

無意味語のリハーサルが記憶探索陰性電位に及ぼす影響¹

宮谷真人・尾形明子・鴨川奈生子・田村理恵・
堀江健太郎・宮崎ゆき・山下香奈

Effects of non-word rehearsal on memory-search negativity of event-related potentials

Makoto Miyatani, Akiko Ogata, Naoko Kamogawa, Rie Tamura,
Kentarō Horie, Yuki Miyazaki, and Kana Yamashita

本研究では、無意味語を声に出さずに頭の中で繰り返す作業(リハーサル)が、記憶探索過程を反映する事象関連電位(ERP)に及ぼす影響を調べた。記憶探索課題を遂行中の12名の成人から脳波を記録した。実験参加者に、聴覚単語、視覚単語、視覚イメージをランダムな順序で呈示し、あらかじめ覚えた2つまたは5つの標的語と一致するかどうかの判断を求めた。記憶探索課題を単独で行う条件と、記憶探索と同時に無意味語リハーサルを行う条件の間で、記憶セットサイズによるERPの変化を比較した。単独課題条件では、刺激の種類にかかわらず、刺激呈示後300ms付近から、記憶セットサイズの増加に伴うERPの陰性シフト(記憶探索陰性電位)が出現した。無意味語リハーサルは、聴覚単語に対するERPのみに影響し、記憶探索陰性電位の振幅を減衰させた。無意味語リハーサルが、音韻ループの構音コントロール過程への干渉課題として妥当であることが確認された。また、本研究のように聴覚刺激と視覚刺激がランダムに呈示される状況では、視覚刺激に対する記憶探索陰性電位には、音声的符号による継時的照合とは異なる心的過程が反映されることが示された。

キーワード：無意味語リハーサル、音韻ループ、ERP、記憶探索陰性電位

問題

注意、記憶、言語などの人間の認知活動を支える心的過程を調べるためのツールの一つとして、事象関連電位(event-related potentials: ERP)がある。ERPとは、感覚、知覚、認知などの脳の情報処理に関わる神経集団の同期的活動で生じる電位変動である(Hillyard & Kutas, 1983; 沖田, 1989a)。ERPは、測定するのにキー押しなどの外的反応を必要としないので、無視された刺激に対する処理や、自動的な処理過程の性質についての情報を得ることができる。また、刺激入力時点、あるいはそれ以前から行動出力に至るまでの脳過程をミリ秒単位で連続的に記録可能で、その過程に介入す

¹ 本研究は、科学研究費補助金(課題番号11610080)の補助を受けて実施した。結果の一部は、日本心理学会第65回大会で発表した。

る心的過程の順序や時間的重なり、持続時間などについて推測することができる。

ERP は、極性、潜時、振幅、頭皮上分布といった特徴で記述される複数の成分で構成されるが、ERP 波形に見られる陰性方向、陽性方向への振れが見かけ上一つの波に見えたとしても、それが単一の成分ではなく、複数の成分で成立している場合がある (Näätänen & Picton, 1987)。その例として、N400 (Kutas & Hillyard, 1980) を挙げるができる。N400 は、文脈から意味的に逸脱した言語刺激に対して出現する陰性電位であり、言語認知における意味処理過程を反映する成分として多くの研究で取り上げられてきた。Kutas & Federmeier (2000) は、N400 に影響する要因として、長期記憶の構造に基づく情報アクセスの難易度と、ワーキングメモリ内の先行文脈情報と入力刺激との統合の容易さという、性質の異なる 2 つを挙げている。N400 が同時に活動する複数の発生源を持つこと (D'Arcy, Service, Connolly, & Hawco, 2005) を考え合わせると、N400 は、それぞれが異なる心的過程を反映する複数の下位成分の複合波であると考えられる。ERP の各成分と認知活動を支える心的過程が細かく対応づけられるほど、研究ツールとしての ERP の有用性は高まる。例えば、N400 を長期記憶内の語彙アクセス過程を反映する成分と、ワーキングメモリ内の情報統合を反映する成分の 2 つに分離することができれば、意味処理や言語理解の過程を理解するための強力なツールとなる可能性がある。

ワーキングメモリ (Baddeley, 1986) に関する研究では、ワーキングメモリを構成する下位システムを特定するために、二重課題法 (三宅・齊藤, 2001) が用いられることがある。二重課題法では、一次課題と二次課題の 2 つの課題を同時に実験参加者に課し、一次課題だけの場合に比べてどの程度成績が低下するかを調べる。例えば、Logie, Zucco, & Baddeley (1990) は、文字列の記憶と空間パターンの記憶という 2 種類の一次課題の成績に及ぼす二次課題の影響を調べた。その結果、二次課題として暗算課題を実行したときには、文字列の記憶成績は二次課題を行わない条件に比べて 60% 以上低下したが、空間パターン課題の成績低下は 10% 程度にとどまった。ところが特定の視覚イメージを生成させる二次課題を課すと、逆に、空間パターンの記憶成績が 50% 以上低下したのに対し、文字列の記憶成績の低下は約 20% に過ぎなかった。この結果は、ワーキングメモリに、音声的符号に基づいた言語情報の一時的保持を行う音韻ループと、言語化できない視覚的・空間的情報を一時的に保持する視空間スケッチパッドという 2 つの下位システムが存在することの証拠と考えられている。

