

問題解決におけるワーキングメモリ容量個人差と外的表象の利用

大塚一徳・宮谷真人

Individual differences in working memory and external representations in problem solving

Kazunori Otsuka and Makoto Miyatani

本研究は、内的表象と外的表象とに分散するワーキングメモリ資源が問題解決に及ぼす影響について、外的表象とワーキングメモリ容量個人差の点から検討した。領域に依存しない実験課題として、難易度の異なる数当てゲーム（3桁版，4桁版）を用意し、外的表象としてゲーム履歴を取り上げた。大学生20名の実験参加者は、リスニングスパン・テストによって高スパン群とスパン群に分けられ、3桁版，4桁版の数当てゲームを各10ゲーム，ゲーム履歴を参照可能な条件と参照できない条件で行った。実験の結果，ゲーム履歴，ワーキングメモリ容量個人差とともに，問題解決パフォーマンスには影響しなかった。一方，問題解決プロセスにおいては，低スパン群は高スパン群に比べより多くゲーム履歴を利用していた。以上の結果に基づき，問題解決における分散ワーキングメモリ資源としての外的表象とワーキングメモリ容量個人差について考察した。

キーワード：ワーキングメモリ，問題解決，外的表象，Mastermind 課題

問題

ワーキングメモリは，処理した情報の保持と，その情報に基づく認知活動を並列的にダイナミックに展開する一時的な記憶システムのことをいう（Just & Carpenter, 1992）。ワーキングメモリは，言語処理（Miyake, Just, & Carpenter, 1994）や，演繹推理（Gilhooly, Logie, Wetherick, & Wynn, 1993），問題解決（大塚, 2003; 大塚・宮谷, 2008b）など，課題の遂行と情報の保持が並列的に行われることが必要な多くの認知活動と深く関わっていることが指摘されている（苧阪・苧阪, 1994）。従来の短期記憶が情報の貯蔵庫としての機能を重視するのに対し，ワーキングメモリは，認知課題の遂行中に情報がいかに操作されるかといった，情報の処理機能を重視する記憶システム概念である（Miyake et al., 1994）。

内的な資源であるワーキングメモリだけではなく，計算をする際に紙や鉛筆を利用したり問題解決の際に図を描いたりといった外的な記憶資源の利用も，我々は日々の生活の中でよく行っている。このような認知活動における外的表象や行為の機能について多くの研究が行われてきた（Larkin, 1989; Zhang & Norman, 1994）。また，我々が日常行う高次の認知活動は，その多くが心的表象と外

的表象に交互に注意を向けながら繰り返されている (Miyake & Shah, 1999)。このような高次認知活動における心的表象の処理資源としてのワーキングメモリと外的表象との関連について Zhang & Norman (1994) は、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、その課題事態は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) として捉えられることを指摘している。また、Cary & Carlson (1999) は、このような分散認知課題の解決過程において、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ことを示唆している。

一方、外的資源は単に記憶補助であり記憶負荷を減少させるものという単純化された視点から、高次認知活動における外的表象の機能についてはワーキングメモリ研究者の十分な関心の対象とはなっていなかったことも指摘されている (Miyake & Shah, 1999)。しかし、我々の日々の高次認知活動においては、内的な情報と外的な情報の処理がダイナミックに相互作用し、内的表象と外的表象とに分散された表象の間を行き来する必要がある (Zhang, 1997)。ワーキングメモリは、このような日々の高次認知活動における内的表象と外的表象の間の重要なインターフェースとしての重要性も指摘されている (Miyake & Shah, 1999)。

実際、問題解決過程において外的表象を利用するためには、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)。したがって、ワーキングメモリの機能を考えるうえで、外的表象と内的表象の相互作用について検討することは重要なことである (Carlson, 1997; Miyake & Shah, 1999)。また、問題解決過程を解明していくためにも、内的表象の処理資源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)。

我々が高次認知課題を遂行するうえで、ワーキングメモリにおいて情報を適切に操作し保持することは必須のことである。そのために、我々はワーキングメモリ資源を管理し、例えばノートをとるといった外的表象を利用する方略や、言語的なりハーサルを行うといった内的表象を利用する方略を適宜利用している (Cary & Carlson, 2001)。外的表象を利用することが可能な場合、すべての重要な情報が外的に記録されるわけではなく、内的に保持する情報と外的に保持する情報に振り分けられる (Schönpflug, 1986)。同時並列的に進行する情報の保持や処理といったワーキングメモリにおける内的な心的プロセスと外的に保持される情報である外的表象は、適切に協調して利用されることが必要である。

問題解決において内的表象と外的表象に分散するワーキングメモリ資源が、問題解決過程にどのような影響を及ぼすのかを検討した先行研究には、外的表象の利用と解決手順の関連を検討したもの (Cary & Carlson, 1999) と、外的表象の内容や種類を検討したもの (Cary & Carlson, 2001) がある。Cary & Carlson (1999) は、コンピュータディスプレイ上に提示される歩合計算課題における紙と鉛筆による外的表象について実験的に検討を行った。その結果、実験参加者は、外的表象が利用できる場合はワーキングメモリへの記憶負荷に関わらず課題の内容に沿った解決手順をとること、特定の解決手順に収斂するまでに時間がかかることが示された。また、Cary & Carlson (2001) は、

同様に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記録され利用されること、外的表象として記録する際に心的努力が必要とされる場合には記録される外的表象が少なくなることを報告している。大塚（2003）は、領域に依存しない簡易な数当てゲーム課題において、ディスプレイ上のゲーム履歴の有無という外的表象による記憶負荷の違いとワーキングメモリ容量個人差の影響を検討した。その結果、実験参加者が記憶負荷の高い方略を利用しディスプレイ上の外的表象も利用できないという記憶負荷の大きい場合に、ワーキングメモリ容量個人差の影響が顕著にみられた。一方、ディスプレイ上の外的表象を利用できる条件では、ワーキングメモリ容量個人差の影響はみられなかった。この結果は、ディスプレイ上の外的表象の利用によって、記憶負荷が低減し処理資源に余裕ができたためであると考えられた。

しかし、これらの研究では、外的表象の利用そのものが問題解決過程に及ぼす影響や、認知主体側の個人差については十分に検討されていない。特にワーキングメモリの特徴の1つとして、その容量に厳しい制約があること、またその容量に個人差があることが指摘される（Miyake, 2001）。したがって、問題解決における認知主体の内と外に分散するワーキングメモリ資源環境を想定する場合、ワーキングメモリ容量の個人差によって認知主体の分散ワーキングメモリ資源環境は異なることが予想される。認知主体のワーキングメモリ容量個人差による分散ワーキングメモリ資源の個人差が、問題解決パフォーマンスや問題解決プロセスにどのような影響を及ぼすのかについては、これまで十分に検討されてきていない。

例えば、紙や鉛筆がなければ多くの人々は指や手のひらを利用して難しい暗算の計算などを行う。これは、中間的な計算結果や認知的な負荷を軽減するための方略のように思われる。このような外的行為によるワーキングメモリ容量限界の補填は、我々の日常生活でよく観察されることである。しかし、高次認知活動における外的表象の役割やワーキングメモリと外的表象との相互的な関連性について、ワーキングメモリ容量個人差の観点からはほとんど検討されていない。そこで本研究では、外的表象によってワーキングメモリ容量の個人差は補償されるのか、また、ワーキングメモリ容量の個人差によって外的表象の利用程度や解決過程は異なるのか、そもそも外的表象の利用はどの程度パフォーマンスに有効であるのか、といった点について検討することを目的とする。

