

数の記憶における作動記憶負荷の記憶妨害効果と促進効果¹

佐々木 尚²

数の認知の研究において、数の記憶過程を検討することは、有意義なことである。作動記憶研究の領域においても、数の認知や数の記憶について研究が行われてきた。しかし、作動記憶システムが数の認知や記憶に対して具体的にどのような役割を果たしているかについては様々な意見があり、定まっていない。本研究では、数の認知と作動記憶との関連を見ていく。

数の認知は視空間スケッチパッドで行われているという意見がある。Hatano & Osawa (1983) は珠算の熟達者の数字と単語の記憶範囲を検討した。その結果、珠算の熟達者は一般の大学生に比べ非常に大きい数唱範囲を持っていることが明らかとなった。また、珠算の熟達者が数唱範囲課題を行った後に言語性の妨害課題と視覚性の妨害課題を行わせた後に数字を再生させたところ、視覚性の妨害課題を行ったときのみ有意に記憶成績が下がったことを見出した。このことから、彼らは数字の記憶には視空間性の短期記憶が関与しているのではないかと考察した。Hubbard, Piazza, Pinel, & Dehaene (2005) によれば、数の認知と空間認知は強い関係があるという。これらの認知は頭頂葉、具体的には数の認知は腹側の頭頂間部で、空間認知は背側の頭頂間部で行われており、これら 2 つの認知をつかさどる部位は異なるけれども強いつながりがあるということを彼らは予想している。

また、音韻ループにおいて数の認知が行われているという説もある。Seitz & Schumann-Hengsteler (2000) は掛け算における作動記憶の役割を検討した。実験 1 では、音韻ループを妨害する二次課題として構音抑制課題と無関連音声提示課題、視空間タッピング課題、単純タッピング課題が用いられた。その結果、 3×4 のような簡単な演算では課題の遂行成績に有意な条件差が見出されなかったが、 6×29 のような難しい演算では構音抑制条件の遂行成績が有意に悪くなった。実験 2 では二次課題として構音抑制課題と視空間タッピング課題、単純タッピング課題、ランダム文字生成課題が用いられた。その結果、数式が難しいときに構音抑制課題とランダム文字生成課題に有意な妨害効果が認められた。また、数式が易しいときにはランダム文字生成課題のみが有意な妨害効果を持った。以上のことから、掛け算の演算には音韻ループと中央実行系の両方が重要な役目を請け負うが、視空間スケッチパッドは関与しないことが示唆された。Trbovich & LeFevre (2003) は数式の保持と演算に対する提示様式（縦書きか横書き）と記憶負荷（音韻性負荷か視空間性負

¹ 本研究におきまして、2004 年度認知心理学 I および教育測定実験の受講者の皆様、2005 年度認知心理学 I および教育測定実験の受講者の皆様、その他多くの皆様のご協力を頂きました。この場を借りて御礼申し上げます。

² 慶應義塾大学大学院社会学研究科教育学専攻後期博士課程

荷)の効果を検討した。その結果、縦書きの方が演算をすばやく正確に遂行できることが明らかになった。また、横書きで課題が提示されたときには音韻性の記憶負荷をかけると遂行成績が落ち、縦書きで提示されるときには音韻性の記憶負荷の妨害効果はわずかしかなかった。さらに、視空間性の記憶負荷は妨害効果を持たなかった。このことから、数式の提示様式によって結果が変わるものの、数式の演算に関しては音韻性の作動記憶が大きな役割を果たすことが分かった。

数式の提示モダリティによっても数の記憶における作動記憶システムの役割が変化する可能性がある。Logie, Gilhooly, & Wynn (1994) は、数式の提示モダリティが変化すると数式の処理に対する二次課題の妨害効果が変わるかどうかを検討した。提示モダリティは聴覚提示もしくは視覚提示であった。二次課題は、音韻ループを妨害する課題として構音抑制課題と無関連音声提示課題、視空間スケッチパッドを妨害する課題として手の動作課題、中央実行系を妨害する課題としてランダム文字生成課題が行われた。その結果、聴覚提示した場合は構音抑制課題の有意な妨害効果があり、視覚提示した場合は手の動作課題の有意な妨害効果が見出された。また、ランダム文字生成課題はどちらの提示モダリティでも有意に遂行成績を妨害した。以上のことから、数式の提示モダリティによって作動記憶の使われ方が変化することが示唆された。

以上、数の認知における作動記憶の役割を概観してきたが、下位システムの役割に関しては意見が別れていることがわかった。そこで、下位システムの役割について検討するために、実験を行った。

実験 1

実験 1 の目的は、数の記憶における作動記憶の役割を検討することである。今回の実験では反復学習のパラダイムを用い、比較的長期の記憶の保持における作動記憶の役割について検討した。

方法

被験者 大学生・大学院生 18 人。

要因計画 3 (作動記憶負荷) × 5 (学習試行数) の 2 要因実験であった。2 要因とも被験者内要因であった。作動記憶負荷の各条件の遂行順序および一次課題の刺激リストはカウンターバランスが取られた。

刺激 一次課題としてアルファベット - 乱数の対連合課題を、作動記憶を妨害する二次課題として構音抑制課題と空間タッピング課題を用いた。

1. 対連合課題 ターゲットとして 2 桁の乱数を、手がかりとしてアルファベット 2 文字を用い、各条件につき 8 対の刺激を作成した。乱数を作成する際、ぞろ目や 0 を含む数字 (例, 99, 50, 07) は除外し、同じ学習条件内で十の位が同じ数字や一の位が同じ数字がリストに入らないようにした。アルファベットを作成する際には、同じアルファベットが並ばないようにし (例, FF), 日常でよく見かける略称 (例, JR) はリストに入れないう

にした。また、同じ学習条件内で一つ目のアルファベットが同じものや、二つ目のアルファベットが同じものが入らないようにリストを作成した。アルファベットの並び替えやターゲットとなる数字の作成に用いる乱数の生成には、鈴木昭弘氏の作成したフリーウェアである乱歩 Ver. 3.30 を用いた。

2. 構音抑制課題 音韻ループの機能を抑制する二次課題として構音抑制課題を用いた。この課題では、被験者が対連合課題を学習している間に 1 拍 500msec.のリズムで提示される音に合わせて被験者に「ダ、ダ、ダ」と発声させた。

3. 空間タッピング課題 視空間スケッチパッドの機能を抑制する二次課題として、空間タッピング課題を用いた。この課題では、被験者が対連合課題を学習している間に 1 拍 500msec.のリズムで提示される Beep 音に合わせてテンキーを「7, 8, 9, 6, 5, 4, 1, 2, 3, 2, 1, 4, ...」の順序でジグザグに打たせた。

機材 刺激の作成と実験の制御には Psychology Software Tools Inc. 製 E-Prime Ver. 1.1 が用いられた。また、刺激の提示には東芝製 Dynabook Satellite 1850 が用いられた。刺激は液晶画面上に視覚提示された。

手続き 練習を行った後、被験者は構音抑制条件、空間タッピング条件、統制条件の 3 条件で対連合課題を学習した。刺激は 1 対 2 秒の割合で提示され、刺激間には 500msec.の割合で注視点が提示された。構音抑制条件、空間タッピング条件では上記のやり方で二次課題を遂行しながら対連合課題を被験者に学習させた。二次課題の始まりは学習試行が始まる“Ready?”というスライドが出た後の「4, 3, 2, 1」というカウントダウンのスライドであり、Beep 音が等間隔で提示されると同時に被験者は二次課題を始めるように求められた。対連合課題の刺激対が出ている間二次課題は遂行されつづけ、“Finish!”というスライドが出たと同時に被験者は二次課題の遂行を中止した。統制条件ではただ静かに刺激を見て学習するように教示された。その後、画面の中央に手がかりのアルファベットが提示され、被験者はそれに対応する数字を 4 秒の制限時間内にテンキーで打ち込んだ。被験者は数字を打ち込んだ後テンキーにある Enter キーを押すように求められた。Enter キーを押すことは反応の終了を意味した。また、被験者は反応の修正を行うことを禁じられた。このような記銘と再生の繰り返しを、被験者は各条件ごとに 5 回繰り返した。

