

左右視野別呈示の顔・漢字に対する記憶探索

— 事象関連脳電位を用いた研究 —^{*1}

沖田 庸嵩^{**2}

左右大脳半球におけるワーキングメモリの記憶照合操作を探るため、10名の実験参加者に刺激系列内で人の顔写真と漢字を無作為な順序で呈示し、短期記憶探索課題を遂行させながら事象関連脳電位(ERP)を記録した。記憶探索に関わる陰性電位変化は初期の視知覚に関わるN1成分の頂点後に後側頭部(T5・T6)優勢に始まり、その発達は顔(あるいは、漢字)呈示視野と反対側で同側に比べ約50ms先行した。顔刺激では探索負荷効果が刺激後400ms以降に観察された。両半球に発達した探索関連電位の収束過程には、顔・漢字とも呈示視野にかかわらず、有意な相違は見出せなかった。前頭部における陰性電位の発達は顔探索時に観察されたが、探索負荷効果はなく、刺激後400msには終了した。刺激呈示視野に対する大脳半球間で異なる後側頭部ERP応答は、ワーキングメモリ探索に要請される記憶表象が各大脳半球でそれぞれ保持され、操作が独立に関わることを示唆する。

1 序論

ワーキングメモリは視聴覚情報を貯蔵し、操作する短期記憶機構である(Baddeley, 1986)。Baddeley(1986)のモデルでは、中央実行系と2つの下部機構、音韻ループと視空間スケッチパッドを想定している。音韻ループと視空間スケッチパッドはいずれも情報を一時的に保持し、音韻ループは内的な言語の反復によるリハーサルを用いて情報を保持しておく貯蔵庫(バッファ)である。視空間スケッチパッドは音韻ループで保持できない非言語的な視覚イメージ情報を一時的に保持する。中央実行系はワーキングメモリの中核として位置づけられ、下部機構への情報の転送や長期記憶間との情報のやり取りを調整するとともに、注意の制御機構としての重要な役割を果たす。本研究ではワーキングメモリにおけるバッファ情報と入力情報との照合処理を取り上げ、左右大脳半球間での異なる照合過程を探る。

ヒトにおける神経機能画像を用いた近年の研究は、文字・数字といった単純な刺激以外に顔貌など日常的で複雑な刺激を用いて、しかもBaddeley(1986)のワーキングメモリモデルやサルの実験で多く用いられてきた遅延サンプルマッチング(delayed match-to-sample)課題と対応付けながら、脳の活動領域を検索している(藤井, 2000, 総説参照)。そうした研究の知見から、一般

※1 本研究の一部は平成15~17年度科学研究費補助金基盤(B)(課題番号15330158, 研究代表者 沖田庸嵩)および平成18年度愛知淑徳大学研究助成を受けて行われた。

※2 コミュニケーション心理学科

的な合意として、視覚ワーキングメモリは視覚皮質の後方領域と前前頭皮質の前方領域を含め脳内に分散して存在し、それらの協調した活動によって支えられていることがわかってきた (Ungerleider, Courtney, & Haxby, 1998)。Smith and Jonides (1997) はワーキングメモリのバッファのタイプによって異なる大脳半球間の側性化があると主張し、空間情報のバッファは右半球の上頭頂領域と前前頭領域が関与し、物体視のバッファは上頭頂領域、下側頭領域および前前頭領域がかかわると提唱した。さらに、皮質領域の特異性を強調する考えも提出されており、こうしたワーキングメモリの脳内機構が後頭-頭頂背側経路の“どこ”システムと後頭-側頭腹側経路の“なに”システムの視覚機構に類似しているとも指摘されている (Farah, Hammond, Levine, & Calvanio, 1988)。

視覚バッファの記憶表象は刺激視野と反対側の大脳半球に形成されることが、事象関連脳電位 (ERP) や事象関連光学信号 (EROS) を用いた研究で見出されている (Klaver, Talsma, Wijers, & Mulder, 1999; Gratton, 1998)。Klaver et al. (1999) は、サンプル-マッチング (すなわち、記憶探索) 課題でまず抽象的な多角図形を左右視野に同時呈示し、記憶するように標的図形 (記憶セット項目) として左右の両側あるいはいずれか一侧を手がかり刺激で指示した。1500ms の遅延後、テスト図形を左右いずれかの視野に1つ呈示して、標的との照合を要請した。このサンプル-マッチング課題の遂行時 ERP には、標的図形呈示からテスト図形呈示までの間に標的図形の呈示視野とは反対側の半球の後頭部に緩徐な陰性電位が発達し、反対側半球における刺激の符号化と保持を示した。それに対し、このテスト図形に対する ERP を分析した Talsma, Wijers, Klaver, and Mulder (2001) は、標的同定にかかわる N2 成分 (N2pc) を左半球の後頭領域に観察したことから、同定処理が左半球優位に実行されることを示唆した。

本研究では、試行ブロックの最初に標的刺激を呈示した後、テスト刺激を連続的に呈示して標的検出を次々と求めていく連続的な記憶探索課題 (Okita, Wijers, Mulder, & Mulder, 1985, 参照) を使用し、テスト刺激の呈示視野を独立変数として操作した。刺激には視覚符号に基づく記憶照合を求める顔写真と音韻符号の照合を要請する漢字を使用した。ここで扱う主な問題は、Talsma et al. (2001) が示唆するように、テスト刺激の呈示視野にかかわらず、標的の同定処理が左半球優位に実行されるのか、という点にある。

われわれの先の研究 (沖田・小西・今塩屋, 2002) で、顔と漢字を刺激として連続記憶探索課題遂行時の ERP を記録した。その結果、刺激の種類にかかわらず、凝視点位置の中央に呈示したテスト刺激に対し左右後側頭部 T5・T6 部位で N1 頂点後の 200ms あたりから記憶照合処理にかかわる緩徐な探索陰性電位 (search negativity) が観察された。その陰性電位は記憶サイズ増加に伴い増強し、Okita et al. (1985) の結果と一致した。前頭中心部では記憶サイズに関わりなく、照合対象の刺激に大きな陰性電位が発達した。こうしたワーキングメモリの照合処理に関わる ERP 変化パターンは、前頭中心部の陰性成分が前頭皮質の働きによるワーキングメモリの注意制御機能に関わり、後側頭部導出の陰性電位が記憶表象の検索とテスト刺激入力との照合処理に関わりと解釈された。これらの解釈は近年の神経機能画像の知見からも支持され、前頭中心領域における陰性電位の発達が情報維持、あるいはその維持を支える注意のトップ-ダウン制御を行っているという示唆 (Jiang, Haxby, Martin, Ungerleider, & Parasuraman, 2000)、さらに後側頭部の記憶サイズ

