

# 脳波によるヒト前頭部行動モニタリング機能の発達 ：加齢と個人差研究

課題番号 15530478

平成15年度～平成17年度科学研究費補助金 [基盤研究(C)]

研究成果報告書

平成18年 3 月

研究代表者：山崎勝男  
(早稲田大学スポーツ科学学術院)

## 1. はじめに

近年、若年層のいわゆる「キレる」行動に代表されるように、自己行動の評価と情動制御の不全が社会的な問題となっていることは周知の通りである。これらの原因には前頭部の担う行動モニタリング機能と、情動制御機能の低下が大きく関与しており、特に近年の神経科学の進歩によって、「帯状回前部」の機能的な役割がfMRIの研究などから注目されている。しかしながら、実験上の制約が多いfMRIの研究では、帯状回前部が担う行動モニタリング(特にエラー検出機能)や情動制御、さらにこれらの機能とパーソナリティの関係を調べたものがほとんどないという状況がある。そこで本研究では、非侵襲的な手段として最も簡便かつ時間分解能が優れた脳波を用いて、ヒトの前頭部機能について個人差研究を行った。

本研究では事象関連電位と前頭部脳波の左右差を指標とした。脳波の加算平均処理から得られる事象関連電位は、「エラー関連陰性電位」と「前頭内側陰性電位」として測定した。前者はエラー検出機能を反映し、後者はフィードバック信号の情動価を反映しており、いずれも帯状回前部から出現する脳電位である。また、正の情動には左半球前部の賦活、負の情動には右半球前部の賦活がそれぞれ関与して、脳波の $\alpha$ 波帯域に左右差をもたらすために、前頭部脳波の $\alpha$ 帯域の左右差を調べれば、正・負の情動を評価することができる。これまでのところ、帯状回前部機能の指標と、情動評価指標を組み合わせた行動モニタリングや、個人差を体系的に研究した例はみられていない。したがって、本研究によって行動モニタリングに関わる全般的な前頭部の機能と、情動反応に関連するパーソナリティの関係を明らかにできると考えた。

通常、エラー生起時には負の情動が伴うことから、情動反応の強い者ほどエラーに反応して、帯状回前部由来の高振幅陰性電位を示すことが予測され、行動学的にはその後のエラー回避に一層努めるものと推察される。課題の誤反応生起率は認知機能に依存することが多く、誤反応後の修正行動や次試行時の反応遅延は、エラー検出に基づいて行われる。それ故に、誤反応の生起率は前頭部機能を反映する行動指標となり、脳波と対応するものと考えることができる。加えて、誤反応が惹起する前頭内側陰性電位の振る舞いにも、情動反応の個人差が反映されると考えられる。

このような仮説や予測に基づいて本研究を展開した。時間と費用の点から、当初目論んだ加齢の縦断的な研究には完全に着手できなかったが、その基礎となる手掛かりは把握できたと確信している。また本研究では、研究の展開から派生した関連問題にも随時検討を加えた。

## 2. 研究組織

研究代表者：山崎勝男（早稲田大学スポーツ科学学術院教授）

研究協力者：正木宏明（早稲田大学スポーツ科学学術院助教授）

研究協力者：高澤則美（江戸川大学社会学部教授）

研究協力者：田中秀明（追手門学院大学心理学部専任講師）

研究協力者：浅岡章一（早稲田大学スポーツ科学学術院助手）

研究協力者：望月芳子（早稲田大学大学院人間科学研究科博士後期課程）

研究協力者：竹内茂生（国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所  
流動研究員）

## 3. 交付決定額（配分額）

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成15年度	2,800,000	0	2,800,000
平成16年度	500,000	0	500,000
平成17年度	500,000	0	500,000
総計	3,800,000	0	3,800,000

## 4. 研究成果

### 研究論文

- 1) 田中秀明・正木宏明・高澤則美・山崎勝男 2003 情報処理段階とエラー関連陰性電位。臨床神経生理学, 31(5), 426-432. (10月)
- 2) 正木宏明・Gehring・高澤則美・山崎勝男 2004 エラー関連陰性電位—行動モニタリングとしての機能的意義—。生理心理学と精神生理学, 22(1), 3-8. (4月)
- 3) Mochizuki, T., Takeuchi, S., Masaki, H., Takasawa, N., & Yamazaki, K. 2005 An ERP study of the effect of time interval memory trace on temporal processing. International Congress Series 1278, Neurology, 373-376. Elsevier (4月)
- 4) Takeuchi, S., Mochizuki, T., Masaki, H., Takasawa, N., & Yamazaki, K. 2005 Stimulus preceding negativity represents arousal induced by affective picture. International Congress Series 1278 Neurology, 385-388. Elsevier (4月)
- 5) 田中秀明・望月芳子・正木宏明・高澤則美・山崎勝男 2005 エラー関連陰性電位による注意資源の離散的および段階的配分方略の研究。心理学研究, 76(1), 43-50. (4月)
- 6) Masaki, H., Takeuchi, S., Gehring, W.J., Takasawa, N., & Yamazaki, K. 2006 Affective-motivational influences on feedback-related ERPs in a gambling task. Brain Research (in press)

### 学会発表

- 1) 竹内成生・本多麻子・山崎勝男：情動予期と前頭部脳波の偏側性。日本生理心理学会

- 第21回大会プログラム・予稿集, p.40, 2003 (5/26-27) (筑波大), 生理心理学と精神生理学, 21(2), p.118, 2003.
- 2) 渡辺淳宣・本多麻子・山崎勝男：前頭部脳波の非対称性と気分一致効果の関連性。日本生理心理学会第21回大会プログラム・予稿集, p.43, 2003 (5/26-27) (筑波大), 生理心理学と精神生理学, 21(2), p.126, 2003.
  - 3) 望月芳子・田中秀明・高澤則美・山崎勝男：タイミングと随伴性陰性変動。日本生理心理学会第21回大会プログラム・予稿集, p.43, 2003 (5/26-27) (筑波大), 生理心理学と精神生理学, 21(2), p.127, 2003.
  - 4) 望月芳子・田中秀明・高澤則美・山崎勝男：タイミングと事象関連電位。日本心理学会第67回大会発表論文集, p.603, 2003 (9/13, 14, 15) (東大)
  - 5) 竹内成生・正木宏明・高澤則美・山崎勝男：情動予期とSPN。日本臨床神経生理学会第33回学術大会プログラム・予稿集, p.291, 2003 (10/1, 2, 3) (旭川)
  - 6) 望月芳子・田中秀明・正木宏明・高澤則美・山崎勝男：タイミングと事象関連電位。日本臨床神経生理学会第33回学術大会プログラム・予稿集, p.292, 2003 (10/1, 2, 3) (旭川)
  - 7) 田中秀明・望月芳子・高澤則美・山崎勝男：自動的処理とエラー関連陰性電位。日本生理心理学会第22回大会プログラム・予稿集, p.24, 2004 (5/29-30) (仁愛大), 生理心理学と精神生理学, 22(2), p.99, 2004.
  - 8) 望月芳子・竹内茂生・正木宏明・高澤則美・山崎勝男：時間情報処理と緩電位変動。日本生理心理学会第22回大会プログラム・予稿集, p.47, 2004 (5/29-30) (仁愛大), 生理心理学と精神生理学, 22(2), p.167, 2004.
  - 9) 竹内成生・正木宏明・W. J. Gehring・高澤則美・山崎勝男：ギャンブル課題遂行中の動機づけと事象関連電位(1)。日本生理心理学会第22回大会プログラム・予稿集, p.53, 2004 (5/29-30) (仁愛大), 生理心理学と精神生理学, 22(2), p.184, 2004.

- 10) 正木宏明・竹内成生・W. J. Gehring・高澤則美・山崎勝男：ギャンブル課題遂行中の動機づけと事象関連電位(2). 日本生理心理学会第22回大会プログラム・予稿集, p.53, 2004 (5/29-30)(仁愛大), 生理心理学と精神生理学, 22(2), p.185, 2004.
- 11) 竹内成生・正木宏明・望月芳子・高澤則美・山崎勝男：事象関連電位によるエラー補償機構の研究. 日本心理学会第68回大会発表論文集, p.417, 2004 (9/12, 13, 14)(関大)
- 12) 望月芳子・竹内成生・正木宏明・高澤則美・山崎勝男：時間情報処理と事象関連電位. 日本心理学会第68回大会発表論文集, p.703, 2004 (9/12, 13, 14)(関大)
- 13) Mochizuki, Y., Takeuchi, S., Masaki, H., Takasawa, N., & Yamazaki, K.: A study of temporal processing by event-related potentials. 8th International Evoked Potential Symposium. Program & Abstracts. p.378, October (5, 6, 7, 8), 2004 (Fukuoka)
- 14) Takeuchi, S., Mochizuki, Y., Masaki, H., Takasawa, N., & Yamazaki, K. Stimulus preceding negativity represents negative anticipation induced by affective picture. 8th International Evoked Potential Symposium. Program & Abstracts. p.383, October (5, 6, 7, 8), 2004 (Fukuoka)
- 15) Masaki, H., Takeuchi, S., Gehring, W. G., Takasawa, N., & Yamazaki, K.: Motivational influences on the stimulus-preceding negativity and the loss-related medialfrontal negativity. Society for Psychophysiological Research 44th Annual Meeting, October 20-24, 2004 (Santafe, New Mexico) Psychophysiology, 2004, Supplement 1, S101.
- 16) 正木宏明・竹内成生・望月芳子・高澤則美・山崎勝男：エラー反応後の反応時間遅延の原因解明—偏側性準備電位による検討—. 日本臨床神経生理学会34回学術大会プログラム・抄録集, 2004 (11/17, 18, 19)(東京). 臨床神経生理学, 32, 5, p.558, 2004.

- 17) 望月芳子・竹内成生・正木宏明・高澤則美・山崎勝男：時間間隔情報処理と事象関連電位. 日本生理心理学会第23回大会プログラム・予稿集, p.30, 2005 (5/28-29)(愛知学院大), 生理心理学と精神生理学, 23(2), p.69, 2005.
- 18) 浅岡章一・正木宏明・福田一彦・山崎勝男：日中の短時間仮眠がエラー反応の脳内モニタリングに与える影響. 日本生理心理学会第23回大会プログラム・予稿集, p.44, 2005 (5/28-29)(愛知学院大), 生理心理学と精神生理学, 23(2), p.109, 2005.
- 19) 竹内成生・望月芳子・正木宏明・高澤則美・山崎勝男：ギャンブル課題遂行中の事象関連電位. 日本生理心理学会第23回大会プログラム・予稿集, p.59, 2005 (5/28-29)(愛知学院大), 生理心理学と精神生理学, 23(2), p.155, 2005.
- 20) 正木宏明・竹内成生・高澤則美・山崎勝男：ギャンブル課題遂行中のERPとパーソナリティ. 日本生理心理学会第23回大会プログラム・予稿集, p.60, 2005 (5/28-29)(愛知学院大), 生理心理学と精神生理学, 23(2), p.156, 2005.
- 21) 竹内成生・望月芳子・正木宏明・高澤則美・山崎勝男：ギャンブル課題遂行時のSPNとパーソナリティ. 日本心理学会第69回大会発表論文集, p.461, 2005 (9/11, 12, 13)(慶應大)
- 22) 望月芳子・竹内成生・正木宏明・高澤則美・山崎勝男：時間間隔情報処理と事象関連電位. 日本心理学会第69回大会発表論文集, p.663, 2005 (9/11, 12, 13)(慶應大)

## 5. 資料

資料の掲載順序は3-6頁に記載した「4. 研究成果」に従った。

# 資 料



## 情報処理段階とエラー関連陰性電位

田中秀明\* 正木宏明\*\* 高澤則美\*\*\* 山崎勝男\*\*\*\*

**要旨** エラー関連陰性電位 (error-related negativity: ERN) はエラーの検出によって惹起される陰性の事象関連電位であり、その振幅はエラー検出に配分される注意資源量を反映する。本研究では、ER N 振幅を指標として、二重課題下の異なる情報処理段階に対する負荷が、エラー検出の注意資源配分方略に及ぼす影響について検討した。被験者は主課題である認知的葛藤課題に両手で反応すると同時に、副課題である聴覚刺激の選択反応課題に右足で反応した。その結果、副課題の難易度の上昇によって注意資源の配分量は減少し、それに伴って主課題の反応時間が延長し ER N 振幅が減少した。また、反応出力段階ではなく、刺激選別段階に負荷をかけた条件で ER N 振幅は減少した。本研究の結果は、ER N 脳内発生源である前部帯状皮質の機能的特性に起因していることが示唆された。

### 目的

選択反応時間課題のエラー反応に伴い、エラー関連陰性電位 (error-related negativity: ERN) が脳波上に観察される<sup>3,4)</sup>。ER N は反応後約 60 ms に陰性の頂点振幅を示し、前頭-中心部に分布する。ER N はエラー検出に関連する認知処理機能を反映し<sup>9)</sup>、その脳内発生源は fMRI を用いた研究によって前部帯状皮質 (anterior cingulate cortex) に推定されている<sup>9)</sup>。また ER N 振幅は、エラー検出に必要な注意資源配分量を反映して、増大すると報告されてきた<sup>10)</sup>。

従来の注意資源に関するモデルを概観すると、刺激選別、反応選択、反応出力といった認知情報処理過程の各処理段階に対して、単一の汎用注意資源から注意をそれぞれに配分する単一競合モデル<sup>5)</sup>と、各処理段階が独自に有する注意資源を当該処理段階に配分する複数競合モデル<sup>15)</sup>に大別される。複数競合モデルによると、2つの実験課題を同時遂行する二重課題下では、

両課題が同一の認知情報処理段階で処理される場合には、注意資源の競合は激化するものの、異なる処理段階で処理される場合には注意資源の競合は生じないという。

Scheffers ら<sup>10)</sup>は、Sternberg search task を用いて、注意資源の配分方略に伴う ER N 振幅変動が、単一競合モデルと複数競合モデルのいずれに適合するかを検討したところ、両モデルを支持する結果を得た。しかしながら、彼らは単一課題しか用いておらず、二重課題での注意資源競合を重視した複数競合モデルを検証するには、手続き上もともと不適切であったと指摘できる。この点を克服するために、田中ら<sup>12)</sup>は二重課題を用いて、注意資源の配分方略と ER N 振幅変動との関係を検討した。その結果、ER N 振幅は単一課題に比較して二重課題条件で減少するが、二重課題の難易度操作には影響されないことをみいだした。この知見は、ER N の振幅変動が単一競合モデルと複数競合モデルのいずれにも適合しないことを示唆している。ただし、田中ら<sup>12)</sup>は刺激選別段階の難易度だけを操作し、反応出力段階は操作していないため、ER N 振幅変動と同一の処理段階の競合を重視する複数競合モデルとの関連性を完全に否定することはできない。ER N は反応

\* 早稲田大学大学院人間科学研究科

\*\* 日本学術振興会

\*\*\* 科学警察研究所

\*\*\*\* 早稲田大学人間科学部

受付日: 2002年7月10日

採択日: 2002年11月7日

出力段階の処理を反映することから<sup>7)</sup>、刺激選別段階よりも反応出力段階の難易度を操作する方が、複数競合モデルを検討するには適しているからである。そこで本研究は、刺激選別段階のみならず、反応出力段階にも難易度を操作する二重課題条件下に、エラー検出処理に対する注意資源の配分方略と ERN との関係を検討した。

刺激選別および反応出力段階に対する負荷に関わりなく、単一課題→低難易度の二重課題条件→高難易度の二重課題条件の順にパフォーマンスの成績と ERN 振幅の両者が段階的に低下した場合は、単一競合モデルが支持されることになる。他方、反応出力段階に負荷をかけた二重課題条件と他の条件との間にパフォーマンスの差がなく、ERN 振幅のみ差があった場合には、複数競合モデルが支持されることになる。

## 方法

### 被験者

四肢が右利きの成人 12 名(男子 7 名, 女子 5 名, 平均年齢  $23.1 \pm 1.5$  歳)を被験者とした。実験前に全被験者に対して実験手続きと測定方法を説明し、実験参加の同意を得た。

### 課題

本実験では以下の 4 条件を設定した。

**単一条件：**視覚的な認知的葛藤課題を被験者に課した。認知的葛藤課題は、“H”と“S”で構成される文字列(視角  $4.3^\circ \times 0.7^\circ$ )の中央文字(標的刺激)に対して反応するもので、標的刺激の両側 2 文字はノイズ刺激であった<sup>2)</sup>。視覚刺激は標的文字とノイズ刺激との組み合わせから、一致刺激(HHHHH, SSSSS)と不一致刺激(SSHSS, HSHHH)に分類した。各刺激は、被験者の前方 1 m に設置した CRT 上に等確率でランダム呈示され、標的刺激に対してできるだけ速くかつ正確に、左第三指あるいは右第三指によるキー上げ反応を行うように被験者に要請した。左右両手指用の反応キーは、それぞれ被験者前方 30 cm の位置に左右対称に設置した。標的文字と反応肢との割り当ては、被験者間でカウンターバランスをとった。

**周波数条件：**単一条件で用いた認知的葛藤課題を主課題とし、聴覚刺激に対する選択反応課題を副課題とする二重課題を遂行した。副課題で用いた聴覚刺激は、

高音(587 Hz)と低音(196 Hz)の 2 種類(持続時間 50 ms, 音圧 50 dB SPL)であり、被験者には主課題遂行中に呈示される聴覚刺激に対して、高音あるいは低音のいずれかに対して反応するように教示した。聴覚刺激は、刺激間隔 3,000 ms で被験者前方 150 cm に設置されたスピーカから呈示した。反応様式は、前方 30 cm の床上に設置したキーに対して、利き足で足趾背屈運動によるキー上げ反応を行うことであった。2 種類の聴覚刺激と標的刺激との割り当ては被験者間でカウンターバランスをとった。聴覚刺激はランダム呈示し、呈示確率は各 50%とした。

**呈示時間条件：**単一条件で用いた認知的葛藤課題を主課題とし、聴覚刺激に対する選択反応課題を副課題とする二重課題を遂行した。呈示時間条件の副課題で用いた聴覚刺激は、長音(持続時間 100 ms)と短音(持続時間 50 ms)の 2 種類(いずれも 587 Hz, 音圧 50 dB SPL)であった。聴覚刺激の刺激間隔、聴覚刺激の呈示順序および呈示率は、全て周波数条件と同一であった。反応様式は、周波数条件と同様に利き足で足趾背屈運動によるキー上げ反応を行うことであり、2 種類の聴覚刺激と標的刺激との割り当ては被験者間でカウンターバランスをとった。

**運動継起条件：**単一条件で用いた認知的葛藤課題を主課題とし、聴覚刺激に対する選択反応課題を副課題とする二重課題を遂行した。副課題は反応様式を除いて周波数条件と同一であった。反応様式は、前方 30 cm の床上に設置された第 1 キーに対してまず足趾背屈運動によるキー上げ反応を行い、次に第 1 キーの右側 10 cm にある第 2 キー、その次に第 2 キーの右側 10 cm にある第 3 キーを順に押し、最後に足を第 1 キーに戻すこと(キー押し)であった。

### 手続き

いずれの条件も認知的葛藤課題は、CRT 上に注視点“+”を 300 ms 間呈示し、続く 500 ms 間のブランク後に文字列を 300 ms 間呈示した。試行間隔は 2000 ms から 4,000 ms の範囲内でランダムに変動させた。単一条件、周波数条件、呈示時間条件、運動継起条件の実施順序は被験者間でカウンターバランスをとった。認知的葛藤課題を各条件とも 4 ブロック(100 試行/ブロック)、計 12 ブロック実施した。被験者には、できるだけ速く正確に反応することと、主課題遂行を

優先するように教示した。

### 記録および分析方法

脳波 (EEG), 垂直眼球運動 (EOG), 筋電図 (EMG) を脳波計 (NEC 三栄製 Synafit 1000) を用いて同時記録した。EEG は, Fz, Cz, Pz, C3, C4 から両耳垂結合を基準に時定数 5 s, 高域遮断周波数 100 Hz で測定した。EOG は左眼窩上下縁部から時定数 5 s, 高域遮断周波数 100 Hz で測定した。EMG は両前腕の尺側手根伸筋から時定数 0.03 s, 高域遮断周波数 1,500 Hz で測定した。電極は全て銀塩化銀電極を用い, 接触抵抗値を 5 k $\Omega$  以下とした。全測定事象はデータレコーダ (NF Electronic Instruments 製 5870 PCM DATA Recorder) にオンラインで磁気記録すると同時に, サンプリング周波数 200 Hz で A/D 変換した。EEG は,  $\pm 100 \mu\text{V}$  以上の眼球運動, 体動などのアーチファクト混入試行は EEG の加算平均処理から除外した。ERN は中心部優勢 (Cz) に出現する<sup>4,9)</sup>ことが知られている。本研究においても Cz で ERN 振幅が最も優勢に出現したことから, ERN の解析対象部位を Cz に限定した。ERN 波形には 10 Hz のローパス・フィルタをかけた。

ERN 頂点振幅は, 反応開始前 100 ms 間の平均電位をベースラインとして, 反応後 0~100 ms 区間内の最大陰性電位を計測した。また, 3 水準以上の繰り返しのある 1 要因分散分析では, タイプ I エラーを抑制するために, Greenhouse-Geisser の  $\epsilon$  による自由度補正を適用した。多重比較には Tukey 法を用いた。

EMG は 30 Hz のローパス・フィルタをかけた後に, 両波整流し, 刺激呈示前 200 ms~100 ms 区間の振幅値について標準偏差 (SD) を試行毎に算出した (以下, 基線部 SD)。反応開始後に EMG 振幅が基線部 SD の 4 倍に達しなかった場合は無反応, 4 倍以上の場合は反応生起とみなした。

主課題のエラーは, 誤反応肢側にキー上げ反応が生じた場合を Overt エラーと定義した。誤反応肢側にキー上げ反応には至らなかったものの, EMG 反応が認められた場合は EMG エラーと定義した。本研究では EMG エラー試行および主課題の反応時間が, 200 ms 未満あるいは 1,000 ms 以上の試行を加算平均処理から除外した。

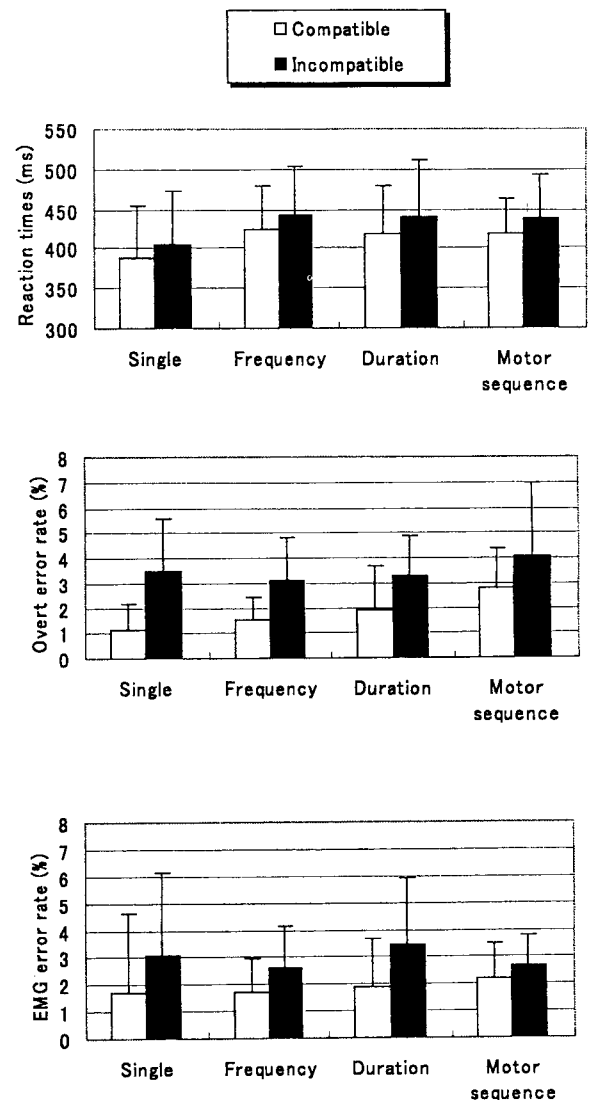


Fig. 1 Mean reaction times (ms), mean overt error rate, and mean EMG error rate for compatible and incompatible stimuli of primary task (single, frequency, duration and motor sequence) in the four experimental conditions.

## 結果

### パフォーマンス

Fig. 1 の上段は主課題・正反応試行の平均反応時間を, 課題条件別および刺激呈示別に求めた結果である。刺激一致性 (2)  $\times$  課題条件 (4) の 2 要因分散分析の結果, 不一致刺激に対して反応時間の遅延が認められた ( $F(1, 11) = 37.09, p < .0001$ )。また, 反応時間は課題条件間にも有意差がみられ ( $F(3, 33) = 6.16, \epsilon = .87, p < .01$ ), 単一条件に比較して他の 3 条件で有意に遅延した (いずれも  $p < .05$ )。

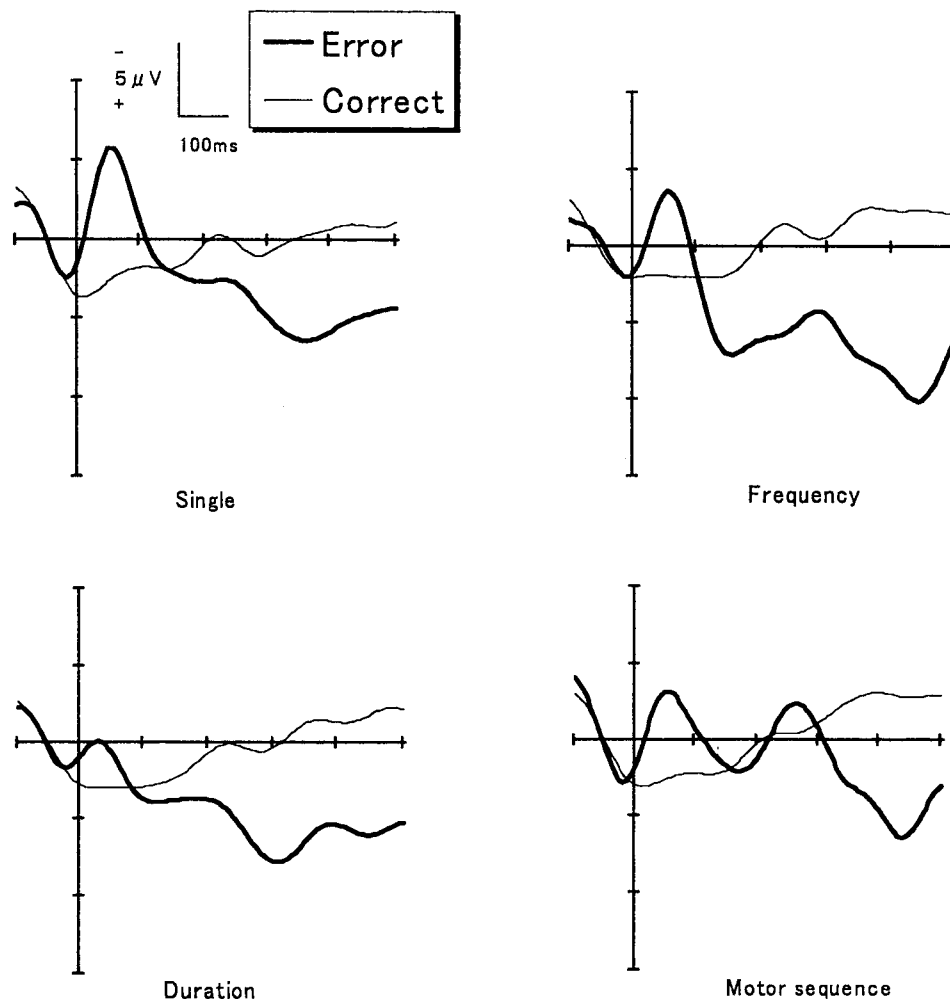


Fig. 2 Grand-mean ERP waveforms (response synchronized) at Cz, for error and correct trials in primary task. Only incompatible trials were included in the averages.

Fig. 1 中段は、主課題の平均 Overt エラー率を、課題条件別および呈示刺激別に求めた結果である。刺激一貫性 (2) × 課題条件 (4) の 2 要因分散分析の結果、一致刺激よりも不一致刺激に対するエラー率は有意に高かった ( $F(1, 11) = 17.52, p < .05$ )。また課題条件の主効果も有意傾向であった ( $F(3, 33) = 2.48, \epsilon = .76, p < .10$ )。引き続き多重比較を行ったところ、単一条件に比較して運動継起条件の方が平均 Overt エラー率は高い傾向を示した ( $p < .10$ )。

Fig. 1 下段は主課題の平均 EMG エラー率を、課題条件別および呈示刺激別に求めた結果である。刺激一貫性 (2) × 課題条件 (4) の 2 要因分散分析の結果、一致刺激よりも不一致刺激に対するエラー率が有意に高かった ( $F(1, 11) = 23.90, p < .001$ )。

副課題における正反応試行の平均反応時間を課題条件別に求めた結果、周波数条件では  $806.4 \pm 43.9$  ms (mean  $\pm$  SD)、呈示時間条件では  $835.5 \pm 61.0$  ms、運動継起条件では  $803.1 \pm 67.9$  ms であった。1 要因分散分析の結果、条件間に有意差はなかった ( $F(2, 22) = 2.08, \epsilon = .80, n.s$ )。

#### 主課題・不一致刺激の ERN

主課題の一致刺激では Overt エラーの試行数が少なく、十分な加算回数が確保できなかったため、解析対象を主課題の不一致刺激に限定した。Fig. 2 は、主課題・反応開始時点をトリガとした Cz の総加算平均波形を、反応の正誤別および課題条件別に示したものである。各条件ともに Overt エラー試行では反応後 0~100 ms 区間に陰性シフトする ERN が同定され

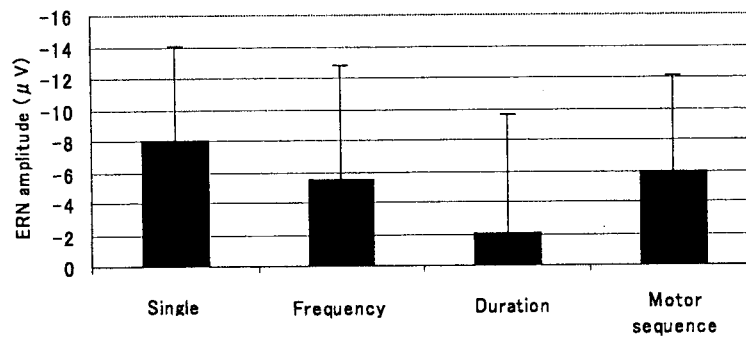


Fig. 3 Response-synchronized average error-related negativity amplitudes for the Cz in all the condition in the primary task. Only incompatible trials were included in the averages.

た。また、ERN 出現後、反応開始からおよそ 300 ms から 400 ms の区間に頂点振幅を示す陽性成分 (error-related positivity : Pe) が報告されている<sup>3)</sup>。Fig. 2 においても、全条件に共通してエラー反応後 300 ms から 500 ms の区間に頂点振幅を示す Pe が観察された。

Fig. 3 は、各条件の ERN の平均頂点振幅値を課題条件別に求めた結果である。ERN の平均頂点振幅を 1 要因分散分析したところ、有意差がみられた ( $F(3, 33) = 4.94$ ,  $\epsilon = .70$ ,  $p < .05$ )。多重比較の結果、単一条件よりも呈示時間条件の ERN 頂点振幅は有意に小さかった ( $p < .05$ )。

### 考 察

本研究では、異なる認知情報処理段階に負荷を加えた条件を設定して、注意資源配分とエラー処理との関係を検討した。その結果、主課題の平均反応時間は、単一条件に比較して他の 3 条件で有意に遅延した。主課題を優先して反応するように教示したにも関わらず、主課題の平均反応時間に条件差が生じたことは、副課題に対して注意資源が配分されたことを示唆している。主課題の Overt エラー率は、単一条件に比べて運動継起条件で増加傾向がみられた。これらの結果は、副課題の追加によって本来主課題に配分されていた注意資源が、副課題に投入されたことを示唆している。ただし、聴覚刺激は周波数よりも呈示時間を弁別する方が困難だといわれている<sup>14)</sup>。本研究の呈示時間条件は周波数条件と異なり、同一周波数の聴覚刺激を用いたことから刺激弁別は困難であったと考えられる。また、運動継起条件では主課題の Overt エラー率が増加

したことから、反応出力段階での負荷の高まりが示唆された。したがって、周波数条件、呈示時間条件、運動継起条件の難易度には質的差異があったと考えられる。

主課題の ERN 頂点振幅は、単一条件よりも呈示時間条件で有意に減少した。この結果は田中ら<sup>12)</sup>の知見と合致している。呈示時間条件は周波数条件と同じレベルの反応時間と Overt エラー率であったにも関わらず、ERN 振幅のみ有意に減少した。この結果は、呈示時間条件が周波数条件と同水準のパフォーマンスを維持するうえで、より多くの注意資源を必要としたため、エラー検出機能に配分される注意資源が減少し、それを反映して ERN 振幅の減少が生じたと解釈できる。

本実験の呈示時間条件では、副課題の刺激選別段階に負荷を加え、運動継起条件では副課題の反応出力段階に負荷を加えた。したがって、主課題の ERN 振幅が運動継起条件で減少すれば、主副の両課題間の反応出力段階における注意資源の競合を示したことになる。複数競合モデル<sup>15)</sup>を支持することになる。しかしながら、呈示時間条件のみに ERN 振幅の減少がみられ、刺激選別段階での競合を示唆するにとどまった。

また、主課題の反応時間には単一条件と他の 3 条件との間に有意差がみられたにもかかわらず、ERN 振幅には単一条件と呈示時間条件との間にだけ有意差がみられた。単一競合モデル<sup>9)</sup>が支持されるのであれば、反応時間と同様、ERN 振幅にも単一条件と他の 3 条件との間に有意差が生じるはずである。したがって、本研究の結果は、エラー処理に対して複数競合モデル

および単一競合モデルのいずれとも合致しない注意資源の配分方略が適用されていたことを示唆している。上記解釈は田中ら<sup>12)</sup>の解釈と合致する。

ERNの発生源である前部帯状皮質は、行動監視(反応出力段階)を担う吻側部と反応選択(段階)を担う背側部とに分類されるが、両部位の間には一方が活性化すると他方は抑制されるという拮抗関係が存在し<sup>1)</sup>、ERN発現は特に吻側部に関連していることがfMRIから示唆されている<sup>9)</sup>。これらの知見を本研究の結果に援用すると、呈示時間条件では刺激選別に関する処理が困難であったために、刺激の弁別に葛藤が生じ、反応選択に関する処理に、より大きな負荷が加わった可能性がある。その結果、前部帯状皮質では背側部の活動賦活と吻側部の活動抑制が生じ、ERN振幅は減少したものと考えられる。

本研究では反応出力段階に負荷を加えた運動継起条件を設定したが、複数競合モデルを否定する結果となった。ERNは運動反応の発現に関与する運動関連脳電位(movement-related cortical potential: MRCP)<sup>11)</sup>と密接な関係があり、両者は協調して行動を調整する<sup>8)</sup>。その背景には、運動反応を制御する一次運動野・補足運動野・運動前野などの大脳皮質運動関連領野が、ERNの発生源である前部帯状皮質と神経回路網によって重層的に接続されているという解剖学的理由がある<sup>13)</sup>。したがって、2つの異なる運動反応が、同一の情報処理段階で影響し合う運動継起条件ではERNの振幅減少が予測されるが、実際にはERN振幅に変化はなかった。同一情報処理段階内での注意資源競合よりも、異なる情報処理段階間での注意資源競合の効果の方が大きいという結果は興味深い。さらに別種の処理段階に負荷を加えることで、エラー検出処理における注意資源の配分方略を検討する必要がある。

本研究のデータの収集に、三宮圭司君(早稲田大学大学院人間科学研究科)の協力を得ました。ここに謝意を表します。

## 文 献

- 1) Bush G, Luu P, Posner MI: Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex. *Trends Cogn Sci* 4: 215-222, 2000.
- 2) Eriksen BA, Eriksen CW: Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Percept Psychophys* 16: 143-149, 1974.
- 3) Falkenstein M, Hohnsbein J, Hoormann J, et al: Effects of crossmodal divided attention on late ERP components. II: Error processing in choice reaction tasks. *Electroencephalogr clin Neurophysiol* 78: 447-455, 1991.
- 4) Gehring WJ, Goss B, Coles MGH, et al: A neural system for error detection and compensation. *Psychol Sci* 4: 385-390, 1993.
- 5) Kahneman D: *Attention and Effort*, NJ: Prentice Hall, Englewood Cliffs, pp 13-27, 1973.
- 6) Kiehl KA, Liddle PF, Hopfinger JB: Error processing and the rostral anterior cingulate: An event-related fMRI study. *Psychophysiology* 37: 216-223, 2000.
- 7) Leuthold H, Sommer W: ERP correlates of error processing in spatial S-R compatibility tasks. *Clin Neurophysiol* 110: 342-357, 1999.
- 8) Luu P, Tucker DM: Regulating action: alternating activation of midline frontal and motor cortical networks. *Clin Neurophysiol* 112: 1295-1306, 2001.
- 9) Scheffers MK, Coles MGH, Bernstein P, et al: Event-related brain potentials and error-related processing: An analysis of incorrect responses to go and no-go stimuli. *Psychophysiology* 33: 42-53, 1996.
- 10) Scheffers MK, Humphrey DG, Stanny RR, et al: Error-related processing during a period of extended wakefulness. *Psychophysiology* 36: 149-157, 1999.
- 11) Shibasaki H, Barrett G, Halliday E, et al: Components of the movement-related cortical potential and their scalp topography. *Electroencephalogr clin Neurophysiol* 49: 213-226, 1980.
- 12) 田中秀明, 正木宏明, 高澤則美, ら: エラー処理の注意資源配分とエラー関連陰性電位. *生理心理学と精神生理学* 20: 29-37, 2002.
- 13) 徳野博信: 上肢運動調節に関わる大脳皮質運動領野とその線維連絡. *神経研究の進歩* 42: 18-27, 1998.
- 14) Turnbull WW: Pitch discrimination as a function of tonal duration. *J Exp Psychol* 34: 302-316, 1944.
- 15) Wickens CD: *The structure of attentional resources*. In Nickerson R, Pew R (eds): *Attention and Performance*, Vol. VIII. NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, pp 239-257, 1980.

**Stages of Information Processing and Error-Related Negativity (ERN)**

HIDEAKI TANAKA\*, HIROAKI MASAKI\*\*, NORIYOSHI TAKASAWA\*\*\*,  
KATUO YAMAZAKI\*\*\*\*

\* *Waseda University Graduate School of Human Science*

\*\* *Japan Society for the Promotion of Science*

\*\*\* *National Research Institute of Police Science*

\*\*\*\* *Waseda University School of Human Science*

Models of multiple resource allocation assert that mental resources are allocated to information processing stages. In this study, we examined the competitive allocation of mental resources to each stage of information processing in single and dual tasks, by using measures of performance, and error-related negativity (ERN). The ERN is a component of the event-related brain potential (ERP) that is associated with the detection of erroneous response, which has been regarded as an index of resource allocation. In the single task condition, we used the Eriksen flanker task, whereas in the dual task condition we used the Eriksen flanker task as the primary task and an auditory choice reaction time task as the secondary task. We manipulated the difficulty of the secondary task including the load on each stage of information processing (stimulus distinction or response output). In comparison to the single task condition, longer reaction times and decreased ERN amplitudes were observed in the primary task of the dual task condition. It is suggested that reduced availability of mental resources resulted from manipulating the difficulty of the secondary task interfered with the error detection process in the primary task, causing the decreased ERN amplitude. In conclusion, these results indicate that error detection in the primary task may decline when mental resources are allocated to stimulus distinction in a secondary task.