結果と考察

再生成績を Figure 1a に示す。分散分析を行った結果、学習試行数と作動記憶負荷の主効果のみが有意であった（順に $F(4, 14) = 23.8, p < .001$; $F(2, 16) = 4.6, p < .05$ ）。対連合課題に対するそれぞれの二次課題の抑制の強さを見るために構音抑制条件と空間タッピング条件の得点から統制条件の得点を引いて抑制価を計算した（Figure 1b 参照）。この抑制価を分散分析にかけたところ、作動記憶負荷の主効果が有意であった（ $F(1, 17) = 5.5, p < .05$ ）。また、作動記憶負荷と学習試行数の交互作用が有意傾向であったため（ $F(4, 14) = 2.4, p = .095$ ）、単純主効果の検定を行ったところ、第 1 試行では有意差がなかったが、第 2 試行と第 3 試行では空間タッピング条件のほうが有意に抑制価が大きかった（順に $F(1,$

17) = 15.8, $p < .001$; $F(1, 17) = 5.1, p < .05$. また , この有意差は第 4 , 5 試行では消滅した .

作動記憶負荷の主効果が有意で , しかも空間タッピング課題の抑制価が最も一貫して高かったことから , 数の記憶にもっとも大きな役割を果たすのは視空間スケッチパッドであることが示唆された . この結果は Hatano & Osawa (1983) と一致する .

また , 単純主効果の検定結果から , 視覚提示された数字の記憶の保持に対する視空間スケッチパッドの貢献の度合いは学習の反復ごとに増大していくが , 音韻ループの貢献の度合いは低下していくことが示唆された . つまり , 学習試行の前半部では音韻ループを妨害する構音抑制課題と視空間スケッチパッドを妨害する空間タッピング課題の両方とも妨害効果をもったため , 音韻ループと視空間スケッチパッドの両方が数の記憶に貢献していると考えられる . また , 後半では構音抑制効果が消失したため , 視空間スケッチパッドのみが貢献していると考えられる . もしかしたら , 数に関する情報を記憶する最初の段階では数字の読みや数の音と視空間的な量的イメージの両方を使っているのかもしれない . そして最後の段階では視空間的な量的イメージのみで記憶を行っているのかもしれない .

実験 2 以降の概要

実験 1 において , もっとも大きな役割を果たすのは視空間スケッチパッドであることが示唆された . また , 数の記憶における作動記憶の下位システムの役割は学習遂行に伴い変化していくことが示唆された . 実験 2 以降ではそのことも踏まえながら , 作動記憶制限の有利さについて検討していく .

作動記憶制限による有利さとは , 作動記憶容量が小さい場合や作動記憶システムの機能に対して妨害がかかっている場合に見られる課題遂行の有利さである . この有利さはさまざまな領域で見られ , 言語獲得 (Newport, 1988, 1990, 1991; Elman, 1993; Cochran, McDonald, & Parault, 1999; Gibbs, 2004) , 相関関係の知覚 (Kareev, 1995; Kareev, Lieberman, & Iev, 1997) , 新近性効果 (Hamilton, Hockey, & Rejman, 1977; Cowan, Wood, & Borne, 1994; Cowan, Wood, Nugent, & Treisman, 1997) でこの有利さが報告されている . 本研究の実験 2 以降では , 実験 1 の追試とともに作動記憶制限の有利さを検討していく .

実験 2 以降では , Newport (1988, 1990, 1991) や Elman (1993) で見出された学習の初期における作動記憶制限の有利さを見るために , 学習フェーズと再学習フェーズを設けた . 実験は以下のように遂行された . 被験者は練習を行った後 , 学習フェーズに移った . 学習フェーズと再学習フェーズでの二次課題の有無が教示された後 , 被験者は記憶負荷条件もしくは統制条件のもとでアルファベットと数字の対連合課題を学習した . 記銘および再生の方法は実験 1 と同様であった . 記銘 再生を 4 回繰り返したあと , 被験者には 30 秒の休憩が与えられた . この休憩は次の再学習フェーズでの二次課題の有無をもう一度教示するために挿入された . その後 , 被験者は教示されたとおりに記憶負荷条件か統制条件のどち

らかで学習フェーズと同じ刺激対を再学習した。再学習フェーズでの記録 再生の反復回数は 4 回であった。もし、学習フェーズにおける作動記憶負荷が再学習成績を促進するのであれば、Newport や Elman の結果を再現できたことになる。

実験 2 から 5 までの二次課題および記憶すべき刺激数を Table 1 に記す。実験 2 と 3 では二次課題に空間タッピング課題を用い、実験 4 と 5 では構音抑制課題を用いた。これは、実験 1 の結果を追試するためであった。二次課題の違いによる一次課題の得点の差異を見ることによって、実験 1 の結果の再現性を検討した。また、一度に提示される刺激数も実験により変えた。これは、課題の困難度と二次課題の効果との関係を見るためであった。

実験 2

実験 2 では記憶すべき刺激数を 4、二次課題を空間タッピング課題にして実験を行った。
方法

被験者 大学生 21 人。

要因計画 2 (学習フェーズでの記憶負荷あり・なし) × 2 (再学習フェーズでの記憶負荷あり・なし) × 2 (フェーズ) × 4 (学習試行数) の 4 要因計画であった。フェーズとは学習フェーズか再学習フェーズのどちらかという意味である。4 要因とも被験者内要因であり、すべての被験者はすべての課題を遂行した。

刺激 一次課題としてアルファベット - 乱数の対連合課題を、作動記憶を妨害する二次課題として空間タッピング課題を用いた。

1. 一次課題 実験 1 と同じ方法で作成された。刺激対の数は各条件ごとに 4 対ずつであった。
2. 二次課題 作動記憶に負荷をかける二次課題として、空間タッピング課題が用いられた。また、統制条件ではただ静かに刺激対を見て覚えるように教示された。これらの遂行方法の詳細は実験 1 と同一であった。

機材 刺激の作成と実験の制御には Psychology Software Tools Inc. 製 E-Prime Ver. 1.1 が用いられた。また、刺激の提示には SONY 製 Vaio PCV-HS21L5 が用いられた。また、刺激はイーヤマ製の CRT である LS902U によって視覚提示された。

手続き 練習を行った後、被験者は学習フェーズに移った。学習フェーズと再学習フェーズでの二次課題の有無が教示された後、被験者は記憶負荷条件もしくは統制条件のもとでアルファベットと数字の対連合課題を学習した。記録および再生の方法は実験 1 と同様であった。記録 再生を 4 回繰り返したあと、被験者には 30 秒の休憩が与えられた。この休憩は次の再学習フェーズでの二次課題の有無をもう一度教示するために挿入された。その後、被験者は教示されたとおりに記憶負荷条件か統制条件のどちらかで学習フェーズと同じ刺激対を再学習した。再学習フェーズでの記録 再生の反復回数は 4 回であった。

結果と考察

再生率と数字の再生で正反応に要した反応時間を従属変数とすることにより、実験結果

の評価を行った。

再生率 Figure 2a, 2b を参照。四元配置の分散分析を行ったところ、フェーズ、学習試行数の主効果が有意であった（順に、 $F(1, 20) = 325.95, p < .001$; $F(1, 20) = 95.13, p < .001$ ）。再生率は再学習フェーズのほうが高かった（.661 vs. .912）。また、フェーズと試行数の交互作用も有意だった（ $F(3, 18) = 32.91, p < .001$ ）。単純効果の検定を行ったところ、学習フェーズのときのみ反復学習の効果が有意であった（ $F(3, 18) = 52.91, p < .001$ ）。しかしながら、学習時および再学習時の記憶負荷の主効果は有意ではなかった。このことから、再生率には空間タッピング課題による妨害効果が見られなかったことになる。

