

# 結果事象を評価する脳内システム

——社会的研究からの展望——

石井 主税・片山 順一

## 1. はじめに

ある環境下で適応的に生存するために、生体は行動あるいは行動に付随する結果事象 (outcome) を適切にモニターする必要がある。生体が自身の行動の誤りを検出・修正しなければ、その不適応な行動は継続され、生体に生存上の不利益をもたらす。機械のボタンを押し間違えた時、言い誤りをした時、ヒトの脳はそのエラー——要求された適切な行動と実際の行動のミスマッチ (e.g., Rabbitt, 1966) ——を即座に検出する (Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann, & Blanke, 1990)。

我々ヒトは誤った行為 (例えば、ボタンの押し間違い) の実行を視覚情報や体性感覚情報などから検出することも可能だが、早期にエラーを検出する機構は生体内部の情報を利用していると考えられる (Gehring et al., 1993; Holroyd & Coles, 2002)。具体的には、この内的情報とは効果器に送られる運動指令のコピー、すなわち遠心性コピー (efference copy) のことを指している。反応生起後に利用可能となる感覚情報によるエラー検出と比較して、課題要求と遠心性コピーの比較はより素早いエラー検出を可能とする。しかしながら、行動時点では望ましい反応がわからないこともある。この場合には内的情報による行為の評価は不可能となり、外的環境の変化、すなわち結果事象が評価される (Miltner, Braun, & Coles, 1997)。ある自動車をはじめて運転する際、アクセルの踏み込みによって予測した以上の速度が出れば、それは行動を

修正すべき外的情報として評価される。あるいは、何気なく言葉を発した後、他者の表情が曇るという外的環境の変化からその発言の不適切さに気付くこともあるだろう。これらの事象が適切にモニタリングされないとすれば長い人生の中で被る不利益が潜在的に大きなものになることは想像に難くない。したがって、ある環境の中で適切な目標を設定し、その目標から逸脱した行為をエラーとして検出すること、あるいは行為に付随する結果事象を評価することで対応する感情を喚起し行動修正を図るプロセスはヒトの生存に極めて重要である。このパフォーマンスモニタリングのプロセスは素早いエラー検出と行為に随伴する結果事象の評価によって成り立つ。

本稿では、はじめにヒトのパフォーマンスモニタリングと対応する行動及び電気生理学的反応を概観する。次に、電気生理学的反応を指標として、パフォーマンスモニタリングを担う脳内システムが外的環境の変化、すなわち結果事象をどのように評価しているのかレビューする。続いて、結果事象の評価の社会的側面に焦点を当てた研究をレビューする。これには結果事象を評価する際の社会的文脈 (social context) を操作した研究、自己ではなく他者の行為に付随する結果事象をどのように評価するのかという行為主体性 (agency) に焦点を当てた研究が含まれる。また、社会的な事象そのものがパフォーマンスモニタリングシステムによって評価されていることを示唆する研究をレビューする。結果事象の評価の社会的側面を扱った研究からの知見は、モニタリングシステムが我々の複雑な社会生活にどのように貢献するか教えてくれる一方で、システム自体の特徴や性質についてどのような示唆を与えてくれるだろうか。本稿では、モニタリングシステムが社会的状況においてどのように働いているかを概観し、またそれを通して、非社会的文脈で行われた研究からは見えてこなかったシステムの特徴を議論する。それらの議論から、パフォーマンスモニタリング研究において社会的研究を行う意義や必要性を強調する。

## 2. パフォーマンスモニタリングの行動及び電気生理学的指標

エラー検出や結果事象の評価に関する知見は行動指標からだけでなく、事象関連脳電位 (event-related brain potential; ERP) のような脳活動を反映する指標を用いた研究からも積み上げられてきている。ここでは各モニタリングプロセスに対応する行動上の現象及び ERP を紹介する。

生体内部の情報に基づくエラー検出に関する研究は選択反応課題 (Falkenstein et al., 1990; Rabbitt, 1966), Go/Nogo 課題 (Falkenstein, Hoormann, & Hohnsbein, 1999; Menon, Adleman, White, Glover, & Reiss, 2001), ストループ課題 (Dreisbach & Fischer, 2012; Hajcak, McDonald, & Simons, 2003), フランカー課題 (Debener, Ullsperger, Siegel, Fiehler, von Cramon, & Engel, 2005; van Veen & Carter, 2002) などを用いて行われてきた。これらの課題に共通するのは被験者自身がエラーを行った時即座にそれを検出できるという点である。エラーに関連した行動面の現象として、エラー後の反応遅延 (post-error slowing: PES, e.g., Rabbitt, 1969) とエラー後の正答率 (post-error accuracy: PEA) の向上がある (Danielmeier, Eichele, Forstmann, Tittgemeyer, & Ullsperger, 2011; Marco-Pallarés, Camara, Münte, & Rodríguez-Fornells, 2008)。PES はエラーが生じた後の試行における反応時間が正答試行後におけるそれと比較して遅延するという現象で、エラーに対して生じた定位反応によって次の試行のパフォーマンスが低下すること (orienting account; Notebaert, Houtman, van Opstal, Gevers, Fias, & Verguts, 2009; Wessel, 2018) 及び／あるいは意図的／方略的な制御が行われることで生じると考えられている (Wessel, 2018)。PEA の向上は反応速度と精度のトレードオフで捉えられる。実際、PEA の向上時には PES も同時に観察されている (Danielmeier et al., 2011; Marco-Pallarés et al., 2008)。また、エラーはフランカー課題やストループ課題における不一致試行のような反応競合を引き起こす状況で増加する (Carter, Braver, Barch, Bot-

vinick, Noll, & Cohen, 1998; Kopp, Rist, & Mattler, 1996)。反応競合とは異なる反応表象間の相互干渉のことである。PES のような行動上の特徴に加えて、エラー時には頭皮上で観察される ERP にも変化が現れる。ERP とは刺激や反応といった何らかの特定事象を時間的基点として数十から数百試行のデータに加算平均処理を施すことで観察できるようになる内的あるいは外的な特定の事象に関連した脳電位である (Luck, 2012)。エラーが行われた時、その反応あるいは筋電図 (Electromyogram; EMG) の活動にタイムロックして算出した ERP 上で約 50-100 ms に前頭-中心部優位の陰性電位が観察される (Boksem, Ruys, & Aarts, 2011; Dikman & Allen, 2000; Falkenstein et al., 1990; Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann, & Blanke, 1991; Gehring et al., 1993; Hajcak & Foti, 2008; van Meel & van Heijningen, 2010; Wiswede, Münte, Krämer, & Rüsseler, 2009)。この ERP はエラー関連陰性電位 (error-related negativity: ERN, Gehring et al., 1993) と呼ばれ、その電源は前部帯状皮質 (anterior cingulate cortex, ACC) に同定されている (Holroyd, Dien, & Coles, 1998)。ERN は比較的大きな ERP であり、少ない加算回数でも観察できる (Boudewyn, Luck, Farrens, & Kappenman, 2017)。しかしその電位としての明瞭さに反して ERN が何を反映するかという問題に答えを出すのは難しい。正答試行に比べてエラー試行で反応競合のレベルが高いことが想定でき (Carter et al., 1998; Kopp et al., 1998)、実際 ERN はエラー検出というよりむしろ競合を反映する可能性も示唆されている (Carter et al., 1998)。ERN より時間的に遅れてエラー陽性電位 (error positivity: Pe) が観察される (Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann, & Blanke, 1991)。Pe は ERN とは異なり中心-頭頂部優位に観察される。Pe はエラーの意識的気づきや主観的評価を反映すると考えられている (Endrass, Reuter, & Kathmann, 2007; Nieuwenhuis, Ridderinkhof, Blom, Band, & Kok, 2001)。アンチサッカード課題において被験者は画面上に呈示される標的刺激と反対方向に目を向けるよう求められる。被験者は時折誤って標的刺激の呈示された方向に視線を向けてしまうが、これは必ずしも意識的に

