

## 問題解決におけるワーキングメモリの 記憶負荷と外化の検討

大塚 一徳・宮谷 真人

(2008年10月2日受理)

Externalizations and the Load on Working Memory in Problem Solving

Kazunori Otsuka and Makoto Miyatani

**Abstract:** Effects and the content of externalization during problem solving tasks causing different loads on working memory were investigated. Junior college student participants ( $N=26$ ) played five three-dimensional versions of number guessing games that directly used working memory resources, either with or without the possibility of using external resources such as papers and pencils. Results indicated that the load of the games on working memory affected the performance of participants. However, there were no differences in performance between participants who did or did not use external resources. Externalization contents that participants wrote on paper were also analyzed. The results indicated that participants tended to externalize all game records compared with parts of these or others, suggesting that game performance was not facilitated by externalization. Results also suggest that game records that were used for distributing working memory resources over external and internal representations have an important role in problem solving tasks.

Key words : problem solving, externalization, working memory, memory load

キーワード : 問題解決, 外化, ワーキングメモリ, 記憶負荷

問題解決において我々はしばしば、メモに書き留められた大切な情報といった外的表象 (external representations) を利用する (Intons-Peterson & Fournier, 1986)。このような外的表象の利用は、問題解決において重要な役割を果たしている (Larkin, 1989; Zhang & Norman, 1994)。ある問題解決事態において外的表象が利用可能である場合、課題事態が認知主体の内部と外部にわたる問題空間を持った分散認知課題 (distributed cognitive tasks) とみなすことができる (Zhang & Norman, 1994)。このような分散認知課題の解決過程における外的表象の利用は、解決のために必須の情報を保持し適切に操作することと、解決のためにどのような方略を利用するかという少なくとも2点に関して重要な役割を果たすと考えられる (Cary & Carlson, 1999)。

実際、微妙な外的表象の変化によって課題の認知的負荷は劇的に変化し、その結果、認知主体の問題解決パフォーマンスにも影響が生じる。Zhang & Norman (1994) は、ハノイの塔課題の多様な同型課題を利用することで外的表象の役割を検討している。彼らの一連の実験においては、ワーキングメモリに保持しておくことが必要なくつかのルールと、ワーキングメモリに保持することが不要で課題そのものの外的表象から簡単に推測できるいくつかのルールを操作した、ハノイの塔課題の同型課題を設定した。彼らの研究の主要な結果は、より多くのルールが外的に表象された場合、問題解決はより速く正確に進行するということであった。この結果は、内的に保持しなければならないルールはより多くの記憶負荷をワーキングメモリに与えるものであり、それ故にプランニングや解決過程の

管理といった重要なプロセスが影響を受けることを示すものである。

外的表象には、メモや図あるいは式といったものから課題そのものの構成にいたるまで様々な種類が存在する。このような多様な外的表象は、あらかじめ課題に備わっている外的表象と、問題解決を行う認知主体が自発的に解決過程において外化したものと大きく分けられる。外化とは、内的資源である心内の表象を外的資源を通して利用可能にする行為のことを指す。例えば、問題を解く際に思い描いたことをノートにとることや、考えたプログラムを実際に計算機へ入力することなどが外化の活動として挙げられる（山崎・三輪, 2002）。

### 問題解決と外化

問題解決における外化された外的表象は、どのような影響を解決パフォーマンスや解決過程に及ぼすのか、またその影響は他の外的表象と比べてどのように異なるのかについて、いくつかの先行研究で検討されている（Anzai, 1991; Cox & Brna, 1995; Cox, 1999）。

