになる 図的意味と文的意味が結びつくようになる
3回目	<ul style="list-style-type: none"> 手順どおりに必要な情報を得られるようになる 問題を大局的に見れるようになり、問題の分類ができるようになる 	<ul style="list-style-type: none"> 適切な作図ができるようになる 作図記号を用いて、描き込みや強調ができるようになる

表 5 - 2 実験の回数に対する作図利用の変化

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
1回目	3	1	1	0	0	0	0	0
2回目	4	8	1	2	0	0	0	4
3回目	3	4	3	2	0	0	0	3

 内は、操作性を目的とした作図。

- ① 逐語的作図 ② 条件記入作図 ③ 条件拡張作図 ④ 推測的作図
 ⑤ 状況考慮作図 ⑥ 解法考慮作図 ⑦ 実験的作図 ⑧ 部分強調作図

5. 4 考察

5. 4. 1 知識ベースの変化

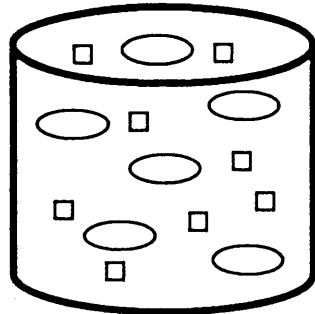
結果を見れば分かるように、この被験者は、学校で習った手続き的情報としての「丸暗記手順」をそのまま適用するという、手続き的情報先行型の学習形態をとっている。

1回目では、この丸暗記手順に沿って、知っている情報を総動員したランダム探索を行い、2回目では、この丸暗記手順が身についで、手順に沿って順序よく知識が適用できるようになり、最後の3回目では、問題全体を大局的に見渡した上で、手順を実行できるようになってきた。丸暗記手順が徐々に、宣言的な知識によって肉付けされ、「目的→充足」関係をもった「問題解決スクリプト」を形成しつつあると考えられる。この「手続き的情報先行型」の知識ベースの変化の過程をまとめた図が、図5-5である。

まず、学習の初期の段階では、手続き的情報も宣言的情報も未分化に渾然一体となって、記憶されている状態と考えられる。この状態を「情報混在の段階」と呼ぶことにする。この状態では、「二辺と挟角がそれぞれ等しい三角形は合同である」のような定理などの宣言的情報も「幾何の問題を解くときには、まず作図して問題の状況をつかむ」というような手順などの手続き的情報も、すべて互いに関連なく記憶されており、問題解決行動は、頭に浮かんだこれらの情報を殆どランダムに適用して、偶然的な解決に期待するという行動になる。実験では、1回目の行動にあたる。

その後の反復的な学習後の段階では、手続き的情報と宣言的情報

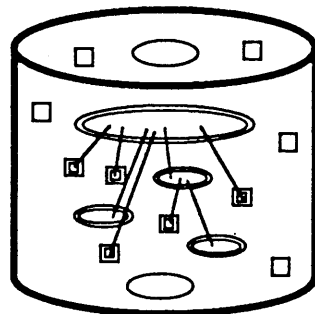
1回目



「情報混在の段階」

この段階では、全ての情報がバラバラの状態、問題解決に必要とされる情報がランダムに適用される。

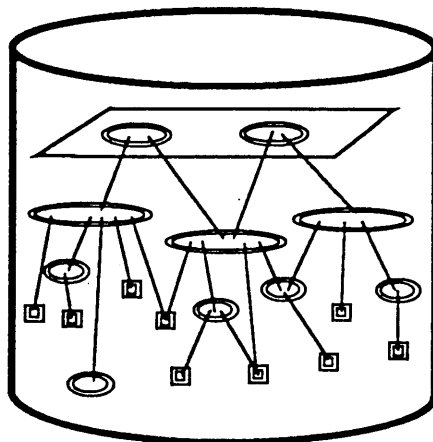
2回目



「知識分化の段階」

この段階では、手続き的知識を中心に知識が連想的に関連づけられて結びくようになり、手続きに沿って知識が適用される。

3回目



「メタ知識形成の段階」

この段階では、いくつかの手続き的知識を、問題の内容によって選択的に利用するための一段高いレベルの知識が形成されている。これによって、知識の階層化が進むと考えられる。

- … 手続き的の情報 □ … 宣言的の情報 / … 知識間の結び付き
- ◉ … 手続き的知識 ◻ … 宣言的知識 ▭ … メタ知識の階層

図 5 - 5 知識ベース変化の過程

が区別されて、関連づけて使われるようになる。手続き的情報が手続き的知識になり、手順中で必要な知識（他の手続き的知識や、宣言的知識）が自然と使えるようになってくる。こうなってくると、丸暗記していた「情報」が、生きて働く「知識」へと変化している状態になっていると考えられる。この状態を「知識分化の段階」と呼ぶことにする。そして、知識ベースでは、丸暗記手順が知識となり、これを中心に関連する知識が結びつき、手順の段階に応じて必要な知識が想起されるようになる。したがって行動としては、丸暗記手順が知識として定着して、必要な宣言的知識も、この手順に結びついたエピソード記憶のように、関連付けられて自然と生成されるようになってくる。例えば、「二つの仮定を見つけたら、そこから導けそうな三角形の合同条件を探して適用する」という手続き的知識に対応して、必要な3つの三角形の合同条件（宣言的知識）が想起されるようになる。また、知識間の結びつきも強くなってくるので、手順を逆に追うような後ろ向きの探索も可能となると考えられる。実験では、2回目の行動に相当する。

さらに、応用問題や違う種類の問題を学習した後の段階では、いろいろな問題に対応できるように、いくつかの手順を学ぶ必要が出てくる。そのため知識構造としては、これらの手順を統括して、選択するための一段高いレベルの知識、すなわちメタレベルの知識（以下ではメタ知識）が必要となり、階層的な知識構造が構築されるものと考えられる。この状態を「メタ知識形成の段階」と呼ぶことにする。例えば、「どんな状況で、三角形の合同からの証明方法を使い、どんな状況で、平行四辺形の辺の長さを使うのかを判別するための一段高い知識」がこのメタ知識に対応する。実験では、3

