

Problem solving with a simple transformation problem with and without continuous external memory support

Till Pfeiffer

European Journal of Cognitive Psychology, 16, 555-572

<はじめに>

- ・ 外的表象の使用は、問題解決において強力な道具となり得る。
 - － 紙とペンのような一般的な道具から生成される外的表象
 - 学習の促進やよりよい問題解決方略の生成につながる(Cary & Carlson, 1999).
 - － 問題の物理的特性としての外的表象
 - 問題解決のステップ数やエラー数を削減し、問題解決時間を短くする(Zhang & Norman, 1994).
 - － 問題解決における外的表象としての図
 - 実験的、論理的に有効性について調べられてきている(e.g., Larkin & Simon, 1987; Novick & Morse, 2000; Scaife & Rogers, 1996).

- ・ 情報の管理や操作のための認知的容量は限られている。
 - － 外的記憶資源の使用により、認知的負荷を削減する。
 - しかし、人間は内的表象のみで問題解決を行うこともある。
 - 問題が非常に簡単であるとき
 - 問題解決者が特殊な符号化の技術を持っているとき

<先行研究>

Zhang & Norman(1994)

- ・ 異種同型のハノイの塔を使用した実験。
 - － 作業記憶の負担は、ルールが適応される操作の貯蔵と評価に起因する。

Cary & Carlson(2001)

- ・ 途中結果を記憶する必要のある計算問題を使用した実験。
 - － 外的記憶資源の使用するコストよりも、外的記憶資源の使用により得られる利益が高いと考えられるときのみ外的記憶資源は使用される。
 - Cost-Benefit analysis(費用便益分析)に従う。

O'Hara & Payne(1998)

- ・ 操作の実行コストが高い場合、問題解決方略について熟考する。
 - － 余分な操作の実行を回避することによって、総合的な認知的負荷を削減。
- ・ 操作の実行コストが低い場合、十分な計画なしに問題空間探索を行う。
 - － 総合的な認知的負荷を削減。

<研究の目的>

- ・ 問題解決における cost-benefit analysis について検討を行う。
 - ① 変形問題(transformation problem)
 - － O'Hara & Payne(1998) や Zhang & Norman(1994)は変形問題を用いたが、外的記憶資源の利用可能性を操作していない。
 - － Cary & Carlson(2001)は外的記憶資源の利用可能性を操作したが、変形問題を扱っていない。
 - cost-benefit analysis を変形問題に適応。
 - ② 外的記憶資源の使用不可条件
 - － Cary & Carlson(2001)の実験では、外的記憶資源の使用不可の場合でも、残りの問題数は常に表示されていた。
 - 本研究では、問題解決者は全ての情報を内的に表象しなければならない。
 - ③ 操作の実行コスト
 - － 外的記憶資源の使用／未使用条件で、実行コスト高／低の影響を検討する。
 - － 実行コストが高い場合
 - 外的表象が提供されていても、計画について熟考するだろうか？
 - － 実行コストが低い場合
 - 外的記憶資源を使用せずに問題解決を行うだろうか？
 - 計画について熟考せずに問題空間を探索するだろうか？
 - ④ cost-benefit analysis
 - － 外的記憶資源の使用／未使用条件での cost-benefit analysis について検討する。

<課題>

- ・ Kotovsky & Simon(1990)で使用された balls and boxes puzzle
 - － chinese ring puzzle と異種同型

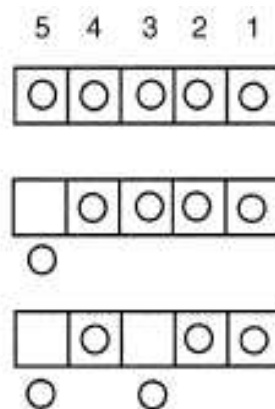


Figure 1. The start state and two following problem states of the five balls and boxes puzzle. Note: In the experiments reported here, the numerical labels of the balls and boxes were not shown.