に鋭敏な陰性電位は紡錘状回（および、その近隣領域）が視覚的符号化情報の保持と照合処理を担っているという示唆 (Courtney, Ungerleider, Keil, & Haxby, 1996; 1997) とも一致した。

上記の研究において、連続記憶探索課題でテスト刺激を中央に呈示した場合、記憶照合に応じる陰性電位は左右の記録部位 (T5・T6) で明瞭な差異はなく、この知見は両側半球で記憶照合処理が実行されることを示している。すなわち、試行ブロックの最初に呈示された記憶セット項目 (標的刺激) の記憶表象は左右各半球に貯蔵され、その後、テスト刺激が中央に呈示されると、その情報は各半球で並列的に符号化され、それぞれの半球で標的刺激の記憶表象と照合されると推定できる。したがって、もしテスト刺激が左（あるいは右）視野に呈示されると、その情報を最初に受け取った右（左）半球では直ちに符号化が可能であり、脳梁の経由を必要とする左（右）側の半球よりも早く標的記憶表象との照合準備が出来上がることになる。各半球が独立して標的同定に必要な記憶照合を独立並列的に実行しうらば、テスト刺激視野と同側半球よりも反対側半球で早く記憶照合が始まるだろう。この半球間に生じる記憶照合開始時間の相違は記憶探索陰性電位の発達開始時間として観察できるだろう。こうした予測は標的同定が左半球に片側した過程と示唆する Talsma et al. (2001) の知見と異なる。

加えて、Courtney et al. (1996, 1997) の知見から示唆されるように、顔情報の脳内表象が活性化状態で一時的にワーキングメモリとして、主に右半球の下側頭皮質で保持されるとすれば、テスト刺激表象との照合処理も右半球に片側的な照合処理が生じると予測できる。さらに、顔知覚の初期段階をゲシュタルト的一括型 (holistic) 処理と部分依存的分析型 (analytic) 処理の観点から検討した研究では、その特異性として右半球紡錘状回が顔の一括型処理にかかわることを示唆する (McCarthy, Puce, Belger, & Allison, 1999)。沖田他 (2002) ではそうした効果は得られなかったが、本実験では再度検討する。また、顔ワーキングメモリと対比する漢字の読みにかかわる音韻情報の符号化と貯蔵が左半球の頭頂部と前頭部がかかわっているということから (Paulesu, Frith, & Frackowiak, 1993; Awh, Smith, & Jonides, 1995; Jonides, Schumacher, Smith, Koeppe, Awh, Reuter-Lorenz, Marshuetz, & Willis, 1998; Henson, Burgess, & Frith, 2000), 左半球における記憶照合の優位性が生じるかもしれない。

以上のように、本実験では、人の顔と漢字を刺激として記憶探索課題を実験参加者に遂行させながら脳電位を記録し、主に探索陰性電位の発達様相を測定として、標的同定処理にかかわる大脳半球間の相違を主に次の2点から検討することとした。(1) もし各半球が独立して標的同定に必要な記憶照合を並列的に実行しうらば、テスト刺激が一侧視野に呈示されると、その刺激視野と反対側半球は同側半球よりも早く記憶照合が始まるであろう。(2) 顔の視覚情報の符号化・貯蔵に右半球優位性があり、漢字の音韻情報で左半球優位性があるなら、照合処理にもそれぞれの半球優位性に応じた片側性が観察されるかもしれない。

2. 方法

2.1 実験参加者

男子大学生10名 (20-23歳)。矯正視力を含め、視力は正常であった。実験参加者には実験前にその内容を伝え、実験への参加について本人の同意を得た。

2.2 刺激

人のグレースケール顔写真（未知の男女各12人）と漢字（読みの異なる12種類）、および向きの異なるユリの花の写真（3種類）を用いた。これらの刺激は実験参加者の眼前約1mに設置した14インチ・モニタに呈示した。刺激の大きさはそれぞれ約6×8cmであった。図1に示すように、各刺激系列は標的となる記憶セット項目（顔、またはひらがな表記の漢字の読み）を2s間呈示した後、顔と花、漢字と花を組み合わせ（それぞれ、以後、顔フレーム・漢字フレーム）、それぞれ無作為に凝視点の左右約2cm離して配置し、異なる組み合わせを順次呈示した。これらのテスト刺激呈示回数は62回、そのうち最初の2回はダミー、残り60回のうち顔フレームと漢字フレームの非標的が各20回、標的が各10回であった。各刺激の呈示時間は200ms、SOA 1.1sであった。

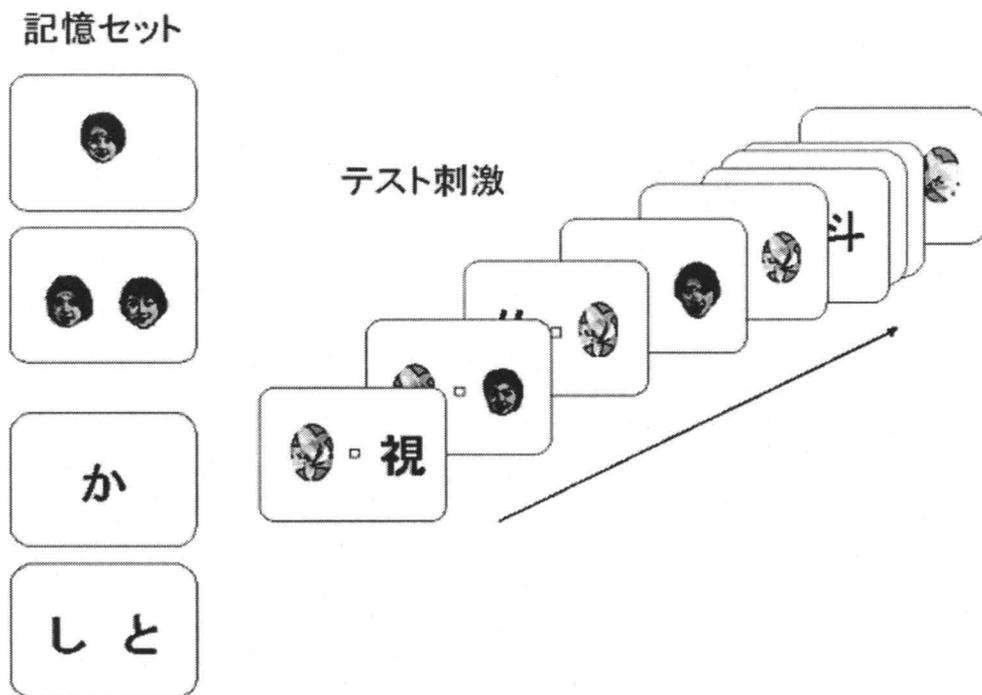


図1 刺激系列の模式図

2.3 条件と課題

記憶セット（標的）項目が顔と漢字の読み、記憶セットサイズが1項目（M1）と2項目（M2）で組み合わせ、 2×2 の4条件を設けた。

実験参加者の課題は刺激系列中の標的項目を検出しボタン押し反応を行うことであった。課題の練習後、各参加者は標的（顔・漢字）と記憶セットサイズ（M1・M2）で異なる条件を各2系列ずつ受けた。すなわち、顔課題では標的として1人または2人の顔を刺激系列中から検出させた。漢字課題では1つまたは2つの読みを標的として指定した。したがって、顔課題では刺激系列中に無作為な順序で呈示される顔フレームが課題関連刺激、漢字フレームは課題無関連刺激となり、漢