**Key Words** : Error-related negativity, Mental resource allocation, Stimulus distinction, Response output

## エラー関連陰性電位 —行動モニタリングとしての機能的意義—<sup>1)</sup>

早稲田大学スポーツ科学部

正木 宏明

University of Michigan

William J. Gehring

江戸川大学社会学部

高澤 則美

早稲田大学スポーツ科学部

山崎 勝男

### **The functional significance of the error-related negativity in action monitoring**

Hiroaki MASAKI

School of Sport Sciences, Waseda University  
2-579-15 Mikajima, Tokorozawa, Saitama, 359-1192, Japan

William J. Gehring

University of Michigan  
525 East University Avenue, Ann Arbor, MI 48109-1109

Noriyoshi TAKASAWA

Department of Sociology and Human Studies, Edogawa University  
474 Komaki, Nagareyama-shi, Chiba, 270-0198, Japan

Katuo YAMAZAKI

School of Sport Sciences, Waseda University  
2-579-15 Mikajima, Tokorozawa, Saitama, 359-1192, Japan

---

2003.11.21 受稿, 2004.2.23 受理

- 1) 本研究の一部は、平成14-15年度科学研究費補助金・基礎研究(c)課題番号15530478(研究代表者:山崎勝男)および平成15年度早稲田大学特定課題研究(研究代表者:正木宏明)2003A-940の助成を受けて実施した。



A growing area of research within psychophysiology concerns the error-related negativity (ERN), an event-related potential component that was first observed independently by the Illinois and the Dortmund groups about fifteen years ago. Since then, evidence has accumulated that the ERN represents action monitoring processes executed presumably by the anterior cingulate cortex (ACC). In this review paper, we discuss the functional significance of the processes reflected by the ERN in action monitoring. We first introduce fundamental aspects of the ERN, including its morphological characteristics, the tasks in which it has been observed, models of its neural generator, findings concerning the involvement of attention, and the relation between the ERN and the continuous vs. discrete nature of error. We discuss the ERN elicited by external feedback signals in light of its independence of motor responses and its relationship to negative affect. We focus on the error- vs. conflict-detection controversy, discussing recent reports addressing this issue. Because proponents of the error-detection and the conflict-detection theories have each reported convincing findings in support of their views, the controversy is not yet settled. We suggest that one reason for the difficulty in resolving the controversy is that theories and models have not specified in sufficient detail how error-detection and conflict-detection are conceptually distinct. In the final part of this paper, we introduce latest findings of the ERN and speculate on future research in this area. (*Japanese Journal of Physiological Psychology and Psychophysiology*, 22(1): 3-18, 2004.)

**Key words:** Error-related negativity (ERN); Feedback-ERN; Error detection; Response conflict; Error- vs. conflict-detection controversy

**【要約】** エラー関連陰性電位 (error-related negativity: ERN) は、前部帯状皮質の行動モニタリング処理を反映した事象関連電位であり、近年ERNに対する関心が高まっている。本稿では、行動モニタリングの点からERNに反映される機能的意義について議論する。まずERNの諸特徴として、形態的特徴、課題、発現モデル、注意との関連、連続型エラーとの関連などを紹介する。また、外的フィードバック信号によって惹起されるERNについて、運動反応との独立性および負の情動との関係から議論する。本稿では「エラー検出対コンフリクト検出論争」を中心に上げ、最近の知見を踏まえながら論じる。両理論ともに、自らの立場を支持する知見を示しており、当該論争は未だ解決をみていない。解決困難の理由のひとつに、エラー検出とコンフリクト検出が概念上どのように区別されるかについて、両理論が十分示してこなかったことがある。最後に、最新の知見を紹介し、今後の研究を展望する。

## 1. はじめに

Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann, & Blanke (1990) と Gehring, Coles, Meyer, & Donchin (1990) の異なる研究グループによって、ほぼ同時期に発見されたエラー関連陰性電位 (error negativity: Ne / error-related negativity: ERN, 本稿ではERNと呼ぶ) は、90年代前半までその研究論文数は極めて少なかった。しかしながら、90年代後半になると、ERN研究は隆盛を極め始める。特に、1998年米国精神生理学会学術大会 (米国コロラド州デンバー) で企画されたERNシンポジウムでの反響は大きく、出席した多くの研究者の知的好奇心を刺激した。事実、その後わずか数年間でERN関連論文数は急増し、重要な基礎的知見の集積は落ち着いたかに見える。その中、2003年7月には、Michael FalkensteinとMarkus Ullspergerをオーガナイザーとするエラー国際会議 (Errors,

Conflicts, and the Brain) がドイツ・ドルトムントで開催され、最新の知見について活発な議論が交わされた。

本稿では、事象関連電位 (event-related potential: ERP) の中でももっとも発見が遅く、それゆえに近年熱い研究対象とされてきたERNについて、その機能的意義と基礎的知見を概観し、特にエラー検出モデルとコンフリクトモデルに関する最新の研究成果に焦点をあてたい。

## 2. ERNに関する基礎的知見

### 2.1. エラー反応に関するERP成分

エラー反応時の筋電図 (electromyogram: EMG) 開始時点に脳波を揃えて加算平均すると、潜時約100-150msにピークを示すERNが観察される (Gehring, Coles, Meyer, & Donchin, 1993a)。ERN出現後にはさらに、エラー反応後約200-500msの

範囲にピークを示す陽性成分Pe (error positivity) が観察される (Falkenstein et al., 1990; Falkenstein, Hoormann, Christ, & Hohnsbein, 2000). ERNは前頭-中心に分布するのに対して, Peは中心-頭頂優勢に分布する. ERNはエラー検出を反映し, Peはエラーの詳細な主観的評価を反映したものと考えられてきた (Falkenstein, Hohnsbein, & Hoormann, 1994).

## 2.2. ERN研究で用いられる課題

ERN研究ではエラー反応を誘発する課題が必要となる. これまで主に採用されてきた課題は, 反応競合課題, 4 択反応時間課題, Go/Nogo課題に分類することができる.

現在もっとも多く採用されている反応競合課題はフランカー課題である (Eriksen & Eriksen, 1974). これは, 標的刺激をノイズ刺激で挟んだ文字列呈示に対して, 標的刺激の指示する側の手で反応する (たとえば標的刺激がHなら左手, Sなら右手で反応する) 課題である. 文字列中央に位置する標的刺激とノイズ刺激が合致する場合には (HHHHH, SSSSS), 間違えることなく速い反応が容易となる. 一方, 標的刺激とノイズ刺激が合致しない場合には (SSHSS, HHSHH), ノイズ刺激処理に伴う反応競合が起こり, 反応時間は遅延し, エラー率も増大する. この課題では, 比較的高いエラー率と大きな干渉効果が得られることから, ERN研究に適した課題となっている. ほかに, サイモン干渉課題 (Leuthold & Sommer, 1999) や空間ストループ課題 (Masaki & Segalowitz, 2004) などが反応競合課題として用いられている.

4 択反応時間課題では, 左右の第一および第二指あるいは四肢を用いた選択反応を行う (Bernstein, Scheffers, & Coles, 1995; Falkenstein, Hohnsbein, & Hoormann, 1996; Gehring & Fencsik, 2001). 同側の反応指間での選択エラーよりも左右反応手間での選択エラーの方が, エラー検出は容易となる. この性質を利用して, ERNのエラー検出モデルが検証されている (Falkenstein et al., 1996).

Go/Nogo課題では, 単純あるいは選択反応時間

課題の遂行中に時折呈示されるNogo刺激に対して反応を抑制しなければならない. 類似の課題には, Go刺激呈示後にNogo信号が呈示されるストップシグナル課題がある (Logan, 1994). Nogo刺激に対して反応をしてしまうエラーは, フォルアラーム (false alarm) と呼ばれるが, この種のエラーによってもERNは惹起される (Falkenstein et al., 1996). フォルアラーム試行と反応抑制試行との差は反応の有無であるため, Go/Nogo課題では選択反応時間課題よりもエラー検出が容易であるという (Falkenstein et al., 1996).

ERN研究では目的によって最適な課題を採用し, 必要に応じて修正を加えている. 研究グループ間で知見を比較し共有する意味では, 共通の課題を用いることが望ましい. そのため, フランカー課題を標準課題として推奨する動向もある.

## 2.3. ERNのエラー検出モデル

ERNはエラー検出を反映した陰性電位であるとの立場から, ColesらIllinoisグループが提案したエラー検出モデルを以下に紹介する (Coles, Scheffers, & Holroyd, 2001). 基本的には Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann, & Blanke (1991) のDortmundグループも同様のモデルを提唱している.

このモデルでは, エラー処理システムは2つの部分から構成されるとしている. 一方は, エラーを検出するシステムであり, 他方は, エラー検出に伴って起動する矯正行動システム (remedial action system) である. 後者は, 抑制 (inhibition), 修正 (correction), 補償 (compensation) という3つのエラー改善に関連した処理過程を包含している. エラーモニタリングの心臓部には, 比較器 (comparator) が想定され, 大脳基底核 (basal ganglia) がその役目を担うと考えられている. この比較器では, 正反応に関する表象と実際の反応に関する表象とが比較される. 正反応の表象には前頭前野 (prefrontal cortex) が関与している. もし比較器が両表象の不一致を検出した場合には, 第二のエラー処理システムである矯正行動システムにエラー信号が送られる. これによっ

て、エラー反応は抑制され、正しい反応に修正される。さらに、再びエラー反応を起こさないように、方略的な調整 (strategic adjustment) が働き (補償)、次の試行では反応時間の遅延が観察される。エラー検出モデルによると、エラー信号が矯正行動システムに到達したときに、前部帯状皮質 (anterior cingulate cortex: ACC) からERNが生起するという。これら一連のエラー処理は、行動モニタリング (action monitoring) という概念として包括されている (e.g., Gehring et al., 1993a)。

最近はさらに、中脳ドーパミン系 (mesencephalic dopamine system) と関連づけたモデルが提唱されている (Holroyd & Coles, 2002)。期待していたよりも結果が悪い場合には、ドーパミン作動系の活動は一過性に低下する。この過程で、中脳ドーパミン系から送られた信号によってACCに脱抑制が生じ、ERNを発現させるという。

#### 2.4. ERNを発現させる事象はなにか

ERNの立ち上がり時点は、EMG開始時点よりも僅かに遅れて観察される (e.g., Gehring, Goss, Coles, Meyer, & Donchin, 1993b)。もしERNが、エラー反応生起に伴う末梢からのフィードバック情報と、正反応に関する表象との比較によって発現する電位であるならば、その立ち上がり時点はEMG開始後約100msに観察されるはずである。しかしながら、この仮定はEMGとERNとの時間的關係に矛盾する。そのため、ERNを発現させる事象は、もっと早期に駆動する処理過程に求めなければならない。末梢からの情報に依存せず、中枢におけるフィードバック情報を利用可能とする機構が必要となる。

そのような機構の強力な候補として、遠心性コピー (efference copy) がある (Angel, 1976)。これは、運動指令のコピーが、末梢に送られる信号とは別に中枢神経系内に置かれ、正反応の表象との比較に用いられるという概念である。エラー反応の遠心性コピーは、運動命令が効果器に送られたときには既に利用可能となっているため、ERNの発現タイミングを説明することができる。しかしながら、後述するように、運動反応はなくと

も、フィードバック信号によって惹起されるいわゆるフィードバックERNについては、この発現メカニズムが適用されない。そのため、ERNは遠心性コピーと正反応表象との差の検出よりも、むしろ検出された差に対する反応 (たとえば負の情動) を反映している可能性も残されている (Gehring & Willoughby, 2002)。

#### 2.5. ERNの反応モダリティとの独立性と発現部位

ERNの発生源については、ダイポール推定法の適用やfMRIによってACCに推定されてきた (e.g., Holroyd, Dien, & Coles, 1998)。補足運動野 (supplementary motor area: SMA) の関与も否定できないものの (Kiehl, Liddle, & Hopfinger, 2000)、ほとんどの研究でACCを発生源とみなしている。また、外側前頭前野はERN発現に直接関与しないものの、反応の正誤判別に必要な情報をACCに送っている点で重要な領野である (Gehring & Knight, 2000)。

ERNは運動野の活動とは独立して、ACCから生起することから、認知処理を反映した電位成分であると考えられる。したがって、ERNは特定の運動部位に依存しない出現様相を示すものと予測される。実際、足によるエラー反応 (Holroyd et al., 1998)、サッカーディック眼球運動でのエラー反応 (Van't Ent & Apkarian, 1999)、発声エラー (Masaki, Tanaka, Takasawa, & Yamazaki, 2001b) でも同様の陰性成分がこれまでに観察されている。また、後述するように、運動反応とは関わりなく、誤反応を伝えるフィードバック信号によっても類似の陰性成分が惹起される (Gehring & Willoughby, 2002; Miltner, Braun, & Coles, 1997; 高澤・多喜乃・山崎, 1990)。これらの報告は、エラー反応やエラー情報によって惹起される陰性電位が、反応肢とは独立し、認知処理を反映した現象であることを示唆している。

#### 2.6. 注意資源との関連

ERN振幅は注意との関連で変化することがこれまでに報告されてきた。たとえば、スピードと正確性のトレードオフについて検討した実験では、

正確性が要求される条件でERNは増大した (Gehring et al., 1993a). 正しい反応遂行を維持しようとする事態下では, エラー検出はさらに重要となり, 課題遂行に対する注意を高めることとなる. ERNの高振幅化はこうした注意の高まりと大いに関連している.

注意資源の配分方略を実験的に検討するうえで, 従来用いられてきた方法に二重課題法がある (e.g., Kahneman, 1973). 主課題と副課題を同時に遂行させ, 主課題の難易度操作に伴う副課題のパフォーマンス低下から, 注意資源配分を検討する手法である. 一方の課題難度を高めることによって, 他方の課題遂行に配分される注意資源量を相対的に減少させることができる.

もし割り当てられた注意資源量をERNが反映するのであれば, 一方の課題難度を高めることに伴って, 他方の課題で観察されるERNに低振幅化が生じるはずである. 田中・正木・高澤・山崎 (2002; 2003) は, 副課題の難易度を操作し, エラー反応に伴うERNと注意資源との関係を検討した. ここでは, 一般的な二重課題とは異なり, 副課題の難易度を操作することで, 主課題での反応時間とERNが調べられた. 注意資源配分の操作成功は, 副課題の難度上昇に伴う主課題反応時間の遅延と, エラー率の上昇から確認された. 一方ERNには, 注意資源減少に伴う振幅低下が認められた.

その他にも, 午後7時から翌朝10時までの連続課題遂行によって断眠させると, 覚醒低下に伴うERN減少が報告されている (Scheffers, Humphrey, Stanny, Kramer, & Coles, 1999). このことは課題遂行時の注意要求によってERN振幅が調整されることを示唆している. ただし, 眠気の強い状態と通常の状態でフランカー課題を遂行した実験では, 眠気の影響はERNではなく, Peの振幅減少として認められるに過ぎず, エラー検出そのものは眠気の影響をさほど受けないことが示唆されている (Murphy, Richard, Masaki, & Segalowitz, 2003).

## 2.7. フィードバックERN

ERNは反応肢と独立して正中線上で最大振幅を

示す. 反応モダリティとの独立性とACC由来の電位である事実は, ERNが認知処理を反映する電位であることを示している. もしそうであるならば, 被験者にエラーや失敗結果を伝える外的信号を呈示した場合にも, ERNが惹起されるかどうかは興味深いテーマである.

Miltner et al. (1997) は, 時間評価課題を被験者に課し, 結果の知識を与えるフィードバック信号 (以下FB信号) 呈示に惹起されるERPを検討した. FB信号には, 視覚刺激, 聴覚刺激, 触覚刺激の3種類を用いた. その結果, 刺激モダリティに関わらず, 評価時間の誤反応を伝えるFB信号によって, 潜時230–330msにピークを示し, 前頭–中心部優勢に分布する陰性電位を見出した. これらの陰性電位の発生源はACCに推定され, 包括的エラー検出過程 (generic error detection) を反映する陰性電位としてERNと同一視された. 本稿ではこの陰性電位をFB-ERNと呼ぶ. FB-ERNは他者の遂行エラーを観察した時にも惹起されることから (Miltner, Brauer, Hecht, Trippe, & Coles, 2004; van Schie, Mars, Coles, & Bekkering, 2004), エラー関連事象の認知レベルでの検出を反映した陰性電位といえる.

結果の知識として呈示されるFB信号によって陰性成分が惹起されることは, 高澤ら (1990) が既に報告している. 引き金の牽引で標的強度値を出力する課題では, 誤反応を知らせるFB信号呈示によって約210msのピーク潜時を示す陰性成分が惹起された. 興味深いことに, 金銭報酬で動機づけを高めた条件では, この陰性成分は増大した (Fig. 1).

エラー検出モデルでは, FB-ERNに対して正反応表象と実際の反応との比較過程を適用せず, エラー信号そのものがERNを発現させていると考えている. しかしながら, FB-ERNは被験者の結果に関する予期表象と実際のフィードバック信号とが合致しない場合に生起するという可能性も残されている. そこで, Masaki, Tanaka, Takasawa, & Yamazaki (2001c) は, 標的強度値出力課題を用いて, 反応結果に関する予期とフィードバック信号との一致性からFB-ERNを検討した. 反応毎に被験者から反応結果を予測させ, その確信度も聴

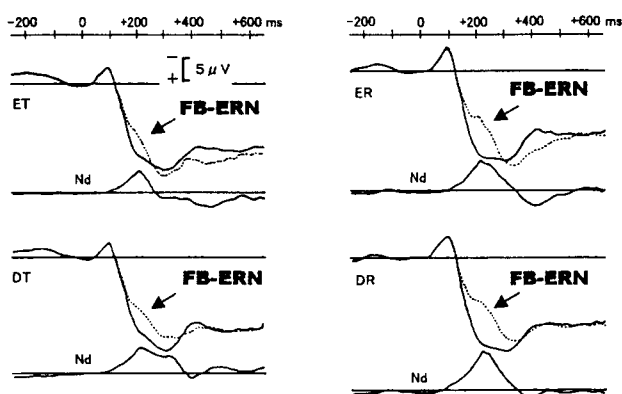


Fig. 1 標的強度値出力課題で提示したフィードバック音に伴うERP波形 (高澤ら, 1990). 誤反応フィードバックによって潜時約210msに陰性成分が惹起された (破線). 一方, 正反応フィードバックでは, 陰性成分は惹起されなかった (実線). Nd (negative difference) は, 誤反応フィードバック提示時のERPから正反応フィードバック時のERPを引算して求めた差波形. Ndの大きさに示されているように, 陰性成分は, 課題が難しくなった場合や報酬付加条件で大きくなった. ET:低難度条件, DT:高難度条件, ER:低難度報酬付加条件, DR:高難度報酬付加条件.

取した. もし, 予期表象とフィードバック信号の不一致がFB-ERNの生起要因であれば, 正反応を伝えるフィードバック信号でもFB-ERNが認められるはずである. 実験の結果, 誤反応フィードバック信号だけでなく, 予期表象とフィードバック信号の不一致時にもFB-ERNが観察された (Fig. 2).

頭皮上分布の僅かな差異 (Gehring & Willoughby, 2004), ピーク潜時の差異, 機能および発現モデルの点でFB-ERNとERNとの異同は議論の余地を残しているものの, 運動反応を伴わなくとも観察できるというFB-ERNの特徴に着目すると, その適用範囲は広いと考えられる. 誤反応生起に着目せずとも認知レベルでのエラー処理機能が扱えるばかりか, 運動機能障害を有する被験者のエラー検出機構も検討可能となるからである.

## 2.8. 連続エラーとERN

あるスポーツ競技の初心者が, 合理的で美しい動作フォームを獲得すべく練習している場合, 目

標動作と実際の動作との偏差を小さくすることが運動学習の本質とされる. 一方, 習熟段階では, 目標動作からの偏差は, エラーとして比較的容易に検出される. 目標 (標的) からの偏差は連続エラー (continuous error) として分類することができ, 偏差の程度はエラー量の大きさとして捉えられる. 誤反応肢によるボタン押しとは異なり, エラー量は標的を中心として次元軸上を連続的に変化していく. この連続エラーの検出がERN振幅に反映されるならば, 習熟過程を評価するツールとしての適用可能性がみえてくる.

実際に, 連続エラーとERN振幅との関係を調べた研究では, 両者の関連を認めた報告 (田中・正木・高澤・山崎, 2000) と関連なしとする報告 (de Bruijn, Hulstijn, Meulenbroek, & van Galen, 2003; Masaki, Takasawa, & Yamazaki, 2001a) に分かれている.

引き金の牽引で標的強度値を出力する運動学習課題を用い, 運動の正誤結果別に運動関連電位を比較した研究では, 先行する準備電位 (readiness potential: RP, Kornhuber, & Deecke, 1965) を含むERP波形に正誤間の差はなかった (正木・山崎, 1992).

Masaki et al. (2001a) も同様の標的強度値出力課題を用い, 標的強度値と実際の牽引強度値との偏差の大きさから試行を3つに区分し, それぞれのERP波形を比較した. 実験は連続2日間行われ, 試行毎に被験者の確信度を聴取した. 引き金の牽引時点を基準に脳波を加算平均した結果, 運動直後に前頭部で大きい陰性電位 (ここでは便宜上 monitoring-related negativity: MRN と呼ぶ) をすべての区分で認めた (Fig. 3). このMRN振幅は, 標的強度値からの偏差が大きい試行と偏差の小さい試行間に差はなかった. 興味深いことに, MRNは標的強度値に近い力量を発揮した試行でむしろ大きかった. この高振幅MRNは, 第一日目の実験にのみ観察され, 第二日目では他の条件と同レベルまでに減少した. MRNはエラーの大きさととは対応しないため, ERNとの異同は不明のままである. しかしながら, 標的に近い強度値の出力に成功したときに振幅が大きかったという結果は, MRNがなんらかのモニタリング処理を反

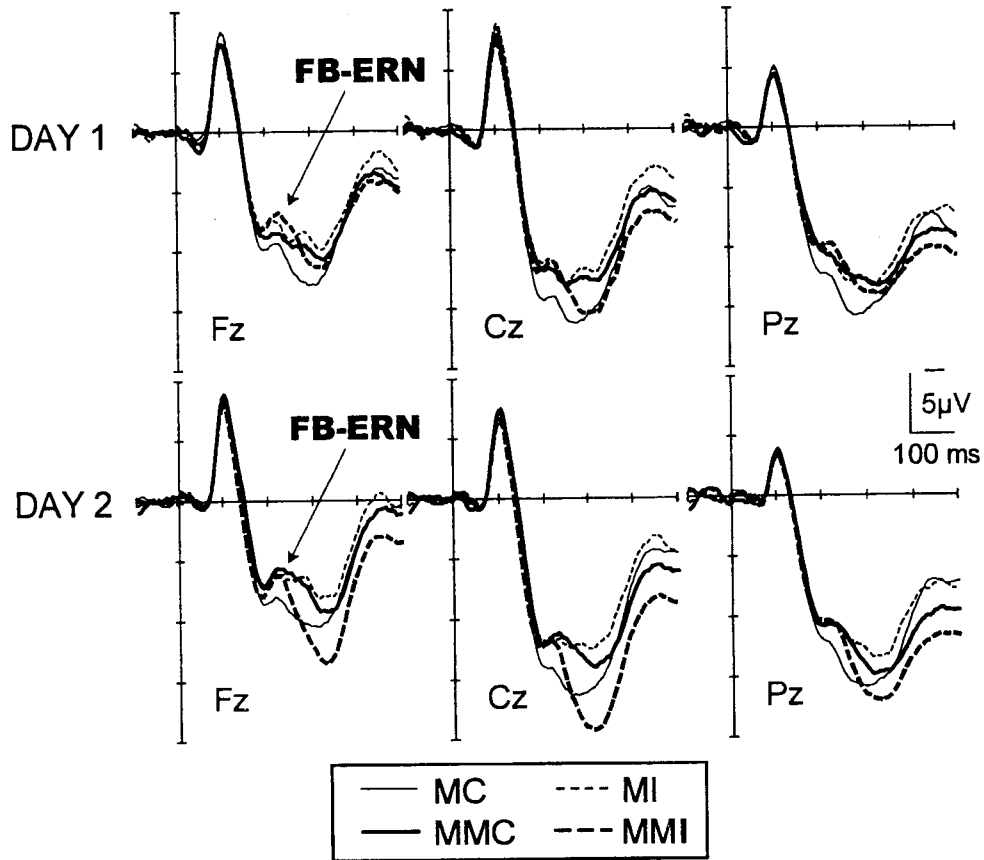


Fig. 2 標的強度値出力課題での視覚フィードバック由来のERP波形 (Masaki, et al., 2001c). 被験者の結果予測と実際のフィードバックとの対応から4条件に分類した. MC: 正反応・予測的中条件, MMC: 正反応・不的中条件, MI: 誤反応・的中条件, MMI: 誤反応・不的中条件. 陰性成分は, 誤反応フィードバックだけでなく, 予測に反した場合には正反応でも惹起され, 学習の進んだ第2日目で顕著であった. 図中縦軸はフィードバック呈示時点を示す.

映したものと推察できる.

標的強度値出力課題では, 被験者は比較的早い段階で自分のパフォーマンスの結果を, フィードバック情報がなくともある程度正確に言い当てることができる (正木, 1994). そのため, MRN増大は狙い通りの強度出力ができたことに伴う強い気づき (salience) に起因したものかもしれない. もしもこの説明が正しければ, 被験者の確信度に伴ってMRNの増大が予測されるが, 実際に, 被験者の確信度が高かった場合に振幅は大きかった.

## 2.9. 負の情動とERN

意に反して起こしたエラー反応を快く思う人はいないであろう. むしろ, エラーによって負の情動が一過性に生じるはずである. 失敗直後に多く

生じるネガティブ語の発声は, 負の情動の表出である. このように, エラー生起と負の情動とは切り離すことができない. また, 古くはPapetzの回路 (Papetz, 1937) にみられるように, 帯状回機能は情動体験との文脈で議論されてきた. ACCを発生源とするERNに, 負の情動との関係を求めることは当然であろう.

正木・山崎 (2000) は, サイモン課題遂行中のエラー反応に対して, 罰 (不快音: 黒板を爪で引っ掻く音, 95dB/SPL) を与える条件と, 罰を与えない条件でERNを比較した. 罰を与えられる場合は回避動機が高まるため, エラーモニタリング機構の働きは強まり, ERNは増大するものと予測された. しかしながら, 実際にはERNは罰条件の方が小さかった (Fig. 4). ACCの尾側部は主に認知処理に, 吻側部は負の情動にそれぞれ関与

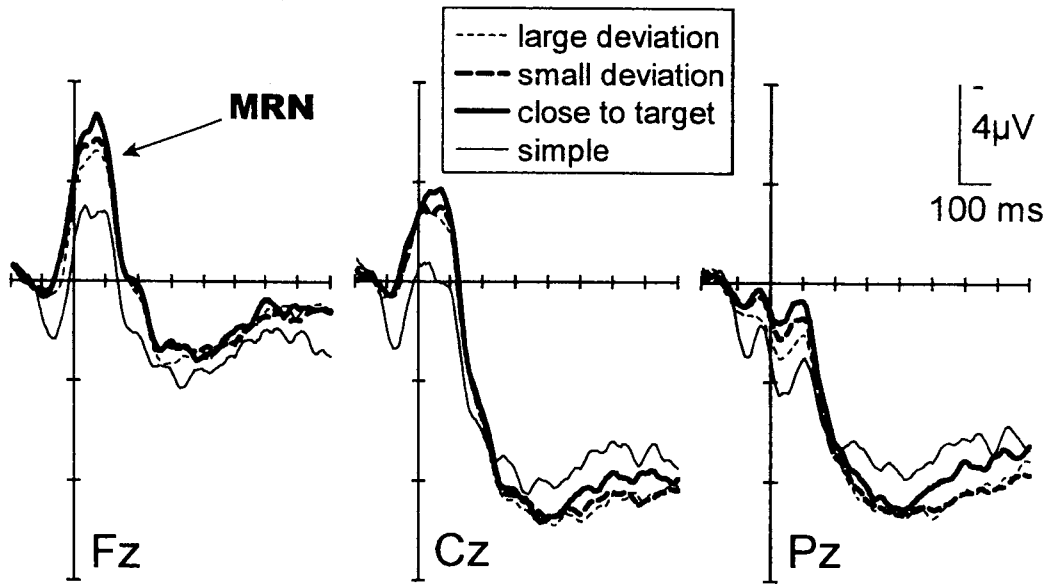


Fig. 3 連続型エラーとERP波形 (Masaki, Takasawa, & Yamazaki, 2001a). 単純な引き金の牽引でも陰性成分は出現したが、標的強度値出力時には大きな陰性成分 (monitoring-related negativity: MRN) がみられた。MRNは、標的強度値からの偏差の程度と無関係であった。しかしながら、標的強度値に近い出力時に、MRNは大きかった。図中縦軸は牽引運動開始時点を示す。simple: 単純な引き金の牽引, close to target: 標的強度値近傍の出力, small deviation: 標的強度値からの偏差が小さい場合, large deviation: 標的強度値からの偏差が大きい場合。

しており、両者には一方の活動亢進によって他方の活動が抑制されるという拮抗関係がある (Bush, Luu, & Posner, 2000)。罰付加に伴うERNの低振幅化はこの拮抗関係を反映した結果かもしれない。もしERNの発生源がACC吻側部より後方に存在するならば、罰条件の不快状況に伴う吻側部の活動亢進によって、ERNが低振幅化するからである。

その他にも、負の情動特性を強く示す被験者では、実験開始直後に高振幅のERNが観察され、その後漸減することが報告されている (Luu, Collins, & Tucker, 2000)。

FB-ERNはERNと同一電位とみなされているようであるが、ギャンブル課題を用いたGehring & Willoughby (2002)の研究では、内側前頭陰性電位 (medial frontal negativity: MFN) としてERNとは区別されている。それは、二者択一で賭金を選択した場合、賭け方のミスよりもむしろ損失結果に伴う負の情動をMFNは反映したためである。高澤ら (1990) も、金銭報酬条件でのエラーによってFB-ERNが高振幅になることを見出してい

る (Fig. 1)。これらの結果は、FB-ERNやMFNが負の情動を強く反映することを示唆している。

### 3. エラー検出対反応コンフリクト検出

#### 3.1. 反応コンフリクト説の登場

ERNの機能的意義は、その発見以来、エラー検出であると考えられてきた (Falkenstein et al., 1994; Gehring et al., 1994)。しかしながら、Carter, Braver, Barch, Botvinick, Noll, & Cohen (1998) がfMRIを用いて、反応競合課題遂行中の正反応時にもかかわらず、ACC由来の信号を検出したことで事態は一転した。彼らの想定した「コンフリクトはあってもエラーはない」状況下でACCの信号が得られたからである。その結果、ERNはエラー検出ではなく、正・誤両反応の賦活に伴う競合から生じた「反応コンフリクト (response conflict)」を反映した電位であると主張されるようになったのである。これがきっかけとなり、ERNのいわゆる「エラー検出対反応コンフリクト論争」が始まった。

オリジナルのエラー検出説 (Falkenstein et al.,

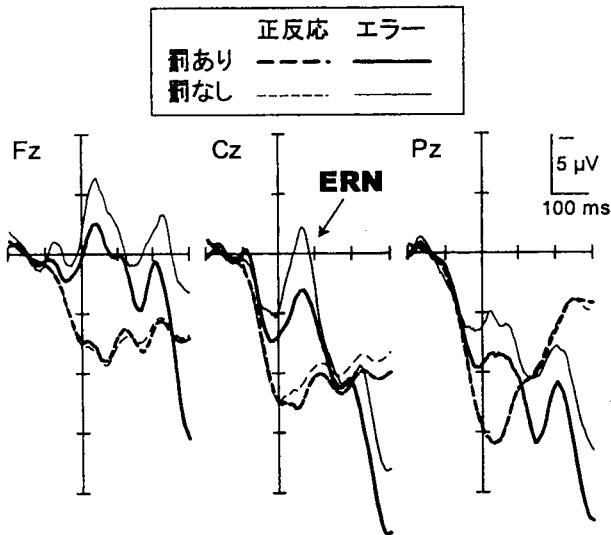


Fig. 4 負の情動生起とERN波形 (正木・山崎, 2000). エラー反応に対して罰を与えるとERNに低振幅化が生じた. 図中の縦軸は, ボタン反応時点を示す.

1994; Gehring et al., 1994) では, 正反応と誤反応に関する表象を比較する比較器が想定されていたのに対して, Carterらの主張する「反応コンフリクト説」では比較器は想定されていない. この点が両モデルを区別しているかにみえる. しかしながら, 実際には, コンフリクトの検出でも比較過程が存在している. 反応コンフリクトモデルでは, 正・誤2つの反応賦活の差を算出しているが, これ自体が比較をもたらすことになるからである. また, Carterらの用いた課題では, 反応処理系におけるエラーが正反応試行に混入していた可能性もある. この場合, 問題視されるのは, 明確なエラー反応ではなく, 後述するEMGレベルでの部分エラー (partial error) が, 正反応試行に混入する可能性である.

こうした事態から, 実際には, エラー検出と反応コンフリクトの両モデルを明確に区別することは困難となっている. それにもかかわらず, いずれのモデルが妥当であるかを検討する実験やシミュレーションがこれまでにに行われてきた.

### 3.2. 反応コンフリクト説を支持する知見

もし, ERNが反応コンフリクト検出ではなく, エラー検出を反映した電位であるならば, 「ERNは排他的にエラー検出を反映する」という命題が

証明されなければならない. この場合, ERNは反応コンフリクト課題の正反応時には生起し得ないことになる. しかしながら, 以下に紹介するように, 実験結果の中にはこの予測に反するものが報告されている.

反応競合課題で不一致刺激によって惹起される反応コンフリクトは, 反応時点というよりは刺激呈示時点に同期しているものと考えられる. そのため, 反応コンフリクト説が正しいのであれば, 刺激呈示時点で加算平均したERP波形に反応コンフリクトを反映した成分が観察できるはずである.

Carterグループは反応コンフリクト説の正当性を示すため, 反応競合課題の不一致刺激に内包される課題関連情報と無関連情報の結合関係と, 刺激情報と反応肢の結合関係を検討した (van Veen & Carter, 2002). 彼らはフランカー課題を加工し, 中央の標的文字がSまたはXのときは右手反応, HまたはPのときは左手反応を行うように被験者に教示した. この場合, SSXSS, HHPHHという文字列呈示では, 標的刺激とノイズ刺激は文字種類の点で一致しないものの, 同じ反応肢を指定している点で両者は合致しており, 刺激内コンフリクト刺激と呼ぶべきものであった. 一方, SSPSS, HHXHHという文字列呈示では, ノイズ刺激と反応肢が不適合のため, 反応コンフリクト刺激と呼ぶことができる. 一見すると, 両タイプの刺激とも同じ文字列刺激のようであるが, 反応コンフリクト刺激のみが誤反応肢の賦活を引き起こす性質をもっている.

実験の結果, 反応時間には, 一致刺激, 刺激内コンフリクト刺激, 反応コンフリクト刺激の順に遅延がみられた. また, 正反応率は反応コンフリクト刺激で大きく低下した. 一方, 刺激呈示時点を基準に加算平均したERP波形には, 潜時340-380msに前頭-中心に分布するN2が観察された. このN2は反応コンフリクト刺激呈示時に高振幅値を示し, その発生源はACCに推定された. この結果は, Carterらの主張を裏付けるもので, エラー検出説を棄却する決定的証拠のようにみえる.