回目の行動にあたる。

このように、知識構造の違いが問題解決行動の違いとして現れると考えられる。

5. 4. 2 作図利用の変化

この学習過程による変化を、作図の利用に広げて考えることにする。初期の「情報混在の段階」では、当然、持っている知識と具体的な図との対応がうまくとれず、作図記号すら現れない状態になっている。そして、学習が進むにつれ「知識分化の段階」になる。この段階では、知識が関連づけてつながりを持つようになっているので、持っている知識と具体的な図との明確な対応がとれるようになっていくと考えられる。そのため、作図記号も現れるようになり、必要な情報にすぐ目がいくようになっていくと考えられる。さらに学習が進んで、「メタ知識形成の段階」になると、問題自体を一段高い客観的なレベルで観察できるようになり、広い視野から適切な作図ができるようになるのだと考えられる。

このように丸暗記手順をもとに学習が進んでいき、関連する知識が手続き的知識をもとに結びついて、さらに、それぞれの手続き的知識を統合するメタレベルの知識が形成され、抽象化されて「問題解決スクリプト」のような問題解決行動の規範となる知識系列が形成されるのではないだろうか。スクリプトの「目的→充足」という行動形態は、メタレベルの「目的」を、丸暗記手順によって「充足」していく過程であると言えるだろう。

このように考えると、本研究で見てきた手続き的情報先行型学習では、宣言的情報よりも手続き的情報によって、とりあえず「解い

た！」という実体験を得ることが、知識を獲得するための重要な役割を持っていると考えられないだろうか？そのように考えると、作図行動のような手続き的知識を使うことによって解決して、「何故うまくいったのか？」を考えることによって、宣言的知識がはじめて意味あるものとして理解されると言えよう。従来の手続き化学習の過程では、手続き的知識は、学習の結果として得られるものであるという考え方であったが、本研究によって、むしろ手続き的知識（情報）は、学習の過程で宣言的知識を理解するために、役立っているのではないかという可能性も示唆されるだろう。

5. 4. 3 今後の課題

今回は、「手続き的情報先行型学習」という学習の流れが存在する可能性を示す目的であったので、一人の被験者による実験で十分であったと考えるが、当然、他の学習条件（教育方法や学習環境など）によって、違う学習パターンも観察される可能性がある。手続き的知識は、他の人から情報として与えられ、それをそのまま知識として取り込む学習過程も考えられるし、Andersonらの手続き化学習のように、手続き的知識を自分自身で抽象化し、形成していくというパターンも考えられる。また、逆に手続き的知識からそれまでの経験（知識）と照らし合わせて、自分から宣言的知識を発見（形成）していく発見学習の過程も考えられる。さらに、幅広く心理データを集めて、様々な学習パターンを比較し考察する必要があるだろう。

本章の研究では、被験者の負担を少なくするために1回目、2回目、3回目の間を日数的に離すように計画を立てており、各回の間で実際にどのような行動的な変化が起こっているのかを、克明に記

録することができなかった。実験方法を改善したり、より深い被験者の協力を得ることによって、詳細な学習の過程を調べる必要もあろう。

また、この研究で得られた知見から、学習の過程で手続き的情報を優先させ、実際に「解いた！」という体験を通して、その理由としての宣言的情報を手続きに合わせてエピソードに教えていくというC A Iの設計も考えられるだろう。より詳細な研究を行い、今後はこのような教育工学の分野への応用も考えていきたい。

5. 5 あとがき

心理実験から、問題解決の学習過程においては、手続き的情報をもとに学習していく学習の流れ（手続き的情報先行型学習）が観察され、その具体例を示すことができた。その結果、「手続き的情報先行型学習」の知識獲得方法の一例として、「情報混在の段階→知識分化の段階→メタ知識形成の段階」の学習過程が確認され、この型の学習では、「丸暗記手順」を中心に学習が進んでいくことが分かった。このことから、「問題解決スクリプト」の獲得に至る際に最初に学習した「丸暗記手順」が大きな役割を果たしている可能性が示唆された。手続き的行動としての作図も、学習が進むにつれ知識の定着を裏付けるように適切な作図ができるよう変化して、人間の学習程度を調べる上で重要な物差しになりうることが示された。

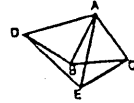
Appendix-5.A 実験に用いた問題

1回目：

<問題1> 三角形ABCの辺BCの中点をMとし、AMを延長して、その上に点Dをとり、 $DM = AM$ とすれば、 $BD = CA$ であることを証明せよ。

<問題2> $AB = AC$ の二等辺三角形において、AB、ACの中点をそれぞれ、D、Eとすると、 $\angle ADC = \angle AEB$ であることを証明せよ。

<問題3> 右の図において三角形ABCと三角形ADEはともに正三角形である。このとき、 $\triangle ABD \cong \triangle ACE$ であることを証明せよ。



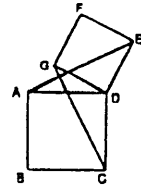
2回目：

<問題4> 右の図で、四角形ABCDと四角形DEFGは正方形である。このとき、 $\triangle ADE$ と $\triangle CDG$ は合同であることを証明せよ。

<問題5> $\angle XAY$ の辺AX上に2点B、Cをとり、辺AY上に2点D、Eをとって、 $AB = AD$ 、 $AC = AE$ とすれば、

$BE = DC$ であることを証明せよ。

<問題6> 三角形ABCの辺BCの中点をMとし、AMを延長して、その上に点Dをとり、 $DM = AM$ とすれば、 $BD = CA$ であることを証明せよ。



3回目：

<問題7> 直角二等辺三角形ABCの直角の頂点Aを通る一直線をXYとする。B、Cより、XYに垂線BD、CEを引けば、 $\triangle BAD \cong \triangle ACE$ となることを証明せよ。

<問題8> 三角形ABCの辺BCの中点をMとし、AMを延長して、その上に点Dをとり、 $DM = AM$ とすれば、 $BD = CA$ であることを証明せよ。

<問題9> $AB = AC$ である二等辺三角形で、辺BC上に2つの点P、Qをとり、 $BP = CQ$ とすれば、 $\triangle APQ$ は二等辺三角形であることを証明せよ。

6 章 作図と理解

6. 作図と理解

6. 1 まえがき

3章から5章まで、作図と問題解決の過程について認知科学的方法で様々な研究を行ってきた。この中で、DIPS (Diagramatic Problem Solver) という認知モデルを構築し、人間の作図を含んだ問題解決過程を説明しようとして試みてきた。このモデルの概念図が、図6-1である。