字課題では逆に漢字フレームが関連刺激、顔フレームは無関連刺激となった。

2.4 手続き

実験参加者は記録用電極の装着を受けた後、防音シールド室内に設置された椅子に座り、課題の練習を行った。各実験参加者は4条件の刺激系列を各2回ずつ、計8回をカウンターバランスした順序で実験を受けた。ただし、眼球運動が多く観察された場合には、その条件の施行を追加した結果、1名の実験参加者で1系列、もう1名で4系列を加えた。系列間には、約30–60sの休息を入れた。

2.5 脳波・眼球運動・ボタン押し反応の記録

鼻尖を基準電極として、Fz・Cz・Pz・Fp1・Fp2・F3・F4・F7・F8・C3・C4・T3・T4・P3・P4・T5・T6・O1・O2から脳波を記録した（帯域フィルタ：0.05–30Hz）。同時に左右の眼角外側15mmに電極を装着し、水平眼球電図（EOG）を記録した。脳波とEOG、およびボタン押し反応は、200HzでA/D変換後、コンピュータのディスクに記録した。

2.6 分析

反応時間は脳波とともに記録した刺激トリガーから標的刺激に対するボタン押しまでの経過時間として計測し、顔と漢字課題別に、記憶セットサイズ（M1・M2）、刺激視野（左・右）を変数とする2要因の反復測定分散分析を行った。ボタン押しの正答率についても同様に分析した。

ERPは50 μ V以上の顕著な眼球運動やその他のノイズのない試行を、各実験参加者で条件・刺激別に加算処理して求めた。ERPの分析期間は、刺激前200msから刺激後700ms、基線は刺激前200msの平均電位とした。加算回数は16–34回であった。ERPのN1成分は後側頭部（T5・T6）で刺激後150–210ms間の最大陰性電位として測定した。記憶探索要請時に発達した緩徐な陰性電位は刺激後200–400ms区間と400–700ms区間の平均電位として定量化した。加えて、探索陰性電位の発達開始時点に関する半球間差を分析するため、刺激後180–290ms間で10ms区間毎の平均電位をT5・T6部位で求めた。いずれのERP測定についても顔と漢字課題別に、課題関連性（関連・無関連）、記憶セットサイズ（M1・M2）、刺激呈示視野（左・右）、記録部位（たとえば、T5・T6）を変数とする4要因の反復測定分散分析を行った。

3 結果

3.1 行動測定

表1に顔と漢字課題の標的に対するヒット率と反応時間を記憶セットサイズと標的呈示視野別に示す。ヒット率は顔課題で記憶セットサイズの主効果が有意であったが（ $F(1, 9) = 31.61, p < .001$ ）、漢字課題では有意な効果がみられなかった。

反応時間は顔・漢字課題とも記憶セットサイズの主効果が有意で（顔： $F(1, 9) = 9.57, p < .05$ ；漢字： $F(1, 9) = 12.46, p < .01$ ）、記憶セットサイズの増加にともなう検出時間の延長を示した。

表1 顔・漢字課題の標的に対するヒット率と反応時間

Task	Face				Kanji			
	1		2		1		2	
Memory-set size	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right
Hit (%)	85	91	63	62	96	88	82	86
Response time (ms)	577	566	654	611	584	577	650	621

3.2 顔フレームERP

図2は非標的顔フレームに惹起された10名の実験参加者間総平均ERP波形を示す。T5・T6部位の波形をみると、課題にかかわらず潜時190msあたりに陰性波(N1)が惹起され、顔刺激視野

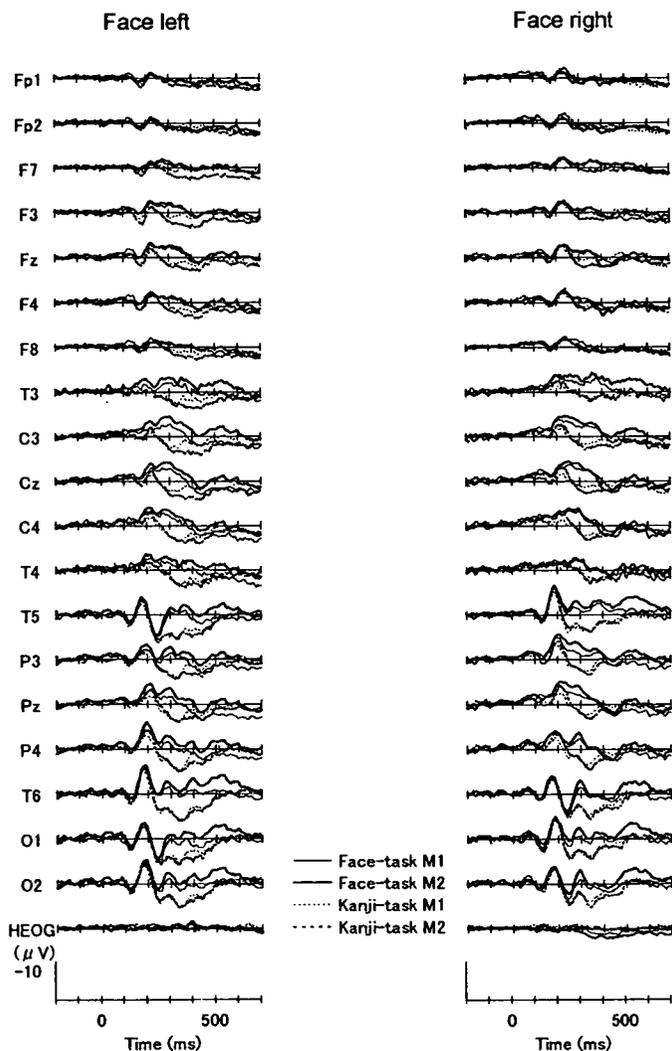


図2 非標的顔フレームに惹起された20部位の実験参加者間平均ERPおよび水平EOG波形。顔刺激の呈示視野が左(左欄)と右(右欄)に分け、顔課題遂行時の記憶サイズ1(M1, 細実線)と2(M2, 太実線)、漢字課題遂行時の記憶サイズ1(M1, 細点線)と2(M2, 太点線)の波形を重畳して示す。

