

ワーキングメモリにおけるリソース配分方略

西 本 武 彦

1. はじめに

記憶システムに関する Atkinson & Shiffrin (1968, 1971) の二重貯蔵モデルが、その後の処理水準理論 (Craik & Lockhart, 1972)、スキーマ理論 (Alba & Hasher, 1983)、そしてワーキングメモリモデル (Baddeley & Hitch, 1974) などの理論的發展を促したことは周知の事実である。二重貯蔵モデルが内包する3つの大きな問題、すなわち (a) 短期記憶から長期記憶への情報の変換・転送・制御のメカニズム、(b) 知識構造としての長期記憶そのもののメカニズム、(c) 現実の会話・読み・思考・問題解決等における短期記憶の能動的な注意配分や情報の選択・処理のメカニズムのうち、(c) はワーキングメモリ (working memory) 問題として今日、認知神経心理学的手法を取り入れながら急速に研究が進展している。

本稿では西本 (2000, 2003) に引き続き、ワーキングメモリのリソースが下位システムに配分される様相を実験的に示す。西本 (2000) では、1次課題としての視覚的探索課題 (後述) が、(a) ワーキングメモリの下位システムである音韻ループと視空間スケッチパッドを同時に作動させる課題として有効であること、(b) 音韻ループに負荷を与える構音抑制下において、中央実行系のリソースが2つの下位システムに有効配分されパフォーマンス低下を防ぐこと、(c) リソースが少ない被験者の場合、負荷条件下では特に視空間スケッチパッドのパフォーマンスが有意に低下すること、が示された。さらに西本 (2003) では、マトリックススイメージ生成 (2次課題) を使って視空間スケッチパッドに負荷を与えても同様な結果が得られた。また、リソース測定に用いたリーディングスパンテスト (Daneman & Carpenter, 1980; 苧阪・苧阪, 1994) は、読解に限定された領域特異的な能力だけでなく、音韻ループならびに視空間スケッチパッドのリソースを包含する全体的なリソースを測定している可能性の強いことが示唆された。

これら2つの実験はいずれも二重課題法により、それぞれ音韻ループと視空間スケッチパッドに負荷を与えてそのパフォーマンス変動を観察するものであった。下位システムではなく、中央実行系に対する直接的負荷が音韻ループならびに視空間スケッチパッドのパフォーマンスにどのような影響を及ぼすかについては未検討課題として残されている。そこで本稿では、中央実行系に対する負荷課題として乱数生成 (random generation) (Baddeley, 1966) を用いた実験によ

り、リソース配分における中央実行系の直接的関与の程度を明らかにする。

2. 中央実行系におけるリソース配分問題

2. 1 リソース配分方略を調べる課題

ワーキングメモリモデルの構成要素である音韻ループに関しては数多くの研究が存在するが、視空間スケッチパッドや中央実行系のリソース配分方略については実験的にまだ十分に解明されていない。中央実行系の機能は本来オンライン的であり、必要なリソースは下位システムに流動的に配分され、全体としてのパフォーマンス低下を防いでいる。そうしたダイナミズムを調べるためには、中央実行系と下位システムを同時に作動させる課題を必要とする。特定の下位システムだけを切り離して操作しても、ワーキングメモリの特徴である統合性、同時性を観察することはできない。この点、西本（2000, 2003）が用いた視覚的探索課題はワーキングメモリの統合的でオンライン的特性を観察するのに適している。この課題は、特定の目標文字を背景文字群の中から出来るだけ速くかつ正確に探索し抹消するもので、基本的には目標文字の表象と、連続的走査により入力される背景文字表象との比較照合課題である。目標文字と背景文字の類似性を音韻的・視覚的次元で操作することにより、音韻ループと視空間スケッチパッドに選択的負荷をかける。認知処理の原則から、類似している刺激の比較照合は非類似の場合より時間を必要とする。文字形式の言語情報処理には少なくとも音韻ループと視空間スケッチパッドの2つが関わっていると仮定されるので、類似性の関数としての探索時間の長短は、2つの下位システムの相対的なパフォーマンス比較を可能にする。

中央実行系のリソース配分方略を調べる方法として Brooks 課題（Brooks, 1967, 1968; Baddeley & Lieberman, 1980）が知られている。しかし、この方法はマトリックス課題と言語課題のパフォーマンスレベルを事前にほぼ同一レベルに揃える点で厳密性を欠いている。さらに音韻ループと視空間スケッチパッドを分離してパフォーマンスを比較しているので、ワーキングメモリが有する同時性、統合性の観察には向いていない。視覚的探索課題の場合はそうした操作は必要がなく、1つの課題の中で同時に複数の下位システムを作動させることができるのが特徴である。