Anzai (1991) は、物理の力学の問題における初学者の作図について検討した。その結果、初学者は適切な作図を行うことができず、問題解決が促進されるとは限らないこと示した。Cox & Brna (1995) は、外的表象の利用が命題論理や述語論理による推論に及ぼす影響を検討するため、推論の過程で実験参加者が描いた走り書き（workscratching）を分析した。その結果、走り書きとしてベン図や表、論理式など様々な形式の外的表象が形成され、複数の外的表象を用いることで正答を得やすくなっていたことを指摘した。さらに Cox (1999) は、学習者の分析的な推論を支援する switchER II というインタラクティブな学習環境を開発し、述語論理を用いた問題を与え、学習者自身が問題内容を図に描いて問題を解く条件（構築条件）と、システムから与えられた図を解釈することで問題を解く条件（解釈条件）との比較を行った。学習者が犯すエラーについて、両条件間の質的な差を検討したところ、構築条件と解釈条件とでは、犯しやすいエラーのタイプが異なることを明らかにした。さらに、構築条件において、問題解決時に誤りを含む図を描いていても、複数の外的表象を構築するうちにその誤りが修正され、結果として正解を得やすくなっていたことを示した。山崎・三輪 (2001) は、類推的問題解決における外化について検討した。彼らの研究では、図を描くことが許された実験参加者と禁じられた実験参加者の間のパフォーマンスと解決過程の差異が検討された。その結果、パフォーマンスレベルでは図を描くことが許された実験参加者と禁じられた実験参加者の間に有

意差はなかった。一方、解決過程レベルでは外化によって問題構造の制約からの緩和が示された。

このような先行研究から、問題解決における外化はパフォーマンスレベルでは問題解決を促進するとは限らないこと、解決過程レベルではワーキングメモリの記憶負荷の軽減や計算負荷の軽減が複数の外化された外的表象によって可能となることが示唆される。ただし、いわゆる良定義問題であり狭義の問題解決過程を取り扱った上述の外化に関する研究に対して、目標状態が明確に設定されておらず、その目標状態を探索する必要がある問題発見型の問題では、外化の影響は異なることも報告されている（諏訪, 1999）。

一方、問題解決において、内的な情報処理機構から産出された情報を外化し、それを再び内部に取り込むといった、外部と内部の双方向的な情報のやり取りにおいては認知主体の影響を考慮することも必要である（村山, 1995）。認知主体の影響としては、問題解決における認知主体の領域知識（Anderson, 1993）やワーキングメモリ（Cary & Carlson, 1999）といった内的資源の要因が挙げられる。問題解決に必要な領域知識もワーキングメモリに活性化された状態にあると想定され、問題解決における外的表象の利用にあたっては、内的資源であるワーキングメモリと協調させなければならない（Carlson, Wenger, & Sullivan, 1993）。問題解決過程を解明していくためには、内的表象としてのワーキングメモリと外的表象のダイナミックな相互作用について検討していくことの重要性が指摘されている（Larkin, 1989; Zhang, 1997; Zhang & Norman, 1994）。

Cary & Carlson (2001) は、計算課題における紙と鉛筆による外的表象の内容やディスプレイ上の外的表象の種類について実験的に検討した結果、解決のために必須の情報が外的表象として外化され利用されること、外的表象として外化する際に心的努力が必要とされる場合には外化される外的表象が少なくなることを報告している。しかし、ワーキングメモリには個人差があることが大きな特徴であることから（Miyake, 2001）、ワーキングメモリの個人差によって外化のために必要な心的努力の影響も異なり外化に影響を及ぼすかもしれない。また、課題の記憶負荷や計算負荷の程度によって解決のために必要なワーキングメモリ資源の配分は異なることから、外化のためのワーキングメモリ資源の配分に影響を及ぼし、外化が影響を受けることも予想される。

このような点を検討するために、本研究では問題解決における外化に関して、内的資源としてのワーキングメモリとの相互的な関連性の視点から検討を行う。そのために、領域に依存しないワーキングメモリ資源

Table 1 各ゲームの内容

ゲーム	正解コード	提示コード	cp	cn	記憶負荷及び計算負荷
1	032	012	2	0	低
2	102	123	1	1	中
3	211	230	1	0	中
4	210	301	0	2	高
5	112	023	0	1	低