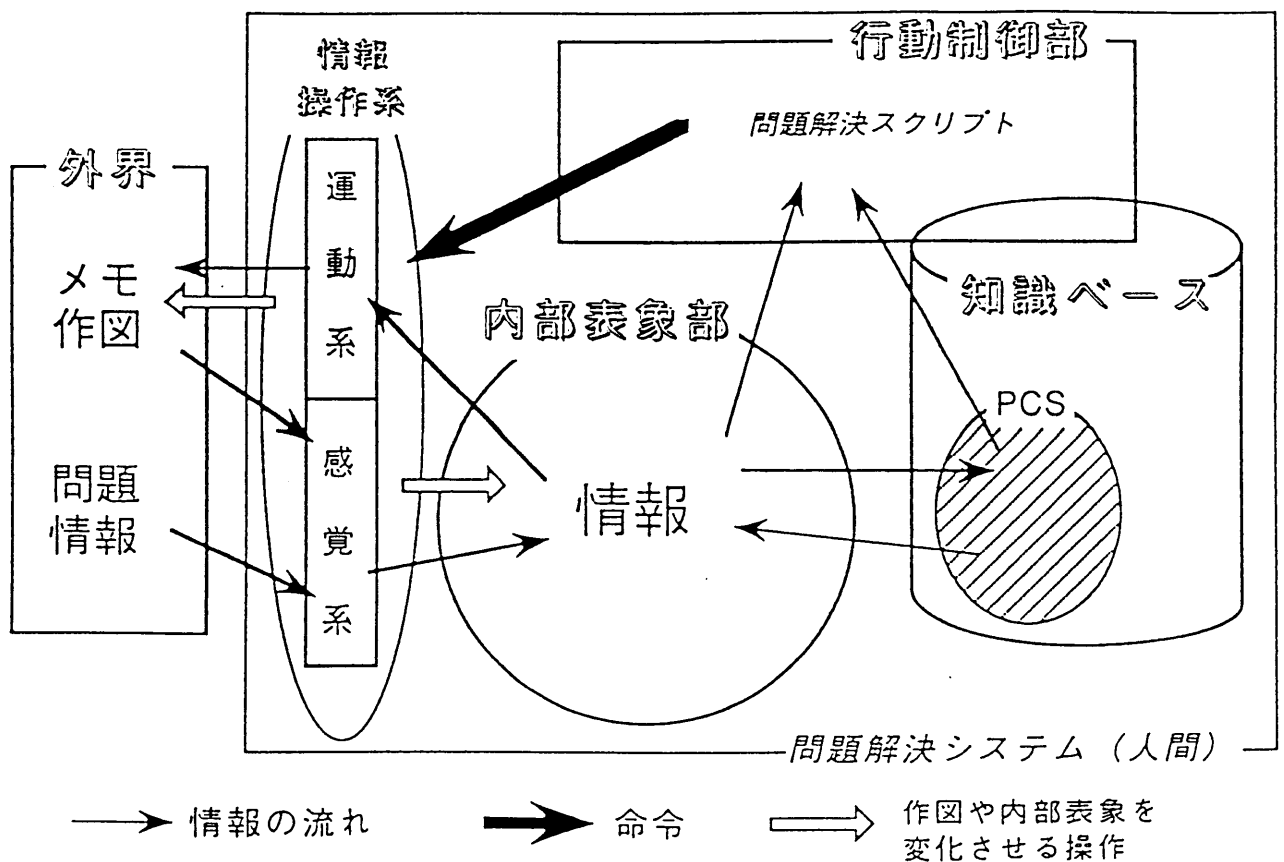


図6-1 DIPSの概念図

問題が外界から入力されると、人間内部では、感覚器によってその情報が取り込まれ、短期的に「内部表象部」に保持される。「内部表象部」では、その情報を変化させて解決状態に変換していく。その際に、必要な知識を「知識ベース」から取り出したり、「情報操作系」を通して「内部表象部」の情報を変化させたり、外界に操作を加えたりすると考えている。この「情報操作系」を制御しているのが「行動制御部」で、「知識ベース」で活性化された知識を基にどのような行動をとればいいのかを選択し命令を出している。

このように、DIPSでは、問題解決の過程を「外界」と「内部表象部」の情報の表現変化の過程として捉えてきた。

3章では、このDIPSの概要を説明し⁽⁶²⁾、4章では、行動制御部を「問題解決スクリプト」という概念を提案して⁽⁶⁵⁾、人間の行動は各スクリプトの有する目的を充足するための行動であることを示唆してきた。5章では、このモデルをもとにして、人間の学習過程を作図利用の変化を手がかりに知識ベースが学習と共に変化していることを仮説として提案した⁽⁶⁷⁾⁽⁶⁸⁾。

本章では、問題解決行動をするもとになる知識は、どのように選択されるのか、作図することによってどのように問題解決が効率化されるのかを調べていく。そして、仮説として内部表象部の状態に連動して変化する「PCS」という作業記憶空間を提案して知識ベースをモデル化する^{(69)~(71)}。

6. 2 心理実験

6. 2. 1 目的

幾何の問題解決において、作図可、不可に応じて連想される知識にどのような違いが生ずるのかを調べる。また、問題解決のパフォーマンスにはどのような違いが見られるのかについても調べる。

6. 2. 2 方法

被験者に問題を解かせ、その際に考えた内容をすべて発話するように被験者に教示をし、その発話内容を分析するという発話プロトコル法を用いた。被験者は、当大学の大学院生6名。問題は、初等幾何の証明問題で一人当たり6問を与えた。問題の難易度は、教科書レベルの問題で、特に複雑な問題は含まなかった（Appendix-B参照）。

実験の条件としては、まず、問題は、「問題図を含む問題（以下、D問題）」「含まない問題（以下、N問題）」の2種類の問題を用いた。そして、教示条件は、「作図してもよい（以下、可条件）」「作図してはいけない（以下、不可条件）」の2条件について行った。従って、実験の条件は、2問題*2条件の4条件について調べた。問題は、一人当たり6問（D問題3問、N問題3問）、被験者は2つの条件にあわせて、3人ずつの2グループに分けた。

6. 2. 3 結果

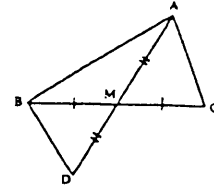
4条件間の実験の結果をまとめたのが表6-1である。最も顕著な差が、「N問題、不可条件」と「それ以外の条件」との間に見られた。ここでは典型例として、図6-2に2つの条件（「N問題、不可条件」と「D問題、可条件」）下での解決行動を例に挙げ、その主な相違点を以下に列挙する。