ルール

- ・ 初期状態：5つのボールが箱の中にある状態。
目標状態：5つのボールが箱の外にある状態。
- ・ 左端のボールは制約なしに動かすことができる。
- ・ 左端以外のボール
 - － 左隣のボールが箱の中にあり、もうひとつ左隣のボールが外にある状態
→ ボールを動かすことができる。
 - － 4番目のボールは、5番目のボールが箱の中にあれば動かすことができる。
- ・ Kotovsky & Simon(1990)の実験では…
 - － ルールを知らない被験者の大半は目標状態に到達しない。
 - － ルールを知っている被験者は全員が目標状態に達成した。

<実験1>

目的

- ・ 実行コストが高い／外的記憶資源を使用できない時
 - － 問題解決方略について熟考することで余分な操作とエラーを避け、総合的な認知的負荷を削減させる。
→ 2つの要因に関して共通。
 - ・ 実行コストが低い／外的記憶資源を使用できない時
 - 2つの要因は競合する。
- ⇒ 問題解決における実行コストと外的記憶資源の2つの要因の相対的な強度を比較する。

方法

被験者

- ・ University of Regensburg の大学生 40人

材料

- ・ モニターに幅3センチの5つの箱が提示される。
 - － 外的記憶資源使用：ボールが箱から出されれば箱の外にボールが表示。
 - － 外的記憶資源未使用：5つの箱のみが提示。

要因計画

- ・ 2(外的記憶資源使用／未使用：被験者間)×2(実行コスト高／低：被験者間)×5(試行数：被験者内)
 - － 実行コスト高：口頭で操作を実験者に告げる。
 - － 実行コスト低：マウスで直接操作する。

手順

- ・ 教示はモニターで表示した.
- ・ 教示後, 被験者には balls and boxes puzzle のルールをもう一度音読させた.
- ・ 全ての被験者には, デモンストレーションとして, ボールが見える状態で左端のボールの移動を行わせた.
- ・ 外的記憶資源未使用の条件では, 現在の状況を表示することができた.
 - － 実行コスト高では口頭, 実行コスト低では”info”ボタンをクリック
 - 現在の状況を更新するためだけに使用するよう指示した.
- ・ ボール移動のエラーは, beep 音により被験者に知らされた.

結果

- ・ パートレット検定により分散の均一性がみとめられなかった場合, グリーンハウス-ガイザーのイプシロンを用いて自由度の調整を行った.