### 3.3. 反応コンフリクト説のシミュレーションによる検証

Carter グループはさらに、反応コンフリクト検出がERPに反映される様相を計算モデルによってシミュレートし (Botvinick, Braver, Barch, Carter, & Cohen, 2001), ERNとパフォーマンスの振る舞いを説明している。彼らのモデルでは、コンフリクトモニタリング機構によってコンフリクトが評価され、その情報が認知制御中枢に送られることで、コンフリクトの抑制に繋がるといふ。ここでは、クロストーク干渉 (crosstalk interference) と呼ばれる並列処理が強調されている。クロストークとは、二つの刺激に対する処理経路が重複していない場合には、両者は平行して処理されるが、もし二つの処理経路がどこかで交差する場合には、処理資源を共有することとなり、両処理は互いに干渉しあうことを意味する (Mozer & Sitton, 1998)。CarterらはこのクロストークこそがERNを発現させるものと考えている。つまり、正反応経路と誤反応経路とのクロストークから生じた反応コンフリクトにACCが反応し、ERNを惹起させるという。その根拠に、刺激処理が不完全なうちに生じる速いエラー反応 (impulsive error) では、反応後も刺激評価は持続するし、誤反応が生じつつある最中でもエラー修正動作は非常に速い潜時で行われることを挙げている。また、刺激呈示から反応までに2秒間の猶予が与えられ、時間的切迫のない状況では、エラー反応が起きてもクロストークは生じ難いため、ERNは観察されなくなる (Dehaene, Posner, & Tucker, 1994)。このように、速い修正動作は、それに先行する誤反応肢の賦活とオーバーラップし、コンフリクトを生起させると考えている。

彼らのシミュレーションでは<sup>2)</sup>、反応コンフリクト強度を表現するエネルギー値は、エラー反応時の方が正反応時よりも大きく、持続することが示された。またエラー反応のシミュレーションでは、現実のERN波形を鏡映するかのよう、反応コンフリクトはエラー反応直前から増大し始め、反応直後に最大となった。一方、正反応のシミュレーションでは、反応コンフリクトはより早くから生起し、反応以前にピークに達した。シミュ

レーション結果は、従来のERNの知見をうまく説明しうるものであった。

### 3.4. エラー検出説の主張

一方、ERNのエラー検出説を支持する研究者の主張は、反応コンフリクトのない事態下のエラー反応によってERNが生起するという点にあった。たとえば、Falkenstein et al. (2000) は、単純な選択反応時間課題やGo/Nogo課題でもERNが観察される事実は、エラー検出説を強力に支持する証拠であると主張した。残念ながら、Go/Nogo課題のフォルスアラームには、反応コンフリクトは関係しないという主張は支持され難い。反応を抑制しようと努力したものの、反応を生起させてしまう過程自体が反応コンフリクトと同義であると見なされるからである (Nieuwenhuis, Yeung, van den Wildenberg, & Ridderinkhof, 2003)。

エラー検出説ではまた、エラー検出が容易な事態の方が、困難である場合よりもERNは大きくなることが予測される。一方、反応コンフリクト説では、エラー検出が困難な事態の方が、コンフリクトは強く生じるため、ERNは大きくなることが予測される。

#### Go/Nogo課題におけるフォルスアラーム検出

- 2) Botvinick et al. (2001) は、コネクショニストモデルに基づいてERNをシミュレートしている。方法の詳細は原著に譲るが、手続きの概略は以下のとおりである。フランカー課題の場合、入力、出力、注意の3つのモジュールが設定される。入力モジュール内の文字ユニットは、空間注意ユニット (左, 中央, 右) と出力ユニット (H, S) にそれぞれ興奮性に結合されている。一方、モジュール内のユニット間は相互抑制的に結合されている。フランカー課題は中央標的文字に反応する課題であるため、シミュレーションではまず、中央の空間注意ユニットに入力が行われ、次に文字刺激パターンを文字ユニットに適用して計算される。その結果、モデルは出力ユニットが反応閾値に達するまで計算を繰り返す。さらに、計算サイクル毎にランダムノイズを各ユニットの賦活レベルに適用することで、様々な反応潜時を作り出し、時にはエラーを引き起こすように工夫されている。彼らは、出力モジュールに対してコンフリクトモニタリング機構を付加的に設定することで、反応層のエネルギー値を推定し、ERNをシミュレートしている。

は、他の選択反応時間課題のエラー反応よりも容易に行われると考えられる。実際にERN振幅はフォルスアラーム時の方が大きく、ピーク潜時も短い (Falkenstein et al., 1996)。さらに、4 択反応時間課題を用いた実験でも、正反応とエラー反応の表象差が大きい反応肢の選択エラー試行の方が、同側の反応指の選択エラー試行よりもERNは高振幅であった (Bernstein et al., 1995; Falkenstein et al., 1996)。これらの結果は、エラー検出説の予測を支持している。しかしながら、四肢による4 択反応時間課題で同様の仮説を検証したGehring & Fencsik (2001) の実験では、反応コンフリクトがもっとも強くなる、同側の手足の選択エラー時にERNは最大となった。このようにエラー反応と正反応との表象類似性を操作した研究では知見が一致していない。

### 3.5. エラー検出説の実験的検証

Masaki & Segalowitz (2004) は、反応コンフリクトの程度が異なる3つの刺激-反応コンパチビリティ課題 (stimulus-response compatibility: SRC) を比較することと、部分エラー (パフォーマンス上は正反応であっても、それに先行して誤反応肢の筋放電が観察される場合) に着目することで、エラー検出説と反応コンフリクト説の妥当性を検証している。ここでは、Kornblum (1992) のモデルに基づいて工夫された二種類のサイモン課題と空間ストループ課題 (それぞれ、arrow-task: AR, arrow-Simon task: AS, arrow-orientation task: AO) を比較したところ、反応時間の遅延およびエラー率の上昇は $AR < AS < AO$ の順で大きくなり、反応コンフリクトの差異が確認された。もしERNが反応コンフリクト検出と無関係であれば、パフォーマンスとの乖離を示し、ERN振幅値に課題間の差はないことが予測される。しかしながら、ERN振幅もパフォーマンス同様の関係を示し、 $AR < AS < AO$ の順に増大した。

この研究では、部分エラーに伴うERN (岩木, 1998; 正木・高澤・山崎, 1999; Vidal, Hasbroucq, Grapperon, & Bonnet, 2000) に着目することで、反応コンフリクト説を検討している。SRC課題では反応競合に伴いエラー反応が生じやすくな

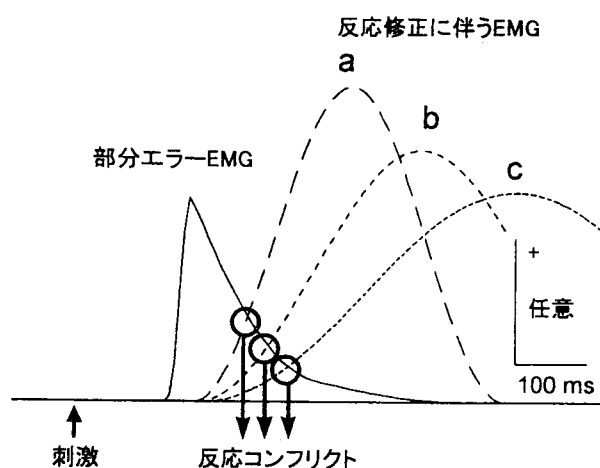


Fig. 5 部分エラーと修正動作との関係から生じる反応コンフリクトの概念図。反応競合課題で干渉効果が大きくなるに伴って、修正動作は遅延する(a→b→c)。反応コンフリクトは、部分エラーと修正反応の賦活が交差する時点で生じる。また、そのコンフリクト強度は、両者の重なり大きさで決定される。反応コンフリクト説では、 $a > b > c$ の順で反応コンフリクトが弱くなるため、ERNもこの順で低振幅化とピーク潜時遅延を示すものと予測される。

る。ただし、被験者が誤反応肢を賦活させてしまっても、明確なエラー反応 (overt error) を起こす前に、正反応肢の反応にうまく修正できれば、その試行は正反応として分類される。このような試行は、あらわでないエラー (covert error) であり、誤反応肢のEMGを観察することではじめて同定される。

反応修正を強く伴った部分エラーは、正反応として分類されるものの、修正を伴わないエラー反応に比べれば反応コンフリクトは強いはずである。したがって、反応コンフリクト説に基づくと、ERN振幅は部分エラー試行時の方が修正のないエラー反応時よりも大きくなるものと予測された。Carterらのモデルを部分エラー試行に適用すると、Fig. 5のように説明される。正反応肢による修正EMGのピーク時点は、干渉効果の大きさに伴って遅れる。反応コンフリクトは、正反応肢の修正EMG波形が誤反応肢のEMG波形と交わる時点で生じ、その強度は両者の重なり大きさから決定される<sup>3)</sup>。したがって、反応コンフリクト

3) 反応コンフリクトモデルによるこの予測は、Cameron Carter博士及びNick Yeung博士から直接教授を受けた。両氏に感謝します。

説に基づくと、干渉効果の増大に伴ってERNのピーク潜時遅延と低振幅化が予測される。しかしながら実験結果は、(1) ERN振幅は部分エラーの方が明確なエラーよりも小さく、(2) 正・誤EMG波形の交点遅延は、ERNのピーク潜時に影響を与えないものの、振幅をむしろ増大させたことから、反応コンフリクト説による予測に反するものであった。課題間にみられたERN増大は、エラーに対する強烈な気づき (salience) から説明されうることを考慮すると、この実験結果は、全体的にエラー検出説を支持したものと見える。

ところで、ERN振幅に反映されるエラー検出過程の様相からエラー検出説には、全か無か検出 (all-or-nothing account) と勾配的検出 (a graded account) の二つの立場が包含されている。前者は、エラーを検出したときはいつでも同等のERNが出現するが、正反応時には全く出現しないという立場である。後者は、エラー検出に伴ってERNは出現するが、エラー検出過程の状況によってその振幅値が規定されるという立場である。従来の知見には、それぞれの立場を支持したものがあるが、課題遂行時の注意要求、強い気づき (salience) や苦痛 (distress) といった心理的反応、負の情動生起の強さ、によって振幅値は変化することが多く、ERNの勾配的検出様式を多くみることができる。

### 3.6. 論争の行方

ここまで概観してきたように、反応コンフリクト説とエラー検出説のいずれが正当であるかを検証することは、実際には極めて困難である。同じERNの振る舞いを両モデルが予測することも多く、モデル検証を一層困難とする一因になっている。また、反応コンフリクトの“反応”と“コンフリクト”は、それぞれ本質的に何を指したもののかについては曖昧なところが多分にある。呈示刺激に対する筋活動を伴う運動反応だけでなく、エラー反応に伴う負の情動生起も反応であり、これは情動反応の強度に着目すれば、情動コンフリクトとも呼ぶことができる。反応コンフリクトの定義は研究者間で僅かずつ異なっており、この点がコンフリクト説の解釈をさらに複雑にし

ている。

エラー検出か反応コンフリクト検出かという論争は、どの研究モデルを採用するのか、どのような定義に基づいて現象を観察するのかによって、同一現象を異なるもののようにみている可能性がある。この場合、各モデルを支持する研究者それぞれが、もっともらしい知見を示して、自らの主張を擁護できる事態は当然のこととなる。こうした理由から、当該論争は、同一現象の捉え方に起因した意味論的 (semantic) 問題に過ぎない可能性も生じてくる。

いずれにしても、研究者がエラー検出と反応コンフリクト検出について、概念的な区別を明確にしてこなかったところに論争未解決の原因がある。

### 4. その他のERN適用例

社会成熟性の極端に低い被験者では、エラー反応への罰付加によって、ERNが低振幅化するという報告以来 (Dikman & Allen, 2000)、様々な行動特性やその背景にある性格特性とERNとの関係が注目されるようになった。最近では、社会成熟性と関連のある神経症傾向や誠実性についても検討されている (Pailing & Segalowitz, 2004)。誠実性の高い被験者では欣然と作業を遂行するため、ERNは金銭報酬額に関わらず大きい。誠実性の低い被験者では金銭報酬額によってERNは変化する。また、神経症傾向の高い被験者も低い者とは異なり、金銭報酬額によってERNが変化する。行動のモニタリング機能の点からERN振幅は、性格特性の個人差を捉える指標になりうるため、幅広い分野での応用が期待される。今後、種々の性格特性とERNとの関係が重要視され、ヒトの行動解明に大きく貢献するものと考えられる。

ERNに対する発達・加齢の影響についても報告が増えている。高齢者ではERNに低振幅化がみられ (Falkenstein et al., 2004)、記憶課題のエラーに対するERNの発生源は若年成人と異なる位置に推定されている (Dywan, Mathewson, & Segalowitz, 2004)。また、学童期 (7歳) から青年期 (18歳) にかけてのERNを調べた研究では、

ERNの発達様態だけではなく、思春期における発達の性差をERNが反映するという興味深い結果も報告されている (Segalowitz, Davies, Gavin, & Schmidt, 2004)。

臨床応用についても行動モニタリングの指標としてERN適用の増大が予測される。これまで、パーキンソン氏病、統合失調症、強迫性障害 (obsessive-compulsive disorder: OCD) などではERNが記録されている。統合失調症患者ではERNに低振幅化がみられるものの、正反応時でも誤反応と同等の陰性成分が観察されるという興味深い知見が得られている (Ford, 1999; Alain, McNeely, He, Christensen, & West, 2002)。パーキンソン氏病でもERNの低振幅化が観察されるが (Falkenstein, Hielscher, Dziobek, Schwarzenau, Hoormann, Sunderman, & Hohnsbein, 2001)、OCD患者では逆に高振幅のERNが観察される (Gehring, Himle, & Nisenson, 2000)。臨床応用についての報告はまだ少なく、今後の研究発展が期待される領域である。

## 5. おわりに

本稿ではERNの機能的意義に関する知見を概観した。ERNの機能的意義は、基本的には、明確なエラー (overt error)、または、あらわでないエラー (covert error) の検出と考えられる。しかしながら、この処理過程はコンフリクト検出という概念で捉え直すこともできる。エラーとコンフリクトの概念的区別の曖昧さが、ERNの機能的意義に関する論争の根底にある。いずれのモデルが正しいのかを決めようとする努力は、当該論争をいたずらに持続させることにもなりかねない。

本稿で概観したように、ERNの機能的意義や発現メカニズムについては、まだ微視的な議論の余地を残している。しかしながら、ERNの振る舞いに関する知見の集積が一段落したことで、今後は、臨床応用や人間工学分野での幅広い適用に期待が高まっていくであろう。

## 引用文献

- Alain, C. McNeely, H. E., He, Y., Christensen, B. K., & West, R. 2002 Neurophysiological evidence of error-monitoring deficits in patients with schizophrenia. *Cerebral Cortex*, 12, 840-846.
- Angel, R. W. 1976 Efference copy in the control of movement. *Neurology*, 26, 1164-1168.
- Bernstein, P. S., Scheffers, M. K., & Coles, M. G. H. 1995 Where did I go wrong? A psychophysiological analysis of error detection. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 1312-1322.
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S., & Cohen, J. D. 2001 Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, 108, 624-652.
- Bush, G., Luu, P., & Posner, M. I. 2000 Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 215-222.
- Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D. M., Botvinick, M. M., Noll, D., & Cohen, J. D. 1998 Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science*, 280, 747-749.
- Coles, M. G., Scheffers, M. K., & Holroyd, C. B. 2001 Why is there an ERN/Ne on correct trials? Response representations, stimulus-related components, and the theory of error-processing. *Biological Psychology*, 56, 173-189.
- de Bruijn, E. R. A., Hulstijn, W., Meulenbroek, R. G. J., & van Galen, G. P. 2003 Action monitoring in motor control: ERPs following selection and execution errors in a force production task. *Psychophysiology*, 40, 786-795.
- Dehaene, S., Posner, M. I., & Tucker, D. M. 1994 Localization of a neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 5, 303-305.
- Dikman, Z. V., & Allen, J. J. 2000 Error monitoring during reward and avoidance learning in high- and low-socialized individuals. *Psychophysiology*, 37, 43-54.
- Dywan, J., Mathewson, K. J., & Segalowitz, S. J.

- 2004 Error-related ERP components and source monitoring in older and younger adults. In: M. Ullsperger & M. Falkenstein (Eds.), *Errors, Conflicts, and the Brain. Current Opinions on Performance Monitoring. Leipzig: Max Plank Institute of Cognitive Neuroscience*, Pp.184-192.
- Eriksen, B. A., & Eriksen, C. W., 1974 Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception & Psychophysics*, 16, 143-149.
- Falkenstein, M., Hielscher, H., Dziobek, I., Schwarzenau, P., Hoormann, J., Sunderman, B., & Hohnsbein, J. 2001 Action monitoring, error detection, and the basal ganglia: an ERP study. *Neuroreport*, 12, 157-161.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., & Hoormann, J. 1994 Event-related potential correlates of errors in reaction tasks. In: G. Karmos, M. Molnár, V. Csépe, I. Czigler, & J. E. Desmedt (Eds.), *Perspective of event-related potentials research (EEG Supplement 44)*. Elsevier, Amsterdam, Pp. 261-272.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., & Hoormann, J. 1996 Differential processing of motor errors. In: C. Ogura, Y. Koga, & M. Shimokochi (Eds.), *Recent Advances in Event-Related Brain Potential Research*, Elsevier, Amsterdam, Pp. 579-585.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, L. 1990 Effects of errors in choice reaction tasks on the ERP under focused and divided attention. In C. Brunia, A. Gaillard, & A. Kok (Eds.), *Psychophysiological Brain Research*. Tilburg University Press. Tilburg. 192-195.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, L. 1991 Effects of cross-modal divided attention on late ERP components: II. Error processing in choice reaction tasks. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 78, 447-455.
- Falkenstein, M., Hoormann, J., Christ, S., & Hohnsbein, J. 2000 ERP components on reaction errors and their functional significance: tutorial. *Biological Psychology*, 51, 87-107.
- Ford, J. M. 1999 Schizophrenia: the broken P300 and beyond. *Psychophysiology*, 36, 667-682.
- Gehring, W. J., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E. 1990 The error-related negativity: An event-related brain potential accompanying errors. *Psychophysiology (Abstract)*, 27, S34.
- 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.
- Gehring, W. J., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E. 1994 A brain potential manifestation of error-related processing. In: G. Karmos, M. Molnár, V. Csépe, I. Czigler, & J. E. Desmedt (Eds.), *Perspective of event-related potentials research (EEG Supplement 44)*. Elsevier, Amsterdam, Pp.261-272.
- Gehring, W. J., & Fencsik, D. E. 2001 Functions of the medial frontal cortex in the processing of conflict and errors. *The Journal of Neuroscience*, 21, 9430-9437.
- Gehring, W. J., Goss, B., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E. 1993b A neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 4, 385-390.
- Gehring, W. J., Himle, J., & Nisenson, L. G. 2000 Action-monitoring dysfunction in obsessive-compulsive disorder. *Psychological Science*, 11, 1-6.
- Gehring, W. J., & Knight, R. T. 2000 Prefrontal-cingulate interactions in action monitoring. *Nature Neuroscience*, 3, 516-520.
- Gehring, W. J., & Willoughby, A. R. 2002 The medial frontal cortex and the rapid processing of monetary gains and losses. *Science*, 295, 2279-2282.
- Gehring, W. J., & Willoughby, A. R. 2004 Are all medial frontal negativities created equal? Toward a richer empirical basis for theories of action monitoring. In: M. Ullsperger & M. Falkenstein (Eds.), *Errors, Conflicts, and the Brain. Current Opinions on Performance*

- Monitoring*. Leipzig: Max Plank Institute of Cognitive Neuroscience., Pp.14-20
- Holroyd, C. B., & Coles, M. G. H. 2002 The neural basis of human error processing: Reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychological Review*, 109, 679-709.
- Holroyd, C. B., Dien, J., & Coles, M. G. H. 1998 Error-related scalp potentials elicited by hand and foot movements: evidence for an output-independent error-processing system in humans. *Neuroscience Letter*, 242, 65-68.
- 岩木信喜 1998 視覚性GO/NO-GO課題におけるエラー関連陰性電位とNO-GO電位のオーバーラップ. *生理心理学と精神生理学*, 16, 77-84.
- Kahneman, D. 1973 *Attention and Effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. Pp. 13-27.
- Kiehl, K. A., Liddle, P. F., & Hopfinger, J. B. 2000 Error processing and the rostral anterior cingulate: An event-related fMRI study. *Psychophysiology*, 37, 216-223.
- Kornblum, S. 1992 Dimensional overlap and dimensional relevance in stimulus-response and stimulus-stimulus compatibility. In G. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior* (Vol. 2, Pp. 743-777). Amsterdam: North-Holland.
- Kornhuber, H. H., & Deecke, L. 1965 Hirnpotentialänderungen bei Willkürbewegungen und Passiven Bewegungen des Menschen: Bereitschaftspotential und reafferente Potentiale. *Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*, 248, 1-17.
- Leuthold, H., & Sommer, W. 1999 ERP correlates of error processing in spatial S-R compatibility tasks. *Clinical Neurophysiology*, 110, 342-357.
- Logan, G. D. 1994 On the ability to inhibit thought and action: a users' guide to the stop signal paradigm. In: D. Dagenbach & T. H. Carr (Eds.), *Inhibitory Processes in Attention, Memory, and Language*. Academic Press, San Diego, Pp. 189-239.
- Luu, P., Collins, P., & Tucker, D. M. 2000 Mood, personality, and self-monitoring: negative affect and emotionality in relation to frontal lobe mechanisms of error monitoring. *Journal of Experimental Psychology: General*, 129, 43-60.
- 正木宏明 1994 運動学習過程における脳の緩電位変動. 早稲田大学大学院人間科学研究科修士論文 (未公開)
- Masaki, H., & Segalowitz, S. J. 2004 Error negativity: A test of the response conflict versus error detection hypotheses. In: M. Ullsperger & M. Falkenstein (Eds.), *Errors, Conflicts, and the Brain. Current Opinions on Performance Monitoring*. Leipzig: Max Plank Institute of Cognitive Neuroscience, Pp.76-83.
- 正木宏明・山崎勝男 1992 運動学習課題の正誤反応と準備電位. 日本スポーツ心理学会第19回大会研究発表抄録集, B-08.
- 正木宏明・山崎勝男 2000 エラー反応に特異的な脳の陰性電位成分の検討. 日本体育学会第51回大会号, 174.
- 正木宏明・高澤則美・山崎勝男 1999 認知的葛藤課題におけるエラー関連陰性電位の検討. *生理心理学と精神生理学*, 17, 158.
- Masaki, H., Takasawa, N., & Yamazaki, K. 2001a Action monitoring in a target force production task. *Psychophysiology*, 38, (suppl.), 64.
- Masaki H., Tanaka H., Takasawa N., & Yamazaki K. 2001b Error-related brain potentials elicited by vocal errors. *NeuroReport*, 3, 1851-1855.
- Masaki, H., Tanaka, H., Takasawa, N., & Yamazaki, K. 2001c Negative component following incorrect feedback represents mismatch process between internal representation and feedback information. *Psychophysiology*, 38, (suppl.), 64.
- Miltner, W. H. R., Braun, C. H., & Coles, M. G. H. 1997 Event-related brain potentials following incorrect feedback in a time-estimation task: Evidence for a "generic" neural system for error detection. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9, 788-798.
- Miltner, W. H. R., Brauer, J., Hecht, H., Trippe, R., & Coles, M. G. H. 2004 Parallel brain activity for self-generated and observed errors. In: M.

- Ullsperger & M. Falkenstein (Eds.), *Errors, Conflicts, and the Brain. Current Opinions on Performance Monitoring*. Leipzig: Max Plank Institute of Cognitive Neuroscience, Pp.124-129.
- Mozer, M. C., & Sitton, M. 1998 Computational modeling of spatial attention. In H. Pushler (Ed.), *Attention*. London: UCL Press, 341-393.
- Murphy T. I., Richard, M., Masaki, H., & Segalowitz, S. J. 2003 Whoops, DARN, who cares: The effect of sleepiness on the error-related negativity. *Psychophysiology*, 40, (Suppl.) 62.
- Nieuwenhuis, S., Yeung, N., van den Wildenberg, W., & Ridderinkhof, K. R. 2003 Electrophysiological correlates of anterior cingulate function in a Go/NoGo task: Effects of response conflict and trial-type frequency. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 3, 17-26.
- Pailing, T. E., & Segalowitz, S. J. 2004 The error-related negativity (ERN/Ne) as a state and trait measure: Motivation, personality and ERPs in response to errors. *Psychophysiology*, 41, 84-95.
- Papetz, J. W. 1937 A proposed mechanism of emotion. *Archives of Neurology and Psychiatry*, 38, 725-743.
- Scheffers, M. K., Humphrey, D. G., Stanny, R. R., Kramer, A. F., & Coles, M. G. H. 1999 Error-related processing during a period of extended wakefulness. *Psychophysiology*, 36, 149-157.
- Segalowitz, S. J., Davies, P. L., Gavin, W. J., & Schmidt, L. A. 2004 The Development of the Error Negativity in Children and Adolescents. In: M. Ullsperger & M. Falkenstein (Eds.), *Errors, Conflicts, and the Brain. Current Opinions on Performance Monitoring*. Leipzig: Max Plank Institute of Cognitive Neuroscience, Pp.177-184.
- 高澤則美・多喜乃亮介・山崎勝男 1990 運動学習中に提示したfeedback音由来の事象関連電位. 生理心理学と精神生理学, 8, 95-101.
- 田中秀明・正木宏明・高澤則美・山崎勝男 2000 Go/NoGo課題におけるエラー検出処理—エラー関連陰性電位による検討—. ヒューマンサイエンスリサーチ (早稲田大学大学院人間科学研究科紀要), 9, 299-311.
- 田中秀明・正木宏明・高澤則美・山崎勝男 2002 エラー処理の注意資源配分とエラー関連陰性電位. 生理心理学と精神生理学, 20, 29-37.
- 田中秀明・正木宏明・高澤則美・山崎勝男 2003 情報処理段階とエラー関連陰性電位. 臨床神経生理学, 31, 426-432.
- Van't Ent, D., & Apkarian, P. 1999 Motoric response inhibition in finger movement and saccadic eye movement: a comparative study. *Clinical Neurophysiology*, 110, 1058-1072.
- van Schie, H. T., Mars, R. B., Coles, M. G. H., & Bekkering, H. 2004 Modulation of activity in medial frontal and motor cortices during error observation. *Nature Neuroscience*, 7, 549-554.
- van Veen, V., & Carter, C. S. 2002 The timing of action-monitoring processes in the anterior cingulate cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14, 593-602.
- Vidal, F., Hasbroucq, T., Grapperon, J., & Bonnet, M. 2000 Is the 'error negativity' specific to errors? *Biological Psychology*, 51, 109-128.



# An ERP study of the effect of time interval memory trace on temporal processing

Yoshiko Mochizuki<sup>a,\*</sup>, Shigeki Takeuchi<sup>a</sup>, Hiroaki Masaki<sup>b</sup>,  
Noriyoshi Takasawa<sup>c</sup>, Katuo Yamazaki<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Graduate School of Human Sciences, Waseda University, Japan*

<sup>b</sup>*School of Sport Sciences, Waseda University, Japan*

<sup>c</sup>*Edogawa University, Japan*

---

**Abstract.** The effect of time interval memory trace on temporal processing was investigated. Event-related potentials (ERPs) were recorded in a time reproduction task. Ten healthy participants were asked to memorize the encoding interval (3000 or 2700 ms), retain the interval during the retention period (3000 or 9000 ms) and reproduce the interval. The reproduction error of our study suggests that the reproduction of the interval was relatively difficult under encoding-2700 ms conditions. In the ERP activities at the 500–1000 ms period of the reproduction phase, the contingent negative variation (CNV) amplitude of retention-9000 ms conditions was significantly larger than that of retention-3000 ms conditions over Fpz. Our study suggests that the length of retention affects the time processing of the time reproduction, and the CNV over the frontal cortex seemed to change as a function of the remains of time interval memory trace being accompanied with attention resources allocation to efficiently execute the time reproduction task. © 2004 Elsevier B.V. All rights reserved.

*Keywords:* A time reproduction task; CNV; Frontal cortex; Attention; Memory

---

## 1. Introduction

Time is always involved in completing our behavior. The temporal processing of a time interval is a very important function in the behavior; however, the actual underlying mechanism still remains unclear.

As the mechanism of time processing involves attention and working memory [1], timing is thought to be related to the function of the frontal cortex [2]. The contingent

---

\* Corresponding author. Tel./fax: +81 4 2947 6832.

*E-mail address:* mochy@fuji.waseda.jp (Y. Mochizuki).



negative variation (CNV) over the frontal cortex develops in time perception tasks. Casini and Macar [3] used a time reproduction task and reported that the CNV over the prefrontal cortex fluctuated as a function of the allocation of attention resources. Peeuty et al. [4] investigated the relationship between memory trace and CNV in a temporal task and suggested that the amplitudes of the CNV over the anterior frontal cortex changed as a function of the remains of memory trace in the interval-based time processing.

This study used CNV to investigate the time processing of reconstructing a time interval memory trace in a reproduction task by varying the retention duration (3000 or 9000 ms). The CNV under the retention-9000 ms conditions in the frontal cortex would be larger if a participant might allocate attention resources to the reconstruction of the time interval to correctly complete the task. Meanwhile, each participant had to press a key at the optimal time. Since the duration of motor response was thought to be a part of the motor program before response execution [5], the early CNV was predicted to increase by allocating attention resources to reconstruct the time interval memory trace.

## 2. Method

### 2.1. Subjects

Ten young healthy and right-handed participants (2 females and 8 males;  $24.7 \pm 2.8$  years old) were paid (2000 yen per 3 h) to perform the experiment. The experiment was conducted with the informed consent of each participant.

### 2.2. Task

The participants performed a time reproduction task. The task consisted of four conditions (encoding-3000 ms/retention-3000 ms, encoding-3000 ms/retention-9000 ms, encoding-2700 ms/retention-3000 ms, and encoding-2700 ms/retention-9000 ms). Each participant was asked to memorize either of the encoding intervals (3000 or 2700 ms), retain the interval during either of the retention periods (3000 or 9000 ms) and reproduce the interval by pressing a key with the middle finger of their right hand. The feedback (FB; early, correct or late) was given 2500 ms after pressing the key.

### 2.3. ERP recording and analysis

Electroencephalograms (EEGs) were recorded digitally from 27 electrode sites and referenced to the right ear lobe. Horizontal and vertical electrooculograms (EOGs) were simultaneously recorded. The sampling rate was 250 Hz. A bandpass filter of 0.016–100 Hz was used. Event-related potentials (ERPs) were obtained for each condition. The averaging period was 4000 ms, with a 200-ms baseline before the onset of S1 (the start of the reproduction). A three-way ANOVA [site (Fpz/Fz/FCz/Cz/CPz/Pz/Oz) × encoding (3000/2700 ms) × retention (3000/9000 ms)] was performed on the mean amplitudes in each time window [time window 1 (TW1; 500–1000 ms after S1), time window 2 (TW2; 1000–1500 ms), time window 3 (TW3; 1700–2200 ms for encoding-2700 ms conditions, and 2000–2500 ms for encoding-3000 ms conditions) and time window 4 (TW4; 2200–2700 ms for encoding-2700 ms conditions, and 2500–3000 ms for encoding-3000 ms conditions)]. A four-way ANOVA [lateralization (left/right) × site (Fp1, F3, F7, FC1, FC5, C3, CP5, P3, P7, O1/Fp2, F4, F8, FC2, FC6, C4, CP6, P4, P8, O2) × encoding (3000/

2700 ms)×retention (3000/9000 ms)] was carried out to test the lateralization of the brain activities. A two-way ANOVA [encoding (3000/2700 ms)×retention (3000/9000 ms)] was performed on the reproduction error time of four conditions.

### 3. Results

#### 3.1. Behavior

The ANOVA including encoding (2)×retention (2) yielded a retention×site interaction [ $F(1,9)=6.51, p<0.05$ ]. Post-hoc analysis indicated that the reproduction error under the encoding-2700 ms/retention-3000 ms condition was larger than that under the encoding-3000 ms/retention-3000 ms condition [ $F(1,9)=5.92, p<0.05$ ] and the error under the encoding-2700 ms/retention-9000 ms condition was larger than that under the encoding-3000 ms/retention-9000 ms condition [ $F(1,9)=38.22, p<0.01$ ].

#### 3.2. ERP

Fig. 1. shows the CNV waveforms over Fpz during TW1 and TW2 averaged across 10 participants for four conditions. The ANOVA including site (7)×encoding (2)×retention (2) yielded a retention×site interaction tendency in TW1 [ $F(1,9)=2.10, p<0.10$ ]. Post-hoc analysis indicated that CNV amplitude during retention-9000 ms conditions were significantly larger than that in the retention-3000 ms conditions at Fpz [ $F(1,9)=9.78, p<0.05$ ] and tended to be larger at FCz [ $F(1,9)=4.33, p<0.10$ ], Cz [ $F(1,9)=4.73, p<0.10$ ] and CPz [ $F(1,9)=4.88, p<0.10$ ]. The ANOVA also demonstrated an encoding×retention interaction in TW1 [ $F(1,9)=3.90, p<0.10$ ], TW2 [ $F(1,9)=4.54, p<0.10$ ], TW3 [ $F(1,9)=6.64, p<0.05$ ] and TW4 [ $F(1,9)=15.22, p<0.01$ ]. Post-hoc analysis confirmed that the encoding-2700 ms/retention-9000 ms condition was significantly larger or tended to be larger than the encoding-2700 ms/retention-3000 ms condition in TW1 [ $F(1,9)=6.28, p<0.05$ ], TW2 [ $F(1,9)=4.33, p<0.10$ ], TW3 [ $F(1,9)=4.94, p<0.10$ ] and TW4 [ $F(1,9)=4.20, p<0.10$ ]. The ANOVA including lateralization (2)×site (10)×encoding (2)×retention (2) revealed the main effect of lateralization in TW3. The amplitude of the left hemisphere was significantly larger than that of the right hemisphere [ $F(9,81)=2.55, p<0.05$ ]. A

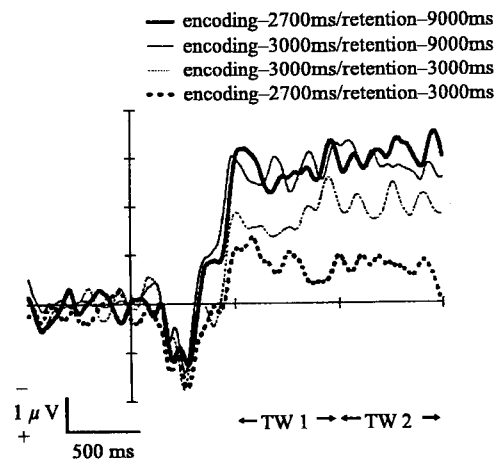


Fig. 1. Grand average CNV waveforms recorded over Fpz during time windows 1 (TW1) and 2 (TW2) for four conditions ( $N=10$ ). The vertical line shows S1 (the start of the reproduction).

lateralization  $\times$  site interaction was also yielded in TW4 [ $F(9,81)=2.55, p<0.05$ ]. Post-hoc analysis showed that C3 was larger than C4 ( $p<0.05$ ) and CP5 was larger than CP6 ( $p<0.01$ ).

#### 4. Discussion

This study investigated the effect of time interval memory trace on temporal processing. The CNV amplitudes in TW1 under the retention-9000 ms conditions were significantly larger than those under the retention-3000 ms conditions over Fpz and tended to be larger over FCz, Cz and CPz. The retention-9000 ms seemed too long to maintain enough of the memory trace to execute an optimal time reproduction. Attention resources were then allocated and neuron networks reactivated to reconstruct the memory trace. However, relatively enough of the memory trace remained under the retention-3000 ms conditions, hence, a newly acquired memory trace was not reconstructed. The early CNV seemed to reflect the difference of the activities. The encoding-2700 ms/retention-9000 ms condition tended to produce a larger CNV than did the encoding-2700 ms/retention-3000 ms condition over midline areas in the 500–2700 ms period. Under encoding-2700 ms conditions, which seemed relatively difficult to reproduce compared with encoding-3000 ms conditions, as a result of the reproduction error, the effect of the memory trace was thought to be maintained in whole time windows.

In the reproduction task used in our study, a participant had to press a key to reproduce the interval. In other words, time processing was used to control pressing the key at the optimal time. The duration of response is thought to be a parameter of motor programming before response execution [5]. Our study showed that the CNV in the left hemisphere was larger than in the right hemisphere in TW3 and that, over C3, was larger than C4 in TW4, indicating that preparation for motor execution must start around 1000 ms before the target time. The assumption that the early CNV of the frontal cortex before motor execution might develop under retention-9000 ms conditions was supported. The early CNV of our study seems to fluctuate as a function of time interval memory trace.

#### Acknowledgements

This research was supported, in part, by Grant-in-Aid for Scientific Research (C) (15530478) from the Japan Society for the Promotion of Science and by the Waseda University Grant for Special Research Projects (2003A-940).

#### References

- [1] C. Fortin, R. Breton, Temporal interval production and processing in working memory, *Perception & Psychophysics* 57 (1995) 203–215.
- [2] V. Monfort, V. Pouthas, R. Ragot, Role of frontal cortex in memory for duration: an event-related potential study in humans, *Neuroscience Letters* 286 (2000) 91–94.
- [3] L. Casini, F. Macar, Prefrontal slow potentials in temporal compared to nontemporal tasks, *Journal of Psychophysiology* 10 (1996) 252–264.
- [4] M. Peeuty, R. Ragot, V. Pouthas, Processes involved in tempo perception: a CNV analysis, *Psychophysiology* 40 (2003) 69–76.
- [5] F. Macar, F. Vidal, L. Casini, The supplementary motor areas in motor and sensory timing: evidence from slow brain potential changes, *Experimental Brain Research* 125 (1999) 271–280.



## Stimulus preceding negativity represents arousal induced by affective picture

Shigeki Takeuchi<sup>a,\*</sup>, Yoshiko Mochizuki<sup>a</sup>, Hiroaki Masaki<sup>b</sup>,  
Noriyoshi Takasawa<sup>c</sup>, Katuo Yamazaki<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Graduate School of Human Sciences, Waseda University, 2-579-15, Mikashima, Tokorozawa, Saitama, Japan

<sup>b</sup>School of Sport Sciences, Waseda University, Japan

<sup>c</sup>Department of Sociology and Human Studies, Edogawa University, Japan

---

**Abstract.** In this study, we investigated the effect of affective valence on the stimulus-preceding negativity (SPN) using the international affective picture system (IAPS). We adopted a S1–S2 paradigm, in which the subject could know the content of the forthcoming affective-slide (positive, negative or neutral picture) by the S1 cue (three types of gray-and-white striped squares). Our procedure differentiated these affective valences which were assessed by questionnaires. The self-assessment mannequin (SAM) data showed that the emotional score (pleasantness) significantly increased in the order of negative, neutral, and positive picture. The arousal scores of the SAM and the multiple mood scale (MMS) for negative picture were higher than for the other pictures. The SPN over the frontal regions significantly increased preceding the negative pictures, but not preceding the neutral and positive pictures. Our results suggest that the SPN might represent arousal induced by emotion-inducing pictures. © 2004 Elsevier B.V. All rights reserved.

**Keywords:** Affective anticipation; Stimulus-preceding negativity (SPN); International affective picture system (IAPS)

---

### 1. Introduction

The anticipation process plays an important role in human behaviour. We can quickly determine our next appropriate behaviour by anticipating forthcoming events. In addition, the anticipation process might change the affective-motivational state, resulting in higher arousal (e.g., Ref. [1]).

---

\* Corresponding author. Tel.: +81 42 949 8113x3568; fax: +81 42 949 8113x3568.

E-mail address: tshigeki@asagi.waseda.jp (S. Takeuchi).

Recent event-related potential (ERP) studies have reported that the stimulus-preceding negativity (SPN) might manifest the affective-motivational anticipation of forthcoming events [2–4]. In most studies of SPN, however, the direction of affective valence (i.e., positive or negative) was not clearly manipulated. In addition, it still remains unclear if increased SPN represents affective anticipation or just higher arousal induced by affective-motivational stimuli. Thus, we investigated the influence of the direction of affective valence on SPN using the international affective picture system (IAPS). The IAPS assesses emotion with orthogonal dimensions (i.e., arousal and affective valence). Because our main concern was to clarify the effect of affective valence on SPN, we used negative, positive, and neutral affective slides that would not differ in arousal values.

## 2. Method

### 2.1. Participants

The 11 participants (8 men, 3 women), between 22 and 33 years of age (mean  $\pm$  S.D. = 25.1  $\pm$  3.4 years), were mostly recruited from the Waseda University community. All participants had normal vision or corrected-to-normal vision. They were paid 800 yen/h (US\$7.2/h) for their participation. Informed consent was obtained.

### 2.2. Task

Participants performed an S1–S2 paradigm task. The S1 cues were three types of gray-and-white striped squares (one cycle per degree) (i.e., vertical stripe, horizontal stripe, or lattice pattern). The S1 cue was presented for a duration of 2000 ms. The S2 cues were three types of pictures, chosen from the IAPS, representing each affective valence (positive, negative, and neutral). The duration of the S2 cue was 4000 ms. Participants could anticipate the affective valence of S2 pictures from the S1 cues. Each participant performed a total of 192 trials.

Emotional and arousal state during the preceding period and the subjective affective-valence of the presented pictures were assessed using two questionnaires. The multiple mood scale (MMS) was used to estimate mood during the period preceding picture presentation, and the self-assessment mannequin (SAM) was used to assess the content of the presented pictures. After the experimental session, participants rated both scales by viewing each S1 cue and S2 picture.

### 2.3. ERP recordings and analysis

The electroencephalogram (EEG) was recorded from 27 sites with tin electrodes embedded in a nylon mesh cap. The left ear lobe served as the reference. An averaged ear lobe reference was derived off-line using right ear lobe data. For the detection of artifacts, the vertical and horizontal electrooculogram (EOG) was recorded using tin electrodes. The digitized sampling rate and online band-pass filter were 250 and 0.16–100 Hz, respectively. Mean SPN amplitudes over the 200-ms interval preceding S2 were calculated at F3, F4, C3, C4, P3 and P4, referred to a baseline of 200 ms prior to fixation.

To estimate arousal during the period preceding S2, the alpha power density (alpha 1: 8.5–10 Hz and alpha 2: 10.5–12 Hz) was compared among the preceding periods of

different affective pictures. Power density values were computed log-transformed mean power density over midline electrode sites.

### 3. Results

#### 3.1. Questionnaire

The questionnaire data showed that our procedure evoked affective valence during the preceding period and on picture presentation. According to the SAM results, the emotional score (pleasantness) significantly increased in the order of negative, neutral and positive picture ( $F(2,20)=130.13$ ,  $p<0.0001$ , post-hoc test:  $ps<0.05$ ). In addition, the arousal score was significantly higher for the negative pictures than for both neutral and positive pictures ( $F(2,20)=3.78$ ,  $p<0.05$ , post-hoc test:  $ps<0.05$ ).

The depression, liveliness, and friendliness scores of the MMS showed that participants estimated negatively in order of the preceding periods of negative, neutral and positive picture presentation (depression:  $F(2,20)=25.74$ ,  $p<0.001$ , liveliness:  $F(2,20)=37.00$ ,  $p<0.001$ , friendliness:  $F(2,20)=42.78$ ,  $p<0.001$ , post-hoc test:  $ps<0.05$ ). In addition, the hostility, well being, and startle scores showed that participants rated more negatively for the negative condition than for both the neutral and positive condition (hostility:  $F(2,20)=25.74$ ,  $p<0.001$ , well being:  $F(2,20)=33.21$ ,  $p<0.001$ , startle:  $F(2,20)=30.91$ ,  $p<0.001$ , post-hoc test:  $ps<0.05$ ). Moreover, the scale of concentration for positive condition was lower than for other conditions ( $F(2,20)=5.08$ ,  $p<0.05$ , post-hoc test:  $ps<0.05$ ).

#### 3.2. ERP

Fig. 1 shows the grand-averaged SPNs prior to the negative, neutral and positive slides. The mean amplitude of SPN was subjected to a repeated-measures ANOVA with Condition (preceding the negative, neutral and positive picture), Electrode (frontal, central and parietal), and Hemisphere (left and right). The ANOVA revealed significant interaction between Condition and Electrode ( $F(4,40)=2.80$ ,  $p<0.05$ ), indicating that the

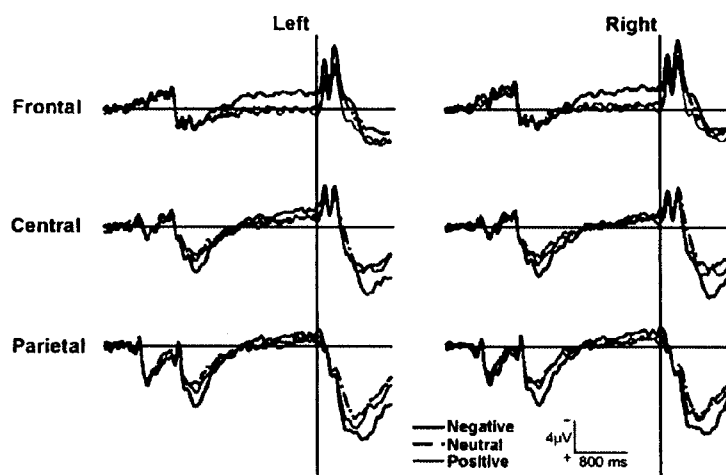


Fig. 1. Grand averaged SPN waveforms recorded at F3, F4, C3, C4, P3 and P4 ( $N=11$ ) separately averaged for each condition (Negative/Neutral/Positive). The vertical line indicates the onset of S2.

SPNs over frontal regions became larger preceding negative pictures than neutral and positive pictures ( $F(2,20)=4.12$ ,  $\epsilon=0.80$ ,  $p<0.05$ , post-hoc test:  $ps<0.05$ ).

The alpha 1 and alpha 2 power density significantly increased over occipital regions in comparison to the other regions ( $ps<0.05$ ). In addition, alpha 1 power density for the preceding period of negative picture presentation was lower than for the preceding periods of positive and neutral picture presentation ( $F(2,20)=6.22$ ,  $p<0.05$ , post-hoc test:  $ps<0.05$ ), suggesting higher arousal for the negative slide.

