

早稲田大学審査学位論文
博士（スポーツ科学）

結果フィードバック予期の神経活動
に関する電気生理学的研究

—刺激前陰性電位を指標とした検討—

An electrophysiological examination of neural activity
during anticipation of feedback stimulus:
Focusing on the stimulus-preceding negativity

2018年1月

早稲田大学大学院 スポーツ科学研究科

平尾 貴大

HIRAO, Takahiro

研究指導教員： 正木 宏明 教授

目次

序文.....	i
表一覧.....	ii
図一覧.....	iii
略語一覧.....	iv
第 I 部 序論.....	1
第 1 章 刺激前陰性電位の諸特徴.....	2
第 2 章 刺激前陰性電位に及ぼす諸要因の効果.....	6
第 3 章 特殊な意思決定課題 —モンティ・ホール・ジレンマ課題—	8
第 4 章 内受容感覚と結果フィードバック予期.....	14
第 II 部 実験 1: 保守的な選択とフィードバック予期.....	17
第 1 章 序論.....	18
第 2 章 方法.....	20
第 3 章 結果.....	26
第 4 章 考察.....	29
第 III 部 実験 2: 意思決定の学習に伴うフィードバック予期変化.....	31
第 1 章 序論.....	32
第 2 章 方法.....	35
第 3 章 結果.....	41

第4章 考察.....	50
第IV部 実験3: 内受容感覚とフィードバック予期.....	57
第1章 序論.....	58
第2章 方法.....	59
第3章 結果.....	63
第4章 考察.....	68
第V部 結果フィードバック予期に関する神経活動の総括.....	72
参考文献.....	80

序文

本学位論文の一部は、以下の学術論文及び学術大会で発表した。

学術論文

Hirao, T., Murphy, T. I., & Masaki, H. (2016). Stimulus-preceding negativity represents a conservative response tendency. *NeuroReport*, 27, 80–84.

doi:10.1097/WNR.0000000000000495

Hirao, T., Murphy, T. I., & Masaki, H. (2017). Brain activities associated with learning of the Monty Hall Dilemma task. *Psychophysiology*, 1–11. doi:10.1111/psyp.12883

学会発表

Hirao, T., Murphy, T.I., & Masaki, H. Change or stick? Anticipation processes associated with subjective and objective probability of winning in a Monty Hall Dilemma task.

Abstracts of the 17th World Congress of Psychophysiology, Hiroshima, Japan, 2014/9.

International Journal of Psychophysiology, 94, p216. doi:

10.1016/j.ijpsycho.2014.08.863.

Hirao, T., Murphy, T.I., & Masaki, H. Do we learn to choose the advantageous option in the Monty Hall Dilemma task? An event-related potential study. Abstracts of the Society for Psychophysiological Research 55th Annual Meeting, Seattle, Washington, USA, 2015/10.

平尾貴大・正木宏明 モンティ・ホール・ジレンマ課題の学習に伴う神経活動変化

—刺激前陰性電位に着目して— 第35回日本生理心理学会(江戸川大学) 2017

年5月

表一覧

Table		Page
1	各条件における主観的報酬獲得確率	26
2	個人毎の客観的報酬獲得確率	42
3	客観的報酬獲得確率とチェンジ選択率の相関関係	49
4	客観的報酬獲得確率と SPN 振幅の相関関係	49

図一覧

Figure		Page
1	加算平均の原理	3
2	典型的な SPN 波形	4
3	島皮質の解剖学的位置	5
4	3 枚ドア MHD 課題の流れ	9
5	実験課題の流れ(実験 1)	21
6	課題別の SPN 波形及び頭皮上分布	28
7	MHD 課題の流れ(実験 2)	37
8	チェンジ選択率及び意思決定時間	45
9	SPN 波形及び頭皮上分布	46
10	数学的に無謬な回答を行った 16 名の SPN 波形	47
11	LORETA による電源推定の結果	48
12	時間評価課題の流れ	61
13	各群の心拍カウント課題パフォーマンス	64
14	各群の瞬時心拍数変化	65
15	各群における条件毎の SPN 波形	66
16	各群の SPN 差波形	67
17	LORETA による電源推定の結果	68

略語一覽

ANOVA	analysis of variance
bpm	beats per minute
EEG	electroencephalogram
EOG	electrooculogram
ERP	event-related potential
fMRI	functional magnetic resonance imaging
Hz	hertz
LORETA	low resolution brain electromagnetic tomography
M	mean
MHD	monty hall dilemma
MRI	magnetic resonance imaging
ms	millisecond
μV	microvolt
SEM	standard error of mean
SPN	stimulus-preceding negativity

第 I 部 序論

最良の意思決定を探索的に学習する際、自らの意思決定がどのような結果につながるかをフィードバックで確認し、自らの利益を最大にすべく行動を変容させる必要がある。それ故、探索的な学習では、結果フィードバックの存在は重要である。結果を知らせるフィードバック信号の前には、刺激予期に関する認知活動が存在することが報告されている(Kotani, Ohgami, Yoshida, Kiryu, & Inoue, 2017)。予期に関する認知活動を反映して生起する事象関連電位(event-related potential: ERP)に、刺激前陰性電位(stimulus-preceding negativity: SPN)がある。本学位論文では、三つの実験を通して SPN の機能的意義を包括的に検討した。

第 1 章 刺激前陰性電位の諸特徴

ERP は特定の事象に関連して頭皮上で発生する一過性の電位変動である。特定の事象に対する認知的処理を鋭敏に反映する。ERP を算出するための実験パラダイムでは、実験目的に沿った注目すべき事象(例えば、フィードバック刺激)を反復呈示し、その間の脳波を記録する。記録した脳波は、加算平均を行うことで当該刺激に関連した認知的処理を反映した脳波を抽出することができる(Figure 1)。

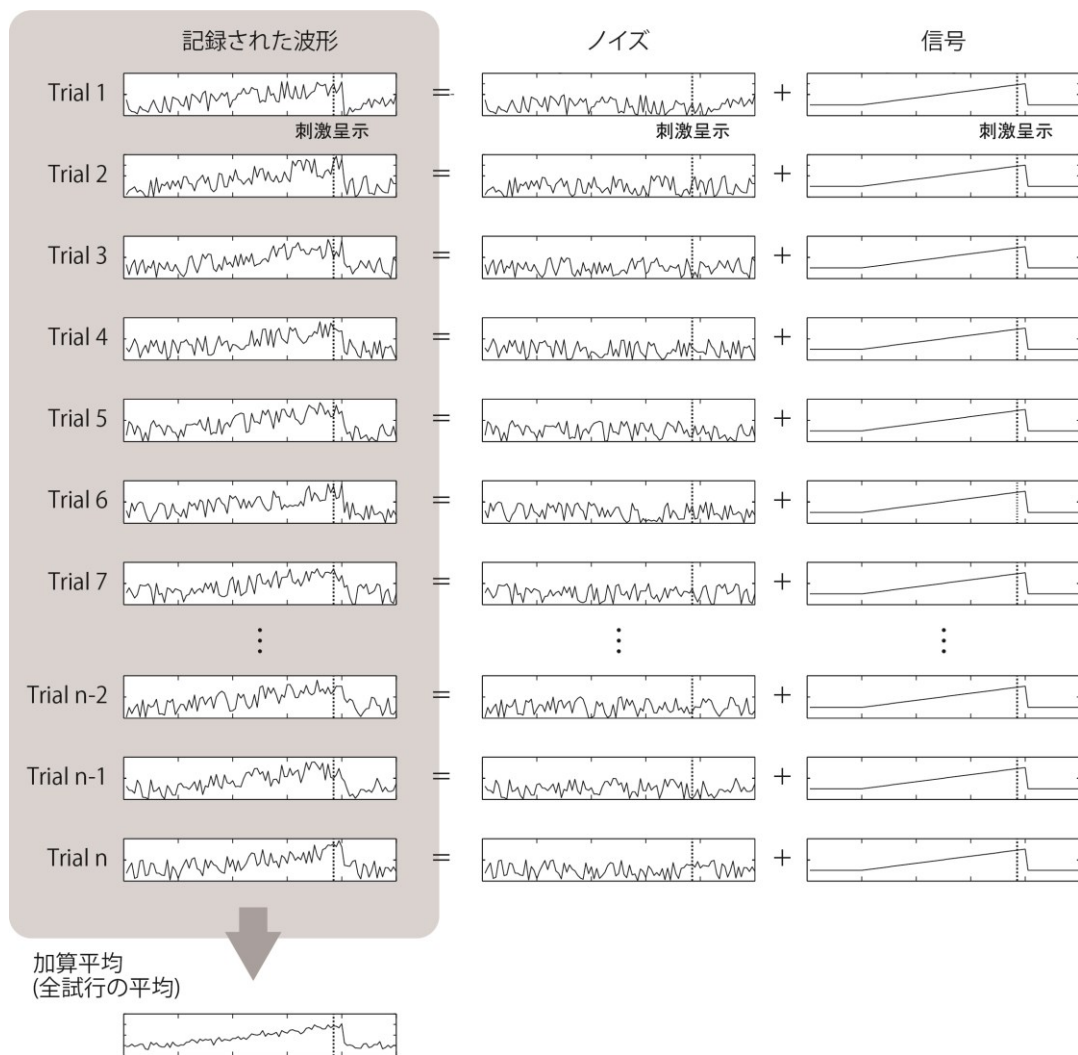


Figure 1. 加算平均の原理. 記録された脳波には, 刺激に関連した信号に重畳して, ノイズが存在する. 加算平均を行うことで, ランダムに発生するノイズを相殺し, ノイズに対する信号の比率を高めることができる.