ワーキングメモリ容量の測定

ワーキングメモリ研究において、Daneman & Carpenter（1980）によって開発されたリーディングスパン・テスト（Reading Span Test, 以下 RST と略）は、有益な研究道具として広く使われている（齊藤・三宅, 2000）。RST は次々と提示される文を実験参加者自身に口頭で読ませながら、文中の単語を記憶させていくという手法を用いるものである。このテストにおいて読みと並列的に記録する単語の再生数から算出される得点が、リーディングスパンである。RST では、音読をしながら単語を保持するという二重課題を行う必要があり、ワーキングメモリでの並列的な処理が要求される（近藤・森下・苧阪, 1999）。

RST はもともと読みにおけるワーキングメモリ容量を測定するために開発されたもので、基本的には記憶課題でありながら、読み理解テストや言語の理解度を測定する言語的な認知課題と高い相

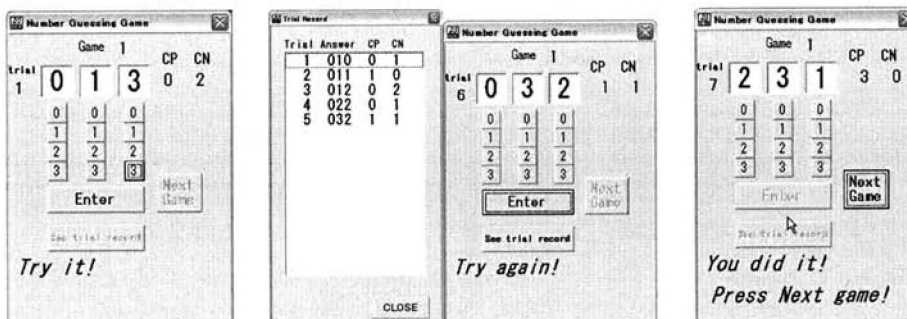
関を示すテストであるところに特徴がある。ただし、RSTに含まれると想定される心的過程は数多いため、RSTがいったい何を測定しているのかについてはいまだ多くの議論や解釈が存在する（齊藤・三宅, 2000）。

RSTの他にも、課題の遂行と情報の保持が要求されるワーキングメモリスパン課題として様々なものが考案されている。例えば、RSTと同様にDaneman & Carpenter (1980)によって開発されたリスニングスパン・テスト (Listening Span Test, 以下LSTと略)がある。このテストにおいては、文とそれに含まれるターゲット語が聴覚的に提示され、実験参加者は、文を聴取しながらターゲット語を覚える課題を行わなければならない。RSTが個別での実施を前提とした課題であるのに対して、LSTは集団での実施が可能である。また、日本語版LSTも開発されている (Osaka, Osaka, Kondo, Morishita, Fukuyama, Aso, & Shibasaki, 2001)。

Mastermind 課題

本研究では、実験課題として数当てゲームの一種である Mastermind 課題という推論型ゲームを用いる。Mastermind 課題は、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。ゲームはコンピュータを相手にして行い、以下のように進行する。最初、桁数が決められた1つの秘密の数をコンピュータが選ぶ。実験参加者は1つの数を挙げ、それがコンピュータの選んだ数かどうかを問う。それに対して、コンピュータは Yes, No の代わりに、それら2つの数に共通にあらわれる数字の組数などの情報をフィードバックする。以下、プレーヤーが秘密の数を当てるまで、このやりとりを繰り返し、その回数の少なさを競う。数字の種類を n 個、数を m 桁とすると、可能な解答の数は n 個の異なる要素から重複を許して m 個を選ぶ重複順列の数である。

数当てゲームには、世界中に様々な変種があり、数字の重複使用を禁じるもの、数字の代わりに色を用いるものなどがよく知られている (田中, 1996)。また、数字の種類が6個で4桁の標準的な Mastermind 課題における完全探索を利用した最小質問戦略 (Koyama & Lai, 1994) や、数字の種類が10個で4桁版の Mastermind 課題の平均質問回数を最小にする戦略 (田中, 1996) も報告されている。ただし、いずれもコンピュータプログラムによって実現される戦略である。



ゲーム開始時

履歴ボタンと履歴ウィンドウ

ゲーム終了時

Figure 1. 3桁版 Mastermind 課題の例

本研究では、0, 1, 2, 3 の 4 個の数字から 3 桁の重複順列を生成し 64 個の正解が存在する簡易版 Mastermind 課題（3 桁版 Mastermind 課題）と、0, 1, 2 の 3 個の数字から 4 桁の重複順列を生成し 81 個の正解が存在する簡易版 Mastermind 課題（4 桁版 Mastermind 課題）を利用する。3 桁版 Mastermind 課題は大塚・奥田（1996, 1997, 1998）で用いられたものと同様であり、4 桁版 Mastermind 課題は Laughlin, Lange, & Adamopoulos（1982）で用いられたものと同様のものである。Figure 1 は、3 桁版 Mastermind 課題のプレー内容を図示したものである。

本実験課題において、実験参加者が選択する数字の組み合わせのことを質問コードと呼び、当てべき数字の組み合わせを正解コードと呼ぶことにする。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 とするとき、 k (CP: Correct Position) と $j-k$ (CN: Correct Number) の値を実験参加者に提示する。すなわち CP 値、CN 値は質問コードに対するフィードバック情報であり、CP 値はある試行において位置も数字も一致するものの個数、CN 値は CP 値で対象となったコード以外で位置は異なるが数字は一致するものの個数である。Figure 1 のように、3 桁版 Mastermind 課題では CP 値 3, CN 値 0 になって終了し、4 桁版 Mastermind 課題では CP 値 4, CN 値 0 になって終了する。Figure 1 の場合、正解コードは 231 である。

この実験課題は、解決の際に特別の前提知識を必要とせず、一般的な量や順序などに関する基本的な知識とゲームのルールから解を導き出せる課題である（奥田・大塚・井上, 1995）。また、ハノイの塔や放射線問題などのように、これまでの問題解決の研究で多く使われてきた問題が解決のための手掛かり情報が予め与えられているのに対して、Mastermind 課題では解決のための手掛かり情報は予め与えられず、解決過程で徐々に提示され、しかもその手掛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）。Mastermind 課題における手掛かり情報とは、1 ゲーム内における各試行の質問コードとそれに対応した CP 値、CN 値をもとに導かれる解決のために有用となる情報のことである。したがって、実験参加者は解決のための手掛かり情報の保持とその情報をもとに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で並列的に行わなければならない。

Mastermind 課題の課題分析

Mastermind 課題には、論理的なもの、ヒューリスティックなものを含め様々な解法がある（奥田他, 1995）。第 1 試行目以降試行を重ねるごとに、質問コードに対するフィードバック情報によって、

Table 1

3 桁版 Mastermind 課題の質問コードパターン

質問コードパターン	個数	質問コード
AAA	4	111, 222, 333, 000
ABA	36	212, 232, 202, 121, 131, 101, 323, 313, 303, 020, 010, 030
AAB		221, 223, 220, 112, 113, 110, 332, 331, 330, 002, 001, 003
BAA		122, 322, 022, 211, 311, 011, 233, 133, 033, 200, 100, 300
ABC	24	213, 231, 132, 123, 321, 312, 210, 201, 120, 102, 021, 012 230, 203, 320, 302, 023, 032, 130, 103, 013, 031, 310, 301

