

文字の心的回転にともなう事象関連脳電位の変化

宮谷 真人・永野真紀子¹

(2002年9月30日受理)

Event-related brain potentials in a mental rotation task with different probabilities
of normal and mirror-image letter stimuli

Makoto Miyatani and Makiko Nagano

The aim of this experiment was to evaluate a scalp distribution of processing-related negativity that was thought as an electrophysiological correlate of the mental rotation process. Event-related brain potentials (ERPs) were recorded from 16 subjects who performed a mental rotation task (to decide whether the letter presented in one of nine different orientations was in normal or mirror-reversed format). The probability of normal stimuli was manipulated between conditions to reduce the effects of P3b that was simultaneously superimposed on the rotation-related negativity. The results showed that the increase of mental rotation demand caused negative shifts of the ERPs between 400 and 800 ms latency range. Although the probability of the normal stimuli did not change the amplitudes of P3b, some differences of topography were observed between the rotation-related negativity and the P3b.

Key words: Mental rotation, Event-related brain potentials, Processing-related negativity, P3b
キーワード：心的回転，事象関連脳電位，処理関連陰性電位，P3b

視覚的イメージとは、“刺激の対象が存在しないにもかかわらず生じる擬似視覚的な経験”（酒井，1995）であり，場合によっては，外的刺激による感覚・知覚体験と同様の，あるいはそれ以上に鮮明な内的経験を生じさせる。視覚的イメージ体験時の脳活動と視覚刺激呈示時の脳活動が類似していることが報告されている（Roland & Friberg, 1985; Kosslyn, 1994; 酒井, 1995）。認知心理学的研究でも，イメージに対する変換操作が，外的事物に対して行われる知覚的・運動的操作と類似したものであることが示されている（Kosslyn, 1994; 宮崎, 1983）。例えば，われわれは，本当の絵に対して行うのと同じように，イメージに対してあちこち視線を動かすことができる（イメージ走査）し，外界の事物を観察するときのように，イメージを近づけてみたり，遠ざけてみたりする（イメージ・スケーリング）ことができる（Kosslyn, 1994）。

イメージ研究において，イメージ走査やイメージ・スケーリングと並んでよく検討されている内的イメージ操作の一つに，Shepard & Metzler (1971) が検討した心的回転がある。彼らは，2つの三次元図形を異なる角度で同時に呈示し，それらが同じ物体か，鏡映像の関係にある物体かを判断させた。その結果，判断に要する時間は，2つの図形の角度差が大きくなるにつれて直線的に延長した。これは，被験者が判断を行う際に，一方の図形をもう一つの図形と重なるまで回転させるという方略を採ったことによるものであると考えられる。被験者の内省報告も，その推測を裏付けるものであった。その後の研究で，回転角度の増加にともなう反応時間の増加は，二次元図形や，数字，文字などを刺激として用いた場合にも見られることが報告されている（Cooper, 1975; Corballis & Manalo, 1993; Desrocher, Smith, & Taylor, 1995）。

心的回転を支える過程について，Desrocher et al. (1995) は時系列に沿った3つの段階を提案している。

¹経営管理センター

第1の段階は、検索あるいは評価の段階で、形全体を符号化し、2つの刺激の一致する部分を同定する段階である。第2の段階では、2つの刺激の向きが一致するまで、一方の刺激全体 (Bryden, George, & Inch, 1990) または刺激の一部 (Just & Carpenter, 1985) を回転させる。第3段階において、変換が正しく行われたかどうかと、2つの刺激の異同に関する判断が行われる。反応時間と刺激の回転角度との間の直線の関係をもたらすのは、この第2の段階である。

ERP (event-related brain potentials, 事象関連脳電位) を指標とした心的回転の研究が、すでにいくつも行われている。Peronnet & Farah (1989) は、文字を刺激とする心的回転課題でERPを記録し、回転操作が必要な刺激に対するERP波形には、刺激呈示後およそ350-800msの区間で、頭頂部から後頭部にかけて陰性方向へのシフトが観察されること、および刺激の回転角度が大きくなるほどこの陰性シフトの程度も大きいことを見出した。Ruchkin, Johnson, Canoune, & Ritter (1991) や Stuss, Sarazin, Leech, & Picton (1983), Wijers, Otten, Feenstra, Mulder, & Mulder (1989) も、心的回転に関連する頭頂・後頭部優勢な陰性電位を報告している。これらの電位の分布は、視覚探索課題において刺激セットの大きさにつれて増大する陰性電位 (宮谷, 2000) や、イメージ・スケーリングが要求される課題で記録された電位変化 (Rösler, Heil, Bajric, Pauls, & Hennighausen, 1995) と類似している。これらの課題で記録された陰性電位の性質を比較し、その異同を明らかにしていくことは、それぞれの電位変化が反映する心的過程を同定し、またそれらの心的過程がそれぞれの課題でどのように機能しているのかを推測するための手がかりとなるであろう。