ERP の中でも SPN は, 刺激呈示時点を基準として加算平均を行った場合, 刺激呈示前 2500 ms 程度から陰性緩電位変動が生起することが報告されている. その振幅は, 刺激予期に関する神経活動を反映すると考えられている(Brunia & Damen, 1988; Damen & Brunia, 1987). SPN は, 頭皮上の左半球よりも右半球でより大きく生起する(右半球優位性). また, 前頭部では特に緩徐な(ramp-like)陰性変動を示し, 頭頂部ではより急峻な漸増波形を示す(Figure 2).

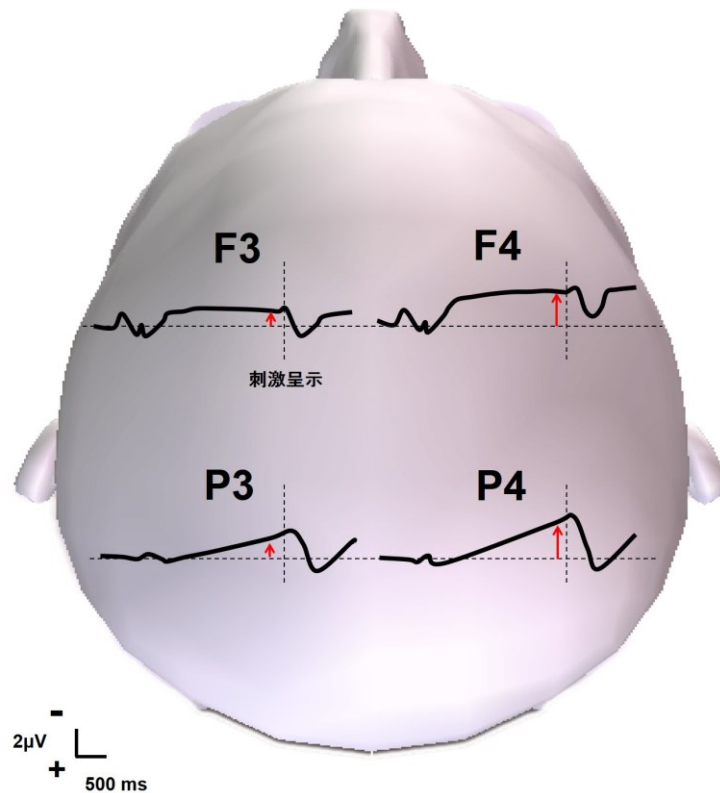


Figure 2. 典型的な SPN 波形. 右半球の振幅値は左半球よりも大きい(右半球優位性). 前頭部では特に緩徐な陰性変動を示し, 頭頂部ではより急峻な漸増波形を示す.

SPN が発見された当初, 前頭部, 頭頂部で波形の形態が異なることから, Brunia & Damen (1988)は, 少なくとも二つの発生源が存在すると考えた. その後, ダイポール分析(Böcker, Brunia, & van den Berg-Lenssen, 1994)や機能的磁気共鳴画像法(functional magnetic resonance imaging: fMRI)を用いた研究(Kotani et al., 2009, 2015; Tsukamoto et al., 2006)により, 複数の脳領域における活動が, SPN 生起に関与することが報告されている. 実験で使用する課題や条件設定が異なると賦活脳領域も異なるが, 島皮質(insula)の活動がいずれの研究でも共通して報告されており, 右島皮質が SPN の主な発生源だと考えられている.

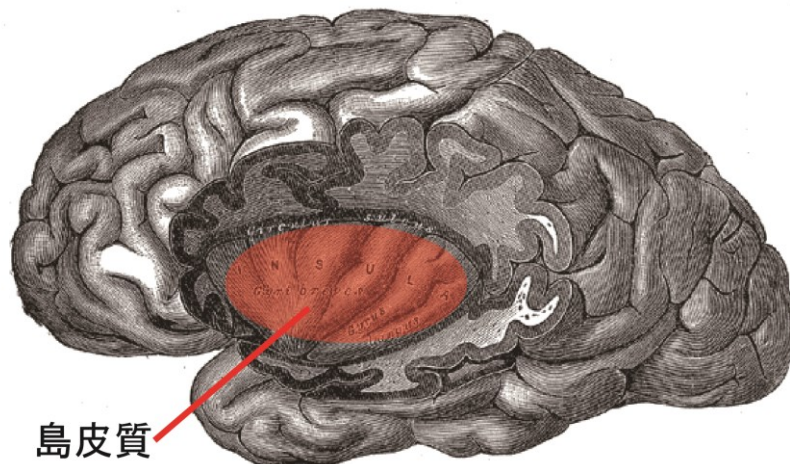


Figure 3. 島皮質の解剖学的位置. 弁蓋部を除去することにより, 島皮質を露出させている. 図は左半球の島皮質を示している. Gray (1918)を改変した.

実験課題で用いられるフィードバックのモダリティ(刺激様相)や条件設定によって, SPN の形態や頭皮上分布は変化することが報告されている(Böcker, Baas, Kenemans, & Verbaten, 2001; Brunia & van Boxtel, 2004; Ohgami et al., 2006; Ohgami, Kotani, Arai, Kiryu, & Inoue, 2014; Ohgami, Kotani, Hiraku, Aihara, & Ishii, 2004).

Ohgami et al. (2006)は, 報酬と罰に関する情報をフィードバックに付加することが結果予期にどのような影響を与えるのか, SPN を測定することで検証した. Ohgami et al. (2006)の研究では, 罰条件では右半球優位性がみられたものの, 報酬条件では右半球優勢は観察されなかった. フィードバックに視覚刺激を用いた場合は後頭部優勢な SPN が観察され, 音刺激を用いた場合には前頭部優勢な SPN が観察された (Brunia & van Boxtel, 2004; Ohgami et al., 2004). さらに視覚刺激の中でも, 言語, シンボル, 表情アイコンを用いた場合では, SPN の左右差の程度が異なると報告されている(Ohgami et al., 2014). このように SPN が, 課題の特性に影響を受ける理由は, Gating モデルで説明される(Brunia, 1993). Gating モデルは, 視床が感覚に関するゲートを操作する役割を担い, 次に到来する刺激に関わる脳部位へのゲートを予

め選択的に開放すると考えられている。フィードバックのモダリティの他に、知覚的予期・情動的予期もこのモデルに従う。SPNは頭皮上の全体で観察される陰性の電位変動であるが、振幅増大する部位は、実験で操作する変数の種類によって異なる。例えば、より知覚的予期を反映した場合は、中心、後頭部のSPN振幅が増大し、より情動的予期は前頭部のSPN振幅に影響を与えられている(van Boxtel & Böcker, 2004)。

第2章 刺激前陰性電位に及ぼす諸要因の効果

初期の時間評価課題を用いた研究では、SPNは知覚的予期を反映する成分に過ぎないと考えられていた(Brunia, 1988)。その後、情報を有するフィードバック刺激や、動機付けに関わるフィードバック刺激(金銭報酬に関するフィードバック、罰に関するフィードバック、パフォーマンス結果に関するフィードバックなど)の前にも、SPNが生じることが確認された(Böcker et al., 2001; Chwilla & Brunia, 1991; Kotani et al., 2003)。SPNに影響を与え得る因子は様々であるが、これらの因子は“Basic”、“Information”、“Affect”の3つに大別できる(van Boxtel & Böcker, 2004)。

“Basic”とは、課題によって変化する因子で、頭皮上分布を描くと、それぞれの課題に関与する脳部位近傍に最大振幅値が観察される。“Information”は、知覚的な予期を表す因子で、頭頂部優位性を示す。“Affect”は、情動的な予期を示す因子で前頭部優位性を示す。

フィードバックへの情動的な動機付けは、SPN振幅に影響を与えることが繰り返して報告されている(Fuentemilla et al., 2013; Masaki, Takeuchi, Gehring, Takasawa, & Yamazaki, 2006; Zheng, Li, Wang, Wu, & Liu, 2015; Zheng & Liu, 2015)。報酬獲得確率によって操作されたフィードバックへの情動的動機付けは、結果予期中の神経活動

に影響を与えることが知られている。ギャンブル課題において、報酬獲得、損失の順序効果を検討した研究では、金額の大きな報酬を得た直後試行で SPN 振幅が増大する(Masaki et al., 2006)。つまり、直前試行で大きな金額を獲得した場合、当該試行ではフィードバックに対するポジティブな情動的動機付けが高まり SPN 振幅が増大する。また、情動的な動機付けが SPN 振幅に与える影響は、報酬を損失する可能性が高い条件よりも、報酬を獲得できる可能性が高い条件で大きい(Zheng et al., 2015)。また、性格特性によっても情動的動機付けが SPN 振幅に与える影響は異なることが報告されている(Zheng & Liu, 2015)。これらの知見は、SPN が脳内の報酬系活動を反映することを示していると考えられる。報酬獲得確率が高い際には、結果に対するポジティブな期待が高まるため、報酬予期に関する脳活動が増大する。この報酬予期活動増大を反映して、SPN 振幅は増大する(Hackley, Valle-Inclan, Masaki, & Hebert, 2014)。

報酬系活動の視座からでは、説明できない研究知見も存在する。SPN 振幅が報酬系の活動のみを反映するならば、報酬獲得確率が高い際に、振幅増大が観察されるべきである。しかしながら、予期していた報酬よりも予期せぬ報酬のほうが、主観的な喜びは大きく SPN 振幅も大きくなるという報告も存在する(Fuentemilla et al., 2013)。

また、近年の研究では、島皮質が刺激の顕著性検出を担うと考えられている(Seeley et al., 2007)。脳内には、課題等の実行に関するネットワーク、安静時のネットワークが存在するが、これらのネットワークの活動切り替えを担う顕著性ネットワークも存在すると報告されている。この顕著性ネットワークを構成する主たる脳部位が島皮質であり、島皮質を主な発生源とする SPN は、顕著性ネットワークの活動を反映することが示唆されている。島皮質より取得した顕著性の情報に従っ

て、次に到来する刺激を処理する上で必要な脳領域をあらかじめ活動させる。この刺激予期段階の脳活動が SPN 生起に関与している可能性がある(Kotani et al., 2015, 2017).