移動回数

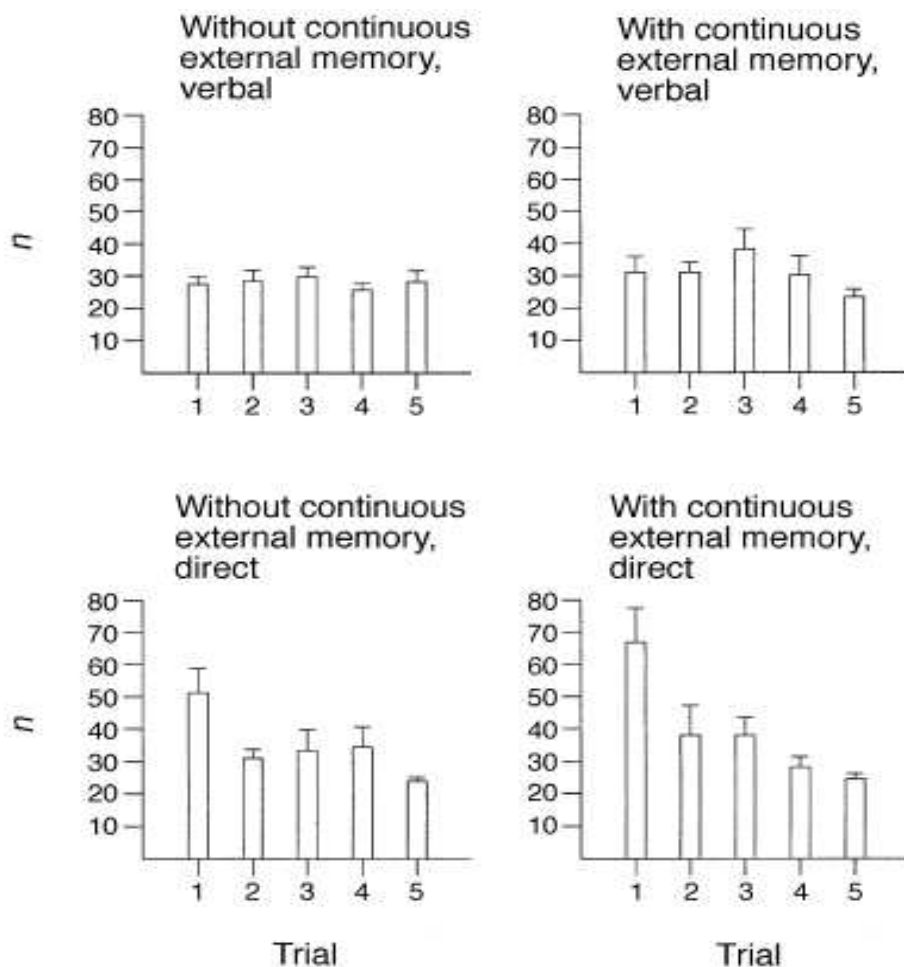


Figure 2. Experiment 1. Number of moves in five repeated solutions of the five balls and boxes puzzle with or without continuous external memory support using verbal commands or direct manipulation to enter a move.

- $2 \times 2 \times 5$ の分散分析を行った結果
 - 外的記憶資源要因の主効果はみられなかった($F(1, 36)=1.43, p=.24$).
 - 実行コスト要因の主効果がみられた($F(1, 36)=6.24, p<.05$).
 - 移動回数は、実行コスト高の方が低よりも有意に少ない。
 - これら 2 要因の交互作用はみられなかった($F<1$).

試行数要因に関して

- 試行数要因の主効果がみられた($\epsilon=0.707, F(3, 102)=9.16, p<.001$).
- 実行コスト要因と試行数要因に交互作用がみられた($F(3, 102)=7.14, p<.001$).
- その他の交互作用はみられなかった($Fs<1.09$).
- 実行コスト高では、試行数要因の線形傾向が有意でなかった($F(1, 19)=3.83, p=.07$).
- 実行コスト低では、試行数要因の線形傾向が有意であった($F(1, 19)=25.6, p<.001$).