複数のERP成分の異同を判断する手がかりの一つは、その頭皮上分布である。本実験は、心的回転課題において、刺激の回転角度にもなって変化する陰性電位の頭皮上分布を、詳しく分析する目的で行った。頭皮上分布を検討する際に障害となるのが、特定の潜時帯のERP波形には、多くの場合、複数のERP成分が重なって出現していることである。心的回転に関連する陰性電位の場合も、その前後に出現する陽性電位、特にP3bの影響を受けていると考えられる。そこで、本研究では、P3bの振幅がなるべく小さくなるような工夫をした。P3b振幅は、刺激の呈示確率の影響を受け、出現確率が小さくなるほど高振幅となる (Donchin, 1981; Duncan-Johnson & Donchin, 1977)。本実験では、刺激としてカタカナを用いて、それが正しい向きの文字 (正立文字) であるか鏡映文字であるかの判断を行わせた。その際、正立文字の呈示確率を

大きくすることにより正立文字が誘発するERPにおけるP3b振幅を減衰させ、文字の回転角度にともなう陰性電位の変化が観察しやすくなるように試みた。

方法

被験者 視力 (矯正視力を含む) の正常な大学生および大学院生16名 (男性8名, 女性8名, 19-30歳) を被験者とした。そのうち1名は左手ききであった。

刺激と装置 パソコン用21インチCRT (Flex Scan T961, ナナオ) に、かな文字18種類 (カタカナ10種類, ひらがな8種類) およびその鏡映文字を呈示した。そのうち、ひらがな (お, す, ぬ, ふ, め, よ, ら, わ) は練習試行用とし、本試行ではカタカナ (ア, オ, ク, ケ, セ, テ, ヌ, ネ, ワ, ヲ) を使用した。刺激の回転角度は、直立方向から時計回りに、0, 40, 80, 120, 160, 200, 240, 280, 320度の9条件とした。文字刺激は、灰色の背景に黒色で呈示した。各文字は太字のMSゴシック体フォントをもとに、画面上の大きさが最大縦5.5cm×横5.5cm (観察距離80cm, 視角で約3.9度) となるように作成した。実験で用いた刺激の例を、図1に示した。

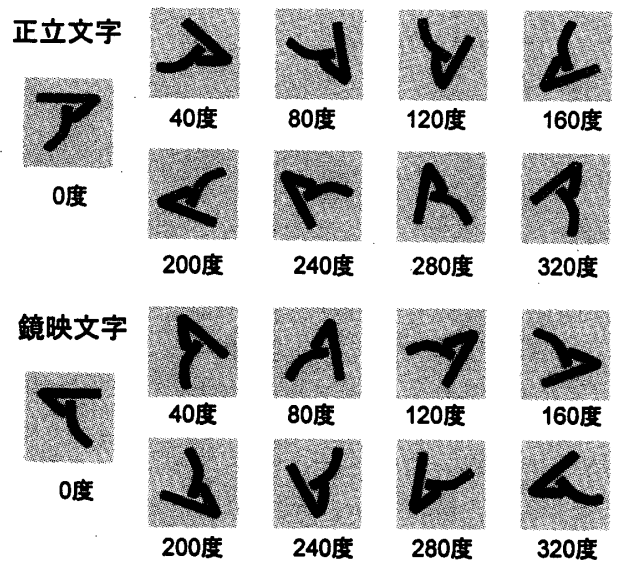


図1. 実験で用いた刺激の例

実験計画 独立変数は、①正立文字の呈示確率 (50, 80%), ②文字の種類 (正立, 鏡映), および③文字の角度 (0, 40, 80, 120, 160, 200, 240, 280, 320度) の3つであった。すべて被験者内変数とした。

課題 被験者は、呈示されたカタカナが正立文字か鏡映文字かを判断した。被験者の半数は、正立文字に対し右手, 鏡映文字に対して左手のスイッチを押して反応した。残りの被験者では、刺激と反応手の関係を

逆にした。刺激呈示後、スイッチが押されるまでの時間を1ms単位で測定した。誤反応に対しては、その直後に1000Hzの純音を100ms呈示して、被験者に知らせた。また刺激後2000msまで反応がない試行は、誤反応とした。

手続き 各試行は、画面中央に144×144ピクセルの枠を呈示することで始まった。被験者には、この枠の中央を凝視するように教示した。枠の呈示後1000ms後に、刺激文字を呈示した。呈示時間は100msとした。凝視用の枠は、刺激呈示開始の1000ms後に消した。被験者の反応の2000ms後に、次の試行を開始した。