- ・どちらの条件でも、連想される事柄の量や内容にはそれほど差がなかった。
- ・問題解決にかかる時間は、「N問題、不可条件」の方が長かった。
- ・「N問題、不可条件」では、知識がバラバラに連想され、必要な知識を効率よく生成できなかったのに対して、「D問題、可条件」では、必要な知識を状況と結びつけて手順良く生成していた。

	不可条件	可条件
N問題	<ul style="list-style-type: none">・指摘する順序がバラバラ・不必要な推論をする・事柄間の関連づけがうまくいかない・誤りはないが、解決がもっとも遅い	<ul style="list-style-type: none">・解決の順序どおりに事柄を指摘・スムーズに推論する
D問題	<ul style="list-style-type: none">・関連する内容がすぐに見つかる・指摘の順序がバラバラ	<ul style="list-style-type: none">・解決の順序どおりに事柄を指摘・スムーズに推論する・解決がもっとも早い

表6-1 実験の4条件のまとめ

問題：三角形ABCの辺BCの中点をMとし、AMを延長してその上に点Dをとり、 $DM=AM$ とすれば、 $BD=CA$ であることを証明せよ。



発話内容

- ・ BCの中点はM。
- ・ 三角形の合同かな？
- ・ $DM=AM$ だから、MはADの中点。
- ・ $\triangle ABC$ と $\triangle DCB$ の合同。
- ・ 四角形ABCDは平行四辺形。

など、、、

結果の特徴

- ・ 指摘する事柄の順序がバラバラ。
- ・ 不必要な推論をする。
- ・ 事柄間の関連づけがうまくできない。

(a) 「N問題、不可条件」の結果

発話内容

- ・ $\triangle AMC$ と $\triangle DMB$ の合同？
- ・ $AM=MD$
- ・ $BM=MC$
- ・ 対頂角 $\angle AMC=\angle DMB$
- ・ 四角形ABCDは平行四辺形。

など、、、

結果の特徴

- ・ 順序だてて事柄が並ぶ。
- ・ スムーズに推論し、不必要な推論をしない。
- ・ 分かったことを図中に描き込む。

(b) 「D問題、可条件」の結果

図 6 - 2 実験結果の2つの典型例

6. 2. 4 考察

実験結果で予想外だったのは、「N問題、不可条件」では、もっと連想される内容が少なく、間違った連想がもっと多く生成されるだろうと考えていた。しかし、予想以上に正確で、内容的にも他の条件と大差ない連想が行なわれた。

この理由としては、もちろん被験者の能力に対して問題自体が簡単過ぎたということが考えられる。しかし、この結果から、少なくとも大学生のような抽象的表現の処理に習熟した者にとっては、文的な情報だけから問題解決に関連する情報を、自分の持っている知

識ベース中から想起することが可能であることが示唆される。

それでは、問題解決にとって作図は不要なのであろうか。結果にも示したように、作図が全く使えないと、連想される内容がバラバラになり、つながりがなくなって解答時間も伸びる。これは、作図することによって、細部の情報を正確に保持でき、必要な情報を目で追うだけで関連づけて得ることができるようになることを示している。

これらの結果から、作図はしなくても問題に含まれる鍵になる情報を基にして、関連する知識が知識ベース内で一種の活性化状態（知識として取り出しやすい状態）を形成し、必要な知識が連想記憶により想起されやすい形になっていると考えられる。そして、作図することによって、それらの知識が関連を持って接合し、一つのまとまりを持った図として外部に保持される。頭の中の作業記憶空間の限界（ 7 ± 2 ）を超える情報量の時は、このまとまりを持った図を頭の内部にすべて保持しておくことは困難で、そのために作図が用いられると考えられる。

6. 3 知識ベースモデル

問題が与えられて、自分の持っている膨大な知識ベース中から、その問題に関連する知識だけを取り出して（推論などの）処理をすることは、非常に困難で人工知能の分野ではフレーム問題*3として

*3 フレーム問題の定義は、いろいろあり一意ではない。ここでは、「実世界の例外的な内容を如何に論理世界で表現しうるか？」という問題であると捉えて議論を進める。

扱われている⁽⁷²⁾。松原らは、「人間はフレーム問題に直面すると、一見解決しているように見えるが、実は回避している」と主張している⁽⁷²⁾。筆者は、人間は学習が進むと、自動的に「知識ベース」中に「内部表象部」の情報と強い関連を持つPCS (Problem Concern Space) という空間が形成され、この空間内での自動的な解決行動のため、意識されずにフレーム問題を解決できるのではないかと考えている。

実験の結果を踏まえて、知識ベース内にこのPCSという空間を仮説として提案することによって、人間がフレーム問題を解決していくメカニズムを考察していくことにする。

6. 3. 1 PCS (Problem Concern Space)

問題解決において、効率よく解決に至るために重要なことは、無駄な探索をせずに必要な情報だけを的確に選別することであると言える。我々人間は、問題などの状況に応じて知識ベースにバイアスをかけ、必要な知識だけを取り出し易い状態にしていると考えられる。

このメカニズムを概念モデルとしたのが、以下に説明するPCSである。まず、内部表象部に入ってきた情報が知識ベースに伝えられ、その情報に密接に関連する知識がキーワードとして発火する。これは、繰り返し行われる学習などによって形成された結びつきであり、自動化されていると考えている。知識ベース中の知識はお互いに関連する内容同士が結びついていて、発火した一つの知識に関連する他の知識が、次々と弱い活性化状態となりPCSを構成すると考えている(図6-3)。