音韻ループに関する研究で頻繁に用いられる二次課題に、構音抑制 (Baddeley, Lewis, & Vallar, 1984) がある。構音抑制とは、刺激を覚えたり保持したりするときに、記憶する刺激とは無関係な “1, 2, 3, 1, 2, 3, …” などの言い慣れた言葉を声に出して繰り返させることによって、刺激のリハーサルを妨害する方法である (苧阪, 2002)。言語刺激の系列再生課題では、刺激リストを構成する項目同士で音が似通っている場合や (音韻的類似性効果)、刺激リスト内の項目の発音所要時間が長いと (語長効果)、成績が低下することが知られている。記憶課題と同時に構音抑制を行わせると、刺激が視覚呈示された場合には音韻的類似性効果も語長効果も消失する。ところが、刺激が聴覚呈示された場合には、語長効果は消失するが音韻的類似性効果は影響を受けない (齊藤, 1997)。これらの結果から、音韻ループには、音韻ストアと構音コントロールという 2 つの下位過程が存在すると想

定されている。聴覚呈示された言語刺激は音韻ストアに入力され、構音コントロール過程でリハーサルにより維持される。音韻的類似性効果は音韻ストアに、語長効果は構音コントロール過程にそれぞれ起因し、構音抑制は構音コントロール過程のみを妨害すると考えると、聴覚課題で音韻的類似性効果が出現することを説明できる。また、刺激が視覚呈示されると、音韻ストアへの入力 が構音コントロール過程を介して行われるため、構音抑制の影響を受けて音韻的類似性効果も消失する。

このように、構音抑制は音韻ループにおける構音コントロールという限定的な心的過程を妨害すると想定されており、構音コントロール過程、あるいはそこで扱われる符号が、言語認知のプロセスでどのように機能するかを調べるのに有効な手法であると考えられる。ERPを測定する研究においても、構音抑制による影響を受けるか否かを、ERP成分を特定するための判断基準の一つとして用いることができるかもしれない。しかし、構音抑制では、何らかの音系列を実際に発声することが求められるので、脳波測定時に大きなノイズを生じてしまう。歌詞が自動的に頭に浮かんでくるような曲の演奏を聴いただけでも、記憶課題の成績が構音抑制と同程度に低下することを報告した研究(Pring & Walker, 1994)があることから、発声を伴わないリハーサルを構音抑制の代わりに利用できる可能性がある。そこで本研究は、ERPを従属変数として用いる研究において、無意味語を声に出さずに頭の中で繰り返す作業が、構音コントロール過程への干渉課題として利用できるかどうかを確かめることを目的とした。

無意味語リハーサルの影響を評価するためのERP成分として、探索陰性電位を取り上げる。Okita, Wijers, Mulder, & Mulder (1985)は、文字刺激を用いた記憶探索課題を遂行中の実験参加者からERPを記録した。記憶セットサイズを1, 2, 4と変化させ、非標的文字、すなわち記憶セットに含まれない文字に対するERPを比べると、刺激後300—700msの区間の波形は、記憶セットサイズが大きくなるほど陰性方向にシフトしており、その効果は中心部(Cz)で大きかった。この、記憶セットサイズに伴う陰性電位の増大は、聴覚刺激(母音)を用いた実験(Okita, 1989)や視覚単語を用いた実験(Mecklinger, Kramer, & Strayer, 1992)でも観察されており、短期記憶における記憶項目と入力刺激との継時的照合を反映すると考えられている(沖田, 1989b)。なお、探索陰性電位には、記憶セットサイズの変化によるものと、視覚探索課題における刺激セットサイズによって変化するものの2種類があり、頭皮上分布や反映する心的過程が異なる(宮谷, 1992, 2001)。本研究では、記憶セットサイズ効果に注目するので、以後、記憶探索陰性電位という用語を用いる。

ワーキングメモリ研究で用いられる二重課題法では、二次課題による干渉効果を示すだけでなく、その二次課題によっては干渉されない一次課題が存在することを示さなければならない。本研究の記憶探索課題では、このような選択的干渉効果を示すために、具体物を表す名詞を標的語とし、テスト刺激として聴覚単語と、具体物の絵や写真をランダムな順序で呈示する。聴覚単語が呈示された場合には音声的符号による比較照合が行われるのに対し、絵や写真のような視覚イメージが呈示された場合には、音声的符号に依存する程度が小さくなると考えられる。したがって、記憶探索陰性電位に及ぼす無意味語リハーサルの影響は、視覚イメージよりも聴覚単語で大きいと予想した。また、本研究では、聴覚単語と視覚イメージに加えて、名詞をカタカナで呈示する試行も設けた。記憶探索課題を単独で行う場合には、視覚単語では視覚イメージに比べて音声的符号が利用しやす

いので、聴覚単語に類似した過程が働くのに対し、無意味語リハーサルが課されると音声的符号によるリハーサルが妨害され、視覚イメージと同じように処理されると考えられる。2つの課題条件のERPを比較することにより、記憶項目と入力刺激との照合に用いられる符号の性質の違いが、記憶探索関連電位にどのように反映されるかを調べた。以上のように、本研究の目的は、音韻ループにおける構音コントロール過程への干渉課題であると想定される無意味語リハーサルが、聴覚単語、視覚単語、および視覚イメージのそれぞれに対して出現する記憶探索陰性電位に及ぼす影響の違いを調べることであった。