ひらかなの刺激を用いて40試行の練習を行った後、カタカナ刺激を用いて本試行を実施した。50試行を1実験系列とし、正立文字50%条件を16系列、80%条件を10系列、合計1300試行を行った。50%条件の実験系列では、各角度条件につき正立条件、鏡映条件それぞれ40試行（0度条件のみ80試行）を実施した。正立文字80%条件の実験系列では、各角度条件につき正立条件40試行（0度条件のみ80試行）、鏡映条件10試行（0度条件のみ20試行）を実施した。どのカタカナについても、実験全体では同回数呈示した。被験者の半数は50%条件を先に、80%条件を後に行った。残りの被験者では、その順序を逆にした。各実験系列の間には1分程度の休憩を、呈示確率50%条件と80%条件の間には、5分程度の休憩を入れた。

脳波の記録と分析 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, O1, O2, F7, F8, T3, T4, T5, T6, FC3, FC4, CP3, CP4, FT7, FT8, TP7, TP8, 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。右眼窩外側一下側間で眼球電図を記録した。電極間抵抗は、10kΩ以下とした。脳波と眼球電図は、生体電気用アンプ (BIOTOP 6R12, NECメディカルシステムズ製) を用いて、帯域通過周波数.016-30Hzで増幅した。増幅した脳波と眼球電図を、デジタル記録器 (DR-M3MK2, TEAC 社製) を用いて、サンプリング周波数500HzでAD変換した後、光磁気ディスクに記録した。

ERPデータは、40度と320度、80度と280度、120度と240度、160度と200度の各条件をそれぞれ込みにして分析した。刺激呈示前100msから1100ms区間を分析の対象とした。刺激呈示前100ms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中にいずれかのチャンネルで±100μV以上の振幅を記録した試行を除き、呈示確率(50%, 80%), 文字の種類(正立, 鏡映), 文字の傾き(0, 40, 80, 120,

160度)を組み合わせた20条件別に加算平均した。なお、正立文字の呈示確率が80%の時の鏡映文字条件では、十分な加算回数を得られなかったため、分析の対象としなかった。

ERPの統計的な分析に反復測定計画分散分析を使用した場合、分散・共分散の非等質性に基づくタイプIエラーの確率増加 (Vasey & Thayer, 1987) 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 各条件の反応時間の中央値を被験者別に求め、それを平均した値を図2に示す。また、図3には誤答率を示した。反応時間は、判断で要求される回転の向きが時計回りか逆回りかに関わらず、文字の傾きが大きくなるにしたがって長くなった。また、鏡映文字に対する反応時間が、正立文字に対するよりも長かった。正立文字に対する反応時間は50%条件よりも80%条件で短かったが、鏡映文字に対する反応時間は、呈示確率の影響を受けなかった。

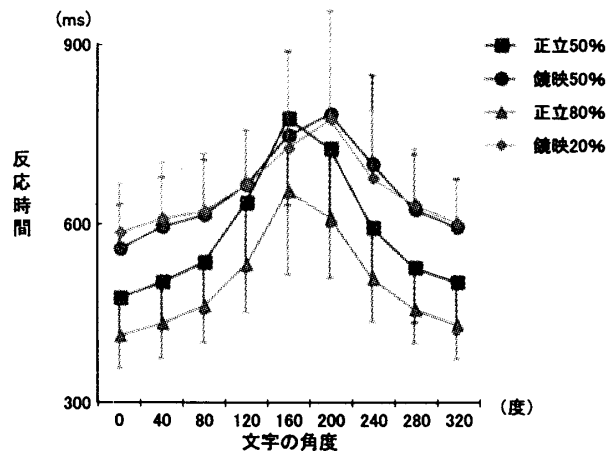


図2. 文字の回転角度にともなう反応時間の変化
垂直線分は標準偏差を表す

呈示確率(2)×文字の種類(2)×文字の角度(9)の分散分析を実施したところ、呈示確率の主効果 ($F(1, 15)=15.59, p<.01$), 文字の種類の主効果 ($F(1, 15)=103.20, p<.001$), 文字の角度の主効果 ($F(8, 120)=67.58, p<.001$) が有意であった。また、呈示確率×文字の種類の交互作用 ($F(1, 15)=76.68, p<.001$), 呈示確率×文字の角度の交互作用 ($F(1, 15)=3.72, p<.001$), および文字の種類×文字の角度の交互作用 ($F(8, 120)=10.31, p<.001$) が有意であった。

