

Title	学習・教授場面における作動記憶の容量制限に対する対処法
Sub Title	The way to solve the problems about the capacity limitation of working memory in the situations of learning and instruction
Author	佐々木, 尚(Sasaki, Takashi)
Publisher	三田哲學會
Publication year	2006
Jtitle	哲學 No.115 (2006. 2) ,p.239- 262
JaLC DOI	
Abstract	The purpose of this paper was to present the methods to solve the problems about the capacity limitation of working memory in the situations of learning and instruction. After the definition, the models, and the limitation of working memory were proposed, the methods to cope with the working memory limitation were proposed. Firstly the way to reduce working memory load was introduced. Secondly the use of long-term memory/knowledge for quickly and efficiently information processing was introduced. Thirdly the importance of exploring the advantage of small working memory was stated. Fourthly the interaction of learning / instruction strategy and working memory capacity was investigated. Finally the residual issues about the capacity limitation of working memory were discussed.
Notes	特集教育研究の現在-教育の統合的理解を目指して- 教育心理学 投稿論文
Genre	Journal Article
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN00150430-00000115-0241

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

投稿論文

学習・教授場面における作動記憶の 容量制限に対する対処法

佐々木

尚*

The Way to Solve the Problems about the Capacity Limitation of Working Memory in the Situations of Learning and Instruction

Takashi SASAKI

The purpose of this paper was to present the methods to solve the problems about the capacity limitation of working memory in the situations of learning and instruction. After the definition, the models, and the limitation of working memory were proposed, the methods to cope with the working memory limitation were proposed. Firstly the way to reduce working memory load was introduced. Secondly the use of long-term memory/knowledge for quickly and efficiently information processing was introduced. Thirdly the importance of exploring the advantage of small working memory was stated. Fourthly the interaction of learning / instruction strategy and working memory capacity was investigated. Finally the residual issues about the capacity limitation of working memory were discussed.

* 慶應義塾大学大学院社会学研究科博士課程（教育心理学，認知心理学）

ヒトは、深刻な制限の下に生きている。特に、作動記憶容量には厳しい制限がかけられており、ヒトの純粹な短期記憶範囲は平均で4チャンク程度しかない (Cowan, 2001)。この4チャンクという大きさは、日常の認知活動において我々がしなくてはならない膨大な情報処理量を考えると、小さすぎる。また、作動記憶は学習において重要なデバイスであるといわれているが (Baddeley, Gathercole, & Papagno, 1998), このような小さな作動記憶しか持ち得ないとしたら、我々は膨大な知識獲得をする際に重大な不利益をこうむることになる。さらに、作動記憶の容量制限は教授場面においても悪影響をもたらすものと想像される (Sweller, van Merriënboer, & Paas, 1998; Sweller, 2003; van Merriënboer & Sweller, 2005)。

以上のことを踏まえて、本稿では、作動記憶の容量制限への対処法を考えていく。まず、作動記憶の理論と容量制限について展望し、その後、対処法として有効だと思われる方策を提示していく。

作動記憶の定義

作動記憶とは、短期的な記憶の保持と情報の制御を司るシステム (Baddeley, 2001) である。また、作動記憶はいくつかのシステムに分けられることが予想され、容量の限界や長期記憶との関与も仮定されている (Miyake & Shah, 1999)。作動記憶は、様々な日常における認知活動に関わっている。例えば、まとまった文章を読むときには、以前の文の内容を覚えておきながら、言い換えれば文脈を感じながら読まなければ、なかなか読み進むことができないはずである。また、電話をかけようとしているうちに、その電話番号を忘れてしまった経験がある人も多いことだろう。作動記憶とは、このように、何かを覚えておきながら作業をするときに使われる記憶であるとされている。

作動記憶のモデルは数々あるが、まず Baddeley のモデルを紹介する

(Baddeley, 2000, 2001). このモデルは、中央実行系 (central executives) に3つの隷属システムがつき、それらに対応して3つの結晶性認知システムが存在するというモデルである。隷属システムは、言語的な情報の短期的保持およびリハーサルをつかさどる部分である音韻ループ (phonological loop), 視覚的・空間的情報の保持およびリハーサルをつかさどる部分である視空間スケッチパッド (visuospatial sketchpad), そして最近付け加わったエピソードバッファー (episodic buffer), の3つがあり、さらに隷属システムには下位システムが仮定されている。音韻ループの下位には音韻ストア (phonological store) と構音リハーサルシステム (articulatory rehearsal system) が、視空間スケッチパッドの下位には視覚キャッシュ (visual cache) とインナー・スクライブ (inner scribe) が仮定されている。また、音韻ループに対応する結晶性システムとしては、言語 (language), 視空間スケッチパッドに対応する結晶性システムは視覚的意味 (visual semantics) が考えられている。中央実行系は、作動記憶システムの制御に関わる部分とされており、記憶の短期的保持には関与しないとされている (Baddeley & Logie, 1999). 最近の理論的進展によって中央実行系の機能も整理されてきており、焦点的注意、分割的注意、転換的注意など、「注意」にその機能は集約されそうな気配である (Baddeley, 2001).

