

2012年度 修士論文

事象関連電位を用いた運動学習研究

早稲田大学 大学院スポーツ科学研究科

スポーツ科学専攻 身体運動科学研究領域

5011A044-6

對間 直也

研究指導教員： 正木 宏明 准教授

目次

第 1 章	序論	1
-------	----	---

第 2 章 実験 1

2.1	はじめに	6
2.2	方法	7
2.3	結果	13
2.4	考察	19

第 3 章 実験 2

3.1	はじめに	22
3.2	方法	23
3.3	結果	27
3.4	考察	34

第 4 章 実験 3

4.1	はじめに	36
4.2	方法	38
4.3	結果	43
4.4	考察	49

第 5 章	総合考察	52
-------	------	----

参考文献	54
------	----

第1章 序論

運動学習において最も重要とされているのが、練習である。運動学習には多くの練習法が存在し、そのどれもが運動スキルの獲得に効果的である。それら多くの練習法の研究の中に、練習スケジュールを操作した文脈干渉効果がある。これは、複数の異なる運動課題を一定期間内に学習するとき、課題毎にまとめて反復遂行するブロック練習よりも、各課題を試行毎に変えて遂行するランダム練習の方が、練習期のパフォーマンスは低いものの、その後の保持テストでは高いパフォーマンスを示すという直観に反する現象のことである。文脈干渉効果は **Batting(1972)** によって最初に報告され、**Shea & Morgan (1979)** によって実験的に証明されて以来、多くの運動学習パラダイムで検証されてきた。

運動学習における文脈干渉効果の背景メカニズムには 2 つの仮説がある。1 つは精緻仮説と呼ばれ、**Batting (1966,1979)** によって提案されたものを、**Shea ら (Shea & Morgan, 1979; Shea & Zimny, 1983)** が運動学習に適合するように発展させたものである。精緻仮説によるとランダム練習は、課題が複合的で可変の情報処理過程を使用しているため、ブロック練習よりも特徴的で精緻な記憶作用へと導くという。ランダム状況下では、ワーキングメモリー内に保持すべき異なる課題が共存する。それらの記憶を維持・強化するためには、練習の間、課題間または課題内の特徴づけや関係づけを積極的に行う必要がある。これはブロック練習下ではできない。そのため、外部刺激のないブロック練習下よりも特殊性のレベルが増していく。

他の 1 つは再構成仮説 (**Lee & Magill, 1983, Magill & Hall, 1990**) と呼ばれるものである。ランダム練習では、試行毎に課題が変化するた

め、課題間の干渉が動作プランの忘却を引き起こすと考えられる。そのため、個々の課題に応じた動作プランを試行毎に再構成する必要がある。この動作プランの再構成の繰り返しが、課題に関する表象を強化し、ブロック練習よりも学習を促進させる原因になっていると説明する。

これら 2 つの立場は、文脈干渉効果が短期記憶内での課題間、課題内の関係づけといった認知システム内の処理活動の産物か、または、動作プランの再構成といった反応システム内での処理活動の産物であるかという点で異なっている。しかし、ランダム練習に伴う能動的で精緻な情報処理が文脈干渉効果を支える機序であるという点で一致している。

運動学習を促進させる要因として練習の次に重要とされているのが、結果の知識（knowledge of results: KR）である。KR とは、動作終了後に学習者に対して与えられる外的な情報を指す。これは付加的フィードバックの一部であり、目標動作に対する自身の動作結果を伝える情報である。学習者は KR をもとに、エラーを検出し、修正していくことで学習を促進させていく。

KR に関する初期の研究では、より高い頻度で KR を与えた方が学習に効果的であると考えられていた（Schmidt, 1975）。しかしながら、後年の研究では、高頻度 KR によって学習はむしろ阻害されることが見出されている（Wulf and Schmidt, 1989）。そのため効果的な KR 呈示法は、その後も継続して研究されてきた。KR 呈示法を分類すると、低頻度 KR、要約 KR、帯域 KR がある。KR 頻度を操作した従来の実験では、KR を毎試行与える高頻度条件と、KR を 2 試行に 1 度の割合で与える低頻度条件が比較されてきた。その結果、低頻度条件では、習得期のパフォーマンスは低いものの、その後の保持は良好となることが示されてきた（Winstein et al., 1990; Wulf et al., 1994）。さらに、複数の試行結果を

まとめて与える要約 KR (Schmidt et al., 1989)や、動作目標範囲から逸脱した時にのみ与える帯域 KR (Wright et al., 1997)でも、低頻度 KR と同様の保持効果が観察されている。

これらの結果は、ガイダンス仮説 (guidance hypothesis; Salmoni et al., 1984) から解釈できる。高頻度 KR は、パフォーマンス調節に効果的に働くため、習得期のパフォーマンスは良い。しかしながら、高頻度 KR は学習者の KR 依存性を高めるため、エラー検出能力または内在的フィードバックの情報処理を阻害してしまう。一方、低頻度 KR 条件では KR が少ない分、内在的フィードバックに対する情報処理が亢進し、より強い記憶表象が形成される。したがって、その後 KR がすべて除去されても、低頻度条件で練習した者はパフォーマンスを低下させることはない。

文脈干渉効果および KR を操作したこれらの運動技能学習の研究は、多くの実験室実験、または身体的実験によって立証されている。しかしながら、これらはすべて行動指標のみに基づいており、学習の背景にある神経機序は明らかになっていない。文脈干渉効果を解釈する精緻仮説または再構成仮説は、どちらも脳内の情報処理によるものと考えられている。同様に KR 操作による学習効果を解釈するガイダンス仮説も、脳内の情報処理によるものであると考えられている。したがって、本研究では、時間分解能に優れた脳波を測定することによって、脳活動からこれらの運動学習の背景メカニズムを検証する。

本研究では、脳波のなかでもヒトの認知・運動機能を鋭敏に反映する事象関連電位(event-related potential: ERP)を指標とする。事象関連電位は、広い意味の誘発反応を指す。概して、外因性成分と内因性成分に大別されるが、前者は潜時 100 ms 以下で誘発され、感覚刺激に対して

受動的に反応し恒常的に出現する電位である。一方、内因性成分は、実験中に実験参加者の課題処理に関する能動的な神経活動を反映して出現する電位である。つまり、内因性成分は、予期、注意、知覚、検索、識別、意思決定、記憶といった脳の認知過程にかかわって大脳活動で生じる電位であると考えられている。

事象関連電位には、実に多くの成分が存在するが、本研究では運動関連脳電位 (motor-related cortical potential: MRCP) に着目する。MRCP とは、BP (Bereitschaftspotential)、NS' (negative slope)、PMP (premotion positivity)、MP (motor potential) といった成分によって構成される随意運動に伴う電位の総称である (Shibasaki et al., 1980)。

BP は随意運動の準備状態を反映する電位であり、準備電位と名付けられている。BP は実際の手の運動の約 1 - 2 秒前から増大し始め、手の運動の直前で最大振幅となる。BP の生起は、筋を動かそうという意味が事前に脳の中に電位として物質的に表現されていることを示すものである。準備電位は大きく 2 成分から構成されている。1 つは、運動開始の 1 ~ 2 秒前から生起し始め、頭蓋頂点を最大に左右対称性に前頭・中心・頭頂部に広く分布する緩やかな勾配をもつ陰性電位 (BP) であり、2 つ目は、陰性電位の緩やかな勾配が運動開始の約 300 - 400ms 前から急峻に増大し、運動と反対側の中心部でその振幅が最大となる陰性電位である。この後者の電位は NS' と呼ばれ、前者の BP と区別されている。これらは MRCP を構成する主要な成分として位置づけられている。

本研究では、MRCP のなかでも、動作直後に観察される fpMP (frontal peak of motor potential: fpMP; Tarkka et al., 1990) に着目する。fpMP は前頭部に局在する陰性電位であり、運動感覚フィードバックを反映した成分と解釈されている。

従来の研究で議論されてきたように，ランダム練習または KR を低頻度呈示するほうが，能動的な脳内情報処理もしくはエラー検出を促進させるのであれば，その情報処理を反映する ERP 成分に振幅増大が生じるはずである．運動感覚フィードバックの処理を反映する fpMP 振幅に増大がみられれば，一次体性感覚野の賦活を意味するため，運動学習の神経基盤としての一次体性感覚野の役割を強調することになる．

第 2 章 実験 1

2.1 はじめに

実験 1 では、運動学習の促進に効果をもたらす文脈干渉効果についてその脳内機序を検討した。文脈干渉効果とは、練習スケジュールを操作した練習法である。複数の課題を学習する際に、1 課題ずつまとめて練習するよりも、複数の課題をランダムな順序で練習する方が、練習期のパフォーマンスは低いものの、後の保持テストではパフォーマンスが逆転し、向上する。この文脈干渉効果は、実験室実験 (Wulf & Lee, 1993) や多くの身体的スキルの学習 (Brady, 2008; Smith, 2002) によって立証されてきた。また、新奇単純課題のみでなく、経験者による複雑な動作を伴うスキル (野球の打撃) においても同様の結果が報告されている (Hall et al., 1994)。

しかしながら、これらの研究はすべて行動指標のみによって結論づけられたものであり、その背景にある神経メカニズムについては不明なことが多い。そこで、本実験では運動学習中の脳波を測定することで、その背景メカニズムを明らかにすることを目的とした。

1 章で述べた通り、文脈干渉効果は、精緻仮説または再構成仮説から説明されている。どちらもランダム練習によって生じる課題間の干渉が、脳内情報処理に学習促進効果をもたらすという考えに立脚している。これらの仮説に基づくと、ランダム練習の方がブロック練習よりも、随意運動に伴って生じる fpMP 成分の振幅値を増大させるものと予測される。

2.2 方法

2.2.1 実験日時・場所

本実験は，2010 年 11 月 18 日から 12 月 9 日および 2012 年 6 月 20 日から 6 月 27 日にかけて，早稲田大学 100 号館 570 号室スポーツ心理学特殊実験室において行われた．また実験室は，暗室，防音のシールド室であり，実験参加者は外部からの刺激に影響されることなく課題を遂行することが可能であった．室内の温度は，エアコンによって実験参加者の要望に合わせてその都度調整した．

2.2.2 実験参加者

実験参加者は，矯正を含め視力が正常で心身共に健康な大学生 24 名（男：19 名，女：5 名，平均年齢 20.5 ± 0.9 歳）であった．

2.2.3 実験課題

運動学習課題として，相対的タイミングを操作したタッピング課題（Wulf & Lee, 1993）を行った．実験参加者は，1 つのボタンを目標時間通りに 4 回押すという課題であった．また，目標時間は，4 回のボタン押しによってできる 3 つの区間にそれぞれ設定した．本実験では，パラメータの異なる課題を 3 つ使用した．各課題の目標時間はそれぞれ，課題 A：200－400－300（ms），課題 B：300－600－450（ms），課題 C：400－800－600（ms）であった．したがって，各区間の目標時間の比率，すなわち相対的タイミングは，すべての課題において 22.2：44.4：33.3（%）で共通していた．課題間では，パラメータ，すなわち絶対的タイミングのみが異なっていた．

2.2.4 実験手続き

初めに実験参加者に研究に関する説明を行い、その後インフォームド Consent 用紙に同意を記入してもらった。また、エディンバラの質問紙 (Oldfield, 1971) を用いて利き手に関する調査を行った。その後、防音のシールド室内で実験参加者をリラックスした状態で座らせ、測定用の電極を装着した。

実験参加者は、ブロック群またはランダム群のどちらかの群にそれぞれ 12 名ずつ振り分けた。

ブロック群では 3 つの課題をそれぞれ纏めたうえで、順次遂行してもらった。1 つの課題につき、3 ブロックで構成され (1 ブロック 21 試行)、3 ブロック終了した後に次の課題を遂行してもらった。課題の呈示順序は、順序効果を相殺するためカウンターバランスをとった。各課題の 1 ブロック目を遂行する前のみ、当該課題での正解タイミングをデモンストレーションするために、ビーブ音 (1000Hz) を使用して正しいタイミングを 3 回聴取させた。

ランダム群では 3 つの課題をランダムな順番で行った。1 ブロック 21 試行内に 3 つの課題がそれぞれ 7 試行ずつランダムな順番で並び、合計 9 ブロックで構成された。そして、3 つの課題の正解となるタイミングの音をそれぞれ 1 回ずつ、1・4・7 ブロック目を遂行する前に聞かせた。

ブロック群、ランダム群ともに 1 ブロック終了ごとに 1 分間の休憩を与え、ブロック群では各課題が終わるごとに、ランダム群では 3 ブロック終了ごとに 3 分間の休憩を与えた。また、実験参加者は両群とも各試行後に、その試行のパフォーマンスに関するフィードバックが 3 区間分並べて、○、+、- のいずれかで与えられた。○は目標時間から $\pm 30\text{ms}$ 正解幅をとり、実際の動作時間がその幅に入ると表示された。目標時間

±30ms より実際の動作時間が長ければ＋，短ければ－が表示された．

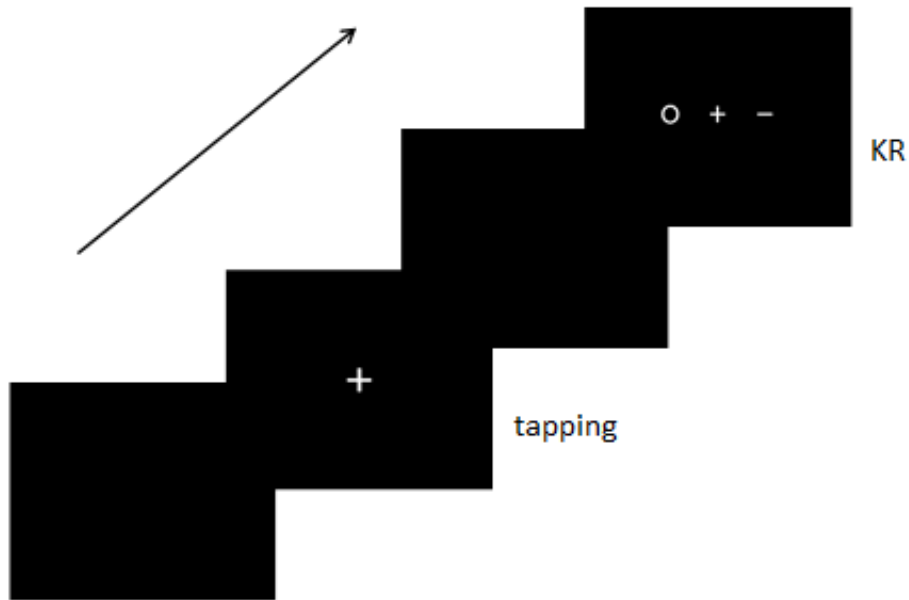


図 1. 課題の流れ



図 2. ランダム群課題呈示画面

ブロック群の課題の流れは図 1 の通りであった．ブランク画面の後に，白色注視点が呈示された．参加者には注視点出現後にセルフペースでタッピングを開始してもらった．1 試行当たり 4 回のタッピングを遂行した直後にブランク画面となり，その 1 秒後に当該試行の結果に関するフィードバック（3 区間）が 3 秒間呈示された．ランダム群の課題手続きは，ブロック群の初めのブランク画面と注視点の呈示との間に図 2 に示す課題呈示の画面のいずれかが 2 秒間挿入されたのみで，それ以外の手