#### 4. Discussion

We succeeded in manipulating affective valence as was indicated by the SAM. The negative- and positive-emotional pictures in our study induced negative and positive affective anticipation, respectively. This was also supported by the scores of the related items of MMS (i.e., liveliness and depression). Regardless of our careful choice of pictures, however, the negative-emotional pictures resulted in higher arousal. The alpha 1 power density was higher during the waiting period of the negative-emotional picture than during those of the other pictures.

The SPNs increased over frontal regions during the waiting period of the negative-emotional picture. On the other hand, the SPNs did not increase before the positive-emotional or the neutral picture. The SPN associated with the negative affect-emotional picture seems to support the affective-motivational account of the SPN. However, if the SPN represents affective-motivational aspects, it should also increase preceding the positive-motivational picture; this is not the case in our study. Thus, it is plausible that the SPN might be more sensitive to arousal than emotion per se generated by emotion-inducing pictures.

#### Acknowledgements

This research was supported in part by Grant-in-Aid for Scientific Research (C) (15530478) from the Japan Society for the Promotion of Science and by the Waseda University Grant for Special Research Projects (2003A-940).

#### References

- [1] D.J. Chwilla, C.H.M. Brunia, Event-related potential correlates of non-motor anticipation, *Biol. Psychol.* 32 (1991) 125–141.
- [2] K.B.E. Böcker, et al., Stimulus-preceding negativity induced by fear: a manifestation of affective anticipation, *Int. J. Psychophysiol.* 43 (2001) 77–90.
- [3] C.H.M. Brunia, E.J.P. Damen, Distribution of slow brain potentials related to motor preparation and stimulus anticipation in a time estimation task, *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 69 (1988) 234–243.
- [4] Y. Kotani, et al., Effect of positive and negative emotion on stimulus-preceding negativity prior to feedback stimuli, *Psychophysiology* 38 (2001) 873–878.

# エラー関連陰性電位による注意資源の離散的および 段階的配分方略の研究<sup>1</sup>

田中秀明<sup>2</sup> 桜美林大学 望月芳子 正木宏明 早稲田大学  
高澤則美 江戸川大学 山崎勝男 早稲田大学

**A study of attentional resource of discrete and gradational allocation strategy using error-related negativity (ERN)**

**Hideaki Tanaka** (*Obirin University*), **Yoshiko Mochizuki, Hiroaki Masaki** (*Waseda University*), **Noriyoshi Takasawa** (*Edogawa University*), and **Katsuo Yamazaki** (*Waseda University*)

The error-related negativity (ERN) is a component of the event-related brain potential (ERP) that is associated with action monitoring and error detection. The ERN amplitude reflects attentional resource allocated to error detection. The present study examined whether discrete or gradational allocation strategy of attentional resource in error detection using the ERN amplitude. Only Eriksen flanker task was used in the single task condition. Eriksen flanker task was used as a primary task and Sternberg memory search task was used as a secondary task in the dual task conditions. The task difficulty of the secondary task manipulated in the present study included the memory load. Memory set sizes of 2, 4 and 6 were used in the Sternberg memory search task (M2, M4 and M6 conditions). The results indicated that reaction time was gradually delayed in the primary task as the task difficulty of the secondary task gradually increased. However the ERN amplitude of the primary task decreased in M6 condition alone. In conclusion, discrete allocation strategy of attentional resource was adopted in the error detection.

**Key words:** attentional resource, discrete allocation strategy, gradational allocation strategy, error detection, error-related negativity.

*The Japanese Journal of Psychology*  
2005, Vol. 76, No. 1, pp. 43-50

選択反応時間課題のエラー反応によって惹起され、反応開始後 60 ms に頂点振幅を持ち前頭中心部に分布する陰性の事象関連電位 (event-related potential: ERP) がある。この事象関連電位はエラー関連陰性電位 (error-related negativity: 以下 ERN とする) と呼ばれ (Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann, & Blanke, 1990; Gehring, Goss, Coles, Meyer, & Donchin, 1993), エラー検出に関する認知処理機能を

反映した電位と理解されている (Gehring et al., 1993; Scheffers, Coles, Bernstein, Gehring, & Donchin, 1996)。ERN の脳内発生源は、ヒトを対象とした等価電流双極子推定法 (Holroyd, Dien, & Coles, 1998), fMRI (functional magnetic resonance imaging; Kiehl, Liddle, & Hopfinger, 2000) を用いた研究によって、前部帯状皮質 (anterior cingulate cortex) に推定されている。

Correspondence concerning this article should be sent to: Hideaki Tanaka, Department of Psychology, Health & Sports Science, College of Humanities, Obirin University, Tokiwamachi, Machida 194-0294, Japan (e-mail: tanahide@ruri.waseda.jp)

<sup>1</sup> 本研究は、2003 年度日本学術振興会科学研究費基盤研究 C (課題番号: 15530478, 研究代表者: 山崎勝男) と 2003 年度早稲田大学特定課題研究助成費 (課題番号: 2003A-111, 研究代表者: 山崎勝男) の補助を受けて実施した。また本研究は、第一著者が早稲田大学に提出した 2002 年度の博士論文の一部を加筆・修正したものである。

<sup>2</sup> 現所属: 産業技術総合研究所特別研究員。

従来の ERN に関する研究を概観すると、エラー検出の認知処理に必要な注意資源配分量を反映して、ERN 振幅は増減すると報告されている。エラー検出に配分される注意資源量が減少すると、それに伴い ERN 振幅は減少し、エラー検出機能の低下が見出された (Scheffers, Humphrey, Stanny, Kramer, & Coles, 1999; 田中・正木・高澤・山崎, 2002, 2003)。

田中他 (2002) は、二つの課題を同時に遂行する二重課題を用いて注意資源の配分方略と ERN 振幅変動の関係を検討した。単一課題は認知的葛藤課題を使用



し、二重課題は認知的葛藤課題を主課題とし、聴覚刺激に対する選択反応課題を副課題とした。さらに、聴覚刺激の周波数を弁別する条件と、弁別がより困難とされている聴覚刺激の呈示時間 (Turnbull, 1944) を弁別する条件を設定することで、副課題の難易度を操作した。その結果、主課題 ERN 振幅は、単一課題と比較して難易度の高い二重課題条件で有意に減少するが、二重課題条件間の難易度操作には影響されないことを見出した。田中他 (2003) においても、同様の結果が得られた。

ところで、Strayer & Kramer (1990) は二重課題における注意資源の配分方略と学習の概念を組み合わせ、注意資源の離散的および段階的配分方略の概念を提唱した。離散的配分方略とは、総量として限界容量のある注意資源には一定の閾値が存在し、副課題の難易度が低く、副課題の遂行に必要とされる注意資源量が閾値以下の分量で充足される場合は、主課題の情報処理へ余剰分の注意資源が一挙に離散的に投入される方略である。段階的配分方略とは、副課題の難易度の段階的操作に伴い、主課題の情報処理へ注意資源も段階的に配分される方略である。

上記の田中他 (2002, 2003) の実験では、副課題の難易度を段階的操作したにもかかわらず、主課題 ERN 振幅は段階的に変動しなかったため、主課題エラー検出へ注意資源が離散的に配分されたものと考えられる。一方 Gehring et al. (1993) は、課題遂行の速さを重視する条件、課題遂行の正確さを重視する条件、中立条件を設定し、各条件の ERN 波形を検討したところ、速さ重視、中立、正確さ重視の順に段階的に ERN 振幅が増大したと報告している。この結果は、エラー検出における速さと正確さのトレードオフを示したものであり、エラー検出へ注意資源が段階的に投入される配分方略が採られたことを示唆している。このように、エラー検出における注意資源の配分方略については知見が一致していない。

しかしながら、田中他 (2002, 2003) の実験では、副課題の難易度を操作した際、聴覚刺激の周波数および呈示時間の弁別課題をそれぞれ設定したため、二重課題条件間での刺激の物理的特性に大きな違いが生じた。この刺激の物理的特性の違いが課題の質的差異を引き起こしたために、厳密な意味で課題難易度を段階的に操作していなかったと考えられる。もし、副課題の質を統制し、純粋な実験変数の数量的変化によってのみ難易度を操作するならば、これは厳密に課題難易度を段階的に操作したといえる。このような操作をすれば、エラー検出における注意資源は、離散的に投入されるか、あるいは段階的に投入されるのかといった配分方略が明確になるものと考えられる。

Sternberg memory search task (Sternberg, 1966) は記憶探索課題であり、課題の質を変えることなく、記

憶負荷量の増減だけで難易度の段階づけを数量的に操作できる特徴がある (Wickens, Hyman, Dellinger, Taylor, & Meador, 1986)。そこで本研究では、副課題に Sternberg memory search task を用いて、エラー検出における注意資源の配分方略を ERN 振幅変動から検討することで、その配分方略が離散的配分方略と段階的配分方略のいずれが採られるのかを明確にすることを目的とする。エラー検出において段階的な配分方略が採られるのであれば、副課題の記憶負荷量の段階的增加に伴って、ERN 振幅は段階的に減少することが推測できる。ERN 振幅が段階的に減少しなければ、離散的な配分方略が採られたと示唆される。

なお、Sternberg memory search task には刺激と反応の対応が実験中に一貫する CM (consistent mapping) 条件と、実験のセッションごとに変動する VM (varied mapping) 条件がある。CM 条件の方が課題に習熟しやすく、一度課題に習熟すると課題遂行へ注意資源を投入する必要はなくなると報告されている (Shiffrin & Schneider, 1977)。したがって、本研究では VM 条件のみを使用した。

また、P300 は視覚刺激や聴覚刺激の評価に関する認知処理機能を反映する事象関連電位 (Kutas, McCarthy, & Donchin, 1977) である。この P300 振幅の増減は、刺激評価へ配分される注意資源量を示すといわれている (Kok, 1997, 2001)。そこで本研究では、ERN と P300 を併用することで注意資源の配分方略を詳細に検討した。

## 方 法

**実験参加者** 四肢が右利きの成人 9 名 (男子 4 名、女子 5 名) を実験参加者とした。実験参加者の年齢は  $23.2 \pm 2.5$  歳 (mean  $\pm$  SD) であった。

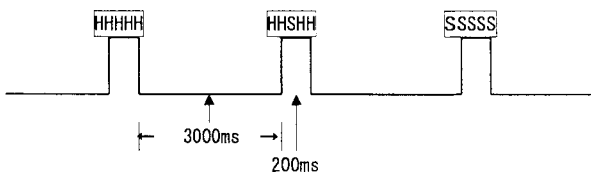
**課題** 本研究では単一課題あるいは二重課題を遂行する 4 条件を設定した。実験参加者は単一課題条件では Eriksen & Eriksen (1974) の認知的葛藤課題 (Eriksen flanker task) のみを遂行し、二重課題条件では、主課題である Eriksen flanker task と副課題である Sternberg memory search task を組み合わせて、同一ブロック内でこの二つの課題を遂行した。全条件において、刺激呈示の制御と行動指標の計測にはタキストスコープ (岩通アイセル社製 IS-702 AV タキストスコープ) を使用した。

Eriksen flanker task は、“H”と“S”で構成される文字列の中央文字 (標的刺激) に対して反応するもので、標的刺激の両側 4 文字はノイズ刺激であった。視覚刺激 (視角  $4.3^\circ \times 0.7^\circ$ ) は標的の文字とノイズ刺激との組み合わせから、一致刺激 (HHHHH, SSSSS) と不一致刺激 (SSHSS, HSHHH) に分類した。各刺激は CRT 上に一致刺激 (40%)、不一致刺激 (60%) の割合でランダム呈示した<sup>3</sup>。標的刺激に対してでき

るだけ速くかつ正確に、右第3指あるいは左第3指の伸展運動でキー上げ反応を行うように実験参加者に要請した。標的文字と反応手の割り当ては実験参加者間でカウンターバランスをとった。

Sternberg memory search task は、ブロック開始直前にアルファベットを短期間記憶し、CRT上に呈示される文字中に記憶した文字の有無を判断し、記憶した文字が存在する場合には、できるだけ正確に速く反応する作業である。記憶する標的文字は、2, 4, 6文字の3条件（以下、*M2*, *M4*, *M6*）とし、記憶しない非標的文字もそれぞれ2, 4, 6文字の組み合わせとした。刺激とした文字（視角 $0.7^\circ \times 0.7^\circ$ ）は、B, D, F, G, H, J, N, P, T, V, X, Zの中から、条件とブロックごとに標的文字と非標的文字を選択して使用した。例えば、*M2*条件の標的文字がV, Bとすれば、非標的文字はF, Zなどを用いる。V, Bの2文字がCRT上に呈示されたときは、記憶した文字と一致しているので、右足の足趾背屈運動でキー上げを行うように教示した。F, Zの場合は記憶した文字と一致していないので、左足の足趾背屈運動でキー上げ反応を行うように教示した。*M4*, *M6*条件も同様に標的文字と非標的文字をランダムに組み合わせさせた。いずれの条件も標的文字と非標的文字を等確率にランダム呈示した。

#### SINGLE TASK (SINGLE CONDITION)



#### DUAL TASK (M2, M4 AND M6 CONDITIONS)

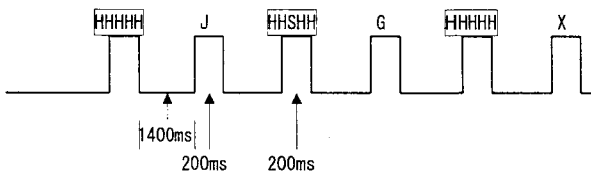


Figure 1. A schematic representation of the temporal structure of the single task (single condition) and the dual task (*M2*, *M4* and *M6* conditions). Alphabet in a figure is each stimulus of primary task and secondary task.

<sup>3</sup> 本研究で使用した Eriksen flanker task は、瞬目の混入したエラー試行を加算平均から除外すると、特にエラーの少ない一致刺激では ERN 波形を算出するために必要な加算回数が必要になる（田中他, 2002, 2003）。そこで本研究では、Rodriguez-Fornells, Kurzbuch, & Munte (2002) と同様に、不一致刺激において ERN 算出に必要な加算回数を確保するため、刺激は一致刺激（40%）、不一致刺激（60%）の割合で呈示した。

手続き Figure 1 は実験手続きを示したものである。Eriksen flanker task のみを遂行する単一条件は、実験参加者の前方 1 m にある CRT 上に文字列を 200 ms 間呈示し、試行間隔は 3 000 ms とした。また、*M2*, *M4*, *M6* の二重課題条件では、Eriksen flanker task と Sternberg memory search task を交互に遂行するため、文字列—1 字のアルファベット—文字列—1 字のアルファベットの順序で交互に刺激を呈示した。実験参加者は主課題（Eriksen flanker task）に対して、対応する手の第 3 指伸展運動で反応し、副課題（Sternberg memory search task）に対しては、対応する足趾の背屈運動で反応した。各二重課題条件では CRT 上に文字列と 1 字のアルファベットを 200 ms 間呈示し、試行間隔は 1 400 ms とした。単一条件、*M2* 条件、*M4* 条件、*M6* 条件の実施順序は実験参加者間でカウンターバランスをとった。条件ごとに 50 試行の練習をして、各条件 4 ブロック（100 試行/ブロック）を実施した。各ブロックとも最初の 3 試行はダミー試行とし、解析から除外した。

記録および分析方法 脳波 (EEG), 眼球運動 (EOG), 筋電図 (EMG) を脳波計 (NEC 三栄製 Synafit 1000) を用いて同時記録した。EEG は、Fz, Cz, Pz, C3, C4 から両耳垂結合を基準に時定数 5 s, 高域遮断周波数 100 Hz で導出した。EOG は左眼窩上下縁部から時定数 5 s で導出した。EMG は両前腕 (尺側手根伸筋) から時定数 0.03 s で導出した。電極はすべて銀塩化銀電極を用い、接触抵抗値は 5 k $\Omega$  以下とした。全測定事象はデータレコーダ (NF Electronic Instruments 製 5870 PCM DATA Recorder) に磁気記録した後、サンプリング周波数 200 Hz で A/D 変換した。EEG は主課題のキー上げ反応時点と、主課題、副課題の刺激呈示時点をそれぞれトリガに用いて加算平均した。 $\pm 100 \mu\text{V}$  以上の眼球運動や、体動などのアーチファクト混入試行は加算平均処理から除外した。ERN は中心部優勢に出現する (Gehring et al., 1993; Scheffers et al., 1996) ことから、本研究では ERN の解析対象部位を Cz に限定した。また、P300 は Pz から導出した。いずれの ERP 波形にも 10 Hz のローパス・フィルタをかけた。

ERN 頂点振幅は、反応開始前 100 ms 間の平均電位をベースラインとして、反応後 0—100 ms 区間内の最大陰性電位を計測した。P300 頂点振幅は刺激呈示前 100 ms 間の平均電位をベースラインとして、刺激呈示後 250—500 ms 区間内の最大陽性電位を計測した。また、3 水準以上の繰り返しのある 1 要因および 2 要因分散分析では、タイプ I エラーを統制するために、Greenhouse-Geisser の  $\epsilon$  による自由度補正を適用した。多重比較には Tukey 法を用いた。

EMG は両波整流した後に、刺激呈示前 200—100 ms 区間の振幅値について標準偏差 (SD) を試行タイ

プ毎に算出した (以下, 基線部  $SD$ )。反応開始後に EMG 振幅が基線部  $SD$  の 4 倍に達しなかった場合は無反応, 4 倍以上の場合は EMG 反応の生起とみなした。EMG 反応の有無の基準を上記のように設定したのは, 反応の有無の判定に EMG 振幅を使用する場合, 刺激呈示前の基線部振幅の変動 (基線部  $SD$ ) をノイズ変動と考え, そのノイズ変動と刺激呈示後の EMG 振幅を区別することが EMG 反応の有無の基準になるからである。しかし, このような基準は研究者がそれぞれ各自で経験的に定めている段階であり, 主に試行ごとに基線部  $SD$  を計測し, その 3-4 倍を当該試行の基準にする方法が採用されている (Smid, Mulder, Mulder, & Brands, 1992)。本研究では基線部  $SD$  の 4 倍を基準とした。

主課題のエラーは, 誤反応肢側にキー上げ反応が生じた場合を Overt エラーと定義した。誤反応肢側にキー上げ反応には至らなかったものの, EMG 反応が認められた場合は EMG エラーと定義した。本研究では EMG エラー試行を加算平均処理から除外した。また, 反応が極端に速い/遅い試行は刺激を正確に認知していない恐れがあるため, 主課題正反応試行のうち反応時間が 200 ms 未満あるいは 1000 ms 以上の試行を加算平均処理から除外した。

## 結果

**行動指標** Figure 2 上段は主課題正反応試行の平均反応時間を, 課題条件別と刺激呈示別に求めた結果である。刺激一致性 (2) × 課題条件 (4) の 2 要因分散分析の結果, 一致刺激よりも不一致刺激に反応時間の遅延が認められた ( $F(1, 8) = 43.43, p < .001$ )。また課題条件間の差も有意であり ( $F(3, 24) = 8.45, \epsilon = .64, p < .01$ ), 多重比較の結果, 反応時間は単一条件, M2 と M4 条件, M6 条件の順に有意に遅延した (いずれも  $p < .05$ )。

Figure 2 中段は, 主課題の平均 Overt エラー率を課題条件別と呈示刺激別に求めた結果である。刺激一致性 (2) × 課題条件 (4) の 2 要因分散分析の結果, 一致刺激よりも不一致刺激に対するエラー率は有意に高かった ( $F(1, 8) = 27.04, p < .001$ )。課題条件間に有意差はなかった。

Figure 2 下段は, 主課題の平均 EMG エラー率を課題条件別と呈示刺激別に求めた結果である。刺激一致性 (2) × 課題条件 (4) の 2 要因分散分析の結果, 一致刺激よりも不一致刺激に対する EMG エラー率は有意に高かった ( $F(1, 8) = 8.89, p < .05$ )。また課題条件間の差も有意であり ( $F(3, 24) = 5.40, \epsilon = .59, p < .05$ ), 多重比較の結果, EMG エラー率は M6 条件に比較して単一条件で増加した ( $p < .05$ )。

副課題における正反応試行の平均反応時間を課題条件別に求めた。その結果, M2 条件では  $376.2 \pm 6.2$

ms (mean  $\pm SD$ ), M4 条件では  $376.8 \pm 4.4$  ms, M6 条件では  $381.4 \pm 5.2$  ms であった。見かけ上 M6 条件の反応時間が遅延したが, 各条件間に有意差はなかった ( $F(2, 16) = 2.51, \epsilon = .92, ns$ )。また, 副課題のエラー率も各条件間に有意差はなかった。

**主課題不一致刺激の ERN** 主課題の一致刺激では Overt エラーの試行数が少なく, 十分な加算回数が確保できなかったため, 解析対象を主課題の不一致刺激に限定した。Figure 3 は, 主課題の反応開始時点をトリガとした Cz の総加算平均波形を, 反応の正誤別と課題条件別に示したものである。各条件ともに Overt エラー試行では反応後 0-100 ms 区間で陰性シフトする ERN が同定された。

ERN の平均頂点振幅値は, 単一条件が  $-5.9 \pm 10.1 \mu V$  (mean  $\pm SD$ ), M2 条件が  $-5.1 \pm 11.9 \mu V$ , M4 条件が  $-5.9 \pm 9.2 \mu V$ , M6 条件が  $-1.3 \pm 5.4 \mu V$  であっ

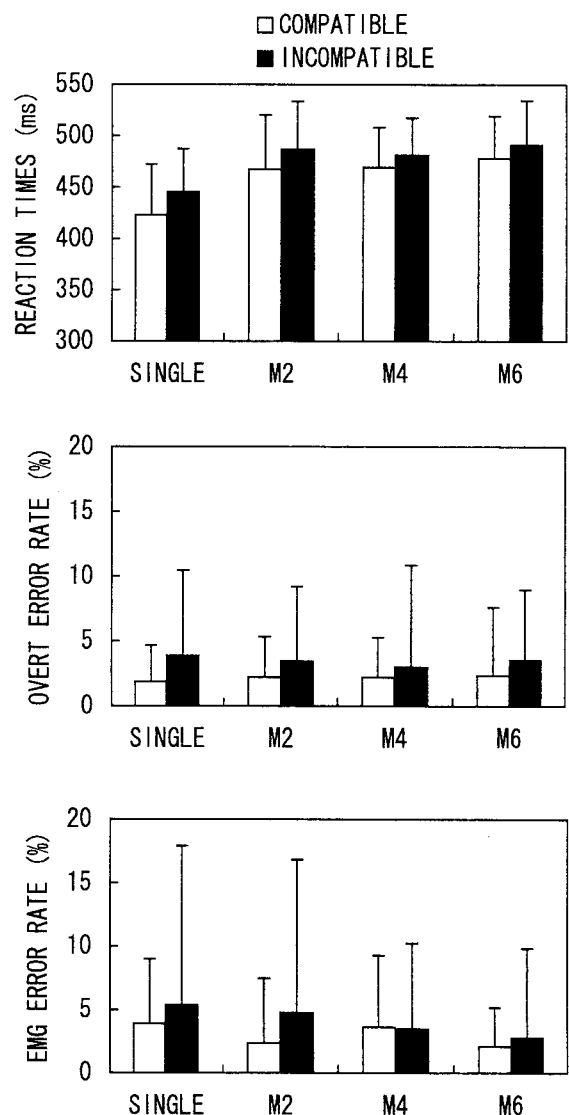


Figure 2. Mean reaction times (ms), mean overt error rate, and mean EMG error rate for compatible and incompatible stimuli in each experimental condition of primary task.

た。各条件で振幅を比較したところ、M6条件のERN平均頂点振幅のみが減少していた。ERNの平均頂点振幅について1要因分散分析を行ったところ、有意差がみられた ( $F(3, 24) = 3.30, \epsilon = .88, p < .05$ )。多重比較の結果、単一条件、M4条件と比較してM6条件のERN頂点振幅が有意に減少した ( $p < .05$ )。

**主課題不一致刺激のP300** Figure 4は、主課題のP300波形 (Pz) である。P300は、他条件に比較して単一条件で最も大きく発達した。平均頂点振幅値は、単一条件が  $12.4 \pm 4.8 \mu V$ 、M2条件が  $10.1 \pm 2.4 \mu V$ 、M4条件が  $8.4 \pm 4.5 \mu V$ 、M6条件が  $9.0 \pm 3.4 \mu V$  であった。平均頂点振幅値を条件間で比較したところ、有意差がみられ ( $F(3, 24) = 6.52, \epsilon = .73, p < .01$ )、単一条件と比較してM4条件、M6条件のP300頂点振幅が減少した ( $p < .05$ )。

**副課題P300** 副課題のP300平均頂点振幅は、M2条件が  $6.0 \pm 5.0 \mu V$ 、M4条件が  $4.0 \pm 4.7 \mu V$ 、M6条件が  $5.1 \pm 4.5 \mu V$  であった。平均頂点振幅値を条件間で比較したところ、有意差はなかった ( $F(2, 16) = 0.97, \epsilon = .93, ns$ )。

考 察

本研究では、ERN振幅を指標として、エラー検出

における注意資源の配分方略が一定の閾値を境として離散的に投入されるか、あるいは段階的に連続的に投入されるかを検討した。

刺激の一致性に関わらず主課題の平均反応時間は、単一条件よりもM2、M4条件の方が遅延し、M2、M4条件よりもM6条件の方が遅延した。ところで、反応時間は、刺激入力から反応出力に至る認知情報処理全体の効率を反映するため (Donders, 1969)、主課題反応時間は主課題に対する認知情報処理全体の注意資源量を反映していると考えられる。注意資源が配分さ

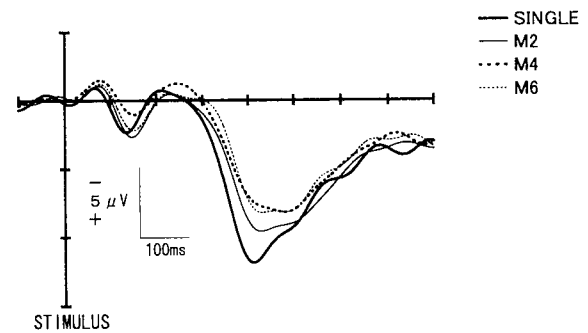


Figure 4. Stimulus-locked average ERP waveforms for the Pz for all conditions in primary task. Only incompatible trials were included in the averages.

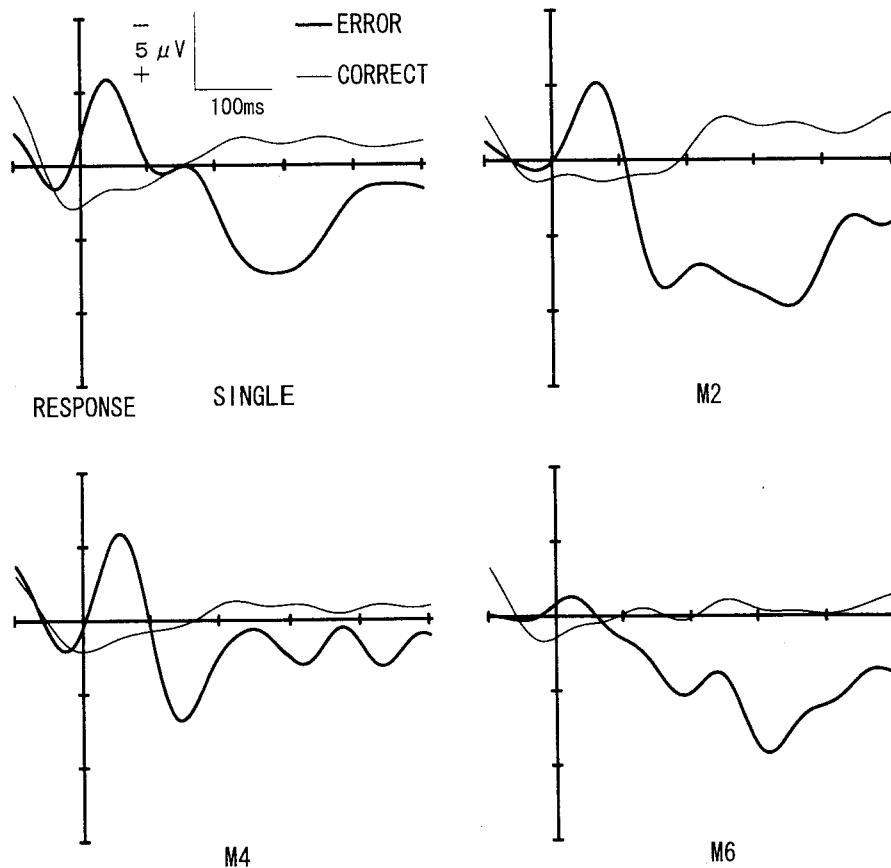


Figure 3. Grand-mean ERP waveforms (response synchronized) at Cz, for error and correct trials for all conditions in primary task. Only incompatible trials were included in the averages.

れないと処理効率は低下し、反応時間が遅延する。したがって、この結果は副課題の難易度上昇に伴って、処理に必要な注意資源が副課題へ多く配分され、そのトレードオフとして主課題の注意資源量が減少したことを示唆している。ただし、刺激評価の注意資源量を反映する主課題のP300頂点振幅は、単一条件と比較してM4条件、M6条件で有意に減少したが、副課題の段階的難易度操作に伴う振幅低下は示さなかった<sup>4</sup>。また、主課題のEMGエラー率はM6条件と比較して単一条件で有意に増加した。これは単一条件の課題に多くの注意資源が配分されたために課題遂行の正確さに敏感になり、EMGエラー率が増加したと考えられる。

副課題では、平均反応時間、エラー率とP300頂点振幅に条件間の差はなかった。副課題の行動指標とP300頂点振幅に差がなかったのは、主課題は手、副課題は足という運動系の出力が異なることに起因している可能性がある。手と比較すると、足は精密な動作がしにくいいため、記憶負荷量の違いに関わらずに条件差が生じなかったと考えられる。しかし、副課題の記憶負荷は確実に数量として増加しており、その副課題の記憶負荷の増加に伴って主課題の反応時間とP300頂点振幅が変動していることから、副課題によって段階的な難易度操作が行われたことを示唆している。

主課題のERN頂点振幅は、単一条件、M4条件と比較してM6条件で有意に減少した。M6条件以外では条件差はみられなかった。他の条件に比べて最も反応時間が遅く、最も負荷が増加した難易度の高い条件のみでERN振幅が有意に減少した結果は、田中他(2002, 2003)の知見と合致する。特にM4条件と比べてM6条件のERN振幅が有意に減少した結果から、副課題の難易度上昇によって副課題へ必要となる注意資源量が一定量を越えて配分されると、主課題のエラー検出に対する注意資源配分量は、一挙に離散的に減少する配分方略が採られたことが推察できる。主課題平均反応時間は、M2条件とM4条件に差がないものの、段階的な副課題の難易度変化に付随してほぼ段階的に変動したが、主課題のERN頂点振幅は段階的に変動することはなかった<sup>5</sup>。

日常生活でヒトはエラーを犯すことがある。例えば、パソコンの入力ミス、工作機械や車の操作ミスな

どがあり、このような些細なエラーが重大な事故を引き起こすこともある。エラーによって誘発される事故を予防したり、あるいは事故の被害を最小限に抑えるためには、エラーを検出し、それを修正する行動監視機構(アクションモニタリング)が重要な役割を果たすといわれている(Gehring et al., 1993; Logan, 1985)。したがって、ヒトの生命と生活の安全を確保するために、すべての認知処理の中でもエラー検出が優先的に機能することが推測できる。このアクションモニタリングの重要性を考慮して、本研究の結果を解釈すると、限界容量のある注意資源総量の中で、他の認知処理における注意資源の変動になるべく影響されないようにして、エラー検出へ優先的に注意資源を配分する方略が採られたものと考えられる。そして、さらに課題難易度が上昇して、他の認知処理に必要な注意資源量が一定の閾値を超えると、限界までエラー検出へ優先的に配分されていた注意資源量が、他の認知処理へ一挙に離散的に投入されたと推察できる。

ところで、二重課題における注意資源の配分方略を検討するうえで、非常に使用頻度の高い生理指標がP300である(Kok, 1997, 2001)。Kok(2001)によれば、二重課題を用いたP300研究は課題難易度パラダイムと、課題優先度パラダイムに大別される。課題難易度パラダイムは、一方の課題の難易度を変化させることで、その注意資源の配分方略を他方の課題のP300振幅を指標として検討する手法である(Wickens, Kramer, Vanasse, & Donchin, 1983)。課題優先度パラダイムは、主副の両課題に対する注意資源量の配分の割合を意識的に制御させることで、注意資源のトレードオフを主副の両P300振幅で比較検討する手法である。例えば、Strayer & Kramer(1990)は交互に呈示される主副両課題の視覚刺激に対して、全試行中の100%の主課題を遂行し、副課題を一切遂行しない100/0条件、主課題を90%副課題を10%遂行する90/10条件、以下同様に50/50条件、10/90条件、0/100条件の5条件を設定し、課題優先度を意識的に制御するように教示した。その結果、主課題と副課題に対する注意資源の意識的な配分とよく対応したP300振幅変動を示した。つまり、注意資源を意識的に配分しなかった課題と比較して、注意資源を優先的に配分した方の課題のP300振幅が増大した。

上記の両パラダイムに共通した知見は、難易度の段階的变化に伴ってP300振幅も段階的に変動することである。ただし、これらの知見を詳細に検討すると、課題優先度パラダイムでは比較的P300振幅が段階的に変動しやすい。他方、課題難易度パラダイムでは、段階的P300振幅変動がみられる場合(Wickens et al., 1983)と、段階的P300振幅変動がみられない場合がある(Kramer & Strayer, 1988)。これらの知見から、課題優先度の操作による意識的な注意資源配分の制御

<sup>4</sup> 本研究の結果では、主課題の反応時間とP300振幅変動の条件ごとの変動が異なっていた。これは行動指標と生理指標の乖離を示しており、行動指標のみでは知りえない認知処理の特性を生理指標によって示したことになる。

<sup>5</sup> Strayer & Kramer(1990)の実験方法と同様に、本研究では主課題と副課題の刺激提示間隔(1400ms)を十分な長さの時間間隔にしており、刺激提示間隔の長さが本研究の結果に影響を及ぼすことはないと考えられる。ただし、二重課題において、二課題間の間隔は注意資源の配分方略に影響を与える重要な問題なので、今後別の研究課題として検討する必要がある。

よりも、課題難易度の変動の方が、段階的な変動による配分方略は採られにくくなると推察される。

本研究の課題は、副課題の記憶負荷量の変化によって課題難易度を操作したものであり、課題難易度パラダイムに分類される。上記の知見を援用して本研究の結果を解釈すると、課題優先度パラダイム下の意識的な注意資源の配分方略ではなく、課題難易度パラダイムであったため、主課題のERN振幅は段階的な変動を示さなかった可能性もある。上記解釈は、主課題のP300頂点振幅が段階的振幅変動を示さなかったことから支持される。

Gehring et al. (1993) の課題遂行の速さと正確さのトレードオフを操作した研究では、速さ重視条件、中立条件、正確さ重視条件の順に、段階的にERN振幅が増大した。彼らの課題は、条件間で速さと正確さに対する意識的な注意の方向性を操作したことから、課題優先度パラダイムに極めて類似した手法が採られたと推察できる。彼らの知見と本研究の知見を比較すると、エラー検出における注意資源は、実験参加者の意識的な注意の制御などの内的要因に対しては段階的な変動を示し、課題難易度の操作などの外的要因に対しては離散的な変動を示す配分方略が採られることが示唆された。

また、田中他(2002, 2003)は、ERNの脳内発生源である前部帯状皮質に関する神経科学的研究の知見に基づいて実験結果を解釈したが、本研究の結果の解釈についてもその知見の援用が可能と考えられる。前部帯状皮質は解剖学的に前方の吻側部と後方の尾側部に分類される(Devinsky, Morrell, & Vogt, 1995)。吻側部は、前頭前野や特に扁桃核、視床下部、島皮質などの情動経験に関与する部位と密接な連絡があり、この部位は行動の監視(エラー検出)や情動行動の調整を担うといわれている。また尾側部は、運動関連領域と密接な連絡があり、反応選択と反応遂行を担うといわれている。fMRIを用いた研究により、ERNの発生源は前部帯状皮質の特に吻側部に推定されている(Kiehl et al., 2000)。さらにBush, Luu, & Posner(2000)は、従来の前部帯状皮質に関する知見を概観した結果、吻側部と尾側部の間には、一方の部位が活性化すると他方は抑制されるという拮抗関係があることを見出した。

上記の知見から、本研究ではM6条件で最も刺激の種類が多く、刺激弁別の困難さに連動して反応の選択に葛藤が生じ、反応選択に関する処理により大きな負荷が加わった可能性がある。その結果、前部帯状皮質では尾側部の活動賦活と吻側部の活動抑制が生じ、それを反映してERN振幅は減少したものと考えられる。

しかし、本研究のデータは行動指標とERPのみであるため、上記解釈は推測の域を出ていない。上記解

釈を実証するためには、前部帯状皮質の神経機構についてさらなる詳細な検討が必要である。そのためには、時間分解能の優れたERPと空間分解能の優れたfMRIなどの非侵襲的脳機能測定法を併用した研究が有効であろう。そして、前部帯状皮質の神経機構の詳細が解明されれば、エラー検出における注意資源の配分方略についてより深い理解が得られるであろう。

## 引用文献

- Bush, G., Luu, P., & Posner, M. I. (2000). Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, *4*, 215-222.
- Devinsky, O., Morrell, M. J., & Vogt, B. A. (1995). Contributions of anterior cingulate cortex to behavior. *Brain*, *118*, 279-306.
- Donders, F. C. (1969). On the speed of mental processes. In W. G. Koster (Ed. & Trs.), *Attention and performance II*. Amsterdam: North-Holland. pp. 412-431. (Originally published, 1868.)
- Eriksen, B. A., & Eriksen, C. W., (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception & Psychophysics*, *16*, 143-149.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, L. (1990). Effects of errors in choice reaction tasks on the ERP under focused and divided attention. In C. Brunia, A. Gaillard & A. Kok (Eds.), *Psychophysiological Brain Research*. Tilburg: Tilburg University Press. pp. 192-195.
- Gehring, W. J., Goss, B., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E. (1993). A neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, *4*, 385-390.
- Holroyd, C. B., Dien, J., & Coles, M. G. H. (1998). Error-related scalp potentials elicited by hand and foot movements: Evidence for an output-independent error-processing system in humans. *Neuroscience Letters*, *242*, 65-68.
- Kiehl, K. A., Liddle, P. F., & Hopfinger, J. B. (2000). Error processing and the rostral anterior cingulate: An event-related fMRI study. *Psychophysiology*, *37*, 216-223.
- Kok, A. (1997). Event-related potential (ERP) reflections of mental resources: A review and synthesis. *Biological Psychology*, *45*, 19-56.
- Kok, A. (2001). On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology*, *38*, 557-577.
- Kramer, A. F., & Strayer, D. (1988). Assessing the development of automatic processing: An application of dual-task and event-related brain potential methodologies. *Biological Psychology*, *26*, 231-267.
- Kutas, M., McCarthy, G., & Donchin, E. (1977). Augmenting mental chronometry: The P300 as a

- measure of stimulus evaluation time. *Science*, **197**, 792-795.
- Logan, G. D. (1985). Executive control of thought and action. *Acta Psychologica*, **60**, 193-210.
- Rodriguez-Fornells, A., Kurzbuch, A. R., & Munte, T. F. (2002). Time course of error detection and correction in humans: Neurophysiological evidence. *Journal of Neuroscience*, **22**, 9990-9996.
- Scheffers, M. K., Coles, M. G. H., Bernstein, P., Gehring, W. J., & Donchin, E. (1996). Event-related brain potentials and error-related processing: An analysis of incorrect responses to go and no-go stimuli. *Psychophysiology*, **33**, 42-53.
- Scheffers, M. K., Humphrey, D. G., Stanny, R. R., Kramer, A. F., & Coles, M. G. H. (1999). Error-related processing during a period of extended wakefulness. *Psychophysiology*, **36**, 149-157.
- Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending, and a general theory. *Psychological Review*, **84**, 127-190.
- Smid, H. G. O. M., Mulder, G., Mulder, M. J. M., & Brands, G. J. (1992). A psychophysiological study of the use of partial information in stimulus-response translations. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **18**, 1101-1119.
- Sternberg, S. (1966). High-speed scanning in human memory. *Science*, **153**, 652-654.
- Strayer, D. L., & Kramer, A. F. (1990). Attentional requirements of automatic and controlled processing. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, **16**, 67-82.
- 田中秀明・正木宏明・高澤則美・山崎勝男 (2002). エラー処理の注意資源配分とエラー関連陰性電位 生理心理学と精神生理学, **20**, 29-37. (Tanaka, H., Masaki, H., Takasawa, N., & Yamazaki, K. (2002). The relationship between the error-related negativity (ERN) and mental resource allocation in the error-related processes. *Japanese Journal of Physiological Psychology and Psychophysiology*, **20**, 29-37.)
- 田中秀明・正木宏明・高澤則美・山崎勝男 (2003). 情報処理段階とエラー関連陰性電位 臨床神経生理学, **31**, 426-432. (Tanaka, H., Masaki, H., Takasawa, N., & Yamazaki, K. (2003). Stages of information processing and error-related negativity (ERN). *Japanese Journal of Clinical Neurophysiology*, **31**, 426-432.)
- Turnbull, W. W. (1944). Pitch discrimination as a function of tonal duration. *Journal of Experimental Psychology*, **34**, 302-316.
- Wickens, C. D., Hyman, F., Dellinger, J., Taylor, H., & Meador, M. (1986). The Sternberg memory search task as an index of pilot workload. *Ergonomics*, **29**, 1371-1383.
- Wickens, C., Kramer, A., Vanasse, L., & Donchin, E. (1983). Performance of concurrent tasks: A psychophysiological analysis of the reciprocity of information-processing resources. *Science*, **221**, 1080-1082.

available at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

SCIENCE @ DIRECT®

[www.elsevier.com/locate/brainres](http://www.elsevier.com/locate/brainres)BRAIN  
RESEARCH

## Research Report

# Affective-motivational influences on feedback-related ERPs in a gambling task

Hiroaki Masaki<sup>a</sup>, Shigeki Takeuchi<sup>b</sup>, William J. Gehring<sup>c,\*</sup>,  
Noriyoshi Takasawa<sup>d</sup>, Katuo Yamazaki<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Faculty of Sport Sciences, Waseda University, Japan<sup>b</sup>Graduate school of Human Sciences, Waseda University, Japan<sup>c</sup>Department of Psychology, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109-1043, USA<sup>d</sup>Department of Sociology and Human Studies, Edogawa University, Japan

## ARTICLE INFO

## Article history:

Accepted 10 January 2006

## Keywords:

Stimulus-preceding negativity  
Medial frontal negativity  
Feedback negativity  
Motivational impact  
Risk-taking behavior  
Gambler's fallacy

## Abbreviations:

MFN, medial-frontal negativity  
ACC, anterior cingulate cortex  
SPN, stimulus-preceding negativity

## ABSTRACT

Theories have proposed that both the stimulus-preceding negativity (SPN) and the medial frontal negativity (MFN) reflect affective/motivational processing. We examined the effect of the motivational impact of feedback stimuli on these ERPs using a simple gambling task, focusing on the influence of prior losses and gains on ERPs and choice behavior. Choices were riskier following large losses than following small losses or large gains. The MFN, however, was larger following larger gains. The SPN preceding the outcome was also larger after a greater gain. Thus, we confirmed that both the MFN and the SPN respond to the motivational properties of the feedback. A dissociation between risk-taking behavior and these ERPs suggests that there could be two monitoring systems: one that leads to riskier responses following losses and a second that leads to heightened expectancy.