最近新しく導入された隷属システムがエピソードバッファーである (Baddeley, 2000). このシステムの機能は今まで中央実行系の機能として含まれていたもので、ほかの隷属システムに保持されているような様々な資源からの情報の統合や、長期記憶とのインターフェースを司るとされている。エピソードバッファーに関連した論文はまだ数少ないが、神経心理学的研究 (Baddeley & Wilson, 2002), 実験研究 (Jefferies, Ralph, & Baddeley, 2004), 相関研究 (Alloway, Gathercole, Willis, & Adams, 2004) など少しづつではあるが実証データが集まってきている。ちなみ

に、エピソードバッファーに対応する結晶性システムは、エピソード長期記憶 (episodic LTM) である。

この他のモデルとしては、CAPS (capacity-constrained, concurrent, activation-based system; Just & Carpenter, 1992) や Engle らのモデル (Engle, Kane, & Tuholski, 1999) のように領域汎用的な情報処理資源や制御機能を仮定するモデル、長期作動記憶仮説 (Ericsson & Kintsch, 1995) のように長期記憶との関係を重視したモデル、課題スイッチング仮説 (Towse, Hitch, & Hutton, 1998) のように情報の保持と制御の関係の解明にメスを入れたモデルなどが提示されている。

作動記憶の容量制限

作動記憶には容量制限がある。たとえば、Miller (1956) は、人の短期記憶容量は 7 ± 2 チャンクであると主張した。しかし、最近では人の純粋な短期記憶容量は 4 チャンク程度であるという主張がなされている (Cowan, 2001)。Cowan は、(1) 個々の刺激のチャンキングを制限する情報の過負荷の存在を検討した実験、(2) 刺激をより大きなチャンクへと記録するのを妨害するほかの方法を検討した実験、(3) 容量制限のせいで課題遂行が断絶してしまった要因を検討した実験、(4) 容量制限の間接効果を検討した実験を行うことによって、純粋な短期記憶容量制限を観察できるのではないかと主張した。そこで、この 4 つに当てはまるさまざまな研究を展望した結果、Cowan (2001) は、ヒトの純粋な短期記憶容量は 3-5 チャンク、平均 4 チャンク程度ではないかと結論づけた。Cowan (2001) に対する反論としては、McElree & Doshier (2001) による 1 チャンク説や、Ericsson & Kirk (2001) のように、訓練によって記憶範囲が 4 チャンクを超えて拡大するという説などがある。また、作動記憶の容量制限については、主に心理学的手法によって研究されてきたが、電気生理学的研究によっても、容量制限を示唆する知見も現れてきている

(Lisman & Idiart, 1995).

では、なぜ作動記憶に容量制限があるのだろうか。まず一つ目に考えられるのが、進化論的な理由である。ヒトの記憶容量は進化における適応の過程の中で最適化されてきたのではないか、ということが考えられる（齋藤, 1998; Cowan, 2001）。また計算論モデルでもこのような最適化に関する知見が見られる。O'Reilly, Braver, & Cohen (1999) は彼らの計算論的モデルの知見から、作動記憶に制限があるのは、前頭葉の機能、つまり作動記憶に制限をかけておくことで、過活性化を防ぎ、情報処理を効率よく行うためではないか、と推論している。もう一つの理由としては、作動記憶容量の小ささが課題遂行にメリットを与えるというものである。言語獲得 (Newport, 1988, 1990, 1991; Elman, 1993) や相関関係の知覚 (Kareev, 1995; Kareev, Lieberman, & Lev, 1997) など、作動記憶容量が小さいほうが有利だという知見が報告されている（後の「作動記憶容量が小さいことによる有利さ」の節で詳しく説明する）。これらの意見は、作動記憶の容量制限の存在理由を考えるにあたり非常に有用な示唆を与えてくれる。しかし、現在のところ進化論的理由に関しては確かめようがなく、作動記憶容量が小さいことによる有利さに対しても反論が見られ (Rohde & Plaut, 1999; Tomasello, 2003), 神経科学的知見からは容量制限の存在理由について説明することが今のところ出来ない (Marois & Ivanoff, 2005)。このことから、作動記憶の容量制限の存在理由について考えていくことは、もう少し実証データの蓄積を待ってから慎重に行うべきであろう。

容量制限に対する対処法

このように、作動記憶には厳しい容量制限がある。そのため、このシステムに対する制限が障害となって様々な課題の遂行に悪影響を与えており、特に、二重課題を遂行する場合にはその影響は深刻である (Paschler,

1994; Marois & Ivanoff, 2005).

そこで、作動記憶の容量制限に対する対処法が必要であるが、本稿では、4つの方法を提示する。その対処法は順に、(1) 作動記憶に対する負荷を軽減する、(2) 長期記憶・既有知識の利用、(3) 作動記憶容量が小さいことによる有利さを見つける、(4) 学習・教授方略との交互作用を見つける、である。

作動記憶負荷の軽減

作動記憶の容量限界に対応する方法の一つ目として、認知的負荷を減らす、という方法が考えられる。二重課題法を用いた研究では、作動記憶に対する負荷が語彙の反復学習 (Papagno, Valentine, & Baddeley, 1991) や数式の演算 (DeStefano & LeFevre, 2004) などに悪影響を与えることがわかっている。このことから、作動記憶に対する負荷を軽減すれば、学習成績は高くなることが予想される。

では、どの作動記憶負荷を減らせばよいであろうか。このことに関しては、認知負荷理論 (cognitive load theory; Sweller, et al., 1998; Sweller, 2004; van Marrienoer & Sweller, 2005) の適用が有効である。彼らの理論によると、ヒトの認知構造は容量に制限を持つ作動記憶と制限の無い長期記憶とに分かれている。そして、制限のある作動記憶に対する負荷は、三種類ある。一つは、内生的認知負荷 (intrinsic cognitive load) というもので、これは学習課題などの教材にもともと備わった負荷である。たとえば、外国語の単語を覚えるという作業は、この課題内に含まれる要素が少なく、要素間の相互作用が比較的少ないため、内生的認知負荷は低いと判断することができる。また、文法を学習したり、数式を解いたりする作業は、課題内に含まれる要素が多く、要素間の相互作用も多いため、内生的認知負荷は高いと判断できる。二つ目は、外生的認知負荷 (extraneous cognitive load) である。これは教授時に起こる負荷で、情報の構造