続きはブロック群と同様であった．

実験は 2 日間に渡って行われた．第 1 日目には練習と直後保持テストを行った．翌日の第 2 日目には，遅延保持テストを行ってもらった．直後および遅延保持テストは共に，練習期で遂行した 3 課題を各課題連続 5 試行ずつ，計 15 試行で行われた．両保持テストでは正解となるタイミングを音でデモンストレーションすることはしなかった．また，試行毎にフィードバックを呈示することもしなかった．ブロック群は練習期と同じ順番でテスト課題を行った．保持テストに関しては，ランダム群もブロック群と同様に，3 課題をそれぞれ纏めて遂行した．そのため，新たに順序効果を相殺するためカウンターバランスをとった．

2.2.5 測定装置および記録方法

i．行動指標

刺激呈示と反応時間の測定は，タキストスコープ（岩通アイセル社製 Is-702AVTachistoscope）を利用した．

ii．生理指標

脳波（electroencephalogram: EEG），眼電図（electrooculogram: EOG）は，デジタル脳波計（Biosemi 社製 Active-Two）を用いてサンプリング周波数 1024Hz で同時記録した．EEG は，頭皮上 128 部位より DC 導出した．その後，オフラインでバンドパスフィルタ 0.1-30 Hz を適用した．また，眼球運動をモニタするため，両目角外 1cm から水平眼球運動，左眼窩上下 2 cm から垂直眼球運動を記録した．

2.2.6 分析

i. 測定項目

1) パフォーマンス

実験参加者の動作時間の正確性を求めるため、Wulf & Lee (1993) と同様の指標を用いた。各試行における区間ごとの目標時間と実際の動作時間との誤差の絶対値を合計算することで、各試行の絶対誤差 (absolute error: AE) を測った。AE によって逸脱の大きさを表した。

2) 脳波

事象関連電位は、タッピングの 4 回目のボタン反応時点をトリガにして加算平均した。眼球運動、体動などのアーチファクトが混入している試行は加算平均から除外した。本実験では、トポグラフィによって fpMP の最大賦活部位と同定された FCz (Biosemi electrode coordinate: C23) を解析対象とした。

fpMP 成分の振幅値は、4 回目のタッピング後 100ms から 150ms の区間における最大陰性成分とその直前の陽性との差分値を測定した (peak to peak measure)。ベースラインはトリガ前 70–50 ms の平均電位を用いた。

ii. 分析法

1) パフォーマンス

両群とも各課題、練習試行を 1 ブロック 7 試行ごとに 9 ブロックに振り分けた。そして、各課題の練習期の AE に関して、練習スケジュール (ブロック群, ランダム群) × 練習試行 (9 ブロック) の 2 要因分散分析を行った。また、各課題の保持テストのデータに関しても、練習スケ

ジュール（ブロック群，ランダム群）×保持テスト（直後保持，遅延保持）の 2 要因分散分析を行った．

分散分析に際し，**Mauchly** の球面性検定を行い，球面性が仮定された時には **Greenhouse-Geisser** のイプシロンを用いて自由度，有意確率を再計算した．主効果が認められた時には，**Bonferroni** 法による多重比較を行った．また，有意水準は 5% とした．

2) 脳波

fpMP 振幅値に関して，課題ごとに対応のない t 検定（ブロック群×ランダム群）を行った．

2.3 結果

2.3.1 パフォーマンス

i. 課題 A

1) 練習期

課題 A の練習期および保持テストのパフォーマンスは，図 3 の通りであった．練習期に関しては，ブロックの主効果が認められた ($F(8,176)=6.13$, $p<.01$)．下位検定の結果，2 ブロック目に対して 6 ブロック目で有意に逸脱値が下がった ($p<.05$)．また，交互作用も認められた ($F(8,176)=3.93$, $p<.05$)．下位検定の結果，1, 2, 3, 5, 8, 9 ブロックにおいて，ブロック群の方がランダム群よりも逸脱値が低かった ($p<.05$)．

2) 保持テスト

保持テストに関しては，テスト間に差はなかったが ($F(1,22)=0.99$, $n.s.$)，群間差は認められ，ランダム群の方が逸脱値は低かった ($F(1,22)=5.98$, $p<.05$)．交互作用はなかった ($F(1,22)=0.02$, $n.s.$)．

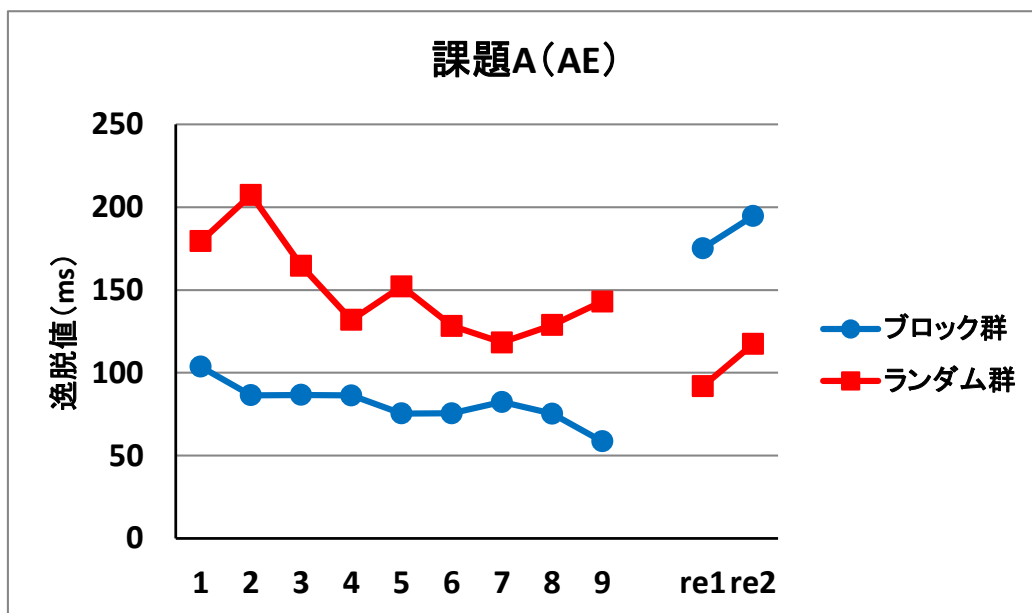


図 3. 課題 A のパフォーマンス結果

ii. 課題 B

1) 練習期

課題 B の練習期および保持テストのパフォーマンスは、図 4 の通りであった。練習期に関しては、ブロックの主効果が認められた ($F(8,176)=3.02, p<.01$)。下位検定の結果、1 ブロックから 4 ブロック、および 2 ブロックから 4, 5 ブロックにかけて逸脱値は低い傾向であった ($p<.10$)。また、交互作用も認められた ($F(8,176)=2.56, p<.05$)。下位検定の結果、4 ブロック以外のブロックにおいて、ブロック群の方がランダム群よりも逸脱値が低かった (いずれも $p<.05$)。

2) 保持テスト

保持テストに関しては、テスト間に差はなく ($F(1,22)=1.19, n.s.$)、群間差もなかった ($F(1,22)=0.22, n.s.$)。交互作用はなかった ($F(1,22)=1.15, n.s.$)。

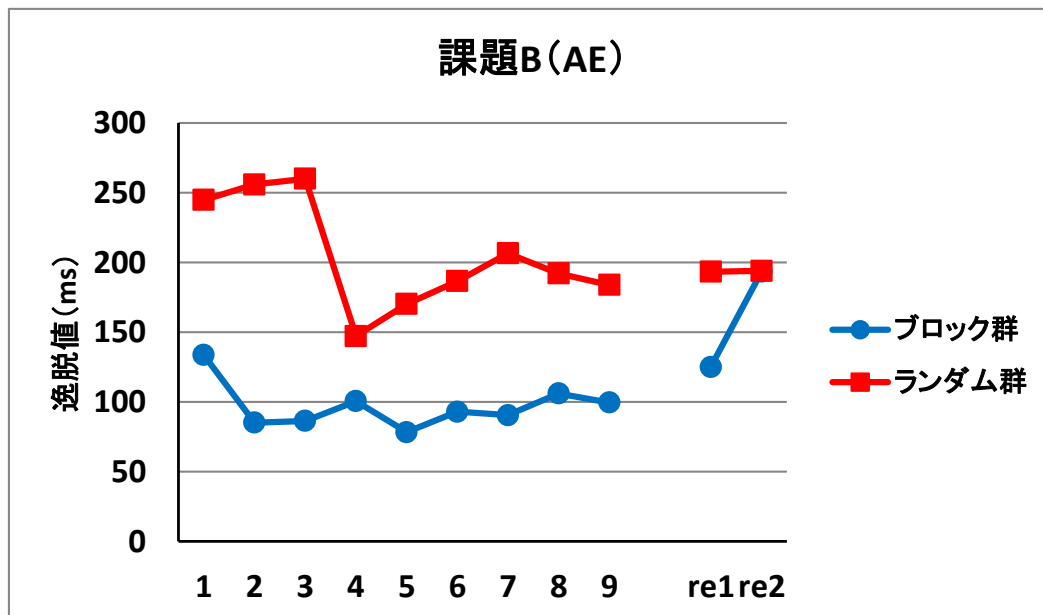


図 4. 課題 B のパフォーマンス結果

iii. 課題 C

1) 練習期

課題 C の練習期および保持テストのパフォーマンスは、図 5 の通りであった。練習期に関しては、ブロックの主効果が有意だった ($F(8,176)=5.01, p<.01$)。下位検定の結果、1 ブロック目から 5 ブロック目にかけて有意に逸脱値が下がった (いずれも $p<.05$)。また、群間差も有意で、ブロック群の方がランダム群よりも逸脱値は低かった ($F(1,22)=16.60, p<.01$)。交互作用はなかった ($F(8,176)=1.87, n.s.$)。

2) 保持テスト

保持テストに関しては、テスト間に有意差が認められ ($F(1,22)=5.92, p<.05$)、直後保持テストから遅延保持テストにかけて逸脱値が増加した。群間差 ($F(1,22)=0.67, n.s.$) も交互作用 ($F(1,22)=2.26, n.s.$) もなかった。

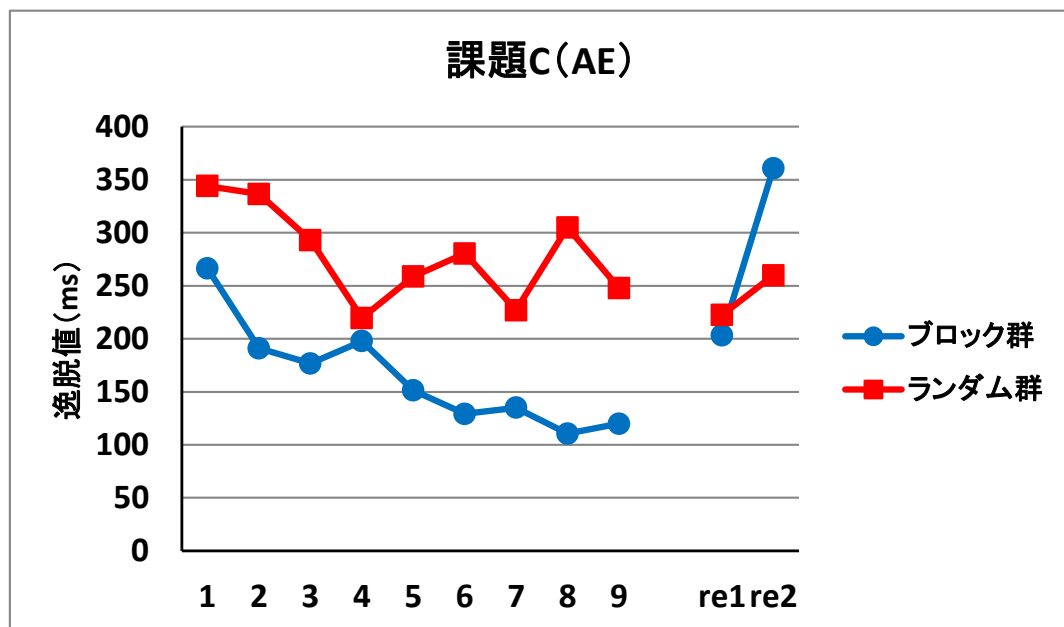


図 5. 課題 C のパフォーマンス結果

2.3.2 脳波

i. 課題 A

課題 A の fpMP に関する波形および頭皮上分布は図 6 の通りであった。fpMP 振幅値に関して、対応のない t 検定を行ったところ、ランダム群の方がブロック群よりも陰性の電位が大きかった ($t(22)=2.24, p<.05$)。