2. 2 中央実行系に対する負荷課題

Baddeley (1966) はワーキングメモリのリソース限界を乱数生成課題で測定した。まず、0.5秒、1秒、2秒、4秒ごとのペースでアルファベットをランダムに言うように被験者に求め、それぞれのペースにおけるアルファベットの重複数を数えた。ペースが速くなるにつれ重複数は増加した。これは個人のワーキングメモリのリソースに限界があることを示している。さらに、乱数生成課題を2次課題としてカード分類をさせると、分類するカードの種類（1から8）が増加するにつれ、報告するアルファベットの重複数が増加した。乱数発生とカード分類は同じリソ-

スを使用しており、そのリソースには限界があることを示している。また、アルファベットとやらんで数字を用い、その数を5水準（2, 4, 8, 16, 26個）に設定し、ペースを設ける場合と出来るだけ速く報告させる場合を比較検討した。この方法はリソースの限界測定ならびに中央実行系に対する負荷の定量的操作の点で有効である。

他方、中央実行系の機能を示す課題の1つに記憶更新課題がある（Morris & Jones, 1990; 斎藤, 1993）。記憶更新（memory updating）とは、新しく入ってきた情報にしたがって、記憶表象の現在の状態を修正する活動と定義される。数字系列の長さ（例えば、12桁の数列）が知らされていない事態で、呈示された数字系列の最後の6個の系列再生が求められるのであれば、系列の学習中には、リアルタイムで各項目への注意の配分を行ったり、それを変更したりする活動が行われるであろう。このような記憶更新はBaddeley（1986）のモデルの中央実行系の機能であると考えられている（Morris & Jones, 1990）。しかし、この記憶更新課題は実験操作上、課題の困難度がコントロールしにくい。系列長を変えることで段階的に負荷量をコントロールできるとされるが、実際にはパフォーマンスを可能な限り一定の水準に維持するため系列全体を保持し、その中から指定された文字系列を探索して再生する、という方略がとられる場合がある。この場合は、単に直接記憶幅を測定しているにすぎない。

2. 3 リソースの測定

ワーキングメモリのリソース測定に関して現在、標準化されたものにDaneman and Carpenter（1980）が考案したリーディングスパンテスト（reading span test）がある（日本版については、荻阪・荻阪, 1994）。これは読解の諸測度と高い相関をもつが、単語系列に関する従来の記憶幅とは相関しない。リーディングスパンは一時的に活性化された長期記憶表象を検索する際の中央実行系の処理効率を測定し、従来の単語記憶幅は音韻ループの貯蔵容量を測定しているとされる（Just & Carpenter, 1992）。Danemanらはワーキングメモリが少なくとも2つの別個の処理系から構成されていること、その1つは言語記号的信息を表象し操作するものであり、もう1つは空間的信息を表象し操作するものであると結論づけている。さらに、Just & Carpenter（1992）はワーキングメモリが処理容量の大きな集合から構成され、その一部が所定の領域、すなわち少なくとも音韻ループと視空間スケッチパッドのために配分されているとした。

2. 4 作業仮説

今回の実験では西本（2000, 2003）と同じパラダイムを用い、2つの下位システム（音韻ループと視空間スケッチパッド）にリソースがどのように配分されるかを調べる。1次課題にはリアルタイム処理の視覚的探索課題（2.2を参照）を用いた。先行実験では2次課題に構音抑制ならびにマトリックスイメージ生成を使ったが、本実験では乱数生成課題を使い、中央実行系に直接負荷をかけた。実験は次の3つを前提としている。すなわち、(a)課題要求特性に応じて、中央実行系はリソースを下位システムに最適に配分する。(b)リソースには上限と個人差がある。

(c)視覚的探索課題には中央実行系を中心に、少なくとも音韻ループと視空間スケッチパッドが関与する。

このうち、(a)と(b)はワーキングメモリモデルの基本要件であり、(c)の成立（視覚的探索課題の妥当性）は西本（2000, 2003）の実験から明らかである。これらの前提から導かれた以下の7つの作業仮説に関し、(1)と(2)は西本（2000, 2003）、(3)と(4)は西本（2000）、(5)と(6)は西本（2003）において確認されている。今回の実験は仮説(7)の検証を目的とし、同時にこれまでに確認された(1)と(2)も再度検証する。

