Vol. 35 No. 7 情報処理学会論文誌 July 1994

ショートノート

作図するとなぜ解きやすくなるのか

伊藤 毅志[†] 大西 昇[†] 杉江 昇[†]

本論文では，幾何の問題解決の際に，作図の有無によって思考過程にどのような変化がみられるのかという心理実験を行った．エキスパートでは，作図の有無によって想起される知識に大差がないことがわかった．しかし，作図して解いた場合は，せずに解いた場合に比べて解答時間が短かった．この事実をもとに，PCS (Problem Concern Space) という概念を仮説として提案することによって，知識が効率よく想起されるメカニズムを考察した．また，この概念をもとに，作図には，想起された知識をまとまりとして外部に保持しておく機能があることを示唆した．

Why Do We Feel Easy to Solve Some Problems by Drawing Diagrams?

TAKESHI ITO,[†] NOBORU OHNISHI[†] and NOBORU SUGIE[†]

We report an experiment in which problem solving behaviours with and without diagram drawing were examined. Whether diagram drawing is permitted or not did not make a significant difference in associatively recall knowledge for expert subjects. However, the time needed for problem solving was much shorter if diagram drawing is permitted. These findings led us propose a concept, PCS (Problem Concern Space), which is useful in explaining the mechanism of efficient recall of relevant knowledge. It is also suggested that diagrams are useful by external storage of recalled knowledge in an organized way.

1. はじめに

我々は，これまで，作図と問題解決の過程について認知科学的方法でさまざまな研究を行ってきた[1)~4)]．この中で，我々は，DIPS (Deagrammatic 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試みてきた．このモデルの概念図が**図 1** である．

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，短期的に一種の作業記憶としての「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，必要な情報を外部から得るために「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もとに，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．

これまでの研究では，文献 1) では，この DIPS の概要を説明し，文献 2) 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，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．

本論文では，問題解決行動をするためのもとと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，心理実験を通して調べる．そして，この心理実験の結果と従来の研究の知見をもとに，仮説として内部表象部の状態に連動して変化する知識ベースのモデルを提案する．

† 名古屋大学工学部
School of Engineering, Nagoya University

* ここでは，「情報」とは，世の中にあるさまざまな事柄を指し，「知識」とは，情報が脳内で使える形に変化したものと捉えている．

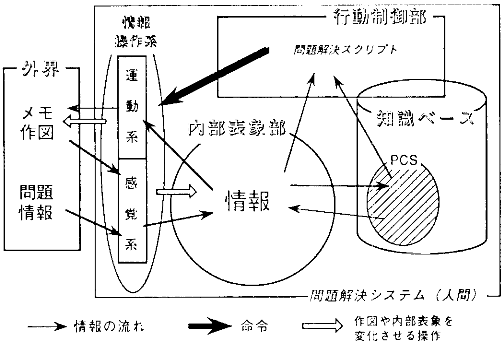


図 1 認知モデル (DIPS) の概要
Fig. 1 An outline of the cognitive model (DIPS).

2. 心理実験

2.1 目　　的

幾何の問題解決において，作図可，不可に応じて想起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．

2.2 方　　法

実験では，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な被験者に教示をし，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．問題としては，初等幾何の証明問題を一人当たり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（付録参照）．

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．したがって，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）とし，被験者は二つの条件にあわせて，3人ずつの2グループに分けた．

2.3 結　　果

4条件間の実験の結果をまとめたのが**表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」との間にみられた．ここでは典型例として，**図2**に二つの条件（「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，その主な比較結果を以下に列挙する．

- どちらの条件でも，発話内容に現れる幾何学の知識，すなわち問題解決の過程で想起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，（平均時間にして約1.5倍ほど）長かった．
- 「N問題，不可条件」では，知識がバラバラに想起され，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．

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，もっと想起される内容が少なく，もっと間違ったり，問題解決にとって無意味な想起が多く生じ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想起がなされた．

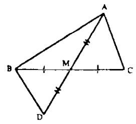
この理由としては，もちろん被験者の能力に比して問題自体が簡単過ぎたということが考えられる．しかし，この結果から，少なくとも大学生のような抽象的表現の処理に習熟した者にとっては，文的な情報だけで，自分の持っている知識ベース中から（解決に関係したという）経験に基づいて関連した知識だけを取り出しやすくする機能があることが示唆される．

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

表 1 実験の四つの条件のまとめ
Table 1 Summary of the results on four conditions of the experiment.