© 2006 Elsevier B.V. All rights reserved.

## 1. Introduction

The rapid evaluation of response outcomes and the anticipation of future events are important for enabling humans to guide subsequent choices to avoid other negative events. Recent event-related potential (ERP) studies have reported neurophysiological activity that is involved in rapidly evaluating the motivational significance of ongoing events. A number of these studies have focused on a medial-frontal negativity (MFN) elicited by reward feedback in simple

learning and gambling tasks (e.g., Gehring and Willoughby, 2002, 2004; Holroyd and Coles, 2002; Miltner et al., 1997; Yeung and Sanfey, 2004). The MFN in these studies is a negative-going deflection in the ERP that has a frontocentral distribution, most likely reflecting neural activity generated in the anterior cingulate cortex (ACC). Functionally, it appears to reflect a process involved in evaluating the motivational significance of ongoing events (Gehring and Willoughby, 2002; Holroyd and Coles, 2002). It peaks approximately 250 to 300 ms following a signal conveying feedback about the

\* Corresponding author. Fax: +1 734 763 7480.

E-mail address: [wgehring@umich.edu](mailto:wgehring@umich.edu) (W.J. Gehring).



incorrectness of a response or about a monetary loss (for a review see Nieuwenhuis et al., 2004b).<sup>1</sup>

Gehring and Willoughby (2002) hypothesized that the process reflected by the MFN was involved in quickly determining the motivational impact of ongoing events. A related but more specific hypothesis was offered by Holroyd and Coles (2002), who suggested that MFN activity (or the "feedback ERN") is elicited when an error processing system detects events that are worse than expected. Gehring and Willoughby (2002) reported that losses evoked MFN activity even when the loss was the most advantageous outcome on a trial, suggesting that the MFN responded to the gain/loss status of the event rather than to the indication that one response was correct and the other was not. Their data also suggested that the MFN elicited by a monetary loss was also influenced by the motivational impact of previous bad outcomes, because a monetary loss affected the risk-taking behavior and MFN on subsequent trials. Other studies also indicate a strong influence of context on the MFN elicited by losses and negative events (Holroyd et al., 2004).

A fundamental question concerning the factors that influence the MFN is whether there is a potential effect of anticipating the outcome (i.e., expectancy) that is distinct from the monetary value associated with that outcome. The response to losses could occur because of the negative utility (value) associated with the outcome, but it could also occur because the subject, choosing a gamble, chose the alternative that seemed most likely to result in a gain. The loss is thus not only a negative event, but also, potentially, an unexpected one. In many of the tasks that have elicited the feedback-related MFN (Gehring and Willoughby, 2002; Holroyd and Coles, 2002; Miltner et al., 1997), negative and positive outcomes have been equiprobable. That the probabilities were equal does not rule out the possibility that at some level the chosen outcome was seen as more likely than the unchosen one to result in a gain. Likewise, risk-taking behavior could be driven either by the perceived value of a gamble or the perceived probability of a gain.

One way to dissociate anticipatory and evaluative processing would be to record ERPs in the period between the choice and the appearance of the outcome. In the present study, we explored the anticipation of outcomes by recording the stimulus-preceding negativity (SPN) during the waiting period prior to the outcome (Brunia, 1988; Brunia and Damen, 1988). Brunia and his colleagues have identified negative slow brain potentials that precede the occurrence of predictable events.

<sup>1</sup> Authors have referred to this deflection in the ERP waveform as the error-related negativity (feedback ERN; e.g., Holroyd and Coles, 2002). Others refer to it as the feedback-related negativity. We use the term medial-frontal negativity here as a generic term to describe its scalp distribution and polarity. The relationship between this feedback-related MFN and the response ERN is currently an active area of investigation. The more anterior and right-lateralized topography of the feedback-related MFN suggests that there must be a difference in the configuration of generators that gives rise to the two components, although one of these neural generators may be active in both cases (Gehring and Willoughby, 2002, 2004; Holroyd and Coles, 2002).

The SPN is the non-motoric component of the late contingent negative variation (CNV) (Walter et al., 1964), which is distinct from the motoric component, the readiness potential (Kornhuber and Deecke, 1965). Feedback stimuli normally used in the SPN paradigm provide the participant with knowledge of results. This SPN shows a right hemisphere preponderance of negativity and largest amplitudes over the parietal cortex (Brunia and van Boxtel, 2001) and is referred to as the pre-knowledge-of-results SPN (Brunia, 1988). Although other types of SPN have been identified (Böcker et al., 2001; van Boxtel and Böcker, 2004), the paradigm used in the current study should only produce a pre-knowledge-of-results SPN, therefore for brevity, we shall refer to it simply as SPN.

According to a thalamic gating model (Brunia, 1999), the SPN is a manifestation of anticipatory attention. Recent studies have reported that the SPN represents anticipation of the affective-motivational valence of feedback stimuli as well as their informative value. The SPN shows the largest amplitudes during anticipation of stimuli with emotional valence (Böcker et al., 1994, 2001; Donkers and van Boxtel, 2005). Emotional valence comprises affective valence that gives rise to appraisal and motivational valence that directs behavior (Böcker et al., 2001).

Although the stimuli in most studies that showed the SPN were aversive, increased non-motoric negativity was also reported by studies that used stimuli with positive valence, such as nude slides (e.g., Howard et al., 1992; Simons et al., 1979). In addition, the SPN increased with monetary reward in a time estimation task (Kotani and Aihara, 1999). Thus, factors that induce affective arousal – both positive and negative – might be critical for development of the SPN. These previous findings suggest that the amplitude of the SPN should be sensitive to the motivational incentives delivered by outcome stimuli.

Interestingly, in previous reports, a symmetrically fronto-central SPN, consistent with involvement of the ACC, was observed before stimuli that involved negative affect (e.g., fear slides) (Böcker et al., 2001), whereas a right-lateralized frontocentral SPN, possibly due to activity of the insular cortex, was observed before stimuli with motivational valence (e.g., monetary reward and punishment) (Kotani and Aihara, 1999). Using a spatiotemporal dipole analysis, Böcker et al. (2001) also found involvement of insular cortex in the SPN. Böcker et al. (2001) suggested that the ACC is more involved in the SPN related to negative affect, whereas the insular cortex is more involved when there is motivational (incentive) information conveyed by the feedback signal. This line of reasoning suggests that the SPN preceding motivational feedback would show a right-lateralized frontocentral distribution, whereas the SPN related to negative affect would show more symmetrical negativity over frontocentral regions.

Because both the MFN and the SPN might represent affective-motivational processing, one could hypothesize that they would respond similarly to the motivational impact of the previous outcome and that they would both vary with the probability of risk-taking behavior. On the other hand, it is also possible that risk-taking behavior would be independent of the motivational state reflected by the SPN, in which case the SPN would not vary with the probability of a risky choice.

Thus, we focused on testing whether the processing associated with risk-taking in a simple gambling task depends on the motivational impact of the previous outcome or on the affective-motivational state induced by the current choice, or both, using the SPN and the MFN.<sup>2</sup> First, we tried to replicate the findings of Gehring and Willoughby (2002) that the MFN represents processing of monetary losses rather than the detection of choice errors and that the MFN becomes larger as a function of preceding outcomes (i.e., the larger the monetary loss on the previous trial, the larger the MFN elicited by a monetary loss on the current trial), which would link the MFN to the probability of risk-taking behavior. Second, we tested the hypothesis that the MFN, the SPN, and risky choice behavior would all be similarly affected by the motivational impact of the previous outcome: after bigger monetary losses they should be largest and after bigger monetary gains they should be smallest (Gehring and Willoughby, 2002). Alternative scenarios are possible, however, in which the two components do not show the same relationship to the previous outcome and to risk-taking behavior.

## 2. Results

### 2.1. Behavioral results

The mean monetary gain was 385 yen ( $SD = 674$ ). Fifteen participants gained money at the end of the experiment. The best score was a gain of 1560 yen and the worst was a loss of 1140 yen.

Table 1 shows the mean probability of a risky choice in each outcome condition. The participants tended to make risky choices (i.e., choosing 50 yen rather than 10 yen) on trials following losses of 50 yen. On the other hand, they did not make risky choices after gains of 50 yen. This result is similar to the finding of Gehring and Willoughby (2002), whose results showed a strong linear relationship between previous outcome and riskiness of choices. We also found a linear relationship between the riskiness of the choice and the value of the preceding outcome ( $F(1,19) = 12.78, P = 0.002$ ). A one-way ANOVA revealed a significantly higher probability of a risky choice after Loss 50 than after Gain 50 and Loss 10 ( $F(3,57) = 5.43, P < 0.01$ , post hoc test:  $P_s < 0.05$ ) and a trend of a higher probability following Loss 50 relative to Gain 10 ( $P = 0.07$ ). In addition, there was a trend of a higher probability of a risky choice after Gain 10 relative to Gain 50 ( $P = 0.08$ ). Table

**Table 1 – The effect of the preceding outcome on the riskiness of behavior with the standard error of the mean in parentheses**

Preceding outcome	Risky choice (%)	Reaction time (ms)
Gain 50	39.6 (3.6)	622 (34.0)
Gain 10	47.4 (3.2)	613 (33.9)
Loss 10	48.0 (2.2)	602 (33.6)
Loss 50	57.1 (3.4)	615 (35.2)
Control		788 (40.2)

Mean reaction times are calculated by pooling Current choice 50 and Current choice 10. Note that the participants did not choose between the monetary options in the control condition, so that risky choice is not reported.

1 also shows reaction time (RT) for choice responses in each previous outcome and control condition. A one-way ANOVA including the control condition revealed longer RTs for the control than for the other conditions ( $F(4,76) = 17.46, \epsilon = 0.28, P < 0.001$ ; post hoc,  $P_s < 0.001$ ), but no differences were observed across the previous outcome conditions.

To explore the effects of preceding outcomes on riskiness of behavior further, we computed mean probability of a risky choice according to the number of successive preceding gains or losses. A 3 (sequence length: 3, 2, or 1)  $\times$  2 (sequence type: Gain/Loss) repeated measures ANOVA revealed a main effect of sequence type, indicating a greater proportion of risky choices following successive losses (53.5%) than following successive gains (42.9%) ( $F(1,19) = 10.97, P < 0.005$ ). A main effect of sequence length was also significant ( $F(2,38) = 3.57, \epsilon = 0.83, P < 0.05$ ). Post hoc tests revealed riskier choices after sequences of length three than after sequences of length two ( $P < 0.05$ ) (1st trial: 47.6%, 2nd: 46.7%, and 3rd: 50.2%). In addition, an interaction of sequence type by sequence length was significant ( $F(2,38) = 10.19, \epsilon = 0.75, P < 0.005$ ) (Table 2). Post hoc tests revealed that following successive losses the probability of a risky choice increased with the sequence length (1 loss vs. 2 losses:  $P < 0.05$ ; 2 losses vs. 3 losses:  $P = 0.06$ ). Following successive gains, risky choices were less probable after 2 successive gains than after 1 gain ( $P < 0.005$ ), but there was no difference between 2 and 3 successive gains. The probability of a risky choice following gain sequences differed from that following loss sequences after sequences of length two ( $t(19) = 3.54, P < 0.005$ ) and after sequences of length three ( $t(19) = 3.64, P < 0.005$ ).

### 2.2. The MFN

Fig. 1a shows grand-averaged ERP waveforms at FCz and scalp topography of the difference wave obtained by subtracting the ERPs on the gain trials from those on the loss trials. As can be seen in the figure, the frontocentrally distributed MFN peaking at about 250 ms was exclusively elicited by the feedback signal that informed the participants of a monetary loss. The negativity is also slightly lateralized to the right, consistent with the topography reported by Gehring and Willoughby (2004).

Fig. 1b (left panel) shows the grand-averaged ERPs at FCz elicited by feedback signals based on the larger subset of trials showing all combinations of correctness and outcome (i.e.,

<sup>2</sup> An anonymous reviewer suggested that variation in the MFN or SPN associated with previous outcomes might reflect representations of the outcomes in memory rather than their motivational impact. The effects reported in earlier studies and those we report here, however, depend on the valence and magnitude of the previous outcomes. An explanation based on memory representations alone would have to postulate that the representations are specifically reward-related (rather than being value-neutral representations of sequence length or some other aspect of the past outcomes). It then becomes difficult to tease the motivational and memory-based explanations apart, because the motivational changes induced by previous outcomes should be tightly linked to memory representations of the outcomes' reward properties.

**Table 2 – The effect of the number of successive preceding gains or losses on the probability of a risky choice and on SPN amplitude with the standard error of the mean in parentheses**

Sequence of preceding outcomes	Risky choice (%)	SPN ( $\mu\text{V}$ )
<b>Gains</b>		
1	47.8 (2.3)	-2.61 (0.41)
2	39.5 (2.7)	-1.72 (0.44)
3	41.3 (3.1)	-1.68 (0.62)
<b>Losses</b>		
1	47.5 (1.9)	-1.38 (0.46)
2	53.9 (2.5)	-2.28 (0.56)
3	59.1 (3.6)	-2.22 (0.50)

Loss/Error, Loss/Correct, Gain/Error, and Gain/Correct) and right panel shows the ERPs derived from the 4 conditions chosen by Nieuwenhuis et al. (2004a).

We carried out a 2 (Outcome: Gain/Loss)  $\times$  2 (Correctness: Correct/Error) repeated measures ANOVA for the MFN amplitude measure at FCz (Table 3). There was a significant main effect of Outcome ( $F(1,19) = 30.43, P < 0.00005$ ), but no effect of Correctness for the conditions shown in the left panel of Fig. 1b. However, the ANOVA revealed an interaction between Outcome and Correctness in the analysis shown in the right panel of Fig. 1b ( $F(1,19) = 15.62, P < 0.005$ ). Loss trials showed greater negativity than gain trials only for error outcomes ( $P < 0.01$ ), not for correct outcomes.

Fig. 2 depicts the MFNs at FCz, quantified from the loss-gain difference waveform and averaged according to the outcome on the previous trial. A 4 (Previous outcome: Gain 50/Gain 10/Loss 50/Loss 10)  $\times$  2 (Current choice: 10/50) repeated measures ANOVA revealed a significant interaction of Previous outcome  $\times$  Current choice ( $F(3,57) = 4.19, \epsilon = 0.79, P < 0.05$ ), indicating that following a monetary gain (previous outcome Gain 50/Gain10), the MFN was larger when the current out-

**Table 3 – Mean MFN amplitudes ( $\mu\text{V}$ ) at FCz with standard error of the mean in parentheses for the Gain/Loss status and for the Correct/Error status**

	All conditions	Critical conditions (4)
Gain/correct choice	8.16 (0.73)	6.19 (0.63)
Gain/error	7.76 (0.86)	7.76 (0.86)
Loss/correct choice	5.88 (0.59)	5.88 (0.60)
Loss/error	6.09 (0.58)	5.00 (0.55)

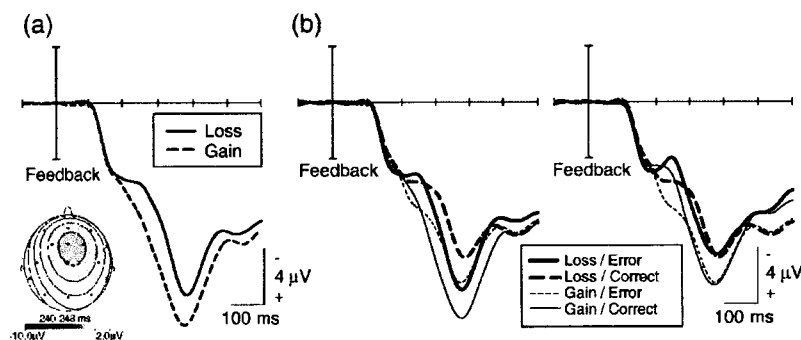
ERPs for four conditions based on all conditions shown in Table 5 (all conditions) and based on only the four conditions, as indicated in Table 5 (critical conditions).

come was 50 Yen than when it was 10 Yen (at previous-outcome Gain 50:  $t(19) = 3.34, P < 0.01$ , at Gain 10:  $t(19) = 2.92, P < 0.01$ ), and the MFN was larger after Gain 50 than after Loss 50 for Current choice 50. A repeated measures ANOVA analyzing the effect previous outcome on Current choice 50 trials showed a significant main effect of previous outcome,  $F(3,57) = 3.20, \epsilon = 0.84, P < 0.05$ ; post hoc test: Gain 50 vs. Loss 50:  $P < 0.05$  (Fig. 3).

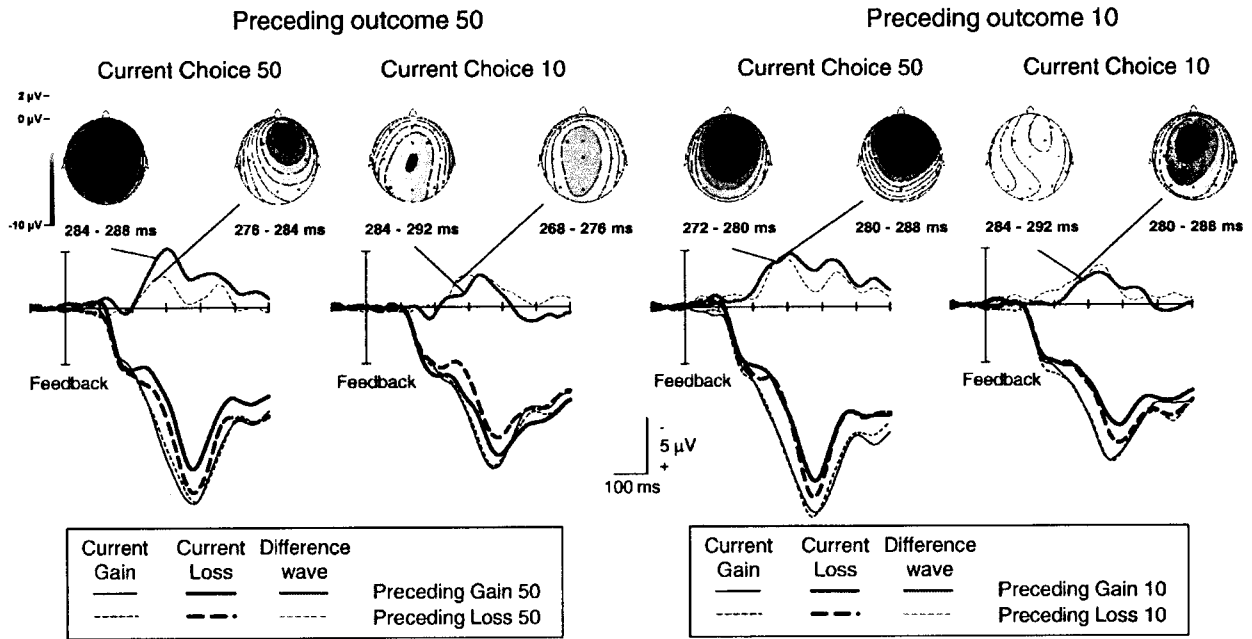
### 2.3. The SPN

Fig. 4 shows the grand-averaged SPNs for the 50 current choice, the 10 current choice, and the control conditions. SPNs for both the 50 and 10 choices developed gradually over centroparietal regions and showed a prominent negativity especially 1 s before the feedback signal, which is revealed by a visual inspection of waveforms comparing waveforms in the choice conditions with that of the control task.

A 2 (Current choice: 10/50)  $\times$  5 (Caudality: Frontal/Central/Parietal/Temporal/Occipital)  $\times$  2 (Hemisphere: Right/Left) three-way repeated measures ANOVA was carried out on the subtracted SPN amplitudes. The effect of Caudality was significant ( $F(4,76) = 6.39, \epsilon = 0.52, P < 0.005$ ). The SPN was larger over central, parietal, and occipital regions than over



**Fig. 1 – (a) ERP waveforms at FCz and the scalp topography of the difference wave obtained by subtracting the ERPs on all gain trials from those on all loss trials. (b) The grand-averaged feedback-related ERPs separately averaged for each case (i.e., Loss/Error, Loss/Correct, Gain/Error, and Gain/Correct). Left panel shows the ERPs for the four conditions derived from 12 possible combinations and right panel shows the ERPs for the 4 conditions chosen by Nieuwenhuis et al. (Kotani et al., 2003).**



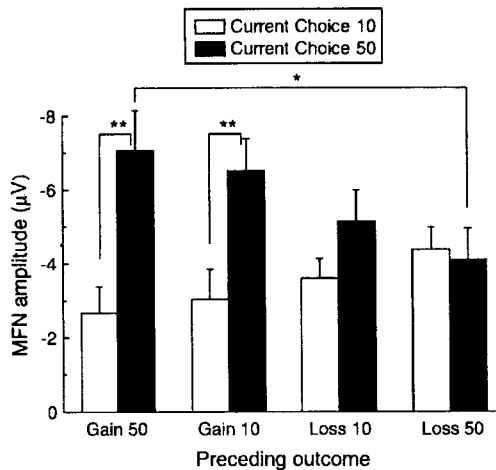
**Fig. 2** – The grand-averaged MFNs and the difference waves (loss minus gain) for each previous outcome. The topographical maps of the difference waves were drawn based on amplitude values taken at the mean peak latency of the MFN in each condition.

frontal regions ( $P_s < 0.005$ ), and the SPN over temporal regions was marginally larger than over frontal regions ( $P < 0.08$ ) and marginally smaller than over parietal ( $P < 0.09$ ) and occipital regions ( $P < 0.06$ ).

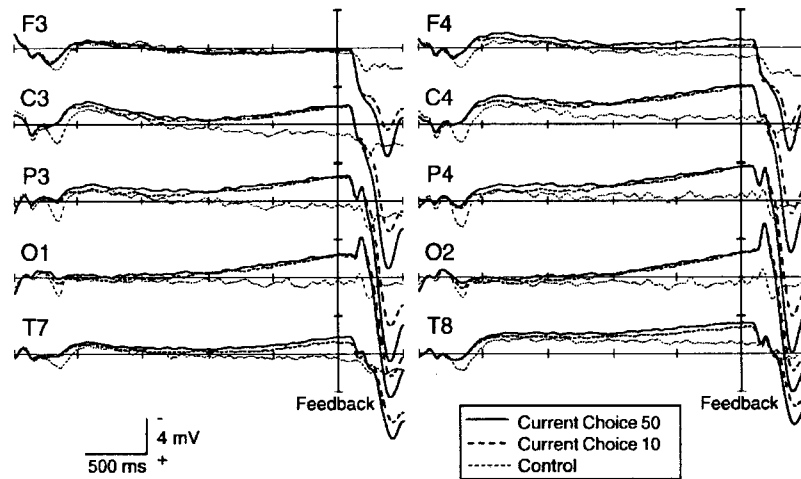
Because choice behavior and the MFN were both affected by the outcome on the previous trial, we also averaged the SPN according to previous outcomes. Fig. 5 shows the SPNs for each previous outcome, following subtraction of the control task waveform, and it also shows the topographical distribution of SPN following Gain 50 trials, for both Current choice 50 and 10 (top). On trials where the subject chose 50, examination

of the waveforms suggests that the SPN became larger as a function of the previous outcome in the order of Loss 50 < Loss 10 < Gain 10 < Gain 50. In contrast, on trials where the subject chose 10, the SPN became larger in the order of Loss 10 < Gain 10 < Loss 50 < Gain 50.

We carried out a 2 (Current choice: 10/50)  $\times$  4 (Preceding outcome: Gain 10/Gain 50/Loss 10/Loss 50)  $\times$  5 (Caudality: Frontal/Central/Parietal/Temporal/Occipital)  $\times$  2 (Hemisphere: Right/Left) repeated measures ANOVA on the mean amplitude measure computed over the 200 ms epoch preceding the feedback signal. It revealed an effect of Preceding outcome ( $F$



**Fig. 3** – Mean MFN amplitude ( $\mu V$ ) at FCz for each preceding outcome condition. **\*\*** $P < 0.01$ , **\*** $P < 0.05$ .



**Fig. 4** – The grand-averaged SPNs for the 50 choice, 10 choice, and control conditions. The SPNs are depicted from the response onset, 2.5 s preceding the feedback signal.

(3,57) = 3.55,  $\epsilon = 0.69$ ,  $P < 0.05$ ). The SPN was larger following Gain 50 than following other outcomes ( $P_s < 0.05$ ). The effect of Caudality was also significant ( $F(4,76) = 6.36$ ,  $\epsilon = 0.49$ ,  $P < 0.005$ ). The SPN was larger over central, parietal, and occipital regions than over frontal regions ( $P_s < 0.05$ ), and the SPN over temporal regions was marginally larger than over frontal regions ( $P = 0.07$ ) and marginally smaller than over central regions ( $P = 0.07$ ). A significant interaction of Caudality  $\times$  Preceding outcome was revealed ( $F(12,228) = 2.42$ ,  $\epsilon = 0.42$ ,  $P < 0.05$ ). A post hoc test showed that the SPN was larger following Gain 50 outcomes than following other outcomes at frontocentral electrode sites (simple effect of Previous outcome at frontal:  $F(3,57) = 5.32$ ,  $\epsilon = 0.79$ ,  $P < 0.01$ ; central:  $F(3,57) = 3.70$ ,  $\epsilon = 0.67$ ,  $P < 0.05$ ) (Table 4). This effect also existed at temporal electrode sites ( $F(3,57) = 2.61$ ,  $\epsilon = 0.80$ ,  $P = 0.08$ ). In addition, the interaction of Caudality  $\times$  Hemisphere was marginally significant ( $F(4,76) = 2.96$ ,  $\epsilon = 0.49$ ,  $P < 0.07$ ). The interaction of Current choice  $\times$  Preceding outcome was marginally significant ( $F(3,57) = 2.64$ ,  $\epsilon = 0.78$ ,  $P < 0.08$ ). Examination of the waveforms suggests that on Current choice 50 trials, the effects of the different levels of prior outcome were more distinguishable than on Current choice 10 trials.

**Table 4** – Mean SPN amplitude ( $\mu V$ ) for each preceding outcome condition, indicating an interaction of Caudality  $\times$  Preceding outcome

	Gain 50	Gain 10	Loss 10	Loss 50
Frontal <sup>**</sup>	-1.86 (0.80)	-0.71 (0.76)	-0.26 (0.70)	0.03 (0.78)
Central <sup>*</sup>	-3.98 (0.79)	-2.99 (0.81)	-2.37 (0.71)	-2.64 (0.85)
Parietal	-3.92 (0.64)	-2.90 (0.73)	-2.55 (0.61)	-2.78 (0.70)
Occipital	-2.99 (0.57)	-2.45 (0.76)	-2.54 (0.66)	-2.51 (0.59)
Temporal <sup>a</sup>	-2.24 (0.51)	-1.64 (0.53)	-1.61 (0.59)	-1.50 (0.49)

Standard errors of the mean are in parentheses.

Note. The SPN was larger following Gain 50 outcomes than following other outcomes.

<sup>a</sup>  $P < 0.10$ .

<sup>\*</sup>  $P < 0.05$ .

<sup>\*\*</sup>  $P < 0.01$ .

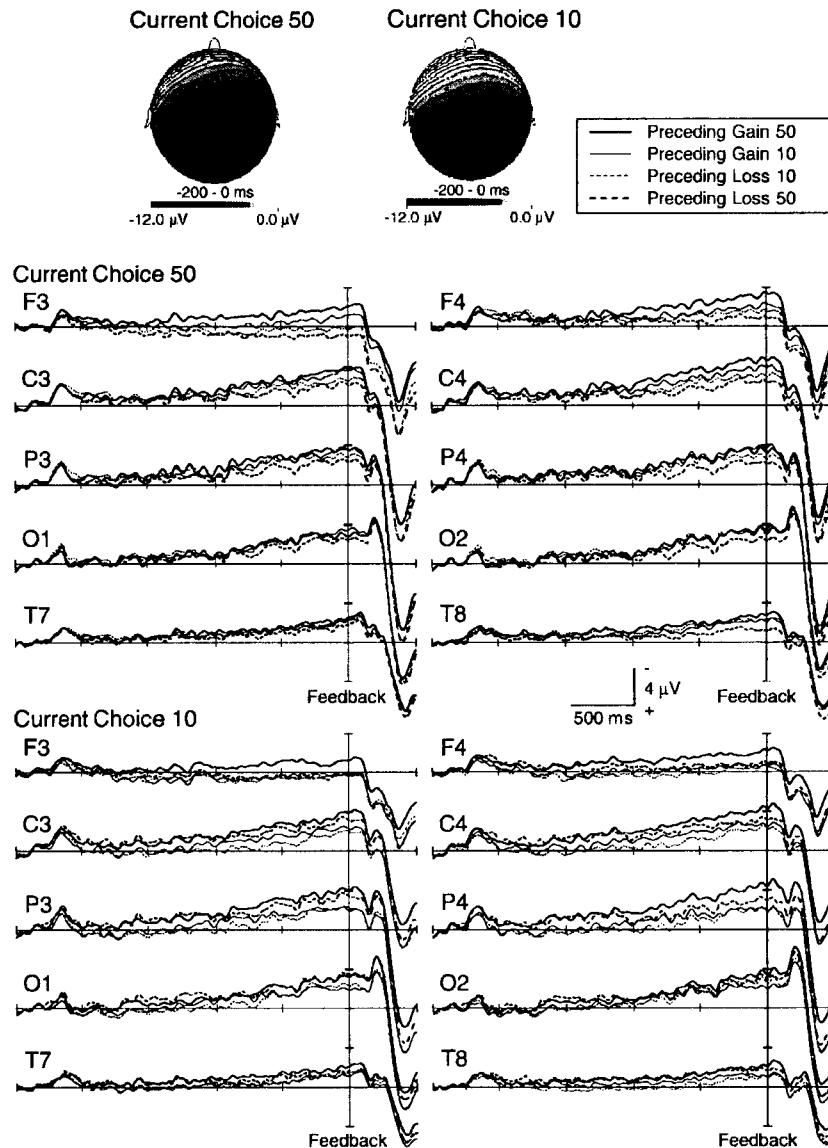
To explore the effects of preceding outcomes further, we computed SPN averages according to the number of successive preceding gains or losses. Fig. 6 depicts the SPN at C4 (where it was largest, see Fig. 5) averaged according to the number of preceding gain or loss outcomes 3 (sequence length: 3, 2, or 1)  $\times$  2 (sequence type: Gain/Loss)  $\times$  5 (Caudality)  $\times$  2 (Hemisphere) repeated measures ANOVA revealing a significant interaction of Gain/Loss type by sequence length ( $F(2,38) = 8.59$ ,  $\epsilon = 0.99$ ,  $P < 0.005$ ) (Table 2). Post hoc tests indicated that the SPN was significantly larger after three Losses and two Losses than after one Loss (an ANOVA restricted to loss trials showed a main effect of sequence length:  $F(2,38) = 4.58$ ,  $\epsilon = 0.91$ ,  $P < 0.05$ ; three and two Losses  $>$  one Loss:  $P_s < 0.05$ ). For Gains, the main effect of preceding outcome was marginally significant,  $F(2,38) = 3.27$ ,  $\epsilon = 0.81$ ,  $P = 0.05$ . Post hoc analyses indicated that compared to one Gain, there were smaller SPNs after two Gains ( $P < 0.05$ ) and a trend toward smaller SPNs after three Gains ( $P < 0.08$ ). The significant Gain/Loss  $\times$  Caudality ( $F(4,76) = 2.79$ ,  $\epsilon = 0.76$ ,  $P < 0.05$ ) interaction indicated a disappearance of the amplitude difference between frontal and temporal regions after gain sequences (Loss: frontal  $<$  other electrode sites:  $P_s < 0.05$ ; Gain: frontal vs. temporal:  $P = 0.12$ ). The interaction of Caudality  $\times$  Hemisphere was marginally significant ( $F(4,76) = 2.73$ ,  $\epsilon = 0.59$ ,  $P < 0.07$ ).

### 3. Discussion

The main purpose of this study was to clarify the affective and motivational influences on the MFN and SPN by relating those components to choice behavior, reward anticipation, and reward evaluation.

#### 3.1. Choice behavior

Consistent with Gehring and Willoughby (2002), we found that the worse the outcome on one trial, the riskier the choice on



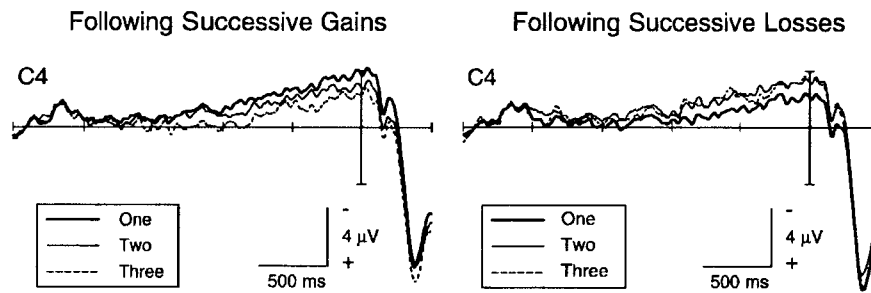
**Fig. 5** – The subtracted SPN waveforms for each previous outcome case on Current choice 50 trials (top) and for each previous outcome case on Current choice 10 trials (bottom). The SPNs are depicted from the response onset, 2.5 s preceding the feedback signal. Vertical lines represent the feedback signal onset. The SPNs showed steeper slopes about 1 s before the feedback signal. Scalp distributions of the subtracted SPNs for the Gain 50 condition on both Current choice 50 and Current choice 10 are also shown above these waveforms.

the subsequent trial. Thus, the probability of a risky choice was higher after a Loss 50 trial than after the other outcome conditions.

### 3.2. Reward anticipation and the SPN

A central goal of our study was to examine how previous outcomes would alter the SPN that develops during the waiting period prior to the outcome, in order to clarify the role of expectancies in the effects of prior outcome on risk-taking and the MFN. Importantly, in the present study, the amplitude of the SPN differed depending on previous outcomes. The SPN was larger after a Gain 50 trial than after other

outcomes, regardless of the amount chosen on the current trial. In addition, the effect of preceding outcomes on the SPN was observed over frontocentral regions. This result seems to be consistent with previous reports (Kotani et al., 2003; Ohgami et al., 2004), which found a prominent effect of reward on the SPN over frontocentral regions. Thus, our result suggests that the motivational state represented by the SPN became much higher on the trials following a large monetary gain. The trend-level interaction between current choice and previous outcome suggests that the different levels of prior outcome may influence the SPN more on Current choice 50 trials than on Current choice 10 trials, perhaps because of a lower motivational state associated with a choice of 10.



**Fig. 6 – The effect of successive outcomes on the SPN delivered from C4. The SPN increased after successive Losses and decreased after successive Gains.**

Although our results showed the SPN to be related both to performance and to motivational properties of the feedback, the pattern of results presents some challenges for interpretation. Drawing a broad distinction, one might hypothesize either that the SPN reflects anticipation of a positive (gain) event or that it represents anticipation of a negative (loss) event. If it reflects anticipation or preparation for a positive event, then the effects of sequence length on the SPN and on the probability of a risky choice would be consistent with a gambler's fallacy. Gains are seen as more likely after a run of losses, with the SPN reflecting greater anticipation or preparation for a subsequent gain. Behavior becomes riskier in such conditions to take advantage of the greater perceived likelihood of a positive outcome. A run of gains leads to the opposite pattern, with more cautious responding and anticipation of losses.

It is still plausible, however, that the SPN reflects anticipation of a negative event rather than a positive event, which would be in line with some suggestions that the SPN reflects an anxiety/arousal state (Böcker et al., 2001; Takeuchi et al., 2005). For example, the SPN was larger following Gain 50 trials than following other outcomes. Because choices were more cautious following Gain 50 trials, one could postulate that the SPN reflected anticipation of a negative event, leading to fewer risky choices. Also consistent with a relationship of the SPN to a negative anticipatory state is the idea of a "winning streak" or a "losing streak:" losses would be seen as more likely following a run of losses, and gains more likely following a run of gains. In that case, the larger SPN following losses would reflect the greater subjective probability of loss (i.e., the anxiety/arousal state). Still, however, this interpretation is difficult to reconcile with the observation of riskier choices following losses.

In summary, although we demonstrated that the SPN was related to the motivational significance of the previous outcomes, as proposed in the Introduction, the data are ambiguous with respect to the relationship between the SPN and a particular negative or positive motivational state. It will be beneficial to future studies to incorporate richer subjective and performance measures that allow a finer-grained analysis of the subjects' motivational state during the period corresponding to the SPN. In particular, incorporating subjective measures such as confidence ratings into SPN studies may help to determine for a given context of previous outcomes whether subjects expect positive or negative outcomes.

### 3.3. Reward evaluation and the MFN

Gehring and Willoughby (2002) found that the MFN was modulated by the loss-gain valence of the outcome, rather than by the information it delivered regarding the accuracy of the response. We observed similar results. However, the analysis using the more restricted set of conditions chosen by Nieuwenhuis et al. (2004a), which controlled for outcome value, was less clear, showing a greater negativity on loss than on gain trials only when the outcomes were errors. The reason for this discrepancy is unclear, but it should be noted on gain-correct trials that there was a *greater* negativity than on gain-error trials, which is not consistent with either possible influence on the MFN (sensitivity to losses or sensitivity to errors). In addition, the negativity peaked earlier on gain-correct trials, making it more difficult to interpret the present result: it is possible that this peak is a different, N200-like component. Other studies have noted the possibility that the MFN in studies such as this might reflect a combination of an N2 and an MFN more specific to the reward properties of the feedback (Donkers et al., 2005; Donkers and van Boxtel, 2005). Furthermore, as shown in Fig. 3, the MFN effect was absent on Current choice 10 trials, suggesting that the 10-yen rewards may not be motivating enough to produce robust effects. Despite these anomalies, on the whole, the present result is consistent with other studies that have shown evidence for motivational or incentive influences on the MFN (e.g., Takasawa et al., 1990; Holroyd et al., 2003).