と反対側の記録部位で振幅は増強している。そのN1頂点あたりから、記憶探索が要請された顔課題で記憶セットサイズに応じた緩徐な陰性電位が発達し、記憶サイズの増加にともなう陰性電位の増強と持続時間の延長がみられる。他方、顔刺激が記憶探索の対象とならなかった漢字課題遂行時には、記憶サイズに関わらず、陰性電位シフトはみられない。こうした効果は後側頭部に優勢に生じ、中心領域で観察される課題関連効果もT5・T6部位ほど明瞭ではない。

T5・T6優勢に惹起された緩徐な陰性電位（以後、探索陰性電位）の特性を見やすくするために、顔課題遂行時ERPから漢字課題遂行時ERPを減じて実験参加者間総平均引算波形を求めた。図3で明らかなように、顔探索陰性電位は、顔呈示視野と同側の記録部位に比べ、反対側の記録部位で50msほど早く発達し始めている。さらに、電位シフトにおける顔呈示視野の影響は、T5に比べT6で大きいようにみえる。

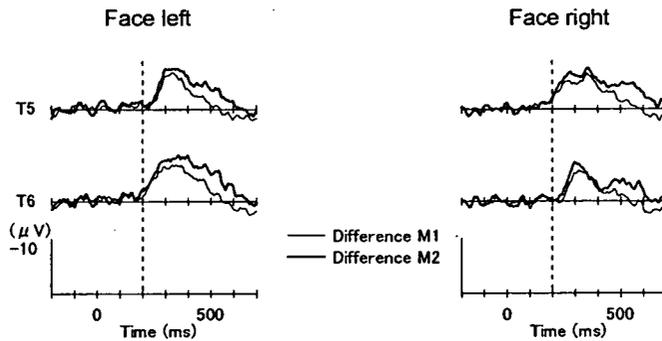


図3 非標的顔フレームに惹起されたT5・T6部位の顔課題遂行時ERPから漢字課題遂行時ERPを減じて得られた実験参加者間平均引算波形。顔刺激の呈示視野が左（左欄）と右（右欄）に分け、記憶サイズ1（M1、細線）と2（M2、太線）の波形を重畳して示す。縦破線は刺激後200ms時点を示す。

こうした視察による効果は統計的分析によって確証された。T5・T6におけるN1振幅には有意な課題関連性の主効果（ $F(1, 9) = 9.35, p < .02$ ）があり、課題関連（顔課題）時にはN1振幅（ $-7.0 \mu V$ ）が無関連（漢字課題）時（ $-6.2 \mu V$ ）に比べて大きいことを示した。加えて、顔呈示視野×記録部位の交互作用（ $F(1, 9) = 46.98, p < .001$ ）があり、続く単純主効果の検定は左視野顔呈示に対してT5（ $-4.7 \mu V$ ）よりT6（ $-8.3 \mu V$ ）でN1が大きき（ $F(1, 18) = 29.1, p < .001$ ）、右視野顔呈示にはT5（ $-8.0 \mu V$ ）がT6（ $-5.8 \mu V$ ）よりも大きいことを示した（ $F(1, 18) = 16.6, p < .001$ ）。

探索陰性電位の初期部分に関して、T5・T6部位で刺激後200–400ms区間平均電位を求めて分析した結果、課題関連性と顔呈示視野の主効果（それぞれ、 $F(1, 9) = 135.38, p < .001$ ； $F(1, 9) = 5.77, p < .05$ ）、顔呈示視野×記録部位および課題関連性×顔呈示視野×記録部位の交互作用が見出された（それぞれ、 $F(1, 9) = 60.18, p < .001$ ； $F(1, 9) = 18.49, p < .005$ ）。単純・単純主効果をみると、刺激視野×記録部位にかかわらず、課題関連性の効果が有意で（ $F(1, 36)$ 値の範囲：30.24–82.86、いずれも $p < .001$ ）、いずれの視野・部位にも探索陰性電位の発達を認めた。しかし、その発達様相が左右の記録部位で異なり、単純交互作用を調べると、T6では反対側の左視野呈示（ $-5.5 \mu V$ ）で同側の右視野呈示（ $-3.4 \mu V$ ）よりも探索陰性電位が大きいことを反映して、課題

関連性×顔呈示視野の交互作用がみられたが ($F(1, 18) = 7.71, p < .05$), T5ではそうした交互作用が見出せなかった ($F(1, 18) = 1.14, p > .1$) (T5と反対側の右視野呈示: $-5.2 \mu V$; 同側の左視野呈示: $-4.3 \mu V$)。また、この潜時帯では記憶セットサイズにかかわる効果は認められなかった。

T5・T6部位の刺激後400–700ms区間平均電位では、記憶セットサイズ増加に伴う探索陰性電位の増大と延長を反映して、課題関連性×記憶セットサイズの交互作用が認められた ($F(1, 9) = 19.03, p < .005$)。単純主効果を調べると、記憶サイズ2 (M2) においてのみ課題関連性効果が有意で ($F(1, 18) = 11.42, p < .005$), 探索陰性電位 ($-2.9 \mu V$) の持続を示したが、M1 ($-0.5 \mu V$) では認められなかった ($F(1, 18) < 1$)。加えて、刺激呈示視野×記録部位の交互作用があり ($F(1, 9) = 14.05, p < .005$), T5における視野効果を示し (左視野: $1.0 \mu V$; 右視野: $-0.5 \mu V$), T6には左右視野差はなかった (左視野: $0.1 \mu V$; 右視野: $0.5 \mu V$)。

顔呈示視野と反対側記録部位で探索陰性電位の発達開始が早まる点を検証するため、刺激後180–290ms間で10ms区間毎の平均電位をT5・T6部位で求めて検討したところ、課題関連性×刺激呈示視野×記録部位の交互作用が200ms以降に見出された ($F(1, 9)$ 値の範囲: 7.73–32.31, いずれも $p < .05$)。表2に示す単純・単純主効果検定の結果は、左右の呈示視野にかかわらず、刺激後200msから反対側記録部位で探索陰性電位の発達を認めたが、同側記録部位では50–60msの発達の遅延を示した。なお、本研究においては2区間連続して有意な効果が得られた時点をもって発達開始と定めた (Talsma et al., 2001, 参照)。