エラー数

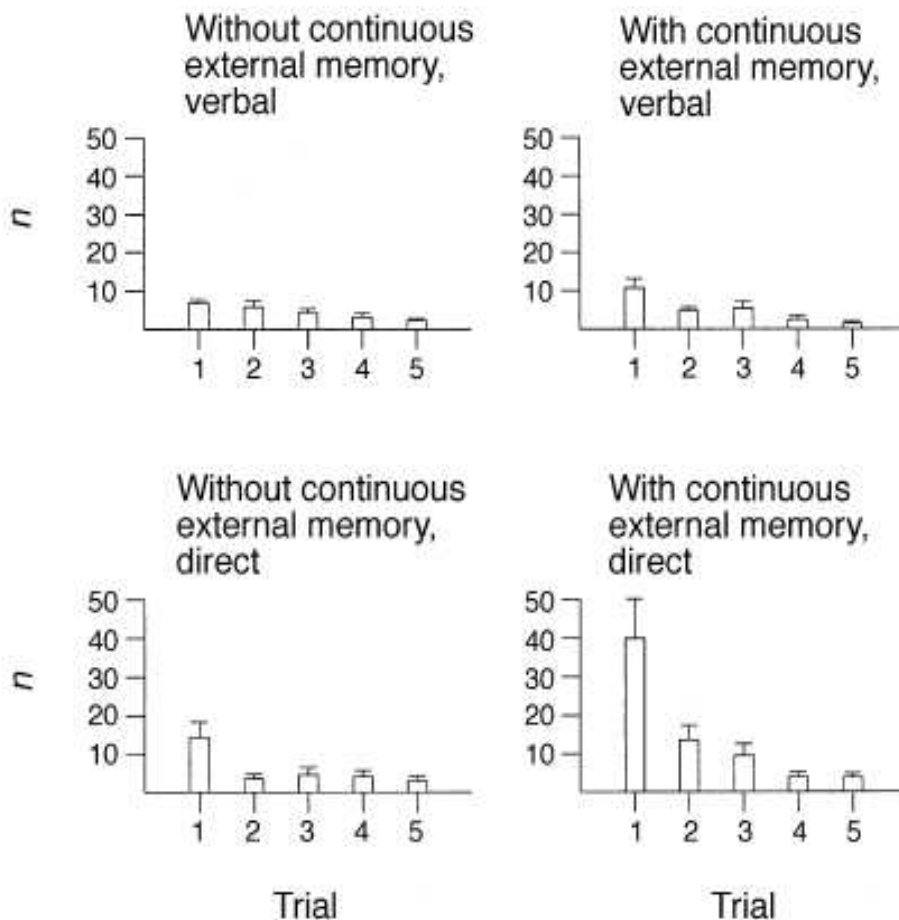


Figure 3. Experiment 1. Number of errors in five repeated solutions of the five balls and boxes puzzle with or without continuous external memory support using verbal commands or direct manipulation to enter a move.

- 外的記憶資源要因の主効果がみられた($F(1, 36)=5.94, p<.05$).
- 実行コスト要因の主効果がみられた($F(1, 36)=9.05, p<.01$).
- これら 2 要因の交互作用がみられた($F(1, 36)=4.70, p<.05$).

試行数要因に関して

- 試行数要因の主効果がみられた($\epsilon = 0.36, F(1, 52)=21.79, p<.001$).
- 外的記憶資源要因と試行数要因に交互作用がみられた($F(1, 52)=5.36, p<.05$).
- 実行コスト要因と試行数要因に交互作用がみられた($F(1, 52)=7.73, p<.01$).
- 2 次の交互作用はみられなかった($F(1, 52)=2.79, p=.10$).
- 4 条件で、試行数要因の線形傾向が有意であった。
- 実行コスト低の外的記憶資源使用／未使用では、試行数要因の 2 次曲線傾向が有意であった。

時間

- 各試行の 1 回の移動にかかる時間の中央値。
- 実行コスト高と実行コスト低をそれぞれ分割して分析。

実行コスト高

- 試行数要因の主効果がみられた($\epsilon = 0.35, F(4, 72)=17.08, p<.001$).
- 1 試行目(4.21 s)→5 試行目(1.51 s)
- 外的記憶資源要因の主効果はみられなかった($F(1, 18)=1.54, p=.23$).
- これら 2 要因の交互作用はみられなかった($F<1$).

実行コスト低

- 試行数要因の主効果がみられた($\epsilon = 0.66, F(4, 72)=28.35, p<.001$).
- 1 試行目(2.25 s)→5 試行目(1.04 s)
- 外的記憶資源要因の主効果はみられなかった($F(1, 18)=2.27, p=.14$).
- これら 2 要因の交互作用はみられなかった($F(4, 72)=1.59, p=.21$).

現在状況の表示

TABLE 1
Experiment 1. Number of calls for a display of the current problem state in five repeated solutions of the five balls and boxes puzzle in problem solving without continuous external memory support

Trial	1	2	3	4	5
Verbal command	3.20	2.50	2.10	1.80	1.90
Direct manipulation	14.20	6.20	6.70	5.10	2.90

Moves were entered either by verbal commands or using a direct manipulation interface.

- ・ 外的記憶資源未使用条件のみ分析。
 - － 実行コスト要因の主効果がみられた($\epsilon = 0.464$, $F(1, 18) = 5.85$, $p < .05$).
 - － 試行数の主効果がみられた($F(2, 33) = 9.27$, $p < .001$).
 - － これら 2 要因の交互作用がみられた($F(2, 33) = 5.66$, $p < .01$).