- (1) 視覚的探索課題において、音韻的類似性が高い条件では音韻ループに負荷がかかる。視覚的類似性が高い条件では視空間スケッチパッドに負荷がかかる。
- (2) 負荷によるパフォーマンス低下を補償するためにリソースが補充されるが、その配分量は個人のリソースに依存する。リソースに余裕がある場合には十分な量が補充されてパフォーマンス低下は少なく、十分でないパフォーマンス低下を引き起こす。
- (3) 2次課題が音韻ループに関与するものであるとき、音韻的類似性の高い探索条件のパフォーマンスは、負荷なしの場合に較べて相対的に低下する。低下の程度はリソースの少ない個人において大きい。
- (4) 2次課題が音韻ループに関与するものであるとき、視覚的類似性の高い探索条件のパフォーマンスは、負荷なしの場合と同じか、それより低下する。低下の度合いはリソースの少ない個人において大きい。この仮定は、中央実行系のリソースが音韻ループに配分されることで、結果的に視空間スケッチパッドへの配分量が減少する可能性を意味している。
- (5) 2次課題が視空間スケッチパッドに関与するものであるとき、視覚的類似性の高い探索条件のパフォーマンスは、負荷なしの場合に比較して相対的に低下する。低下の度合いはリソースの少ない個人において大きい。この仮説は音韻ループに関する仮説(3)に対応している。
- (6) 2次課題が視空間スケッチパッドに関与するものであれば、音韻的類似性の高い探索条件のパフォーマンスは、負荷なしの場合と同じか、それより低下する。低下の度合いはリソースの少ない個人において大きい。この仮説は音韻ループに関する仮説(4)に対応し、中央実行系のリソースが視空間スケッチパッドに配分されることで、結果的に音韻ループへの配分量が減少する可能性を意味している。
- (7) 2次課題が中央実行系に直接負荷を与えるものであれば、下位システムへのリソース配分量が減少し、結果的に音韻的類似性の高い探索条件ならびに視覚的類似性の高い探索条件のそれぞれでパフォーマンスは低下する。その低下の程度はリソースの少ない個人において大きい。

3. ワーキングメモリのリソース配分方略に関する実験

3. 1 目的と検証仮説

中央実行系、音韻ループならびに視空間スケッチパッドの各要素における、リソース配分の様相を実験的に明らかにする。本実験では、乱数生成課題により直接的に中央実行系に負荷を与えたときの、音韻ループと視空間スケッチパッドのパフォーマンス変動を調べ、認知的課題の遂行における中央実行系の直接的関与の程度を検討する。

次の2つを前提とした。すなわち、(a) 2次課題としての乱数生成は中央実行系の処理機能を低下させる (Baddeley, 1966)。(b) 中央実行系のリソースはリーディングスパンテストで測定できる (Daneman & Carpenter, 1980)。

この前提をもとに、本実験では以下の2つの仮説を検証する。

仮説1：乱数生成課題が中央実行系のリソースを消費した結果、下位システムの音韻ループと視空間スケッチパッドへのリソース配分が減少しパフォーマンスは低下する。

仮説2：リソースが大きいほどパフォーマンス低下は少ない。

3. 2 方法

被験者：大学生64名（平均年齢20.5歳、男子37名、女子27名）。全員にリーディングスパンテスト（荳阪・荳阪, 1994）を実施し、3.0以上の被験者11名を高リソース群（男子6名、女子5名）、2.0以下の被験者10名を低リソース群（男子5名、女子5名）として分析対象とした。

1次課題：1次課題は20字×30行の文字配列シートを先頭から末尾へ視覚的に走査し、目標文字Fを背景文字群から検出・抹消する課題である。目標文字に対して背景文字は、(a)視覚的類似 (EPTRH)、(b)音韻的類似 (MNSXZ)、(c)非類似（統制条件）(CGQVJ)とした（西本, 2003）。目標文字はシート上でランダムに100回出現した（全体文字数の6分の1）。

2次課題（乱数生成）：被験者は1秒毎に鳴るメトロノームの音に合わせて、26から33までの8つの数字をランダムに発声した。26, 27, 28や33, 32, 31など連続する2つの数字を用いること、28, 33, 26, 30, 27, 28, 33, 26, 30, 27, 28, 33, 26, 30…など一定のパターンを作り繰り返すことが禁止された。

要因計画：(a)リソース要因（高低の2水準：被験者間）、(b)1次課題の類似性要因（視覚的類似、音韻的類似、非類似の3水準：被験者内）、(c)2次課題（乱数生成による2次的負荷の有無の2水準：被験者内）の2×3×2の要因配置とした。従属変数は1次課題における目標文字の探索所要時間（秒）であった。