Recent studies have explored the relationship between feedback-related negativities, such as the MFN elicited by gambling losses, and the ERN observed in speeded response tasks. An influential theory of the ERN, the Reinforcement-Learning theory of the ERN (RL-ERN), is intended to account for both phenomena, arguing that the speeded-response ERN and the feedback-related MFN are both reflections of a dopaminergic negative feedback reinforcement-learning signal generated when response outcomes are worse than expected (Holroyd and Coles, 2002). Recently, Nieuwenhuis et al. (2004a) presented a study in support of this theory. They devised a task in which the perceptually salient color change indicated the correct/error dimension rather than the gain/loss dimension of the outcome stimuli. They showed that, in their version of the task, error feedback elicited a larger MFN than did the correct feedback, irrespective of the gain/loss status of the outcome. They

suggested that their results showed that the MFN could be sensitive to either type of information, depending on which is perceptually more salient.

A different possibility is that the MFN is not sensitive to error/correct or gain/loss distinction per se. Rather, in both cases, subjects view the stimulus as global "good/bad" feedback, indicating how well they are doing according to the standards set by the experimenter (see Yeung et al., 2005 for a similar interpretation). When a perceptually salient stimulus attribute affords that information, the MFN can provide a rapid assessment of the feedback along that dimension. Future studies will be needed to evaluate this hypothesis.

Gehring and Willoughby (2002) asserted that the higher probability of a risky choice following a prior loss than following a gain was related to the difference in the motivational state induced by a prior loss and that induced by a gain. The interpretation was supported by evidence that the previous outcomes affected MFN amplitudes and risky choices similarly. According to this line of reasoning, such a change in motivational state could affect the tendency to take risks for a number of reasons: a loss might have seemed less likely after a prior loss (the gambler's fallacy) or a loss could have induced a change in the subjective value of the options (perhaps via a context effect similar to a framing effect).

However, in this study, we found that prior outcomes affected MFN and the probability of a risky choice differently: as in the Gehring and Willoughby (2002) study, riskiness increased following losses (i.e., 50 yen choices were most frequent after Loss 50 and less frequent after Gain 50). Contrary to their finding that the MFN was larger following large losses, however, the MFN in the present study was smallest following high loss trials, especially when the choice was risky. In addition, pattern of data observed for the SPN mirrored that of the MFN.<sup>3</sup> Across the two studies, then, this dissociation between the MFN and the probability of risky choices suggests that the underlying process of risk-taking behavior facilitated by a previous bad outcome can be independent of the affective-motivational processing that influences the MFN (and the SPN). One possible methodological reason for the discrepancy is that the waiting period prior to the outcome was longer in the current study (2.5 s) than in Gehring and Willoughby (2002) (1 s). A longer waiting period could permit different processes to engage prior to the outcome stimulus, affecting the evaluation reflected by the MFN. For example, an expectancy similar to the gambler's fallacy could drive the MFN at short cue-feedback intervals, whereas a winning streak/losing streak expectancy could drive it at longer intervals. As with the SPN, subjective measures may help to identify the factors that control the relationship between the motivational process associated with risk-taking behavior and the evaluative process reflected by the MFN.

<sup>3</sup> We also calculated correlations between the MFN (FCz) and the SPN (C4) amplitudes, which would be sensitive to individual differences. We found a mild positive correlation between these ERPs for Gain 50 on current-choice 50 ( $r = 0.56, P < 0.05$ ), suggesting that the participants who showed larger MFNs also showed larger SPNs on trials following Gains of 50 yen.

### 3.4. Implications

Our study is consistent with the growing literature showing a relationship between the MFN elicited by negative feedback and evaluative processing. Taken together, we replicated the findings of Gehring and Willoughby (2002) that (1) choices were riskier following large losses than following large gains and (2) the loss-gain status influenced the MFN response whereas the error-correct status did not (cf. Nieuwenhuis et al., 2004a,b). However, the effects of previous outcomes on the MFN and risk-taking behavior contrasted with the results of Gehring and Willoughby (2002). Although the trend of greater risk-taking after a greater monetary loss seems to be a fairly robust effect, a consideration of our data and the Gehring and Willoughby (2002) report suggest that there can be dissociations between the behavioral changes associated with post-loss risk-taking and the MFN and the SPN. The dissociation suggests that a profitable research strategy will consider the functional relationships between the behavioral control system that causes responses to be riskier following a monetary loss, a second possibly related system reflected by the SPN that causes an anticipatory motivational state to be greater following a monetary gain, and finally, the evaluative system reflected by the MFN.

## 4. Experimental procedures

### 4.1. Participants

Twenty participants (13 men), aged 19–26 years (mean  $\pm$  SD = 22.9  $\pm$  2.0), were recruited from the Waseda University community and paid for their participation (500 Japanese Yen/hour: US\$4.78). All participants had normal or corrected-to-normal vision, a mean handedness score of +79.6 (Oldfield, 1971) and informed consent was obtained.

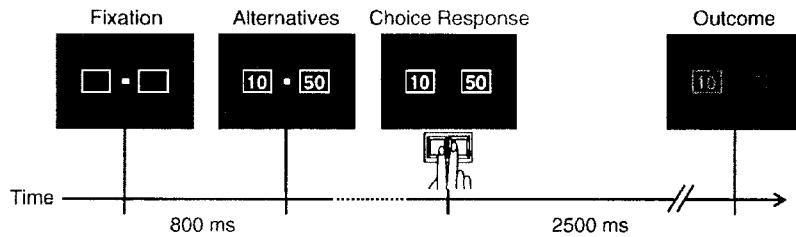
### 4.2. Procedure

We used a monetary gambling task similar to that of Gehring and Willoughby (2002), differing from that study in the time intervening between the choice and outcome. As in that study, participants' choices were followed by feedback signifying both the monetary gain or loss resulting from their choice and the potential gain or loss had the other option been chosen.

Each trial began with the presentation of a white fixation spot between two blank squares (subtended visual angle 1.1°  $\times$  1.1°) displayed centrally on a Sharp LL-T17A1 monitor 80 cm in front of the participant (Fig. 7). After 800 ms, a "10" or a "50" (alternatives) appeared in each square. Participants were instructed to choose one square by pressing a button with their right index or middle finger (corresponding to the left or right square, respectively). The fixation disappeared upon the button press, but the squares and numeral remained. 2.5 s after the choice, the color of the numeral and square turned red or green, informing participants of the outcome. Green would indicate that the amount represented by the chosen numeral (Japanese Yen) was added to the total amount awarded to the individual at the end of a block of trials, red indicated that the amount would be deducted from the total. Simultaneously, the square not chosen also changed color to indicate to the participant what they would have gained or lost had they chosen the other square.

For example, a loss of 10, when the unchosen alternative was a loss of 50, actually corresponded to the most advantageous





**Fig. 7 – Sequence of stimulus and response events in the gambling task. In the example shown above, the “10” and surrounding box turn green, the “50” and surrounding box turn red.**

(“correct”) choice; it was the better of the two outcomes. On the other hand, a gain of 10, when the unchosen alternative was a gain of 50, corresponded to the disadvantageous (“error”) choice—the chosen response was less consistent than the alternative with the overall goal of maximizing gains and minimizing losses. In addition to these “loss-and-correct” and “gain-and-error” conditions were “loss-and-error” and “gain-and-correct” conditions (Gehring and Willoughby, 2002).<sup>4</sup>

Inter-trial intervals ranged from 0.8 to 1.2 s in a randomized fashion (increments of 200 ms). Eleven of the participants were assigned green as the gain color and nine were assigned red as the gain. The experimental session consisted of 20 blocks of 32 trials each, separated by short breaks. Each participant initially received an allotment of 2000 Japanese Yen and was informed of the current total amount at the end of each block. Both losses and gains were accumulated across blocks.

Before the experimental session, the participant performed a control task (2 blocks of 64 trials), in which the identical stimuli used in the gambling task were presented with the same temporal order, but instead of the feedback signal, the squares disappeared. The participant was asked to respond by pressing the left or right button with the right index and middle finger, respectively, and then to keep gazing at the fixation until the squares disappeared. This control task was used to estimate the movement-related potentials associated with button press.

**4.3. Recording**

The electroencephalogram (EEG) was recorded from 28 electrodes (Fp1, Fpz, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, FC1, FCz, FC2, FC5, FC6, T7, C3, Cz, C4, T8, CP5, CP6, P7, P3, Pz, P4, P8, O1, Oz, and O2; American Electroencephalographic Society, 1991) with tin electrodes embedded in a nylon mesh cap (Electrode-Cap International, Eaton, OH). The left ear lobe served as the reference. An averaged ear lobe reference was derived off-line using right ear lobe data. For the detection of artifacts, the vertical and horizontal electrooculogram (EOG) was recorded from left supraorbital and infraorbital electrodes and left and right outer canthus, respectively, with tin electrodes. A ground electrode was placed on the forehead. The time constant and high frequency cut-off for the EEG and EOG were 10 s and 100 Hz, respectively. Electrode impedances were below 5 kΩ. The EEG and EOG were amplified by the BrainAmp amplifier (Brain Products, Inc.). All signals were digitized on-line at

a rate of 250 Hz. All trials in which EEG voltages or both vertical and horizontal EOG voltages exceeded a threshold of 100 mV during the recording epoch were excluded from further analysis. The trials containing muscular activity were also discarded. EEG data were corrected for ocular movement artifacts using the procedure described by Gratton et al. (1983). After these procedures, the number of trials per average ranged from 66 to 199 for testing the Gain/Loss vs. Correct/Error status of the MFN, and from 26 to 39 for testing the effect of previous outcome on the MFN, and from 50 to 76 for testing the effect of previous outcome on the SPN.

**4.4. Data analysis**

**4.4.1. Risky choice influenced by preceding outcomes**

Gehring and Willoughby (2002) found that a risky choice (i.e., choosing 25¢ rather than 5¢) depended on the outcome on the preceding trial. Participants made riskier choices when the immediately preceding outcome was a loss than when it was a gain. We calculated the proportion of risky choices by dividing the number of 50-yen choices by the total number of trials, according to the previous outcome (i.e., Gain 50, Gain 10, Loss 10, and Loss 50). Both the SPN and the MFN were also averaged according to these categories.

**Table 5 – Possible combinations of chosen outcome and alternative outcome**

Chosen outcome	Alternative outcome	Condition
-50	-10	Loss and error
-50	+10	Loss and error
-50	+50	Loss and error
-10	-50	Loss and correct*
-10	+10	Loss and error
-10	+50	Loss and error*
+10	-50	Gain and correct*
+10	-10	Gain and correct
+10	+50	Gain and error*
+50	-50	Gain and correct
+50	-10	Gain and correct
+50	+10	Gain and correct
+50	+50	Gain
-50	-50	Loss
+10	+10	Gain
-10	-10	Loss

*Note.* We averaged the MFNs for 4 conditions derived from 12 combinations of chosen and unchosen amounts (Fig. 1b, left panel). Asterisks indicate the four conditions that are analogous to the four conditions chosen by Nieuwenhuis et al. (2004a); these conditions should reduce superimposition of the P300 on the MFN (Fig. 1b, right panel). We excluded from averaging the equivalent-option cases, shown in the last 4 conditions.

<sup>4</sup> Note that the terminology “correct” and “error” in this case has a specific meaning: an error occurs when one response would have been preferable to the response that was actually executed. Such a definition is consistent with the definition of “error detection” in the work of Coles and colleagues, where error detection occurs by comparing the response that ought to have been executed with the response that was actually executed (Bernstein et al., 1995; Scheffers and Coles, 2000). The use of these terms in the present case presumes that subjects had the goal of maximizing gains and minimizing losses.

#### 4.4.2. The medial frontal negativity (MFN)

To obtain the MFN, ERPs were averaged using the feedback signal as a trigger according to previous outcomes (i.e., Gain 50, Gain 10, Loss 10, and Loss 50) and the combination of correctness and outcome (i.e., loss/error, loss/correct, gain/error, and gain/correct). In the latter case, we first averaged the MFNs based on 12 of the 16 feedback types (Table 5). However, that subset confounded the correct vs. error comparison with differences in the amount of gain vs. loss, which would affect the P300 amplitude (i.e., larger P300s are elicited by large gains and losses than by small gains and losses) (Nieuwenhuis et al., 2004a). Thus, to reduce the influence of the P300 on the MFN, we also averaged the MFNs from 4 conditions chosen by Nieuwenhuis et al. (2004a) to eliminate this confound. The averaged waveforms were digitally filtered with a 12 Hz low-pass filter (24 dB/octave roll-off). The MFN was quantified as the mean amplitude at FCz in the 200–300 ms epoch following the onset of the feedback stimulus, relative to a 100 ms pre-stimulus baseline. In the analysis of gain/loss effect based on previous outcomes, peak amplitude of the difference wave at FCz obtained by subtracting the ERP on the gain trials from the ERP on the loss trials was measured relative to a 100 ms pre-stimulus baseline (i.e., maximum amplitude within the 170–320 ms latency time window).<sup>5</sup>

#### 4.4.3. The stimulus-preceding negativity (SPN)

Brunia (1988) observed a right hemisphere preponderance of the SPN, reflecting an expectancy of the following feedback stimulus. In contrast, the readiness potential has a contralateral preponderance of negativity (i.e., negative slope, Shibasaki et al., 1980), that is, a larger amplitude over the left hemisphere when the responding limb is the right hand. If the readiness potential is cancelled out by a subtraction method (Damen and Brunia, 1994), only the non-motoric stimulus preceding negativity would remain as an index of the magnitude of anticipation. Thus, to assess the SPN prior to the feedback signal, we subtracted the ERP in the control task from that in each condition.

Mean SPN amplitudes over the 200 ms interval preceding the feedback signal were calculated at F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, T7, and T8, referenced to a baseline of 200 ms after the response (i.e., 2500–2300 ms before the feedback signal). The SPN amplitude measurement in each choice (i.e., choice of 50 vs. 10) was subjected to a three-way ANOVA with repeated measures on the variables of Previous-outcome (Gain 50/Gain 10/Loss 10/Loss 50), Hemisphere (left/right), and Caudality (frontal/central/parietal/occipital/temporal). Where multiple comparisons were required, the Newman-Keuls test was employed. The degrees of freedom were adjusted with the Greenhouse-Geisser procedure, but the original degrees of freedom are reported with the epsilon value (these corrections were also applied to performance and MFN measures).

We also averaged the SPNs according to the number of successive prior gains or losses. The SPNs after one Gain, after two successive Gains, and after three successive Gains were calculated, as were the SPNs after one Loss, after two successive Losses, and after three successive Losses. Gain trials were pooled

across Gain 10 and Gain 50 trials, and Loss trials pooled across Loss 10 and Loss 50 trials. If subjects behave according to the Gambler's fallacy, they should expect a gain after a run of successive losses and a loss after a run of gains. Thus, if the SPN is more sensitive to the anticipation of positive outcomes, it should increase after successive losses; if the SPN is more sensitive to negative anticipation, it should increase after successive gains.

## Acknowledgments

Portions of this paper were presented at the 44th annual meeting of the Society for Psychophysiological Research, Santa Fe, New Mexico, October 20–24, 2004. This study was supported by a Grant-in-Aid for Scientific Research(C) 15530478 from Japan Society for Promotion of Science to Katuo Yamazaki and by Waseda University Grant for Special Research Projects (2004A-309) to the first author. The authors would like to thank Dr. Yasunori Kotani and Tim Murphy for their helpful comments on an earlier draft of the manuscript. We also thank Kiyotaka Watanabe for his assistance in collecting the data.

## REFERENCES

- Bernstein, P.S., Scheffers, M.K., Coles, M.G., 1995. "Where did I go wrong?" A psychophysiological analysis of error detection. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 21, 1312–1322.
- Böcker, K.B.E., Brunia, C.H.M., Van den Berg-Lenssen, M.M.C., 1994. A spatiotemporal dipole model of the stimulus preceding negativity (SPN) prior to feedback stimuli. *Brain Topogr.* 7, 71–88.
- Böcker, K.B.E., Baas, J.M.P., Kenemans, J.L., Verbaten, M.N., 2001. Stimulus-preceding negativity induced by fear: a manifestation of affective anticipation. *Int. J. Psychophysiol.* 43, 77–90.
- Brunia, C.H.M., 1988. Movement and stimulus preceding negativity. *Biol. Psychol.* 26, 165–178.
- Brunia, C.H.M., 1999. Neural aspects of anticipatory behavior. *Acta Psychol.* 101, 213–242.
- Brunia, C.H.M., Damen, E.J.P., 1988. Distribution of slow brain potentials related to motor preparation and stimulus anticipation in a time estimation task. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 69, 234–243.
- Brunia, C.H.M., van Boxtel, G.J.M., 2001. Wait and see. *Int. J. Psychophysiol.* 43, 59–75.
- Damen, E.J.P., Brunia, C.H.M., 1994. Is a stimulus conveying task relevant information a sufficient condition to elicit a stimulus preceding negativity SPN? *Psychophysiology* 31, 129–139.
- Donkers, F.C.L., van Boxtel, G.J.M., 2005. Medial frontal negativities to averted gains and losses in the slot-machine task: a further investigation. *J. Psychophysiol.* 19, 256–262.
- Donkers, F.C.L., Nieuwenhuis, S., van Boxtel, G.J.M., 2005. Medial frontal negativities in the absence of responding. *Cogn. Brain Res.* 25, 777–787.
- Gehring, W.J., Willoughby, A.R., 2002. The medial frontal cortex and the rapid processing of monetary gains and losses. *Science* 295, 2279–2282.
- Gehring, W.J., Willoughby, A.R., 2004. Are all medial frontal negativities created equal? Toward a richer empirical basis for theories of action monitoring. In: Ullsperger, M., Falkenstein, M. (Eds.), *Errors, Conflicts, and the Brain. Current Opinions on Performance Monitoring*. Max Plank Institute of Cognitive Neuroscience, Leipzig, pp. 14–20.
- Gratton, G., Coles, M.G., Donchin, E., 1983. A new method for

<sup>5</sup> Different analyses required different measures of MFN amplitude. Because one of our aims was to compare ERPs across gain/loss and correct/error statuses, we scored mean amplitudes referred to the baseline; the Gain-Correct trials did not elicit a distinct MFN peak to use in scoring the negativity. On the other hand, we scored the peak amplitude of the difference wave (Loss-Gain) to investigate the influence of previous outcomes on the MFN. In these analyses, the difference waves showed distinct deflections that allowed the peak amplitude to be scored. However, there were sometimes two peaks in a difference wave; in such cases, we scored the peak that was distributed more frontal-centrally.

- off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 55, 468-484.
- Holroyd, C.B., Coles, M.G., 2002. The neural basis of human error processing: reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychol. Rev.* 109, 679-709.
- Holroyd, C.B., Nieuwenhuis, S., Yeung, N., Cohen, J.D., 2003. Errors in reward prediction are reflected in the event-related brain potential. *NeuroReport* 14, 2481-2484.
- Holroyd, C.B., Larsen, J.T., Cohen, J.D., 2004. Context dependence of the event-related brain potential associated with reward and punishment. *Psychophysiology* 41, 245-253.
- Howard, R., Longmore, F., Mason, P., 1992. Contingent negative variation as an indicator of sexual object preference: revisited. *Int. J. Psychophysiol.* 13, 185-188.
- Kornhuber, H.H., Deecke, L., 1965. Hirnpotentialänderungen bei Willkürbewegungen und Passiven Bewegungen des Menschen: Bereitschaftspotential und reafferente Potentiale. *Pflügers Arch.* 248, 1-17.
- Kotani, Y., Aihara, Y., 1999. The effect of stimulus discriminability on stimulus-preceding negativities prior to instructive and feedback stimuli. *Biol. Psychol.* 50, 1-18.
- Kotani, Y., Kishida, S., Hiraku, S., Suda, K., Ishii, M., Aihara, Y., 2003. Effect of information and reward on stimulus-preceding negativity prior to feedback stimuli. *Psychophysiology* 40, 818-826.
- Miltner, W.H.R., Braun, C.H., Coles, M.G.H., 1997. Event-related brain potentials following incorrect feedback in a time-estimation task: evidence for a "generic" neural system for error detection. *J. Cogn. Neurosci.* 9, 788-798.
- Nieuwenhuis, S., Yeung, N., Holroyd, C.B., Schurger, A., Cohen, J.D., 2004a. Sensitivity of electrophysiological activity from medial frontal cortex to utilitarian and performance feedback. *Cereb. Cortex* 14, 741-747.
- Nieuwenhuis, S., Holroyd, C.B., Mol, N., Coles, M.G., 2004b. Reinforcement-related brain potentials from medial frontal cortex: origins and functional significance. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 28, 441-448.
- Ohgami, Y., Kotani, Y., Hiraku, S., Aihara, Y., Ishii, M., 2004. Effects of reward and stimulus modality on stimulus-preceding negativity. *Psychophysiology* 41, 729-738.
- Oldfield, R.C., 1971. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia* 9, 97-113.
- Scheffers, M.K., Coles, M.G., 2000. Performance monitoring in a confusing world: error-related brain activity, judgments of response accuracy, and types of errors. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 26, 141-151.
- Shibasaki, H., Barrett, G., Halliday, E., Halliday, A.M., 1980. Components of the movement-related cortical potential and their scalp topography. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 49, 213-226.
- Simons, R.F., Ohman, A., Lang, P.J., 1979. Anticipation and response set: cortical, cardiac and electrodermal correlates. *Psychophysiology* 16, 222-233.
- Takasawa, N., Takino, R., Yamazaki, K., 1990. Event-related potentials derived from feedback tones during motor learning. *Jpn. J. Physiol. Psychol. Psychophysiol.* 8, 95-101.
- Takeuchi, S., Mochizuki, Y., Masaki, H., Takasawa, N., Yamazaki, K., 2005. Stimulus preceding negativity represents arousal induced by affective picture. *Int. Congr. Ser.* 1278, 385-388.
- van Boxtel, G.J.M., Böcker, K.B.E., 2004. Cortical measures of anticipation. *J. Psychophysiol.* 18, 61-76.
- Walter, W.G., Cooper, R., Aldridge, V.J., McCallum, W.C., Winter, A.L., 1964. Contingent negative variation: an electric sign of sensorimotor association and expectancy in the human brain. *Nature* 203, 380-384.
- Yeung, N., Sanfey, A.G., 2004. Independent coding of reward magnitude and valence in the human brain. *J. Neurosci.* 24, 6258-6264.
- Yeung, N., Holroyd, C.B., Cohen, J.D., 2005. ERP correlates of feedback and reward processing in the presence and absence of response choice. *Cereb. Cortex* 15, 535-544.

## 情動予期と前頭部脳波の偏側性

○竹内 成生 (早稲田大学大学院人間科学研究科)

本多 麻子 (早稲田大学スポーツ科学部)

山崎 勝男 (早稲田大学スポーツ科学部)

## 【目的】

脳波の偏側性と情動の関連性がこれまでに報告されてきた。SPN(stimulus preceding negativity)は、フィードバックに先行し、予期・期待、動機づけや情動を反映することが知られている。驚愕刺激や報酬を用いた研究では、前頭や右側頭部位で SPN 増大が報告されている[1,2]。また、Davidson[3]は、前頭部  $\alpha$  波の偏側性が感情状態を反映すると指摘している。本研究では、負の情動刺激予期に関連する前頭部脳波の偏側性と SPN の振る舞いを検討した。

## 【方法】

**被験者** 常用手を右手とする成人 10 名 (男性 5 名, 女性 5 名, 27.0 $\pm$ 3.1 歳) であった。

**刺激** S1 は空間周波数の異なる 3 種類の縦縞模様図形 (縦 $\times$ 横: 6 $\times$ 7cm, 周波数: 1cpd $\cdot$ 2cpd $\cdot$ 4cpd) とした。

S2 は情動価の異なる 60 枚の IAPS スライド (縦 $\times$ 横: 17 $\times$ 23cm, 情動価: 不快 $\cdot$ 中性 $\cdot$ 快) とした。S1, S2 は被験者から約 50cm 離れた液晶ディスプレイ上に表示された。

**手続き** S1 呈示 2300ms 後に S2 を 6000ms 呈示し、被験者に情動評価をさせた。S1 の空間周波数によって、後続する S2 スライドの情動を予期させた。総試行回数は 60 回とし、刺激はランダムに呈示された。

**記録および分析方法** スライド呈示による情動喚起を確認するため、情動指標に SAM(self assessment manikin) を用いた。SAM の評定段階は「快 $\rightarrow$ 不快」の 9 段階とした。EEG は、F3, F4, C3, C4, P3, P4 より導出した (周波数: Cz 基準, T.C. 0.3s, H.C. 100Hz, SPN.: 両耳垂結合基準, T.C. 5s, H.C. 100Hz)。

**周波数分析:** 分析対象部位は F3, F4 とし、データ取得後に band-pass filter (0.3-60Hz) に供した。分析対象区間は S1-S2 呈示までの 2300ms とした。FFT 解析によって  $\alpha 1$  帯域 (8.5-10Hz),  $\alpha 2$  帯域 (10.5-12Hz) ごとのパワ密度を算出した。SPN: S1-S2 呈示までの 2300ms 区間の脳波を加算平均した。S1 呈示前 200ms の平均電位をベースラインとした。瞬目混入試行は Verleger 法 [4] で修正した。S2(IAPS) 呈示前 200ms 区間の平均電位について 3 要因の分散分析を用いて検討した。

## 【結果および考察】

**情動指標** 情動予期試行 (不快) $\cdot$ 中性 $\cdot$ 快 $\cdot$ 不快のスライド評価得点間に有意差が認められた ( $F(3,32)=74.8, p<.001$ )。Tukey 法を用いた下位検定の結果, 異なる情動価を有するスライド間の全てに有意差が認められた ( $p_s<.001$ )。スライド呈示による情動喚起が確認されたことから, S1 呈示による情動予期が可能であったことが示された。

**周波数解析** 情動予期試行と刺激予期試行に  $\alpha$  パワ値の差は無かった ( $\alpha 1$  帯域:  $t(8)=1.46, p=.18$ ,  $\alpha 2$  帯域:  $t(8)=1.28, p=.90$ )。

**SPN** 条件(情動予期 / 刺激予期)間に有意差が認められた ( $F(1,8)=9.10, p<0.05$ )。しかし, 左右 (L/R), および部位間(F/C/P)に差は無かった。

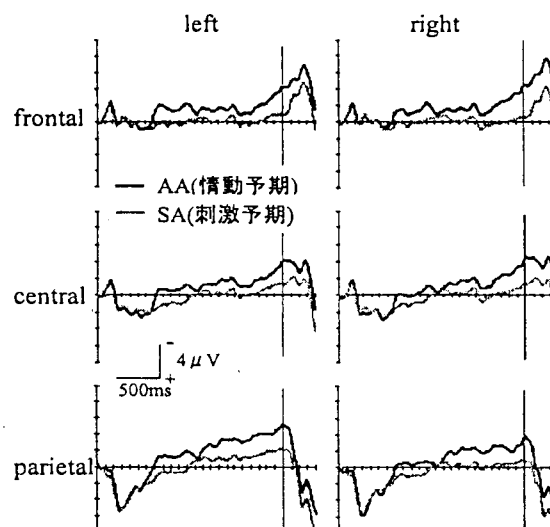


Fig.1 SPN waveform

本研究では、前頭部  $\alpha$  波の偏側性は認められなかった。SPN も同様に偏側性は認められなかった。しかしながら、不快スライドを予期させる S1 刺激に伴って、S2 呈示前に SPN 増大が認められた。したがって、この SPN 増大は、負の情動予期に起因したものと考えられる。情動予期(affective anticipation)[1]を検討するうえで、前頭部  $\alpha$  波の偏側性よりも SPN の方が切れの良い指標となりうることが示唆された。

## 【引用文献】

- [1] Böcker, K.B.E., Baas, J.M.P., Kenemans, J.L., & Verbaten, M.N. (2001). *International Journal of Psychophysiology*, 43, 77-90
- [2] Kotani, Y., Hiraku, S., Suda, K., & Aihara, Y. (2001). *Psychophysiology*, 38, 873-878.
- [3] Davidson, R.J. (1993). *Handbook of emotion*. 143-154.
- [4] Verleger, R., Gasser, T., & Möcks, J. (1982). *Psychophysiology*, 19, 472-480.

前頭部脳波の非対称性と気分一致効果の関連性

○渡辺 淳宣 (早稲田大学大学院人間科学研究科)  
 本多 麻子 (早稲田大学スポーツ科学部)  
 山崎 勝男 (早稲田大学スポーツ科学部)

【目的】

気分一致効果とは、特定の気分が生起するとその気分と一致した感情価を持つ情報の記憶や判断が促進される現象である。本実験では、気分誘導前と比較してポジティブな気分誘導後に提示した刺激の評価がポジティブに変化した場合、Davidson(1993)のモデルに合致した左前頭部脳波(EEG)の賦活がみられるか検討した。

【方法】

被験者：常用手が右手の男子大学生および大学院生 6 名(平均年齢 23±1.26 歳)。

刺激および評価方法：無表情の線画、灰色の円、灰色の三角形を評価刺激とした。肯定的・否定的な形容詞対を 10 対用意して、各評価刺激を 5 段階で評価させた。

実験条件：本実験ではベースライン条件とポジティブな気分誘導条件を設定した。

手続き：実験開始前の気分状態を POMS で回答させた後、開眼・閉眼安静時の EEG を各 2min 測定した。CRT 上に 500ms の注視点提示に引き続き、1000ms の評価刺激提示後、形容詞対を提示した。形容詞対は 1~5 番のキーで評価させた。以上を 1 試行とした。キー押し後、次の試行を開始した。全刺激の提示順序は、評価刺激と形容詞対の組み合わせ(全 30 通り)が 1 回ずつ提示されるようにランダム化した。全試行終了後、休憩した。休憩時に、ポジティブな気分誘導するために現金 1000 円を被験者に渡した。ベースライン条件と同様に、安静時の EEG を測定し、刺激を評価させた。全試行終了後、POMS に回答させ、安静時 EEG を測定して、内省報告を聴取した。

記録および分析方法：EEG は F3, F4, C3, C4, P3, P4 より Cz を基準にして T.C.0.3s, H.C.100Hz で導出した。本実験では F3, F4 のみを分析対象とした。EOG は T.C.5 s, H.C.100Hz で導出した。開眼・閉眼安静時の EEG は FFT 解析によって  $\alpha$  帯域(8~13Hz)と  $\beta$  帯域(13~30Hz)のパワ密度を算出した後、対数変換した。刺激評価得点は肯定的な形容詞を 5 点~否定的な形容詞を 1 点として、刺激別に得点を算出

した。POMS 得点は因子ごとに算出した。

【結果】

POMS 得点、刺激評価得点、 $\alpha$ ・ $\beta$  パワ値それぞれをベースライン条件と気分誘導条件間で比較した。その結果、いずれも差はなかった。 $\alpha$  パワ値の左右差は両条件ともなかった。閉眼時の  $\beta$  パワ値は両条件ともに左右差が認められた( $p < .05$ )(図 1)。したがって、両条件ともに相対的な右前頭部の賦活がみられた。また、刺激の評価得点について、条件(2)×刺激(3)の 2 要因分散分析の結果、刺激の主効果があった( $F(2, 10)=7.28, p < .01$ )。多重比較の結果、無表情、三角形刺激と比較して、円刺激の評価得点は有意に高かった( $p < .05$ )。

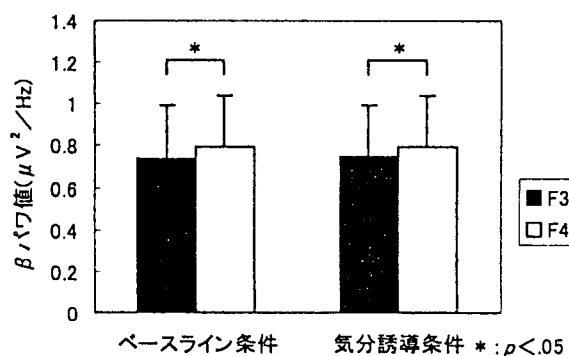


図1. 閉眼安静時の  $\beta$  パワ値(13~30Hz)

【考察】

本実験では被験者の気分には有意な変化はなかった。この原因として金額の少なさ、金銭の提示方法が気分を誘導するほど精緻化されていなかったことが挙げられる。Davidson のモデルによると、右前頭部 EEG の賦活は相対的にネガティブな状態であったといえる。このことが無表情や三角形に対する評価得点の低さにつながったものと考えられる。Davidson の研究では  $\beta$  パワ値は用いられていない。しかしながら、 $\beta$  帯域でも正・負の感情で活動性に違いがあるという報告(磯谷他, 2002)などから、 $\beta$  帯域も考慮する必要があるといえる。円刺激は他の刺激よりも評価得点が高かった。円が日常的にポジティブな事象と結びつきやすいことから、評価に影響を及ぼしたものと考えられる。

【引用文献】

Davidson, R. J. 1993 Parsing affective space : perspectives from neuropsychology and psychophysiology. *Neuropsychology*, 7, 464-475.  
 磯谷俊明他 2002 陽性・陰性感情と脳電位活動発生源 臨床神経生理学 30, 102-108.

タイミングと随伴性陰性変動

- 望月 芳子 (早稲田大学大学院人間科学研究科)  
 田中 秀明 (桜美林大学)  
 高澤 則美 (科学警察研究所)  
 山崎 勝男 (早稲田大学スポーツ科学部)

【目的】

連続的タイミング事態で、時間間隔変化が脳内情報処理に及ぼす影響を調べた。CNV パラダイム(S1-S2+運動反応(MR))を用い、反応時間(RT)、随伴性陰性変動(CNV)を指標に用いた。近年、継続的状況下の予期を扱う研究はあるが、これらの研究はISIのみに注目しITIがタイミングに及ぼす影響は扱っていない。そこで本研究は、ISIとITIの時間間隔を操作した。

【方法】

**被験者:** 常用手が右利きの成人19名(男子7名, 女子12名), 24.1±2.3歳を被験者とした。

**刺激:** 全4条件に共通して, S1にクリック音(800Hz, 90dB, 持続時間50ms), S2に緑色円図形(被験者の前方1mにあるCRTに表示, 直径5cm, 持続時間100ms)を呈示した。

**条件:** S1-S2+MRパラダイムを基本とし, 単純反応課題4条件を実施した。条件1はISIとITIともに3s, 条件2はISI3sでITI10s, 条件3はISIランダム(2s, 3s, 6s, 8s)でITI3s, 条件4はISIランダム(条件3と同様)でITI10sとした。

**手続き:** 被験者には「クリック音の少し後に緑色円図形が画面に表示されます。緑色円図形を見たら速やかにキーを上げてください。」と教示した。被験者はS2に対して前方に設置したキーを右手中指の伸展運動によるキー上げを行った。条件1を最初に行い, その他の3条件は被験者間でカウンターバランスをとった。

**記録および分析方法:** EEGは, Fz, F3, F4, Cz, C3, C4, Pz, P3 P4から両耳垂結合を基準に時定数5s, 高域遮断周波数100Hzで, EOGは時定数5s, 高域遮断周波数100Hzで, EMGは時定数0.03s, 高域遮断周波数1500Hzで導出した。EEGはS2呈示時点トリガとして加算平均した。データ処理はRTが130-800msにある試行を分析対象とした。CNVは, 条件1・条件2のISIに出現する波形と, 条件3・条件4のランダム条件のうちISIが3sの試行を分析対象とした。CNVはFz, Cz, Pzに分析を絞った。3部位でISIを500ms毎に分け, 各区間の平均振幅値についてISI(3s/ランダム)

×ITI(3s/10s)で分散分析を行った。RTはISI(3s/ランダム)×ITI(3s/10s)で分散分析を行った。

【結果および考察】

RTを分散分析した結果, ISI, ITIいずれの主効果も認められた( $F[1, 18] = 189.83, p < .01$ ) ( $F[1, 18] = 10.65, p < .01$ )。そのため, ISI3s固定条件(条件1・条件2)に比較して, ISIランダム条件(条件3・条件4)のRTは有意に遅延し, ITI3s条件(条件1・条件3)に比較して, ITI10s条件(条件2・条件4)のRTは有意に遅延した。CNV平均振幅値を分散分析した結果, Fzでは, 500-1000ms ( $F[1, 18] = 9.30, p < .01$ ), 1000-1500ms ( $F[1, 18] = 4.47, p < .05$ )でITIの主効果があった。そのため, この2区間では, ITI3s条件に比較してITI10s条件が有意に増大した。2000-2500msではISIとITIの交互作用があった( $F[1, 18] = 6.07, p < .05$ )。ISI3s水準におけるITIの単純主効果があり(5%水準), 条件1に比較して条件2が有意に増大した。Czでは, 500-1000msでISIの主効果( $F[1, 18] = 4.51, p < .05$ )とITIの主効果( $F[1, 18] = 10.81, p < .01$ )があった(図1は, S1から1000ms区間におけるCzの波形である)。その結果, 500-1000msでは, ISI3s固定条件に比較してISIランダム条件が有意に増大した。また, ITI3s条件に比較してITI10s条件が有意に増大した。1500-2000msでISIとITIの交互作用があった( $F[1, 18] = 4.72, p < .05$ )。ISI3s水準におけるITIの単純主効果があり(5%水準), 条件1に比較して条件2が有意に増大した。Pzは差がなかった。

S1後CNV前・中期成分はISI, ITIの両効果を受けていることから, S1直後に複合的な情報処理が行われたことが推測された。連続的タイミング事態での時間情報処理は, ISIとともにITI長短により影響されることが示唆された。

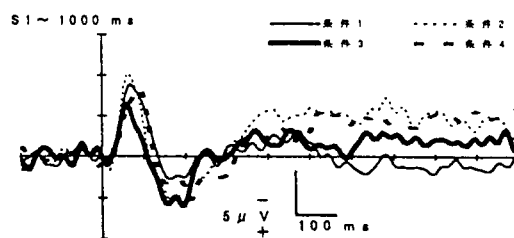


図1. CzにおけるCNV波形

MOCHIZUKI Yoshiko, TANAKA Hideaki,  
 TAKASAWA Noriyoshi, YAMAZAKI Katuo

# タイミングと事象関連電位

○望月 芳子 田中 秀明 高澤 則美 山崎 勝男  
 (早稲田大学人間科学研究科) (科学警察研究所) (早稲田大学人間科学部)  
 key words: CNV N1 P3

## 【目 的】

タイミングとは、反応に最も有効な時間条件を創造するための能力である。本研究では、CNV パラダイム(S1-S2+運動反応)を連続刺激と捉え、連続的タイミング事象で、時間間隔変化が脳内情報処理に及ぼす影響を調べた。反応時間(RT), 随伴性陰性変動(CNV), N1, P3を指標に用いた。

従来、CNV パラダイムは、刺激間隔(ISI)を操作して心理要因との対応が調べられてきた。しかし、試行間隔(ITI)を操作した報告はない。近年、継続的な状況下での予期を扱う研究がある(Trillenber, Verleger, Wascher, Wauschkuhn, & Wessel, 2000; Wascher, Verleger, Jaskowski, & Wauschkuhn, 1996)。しかし、これらの研究はISIのみに注目しITIがタイミングに及ぼす影響は扱っていない。そこで本研究は、ISIとITIの時間間隔を操作した。

## 【方 法】

**被験者:** 常用手が右利きの成人19名(男子7名, 女子12名), 24.1±2.3歳)を被験者とした。

**刺激:** 全4条件に共通して, S1にクリック音(800Hz, 90dB, 持続時間50ms), S2に緑色円図形(被験者の前方1mにあるCRTに表示, 直径5cm, 持続時間100ms)を呈示した。

**条件:** S1-S2+運動反応(MR)パラダイムを基本とし, 単純反応課題4条件を実施した。条件1はISIとITIともに3s, 条件2はISI 3sでITI 10s, 条件3はISI ランダム(2s, 3s, 6s, 8s)でITI 3s, 条件4はISI ランダム(条件3と同様)でITI 10sとした。