誤反応も、文字の傾きが大きいほど多くなった。80%条件の鏡映文字に対する誤答率が最も大きく、最も誤

反応の少ないのが80%正立文字条件であった。また、反時計回りに傾いた文字に対する誤反応が、時計回りに傾いた文字に対する誤反応よりも多かった。各被験者の誤答率を開平変換した値について、反応時間と同様の分散分析を実施したところ、呈示確率の主効果 ($F(1, 15)=4.84, p<.05$)、文字の種類の主効果 ($F(1, 15)=14.15, p<.01$)、文字の角度の主効果 ($F(8, 120)=19.95, p<.001$)、および呈示確率×文字の種類
の交互作用 ($F(1, 15)=26.67, p<.001$) が有意であった。

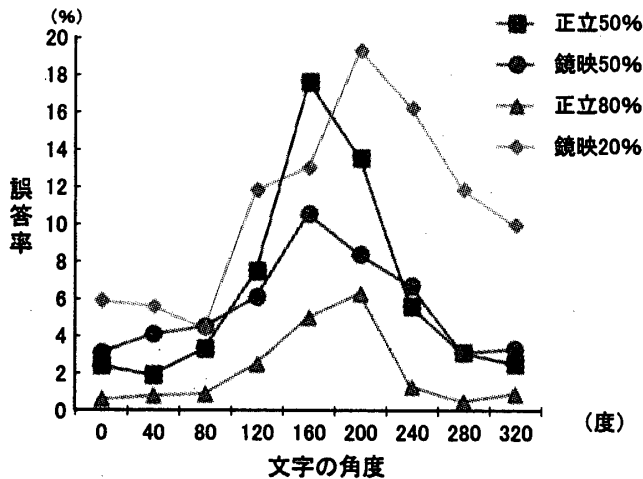


図3. 文字の回転角度による誤答率の変化

ERP 被験者16名の ERP 総加算平均波形を条件別に求めた。図4に、呈示確率50%条件の正立文字に対する波形を示す(呈示確率80%条件の正立文字に対する波形、呈示確率50%条件の鏡映文字に対する波形は省略する)。文字の傾きに関する5条件の波形を重ね書きしてある。3条件すべてにおいて、刺激呈示後約400msあたりから文字の傾きによる波形の違いが現れ、傾きが大きいほど波形は陰性方向にシフトしていた。

波形で観察された文字の傾き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、2つの呈示確率条件の正立文字に対するERPについて、傾きの効果が大きく現れ、かつ図4の0度条件波形で見られる陽性方向の電位変化(P3b)の頂点を含む区間である刺激後400-600ms間の平均電位を刺激条件別に計算して、呈示確率(2)×文字の傾き(5)×部位(3)の分散分析を行った。その結果、文字の傾きの主効果 ($F(4, 60)=31.16, \epsilon = .763, p<.001$)、部位の主効果 ($F(30, 450)=31.16, \epsilon = .104, p<.001$)、呈示確率×文字の傾きの交互作用 ($F(4, 60)=3.41, \epsilon = .771, p<.05$)、文字の傾き×部位の交互作用 ($F(120, 1800)=31.16, \epsilon = .137, p<.001$) が有意であった。呈示確率の主効果は、有意でなかった。呈示確率×文字の傾きの交互作用が有意であったので、呈示確率別に文字の傾きの効果

を調べたところ、50%条件 ($F(4, 60)=23.06, p<.001$)、80%条件 ($F(4, 60)=19.68, p<.001$) とともに、文字の傾きの効果は有意であった。文字の傾きが80度、120度、160度のときには、呈示確率による振幅差はないが、0度条件、40度条件では、呈示確率80%条件のERPが、50%条件のERPよりも陽性であった。文字の傾き×部位の交互作用が有意であったので、部位別に文字の傾きの効果を調べたところ、すべての部位で文字の傾きの効果が有意であった(F値等の記述は省略する)。文字の傾きの効果は、CPz, Pzを中心に、頭頂部、中心部、後頭部、側頭部の広い範囲で大きく現れたが、前頭極では、他の部位に比べて文字の傾きの効果が小さかった。

文字の傾きがERPに及ぼす影響をさらに詳しく検討するために、40, 80, 120, 160度の各傾き条件のERPから0度条件のERPを引き算して差分波形を求めた。呈示確率50%条件の正立文字に対する波形を、図5に示した。刺激呈示後約300msあたりから文字の傾きによる差分波形の違いが現れており、傾きが大きいほど波形は陰性方向にシフトし、その頂点の潜時が延長している。正立文字に対する波形に基づく差分波形に比べ、鏡映文字の場合には、ERP波形における条件差の出現や終息が100ms程度遅れていた。