(cp: 位置と数字両方の一致数, cn: 数字のみの一致数)

を必要とする実験課題を利用する。本研究における実験課題において、外化がパフォーマンスに及ぼす影響、外化された外的表象の分析、ワーキングメモリの記憶負荷と計算負荷の異なる課題での外化の影響を検討する。また、ワーキングメモリの個人差要因もあわせて検討する。

**実験課題**

本研究の実験課題は、数当てゲームの一種であり3桁の秘密の数をできるだけ少ない回数で当てることを競うゲームである。実験課題で使用した数当てゲームは0, 1, 2, 3の数字を用い、その重複順列の1つ1つをコードと称し、当てるべきものを正解コード、実験参加者が挙げるものを質問コードと呼ぶ。なお、本実験課題の正解コード数は、64個である。この実験課題の構造は、大塚(2003, 2008)で利用された課題と同型のものである。また、本実験課題の解決過程は、リーディングスパン・テスト(以下、RST)で測定されるワーキングメモリ成分の容量制約による影響を受けることが報告されている(大塚, 2008)。

Figure 1は実験課題を例示したものである。正解コードと質問コードを比較し、両方のコードに共に含まれる数字の組数をj、その中で位置も一致するものの組数をkとすると、フィードバック情報としてk(cp: correct position)とj-k(cn: correct number)の値を返す。したがって、本実験課題はcp, cn値が3, 0で終了する。

領域に依存しない問題解決課題としてよく利用され

るハノイの塔課題は、あらかじめ手がかり情報はすべて提示される課題であり、解にいたる問題空間の最適探索過程は常に一意に定まる。一方、本実験課題は、解決のための手がかり情報があらかじめ付与されず解決過程で徐々に提示される。また解決のための手がかり情報は一時的なもので、ゲームごとに異なるという特徴がある(米川, 1991)。したがって、実験参加者は手がかり情報の保持と次の質問コードを生成するための推論という2つの処理を、ワーキングメモリにおいて並行的に行わなければならない。本実験課題は、このような特徴から問題解決におけるワーキングメモリ容量の制約を、領域に依存しない他の実験課題よりも多面的に検討できる課題であると考えられる。

本実験課題は第1試行目とそれに対するフィードバック情報によって問題空間が確定し、課題の難易度が異なる課題である。そこで、実験において実験参加者は、あらかじめ第1試行目とそれに対するフィードバック情報が提示されている状態からゲームを行った。実験課題としては難易度の異なる5ゲームが用意された。各ゲームにおける第1試行目とフィードバック情報及び正解コードはTable 1に示すとおりである。ゲームの難度については、第1試行目とそのフィードバック情報から論理的に算出される候補となる正解コードの数によって決定した。Table 1の1及び5ゲームはゲーム開始時に正解コードの候補が9個に絞られる。一方、2及び3ゲームはゲーム開始時に正解コードの候補が12個に絞られ、走査する必要があるコード数が多いため難度が1, 5ゲームより高くなる。同様に4ゲームは正解コードの候補が15個までにしか絞られないため難度はもっとも高くなる(奥田・大塚・井上, 1995)。

**方 法**

**実験課題** 3桁版数当てゲーム。ゲームは、Visual Basic 6.0によって本実験用に作成されたもので、自動的に実験参加者の試行ごとの、質問コード、試行回数、各ゲームの正解コードが履歴ファイル上に保存された。実験参加者はパーソナルコンピュータ上でマウスのみを利用して実験課題を行った。



Figure 1. 実験課題の例

**実験参加者** 実験参加者は、短期大学生26名（男性10名、女性16名）、平均年齢20.3歳（範囲：19-21歳）で、すべての実験参加者はパーソナルコンピュータの操作に関して6ヶ月以上の経験があり、タッチタイピングの授業を受講した後であった。また、過去にこの実験課題を行った経験のある実験参加者はいなかった。