検出されない。このような場合にも ERN は意識的気づきのあるエラー試行と同程度に生じるが、Pe 振幅は減衰する (Nieuwenhuis et al., 2001)。少なくとも、ERN と Pe はエラーに対する異なる処理プロセスを反映すると考えてよいだろう。

ヒトは生体内部の情報だけに頼ってパフォーマンスモニタリングを行っているわけではない。何らかの行為後、外的環境の変化を通して行為の善し悪しを知ることもある。ERN の発見から数年後、Miltner et al. (1997) によって反応エラーが生じたことを示すフィードバック刺激に対して生じる ERP が報告された。彼らの実験において、被験者らは指定された刺激から 1 秒経過した時点でボタンを押すことを求められた。反応から 600 ms 後、反応のタイミングが定められた範囲に収まっていたかどうか示すフィードバック刺激が呈示された。重要な点は、フィードバック刺激が呈示されるまで被験者は自己の反応タイミングが正しいどうかわからなかったことである。反応タイミングが誤っていたことを示すフィードバック刺激呈示後に前頭-中心部優位の陰性電位が観察された。彼らによってフィードバックエラー関連陰性電位 (feedback ERN) と呼ばれたこの ERP は、フィードバック刺激が視覚、聴覚及び体性感覚のいずれであっても同様に観察され、包括的なエラー検出メカニズム (generic error-detection mechanism) の活動を反映するものと考察された。今日フィードバック関連陰性電位 (feedback-related negativity: FRN) もしくは内側前頭陰性電位 (medial frontal negativity: MFN) と呼ばれるこの ERP はパフォーマンスの失敗 (Donkers, Nieuwenhuis, & Boxtel, 2005; Holroyd, Hajcak, & Larsen, 2006; Holroyd & Krigolson, 2007; Miltner et al., 1997; Pfabigan, Zeiler, Lamm, & Sailer, 2014; Schulreich, Pfabigan, Derntl, & Sailer, 2013) や金銭損失といったネガティブな結果の呈示から約 200-300 ms 後に生じる電位として定義される (Chen, Zhong, Zhang, Li, Zhang, Tan, & Li, 2012; Hajcak, Holroyd, Moser, & Simons, 2005; Hajcak, Moser, Holroyd, & Simons, 2006; Li, Han, Lei, Holroyd, & Li, 2011)。FRN は ERN と同様に前頭中心部優位の頭皮上分布を示し、その電

源は ACC の特に背側部だと考えられている (Gehring & Willoughby, 2002 ; Koban, Pourtois, Bediou, & Vuilleumier, 2012 ; Miltner et al., 1997 ; Yu & Zhou, 2009)。FRN は時間評価課題 (e.g., Miltner et al., 1997) やギャンブル課題 (e.g., Gehring & Willoughby, 2002), あるいは何らかの学習性のある課題を用いて検討される (Bellebaum & Baum, 2008 ; van der Helden, Boskem, & Blom, 2010)。ERN を検討するための課題とは対照的に, FRN を検討するための課題では反応時点ではなく結果事象の呈示時点でその善し悪しが判明しなければならない。実際, ある反応が誤りであることが明らかな場合には ERN が明瞭に出現する代わりに FRN は大きく減衰するか消失する (Eppinger, Kray, Mock, & Mecklinger, 2008 ; Holroyd & Coles, 2002 ; Nieuwenhuis et al., 2002 ; Koban et al., 2012)。Figure 1 に典型的な FRN 波形を示した。

FRN に続いて, フィードバック刺激呈示後 300-500 ms に頭頂部優位の陽性電位 P 300 が出現する。FRN は基本的に刺激の良い-悪いという次元に感度を持つが, P 300 は悪い結果事象に対して増大することを示す研究 (Jia, Li, Luo, Chen, Wang, & Zhou, 2007 ; Koban et al., 2012 ; van Meel & van Heijningen, 2010) も良い結果事象に対して増大することを示す研究もあり (Hajcak et al., 2005 ; Leng & Zhou, 2010 ; Li, Jia, Feng, Liu, Suo, & Li, 2010 ; Ma, Shen, Xu, Li, Shu, & Wever, 2011 ; Yeung, Holroyd, & Cohen, 2005 ; Yu, Luo, Ye, & Zhou, 2007 ; Zhang, Li, Qian, & Zhou, 2012), 一貫

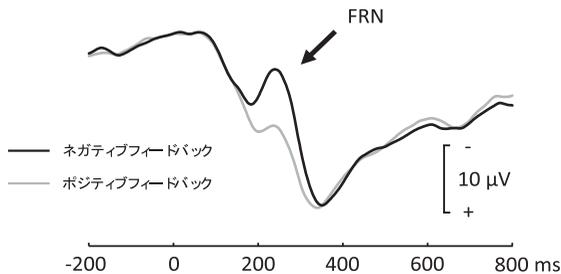


Figure 1 時間評価課題における FRN.

した知見は得られておらず、結果事象の動機づけの重要性や注意配分を反映することが示唆されている (Nieuwenhuis, Aston-Jones, & Cohen, 2005; Sato, Yasuda, Ohira, Miyawaki, Nishikawa, Kumano, & Kuboki, 2005; Yeung & Sanfey, 2004)。

ここまで内的及び外的な情報に基づくパフォーマンスモニタリングの行動及び電気生理学的な対応物を概観した。モニタリングプロセスの異なる段階の処理を反映する ERP は、それぞれの段階の処理がどのような特徴や性質を持ち、またどのような要因によって影響を受けるか明らかにするために有用な指標になる。以降ではモニタリングシステムが外的フィードバックをどのように処理しているのか、主に ERP の知見に基づきレビューする。