方法

実験参加者 視力(矯正視力を含む)および聴力の正常な大学生12名(男子4名,女子8名,年齢:20.4—22.1歳)が実験に参加した。右手利きが10名,左手利きが2名であった。

実験計画 独立変数は、(1)干渉課題の有無、(2)記憶セットサイズ(2,5)、(3)テスト刺激の種類(聴覚単語、視覚単語、視覚イメージ)の3つであった。すべて参加者内変数とした。

刺激と装置 3文字(音節)からなる普通名詞132個を刺激とした。聴覚単語刺激は、2名の女性がそれぞれ読み上げる単語を22 kHz、16ビットでパソコンに取り込んだものを使用した。刺激の長さは、333—728 msの範囲であった。視覚単語刺激は2種類のフォント(MSゴシック体とMS明朝体)で表示したカタカナであった。フォントの大きさは54ポイントとした。視覚イメージ刺激として、名詞が表す物の写真や絵を2種類用意した。画像の大きさは、縦240×横320ピクセルであった。市販の素材集やインターネット上のフリー画像を利用し、適宜編集したものを使用した。同じ名詞について、聴覚単語、視覚単語、視覚イメージそれぞれ2種類ずつ刺激を準備したのは、物理的に同一の刺激が繰り返し表示される回数を少なくするためである。

聴覚単語は、視覚刺激呈示用モニターの左右に設置したスピーカ(SS-GX3, SONY)から呈示した。音の大きさは、最大約70 dBであった。視覚刺激は実験参加者の前方90 cmに置いたパソコン用21インチXGAモニター(Flex Scan T961, Nanao)に呈示した。呈示時間は1000 msであった。

132個の刺激の中から、果物、食べ物、動物、小物体(タワシ、ユビワなど)、大物体(ピアノ、クルマなど)の5カテゴリーに含まれる名詞をそれぞれ6個選び、合計30個を標的語候補とした。残りの名詞は非標的語とし、標的語候補を非標的語として用いることはなかった。記憶セットサイズが5の条件(以下、M5条件)では、これら5つのカテゴリーから1語ずつ選び、標的語とした。記憶セットサイズが2の条件(以下、M2条件)では、果物、食べ物、動物のカテゴリーから1語、小物体、大物体のカテゴリーから1語を選んで標的語とした。各標的語候補は、実験を通じて1回だけ標的語となった。

課題 単独課題条件では、記憶探索課題のみを実施した。実験参加者は、刺激の種類に関わらずあらかじめ覚えた名詞あるいはそれを表す絵や写真(標的刺激)が呈示されたら、手元のスイッチを速やかに押した。非標的刺激に対しては、何も反応しなかった。二重課題条件では、6文字からなる無意味語(例:わはほくすお、ぬほむきわゆ)をあらかじめ実験参加者に呈示し、記憶探索課題遂行中も頭の中で繰り返して覚えておき、探索課題終了後に再生するよう求めた。

手続き 各実験系列の最初に、2 つまたは 5 つの標的語を実験参加者に呈示した。二重課題条件では、無意味語も同時に呈示した。標的語と無意味語の呈示には、それぞれを記入したカードを用いた。標的語のカードは、必要に応じて実験参加者が確認できるよう、刺激呈示用モニターの前に置いた。各実験系列は 60 試行 (3 刺激の種類×20 試行) で構成し、3 種類の刺激をランダムな順序で呈示した。2 種類準備した刺激のどちらを呈示するかはランダムとしたが、実験全体を通じてほぼ等確率となるようにした。標的刺激の確率は 20%、刺激の呈示時間間隔(SOA)は、聴覚刺激、視覚刺激ともに 5 000 ms とした。各試行では、刺激呈示前 1 000 ms から呈示後 1 800 ms の間、縦 248 ×横 328 ピクセルの枠を呈示し、その間は瞬きや眼球運動を抑制するよう実験参加者に教示した。干渉課題の有無と記憶セットサイズを組み合わせた 4 条件のそれぞれについて 5 系列(連続)ずつ、合計 20 系列を実施した。標的語は条件ごとに、無意味語は系列ごとに変えた。二重課題条件では、各系列終了後無意味語の再生を求め、間違えた場合には同じ条件の系列をもう一度繰り返した。不正解の系列で得られたデータは、分析から除いた。条件の実施順序はランダムに決定した。実験参加者の半数は右手で反応し、残りの半数は左手で反応した。

脳波の記録と分析 スズ電極キャップ (Electro-Cap International) を用いて、Fp1, Fp2, F3, F4, FC3, FC4, C3, C4, CP3, CP4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, FT7, FT8, T7, T8, TP7, TP8, P7, P8, Fpz, Fz, FCz, Cz, CPz, Pz, Oz の 31 部位から脳波を記録した。基準電極は鼻尖、接地電極は Fpz と Fz の中間に置いた。右眼窩外側-下側間で眼球電図(EOG)を記録した。電極間抵抗は、10 k Ω 以下とした。脳波と EOG は、生体電気用アンプ(BIOTOP 6R12, NEC メディカルシステムズ)を用いて、帯域通過周波数 0.016—30 Hz で増幅した。増幅した脳波と EOG は、デジタル記録器(DR-M3 MK2, TEAC)を用いて、サンプリング周波数 500 Hz で AD 変換して記録した。

