

記憶負荷が語彙判断課題時の 事象関連電位に及ぼす影響

中尾美月・武澤友広・中尾 敬

(2003年9月30日受理)

The effect of working memory load on event-related brain potentials during lexical decision task

Mizuki Nakao, Tomohiro Takezawa, and Takashi Nakao

In this study, we investigated whether the working memory involved the post-lexical semantic integration process whereby semantic information was integrated into a higher level discourse representation. ERPs were recorded from twelve undergraduate and graduate students during the lexical decision task under low or high working memory load conditions. Participants decided whether target was a real word or not with keeping two or five digits in working memory. The N400 reflecting the ease of semantic integration were smaller for targets preceded by related primes than preceded by unrelated primes. This N400 modulation, however, was not affected by memory load. It is suggested that the different working memory subsystem for retaining digits is engaged in the semantic integration underlying the N400.

Key words: memory load, lexical decision task, event-related brain potentials, N400, semantic integration, working memory

キーワード：記憶負荷，語彙判断課題，事象関連電位，N400，意味統合，ワーキングメモリ

言語活動は人の高次認知機能の一つである。人は言語を使って思考し、コミュニケーションし、読み書きする。この高次機能のメカニズムに迫ることのできる理論的枠組みの一つに、ワーキングメモリがある。本研究は、言語活動に果たすワーキングメモリの役割に、脳の電気的な活動を反映する事象関連電位(event-related brain potentials, ERP)を用いてアプローチするものである。

言語処理に関係の深いERP成分の一つにN400が挙げられる。N400は文末から意味的に逸脱した単語に対して、潜時約400msで頭皮上中心部・頭頂部優勢に出現する陰性電位である。N400はプライミング・パラダイムでも観察される。このパラダイムでは、2つ(あるいはそれ以上)の単語を継時呈示し、後続単語に語彙判断(単語か非単語かという判断)などの課題を課す。先行単語(プライム)と後続単語(ターゲット)との間に意味的関連性がある場合には、ない場合

と比較して、語彙判断が速く正確になる。この現象は意味的プライミング効果と呼ばれるが、同様の変動がN400にも認められる。すなわち、プライムとターゲットの間に意味的関連性がある場合には、ない場合と比較して、その振幅が減衰する。

このような変動を示すN400がどのような言語処理を反映しているのかを明らかにするため、これまで数多くの研究が行われてきた(Kutas & Van Petten, 1988のレビューを参照)。現在のところ、その最も有力な候補は意味統合過程である。意味統合過程とは、心内辞書で同定された語彙レベルの情報を意味的に統合し、より高次の表象を構築していく過程である(Kintsch, 1988)。N400振幅は意味統合の難易度を反映し、意味統合が困難であるほど、N400振幅が増大すると解釈されている。文脈から意味的に逸脱した単語や、プライムと意味的関連性のないターゲットに対して高振幅のN400が出現するのは、先行情報と後

続情報との意味統合が困難であり、付加的な処理が生じるためと考えられている。

この意味統合過程で重要な役割を果たしていると考えられるのがワーキングメモリである。ワーキングメモリは認知課題の遂行に必要な情報の一時的な保持や処理に携わる記憶システムであり、言語機能を含む様々な認知機能を支える中心的存在である (Baddeley, 2000 など)。これまでに数々のワーキングメモリ・モデルが構築されているが (詳しくは Miyake & Shar, 1999 を参照), その中で言語機能を最もよく説明できるのは, Just & Carpenter (1992) によって提唱されたモデルである。彼らによると, 文の読みは, 既に読んだ内容を保持しつつ, 後に出てくる単語を処理するという一連の並列的な過程であり, このような先行文脈の一時的な「保持」と後続単語の「処理」を支えるメカニズムとしてワーキングメモリをとらえている。彼らのモデルの特徴は以下の4点にまとめられる。(1)ワーキングメモリには「保持」と「処理」の2つの側面がある。(2)「保持」と「処理」はどちらも処理資源を必要とする。(3)ワーキングメモリは処理資源の貯蔵庫であり, その容量には制限がある。(4)情報の保持を長期記憶が一時的に活性化した状態として捉える。このモデルに従うと, 読みの過程とは, 長期記憶における心内辞書の一時的な活性化によって先行文脈を保持しつつ, 次の単語を心内辞書の中から検索し, 先行文脈と統合するという連続的な作業であるといえる。