表2 顔フレーム惹起ERPにおいて異なる潜時帯で得られた各刺激視野・記録部位の課題関連性 (単純・単純主効果) の $F(1, 36)$ 値

Latency ranges (ms)	Left visual field		Right visual field	
	T 5	T 6	T 5	T 6
200–210	1.88	6.13*	13.90****	< 1
210–220	1.21	10.39***	24.43****	< 1
220–230	< 1	13.93****	27.05****	< 1
230–240	1.87	23.69****	34.89****	< 1
240–250	2.06	24.46****	31.94****	< 1
250–260	4.61*	29.55****	38.29****	3.33
260–270	5.83*	27.24****	34.03****	6.98*
270–280	20.24****	51.29****	49.84****	19.51****
280–290	29.99****	56.13****	44.97****	29.35****

* $p < .05$ ** $p < .01$ *** $p < .005$ **** $p < .001$

次に、探索陰性電位の終了時点における発達開始遅延の影響を検討するため、T5・T6部位で刺激後500–700ms間の10ms区間平均電位を求めて分析したところ、課題関連性×刺激呈示視野×記録部位の交互作用が540–570ms間でみられた ($F(1, 9)$ 値の範囲: 6.40–9.17, いずれも $p < .05$)。しかし、単純・単純主効果検定の結果では、540–550ms区間では刺激呈示視野と反対側記録部位における課題関連性効果 (右視野T5: $F(1, 36) = 6.02$, 左視野T6: $F(1, 36) = 6.91$, いずれも $p < .05$), 550–570ms区間では左視野刺激に対するT6部位における課題関連性効果がそれ

ぞれ見出され (550-560ms : $F(1, 36) = 9.45$, 560-570ms : $F(1, 36) = 4.71$, いずれも $p < .05$), 発達開始の遅れがその終了に影響していないことを示した。

正中線上3部位 (Fz・Cz・Pz) の刺激後200-400ms区間平均電位では, 探索陰性電位がいずれの部位でも発達したが (Fz: $-2.5 \mu V$, Cz: $-4.1 \mu V$, Pz: $-3.7 \mu V$), 前頭部に比べ中心・頭頂部で大きいのを反映して, 課題関連性の主効果 ($F(1, 9) = 38.69$, $p < .001$) とともに課題関連性×記録部位が有意であった ($F(2, 18) = 14.45$, $p < .005$)。さらに, 有意な刺激視野の主効果 ($F(1, 9) = 5.16$, $p < .05$) とともに刺激視野×記録部位の交互作用 ($F(1, 9) = 6.61$, $p < .01$) があり, 単純主効果検定で刺激視野効果がCzとPzで認められた (それぞれ, $F(1, 27) = 4.85$, $p < .05$; $F(1, 27) = 11.21$, $p < .005$)。また, 記憶セットサイズ×記録部位の交互作用もみられた ($F(1, 9)$)

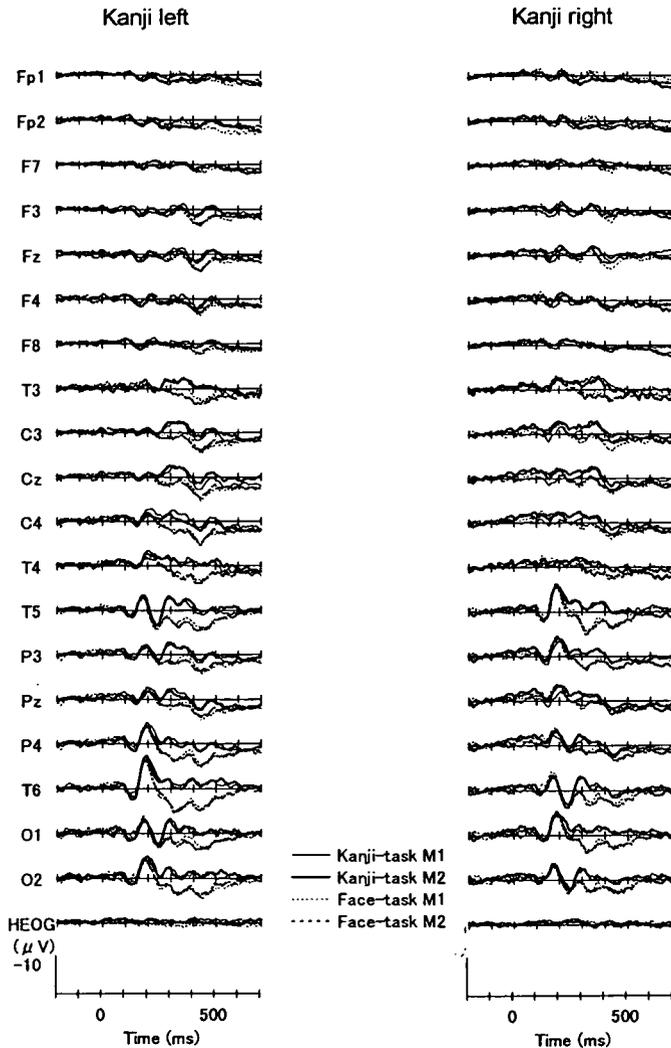


図4 漢字フレームに惹起された20部位の実験参加者間平均ERPおよび水平EOG波形。顔刺激の呈示視野が左(左欄)と右(右欄)に分け, 漢字課題遂行時の記憶サイズ1(M1, 細実線)と2(M2, 太実線), 顔課題遂行時の記憶サイズ1(M1, 細点線)と2(M2, 太点線)の波形を重畳して示す。

= 10.03, $p < .005$ 。

正中線上3部位の400–700 ms区間平均電位では、課題関連性×記憶セットサイズの交互作用がみられたものの ($F(1, 9) = 5.66, p < .05$)、探索陰性電位がすでに減衰したのを反映して、単純主効果検定では有意な効果は認められなかった。他に、記憶セットサイズ×記録部位の交互作用がみられた ($F(1, 9) = 4.12, p < .05$)。

3.3 漢字フレームERP

図4・5にみられるように、顔フレームERPと同様、非標的漢字フレームに惹起されたERPもN1頂点あたりから後側頭部(T5・T6)最大に探索陰性電位が発達した。同様に、発達開始が漢字呈示視野と同側の記録部位より反対側の記録部位で早まっている。しかし、探索陰性電位における記憶セットサイズは不明瞭である。また、正中部、特にFzでは探索陰性電位の発達がほとんど観察されない。