解となる質問コードの集合は論理的に漸次絞られていく。したがって、“フィードバック情報によって絞られる候補集合の中から次の質問コードを選ぶ”という論理的な推論を仮定することができる。また、“良い質問は、一般に、現在の候補集合を多数の候補集合に分割する”と想定される（奥田他, 1995）。これは、フィードバック情報によって絞られる質問コードが少ないほど、次の質問で当たる確率が高くなるためである。

さらに Mastermind 課題では、実験参加者が第 1 試行目でどのような質問コードをとるかで課題の認知的処理要求が論理的には決定される。3 桁版 Mastermind 課題の場合、第 1 試行目以降の問題空間の広がりと同じになる 3 パターンの質問コードが存在する (Table 1)。Table 1 の AAA パターンは、3 桁とも同じ数字の質問コードパターンで、000 や 111 といった 4 個の質問コードが存在する。ABA, AAB, BAA パターンは 3 桁のうち 1 桁だけ数字が異なり残りの 2 桁は同じ数字の質問コードパターンで、010 や 212 といった 36 個の質問コードが存在する。ABC パターンは、3 桁すべてが異なる数字で構成される質問コードパターンで、012, 123 といった 24 個の質問コードが存在する。各パターンの第 1 試行目のフィードバック情報に応じた質問コード数をまとめたものが Table 2 である。

実験参加者が“フィードバック情報によって絞られる候補集合の中から次の質問コードを選ぶ”という論理的な推論を行うと仮定した場合、第 1 試行目を ABC パターンで始める場合は正解の場合を除いて 8 通りの候補集合の中からフィードバック情報に応じた候補集合の中味を推論しなければ

Table 2
3 桁版 Mastermind 課題第 1 試行目のフィード

		バック情報に応じた質問コード数		
cp	cn	AAA	AAB	ABC
3	0	1	1	1
2	0	9	9	9
1	2	0	2	3
1	1	0	8	12
1	0	27	17	12
0	3	0	0	2
0	2	0	5	15
0	1	0	14	9
0	0	27	8	1
計		64	64	64

ばならない。同様に AAB パターンの場合は 7 通りの候補集合の中から CP 値, CN 値に応じた候補集合の中味を推論しなければならない。一方, AAA パターンで始める場合は, 3 通りの候補集合の中から CP 値, CN 値に応じた候補集合の中味を推論できる。第 1 試行目を ABC パターンで始めた場合, 実験参加者は 8 通りの候補集合を査定することが必要となり, 認知的処理要求はもっとも大きくなる。反対に, 第 1 試行目を AAA パターンで始めた場合, 実験参加者は 3 通りの候補集合を査定するだけでよく認知的処理要求はもっとも少なくなる。

Table 3

3 桁版 Mastermind 課題第 1 試行目質問コードパターンによる
正解コードまでの論理的平均試行回数の違い

第 1 試行目質問コードパターン	正解コードに至るまでの論理的平均試行回数
AAA	3.9
AAB	3.5
ABC	3.5

3 桁版 Mastermind 課題の問題空間について、第 1 試行目以降“CP 値、CN 値に応じた質問コードの候補集合の中から任意の質問コードを選ぶ”という論理的に矛盾しないランダムな試行を想定することが可能である。このようなランダムな試行をもとに Mastermind 課題の問題空間を分析すると、第 1 試行目の各パターンの正解に至るまでの平均試行回数は Table 3 のようになる。AAA パターンの質問コードでゲームを開始することが他の 2 つのパターンで開始するよりも効率が悪いといえる。Table 2, Table 3 に示される 3 桁版 Mastermind 課題の課題分析から、第 1 試行目を AAA パターンで始めることは実験参加者にとってもっとも認知的処理要求は低い効率はもっとも悪く、反対に第 1 試行目を ABC パターンで始めることは実験参加者にとってもっとも認知的処理要求は高い効率はよいといえる。

Table 4

4 桁版 Mastermind の質問コードパターン

質問コードパターン	個数	質問コード
AAAA	3	0000, 1111, 2222
AAAB	24	0001, 2221, 0002, 2220, 1110, 1112 0010, 2212, 0020, 2202, 1101, 1121 0100, 2122, 0200, 2022, 1011, 1211 1000, 1222, 2000, 0222, 0111, 2111
AABB	18	0011, 0022, 1122, 1100, 2211, 2200 0110, 0220, 1001, 1221, 2002, 2112 0101, 0202, 1010, 1212, 2020, 2121
ABCA	36	0120, 0210, 1021, 1201, 2012, 2102 0012, 0021, 1102, 1120, 2201, 2210 1200, 2100, 0211, 2011, 0122, 1022 1002, 2001, 0112, 2110, 0221, 1220 0102, 0201, 1012, 1210, 2021, 2120 1020, 2010, 0121, 2101, 0212, 1202

4 桁版 Mastermind 課題については、Laughlin et al. (1982) において同様の課題分析が行われている。4 桁版においては、第 1 試行目以降の問題空間の広がりと同じになる 4 パターンの質問コード

が存在する (Table 4)。4 桁版 Mastermind 課題の各質問コードパターンにおける第 1 試行目のフィードバック情報に応じた質問コード数をまとめたものが Table 5 である。4 桁版 Mastermind 課題の問題空間においても“CP 値, CN 値に応じた質問コードの候補集合の中から任意の質問コードを選ぶ”という論理的に矛盾しないランダムな試行を想定した Laughlin et al. (1982) の分析によれば、第 1 試行目の各パターンの正解に至るまでの平均試行回数は Table 6 のようになる。4 桁版 Mastermind 課題においては、第 1 試行目を AAAA パターンで始めることは実験参加者にとってもっとも認知的処理要求は低い効率はもっとも悪く、反対に第 1 試行目を AABB パターンもしくは ABCA パターンで始めることは実験参加者にとってもっとも認知的処理要求は高い効率はよいといえる (Laughlin et al., 1982)。

Table 5

4 桁版 Mastermind 課題第 1 試行目のフィードバック情報に応じた質問コード数

CP	CN	AAAA	AAAB	AABB	ABCA
4	0	1	1	1	1
3	0	8	8	8	8
2	2	0	3	4	5
2	1	0	6	8	10
2	0	24	15	12	9
1	3	0	0	0	4
1	2	0	9	12	18
1	1	0	12	16	8
1	0	32	11	4	2
0	4	0	0	1	2
0	3	0	0	4	8
0	2	0	7	6	6
0	1	0	8	4	0
0	0	16	1	1	0
計		81	81	81	81