反応時間 各フェーズにおける正反応に要した反応時間の総平均を従属変数として分析をした（Figure 2c, 2d を参照）。その理由は、両フェーズとも最大正反応数は4（刺激対の数） \times 4（学習試行数）= 16 個しかないため、試行ごとに正反応の反応時間を計算しようとすると、欠損値が出ることがあるためである。よって、分析は2（学習フェーズでの記憶負荷あり・なし） \times 2（再学習フェーズでの記憶負荷あり・なし） \times 2（フェーズ）の三元配置の分散分析をすることにした。その結果、再学習時の記憶負荷が有意であった（ $F(1, 20) = 4.35, p < .05$ ）。再学習時に記憶負荷をかけたほうが反応時間が短くなった（1872.5 vs. 1769.2）。この差は、記憶負荷がかかっていないはずの学習フェーズから発生し（2017.0 vs. 1904.6）、再学習フェーズでも条件差が残った（1728.0 vs. 1633.9）。さらにフェーズの主効果が有意であり（ $F(1, 20) = 114.99, p < .001$ ）、再学習フェーズのほうが反応時間が短くなった（1960.8 vs. 1681.0）。また、学習時の記憶負荷とフェーズとの交互作用も有意となった（ $F(1, 20) = 4.92, p < .05$ ）。単純主効果の検定にかけたところ、学習フェーズにおける記憶負荷の条件差は有意傾向であり（ $F(1, 20) = 4.10, p = .058$ ）、学習時の記憶負荷による反応時間の増加は再学習時には消滅する可能性が示唆された（学習フェーズ：1891.6 vs. 2030.0、再学習フェーズ：1686.5 vs. 1675.5）。さらに、学習フェーズから再学習フェーズへの反応時間の減少は記憶負荷のどちらの条件でも有意であったが（順に、 $F(1, 20) = 24.48, p < .001$; $F(1, 20) = 65.73, p < .001$ ）、反応時間の減少幅は学習フェーズにおいて記憶負荷をかけた条件の方が大きかった（-205.1 vs. -354.6）。学習時の記憶負荷の主効果と他の交互作用は有意ではなかった。

再学習時の記憶負荷の主効果が有意で、かつ記憶負荷をかける条件のほうが反応時間が短かったので、作動記憶制限による有利さが見出せたことになった。しかし、学習フェーズとの交互作用は有意ではなく、記憶負荷がかかっていないはずの学習フェーズから再学習時に記憶負荷をかける条件のほうが反応時間が速くなっている事もわかった。たまたま記憶能力が高い人が再学習フェーズに配置されたためこの結果が生み出されたのではのではないかという解釈がまず考えられるが、被験者内実験であるためこのような解釈は考えられない。この結果を引き起こしたものは、実験前の「再学習フェーズで空間タッピング課題を行います」という教示以外には考えにくく、再学習フェーズにおける記憶負荷に対する不安が反応時間を速めたのかもしれないと解釈できる。この件については総合考察で

議論する。

実験 3

この実験では、一度に記録する刺激対の数を倍の 8 対に増やして、実験 2 の結果が再現できるかどうかを検討する。

方法

被験者 大学生・大学院生 21 人。

要因計画 2 (学習フェーズでの記憶負荷あり・なし) × 2 (再学習フェーズでの記憶負荷あり・なし) × 4 (学習試行数) × 2 (学習フェーズ・再学習フェーズ) の 4 要因計画であった。4 要因とも被験者内要因であり、すべての被験者はすべての課題を遂行した。作動記憶負荷の各条件の遂行順序および一次課題の刺激リストはなるべくカウンターバランスが取られるように執り図られた。

刺激 一次課題としてアルファベット - 乱数の対連合課題を、作動記憶を妨害する二次課題として空間タッピング課題を用いた。

1. 一次課題 実験 1 および 2 と同じ方法で作成された。刺激対の数は各条件ごとに 8 対ずつであった。

2. 二次課題 作動記憶に負荷をかける二次課題として、空間タッピング課題が用いられた。また、統制条件ではただ静かに刺激対を見て覚えるように教示された。これらの遂行方法の詳細は実験 1 および 2 と同一であった。

機材 実験 2 と同様であった。

手続き 課題遂行は実験 2 と同様に行われた。実験 2 との違いは刺激対の数が増えたことで、実験 3 では 8 つの刺激対を学習するように求められた。

結果と考察

実験 2 と同様に再生率と正反応における反応時間を従属変数として分析した。

再生率 再生率を Figure 3a, 3b にあらわした。四元配置の分散分析をしたところ、学習時の記憶負荷の主効果が有意で ($F(1, 20) = 4.70, p < .05$)、学習時に記憶負荷をかけると成績が低下したことが明らかになった (.763 vs. .700)。また、フェーズと学習試行数の主効果も有意であり (順に、 $F(1, 20) = 187.40, p < .001$; $F(3, 18) = 228.36, p < .001$)、再学習フェーズのほうが正答率は有意に高かった (.565 vs. .898)。また、4 要因の交互作用も有意であった ($F(3, 18) = 3.66, p < .05$)。他の主効果および交互作用は有意ではなかった。

空間タッピング課題は数字の記憶に対して有意な妨害効果を持ったので、数の記憶に対して視空間スケッチパッドは重要な役割を果たし、しかも、その役割は比較的長期にわたることがわかった。この結果は、実験 1 の結果を異なる手続きによって再現したことになる。

反応時間 実験 2 と同様の方法で反応時間を計算し (Figure 3c, 3d 参照)、三元配置の分散分析を用いて分析した。まず、学習時の記憶負荷の主効果が有意であり ($F(1, 20) = 4.76,$

$p < .05$), 学習時に記憶負荷をかけると正反応に要する反応時間が長くなることがわかった (1948.9 vs. 2016.3). また, フェーズの主効果も有意であり ($F(1, 20) = 111.80, p < .001$), 再学習フェーズの反応時間のほうが有意に短かった (2105.8 vs. 1859.3). しかしながら, 他の主効果と交互作用は有意ではなかった.

以上の結果から, 空間タッピング課題は数字の記憶に対して有意な妨害効果を持つことがわかったので, 数の記憶に対して視空間スケッチパッドは重要な役割を果たす事がわかった. しかし, 実験 2 で見られたような作動記憶制限に対する有利さは見られなかった. 実験 2 と実験 3 の差は記憶すべき刺激数であった. 実験 3 のほうが刺激数が多く, 課題の困難度が高かった. そのことから, 課題の困難度が高い場合には作動記憶制限の有利さが生起しないことが示唆される. このことに関しては総合考察で議論する.

実験 4

この実験では, 二次課題を音韻ループを妨害する構音抑制課題に変えて, 実験 1 または 4 の結果を再現できるかどうかを検討する.

方法

被験者 大学生・大学院生 18 人.

要因計画 2 (学習フェーズでの記憶負荷あり・なし) \times 2 (再学習フェーズでの記憶負荷あり・なし) \times 4 (学習試行数) \times 2 (学習フェーズ・再学習フェーズ) の 4 要因計画であった. 4 要因とも被験者内要因であり, すべての被験者はすべての課題を遂行した. 作動記憶負荷の各条件の遂行順序および一次課題の刺激リストはなるべくカウンターバランスが取られるように執り図られた.

刺激 一次課題としてアルファベット - 乱数の対連合課題を, 作動記憶を妨害する二次課題として構音抑制課題を用いた.

1. 一次課題 実験 1, 2, 3 と同じ方法で作成された. 刺激対の数は各条件ごとに 4 対づつであった.

2. 二次課題 作動記憶に負荷をかける二次課題として, 構音抑制課題が用いられた. また, 統制条件ではただ静かに刺激対を見て覚えるように教示された. これらの遂行方法の詳細は実験 1 と同一であった.

機材 実験 2, 3 と同一であった.