### 3. 結果事象の評価

ここでは外的環境の変化に基づく結果事象の評価について、ERP 研究を中心にレビューする。まず FRN 研究の知見からモニタリングシステムの基本的特徴を述べ、その後 FRN の振る舞いを説明する理論を紹介する。Miltner et al. (1997) による報告に続いて、Gehring & Willoughby (2002) はギャンプリング課題時における FRN の出現を報告した。彼らの実験では、被験者には2つの選択肢 (画面の左右に呈示された四角形) が呈示され、その後選択した選択肢と選択しなかった選択肢両方の金銭結果が選択肢の内部に表示された。金銭結果として +25¢, +5¢, -25¢, -5¢ の4つの可能性があり、金銭の獲得/損失は選択肢の内部が緑/赤になることで強調された。彼らの手続きにおいて重要な点は、試行のタイプの中に金銭は獲得したがより望ましい選択肢が存在した試行 (gain & error, +5¢ を選んだ時の +25¢) と金銭は損失したがより望ましくない選択肢が存在した試行 (loss & correct, -5¢ を選んだ時の -25¢) が含まれていた点である。もし FRN がエラー検出メカニズムの活動を反映するのであれば金銭の獲得/損失にかかわらず選択の正否によってその出現が規定されるはずであるが、実験結果は FRN がエラーではなく金銭の損失

に対して出現するというものであった。この実験結果は一見すると、金銭の獲得／損失とパフォーマンスの正誤が良い－悪いという次元で矛盾する時、FRN に反映されるシステムが金銭結果に基づいて結果事象を評価することを示唆するように捉えられるかもしれない。しかし、Nieuwenhuis, Yeung, Holroyd, Schurger & Cohen (2004) はパフォーマンスと金銭結果のどちらかを色で強調する操作を行った実験から、2つの側面が矛盾する際にはモニタリングシステムが物理的に強調された側面に基づき良い－悪いという次元で結果事象を評価していることを明らかにした。

直感的に考えると、金銭を損失しはしたが相対的に良い選択肢を選んだという結果事象は、金銭を損失した上に相対的にも悪い選択肢を選んだという結果事象ほど悪くないように思える。もし FRN が結果事象の持つ価値を連続量としてコードしているのであれば、後者のような場合により大きな振幅が観察されるはずである。Nieuwenhuis et al. (2004) を含むいくつかの研究は FRN が結果事象を良い－悪いという次元で二值的にコードしている可能性を示唆している (Hajcak et al., 2006; Holroyd et al., 2006; Yeung & Sanfey, 2004)。Hajcak et al. (2006) や Yeung & Sanfey (2004) はギャンプリング課題を用い、大小の金銭結果 (e.g., 5¢ と 25¢) に対する FRN 振幅の間に差が見られなかったことを報告している。これらの知見は、モニタリングシステムが結果事象を良い－悪いという次元で二值的に評価していることを示している。

モニタリングシステムは、必ずしも自己の行為に随伴する結果事象のみを評価しているわけではなく、行為に随伴しない結果事象も評価している。Yeung et al. (2005) の研究における無反応条件では、被験者が反応することなくギャンプリング課題における選択肢が決定され、その金銭結果が呈示された。結果事象は自己の行為に随伴していなかったにもかかわらず、損失を表す結果事象に対して FRN は生じた。これは FRN を生じさせるシステムが行為に随伴する結果事象の評価だけでなく、外的環境における刺激間の随伴性を学習することにも関与していることを示唆している。

モニタリングシステムは事象の善し悪しをどのように決定しているのだろうか？もし出現する可能性のある結果事象の中に良い結果事象（例えば、金銭獲得）が存在しない場合、このシステムはどのような評価を下すことになるのだろうか。Holroyd, Larsen, & Cohen (2004) は、獲得条件と損失条件を設定することでこの問題を明らかにした。可能性のある結果事象は獲得条件では  $0c$ （損得なし）、 $+2.5c$ （小獲得）、 $+5c$ （大獲得）で、損失条件では  $0c$ （損得なし）、 $-2.5c$ （小損失）、 $-5c$ （大損失）であった。いずれの条件にも金銭の増減がない結果事象が存在するが、その意味は大きく異なり、獲得条件では最も望ましくない結果事象である一方、損失条件では最も望ましい結果事象となる。獲得条件におけるこの結果事象に対しては悪い結果事象に対して典型的に生じる FRN が観察されたが、損失条件では FRN とみられる陰性変動は出現しなかった。これらの実験結果は、モニタリングシステムが絶対的な評価として結果事象が良いか悪いか評価しているわけではなく、可能性のある結果事象の中でその結果事象が相対的に良いか悪いか評価していることを示唆する。ここまで FRN に反映されるモニタリングシステムの基本的な特徴をレビューしてきた。モニタリングシステムは反応と結果事象のマッピングが不明瞭な場合には結果事象を利用してエラーを検出するが、必ずしも行為の誤りのみを検出するわけではない。また、評価される結果事象は顕在的な行為に随伴するものだけに限らない。そして、ある事象の善し悪しは文脈内で相対的に決定される。

FRN の振る舞いに関しては複数の理論や説明が提案されている。ここでは代表的な 2 つの理論及び説明を概観する。Holroyd & Coles (2002) は ERN と FRN が同一のプロセスを反映すると考えており、これらの活動を強化学習理論（reinforcement learning theory）の枠組みで解釈した。この理論では、事象の成否を予測する脳構造として大脳基底核が位置づけられる。結果が予測より良かった時には中脳ドーパミン系において一過性の活動増加が生じ、予測より悪かった時には一過性の活動減少が生じる。これらの正および負の予測誤差信号（予測した報酬と実際に得られた報酬の差）はドーパミン神経系を介し

て ACC およびその他の様々な脳領域に伝達される。ACC を除く諸領域は、最適な反応方略を確立するためにそれらの信号を用い、ACC はそれらの領域のいずれかを採用するフィルタとして機能することが提案されている。予測誤差信号はモニタリングシステムそのものにもフィードバックされ、以降の予測に活かされる。この理論によると、予測より悪かった事象によって生じる中脳ドーパミン系における一過性の活動減少が ACC の脱抑制をもたらし FRN が生じる。また、予測より良かった事象は対照的なメカニズムで ERP 上における陽性変動を生じさせる (RewP: Reward positivity, Holroyd, Krigolson, & Lee, 2011; Holroyd, Pakzad-Vaezi, Krigolson, 2008)。要約すると、RewP/FRN は ACC への正/負の強化学習信号の伝達を反映する。

FRN に関するもう 1 つの説明は、結果事象の動機づけ的/情動的重要性に焦点を当てたものである (Gehring & Willoughby, 2002)。FRN が結果事象の良い-悪いという側面にのみ感度を持つことを示唆する研究もいくつか存在するが (Hajcak et al., 2006; Holroyd et al., 2006; Yeung & Sanfey, 2004)、結果事象の動機づけ的/情動的重要性が FRN 振幅に影響することは、課題への関与 (Li et al., 2011; Yeung et al., 2005; Yu, Luo et al., 2007)、行為主体性 (Bellebaum, Kobza, Thiele, & Daum, 2010; Itagaki & Katayama, 2008; Leng & Zhou, 2010; Ma et al., 2011; Marco-Pallarés., Krämer, Strehl, Schröder, & Münte, 2010; Yu & Zhou, 2006)、社会的文脈 (Kimura & Katayama, 2013, 2016; Koban et al., 2012; Li et al., 2010; Tian, Feng, Gu, Broster, Feng, Wang, Guan, Luo, 2015; van Meel & van Heijningen, 2010)、個人差 (Motomura, Takeshita, Egashira, Nishimura, Kim, & Watanuki, 2015; Pfabigan, Alexopoulos, Bauer, Lamm, & Sailer, 2011; Takács, Kóbor, Janacsek, Honbolygó, Csépe, & Németh, 2015) を扱った多数の研究から支持される。例えば、Yeung et al. (2005) は自身で選択あるいは反応しなかった時に呈示された結果事象について、金銭獲得と比較して損失に対する陰性変動を見出したが、損失に対する ERP から獲得に関連した ERP を引き算した差分 FRN (dFRN: difference