	不可条件	可条件
N問題	・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	・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	・関連する内容がすぐに見つかる ・指摘の順序がバラバラ	・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

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。
・△ABCと△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
・△AMCと△DMBの合同？
・AM=MD
・BM=MC
・対頂角AMC=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 2 実験結果の二つの典型例
Fig. 2 Two typical results of the experiment.

と，想起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もとにして，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，必要な知識が取り出しやすく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もって接合し，一つのまとまりをもった図として外部に保持される．頭の中の内部表象部の作業記憶空間の容量限界（7±2）を超える情報量のときは，頭の内部にすべて保持しておくことは困難となり，細部にわたって保持し整理するために外部に作図すると考えられる．

3. 知識ベースモデル

問題が与えられたとき，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として扱われている[5]．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[5]．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，我々は考える．

従来の研究[1)~4)]と今回の実験の結果を踏まえて，我々は，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．

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いえる．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やす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 (Problem Concern Space) である．

まず，内部表象部に入ってきた情報が鍵となり知識ベースに伝えられ，その情報に密接に結びついている知識が関連する知識として発火する．その発火は，繰り返し行われる学習によって形成された（経験に基づいた）内部表象部と知識ベースの結びつきによって連鎖的に起こると考えられ，徐々に自動化されていくと考えている☆．知識ベース中の知識も，お互いに関連

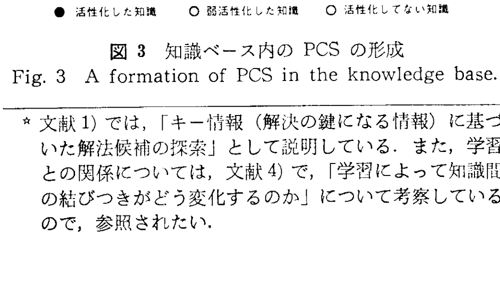


図 3 知識ベース内の PCS の形成
Fig. 3 A formation of PCS in the knowledge base.

☆ 文献1）では，「キー情報（解決の鍵になる情報）に基づいた解法候補の探索」として説明している．また，学習との関係については，文献4）で，「学習によって知識間の結びつきがどう変化するのか」について考察しているので，参照されたい．

する内容同士が結びついていて（例えば，図2では，「三角形の合同」に対する「各辺が相等になる」などの知識のような結びつき），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3**）．

PCS の形成手順を整理すると以下のようになる．

（1）鍵となる情報が内部表象部に入ると，そこで最初の発火が生じる．

（2）その情報と関連する知識が（連想記憶機構により）知識ベース内で活性化する*．

（3）知識ベース内では，関連を持った知識が互いに結びついていて，そのつながりを通って次々に発火が広がり，PCS を形成する．

また，PCS には，以下のような性質があると考えている．

- PCS 内の理識は，弱い活性化状態なので，そのままでは内部表象部には転送されず，意識にのぼらない．
- PCS 内の弱い活性化状態の知識は，行動制御部の命令によって，より強い活性化状態になり，内部表象部に取り出され，意識にのぼる．
- 内部表象部に入ってくる情報の変化に応じて，PCS も連動して刻々と変化する．
- 活性化状態にあるため，PCS 内の知識の探索は，早い．
- PCS 以外の知識の探索は，困難になる．（いったん見つけた解決方略に固執するケースなどはこれに当たると考えられる．）

3.2 実験との比較

上記のような PCS を想定すると，実験の結果も，うまく説明できる．

問題文中に含まれる情報が，内部表象部に伝達され，その情報が鍵となり，知識ベースは，関連する知識空間として PCS 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知識ベースから取り出されたといえよう．弱い活性化状態なので，積極的に注意を向けない（行動制御部の命令によって，より強い活性化状態にしない）と知識は内部表象部に現れず意識にのぼらないが，作図などの図的情報があれば，PCS 内の情報が関連づけて見渡せるようになっているので，必要な情報や知識を順序よく整理して内部表象部で処理できると考えられる．