差分波形の振幅が最大になる潜時は、原波形におけるP3bの頂点潜時よりも全体的にやや短い。そこで、差分波形における300-500ms区間の平均電位を計算し、呈示確率(2)×文字の傾き(4)×部位(3)の分散分析を行った。その結果、文字の傾きの主効果 ($F(3, 45)=24.39, \epsilon = .770, p<.001$)、部位の主効果 ($F(30, 450)=15.51, \epsilon = .126, p<.001$)、文字の傾き×部位の交互作用 ($F(90, 1350)=9.03, \epsilon = .052, p<.001$) が有意であった。原波形の400-600ms区間では有意であった呈示確率×文字の傾きの交互作用は、差分波形の300-500ms区間では有意でなかった。文字の傾き×部位の交互作用について調べると、効果の頭皮上分布は、原波形の400-600ms区間における効果と類似していた。

トポグラフィの分析 差分波形に反映される文字の傾き効果の頭皮上分布と原波形のP3b成分の頭皮上分布を比較するために、0度条件の原波形の最大陽性電位時点、および160度-0度条件差分波形の最大陰性電位時点の振幅値に基づいて、電位トポグラフィを作成し、図6に示した。左側がP3b、右側が差分波形のトポグラフィを表す。それぞれ上から呈示確率50%の正立文字、80%の正立文字、50%の鏡映文字に対するERPに基づいて描いたものである。P3bは、文字が正立であるか鏡映であるか、また正立文字の呈示確率に関わらず、頭頂部のほぼ中心やや右寄り