手続き 課題遂行は実験 2 と同様に行われた. 実験 2 との違いは二次課題が構音抑制課題に変わったことで, 被験者は対連合課題の記録中ずっと実験 1 と同じやり方で構音抑制課題を遂行しつづけた.

結果

実験 2, 3 と同様に再生率と正反応における反応時間を従属変数として, 分析した.

再生率 再生率を Figure 4a, 4b に記す. 四元配置の分散分析をしたところ, フェーズと学習試行数の主効果が有意であった (順に, $F(1, 17) = 119.46, p < .001$; $F(3, 15) = 97.13$,

$p < .001$). 学習フェーズよりも再学習フェーズのほうが有意に再生率が高かった (.681 vs. .907). また, フェーズと学習試行数の交互作用が有意であり ($F(1, 17) = 50.70, p < .001$), 学習フェーズでは学習試行数の単純主効果が有意であったが ($F(3, 15) = 91.26, p < .001$), 再学習フェーズでは有意ではなくなった. このことは, 再学習フェーズで天井効果が出ていることを示唆する. さらに, 学習フェーズの作動記憶負荷 × フェーズの交互作用と学習フェーズの記憶負荷 × 学習試行数の交互作用が有意であった (順に, $F(1, 17) = 4.91, p < .05$; $F(3, 15) = 3.44, p < .05$). 学習フェーズの作動記憶負荷 × フェーズの交互作用が有意であったことから, 学習フェーズにおける作動記憶負荷による記憶成績の不利益は再学習フェーズで解消されることが示唆された (学習フェーズ: .715 vs. .648, 再学習フェーズ: .908 vs. .906). 他の主効果や交互作用は有意ではなかった.

以上の結果から, 学習フェーズにおける構音抑制課題の妨害効果は再学習フェーズまでは続かないことがわかったので, 音韻ループは数の記憶に対して短期的な役割しか担わないことがわかった. この結果は, 実験 1 の結果を異なる手続きで再現したことになった.

反応時間 実験 2, 3 と同様の方法で反応時間を計算し (Figure 4c, 4d 参照), 三元配置の分散分析を用いて分析した. フェーズの主効果が有意で ($F(1, 15) = 24.35, p < .001$), 再学習時のほうが反応時間が短くなることが明らかとなった (1809.2 vs. 1563.6). また, 再学習時の記憶負荷 × フェーズの交互作用も有意傾向であった ($F(1, 15) = 3.80, p = .068$). 学習フェーズにおいて, 再学習フェーズに記憶負荷をかける条件は負荷をかけない条件よりも反応時間が短く (1834.6 vs. 1783.9), 再学習フェーズでは, 再学習フェーズに負荷をかけたほうが反応時間が長くなった (1542.6 vs. 1584.6).

再学習時の記憶負荷 × フェーズの交互作用が有意傾向であり, しかも学習フェーズにおいて再学習フェーズで記憶負荷をかけられる条件のほうが反応時間が速くなったことから, 実験 2 の結果が再現されたことがわかる. しかし, 再学習フェーズでは再学習フェーズに記憶負荷をかけた条件のほうが反応時間が長くなってしまったため, 実験 2 のような作動記憶制限による有利さは見出せなかった. このことは, 作動記憶制限による有利さが生起する条件の探索に対して示唆を与えてくれる. 数の記憶において最も重要な役割を果たすのは視空間スケッチパッドであるということは, Hatano & Osawa (1983) や Hubbard, et al. (2005) や本研究における実験 1 から 3 までで主張されてきた. そして, 実験 2 では作動記憶制限による有利さが見出された. ところが, 実験 4 では数の記憶においてそれほど重要ではない音韻ループを妨害して課題遂行を行わせたところ, 作動記憶制限による有利さは見出せなかった. このことから, 作動記憶制限による有利さが生起するのは, 当該の情報処理を行う際にもっとも重要なシステムに制限を加えた時だけであることが示唆される. この件に関しては, 総合考察で議論する.

実験 5

この実験では, 二次課題を音韻ループを妨害する構音抑制課題に変え, さらに刺激数を 8

つに増やして、実験 1 または 4 の結果を再現できるかどうかを検討する。

方法

被験者 大学生・大学院生 18 人。

要因計画 2 (学習フェーズでの記憶負荷あり・なし) × 2 (再学習フェーズでの記憶負荷あり・なし) × 4 (学習試行数) × 2 (学習フェーズ・再学習フェーズ) の 4 要因計画であった。4 要因とも被験者内要因であり、すべての被験者はすべての課題を遂行した。作動記憶負荷の各条件の遂行順序および一次課題の刺激リストはなるべくカウンターバランスが取られるように執り図られた。

刺激 一次課題としてアルファベット - 乱数の対連合課題を、作動記憶を妨害する二次課題として構音抑制課題を用いた。

1. 一次課題 実験 1 から 4 と同じ方法で作成された。刺激対の数は各条件ごとに 8 対づつであった。

2. 二次課題 作動記憶に負荷をかける二次課題として、構音抑制課題が用いられた。また、統制条件ではただ静かに刺激対を見て覚えるように教示された。これらの遂行方法の詳細は実験 1 と同一であった。

機材 実験 2, 3 と同一であった。

手続き 課題遂行は実験 4 と同様に行われた。実験 4 との違いは刺激対の数が増えたことで、実験 5 では 8 つの刺激対を学習するように求められた。

結果

実験 2 から 5 と同様に、正答率と正反応における反応時間を従属変数として分析した。

正答率 結果を Figure 5a, 5b に記す。学習フェーズの記憶負荷と再学習フェーズの記憶負荷の主効果はいずれも有意にはならなかった。しかし、学習フェーズの記憶負荷 × フェーズの交互作用が有意傾向であった ($F(1, 19) = 4.26, p = .053$)。学習フェーズにおいて記憶負荷がない条件のほうが記憶負荷がある条件よりも正答率が高かったが (.667 vs. .586)、再学習フェーズにおいては条件差は小さくなった。単純効果の検定を行ったところ、学習フェーズのときのみ学習フェーズにおける記憶負荷の単純主効果が有意傾向であった ($F(1, 19) = 4.17, P = .055$)。そして、学習フェーズの記憶負荷 × 学習試行数の交互作用は有意であった ($F(3, 17) = 4.33, p < .05$)。また、フェーズの主効果、学習試行数の主効果が有意であり (順に、 $F(1, 19) = 378.01, p < .001$; $F(1, 19) = 290.77, p < .001$)、学習フェーズよりも再学習フェーズのほうが再生率が高かった。さらに、フェーズと学習試行数との交互作用も有意であり ($F(3, 17) = 49.86, p < .001$)、単純効果の検定の結果、学習フェーズの時のみ学習試行数の単純主効果が有意であった。

以上の結果から、構音抑制課題の妨害効果は短期間しか続かないことがわかり、音韻ループは数の記憶に対しては短期的な役割しか担わないことがわかった。この結果は実験 1 と 4 を再現した。

反応時間 結果を Figure 5c, 5d に記す。学習フェーズの主効果のみが有意であり ($F(1,$

19) = 70.00, $p < .001$), 学習フェーズよりも再学習フェーズのほうが反応時間が短かった (2041.2 vs. 1840.1) .