FRN) は自らオプションを選択した時と比較して小さなものであった。自身の手で選択したオプションに対する結果事象は動機づけ的により重要であり、そのような要因が FRN 振幅に影響することを示す直接的な証拠であると解釈された。結果事象の動機づけ的／情動的重要性が FRN に影響するという事実は、この ERP の電源と考えられている背側前部帯状皮質 (dACC: dorsal ACC) が様々な課題におけるネガティブ事象によって賦活するという知見と一致する。dACC はエラーやネガティブフィードバックだけでなく (Nieuwenhuis, Heslenfeld, von Geusau, Mars, Holroyd, & Yeung, 2005; Nieuwenhuis, Schweizer, Mars, Botvinick, Hajcak, 2007), 社会的排斥 (Eisenberger, Lieberman, & Williams, 2003; Kross, Berman, Mischel, Smith, & Wager, 2011; Kross, Egner, Ochsner, Hirsch, & Downey, 2007), 嫉妬 (Takahashi, Kato, Matsuura, Mobbs, Suhara, & Okubo, 2009), 悲嘆 (O'Connor, Wellisch, Stanton, Eisenberger, Irwin, & Lieberman, 2008) に関連しても賦活する。さらに、痛みに関する研究領域では、dACC は自身の身体的な痛みだけでなく他者の痛みを観察した時にも賦活することが確認されている (Rainville, Duncan, Price, Carrier, & Bushnell, 1997; Singer, Seymour, O'Doherty, Kaube, Dolan, & Frith, 2004)。これらの知見から、dACC は事象の情動的な評価に関わっており (Etkin, Egner, & Kalisch, 2011), FRN が結果事象の情動的评价を反映するという解釈と一致する (van Meel & van Heijningen, 2010)。

#### 4. 結果事象の評価と社会的効果

ここまで結果事象を評価するモニタリングシステムの特徴をレビューしてきた。近年、このモニタリングシステムによる評価的処理への社会的文脈や行為主体性の影響が多数報告されている。それらの研究はヒトの行為が複雑な社会的文脈の中でいかに調整されるか、またヒトが他者の行為とそれに随伴する結果事象からいかに学習を行っているかについて示唆を与えてくれる。他方、評

価的処理への社会的効果からモニタリングシステムの特徴に関する示唆を得ることもできる。

様々な社会的文脈がモニタリングシステムによる結果事象の評価的処理を変容する。例えば、他者との競争は結果事象の動機づけの／情動的重要性を高める (van Meel & van Heijningen, 2010)。また、仮に明示的に競争が要求されていなかったとしても、ネガティブフィードバックに対する FRN は他者も同じく失敗した時と比較して他者が成功した時により大きくなる (Boksem, Kostermans, & Cremer, 2011; ただし Qiu et al., 2010; Wu, Zhang, Eliason, & Zhou, 2012 も参照されたい)。これらの実験結果は、社会的比較のプロセスが結果事象の評価に影響していることを示唆する (Festinger, 1954)。他方、他者と協力することもまた結果事象の評価的処理を変容する。dFRN 振幅は 1 人の時と比較して 3 人で一緒にギャンブリング課題を行った時に減衰した (Li et al., 2010)。また、3 人の多数決によって選択肢を決定するギャンブリング課題において、dFRN 振幅は自身が多数派に属した時と比較して全会一致によって選択肢が決定された時に減衰した (Kimura & Katayama, 2013)。これらの実験結果は、社会心理学において主に研究されてきた責任の分散 (Darley & Latané, 1968; Mynatt & Sherman, 1975) によって解釈されており、背景には主観的な課題の制御可能性が存在するかもしれない (Holroyd, Krigolson, Baker, Lee, & Gibson, 2009; Li et al., 2011, Yeung et al., 2005)。

ヒトは自己の行為及びそれに随伴する結果事象だけでなく他者のそれらを観察することを通して学習する。モニタリングシステムが自己の行為やそれに関連した結果事象と同様に他者のそれらを処理しているのであれば、行為主体が誰であるかにかかわらず類似の ERP パターンが観察されるはずである。他者の行為及びそれに随伴する事象を観察することはある種の社会的文脈と捉えることもできるが、ここでは競争や協力などといった文脈とは異なるものとして行為主体性を扱う。自己ではなく、他者のエラーを観察した時には観察者において ERN (oERN; observer ERN) が観察される (Miltner, Brauer,

Hecht, Trippe, & Coles, 2004; van Schie, Mars, Coles, & Bekkering, 2004)。また、他者の行為に随伴するネガティブフィードバックに対しても観察者において FRN (oFRN; observer FRN) が観察されたことから、自己と他者の行為結果を評価することに同様のメカニズムが関与している可能性が示された (Yu & Zhou, 2006)。先行研究の手続きには他者の行為結果が観察者の金銭的な損得に何らかの影響を及ぼすもの (Fukushima & Hiraki, 2006; Itagaki & Katayama, 2008) と何の影響も及ぼさないものがあるが (Fukushima & Hiraki, 2009; Leng & Zhou, 2010; Ma et al., 2011; Yu & Zhou, 2006)、結果事象が観察者の損得に影響を及ぼさない場合に生じる oFRN の生起は共感的なプロセスに駆動されるとの主張がある (Marco-Pallarés et al., 2010)。oFRN 振幅は観察する他者との関係性 (Leng & Zhou, 2014) や主観的な類似性 (Kang, Hirsh, & Chasteen, 2010)、また観察する他者の好ましさ (Wang, Qu, Luo, Qu, & Li, 2014) や観察者の情動的共感 (Fukushima & Hiraki, 2009; ただし Rak, Bellebaum, & Thoma, 2013 も参照されたい) によって変化することから、自己の行為結果に対して生じる FRN 同様に結果事象の動機づける／情動的重要性を反映すると考えられる。自己の行為に随伴しない自己関連の結果事象に加えて (Yeung et al., 2005)、FRN に反映されるモニタリングシステムは自己の行為に随伴しないだけでなく自己に直接的に関連しない結果事象に対しても評価的処理を実行している。