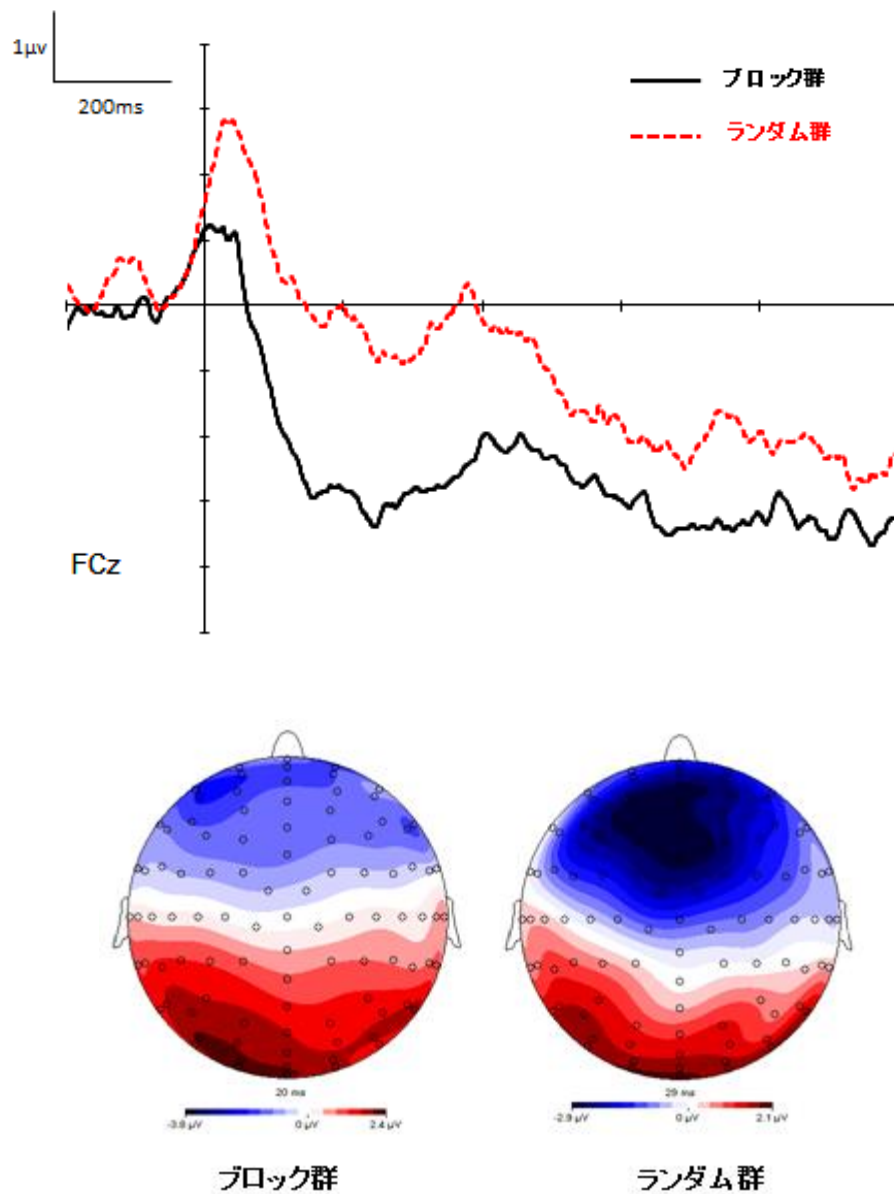


図 6. 課題 A の波形（上）および頭皮上分布（下）

ii. 課題 B

課題 B の fpMP に関する波形および頭皮上分布は図 7 の通りであった。
fpMP 振幅値に関して、対応のない t 検定を行ったところ、両群に差は
みられなかった ($t(22)=0.79$, $n.s.$)。

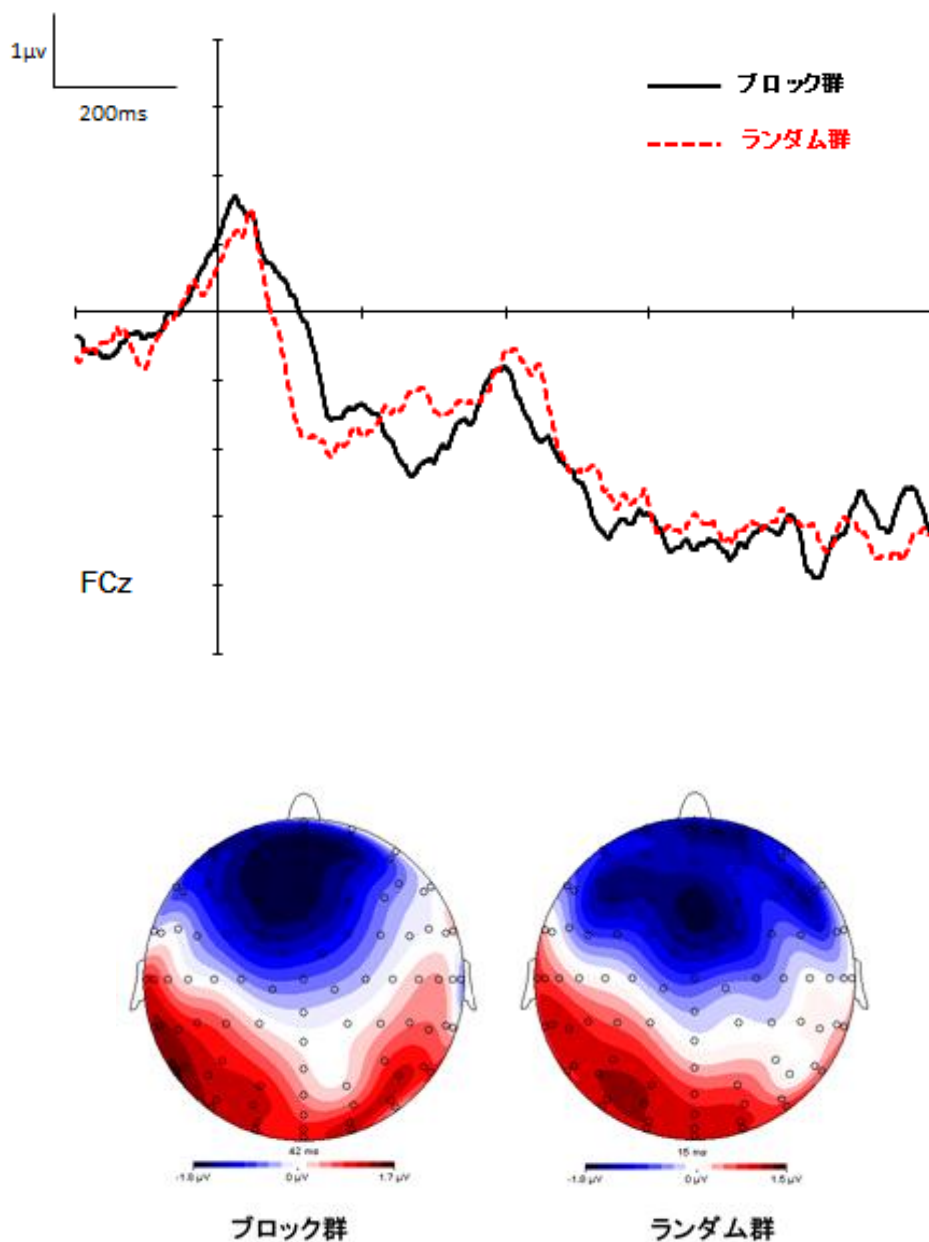


図 7. 課題 B の波形（上）および頭皮上分布（下）

iii. 課題 C

課題 C の fpMP に関する波形および頭皮上分布は図 7 の通りであった。fpMP 振幅値に関して、対応のない t 検定を行ったところ、ランダム群の方がブロック群よりも陰性の電位が大きかった ($t(22)=2.43, p<.05$)。

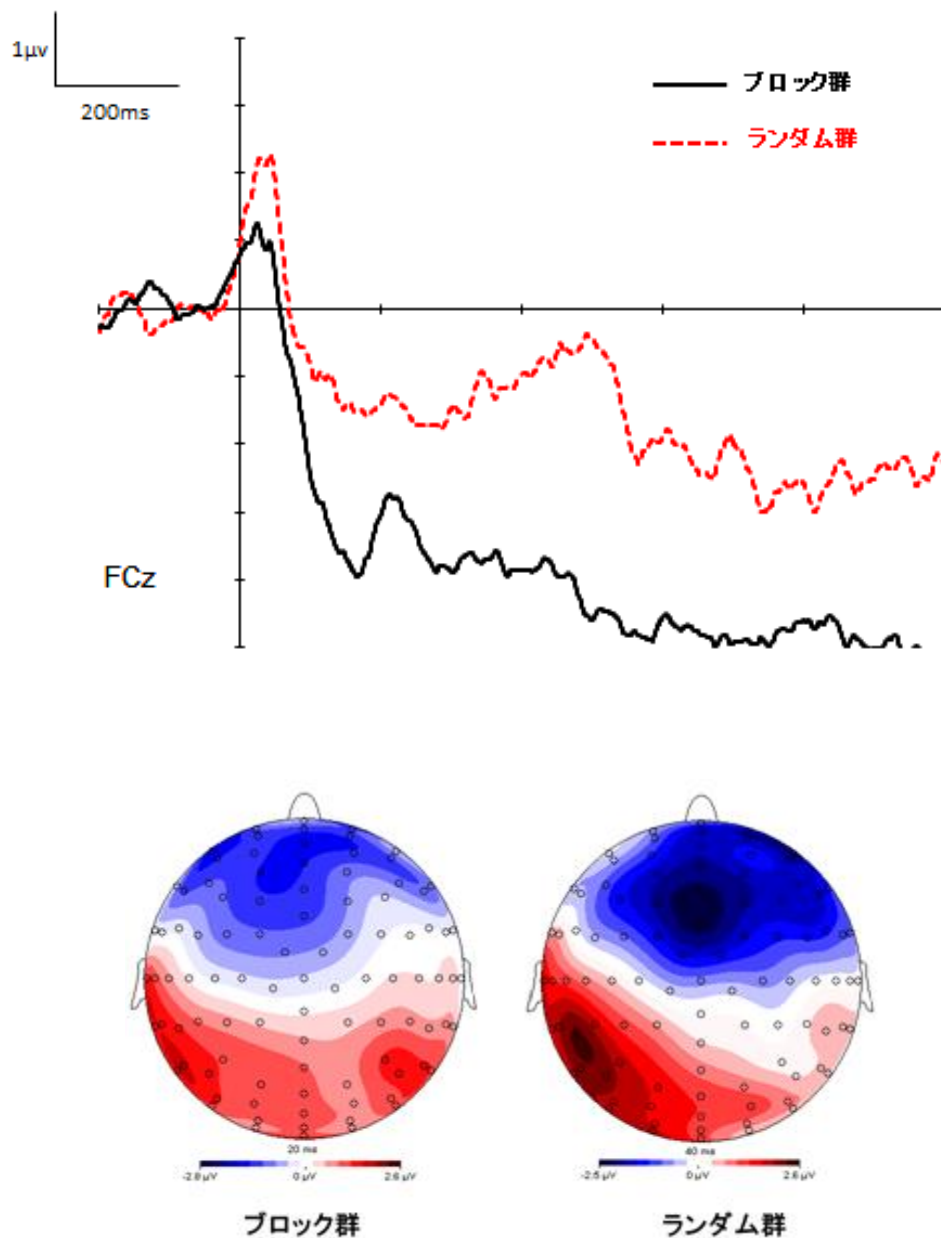


図 8. 課題 C の波形（上）および頭皮上分布（下）

2.4 考察

本実験のタッピング課題において、課題 A ではブロック群とランダム群ともに練習試行を通して明確なパフォーマンスの向上を見せた。練習期においては、ブロック群の方がランダム群よりも逸脱値が低かった。また、保持テストに関しては、直後保持テストから遅延保持テストにかけて、両群とも差はみられなかった。しかしながら、保持テスト時では、ブロック群とランダム群との間に差がみられた。練習最終ブロックの時点では、ブロック群の方がランダム群よりもパフォーマンスが良かった。しかし、直後保持テストの段階で、既にランダム群のパフォーマンスが逆転し、ブロック群よりも良くなっていた。また、ブロック群は明らかに練習試行から保持テストにかけてパフォーマンスが低下した。それに対して、ランダム群は練習試行最終ブロックから保持テストにかけて、パフォーマンスが良くなっている。これは、課題 A において文脈干渉効果がみられたといえる。

課題 B に関しても、練習期にはブロック群とランダム群ともに明確なパフォーマンスの向上を見せ、かつブロック群の方がランダム群よりも逸脱値は低かった。しかし、その後の両群の保持テストでは、主効果も交互作用も認められなかった。これは練習期の群間差が、保持テストではなくなっているといえる。

課題 C においても、ブロック群とランダム群ともに練習期ではパフォーマンスの向上を見せ、かつブロック群の方がランダム群よりも逸脱値が低かった。保持テストでは、両群とも直後保持テストから遅延保持テストにかけて、パフォーマンスは低下した。こちらも課題 B と同様に、練習期ではあった群間差がなくなった。

課題 A, B, C すべてにおいて、練習期のパフォーマンスは従来の研

究通り、両群ともに明確な学習の向上が見られ、また、ランダム群の方がブロック群よりもパフォーマンスは低かった。課題 A においては、保持テストでブロック群とランダム群のパフォーマンスが逆転し、文脈干渉効果が再現された。課題 B および課題 C では、保持テストにおけるパフォーマンスの明確な逆転現象はみられなかった。しかし、練習期にみられた群間差が保持テストではみられなかったため、ランダム群の練習効果は支持されると考えられる。

脳波に関しては、課題 A および課題 C において、ランダム群の fpMP 成分の振幅値がブロック群よりも大きかった。fpMP 成分が大きくなった結果、ランダム群の方がブロック群よりも脳内での情報処理が盛んになるという仮説が支持されたと考えられる。fpMP 成分が最も賦活していた部位が、前頭部における FCz 付近であることから、前部帯状回の関与が考えられる。これまでの研究で、前部帯状回は情動処理や認知処理に関わっていることがわかっている。本実験では、保持すべき異なる課題が多いランダム群において、認知処理がより盛んに働いたと考えられる。つまり、ランダム群の実験参加者は、3 つの課題が同時かつランダムな順に存在することで、それら 3 課題を練習の間、積極的に課題間あるいは課題内の特徴づけや関係づけを行った。その結果、FCz 付近で fpMP 成分の振幅値が大きくなったと考えられる。また、陰性電位の大きさが情報処理活動を反映し、パフォーマンスに影響するものであると考えた。パフォーマンスの結果において、練習試行から保持テストにかけて課題 A は文脈干渉効果がみられ、ランダム群とブロック群のパフォーマンスが逆転した。脳波の結果においても課題 A は群間で振幅値に有意な差が認められた。また、保持テストにおいて、群間差が認められなかった課題 B では、脳波の結果においても振幅値に群間差が認められな

かった．そのため，パフォーマンスの結果と脳波の結果が合致しているといえる．すなわち，練習期における fpMP 成分の振幅値の大きさが，脳内の情報処理過程を反映し，後のパフォーマンスの保持を示唆するものであると考えられる．ブロック群のように同一課題をひたすら繰り返しているだけでは，脳内の認知処理過程において課題間あるいは課題内の特徴づけや関係づけを行うことができない．そのため，脳内でのモニタリングがうまくされず，学習の低下につながっていったものと考えられる．一方，ランダム群では脳内でのモニタリング活動が活発であったため，各課題に対する特殊性のレベルが増していったことが，パフォーマンスの逆転へとつながったと考えられる．また，ランダム群で fpMP 成分が大きくなったことは，従来の研究で言われてきた，文脈干渉効果の精緻仮説および再構成仮説を生理指標からも支持するものであると考えられる．

第 3 章 実験 2

3.1 はじめに

運動学習を促進させる重要な要因として、結果の知識（**knowledge of results: KR**）が挙げられる。**KR**とは、動作終了後に学習者に対して与えられる外的な情報を指す。これは付加的フィードバックの一部であり、目標動作に対する自身の動作結果を伝える情報である。学習者は**KR**をもとに、エラーを検出し、修正していくことで学習を促進させていく。