第3章 特殊な意思決定課題 —モンティ・ホール・ジレンマ課題—

モンティ・ホール・ジレンマ(Monty Hall dilemma: MHD)は、アメリカで放映されたテレビ番組(Let's Make a Deal)で使用された参加者体験型ゲームに端を発する。当該ゲームでは、参加者の前に3つのドアが選択肢として提示される。司会者とゲストという二者間で行われるゲーム課題で、ゲストは3つのドアから賞品が隠されたドアを推察し当てる。3つのドアの内2つには山羊が隠されており(はずれ)、残りの1つには車が用意されている(賞品)(Figure 4 i)。先ずゲストは3つのドアから1つのドアを自由意思で選択する(Figure 4 ii)。その後、司会者が残る2つのドアの内、はずれのドアを1つゲストに開示する(Figure 4 iii)。最後にゲストは、最初に選択したドアに固執するか(ステイ選択)、残り1つのドアを選択し直すか(チェンジ選択)、二者択一の最終意思決定を行う(Figure 4 iv)。

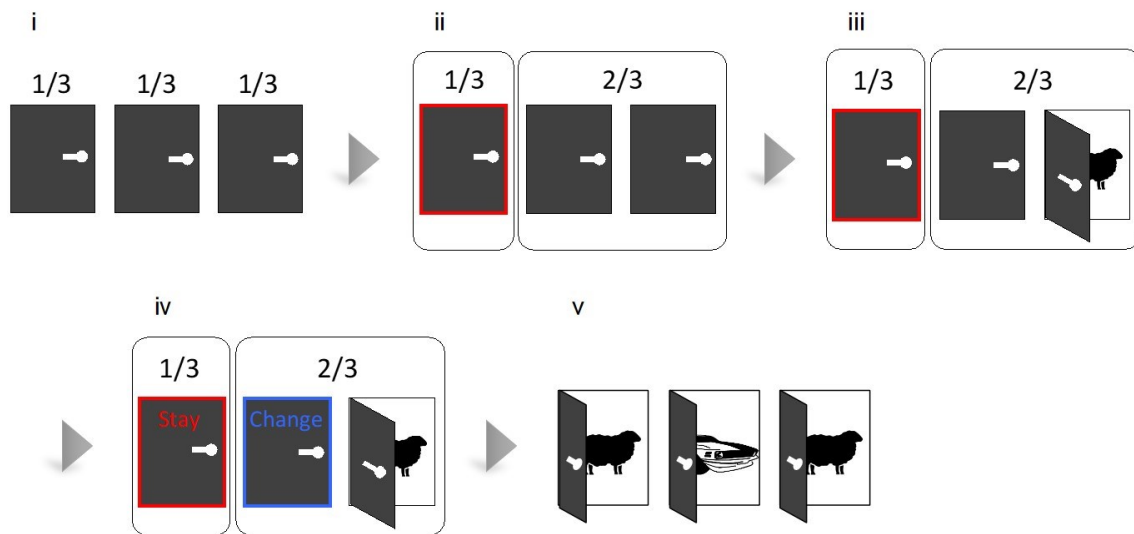


Figure 4. 3 枚ドア MHD 課題の流れ. 第一選択として一番左を選択した場合. 第一選択での選択ドアを赤枠で示した. (i)はじめそれぞれのドアで当選する確率は等しく $1/3$ である. (ii)第一選択の際, 選んだカードが当選する確率は $1/3$ であり, その他 2 つに当選が含まれる確率は $2/3$ である. (iii)その後非選択の 2 つドアからはずれを開くと, 残った非選択ドアの当選確率が $2/3$ になる. (iv)よって, 最終選択では Stay の場合当選確率は $1/3$ で, Change の場合 $2/3$ になる.

この課題の興味深い点は, 最終決定において主観的な報酬獲得確率と実際の報酬獲得確率が乖離することにある. 最終決定では, 二者択一の選択を求められるため, 多くの参加者はステイ選択, チェンジ選択共に報酬獲得確率は $1/2(50.0\%)$ であると考える. あるいは, いずれの選択も $1/3(33.3\%)$ のままであると考える. しかしながら実際は, ステイ選択の報酬獲得確率は $1/3(33.3\%)$, チェンジ選択の報酬獲得確率は $2/3(66.7\%)$ であり, チェンジ選択の方が報酬獲得確率は二倍となる. このメカニズムは, 簡単な集合論で説明可能である (Granberg, 1999). 報酬獲得確率の乖離に加えて MHD 課題のもう一つの特徴は, 参加者の行動が主観的な報酬獲得確率に従わないことである. 多くの参加者は, チェンジ選択, ステイ選択共に, 報酬獲得確率 $1/2$ と回答するにもかかわらず, ステイを選択する. 両選択の報酬獲得確率を等しく $1/2$ と考

えるならば、両選択の間に論理的差はないため、チェンジ選択、ステイ選択は同数になるものと考えられる。しかしながら、当該課題に初めて直面した場合、多くの回答者はステイを選択する。この行動は認知バイアスによって引き起こされると考えられている(Tubau, Aguilar-Lleyda, & Johnson, 2015)。認知バイアスは、大別すると二種類ある。一つは、チェンジして非当選になることの回避である。行動を起こした後に損失することは、行動を起こさずに損失することに比べて、後悔感情を強く引き起こす(Kahneman & Tversky, 1982; Zeelenberg, van den Bos, van Dijk, & Pieters, 2002)。

MHD 課題の最終意思決定でチェンジを選択することは、最初意思決定から変更する意味で、強く行動を起こした選択と考えることができる。一方、ステイ選択は、最初意思決定を変更しない意味で、行動を起こしていない選択と考えることができる。以上のような文脈を MHD 課題で検討したのが Gilovich & Medvec (1995)である。彼らは、チェンジ選択及びステイ選択での損失が生み出す後悔の強度について、認知的不協和(cognitive dissonance)から検討した。二人一組で遂行する MHD 課題で、チェンジ、ステイ選択は二人の合意で行うように指示された。二人のうち一人は実験参加者で、もう一人は実験参加者を装った実験者(サクラ)であった。実験前には、当選すれば T シャツや映画チケットなどの賞品が与えられ、非当選であれば、ステッカー(一般に\$1.1 で販売されている賞品)やノートといった粗品が与えられると伝えられた。実験参加者は、サクラの誘導により最終選択においてチェンジを選択する者(チェンジ群)、ステイを選択する者(ステイ群)に割り当てられた。最終選択は異なったが、全ての参加者の結果は等しく、非当選でステッカーを獲得した。課題終了後に、全ての参加者に対して、「ステッカーを買い取ってもらえるなら、いくらで買い取って欲しいか」を尋ね、この値段を認知的不協和の度合いを示す変数とし、統計解析を行った。その結果、チェンジ群の方が、ステイ群よりも高い値段を提示した

(チェンジ群: \$1.58, ステイ群: \$1.11). チェンジ選択による損失はステイ選択による損失に比べ、認知的不協和をより強く生じさせたことになる。つまり、認知バイアスは、チェンジ選択による損失を避けるためのリスク回避から生じるものと考えられた。

ステイ選択バイアスを導く二つ目の原因は、最初の選択へのポジティブな固執である。「最初に自分で選択した選択肢なのだから、非当選でも納得できる」という考え方である。この選択バイアスは、制御幻想(Langer, 1975)や、現状維持バイアス(Samuelson & Zechhauser, 1988)といった認知的バイアスによって説明されている。Granberg & Dorr (1998)は、MHD 課題のステイ選択バイアスを制御幻想から説明した。制御幻想とは、自らが制御しているという感覚が強い行動ほど、結果をポジティブに見積もってしまう認知バイアスである。Granberg & Dorr (1998)は、MHD 課題が二段階の意思決定が必要であることに注目し、第一選択と最終選択を別々の参加者が行う群(二人群), 両選択を同一の参加者が遂行する群(コントロール群)に分けて、それぞれの群に MHD 課題を 10 試行 × 5 ブロック遂行してもらった。二人群では、制御幻想が生じ得ないため、チェンジ選択率は高くなると仮説が立てられた。5 ブロックでのチェンジ選択率の推移を群間で比較した結果、課題の初期においてのみ仮説が支持された。コントロール群では、1 ブロック目に 30%前後であったチェンジ選択率が、最終ブロックでは 50%以上に上昇した。一方、二人群では、1 ブロック目から最終ブロックまで、一貫して 50%前後のチェンジ選択率であった。特に、第 1 試行目では、コントロール群が 9%のチェンジ選択率にとどまったのに対し、二人群では 38%(チャンスレベル 50%と差はない)であった。コントロール群は、チェンジ選択の有利性を学習した。それ故、コントロール群のチェンジ選択率は、課題途中で二人群のチェンジ選択率に追いついた。しかしながら、学習前のチェンジ選択率はコント

ロール群が有意に低かった。この結果から、課題の序盤では制御幻想が顕著に観察されるものの、チェンジ選択の有利性を学習した後はチェンジ選択が増加すると考えられた。

ステイ選択バイアスは、非常に強力なバイアスであることが知られている。Granberg & Brown (1995)の研究では、チェンジ選択率の際にインセンティブを付加したが、完全にステイ選択がなくなることはなかった。さらにチェンジ選択率の確率を顕在的に理解した人でさえ、ステイを選択し続けることも報告されている(Franco-Watkins, Derks, & Dougherty, 2003)。