社会的な事象に対して FRN の出現を確認した研究は、モニタリングシステムの評価する事象が既に行われた行為の正誤を示すものや金銭的な損得を示すものに限られないことを示唆している。社会的な事象には、他者への提案の拒否 (Hewig, Trippe, Hecht, Coles, Holroyd, & Miltner, 2008)、社会的排斥 (Sun & Yu, 2014)、不公平 (e.g., Boksem & Cremer, 2010) 及び他者との意見の不一致 (e.g., Chen, Wu, Tong, Guan, & Zhou, 2012) が含まれる。Hewig et al. (2008) は他者に行ったアドバイスが受け入れられなかった際に FRN 様の陰性電位が生じたことを報告している。重要な点は、彼らの実験手

続きにおいてアドバイスが拒否されたことが必ずしも金銭的に悪い結果に繋がるわけではなかったことである。同様の知見は Sun & Yu (2014) においても報告されており、金銭的な損失は被らないとしても社会的に受け入れられないことがモニタリングシステムにおいてネガティブに評価される事象であることを示唆している。

ヒトが不公平を嫌悪することは経済ゲームを用いた研究から明らかにされてきており、ヒトは自己の利益を捨てても不公平な人物には儲けさせない傾向を持っている (Sanfey, Rilling, Aronson, Nystrom, & Cohen, 2003)。経済ゲームの1つである最後通牒ゲームを行う被験者の脳波を記録すると、公平な提案と比較して不公平な提案に対して大きな FRN 様の陰性変動が見られる (Boksem & Cremer, 2010; Mussel, Hewig, Allen, Coles, & Miltner, 2014; Riepl, Mussel, Osinsky, & Hewig, 2016)。さらに、金銭結果の不公平だけでなく、手続き上の不公平があった場合にも FRN は増大した (Long, Sun, Jia, Li & Chen, 2018)。これらの知見は、モニタリングシステムが他者の獲得する金額を参照点とすることで、自己に提案された金額の評価を変容していることを示唆する。

FRN に反映されるモニタリングシステムによって評価的処理を受けていることが示唆されているもう1つの社会的現象は他者との意見の不一致である。Chen et al. (2012) は脳波を測定しながら同調実験を行った。彼らの実験において、被験者は呈示された2本の線分のどちらが基準となる線分と同じ長さか判断した。被験者の線分判断の後、同じく実験に参加していた4人の他者の判断が示され、被験者には再度判断の機会が与えられた。他者の判断が明らかになった時点の ERP を算出してみると、4人の他者全員が自己と同じ線分を選択した場合と比較して4人もしくは2人が自己と異なる判断を行った場合に FRN 様の陰性電位は増大した。また、興味深いことに2度目の機会でも判断を変更した(つまり、同調が生じた)試行の FRN は変更しなかった試行と比較して大きかった。他者との意見の不一致に対して FRN 様の ERP が生じることはその後複数の実験で再現されている (Kimura & Katayama,

2013; Kimura, Murayama, Miura, & Katayama, 2013; Shestakova, Riesenkamp, Tugin, Ossadtchi, Krutitskava, & Klucharev, 2013)。これらの研究から得られる示唆は、ヒトのパフォーマンスモニタリングを担うシステムが自己と他者との関係性を重要な情報として処理しているということである。

## 5. まとめと今後の展望

本稿ではパフォーマンスモニタリング、特に外的情報に基づく結果事象の評価について ERP 研究を中心に概観した。その後、社会的文脈が結果事象の評価に及ぼす影響及び行為主体が自己でない状況での結果事象の評価的処理について論じた。また、いくつかの社会的事象がモニタリングシステムによって評価されている可能性を論じた。

内的情報に基づき行為のモニタリングが行えない場合、パフォーマンスモニタリングは外的情報に基づいて行われることになる。この結果事象の評価的処理に対応する ERP として FRN と P 300 が発見されており、これらを指標としてその処理の特徴や性質が明らかにされてきた。本稿では特に FRN に関する知見からレビューした。

FRN はパフォーマンスの失敗 (Miltner et al., 1997) や金銭の損失 (Gehring & Willoughby, 2002) を示す結果事象に対して生じる ERP である。FRN は行為に随伴しない結果事象に対しても生じ (Yeung et al., 2005)、事象の善し悪しは可能性のある結果の中で相対的に良いか悪いかで判断される (Holroyd et al., 2004)。FRN の振る舞いに関しては、予測誤差信号 (Holroyd & Coles, 2002) や結果事象の動機づけ的／情動的重要性からの説明がなされている (Gehring & Willoughby, 2002)。

パフォーマンスモニタリング研究の中で社会的な効果を扱った研究は、1つの側面としてそのシステムが実社会の複雑な対人相互作用においてどのように機能するのか、ひいてはヒトが社会的な文脈で適応している方法について示唆を与えてくれる。もう1つの側面として、社会的な効果はモニタリングシス

テムの基礎的な特徴や性質に関する示唆を提供する。FRN 振幅は先行する結果事象の文脈 (Gehring & Willoughby, 2002) や呈示確率 (Holroyd et al., 2003) にとどまらず様々な社会的文脈によって変化する (レビューとして Koban & Pourtois, 2014 を参照されたい)。また、自己の行為に付随する結果事象によってだけでなく、他者の行為に付随し自己の金銭的な損益に関わりがない結果事象に対しても FRN は生じる (e.g., Yu & Zhou, 2006)。そしてその ERP の振幅は観察する人物とされる人物の関係性によって変化する (Kang et al., 2010)。これらの知見は、単にある社会的状況で結果事象がどのように評価されるかということを超えて、モニタリングシステムによる結果事象の評価が極めて柔軟なものであることを示唆する。また、他者からの排斥 (Sun & Yu, 2014) や意見の不一致 (Chen et al., 2012)、あるいは不公平な提案 (Boksem et al., 2010) に対しても FRN 様の ERP が観察されることは、モニタリングシステムによる評価的処理が広範な社会的事象にまで及ぶことを示唆する。

本稿では FRN に関して社会的な効果を示した研究を取り上げ、ヒトのモニタリングシステムが極めて柔軟に広範な事象を評価している可能性を論じた。レビューしてきたように、社会的文脈や行為主体性、社会的事象を扱う研究はモニタリングシステムによって行われる評価的処理の柔軟さやその処理が適用される範囲について明らかにする上で有用な視点を提供することを強調したい。自己に関連した結果事象を評価する際に他者のそれを参照点として処理することや、最終的な課題の正否はさておき他者との意見の一致性を評価することは非社会的研究からは見えてこないモニタリングシステムの興味深い一面であろう。今後の研究において、個々の社会的状況でのモニタリングシステムの働きに加えて、社会的な効果を扱う研究からこのシステムの一般的な特徴や性質の解明に資する知見のさらなる蓄積が期待される。