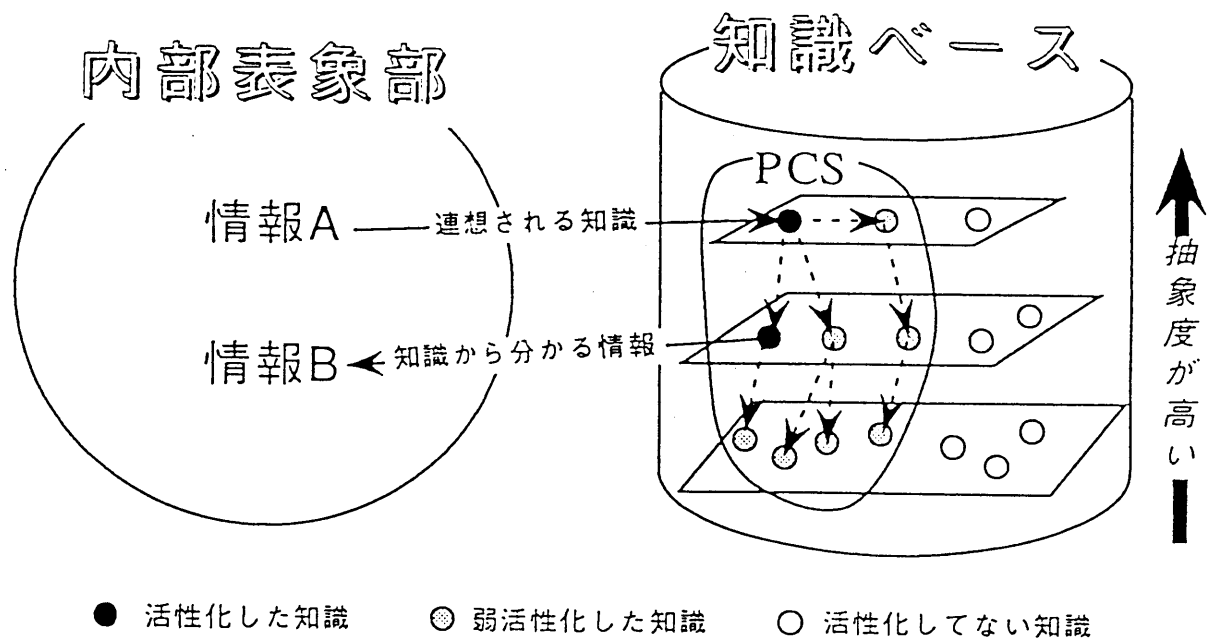


図 6 - 3 知識ベース内のPCSの形成

PCSには、以下のような性質があると考えている。

- (1) 最初の発火は、知識ベース中の抽象度の高い知識であり、学習などにより内部表象部の情報と強い結びつきをもって、自動的に起こる。
- (2) PCSの広がり、知識ベース内で関連性を持って結びついた知識同士間で起こり、次々に広がる。
- (3) 弱い活性化状態なので、注意を向けないとPCS内の知識は意識にのぼらない。
- (4) 注意を向けた知識は、活性化して内部表象部に情報が伝わり、意識にのぼる。

(5) 内部表象部に入ってくる情報の変化に応じて、空間も連動して刻々と変化する。

6. 3. 2 実験との比較

P C S という概念を想定すると、実験の結果もうまく説明される。

問題文中に含まれる情報が、内部表象部に伝達され、その情報に触発され、知識ベースでは、関連する知識空間として P C S が構成されると考えられる。これによって、作図のあるなしに関わらず、問題に関連する知識はかなり正確に想起されたことが説明できる。弱い活性化状態なので、積極的に注意を向けないと知識は意識にのぼらないが、作図などの図的信息があれば、P C S 内の情報が関連づけて見渡せるようになっているので、必要な情報を順序よく意識化できると考えられる。

このように、P C S の概念を導入することによって、膨大な知識ベースのすべてを網羅的に探索する必要は無くなった。そして、作図行動は、P C S を外部に保持し意識化する助けになっていることが示唆された。

6. 4 今後の課題

今回の実験は、被験者がかなり抽象的（論理的）思考に慣れている工学部の大学院生であった。抽象的思考に慣れているかどうかによって、P C S の形成されるされ方や、知識ベース自体の知識の整理のされ方に違いが生じると考えられる。その問題に対する習熟度や、学習による類推を含めて、さらに、幅広い被験者について、P

C S の観点から詳細な調査が必要だろう。

6. 5 あとがき

問題解決において作図ができる場合とできない場合で、連想される知識の量と早さの違いを発話プロトコル実験を通して考察した。また、問題解決において、解決に必要な知識を、どのように効率的に知識ベースの中から絞っているのかをPCSという仮説概念を用いて、説明した。

Appendix-6.A 実験に用いた問題 (問題図は省略)

(問題1)

$\angle XAY$ の辺 AX 上に2点 B, C をとり、辺 AY 上に2点 D, E をとって、 $AB = AD, AC = AE$ とすれば、 $BE = DC$ であることを証明せよ。

(問題2)

直角三角形 ABC の直角の頂点 A を通る一直線を XY とする。 B, C より、 XY に垂線 BD, CE をひけば、 $\triangle BAD \equiv \triangle ACE$ となることを証明せよ。

(問題3)

平行四辺形 $ABCD$ で、 $AE = BF = CG = DH$ である。このとき、四角形 $EFGH$ は平行四辺形であることを証明せよ。

(問題4)

$AD \parallel BC$ である台形 $ABCD$ において、 DC の中点を E とすれば、三角形 ABE の面積は、台形 $ABCD$ の面積の2分の1であることを証明せよ。

(問題5)

長方形 $ABCD$ の辺 BC 上の点 P から2つの対角線に平行線をひき、辺 AB と Q 、辺 CD と R で交わらせる。このとき、 $PQ + PR = \text{一定}$ であることを証明せよ。

(問題6)

三角形 ABC の辺 BC の中点を M とし、 AM を延長してその上に点 D をとり、 $DM = AM$ とすれば、 $BD = CA$ であることを証明せよ。

7 章 結 論

7. 結論

本論文では、初等幾何の証明問題を例に挙げて、人間の作図行動を含んだ問題解決過程に関して認知科学的アプローチで様々な考察を行った。

第1章では、本研究の背景と意義を工学的な応用の観点から概観し、研究の位置づけを行った。

第2章では、本研究で用いた認知科学的アプローチを認知科学の研究の立場から説明し、本研究が認知科学的研究としてどのような方向性を持った研究であるのかを、従来の研究を紹介して検討して、第3章から第6章では、認知科学的アプローチに則った研究を紹介した。

第3章では、初等幾何の証明問題を解決するプロトタイプの認知モデル(DIPS)を提案した。このモデルは、人間の問題解決過程を情報表現変換の過程として捉え、作図行動をトップダウン的な逐語的作図過程として説明した⁽⁵²⁾。

第4章では、第3章で提案した認知モデルでは不明確であった行動生成のメカニズムを「問題解決スクリプト」という概念を提案して説明を試みた。また、作図生成過程に関しても詳細に調査して、「利用の利点」という観点から3つに、「現れ方の違い」から8つに分類し、「問題解決スクリプト」との関係性を明らかにした⁽⁶⁶⁾。