**RST** 日本語版 RST（荻阪・荻阪，1994）を利用した。手続きも荻阪・荻阪（1994）に準じ個別に2文条件から5文条件まで行った。

**デジットスパンの測定** デジットスパンの測定は集団で行った。ランダムに選ばれた12個の2桁数字を5秒間隔で聴覚提示後、再生用紙に系列再生を行わせた。3回の測定を行い、平均値を算出した。

**実験計画** メモの有無（有・無）×ゲーム（1-5ゲーム）の2×5の参加者内計画とした。

**手続き** デジットスパンテスト→RST→実験課題の順に、すべて別の日に実施された。デジットスパンテストは集団で実施された。RSTと実験課題はすべて個別に行われた。実験課題のメモ無条件5ゲームすべてにおいて、実験参加者はメモや筆記具を利用することはできなかった。メモ有条件では、実験者より実験参加者にゲームごとに白紙のA4用紙がメモ用紙として配られ、1ゲームが終了する度に実験者によってメモ用紙が回収され、次のゲーム用のメモ用紙が配布された。1ゲーム中実験参加者は10試行まで可能であった。10試行目においても実験参加者が正解コードを見つけないことができなかった場合は、強制的に次のゲームへと進行した。

## 結果

本実験課題では Table 2 に示される各測度を実験参加者のパフォーマンスの指標として用いた。試行回数とは、各ゲームにおいて、実験参加者が正解コードに至るまでの回数である。実験参加者は5ゲームを行ったので、5ゲームの試行回数の平均値を Table 2 に示した。解決ゲーム数は、1ゲーム10試行以内で解決できたか否かという点に注目した測度で、実験参加者が5ゲーム中において解決できたゲーム数である。質問コード重複回数は1ゲーム中、実験参加者が一度利用した質問コードを再度利用した回数である。5ゲーム

における質問コード重複利用回数の平均値を Table 2 に示した。各測度についてメモ有条件とメモ無条件を比較した結果、試行回数 ( $t(25) = -0.59, ns$ )、解決ゲーム数 ( $t(25) = 0.46, ns$ )、質問コード重複回数 ( $t(25) = -0.92, ns$ ) のどれも有意差はなかった。

Figure 2はゲームごとの各条件における試行回数の平均値を示したものである。ゲームごとの平均試行回数に対し、メモ要因×ゲーム要因の2要因分散分析を行った結果、ゲーム要因の主効果が有意 ( $F(4, 100) = 3.70, p < .01$ ) であった。多重比較 (Bonferroniの方法)の結果、5%水準で有意差がみられ、5ゲーム目は1ゲーム目に比べ平均試行回数が多かった。メモ要因の主効果は、有意でなかった ( $F(1, 25) = 0.34, ns$ )。2要因の交互作用も、有意でなかった ( $F(4, 100) = 0.94, ns$ )。

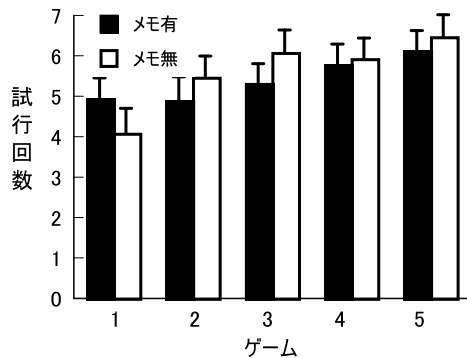


Figure 2. 各ゲームにおける試行回数の平均値

Figure 3はゲームごとの各条件における質問コード重複回数の平均値を示したものである。ゲームごとの平均質問コード重複回数に対し、メモ要因×ゲーム要因の2要因分散分析を行った結果、2要因の交互作用が有意傾向であった ( $F(4, 100) = 2.14, p < .10$ )。ゲーム要因の主効果 ( $F(4, 100) = 0.16, ns$ ) およびメモ要因の主効果 ( $F(1, 25) = 0.85, ns$ ) は、有意でなかった。2要因の交互作用が有意傾向であったので両要因の単純主効果の検定を行った結果、有意な単純主効果はなかった。