手続き：被験者に乱数生成課題を課しながらシート上の目標文字を探索させ、目標文字探索に要した時間を測定した。被験者は鉛筆を持って目を閉じた状態で待機し、実験者は被験者の目前に文字リストの印刷されたシートを置いた。実験者の「はじめ」という合図により、被験者は文字リストの中から目標文字Fを探索し、斜線によるチェックを行った。文字リストは左方向から右方向、上から下へと1行ずつ探索した。右下まで達したら、「終わった」ことを合図し、被験者は目を閉じて待機した。実験者の「はじめ」という合図から被験者の「終わり」という合図ま

をストップウォッチにより秒単位で記録した。

3. 3 結果と考察

実験結果を Figure 1 と Figure 2 に示す。Figure 1 から明らかなように、コントロール条件（非類似条件）に比較して視覚的類似条件と音韻的類似条件のパフォーマンスは共に低下し（探索時間の増加）、低下の程度は視覚的類似条件の方が大きい。このことは、視覚的探索課題の遂行に視空間スケッチパッドと音韻ループが同時に関与し、関与の程度は視空間スケッチパッドの方が相対的に大きいことを意味している。さらに中央実行系に2次的負荷がかかると、全体的なパフォーマンス低下が生じる。Figure 2 はそうしたパフォーマンス低下がリソースの高低とどのような関係にあるかを示すもので、低下の程度は低リソース群の方が相対的に大きい傾向にある。

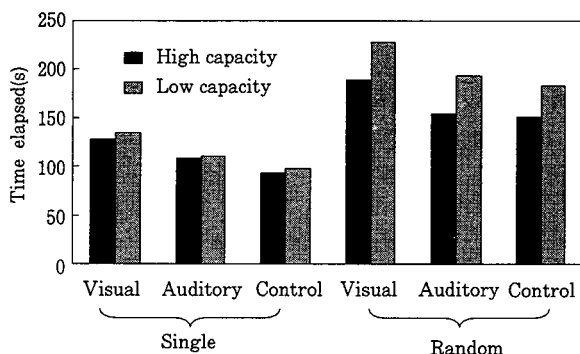


Figure 1 中央実行系に負荷をかけた場合のパフォーマンス変化

Visual：視覚的類似条件
Auditory：聴覚的類似条件
Control：コントロール条件
Random：乱数生成による負荷

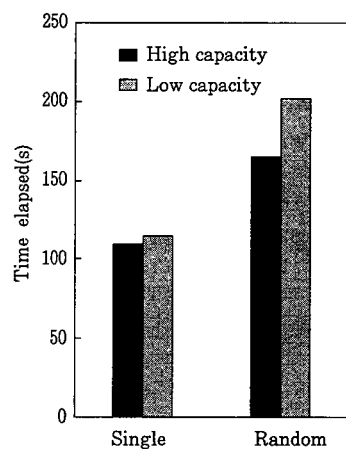


Figure 2 負荷の主効果

探索所要時間をもとに3要因の分散分析を行った。その結果、類似性要因の主効果 [$F(2,38) = 47.25, p < .001$] と乱数生成（2次課題）の主効果 [$F(1,19) = 143.69, p < .001$] はそれぞれ有意、リソース要因の主効果も有意 [$F(1,19) = 5.15, p < .05$] であった。類似性要因の主効果における多重比較（Ryan法）では、全ての水準間に有意差（ $p < .001$ ）が見られた。Figure 1 に示されるように、類似性については視覚的類似性の方が音韻的類似性よりも効果（負荷）が大きい。中央実行系に対する負荷課題である乱数生成については、全体としてみると探索時間の増加という形でパフォーマンスの有意な低下を引き起こしている。類似性との間の交互作用は見られない。しかし、リソース要因と乱数生成要因の間には交互作用が存在し [$F(1,19) = 7.43, p < .05$]、高リソース群ほど乱数生成による負荷の影響を受けにくい。

仮説1「乱数生成課題が中央実行系のリソースを消費した結果、下位システムの音韻ループと視空間スケッチパッドへのリソース配分が減少しパフォーマンスは低下する」に関しては、乱数

生成の主効果が有意であることがその成立を示している。すなわち、中央実行系に対する負荷は下位システムの機能を同時に低下させる。また、視覚的探索課題は下位システムのパフォーマンスを相互比較できる課題として妥当性があることを示している。