や認知的アーキテクチャーを軽視した教授手続きがなされた場合に高くなる。三つ目は、密接的認知負荷 (germane cognitive load) である。この認知負荷も教材の提示方法に由来するものであり、スキーマの獲得や自動化を発生させる際に起こるものである。認知課題の適切な遂行のためには、これらの認知負荷を低下させればよい。

それでは、どの認知負荷を低下させればよいのだろうか。Sweller, et al. (1998) によれば、内生的認知負荷は軽減できないという。また、密接的認知負荷は、スキーマ形成の際の副産物であるから、これも軽減する必要はない。そうすると軽減すべきは外生的認知負荷ということになる。外生的認知負荷を低下させれば、密接的認知負荷に割り当てることができる作動記憶容量は大きくなり、その結果スキーマの獲得や情報処理の自動化が促進される。さらにスキーマや自動化は認知負荷を軽減し、作動記憶容量をより高度なスキーマを使った学習に割り当てることができるようになる、というサイクルが出来上がるのである。

認知負荷に対する彼らの研究は数多くあり、Sweller, et al. (1998) や Sweller (2003) などに数多く紹介されている。たとえば、目標自由効果 (goal-free effect) は、目標にとらわれなくて分かるところから解答していくほうが作動記憶負荷は相対的に小さくなるためスキーマ形成を促進する、という効果である。たとえば、手段-目標分析を用いて問題解決する時を考えよう。問題に取り組んでいる人はまず現在の状態と目標状態を把握し、その後何らかの操作子を用いたときの状態と目標状態を比較し、現在の状態を目標に近づけていく、という作業を行うが、この作業は初心者にとっては認知負荷が高い解答方略である。このことを考えると、手段-目的分析は初心者にとっては貴重な作動記憶容量を奪われる方略となってしまうスキーマ獲得が困難になるので、作動記憶容量を食わない、目標にとらわれなくて分かるところから解いていく方略のほうが初心者にとっては望ましい方略になるのである。

また、教授場面で用いる例や図に関しても認知負荷理論の観点から研究が行われており、例示工夫効果 (worked example effect) や注意分割効果 (split-attention effect) などが報告されている。例示工夫効果は、よく練られた例示はスキーマ形成や転移によい影響を及ぼすという効果である。これは慣習的な例示や教授方略より効果が高く、Zhu & Simon (1987) はこの効果を用いることにより多くの生徒は二次式の因数分解を短い時間で身につけることが出来たと報告した。彼らは、二次式の因数分解をこの手順をプロダクション・システムの理論を用い、たとえば、「もし目標が (x^2+ax+b) を因数分解することであれば、 x^2 は $x \cdot x$ と分解される。」というように手順を記述して、教材を作った。このような教材を用いて因数分解を教えたあと、生徒達の片方の群にはこの教材の内容を踏まえた例示付きの計算訓練をさせ、もう片方の群は例示無しで計算訓練をさせたところ、例示付きの群の多くの生徒は計算を短時間で身につけることが出来た。さらにこのような工夫をした例示を授業で使い続けた結果、3年かかる数学のカリキュラムを2年で終わらせることが出来た。注意分割効果は説明が図や例から分離された状態で提示されると、学習成績が落ちるといふ効果であり、これを防ぐには説明を図や例と統合した形で提示するとよいとされている。この他にも例や図に関する効果が報告されており、音韻的情報を入力するチャンネルと視覚的情報を入力するためのチャンネルの両方を使って教示すると作動記憶容量が増大し学習効果があがるというモダリティ効果 (modality effect) や、1つのチャンネルからの多すぎる付加情報が学習を妨げる冗長性効果 (redundancy effect) などが報告されている。

長期記憶・既有知識の利用

二つ目の方法としては、長期記憶やあらかじめ個人が持っている知識を利用して、検索などの情報処理を効率化したり、処理速度を上げたりする

ことによって、作動記憶容量の小ささに起因する学習に対する不利益を小さくする方法があげられる。この方法をとる際に、長期作動記憶仮説 (Ericsson & Kintsch, 1995) は有効な指針となると考えられる。

長期作動記憶とは、Ericsson & Kintsch (1995) が提唱したモデルである。彼らは、記憶術の達人やある領域の熟達者の得意な領域における優れた記憶能力を説明するには、今までの短期記憶理論や作動記憶理論では説明がつかないとした。つまり、すべての情報が短期記憶や作動記憶の中で活性化しているとは考えにくく、なんらかの形で長期記憶が関与しているのではないかと彼らは考えた。そこで、Ericsson & Kintsch (1995) は、熟達者たちはその関連分野での豊かな知識と技能を元に、提示された情報を後ですぐに検索して使えるようにした状態で長期記憶に貯蔵している、つまり、符号化時に検索構造 (retrieval structure) や精緻化された記憶構造 (elaborated memory structure) を形成しているとし、実際に短期記憶や作動記憶 (彼らの言うところの短期作動記憶) に蓄えられているのは検索手がかり (retrieval cue) となるごく僅かな情報だけである、と考えた。つまり、長期作動記憶とは、短期作動記憶内に蓄えられた検索手がかりがあれば、すぐに取り出して使うことのできる長期記憶内の情報である。