ガイダンス仮説では、低頻度**KR**条件の方が高頻度**KR**条件よりも学習に効果的であるとしている。高頻度**KR**は、パフォーマンス調節に効果的に働くため、練習期のパフォーマンスは良い。しかしながら、高頻度**KR**は学習者の**KR**依存性を高めるため、エラー検出能力または内在的フィードバックの情報処理を阻害してしまう。一方、低頻度**KR**条件では**KR**が少ない分、内在的フィードバックに対する情報処理が亢進し、より強い記憶表象が形成される。したがって、その後**KR**がすべて除去されても、低頻度条件で練習した者はパフォーマンスを低下させることはない。

KRを操作したこれらの運動学習の研究は行動指標のみに基づいており、学習の背景にある神経機序は明らかになっていない。そこで本研究では、時間分解能に優れた脳波を測定することによって、脳活動から運動学習の背景メカニズムを検証する。

従来の研究で議論されてきたように、**KR**を低頻度呈示するほうが、能動的な脳内情報処理もしくはエラー検出を促進させるのであれば、ERP成分に増大が生じると予測される。

3.2 方法

3.2.1 実験日時・場所

本実験は，2011年11月17日から2012年2月14日にかけて，早稲田大学100号館570号室スポーツ心理学特殊実験室において行われた．

3.2.2 実験参加者

実験参加者は，矯正を含め視力が正常で心身共に健康な大学生26名（男：17名，女：9名，平均年齢 21.0 ± 1.0 歳）であった．また，実験参加者は実験1に参加していない，本実験の装置及び課題経験のない者であった．

3.2.3 実験課題

課題は，実験1と同様にタッピング課題を用いた．1つのボタンを目標時間通りに4回押すというものであった．各課題の目標時間は，実験1と同じく，課題A：200－400－300(ms)，課題B：300－600－450(ms)，課題C：400－800－600(ms)であった．しかし，実験1とは異なり，KRの呈示には記号ではなく，数字を用いた．

3.2.4 実験手続き

初めに実験参加者に研究に関する説明を行い，その後インフォームドコンセント用紙に同意を記入してもらった．また，エディンバラの質問紙を用いて利き手に関する調査を行った．その後，防音のシールド室内で実験参加者をリラックスした状態で座らせ，測定用の電極を装着した．

実験参加者は，KRを毎回与えられる100%KR群またはKRを2試行に

1 回与えられる 50%KR 群のどちらかの群にそれぞれ 13 名ずつ振り分けた。

課題は、1 課題につき 3 ブロック（1 ブロック 36 試行）で構成された。課題の順番は、順序効果を相殺するためカウンターバランスをとった。

実験参加者は、各群の KR 頻度で、パフォーマンスに関する KR を 3 区間分並べて ms 単位で正負の数字で与えられた。目標時間よりも実際の動作時間が長ければ正数（例、10ms 長ければ「10」）、目標時間よりも早ければ負数（例、10ms 早ければ「-10」）、目標時間通りであれば「0」が呈示された。

実験は 2 日間に渡って行われた。第 1 日目には練習、及び直後保持テストを行った。第 2 日目には、遅延保持テストを行ってもらった。直後および遅延保持テスト共に、練習期で行った 3 課題を各課題連続で 5 試行ずつ、計 15 試行を行った。保持テストは KR なしで行われた。保持テストも練習期と同様の課題順序で行った。

課題の流れは、初めに課題呈示画面が呈示され、その後、画面中央に白色注視点が現れた。実験参加者は、注視点が現れたら自分のタイミングでタッピングを開始した。4 回のタッピングの 1 秒後に、KR が各群の条件の頻度で呈示された。KR の呈示時間は 3 秒間であった。

3.2.5 測定装置および記録方法

i. 行動指標

刺激呈示と反応時間の測定は、プレゼンテーション 14.5 を利用した。

ii. 生理指標

EEG (脳波), EOG (眼電図), EMG (electromyogram, 筋電図) を, 脳波計 (Biosemi 社製 Active-two) を用いてサンプリング周波数 1024Hz で同時記録した. EEG は, 頭皮上 128 部位より DC 導出した. その後, オフラインでバンドパスフィルタ 0.1-30Hz を適用した. また, 眼球運動をモニタするため, 両目角外 1cm から水平眼球運動, 左眼窩上下 2 cm から垂直眼球運動を記録した. さらに, 右手人差し指でボタンをタッピングするため, 右腕橈骨筋の筋電図を測定した.

3.2.6 分析

i. 測定項目

1) パフォーマンス

実験参加者の動作時間の正確性を求めるため, 実験 1 と同様の指標を用いた. 各試行における区間ごとの目標時間と実際の動作時間との誤差の絶対値を合計算することで, 各試行の絶対誤差 (absolute error: AE) を測った. AE によって逸脱の大きさを表した.

2) 脳波

事象関連電位は, タッピングの 4 回目の反応をトリガにして加算平均した. 眼球運動, 体動などのアーチファクトが混入している試行は加算平均から除外した. 本実験では, トポグラフィによって最大賦活部位と同定した FCz と F1 (Biosemi electrode coordinate C23, C25) を解析対象とした.

fpMP 成分の振幅値は，4 回目のタッピング後 100 ms から 150 ms の区間における最大陰性成分とその直前の陽性との差分値を測定した．ベースラインはトリガ前 70–50 ms の区間平均電位を用いた．

さらに，4 回目のタッピング時の事象関連電位は CSD (current source density) に供し，頭皮上の直下の電流密度を検討した．CSD 波形の fpMP 成分の振幅値は，4 回目のタッピング後 0ms–50 ms の区間平均電位をベースラインとして計測した．CSD 波形のベースラインはトリガ前 300–250 ms の区間平均電位を適用した．

ii. 分析法

1) パフォーマンス

両群とも各課題，練習試行を 1 ブロック 12 試行ごとに 9 ブロックに振り分けた．そして，各課題の練習期の AE に関して，練習スケジュール（100%KR 群，50%KR 群）×練習試行（9 ブロック）の 2 要因分散分析を行った．また，各課題の保持テストのデータに関しても，練習スケジュール（100%KR 群，50%KR 群）×保持テスト（直後保持，遅延保持）の 2 要因分散分析を行った．

分散分析に際し，Mauchly の球面性検定を行い，球面性が仮定された時には Greenhouse-Geisser のイプシロンを用いて自由度，有意確率を再計算した．主効果が認められた時には，Bonferroni 法による多重比較を行った．また，有意水準は 5% とした．

2) 脳波

fpMP 振幅値に関して，課題ごとに対応のない t 検定（ブロック群×ランダム群）を行った．

3.3 結果

3.3.1 パフォーマンス

i. 課題 A

1) 練習期

課題 A の練習期および保持テストのパフォーマンスは、図 9 の通りであった。練習期に関して、ブロックの主効果が認められた ($F(8,192)=4.97$, $p<.05$)。下位検定の結果、1 ブロック目から 3 および 9 ブロック目にかけて有意に逸脱値が下がった ($p<.05$)。群間差はなかった ($F(1,24)=2.74$, $n.s.$)。交互作用もなかった ($F(8,192)=0.73$, $n.s.$)。

2) 保持テスト

保持テストに関しては、テスト間に差はなく ($F(1,24)=2.32$, $n.s.$)、群間差もなかった ($F(1,24)=2.79$, $n.s.$)。交互作用は有意でなかった ($F(1,24)=0.06$, $n.s.$)。

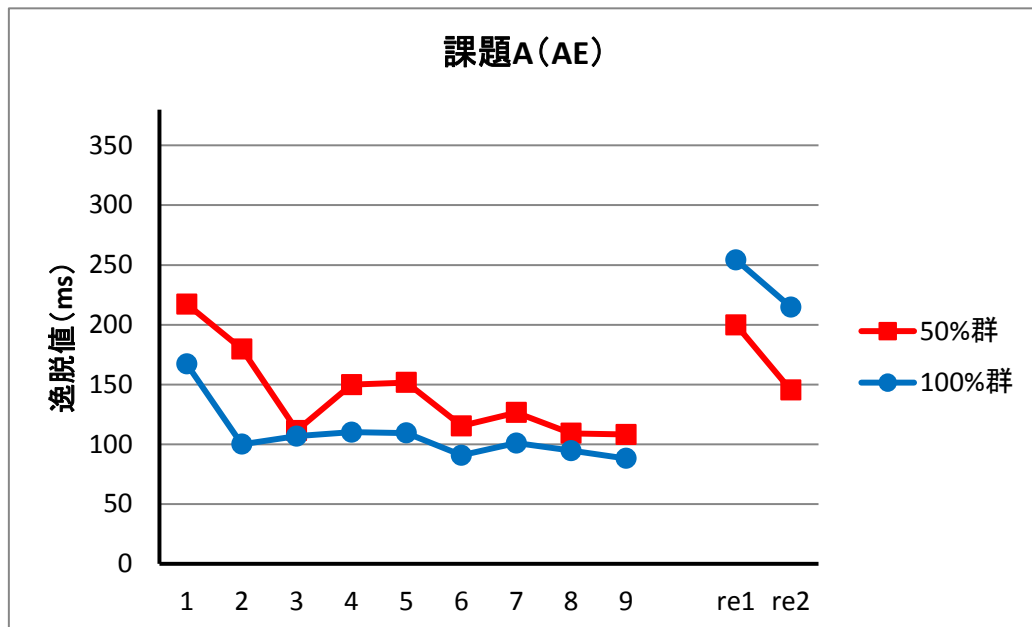


図 9. 課題 A のパフォーマンス結果

ii. 課題 B

1) 練習期

課題 B の練習期および保持テストのパフォーマンスは，図 10 の通りであった．練習期に関して，ブロックで主効果が認められた ($F(8,192)=6.30, p<.01$)．下位検定の結果，1 ブロック目から 2 ブロック目以外のすべてのブロックにかけて逸脱値が有意に低下した ($p<.05$)．群間差も ($F(1,24)=1.68, n.s.$)，交互作用も ($F(8,192)=1.06, n.s.$) なかった．

2) 保持テスト

保持テストに関しては，テスト間に差はなかった ($F(1,24)=1.65, n.s.$)．しかしながら，群間差が認められ ($F(1,24)=5.35, p<.05$)，50%群のほうが 100%群よりも低かった．交互作用はなかった ($F(1,24)=0.10, n.s.$)．

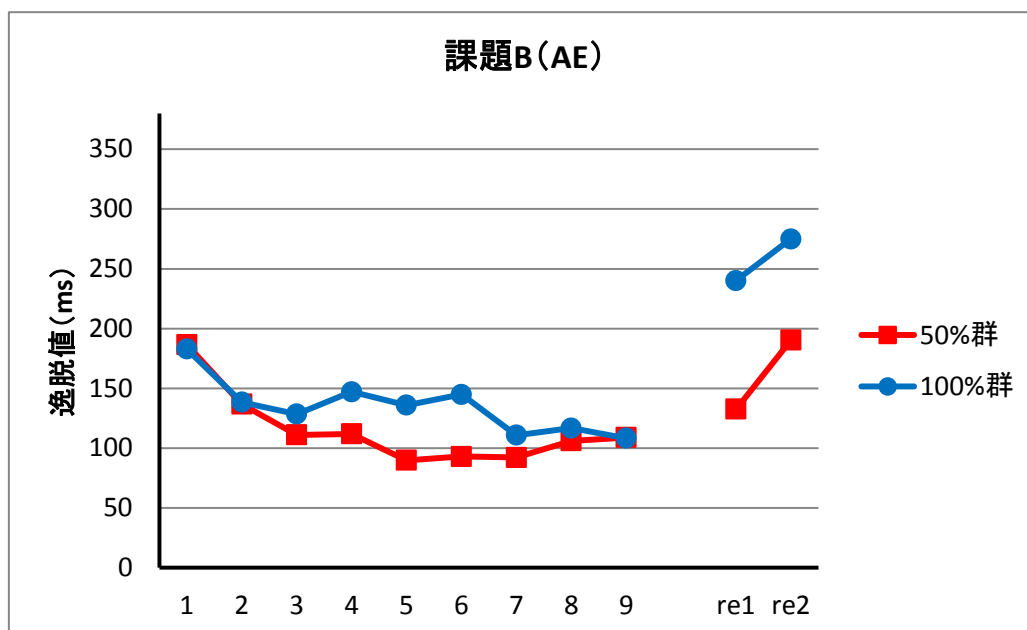


図 10. 課題 B のパフォーマンス結果

iii. 課題 C

1) 練習期

課題 C の練習期および保持テストのパフォーマンスは、図 11 の通りであった。練習期に関して、ブロックの主効果が認められた ($F(8,192)=6.71, p<.01$)。下位検定の結果、1 ブロック目から 5, 6 ブロック目以外のすべてのブロックにかけて逸脱値が有意に下がった ($p<.05$)。群間差 ($F(1,24)=0.42, n.s.$) および交互作用 ($F(8,192)=0.46, n.s.$) はなかった

2) 保持テスト

保持テストに関しては、テスト間にも ($F(1,24)=2.21, n.s.$)、群間にも ($F(1,24)=1.18, n.s.$) 差はなかった。交互作用もなかった ($F(1,24)=0.31, n.s.$)。

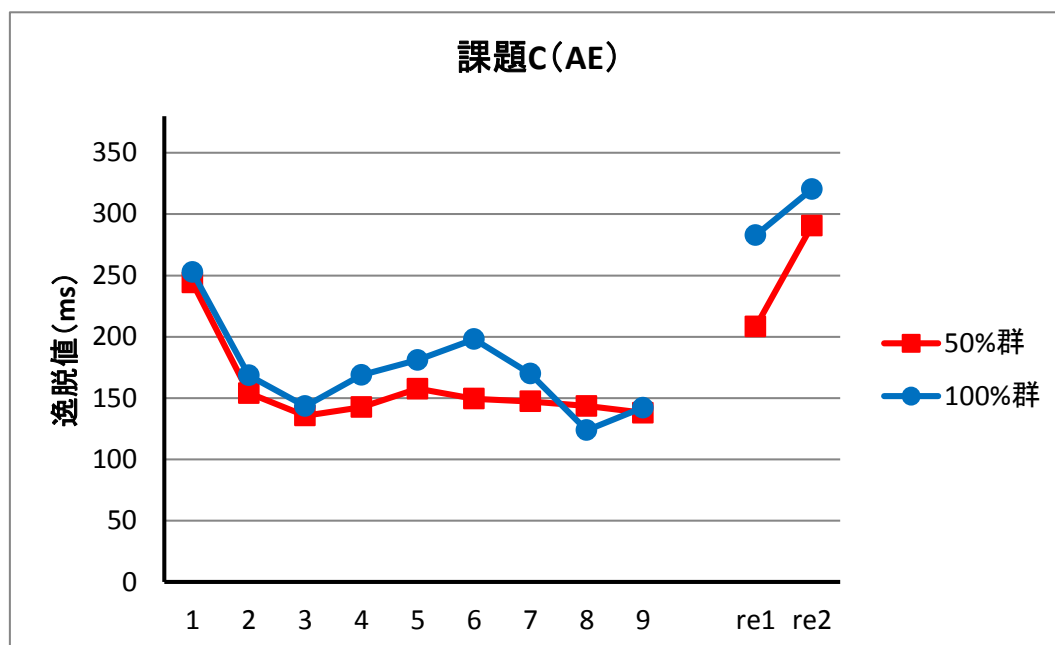


図 11. 課題 C のパフォーマンス結果

3.3.2 脳波

i. ERP 波形

通常の ERP 波形では,すべての課題において群間差は認められなかった (図 12).