ここまで、強力なステイ選択バイアスの働きによって主観的報酬獲得確率と参加者の選択行動は一致しないことを概観した。MHD 課題においてチェンジを選択するのはどのような時であろうか。実際には、チェンジ選択の方が二倍高い報酬獲得確率を有する。この確率情報を学習し、チェンジ選択率が増加することはあるのだろうか。先行研究では、課題の反復遂行によってチェンジ選択が漸進的に増加することが示されている(Friedman, 1998; Granberg & Brown, 1995; Tubau & Alonso, 2003)。

Friedman (1998)の研究では、はじめ 10%未満であったチェンジ選択率は、15 回の繰り返し後、29%に達した、また、Granberg & Brown (1995)は、50 回の繰り返しにより、チェンジ選択率が 10%から 55%に上昇することを示した。これらの研究は、繰り返しによるチェンジ選択率の増加を示しているが、参加者がチェンジ選択の有利性を顕在的に理解したかどうかは不明である。そこで、Tubau & Alonso (2003)は MHD 課題の遂行を反復させ、チェンジ選択率の増加と報酬獲得確率の理解度との関係を検討した。その結果、MHD 課題を繰り返し遂行することはチェンジ率の増加を促すが、チェンジ選択有利性は顕在的に学習されないことを示した。すなわち、参加者はチェンジ選択、ステイ選択共に 1/2 と信じながらも、チェンジ選択の有利性を経験的に

学習し、行動を変化させたのである。3枚カードに加えて10枚カードMHD課題（第一選択後に8枚の非当選カードが開示される）を用いたFranco-Watkins et al. (2003)も、同様の結果を報告している。3枚カード群、10枚カード群に分かれた参加者が、カード版MHD課題を練習とし、1ブロック5試行を6ブロック遂行した(従来のMHDでは、選択肢をドアで表現したが、カード版では、トランプカードを用いた。エースは当選を示し、非エースは非当選であった)。カード版MHD課題を用いた練習の後、それぞれの群に対し、従来のドアを使用したMHD課題と主観的報酬獲得確率の質問を行い、MHD課題における主観的報酬獲得確率の学習について検討した。その結果、3枚カード群、10枚カード群共に有意なチェンジ選択率の増加がみられたが、確率情報について顕在的な学習を示した参加者はほとんどいなかった。以上の結果から、MHD課題の反復遂行におけるチェンジ率増加は、経験的に選択と結果の関係性を学習した結果であり、顕在的に報酬獲得確率を理解することとは切り離されたものと考えられるべきである。

MHDに関する先行研究の多くは、質問紙で参加者の心理的面を測定し、得られた回答を過去の知見と照らし合わせることで、チェンジ選択、ステイ選択の背景にある意思決定プロセスについて検討してきた。それ故、MHD課題における選択行動の背景にある認知神経的なプロセスは未だ明らかでない。唯一、Zhou, Yu, & Zhou (2010)は、繰り返しのあるMHD課題の手続きを使用し、チェンジ選択、ステイ選択が結果評価に与える影響について、ERPを指標として調べている。フィードバック刺激呈示の後に生じるERPに、フィードバック関連陰性電位(feedback-related negativity: FRN)がある(Gehring & Willoughby, 2002)。Zhou et al. (2010)は、MHD課題の文脈で、FRNを用いて、チェンジ選択後の損失とステイ選択後の損失では、結果の評価に差異が生じるか検討した。その結果、チェンジ後の損失は、ステイ後の損失に比べて、

振幅のより大きな FRN を惹起させた。この結果を Zhou et al. (2010)は、FRN 成分の発生機序である二つの理論に基づき解釈している。一つは、FRN 振幅は、結果に対する情動的動機付けの影響を受けるという理論である(Gehring & Willoughby, 2002; Masaki et al., 2006)。Zhou et al. (2010)は、チェンジ選択、ステイ選択の反応に同期して算出した ERP も解析しており、その結果、チェンジ選択の際、ステイ選択よりも陰性方向に振幅が大きかった。この陰性電位は次に起きる結果に対する前帯状回からの警告信号であり、チェンジ選択の方が結果に対して、動機付けられていたと解釈している。二つ目は、強化学習理論である(Holroyd & Coles, 2002)。結果が呈示された際、実際の結果と、予期していた結果の差分(予期エラー)を算出し、その予期エラーを反映して、FRN が惹起するという理論である。行動を起こした後は、自分の結果をよりポジティブに見積もりやすいことが先行研究から知られている(Ritov & Baron, 1994)。そのポジティブな見積もりがチェンジ選択時の期待を根拠無しに高く見積もった。それ故、チェンジ選択の結果が損失を招いた場合、予期エラーが増大し、FRN 振幅が大きくなったと考えられている。しかしながら、Zhou et al. (2010)では、予期・期待に関する指標は測定していないため、選択が予期・期待に与える影響は明らかでない。さらに彼らの研究では、チェンジ、ステイという選択の効果のみを評価するため、それぞれの選択による報酬獲得確率は、等しく 1/2 に統制されていた。

第4章 内受容感覚と結果フィードバック予期

内蔵を含めた身体内部の生理的な状態に関する感覚は、内受容感覚(interoception)と呼ばれる(Craig, 2002)。SPN の主な発生源は、右の島皮質であると報告されているが(Kotani et al., 2015)、島皮質の役割には、内蔵を含めた身体内部の感覚受容と、

情動反応の身体的表出が挙げられる。また、右の島皮質は、眼窩前頭皮質、前帯状回、扁桃体などと線維連絡を有していることが報告されている。それ故、身体感覚、情動の認知、情動性の身体表出や、自己意識の発現に重要な役割をもつと考えられている(Craig, 2002, 2003b; Singer, Critchley, & Preuschoff, 2009)。身体内部からの求心性情報は、右の島皮質に投射されるため、身体の状態を把握する上で、右の島皮質は重要な役割を担っていると考えられる。

近年、身体内部の状態(内受容感覚)が変化することを予期する際にも、右の島皮質が活動することがわかってきている。また、その内受容感覚変化の予期に関する神経活動は、過酷な環境下に身を置くアスリートと非アスリートでは、異なることが示されている(Paulus et al., 2012)。日頃から過酷な環境に身を置くアスリートは、内受容感覚変化が生じる前に、島皮質を活動させることで身体内部情報の変化を予測し、実際に内受容感覚が変化した場合でも、最適な運動パフォーマンスができる(Paulus et al., 2009)。この研究知見を踏まえると、過酷な環境に身を置き、内受容感覚の優れたアスリートは、SPN 振幅が大きい可能性がある。

SPN を評価する課題として頻繁に用いられる課題として、時間評価課題がある。音もしくは視覚刺激を呈示し、当該刺激から指定された秒数(例えば 3 秒)経過したと感じたタイミングで、ボタン押しにより反応する課題である。ボタン押し反応の約 3 秒後には結果の知識(knowledge of results: KR)を含んだフィードバック刺激さる。参加者は、フィードバックを確認することで、自らの反応時間が、指定された評価時間よりも早かったか、遅かったか、もしくは正確だったのか知ることができる。この時間評価課題においても、フィードバック呈示前には、結果予期に関する神経活動を反映した SPN が生起する。非常に単純な課題であるが、フィードバック

ク刺激呈示前には，SPN 生起と同時に，心拍数の低下(内受容感覚の変化)が観察されることも報告されている(Damen & Brunia, 1987).

第Ⅱ部 実験 1: 保守的な選択とフィードバック予期

第1章 序論

SPN は、結果フィードバック呈示の前に生起する陰性の緩電位変動である(Brunia & Damen, 1988). 右の島皮質が主な発生源であると報告されており、一般的に SPN は左半球よりも右半球で高振幅である(Brunia, de Jong, van den Berg-Lenssen, & Paans, 2000). SPN 振幅の大きさは、フィードバックに対する情動的な動機づけを反映することが報告されており(Masaki et al., 2006), 課題遂行者にとって情報価値が高いフィードバックに対して振幅は増大する(Chwilla & Brunia, 1991). 意思決定を要する課題では、意思決定行動とその結果フィードバックの間に生起する(Zheng et al., 2015). フィードバック呈示後に惹起する事象関連電位との関連を検討した研究結果も、SPN 振幅がフィードバックに対する情動的な動機付けを反映することが支持している(Masaki et al., 2006; Zhou et al., 2010). 高情報価フィードバックと低情報価フィードバックに対する予期活動の違いを機能的 MRI を用いて明らかにした研究では、情報価の高いフィードバックに対する予期の際、右島皮質前部の活動が増加すると報告されている(Tsukamoto et al., 2006). つまり、情報価が高く、フィードバックへの動機付けが高い際は、フィードバック予期中において右の島皮質が活動が増大し、その結果 SPN 振幅が増大する.