たとえば文章理解について考えてみよう。我々はなじみのある文章をすばやく理解し記憶することができるが、それは長期作動記憶を使用しているからであると解釈することができる。我々は日常経験や一般的知識を用いることにより文章のすばやい記憶や理解を成し遂げることができるのである。このような状況下で、Butcher & Kintsch (2003) は長期作動記憶は二つの役割を担っていると述べている。まず一つ目の役割は、自動的な情報の活性化であり、概念やフレーム、スクリプト、スキーマ、個人的経験が作動記憶内に保持されている情報と読者の一般的知識やエピソード記憶を結びつけるといった処理が行われる。このことはこの知識が短期作動

記憶に保持されるということの意味するのではなく、この情報が使用可能な状態にあることを意味する（つまり、検索構造の構築が完成したといえる）。この処理過程は推論ということも出来、よく学習された知識が長期記憶内にあるのであれば、我々の理解のギャップを埋める作業に活性化された知識が使われ、文章の意味を推定する、という処理が行われる。もう一つの役割は、すでに構築されたテキストの心的表象をすばやいアクセスが可能な状態に保つことである。つまり、短期作動記憶内において文章に焦点的注意を向ける、という処理を行っている。以上のような知識の活性化と短期作動記憶の利用によって、我々は文章理解を行うことができるのである。

また Ericsson & Delaney (1999) は、われわれは新奇な状況で問題解決をするときにも既存知識を使うことがあるから、長期作動記憶は見知らぬ領域での課題を解く時にも必要となるのではないかと述べている。さらに長期作動記憶のモデルからすると、領域共通な技能や知識、課題を解く手続きは情報を符号化する技能内に統合されているため、記憶と知識、手続きを厳密に区分するような今までの伝統的な区分は技能に関する説明をするには妥当ではない、とも述べている。個人差に関してとも言及がある。Ericsson & Delaney (1999) は、個人ごとに表象や知識、方略が異なるのだから、長期作動記憶にも個人差があるのかも知れないと述べている。

彼らのモデルの中で、もっとも特徴的なことは2つある。まず1つは、熟達化を理論の中に取り込んでいる点であろう。記憶のエキスパートたちはその関連分野での豊かな知識と技能を元に、提示された情報を後ですぐに検索して使えるようにした状態で長期記憶に貯蔵しているという考えは、まさにこれにあたる。もう1つは、長期記憶との関連を積極的に考えている点である。Baddeley の二重課題法にしる、リーディングスパンテスト (Daneman & Carpenter, 1980) などの作動記憶容量課題にしる、

短期記憶の実験パラダイムを利用して研究がなされ、Ericsson & Kintsch (1995) がこのような主張をするまでは、長期記憶との関連はあまり取り上げられてはこなかった。それに対して、Ericsson & Kintsch (1995) では、リーディングスパンテストの回答方略に知識や技能が影響を与えていると考察を加えるなど、長期記憶が作動記憶課題の中でどのように振舞うかということモデルに入れている。最近では Baddeley (2000) がエピソードバッファーという隷属システムを提唱しているが、それは、この長期作動記憶のモデルが影響を与えていると考えられている。

情報処理を効率化したり、速度をあげたりするためには、この長期作動記憶仮説で言うところの検索構造をつくりあげればよいことになる。しかし、このためにどのような訓練を行えばよいかは不明確である。また、この仮説における検索構造の概念は、順序に関する記憶が重要な場合や、記憶構造の構成や使用に意識的な努力が必要とされる場合、入力が系列的に符号化される場合は、理論的に疑わしい説明を提示することがある (Gobet, 2000)。このことから、日常における教授・学習場面に長期作動記憶仮説を応用するには、まだ検討の余地がある。

作動記憶容量が小さいことによる有利さ

三つ目の対処法は、作動記憶容量の小さいことによる有利さを探ることである。幾つかの限られた領域では、作動記憶容量が小さい事による優位性が示されており (Miyake & Shah, 1999; 三宅・齊藤, 2001)、言語学習に関する研究が数多く見られる。このような有利さが生起する要因を検討していけば、作動記憶容量が非常に小さい場合にも有効な学習・教授方略が見つかることが期待される。

例えば、“The less is more hypothesis (Newport, 1988, 1990, 1991)” があげられる。彼は、記憶容量などの、子供の発達における初期の認知的

制約は言語発達に関しては良い影響を及ぼす、と主張した。この理由として、彼は、認知的制約がある場合の方が言語に対する内的分析がしやすいことをあげている。子供は認知的制約があるため他人の発話の中から少ししか情報を抽出できないが、それゆえに少しずつ言語に対する分析をすることができ、認知的限界が解消されていくにつれて分析された項目を増加させてゆく。そのようにして言語獲得において誤りを少なくしている。しかし、大人は多くのことを一遍に抽出できるが、一度に多くの分析をするという困難に陥るため、言語獲得において誤りが多くなる。このように、制限があるほうが内的分析といった心的努力をするので、結局は言語の学習に成功するというのが、Newportの主張であった。

この仮説と似たような研究が、コンピュータシミュレーションで行われている。Elman (1993) は関係節を含む複雑な文の学習をシミュレーションした。その結果によると、文脈層から隠れ層へのループを操作して、人間で言うところの作動記憶容量を最初は小さく、そしてだんだん大きくするようにした方が、最初から作動記憶容量が大きいときに比べて文の学習において誤りが少ない、ということが明らかになった。

