

問題解決における状態空間の抽象化に関する実験的検討 An Experimental Study of State Space Abstraction in Problem Solving

寺井 仁^{†‡}, 三輪 和久[†]
Hitoshi Terai, Kazuhisa Miwa

[†]名古屋大学大学院情報科学研究科, [‡]JST/CREST
[†]Graduate School of Information Science, Nagoya University, [‡]CREST, JST
{terai, miwa}@is.nagoya-u.ac.jp

Abstract

This study investigated process of state space abstraction in problem solving from the view point of dual space search framework. In our experiment, we used 2 x 2 x 2 Rubik's Cube (Pocket Cube) as an experimental task. Two graduate students participated in our experiments. The state space consists of a huge amount of states over 3 million; distance among each state cannot be perceived directly. Therefore, they could not find the rule to solve the cube as long as they search of the state space. They needed to capture their current state within an abstracted state space. The results showed that same tendency was confirmed between the participants: (1) they searched within state space for the goal state using weak methods (hill climb and means-ends analysis) and then failed to solve it repeatedly, (2) they found an incomplete abstracted sub-state as a result of search of state space, (3) they captured their current state within their own abstracted state space, (4) finally, they found their own strategies to solve the cube based on search of the abstracted state and rule spaces.

Keywords — abstraction, dual space search, rule discovery, state space, rule space

1. はじめに

1.1 背景

問題解決研究では、問題解決プロセスを実験室研究の枠組みで捉えるために、ハノイの塔に代表されるパズル課題、チェスや将棋を用いたゲーム課題、および代数や力学を題材とした学習課題が広く利用され検討が行われてきた。これらの研究を通して、問題解決プロセスは、問題空間の探索として理解が進められてきた[3, 6]。Simon and Lea (1974)は、問題解決プロセスを、実際に観察され物理的に操作可能な事象からなる「状態空間（事例空間）」に加え、背後に潜む法則性を検討する

際に構成される心的な「ルール空間」と呼ばれる2つの空間の探索およびその相互作用によって達成されるとした。例えば、ハノイの塔を解く場合、ディスク操作が状態空間の探索に相当し、問題解決のための解決方略の探索がルール空間の探索に相当する。Simon (1975)は、ハノイの塔の解決時に使用されるうる複数の方略を知覚および記憶の観点から整理しているが、同様の方略が、発話プロトコル実験を通して、問題解決を繰り返していく中で獲得および変化していく様子が実験的にも示されている[1]。

Klahr and Dunbar (1988)は、このような質の異なる2つの問題空間（状態空間に対応する「実験空間」とルール空間に対応する「仮説空間」）の探索として *dual space search* の枠組みを提案し、科学的発見プロセスの理解を進めた。

Dual space search のフレームワークに基づく研究は、数分で解決可能なハノイの塔のようなパズル課題だけでなく、解決に1時間前後を要する、より複雑なルール空間を構成する課題にも拡張されてきた[4]。課題の複雑性は、ルール空間の複雑性だけでなく、状態空間の複雑性の観点からも議論することが可能である。しかしながら、状態空間の複雑性を対象とした実験的検討はほとんど行われていない。

例えば、ハノイの塔において、使用されるディスクの数を増加させることによって、状態空間のサイズを増大させることは可能である。しかしながら、ハノイの塔は、状態間の類似性や差異を知覚的に直接把握することが可能である。そのため、状態空間が増大しても状態空間内における状態のとらえ方は本質的に変化せず、ディスクの数が少ない場合と同様に問題解決が可能となる。

これに対して、状態空間の構造の把握が困難な状況として、状態空間に含まれる状態間の関係が知覚的に把握困難な場合を考えることができる。状態数が実質的に無限に存在し、なおかつ、個々の状態間の関係性の識別が困難な場合、状態を一旦抽象化し、限られた状態間の関係として現象の理

解を進めることが必要になると考えられる。このような問題構造を持つ問題に対して、解決がどのように進められているかを明らかにすることは、ゲームに限らず、現象の構造的な理解が求められる数学や化学、物理学、生物学など科学的活動を支える問題解決の理解においても重要な観点であると考えられる。

本研究では、*dual space search*を理論的背景とし、状態空間の構造を直接把握することが困難な問題解決状況における、状態空間の構造の理解とルール獲得のプロセスを明らかにすることを問いとして、実験的検討を試みる。

2. 実験

2.1 方法

2.1.1 実験参加者

工学研究科の修士課程に所属する男子学生2名（以降、参加者A、参加者Bと呼ぶ）を参加者とした。

2.1.2 課題

ハノイの塔などと比較し膨大な状態空間を形成し、加えて、個々の状態間の関係を識別することが困難な課題として、本研究では、 $2 \times 2 \times 2$ のルービックキューブ（以下、キューブ）に着目した。

キューブは8つのピースから構成される正6面体の置換パズルであり、6つの面に対する左右の回転操作だけが許されたwell-definedな問題である。任意の状態から6つの面の色を揃えるために要するステップ数は、 90° の回転を1回の操作とした場合、最大14ステップ以内で解くことが可能である。しかしながら、ピースの組み合わせは300万通り以上存在し、膨大な状態空間を持つ（例えば、5枚ディスクのハノイの塔の状態数は243である）。また、1回の操作は4つのピースの置換を伴うため、状態間の距離を認識することは困難であり、さらに、3次元パズルという性質から、視点によって状態の見えが大きく変化する。