刺激呈示前 100 ms から呈示後 1 000 ms 区間の脳波と EOG を分析した。刺激呈示前区間の平均電位をベースラインとし、誤反応試行および分析区間にいずれかのチャンネルで $\pm 100 \mu\text{V}$ (EOG では $\pm 30 \mu\text{V}$) 以上の振幅を記録した試行を除き、課題条件(単独, 二重)、記憶セットサイズ(2, 5)、刺激の種類(聴覚単語, 視覚単語, 視覚イメージ)、反応の種類(標的, 非標的)および記録部位別に加算平均して ERP を算出した。ERP の統計的な分析は、十分な加算回数(33 回以上)が得られた非標的波形のみを対象とした。記憶セットサイズ効果の評価のために、刺激条件別に、非標的的刺激に対する ERP の区間平均電位について課題×セットサイズ×記録部位の 3 要因反復測定計画分散分析を実施した。球形性仮定からの逸脱に基づくタイプ I エラーの確率増加を避けるため、必要に応じて Greenhouse と Geisser の ϵ で自由度を調整した。

結果

行動測定 各実験参加者の標的刺激に対する正反応時間の条件別平均値と誤答率(ミスとフォールス・アラーム)を集計し、12 名の平均値と標準偏差を Table 1 に示した。反応時間は、視覚単語や視覚イメージよりも聴覚単語に対して長く、課題や刺激の種類にかかわらず、M2 条件よりも M5 条件で長い。また、全体的に二重課題条件の反応時間が、単独課題条件よりも長くなっている。ミス率やフォールス・アラーム率に関しては、条件による一貫した差は読み取れない。

Table 1

記憶探索課題における平均正反応時間と誤答率

課題	刺激	記憶 セット サイズ	反応時間 (ms)		ミス (%)		フォールス・ アラーム (%)	
単独	聴覚単語	2	722.6	(92.3)	2.1	(3.3)	0.3	(0.6)
		5	816.1	(98.1)	2.1	(2.6)	0.1	(0.4)
	視覚単語	2	556.0	(87.0)	2.5	(3.4)	0.0	(0.0)
		5	624.8	(69.8)	2.5	(2.6)	0.4	(0.8)
	視覚イメージ	2	567.4	(84.0)	2.5	(3.4)	0.6	(0.7)
		5	653.6	(55.8)	2.5	(3.4)	1.5	(1.8)
二重	聴覚単語	2	779.8	(122.2)	1.3	(3.1)	0.1	(0.4)
		5	845.2	(94.6)	2.9	(4.0)	0.0	(0.0)
	視覚単語	2	608.1	(88.6)	2.1	(2.6)	0.1	(0.4)
		5	640.7	(85.8)	1.7	(2.5)	0.2	(0.5)
	視覚イメージ	2	604.4	(99.5)	2.5	(3.4)	0.6	(1.0)
		5	648.9	(85.3)	0.8	(2.0)	0.9	(0.9)

()内は標準偏差

反応時間について課題(単独, 二重)×記憶セットサイズ(2, 5)×刺激の種類(聴覚単語, 視覚単語, 視覚イメージ)の3要因反復測定分散分析を行ったところ, 課題の主効果($F(1, 11)=10.04, p<.01$), セットサイズの主効果($F(1, 11)=33.60, p<.001$), 刺激の主効果($F(2, 22)=123.67, \epsilon=.723, p<.001$), および課題×セットサイズの交互作用($F(1, 11)=8.74, p<.05$)が有意であった。セットサイズ×刺激の交互作用も有意に近かった($F(2, 22)=3.03, \epsilon=.975, p<.08$)。反応時間は, 単独課題条件よりも二重課題条件で長く, M2条件よりもM5条件で長かった。刺激の効果について Bonferroniの方法による多重比較(有意水準は5%に設定)を行った結果, 聴覚単語に対する反応時間は, 視覚刺激や視覚イメージに対する反応時間よりも有意に長かった。

課題×記憶セットサイズの交互作用について調べるために, 課題条件別に記憶セットサイズ×刺激の2要因反復測定分散分析を実施した。その結果, 単独課題条件($F(1, 11)=31.14, p<.01$)でも, 二重課題条件($F(1, 11)=21.68, p<.01$)でも, セットサイズが大きいほど有意に反応時間が長かった。セットサイズ別に課題の効果を調べたところ, M2条件では, 反応時間は単独課題条件よりも二重課題条件で有意に($F(1, 11)=22.67, p<.01$)長かった(単独: 615.4 ms, 二重: 664.1 ms)が, M5条件では, 課題の効果は有意でなかった(単独: 698.2 ms, 二重: 711.6 ms)。

記憶セットサイズ×刺激の交互作用について, まず刺激別に課題×記憶セットサイズの2要因反復測定分散分析を実施して調べた。その結果, 聴覚単語条件では課題の主効果($F(1, 11)=8.32, p<.05$)とセットサイズの主効果($F(1, 11)=34.93, p<.001$)が有意で, 交互作用は有意でなかった。視覚単語条件では, セットサイズの主効果($F(1, 11)=17.17, p<.01$)と課題の主効果($F(1, 11)=9.52, p<.05$)が有意で,