文字の心的回転にともなう事象関連脳電位の変化

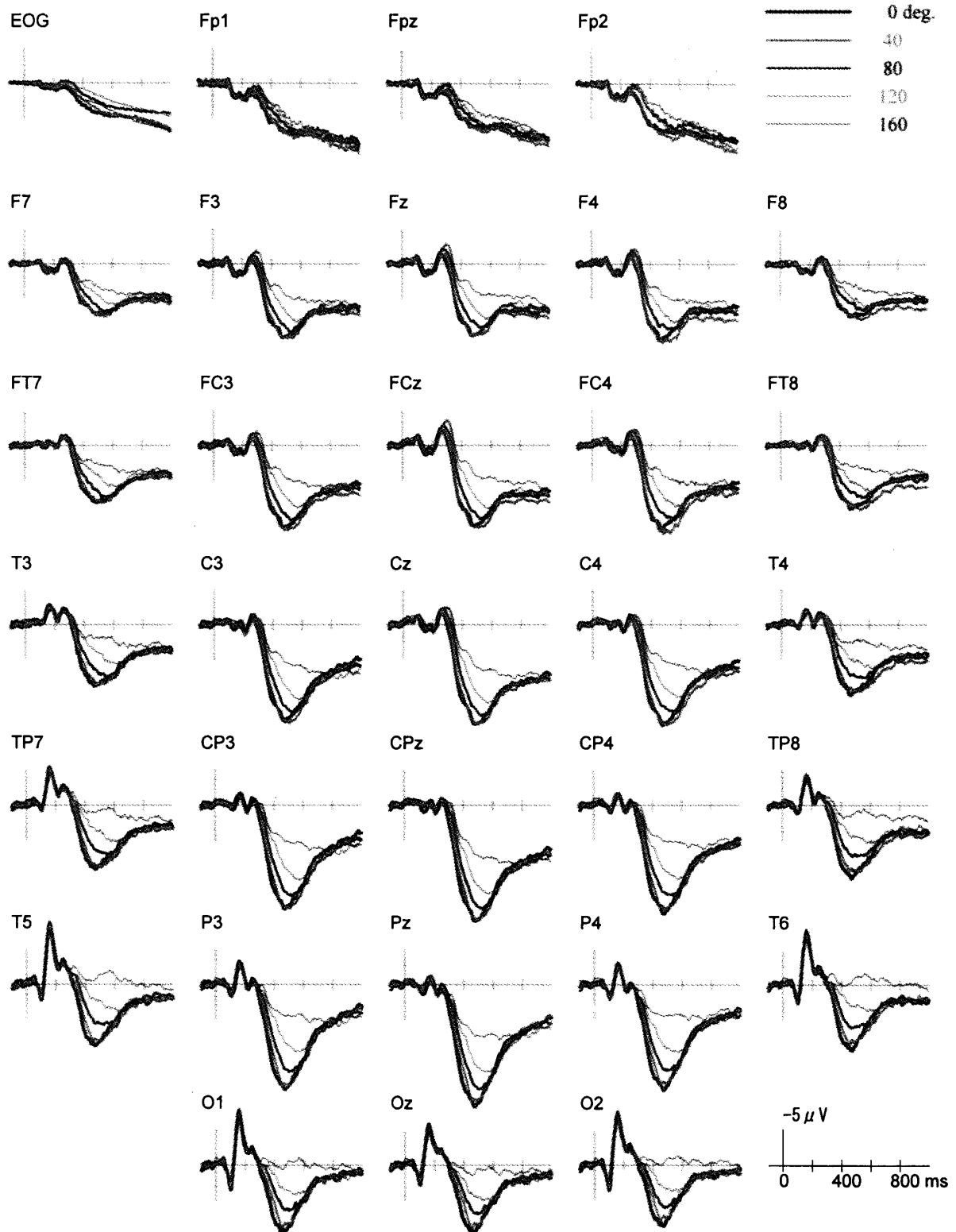


図4. 呈示確率50%条件の正立文字に対するERP総加算平均波形

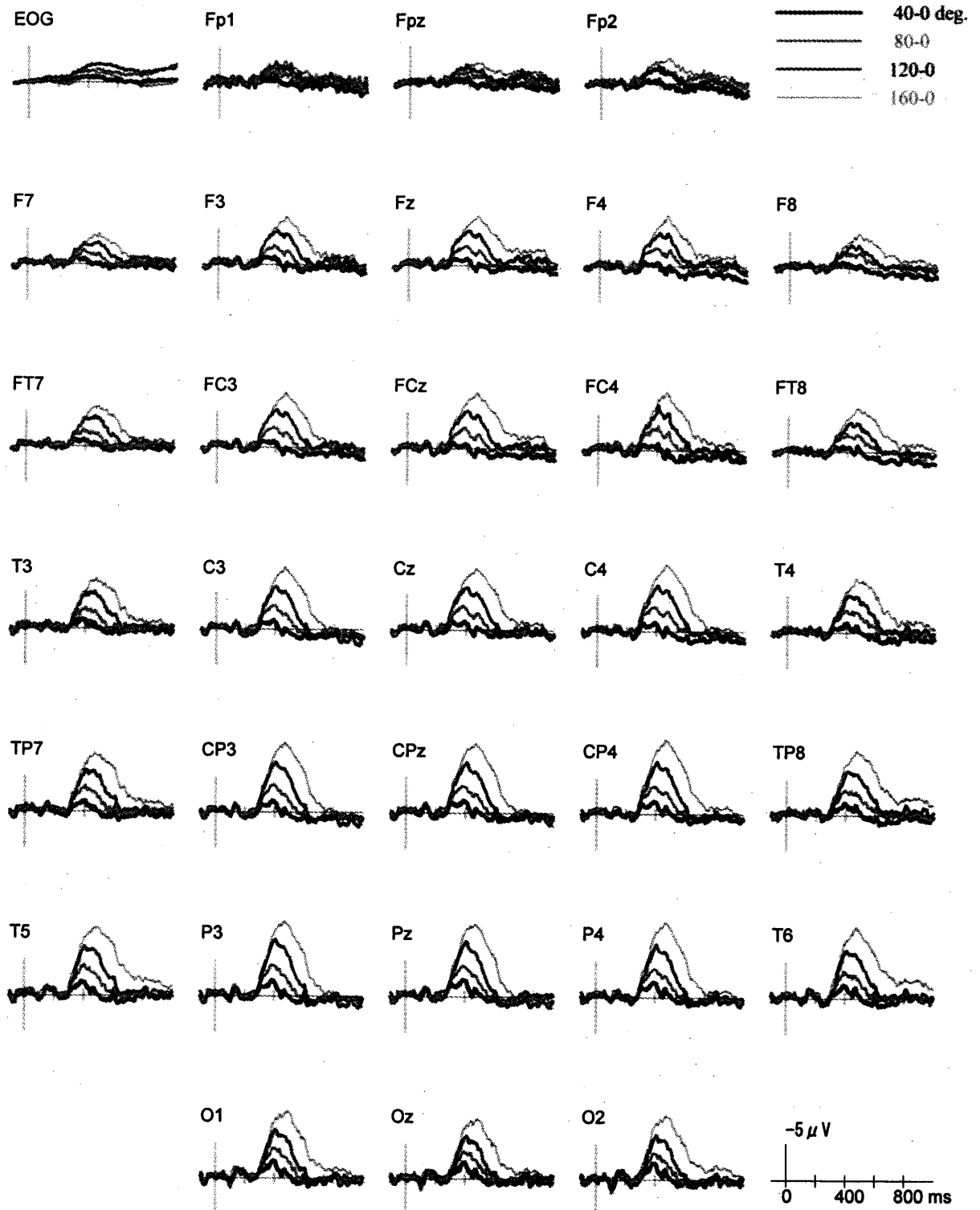


図5. 呈示確率50%条件の正立文字に対するERPの差分波形

振幅を示している。一方、正立文字条件における差分波形の分布は、P3b に比べて後ろ寄りで、かつ右半球優勢である。また、鏡映文字条件の差分波形のトポグラフィを正立文字条件のものとは比べると、右半球優勢であることは同じであるが、最大振幅を示す部位が前寄りになっていることがわかる。