第5章では、実際の中学生の被験者の学習過程を追跡調査して、上記の認知モデルがどのように学習されるのかを、作図利用の変化に注目して調べた⁽⁶⁸⁾。

第6章では、第3章から第5章までの知見をもとに、問題解決における”理解”がどのようになされるのかを説明する知識ベースモデルを提案した⁽⁷¹⁾。

各章ごとに得られた知見は、各章の「あとがき」にまとめられているが、本研究を通じて総括すると以下の事項にまとめられる。

(1) 本研究では、作図行動を含んだ問題解決過程を説明する認知モデル(DIPS)を提案した。DIPSは大きく分けて、表現変換部(Representation Changer)、内部表象部(Internal Representation)、知識ベース(Knowledge Base)、制御部(Controller)の4つに分けられる(p.51, 図4-1参照)。

モデルの発想としては、SimonのGPSの影響を受けて、問題解決の過程を問題表現変化の過程として捉えた。それによって、作図過程は、人間外部への表現変換の行動であると捉えられ、作図行動を内部表現の外化と考えることで説明できた。

こういった観点から、作図表現を座標表現で置き換え、図の生成・解釈を関数表現で再現することが出来た。

(2) 制御部の働きを外部に現れた作図行動と発話プロトコル分析を結びつけることによって、「問題解決スクリプト」として説明した。”現れ方の違い”によって分類された作図の「8つの分類」が、作図を含んだ人間の認知科学研究の物差しになりうる可能性も指摘された。

(3) 分類された作図をもとに学習過程を調べることによって、人間の内部表象部、知識ベースで起こっていることが推察され、学習過程に関する一つのモデル（手続き的知識が先に学習される学習方法）が説明された。ここでも、作図の分類が、**作図行動**を含んだ人間の**認知研究**に有効であることが示唆された。

(4) 人間の問題解決における**理解**では、知識ベースの連想記憶的なメカニズムがあることが予想され、作図行動は、知識ベース内に連想的に広がった空間（PCS）を保持して、操作しやすくしておくという役割があることが指摘された。

今後の研究課題に関しては、以下のようにまとめられる。

(a) 本研究では、図の解釈をコンピュータ上でシミュレートする際に座標情報を解釈する関数表現を用いた**論理的解釈**しか扱わなかった。しかし、人間の「図の解釈」では、“印象”とか“感覚”のような**直感的解釈**が**論理的理解**と連想的に結びついていることが観察される。直感的な処理と論理的な処理を融合させた思考研究は⁽⁷³⁾、一朝一夕に達成されるとは思われないが、認知科学研究の先端的なテーマとして、今後は直感的解釈を組み込んだ認知モデルを提案していきたい。

(b) 学習の研究で、一つの学習パターンとして「**手続き的情報先行型学習**」という形態を提案したが、学習には、いろいろなパターンが考えられ、それぞれ作図のような非言語的情報が何らかの形で役

立っていると考えられる。様々なタイプの学習と作図との関係についても、調べていきたい。

(c) 非言語的情報が役立つ場面は、問題解決のような一人の思考過程だけでなく、会話や対話、説明などの複数の思考過程などでも考えられる。本研究のモデルをもとにして、対話における身ぶり手振り、図などの利用を調査してCSCWなどのヒューマンインターフェースへの応用も考えていきたい。

(d) 図の理解に関しては、発達の影響も考える必要があるだろう。筆者が属する研究室では、盲人用図面認識支援システムの研究を行って、盲人にとって理解しやすい表現を提供するシステム作りを行っている⁽⁷⁴⁾。この研究では、盲人の図面認識能力に関する基礎心理実験も行っており、先天盲と後天盲では、図面解釈、生成能力に大きな差が見られることが分かってきている⁽⁷⁵⁾⁽⁷⁶⁾。盲人の心理実験と健常者の心理実験を比較することによって、図的表現の発達における獲得のメカニズムを明らかにしていきたい。

現在、(第1章でも述べたように)ヒューマンインターフェースや教育工学の分野では、図的思考と論理的思考を融合した理論に関する新しいパラダイムが模索されている。本研究は、そういった流れの中で、「知」のメカニズムを明らかにしようとする認知科学研究のアプローチで行われたものである。本研究が、図的思考と論理的思考の融合という大目標達成への何らかの貢献となるであろうことを期待して、本論文の結びとする。

参考文献

- (1) 西田正吾、佐伯胖：“ヒューマン・コンピュータ交流技術”、オーム社（1991）
- (2) T. H. Nelson：“Why A Pluralistic Docuverse?”, *Computer World* 89 (1989)
- (3) J. Conklin：“Hypertext：An Introduction and Survey”, *Computer*, Vol.20, No.9, pp.17-41 (1987)
- (4) 折原良平：“発想支援システムの動向”、情報処理、Vol.34, No.1, pp.81-87 (1993)
- (5) M. Stefik et al.：“Beyond The Chalkboard：Computer-Support for Collaboration and Problem Solving in Meeting”, *Communications of The ACM*, Vol.30, No.1, pp.32-47 (1987)
- (6) 竹内章、大槻説乎：“知的C A Iの可視化とそのインターフェース”、人工知能学会研究会資料, SIG-HICG-9202-1, pp.1-7 (1992)
- (7) 安西祐一郎：“パーソナルロボットとそのインターフェースについて”、情報処理学会H I研究会資料, 93-HI-47-4, pp.23-28 (1993)
- (8) Y. Anzai：“Towards A New Paradigm of Human-Robot-Computer Interaction”, *Proc. of IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication*, pp.11-17 (1992)
- (9) S. A. メドニック、J. ヒギンズ、J. キルシェンバウム：“心理学概論－行動と経験の探求－”, 誠信書房（1979）
- (10) Pavlov, I. P.：“Condition Reflex”, *London: Oxford University Press* (1927)
- (11) 伊藤紘二：“知的C A Iシステム探訪”、情報処理、Vol.29, No.11, pp.1283-1293 (1988)
- (12) 溝口理一郎、角所収：“知的C A Iにおける学習者モデル”、情報処理、Vol.29, No.11, pp.1275-1282 (1988)
- (13) Sleeman, D. H. et al.：“Modeling Students’ Problem Solving”, *Artificial Intelligence*, Vol.16, pp.171-187 (1981)
- (14) Anzai, Y.：“Architecture for Problem Understanding in Physics Problem Solving”, *Paper Presented as An Invited Talk at The 3rd International Conference on Artificial*