フィードバックへの情動的な動機付けの他に、SPN 振幅に影響を与える要因として、行為と結果の随伴性が挙げられる. 二者択一の選択肢から一つ選ぶといった意思決定を要するギャンブリング課題において、自らの自由意思で選択した場合とコンピュータがランダムに結果を呈示した場合では、自らの選択が随伴した際に、SPN 振幅は増大する(Masaki, Yamazaki, & Hackley, 2010). 行為と結果の随伴性が高い際には、尾状核及び島皮質前部の活動が増大することが報告されている(Tricomi, Delgado, Mccandliss, Mcclelland, & Fiez, 2006; Tricomi, Delgado, & Fiez, 2004). 行為と結果の随

伴性は、結果予期中の島皮質活動を増大し、SPN 振幅を増大するが、保守的な選択傾向も同様に SPN 振幅を増大させるか未だ不明である。

複数の選択機会を与えられた場合、一度選択した後、変更によって得られる利益が明らかでない際には、その選択肢を変更しない傾向がある(Granberg & Brown, 1995; Zhou et al., 2010)。この保守的な選択行動は、行為と結果の随伴性を高める可能性があるが、保守的な選択行動と SPN 振幅の関係は明らかでない。

本実験では、三種類の選択ギャンプリング課題(Monty Hall Dilemma 課題: MHD 課題, 報酬獲得確率 50%課題: 50%課題, 報酬獲得確率 33%課題: 33%課題)を用いて、保守的な選択行動が SPN 振幅に与える影響を検討した。いずれの課題でも、三つの選択肢(内、あたりは一つ)の中から、第一選択及び最終選択といった二段階の選択機会を用いて、最終的な選択を決定することが求められた。MHD 課題の流れは以下の通りであった。課題の始め、参加者は、呈示された三つの選択肢の中から、一つの選択肢を選ぶことが求められた。第一選択後、非選択の選択肢の中からはずれの選択肢が暴かれ、最終的に、最初に選択した選択肢を選ぶか(ステイ選択)、残った非選択の選択肢に変更するか(チェンジ選択)の最終意思決定の機会が与えられた。従来の先行研究に基づくと、最終選択では、二者択一の意味決定が求められるため、多くの参加者は、ステイ選択、チェンジ選択共に報酬獲得確率が 50%のように錯覚すると予想された。しかしながら、実際にはステイ選択の際の報酬獲得確率は 33%、チェンジ選択の際の報酬獲得確率は 66%であり、チェンジ選択のほうが二倍高い報酬獲得確率を有していた。50%課題及び 33%課題では、チェンジ選択及びステイ選択の報酬獲得確率は、それぞれ 50%、33%に統制された。つまり、50%課題及び 33%課題では、チェンジ選択とステイ選択の間に報酬獲得確率の違いはなかった。

保守的な選択行動が行為と結果の随伴性を高めた場合、チェンジ選択よりもステ

イ選択の際に、SPN 振幅が増大すると予想された。また、MHD 課題では、チェンジ選択とステイ選択の間に報酬獲得確率の勾配が存在するため、課題を繰り返すうちにステイ選択への保守的な選択の固執が弱まることが予想された。ステイ選択における SPN 振幅を条件間で比較した場合、MHD 課題の振幅は、他の二つの課題に比べて小さくなると予想された。

第2章 方法

2.2.1. 実施日時・場所

本実験は、2013年11月12日から2014年6月20日にかけて、早稲田大学100号館F棟570実験室で実施された。実験室は、防音のシールドルームで、参加者は外部刺激の影響を受けることなく課題を遂行することが可能であった。室内の温度は、エアコンによって実験者の要望に合わせて、調整した。また、実験中、参加者の方とコミュニケーションをとるため、実験室内の卓上にマイクروفオンとスピーカーを設置した。実験中の参加者の様子は、実験者の右斜め後方に設置されたカメラを通して、オンラインで確認した。

2.2.2. 参加者

早稲田大学に所属する大学生32名(男性16名、女性16名、平均年齢 20.41 ± 1.43 歳)が本実験に参加した。脳波解析において十分な加算回数を得られなかった参加者12人は解析から除外したため、脳波データ解析を行った参加者は、右利きの大学生20名(男性12名、女性8名、平均年齢 20.65 ± 1.53 歳)であった。全ての参加者は、脳に損傷が無く、正常な視力(視力の低い参加者は、眼鏡等を使用し視力を矯正した)を有した。本研究は、早稲田大学の人を対象とする研究に関する倫理審査委員会か

ら承諾を受けており，実験前には，全ての実験参加者からインフォームドコンセントを取得した．謝礼は，全ての実験参加者に対し一律 3600 円が支払われた(本実験は，課題の結果フィードバック刺激に対する予期，期待や動機付けに関する脳活動を検討する研究であった．当該脳活動をより賦活させる目的で，実験前には，「課題パフォーマンス結果に従い，謝金を支払う」という虚偽の教示を与えた)．

2.2.3. 課題

コンピュータプログラミングで，3枚カード MHD 課題を実験室内に再現した．課題は，Presentation 9.20 (Neurobehavioral 社製)を用いてプログラミングされ，CRT モニタ(株式会社イーヤマ製)に呈示した．本実験では，MHD 課題に加え，報酬獲得確率が異なる二種類の課題(50%課題，33%課題)を設けた(Figure 5)．全ての課題において，当選選択肢一つ，非当選選択肢二つで構成された三つの選択肢を使用した．選択肢は，カードを模した画像で示された．3枚のカードは水平方向に並べて表示された．参加者は，左のカード，真ん中のカード，右のカードに対応した三つボタンを使用し選択行動を行った．全ての参加者は右手でボタン押しを行った．

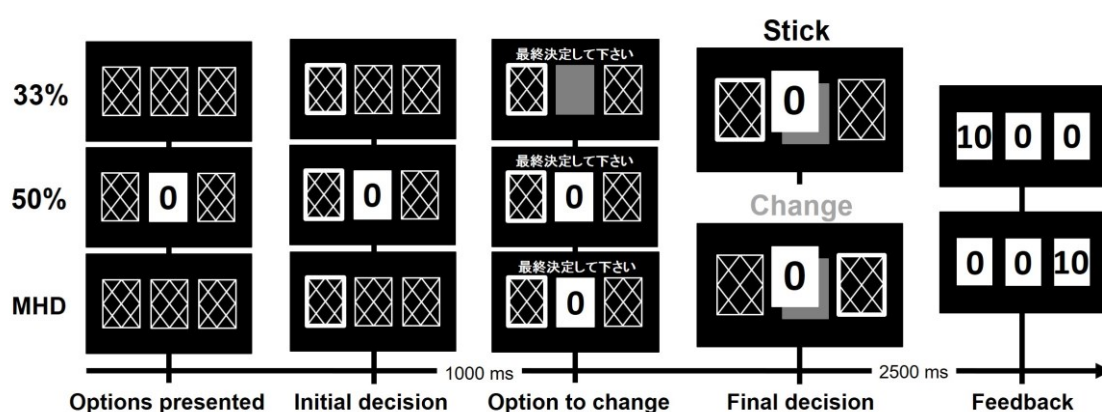


Figure 5. 実験課題の流れ(実験 1)．33%課題(上段)，50%課題(中段)，MHD 課題(下段)．

MHD 課題

課題の始め、裏向きの 3 枚カードから、第一選択として、1 枚カードを選択した。第一選択の 1000 ms 後、第一選択で選ばれなかった 2 枚の内、非当選カードがランダムに暴かれ、「最終決定して下さい」と表示された。最後に、第一選択から変更するか(チェンジ選択)、変更しないか(ステイ選択)を意思決定した。チェンジ選択は、変更先のカードに対応したボタン押し、ステイ選択は、第一選択と同じボタンを押しすることにより、選択を遂行した。最終意思決定から 2500 ms 後、3 枚全てのカードが開示され、参加者は当選カードの位置を確認することができた。

50%課題及び 33%課題

33%課題及び 50%課題では、非選択カードを表示するタイミング、教示の与え方を操作する事で、報酬獲得確率を操作した。50%課題では、試行の始めから、ランダムに 1 枚はずれが開示されており、参加者は残りの 2 枚のカードを使用し、第一選択、最終選択を行った。33%課題では、MHD 課題と同様に、3 枚カードから第一選択を遂行した。その後、はずれカードの内 1 枚がランダムにグレーで塗りつぶされた(はずれカードだけでなく、当たりカードが塗りつぶされることもあった)。このグレーカードは、非当選を意味するものではなく、選択不可能を意味していた。以上の手続きにより 33%課題では、選択の種類にかかわらず、報酬獲得確率 33%、50%課題では、報酬獲得確率 50%となった。試行間隔は、2000 ms, 3000 ms, 4000 ms の三種類をランダムで使用した。課題の視野角は、最大で、縦 1.40 度、横 2.92 度であった。本実験は、1 ブロック 60 試行とし、6 ブロックであった。また、条件毎の、第一選択時及び最終選択時の主観的な報酬獲得確率を取得するため、実験後に、質問紙への回答を求めた。質問紙は、最終選択における報酬獲得確率をチェンジ選択、ス

テイ選択毎に報酬獲得確率を分数形式で、直接推定してもらった。

2.2.4. 測定装置及び記録方法

脳波は、128ch デジタル脳波計(Biosemi 社製)を用いて、サンプリングレート 1024Hz で DC 記録した。電極は、Biosemi 電極キャップを用い、頭皮上 128 部位に装着した。また、眼電図(electrooculogram : EOG)の記録には、フラットタイプ外部電極を用いた。脳波データは、オフラインで、左右のマストイドの電極から得られたデータに再基準化した。左眼眼窩上下縁に取り付けた外部電極により、垂直方向の EOG を記録し、平行方向の EOG 記録には、両眼外側の眼窩縁に取り付けた電極を用いた。

2.2.5. 実験手続き

実験室において、紙面及び口頭で詳細な実験説明を行った後、インフォームドコンセント記入を求めた。同意が得られた参加者は、シールドルームに移動し、測定のための電極を装着した。電極装着後、ボタン押しによる選択方法を確認した。

2.2.6. データ解析

参加者は、手元に設置された三つのボタン押しにより、カードを選択した。ボタン押しの失敗が含まれた試行のデータは、妥当でないため解析から除外した(ボタン押しの失敗が含まれた試行とは、以下のような試行であった。最終選択において、既に表向きになったカードを再度選択した試行、不必要なボタンの連打がみられた試行、第一選択からフィードバック呈示まで、特定のボタンを押したままになっていた試行)。