ゲームごとの実験参加者のメモ内容を1文字ごとにカウント（記号等も含む）し、ゲームごとに示したものが Figure 4である。ゲームごとの平均メモ文字数

Table 2 メモ有無条件における各測度の平均値（標準偏差）

測度	N=26	メモ有	メモ無
試行回数		5.40 (1.54)	5.60 (1.56)
解決ゲーム数		4.42 (0.99)	4.35 (0.94)
質問コード重複回数		0.31 (0.37)	0.39 (0.46)



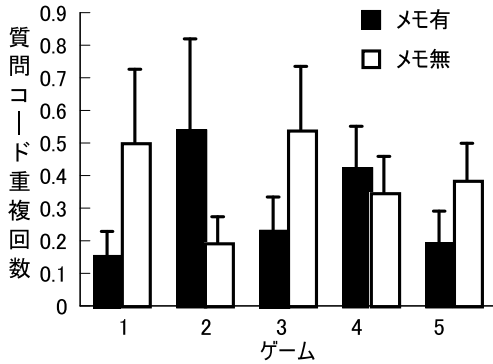


Figure 3. 各ゲームにおける質問コード重複回数の平均値 (図中のバーは標準誤差を示す)

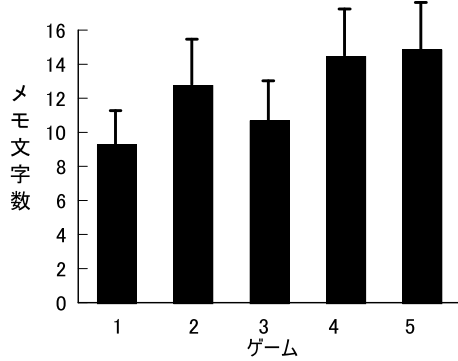


Figure 4. 各ゲームにおけるメモ文字数の平均値 (図中のバーは標準誤差を示す)

に対し、ゲーム要因の1要因分散分析を行った結果、ゲーム要因の主効果が有意であった( $F(4,100) = 3.91, p < .01$ )。多重比較 (Bonferroni の方法) の結果、4ゲーム目、5ゲーム目のメモ文字数は1ゲーム目のメモ文字数よりも多い傾向であった ( $p < .10$ )。

実験参加者の外化内容を質的に分析した結果、Figure 5に例示されている4つの外化内容に分類可能であった。実験参加者の外化内容を Figure 5の分類をもとに5ゲーム分を集計し、代表値を示したものが Table 3である。外化内容の多くは、質問コードのものか質問コードと cp 値、cn 値のものであった。質問コードのみに分類される外化内容を行ったゲーム数の平均値と質問コードと cp 値、cn 値両方を外化したゲーム数の平均値を比較した結果、質問コードのみを外化したゲーム数よりも有意に多かった ( $t(25) = -2.22, p < .05$ )。

デジットスパンテストと RST の結果を示したものが、Table 4である。デジットスパンテスト及び RST 総正再生数と有意な相関がみられた測度はなかった。

## 考 察

本研究は、問題解決における外化についてワーキングメモリの処理資源との関連から検討を行うために、外化がパフォーマンスに及ぼす影響、ワーキングメモリの記憶負荷と計算負荷の異なる課題での外化の影響、外化された外的表象の分析及びリーディングスパン、デジットスパンとの関連から検討を行った。実験課題として、ワーキングメモリ資源を必要とし領域に依存しない簡易な数当てゲーム課題の一種を利用した。本実験課題を遂行するうえで外化の効果を検討するために、外化のためのメモ用紙を利用可能な条件と利用不可の条件とを設定した。