以上の特徴から、キューブは、ハノイの塔とは異なり、（1）問題解決において任意の状態を再現することが困難であり、（2）目標状態を達成するために個別の副目標状態を設定することは難しく、そして（3）オペレータによって変化する状態間の距離を把握することが困難となる。このことから、キューブの問題解決においては、状態空間を直接探索するのではなく、状態空間を一旦抽象的な形で捉え直し、限られた抽象的状态空間を対象に探索を進めることが重要な役割を果たすと予想される。

なお、実験を開始するにあたり、参加者2名はいずれも本研究で用いたキューブおよびそれに類する課題（ $3 \times 3 \times 3$ のRubik's Cubeなど）についての解法を知らず、また、過去にルールを獲得することを目的に取り組んだことがないことを確認している。

2.1.3 手続き

実験に先立ち、覆面算課題を用いて発話練習を10分前後行った。実験では、キューブを参加者に与え、任意の状態から6つの面の色を揃える（キューブを完成する）プロセスについて観察を行った。参加者の目的は、任意の状態からキューブを完成するための方法が明確に説明することができるようになることとし、連続して5回、意図通りにキューブを完成できることを確認後、実験を終了した。なお、参加者には、キューブの他にノートとボールペンが与えられ、自由な使用が許された。

実験は、1回の試行を約30分とし、10分間の休憩時間を挟み、繰り返し行った（30分は目安として設けられ、切りの良いところまで課題を続けても良いとした）。実験中、参加者には発話を求め、キューブの操作やノートへの記録は複数のビデオカメラによって撮影された（図1）。また、試行の終了毎に、（1）問題解決時の観点、（2）その過程で発見された方略、（3）問題解決において困難に感じている点について事後インタビューを行った。

なお、実験は数日間に渡って行われたため、実験参加中は、（1）キューブを実験時間外では扱わない、（2）キューブに関連する情報収集を行わないことを実験参加の条件とした。

2.2 結果

ルールの発見までに要した時間は、参加者Aが約37時間、参加者Bが約19時間であった。

2名の参加者が獲得したルールは異なるものであったが、試行終了毎の事後インタビューの分析の結果から、そのプロセスには以下の共通する特徴が認められた。

- （1）weak methodsを用いた状態空間の探索と失敗
- （2）不完全な抽象的副目標状態の発見
- （3）状態空間の抽象化とルール空間の探索
- （4）抽象化された状態空間で問題を解決するためのルールの発見



図1 実験の様子

以下では、参加者Aの例を上記のプロセスに対応させて具体的に示す。

(1) weak methodsを用いた状態空間の探索と失敗

問題解決の初期において、参加者は問題解決のためのルールを獲得してないため、8つのピースが揃ったキューブの完成形を目標状態として、weak methodsの一つである「山登り方略」が用いられた。ここでは、ピースの単純な入れ替えなどの部分的で基本的な操作の学習が同時に行われ、状態空間上での山登り方略に基づく状態遷移が進められた。

その結果、4つのピースを揃えた状態（1面の色が揃っており、かつ、その辺の色も揃っている状態）を容易に達成することができるようになった（図2）。しかしながら、山登り方略ではこれ以上目標状態に近づけることは不可能となり、手詰まりの状態に陥った。この状態からさらにピースを揃えるためには、既に揃っている4つのピースを一旦崩さなければ先に進むことができないためである。

山登り方略で手詰まりとなった後、4つのピースが揃った状態から目標状態を目指すため、手段-目標分析方略に基づき、状態空間における副目標状態の探索が進められた。しかしながら、4つのピースが揃った状態とは、残る4つのピースによって状態の変化によって様々な状態を取り得ることから、それらに共通した特定の副目標状態を発見することは困難である。そのため、手段-目標分析方略に方略を切り替え、副目標状態を探し続けるが、望まれていた副目標状態を見つけることはできなかった。

(2) 不完全な抽象的副目標状態の発見

前述の手段-目標分析方略に基づく副目標状態の



図2 4つのピースが揃った状態

Note. 上部4つのピースが揃えられていることが確認される。この状態から下部4つのピースを揃えるためには、一旦、既に揃っている上部4つのピースを崩さなければならない。

探索を繰り返していく中で、目標状態につながる抽象的副目標状態（ある制約を満たした状態の集まり）が獲得された。具体的には、2つのピースを揃えた後、残りの6つのピースを3組のペアとして考え、各ペアが「一定の制約」を満たしていれば、目標状態に到達できるだろうというものであった（図3に参加者がノートに記述した抽象的副目標状態の例を示す）。ただし、ここで発見された抽象的副目標状態は状態空間の探索の結果として獲得されたものであり、不完全な副目標である。発見された抽象的副目標状態は正確には複数の抽象的副目標状態が組み合わせられたものであるため、それが理解されるまで、あるときは目標状態にたどり着けるが、あるときはたどり着けないということを経験することとなった。