Intelligence and Education, LRDC, University of Pittsburgh (1987)

- (15) 平島宗、河野隆宏、中村祐一、溝口理一郎、豊田順一：“問題解決における「理解」に関する一考察 - ITS の立場から - ”、信学技報、Vol.90, No.21, pp.29-36 (1990)
- (16) 市川伸一：“認知カウンセリングの構想と展開”、心理学評論、32, pp.421-437 (1989)
- (17) 市川伸一編著：“学習を支える認知カウンセリング～心理学と教育の新たな接点”、ブレーン出版 (1993)
- (18) M. ポラニー、佐藤敬三訳：“暗黙知の次元”、紀伊国屋書店 (1980)
- (19) H. ガードナー：“認知革命 - 知の科学の誕生と展開 - ”、産業図書 (1987)
- (20) D. A. ノーマン編：“認知科学の展望”、産業図書 (1984)
- (21) Miller, G. A. : “The Magical Number Seven”, *Psychological Review*, 63, 81 (1956)
- (22) Chomsky, N. : “Three Models of The Description of Language”, *Proceedings of a Symposium on Information Theory. IRE Transactions on Information Theory*, Sept. IT-2(3), pp.113-124 (1956)
- (23) Newell, A. & Simon, H. A. : “The Logic Theory Machine” , *IRE Transactions on Information Theory*, Sept. IT-2(3), pp.61-79 (1956)
- (24) Bruner, J. S., Goodnow, J. J., & Austin, G. A. : “A Study of Thinking” , New York: Weley (1956)
- (25) Putnam, H. : “Minds and Machines” , In S. Hook, (Ed.), *Dimensions of Mind*, New York: New York University Press (1960)
- (26) Ericson, K. A. & Simon, H. A. : “Protocol Analysis: Verbal Reports of Data” , *Cambridge, MA: MIT Press* (1984)
- (27) M. I. ポズナー編、佐伯胖監訳：“認知科学の基礎①、概念と方法”、産業図書 (1991)
- (28) Nisbett, R. E. & Wilson, T. D. : “Telling More Than We Can Know: Verval Reports on Mental Processes” , *Psychological Review* 84: pp.231-259 (1977)

- (29) Newell, A. & Simon, H. A. : "GPS, A Program that Simulates Human Thought", In Feigenbaum & Feldman (Eds.), *Computer and Thought*. New York: McGraw-Hill (1963)
- (30) Newell, A. & Simon, H. A. : "Problem Solving Machines", *Science and Technology*, Vol.3, No.36, pp.48-62 (1964)
- (31) Newell, A. & Simon, H. A. : "Human Problem Solving", PRENTICE-HALL (1972)
- (32) Anderson, J. R. : "Aquisition of Proof Skills in Geometry", *MACHINE LEARNING: An Artificial Intelligence Aproach*, R. S. Michalski (eds.) , pp.191-219 (1983)
- (33) Anderson, J. R. : "The Architecture of Cognition", Cambridge, M. A., Harvard University Press (1983)
- (34) J. G. グリーノ著、山口修平、東洋共訳 : "問題解決の過程～幾何の課題による研究～"、サイエンス社 (1985)
- (35) de Kleer J. : "Multiple Representations of Knowledge in A Mechanics Problem-Solver", *Proc. of 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp.299-304 (1977)
- (36) Novak G.S. , Jr. , : "Representations of Knowledge in A Program for Solving Phisycs Problems", *Proc. 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp.286-291 (1977)
- (37) Luchins, A. S. : "Mechanization in Problem Solving", *Psychological Monographs* , 248, (1942)
- (38) Miller, G. A., Galanter, E., & Pribram, K. H. : "Plans and The Structure of Behavior", New York: Holt (1960)
- (39) Duncker, K. : "On Problem Solving", *Psychological Monographs*, 58, 5, Whole No.270 (1945)
- (40) 安西祐一郎、甲 洋介 : "類似による問題解決における図の効果"、第1回日本認知科学会全国大会予稿集 (1984)
- (41) 市川伸一 : "3 囚人問題の解決と理解の過程をめぐって"、*認知科学の発展 (第1巻)*、pp.1-32 (1988)

- (42) 井原二郎 : "「3 囚人問題」に関する直感の数理モデル"、日本認知科学会第4回大会発表論文集、pp.24-25 (1987)
- (43) Larkin, J. H. & Simon, H. A. : "Why A Diagram is (Sometimes) Worth Ten Thousand Words", *Cognitive Science*, 11, pp.65-99 (1987)
- (44) Anzai Y. & Yokoyama T. : "Internal Models in Physics Problem Solving", *Cognition and Instruction*, 1, pp.397-450 (1984)
- (45) Anzai Y. : "Learning and Use of Representations for Physics Expertize", in *Toward A General Theory of Expertise*, K. A. Ericsson & J. Smith, (Eds.), Cambridge University Press (1991)
- (46) Larkin, J. H., McDermott, J., Simon, D. P., & Simon, H. A. : "Models of Competence in Solving Physics Problems", *Cognitive Science*, 4, pp.317-345 (1980)
- (47) Chi, M. T. H., Feltovich, P. J., & Glaser, R. : "Categorization and Representation of Physics Problems by Experts and Novices", *Cognitive Science*, 5, pp.121-152 (1981)
- (48) Chi, M. T. H., Bassok, M., Lewis, M. W., Reinmann, P., & Glaser, R. : "Self-Explanations : How Students Study and Use Examples in Learning to Solve Problems", *Cognitive Science*, 13, pp.145-182 (1987)
- (49) 伊藤毅志、大西昇、杉江昇 : "視覚情報を利用した幾何の問題解決認知モデル"、第4回人工知能学会全国大会予稿集、pp.149-152 (1990)
- (50) 山本博樹、高橋秀明、天沼聡 : "プロトコルの効果的な採取のための基礎的考察 - 思考発話法と疑似遂行法との比較検討 -"、日本認知科学会第6回大会発表論文集、pp.60-61 (1989)
- (51) 三輪和久、杉江昇、織田守矢 : "人間の個別的思考過程を記述する情報处理的モデルの実現法"、人工知能学会誌、6, 1, pp.105-116 (1991)
- (52) 伊藤毅志、大西昇、杉江昇 : "作図過程を伴う幾何の問題解決認知モデルの提案"、電子情報通信学会論文誌、Vol. J75-D-II, No.10, pp.1701-1712 (1992)
- (53) Ito T., Ohnishi N., & Sugie N. : "A Cognitive Model of Geometric Problem Solving with Drawing Processes", *Systems & Computers in Japan* (掲載予定)