外化のためのメモ用紙の有無について実験参加者のパフォーマンス (Table 2) に関し分析した結果、外化のためのメモ用紙が利用可能であることのパフォーマンスへの影響はみられなかった。類推的問題解決課題における外化の影響 (山崎・三輪, 1998, 1999, 2001) を検討した研究においても、パフォーマンスレベルで外化の影響はなかったことが報告されている。問題解決における外化は、特に新規な課題で初心者の場合、必ずしも適切な表象が描かれることが保証され

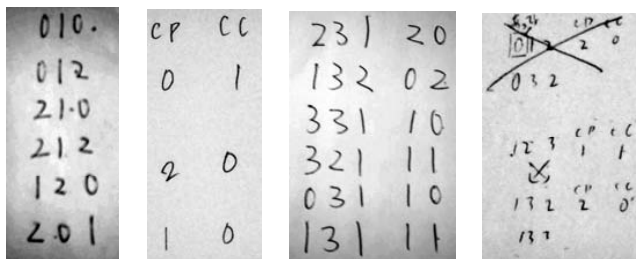


Figure 5. 外化内容の例

注) 左から質問コードのみ、cp、cn 値のみ、質問コードと cp、cn 値、その他の例

Table 3 各ゲームにおけるメモ内容の代表値

メモ内容	N=26	最小値	最大値	平均値	標準偏差
質問コードのみ		0	5	1.04	1.54
cp, cn のみ		0	1	0.04	0.20
質問コードと cp, cn		0	5	2.42	2.10
その他		0	2	0.23	0.65

Table 4 RST 及びデジットスパンテストの代表値

	N=26	最小値	最大値	平均値	標準偏差
RST スパン得点		2.00	4.50	2.42	0.56
RST 総再生数		28.00	59.00	45.77	7.41
デジットスパン		2.67	9.33	6.35	1.71

ず、問題解決を促進するとは限らない (Anzai, 1991) という先行研究の知見と一致する結果である。

課題の記憶負荷と計算負荷の異なる1ゲーム目から5ゲーム目までのゲーム要因とメモ要因について分析した結果、質問コード重複回数において2要因の交互作用の有意傾向があった。ゲーム中1度利用した質問コードを再度利用した回数を示すこの測度は、質問コードの保持に関する成分を示す測度であると考えられる (大塚, 2003)。したがって、ワーキングメモリの保持成分に関して、課題の記憶負荷と計算負荷とメモという外的資源の存在が何らかの関連がある傾向があったことが示唆される結果である。しかし、2要因の各水準における有意な単純主効果はなかったため、本研究によって課題の記憶負荷や認知負荷が外的表象の利用とどのような相互的な関連にあるのかについて実証的なデータを提示することはできない。

外化することが可能なメモという外部記憶資源が課題の記憶負荷や計算負荷の程度に応じて、どのようにその機能が異なってくるのかについては、課題の記憶負荷の大きさが大きな要因として挙げられる。例えば、計算課題の場合ある一定の桁数を超えると暗算で行うことは無理であり、メモ用紙や鉛筆といった筆記具の利用は必須となるであろう。このような点を考慮すると、本実験における記憶負荷の操作が不十分であったと思われる。この点については、課題の記憶負荷や計算負荷の程度をさらに厳密に統制し、課題の難易度の差を大きくした実験が必要であり、今後の課題である。

ゲームごとの試行回数において、5ゲーム目の試行回数は1ゲーム目の試行回数より多くパフォーマンスが悪かった。論理的には、Table 1に示されているように1ゲーム目と5ゲーム目の記憶負荷と計算負荷は同じであり、5ゲーム目では練習効果も想定される。このように論理的な難易度は1ゲーム目と同じである5ゲーム目のパフォーマンスが劣っていた原因とし

て、フィードバック情報の違いが考えられる。すなわち、1ゲーム目と5ゲーム目における cp 値, cn 値の違いである。実験参加者にとって、5ゲーム目の cn 値2 (2個は位置は異なるが数字はあっている) というフィードバック情報は1ゲーム目における cp 値2 (2個の数字はあたり) に比べ、下位問題の推測に役に立たないフィードバック情報であったことが推測される。本実験課題における cp 値, cn 値といったフィードバック情報によっても、認知主体からみた課題の難易度は異なることを示唆する結果である。