また、Cochran, McDonald, & Parault (1999) による、アメリカンサインランゲージ (ASL) の研究もこの考えを支持している。この研究では、手話を学習する際に計数課題を同時に課した負荷あり条件の大学生被験者のほうが、負荷無し条件の被験者よりも学習時間は長くかかるが、学習した ASL 動詞の未学習文脈での使用に関しては成績が良い、という結果が出た。この結果の解釈としては、作動記憶容量を制限すると、文の全体的処理ができなくなるかわりに、言語の内的構造を分析できるようになり、その結果、新しい文脈での般化を生み出す、ということが主張された。

音韻意識の獲得においても作動記憶容量が小さいことによる有利さが指摘されている。Gibbs (2004) は 5 才から 7 才の被験児に対して音韻意識の獲得に関する研究を行った。最初のセッションではライム意識、音素意

識、記憶範囲、語彙量を測定し、6カ月後に、同じ尺度をもう一度測定した。年齢と最初のセッションの変数、最初の語彙量と最初の記憶範囲の交互作用項を独立変数に、2回目のセッションのライム意識の得点を従属変数にして階層的重回帰分析を行ったところ、年齢、最初のセッションのライム意識が有意となった。また、語彙量と記憶範囲の交互作用も有意となった。交互作用が有意となったことから、記憶範囲が小さく語彙量が多い被験児は記憶範囲が大きい被験児と同じかそれ以上にライム意識を獲得したことが示唆された。また、2回目のセッションの音素意識を従属変数にして同様の分析をしたところ、年齢、最初の音素意識、最初の語彙量、最初の記憶範囲、そして語彙量と記憶範囲の交互作用が有意になったことから、記憶範囲が小さく語彙量が多い被験児は記憶範囲が大きい被験児と同じくらい高い音素意識を獲得したことが示唆された。

語彙学習に関しては、Sasaki (2004a, 2004b) が作動記憶容量の小さいことによる有利さを見出している。Sasaki は Baddeley, et al. (1988) が用いたような単語-非単語の対連合課題と構音抑制課題を用いて、構音抑制の長期的効果を検討した。これらの研究では構音抑制条件と単純タッピング条件の両方の群の被験者に、単語対を完全学習させたあと、11分間の遅延時間の後に同じ課題を単純タッピング条件で再学習するよう求めた。その結果、構音抑制条件の被験者達は単純タッピング条件の被験者に比べ有意に再学習時の間違いが少なくなった。このことから、語彙学習の領域でも記憶容量の小さいことによる有利さが見出せることが明らかになった。

また、この有利さは、言語性の課題の遂行のみに見られるのではない。Kareev (1995) は、シミュレーションによって、小さな相関係数の検出には作動記憶容量が小さいほうが優れていることを示した。またこの結果は、Kareev, et al. (1997) によって心理実験によっても実証された。彼らの実験では、被験者にコインの入ったたくさんの封筒を提示し、封筒の中

に入っているコインの種類（○か×）を当てさせるという課題を遂行させた。この封筒は色によって2種類に分けられており、色と封筒の中のコインの種類を操作することによって、封筒の色とコインの種類の相関関係を変化させて、非常に高い相関から低い相関までを表現した。このとき、封筒の色と実際のコインの種類との四分相関は母相関係数となり、封筒の色と被験者が予想したコインの種類との四分相関が標本相関係数となるのである。その結果、数唱範囲の小さい被験者群では母相関係数が小さい時には、標本相関係数が大きくなる、つまり、相関係数を大きめに見積もることが分かった。このことから、Kareev 達は作動記憶容量が小さいほうが小さな相関関係の検出に敏感だと解釈し、シミュレーションの結果を再現できたと主張した。

作動記憶容量の小さいことによる有利さに関連して、作動記憶容量の大きいことによる不利益についても述べておく。Beilock & Carr (2005) は数学不安の実験において、この不利益を見出している。実験の結果、作動記憶容量の大きな人のみが高いプレッシャーの影響を受け、さらに、この影響は、数学課題の難易度が難しい場合にのみ見られる事がわかった。

この有利さに対する反論としては、言語獲得の領域からは、Rohde & Plaut (1999) や Tomasello (2003) があげられる。Rohde & Plaut (1999) は彼らのシミュレーションにおいて、統語的な制約とともに“Mary chases Mary.”といったように文法的には正しいが意味は正しくないと判断されるような制約をかけた場合、Elman (1993) のような作動記憶が小さいことによる有利さが消失したと報告した。Tomasello (2003) は“The less is more hypothesis”に反対し、大きな作動記憶容量をもつことによって幼児はより複雑な統語的構造を理解し産出できると主張した。また彼は、“less is more”のような現象が起こるのは入力単純な場合や、第二言語の獲得に対する第一言語からの干渉が小さい場合に起こるのであって、作動記憶容量が小さいことによる有利さがあるから生起するの

ではない、とも主張した。また、Kareevらの研究結果に対しても異なった解釈から反論できる。彼らの研究結果から、作動記憶容量の小さい人たちが小さな相関係数を大きな相関係数と捉えるということが分かったが、この現象は相関係数を過大に見積もるという誤った知覚の結果であると考えられるため、この現象の解釈についても再考する必要があるだろう。

このようにいくつかの反論があるものの、作動記憶容量が小さいことによる有利さはいたるところで見られることがわかったが、この効果の生起理由は今のところわかっていない。仮説としては、先述した O'Reilly, et al. (1999) や Newport (1988, 1990, 1991) があるが、まだ実証データは少ない。また、佐々木 (2004) はこの有利さの生起理由について、適性処遇交互作用 (Cronbach, 1957; 並木, 1997) がたまたま起こったため、つまり、作動記憶容量が小さいときに有利な学習方略が採用されたため、このような有利さが生起したのではないかと予想したが、これはまだ推測の域を出ないだろう。ともかく、作動記憶容量が小さいことによる有利さの生起理由を見つけていくことが、この対処法の検討にするにあたって重要になっていくだろう。