考察

外的記憶資源使用／未使用

- ・ パフォーマンスはほぼ同等であった。
 - － 外的記憶資源未使用では…
 - 余分な移動はなかった。
 - エラー数は外的記憶資源使用よりも少なかった。
 - － 外的記憶資源使用／未使用で学習効果がみられた。
 - － 外的記憶資源使用／未使用で移動にかかる時間に差はなかった。

⇒ 外的記憶資源未使用での結果は **cost-benefit analysis** に従う

 - 余分な操作とエラーを避け、総合的な認知的負荷を削減させる。

実行コスト高／低

- ・ O'Hara & Payne(1998)と同様の結果。
 - － 実行コスト高は低に比べ、移動回数が少なく、エラーが少なく。

⇒ 実行コストが高い場合、外的記憶資源使用／未使用に関わらず計画について熟考する。

現在状況の表示

- ・ 2通りの説明
 - － 実行コスト高よりも低の方が、多く現在の状況を表示させた。
 - ① 現在の状況を表示させるコストの違い。
 - ② Baddeley(1986)の仮説に従えば…
 - 実行コスト低／外的記憶資源未使用の場合、現在状況の表示回数が多かった。
 - 手の動きとイメージ操作の不一致により生じる。

<実験 2>

目的

- ・ ボール 3, 5, 7 個の balls and boxes puzzle で実験 1 の追試を行う。
 - 外的記憶資源使用／未使用が同等のパフォーマンスである。
- ・ 実験 1 との違い
 - ① 異なる課題による練習効果の違いを検証。
 - ② 実験 1 よりも大きな問題空間を持つボール 7 個の puzzle で転移課題を行う。

- ③ 実験 1 よりも多くの被験者。
 - 外的記憶資源使用／未使用が同等のパフォーマンスであることを検証.
- ④ 実験の最後に他の人へ問題解決のアドバイスを記述させる。
 - 外的記憶資源使用／未使用で言語的知識の獲得に違いがあるか検証.

方法

被験者

- ・ 大学生 72 人. 外的記憶資源使用／未使用：36 人ずつ.
- ・ 下記以外の材料, 手続きは実験 1 と同じ.
 - ボール 3, 5, 7 個の balls and boxes puzzle を順に行う.
 - 箱の大きさをボール 5 個のとき(実験 1)と同じ大きさに調整.

結果

- ・ ボール 3, 5, 7 個の balls and boxes puzzle はそれぞれ 7, 31, 127 の問題状態を持つ.
 - 最短移動回数はそれぞれ 5, 21, 83.

移動回数

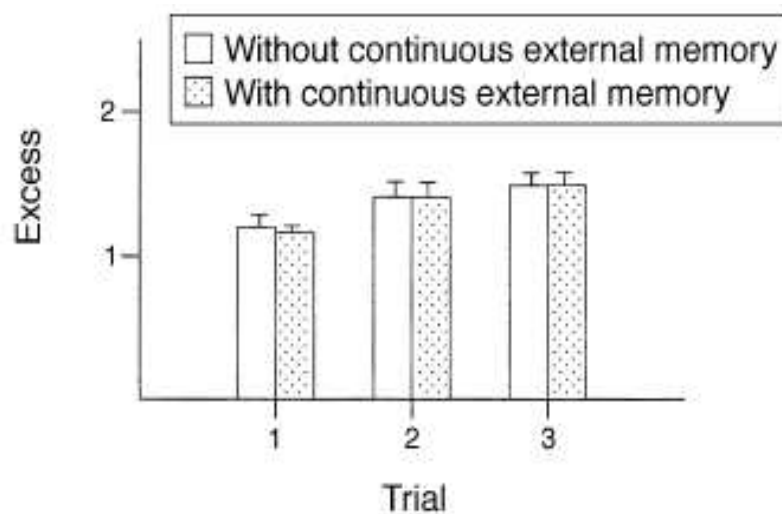


Figure 4. Experiment 2. Excess of legal moves in trials 1 to 3 with the three, five, and seven balls puzzle. The excess is the ratio of the number of legal moves to the minimally necessary number of moves. The minimal number of moves is 5, 21, and 83 in the three, five, and seven balls puzzle, respectively.