このように, Just & Carpenter (1992) の考えるワーキングメモリの読みに果たす役割は, N400 に反映される意味統合と密接な関係があると考えられる。しかし, これまで二つの問題は別々の研究で扱われ, 両者の関係を直接調べた研究はない。そこで本研究では, N400 に反映される意味統合とワーキングメモリとの関係を明らかにすることを目的とする。

この目的を達成するために, 本研究ではワーキングメモリの保持機能に負荷をかけ, その記憶負荷の大きさが N400 に影響するかどうかを検討した。もし N400 に反映される意味統合にワーキングメモリが関わっているならば, 保持機能に負荷をかけることによって意味統合に必要な処理資源が少なくなるため, N400 振幅が低下したり, N400 上に現れる様々な効果が消失することが予想される。

N400 の観察にはプライミング・パラダイムを採用し, ターゲットに対する語彙判断課題を遂行中の被験者から ERP を記録した。記憶負荷は, Sternberg (1966) の考案した記憶探索課題を語彙判断課題に組み合わせることによって操作した。具体的には, 各試行

の語彙判断課題終了後にテスト刺激として呈示される数字が, あらかじめ標的として覚えた2つもしくは5つの数字の中にあるかどうかを被験者に判断させた。この標的の数によって記憶負荷を定義し, 2つの標的を覚えたまま語彙判断を行う場合 (低負荷条件) と, 5つの標的を覚えたまま語彙判断を行う場合 (高負荷条件) とで, N400 上に観察される意味的関連性効果の大きさが異なるかどうかを調べた。

方 法

参加者 18-31歳の大学生および大学院生12名 (男性3名, 女性9名) が実験に参加した。全員, 母語は日本語であり, 利き手は右であった。視力 (矯正視力を含む) に問題にある者はいなかった。

実験計画 記憶負荷 (低負荷, 高負荷) × 意味的関連性 (関連, 非関連) の2要因計画とした。いずれの要因も被験者内要因であった。

刺激 語彙判断課題では, カタカナ表記で2-6文字 (平均文字数3.7) の単語および非単語を使用した。プライムは常に単語であり, ターゲットはプライムと意味的関連性のある単語である関連 (RELATED) ターゲット, 意味的関連性のない単語である非関連 (UNRELATED) ターゲット, 非単語 (NONWORD) ターゲットのいずれかであった。1ブロックに含まれる刺激対は各条件につき10対, 計30対であり, これらの刺激対を疑似ランダム順に配置したリストを3種類用意した。

記憶探索課題では, 標的刺激および標テスト刺激に0-9までの1桁の数字を用いた。

刺激はいずれも17インチCRT ディスプレイ (T565, ナナオ) の画面上に呈示した。刺激の色は黒, 背景は灰色であった。文字の大きさは54ポイントとした。

手続き 被験者は半暗室でディスプレイに向かって座った (観察距離約62cm)。実験は10ブロックからなり, 半数の被験者は前半5ブロックを低負荷条件, 後半5ブロックを高負荷条件とし, 残り半数の被験者はその逆の順序で行った。各ブロックの最初に標的となる数字を2つもしくは5つ呈示した。被験者は標的を覚えたら左右のボタンを同時に押して, そのブロックの実験試行を開始した。各負荷条件の最初のブロックを始める前に, 練習ブロックを行った。

各試行の最初に凝視枠を呈示し, 1500ms後にプライムとターゲットを200msずつ, 800msの刺激間隔 (stimulus onset asynchrony, SOA) をはさんで, 枠内に継時呈示した。試行間間隔は3000msとした。

被験者には各試行において2種類の課題を課した。第1課題はターゲットに対する語彙判断であり、単語か非単語かを左右ボタンの押し分けによって判断させた。ターゲット呈示後2000ms後(反応がなかった場合は3000ms後)、テスト刺激として0-9のいずれかの数字を呈示した。第2課題はテスト刺激に対する記憶探索課題であり、テスト刺激が標的かどうかを左右ボタンの押し分けによって反応させた。反応手のボタンへの割り当ては、半数の被験者では、語彙判断課題の単語反応および記憶探索課題の肯定反応を右手、語彙判断課題の非単語反応および記憶探索課題の否定反応を左手とし、残り半数の被験者では逆にした。

脳波の記録と分析 左耳朶を基準電極とし、電極キャップ(Electro-Cap International社製、スズ電極)を用いて、Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, F7, F8, T3, T4, T5, T6, O1, O2, Fz, Cz, Pzの19部位からEEGを、Fp1-左眼窩下間でVEOGを導出した。実験終了後、両耳朶を基準電極としたときのEEGをオフラインで算出した。EEGとVEOGは帯域通過周波数0.05-30Hzで増幅し、サンプリング周波数500HzでA/D変換した。誤反応試行およびアーチファクト混入試行を除き、ターゲット呈示前100msから呈示後1000msの区間について、2記憶負荷×2意味的関連性の4条件別に加算平均した。