学習・教授方略と作動記憶容量との交互作用

四つ目の方法としては、適性処遇交互作用の知見を用いて、学習・教授方略の最適化をすることである。

適性処遇交互作用 (ATI; Cronbach, 1957; 並木, 1997) とは、知能、性格、認知スタイルなどの適性をもつ学習者が教授法などの異なる処遇を与えられた場合の、その適性と処遇との組み合わせの効果、つまり交互作用のことである。この概念は特に教育場面で、どのような適性の学習者にはどのような教授方法が最適かという、個人差に応じた教育環境を研究・設計するために用いられてきた。

並木・藤谷・最上・林・川村(1982)は、Caseの教授理論をATIパラダイムを用いてその効果を検討した。彼らは小学5年生87名を、Caseの教授理論に沿った実行構造教示条件、伝統的なカリキュラムに準拠した条件、具体的なものを一切用いないで概念レベルで教示する条件の3群に分けた。学習課題は「比例配分」であり、適性に関する変数は数唱範囲課題や文章記憶課題、プレテストなどであった。分析の結果、数唱範囲が小さい被験者は伝統的カリキュラム準拠条件下でもっとも成績が高くなり、実行構造教示条件は、数唱範囲の大きい被験者にとって有効であることが明らかになった。また、文章記憶課題やプレテストを適性変数に設定して分析した場合は、このような交互作用は見られず、適性変数と学習課題の間に同様な正の相関関係が見られた。

Turley-Ames & Whitfield (2003) は、リーディングスパンテストの遂行における記憶方略訓練の効果を検討した。この結果、作動記憶容量低群においてのみ得点の伸びに対するリハーサル方略の効果が見られ、作動記憶容量高群においてはどの方略も効果はなかった。このことに関して彼らは作動記憶容量の小さい人たちにとってはリハーサル方略は学習しやすく、彼らにとって使い慣れた方略であり、認知的リソースにあまり負荷がかからず、イメージ方略や意味的方略のように干渉が起こりにくい方略であると考察している。一方、作動記憶容量の大きい人たちにとっては、記憶方略はすでに用いられているものであるから訓練の効果は現れず、逆に方略訓練がネガティブな効果をもたらしているのかもしれないと考察した。

ATIを用いた方法の問題点は、交互作用自体に存在する。まず、サンプルサイズを非常に大きくしなければ、交互作用効果が統計的に有意にならない。Cronbach & Snow (1977) は、1グループにつき100名の被験者を推奨している。交互作用が有意にならなければ作動記憶容量に見合った教授・学習方略を見逃してしまう可能性も高くなり、結果としてこの四

つ目の方法を失敗に終わらせてしまうだろう。そのため、この対処法を取る際には、統計学的、実験手法的側面の両方から交互作用効果を検出する方法を発展させていくことが重要となるだろう。

おわりに

本稿では、ヒトは厳しい作動記憶の容量制限下に置かれているという立場にたち、学習・教授場面において、この容量制限に対処するため、(1) 作動記憶に対する負荷を軽減する、(2) 長期記憶・既有知識の利用、(3) 作動記憶容量が小さいことによる有利さを見つける、(4) 学習・教授方略との交互作用を見つける、の4つの対処法を提示し、その効果に対して検討した。この節では、これらの対処法に対する更なる検討を加える。

作動記憶負荷はすべて取り除くべきか

認知負荷理論 (Sweller, et al., 1998) によれば、作動記憶に負荷をかける負荷には3種類あるが、学習・教授の働きを妨害する負荷は内生的認知負荷と外生的認知負荷の2つで、スキーマの獲得や自動化の際に出てくる密接的認知負荷は理解活動において重要な役割を果たすとされている。

しかし、認知負荷理論で言うところの内生的認知負荷と外生的認知負荷も学習促進効果をもつのではないかという仮説も存在する。Battig (1972, 1979) は、文脈干渉仮説 (contextual interference hypothesis) という仮説を提唱し、課題遂行時の妨害刺激が学習を促進する場合があることを主張した。文脈刺激からの干渉や難易度の高い課題は、学習の初期には学習に対してネガティブな効果をもたらすが、このような条件で学習をしたほうが遅延再生や再学習の成績が向上する、ということがこの仮説で提起されている。この仮説で言うところの「文脈刺激からの干渉」は認知負荷理論で言うところの外生的認知負荷にあたり、課題の難易度の高さは

内生的認知負荷にあたる。このことから、認知負荷理論では取り除くべきであると主張された認知負荷も学習を促進する場合があるようだ。

以上のことから、認知負荷理論では小さいほうが好ましいとされた内生的認知負荷や外生的認知負荷も学習に有効な場合があることが示唆されたが、おそらくこれらの負荷は大きければ大きいほどよいというものではないだろう。もしかしたら、学習遂行と覚醒水準の関係に関する理論である Yerkes-Dodson の法則 (Yerkes & Dodson, 1909) における U-shape のような作動記憶負荷と学習成績との関数関係が存在し、中庸の認知負荷が発生したときに学習促進効果が現れるのかもしれない。作動記憶負荷と学習成績との関数関係についてもう少し深く検討していく必要があるだろう。