Table 6

4 桁版 Mastermind 課題第 1 試行目質問コードパターンによる正解コードまでの論理的平均試行回数の違い

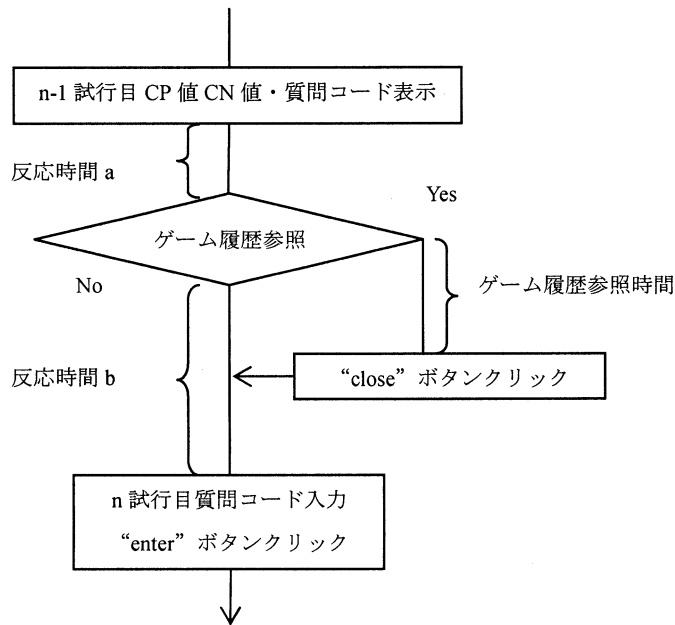
第 1 試行目質問コードパターン	正解コードに至るまでの論理的平均試行回数
AAAA	4.7
AAAB	4.1
AABB	4.0
ABCA	4.0

Mastermind 課題の解決方略

Mastermind 課題は柔軟なフィードバック情報をもつ概念達成課題と考えられ、そこで用いられる主な方略として、先行の概念学習の研究から焦点 (focusing) 方略と戦術 (tactical) 方略があると考えられる (Laughlin et al., 1982)。焦点方略は、まず数字という属性に焦点をあて、正解にはどの数

字が含まれるかについて推論を進めていく。この場合、第1試行目はAAAパターンもしくはAAAAパターンとなる。上述したようにこれはもっとも認知的処理要求が少ない方略であるが、効率は悪い。反対に戦術方略は解決のためにもっとも情報量が多くなるような質問を行うという方略で、第1試行目がABC, AABBもしくはABCAパターンで始まる。この方略は、効率はもっともよいが、認知的処理要求はもっとも高くなる。

実験参加者は、はじめのうちはこのように質問コードによって効率が異なることや認知的処理要求が異なるとは気づいていないことが多いと思われる。しかし、試行を重ねるにつれて焦点方略に気づくことは多く観察され、ABC, ABCAパターンで始めると処理要求が高くなることに気づくことも観察されている(大塚・奥田, 1994)。また、Mastermind課題は第1試行目にどのような質問コードを選ぶかで論理的な問題空間は定まるが、紙や鉛筆といった補助具を利用しない限りは完全に問題空間を推測することは不可能で、様々なヒューリスティックを用いて解決にあたっていると考えられる(奥田他, 1995)。



$$n \text{ 試行目の反応時間} = \text{反応時間 a} + \text{反応時間 b} - \text{ゲーム履歴参照時間}$$

Figure 2. Mastermind 課題における反応時間とゲーム履歴参照時間

Mastermind 課題のゲーム事態とゲームの進行過程

Mastermind 課題は正解コードの桁数と数字の個数によって正解コードの個数が決まる。正解コード数が多いほど、問題空間は大きくなりゲームは困難になる。また、ゲーム事態の設定によっても Mastermind 課題の難易度は異なる。ゲーム事態の設定として、Figure 1 中央のゲーム履歴ウィンド

ウのように常に実験参加者にそれまでの質問コード、フィードバック情報といったゲーム履歴が参照可能な場合と、直前の試行のゲーム履歴のみが参照可能な場合とでは実験参加者のワーキングメモリへの記憶負荷が異なり、ゲームの難易度が異なってくる。あるいは、試行中にメモ用紙や筆記具を利用可とするか否かでもゲームの難易度は異なる。

本研究では、実験参加者が実験課題を解決中に利用可能な外的表象としてゲーム履歴をとりあげる。本研究においては、実験参加者が問題解決中ディスプレイ上の自己産出的な外的表象である該当ゲーム履歴を利用することが可能なゲーム事態を設定した。Mastermind 課題のゲーム事態における外的表象として、ゲーム履歴は記憶負荷の軽減に有効なことが報告されている（大塚，2003；大塚・宮谷，2008a）。Figure 2 は、本実験課題の進行過程を例示したものである。CP 値、CN 値が提示され、実験参加者が“enter” ボタンをクリックするまでの時間を反応時間として記録した。また、“see trial record” ボタンをクリックするとゲーム履歴ウィンドウが開き、ゲーム履歴が参照可能となる。このゲーム履歴ウィンドウが開いている間、実験参加者は“enter” ボタンをクリックして質問コードを確定することはできない。実験参加者は、“close” ボタンをクリックしてゲーム履歴ウィンドウを閉じた後、“enter” ボタンをクリックし、質問コードを確定する。実験参加者がゲーム履歴ウィンドウを開いている時間をゲーム履歴参照時間として記録した。

方法

実験参加者 大学1年生20名（看護系学部、男性2名、女性18名）が実験に参加した。平均年齢は19.2歳（範囲：18–20歳）であった。すべての実験参加者はパソコンの操作に関して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。実験中、実験参加者はマウスとキーボードのみを操作することが可能であり、メモ用紙や筆記具を利用することはできなかった。実験は、音響設備と1名1台のパーソナルコンピュータ（以下PC）環境の整った実験室において行われた。

LST 日本語版LST（Osaka et al., 2001）を利用した。刺激文は2文条件から5文条件まで各5セットあり、あらかじめ同一の朗読者によってCDに録音されたものを再生し聴覚提示した。各刺激文は3秒から9秒の長さで再生され、次の刺激文提示までに5秒の間隔が挿入された。実験参加者はこの刺激文と刺激文の間の5秒間に刺激文の正誤を判断し、マウスによってディスプレイ上の解答画面をチェックした。刺激セットの提示が終了すると、実験参加者はターゲット語の再生が求められ、ディスプレイ上の入力欄にキーボードからターゲット語を入力した。ターゲット語の入力時間は、約20秒から60秒であった。

実験課題 3桁版および4桁版の数当てゲーム（Mastermind 課題）を実施した。ゲームは、Visual Basic6.0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、反応時間、ゲーム履歴参照時間が保存された。なお、反応時間の測定にはGetTickCount関数を利用した。実験参加者はPC（Windows2000）上でゲームを行った。正解コードはランダムに選ばれ、1ゲームあたり15試行まで可能であった。15試行目においても実験参加者が正解コードを見つける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。

本実験課題は第1試行目の質問コード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、課題の難易度が決定する課題である。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。3桁版においては第1試行目に012といった3桁とも異なる数字を提示し、フィードバック情報としてCP値0、CN値2を提示するゲームを5ゲーム、第1試行目に011といった2つの数字のみの組み合わせを提示し、フィードバック情報としてCP値1、CN値0を提示するゲームを5ゲーム、計10ゲーム行った。4桁版においては第1試行目に0011や0111といった2つの数字のみの組み合わせを提示し、フィードバック情報としてCP値0、CN値1を提示するゲームを10ゲーム行った。

記憶スパンの測定 記憶スパンとして、デジットスパンとワードスパンを測定した。測定法は大塚・宮谷（2007）と同様、極限法で行い、ISIは30ms、SOAは530msであった。