(3) 状態空間の抽象化とルール空間の探索

一旦、目標状態を達成することが可能な不完全な抽象的副目標状態が発見されることにより、任意の初期状態から抽象的副目標状態の達成およびそこから目標状態を達成するために、不完全な抽

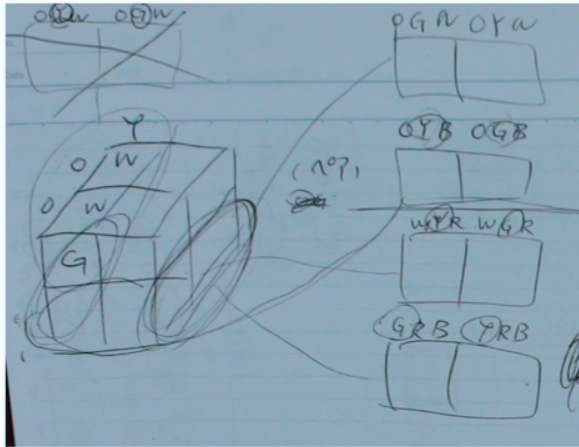


図3 抽象的副目標状態の例

Note. 左に描かれたキューブは2つのピースが揃っていることを示し、残りの3組のペアについての制約が右に描かれている。なお、インタビューの結果から、色の表記（例：W = 白）は便宜的で他の組み合わせも可能であり、抽象的副目標状態を表していることが確認された。

象的副目標状態の精緻化とさらなる抽象的副目標状態の探索が進められた。特に、最初に作られた抽象的副目標状態と目標状態の距離が近かったため、任意の初期状態から抽象的副目標状態に至る方法について、そこを起点とした後ろ向きの探索が進められた。しかしながら、ここでは、単に後ろ向きに状態遷移を追っていくだけではなく、そこにどのようなパターンが現れるのかに着目した抽象的状态空間を意識した探索が行われ、その構造が明らかにされた。

（4）抽象的状态空間で問題を解決するためのルールの発見

以上のプロセスを通して、現在の状態を抽象的状态空間で捉え直すことにより、抽象的状态空間とルール空間の2つの問題空間での探索が可能となり、その結果、任意の状態から目標状態に至るための統一的なルールの獲得に成功した。

状態空間の抽象化の方法、および最終的に獲得されるルールは問題解決者毎に大きく異なっていた。しかしながら、以上のプロセスは、参加者Bでも同様に認められるだけでなく、本研究の開始に先立ち著者の一人が取り組んだ場合にも同様に認められ、普遍的なプロセスであることが示唆された。

3. 考察とまとめ

本研究では、状態空間の抽象化が問題解決に果たす役割について、キューブを用いた実験的な検

討を進めてきた。

実験の結果から、状態空間の直接的な把握が困難な問題解決状況においても、問題解決初期には状態空間とルール空間においてルールの探索が進められていることが確認された。そして、状態空間とルール空間の探索を繰り返していく中で抽象的副目標状態が発見され、それを軸として、抽象的状态空間が形成されていった。そして、抽象的状态空間が構成されるに従って、状態の理解は抽象的状态空間においてなされ、ルールの発見は抽象的状态空間とルール空間の探索を通して達成された。これらの結果を通して、個々の状態を個別に識別することが困難な問題解決状況では、状態空間とルール空間の探索では問題解決に至らず、状態空間から抽象的状态空間を生成するプロセスが重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

Chase and Simon (1973)によるチェスを対象とした研究では、エキスパートが持つ優れた能力は、コマの特定の配置を一つのチャンクとして記憶することによって支えられていることが明らかにされた。チャンクは個々の事例をあるまとまりとして捉えるという意味において、一種の抽象化であると捉えることができる。しかしながら、チェスにおけるチャンクは問題解決の効率化に寄与するが、チャンクを作ることができなくても問題を解決することは可能である。また、本研究におけるキューブの解決では、状態空間の抽象化は、状態に対する表象の転換を伴っていると考えられる。

今後、新たな実験参加者によるデータ収集を進めると共に、抽象的副目標状態がどのように発見されるのか、また、抽象的問題空間が精緻化されるプロセスについて、状態空間、抽象的状态空間、およびルール空間の探索の観点から、発話プロトコルおよび行動データに基づく理解を進める。

参考文献

- [1] Anzai, Y. & Simon, H. A. (1979). The theory of learning by doing. *Psychological Review*, 86(2), 124-140.
- [2] Chase, W. G. & Simon, H. A. (1973). Perception in chess. *Cognitive Psychology*, 4, 55-81.
- [3] Klahr, D. & Dunbar, K. (1988). Dual space search during scientific reasoning. *Cognitive Science*, 12, 1-55.
- [4] Klahr, D. (2000). Exploring science: The cognition and development of discovery processes. MA: MIT Press.
- [5] Simon, H. A. (1975). The functional equivalence of problem solving skills. *Cognitive Psychology*, 7, 268-288.
- [6] Simon, H. A. & Lea, G. (1974). Problem solving and rule induction: A unified view. In L. W. Gregg (Ed.), *Knowledge and Cognition*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.