作動記憶容量の最適水準について

「作動記憶の容量制限」のところで見えてきたように、ヒトの作動記憶容量は進化適応において決まってきたのではないか、ということが言われてきた。また、ある課題の遂行においては、「作動記憶容量が小さいことによる有利さ」が存在することもわかってきている。これらのことから、作動記憶容量には最適水準があることが示唆される。

しかし、この最適水準は課題や方略によって異なるものかもしれない。このことについては、先述した適性処遇交互作用においても検討されているが、同様の検討が、数理心理学的研究によっても行われている。Dirlam (1972) によると、記銘項目を探索するのにかかる時間の平均が最も小さくて済むのは、1チャンクに4項目が入っているときで、探索時間の最大値が最も小さくて済むのは1チャンクにつき3項目が入っているときである、という。また、MacGregor (1987) は、悉皆走査の場合は項目数が5以上、自己打ち切り走査の場合は項目数が7以上にならないとチャンキングの恩恵を受けないと報告した。このことから、記憶の組織化

をするには最適な項目数が存在し、更に、最適水準は検索方略によって変化することが示唆される。これらのことから、作動記憶容量の最適水準は採るべき課題の遂行方略によって変化するということが予想できる。

本稿では、学習・教授場面において悪影響を及ぼすであろうと考えられる作動記憶の容量制限とそれに対する対処法を検討した。本稿における議論では、おもに学び手における容量制限について議論してきたが、作動記憶の容量制限は学び手だけではなく教師にも存在することを最後に付け加えておく。そして、この容量制限は教師が行う様々な認知活動に制約を与えるものとなるであろう。たとえば教授方略を選択するといった行為や、学び手を観察し評価するといった行為は、知覚や問題解決といった様々な要素を含む非常に高度な認知活動であるため、これらの行為に対しても作動記憶が関与している可能性は十分ある。そうすると、作動記憶容量に制限を与える様々な要因が、この例のような教師の行為をゆがめている可能性が出てくる。今後学習・教授場面において作動記憶の研究を行う際には、学び手だけではなく教師の作動記憶に関する研究も行うべきであろう。

References

- Alloway, T. P., Gathercole, S. E., Willis, C., & Adams, A. (2004). A structural analysis of working memory and related cognitive skills in young children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *87*, 85-106.
- Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: A new component of working memory? *Trends in Cognitive Science*, *4*, 417.
- Baddeley, A. D. (2001). Is working memory still working? *American Psychologist*, *56*, 849-865.
- Baddeley, A. D., Gathercole, S. E., & Papagno, C. (1998). The phonological loop as a language learning device. *Psychological Review*, *105*, 158-173.
- Baddeley, A. D., & Logie, R. H. (1999). The multiple-component model. In A.

- Miyake, & P. Shah (Eds.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 28–61). New York, US: Cambridge University Press.
- Baddeley, A. D., & Wilson, B. A. (2002). Prose recall and amnesia: Implications for the structure of working memory. *Neuropsychologia*, **40**, 1737–1743.
- Battig, W. F. (1972). Intratask interference as a source of facilitation in transfer and retention. In R. F. Thompson, & J. F. Voss (Eds.), *Topics in learning and performance* (pp. 131–159). New York: Academic Press.
- Battig, W. F. (1979). The flexibility of human memory. In L. S. Cermak, & Craik, F. I. M. (Eds.), *Levels of processing and human memory* (pp. 23–44). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Beilock, S. L., & Carr, T. H. (2005). When high-powered people fail: Working memory and “choking under pressure” in math. *Psychological Science*, **16**, 101–105.
- Bucher, K. R., & Kintsch, W. (2003). Text comprehension and discourse processing. In I. B. Weiner (Ed), *Handbook of psychology* (Vol. 4, pp. 575–595). Hoboken, N. J.: Wiley.
- Cochran, B. P., McDonald, J. L., & Parault, S. J. (1999). Too smart for their own good: The disadvantage of a superior processing capacity for adult language learners. *Journal of Memory & Language*, **41**, 30–58.
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, **24**, 87–185.
- Cronbach, L. J. (1957). The two disciplines of scientific psychology. *American Psychologist*, **12**, 671–684.
- Cronbach, L. J., & Snow, R. E. (1977). *Aptitudes and instructional methods: A handbook for research on interactions*. Oxford, England: Irvington.
- Daneman, M., & Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning & Verbal Behavior*, **19**, 450–466.
- DeStefano, D., & LeFevre, J. (2004). The role of working memory in mental arithmetic. *European Journal of Cognitive Psychology*, **16**, 353–386.
- Dirlam, D. K. (1972). Most efficient chunk sizes. *Cognitive Psychology*, **3**, 255–359.