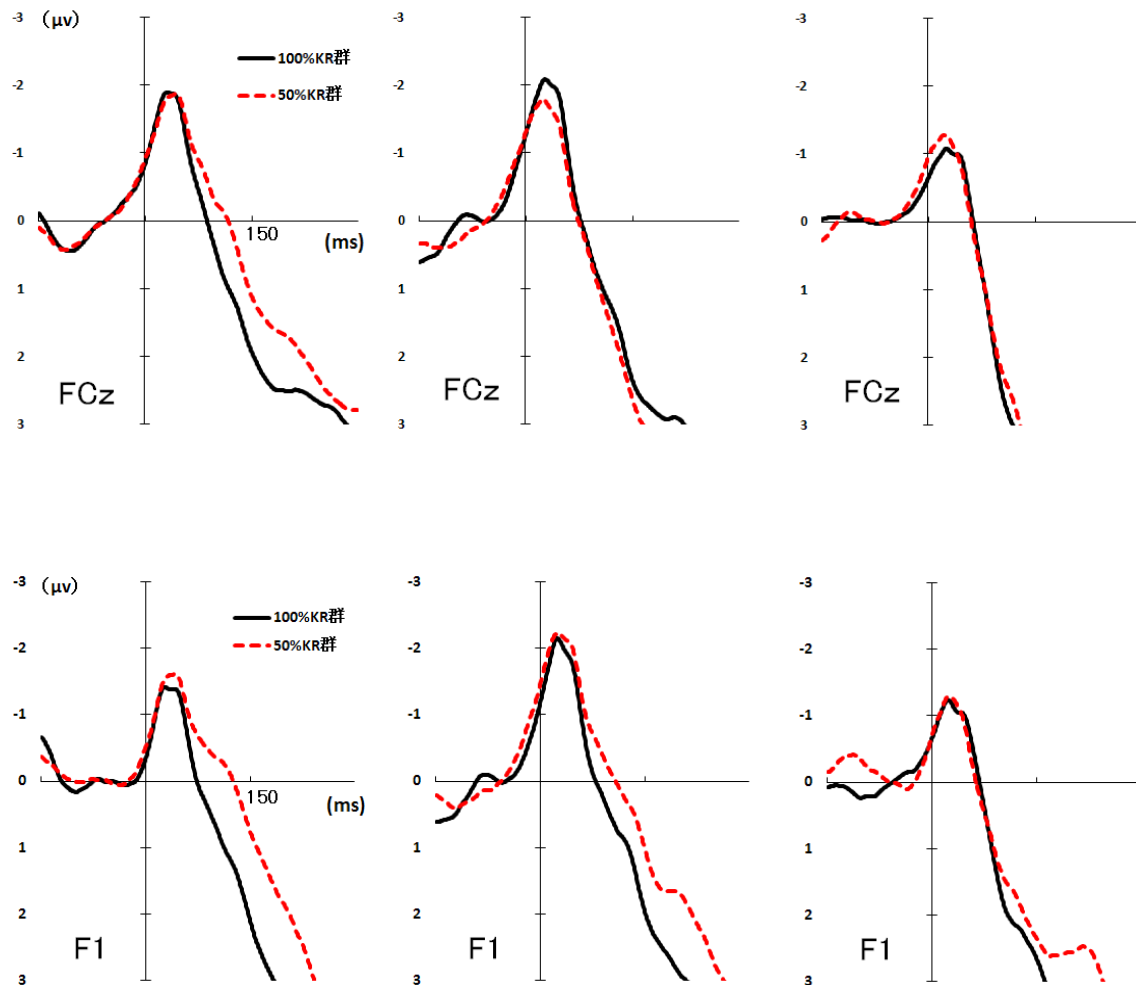


図 12. 課題 A, B, C の ERP 波形

ii. CSD 波形

1) 課題 A

課題 A の fpMP に関する CSD 波形および頭皮上分布は図 13 の通りであった。fpMP 振幅値に関して、対応のない t 検定を行ったところ、両群に差はみられなかった (FCz: $t(24)=0.43$, $n.s.$, F1: $t(24)=0.10$, $n.s.$)。

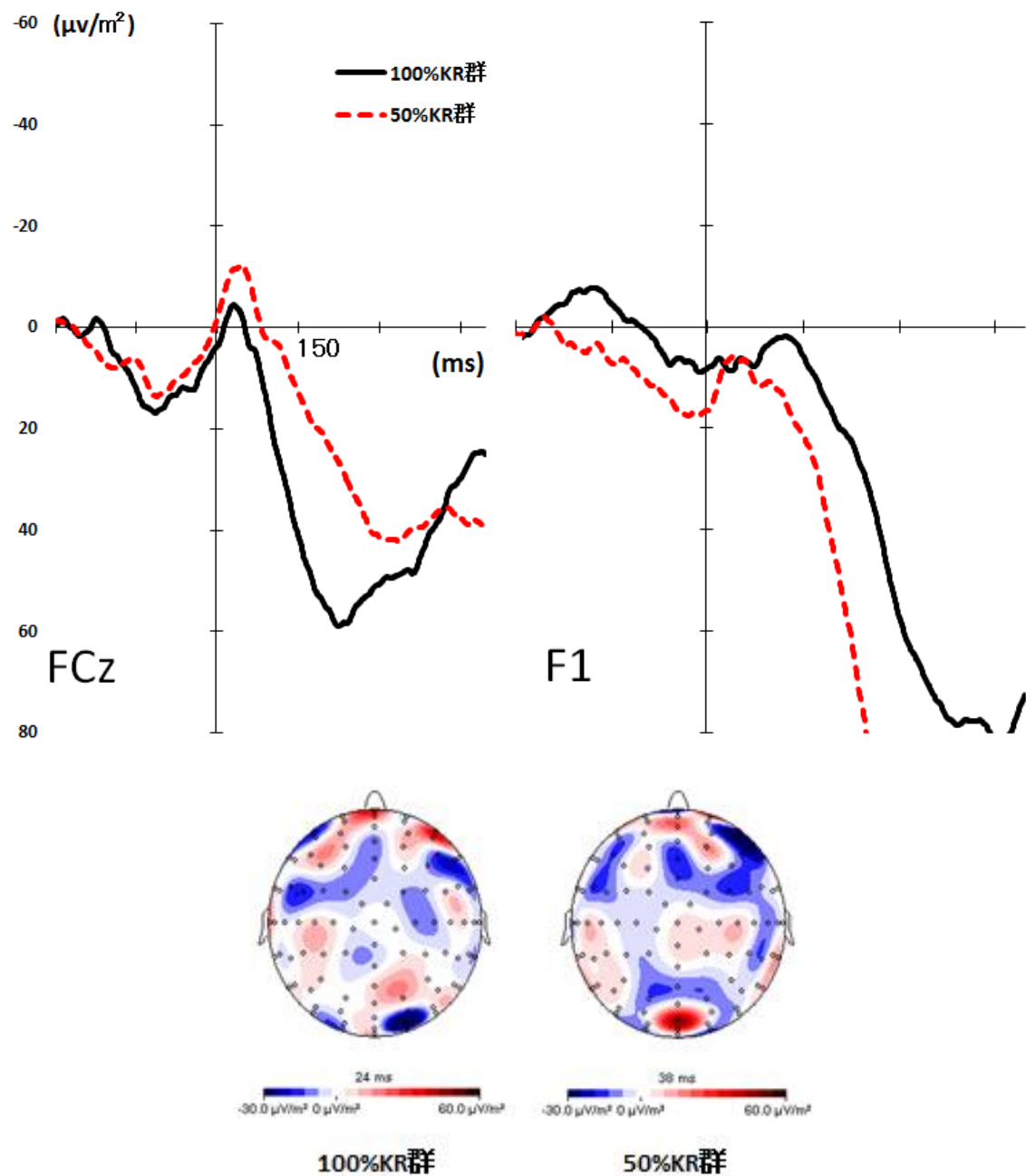


図 13. 課題 A の CSD 波形（上）および頭皮上分布（下）

2) 課題 B

課題 B の fpMP に関する CSD 波形および頭皮上分布は図 14 の通りであった． fpMP 振幅値に関して，対応のない t 検定を行ったところ，F1 において 50%KR 群の方が 100%KR 群よりも陰性の電位が大きかった ($t(24)=3.14$, $p<.01$)． FCz では有意差はなかった ($t(24)=1.13$, $n.s.$)．

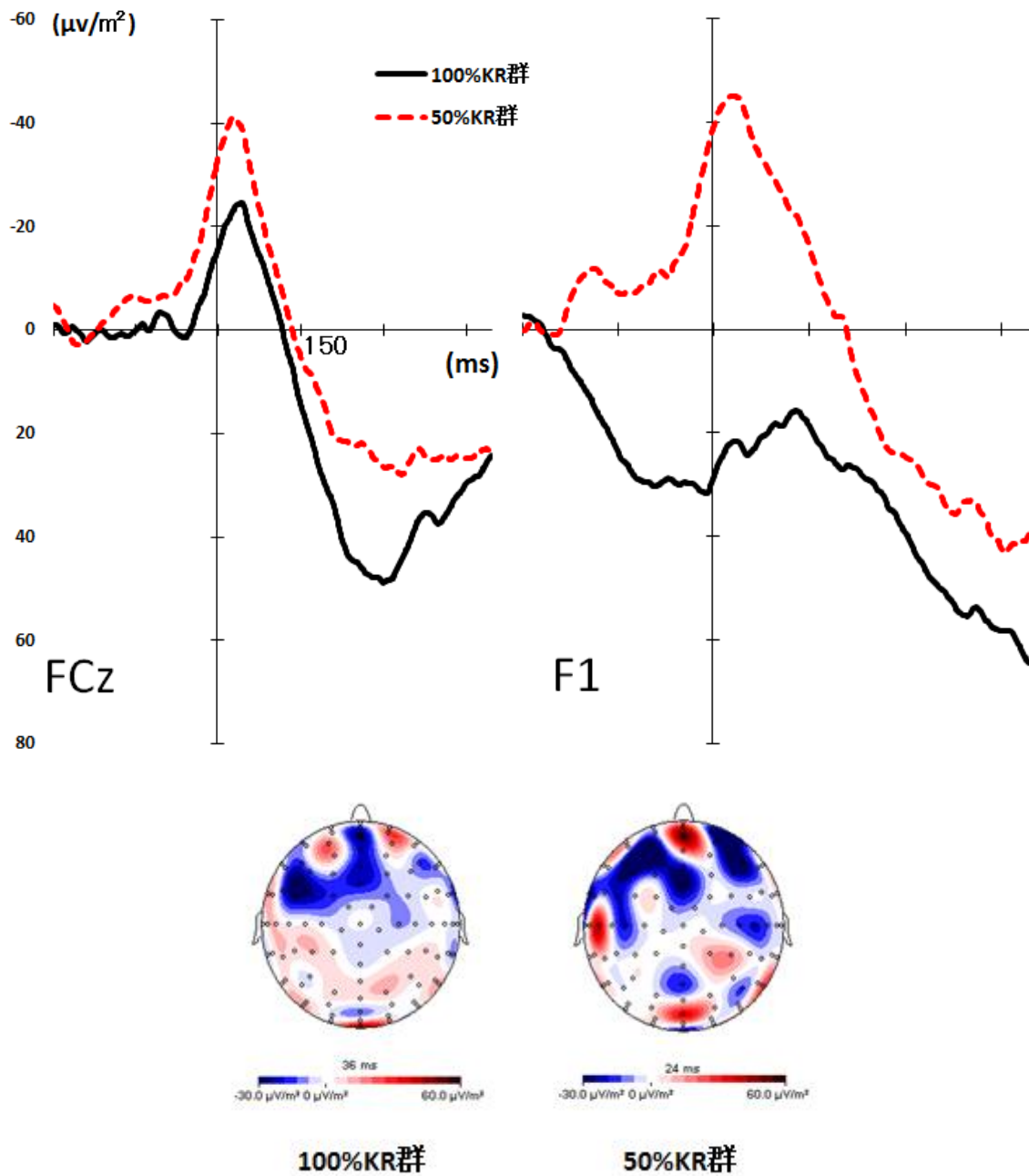


図 14. 課題 B の CSD 波形（上）および頭皮上分布（下）

3) 課題 C

課題 C の fpMP に関する CSD 波形および頭皮上分布は図 15 の通りであった。fpMP 振幅値に関して、対応のない t 検定を行ったところ、両群に差はみられなかった (FCz : $t(24)=0.77$, $n.s.$, F1 : $t(24)=0.63$, $n.s.$)。