実験計画 スパン×問題空間×ゲーム履歴の混合計画とした。第1要因は実験参加者間変数であった。第2要因は実験参加者内変数で、3桁版、4桁版 Mastermind 課題の2水準、第3要因も実験参加者内変数で、ゲーム履歴有条件、履歴無条件の2水準とした。

手続き 実験は、デジットスパン→ワードスパン→LST→3桁版 Mastermind 課題→4桁版 Mastermind 課題の順で実施した。なお、各桁版 Mastermind 課題において、実験参加者はゲーム履歴有条件で10ゲーム、履歴無条件で10ゲームを行い、その実施順序はカウンターバランスした。実験参加者は、すべての課題を実験者の指示にしたがってPCを利用して行った。

結果

本研究では、実験参加者のパフォーマンスの指標として試行回数を測定した。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10ゲームを行ったので、10ゲームの試行回数の平均値をその実験参加者の試行回数とした。また、実験参加者の解決プロセスに関連する測度として、質問コード重複試行回数、反応時間、ゲーム履歴利用ゲーム数、ゲーム履歴参照回数、およびゲーム履歴参照時間を用いた。質問コード重複回数は、1ゲームの中で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。10ゲームにおける質問コード重複利用回数の平均値を各実験参加者の重複利用回数とした。反応時間は、各試行において“enter”ボタンをクリックするまでの時間である。ゲーム履歴利用ゲーム数は、10ゲーム中ゲーム履歴を利用したゲーム数である。ゲーム履歴参照回数は、試行回数に応じて増加すると考えられるので試行回数に対する比率（10ゲームのゲーム履歴参照回数合計／10ゲームの試行回数合計）についても分析を行った。同様に、ゲーム履歴参照時間も反応時間に応じて増加すると考えられるので、ゲーム

Table 7

LSTと記憶スパンテストの平均値（標準偏差）

	<i>n</i>	LST 得点	LST 総正再生数	デジットスパン	ワードスパン
高スパン群	5	4.80 (0.27)	64.80 (1.48)	6.40 (0.96)	5.88 (0.18)
低スパン群	5	2.90 (0.55)	51.00 (4.30)	6.04 (0.54)	6.04 (0.92)

履歴参照時間の反応時間に対する比率(10ゲームのゲーム履歴参照時間合計/10ゲームの反応時間合計)についても分析を行った。

実験参加者の分類 スパン得点によって上位群と下位群を設定し、課題成績を比較するという方法では、通常上位25%と下位25%の比較が行われる(Conway, Kane, Bunting, Hambrick, Wilhelm, & Engle, 2005)。本研究においても、スパン得点上位25%の実験参加者5名を高スパン群に、スパン得点下位25%の実験参加者5名を低スパン群に振り分けた。Table 7は各群のLSTおよび記憶スパンの平均値を示したものである。各群の平均値に対して*t*検定を行った結果、LST得点($t(8)=6.94, p<.001$)、LST総正再生数($t(8)=6.78, p<.001$)に有意差があり、いずれも高スパン群の得点が高かった。デジットスパン($t(8)=0.73, ns$)とワードスパン($t(8)=-0.38, ns$)に有意差はなかった。

試行回数 各条件の平均試行回数をFigure 3に示す。試行回数について、スパン×問題空間×ゲーム履歴の分散分析を行った結果、問題空間の主効果が有意で($F(1, 8)=24.92, p<.01$)、4桁条件は3桁条件に比べ試行回数が多く成績が悪かった。他の要因の主効果と交互作用は有意でなかった(スパン: $F(1, 8)=0.63$; ゲーム履歴: $F(1, 8)=2.12$; スパン×問題空間: $F(1, 8)=0.11$; スパン×ゲーム履歴: $F(1, 8)=0.22$; 問題空間×ゲーム履歴: $F(1, 8)=0.42$; スパン×問題空間×ゲーム履歴: $F(1, 8)=1.06$)。

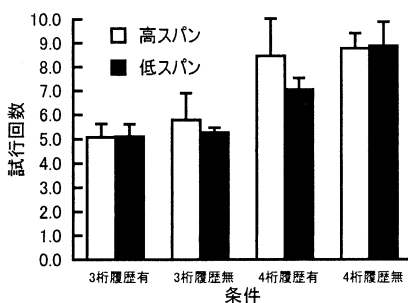


Figure 3. 各条件の平均試行回数
(誤差線は標準誤差を表す)

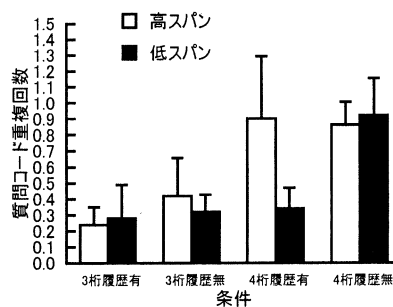


Figure 4. 各条件の平均質問コード重複回数
(誤差線は標準誤差を表す)

質問コード重複回数 各条件の平均質問コード重複回数をFigure 4に示した。質問コード重複回数について、スパン×問題空間×ゲーム履歴の分散分析を行った結果、問題空間の主効果が有意で($F(1, 8)=7.37, p<.05$)、2次の交互作用が有意傾向であった($F(1, 8)=3.73, p<.10$)。スパン($F(1, 8)=1.75, ns$)とゲーム履歴($F(1, 8)=1.37, ns$)の主効果、スパン×問題空間($F(1, 8)=0.46, ns$)、スパン×ゲーム履歴($F(1, 8)=0.55, ns$)、問題空間×ゲーム履歴($F(1, 8)=0.66, ns$)の交互作用は有意でなかった。2次の交互作用は有意傾向にとどまったが、本研究の目的にとって重要な結果であるので、高スパン群および低スパン群における問題空間×ゲーム履歴の単純交互作用についてさらに分析を行った。その結果、この単純交互作用は、低スパン群においては有意傾向($F(1, 8)=3.76, p<.10$)であったが、高スパン群においては有意でなかった($F(1, 8)=0.63, ns$)。そこで、スパンと問題空間を組み合わせた各条件でゲーム履歴の単純・単純主効果の検定を行ったところ、低スパン・4桁条件において有

意 ($F(1, 16)=4.66, p<.05$) であり、履歴有条件の方が履歴無条件より質問コード重複回数が少なかった。さらに、スパンとゲーム履歴を組み合わせた各条件で問題空間の単純・単純主効果の検定を行った結果、高スパン・履歴有条件 ($F(1, 16)=6.05, p<.05$) と低スパン・履歴無条件 ($F(1, 16)=5.00, p<.05$) で有意であり、ともに3桁条件の方が4桁条件より質問コード重複回数が少なかった。

反応時間 各条件における反応時間を図示したものが、Figure 5 である。反応時間について、ス

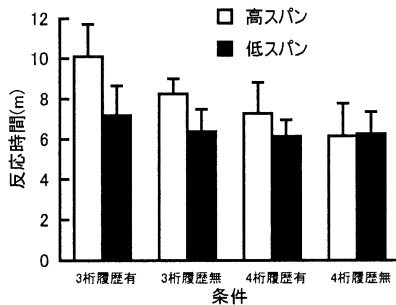


Figure 5. 各条件の平均反応時間
(誤差線は標準誤差を表す)