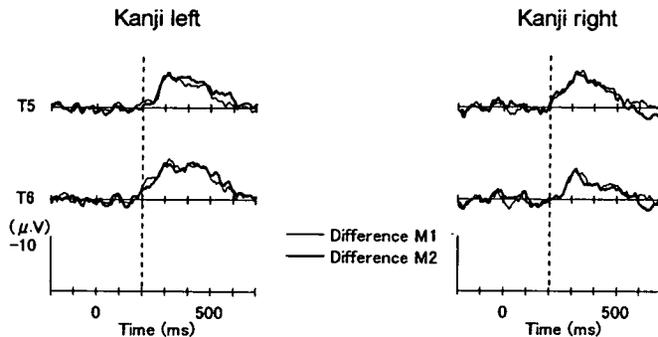


図5 非標的漢フレームに惹起されたT5・T6部位の漢字課題遂行時ERPから課題遂行時ERPを減じて得られた実験参加者間平均引算波形。顔刺激の呈示視野が左(左欄)と右(右欄)に分け、記憶サイズ1(M1, 細線)と2(M2, 太線)の波形を重畳して示す。縦破線は刺激後200ms時点を示す。

T5・T6におけるN1振幅は、顔フレーム同様、漢字呈示視野×記録部位の交互作用 ($F(1, 9) = 94.50, p < .001$)があり、単純主効果の検定は左視野漢字呈示ではT5 ($-4.8 \mu V$)よりT6 ($-9.4 \mu V$)でN1が大きく ($F(1, 18) = 13.52, p < .005$)、右視野呈示ではT5 ($-8.1 \mu V$)がT6 ($-5.4 \mu V$)よりも大きいことを示した ($F(1, 18) = 4.90, p < .05$)。

刺激後200–400ms区間平均電位の分析では、課題関連性の主効果 ($F(1, 9) = 54.11, p < .001$)、顔呈示視野×記録部位および課題関連性×顔呈示視野×記録部位の交互作用が見出された(それぞれ、 $F(1, 9) = 52.03, p < .001$; $F(1, 9) = 11.47, p < .01$)。単純・単純主効果をみると、この効果も顔フレームERPと同様、刺激視野・記録部位にかかわらず、課題関連性の効果が有意で ($F(1, 36)$ 値の範囲: 12.80–47.45, いずれも $p < .005$)、いずれの視野・部位にも探索陰性電位の発達を認めたと、その発達様相が左右の記録部位で異なっていた。単純交互作用検定で、T6では反対側の左視野呈示 ($-5.0 \mu V$)で同側の右視野呈示 ($-2.6 \mu V$)よりも探索陰性電位が大きいことを反映して、課題関連性×顔呈示視野の交互作用がみられたが ($F(1, 18) = 6.72, p < .05$)、T5ではそうした交互作用が見出せなかった ($F(1, 18) < 1$) (T5と反対側の右視野呈示: $-4.1 \mu V$;

同側の左視野呈示: $-3.8 \mu V$)。

刺激後400–700ms区間平均電位では、顔フレームERPとは異なり、記憶セットサイズにかかわる効果は見出せず、探索陰性電位の持続を反映する課題関連性の主効果が有意であった ($F(1, 9) = 6.76, p < .05$)。また、顔フレームERPと同様、刺激呈示視野×記録部位の交互作用があったが ($F(1, 9) = 15.13, p < .005$)、単純主効果検定では有意な効果を見出せなかった。

T5・T6部位における刺激後180–290ms間の10ms区間平均電位による分析では、顔フレームと同様、課題関連性×刺激呈示視野×記録部位の交互作用が200ms以降に見出された ($F(1, 9)$ 値の範囲: 5.72–27.38, いずれも $p < .05$)。表3に示す単純・単純主効果検定の結果は、漢字の左視野呈示が刺激後200msから反対側記録部位で探索陰性電位の発達を認めたのに対し、右視野では刺激後210msとさらに10ms遅れた。呈示視野と同側記録部位での遅れは左右視野呈示とも60msであった。さらに、顔フレーム同様、T5・T6部位で刺激後500–700ms間の10ms区間平均電位を求めて、探索陰性電位の終了時点への発達開始遅延の影響を検討したが、課題関連性×刺激呈示視野×記録部位の交互作用はこの間で見出されなかった。

表3 漢字フレーム惹起ERPにおいて異なる潜時帯で得られた各刺激視野・記録部位の課題関連性 (単純・単純主効果) の $F(1, 36)$ 値

Latency ranges (ms)	Left visual field		Right visual field	
	T5	T6	T5	T6
200–210	1.48	11.23***	1.01	<1
210–220	1.81	13.18****	4.30*	<1
220–230	2.67	21.45****	8.95***	<1
230–240	3.04	28.15****	16.73****	1.04
240–250	2.09	34.50****	15.92****	<1
250–260	3.53	32.60****	17.95****	<1
260–270	8.16**	32.60****	18.30****	1.90
270–280	19.56****	36.99****	17.75****	6.95*
280–290	34.22****	47.08****	24.50****	16.04****

* $p < .05$ ** $p < .01$ *** $p < .005$ **** $p < .001$

正中線上3部位 (Fz・Cz・Pz) の刺激後200–400ms区間平均電位では、課題関連性の主効果 ($F(1, 9) = 7.12, p < .05$) とともに課題関連性×記録部位が有意であった ($F(2, 18) = 5.04, p < .05$)。単純主効果検定は探索陰性電位がCz ($-2.3 \mu V$) とPz ($-1.7 \mu V$) にのみ有意に発達したことを示した (それぞれ, $F(1, 27) = 12.10, p < .005$, $F(1, 27) = 6.97, p < .05$)。続く400–700ms区間平均電位では、部位の主効果のみが得られた ($F(2, 18) = 8.06, p < .005$)。

4 考察

本研究ではワーキングメモリにおける探索 (バッファ情報と入力情報との照合) 処理を取り上げ、その処理にかかわる大脳半球間の独立性と優位性を探った。ここでは、探索陰性電位が最も大きく発達し、課題関連刺激の呈示視野と記録部位間で明瞭な交互作用が得られた後側頭部 (T5・T6) の知見を中心に考察する。

4.1 探索陰性電位における記憶セットサイズ効果

本研究で観察された顔フレームERPにおいて、沖田他（2002）の知見に一致して、記憶セットサイズ増加に伴う陰性電位の増大と延長が後側頭部（T5・T6）最大に認められたが、その効果は特に前頭・中心正中部では見出せなかった。こうした結果は視覚ワーキングメモリが視覚皮質の後方領域と前前頭皮質の前方領域を含めて脳内に分散して存在するという近年の合意（Ungerleider et al., 1998）に沿うものであり、沖田他（2002）が示唆したように、前頭中心領域における陰性電位の発達は前頭皮質が中央実行系の注意制御に関わり、後側頭部の記憶サイズに鋭敏な陰性電位は紡錘状回（および、その近隣領域）が視覚的符号化情報の保持と探索処理を反映するという示唆（沖田他，2002）と一致する。近年の神経画像研究はワーキングメモリの処理に応じて背外側前部前頭皮質が賦活することを見出し（Petrides, Alivisatos, Evans, & Meyer, 1993, Petrides, Alivisatos, Meyer, & Evans, 1993）、ワーキングメモリの中央実行系にかかわる機能を担う脳領域と推定されている（D'Esposito, Detre, Alsop, Shin, Atlas, & Grossman, 1995）。さらに、Druzgal and D'Esposito（2001）はn-back顔課題を用いた機能的磁気共鳴画像（fMRI）研究で、ワーキングメモリ負荷が前前頭領域のみならず顔応答紡錘状回に作用し、顔応答紡錘状回が単に顔知覚にかかわるのではなく、ワーキングメモリにおける顔情報の保持と操作にかかわると示唆している。