条件差の出現区間や有意性は、繰り返し測度の分散分析およびその下位検定を行うことによって判断した。第一種の過誤の増大を防ぐため、必要に応じてGreenhouse & Geisser(1959)の ϵ による自由度の調整を行った。多重比較にはRyan法を用い、有意水準を5%に設定した。部位を含んだ交互作用に関しては、各部位における平均電位をベクトル長で規準化した場合(McCarthy & Wood, 1985)にも有意であった場合のみを採用した。なお、先行研究ではN400の左右差について一致した結果が得られていないため、統計的検定では正中線上部位から記録したERPを分析対象とした。

結果

本実験では単語ターゲットにおける条件差について検討することを目的としているため、行動指標とERPのどちらについても、非単語ターゲットのデータは分析から除外した。

行動指標 全被験者の平均語彙判断時間は、低負荷条件の関連ターゲットでは566ms、非関連ターゲットでは585ms、高負荷条件の関連ターゲットでは565ms、非関連ターゲットでは605msであった。2

記憶負荷×2意味的関連性(関連, 非関連)の分散分析を行ったところ、意味的関連性の主効果が有意であり($F(1, 11)=36.08, p<.05$)、関連ターゲットでは非関連ターゲットよりも語彙判断が速いという意味的プライミング効果を認めた。記憶負荷の主効果および意味的関連性との交互作用は有意でなかった。

次に、全被験者の平均誤反応率は、低負荷条件の関連ターゲットでは2.7%、非関連ターゲットでは4.5%、高負荷条件の関連ターゲットでは1.7%、非関連ターゲットでは2.5%であった。反応時間と同様の分散分析を行ったところ、記憶負荷の主効果が有意であり($F(1, 11)=5.60, p<.05$)、低負荷条件の方が高負荷条件よりも誤反応が多かった。意味的関連性の主効果および記憶負荷との交互作用は有意でなかった。なお、反応時間と誤反応率には、速さと正確性のトレードオフはなかった。

ERP 図1および図2に、関連ターゲットおよび非関連ターゲットに対する各部位の被験者間総加算平均波形を示した。図1が低負荷条件、図2が高負荷条件の波形である。どちらの負荷条件の波形でも、N1, P2およびN2に続いて、300ms付近に頂点に達するN400と、500ms付近に著しく発達した後期陽性電位(late positive component, LPC)が認められた。視察では、波形に記憶負荷による違いがほとんど認められなかった。意味的関連性による条件差の現れ方も記憶負荷にかかわらず同じように生じ、200ms付近から500ms付近にかけて、関連ターゲットに対するERPは非関連ターゲットよりも陽性方向にシフトしていた。Czで最大の条件差が生じたことから、この条件差には中心部優勢に出現するN400の変動が大きく関与していると考えられる。

以上の視察を統計的に評価するため、意味的関連性の条件差が最もよく認められる300-400msおよび400-500ms区間について、正中線上3部位の平均電位をそれぞれ算出し、2記憶負荷×2意味的関連性×2部位の3要因分散分析を行った。その結果、どちらの区間でも意味的関連性の主効果が有意であり(300-400ms: $F(1, 11)=102.79, p<.01$, 400-500ms: $F(1, 11)=39.58, p<.01$)、視察で認められた意味的関連性の条件差が統計的にも支持された。また、400-500ms区間では意味的関連性×部位の交互作用が有意であり($F(2, 22)=43.19, p<.01, \epsilon=.830$)、意味的関連性の条件差が部位によって異なる可能性があった。なお、どちらの区間でも有意な記憶負荷の主効果や意味的関連性との交互作用がなく、視察どおり、波形や条件差の大きさに記憶負荷による違いはないことが統計的にも示された。