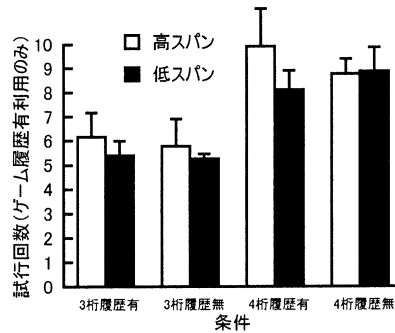


Figure 6. 各条件の平均試行回数
履歴有条件はゲーム履歴利用のみ
(誤差線は標準誤差を表す)

パン×問題空間×ゲーム履歴の分散分析を行った結果、問題空間 ($F(1, 8)=4.58, p<.10$) とゲーム履歴の主効果 ($F(1, 8)=3.86, p<.10$)、問題空間×ゲーム履歴の交互作用 ($F(1, 8)=4.19, p<.10$) が有意傾向であった。交互作用は有意傾向であったが、問題空間とゲーム履歴の相互的な関連性を検討するために、各要因の単純主効果の分析を行った。その結果、履歴有条件における問題空間の単純主効果が有意で ($F(1, 16)=7.61, p<.05$)、3桁条件は4桁条件に比べ反応時間が長かった。また、3桁条件におけるゲーム履歴の単純主効果が有意で ($F(1, 16)=7.39, p<.05$)、ゲーム履歴有条件は履歴無条件に比べ反応時間が長かった。

ゲーム履歴を利用したゲームのみの試行回数 ゲーム履歴無条件における平均試行回数と、ゲーム履歴有条件において実際に履歴を利用したゲームのみの試行回数の平均値を Figure 6 に示した。スパン×問題空間×ゲーム履歴の分散分析を行った結果、問題空間の主効果が有意で ($F(1, 8)=35.25, p<.01$)、4桁条件は3桁条件に比べ試行回数が多く成績が悪かった。他の要因および交互作用は有意でなかった (スパン要因: $F(1, 8)=1.20$; ゲーム履歴要因: $F(1, 8)=0.14$; スパン×問題空間: $F(1, 8)=0.04$; スパン×ゲーム履歴: $F(1, 8)=0.78$; 問題空間×ゲーム履歴: $F(1, 8)=0.004$; スパン×問題空間×ゲーム履歴: $F(1, 8)=0.59$)。

ゲーム履歴を利用したゲームのみの質問コード重複回数 ゲーム履歴無条件における平均質問コード重複回数と、ゲーム履歴有条件において実際にゲーム履歴を利用したゲームのみの質問コード重複回数の平均値を図示したものが、Figure 7 である。スパン×問題空間×ゲーム履歴の分散分析を行った結果、問題空間の主効果が有意で ($F(1, 8)=10.93, p<.05$)、4桁条件は3桁条件に比べ質問

コード重複回数が多かった。他の要因と交互作用は有意でなかった（スパン： $F(1, 8)=1.13$ ；ゲーム履歴： $F(1, 8)=0.44$ ；スパン×問題空間： $F(1, 8)=0.19$ ；スパン×ゲーム履歴： $F(1, 8)=0.70$ ；問題空間×ゲーム履歴： $F(1, 8)=0.60$ ；スパン×問題空間×ゲーム履歴： $F(1, 8)=3.30$ ）。

ゲーム履歴を利用したゲームのみの反応時間 ゲーム履歴無条件における平均反応時間と、ゲーム履歴有条件において実際にゲーム履歴を利用したゲームのみの反応時間の平均値を図示したものが、Figure 8 である。スパン×問題空間×ゲーム履歴の分散分析を行った結果、ゲーム履歴の主効果が有意で（ $F(1, 8)=19.15, p<.01$ ），履歴有条件は履歴無条件に比べ反応時間が長かった。他の要因と交互作用は有意でなかった（スパン： $F(1, 8)=1.11$ ；問題空間： $F(1, 8)=0.02$ ；スパン×問題空間： $F(1, 8)=0.53$ ；スパン×ゲーム履歴： $F(1, 8)=0.08$ ；問題空間×ゲーム履歴： $F(1, 8)=0.32$ ；スパン×問題空間×ゲーム履歴： $F(1, 8)=0.28$ ）。

ゲーム履歴参照回数 ゲーム履歴有条件におけるゲーム履歴参照回数を Figure 9 に示した。ゲー

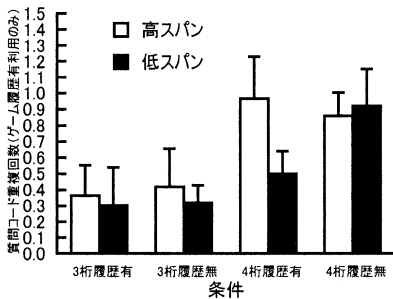


Figure 7. 各条件の平均質問コード重複回数
履歴有条件はゲーム履歴利用のみ
(誤差線は標準誤差を表す)

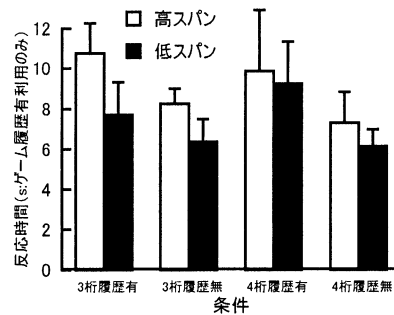


Figure 8. 各条件の平均反応時間
履歴有条件はゲーム履歴利用のみ
(誤差線は標準誤差を表す)

ム履歴参照回数について、スパン×問題空間の分散分析を行った結果、スパンの主効果（ $F(1, 8)=3.84, p<.10$ ）と交互作用（ $F(1, 8)=4.22, p<.10$ ）が有意傾向であり、問題空間の主効果（ $F(1, 8)=0.47, ns$ ）は有意でなかった。交互作用は有意傾向にとどまったが、ワーキングメモリ容量個人差によるゲーム履歴参照回数の違いについて検討するために、単純主効果の分析を行った。その結果、4桁条件におけるスパンの単純主効果が有意であり（ $F(1, 16)=7.18, p<.05$ ），低スパン群は高スパン群に比べゲーム履歴参照回数が多かった。また、低スパン群における問題空間の単純主効果が有意傾向であり（ $F(1, 8)=3.75, p<.10$ ），3桁条件よりも4桁条件においてゲーム履歴参照回数が多い傾向であった。

ゲーム履歴参照時間 ゲーム履歴有条件におけるゲーム履歴参照時間を Figure 10 に示した。ゲーム履歴参照時間についてスパン×問題空間の分散分析を行った結果、有意な効果はなかった（スパン： $F(1, 8)=2.21$ ；問題空間： $F(1, 8)=1.26$ ；スパン×問題空間： $F(1, 8)=0.96$ ）。

ゲーム履歴利用ゲーム数 問題空間に関する条件別に、10 ゲーム中ゲーム履歴を利用したゲーム数を図示したものが Figure 11 である。ゲーム履歴利用ゲーム数についてスパン×問題空間の分散分析を行った結果、スパンの主効果が有意傾向で ($F(1, 8)=4.23, p<.10$)、高スパン群は低スパン群より履歴利用ゲーム数が少なかった。問題空間の主効果 ($F(1, 8)=0.78, ns$) と交互作用 ($F(1, 8)=0.44, ns$) は有意でなかった。