- ・ excess(ルールに従った移動回数 対 目標状態への最短移動回数の比率)を算出.
 - 試行回数要因の主効果がみられた($F(2, 136)=7.33, p<.01$).
 - 外的記憶資源要因の主効果はみられなかった($F<1$).
 - これら 2 要因の交互作用はみられなかった($F<1$).

エラー数

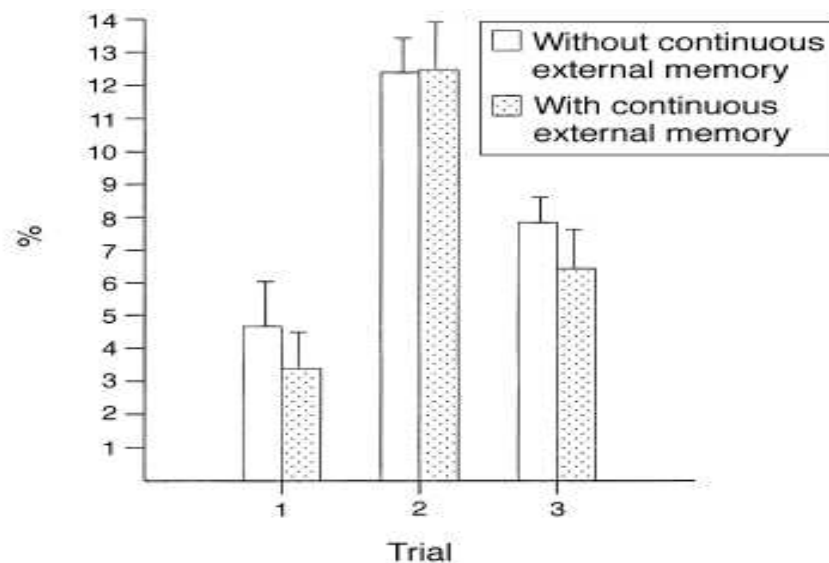


Figure 5. Experiment 2. Percentage of errors in three successive solutions of the three, five, and seven balls and boxes puzzle in trials 1, 2, and 3.

- 全ての移動回数とエラー数の割合を算出。
 - 試行回数要因の主効果がみられた($\epsilon = 0.86$, $F(2, 136) = 42.62$, $p < .001$).
 - 外的記憶資源要因の主効果はみられなかった($F < 1$).
 - これら 2 要因の交互作用はみられなかった($F < 1$).

時間

- 試行回数要因の主効果がみられた($\epsilon = 0.55$, $F(2, 136) = 15.62$, $p < .001$).
- 1 試行目(6.86 s)→2 試行目(5.43 s)→3 試行目(3.70 s)
- 外的記憶資源要因の主効果はみられなかった($F < 1$).
- これら 2 要因の交互作用はみられなかった($F < 1$).

現在状況の表示

- 外的記憶資源未使用条件のみ分析
- 表示を要求した被験者の数。
 - ボール 3 個：3/34 人が要求。1 人は 2 回，2 人は 1 回。
 - ボール 5 個：30/34 人が要求。
 - ボール 7 個：34/34 人が要求。最小 1 回～最大 46 回。

アドバイスの記述

- balls and boxes puzzle の解法を知る 2 人に 1～6 点で評価。
- 1～5 点は Reber & Kotovsky(1997)の方法を適応。

評価 1：情報なし.

評価 5：全ての状態，操作を記述.

→ 評価 6 を加える：再帰構造を記述(e.g., 後はボール 5 個と同じ).