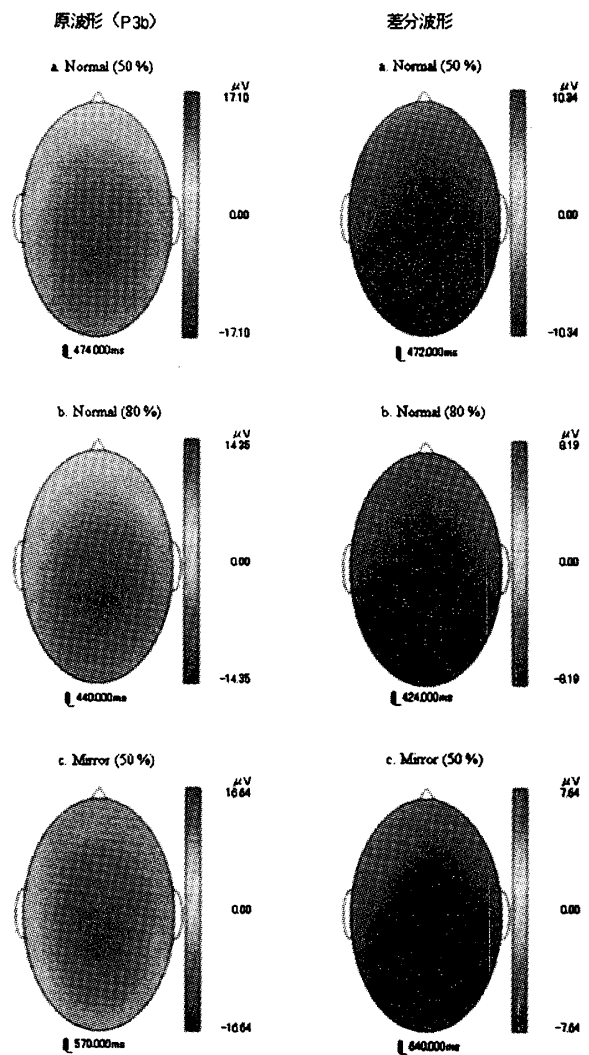


図6. 原波形のP3bと差分波形のトポグラフィの比較

考 察

本実験は、刺激の呈示確率を操作することによってP3b成分の影響を軽減した上で、文字の心的回転にともなって変化するERPの陰性成分の頭皮上分布を観察することを目的として実施した。しかし、正立文字に対するERPのP3b成分の振幅は、その呈示確率によって変化しなかった。結果には示さなかったが、呈示確率80%の正立文字に対するERPと20%の鏡映文字に対するERPのP3b振幅を比べると、ほぼ同じか

後者がやや小さかった。したがって、本研究における刺激呈示確率の操作は、当初の目的を達成できなかった。オドボール課題におけるP3b振幅が、刺激の呈示確率の影響を受け、出現確率が小さくなるほど高振幅となる (Donchin, 1981; Duncan-Johnson & Donchin, 1977) ことが報告されているが、本実験ではオドボール課題に比べて呈示する刺激の種類が多く、正立文字 vs. 鏡映文字というカテゴリ間の刺激の比率は、被験者にとってあまり重要でなかったのかもしれない。図2の反応時間で、正立文字に対する反応時間は呈示確率の影響を受け、高確率条件の反応時間が短縮したのに対し、鏡映文字に対する反応時間には呈示確率の効果が見られなかったことも、本実験における呈示確率の操作は、実験前に想定したよりも複雑な影響を結果にもたらしたことを示唆している。また、本実験では、文字の傾きが反応時間に従来の研究と同様の効果をもたらしているかどうかを確認するために、正立文字と鏡映文字の両方に反応を求めたので、標的刺激にのみ反応し、非標的は無視するような課題に比べて、刺激の呈示確率の効果は現れにくく、また高頻度刺激に対するP3bも大きく出現したのかもしれない。