試行回数に対するゲーム履歴参照回数の比率 試行回数に対するゲーム履歴参照回数の比率 (10 ゲームのゲーム履歴参照回数合計/10 ゲームの試行回数合計)の平均値を図示したものが、Figure 12 である。ゲーム履歴参照比率について、スパン×問題空間の分散分析を行った結果、問題空間の主効果 ($F(1, 8)=5.33, p<.05$) と交互作用 ($F(1, 8)=5.33, p<.05$) が有意であり、スパンの主効果 ($F(1, 8)=1.97,$

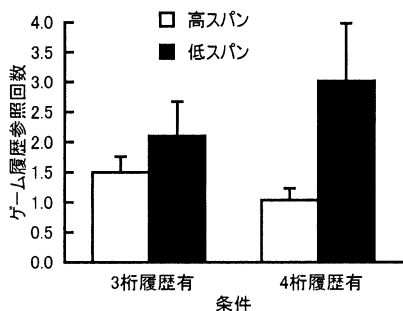


Figure 9. 平均ゲーム履歴参照回数
(誤差線は標準誤差を表す)

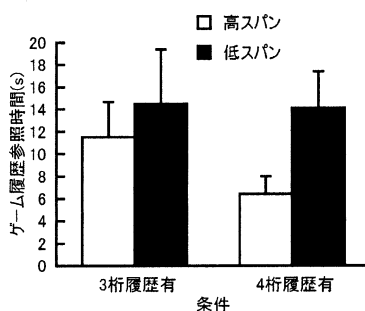


Figure 10. 平均ゲーム履歴参照時間
(誤差線は標準誤差を表す)

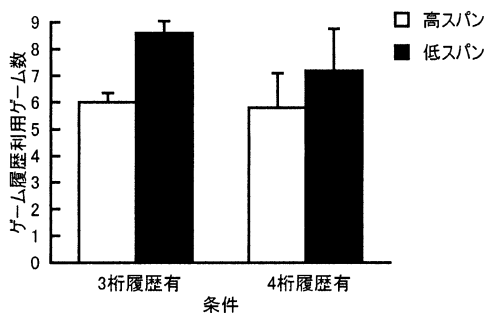


Figure 11. ゲーム履歴利用ゲーム数
(誤差線は標準誤差を表す)

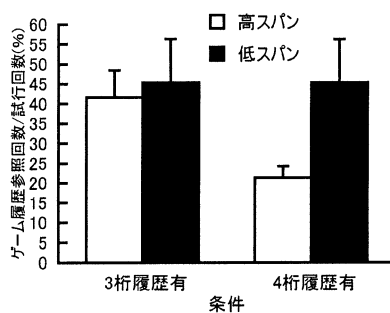


Figure 12. 試行回数に対するゲーム履歴参照回数の比率
(誤差線は標準誤差を表す)

ns) は有意でなかった。各要因の単純主効果について分析した結果、4桁条件におけるスパンの単純主効果が有意であり ($F(1, 16)=4.90, p<.05$)、低スパン群は高スパン群に比べゲーム履歴参照比率が高かった。また、高スパン群における問題空間の単純主効果が有意であり ($F(1, 8)=10.66, p<.05$)、

3桁条件に比べ4桁条件においてゲーム履歴参照比率が小さかった。

反応時間に対するゲーム履歴参照時間の比率 ゲーム履歴参照時間の反応時間に対する比率（10ゲームのゲーム履歴参照時間合計／10ゲームの反応時間合計）の平均値を、Figure 13に示す。スパン×問題空間の分散分析を行った結果、スパンの主効果（ $F(1, 8)=5.34, p<.05$ ）と交互作用（ $F(1, 8)=6.17, p<.05$ ）が有意で、問題空間の主効果（ $F(1, 8)=1.26, ns$ ）は有意でなかった。各要因の単純主効果の分析を行った結果、4桁条件におけるスパンの単純主効果が有意で（ $F(1, 16)=10.28, p<.01$ ）、低スパン群は高スパン群に比べゲーム履歴参照時間比率が高かった。また、低スパン群における問題空間の単純主効果が有意で（ $F(1, 8)=6.50, p<.05$ ）、3桁条件に比べ4桁条件においてゲーム履歴参照時間の比率が高かった。

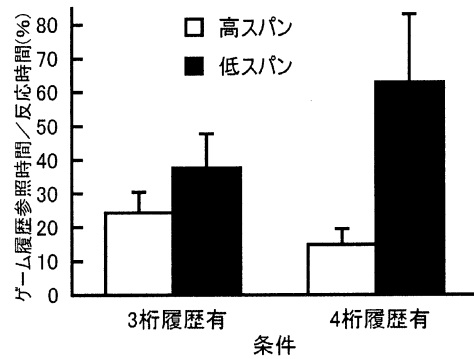


Figure 13. 反応時間に対する履歴参照時間の比率
(誤差線は標準誤差を表す)

考察

本研究の目的は、問題解決におけるワーキングメモリ容量個人差と外的表象の利用について検討することであった。そのために、ワーキングメモリでの情報の保持と処理の並列的な処理が必要な領域に依存しない簡易な実験課題を用意し、ワーキングメモリ容量の個人差（スパン）、問題空間の大きさ、外的表象の有無という3要因を取り上げた。実験参加者の問題解決パフォーマンスと、問題解決プロセスにおける反応時間と外的表象の利用の程度について分析を行った。これらの分析結果をもとに、外的表象によってワーキングメモリ容量の個人差は補償されるのか、また、ワーキングメモリ容量の個人差によって外的表象の利用程度や解決過程は異なるのか、そもそも外的表象の利用はどの程度パフォーマンスに有効であるのか、といった点について以下に考察をすすめる。

ワーキングメモリ容量個人差と問題解決パフォーマンス

本研究で採用した実験課題は、できるだけ少ない回数で正解コードにいたることを目的とした課題であり、正解コードにいたる試行回数を少なくすることを競うものである。実験参加者の平均試行回数について分析した結果、問題空間の主効果のみが有意であり、スパンやゲーム履歴の効果はなかった。また、実際にゲーム履歴を利用したゲームの試行回数のみを抽出して分析した結果においても、問題空間の主効果のみが有意であり、ゲーム履歴やワーキングメモリ容量個人差の影響はなかった。これらの結果は、ワーキングメモリ容量個人差や外的表象は、本実験課題のパフォーマンスに対して直接的には影響を及ぼしていないことを示すものである。

一方、同様の実験課題を用いた大塚（2003）では、難易度の高い実験課題において、ディスプレイ上の外的表象が RST によって測定された低スパン群の実験参加者に有効であったことが報告さ

れている。ただし、大塚（2003）ではディスプレイ上の外的表象は常に参照可能であり、本実験とは課題の性質が多少異なっている。このような外的表象の利用可能性の違いが2つの研究結果の相違をもたらしているのかもしれない。