#### 引用文献

Bellebaum, C., & Daum, I. (2008). Learning-related changes in reward expect-

- tancy are reflected in the feedback-related negativity. *European Journal of Neuroscience*, *27* (7), 1823-1835.
- Bellebaum, C., Kobza, S., Thiele, S., & Daum, I. (2010). It was not MY fault : event-related brain potentials in active and observational learning from feedback. *Cerebral Cortex*, *20* (12), 2874-2883.
- Boksem, M. A., & De Cremer, D. (2010). Fairness concerns predict medial frontal negativity amplitude in ultimatum bargaining. *Social neuroscience*, *5* (1), 118-128.
- Boksem, M. A., Kostermans, E., & De Cremer, D. (2011). Failing where others have succeeded : medial frontal negativity tracks failure in a social context. *Psychophysiology*, *48* (7), 973-979.
- Boksem, M. A., Ruys, K. I., & Aarts, H. (2011). Facing disapproval : Performance monitoring in a social context. *Social Neuroscience*, *6* (4), 360-368.
- Boudewyn, M. A., Luck, S. J., Farrens, J. L., & Kappenman, E. S. (2018). How many trials does it take to get a significant ERP effect? It depends. *Psychophysiology*, *55* (6), e13049.
- 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* (5364), 747-749.
- Chen, J., Wu, Y., Tong, G., Guan, X., & Zhou, X. (2012). ERP correlates of social conformity in a line judgment task. *BMC neuroscience*, *13* (1), 43.
- Chen, J., Zhong, J., Zhang, Y., Li, P., Zhang, A., Tan, Q., & Li, H. (2012). Electrophysiological correlates of processing facial attractiveness and its influence on cooperative behavior. *Neuroscience letters*, *517* (2), 65-70.
- Danielmeier, C., Eichele, T., Forstmann, B. U., Tittgemeyer, M., & Ullsperger, M. (2011). Posterior medial frontal cortex activity predicts post-error adaptations in task-related visual and motor areas. *Journal of Neuroscience*, *31* (5), 1780-1789.
- Darley, J. M., & Latané, B. (1968). Bystander intervention in emergencies : diffusion of responsibility. *Journal of personality and social psychology*, *8* (4), 377-383.
- Debener, S., Ullsperger, M., Siegel, M., Fiehler, K., Von Cramon, D. Y., & Engel, A. K. (2005). Trial-by-trial coupling of concurrent electroencephalogram and functional magnetic resonance imaging identifies the dynamics of performance monitoring. *Journal of Neuroscience*, *25* (50), 11730-11737.
- Dikman, Z. V., & Allen, J. J. (2000). Error monitoring during reward and avoid-

- ance learning in high-and low-socialized individuals. *Psychophysiology*, 37 (1), 43-54.
- Donkers, F. C., Nieuwenhuis, S., & Van Boxtel, G. J. (2005). Mediofrontal negativities in the absence of responding. *Cognitive brain research*, 25 (3), 777-787.
- Dreisbach, G., & Fischer, R. (2012). Conflicts as aversive signals. *Brain and cognition*, 78 (2), 94-98.
- Eisenberger, N. I., Lieberman, M. D., & Williams, K. D. (2003). Does rejection hurt? An fMRI study of social exclusion. *Science*, 302 (5643), 290-292.
- Endrass, T., Reuter, B., & Kathmann, N. (2007). ERP correlates of conscious error recognition : aware and unaware errors in an antisaccade task. *European Journal of Neuroscience*, 26 (6), 1714-1720.
- Eppinger, B., Kray, J., Mock, B., & Mecklinger, A. (2008). Better or worse than expected? Aging, learning, and the ERN. *Neuropsychologia*, 46 (2), 521-539.
- Etkin, A., Egner, T., & Kalisch, R. (2011). Emotional processing in anterior cingulate and medial prefrontal cortex. *Trends in cognitive sciences*, 15 (2), 85-93.
- 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 Brunia, C. J. M., Gaillard, A. W. K., & Kok, A. (Eds.), *Psychological brain research*, Tilburg : Tilburg University Press, pp.192-195.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, L. (1991). Effects of crossmodal divided attention on late ERP components. II. Error processing in choice reaction tasks. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 78 (6), 447-455.
- Falkenstein, M., Hoormann, J., & Hohnsbein, J. (1999). ERP components in Go/Nogo tasks and their relation to inhibition. *Acta Psychologica*, 101 (2-3), 267-291.
- Festinger, L. (1954). A theory of social comparison processes. *Human relations*, 7 (2), 117-140.
- Fukushima, H., & Hiraki, K. (2006). Perceiving an opponent's loss : gender-related differences in the medial-frontal negativity. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 1 (2), 149-157.
- Fukushima, H., & Hiraki, K. (2009). Whose loss is it? Human electrophysiological correlates of non-self reward processing. *Social neuroscience*, 4 (3), 261-275.

- Gehring, W. J., Goss, B., Coles, M. G., Meyer, D. E., & Donchin, E. (1993). A neural system for error detection and compensation. *Psychological science*, 4 (6), 385-390.
- Gehring, W. J., & Willoughby, A. R. (2002). The medial frontal cortex and the rapid processing of monetary gains and losses. *Science*, 295 (5563), 2279-2282.
- Hajcak, G., & Foti, D. (2008). Errors are aversive defensive motivation and the error-related negativity. *Psychological science*, 19 (2), 103-108.
- Hajcak, G., McDonald, N., & Simons, R. F. (2003). Anxiety and error-related brain activity. *Biological psychology*, 64 (1), 77-90.
- Hajcak, G., Moser, J. S., Holroyd, C. B., & Simons, R. F. (2006). The feedback-related negativity reflects the binary evaluation of good versus bad outcomes. *Biological psychology*, 71 (2), 148-154.
- Hajcak, G., Moser, J. S., Yeung, N., & Simons, R. F. (2005). On the ERN and the significance of errors. *Psychophysiology*, 42 (2), 151-160.
- Hewig, J., Trippe, R. H., Hecht, H., Coles, M. G., Holroyd, C. B., & Miltner, W. H. (2008). An electrophysiological analysis of coaching in Blackjack. *Cortex*, 44 (9), 1197-1205.
- 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 (4), 679-709.
- Holroyd, C. B., Dien, J., & Coles, M. G. (1998). Error-related scalp potentials elicited by hand and foot movements: evidence for an output-independent error-processing system in humans. *Neuroscience letters*, 242 (2), 65-68.
- Holroyd, C. B., Hajcak, G., & Larsen, J. T. (2006). The good, the bad and the neutral: electrophysiological responses to feedback stimuli. *Brain research*, 1105 (1), 93-101.
- Holroyd, C. B., & Krigolson, O. E. (2007). Reward prediction error signals associated with a modified time estimation task. *Psychophysiology*, 44 (6), 913-917.
- Holroyd, C. B., Krigolson, O. E., Baker, R., Lee, S., & Gibson, J. (2009). When is an error not a prediction error? An electrophysiological investigation. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 9 (1), 59-70.
- Holroyd, C. B., Krigolson, O. E., & Lee, S. (2011). Reward positivity elicited by predictive cues. *Neuroreport*, 22 (5), 249-252.
- Holroyd, C. B., Larsen, J. T., & Cohen, J. D. (2004). Context dependence of the event-related brain potential associated with reward and punishment. *Psy-*