総合考察

本研究の結果、視空間スケッチパッドは数の記憶において重要で長期的な役割を果たすことがわかった。また、一度に覚える刺激数が 4 のときは空間タッピング課題は妨害効果ではなく促進効果を持つことがわかった。一方、音韻ループは数の記憶においては短期的な役割しか果たさないことがわかった。また、一次課題の成績に対する構音抑制課題の促進効果は見られなかった。

数の記憶における隷属システムの役割について

本研究の結果から学習の初期には音韻ループと視空間スケッチパッドに対する二次課題の妨害効果が見られるが、学習の後期には視空間スケッチパッドに対する妨害効果しか見られないことがわかった。このことから、学習の初期には数字は音韻的情報と視空間的情報の両方から符号化されるが、学習の後期には視空間的情報による符号化のみが行われている可能性がある。ただし、今回の実験では空間タッピング課題という空間的情報の処理を妨害する課題だけを使ったため、視覚的処理に関しては検討されていない。今後は視覚的処理を妨害する課題を用いて検討すべきであろう。

どのようなときに作動記憶制限による有利さが見られるか

実験 2 の結果から、二次課題に空間タッピング課題を用い記憶すべき刺激数が 4 の時には、記憶負荷の効果はネガティブな効果ではなく反応時間を早める効果がある、つまり記憶を促進する効果があることが明らかになった。この結果は、作動記憶制限による有利さを示すものであり、言語学習 (Newport, 1991; Elman, 1993; Cochran, et al., 1999) 以外の領域でもこの有利さが存在する事を示すことが出来た。しかし、再学習フェーズの記憶負荷の主効果が有意になったことから、Elman (1993)で見られたような学習初期における作動記憶制限の有利さではないこともわかった。

また、実験 2 とは正反対の結果が実験 3 で見出された。刺激対の数が 8 になったら、二次課題の一次課題に対する記憶の妨害効果が現れ、しかもそれは再学習フェーズになっても消えることは無かった。つまり、作動記憶制限の有利さは実験 3 では見出せなかったことになる。

この結果の差を引き起こしているものは何であろうか。実験 2 と 3 の差は刺激対の数である。4 のほうが少ない、つまり、4 のほうが易しい課題だったということである。ヒトの純粋な短期記憶容量は 4 チャンク程度であるという (Cowan, 2001)。つまり、実験 2 の課題は作動記憶内に一瞬で保持できる量ということになり、困難が少ない課題ということになる。このことを考えると、作動記憶制限の有利さというものは一次課題の遂行に困難がないときにのみ現れるのではないかと考察することが出来る。一次課題の難易度と妨害課題の関係については今後検討していく余地があるだろう。

また、実験 4 でも実験 2 の結果を再現できなかった。実験 4 では、音韻ループを妨害する構音抑制課題を二次課題に用いて数の記憶を遂行させたが、この音韻ループは実験 1 では数の長期的な記憶の保持には重要な役割を果たさないと示唆されたものであった。このことを考えると、作動記憶制限の有利さは一次課題の処理にもっとも重要な役割を果たすシステムが妨害されたときのみ起こることなのかもしれないと考察することが出来る。重要なシステムを妨害することによって、それほど重要ではないシステムの使用を促進し、その結果 2 つの面から情報処理を行うことができるようになったため記憶成績が促進されたのかもしれない。Paivio (1971) や Mayer (1997) は言語性の情報と視覚的情報の両方を用いると記憶成績や教育効果があがることを主張しているが、本研究では彼らが報告しているような方略が、数の記憶に重要な役割を果たす視空間スケッチパッドの働きを妨害することによって強制的に導入されたと考えることができる。ただし、空間タッピングによる促進効果は課題数が少ないときのみ起こっているため、今後の研究では課題の困難度との関係をより詳しく検討していく必要があるだろう。

学習フェーズの反応時間における再学習フェーズの記憶負荷の効果

実験 2 と 4 では、学習フェーズにおいて再学習フェーズで記憶負荷に振り分けられる条件の反応時間が、そうでない条件に比べ短いことが示された。実験手続き上、学習フェーズの成績に対して再学習フェーズにおける負荷の影響は存在しないはずである。しかし、これらの実験では学習フェーズで短くなっている。これはどういうことであろうか。

このような現象が生じた理由として考えられるのは、実験前の教示によって再学習フェーズの記憶負荷に対する不安が高まり、覚醒水準が上がった、もしくは不安を拭い去るために再学習時の不利益に備えて記憶の貯蓄をした、ということである。Kondo (1997) によると、テスト不安傾向の高い学生はテスト準備をよくする傾向にあるという。もしかしたら、本研究においてもこのような不安に誘導された準備行動が起こった可能性がある。今後は、本当に教示が不安を引き起こすのか、そしてその不安が再学習に備えた準備行動を促進するのかを検討する必要があるだろう。

本研究では二重課題法と乱数とアルファベットの対連合学習課題を用いて数の記憶における作動記憶の隷属システムの役割を検討した。その結果、視空間スケッチパッドは長期的に重要な役割を果たすが、音韻ループは学習の初期に短期的な役割を果たすのみであることがわかった。さらに、記憶すべき刺激数が少ないときには再学習フェーズにおける視空間スケッチパッドの制限が反応時間を短くした。この現象は、音韻ループへ制限を与えたときには生じなかったため、作動記憶制限の有利さは当該の情報処理にとってもっとも重要な隷属システムが妨害されたときにだけ生じることが示唆された。また、学習フェーズに再学習フェーズで記憶負荷がかかる条件の反応時間が速くなったことから、学習前の教示によって再学習フェーズにおける記憶負荷に対する不安が生じ、それが覚醒水準の向上や準備行動を生み出すことが示唆された。

引用文献

- 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.
- Cowan, N., Wood, N. L., & Borne, D. N. (1994). Reconfirmation of the short-term storage concept. *Psychological Science*, **5**, 103-106.
- Cowan, Wood, N. L., Nugent, L. D., & Treisman, M. (1997). There are two word-length effects in verbal short-term memory: Opposed Effects of Duration and Complexity. *Psychological Science*, **8**, 290-295.
- Elman, J. L. (1993). Learning and development in neural networks: The importance of starting small. *Cognition*, **48**, 71-99.
- Gibbs, S. (2004). Phonological awareness: An investigation into the developmental role of vocabulary and short-term memory. *Educational Psychology*, **24**, 13-25.
- Hamilton, P., Hockey, G. R. J., & Rejman, M. (1977). The place of the concept of activation in human information processing theory. In S. Donic (Ed.), *Attention and Performance* (Vol. 6, pp.463-488), New York: Academic Press.
- Hatano, G., & Osawa, K. (1983). Digit memory of grand experts in abacus-derived mental calculation. *Cognition*, **15**, 95-110.
- Hubbard, E. M., Piazza, M., Pinel, P., & Dehaene, S. (2005). Interactions between number and space in parietal cortex. *Nature Reviews: Neuroscience*, **6**, 435-448.
- 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.
- Logie, R. H., Gilhooly, K. J., & Wynn, V. (1994) Counting on working memory in mental arithmetic. *Memory & Cognition*, **22**, 395-410.
- Mayer, R. E. (1997). Multimedia learning: Are we asking the right questions? *Educational Psychologist*, **32**, 1-19.
- 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). Maturational 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.
- Paivio, A. (1971). *Imagery and Verbal Processes*. Holt, New York: Rinehart & Winston.
- Seiz, K., & Schmann-Hengsteler, R. (2000). Mental multiplication and working memory. *European Journal of Cognitive Psychology*, **12**, 552-570.
- Trbovich, P. L., & LeFevre, J. (2003). Phonological and visual working memory in mental addition. *Memory & Cognition*, **31**, 738-745.