統計解析は SPSS 22(IBM 社製)を用いて行った。課題別に、チェンジ選択率、意思

決定時間、SPN 振幅を算出した。統計解析は、行動指標、生理指標それぞれについて、反復測定分散分析に供した。分散分析では、Mauchly 球面性の検定を行い、球面性の仮定が棄却された場合は、Greenhouse-Geisser の ϵ を用いて自由度補正した後、有意性の検定を行った。タイプ I エラー率の増大をさけるため、下位検定として、Bonferroni 補正を使用した多重比較を行った。全ての統計検定において、有意水準は 5%であった。

行動指標

主観的報酬獲得確率(確率直接推定値)

質問紙を用いて、チェンジ選択、ステイ選択の報酬獲得確率を直接推定してもらった。得られたデータは、逆正弦変換した後、課題(MHD 課題, 50%課題, 33%課題)及び最終選択(チェンジ選択, ステイ選択)を要因とした、二要因分散分析に供した。

ステイ選択率

ボタン押し失敗等により妥当でない試行を取り除いた後に、チェンジ選択を選んだ割合を算出した。割合データが、正規分布を示さなかったため、逆正弦変換を行った後、条件間の差異について、一要因分散分析で統計解析を行った。

生理指標

SPN

Vision Analyzer2(Brain Products 社製)を用いて解析を行った。脳波データは、オフラインにて、左右のマストイドから導出した電位の平均値に最基準化した。30 Hz(24dB/octave)の高域遮蔽フィルターを適用した。課題毎にエポックを切り出した後、Gratton & Coles 法(Gratton, Coles, & Donchin, 1983)を用いて、EOG アーチファク

トを取り除いた。その後、フィードバック刺激呈示時点を 0 ms とし、フィードバック前 3000 ms、フィードバック後 1000 ms の 4000 ms エポックを切り出した。その際、ベースラインは、-2700 ms から-2500 ms の平均電位を使用した。EOG 以外のアーチファクトを除去するため、区間内で $\pm 80 \mu\text{V}$ の基準より大きな変動がみられた試行は取り除き、課題毎に加算平均を行った。アーチファクトを取り除いた後、16 試行以上の加算が得られない条件がある参加者は、その後の解析から除外した。SPN 振幅値は、フィードバック刺激前 100 ms の区間平均電位を算出した。統計解析では、F3, F4, C3, C4, P3, P4 の頭皮上部位を用い、頭皮上部位前後(前頭部位, 中心部位, 後頭部位) \times 頭皮上部位左右(左半球, 右半球) \times 課題 \times 最終選択の四要因分散分析に供した。

第3章 結果

2.3.1. 行動指標

主観的報酬獲得確率

課題の主効果は有意であったが($F(2, 38) = 94.65, \epsilon = .60, p < .0001$), 最終選択の主効果, 交互作用は統計的に認められなかった(それぞれ, $F(1, 19) = 1.00, p = .33, F(2, 38) = 1.00, p = .38$). 33%課題の主観的報酬獲得確率は, 他の2条件に比べ有意に低かった(それぞれ, MHD 課題: $t(19) = 9.72, p < .0001$, 33%課題: $t(19) = 10.38, p < .0001$) (Table1).

Table1. 各条件における主観的報酬獲得確率

	MHD task (%)	50% task (%)	33% task (%)
Change	49.00(5.23)	50.50(2.24)	35.33(3.08)
Stay	50.00(7.56)	49.50(2.24)	36.33(3.24)

ステイ選択率

本実験に参加した32名の平均ステイ選択率は, MHD 課題: 54.8%, 50%課題: 62.3%, 33%課題: 63.8%であった. 分散分析の結果, 課題の主効果が認められた($F(2, 62) = 4.81, p = 0.01$). 33%課題のステイ選択率は, MHD 課題よりも高かった($t(31) = 2.95, p = 0.02$). 仮説通り 50%課題のステイ選択率は MHD 課題よりも高値であったが, 有意差は認められなかった($t(31) = 2.32, p = 0.08$). MHD 課題の報酬獲得確率について, 正しい報酬獲得確率を回答した参加者はいなかった. つまり, MHD 課題では選択と結果の関係性を経験的に学習し, チェンジ選択の有利性を学習した結果, ステイ選択が低下したと考えられる.

脳波解析では, 十分な加算回数を得られなかった12名を解析から除外した. 除外

後の 20 名のステイ選択率は、MHD 課題: 51.8%, 50%課題: 53.9%, 33%課題: 54.5%であった。除外後の参加者データを用いて、ステイ選択率を課題間比較した際には、課題の主効果が認められなかった($p = .072$)。

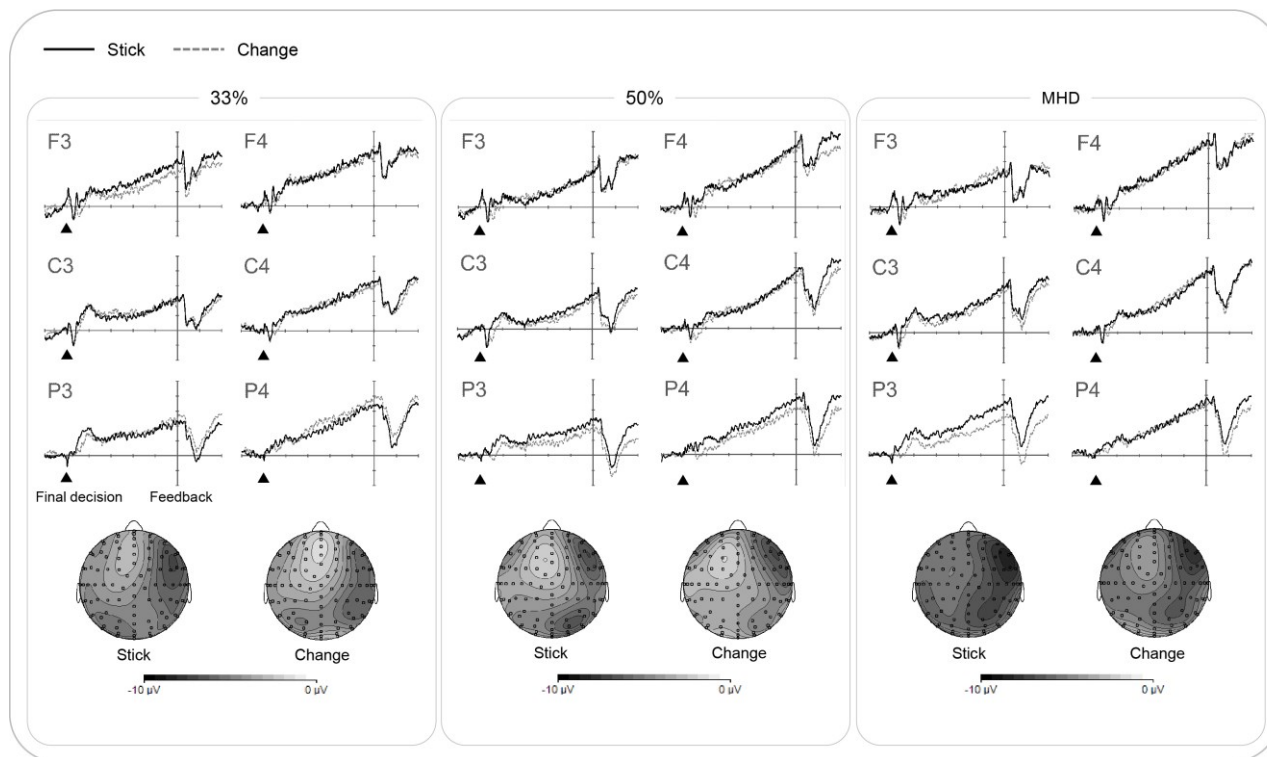
2.3.2. 生理指標

SPN

Figure 6 に SPN 波形を示した。四要因分散分析の結果、頭皮上部位左右及び最終選択の主効果が有意であった($F(1,19) = 25.49, p < .0001, F(1,19) = 8.06, p = .001$)。左半球に比べ、右半球で SPN 振幅は大きかった(左半球: $-4.80 \mu\text{V}$ vs. 右半球: $-7.19 \mu\text{V}$)。また、ステイ選択時の SPN 振幅は、チェンジ選択時より大きかった(チェンジ選択: $-5.58 \mu\text{V}$ vs. ステイ選択: $-6.40 \mu\text{V}$)。

加算回数の不足により除外した 12 名の多くは、チェンジ選択時の加算回数が不足したことが原因であった。そこで、ステイ選択時のみに着目し、29 名のデータを統計解析した。29 名のステイ選択時の SPN を Figure 6b に示した。当該データについて、三要因分散分析で統計解析した結果、頭皮上部位左右の主効果が認められたが($F(1, 28) = 30.3, p < 0.001$)、その他の差は統計的に認められなかった($ps > .34$)。

(a)



(b)

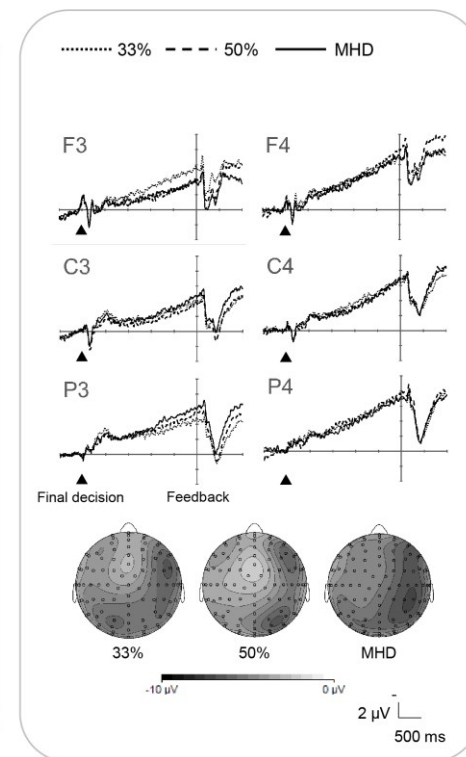


Figure 6. (a)課題別の SPN 波形及び頭皮上分布. (b)ステイ選択時の SPN 波形及び頭皮上分布.