- chophysiology*, 41 (2), 245-253.
- Holroyd, C. B., Pakzad-Vaezi, K. L., & Krigolson, O. E. (2008). The feedback correct-related positivity: Sensitivity of the event-related brain potential to unexpected positive feedback. *Psychophysiology*, 45 (5), 688-697.
- Itagaki, S., & Katayama, J. I. (2008). Self-relevant criteria determine the evaluation of outcomes induced by others. *Neuroreport*, 19 (3), 383-387.
- Jia, S., Li, H., Luo, Y., Chen, A., Wang, B., & Zhou, X. (2007). Detecting perceptual conflict by the feedback-related negativity in brain potentials. *Neuroreport*, 18 (13), 1385-1388.
- Kang, S. K., Hirsh, J. B., & Chasteen, A. L. (2010). Your mistakes are mine: self-other overlap predicts neural response to observed errors. *Journal of Experimental Social Psychology*, 46 (1), 229-232.
- Kimura, K., & Katayama, J. I. (2013). Outcome evaluations in group decision making using the majority rule: An electrophysiological study. *Psychophysiology*, 50 (9), 848-857.
- Kimura, K., Murayama, A., Miura, A., & Katayama, J. I. (2013). Effect of decision confidence on the evaluation of conflicting decisions in a social context. *Neuroscience letters*, 556, 176-180.
- Koban, L., & Pourtois, G. (2014). Brain systems underlying the affective and social monitoring of actions: an integrative review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 46, 71-84.
- Koban, L., Pourtois, G., Bediou, B., & Vuilleumier, P. (2012). Effects of social context and predictive relevance on action outcome monitoring. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 12 (3), 460-478.
- Kopp, B., Rist, F., & Mattler, U. W. E. (1996). N 200 in the flanker task as a neurobehavioral tool for investigating executive control. *Psychophysiology*, 33 (3), 282-294.
- Kross, E., Berman, M. G., Mischel, W., Smith, E. E., & Wager, T. D. (2011). Social rejection shares somatosensory representations with physical pain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108 (15), 6270-6275.
- Kross, E., Egner, T., Ochsner, K., Hirsch, J., & Downey, G. (2007). Neural dynamics of rejection sensitivity. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19 (6), 945-956.
- Leng, Y., & Zhou, X. (2010). Modulation of the brain activity in outcome evaluation by interpersonal relationship: an ERP study. *Neuropsychologia*, 48 (2), 448-455.

- Leng, Y., & Zhou, X. (2014). Interpersonal relationship modulates brain responses to outcome evaluation when gambling for/against others: an electrophysiological analysis. *Neuropsychologia*, *63*, 205-214.
- Li, P., Han, C., Lei, Y., Holroyd, C. B., & Li, H. (2011). Responsibility modulates neural mechanisms of outcome processing: an ERP study. *Psychophysiology*, *48* (8), 1129-1133.
- Li, P., Jia, S., Feng, T., Liu, Q., Suo, T., & Li, H. (2010). The influence of the diffusion of responsibility effect on outcome evaluations: electrophysiological evidence from an ERP study. *Neuroimage*, *52* (4), 1727-1733.
- Long, C., Sun, Q., Jia, S., Li, P., & Chen, A. (2018). Give Me a Chance! Sense of Opportunity Inequality Affects Brain Responses to Outcome Evaluation in a Social Competitive Context: An Event-Related Potential Study. *Frontiers in human neuroscience*, *12*, 135.
- Luck, S. J. (2012). Event-related potentials. In Cooper, H., Camic, P. M., Long, D. L., Panter, A. T., Rindskopf, D., & Sher, K. J. (Eds.), *APA Handbook of Research Methods in Psychology: Volume 1, Foundations, Planning, Measures, and Psychometrics*. Washington, DC: American Psychological Association, pp. 523-546.
- Ma, Q., Shen, Q., Xu, Q., Li, D., Shu, L., & Weber, B. (2011). Empathic responses to others' gains and losses: an electrophysiological investigation. *Neuroimage*, *54* (3), 2472-2480.
- Marco-Pallarés, J., Camara, E., Münte, T. F., & Rodríguez-Fornells, A. (2008). Neural mechanisms underlying adaptive actions after slips. *Journal of cognitive neuroscience*, *20* (9), 1595-1610.
- Marco-Pallarés, J., Krämer, U. M., Strehl, S., Schröder, A., & Münte, T. F. (2010). When decisions of others matter to me: an electrophysiological analysis. *BMC neuroscience*, *11* (1), 86.
- Menon, V., Adelman, N. E., White, C. D., Glover, G. H., & Reiss, A. L. (2001). Error-related brain activation during a Go/NoGo response inhibition task. *Human brain mapping*, *12* (3), 131-143.
- Miltner, W. H. R., Brauer, J., Hecht, H., Trippe, R. H., & Coles, M. G. H. (2004). Parallel Brain Activity for Self-generated and Observed Errors. *Journal of Psychophysiology*, *18* (4), 205.
- 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 neuro-*

- science*, 9 (6), 788-798.
- Motomura, Y., Takeshita, A., Egashira, Y., Nishimura, T., Kim, Y. K., & Watanuki, S. (2015). Inter-individual relationships in empathic traits and feedback-related fronto-central brain activity: an event-related potential study. *Journal of physiological anthropology*, 34 (1), 14.
- Mussel, P., Hewig, J., Allen, J. J., Coles, M. G., & Miltner, W. (2014). Smiling faces, sometimes they don't tell the truth: Facial expression in the ultimatum game impacts decision making and event-related potentials. *Psychophysiology*, 51 (4), 358-363.
- Mynatt, C., & Sherman, S. J. (1975). Responsibility attribution in groups and individuals: A direct test of the diffusion of responsibility hypothesis. *Journal of Personality and Social Psychology*, 32 (6), 1111-1118.
- Nieuwenhuis, S., Aston-Jones, G., & Cohen, J. D. (2005). Decision making, the P3, and the locus coeruleus-norepinephrine system. *Psychological bulletin*, 131 (4), 510.
- Nieuwenhuis, S., Heslenfeld, D. J., von Geusau, N. J. A., Mars, R. B., Holroyd, C. B., & Yeung, N. (2005). Activity in human reward-sensitive brain areas is strongly context dependent. *Neuroimage*, 25 (4), 1302-1309.
- Nieuwenhuis, S., Ridderinkhof, K. R., Blom, J., Band, G. P., & Kok, A. (2001). Error-related brain potentials are differentially related to awareness of response errors: evidence from an antisaccade task. *Psychophysiology*, 38 (5), 752-760.
- Nieuwenhuis, S., Ridderinkhof, K. R., Talsma, D., Coles, M. G., Holroyd, C. B., Kok, A., & Van der Molen, M. W. (2002). A computational account of altered error processing in older age: dopamine and the error-related negativity. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 2 (1), 19-36.
- Nieuwenhuis, S., Schweizer, T. S., Mars, R. B., Botvinick, M. M., & Hajcak, G. (2007). Error-likelihood prediction in the medial frontal cortex: a critical evaluation. *Cerebral cortex*, 17 (7), 1570-1581.
- Nieuwenhuis, S., Yeung, N., Holroyd, C. B., Schurger, A., & Cohen, J. D. (2004). Sensitivity of electrophysiological activity from medial frontal cortex to utilitarian and performance feedback. *Cerebral Cortex*, 14 (7), 741-747.
- Notebaert, W., Houtman, F., Van Opstal, F., Gevers, W., Fias, W., & Verguts, T. (2009). Post-error slowing: an orienting account. *Cognition*, 111 (2), 275-279.
- O'Connor, M. F., Wellisch, D. K., Stanton, A. L., Eisenberger, N. I., Irwin, M. R.,