— 外的記憶資源使用／未使用で有意な差はみられなかった($t(68)=1.24, p=.22$).

外的記憶資源使用：平均評価得点 2.97.

外的記憶資源未使用：平均評価得点 2.57

考察

外的記憶資源使用／未使用

・ パフォーマンスはほぼ同等であった.

— 外的記憶資源未使用では…

→ ボール 7 個の課題でも余分な移動はなかった.

⇒ 実験 1 と同じ.

excess

・ 外的記憶資源使用／未使用で有意な増加がみられた.

— 部分的な転移しか生じなかった.

→ 全体的な転移が生じれば，excess は一定，または減少する.

・ エラー数の割合が逆 U 字型であるのは，ボール 3 個の課題が含まれていることが原因.

→ ボール 5 個から 7 個の課題でのエラーの減少は実験 1 と同じ.

現在状況の表示

・ 現在状況の表示の増加は，認知的負荷の増加を示す.

— ボール 3 個の表象は，ほとんどの被験者にとって認知的容量の制限内に納まる.

— ボール 7 個の表象は，認知的容量の限界かもしれない.

アドバイスの記述

・ 言語的知識に関しても，外的記憶資源使用／未使用のパフォーマンスはほぼ同等.

<総合考察>

・ 本研究の目的は変形問題を用い，外的記憶資源使用／未使用でのパフォーマンスの比較.

— 外的記憶資源未使用：外的表象を使用せず，操作，ルール，問題状態を内的に表象.

→ 認知的負荷の削減が小さい.

外的記憶資源使用：問題の外的表象を使用し，それを操作することができる.

→ 認知的負荷の削減が大きい.

- O'Hara & Payne(1998)や Cary & Carlson(2001)の研究
 - 総合的な認知的負荷を削減するために、問題解決者は論理的分析を行う。
 - 論理的分析：計画について熟考するか、計画なしに問題空間を探索するかを選択。
- ⇒ 本実験の変形問題でも適応された。

- 外的記憶資源使用／未使用のパフォーマンスはほぼ同等であった。
 - 外的記憶資源未使用の被験者は、不十分な計画は余分な移動とエラーを招き、問題解決プロセスを引き伸ばすことに気づいた。
- ⇒ 外的記憶資源未使用の被験者は、計画について熟考した。

- 問題解決者は、外的記憶資源の使用コストを最小限に留める(Cary & Carlson, 2001).
 - 本実験では、被験者はボールの移動ごとに現在状況の表示をすることができた。
 - ボール7個の課題でも、その方略は用いられなかった。
- ⇒ 外的記憶資源を使用するコストは、内的表象を維持するコストよりも高く見積もられている。

- 操作の実行コストが高ければ、計画について熟考する。
実行コストが低ければ、試行錯誤のような行動をとる(O'Hara & Payne, 1998).
 - 総合的な認知的負荷の削減。
 - 本実験では…
 - 実行コスト高：外的記憶資源使用／未使用に関わらず計画について熟考した。
 - 実行コスト低：外的記憶資源使用／未使用でもパフォーマンスは悪化した。
 - 強度：実行コスト > 外的記憶資源

- 外的記憶資源使用／未使用での練習効果も同等であった。
 - 同じ課題を繰り返しても、異なる課題を繰り返しても同等。

- 文章理解の領域では、困難な文章の方が容易な文章よりも理解が深まる(e.g., McNmara, Kintch, Songer, & Kintch, 1996).
 - 本実験では、外的記憶資源使用／未使用に問題について言語的知識に差はなかった。
 - 内的表象の操作、維持によって認知的容量の空きがなかった。
 - 認知的容量を十分に活用した → パフォーマンスの向上。