交互作用もほぼ有意($F(1, 11)=3.78, p<.08$)であった。視覚イメージ条件では、セットサイズの主効果($F(1, 11)=23.06, p<.01$)は有意で、交互作用もほぼ有意($F(1, 11)=4.74, p<.06$)であったが、課題の主効果は有意でなかった。セットサイズ別に刺激の効果を調べると、セットサイズにかかわらず(M2: $F(2, 22)=92.64, \epsilon=.702, p<.001$, M5: $F(2, 22)=114.21, \epsilon=.846, p<.001$)、聴覚単語に対する反応時間が、視覚刺激や視覚イメージに対する反応時間よりも有意に長かった。

ミス率およびフォールス・アラーム率を開平変換した値について、反応時間と同じ3要因反復測定分散分析を実施したところ、有意な主効果や交互作用はなかった。また、反応時間と誤答率の間に、トレード・オフはなかった。

ERP 実験参加者12名の総加算平均波形を条件別に求め、Figure 1とFigure 2に示した。Figure 1がPzで記録された標的刺激に対するERP、Figure 2がCzで記録された非標的の刺激に対するERPである。どちらの図も、課題と記憶セットサイズを組み合わせた4条件の波形を重ね書きしてある。標的の刺激に対するERP波形(Figure 1)を非標的の刺激に対するERP波形(Figure 2)と比べると、刺激呈示後400ms以降に頂点を示す陽性電位が大きく出現し、その傾向は特に視覚刺激において著しい。この陽性電位は、図には示していないがCPzからPzで最大となることや、標的の刺激に対して顕著に出現することから、P3b成分であると考えられる。単独課題におけるP3bは、刺激の種類に関わらず、記憶セットサイズが2から5に増加することによって頂点潜時が延長し、振幅が減少している。二重課題条件では、視覚イメージに対するERPを除いて、P3bにおける記憶セットサイズの効果が小さくなっている。なお、本研究では各条件の標的試行は20試行であり、実験参加者別の集計では十分な加算回数を確保できなかった(7—20回)、統計的な分析は行わなかった。

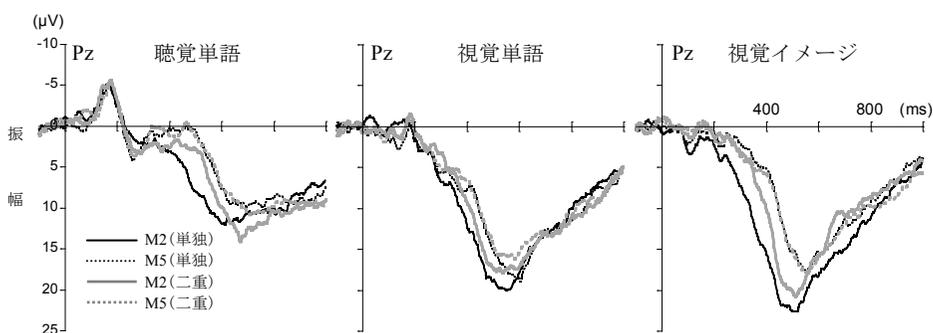


Figure 1. 標的の刺激に対するERP(記録部位はPz)の総加算平均波形

Figure 2を見ると、単独課題条件の聴覚単語ERPでは、刺激後300msあたりからM2条件波形とM5条件波形が分離し始め、M5波形がM2波形よりも陰性方向にシフトし、その条件差は700msあたりまで持続する。視覚単語に対するERPでも、刺激後約300msから記憶セットサイズによる波形の違いが出現している。ただし、聴覚単語に対するERPに比べて条件差は小さく、550ms付近でM2波形とM5波形が交差し、300—550ms区間ではM5波形がM2波形に比べて陰性であるのに対し、それ以降では逆に、M5波形がM2波形よりも陽性になっている。視覚イメージに対するERPでも、視覚単語条件と同様、刺激後300ms前後からM5波形がM2波形よりも陰性方向にシフトし

ている。ただし、潜時 550 ms 付近での M2 波形と M5 波形の交差は視覚イメージ条件では観察されず、セットサイズによる条件差は、800 ms 付近まで持続している。

二重課題条件の聴覚単語 ERP では、記憶セットサイズの効果が、単独課題条件に比べて小さくなっている。それに対して、視覚刺激に対する ERP では、視覚単語条件でも視覚イメージ条件でもセットサイズ効果の現れ方には、無意味語リハーサルの有無による違いはないようである。記憶セットサイズ効果をより明確に示すために、M5 条件の ERP から M2 条件の ERP を引き算し、得られた差波形を課題および刺激の種類に関する条件別に Figure 3 に示した。なお、差波形(記憶探索陰性電位)の頭皮上分布を調べると、刺激の種類にかかわらず、Cz で最大振幅を示し、頭皮上全体に広く出現していた。