Table 1 Set size and secondary task of Experiment 2 to 5

Experiment	Set size	Secondary Task
Experiment 2	4	Spatial Tapping
Experiment 3	8	Spatial Tapping
Experiment 4	4	Articulatory Suppression
Experiment 5	8	Articulatory Suppression

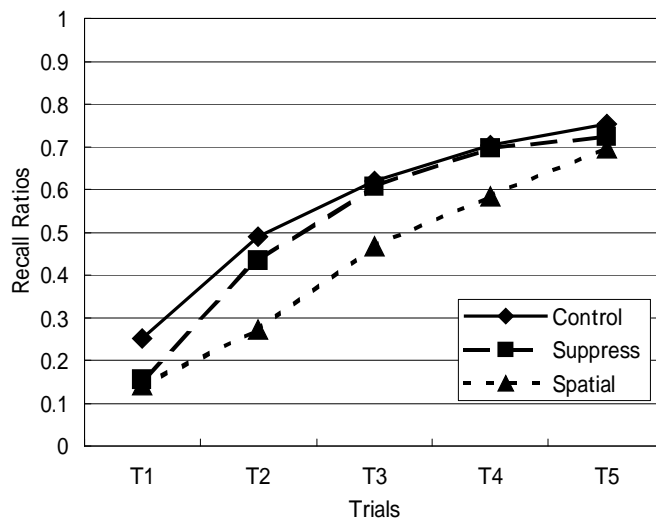


Figure 1a. Recall Accuracy in Experiment 1

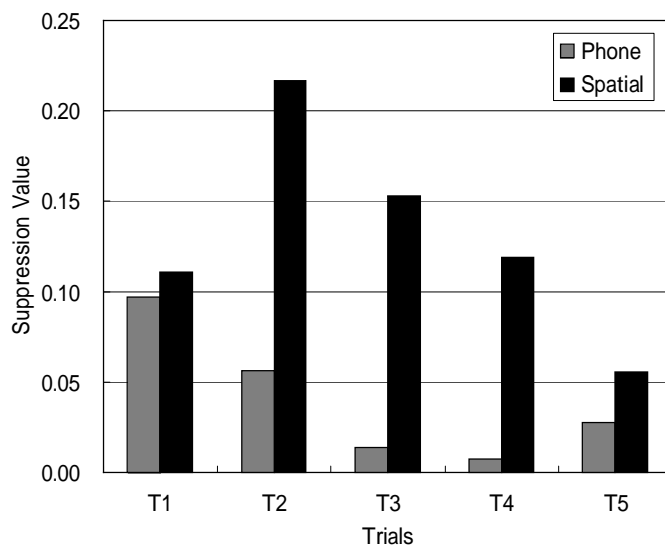


Figure 1b. Suppression Values on Experiment 1

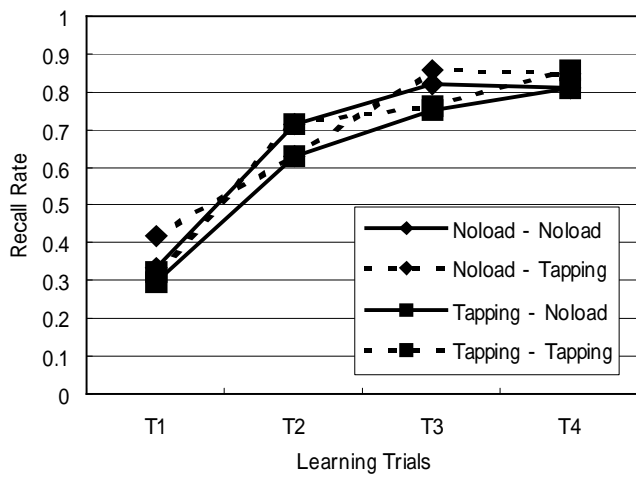


Figure 2a Recall Rate of the learning phase in Experiment 2

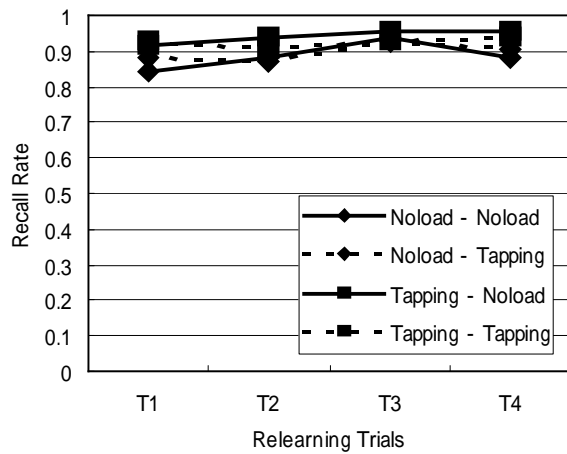


Figure 2b Recall rate of the relearning phase in Experiment 2

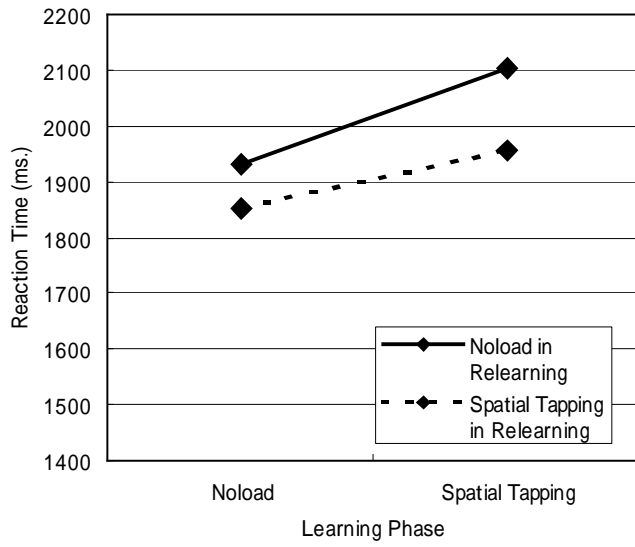


Figure 2c Reaction Time of the learning phase in Experiment 4