さらに、大塚（2007）では、本研究と同様の3桁版 Mastermind 課題において RST によって測定されたワーキングメモリ容量個人差の影響が観察された。本研究ではワーキングメモリ容量の査定に LST を用いたが、大塚（2003）および大塚（2007）では RST を利用しており、ワーキングメモリの査定方法の違いの影響もあると思われる。一方、同様の課題における外化とワーキングメモリ容量個人差を検討した大塚・宮谷（2008a）では、任意にメモ用紙や鉛筆を利用できる条件と利用できない条件の間に、問題解決パフォーマンスの違いはなかった。大塚（2003, 2007）、大塚・宮谷（2008a）、さらに本研究という一連の研究から、問題解決に及ぼす外的表象の影響は、その利用形態や形式によって異なることが示唆される。一般に、外的表象を含む外的資源は分散ワーキングメモリ資源とみなされ、ワーキングメモリの延長として機能すると想定されるが、外的資源の種類や形式によってその役割や機能は異なることが指摘されている（Cary & Carlson, 1999, 2001）。本実験課題における外的資源の種類や形式について、今後さらに検討していく必要がある。

問題解決プロセスと外的表象

質問コード重複回数は、実験参加者が一度利用した質問コードを保持できていなかったことを示す測度である。質問コード重複回数について分析した結果、スパン×問題空間×ゲーム履歴の交互作用が有意傾向であり、低スパン・4桁条件においてゲーム履歴有条件の方が履歴無条件に比べ質問コード重複回数が少なかった。この結果は、課題の難易度の高い4桁条件において低スパン群にはゲーム履歴が有効に働いたことを示唆する結果である。ただし、実際にゲーム履歴を利用したゲームにおける質問コード重複回数については、問題空間の主効果のみが有意でその他の効果は有意ではなかったことから、今後のさらなる検討が必要である。

ゲーム履歴参照回数について分析した結果、スパン×問題空間の交互作用が有意傾向であり、4桁条件で低スパン群は高スパン群に比べゲーム履歴参照回数が多く、低スパン群は3桁条件に比べ4桁条件でゲーム履歴参照回数が多かった。この結果は、低スパン群がゲーム履歴をより頻繁に利用していたことを示唆する結果である。低スパン群の実験参加者は、ワーキングメモリ容量の制約を補償するためにゲーム履歴を高スパン群の実験参加者よりも多く利用していたことが推測される。

ゲーム履歴の利用について詳細に検討するために、試行回数に対するゲーム履歴参照回数の比率について分析した結果、スパン×問題空間の交互作用が有意であり、4桁条件において低スパン群は高スパン群に比べゲーム履歴参照回数の比率が高いことが示された。同様の結果は、ゲーム履歴参照時間の反応時間に対する比率においても示された。また、ゲーム履歴を利用したゲーム数も低スパン群の方が多かった。これらの結果は、低スパン群の実験参加者が高スパン群に比べより多くゲーム履歴を利用していたことを示すものである。低スパン群における問題解決プロセスでは、ゲーム履歴がワーキングメモリ資源の制約を補償するように機能していたことが示唆される。高スパン群と低スパン群で、デジットスパンとワードスパンには差がないことから、両群のゲーム履歴の利用の違いは短期記憶成分によるものではないことも示唆される。

以上の結果から、本研究で検討した実験課題のパフォーマンスには、外的表象の有無による違いはみられなかった。一方、問題解決プロセスにおいては低スパン群にとって外的表象が有効に機能していたことが示唆された。大塚（2007）は、本研究と同様の3桁版 Mastermind 課題を用いた実験を行い、パフォーマンスにおいても RST によって測定されたワーキングメモリ容量個人差の影響があることを報告している。本研究で用いたような GP 分析法では、ワーキングメモリスパン課題の成績をワーキングメモリ容量の指標として利用する。このような手法を利用する場合は、スパン得点だけでなく他の集計方法も併用することや、複数のワーキングメモリスパン課題を用いることが推奨されている（Conway et al., 2005）。今後、LST と RST による結果の相違も含め、複数のワーキングメモリスパン課題を利用した検討を行うことが有効であると考えられる。

我々の高次認知活動において、ワーキングメモリ容量個人差は外的表象や外的行為といった外的資源の利用によってどのように補償されるのか、あるいは外的資源が利用できる場合においてもワーキングメモリ容量個人差はパフォーマンスの基本的な決定因であるのかなどについて、今後さらに検討をすすめていく必要がある。

引用文献

- Carlson, R. A. (1997). *Experienced cognition*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- 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.
- Conway, A. R. A., Kane, M. J., Bunting, M. F., Hambrick, D. Z., Wilhelm, O., & Engle, R. W. (2005). Working memory span tasks: A methodological review and user's guide. *Psychonomic Bulletin and Review*, **12**, 769-786.
- Daneman, M., & Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, **19**, 450-466.
- Gilhooly, K. J., Logie, R. H., Wetherick, N. E., & Wynn, V. (1993). Working memory and strategies in syllogistic reasoning tasks. *Memory & Cognition*, **21**, 115-124.
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1992). A capacity theory of comprehension: Individual differences in working memory. *Psychological Review*, **99**, 122-149.
- 近藤洋史・森下正修・荻阪直行 (1999). 読みのワーキングメモリとリーディングスパンテスト 心理学評論, **42**, 506-523.
- Koyama, K., & Lai, T. W. (1994). An optimal mastermind strategy. *Journal of Recreational Mathematics*, **25**, 251-256.

- 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.
- Laughlin, P. A., Lange, R., & Adamopoulos, J. (1982). Selection strategies for "Mastermind" problems. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, **8**, 475-483.
- Miyake, A. (2001). Individual differences in working memory: Introduction to the special section. *Journal of Experimental Psychology: General*, **130**, 163-168.
- Miyake, A., Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1994). Working memory constraints on the resolution of lexical ambiguity: Maintaining multiple interpretations in neutral contexts. *Journal of Memory and Language*, **33**, 175-202.
- 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.
- 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.
- Osaka, M., Osaka, N., Kondo, H., Morishita, M., Fukuyama, H., Aso, T., & Shibasaki, H. (2001). Individual differences in verbal working memory: An fMRI study. *Clinical Neurophysiology*, **112**, 1123.
- 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・宮谷真人 (2007). 問題解決における分散ワーキングメモリ資源と外的表象の利用 広島大学教育学研究科紀要 第三部 (教育人間科学領域), **56**, 227-236.
- 大塚一徳・宮谷真人 (2008a). 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 広島大学教育学研究科紀要 第三部 (教育人間科学領域), **57**, 261-268.
- 大塚一徳・宮谷真人 (2008b). 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**, 47-56.
- 大塚一徳・奥田富蔵 (1994). 数当てゲームにおけるプレー知識の集積と解決方略 教育工学関連学協会連合第 4 回全国大会講演論文集, 481-482.
- 大塚一徳・奥田富蔵 (1996). ワーキングメモリへの記憶負荷が問題解決に及ぼす影響 東海大学短期大学紀要, **29**, 115-120.
- 大塚一徳・奥田富蔵 (1997). 作動記憶上への継時的な記憶負荷の増加が問題解決に及ぼす影響 東海大学短期大学紀要, **30**, 43-48.
- 大塚一徳・奥田富蔵 (1998). 問題解決における言語的作動記憶容量と解決方略 東海大学短期大学紀要, **31**, 37-42.

- 齊藤 智・三宅 晶 (2000). リーディングスパン・テストをめぐる6つの仮説の比較検討 心理学評論, **43**, 387-410.
- Schönplflug, W. (1986). The trade-off between internal and external information storage, *Journal of Memory and Language*, **25**, 657-675.
- 田中哲朗 (1996). 数当てゲーム MOO の最適戦略 ゲームプログラミングワークショップ'96, 202-209.
- 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.