- (54) Ito T., Ohnishi N., & Sugie N. : " An Experiment and A Model to Investigate How We Use Diagrams in Geometry Problem Solving", *Proceedings of The 2nd Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence*, pp.1072-1078 (1992)
- (55) 伊藤毅志、大西昇、杉江昇 : " 図形情報を利用した幾何の問題解決認知モデル"、日本認知科学会第7回大会、pp.78-79 (1990)
- (56) 伊藤毅志、大西昇、杉江昇 : " 作図過程を含んだ幾何の問題解決認知モデル (D I P S)"、日本認知科学会第8回大会予稿集、pp.18-19 (1991)
- (57) 安西祐一郎 : " 問題解決における理解について"、心理学評論, Vol.23, No.1, pp.7-36 (1980)
- (58) 伊藤毅志、大西昇、杉江昇 : " 幾何の問題解決における作図解釈の過程"、情報処理学会第43回全国大会予稿集 (第I分冊)、pp.357-358 (1991)
- (59) 伊藤毅志、大西昇、杉江昇 : " 作図行動が問題解決に与える影響について"、日本認知科学会第9回大会予稿集、pp.72-73 (1992)
- (60) 戸田正直、阿部純一、桃内佳雄、往住彰文 : " 認知科学入門"、サイエンス社 (1986)
- (61) 川崎恵里子 : " 第2章、知識の構造と文章理解"、認知科学のフロンティアI、箱田裕司編、サイエンス社、PP.31-72 (1991)
- (62) Koedinger, K. R., & Anderson, J. H. : " Abstract Planning and Perceptual Chunks: Elements of Expertise in Geometry", *Cognitive Science*, 14, pp.511-550 (1990)
- (63) "交通教則に基づく学科教本 (警察庁統一カリキュラム準拠)", 中部日本自動車学校発行・編集
- (64) Laird, J., Rosenbloom, P. and Newell, A. : " Chunking in SOAR : The Anatomy of A General Learning Mechanism", *Machine Learning*, Vol.1, pp.11-46 (1985)
- (65) 伊藤毅志、大西昇、杉江昇 : " 問題解決で作図はどの様に生成されるか～作図の分類と問題解決スクリプト～", 電子情報通信学会春期大会予稿集 (第1分冊), シンポジウム, pp.439-440 (1993)
- (66) 伊藤毅志、大西昇、杉江昇 : " 人間の作図過程を説明する問題解決スクリプトと作図の分類"、電子情報通信学会論文誌 (採録)

- (67)伊藤毅志、大西昇、杉江昇：“幾何の問題解決能力の学習過程における作図利用の変化”、情報処理学会H I 研究会、93-HI-47, pp.101-108 (1993)
- (68)伊藤毅志、大西昇、杉江昇：“幾何問題解決の学習過程に関する認知科学的研究～手続き的情報先行型学習の事例～”、情報処理学会論文誌(投稿中)
- (69)伊藤毅志、大西昇、杉江昇：“作図生成過程を説明する内部モデル～幾何の問題解決に関する考察～”、日本認知科学会第10回大会、pp.156-157 (1993)
- (70)伊藤毅志、大西昇、杉江昇：“作図をすると何故ひらめくのか?～「ひらめき」を導く知識ベースモデル～”、情報処理学会H I 研究会、93-HI-49, pp.25-31 (1993)
- (71)伊藤毅志、大西昇、杉江昇：“作図すると何故解きやすくなるのか?”、情報処理学会論文誌(投稿中)
- (72)松原仁、山本和彦：“フレーム問題について”、人工知能学会、2(3), pp.266-272 (1987)
- (73)野村幸正：“知の体得－認知科学への提言－”、福村出版、(1989)
- (74)河井良浩、大西昇、杉江昇：“盲人用図面認識支援システム”、電子情報通信学会論文誌、J72-D-II, No.9, pp.1526-1533 (1989)
- (75)皆川洋喜、大西昇、杉江昇、小野田明好、水谷厚彦：“盲人の地図表現に関する実験と考察”、第19回感覚代行シンポジウム予稿集、pp.103-106 (1993)
- (76)皆川洋喜、伊藤毅志、大西昇、杉江昇：“盲人用図表現システムのための基礎的研究”、情報処理学会H I 研究会、93-HI-50-9, pp.65-71 (1993)

謝辞

まずはじめに、名古屋大学工学部教授杉江昇先生に深く感謝いたします。杉江先生には、指導教官として本研究を進める機会を与えていただき、私が名古屋大学の研究生、大学院生として在学中の6年間の長きに渡って辛抱強く研究の御指導をいただきました。杉江先生の御指導、御鞭撻なくしては、本論文は完成しなかったと思います。同じく指導教官として、辛抱強く丁寧に研究を御指導して下さった名古屋大学工学部助教授大西昇先生に深く感謝いたします。大西先生には、本論文はもちろん、これまで投稿した論文や発表した研究に関して、注意深く御指導をいただき、研究の厳しさを教えていただきました。

また、本論文を丁寧に読んで下さり、大変貴重な御意見を賜りました副査の名古屋大学工学部教授鳥脇純一郎先生に深く感謝いたします。

本研究を進めるにあたっては、非常に多くの方々に御意見、御助言をいただきました。慶應義塾大学理工学部の安西祐一郎先生は、私が北海道大学文学部在学当時の指導教官であり、認知科学の研究方法の基礎をお教えいただき、本研究を始めるきっかけを作ってくださいました。また、名古屋大学人間情報学部の三輪和久先生には、研究の進め方や認知科学研究に関して御助言をいただき研究を進める自信を与えて下さいました。また、杉江研究室の皆様には、研究を進めるにあたって、多くの有意義な御意見やコメントをいただきました。特に、博士課程後期2年の皆川博喜氏には、本論文の原稿を読んでいただき貴重なコメントをいただきました。

また、被験者として心理実験に参加していただいた多くの方々に感謝いたします。

最後に、永い間教育を受けさせていただいた両親に心から感謝いたします。

平成5年1月11日

伊藤毅志