**手続き:** 被験者にはすべての条件で「クリック音の少し後に緑色円図形が画面に表示されます。緑色円図形を見たら速やかにキーを上げてください。」と教示し, ISI ランダム条件(条件3・4)では「間隔がランダムになるので意識してください。」という教示を加えた。被験者はS2に対して前方に設置されたキーを右手中指の伸展運動によるキー上げを行った。条件1を最初に行い, その他の3条件は被験者間でカウンターバランスをとった。

**記録および分析方法:** EEGは、Fz, F3, F4, Cz, C3, C4, Pz, P3 P4から両耳垂結合を基準に時定数5s, 高域遮断周波数100Hzで, EOGは時定数5s, 高域遮断周波数100Hzで, EMGは時定数0.03s, 高域遮断周波数1500Hzで導出した。EEGはS2呈示時点トリガとして加算平均した。データ処理はRTが130-800msにある試行を分析対象とした。CNVは、条件1・条件2のISI3000msに出現する波形と条件3・条件4のランダム条件のうちISIが3000msの試行を分析対象とした。N1はS1後とS2後0-200ms, P3はS1後とS2後0-500msに出現する最高振幅とその潜時を分析対象とした。

CNVはFz, Cz, Pzに分析を絞った。3部位で、ISIを500ms毎に分け、各区間の平均振幅値についてISI(3s/ランダム)×ITI(3s/10s)で分散分析を行った。N1は、S1後とS2後それぞれ部位(Fz/Cz/Pz)×ISI(2)×ITI(2)で分散分析を行った。P3は、PzにおいてS1後とS2後それぞれISI(2)×ITI(2)で分散分析を行った。RTはISI(2)×ITI(2)で分散分析を行った。

## 【結果および考察】

RTを分散分析した結果、ISI, ITIいずれの主効果も認められた(F[1,18]=189.83, p<.01) (F[1,18]=10.65, p<.01)。そのため、ISI3s固定条件(条件1・条件2)に比較して、ISIランダム条件(条件3・条件4)のRTは有意に遅延し、ITI3s条件(条件1・条件3)に比較して、ITI10s条件(条件2・条件4)のRTは有意に遅延

した。

CNV平均振幅値を分散分析した結果、Fzでは、500-1000ms (F[1,18]=9.30, p<.01), 1000-1500ms (F[1,18]=4.47, p<.05)でITIの主効果があった。そのため、この2区間では、ITI3s条件に比較してITI10s条件が有意に増大したことが示された。2000-2500msではISIとITIの交互作用があった(F[1,18]=6.07, p<.05)。ISI3s水準におけるITIの単純主効果があり(5%水準)、条件1に比較して条件2が有意に増大した。Czでは、500-1000msでISIの主効果(F[1,18]=4.51, p<.05)とITIの主効果(F[1,18]=10.81, p<.01)があった。その結果、500-1000msでは、ISI3s固定条件に比較してISIランダム条件が有意に増大したことが示された。また、ITI3s条件に比較してITI10s条件が有意に増大したことが示された。1500-2000msでISIとITIの交互作用があった(F[1,18]=4.72, p<.05)。ISI3s水準におけるITIの単純主効果があり(5%水準)、条件1に比較して条件2が有意に増大した。Pzは差がなかった。

N1成分を分散分析した結果、振幅と潜時いずれも部位に主効果があったが、ISIとITIの効果はなかった。N1は空間的情報処理の指標として用いられるが、時間的情報処理の指標にはならないという報告がある(Miniussei, Wilding, Coull, & Nobre, 1999)。本研究でもN1の振幅と潜時ともに条件の差はなかった。

図1はPzのS1後、S2後500msの波形である。P3成分を分散分析した結果、S1後の振幅にITIの有意傾向があった(F[1,18]=4.13, p<.10)。ITI3s条件に比較してITI10s条件の陽性成分は増大する傾向であった。また、S1後の潜時にISIとITIの交互作用があった(F[1,18]=67.08, p<.01)。ITI10s水準におけるISIの単純主効果があり(1%水準)、条件2に比較して条件4が有意に遅延した。また、ISIランダム水準におけるITIの単純主効果があり(1%水準)、条件3に比較して条件4が有意に遅延した。S2後の振幅にはISIの主効果があった(F[1,18]=9.82, p<.01)。ISI3s固定条件に比較してISIランダム条件は有意に増大した。

S1後P3, CNV前・中期成分にISI, ITIの両効果を受けていることから、有効な時間条件を創造するため、S1直後に複合的な情報処理が行われたことが推測された。連続的タイミング事象での時間情報処理は、ISIとともにITI長短により影響されることが示唆された。

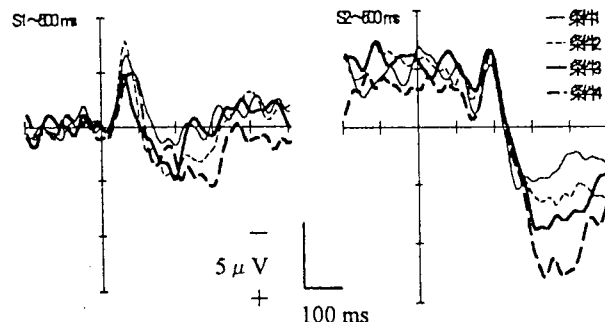


図1. Pzにおける波形

MOCHIZUKI Yoshiko, TANAKA Hideaki,  
 TAKASAWA Noriyoshi, YAMAZAKI Katuo

## J2A3-02 情動予期と SPN

竹内 成生<sup>1)</sup>, 正木 宏明<sup>2)</sup>, 高澤 則美<sup>3)</sup>, 山崎 勝男<sup>2)</sup>

1) 早稲田大学大学院 人間科学研究科, 2) 早稲田大学 スポーツ科学部, 3) 科学警察研究所

SPN(stimulus-preceding negativity)は、フィードバック呈示に先行して出現し、予期・期待、動機づけや情動を反映することが示唆されている。驚愕刺激や報酬を用いた研究では、前頭や右側頭部位で SPN 増大が報告されている。しかしながら、これらの研究では情動操作の妥当性に問題がある。そこで本研究では、この点を改善することによって情動と SPN との関連性を再検討した。S1として呈示された3種類の視覚刺激によって、S2の情動内容が予期できるパラダイムを採用した。S2として international affective picture set(IAPS)スライドを呈示した。実験1では負の情動予期のみを操作した結果、それに伴う SPN 増大が認められた。しかしながら、正の情動予期と SPN との関連性については検討の余地を残した。そこで実験2では、快・不快・中性の各情動刺激に先行する SPN を比較することで、正・負の情動予期が SPN に及ぼす影響について検討した。

## J2A3-05 タイミングと事象関連電位

望月 芳子<sup>1)</sup>, 田中 秀明<sup>2)</sup>, 正木 宏明<sup>3)</sup>, 高澤 則美<sup>4)</sup>, 山崎 勝男<sup>5)</sup>

1) 早稲田大学 人間科学研究科, 2) 桜美林大学, 3) 早稲田大学 スポーツ科学部, 4) 科学警察研究所,  
5) 早稲田大学 スポーツ科学部

本研究では、連続的タイミング事態で、時間間隔変化が CNV, P3, N1 に及ぼす影響を調べた。CNV パラダイムを連続刺激と捉え、ISI と ITI の時間間隔を操作した。その結果、ISI 固定条件に比較して、ISI ランダム条件の RT が遅延し、Cz の CNV 前期成分が増大した。このことから、時間的情報処理は S1 直後の CNV 前期成分に反映されることが推測された。また、ITI 短縮条件に比較して、ITI 延長条件の RT が遅延し、Cz の CNV 前期成分と Fz の CNV 前期・中期成分が増大した。この結果、S1 直後に複合的な情報処理が行われたことが推測された。S2 後の P3 振幅に ISI の主効果があり、ISI 固定条件に比較して、ISI ランダム条件の P3 振幅が増大した。また、N1 には ISI と ITI の効果はなかった。



## 第22回大会要旨

### 自動的処理とエラー関連陰性電位

- 田中 秀明(産業技術総合研究所特別研究員)  
望月 芳子(早稲田大学大学院人間科学研究科)  
高澤 則美(科学警察研究所)  
山崎 勝男(早稲田大学スポーツ科学部)

#### 1. 目的

自動的処理は学習後の習熟状態であり、注意資源の配分を必要としない無意識的処理である。制御的処理は学習前の未熟な状態であり、注意資源の配分を必要とする意識的処理である。人間の行動は、学習によって習熟し、制御的処理から自動的処理へ移行する。本研究では、エラー関連陰性電位(ERN)を指標として、自動的処理がエラー検出における注意資源の配分方略に及ぼす影響について検討した。

#### 2. 方法

**被験者:**成人10名(男子7名,女子3名)であった。

**手続き:**本研究では、認知的葛藤課題を主課題、Sternberg memory search taskを副課題とした二重課題を遂行した。

認知的葛藤課題は、“H”と“S”で構成される文字列の中央文字(標的刺激)に対して反応するもので、標的刺激の両側4文字はノイズ刺激であった。視覚刺激は標的文字とノイズ刺激との組み合わせから、一致刺激(HHHHH, SSSSS)と不一致刺激(SSHSS, HSHHH)に分類された。各刺激はCRT上に一致刺激(40%)、不一致刺激(60%)の割合でランダム呈示され、標的刺激に対してできるだけ速くかつ正確に、右第3指あるいは左第3指の伸展運動によるキー上げ反応を行うように被験者に要請した。標的文字と反応手の割り当ては被験者間でカウンターバランスをとった。

Sternberg memory search taskは、実験開始直前にアルファベットを短期間記憶し、CRT上に呈示される文字の中に記憶した文字が存在するか否かを判断し、記憶した文字が存在する場合に、できるだけ正確に早く足趾背屈運動で反応する作業である。記憶する標的文字は6文字とし、妨害文字も6文字の組み合わせとした。標的文字、妨害文字をランダムに組み合わせさせた。いずれも出現率が50%となるようにした。また、本研究ではSternberg memory search taskで、全ブロックで標的文字を固定するCM条件とブロックごとに標的文字を変化させるVM条件を

使用した。

CM条件とVM条件の実施順序は被験者間でカウンターバランスをとった。各条件について、主・副課題ともに5ブロック(1ブロック100試行)実施した。

**記録および分析方法:**EEGは、Fz, Cz, Pzから両耳垂結合を基準に時定数5s, 高域遮断周波数100Hzで、EOGは時定数5sで測定した。

#### 3. 結果および考察

主課題エラー率はCM条件の一致刺激が0.8%(1.0%, 以下カッコ内はSD), 不一致刺激が0.6%(1.7%), VM条件の一致刺激が1.6%(2.2%), 不一致刺激が1.0%(2.2%)であった。課題条件(2)と刺激の一致性(2)の分散分析で課題条件の主効果の有意差が認められた( $F(1, 9)=19.26, p<.01$ )。また、副課題反応時間(CM条件383ms(11ms), VM条件386ms(10ms))についてt検定を行ったところ、有意傾向であった( $t(9)=-1.92, p<.10$ )。

図1は主課題・一致刺激のERN(Cz)の波形を示したものである。頂点振幅について課題条件(2)と刺激の一致性(2)の分散分析を実施したところ、課題条件の有意差が見られた( $F(1, 9)=15.06, p<.01$ )。VM条件に比較してCM条件のERN振幅が増大した。

副課題の反応時間は、VM条件に比較してCM条件の方が短縮した。この結果は、標的文字を固定するCM条件の方が課題の習熟がしやすいため、CM条件下の副課題が自動的処理に移行したものと考えられる。そして、CM条件の副課題の自動的処理への移行によって余剰分の注意資源が主課題エラー検出へ配分され、主課題ERNの振幅が増大した。それに伴ってエラー検出機能が向上し、CM条件の主課題のエラー率が減少したと推察できる。

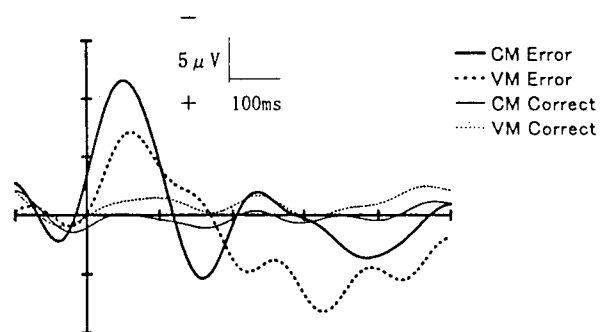


図1 主課題のERN波形

時間情報処理と緩電位変動

- 望月 芳子 (早稲田大学大学院人間科学研究科)
- 竹内 成生 (早稲田大学大学院人間科学研究科)
- 正木 宏明 (早稲田大学スポーツ科学部)
- 高澤 則美 (江戸川大学)
- 山崎 勝男 (早稲田大学スポーツ科学部)

【目 的】

時間情報処理の機序は記憶が前提となっている。2-3 秒の時間間隔にはワーキングメモリの関与が考えられる。時間再生課題において、記録中と再生中の CNV を観察した研究は多い。しかしながら、保持中の ERP を観察した研究は少なく、極性も不明確である。本研究では、視覚刺激を用い保持中の電位変動を検討した。ERP は前頭部で陽性変動し、再生が相対的に困難な条件の陽性変動増大が予想された。

【方 法】

**被験者：**四肢が右利きの成人 10 名 (男子 8 名, 女子 2 名) を被験者とした。年齢は  $24.7 \pm 2.8$  歳であった。

**条件と刺激：**時間再生課題を用いた。記録時間 (3000ms/2700ms) と、保持時間 (3000ms/9000ms) を操作し、4 条件を設定した。記録中は、黒色長方形 (縦 5 cm × 横 2 cm, 被験者の前方 1m にある CRT に呈示) 内で、緑色横線が上から下に移動した。保持中は、注視点を呈示した。再生は、黒色長方形をキー押しで消去した。再生終了後にフィードバックを呈示した。

**手続き：**全条件で記録時間を記憶するよう教示した。再生は、記録時間と同じと判断した時点で、前方に設置したキーを右手中指で押すように教示した。4 条件は被験者間でカウンターバランスをとった。

**記録および分析方法：**EEG は、Fpz, Fp1, Fp2, Fz, F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, FCz, Cz, C3, C4, CPz, CP5, CP6, Pz, P3, P4, P7, P8, Oz, O1, O2 から左耳垂を基準に時定数 10 s, 高域遮断周波数 100 Hz で、EOG は時定数 10 s, 高域遮断周波数 100 Hz で導出した。EEG は、保持刺激呈示をトリガとして加算平均した。データ処理は、再生がキー押し時点の  $\pm 500$  ms にある試行を分析対象とした。ERP は、Fpz, Fz, FCz, Cz, CPz, Pz, Oz を分析対象とした。7 部位で、保持期間を 500 ms 毎に分け、区間 1 (500 ms-1000 ms), 区間 2 (1000 ms-1500 ms), 区間 3 (保持 3000ms 条件: 2000 ms-2500 ms, 保持 9000ms 条件: 8000 ms-8500 ms), 区間 4 (保持 3000ms 条件: 2500 ms-3000 ms, 保持 9000ms 条件: 8500

ms-9000 ms) の平均振幅値について、部位 (7) × 記録 (3000ms/2700ms) × 保持 (3000ms/9000ms) の 3 要因分散分析を行った。再生時間は、再生変動誤差時間を記録 (2) × 保持 (2) の 2 要因分散分析を行った。

【結果および考察】

4 条件の再生誤差時間を分散分析した結果、記録 × 保持の交互作用が有意であった ( $F[1, 9]=6.51, p<.05$ )。単純主効果を分析した結果、条件 1 (記録 3000ms/保持 3000ms) より条件 3 (記録 2700ms/保持 3000ms) ( $p<.05$ )、条件 2 (記録 3000ms/保持 9000ms) より条件 4 (記録 2700ms/保持 9000ms) ( $p<.01$ ) の再生誤差が大きかった。

保持中は、陽性変動が観察された。図 1 は、Fpz における保持中の波形である。3 要因分散分析の結果、区間 1 は部位 × 記録の交互作用が有意であった ( $F[6, 54]=2.44, p<.05$ )。Fz, FCz, Cz において記録 3000ms 条件よりも、記録 2700ms 条件の陽性変動が大きかった ( $Fz, FCz: p<.10$ ) ( $Cz: p<.01$ )。また、部位 × 保持の交互作用が有意傾向であった ( $F[6, 54]=2.08, p<.10$ )。Fpz, Fz, FCz において、保持 3000ms 条件よりも保持 9000ms 条件の陽性変動が大きかった ( $ps<.01$ )。区間 2 には部位の主効果があり ( $F[6, 54]=5.38, p<.01$ )、FCz, Cz, CPz, Pz の振幅が増大した ( $ps<.05$ )。区間 3, 区間 4, では、部位 × 記録 × 保持の交互作用が有意であったため、各部位毎に記録 × 保持の単純交互作用を分析した。その結果、区間 3 では Fpz, Fz で、区間 4 では Fz で記録 × 保持の交互作用が有意であった ( $ps<.01$ )。条件 2 (記録 3000ms/保持 9000ms) よりも、条件 4 (記録 2700ms/保持 9000ms) の陽性変動が増大した。

本研究では、視覚刺激を用いて保持中の陽性変動が認められ、複数領域の賦活に起因することが考えられた。また、区間 1, 区間 3, 区間 4 において、前頭部では記録と保持の効果が認められた。特に、長い保持時間になると、再生の困難な条件で陽性変動が増大したことが考えられた。

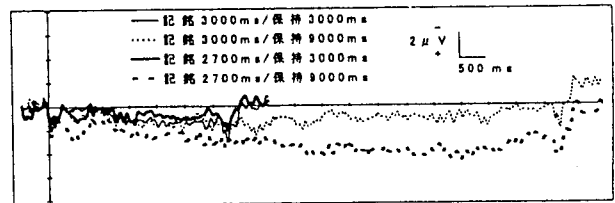


図 1. Fpz における波形

MOCHIZUKI Yoshiko, TAKEUCHI Shigeki, MASAKI Hiroaki, TAKASAWA Noriyoshi, YAMAZAKI Katuo

ギャンブル課題遂行中の動機づけと事象関連電位(1)

- 竹内成生 (早稲田大学大学院人間科学研究科)
- 正木宏明 (早稲田大学スポーツ科学部)
- William J. Gehring (University of Michigan)
- 高澤則美 (江戸川大学社会学部)
- 山崎勝男 (早稲田大学スポーツ科学部)

【目的】

刺激前陰性電位 (SPN) は、結果の知識に対する予期や期待、情動—動機づけとの関連から行動に結びつく重要なプロセスを反映する ERP と考えられている。本研究ではギャンブル課題を用い、前試行の結果が次試行でのリスク選択および結果の予期に与える情動—動機づけの影響を SPN から検討した。

【方法】

**被験者:** 右手を常用手とする成人 20 名 (22.9±2.0 歳)。  
**課題:** 被験者には 500 円の時給とともに、2000 円の所持金を与え、ギャンブル課題を課した。被験者の 80 cm 前方に設置されたディスプレイ上の中央に注視点、その左右に空箱を呈示した。その 800 ms 後、左右各々の箱の中に 10 または 50 の数値が表示された。被験者は、左右の箱に対応したボタンを右手の示指と中指を用いて選択反応した。ボタン押し後、注視点が消滅し、2500 ms 後に金銭の獲得と損失、金額のフィードバックを色(緑/赤)と数値 (10/50) によって呈示した。総試行回数は 32 試行 × 20 ブロックの計 640 回とした。ITI は平均 1000 ms (± 200 ms) とした。ボタン押しによる運動関連電位を評価するために統制条件として、金銭報酬のフィードバック情報が呈示されない試行を 64 試行 × 2 ブロックおこなった。

**記録方法:** 脳波 (EEG) は、国際 10%法に準拠した 31 部位から左耳垂 (A1) を基準に、時定数 10s、高域遮断周波数 100 Hz で導出した。垂直および水平眼球運動を時定数 10 s、高域遮断周波数 100 Hz で導出した。測定事象はサンプリング周波数 250 Hz で保存し、オフライン処理に供した。

**分析方法:** 行動指標は、リスク選択率とした。リスク選択率は、直前試行の結果によって 4 分類 (Gain50, Gain10, Loss10, Loss50) し、当該試行で 50 円選択した確率を算出した。SPN は、フィードバック信号をトリガとして、直前試行の結果と当該試行での選択

(Choice50, Choice10) から、条件ごとに加算処理した。加算波形は、10 Hz の low-pass フィルタに供し、統制条件を減じた。F3, F4, T7, C3, C4, T8, P3, P4, O1, O2 について、フィードバック信号呈示の -2500 ms から -2300 ms をベースラインとし、フィードバック刺激呈示直前 200 ms の平均電位を算出した。

【結果】

**リスク選択率:** 直前試行の結果について 1 要因分散分析をおこなったところ、50 円損失時にリスク選択率が 50 円獲得、10 円損失に比べ上昇した ( $F(3, 57) = 5.43, p < .01$  post-hoc test:  $p_s < .05$ )。

**SPN:** 要因配置を当該試行選択 (Choice50, Choice10) × 直前試行の結果 (Gain50, Gain10, Loss10, Loss50) × 半球(left, right) × 電極部位 (F, T, C, P, O) とした 4 要因反復測定分散分析をおこなった。その結果、前試行結果の効果が有意であり ( $F(3, 57) = 3.55, p < .05, \epsilon = .69$ )、Gain50 は、Gain10, Loss10, Loss50 に比べ陰性電位が増大した ( $p_s < .05$ )。電極部位の効果が認められ ( $F(4, 76) = 6.36, p < .005, \epsilon = .49$ )、central, parietal, occipital は frontal よりも高い陰性電位を示した ( $p_s < .005$ )。さらに電極部位と半球の交互作用が有意であり、frontal で右半球優位であった ( $p < .05$ )。電極部位と前試行結果の交互作用も有意で認められ、前試行で 50 円獲得した場合、frontal および central の電位が 10 円獲得、10 円損失、50 円損失よりも増大した ( $p_s < .05$ )。

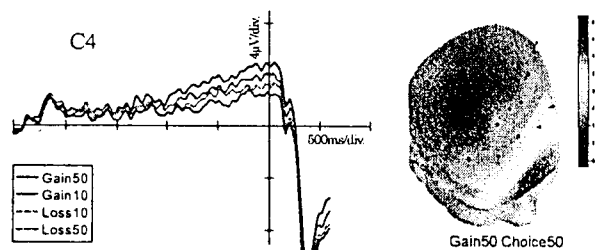


図 1. 当該試行 Choice50 の SPN (左) と頭皮上分布 (右)

【考察】

直前試行で 50 円獲得した場合には、右半球の前頭—中心部および頭頂部で SPN が増大した。当該試行での選択金額よりも、直前試行の結果がギャンブル課題遂行中の情動—動機づけに強く影響することが示された。行動的には、リスクを伴う高額選択は 50 円損失直後に多くみられたが、リスク選択は SPN に反映される動機づけとは異なるプロセスに起因したものと考えられる。

ギャンブル課題遂行中の動機づけと事象関連電位(2)

- 正木宏明 (早稲田大学スポーツ科学部)
- 竹内成生 (早稲田大学大学院人間科学研究科)
- William J. Gehring (University of Michigan)
- 高澤則美 (江戸川大学社会学部)
- 山崎勝男 (早稲田大学スポーツ科学部)

【目的】

ギャンブル課題遂行中の動機づけ水準は、金銭の得失に伴って変化することが知られている。大きな損失直後には、ハイリスク・ハイリターンを選択率(リスク選択率)が上昇する。こうした動機づけの高まりは、損失によって惹起される内側前頭陰性電位(medial frontal negativity: MFN)に反映される(Gehring & Willoughby, 2002)。

MFN はエラー関連陰性電位との異同が議論されてきたが、ギャンブル課題では金銭の選択エラーよりも損失結果にMFNが鋭敏に反応することから、エラー検出ではなく負の情動を反映した電位と解釈されている。

また、MFN 振幅とリスク選択率には対応関係があることが報告されており、前試行での損失結果に起因する動機づけのインパクトを反映したものと考えられている。

本研究では、Gehring & Willoughby (2002)の報告したこれらの知見を、結果の知識(KR)の待ち時間を1sから2.5sに延長した条件下で追試した。

【方法】

実験方法は、SPN (stimulus-preceding negativity)に着目した前頁の報告(竹内他, ギャンブル課題遂行中の動機づけと事象関連電位(1))と同様であった。

分析方法: 直前試行の結果によって4条件(Gain50, Gain10, Loss50, Loss10)を分類し、各リスク選択率(50円を選択した比率)を算出した。MFNはフィードバック信号の呈示時点をトリガに、直前試行結果および当該試行での選択金額(Choice50/ Choice10)別に脳波を加算平均して算出した。さらに、選択エラーによって惹起されるMFNも検討した。選択エラーとは、金銭報酬を獲得したものの、別の選択肢の方が大きな報酬をもたらした場合と、いずれの選択も損失であるものの、別の選択肢の方が小さな損失で済んだ場合を指している。MFN波形には10Hzのローパスフィルタを適用し、

FCzにおける振幅値をトリガ前100msの平均電位を基線として計測した。

【結果】

リスク選択率: リスク選択率を直前試行の結果間で比較したところ、Loss50後にはリスク選択率が上昇し、Gain50, Loss10との間に有意差が認められた( $F(3, 57) = 5.43, p < .01$ )。

MFN: いずれの条件においても金銭損失時には前頭-中心部に分布するMFNが惹起された(図1左)。

(1) エラー vs. 損失: FCzにおけるERP振幅値について、当該試行結果(2: Gain/Loss) × 選択の正誤(2: Correct/Error)の2要因分散分析を行った結果、選択の正誤間には振幅差はなかったが、Loss時の方がGain時よりも振幅は大きかった( $F(1, 19) = 30.44, p < .00005$ )。

(2) 動機づけのインパクト: 前試行の結果間でMFNを比較した。差波形(Loss-Gain)の振幅値について、選択金額(2) × 前試行結果(4)の2要因分散分析を行った結果、交互作用が有意であった( $F(3, 57) = 3.90, p < .05$ )。これは、前試行で報酬を獲得した場合には、50円選択時の方が10円選択時よりもMFNは大きく(Gain 10:  $t(19) = 2.77, p < .05$ , Gain 50:  $t(19) = 3.09, p < .01$ )、また50円選択時ではGain 50後の方がLoss 50後よりもMFNは大きかったこと(Choice 50:  $F(3, 57) = 3.02, \epsilon = .84, p < .05$ )を示したものであった(図1右)。

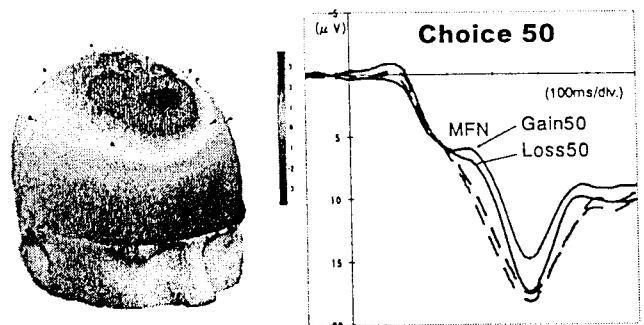


図1 MFN頭皮上分布(左)とMFN総加算平均波形(右)

【考察】

リスク選択率は従来の知見に合致した。またMFNがエラーよりも負の情動に関係した電位であることも確認できた。しかしながら、リスク選択率とMFNの振る舞いには乖離がみられた。MFNはGain50後に最大となり、先行するSPNの結果に合致していた。リスク選択を促進する動機づけ要因と、MFN/SPNに反映される動機づけ要因は異なることを示唆している。

## 事象関連電位によるエラー補償機構の研究

○ 竹内 成生                      正木 宏明                      望月 芳子                      高澤 則美                      山崎 勝男  
 (早稲田大学大学院)    (早大スポーツ科学部)    (早大大学院)                      (科学警察研究所)    (早大スポーツ科学部)  
 key words: ポストエラー slows イング, 偏側性準備電位, エラー関連陰性電位

### 【目的】

選択反応時間課題では、エラー反応に伴い脳内補償機構が働くことで、後続試行での反応時間(reaction time: RT)は遅延する。この現象はポストエラー slows イング(post-error slowing: 以下 PES)と呼ばれており、反応調整のストラテジに起因した現象と考えられてきた。しかしながら、同様の現象は、短い試行間隔(response-stimulus interval: RSI)に起因する心理的不応からも説明できる。本研究では、PESがエラー補償に関与するストラテジに起因した現象なのか、心理的不応に起因した現象なのかについて、RSIを操作したうえで、偏側性準備電位(lateralized readiness potential: LRP)の振る舞いからその背景メカニズムを調べた。心理的不応に起因する場合には、刺激同期 LRP (S-locked LRP)に差が生じ、反応ストラテジに起因する場合には、反応同期 LRP (R-locked LRP)に差が生ずるものと予想された。さらに、エラー試行時の脳内処理と PES との関連性を検討するために、エラー関連陰性電位(error-related negativity: ERN)を記録した。

### 【方法】

**被験者:** 男性大学生 11 名 (平均年齢: 21.8 歳)。  
**課題:** 空間 S-R コンパチビリティ課題。  
**手続き:** 注視点呈示後に、上下いずれかを示す白色矢印が、注視点の上下いずれかの位置に呈示された。課題は、刺激呈示位置を無視して、白色矢印の方向に合致した手指の伸展運動によって速くかつ正確に反応することであった。手指の位置と刺激の方向が合致している場合を一致刺激、合致していない場合を不一致刺激として分類した。RSI は 300ms の短 RSI 条件と、700ms の長 RSI 条件を設定した。実験日は 2 日間行われ、各 RSI 条件は 20 ブロック (64 試行/ブロック) ずつ遂行された。第 2 日目は RSI 条件の呈示順序を変えた。  
**記録方法:** 脳波 (EEG) は、Fpz, Fz, FCz, Cz, Pz, Oz, Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8, FC1, FC2, C3, C4, T7, T8, P3, P4, P7, P8 PO7, PO8, O1, O2, A2 より左耳垂 (A1) を基準に、時定数 10s, 高域遮断周波数 100Hz で導出した。アーチファクト監視用に垂直および水平眼球運動を時定数 10s, 高域遮断周波数 100Hz で導出した。測定事象はサンプリング周波数 250Hz で記録し、オフライン処理に供した。刺激呈示と RT 測定は、タキストスコープ (岩通アイセル製 IS-720 AV Tachistoscope) で行った。  
**分析方法:** RT は条件毎に、刺激呈示時点から反応時点までをミリ秒単位で計測した。正反応時の RT (Corr.-RT), エラー前 3 試行目の正反応時間 (BE3-RT), エラー前 2 試行目の正反応時間 (BE2-RT), エラー直前試行の正反応時間 (BE1-RT), エラー時の反応時間 (Err.-RT), エラー直後試行の正反応時間 post-error (PE-RT) の間に対応のある t 検定を行った。また、RSI 条件 (2) × 刺激 (2) の 2 要因分散分析により、PES 生起の有無を確認した。  
 EEG は正反応試行と、エラー反応試行の次試行を対象に、刺激呈示時点トリガとして加算平均し、S-locked LRP を算出した。さらに、運動反応トリガとして、R-locked LRP を算出した。加算波形には 10Hz のローパスフィルタを適用した。S-locked LRP は、刺激呈示前 200ms 区間の平均電位を基線に立ち上がり潜時を計測した。R-locked LRP は、反応前 600ms から 200ms 区間の平均電位を基線として計測した。LRP の立ち上がり潜時は、 $-0.3 \mu V$  を越えた時点とした。

ERN は、エラー反応時点をトリガに加算平均して求め、頂点潜時と頂点振幅値を計測した。

### 【結果と考察】

**RT:** 被験者 6 名に短 RSI 条件で PES が認められた。しかしながら、長 RSI 条件では PES はみられなかった。短 RSI 条件では一致・不一致刺激ともに平均 14ms の PES がみられた。長 RSI 条件・不一致刺激では、 $Corr.-RT > BE3-RT > BE2-RT > BE1-RT > Err.-RT$  の順に短縮が認められた ( $p < .05$ )。  
**LRP:** PES は 短 RSI 条件のみに観察されたため、LRP は短 RSI 条件に限定して算出した。図 1 (左列) は短 RSI 条件・不一致刺激での正反応試行とエラー直後試行 (正反応) の S-locked LRP および R-locked LRP の総加算平均波形である。S-Locked LRP には形態的な差はなかったものの、R-Locked LRP には差がみられた。エラー直後試行では R-Locked LRP の立ち上がり時点で 14ms の早期化が生じた。したがって、この条件での PES は反応ストラテジに起因したものと考えられる。一方、短 RSI 条件・一致刺激では (図 1 右列)、正反応試行と比較してエラー直後試行で S-Locked LRP の立ち上がり波形に 14ms の差が生じた。したがって、この条件での PES は心理的不応に起因したことになる。  
**ERN:** ERN の頂点潜時には、刺激一致性および RSI の効果はなかったが、振幅は PES を示した被験者群 (PES 群) で一致刺激より不一致刺激の方が大きかった ( $F(1, 4) = 8.79, p < .05$ )。PES を示した被験者群 (PES 群) では、長 RSI 条件の ERN に増大傾向が示唆された。さらに、PES 群では、短 RSI 条件・不一致刺激で、ERN 振幅と PES 量との間に負の相関が認められた ( $r = -.62, p < .05$ )。

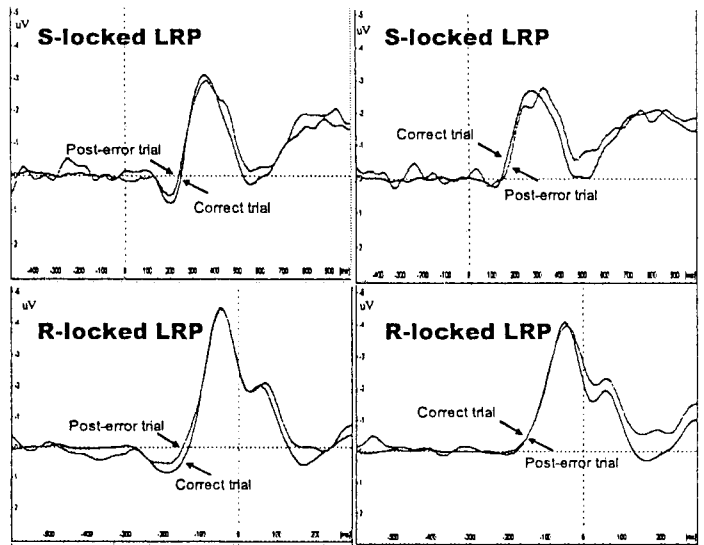


図 1 短 RSI 条件における LRP 総加算平均波形。左: 不一致刺激。右: 一致刺激条件。

TAKEUCHI Shigeki, MASAKI Hiroaki, MOCHIZUKI Yoshiko, TAKASAWA Noriyoshi, YAMAZAKI Katuo

## 時間情報処理と事象関連電位

○望月 芳子

竹内 成生

正木 宏明

高澤 則美

山崎 勝男

(早稲田大学人間科学研究科)

(早大人間科学研究科)

(早大スポーツ科学部)

(科学警察研究所)

(早大スポーツ科学部)

key words: 時間再生課題 CNV 陽性変動

### 【目的】

時間情報処理の機序は記憶が前提となっている。2~3秒の短い時間間隔にはワーキングメモリの関与が考えられる。近年、ワーキングメモリと前頭前野の関与は研究者の同意であり、そのため、時間情報処理の研究も、前頭部機能との関係で考えられてきた。

時間情報処理研究では、時間再生(再認)課題が用いられている。記録中と再生(再認)中の CNV を観察した研究は多く、パフォーマンスが良い条件で、再生中の CNV 減少が観察されている。保持中は、聴覚刺激を用いた課題では陽性変動を観察しているが、視覚刺激を用いた課題では極性が不明確である。

本研究では、視覚刺激を用い、記録中、保持中、再生中の電位変動を検討した。特に、保持中の極性に着目した。再生が相対的に容易で、誤差が小さい条件では、再生中に前頭部 CNV 振幅減少が予想された。

### 【方法】

**被験者:** 四肢が右利きの成人 10 名(男子 8 名, 女子 2 名)を被験者とした。被験者の年齢は  $24.7 \pm 2.8$  歳であった。

**刺激:** 全 4 条件に共通して、記録中、再生中で、縦 1 cm × 横 5 cm の長方形を、被験者の前方 1m にある CRT に呈示した。記録中は、黒色の長方形内で、緑色の横線が上から下に向かって移動した。再生中は、黒色の長方形を呈示した。

**条件:** 時間再生課題に遅延時間を設け、記録時間(3000ms/2700ms)と、保持時間(3000ms/9000ms)を操作した。条件 1(記録 3000ms/保持 3000ms)、条件 2(記録 3000ms/保持 9000ms)、条件 3(記録 2700ms/保持 3000ms)、条件 4(記録 2700ms/保持 9000ms)を設定した。また、再生終了 2500 ms 後にフィードバックを呈示した。

**手続き:** 被験者には、全条件で記録時間を記憶するよう教示した。再生中は、記録時間と同時間の経過時点で、キー押しをするよう教示した。被験者は前方に設置されたキーを右手中指でキー押しを行った。4 条件は被験者間でカウンターバランスをとった。

**記録および分析方法:** EEG は、Fpz, Fp1, Fp2, Fz, F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, FCz, Cz, C3, C4, CPz, CP5, CP6, Pz, P3, P4, P7, P8, Oz, O1, O2 から左耳垂を基準に時定数 10 s, 高域遮断周波数 100Hz で、EOG は時定数 10 s, 高域遮断周波数 100 Hz で導出した。EEG は、記録、保持、再生ともに、記録刺激呈示をトリガとして加算平均した。データ処理は再生時間が  $\pm 500$  ms にある試行を分析対象とした。事象関連電位は、Fpz, Fz, FCz, Cz, CPz, Pz, Oz を分析対象とした。7 部位で、記録、保持、再生中を 500 ms 毎に分け、各期間開始から 500 ms ~ 1000 ms 区間(以後、区間 1)、1000 ms ~ 1500 ms 区間(以後、区間 2)と、各期間終了から 1000 ms ~ 500 ms 前区間(以後、区間 3)、500 ms ~ 0 ms 前区間(以後、区間 4)の平均振幅値について、部位(7) × 記録(3000ms/2700ms) × 保持(3000ms/9000ms)の 3 要因分散分析を行った。再生時間は誤差時間を、保持(3000ms/9000ms) × 記録(3000ms/2700ms)の 2 要因分散分析を行った。

### 【結果および考察】

4 条件の再生誤差時間を分散分析した結果、記録 × 保持の交互作用が有意であった ( $F[1,9]=6.51, p<.05$ )。単純主効果を分析した結果、条件 3(記録 2700ms/保持 3000ms)より条件 1(記録 3000ms/保持 3000ms)、条件 4(記録 2700ms/保持 9000ms)より条件 2(記録 3000ms/保持 9000ms)の再生誤差が小さかった

( $F[1,9]=5.92, p<.05$ ) ( $F[1,9]=38.22, p<.01$ )。

記録中は、陰性変動が観察された。CNV を部位(7) × 記録(2) × 保持(2)で分散分析を行った結果、区間 1, 区間 2, 区間 3 に部位の主効果があり ( $F[6,54]=8.63, p<.01$ ) ( $F[6,54]=11.11, p<.01$ ) ( $F[6,54]=9.55, p<.01$ )、Fz, FCz, Cz で振幅が増大した ( $p<.05$ )。また、区間 2 で記録 2700ms 条件(条件 3, 条件 4)より記録 3000ms 条件(条件 1, 条件 2)が振幅減少した ( $F[1,9]=6.66, p<.05$ )。

図 1, 図 2 は、保持中の区間 3, 区間 4 と、再生中の区間 1, 区間 2 の CNV 波形である。

保持中は、陽性変動が観察された。3 要因分散分析の結果、区間 1, 区間 2 に部位の主効果があり ( $F[6,54]=5.38, p<.01$ ) ( $F[6,54]=7.04, p<.01$ )、FCz, Cz, CPz, Pz の振幅が増大した ( $p<.05$ )。区間 3, 区間 4 では、部位 × 記録 × 保持の交互作用があったため、各部位毎に記録(2) × 保持(2)の 2 要因分散分析を行った。その結果、区間 3 では FPz で、区間 4 では Fz で記録 × 保持の交互作用があった ( $F[1,9]=6.31, p<.05$ ) ( $F[1,9]=5.81, p<.05$ )。単純主効果を分析した結果、両区間とも、条件 2(記録 3000ms/保持 9000ms)よりも、条件 4(記録 2700ms/保持 9000ms)に振幅増大傾向がみられた。

再生中は、陰性変動が観察された。分散分析の結果、区間 1, 区間 2, 区間 3, 区間 4 で部位の主効果があり ( $F[1,9]=11.12, p<.01$ ) ( $F[1,9]=14.60, p<.01$ ) ( $F[1,9]=15.36, p<.01$ ) ( $F[1,9]=7.13, p<.01$ )、区間 1 は Fz, FCz, Cz, 区間 2 は Fz, FCz, Cz, CPz, 区間 3 は FCz, Cz, 区間 4 は Fz, FCz, Cz の振幅値が増大した ( $p<.05$ )。また、全区間で記録(2) × 保持(2)の交互作用があった ( $F[1,9]=4.54, p<.10$ ) ( $F[1,9]=11.86, p<.01$ ) ( $F[1,9]=6.64, p<.05$ ) ( $F[1,9]=15.22, p<.01$ )。単純主効果を分析した結果、全区間で条件 4(記録 2700ms/保持 9000ms)よりも条件 3(記録 2700ms/保持 3000ms)の振幅が振幅減少傾向であった。

本研究では、記録中、再生中に陰性変動、保持中に陽性変動が認められた。視覚刺激を用いて、陽性変動維持が認められた。

また、パフォーマンスは、記録 3000ms 条件(条件 1, 条件 2)の再生誤差が小さかったが、再生中に両条件の CNV 振幅減少は認められず、仮説を支持しなかった。再生中の CNV には、保持の長短(9000ms/3000ms)による CNV 振幅増減が観察され、記録 2700ms 条件(条件 3, 条件 4)では保持時間操作の効果が認められた。保持時間が長い条件では、再生開始直後から振幅が増大することが示唆された。保持中の振幅差は Cz では認められなかったため、再生中に観察される保持時間操作の効果は、保持終了時の条件 3 と条件 4 の振幅差から生じるベースライン効果ではないと考えられる。

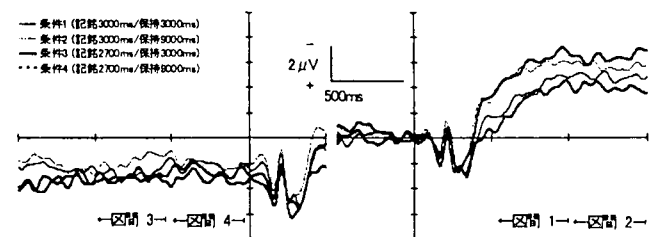


図1 Czの保持中電位変動

図2 Czの再生中電位変動

MOCHIZUKI Yoshiko, TAKEUCHI Shigeki, MASAKI Hiroaki, TAKASAWA Noriyoshi, YAMAZAKI Katuo

**-P-2-59-**

**A study of temporal processing by event-related potentials**

Yoshiko Mochizuki<sup>1</sup>, Shigeki Takeuchi<sup>1</sup>, Hiroaki Masaki<sup>1</sup>,  
Noriyoshi Takasawa<sup>2</sup>, Katuo Yamazaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Waseda University,  
Saitama, Japan

<sup>2</sup>Edogawa University,  
Chiba, Japan

**Purpose:** Event-related potentials were recorded during a time reproduction task to investigate temporal processing.

**Method:** 10 healthy subjects underwent a time reproduction task, which varied the encoding interval (3000ms/2700ms) and the retention interval (3000ms/9000ms).