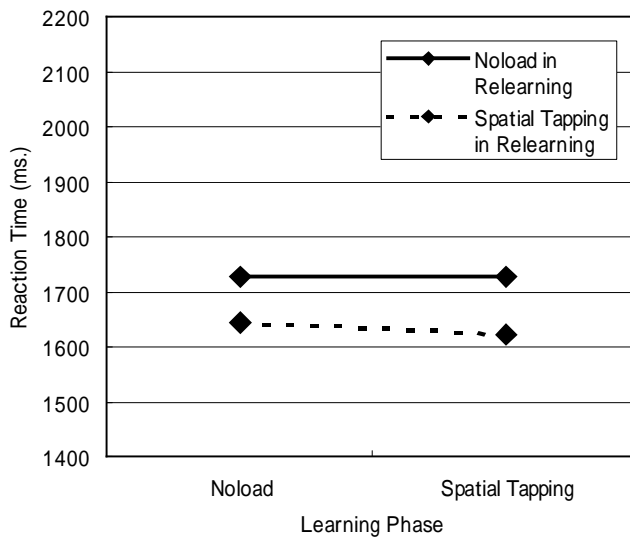


Figure 2d Reaction Time of the relearning phase in Experiment 4

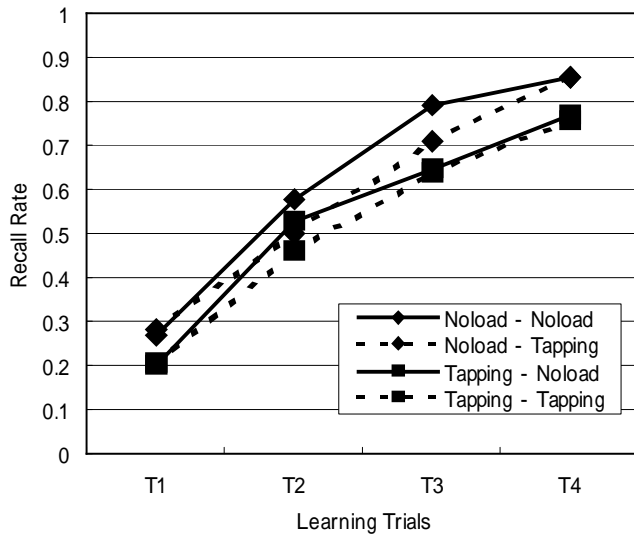


Figure 3a Recall Rate of the learning phase in Experiment 3

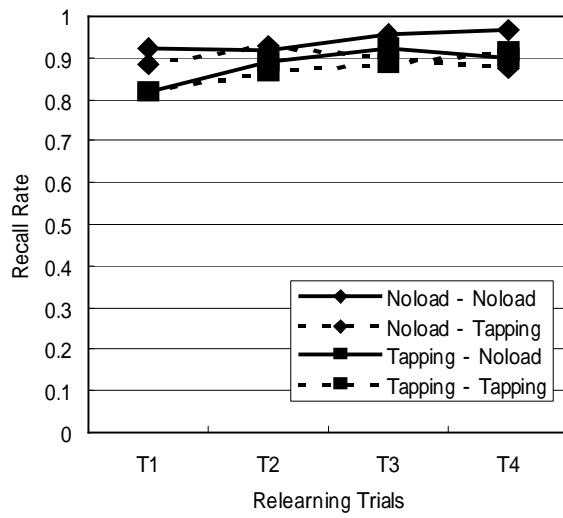


Figure 3b Recall rate of the relearning phase in Experiment 3

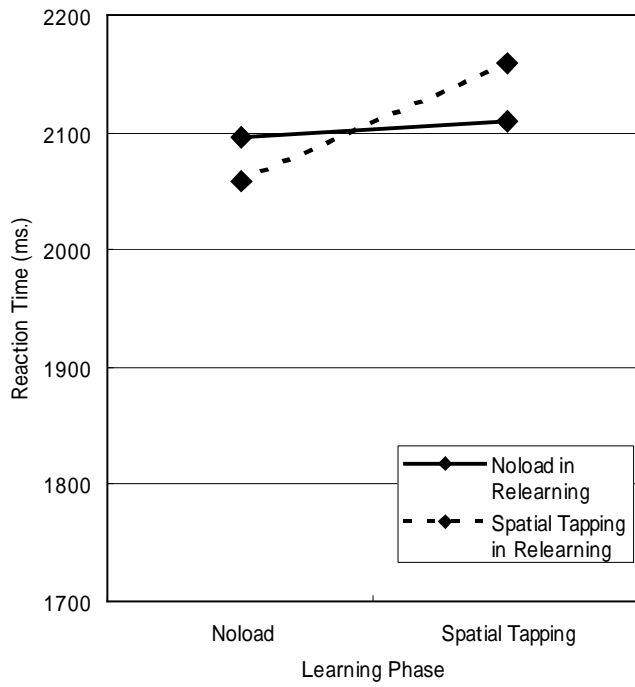


Figure 3c Reaction Time of the learning phase in Experiment 3

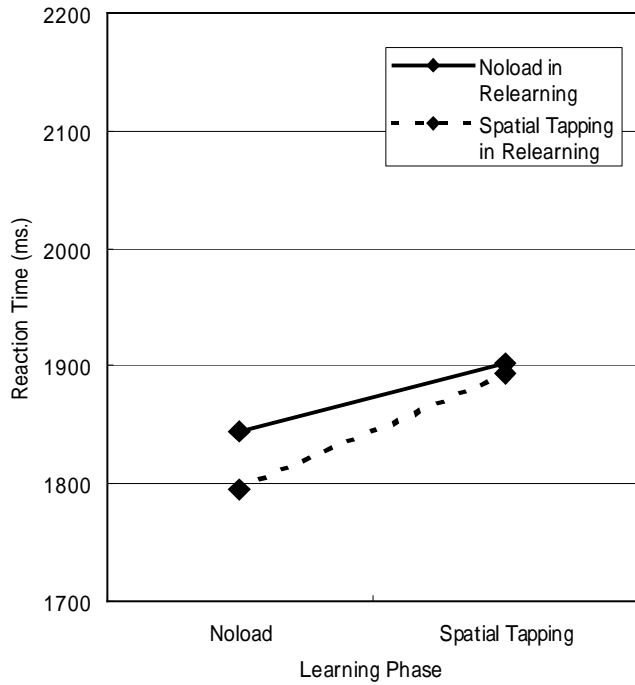


Figure 3d Reaction Time of the relearning phase in Experiment 3

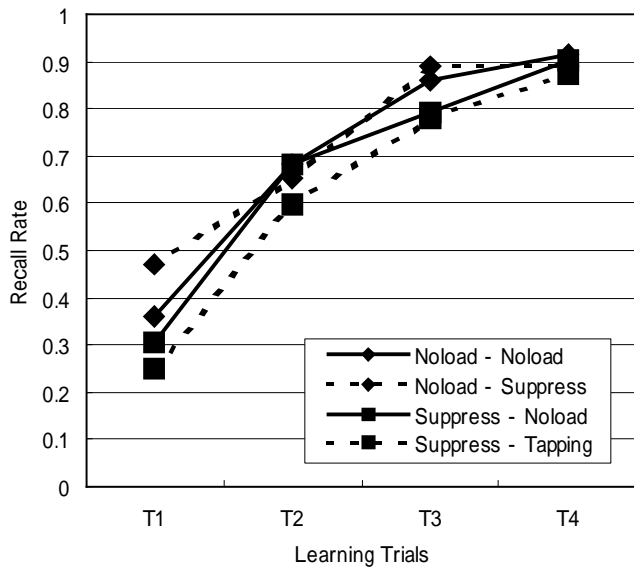


Figure 4a Recall Rate of the learning phase in Experiment 4

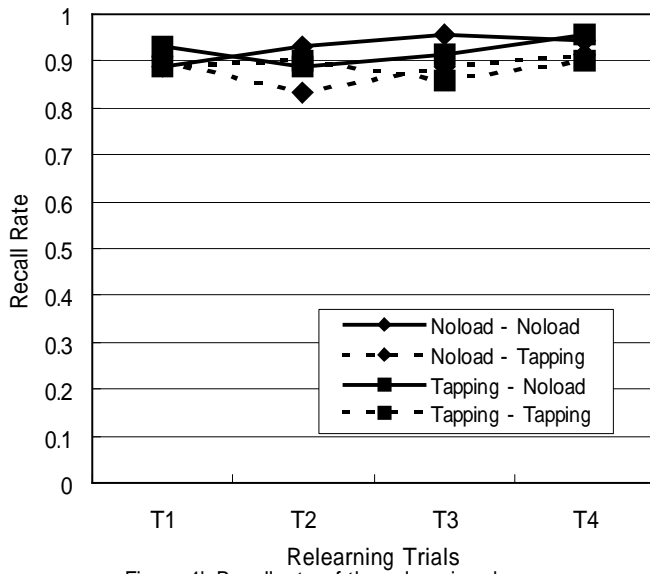