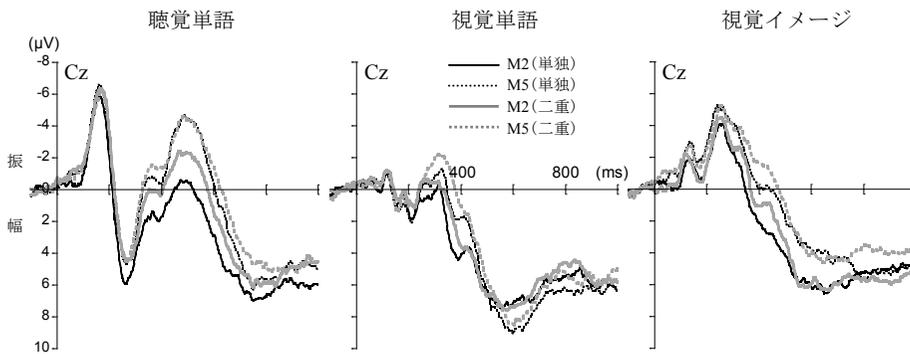


Figure 2. 非標的刺激に対する ERP (記録部位は Cz) の総加算平均波形

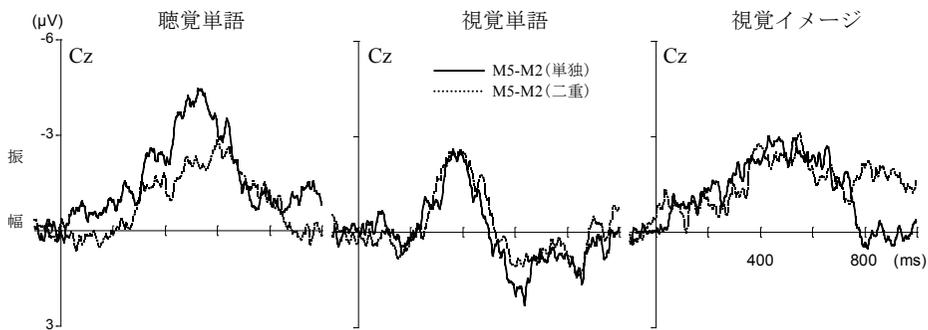


Figure 3. M5 条件 ERP から M2 条件 ERP を引き算した差波形

聴覚単語に対する ERP では、記憶探索陰性電位以外にも、記憶セットサイズの効果が出現した。Figure 4 に、F4 で記録された聴覚単語非標的 ERP と、P7 で記録された視覚刺激に対する非標的 ERP を示す。聴覚単語 ERP の刺激後 150 ms あたりに頂点を持つ陰性電位(N1)を見ると、単独課題条件では記憶セットサイズによる振幅の違いは全くないが、二重課題条件では、M5 条件の N1 が、M2 条件に比べて低振幅である。視覚刺激に対する N1 には、無意味語リハーサルの有無にかかわらず、記憶セットサイズによる振幅や潜時の違いはない。

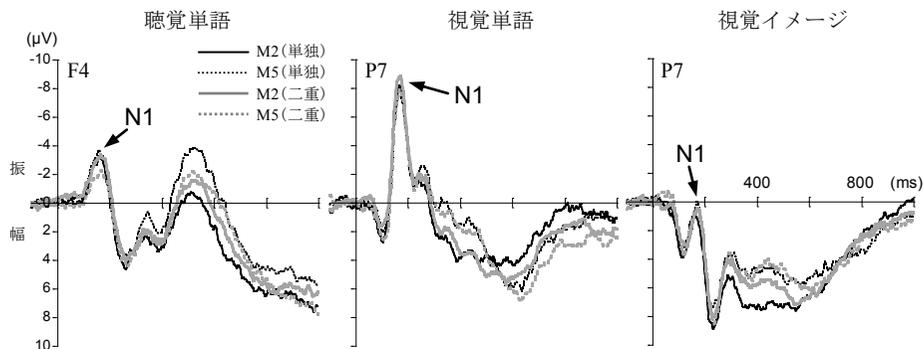


Figure 4. 聴覚非標的 ERP (記録部位は F4) と視覚非標的 ERP (記録部位は P7) の N1

波形上で観察された記憶セットサイズの効果が統計的にも支持されるかどうかを確認するために、以下の分析を行った。まず、聴覚単語に対する ERP について、430—530 ms 区間 (総加算平均波形および個人別加算平均波形の視察から、最も安定したセットサイズ効果が出現していると考えられる区間、以下の分析でも同様) の平均電位を計算し、課題×記憶セットサイズ×記録部位の 3 要因反復測定分散分析を実施した。その結果、セットサイズの主効果 ($F(1, 11)=20.52, p<.001$) と部位の主効果 ($F(30, 330)=3.67, \epsilon=.082, p<.05$)、および課題×セットサイズの交互作用 ($F(1, 11)=4.84, p<.05$) が有意であった。課題×セットサイズの交互作用が有意であったので、課題条件別にセットサイズの単純主効果について調べたところ、単独課題条件ではセットサイズの効果が有意で ($F(1, 11)=27.91, p<.001$)、M2 条件波形に比べて M5 条件波形の方がより陰性であったのに対し、二重課題条件では、セットサイズの効果は有意でなかった。

二重課題条件で観察された聴覚単語 ERP の N1 振幅に及ぼす記憶セットサイズの効果を調べるために、二重課題で得られた ERP の 114—174 ms 区間の平均電位について、記憶セットサイズ×記録部位の 2 要因反復測定分散分析を実施した。その結果、セットサイズの主効果が有意 ($F(1, 11)=5.00, p<.05$) であり、M5 条件の N1 に比べて M2 条件の N1 が高振幅であった。部位の主効果も有意 ($F(30, 330)=18.51, \epsilon=.101, p<.001$) であったが、交互作用は有意でなかった。