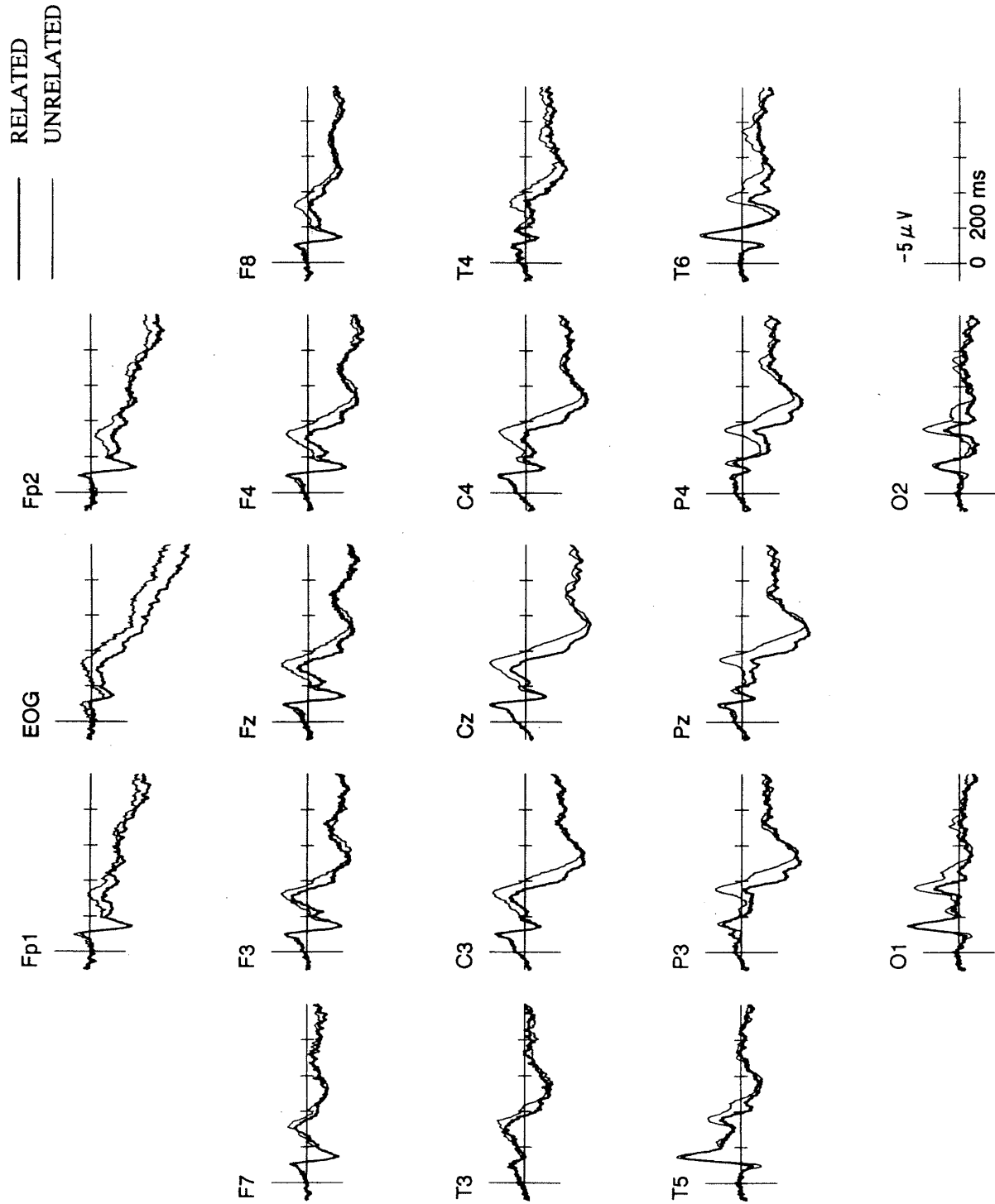


図1. 低負荷条件における関連ターゲットおよび非関連ターゲットに対する被験者間総加算平均波形

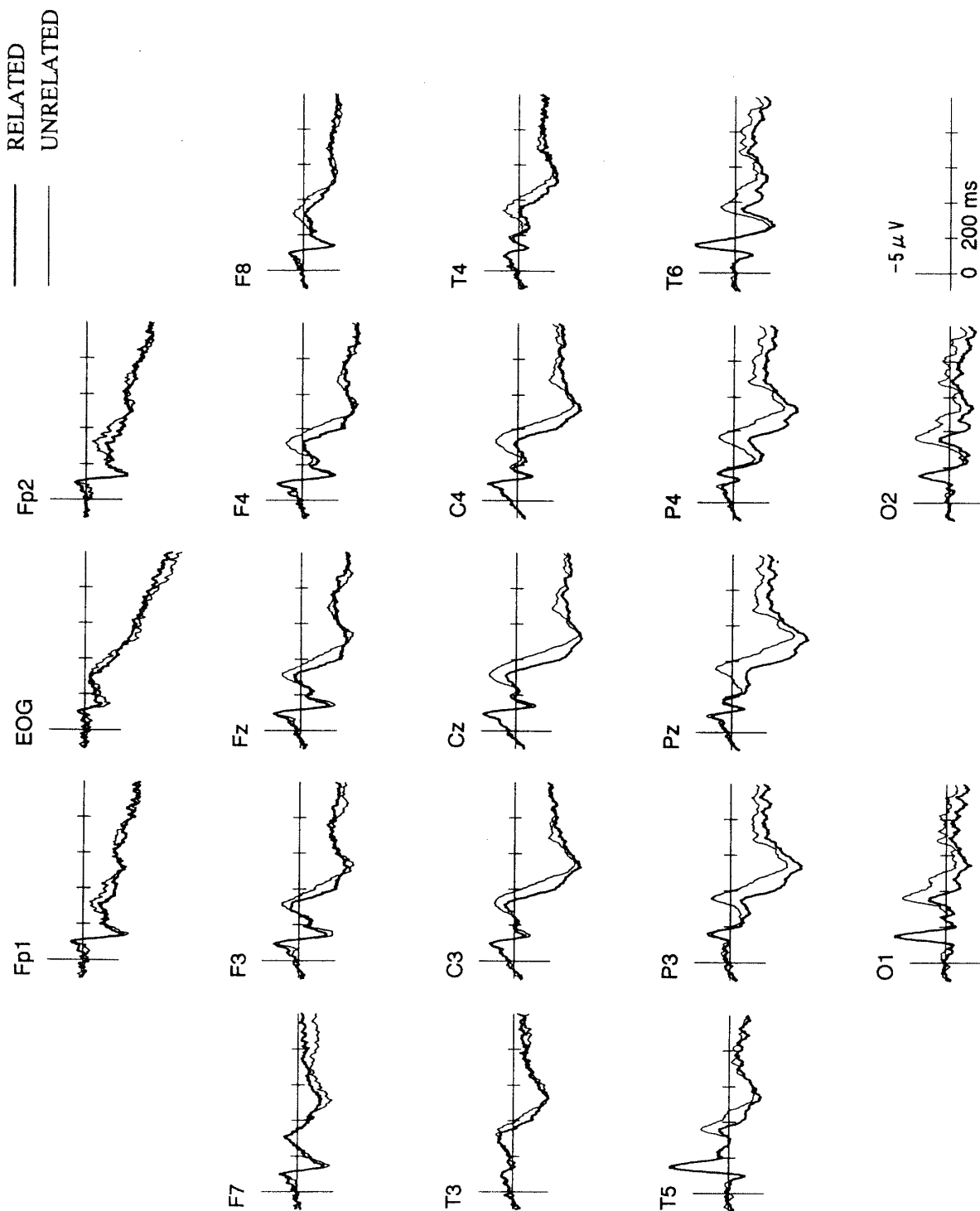


図 2. 高負荷条件における関連ターゲットおよび非関連ターゲットに対する被験者間総加算平均波形

上記の区間で認められた結果が、その後の潜時帯で大きく発達したLPCによるものである可能性を調べるため、LPC 頂点のある500-600ms 区間の平均電位を算出し、同様の分散分析を行った。その結果、部位の主効果 ($F(2, 22)=7.33, p<.01, \epsilon=.942$), 意味的関連性×部位の交互作用 ($F(2, 22)=9.54, p<.01, \epsilon=.980$), 記憶負荷×意味的関連性×部位の交互作用 ($F(2, 22)=9.09, p<.01, \epsilon=.843$) が有意であった。したがって、300-400ms 区間および400-500ms 区間で認められた意味的関連性による主効果は見られなかった ($p>.05$)。さらに意味的関連性×部位の交互作用について下位検定を行ってみても、どの部位でも意味的関連性の単純主効果は得られなかった。よって、上記の区間で生じた意味的関連性効果はLPCによるものではなく、N400によるところが大きいと考えられる。

考 察

本研究では、N400に反映される意味統合過程にワーキングメモリが関わっているかどうかを明らかにすることを目的とした。語彙判断課題と記憶探索課題を組み合わせた実験を行い、ワーキングメモリへの記憶負荷がN400の意味的関連性効果に影響を及ぼすかどうかを調べた。その結果、N400潜時帯に意味的関連性効果が認められ、関連ターゲットに対するN400は非関連ターゲットに対するN400よりも有意に振幅が小さかった。しかし、この意味的関連性効果の大きさに記憶負荷の効果はなく、意味統合にワーキングメモリが関与しているという仮説を支持する結果は得られなかった。