メモ有条件におけるメモ文字数について分析した結果、1ゲーム目に比べ4ゲーム目5ゲーム目はメモ文字数が多い傾向があった。4ゲーム目は1ゲーム目に比べ記憶負荷と計算負荷の高い課題であった。また、5ゲーム目は1ゲーム目に比べパフォーマンスが劣っていた課題でもあった。したがって、4ゲーム目と5ゲーム目は、実験参加者にとって難易度が高い課題として認識されていたことが推測される。Cary & Carlson (2001) は、計算課題における紙と鉛筆による外的表象について検討した結果、解決のために必須の情報が外的表象として外化され利用されることを指摘している。本研究においても実験参加者は記憶負荷や計算負荷を補償するために、課題難易度に応じて外的資源を利用し、難易度の低い課題に比べて多くの外化を行っていたことが推測される。

メモ内容について分析した結果、実験参加者は質問コードと cp 値, cn 値といった履歴情報を外化することが多いことが示された。本実験課題は、解にいたるまでに必要な情報があらかじめ提示されている課題ではなく、試行が進むにつれ継時的に情報が集積していく課題である (米川, 1991)。このように、解にいたるまでに継時的に情報を収集していく場合には、試行ごとに得られる下位問題の解といった問題解決過程における要約的な結果の外化ではなく、それまでのすべ

ての履歴情報を外化しておくことが多いことが示唆される。

大塚 (2003) では、本研究と同様の実験課題を用いた研究において、ディスプレイ上に自動的に表示される実験課題の履歴情報の効果について検討した。その結果、RST によって測定されるワーキングメモリ容量が低い実験参加者が、記憶負荷の高い方略を利用した場合にディスプレイ上の履歴情報の効果がみられた。このように本実験課題はワーキングメモリ容量の個人差によってパフォーマンスが異なることが示唆されている。そこで、本研究においても RST とデジットスパンといった実験参加者の内的資源を測定した。しかし、実験参加者の問題解決パフォーマンスとリーディングスパン及びデジットスパンの間に有意な相関はなかった。

あらかじめディスプレイ上に用意される履歴情報という外的表象や自発的に外化された外的表象と、内的な処理資源であるワーキングメモリ容量との相互的な関連性については、その重要性が従来から指摘されている (Carlson et al., 1993; Miyake & Shah, 1999; 村山, 1995; Zhang, 1997; Zhang & Norman, 1994)。大塚 (2007) は、本研究と同様の課題を用いた実験において、RST で測定されるワーキングメモリ個人差とディスプレイ上の外的表象の関連について検討した。その結果、試行回数、重複回数という測度においてワーキングメモリ容量個人差の影響がみられた。一方、外的表象の利用頻度、利用時間に高スパン、低スパン間で差はなかった。本実験課題は問題空間の大きさによる課題の難易度によってワーキングメモリ容量の個人差の影響は異なる (大塚, 2008) ことや課題の記憶負荷によってもワーキングメモリ容量の個人差の影響は異なる (大塚, 2003) ことが示唆されている。外化された履歴情報についても認知主体のワーキングメモリ容量個人差とどのように相互に関連しているのかについて、課題の難易度や記憶負荷の要因を厳密に操作した検討が必要であろう。

我々の日々の高次認知活動において、内的な情報と外的な情報の処理はダイナミックに相互作用し、内的表象から外的表象にいたる分散された表象の間を行き来する必要がある (Zhang, 1997)。また、外化は書くという外的アクションによって外的な記憶資源を利用し、外的表象を構成するという複雑なプロセスを伴うものである。この内的な情報と外的な情報の処理のダイナミックな相互作用においては、ワーキングメモリは内的表象と外的表象の間の重要なインターフェースと考えられる (Miyake & Shah, 1999)。問題解決における外化の機能やプロセスを検討するうえでも、認