- & Lieberman, M. D. (2008). Craving love? Enduring grief activates brain's reward center. *Neuroimage*, *42* (2), 969-972.
- Pfabigan, D. M., Alexopoulos, J., Bauer, H., Lamm, C., & Sailer, U. (2011). All about the money—external performance monitoring is affected by monetary, but not by socially conveyed feedback cues in more antisocial individuals. *Frontiers in Human Neuroscience*, *5*, 100.
- Pfabigan, D. M., Zeiler, M., Lamm, C., & Sailer, U. (2014). Blocked versus randomized presentation modes differentially modulate feedback-related negativity and P 3 b amplitudes. *Clinical Neurophysiology*, *125* (4), 715-726.
- Qiu, J., Yu, C., Li, H., Jou, J., Tu, S., Wang, T., ... & Zhang, Q. (2010). The impact of social comparison on the neural substrates of reward processing: an event-related potential study. *Neuroimage*, *49* (1), 956-962.
- Rabbitt, P. (1966). Errors and error correction in choice-response tasks. *Journal of Experimental Psychology*, *71* (2), 264-272.
- Rabbitt, P. (1969). Psychological refractory delay and response-stimulus interval duration in serial, choice-response tasks. *Acta Psychologica*, *30*, 195-219.
- Rainville, P., Duncan, G. H., Price, D. D., Carrier, B., & Bushnell, M. C. (1997). Pain affect encoded in human anterior cingulate but not somatosensory cortex. *Science*, *277* (5328), 968-971.
- Rak, N., Bellebaum, C., & Thoma, P. (2013). Empathy and feedback processing in active and observational learning. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *13* (4), 869-884.
- Riepl, K., Mussel, P., Osinsky, R., & Hewig, J. (2016). Influences of state and trait affect on behavior, feedback-related negativity, and P 3 b in the ultimatum game. *PLoS One*, *11* (1), e 0146358.
- Sanfey, A. G., Rilling, J. K., Aronson, J. A., Nystrom, L. E., & Cohen, J. D. (2003). The neural basis of economic decision-making in the ultimatum game. *Science*, *300* (5626), 1755-1758.
- Sato, A., Yasuda, A., Ohira, H., Miyawaki, K., Nishikawa, M., Kumano, H., & Kuboki, T. (2005). Effects of value and reward magnitude on feedback negativity and P 300. *Neuroreport*, *16* (4), 407-411.
- Schulreich, S., Pfabigan, D. M., Derntl, B., & Sailer, U. (2013). Fearless Dominance and reduced feedback-related negativity amplitudes in a time-estimation task—Further neuroscientific evidence for dual-process models of psychopathy. *Biological psychology*, *93* (3), 352-363.
- Shestakova, A., Rieskamp, J., Tugin, S., Ossadtschi, A., Krutitskaya, J., & Klu-

- charev, V. (2013). Electrophysiological precursors of social conformity. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 8 (7), 756-763.
- Singer, T., Seymour, B., O’doherly, J., Kaube, H., Dolan, R. J., & Frith, C. D. (2004). Empathy for pain involves the affective but not sensory components of pain. *Science*, 303 (5661), 1157-1162.
- Sun, S., & Yu, R. (2014). The feedback related negativity encodes both social rejection and explicit social expectancy violation. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 556.
- Takács, Á., Kóbor, A., Janacsek, K., Honbolygó, F., Csépe, V., & Németh, D. (2015). High trait anxiety is associated with attenuated feedback-related negativity in risky decision making. *Neuroscience letters*, 600, 188-192.
- Takahashi, H., Kato, M., Matsuura, M., Mobbs, D., Suhara, T., & Okubo, Y. (2009). When your gain is my pain and your pain is my gain: neural correlates of envy and schadenfreude. *Science*, 323 (5916), 937-939.
- Tian, T., Feng, X., Gu, R., Broster, L. S., Feng, C., Wang, L., Guan, Q., & Luo, Y. J. (2015). Modulation of the brain activity in outcome evaluation by the presence of an audience: An electrophysiological investigation. *Brain research*, 1615, 139-147.
- van der Helden, J., Boksem, M. A. S., & Blom, J. H. G. (2010). The Importance of Failure: Feedback-Related Negativity Predicts Motor Learning Efficiency. *Cerebral Cortex*, 20 (7), 1596-1603.
- van Meel, C. S., & van Heijningen, C. A. (2010). The effect of interpersonal competition on monitoring internal and external error feedback. *Psychophysiology*, 47 (2), 213-222.
- 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 (5), 549.
- van Veen, V., & Carter, C. S. (2002). The timing of action-monitoring processes in the anterior cingulate cortex. *Journal of cognitive neuroscience*, 14 (4), 593-602.
- Wang, Y., Qu, C., Luo, Q., Qu, L., & Li, X. (2014). Like or dislike? Affective preference modulates neural response to others’ gains and losses. *PloS one*, 9 (8), e 105694.
- Wessel, J. R. (2018). An adaptive orienting theory of error processing. *Psychophysiology*, 55 (3), e 13041.
- Wiswede, D., Münte, T. F., Krämer, U. M., & Rüsseler, J. (2009). Embodied emo-

- tion modulates neural signature of performance monitoring. *PLoS One*, 4 (6), e 5754.
- Wu, Y., Zhang, D., Elieson, B., & Zhou, X. (2012). Brain potentials in outcome evaluation: when social comparison takes effect. *International Journal of Psychophysiology*, 85 (2), 145-152.
- Yeung, N., Holroyd, C. B., & Cohen, J. D. (2005). ERP Correlates of Feedback and Reward Processing in the Presence and Absence of Response Choice. *Cerebral Cortex*, 15 (5), 535-535.
- Yeung, N., & Sanfey, A. G. (2004). Independent coding of reward magnitude and valence in the human brain. *Journal of Neuroscience*, 24 (28), 6258-6264.
- Yu, R., Luo, Y., Ye, Z., & Zhou, X. (2007). Does the FRN in brain potentials reflect motivational/affective consequence of outcome evaluation. *Progress in Natural Science*, 17 (13), 136-143.
- Yu, R., & Zhou, X. (2006). Brain responses to outcomes of one's own and other's performance in a gambling task. *Neuroreport*, 17 (16), 1747-1751.
- Yu, R., & Zhou, X. (2009). To bet or not to bet? The error negativity or error-related negativity associated with risk-taking choices. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21 (4), 684-696.
- Zhang, Y., Li, X., Qian, X., & Zhou, X. (2012). Brain responses in evaluating feedback stimuli with a social dimension. *Frontiers in human neuroscience*, 6, 29.

——石井主税 大学院文学研究科博士課程後期課程——

——片山順一 文学部教授——