視覚単語に対する ERP について、刺激呈示後 360—520 ms 区間の平均電位を求め、課題×記憶セットサイズ×記録部位の 3 要因反復測定分散分析を実施した。その結果、セットサイズの主効果 ($F(1, 11)=4.81, p<.06$) がほぼ有意、部位の主効果 ($F(30, 330)=4.45, \epsilon=.106, p<.01$) が有意であった。さらに、750—850 ms 区間の平均電位について、同様の分析を行った結果、部位の主効果 ($F(30, 330)=10.79, \epsilon=.112, p<.001$) と、課題×部位の交互作用 ($F(30, 330)=3.22, \epsilon=.142, p<.05$) は有意であったが、記憶セットサイズに関しては、有意な主効果も交互作用もなかった。つまり、Figure 2 では、視覚単語に対する ERP は、刺激呈示後 550 ms 以降、M2 条件に比べて M5 条件の方が陽性であるように見えるが、これは統計的には支持されなかった。

視覚イメージに対する ERP について、386—486 ms 区間の平均電位を求め、同様の分散分析を実施した。記憶セットサイズの主効果 ($F(1, 11)=7.21, p<.05$) と部位の主効果 ($F(30, 330)=5.49, \epsilon=.068, p<.05$) が有意であったが、課題×セットサイズの交互作用は有意でなかった。

記憶探索陰性電位の頭皮上分布について検討するために、Figure 3 に示す差波形について区間平均電位を計算し(分析区間は上記の分析と同様であり、刺激の種類によって異なる)、刺激の種類別に、課題×記録部位の2要因反復測定分散分析を実施した。その結果、いずれの刺激条件でも部位の主効果は有意でなかった。

考察

本研究の目的は、記憶探索陰性電位の振る舞いを調べることにより、無意味語リハーサルを音韻ループの構音コントロール過程への干渉課題として利用できるかどうかを確かめることであった。行動測度を分析した結果、標的刺激に対する反応時間は単独課題条件よりも二重課題条件で長く、M2 条件よりも M5 条件で長かった。したがって、本研究における二重課題条件の設定と記憶セットサイズの操作は適切であったと考えられる。セットサイズにより課題の効果の現れ方が異なり、セットサイズが5の時には、無意味語リハーサルは反応時間に影響しなかった。Table 1を見ると、聴覚単語の M5 条件では、無意味語リハーサルの実行によって反応時間が 29 ms 延長しているのに対し、視覚単語条件では 16 ms しか延長せず、視覚イメージ条件では逆に単独課題条件において反応時間が長くなっている。視覚単語条件と視覚イメージ条件においては課題×セットサイズの交互作用が有意な傾向を示しており、これらの結果を総合すると、無意味語リハーサルが記憶探索課題に及ぼす影響は、聴覚刺激と視覚刺激とで異なったのではないかと考えられる。

無意味語リハーサルが記憶探索課題に及ぼす影響の違いは、ERP 測度においてさらに明確に現れている。聴覚単語に対する記憶探索陰性電位は、無意味語リハーサルの実行によって振幅が大きく減衰した。それに対して、視覚単語や視覚イメージに対する ERP は、無意味語リハーサルによる影響を全く受けなかった。この結果は、短期記憶内の比較照合に用いられる符号が、聴覚単語条件と視覚単語や視覚イメージ条件では異なり、無意味語リハーサルによる構音コントロール過程への妨害は、音声的符号による比較照合が行われた聴覚単語条件のみで、記憶探索陰性電位に影響したものと考えられる。このことから、無意味語リハーサルは、構音抑制と同様、構音コントロール過程への干渉課題として利用できることが確認できた。二重課題が ERP に及ぼす影響を調べた研究では、知覚的処理資源(Isreal, Chesney, Wickens, & Donchin, 1980)や心的資源(Kok, 1997)の配分の程度と P3b 成分の振幅との関連が中心に扱われてきた。本研究で試みたような、特定の心的過程に限定的に影響する実験操作に対応して変動する ERP 成分の同定が進めば、認知過程の測度として ERP の妥当性と有用性が一層高まると期待できる。

無意味語リハーサルは、聴覚単語に対する N1 にも影響を及ぼし、M5 条件における N1 振幅は M2 条件に比べて減衰していた。聴覚 N1 は、注意を向けた刺激に対して出現する処理陰性電位など複数の電位が重なることによって見かけ上の振幅が変動する(Näätänen & Picton, 1987)。二重課題の M5 条件では、無意味語リハーサルと記憶セットを組み合わせた負荷が最大になり、聴覚刺激に向けられる注意が減少して N1 の振幅減衰をもたらしたのかもしれない。無意味語リハーサルは、視覚刺激に対する N1 には全く影響していないことから、この結果は、処理資源がモダリティ特異的であるという主張(Wickens, 1984)を支持する。しかし、聴覚刺激に対する注意が視空間的弁別課題

の成績 (Spence & Driver, 1997) や空間的注意を反映する ERP 成分 (Eimer & Driver, 2001) に影響するという報告も多くあることから、本研究で観察された聴覚 N1 の振幅減衰を注意の配分の低下によって説明することが妥当かどうかについては、さらに検討する必要がある。