ただし、行動指標について、反応時間にも記憶負荷の主効果が得られず、意味的関連性との交互作用もなかった。さらに誤反応率に見られた記憶負荷の主効果も予想される効果の方向とは異なり、課題遂行が困難であるはずの高負荷条件では低負荷条件よりも誤反応が少なかった。これらの行動指標の結果から、本研究では記憶負荷の操作が不十分であった可能性も考えられる。この推測は被験者の内省報告からも裏付けられ、覚える数字が2つの場合と5つの場合とで、難しさはそれほどかわらないと報告した被験者が多かった。おそらく、0から9までというわずか10種類の数字の中から2つあるいは5つの数字を覚えることは、被験者にとってそれほど困難なことではなかったものと思われる。今後は、高負荷条件で保持に割かれる処理資源の量が低負荷条件よりも確実に多くなるよう、例えば保持すべき刺激にアルファベットを用いたり、1桁の数字ではなく2桁の数字を使用するといった改善が不

可欠である。

別の解釈として、数字を保持するという記憶負荷の操作が、意味統合に携わるワーキングメモリの要素に影響しない性質のものであった可能性もある。このように解釈するためには、ワーキングメモリに機能的に分離した下位システムを仮定することが前提となる。例えばBaddeley(2000)によるワーキングメモリのモデルでは、音韻情報の保持と処理を司る音韻ループ、視覚的・空間的情報の保持と処理を担う視空間スケッチパッド、そしてこれら2つの従属システムの働きをコントロールする制御機構である中央実行系という3つの下位システムを想定している。このモデルに基づく、本実験のように数字を保持しつつ語彙判断を行うという事態では、数字の保持を主に音韻ループが担っていると考えられる。もし意味統合に音韻ループをほとんど必要としないのであれば、音韻ループへの負荷がN400に影響しないのも当然であろう。この推測を裏付けるデータとして、宮谷(2002)は、主に中央実行系に干渉するランダム生成を文の読みと同時に課すと、文脈から意味的に逸脱した単語に対するN400増大が見られなかったことを報告している。このデータから、少なくとも中央実行系は意味統合に何らかの形で寄与していることが伺える。中央実行系と意味統合との関係は、今後さらに検討を重ねていくべき課題である。

本研究の依拠するJust & Carpenter(1992)のモデルは、Baddeley(2000)のような機能的に分離した下位システムを特に想定していない。しかし、容量に限界のある処理資源を保持と処理に配分するという機能は、まさに中央実行系の役割の一つである。ワーキングメモリの各下位システムと意味統合との関係を調べることによって、言語処理にかかわるワーキングメモリのはたらきについて、モデル間の比較や、統一的なモデルの構築も可能になるであろう。

【引用文献】

- Baddeley, A. 2000 The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 417-423.
- Greenhouse, S. W., & Geisser, S. 1959 On the methods in the analysis of profile data. *Psychometrika*, 24, 95-112.
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. 1992 A capacity theory of comprehension: Individual differences in working memory. *Psychological Review*, 99, 122-149.
- Kintsch, W. 1988 The role of knowledge in discourse

- comprehension: A construction-integration model. *Psychological Review*, **95**, 163-182.
- Kutas, M., & Van Petten, C. 1988 Event-related brain potential studies of language. In P. K. Ackless, J. R. Jennings, & M. G. H. Coles (Eds.), *Advances in psychophysiology (Vol. 3)*. Greenwich, CT: Jai. Press. Pp. 139-187.
- McCarthy, G., & Wood, C. C. 1985 Scalp distributions of event-related potentials: An ambiguity associated with analysis of variance models. *Electroencephalography and Clinical Neuro-physiology*, **62**, 203-208.
- Miyake, A., & Shar, P. (Eds.) 1999 *Models of Working Memory*. New York: Cambridge University Press.
- 宮谷真人 2002 中央実行系への妨害が文の正誤判断と N400 に及ぼす影響 (未発表資料)
- 苧阪直行 (編著) 2000 脳とワーキングメモリ 京都大学学術出版会
- Sternberg, S. 1966 High-speed scanning in human memory. *Science*, **153**, 652-654.

付記 本研究は、平成15年度文部科学省科学研究費補助金（基盤研究B，課題番号：14310042，研究代表者：宮谷真人）の補助を受けた。本研究の実施にあたりご協力いただいた白石舞衣子さんと吉村奈緒さんに感謝いたします。