また、顔フレームERPの刺激後400–700ms区間平均電位では課題関連性×記録部位、あるいは課題関連性×記憶セットサイズ×記録部位の交互作用はなく、課題関連刺激の呈示視野にかかわらず、同等の探索陰性電位が発達したことを示した。この知見は、序論で仮定したように、両側半球の視覚パッファに記憶セット項目（標的）情報が貯蔵され、両側半球でそのパッファ情報と課題関連入力情報との照合（標的同定）処理が実行されたことを示唆する。

漢字フレームに対しても後側頭部最大に緩徐な陰性電位が発達したが、顔フレームとは異なり、記憶セットサイズ効果が認められなかった。沖田他（2002）は漢字を用いて、記憶セットサイズの効果を見出した。彼らの実験では標的を特定の漢字に設定しており、本実験のように音韻化を要請しなかった。先行研究（たとえば、宮谷，2000；Okita et al., 1987）は記憶セットサイズに鋭敏に応答する探索陰性電位をCz優勢に認め、本結果の後側頭部と異なる。宮谷（2000）が示唆するように、単純なアルファベット文字の探索は音韻符号で実行され、その音韻ループの活動を中心部探索電位が反映するとすれば、本実験においても同様にCz優勢に記憶サイズに鋭敏な探索陰性電位が観察されるはずであるが、ここで観察されたのは電位分布においても記憶セットサイズへの応答性においても異なっていた。漢字課題の反応時間は顔課題と同様に記憶セットサイズに応じて延長しており、記憶探索負荷はあったように見える。この漢字課題における後側頭部最大に発達した探索陰性電位に記憶セットサイズ効果が見出せなかった点については今後の検討が必要である。

4.2 探索陰性電位の発達開始時間

記憶セットサイズに鋭敏な探索陰性電位は、予測どおり、顔・漢字にかかわらず、課題関連テスト刺激の呈示視野によって発達開始時間が明瞭な影響を受けた。テスト刺激呈示視野と反対側の後側頭部では、呈示視野と同側に比べN1振幅は増大し（Wijers, Mulder, Gunter, & Smid, 1996, 参

照), その頂点付近(刺激後200–210ms)から探索陰性電位が発達した。顔・漢字呈示視野と反対側に対し, 同側の後側頭部では探索陰性電位は顔課題では50ms, 漢字課題では60ms遅延して発達した。この遅延は脳梁を介して課題関連情報を受け取ったことによるものと解釈できる。テスト刺激呈示視野と反対側の半球は課題遂行に必要な情報を視覚求心経路から直接受け取り, その処理を始めることができる。他方, 呈示視野と同側の半球では必要な情報を反対側の半球から脳梁を介して入手しなければならない。

しかし, この半球間の情報転送時間のみで, テスト刺激呈示視野と同側半球における探索陰性電位の発達開始時間の50–60msの遅れを説明しにくい。ヒトの視覚系における脳梁転送時間を調べた従来の研究は10–25ms程度と報告している(Brown, Larson, & Jeeves, 1994)。たとえば, Terasaki and Okazaki (2002)は半側視野呈示の顔刺激に誘発されたN170m(本研究のN170に相当)の頂点潜時を左右半球で比べ, 脳梁間伝導時間を18msと見積もっている。この遅れにおける30ms以上の隔たりの解釈は難しいが, 脳梁を介して課題関連情報を受け取る半球では, ワーキングメモリのバッファ情報と入力情報の照合処理を始めるにあたって必要な処理にも時間を要するのかもしれない。

4.3 探索陰性電位からみた大脳半球間の片側性

顔・漢字にかかわらず, T6では反対側の左視野呈示で同側の右視野呈示よりも探索陰性電位が大きく発達したのに対し, T5ではそうした交互作用が見出せなかった。この知見から推定すると, 左半球における標的同一処理は刺激視野にかかわりなく実行されるが, 右半球では左視野から直接受け取る課題関連情報に対するほど, 脳梁を介して受け取る右視野情報の標的同一処理に従事しないようである。Talsma et al. (2001)は課題関連刺激の呈示視野にかかわらず標的同一処理が左半球優位に実行されることを示唆したが, 本研究は異なる結果となった。Smith and Jonides (1997)は課題要請によって半球間優位性の程度が変わると考えている。記憶セット(標的)とテスト刺激を試行毎に呈示する離散的な手続き(Talsma et al., 2001)と異なり, 試行ブロックの最初に記憶セット項目を呈示した後, テスト刺激を連続的に与えて, 記憶探索(標的同一)を要請した。こうした違いによって, 本実験では課題関連処理に優れた左半球は刺激視野にかかわらず標的同一に従事するが, 右半球は左半球に比べると標的同一処理に劣るため, 左半球から脳梁を介して受け取る右視野情報については左半球の処理に依存するのかもしれない。

別の片側性が漢字刺激に対する探索陰性電位の発達開始時間でみられた。漢字呈示が右視野の場合, 左視野に比べて, 視野と反対側半球(T5)でも同側半球(T6)でも10ms遅くなった。この解釈も難しいが, 序論で触れたように, 音韻情報の符号化と貯蔵が左半球で行われることを踏まえると, 1つの可能性が浮かぶ。漢字という日本人にとって極めて日常的な文字が右視野に呈示されると, それを直接受容する左半球では顔課題遂行時にも自動的に漢字課題と同様の音韻化・貯蔵といった処理が実行されたため, 探索陰性電位の発達として表現された課題関連性(漢字課題と顔課題の対比)効果が遅れたと理解できる。

本研究を始めるにあたって, 顔課題の右半球優位性と漢字課題の左半球優位性をワーキングメモリの照合処理に考えたが, 探索陰性電位にはそうした片側性は見出されなかった。むしろ上記のよ

うに、顔・漢字にかかわらず、照合処理の左半球への片側性がみられた。顔課題で右半球優位性が得られなかったのは先の沖田他（2002）と同じである。Rossin, Dricot, Devolder, Bodart, Crommelinck, de Gelder, and Zoontjes（2000）によれば、同じ人間の顔であっても、注目の仕方によって紡錘状回の優勢な活性化が左右半球間で入れ替わり、顔の特定部位に注目すると左半球優位、顔全体に注目すると一括型処理機構をもつ右半球優位になる。本実験の顔探索という課題が左右間の優位性に影響し、予測したような探索陰性電位における効果が得られなかったのかもしれない。