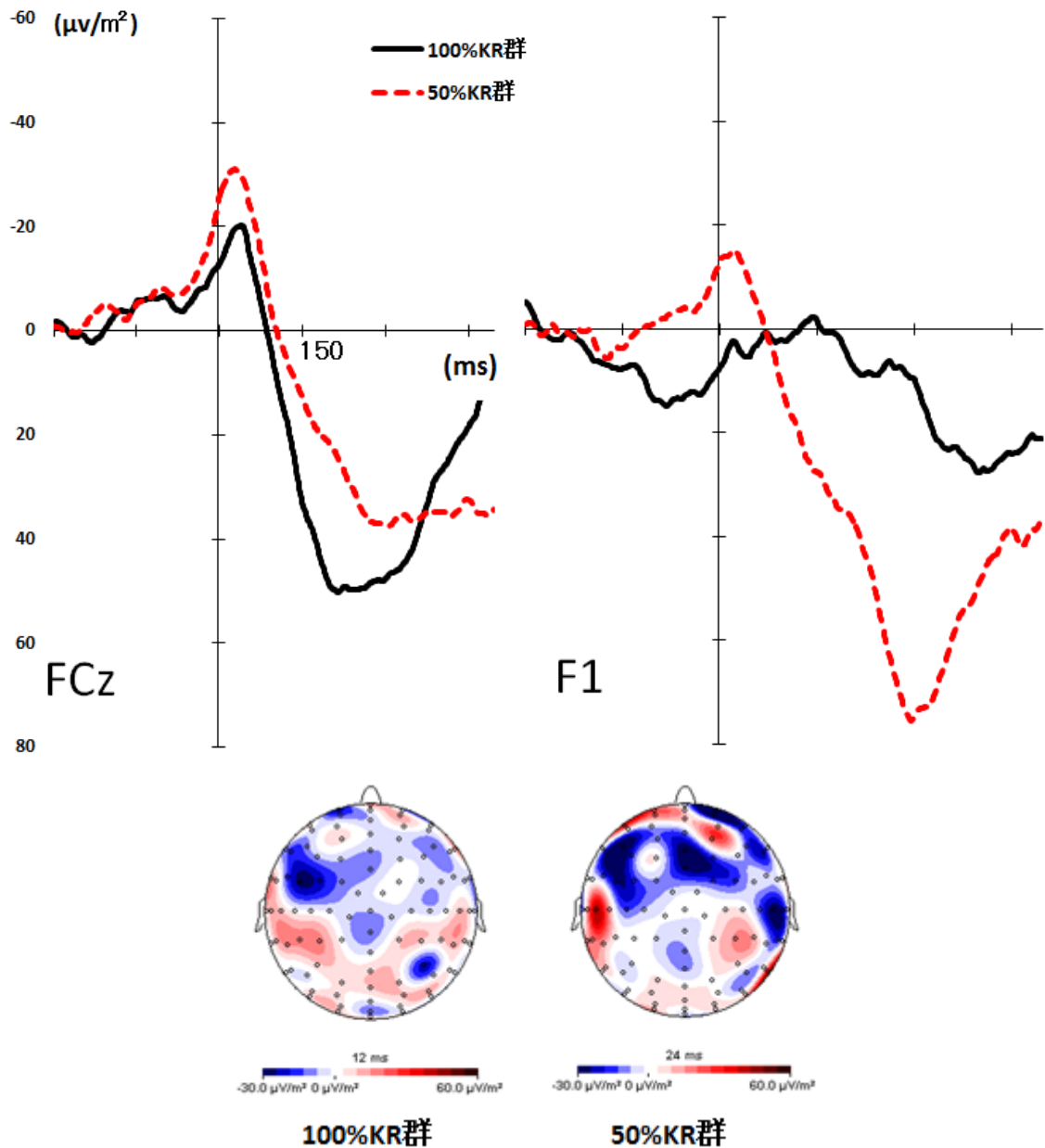


図 15. 課題 C の CSD 波形 (上) および頭皮上分布 (下)

3.4 考察

本実験のタッピング課題において、課題 A, B, C すべてで練習期のパフォーマンスが有意に向上した。しかしながら、100%KR 群と 50%KR 群の間には差がみられなかった。つまり、どちらの群も同じように、スキルを獲得していったこととなる。保持テストに関しては、すべての課題で主効果がみられなかった。すなわち、3 課題ともに直後保持テストから遅延保持テストにかけてスキルの向上または低下、忘却がなく、スキルを維持したと考えられる。また、課題 A および課題 C では、保持テストにおいて群間差がみられなかった。一方、課題 B では保持テストにおいて、50%KR 群の方が 100%KR 群よりも逸脱値が低かった。したがって、課題 B のみ従来の研究通り、低頻度 KR 条件における学習効果がみられた。

脳波の結果に関しては、DC 導出した ERP 波形では、すべての課題で群間差がみられなかった。これは、パフォーマンスの結果において、3 課題ともに KR 頻度に関係なく同様の学習曲線を示したことに起因したものである。

また、頭皮の直下の電流密度を検討するため、ラプラシアン導出した CSD 波形では、課題 A および課題 C において通常の ERP 波形と同様に群間差は認められなかった。しかしながら、課題 B における CSD 波形では、50%KR 群の方が 100%KR 群よりも fpMP 成分の振幅値が大きくなった。この結果は、パフォーマンスの保持テストの結果において課題 B でのみ、群間差が認められたのとは一致する。

したがって、行動指標の観点のみから従来議論されてきた、KR を低頻度呈示するほうが、能動的な脳内情報処理もしくはエラー検出を促進するということを支持する結果といえる。さらに、実験 1 と同様に、練

習期における fpMP 成分の増大は，後のパフォーマンスの向上または維持を示唆するものと考えられる．

第 4 章 実験 3

4.1 はじめに

実験 2 の結果は、KR 頻度の違いによる学習効果を明らかにするには不十分であった。そのため、本実験では目標時間を 1 課題に絞り、より単純化することで、KR 頻度の違いによる学習効果を検討した。さらに、遂行回数を増すことで、学習初期および後期との差も比較した。学習の初期段階では、一次運動野が活発に活動するとされているため (Riek, 2012)、脳波上でその差がみられると予測される。学習の初期段階の方が後期よりも、fpMP 成分が大きくなると考えられる。

また、実験 1, 2 では運動学習課題遂行中の fpMP を検討したが、頭皮上分布に基づくと、エラー関連陰性電位 (error-related negativity: ERN) との異同が不明確である。そのため、実験 1, 2 で検討した陰性電位が実際に fpMP であることを確証する必要がある。実験 2 では、練習期のパフォーマンスに群間差がなく、fpMP 波形にも差がなかった。一方、実験 1 では、練習期にパフォーマンスの低かったランダム群の fpMP が大きかった。エラーの大きさに伴って振幅が大きいという事実は、実験 1, 2 で検討した ERP 成分が fpMP ではなく、エラー検出過程を反映した ERN であった可能性を示唆している。ERN は前部帯状回 (anterior cingulate cortex: ACC) に由来する電位であり、パフォーマンスモニタリングやエラー検出を反映して増大する電位である (Gehring et al., 1993)。そこで、本実験では実験参加者の ERN を評価するために、運動学習課題とは別にエラー反応を誘発する Go/Nogo 課題を設定した。

運動学習中 (タッピング課題) にみられる陰性電位と、Go/Nogo 課題のエラー時にみられる ERN の波形及び頭皮上分布が合致すれば、実験

1,2 で扱った陰性電位は fpMP ではなく ERN ということになる．両者が波形と頭皮上分布の点で異なれば，実験 1,2 で扱った陰性電位は fpMP と同定されることとなる．

実験 2 と同様に，KR を低頻度呈示する方が、能動的な脳内情報処理もしくはエラー検出を促進させるのであれば，ERP 成分に増大が生じると予測される．fpMP であった場合，振幅増大は一次運動野の賦活を意味するため，運動学習の神経基盤としての一次運動野の役割を強調することになる．一方，ERN であった場合，振幅増大は ACC 活動そのもの，もしくは ACC に神経線維を送る大脳基底核(basal ganglia)の活動亢進に起因したことを意味するため，これらの領域の重要性が強調されることとなる．

4.2 方法

4.2.1 実験日時・場所

本実験は、2012年10月16日から12月13日にかけて、早稲田大学100号館570号室スポーツ心理学特殊実験室において行われた。

4.2.2 実験参加者

実験参加者は、矯正を含め視力が正常で心身共に健康な大学生18名（男：11名，女：7名，平均年齢 20.8 ± 0.9 歳）であった。また，実験参加者は実験1，実験2に参加していない，本実験の装置及び課題経験のない者であった。

4.2.3 実験課題

① タッピング課題

KR頻度の違いの効果をみるため，運動学習課題として，実験1，2と同様に，相対的なタイミングを操作したタッピング課題を用いた。本実験では，課題をより単純化するために，これまでの実験とは異なり，1課題のみを行った。本実験の目標時間は $300-600-450(\text{ms})$ であった。区間の目標時間の比率は，これまでと同様に $22.2:44.4:33.3(\%)$ となっていた。課題は，練習期に1ブロック36試行を6ブロック行い，その後KRなしの保持テストとして1ブロック18試行を2ブロック，練習最終ブロック終了から5分後（直後保持テスト）および翌日（遅延保持テスト）に行った。

各区間のタイミングの良し悪しをフィードバックとして3区間分並べて3つ画面に呈示した。目標時間よりも長ければ+、短ければ-、また

目標時間に $\pm 30\text{ms}$ の正解幅を設け、その中に入れば○をそれぞれ呈示した。課題の流れは、初めに画面中央に白い丸が注視点として現れた。実験参加者は、注視点が現れたら自分のタイミングでタッピングを開始した。4回のタッピング後、KRが各群の条件の頻度で呈示された。KRの呈示時間は2.5秒間であった。

② GoNogo 課題

運度学習課題で得られる、ERP成分とエラー関連陰性電位(ERN)との差異を検討するため、ERN課題としても用いられるGoNogo課題を使用した(図16)。

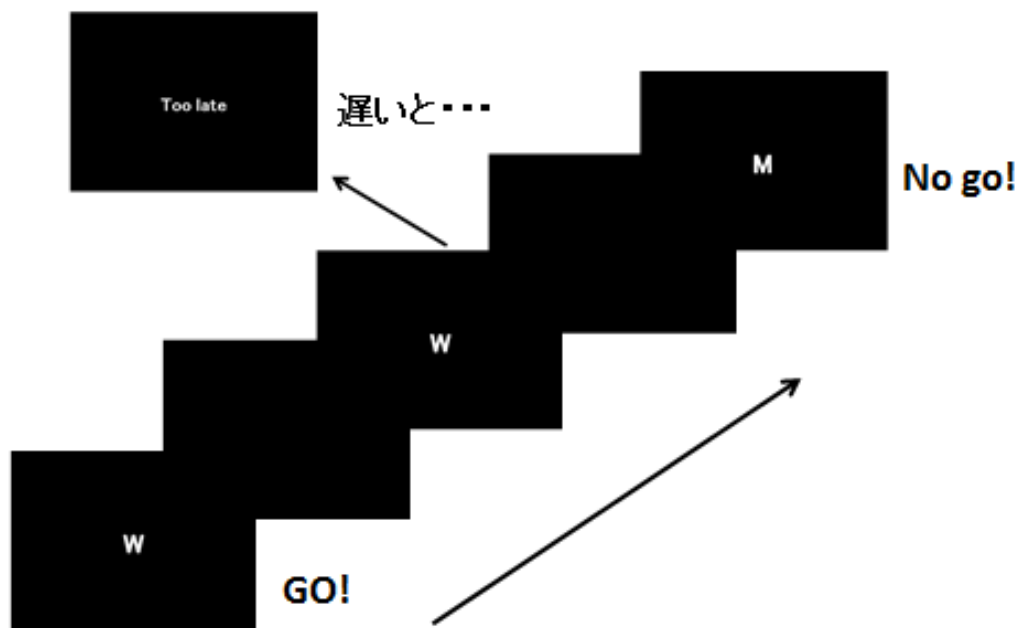


図 16. GoNogo 課題の流れ

この課題は、画面上に呈示されるGO刺激に対してボタンを押して反応し、また、低頻度で呈示されるNoGo刺激に対してはボタンを押さないというものであった。本実験では、GO刺激に「W」、Nogo刺激に「M」を使用した。できる限りすばやく反応してもらうため、刺激呈示後

350ms 以内に反応できなかった場合には「too late」を呈示した。課題は 1 ブロック 100 試行を計 3 ブロック行った。Nogo 刺激の呈示確率は 15%であった。

4.2.4 実験手続き

初めに実験参加者に研究の説明を行い、その後インフォームドコンセント用紙に同意を記入してもらった。次に実験参加者にエディンバラの質問紙を用いて利き手に関する調査を行った。その後、実験参加者に実験室に入ってもらい、リラックスした状態でイスに座らせ、測定に使用する電極を装着した。

実験参加者は、毎回 KR が与えられる 100%KR 群と 2 試行に 1 度 KR が与えられる 50%KR 群にそれぞれ 9 名振り分けられた。実験 1 日目は、タッピング課題を練習 6 ブロックおよび直後保持テスト 2 ブロック行い終了した。翌日、実験参加者には再び実験室に来て頂き、タッピング課題の遅延保持テストを 2 ブロック、GoNogo 課題を 3 ブロック行い、実験を終了した。

4.2.5 測定装置および記録方法

i. 行動指標

刺激呈示と反応時間の測定は、タキストスコープ（岩通アイセル社製 Is-702AVTachistscope）を利用した。

ii. 生理指標

EEG（脳波）、EOG（眼電）、EMG（筋電）を、脳波計（Biosemi 社製 Active-two）を用いてサンプリング周波数 1024Hz で同時記録した。EEG

は，頭皮上 128 部位より DC 導出した．その後，オフラインでバンドパスフィルタ 0.1-30Hz を適用した．また，眼球運動をモニタするため，両目角外 1cm から水平眼球運動，左眼窩上下 2 cm から垂直眼球運動を記録した．さらに，右手人差し指でボタンをタッピングするため，右腕橈骨筋の筋電を測定した．

4.2.6 分析

i . 測定項目

1) パフォーマンス

実験参加者の動作時間の正確性を求めるため，実験 1，2 と同様の指標を用いた．各試行における区間ごとの目標時間と実際の動作時間との誤差の絶対値を合計算することで，各試行の絶対誤差（absolute error: AE）を測った．AE によって逸脱の大きさを表した．

2) 脳波

事象関連電位は，タッピングの 4 回目の反応をトリガにして加算平均した．眼球運動，体動などのアーチファクトが混入している試行は加算平均から除外した．本実験では，トポグラフィによって最大賦活部位と同定した FCz，FC1，F1 (Biosemi electrode coordinate C23, C24, C25) を解析対象とした．

fpMP 成分の振幅値は，4 回目のタッピング後 100ms から 150ms の区間における最大陰性成分とその直前の陽性との差分値を測定した．ベースラインはトリガ前 70-50ms 区間平均電位を用いた．

タッピング課題における脳波は，練習期（全体）では 100%KR 群と 50%KR 群で対応のない t 検定を行った．また，さらに 50%KR 群を KR

呈示後または呈示なし後に分け、それぞれ 100%KR 群と比較した。また、上記の群をそれぞれ群内で、練習期におけるブロック間（ブロック 1-2, 3-4, 5-6）の差を一元配置分散分析によって検討した。保持テストでは、KR 条件（100%, 50%）×保持テスト（直後, 遅延）の 2 要因分散分析を行った。

ii. 分析法

1) パフォーマンス

各課題の練習期の AE に関して、練習スケジュール（100%KR 群, 50%KR 群）×練習試行（6 ブロック）の 2 要因分散分析を行った。また、各課題の保持テストのデータに関しても、練習スケジュール（100%KR 群, 50%KR 群）×保持テスト（直後保持, 遅延保持）の 2 要因分散分析を行った。

分散分析に際し、Mauchly の球面性検定を行い、球面性が仮定された時には Greenhouse-Geisser のイプシロンを用いて自由度、有意確率を再計算した。主効果が認められた時には、Bonferroni 法による多重比較を行った。また、有意水準は 5%とした。