仮説2「リソースが大きいほどパフォーマンス低下は少ない」、言い換えれば、「高リソース群は低リソース群に比較して、全体としてのパフォーマンス低下が少ない」は、リソースの主効果が有意であること、さらに乱数生成による負荷の影響が高リソース群ほど少ないこと（交互作用の存在）から、その妥当性が確認された。リソースをより多く必要とする状況下では、中央実行系のリソースの少なさが下位システムの機能低下を引き起こすため、低リソース群ほど不利になることを示している。下位システムへのリソース配分は、具体的には個人のリソース限界と課題要求特性との関係で決まることが分かる。

以上の結果は、2次課題に構音抑制を用いた西本（2000）、イメージ生成課題を用いた西本（2003）の実験結果と基本的に一致する。同様に、今回の実験でもリーディングスパンテストによって測定されたリソースが音韻ループならびに視空間スケッチパッドのパフォーマンスと関係していることが明らかになった。リーディングスパンは読解という領域特異的な性質だけでなく、視空間的領域をカバーする汎用的性質をもつことを示唆するものである。

4. まとめと今後の課題

認知心理学における最近のトピックであるワーキングメモリについて、中央実行系の機能を実験的に調べた。結果は、先行実験（西本、2000, 2003）の結果を確認するものであった。すなわち、課題要求特性に応じて中央実行系から下位システムにリソースが配分されることで、下位システムの機能は一定に保たれる。しかし、個人のリソース限界から十分な量が配分できないときは、統計的に有意な機能低下が起こることを示している。

乱数生成課題では、生成ルール（単位時間当たりの生成数、生成する乱数の種類など）をもとに負荷の程度を操作的にコントロールできる。リソース配分の変化をより詳細に調べるためには、負荷の中間レベルを複数設定しリソース配分の様相をきめ細かく調べる必要がある。また、生成された乱数系列の冗長性を指標に負荷を定量評価することも検討すべきである。また、配分方略は学習によって変化する。時間的スパンを長くにとって、下位システムの自動的処理とリソース配分の関係を観察することは重要な課題の1つである。さらに、リーディングスパンで定義されたリソースの汎用的性格を調べる必要がある。

謝辞

本論文の執筆に当たり、飯島朋美氏の2003年度早稲田大学第一文学部心理学専修卒業論文の実験データを使用した。付記して感謝申し上げます。

引用文献

- Alba, J.W., & Hasher, L. 1983 Is memory schematic? *Psychological Bulletin*, **93**, 203-31.
- Atkinson, R.C., & Shiffrin, R.M. 1968 Human memory: A proposed system and its control processes. In K.W.Spence & J.T.Spence(Eds.), *The psychology of learning and motivation: An advances in research and theory*, Vol.2, pp.89-195. New York: Academic Press.
- Atkinson, R.C., & Shiffrin, R.M. 1971 The control of short-term memory. *Scientific American*, **225**, 82-90.
- Baddeley, A.D. 1966 The capacity for generating information by randomization. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **18**, 119-130.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. 1974 Working memory. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory*, Vol.8, pp.47-90. New York: Academic Press.
- Baddeley, A. D., & Lieberman, K. 1980 Spatial working memory. In R. S. Nickerson(Ed.), *Attention and performance*, **VIII**, pp.521-539. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Baddeley, A.D. 1986 *Working memory*. New York: Oxford University Press.
- Brooks, L.R. 1967 The suppression of visualization by reading. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **19**, 289-299.
- Brooks, L.R. 1968 Spatial and verbal components in the act of recall. *Canadian Journal of Psychology*, **22**, 340-369.
- Craik, F. I. M., & Lockhart, R. S. 1972 Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, **11**, 671-684.
- Daneman, M., & Carpenter, P.A. 1980 Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, **19**, 450-466.
- Just, M., & Carpenter, P. 1992 A capacity theory of comprehension: Individual differences in working memory. *Psychological Review*, **99**, 122-149.
- Morris, N., & Jones, D. M. 1990 Memory updating in working memory: The role of the central executive. *British Journal of Psychology*, **81**, 111-121.
- 苧阪満里子・苧阪直行 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.
- 西本武彦 2000 作業記憶における容量配分方略。早稲田大学大学院文学研究科紀要, **45**(1), 27-39.
- 西本武彦 2003 作業記憶における下位システムへのリソース配分方略。早稲田大学大学院文学研究科紀要, **48**(1), 27-38.
- 斎藤智 1993 構音抑制と記憶更新が音韻的類似性効果に及ぼす影響。心理学研究, **64**(4), 89-295.