4.4 探索陰性電位からみた大脳各半球における処理の独立性

先にも考察したように、課題関連刺激の呈示視野と反対側の後側頭部では同側に比べて探索陰性電位の発達が50-60ms早く、それぞれの半球が標的訂定に必要な準備が整い次第、半球相互に独立して処理を始めたと推測できる。他方、探索陰性電位の終了はそうした発達開始の相違に影響を受けて遅れるようなことはなく、むしろ、顔探索時には左視野刺激に対する右後側頭部（T6）で30ms延長することが認められた。こうした結果は左右半球とも顔視覚イメージや音韻情報を貯蔵し、入力情報と照合する機能を独立してもっており、同時並列的に照合処理が可能なことを示唆する。さらに、こうした各半球の処理の進行状況はワーキングメモリの中央実行系によって監視され、一方の半球が照合結果を出す而他方の処理は打ち切られるといった制御を受けているように推察できる。しかし、両半球が課題遂行に必要な同じ内容の処理を実行しているのか、更なる今後の検討が要請される。

引用文献

- Awh, E., Smith, E. E., & Jonides, J. 1995. Human rehearsal processes and the frontal lobes: PET evidence. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 769, 97-117.
- Baddeley, A. D. 1986. *Working memory*. Oxford: Oxford University Press.
- Bentin, S., Allison, T., Puce, A., Perez, E., & McCarthy, G. 1996. Electrophysiological studies of face perception in humans. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8, 551-565.
- Brown, W. S., Larson, F. B., & Jeeves, M. A. 1994. Directional asymmetries in interhemispheric transmission time: evidence from visual evoked potentials. *Neuropsychologia*, 32, 439-48.
- Courtney, S. M., Ungerleider, L., G., Keil K., & Haxby, J., V. 1996. Object and spatial visual working memory activate separate neural systems in human cortex. *Cerebral Cortex*, 6, 39-49.
- Courtney, S. M., Ungerleider, L., G., Keil K., & Haxby, J., V. 1997. Transient and sustained activity in a distributed neural system for human working memory. *Nature*, 386, 608-611.
- D'Esposito, M., Detre, J. A., Alsop, D. C., Shin, R. K., Atlas, S., & Grossman, M. 1995. The neural basis of the central executive system of working memory. *Nature*, 378, 279-281.
- Druzgal, T. J. & D'Esposito, M. 2001. Activity in fusiform face area modulated as a function of working memory load. *Brain Research Cognitive Brain Research*, 10, 355-364.
- Farah, M. J., Hammond, K. M., Levine, D. N., & Calvanio, R. 1988. Visual and spatial mental imagery: dissociable systems of representation. *Cognitive Psychology*, 20, 436-462.
- 藤井俊勝 2000. ワーキングメモリの神経基盤 菅阪直行（編）脳とワーキングメモリ 京都大学学術出版会 93-113.

- Gratton, G. 1998. The contralateral organization of visual memory: a theoretical concept and a research tool. *Psychophysiology*, 35, 638-647.
- Henson, R. N. A., Burgess, N., & Frith, C. D. 2000. Recoding, storage, rehearsal and grouping in verbal short-term memory: an fMRI study. *Neuropsychologia*, 38, 426-440.
- Jiang, Y., Haxby, J. V., Martin, A., Ungerleider, L. G., & Parasuraman, R. 2000. Complementary neural mechanisms for tracking items in human working memory. *Science*, 287, 643-646.
- Jonides, J., Schumacher, E. H., Smith, E. E., Koeppe, R. A., Awh, E., Reuter-Lorenz, P. A., Marshuetz, C., & Willis, C. R. 1998. The role of parietal cortex in verbal working memory. *The Journal of Neuroscience*, 18, 5026-5034.
- Klaver, P., Talsma, D., Wijers, A. A., Heinze, H. J., & Mulder, G. 1999. An event-related brain potential correlate of visual short-term memory. *Neuroreport*, 10, 2001-2005.
- McCarthy, G., Puce, A., Belger, A., & Allison, T. 1999. Electrophysiological studies of human face perception. II: Response properties of face-specific potentials generated in occipitotemporal cortex. *Cerebral Cortex*, 9, 431-444.
- 宮谷真人 2000. 視覚探索時の事象関連電位とワーキングメモリ 菅坂直行 (編) 脳とワーキングメモリ 京都: 京都大学学術出版会 139-154.
- 沖田庸嵩・小西賢三・今塩屋隼男 2002. 顔・物品・漢字の選択的記憶探索時における事象関連電位 社会情報, 11, 1-13.
- 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.
- Paulesu, E., Frith, C. D., & Frackowiak, R. S. J. 1993. The neural correlates of the verbal component of working memory. *Nature*, 362, 342-345.
- Petrides, M., Alivisatos, B., Evans, A. C., & Meyer, E. 1993. Dissociation of human mid-dorsolateral from posterior dorsolateral frontal cortex in memory processing. *Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America*. 90, 873-877.
- Petrides, M., Alivisatos, B., Meyer, E., & Evans, A. C. 1993. Functional activation of the human frontal cortex during the performance of verbal working memory tasks. *Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America*. 90, 878-82.
- Rossin, B., Dricot, L., Devolder, A., Bodart, J. M., Crommelinck, M., de Gelder, B., & Zoontjes, R. 2000. Hemispheric asymmetries for whole-based and part-based face processing in the human fusiform gyrus. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 793-802.
- Schendan, N. E., Ganis, G., & Kutas, M. 1998. Neurophysiological evidence for visual perceptual categorization of words and faces within 150 ms. *Psychophysiology*, 35, 240-251.
- Smith, E. E. & Jonides, J. 1997. Working memory: a view from neuroimaging. *Cognitive Psychology*, 33, 5-42.
- Talsma, D., Wijers, A. A., Klaver, P., & Mulder, G. 2001. Working memory processes show different degree of lateralization: evidence from event-related potentials. *Psychophysiology*, 38, 425-439.
- Terasaki, O. & Okazaki, M. 2002. Transcallosal conduction time measured by visual hemifield stimulation with face images. *Neuroreport*, 13, 97-99.
- Ungerleider, L.G., Courtney, S. M., & Haxby, J. V. 1998. A neural system for human visual working memory. *Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America*, 95, 883-890.
- Wijers, A. A., Mulder, G., Gunter, T. C., & Smid, H. G. O. M. 1996. Brain potential analysis of selective attention. In O. Neumann & A. F. Sanders (Eds.), *Handbook of perception and action* (Vol.3, pp. 333-387), London: Academic Press