**Results:** The reproduction error, encoding-3000ms/retention-3000ms condition was smaller than encoding-2700ms/retention-3000ms condition and encoding-3000ms/retention-9000ms condition was smaller than encoding-2700ms/retention-9000ms condition. The ERP activities in encoding, retention and reproduction phases were larger around the midline, compared to the other areas. The encoding and reproduction phases were shifted negatively while the retention phase was shifted positively. At the 500ms-1000ms period of the reproduction phase, the contingent negative variation (CNV) amplitude of retention-9000ms conditions were significantly larger than that of retention-3000ms conditions over Fpz, and tended to be larger over FCz, Cz, and CPz. Encoding-2700ms/retention-9000ms condition tended to produce a larger CNV than encoding-2700ms/retention-3000ms condition over midline areas in the 500ms-2700ms period.

**Conclusions:** The reproduction error of our study suggests that the encoding-2700ms conditions were relatively difficult to reproduce the interval. The CNV activity suggests the length of encoding and retention interval affects the CNV of the reproduction phase. At the beginning of the reproduction phase, compared to the retention-3000ms conditions, the retention-9000ms conditions produced relatively larger CNV which seemed to represent inefficient temporal processing as a result of losing time interval memory trace. The early CNV of the reproduction phase was thought to reflect a difference in the efficiency of temporal processing. The difference seemed to remain in the whole period when time interval reproduction was difficult.

**-P-2-64-**

**Stimulus preceding negativity represents negative anticipation  
induced by affective picture**

Shigeki Takeuchi<sup>1</sup>, Yoshiko Mochizuki<sup>1</sup>, Hiroaki Masak<sup>2</sup>,  
Noriyoshi Takasawa<sup>3</sup>, Katuo Yamazaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Waseda University, Graduate School, Japan

<sup>2</sup>Waseda University,  
Tokyo, Japan

<sup>3</sup>Edogawa University,  
Tokyo, Japan

**Purpose:** Recent researches have reported that the stimulus preceding negativity (SPN) reflects affective factors. However, the affective direction is not clear either positive or negative, otherwise both direction. In this research, we investigated the direction of the affective valence reflected in the SPN using the international affective picture system (IAPS).

**Method:** We tested eleven subjects in S1-S2 paradigm. The S1 cues were three types of gray-and-white striped squares, with either of two orientations and of overwriting two orientations. The S2 cues were three types of pictures contained each affective valence (positive, negative or neutral). Participants could anticipate the affective valence of S2 pictures by S1 cues.

**Results:** Our procedure differentiated these affective valences which were assessed by the questionnaires. The self assessment mannequin (SAM) data showed that negative pictures induced more unpleasantness than neutral pictures. The multiple mood scale (MMS) showed that subjects rated more negative for waiting negative pictures than for waiting neutral pictures. The SPN data were calculated mean amplitude during intervals of 200 ms before S2. The SPN significantly increased over frontocentral region preceding the negative pictures, but not in the case for the neutral pictures.

**Conclusions:** In the present study, we found maximum amplitude of the SPN in negative affect anticipation. Our findings suggest that the SPN might be a useful tool for assessment of the negative affect.



## MOTIVATIONAL INFLUENCES ON THE STIMULUS- PRECEDING NEGATIVITY AND THE LOSS-RELATED MEDIAL FRONTAL NEGATIVITY

Masaki, Hiroaki, Waseda University  
Takeuchi, Shigeki, Waseda University  
Gehring, William J., University of Michigan  
Takasawa, Noriyoshi, Edogawa University  
Yamazaki, Katuo, Waseda University

Descriptors: stimulus-preceding negativity, medial frontal negativity, motivational impact

We attempted to elucidate the effect of motivational impact on the stimulus-preceding negativity (SPN) and the medial frontal negativity (MFN) elicited by monetary losses using a gambling task. Participants were instructed to choose one of two squares, each of which contained the numeral 10 or 50. Each square turned red or green 2.5 s after the choice, informing participants of the outcome. Consistent with Gehring and Willoughby (2002), the MFN was sensitive to whether an outcome was a gain or a loss but not to whether the chosen outcome was better or worse than the other outcome. Choices made after greater losses were riskier, but were not associated with a larger MFN. On trials following a monetary gain, the MFN was larger on Choice 50 trials than on Choice 10 trials. On Choice 50 trials, the MFN was larger following a Gain 50 trial than following a Loss 50 trial. The SPN preceding the outcome was also larger following a Gain 50 trial than following other outcomes over right frontocentral scalp sites. The results confirmed that both the MFN and the SPN are affected by the motivational impact of the feedback. Although we observed a higher probability of risk-taking behavior after a greater monetary loss, the lack of such an effect on the MFN suggests that there could be a dissociation between risk-taking behavior and ERPs. Thus, there may be two systems: one causing responses to be riskier following a monetary loss, and a second affecting feedback processing.

### D-19 エラー反応後の反応時間遅延の原因解明 — 偏側性準備電位による検討—

正木 宏明<sup>1</sup>, 竹内 成生<sup>2</sup>, 望月 芳子<sup>2</sup>, 高澤 則美<sup>2</sup>, 山崎 勝男<sup>2</sup>

<sup>1</sup>早稲田大学スポーツ科学部, <sup>2</sup>早稲田大学大学院人間科学研究科, <sup>3</sup>江戸川大学社会学部

課題遂行中に誤反応してしまうと、エラーの連続を防ぐように脳内補償機構が働く。その結果、次試行では反応時間の遅延が観察される。この現象は、post-error slowing (PES)と呼ばれており、エラー反応抑制に関連した方略的調整の現れと解釈されてきた。しかしながら、同現象は心理的の不

応からも説明可能である。本研究では認知的葛藤課題を用いて、反応-刺激間隔(RSI)の短い条件と長 RSI 条件との比較を行い、PES の原因を偏側性準備電位(LRP)から調べた。PES が方略的調整によるものならば、長 RSI でも認められ、反応同期 LRP の持続時間延長が予測される。一方、PES が心理的不応に起因するものならば、刺激同期 LRP の潜時遅延が予測される。実験の結果、一致刺激には心理的不応の関与が、不一致刺激には方略的調整の関与が示唆された。原因を明確にするため、RSI を工夫した実験をさらに行っている。

## 時間間隔情報処理と事象関連電位

## -CNV と LRP による検討-

- 望月 芳子 (早稲田大学大学院人間科学研究科)  
 竹内 成生 (早稲田大学大学院人間科学研究科)  
 正木 宏明 (早稲田大学スポーツ科学学術院)  
 高澤 則美 (江戸川大学社会学部)  
 山崎 勝男 (早稲田大学スポーツ科学学術院)

## 【目 的】

Niemi & Näätänen (1981) は、単純反応課題を用いて、反応準備に及ぼす試行間間隔(inter-trial interval; ITI)の影響を調べた。彼らによれば反応準備は興奮と抑制のトレードオフで決定し、反応時間(reaction time; RT)が遅延する長 ITI 条件は、抑制が強調された状態だという。

本研究では、ITI の操作が刺激間間隔(inter-stimulus interval; ISI)の固定効果に与える影響を検討した。随伴性陰性変動(contingent negative variation; CNV)パラダイム(S1-S2+MR)を用い、RT, CNV, 偏側性準備電位(lateralized readiness potential: LRP)を指標とした。Niemi & Näätänen の仮説に即すると、運動実行前の段階で抑制効果が働き、foreperiod-LRP に影響が認められると予測された。

## 【方 法】

被験者：成人 9 名 (男子 6 名, 女子 3 名) を被験者とした。年齢は  $25.1 \pm 3.8$  歳であった。

条件、刺激、手続き：CNV パラダイムに基づく単純反応課題 2 条件 [条件 1 (ISI 3 s/ITI 3 s), 条件 2 (ISI 3 s/ITI 10 s)] を実施した。2 条件とも警告刺激+図形(S1; ピンク/ブルー: 3 s)の呈示後に、命令刺激として円図形(S2; ピンク/ブルー)を画面に呈示した。被験者は、円図形に対して速やかに、右手第 3 指あるいは左手第 3 指の伸展運動によるキー上げを行った。円図形(ピンク/ブルー)と反応指(右手第 3 指/左手第 3 指)との対応、2 条件呈示順序は被験者間でカウンタバランした。

記録および分析方法：EEG は Fpz, Fp1, Fp2, Fz, F3, F4, F7, F8, FCz, Cz, C3, C4, T7, T8, CPz, Pz, P3, P4, P7, P8, Oz, O1, O2 から左耳垂を基準に時定数 10 s, 高域遮断周波数 100 Hz で、EOG は時定数 10 s, 高域遮断周波数 100 Hz で導出した。反応指の EMG は時定数 0.03 s, 高域遮断周波数 1500 Hz で導出した。EEG は S1 呈示をトリガとして加算平均した。データ処理

は RT が 100-800 ms 内に収まる試行を分析対象とした。CNV は、Fpz, Fz, FCz, Cz, CPz, Pz, Oz を分析対象とした。LRP [左手反応時の差分電位(C4-C3)の加算平均波形+右手反応時の差分電位(C3-C4)の加算平均波形] / 2] は、C3, C4 を分析対象とした。

CNV は、7 部位で S1-S2 間を 500 ms 毎に分け、6 区間の平均振幅値について、部位 [Fpz/Fz/FCz/Cz/CPz/Pz/Oz] × 条件 [条件 1 (ISI 3 s/ITI 3 s) / 条件 2 (ISI 3 s/ITI 4 s)] の 2 要因分散分析を行った。LRP は、区間 1-区間 6 の平均振幅値について、両側 t 検定を行った。RT は両側 t 検定を行った。

## 【結果および考察】

2 条件の RT を調べた結果、条件 1 (237.29 ms) より条件 2 (262.64 ms) の方が有意に遅延した ( $t(8) = 3.95$ ,  $p < .01$ )。

CNV を部位 (7) × 条件 (3) で 2 要因分散分析を行った結果、区間 2, 区間 6 に部位 × 条件の交互作用があった ( $F[6, 48] = 2.58$ ,  $p < .05$ ) ( $F[6, 48] = 2.76$ ,  $p < .05$ )。多重比較した結果、区間 2 は条件 2 において  $Fpz < Fz$ ,  $FCz, Cz$ ;  $Oz < FCz$  ( $ps < .05$ ) となり、区間 6 は条件 1 において  $Fpz < Fz, FCz, Cz$ ;  $Fz < Cz$ ;  $Oz < FCz$ , 条件 2 において  $Oz < FCz, Cz, CPz, Pz$  であった ( $ps < .05$ )。また、 $FCz$  ( $p < .10$ ),  $Cz$  ( $p < .05$ ),  $CPz$  ( $p < .10$ ),  $Pz$  ( $p < .10$ ),  $Oz$  ( $p < .05$ ) においては条件 1 > 条件 2 であった。

図 1 は、S1-S2 間の LRP 波形である。区間 1-区間 6 の平均振幅値を調べた結果、区間 4, 区間 6 で条件 1 > 条件 2 の傾向が認められた ( $t(8) = 2.06$ ,  $p < .10$ ) ( $t(8) = 2.26$ ,  $p < .10$ )。

本研究では、長 ITI 条件よりも短 ITI 条件で RT が早期化した。foreperiod-LRP の振舞いから、長 ITI 条件よりも短 ITI 条件で反応準備の早期化が示唆される。Niemi & Näätänen に即して考察すると、長 ITI 条件での反応準備は抑制されていたものと考えられる。

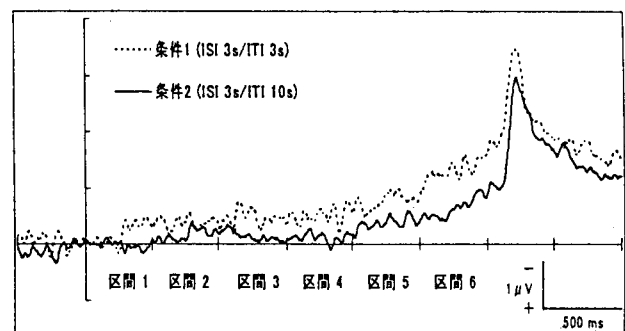


図 1 LRP 波形

## 日中の短時間仮眠がエラー反応の 脳内モニタリングに与える影響

○浅岡 章一 (早稲田大学大学院人間科学研究科)

正木 宏明 (早稲田大学スポーツ科学学術院)

福田 一彦 (福島大学理工学群共生システム理工学類)

山崎 勝男 (早稲田大学スポーツ科学学術院)

事故防止という観点から考えると、エラーの低減とともに「自分がエラーをした事にすぐに気づくかどうか(エラー反応のモニタリング)」も重要な問題である。覚醒時間の延長(徹夜)によって引き起こされた眠気の増加に伴って、エラー反応の脳内モニタリングを反映する ERN(エラー関連陰性電位)振幅は減少するという報告がなされており(Scheffers *et al.*, 1999), 眠気はエラー反応の脳内モニタリングにも影響を与えていると考えられる。これまでに、日中の短時間仮眠は午後の眠気やエラーの低減に有効であることが明らかになっている(e.g., Hayashi *et al.*, 1999)。しかし、仮眠が日中のエラー反応の脳内モニタリングにどのような影響を与えるかについてはまだ検討されていない。そこで、本研究では日中の短時間仮眠がエラー反応のモニタリングに与える影響を検討した。

### 方法

睡眠習慣に問題が無く、仮眠の習慣が無い 8 名の成人を対象とした。本研究では 14:00~14:30 にシールドルーム内で最長 20 分の仮眠をとる条件と、仮眠の代わりに休憩を取る条件を設定した。参加者は各条件に 1 日ずつ参加し、いずれの条件においても仮眠あるいは休憩の前に 1 session、後に 3 session の認知葛藤課題を行った。これは注視点(300ms 提示)の上下いずれかの位置に上向きか下向きの白色矢印(200ms)を提示するものであった。被験者には刺激提示位置を無視し、矢印の方向に対してキー上げ反応するよう指示した。試行数は 1 session につき、800 trials (100 trials × 8 blocks) とした。

本研究ではエラー回数と正反応時の反応時間を行動指標とした。生理指標として、脳波(EEG)、眼電図(EOG)、頤筋の筋電図(EMG)を取得した。EEG は、Fz, Cz, C3, C4, Pz, O1, O2, および FCz より、A1 を基準電極として、TC: 10s, High cut: 100Hz で導出した。仮眠中の EEG から睡眠段階判定を行った。ERN は不一致刺激に対する誤反応を対象にキー上げ反応をトリガとして session ごとに加算平均した。振幅は FCz 波形について直前の陽性ピークか

ら ERN の陰性ピークまでを計測した。さらに visual analog scale (VAS)を用いて課題の前後における主観的な眠気を測定し、その得点を session ごとに平均して主観的な眠気の指標とした。検定には対応のある t 検定を用い、session ごとに条件間で変数を比較した。

### 結果

前日の就床、起床時刻に条件間で有意差はなかった。また、実験中の仮眠時間の多くは、睡眠段階 1 と 2 で占められていた。主観的な眠気に関しては session 3 における仮眠条件での眠気が有意に弱く ( $t(7) = 3.23, P < .05$ ), session 4 においては仮眠条件での眠気が弱い傾向が認められた ( $t(7) = 1.91, P < .10$ )。反応時間では、session 4 において一致刺激に対する反応が仮眠条件で早くなる傾向が認められたが ( $t(7) = 2.20, P < .10$ )、エラー数と ERN 振幅は(図 1)、いずれの session でも条件間に有意差はなかった。

### 考察

主観的な眠気と反応時間は、先行研究の結果をほぼ支持した。ERN 振幅に条件間の差が認められなかった結果は、仮眠によってエラーの脳内モニタリングは改善されないことを示唆する。しかしながら、エラー数に条件間で差なかったことと、主観的な眠気や反応時間で認められた差はわずかであったことを考えると、先行研究と比較して、本研究では、日中のパフォーマンスに与える仮眠の効果そのものが弱かった可能性がある。睡眠段階判定から仮眠中に睡眠段階 3 に到達した被験者が数名いたことが示唆され、仮眠の効果を弱めたことが考えられた。

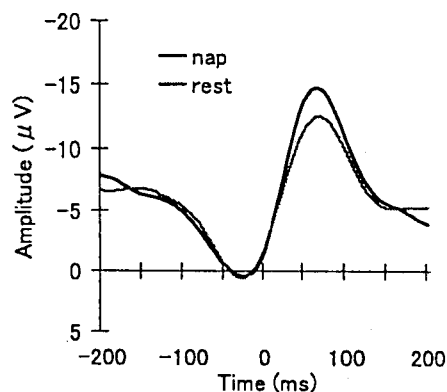


図 1 session 2 における ERN

※本研究は 2004 年度早稲田大学特定課題研究助成費による補助を受けた。

ギャンブル課題遂行中の事象関連電位

- 竹内成生 (早稲田大学大学院人間科学研究科)
- 望月芳子 (早稲田大学大学院人間科学研究科)
- 正木宏明 (早稲田大学スポーツ科学学術院)
- 高澤則美 (江戸川大学社会学部)
- 山崎勝男 (早稲田大学スポーツ科学学術院)

【目的】

ギャンブル課題で勝率を操作することで変化した動機づけが SPN に及ぼす勝率の効果を検討した。

【方法】

**被験者:** 右手を常用手とする成人18名 (23.8±3.4歳)。  
**課題:** 被験者は2000円の所持金を元にカードゲーム型ギャンブル課題を遂行した。先行呈示される相手カードと手持ちカードを比較して勝敗を決定する課題であった。注視点呈示後(300ms)に、被験者は左右いずれかのボタン押しによって賭け金額を決定した(右手示指→10円, 右手中指→50円)。ボタン押しに伴って賭け金額が表示され、その2500ms後に相手カードが表示された。被験者自身のカードは、相手カード表示の3000ms後に表示された(700ms)。手持ちカードが相手カードを上回った場合を勝ちとし、相手カードを下回った場合を負けとした。カードは5種類であり、強さの順は、Jack < Queen < King < Ace < Joker であった。ただし、Jokerは対戦相手のみが所有したが、相手カードに対する被験者の勝率は以下の通りであった: Jack→100%, Queen→75%, King→50%, Ace→25%, Joker→0%。実験は、32試行×20ブロック、計640試行から成った。SPN評価用の統制条件として、金銭報酬を付与しない条件を64試行×2ブロック遂行した。  
**記録方法:** 脳波は、国際10%法に準拠した28部位 (FP1, Fpz, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F4, F8, FC5, FCz, FC6, T7, C3, Cz, C4, T8, CP5, CPz, CP6, P7, P3, Pz, P4, P8, O1, Oz, O2) から左耳垂を基準に時定数(TC)10s, 高域遮断周波数(HC)100 Hzで導出した。垂直および水平眼球運動をTC: 10s, HC: 100Hzで導出した。測定事象はサンプリング周波数250Hzで保存し、オフライン処理に供した。

**分析方法:** 心理指標として、相手カードと賭け金に関する主観的期待評価得点を測定した。SPN は、ボタン押し反応をトリガとして、直前試行の結果、当該試行での選択金額、相手カードの種類別に加算処理した。加算波形は、10Hz のローパスフィルタに供し、統制条件の波形を減算

した。F3, Fz, F4, T7, C3, C4, T8, P3, P4, O1, O2 を対象にボタン押し直前200 ms間の平均電位をベースラインとして、相手カード呈示直前200 msの区間平均電位と手持ちカード呈示直前200 msの区間平均電位を計測した。また、相手カードの呈示によって惹起されるP300についても潜伏時250 ms-350 ms区間の頂点振幅値を計測した。

【結果】

**心理指標:** 金額(10, 50)×カード(5: 0%, 25%, 50%, 75%, 100%)の2要因分散分析の結果、交互作用が有意であった (F(4,68)=6.0, p<.001)。これは、50円選択時では、Joker < Ace < King < Queen < Jack (ps <.05)の順に期待が増加し、Jack, Queen では10円選択時よりも期待は高く、Joker では低かったことを示している(ps <.05)。

**P300:** 50円選択時の方が10円選択時よりも大きく (F(1,17)=15.71, p<.001), King, Ace < Joker, Jack; Queen < Joker (ps <.05)の順であった(F(4,68)=7.36, p<.001)。

**SPN:** 50円と10円選択時の各々で、カード(Jack, Joker) × 半球(左, 右) × 電極部位 (F, T, C, P, O) の3要因分散分析を実施した結果、50円選択時には右半球で高振幅傾向にあった(F(1,17)=3.74, p<.07)。またカード×部位の交互作用が有意傾向であり(F(4,68)=2.25, p<.07)、中心部ではJack > Jokerの関係が示唆された。さらに、Queen, King, Ace間で同様の分散分析を実施したところ、50円選択時にカード×電極部位の交互作用が認められ(F(8,136)=2.41, p<.05)、Queen, Ace呈示時にのみO, Pで振幅は減少した (ps <.05)。一方、10円選択時には、部位の主効果が有意であり(F(4,68)=4.00, p<.10), C, P > O, Tであった (ps <.05)。

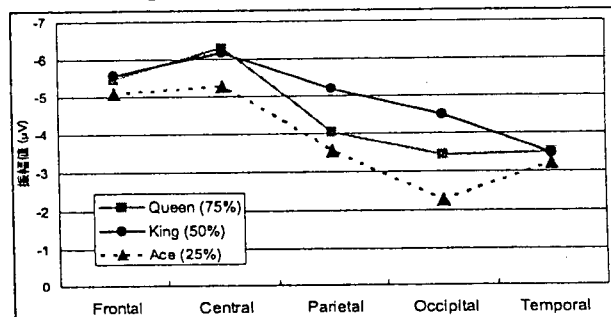


図1 50円選択時のSPN振幅値

【考察】

SPNは必勝事態下で、右中心部の振幅が増大する。ギャンブル性の高い事態下では、情動-動機づけ処理の高まりを反映して、SPNは全体的に増大する。とくに、勝率50%のもっとも不確定要素の高い条件では、frontocentral以外の部位も活性化した。



# ギャンブル課題遂行時の SPN とパーソナリティ

○竹内成生<sup>1</sup>, 望月芳子<sup>1</sup>, 正木宏明<sup>2</sup>, 高澤則美<sup>3</sup>, 山崎勝男<sup>2</sup>  
 ( <sup>1</sup> 早稲田大学人間科学研究科, <sup>2</sup> 早稲田大学スポーツ科学学術院, <sup>3</sup> 江戸川大学社会学部 )

key words: SPN, ギャンブル, パーソナリティ

### 【目的】

刺激前陰性電位 (SPN) は, 結果の知識に対する予期や期待, 情動-動機づけとの関連から行動に結びつく重要なプロセスを反映するERPと考えられている。しかし, 情動-動機づけ要因はパーソナリティの影響を強く受ける。本研究では, 相手カードの種類によって勝率 (100%, 75%, 50%, 25%, 0%) が変化する対戦型ギャンブル課題遂行中のERPとパーソナリティとの関係性を検討した。

### 【方法】

**被験者:** 右手を常用手とする成人18名 (23.8±3.4歳) とした。  
**課題:** 被験者には500円の時給とともに, 2000円の所持金を与え, ギャンブル課題を課した。被験者の80cm前方に設置されたディスプレイ上中央に, カードを模した白枠内に注視点を300 ms呈示した。枠内の注視点が消失した後, 被験者は右手示指と中指を用いて選択反応をした (示指: 10円賭け, 中指: 50円賭け)。反応後, ボタン押しに対応した数値が白枠内に2500 ms表示された。相手カードがアルファベットで枠内に3000 ms表示された後, 勝敗を決定する自身のカードが枠内に700 ms表示された。勝敗は, 相手のカード以上を勝ちとし, 相手カードを下回った場合を負けとした。使用したカードの種類と強さは, Jack < Queen < King < Ace < Joker であり, 対戦相手のみがJokerを所有することとした。相手カードと自身のカードの組み合わせはカウンターバランスをとった。したがって, 相手カードの呈示時点で当該試行の勝率が, Jack (100%), Queen (75%), King (50%), Ace (25%), Joker (0%) に決定された。総試行回数は32試行 × 20ブロックの計640回とした。ITIは平均1000 ms (±200 ms) とした。ボタン押しによる運動関連電位を評価するために統制条件として, 相手, 自身のカードが常に引き分けとなり, 金銭報酬が与えられない試行を64試行 × 2ブロック行った。

**記録方法:** 脳波 (EEG) は, 国際10%法に準拠した28部位 (FP1, Fp2, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F4, F8, FC5, FCz, FC6, T7, C3, Cz, C4, T8, CP5, CPz, CP6, P7, P3, Pz, P4, P8, O1, Oz, O2) から左耳垂 (A1) を基準に, 時定数10 s, 高域遮断周波数100 Hzで導出した。垂直および水平眼球運動を時定数10 s, 高域遮断周波数100 Hzで導出した。測定事象はサンプリング周波数250 Hzで保存し, オフライン処理に供した。

**分析方法:** 行動指標は, リスク選択率および, 50円選択時と10円選択時の反応時間差とした。リスク選択率は, 全体のリスク選択率, 直前試行の結果による4分類 (Gain50, Gain10, Loss10, Loss50), および直前試行での相手カードによる5分類 (Jack, Queen, King, Ace, Joker) について, 当該試行で50円選択した確率を算出した。反応時間差についてもリスク選択率と同様に分類した。パーソナリティに関する尺度には, Sensation-seeking-scale (SSS) ならびにNEO-FFIを用いた。SPNは, ボタン押し反応をトリガとして, 直前試行の結果と当該試行での選択と相手カードから, 条件ごとに加算処理した。加算波形は, 10 Hzのlow-passフィルタに供し, 統制条件を減じた。F3, Fz, F4, FC5, FCz, FC6, T7, C3, Cz, C4, T8, P3, Pz, P4, O1, Oz, O2について, ボタン押しの-200 msから 0 msをベースラインとし, 相手カード, 勝敗を決定する自身のカード呈示直前200 msの平均電位を算出した。これら平均電位について, 条件ごとに10円選択から50円選択の変化量を求めた。

### 【結果と考察】

**行動とパーソナリティ:** 50円選択時と10円選択時の反応時間差とパーソナリティとの相関関係を検討した。勝率50%のKingが先行指標で呈示された場合, 当該試行でのカード選択時間の遅延と外向性に相関関係が認められた ( $r = -.48, p < .05$ )。外向性の高い被験者ほど相手がKingを呈示した次試行で, 50円選択時の反応時間が早期化した。リスク選択率では, 先行試行で50円を損失した場合, 当該試行での50円選択率と調和性との間に相関が認められた ( $r = -.52, p < .05$ )。調和性の低い被験者ほど50円損失後に, 50円を選択することが示された。

**行動とERP:** 10円選択時と比較して, 50円選択時に反応の早期化が起こる被験者ほど, 前頭-中心部で, 相手カード呈示直前, 勝敗決定直前時のSPNが低下する相関関係が認められた ( $r = -.65 - -.50, ps < .05$ )。

リスク選択率の高い被験者ほど, 10円選択に比べ50円選択時に対戦相手がJokerを呈示した場合, 勝敗決定直前時のSPNがFCzにおいて低下した ( $r = .49, p < .05$ )。

**パーソナリティとERP:** 神経症傾向が高い被験者ほど10円選択時と比較して, 50円選択時に頭頂-後頭で相手カード呈示直前のSPNが低下する相関関係が示された ( $r = .46 - .58, ps < .05$ )。また, SSS得点が高い被験者ほど, 頭皮上全体的にかけて相手カード呈示直前のSPNが低下した ( $r = .49 - .61, ps < .05$ )。

10円選択時に比較して, 50円選択時での勝敗決定直前のSPNとパーソナリティとの関係では, FCzとSSSに相関関係が認められ ( $r = .50, p < .05$ )。SSSの高い被験者ほど50円選択時にSPNは低下した。カード別に検討したところ, 相手がJokerを呈示した場合, 外向性の高い被験者ほどFCz, C3, P3, P4, O1, Oz, O2でSPNが低下する関係を示した ( $r = .48 - .62, p < .05$ )。また, 同様にSSS得点の高い被験者ほどFCz, C3でSPNが低下した (FCz:  $r = .47, C3: r = .52, ps < .05$ )。

本研究では, 行動, ERP, 心理尺度間の関係性についてリスク選択の側面から検討した。その結果, パーソナリティ, 行動, ERP相互に相関関係が認められ, 外向性の高低により行動, SPNが変化することが示された。

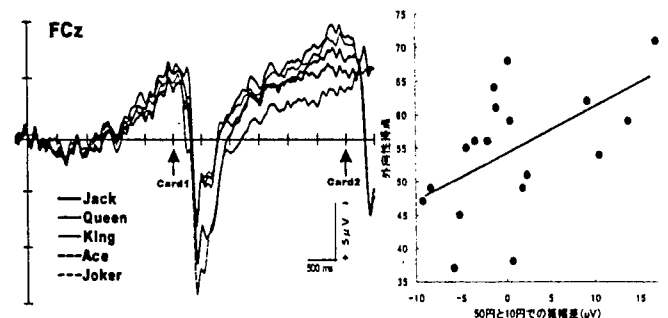


図1. FCzにおける50円選択時の振幅推移(左), 外向性得点と50円と10円での電位差(右)。

TAKEUCHI Shigeki, MOCHIZUKI Yoshiko, MASAKI Hiroaki, TAKASAWA Noriyoshi, YAMAZAKI Katuo

## 時間間隔情報処理と事象関連電位

○望月 芳子                      竹内 成生                      正木 宏明                      高澤 則美                      山崎 勝男  
 (早稲田大学人間科学研究科) (早大人間科学研究科) (早大スポーツ科学学術院) (江戸川大学) (早大スポーツ科学学術院)  
 key words: CNV    LRP    ITI

### 【目 的】

随伴性陰性変動(CNV)パラダイム(S1-S2-MR)を用いて、試行間間隔(inter trial interval:ITI)の変動が、反応時間(reaction time:RT), CNV, 偏側性準備電位(literalized readiness potential: LRP) に与える影響を調べた。

望月・田中・高澤・山崎(2003)は、CNV パラダイムを用いて、ITI を操作し(3 s/10 s), ISI 固定効果との関係を調べた。その結果、ITI の長さの関数として RT と CNV が変動した。

本研究では、ITI を操作し(3 s / 4 s / 6 s), RT, CNV, LRP に及ぼす影響を調べた。長い ITI 条件では、RT が遅延し、CNV 前期成分の増大が予想された。しかしながら、条件 3(ITI 6 s)は ITI が 3 s の倍数のため、もし、3 s の間隔を利用して反応を遂行するならば、条件 3 は条件 2 よりも反応のタイミングが容易となり、RT は条件 1<条件 3<条件 2, CNV 前期成分の振幅は条件 1>条件 3>条件 2 となることが予想された。

### 【方 法】

**被験者:**四肢が右利きの成人 10 名(男子 5 名, 女子 5 名)を被験者とした。被験者の年齢は 27±6.13 歳であった。

**刺激:**3 条件共通して、S1 に+(縦横 5 cm, 持続時間 3 s); S2 に円図形(直径 5 cm)を CRT (被験者の前方 1m) に呈示した。

**条件:**CNV パラダイムを基本とし、単純反応課題 3 条件[条件 1 (ISI 3 s/ITI 3 s), 条件 2 (ISI 3 s/ITI 4 s), 条件 3 (ISI 3 s/ITI 6 s)]を実施した。

**手続き:**すべての条件で、ピンクまたはブルーの+を 3 s 呈示後に、ピンクまたはブルーの円図形を画面に呈示した。ピンクの+の後にはピンクの円図形、ブルーの+の後にはブルーの円図形を呈示した。被験者は、円図形に対して速やかに、前方に設置されたキーを、右手第 3 指あるいは左手第 3 指の伸展運動によるキー上げを行った。円図形(ピンク/ブルー)と、反応指(右手第 3 指/左手第 3 指)との対応は被験者間でカウンターバランスをとった。3 条件呈示順序は被験者間でカウンターバランスをとった。

**記録および分析方法:**EEG は、Fpz, Fp1, Fp2, Fz, F3, F4, F7, F8, FCz, Cz, C3, C4, T7, T8, CPz, Pz, P3, P4, P7, P8, Oz, O1, O2 から左耳垂を基準に時定数 10 s, 高域遮断周波数 100Hz で、EOG は時定数 10 s, 高域遮断周波数 100Hz で導出した。EEG は、S1 呈示をトリガとして加算平均した。データ処理は RT が 100-800 ms にある試行を分析対象とした。CNV は、Fpz, Fz, FCz, Cz, CPz, Pz, Oz を分析対象とした。LRP[左手反応時の差分電位(C4-C3)の加算平均波形+右手反応時の差分電位(C3-C4)の加算平均波形]/2]は、C3, C4 を分析対象とした。

CNV は、7 部位で S1-S2 間を 500 ms 毎に分け、0-500 ms 区間(以後、区間 1), 500-1000 ms 区間(以後、区間 2), 1000-1500 ms 区間(以後、区間 3), 1500-2000 ms 区間(以後、区間 4), 2000-2500 ms 区間(以後、区間 5), 2500-3000 ms(以後、区間 6)区間の平均振幅値について、部位 [Fpz/Fz/FCz/Cz/CPz/Pz/Oz] × 条件 [条件 1 (ISI 3 s/ITI 3 s) / 条件 2 (ISI 3 s/ITI 4 s) / 条件 3 (ISI 3 s/ITI 6 s)] の 2 要因分散分析を行った。LRP は、区間 1-区間 6 までの平均振幅値について、1 要因分散分析を行った。RT は 1 要因分散分析を行った。

### 【結果および考察】

3 条件の RT を 1 要因分散分析した結果、有意な差が認められた (F[2,18]= 4.72, p<.05)。多重比較した結果、条件 1(269.8 ms)と

条件 2(270.4 ms)より条件 3(278.4 ms)が有意に遅延した(p<.05)。

図 1 は、S1-S2 間の FCz における CNV 波形である。CNV を部位(7) × 条件(3)で 2 要因分散分析を行った結果、区間 2, 区間 5, 区間 6 に部位の主効果があった (F[6,54]=3.75, p<.01) (F[6,54]=3.31, p<.01) (F[6,54]=4.22, p<.01)。多重比較した結果、区間 2 は FCz>Oz, 区間 5 は CPz>Fz, CPz>Oz, 区間 6 は Cz>Fz, Cz>Oz, CPz>Fz, CPz>Oz であった(p<.05)。

また、区間 2, 区間 3, 区間 4, 区間 5, 区間 6 に条件の主効果が認められた (F[2,18]=9.28, p<.01) (F[2,18]=6.92, p<.01) (F[2,18]=4.68, p<.05) (F[2,18]=4.10, p<.05) (F[2,18]=3.73, p<.05)。区間 2 と区間 3 では条件 1 より条件 2, 条件 3 の CNV 振幅が増大した。区間 4 では条件 1 より条件 2 の振幅が増大した。区間 5 と区間 6 では条件 3 より条件 2 の振幅が増大した。

図 2 は、S1-S2 間の LRP 波形である。区間 1-区間 6 の平均振幅値で 1 要因分散分析を行った結果、全ての区間で有意差はなかった。

CNV に及ぼす ITI の効果は、CNV 前期成分(区間 2, 区間 3) と後期成分(区間 5, 区間 6)で異なる様相が観察された。CNV 後期成分は、RT 遅延を示した長 ITI 条件(条件 3)で減少したため、運動準備を反映したものと考えられる。しかしながら、CNV 前期成分(区間 2, 区間 3)は、長 ITI 条件(条件 2, 条件 3)で増大したことから、条件 2, 条件 3 では前頭部の活動性が高かったことが示唆された。S1-S2 間の LRP に条件差が認められなかったことから、CNV の振幅は運動準備ではなく、認知的情報処理の差を反映したものと考えられる。

RT:条件 1,条件 2<条件 3, CNV 前期成分:条件 1<条件 2<条件 3, CNV 後期成分:条件 2>条件 1>条件 3 という結果は、条件 3 (ISI 3 s/ITI 6 s)では 3 s を利用した反応方略は使われず、ITI の長さが影響を及ぼしたことを示唆している。

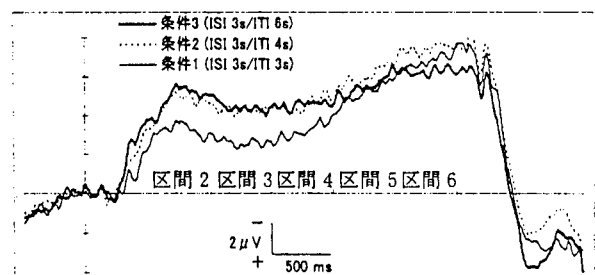


図 1 FCz における CNV 波形

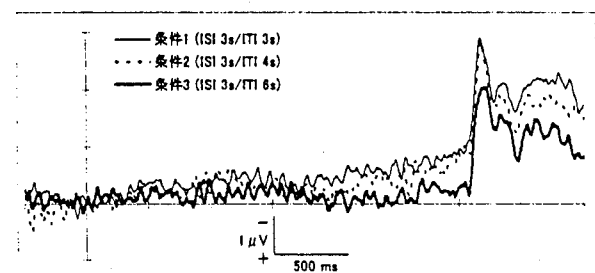


図 2 LRP 波形

MOCHIZUKI Yoshiko, TAKEUCHI Shigeki, MASAKI Hiroaki, TAKASAWA Noriyoshi, YAMAZAKI Katuo