このように，PCS 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なくなった．そして，作図行動は，PCS を外部に詳細に保持するという機能によって，内部表象部の処理の助けになっていることが示唆された*．

* 鍵となる情報に関連して最初に発火する知識だけは，広い知識ベース内から連想記憶機構により想起されると考えている．問題解決過程で，最初の知識がうまく見つからないと，何をしてよいのかわからない状態となる．

* 文献2）の中で，「作図利用の三つの利点（保持性，操作性，全体性）」として説明した内容と一致する．

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，PCS の形成され方や，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，PCS の観点から詳細な調査が必要だろう．

5. まとめ

問題解決において作図ができる場合とできない場合で，想起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，経験に基づいて形成される PCS という仮説概念を用いて，説明した．

参考文献

1) 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 D Ⅱ，Vol. J 75-D-Ⅱ，No. 10, pp. 1701-1712（1992）．
2) 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）．
3) 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—，情報処理学会ヒューマンインターフェース研究会報告，93-HI-49, pp. 25-31（1993）．
4) 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，情報処理学会ヒューマンインターフェース研究会報告，93-HI-47, pp. 101-108（1993）．
5) 松原　仁，山本和彦：フレーム問題について，人工知能学会誌，2（3），pp. 266-272（1987）．

付録　実験に使った問題（問題図は省略）

（問題１）
∠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，△BAD≡△ACE となることを証明せよ．

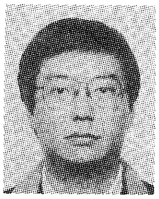
（問題３）
平行四辺形 ABCD で，AE＝BF＝CG＝DH である．このとき，四角形 EFGH は平行四辺形であることを証明せよ．

（問題４）
AD//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から二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＝一定であることを証明せよ．

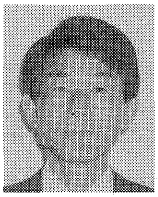
（問題６）
三角形 ABC の辺 BC の中点をＭとし，AM を延長してその上に点Ｄをとり，DM＝AM とすれば，BD＝CA であることを証明せよ．

（平成５年11月９日受付）
（平成６年４月21日採録）



伊藤　毅志

昭和39年生．昭和63年北海道大学文学部行動科学科卒業．平成６年名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了．工学博士．現在電気通信大学情報工学科助手．認知科学，ヒューマンインタフェースの研究に従事．電子情報通信学会，認知科学会各会員．



大西　　昇（正会員）

昭和48年名古屋大学工学部電気卒業．昭和50年同大学院電気工学専攻修士課程修了．同年労働福祉事業団労災リハビリテーション工学センター研究員．昭和59年主席研究員．昭和61年名古屋大学工学部電気工学第二学科講師．平成元年助教授．平成５年同情報工学科助教授，平成６年同教授，現在に至る．生体工学，福祉工学，人工知能，ロボティクスなどの研究・教育に従事．工学博士．電子情報通信学会，計測自動制御学会，ロボット学会，バイオメカニズム学会，IEEE 等各会員．

杉江　　昇（正会員）

昭和32年名古屋大学工学部電気卒業．同年通商産業省電子技術総合研究所入所．昭和37～39年カナダ・マギル大学客員研究員．昭和45年バイオニクス研究室長．昭和53年視覚情報研究室長．昭和54年名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻教授．昭和60年同大学工学部電気工学第二学科教授．平成２年同大学工学部情報工学科教授および同大学大型計算機センター長兼任，現在に至る．バイオニクス，医用工学，コンピュータビジョン，自然言語処理などの研究・教育に従事．工学博士．電気学会，電子情報通信学会，計測自動制御学会，ロボット学会，エム・イー学会，テレビジョン学会，バイオメカニズム学会，日本神経回路学会，IEEE 等各会員．