- Elman, J. L. (1993). Learning and development in neural networks: The importance of starting small. *Cognition*, **48**, 71–99.
- Engle, R. W., Kane, M. J., & Tuholski, S. W. (1999). Individual differences in working memory capacity and what they tell us about controlled attention, general fluid intelligence, and functions of the prefrontal cortex. In A. Miyake, & P. Shah (Eds.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 102–134). New York, US: Cambridge University Press.
- Ericsson, K. A., & Delaney, P. F. (1999). Long-term working memory as an alternative to capacity models of working memory in everyday skilled performance. In A. Miyake, & P. Shah (Eds.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 257–297). New York, US: Cambridge University Press.
- Ericsson, K. A., & Kintsch, W. (1995). Long-term working memory. *Psychological Review*, **102**, 211–245.
- Ericsson, K. A., & Kirk, E. P. (2001). The search for fixed generalizable limits of “pure STM” capacity: Problems with theoretical proposals based on independent chunks. *Behavioral and Brain Sciences*, **24**, 120–121.
- Gibbs, S. (2004). Phonological awareness: An investigation into the developmental role of vocabulary and short-term memory. *Educational Psychology*, **24**, 13–25.
- Gobet, F. (2000). Some shortcomings of long-term working memory. *British Journal of Psychology*, **91**, 551–570.
- Jefferies, E. L., Ralph, M. A., & Baddeley, A. D. (2004). Automatic and controlled processing in sentence recall: The role of long-term and working memory. *Journal of Memory & Language*, **51**, 623–643.
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1992). A capacity theory of comprehension: Individual differences in working memory. *Psychological Review*, **99**, 122–149.
- Kareev, Y. (1995). Through a narrow window: Working memory capacity and the detection of covariation. *Cognition*, **56**, 263–269.
- Kareev, Y., Lieberman, I., & Lev, M. (1997). Through a narrow window: Sample size and the perception of correlation. *Journal of Experimental Psychology: General*, **126**, 278–287.
- Lisman, J. E., & Idiart, M. A. P. (1995). Storage of 7 ± 2 short-term memories

- in oscillatory subcycles. *Science*, **267**, 1512–1515.
- MacGregor, J. N. (1987). Short-term memory capacity: Limitation or optimization? *Psychological Review*, **94**, 107–108.
- Marois, R., & Ivanoff, J. (2005). Capacity limits of information processing in the brain. *Trends in Cognitive Sciences*, **9**, 296–305.
- McElee, B., & Docher, B. A. (2001). The focus of attention across space and time. *Behavioral and Brain Sciences*, **24**, 129–130.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, **63**, 81–97.
- 三宅 晶・齊藤 智 (2001). 作動記憶研究の現状と展開. *心理学研究*, **72**, 336–350.
- 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* (pp. 442–482). New York: Cambridge University Press.
- 並木 博 (1997). 個性と教育環境の交互作用—教育心理学の課題. 培風館.
- 並木 博・藤谷智子・最上嘉子・林 理夏・川村 茂 (1982). 作業記憶, 認知発達水準および最適教示処理条件 (その一, 二). 日本教育心理学会第24回総会発表論文集 (藤谷智子・並木 博 (1982). ATI (適性・処理交互作用) 研究における情報处理的アプローチ. *哲学* (慶應義塾大学), **75**, 207–235. より引用).
- Newport, E. L. (1988). Constraints on learning and then role in language acquisition: Studies of the acquisition of american sign language. *Language Science*, **10**, 147.
- Newport, E. L. (1990). Maturation constraints on language learning. *Cognitive Science*, **14**, 11–28.
- Newport, E. L. (1991). Contrasting concepts of the critical period for language. In S. Carey, & R. Gelman (Eds.), *Epigenesis of mind: Essays on biology and cognition; symposium of the Jean Piaget society, 1988* (pp. 111–130). Hillsdale, NJ, England: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- O'Reilly, R. C., Braver, T. S., & Cohen, J. D. (1999). A biologically based computational model of working memory. In A. Miyake, & P. Shah (Eds.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and execu-*

- tive control* (pp. 375-411). New York, NY, US: Cambridge University Press.
- Papagno, C., Valentine, T., & Baddeley, A. D. (1991). Phonological short-term memory and foreign-language vocabulary learning. *Journal of Memory & Language*, **30**, 331-347.
- Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks: Data and theory. *Psychological Bulletin*, **116**, 220-244.
- Rohde, D. L. T., & Plaut, D. C. (1999). Language acquisition in the absence of explicit negative evidence: How important is starting small? *Cognition*, **72**, 67-109.
- 齊藤 智 (1998). ワーキングメモリのパラドックス—苧阪満里子論文へのコメント—。心理学評論, **41**, 194-196.
- Sasaki, T. (2004 a). Articulatory suppression in a learning phase makes relearning easy. *Poster presented at 5th Tsukuba International Conference on Memory*.
- Sasaki, T. (2004 b). The long-term effect of working memory. *Poster presented at 2nd International Conference on Working Memory*.
- 佐々木 尚 (2005). 言語学習における作動記憶の役割—健常者・児を対象とした研究の展望を中心に—。人間と社会の探求 慶應義塾大学大学院社会学研究科紀要, **59**, 13-27.
- Sweller, J. (2003). Evolution of human cognitive architecture. In B. H. Ross (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (Vol. 43, pp. 215-266). London, UK: Academic Press.
- Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G., & Paas, F. G. W. C. (1998). Cognitive architecture and instructional design. *Educational Psychology Review*, **10**, 251-296.
- Tomasello, M. (2003). *Constructing a language: A usage-based theory of language acquisition*. Cambridge, MA, US: Harvard University Press.
- Towse, J. N., Hitch, G. J., & Hutton, U. (1998). A reevaluation of working memory capacity in children. *Journal of Memory & Language*, **39**, 195-217.
- Turley-Ames, K. J., & Whitfield, M. M. (2003). Strategy training and working memory task performance. *Journal of Memory & Language*, **49**, 446-468.
- van Merriënboer, J. J. G., & Sweller, J. (2005). Cognitive load theory and com-

plex learning: Recent developments and future directions. *Educational Psychology Review*, **17**, 147–177.

Yerkes, R. M., & Dodson, J. D. (1908). The relationship of strength of stimulus to rapidity of habit formation. *Journal of Comparative and Neurological Psychology*, **18**, 459–482.

Zhu, X., & Simon, H. (1987). Learning mathematics from examples and by doing. *Cognition & Instruction*, **4**, 137–166.