第4章 考察

本実験では、三つの報酬獲得確率の異なる意思決定課題において、SPNを取得し、SPN振幅と保守的な選択行動の関係を検討した。行動指標の結果は、本実験課題において保守的な行動が観察されたことを示した。MHD課題遂行中の選択行動に関する先行研究の結果と一致して、MHD課題では、チェンジ選択の有利性を経験的に学習したことを示していた(Franco-Watkins et al., 2003; Granberg & Dorr, 1998)。また、仮説通り SPN 振幅は、ステイ選択時に増大することが明らかとなった。MHD課題では、チェンジ選択とステイ選択の間に報酬獲得確率の勾配が存在するため、ステイ選択時の保守的な選択行動は弱まったが、ステイ選択時の振幅増大は、33%及び50%課題に限らず、全ての課題で同様に認められた。SPN振幅について、課題間の差は認められなかったが、ステイ選択時に SPN 振幅が増大することが明らかとなった。この結果には、三つの解釈が考えられる。

一つ目は、制御幻想と呼ばれる認知バイアスが作用した可能性である(Langer, 1975)。制御幻想とは、他者が選択した選択よりも、自らが選択した選択肢の際に、根拠なく良い結果を期待してしまう認知バイアスである。本実験では、ステイ選択もチェンジ選択も参加者自身の選択ではあったが、ステイ選択の方がより自らの選択だという誤った信念が生じた可能性がある。SPNの主な発生源である島皮質は、ポジティブな報酬予期の際に活動が増大することが報告されており(Amiez, Sallet, Procyk, & Petrides, 2012)、制御幻想により不当に報酬期待が高まった結果、ステイ選択では SPN 振幅が増大したのかもしれない。

もう一つの解釈は、チェンジ選択で損失することの回避である。行動を起こした後、損失した場合、負の情動が大きくなることが知られている。この選択傾向は、情動に基づく選択バイアスで、MHD課題のステイ選択の理由として先行研究

でも挙げられている(Tubau et al., 2015). SPN の振幅は, 報酬及び罰の付加によるフィードバックへの情動的な動機付けによって増大することが報告されている(Masaki et al., 2006; Ohgami et al., 2006). 本実験でも, ステイ選択時のフィードバックへの情動的な動機付けが, SPN 振幅を増大させた可能性があった.

三つ目の解釈は, 行為と結果の随伴性である. 第一選択と最終選択において同じ選択を行なうステイ選択では, 課題に対する制御感覚が強くなり, 自らの選択行為と結果の随伴性を高く感じたのかもしれない. 結果に対する制御感が高い際には, SPN の主な発生源である島皮質前部の活動が増大することも報告されている(Zink, Pagnoni, Martin-Skurski, Chappelow, & Berns, 2004). 課題結果に対する制御感が強まった結果, 行為と結果の随伴性が高くなり, 保守的な選択行動を生じさせるのかもしれない. その場合, 島皮質前部の活動増大は, 線条体等の動機付けや認知活動に関する脳領域の活動と共に認められるのかもしれない.

第Ⅲ部 実験 2: 意思決定の学習に伴うフィードバック予期変化

第1章 序論

MHD 課題では、チェンジ選択の報酬獲得確率は 66%であり、ステイ選択の報酬獲得確率は 33%である(Selvin et al., 1975). 興味深いことに、チェンジ選択の報酬獲得確率は、ステイ選択時よりも二倍高いにも関わらず、認知的なバイアスが働くため、多くの参加者はステイ選択を選んでしまうことが報告されている(Granberg & Brown, 1995; Granberg & Dorr, 1998; Tubau et al., 2015). 実験 1 では、この認知バイアスを反映し、チェンジ選択時よりもステイ選択時に SPN 振幅が増大することを明らかにした。この結果は、ステイ選択時には、認知バイアスの影響で、フィードバックへの情動的な動機付けが増大すると解釈された。

MHD 課題を繰り返し遂行した場合、数学的な理解は進まないが、選択と結果の関係性を学習し、徐々にチェンジ選択率が増加することが知られている(Tubau et al., 2015). 実験 1 では、学習が進んだ参加者を除外する手続きであったため(チェンジ選択が多く、ステイ選択の数が少ない参加者は、脳波解析の都合上除外した)、MHD 課題における学習進度が SPN 振幅に与える影響は検証できなかった。SPN 振幅は、フィードバックに対するポジティブな期待の大きさを反映することが繰り返し報告されている(Fuentemilla et al., 2013; Kotani et al., 2003; Masaki et al., 2006). それ故、MHD 課題でチェンジ選択の有利性を学習した場合、実験 1 の結果と異なり、チェンジ選択時にフィードバックに対する期待が大きくなること予想された。

MHD 課題を反復遂行した場合、チェンジ選択率が漸増する(Franco-Watkins et al., 2003; Friedman, 1998; Granberg & Brown, 1995; Herbranson & Schroeder, 2010; Tubau & Alonso, 2003). MHD 課題の行動的側面を検討した多くの先行研究において、課題の繰り返し遂行がチェンジ選択率を増加させることが報告されているが、このチェンジ選択率は課題の背景にある数学的背景の理解とは異なると考えられている(see

experiment 1 of Tubau & Alonso, 2003). つまり, MHD 課題を反復遂行した場合, 選択と結果の関係性を経験的に学習し, チェンジ選択率が増加する. MHD 課題遂行前に, 他者が行なう MHD 課題を観察することが, 当該試行の選択傾向に影響を与えることが報告されていることから(Franco-Watkins et al., 2003), 選択と結果の関係性に関する情報が, MHD 課題のチェンジ選択増加に影響を与えていると考えることができる.

MHD 課題の学習は, 選択と結果の関係性の学習であることを考慮すると, 選択の種類別に当選回数を呈示することが MHD 課題の学習を促進する手段となる. MHD 課題を反復遂行する中で, チェンジ選択で非当選する回数を過大に見積もってしまうことが知られている(Petrocelli & Harris, 2011). また, Saenen, Van Dooren, & Onghena (2014)は, チェンジ選択, ステイ選択別に当選回数を表示することが, ワーキングメモリ負荷を低下させ, チェンジ選択率を増加させることを報告した. 以上の知見を踏まえると, 選択種類別に当選回数を呈示することが, 適切な選択と結果の関係性学習につながると考えられる.

MHD 課題が, 強化学習課題(Sutton & Barto, 1998)の特徴を有していることを考えると, 学習に伴ってフィードバック情報の価値は低下することが考えられる. 選択と結果の関係性を学習する強化学習課題において, 学習初期はフィードバックの情報価値は高いが, 学習が進むとフィードバックの必要性が低下するため, フィードバック情報価値は低下する(Morís, Luque, & Rodríguez-Fornells, 2013).

フィードバック情報価値を評価する手段として SPN 測定が挙げられる. SPN は, フィードバック前に生起する陰性の緩電位変動である(Brunia & Damen, 1988; Damen & Brunia, 1987). SPN はフィードバックの情報価値によって, 振幅を変調させる事が知られている(Chwilla & Brunia, 1991). 結果の知識がフィードバックとして呈示される課

題において、実際のパフォーマンス結果をフィードバックとして呈示する条件と虚偽のパフォーマンス結果を表示する条件では、実際のパフォーマンス結果フィードバックに対する SPN の方が大きかった。また、この情報価の大小による SPN 振幅の変調は、後頭部位で認められた。さらに、Kotani et al. (2003) も類似の結果を示している。情報価が高いフィードバックが呈示される際は、フィードバックに対する動機付けが高まるため SPN 振幅は増大した。

SPN 振幅は、行為と結果の随伴性を反映するため(Masaki et al., 2010)、強化学習による神経活動の変化を捉えるには適していると考えられる。実際に、Moris et al. (2013) は、強化学習に伴って SPN 振幅が低下することを示した。強化学習課題前期は、学習を促進するためにフィードバック情報が重要であるが、学習がある程度完了した課題後期は、フィードバックが重要でなくなる。Moris et al. (2013) は、この学習に伴うフィードバック情報価の低下に伴って、右前頭部位の SPN が低振幅化することを示した。

本学位論文の実験 1 では、MHD 課題のステイ選択が SPN 振幅を増大させることを示した。ステイ選択では認知的なバイアスが作用し、フィードバックへの期待が高まる可能性があったため、実験 1 の結果は、保守的な選択行動が SPN 振幅を増大させると解釈された(Hirao, Murphy, & Masaki, 2016)。しかしながら、実験 1 では、学習が進みチェンジ選択が多い実験参加者を解析から除外したため、学習が SPN に与える影響は検討できなかった。本実験の目的は、MHD 課題の反復遂行によるチェンジ選択の有利性学習を SPN 記録により証明することであった。先行研究において、MHD 課題の行動的側面を検討している研究は数多く存在するが、神経活動を検討している研究はこれまでなかった。