Figure 4b Recall rate of the relearning phase in Experiment 4

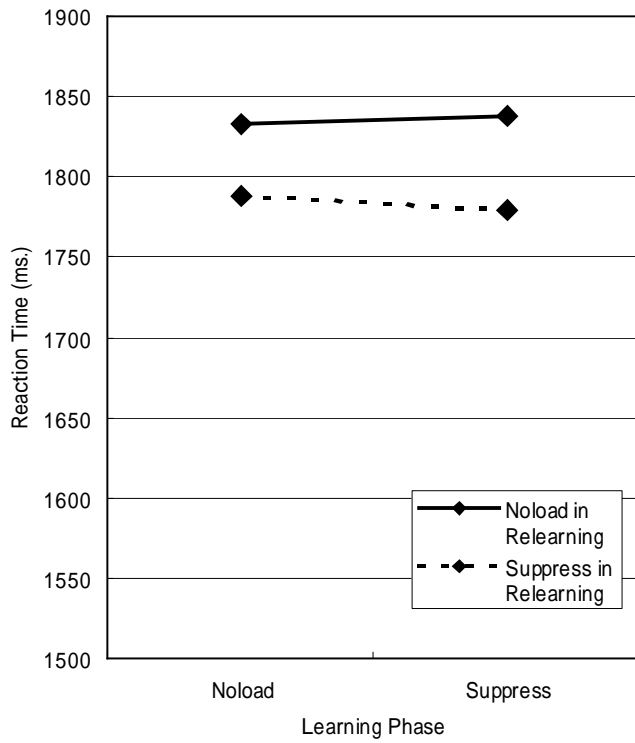


Figure 4c Reaction Time of the learning phase in Experiment 4

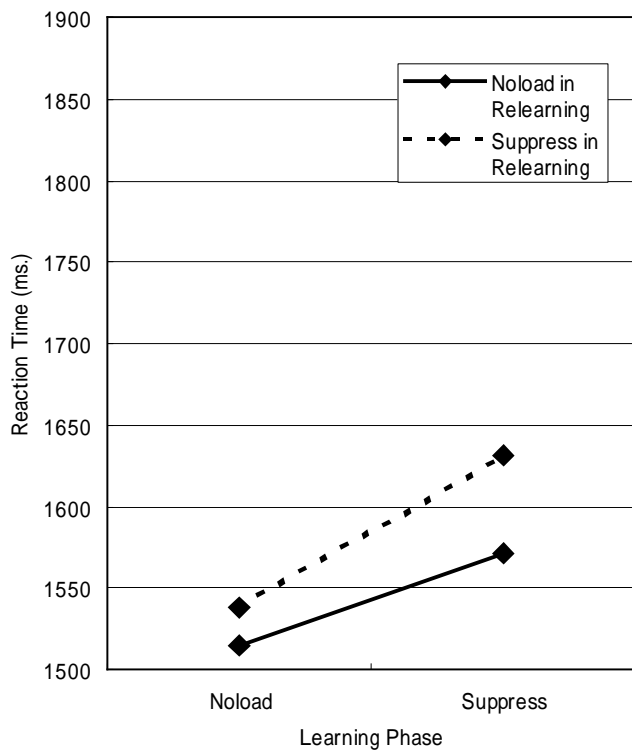


Figure 4d Reaction Time of the learning phase in Experiment 4

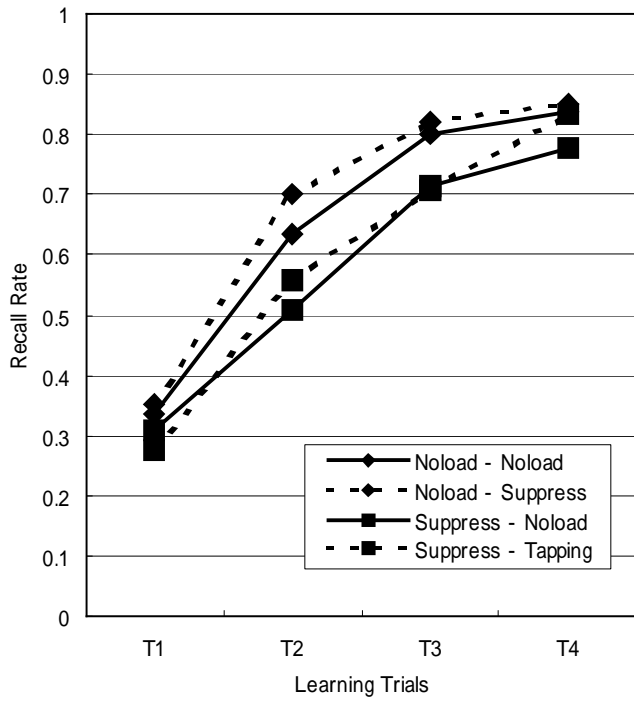


Figure 5a Recall Rate of the learning phase in Experiment 5

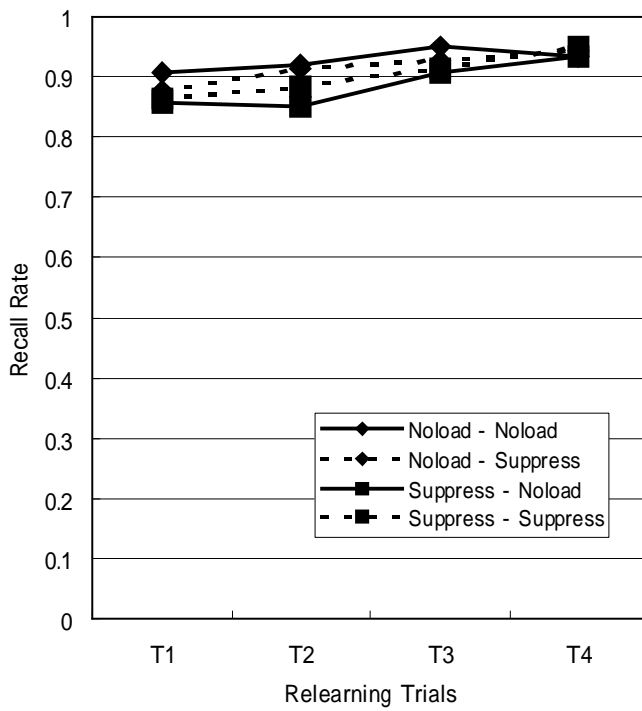


Figure 5b Recall rate of the relearning phase in Experiment 5

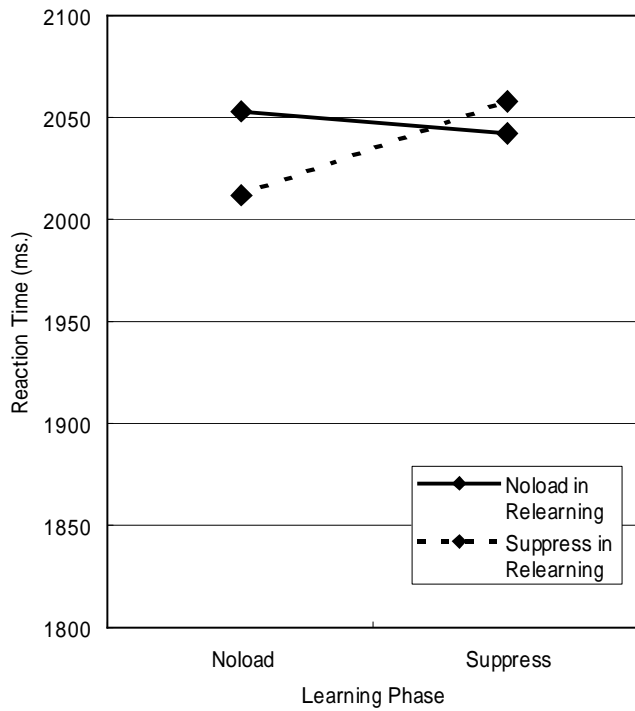


Figure 5c Reaction Time of the learning phase in Experiment 5

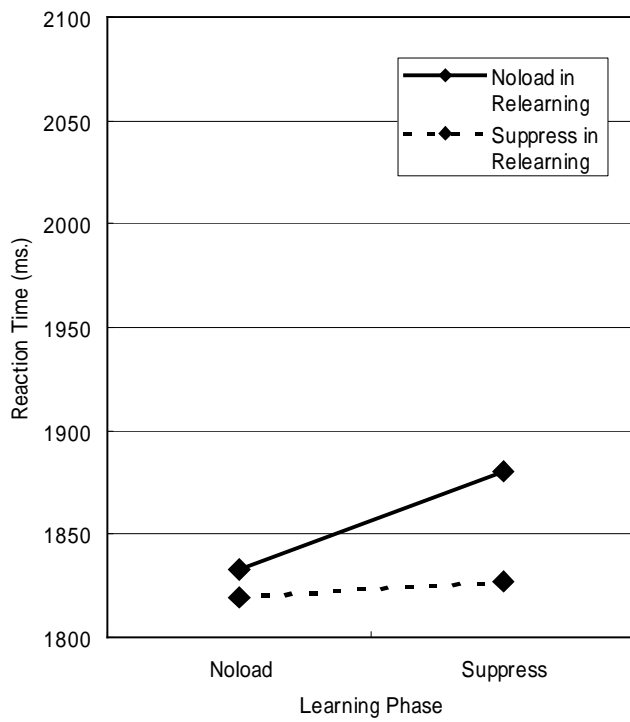


Figure 5d Reaction Time of the learning phase in Experiment 5