2) 脳波

fpMP 振幅値に関して、課題ごとに対応のない t 検定（ブロック群×ランダム群）を行った。

4.3 結果

4.3.1 タッピング課題

i. パフォーマンス

1) 練習期

タッピング課題の練習期及び保持テストの結果は図 17 の通りであった。練習期は分散分析の結果、ブロックにおいて主効果が認められた ($F(5,80)=15.45, p<.05$)。下位検定の結果、1 ブロックから他の全ブロックにかけて、および、2 ブロックから 3 ブロックにかけて有意に逸脱値が下がった ($p<.05$)。また、交互作用 ($F(5,80)=1.11, n.s.$) および群間差 ($F(1,16)=.00, n.s.$) は認められなかった。

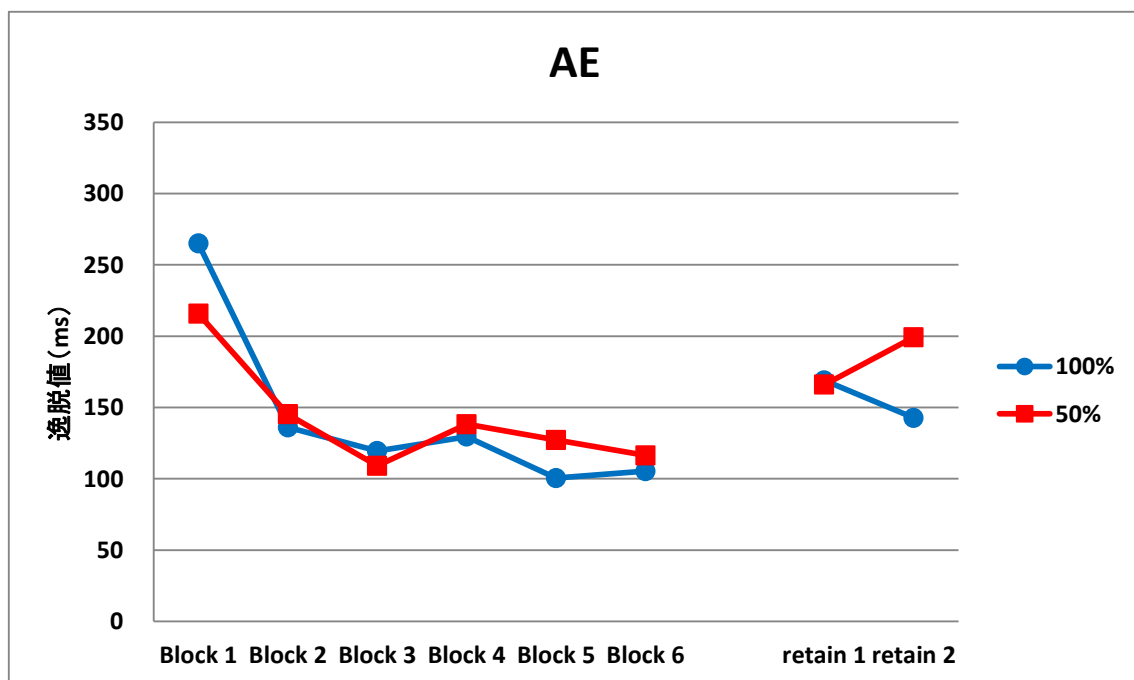


図 17. タッピング課題結果 (100% vs 50%)

2) 保持テスト

保持テストでは分散分析の結果，主効果（ $F(1,16)=.02, n.s.$ ）および交互作用（ $F(1,16)=1.86, n.s.$ ）において統計的な有意差は認められなかった（図 17）。

ii . 脳波

1) 練習期（全体）

① 100%群 vs 50%群

100%KR 群と 50%KR 群のボタン押し 4 回目の時点における fpMP を群間比較したところ（図 18），FC1 において 100%KR 群の方が 50%KR 群よりも有意に大きい傾向であった（ $t(16)=1.74, p<.10$ ）。他の部位では，有意差は認められなかった。

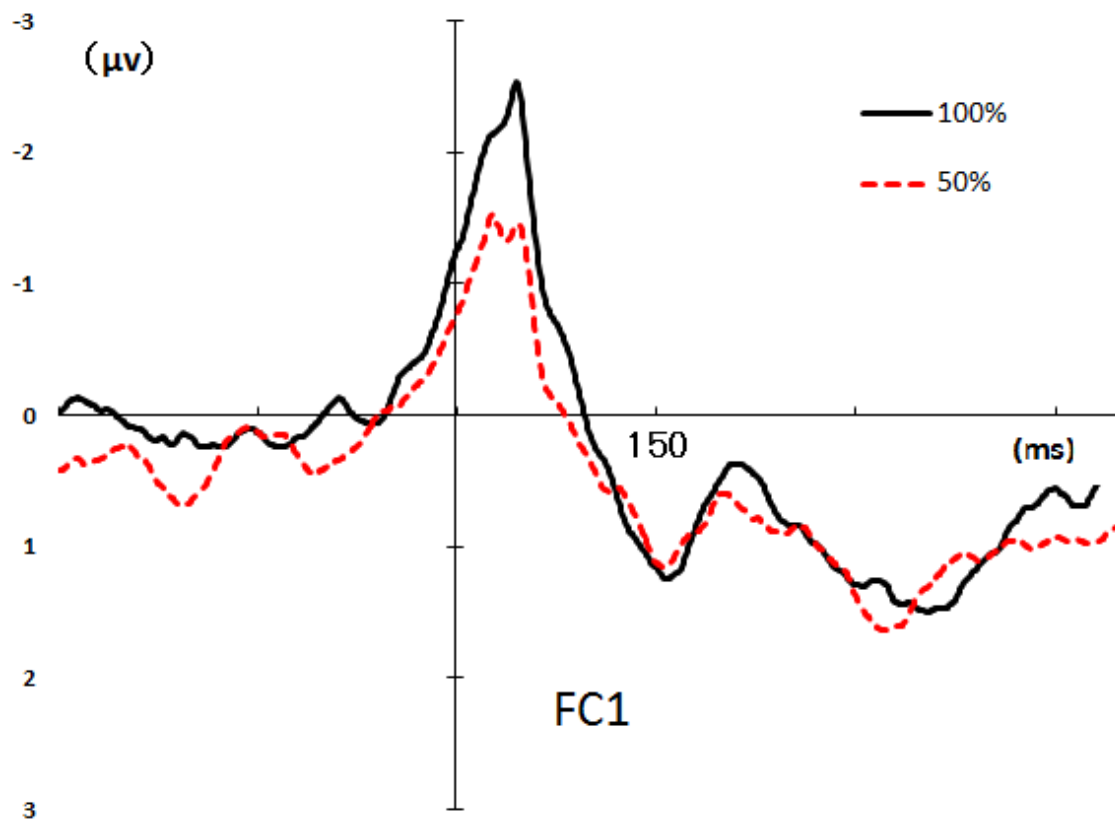


図 18. 100%群および 50%群の波形

② 100%群 vs 50%群 (KR 呈示後試行)

100%KR 群と 50%KR 群の KR 呈示後試行におけるボタン押し 4 回目の時点の fpMP を群間比較したところ, すべての部位で有意差は認められなかった (図 19).

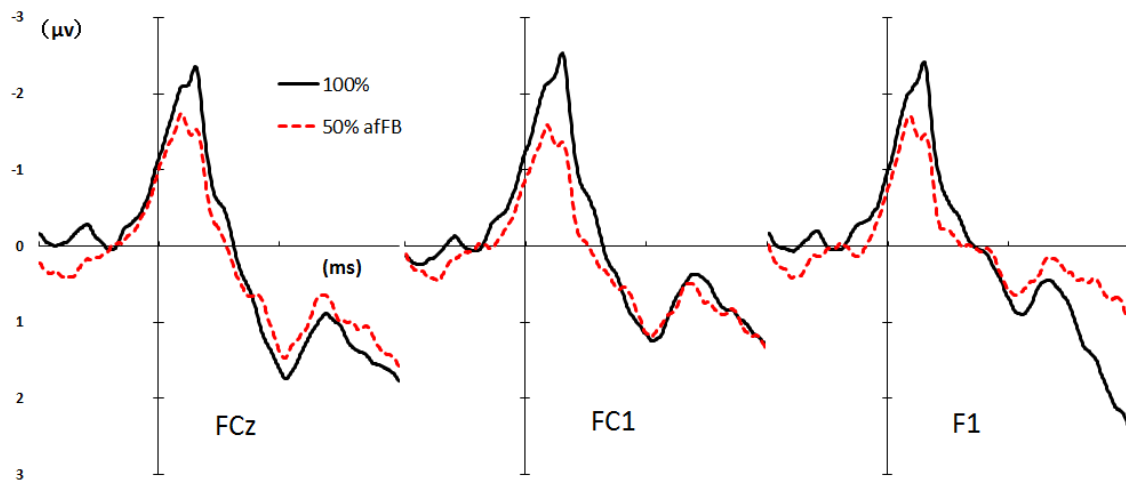


図 19. 100%KR 群および 50% (KR 呈示後試行) KR 群の波形

③ 100%群 vs 50%群 (KR 呈示なし後試行)

100%KR 群と 50%KR 群の KR 呈示なし後の試行におけるボタン押し 4 回目の時点の fpMP を群間比較したところ, すべての部位で有意差は認められなかった (図 20).

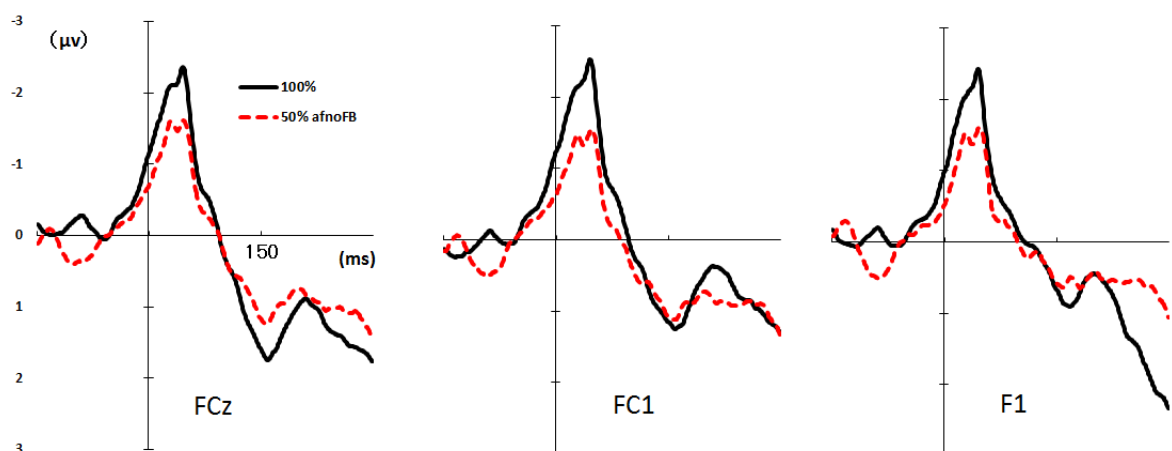


図 20. 100%KR 群および 50% (KR 呈示なし後試行) KR 群の波形

2) 練習期（ブロック間）

100%KR 群内，50%KR 群内および 50%KR（KR 呈示なし後試行）群内それぞれにおけるブロック間での fpMP に関する主効果および交互作用はすべての部位で認められなかった．しかしながら，50%KR（KR 呈示後試行）群内（図 21）ではすべての部位で主効果が認められた（FCz : $F(2,26) = 3.40, p < .05$, FC1 : $F(2,26) = 4.09, p < .05$, F1 : $F(2,26) = 4.18, p < .05$)．下位検定の結果，すべての部位で，ブロック 1-2 からブロック 3-4 にかけて fpMP 振幅が大きくなった．

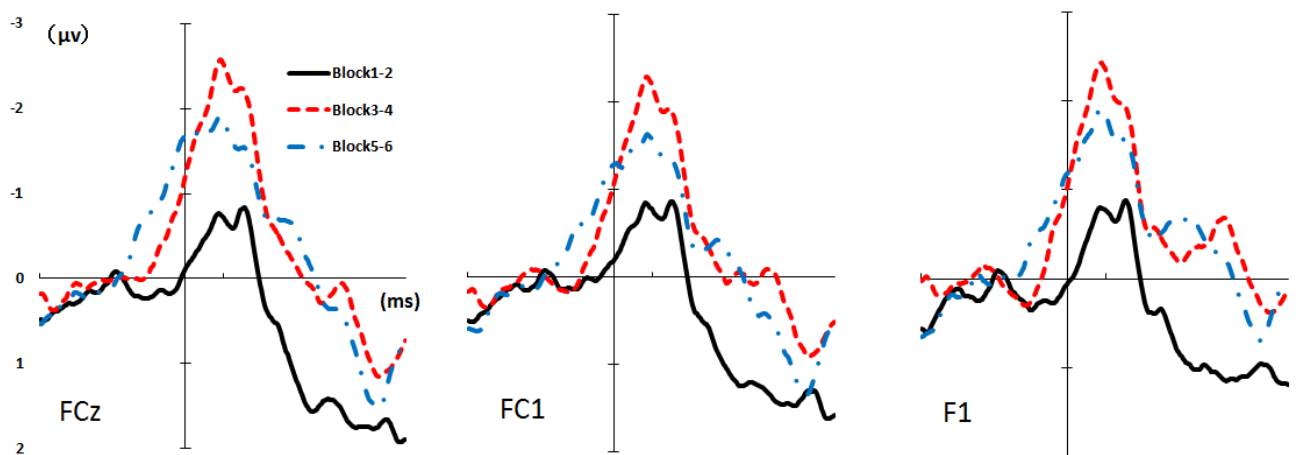


図 21. 50%（KR 呈示後試行）KR 群のブロック毎の波形

3) 保持テスト

保持テストにおける fpMP を KR 条件（100%，50%）×保持テスト（直後，遅延）の 2 要因分散分析を行ったところ，すべての部位で主効果および交互作用は認められなかった．

4.3.2 GoNogo 課題

i. パフォーマンス

GoNogo 課題の結果は，表 1 に示した．

表 1. GoNogo 課題パフォーマンス結果

Go Trials			No go Trials		
反応時間(msec)		失敗(%)	誤反応時間(msec)		エラー率(%)
M		M	M		M
254.7		2.9	231.9		63.5