したがって、本実験で分析した差分波形には、文字の傾きによるP3b成分の変化がかなりの部分反映されているはずであるが、それでも原波形の分析と差分波形の分析では、やや異なる結果が得られた。例えば、図6から、P3bに比べて差分波形で右半球優勢の傾向が強いことがわかる。もしも差分波形のほうに、心的回転に直接関係する脳活動がよく反映されているとすると、この結果は、心的回転と右半球の活動を関連付けたRatcliff (1978) や Corballis & Sergent (1988) などの神経心理学的研究や, Desrocher et al. (1995) のERP研究を支持するものである。また、図6の上段と下段を比較すると、正立文字と鏡映文字の処理過程の違いは、P3bよりも差分波形のほうによく反映されているように思われる。P3bでは、頂点潜時が約100ms遅れるが、頭皮上分布はほぼ同じである。一方差分波形では、頂点潜時の遅れも大きく(約170ms)、トポグラフィにも変化が現れている。従来の心的回転に関するERP研究では、主として加算回数を確保する目的で正立刺激と鏡映刺激を込みにして分析することが多いが、本実験のERPの結果は、両者には処理過程の違いがあり、したがって別々に分析されるべきであることを示唆する。しかも、それがP3b成分にではなく、心的回転にともなって増大する陰性電位に反映されるとすると、今後、P3bの影響を減じたり複数の成分を分離するための方略を工夫(例えば, Heil & Rolke, 2002) することによって、心的

回転に関連するERP成分の性質を、さらに調べる必要がある。

【引用文献】

- Bryden, M. P., George, J., & Inch, R. 1990 Sex differences and the role of figural complexity in determining the rate of mental rotation. *Perceptual and Motor Skills*, **70**, 467-477.
- Cooper, L. A. 1975 Mental rotation of random two-dimensional shapes. *Cognitive Psychology*, **7**, 20-43.
- Corballis, M. C., & Manalo, R. 1993 Effects of spatial attention on mental rotation. *Neuropsychologia*, **31**, 199-205.
- Corballis, M. C., & Sergent, J. 1988 Imagery in a commissurotomed patient. *Neuropsychologia*, **26**, 13-26.
- Desrocher, M. E., Smith, M. L., & Taylor, M. J. 1995 Stimulus and sex differences in performance of mental rotation: Evidence from event-related potentials. *Brain and Cognition*, **28**, 14-38.
- Donchin, E. 1981 Surprise!...surprise? *Psychophysiology*, **18**, 493-513.
- Duncan-Johnson, C. C., & Donchin, E. 1977 On quantifying surprise: The variation of event-related potentials with subjective probability. *Psychophysiology*, **14**, 456-467.
- Heil, M., & Rolke, B. 2002 Toward a chronopsychophysiology of mental rotation. *Psychophysiology*, **39**, 414-422.
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. 1985 Cognitive coordinate systems: Accounts of mental rotation of representations of 2-dimensional and 3-dimensional objects. *Canadian Journal of Psychology*, **39**, 100-129.
- Kosslyn, S. M. 1994 *Image and brain: The resolution of the imagery debate*. Cambridge, MA: MIT Press.
- 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 荻阪直行 (編) 脳とワーキングメモリ 京都大学学術出版会 pp.139-154.
- 宮崎清孝 1983 認知心理学のイメージ研究 水島恵一・上杉 喬 (編) イメージの基礎心理学 誠信書房 pp.158-191.
- Peronnet, F., & Farah, M. J. 1989 Mental rotation: An event-related potential study with a validated mental rotation task. *Brain and Cognition*, **9**, 279-288.
- Ratcliff, G. 1978 Spatial thought, mental rotation and the right cerebral hemisphere. *Neuropsychologia*, **17**, 49-54.
- Roland, P. E., & Friberg, L. 1985 Localization of cortical areas activated by thinking. *Journal of Neurophysiology*, **53**, 1219-1243.
- Rösler, F., Heil, M., Bajric, J., Pauls, A. C., & Hennighausen, E. 1995 Patterns of cerebral activation while mental images are rotated and changed in size. *Psychophysiology*, **32**, 135-149.
- Ruchkin, D. S., Johnson, R. Jr., Canoune, H. L., & Ritter, W. 1991 Event-related potentials during arithmetic and mental rotation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **79**, 473-487.
- 酒井邦嘉 1995 視覚的イメージのニューロン機構 神経研究の進歩, **39**, 612-623.
- Shepard, R. N., & Metzler, J. 1971 Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, **171**, 701-703.
- Stuss, D. T., Sarazin, F. F., Leech, E. E., & Picton, T. W. 1983 Event-related potentials during naming and mental rotation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **56**, 133-146.
- Vasey, M. W., & Thayer, J. F. 1987 The continuing problem of false positives in repeated measure ANOVA in psychophysiology: A multivariate solution. *Psychophysiology*, **24**, 479-486.
- Wijers, A. A., Otten, L. J., Feenstra, S., Mulder, G., & Mulder, L. J.M. 1989 Brain potentials during selective attention, memory search, and mental rotation. *Psychophysiology*, **26**, 452-467.