知主体の内的資源であるワーキングメモリを考慮した検討が今後必要とされるであろう。

## 【引用文献】

- Anderson, J. R. (1993). *Rules of the mind*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Anzai, Y. (1991). Learning and use of representations for physics expertise. In K. A. Ericsson & J. Smith (Eds.), *Toward a general theory of expertise*. New York: Cambridge University Press. pp. 64-92.
- Carlson, R. A., Wenger, J. L., & Sullivan, M. A. (1993). Coordinating information from perception and working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19, 531-548.
- Cary, M., & Carlson, R. A. (1999). External support and the development of problem-solving routines. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 25, 1053-1070.
- Cary, M., & Carlson, R. A. (2001). Distributing working memory resources in problem solving. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 27, 836-848.
- Cox, R., & Brna, P. (1995). Supporting the use of external representations in problem solving: The need for flexible learning environments. *Journal of Artificial Intelligence in Education*, 6, 239-302.
- Cox, R. (1999). Representation construction, externalised cognition and individual differences. *Learning and Instruction*, 9, 343-363.
- Intons-Peterson, M. J., & Fournier, J. (1986). External and internal memory aids: When and how do we use them? *Journal of Experimental Psychology: General*, 115, 276-280.
- Larkin, J. H. (1989). Display-based problem solving. In D. Klar & K. Kotovsky (Eds.), *Complex information processing: The impact of Herbert A. Simon*. NJ: Lawrence Erlbaum Associates. pp. 319-341.
- Miyake, A. (2001). Individual differences in working memory: Introduction to the special section. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130, 163-168.
- Miyake, A., & Shah, P. (1999). Toward unified theories of working memory: Emerging general consensus, unresolved theoretical issues, and future research directions. In A. Miyake & P. Shah

- (Eds.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control*. New York: Cambridge University Press. pp. 442-481.
- 村山 功 (1995). 外的資源による課題と認知主体の変化 認知科学, 2, 28-38.
- 奥田富蔵・大塚一徳・井上 靖 (1995). 数当てゲーム ITS のためのプレー知識の構造について CAI 学会誌, 11, 183-194.
- 荻阪満里子・荻阪直行 (1994). 読みとワーキングメモリ容量—日本語版リーディングスパンテストによる測定— 心理学研究, 65, 339-345.
- 大塚一徳 (2003). 問題解決におけるリーディングスパン個人差の影響 心理学研究, 74, 460-465.
- 大塚一徳 (2007). 問題解決におけるディスプレイ上の外的表象とワーキングメモリ容量個人差 日本心理学会第71回大会発表論文集, 817.
- 大塚一徳 (2008). 問題解決における問題空間とワーキングメモリ容量個人差の影響: Mastermind 課題を用いた検討 認知心理学研究, 6, 47-55.
- 諏訪正樹 (1999). ビジュアルな表現と認知プロセス 可視化情報学会誌, 19, 13-18.
- 山崎 治・三輪和久 (1998). 類推の問題解決における図的表象外化の効果 電子情報通信学会技術報告 (1998-05), 109-116.
- 山崎 治・三輪和久 (1999). 外化による問題解決促進のメカニズム 電子情報通信学会技術報告 (1999-06), 65-70.
- 山崎 治・三輪和久 (2001). 外化による問題解決過程の変容 認知科学, 8, 103-116.
- 山崎 治・三輪和久 (2002). 図を用いた問題解決教育システム情報学会誌, 19, 38-45.
- 米川 勉 (1991). 継時的に集積する情報の処理過程—記憶と処理におこるトレード・オフの軽減に関して— 心理学研究, 62, 96-101.
- Zhang, J. (1997). The nature of external representations in problem solving. *Cognitive Science*, 21, 179-217.
- Zhang, J., & Norman, D. A. (1994). Representations in distributed cognitive tasks. *Cognitive Science*, 18, 87-122.