視覚刺激に対する ERP は、無意味語リハーサルの影響を受けなかった。視覚単語に対する ERP に、単独課題条件では音声的符号に基づく探索過程、二重課題条件では非音声的符号に基づく探索過程を反映する電位が出現すると期待したが、課題条件による記憶探索陰性電位の違いはなかった。この結果から、本研究のように聴覚刺激と視覚刺激がランダムに呈示される状況では、単独課題条件においても、視覚単語に対する記憶探索に音声的符号が利用されないことが示された。宮谷 (2001) は、文字刺激を用いた視覚探索課題で記録される ERP には、後頭部・後部側頭部優勢に出現し刺激セットサイズによって振幅が変化する陰性電位と、中心部優勢に出現し記憶セットサイズによって振幅が増減する陰性電位が重なって出現することを報告し、後頭部・後部側頭部の電位は視覚的符号に基づく比較照合過程を、中心部優勢な電位は音声的符号に依存した比較照合過程を反映すると考えている。本研究の視覚単語条件において音声的符号が用いられなかったとすると、視覚的符号による探索を反映する後頭部・後部側頭部優勢な探索陰性電位が出現すると考えられるが、記憶探索陰性電位は、刺激の種類にかかわらず中心部で最も大きく、頭皮上に広く分布していた。したがって、視覚単語や視覚イメージ条件で記録された記憶探索陰性電位には、短期記憶における継時的照合過程以外の心的過程が反映されている可能性がある。ただし、構音コントロール過程が、発話しようとする際に駆動する言語産出のシステムと関連している (齊藤, 2000) とすると、無意味語リハーサルが妨害するのは、音声的符号の利用そのものではなく、それを時系列的に構成する過程であるかもしれない。記憶探索陰性電位の変動に関与する可能性のある複数の心的過程の性質について検討することが、今後の課題である。

引用文献

- Baddeley, A. (1986). *Working memory*. Oxford: Oxford Press.
- Baddeley, A. D., Lewis, V. J., & Vallar, G. (1984). Exploring the articulatory loop. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **36A**, 233-252.
- D'Arcy, R. C. N., Service, E., Connolly, J. F., & Hawco, C. S. (2005). The influence of increased working memory load on semantic neural systems: A high-resolution event-related brain potential study. *Cognitive Brain Research*, **22**, 177-191.
- Eimer, M., & Driver, J. (2001). Crossmodal links in endogenous and exogenous spatial attention: Evidence from event-related brain potential studies. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, **25**, 497-511.
- Hillyard, S. A., & Kutas, M. (1983). Electrophysiology of cognitive processes. *Annual Review of Psychology*, **34**, 33-61.
- Isreal, J. B., Chesney, G. L., Wickens, C. D., & Donchin, E. (1980). P300 and tracking difficulty: Evidence for multiple resources in dual-task performance. *Psychophysiology*, **17**, 259-273.
- Kok, A. (1997). Event-related-potential (ERP) reflections of mental resources: A review and synthesis.

- Biological Psychology*, **45**, 19-56.
- Kutas, M., & Federmeier, K. D. (2000). Electrophysiology reveals semantic memory use in language comprehension. *Trends in Cognitive Sciences*, **4**, 463-470.
- Kutas, M., & Hillyard, S. (1980). Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity. *Science*, **207**, 203-205.
- Logie, R. H., Zucco, G. M., & Baddeley, A. D. (1990). Interference with visual short-term memory. *Acta Psychologica*, **75**, 55-74.
- Mecklinger, A., Kramer, A. F., & Strayer, D. L. (1992). Event related potentials and EEG components in a semantic memory search task. *Psychophysiology*, **29**, 104-119.
- 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.
- 宮谷真人 (1992). 視覚的探索課題で出現する2種類の探索陰性電位について 生理心理学と精神生理学, **10**, 23-33.
- 宮谷真人 (2001). 色選択と文字探索の複合課題中の事象関連電位に及ぼす視覚負荷と記憶負荷の効果 心理学研究, **72**, 307-314.
- Näätänen, R., & Picton, T. (1987). The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound: A review and an analysis of the component structure. *Psychophysiology*, **24**, 375-425.
- 沖田庸嵩 (1989a). 事象関連電位と認知情報処理—選択的注意を中心として— 心理学研究, **60**, 320-335.
- 沖田庸嵩 (1989b). 事象関連電位による認知過程の分析 臨床脳波, **31**, 503-508.
- Okita, T. (1989). Within-channel selection and event-related potentials during selective auditory attention. *Psychophysiology*, **26**, 127-139.
- Okita, T., Wijers, A. A., Mulder, G., & Mulder, L. J. M. (1985). Memory search and visual spatial attention: An event-related brain potential analysis. *Acta Psychologica*, **60**, 263-292.
- 荻阪満里子 (2002). 脳のメモ帳 ワーキングメモリ 新曜社
- Pring, L., & Walker, J. (1994). The effects of unvocalized music on short-term memory. *Current Psychology*, **13**, 165-171.
- 齊藤 智 (1997). 音韻ループ研究の展開—神経心理学的アプローチと実用的アプローチからの検討— 心理学評論, **40**, 188-202.
- 齋藤 智 (2000). 音韻ループと長期記憶とリズム 荻阪直行 (編) 脳とワーキングメモリ 京都大学出版会 pp. 277-297.
- Spence, C., & Driver, J. (1997). On measuring selective attention to an expected sensory modality. *Perception & Psychophysics*, **59**, 389-403.
- Wickens, C. D. (1984). Processing resources in attention. In R. Parasuraman & D. R. Davies (Eds.), *Varieties of attention*. Orlando, FL: Academic Press. pp. 63-102.