- 今後は、経験、課題の特性、視覚的イメージによる影響に関しても検討する必要がある。

<参考資料>

- ・ balls and boxes puzzle (ボール 5 個) の問題空間

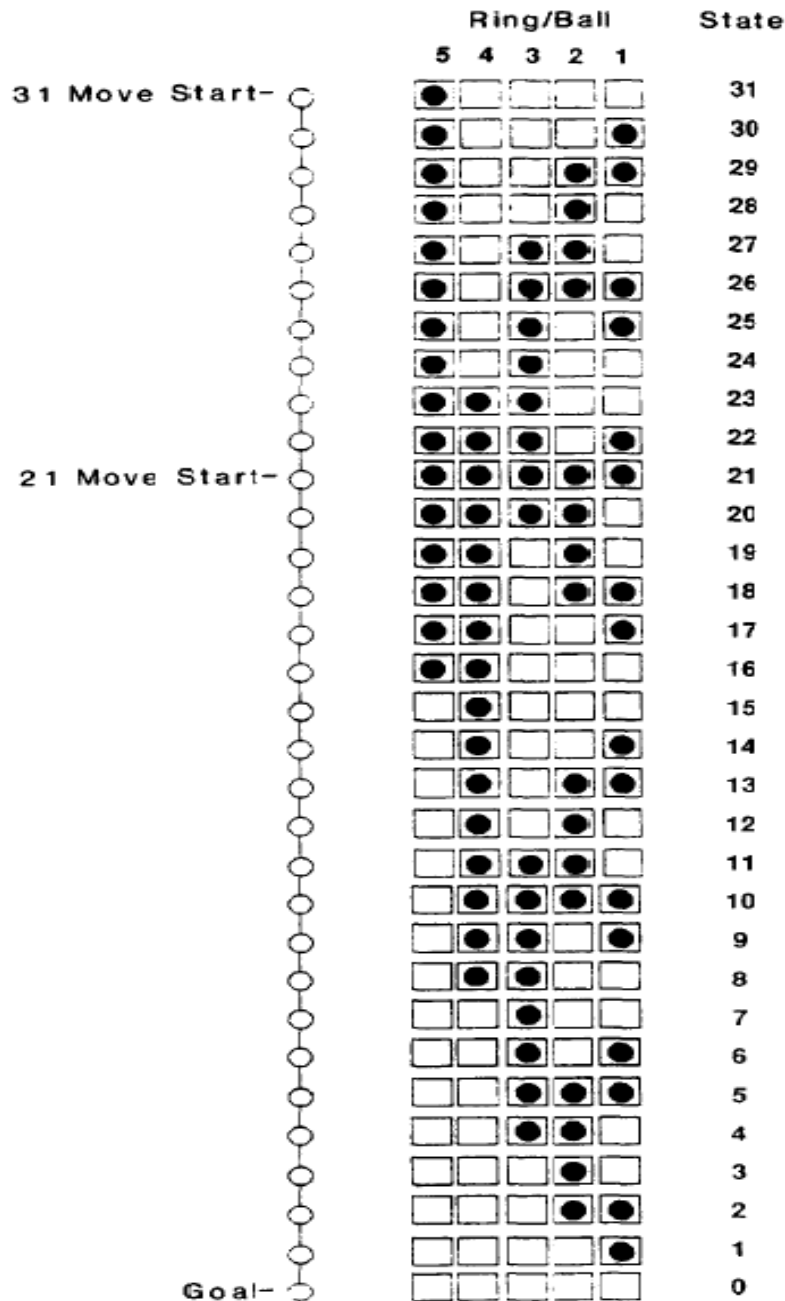


FIG. 3. The Chinese Ring puzzle problem space. The linearity of the space is depicted in the left panel. The right panel shows the corresponding ring/ball configuration. The filled squares denote rings that are on the bar (balls that are in their boxes). The open squares denote rings that are off the bar (balls that are out of their boxes). The states in the problem space are numbered according to their distance from the goal state. The most efficient solution of the 31-move problem moves successively with no reversals from the top to the bottom, passing, en route, the starting point (state 21) for the 21-move problem.

Kotovsky, K., & Simon, H.A. (1990). what makes some problems really hard: Explorations in the problem space of difficulty. *Cognitive Psychology*, 22, 143-183.