2) 脳波

GoNogo 課題中の正反応時と誤反応時に関する波形を図 22 に示した．

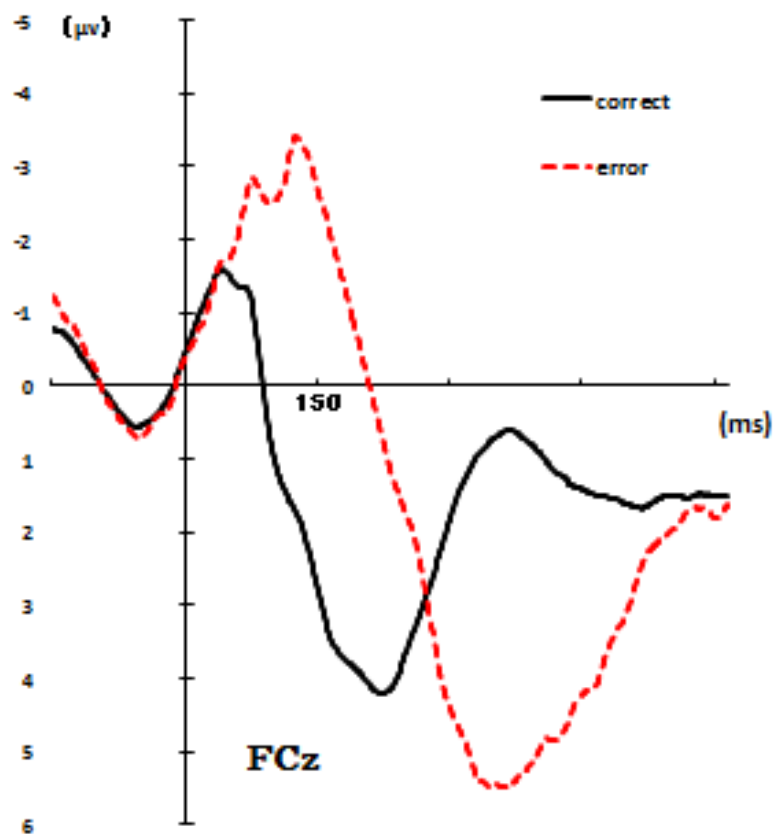


図 22. GoNogo 課題中の ERN 波形

4.3.3 頭皮上分布

タッピング課題遂行中および GoNogo 課題遂行中の頭皮上分布を図 23 に示した。タッピング課題遂行中の fpMP 成分は、動作を行っている反応手（右手）の反対側で賦活した。一方、GoNogo 課題遂行中の ERN 成分は前頭中心部で賦活した。

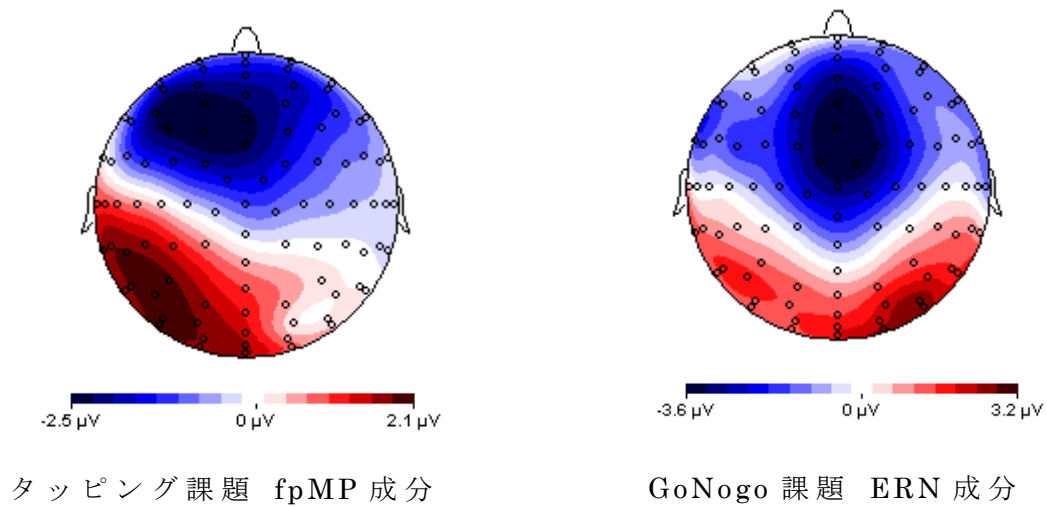


図 23. タッピング課題および GoNogo 課題遂行中の頭皮上分布

4.4 考察

本実験のタッピング課題のパフォーマンスにおいて、練習期では 50% KR 群と 100% KR 群の両群とも群間に差がなく、パフォーマンスの向上が見られた。下位検定の結果、1Block 目と比較して他のすべてのブロックにかけて、および 2Block 目から 3Block 目にかけて有意にパフォーマンスの向上が見られた。また、4Block 目以降にはパフォーマンスの向上は見られなかった。本実験では、タッピング課題に用いた目標時間が 1 課題と単純であったため、早い段階でパフォーマンスの床効果がみられたと考えられる。保持テストでは、50% KR 群と 100% KR 群との間に差はみられなかった。しかしながら、翌日の遅延保持テストでは、100% KR 群のパフォーマンスが向上しているのに対し、50% KR 群のパフォーマンスは低下している。統計的な差がみられなかったのは、サンプル数が少ないことと逸脱値の標準偏差が大きかったことが考えられる。

タッピング課題の結果では、練習期および保持テストにおいて群間差はみられなかった。さらに、統計的な差はなかったが、遅延保持テストでは 50% KR 群のパフォーマンスが低下しているのに対し、100% KR 群のでは向上していた。この結果は、従来の研究の結果に反する。ガイダンス仮説から考えられたのは、KR の頻度が高いとそれに依存してしまうため、能動的な情報処理、あるいは内在的フィードバックが促進されなくなってしまう。一方、KR の頻度が低ければ、その分能動的な情報処理、あるいは内在的フィードバックが促進され、スキルが保持されると予測していた。その結果に反した要因として KR の呈示法が考えられる。この場合の呈示法とは、頻度ではなく視覚的なものである。今回、練習期のパフォーマンスの KR 呈示には「○」「+」「-」を用いた。目標時間からの逸脱値を数字で示すのではなく、逸脱の方向（長い、短い）

のみを示す形であった．KRを実際の数値で示す量的（Quantitative）KRとKRを逸脱の方向性のみで示す質的（Qualitative）KRとの違いを比較した実験（Kilduski, 2003）では，質的KRの方がパフォーマンスが良くなるという結果が得られている．情報量が過剰な量的KRに対し，質的KRは情報量が少ない．そのため，他のKR操作と同様に，ガイダンス仮説によるKRへの依存産出を抑える効果を持つと考えられる．本実験のKRは質的KRにあたり，そのため100%KR群でもパフォーマンスの保持がみられたと考えられる．そして今回の実験では，KR頻度の効果はみられず，質的KRによる学習効果が現れたと考えられる．

また，脳波の結果において，練習期の100%KR群と50%KR群を比較したとき，100%KR群の方が，fpMP成分の振幅値が大きかった．練習期のパフォーマンスでは群間に差が認められなかったのに対し，ERP成分では群間で差が認められた．はじめの予測では，50%KR群の方が大きくなると思っていたが，実際は100%KR群で大きくなった．しかしながら，これは，保持テストのパフォーマンスにおいて，100%KR群の方が良くなっていっていることに関連していることが考えられる．スキル学習の研究で，パフォーマンスが良い条件で運動電位が大きくなるという報告がある（Chiarenza, 1990）．また，KR条件ごとに群内でブロック間を比較したところ，KR呈示後試行条件（50%KR群）でfpMP成分の振幅値に差がみられた．下位検定の結果，ブロック1-2に比べブロック3-4でfpMPが大きくなった．これは，パフォーマンスで1ブロックから3および4ブロック，2ブロックから3ブロックにかけてパフォーマンスが向上したことと一致する．したがって，学習がまさに促進されていること，またはその後のスキルの保持をfpMP成分の振幅値の大きさが反映していると示唆される．

また、本実験の目的の1つであった、運動学習課題遂行中のERP成分とERN成分との区別も、頭皮上分布の差異から明らかとなった。ERNの発生源は従来通り前部帯状回であることが頭皮上分布からわかる。一方、fpMPは反応手（右手）の反対側（左脳半球）で賦活している。さらに、-の電位と+の電位で水平方向のダイポールが形成されており、その間が一次運動野に相当する。したがって、運動学習中のERP成分の発生源はこのあたりであることが示唆された。

第 5 章 総合考察

練習スケジュールを操作した実験 1 では、課題 A において練習期から保持テスト間で、ブロック群とランダム群のパフォーマンスの逆転現象がみられた。つまり、練習期にはパフォーマンスの低かったランダム群が、保持テスト遂行時にはブロック群よりもパフォーマンスが良くなった。文脈干渉効果がみられた課題 A における、練習期の fpMP に着目すると、ランダム群の方がブロック群よりも振幅値が大きかった。また、KR 頻度を操作した実験 2 では、課題 B において 50%KR 群の保持テストでのパフォーマンスが 100%KR 群よりも良かった。この課題 B の練習期の脳波は、ERP 波形では群間に差がなかったものの、CSD 導出した波形では、50%KR 群の方が ERP 成分の振幅値が大きかった。どちらの実験も練習期の ERP 成分が大きかったということは、より能動的な脳内情報処理もしくはエラー検出が促進されていたと考えられる。したがって、これまで考えられてきた、文脈干渉効果における精緻仮説および再構成仮説、さらに KR 操作におけるガイダンス仮説を支持する結果といえる。

また、実験 1, 2 ともに練習期の fpMP 成分が増大している群で、後のパフォーマンスが良くなっている。このことから、fpMP 成分の振幅値は、運動学習中の脳活動の反映のみならず、その後のパフォーマンスの良し悪しを示唆するものであると考えられる。さらに、実験 3 では、学習の初期段階、すなわちパフォーマンスが向上している際の fpMP 成分の方が、学習の後期段階、つまりパフォーマンスの向上がみられず定着している時点よりも大きかった。また、実験 3 では fpMP 成分の発生源に一次運動野を示唆した。学習の初期段階で、学習および運動スキルの保持に関連した脳領域のネットワークの一部である一次運動野の関与を

示唆するこの結果は，運動学習の神経基盤としての一次運動野の役割を強調することとなった．

参考文献

- Battig, W.F., 1966. Facilitation and interference. In: E.A. Bilodeau (ed.), *Acquisition of skill*. New York: Academic Press., 215-244.
- Battig, W.F., 1972. Intratask interference as a source of facilitation in transfer and retention. In: R.F. Thompson and J.F. Voss (eds.), *Topics in learning and performance*. New York: Academic Press. 131-159.
- Battig, W.F., 1979. The flexibility of human memory. In: L.S. Cermak and F.I.M. Craik (eds.), *Levels of processing in human memory*. Hillsdale, NJ: Erlbaum. 23-44.
- Brady, F., 2008. The contextual interference effect and sport skills. *Perceptual Motor Skills*. 106, 461-472.
- Chiarenza, G.A., Vasile, G., & Villa, M., 1990. Goal or near miss! Movement potential differences between adults and children in skilled performance. *International Journal of Psychophysiology*. 10, 105-115.
- Gehring, W. J., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E., 1993a. A neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 4, 385-390.
- Hall, K.G., Domingues, D.A., & Cavazos, R., 1994. Contextual interference effects with skilled baseball players. *Perceptual Motor Skills*. 78, 835-841.
- Kiduski, N. C. & Martin S. R., 2003. Qualitative and Quantitative Knowledge of Results: Effects on Motor Learning, *The American*

Journal of Occupational Therapy, 57(3), 329-336.

Lee, T.D., & Magill, R.A., 1983. The locus of contextual interference in motor-skill acquisition. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition. 9, 730-746.

Magill, R.A., & Hall, K.G., 1990. A review of the contextual interference effect in motor skill acquisition. Human Movement Science, 9, 241-289.

Oldfield, R. C., 1971. The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. Neuropsychologia, 9, 97-113.

Riek, S., Hinder, M. R., & Carson, R.G., 2012. Primary motor cortex involvement in initial learning during visuomotor adaptation. Neuropsychologia, 50, 10, 2515-2523.

Salmoni, A. W., Schmidt, R. A., & Walter, C. B., 1984. Knowledge of results and motor learning: A review and critical reappraisal. Psychological Bulletin, 95, 355-386.

Shea, J. B. & Morgan, R. L. 1979. Contextual interference effects on the acquisition, retention, and transfer of a motor skill. Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory, 5, 2, 179-187.

Shea, J.B., & Zimny, S.T., 1983. Context effects in memory and learning movement information. In: R.A. Magill (ed.), Memory and control of action. Amsterdam: North-Holland. 145-366.

Schmidt, R. A., 1975. A schema theory of discrete motor skill learning. Psychological Review, 82, 225-260.

Schmidt, R. A., Young, D. E., Swinnen, S., & Shapiro, D. C., 1989.

Summary knowledge of results for skill acquisition: Support for the guidance hypothesis. *Journal of Experimental psychology: Learning, Memory, and Cognition*. 15, 352-359.

Shibasaki, H., Barrett G., Halliday, E., & Halliday A. M., 1980. Components of the movement-related cortical potential and their scalp topography. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. 49, 213-226.

Shibasaki, H., & Hallet, M., 2006. What is the Bereitschaftspotential? *Clinical Neurophysiology*. 117, 2341-2356

Smith, P.J., 2002. Applying contextual interference to snowboarding skills. *Perceptual Motor Skills*. 95, 999-1005.

Tarkka, I. M., & Hallett, M., 1990. Cortical topography of premotor and motor potentials preceding self-paced, voluntary movement of dominant and non- dominant hands. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. 75, 36-43.

Winstein, C. J., & Schmidt, R. A., 1990. Reduced frequency of knowledge of results enhances motor skill learning. *Journal of Experimental psychology: Learning, Memory, and Cognition*. 16, 677-691.

Wright, D. L., Smith-Munyon, V. L., & Sidaway, B., 1997. How close is too close for precise knowledge of results? *Research Quarterly for Exercise and Sport*. 68, 172-176.

Wulf, G., & Lee, T. D., 1993. Contextual interference in movements of the same class: differential effects on program and parameter learning. *Journal of Motor Behaviour*. 25, 254-263.

Wulf, G., Lee, T. D., & Schmidt, R. A., 1989. The learning of generalized motor programs: Reducing the relative frequency of knowledge of results enhances memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*. 15, 748-757.

Wulf, G., Lee, T. D., & Schmidt, R. A., 1994. Reducing knowledge of results about relative versus absolute timing: Differential effects on learning. *Journal of Motor Behavior*. 26, 362-369.

謝 辞

本論文作成にあたり，指導教官である正木先生には，数年間に渡りご指導して頂き深く感謝しております．副査を引き受けてくださった彼末一之先生，内田直先生にも御礼申し上げます．また，正木研の紙上先生，べさん，シュさん，日頃よりアドバイス等頂き，ありがとうございました．そして，私の実験を手伝ってくれた学部のゼミ生，何よりも実験に協力して下さった参加者の方々に，感謝しております．