第2章 方法

3.2.1. 実施日時・場所

本実験は、2014年11月9日から12月8日にかけて、早稲田大学100号館F棟570実験室で実施された。実験室は、防音のシールドルームで、参加者は外部刺激の影響を受けることなく課題を遂行することが可能であった。室内の温度は、エアコンによって実験者の要望に合わせて調整した。また、実験中、参加者の方とコミュニケーションをとるため、実験室内の卓上にマイクロフォンとスピーカーを設置した。実験中の参加者の様子を確認できるように、実験者の後方にはカメラが設置された。

3.2.2. 参加者

早稲田大学に所属する常用手が右手の大学生28名(男性18名、女性10名、平均年齢 20.4 ± 1.4 歳)が本実験に参加した。常用手は、エディンバラの利き手調査質問紙(Oldfield, 1971)を用いて評価した。本研究の実験1に参加していただいた参加者は含まれなかった。脳波解析において十分な加算回数を得られなかった参加者6名は解析から除外したため、統計解析を行った参加者は、大学生21名(男性12名、女性9名、平均年齢 20.3 ± 1.4 歳)であった。全ての参加者は、心身共に健康であり、治療中の疾病や継続的な薬物の服用はなかった。本研究は、早稲田大学の人を対象とする研究に関する倫理審査委員会から承諾を受けており、実験前には、全ての実験参加者からインフォームドコンセントを取得した。謝礼は、全ての実験参加者に対し、一律3600円が支払われた(結果フィードバック刺激に対する動機付けを高める目的で、実験前には、「課題パフォーマンス結果に従い、謝金を支払う」という虚偽の指示を与えた)。

3.2.3. 課題

Presentation 9.20(Neurobehavioral 社製)を用いて、3枚カード MHD 課題を実験室内に再現した(Figure 7)。課題は、CRT モニタ(株式会社イーヤマ製)に呈示した。課題の流れは一般的な MHD 課題と同様であった(e.g., Granberg & Brown, 1995)。カードは水平方向に3枚並んで表示された。参加者は、左のカード、真ん中のカード、右のカードに対応した三つボタンを使用し、課題を遂行した。課題の始め、裏向きの3枚のカードが表示された。3枚カードの中から、第一選択として、1枚カードを選択してもらった。その 1000 ms 後、第一選択で選ばれなかった2枚のカードの内、はずれのカードがランダムにめくられ、「最終決定して下さい」と表示された。最後に、はじめの選択カードを変更するか(チェンジ選択)、変更しないか(ステイ選択)を意思決定した。最終意思決定から 2500 ms 後、3枚カードが全て開示され、参加者は当選カードの位置を確認することができた。当選カードには、「10」、非当選カードには「0」と記載されていた。カード上に設置された表には、当選・非当選の回数が、チェンジ選択、ステイ選択毎に累積表示された。この表は、課題遂行中常時表示されていた。表の数字は、フィードバック刺激呈示後に更新された。試行間間隔は、1000 ms, 2000 ms, 3000 ms の三種類をランダムで使用した。当課題の視野角は、水平方向 2.92 度、垂直方向 2.69 度であった。参加者は、1ブロック 60 試行で、6ブロック遂行した。また、主観的な報酬獲得確率を取得するため、実験前、実験中、実験後において、Tabau & Alonso (2003)が用いた質問紙への回答を求めた。この質問紙では、主観的報酬獲得確率を取得する他に、三択形式で、選択の有利性を尋ねる事ができた。

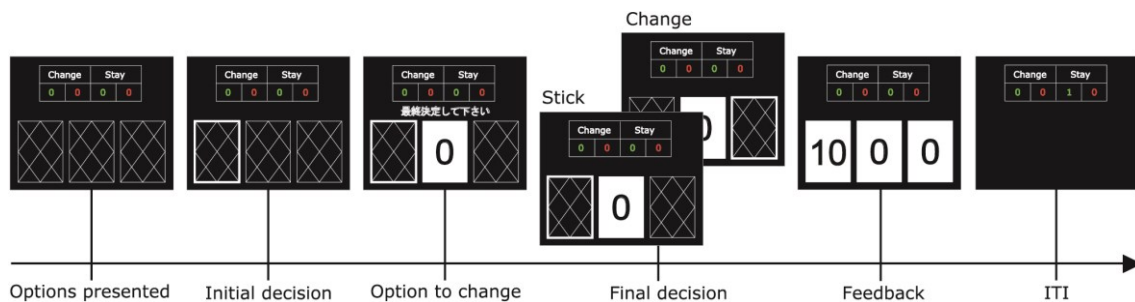


Figure 7. MHD 課題の流れ(実験 2). 「10」は 10 円獲得, 「0」は何も獲得できなかったことを示す.

3.2.4. 測定装置及び記録方法

脳波は、64ch デジタル脳波計(Biosemi 社製)を用いて、サンプリングレート 1024Hz で DC 記録した。脳波電極は、電極キャップを用い、国際 10-20 法に従った頭皮上 64 部位に装着した。さらに、フラットタイプ外部電極を使用し、眼電図(EOG)を記録した。左右のマストイドの電極から得られたデータは、オフラインで基準電極とした。左眼眼窩上下縁に取り付けた外部電極により、垂直方向の EOG を算出し、平行方向の EOG 算出には、両眼外側左右の眼窩縁に取り付けた電極を用いた。

3.2.5. 実験手続き

実験室において、紙面及び口頭で詳細な実験説明を行った後、インフォームドコンセント記入を求めた。同意が得られた参加者に対し、エディンバラの利き手調査質問紙を行った。その後、シールドルームに移動し、測定のための電極を装着した。電極装着後、計 5 試行の練習試行を行った。本実験では、表形式で、当選/非当選回数をチェンジ/ステイ選択毎に累積表示した。表呈示を行ったため、上下方向の大きな眼球運動が予想された。SPN 測定区間における EOG アーチファクトの減少に努めるため、「最終意思決定のボタン押しから、フィードバック刺激までは、最終意思決定で選択するカードに視線を向けて下さい」という教示を与えた。また、課題遂行直

前に MHD 課題における学習を進めるための教示を与えた。

3.2.6. データ解析

参加者は、実験 1 と同様に手元に設置された三つのボタン押しにより、カードを選択した。ボタン押しに失敗した試行のデータは妥当でないため、解析の際、除外した(ボタン押しの失敗が含まれた試行とは、以下のような試行であった。最終選択において、既に表向きになったカードを再度選択した試行、不必要なボタンの連打がみられた試行、第一選択からフィードバック呈示まで、特定のボタンを押したままになっていた試行)。

統計解析は SPSS 22(IBM 社製)を用いて行った。時系列の要因は、1 から 3 ブロックを前半、4 から 6 ブロックを後半とした。分散分析では、Mauchly 球面性の検定を行い、球面性の仮定が棄却された場合は、Greenhouse-Geisser の ϵ を用いて自由度修正をした後に有意性の検定を行った。下位検定として、Bonferroni 補正を使用した多重比較を行った。全ての統計解析において、有意水準は 5%未満であった。

行動指標

主観的報酬獲得確率

時系列毎のチェンジ選択、ステイ選択時の主観的報酬獲得確率は逆正弦変換した後、時系列(課題前、3 ブロック終了時、課題後) × 最終意思決定(チェンジ選択、ステイ選択)の二要因分散分析に供した。

主観的な選択の有利性

課題前、3 ブロック終了時、課題後に行った質問紙上で、三択(1. ステイ選択、2. チ

チェンジ選択, 3. どちらも同じ)を用いて, どの選択が有利だと思えるか尋ねた. また, 同時になぜそのように考えるか自由記述で回答を求めた. 得られた三択データは, ノンパラメトリック検定で統計検定を行った. Cochran の検定を用いて, 時系列要因(課題前, 3 ブロック終了時, 課題後)の差を比較した後, McNemar 検定にて多重比較を行った.

チェンジ選択率

ボタン押し失敗等により妥当でない試行を取り除いた後に, 残った試行の内, チェンジを選択した割合を算出した. 割合データは, 正規分布を示さないため, 逆正弦変換を行った後, 時系列(前半, 後半)について t 検定で, 統計解析を行った.

最終選択における意思決定時間

チェンジ選択, ステイ選択毎に意思決定時間を算出した. 本実験における意思決定時間の分布は, 対数正規分布を示したため, 意思決定時間は対数変換を行った後, 時系列(前半, 後半) × 最終意思決定(チェンジ選択, ステイ選択)の二要因分散分析に供した.

生理指標

SPN

Vision Analyzer2(Brain Products 社製)を用いて解析した. 脳波データは, 前半, 後半でエポックを切り出した後, Gratton & Coles 法を用いて, EOG アーチファクトを取り除いた(Gratton et al., 1983). その後, フィードバック刺激呈示を 0 ms とし, 前 3000 ms, 後 1000 ms のエポックを切り出した. ベースラインは, -2700 ms から -2500 ms の平均電位であった. EOG 以外のアーチファクトを除去するため, $\pm 100 \mu\text{V}$ の基準

より大きな変動がみられた試行は取り除き，条件毎に加算平均を行った．20 試行以上の加算が得られない条件がある参加者は，解析から除外した．SPN はフィードバック刺激前 100 ms の平均電位の値として算出した．統計解析では，F3, F4, C3, C4, P3, P4 の頭皮上部位を用い，電極位置前後 (前頭部位，中心部位，後頭部位) × 電極位置左右 (左半球，右半球) × 時系列(前半，後半) × 最終選択(チェンジ選択，ステイ選択)の四要因分散分析に供した．

三次元脳内電流密度解析 (low resolution brain electromagnetic tomography: LORETA)

LORETA-KEY software, v20170220 を用いて電源推定を行った (<http://www.uzh.ch/keyinst/NewLORETA/Software/Software.htm>). 学習に伴う SPN 振幅変化の脳内発生源を検討する目的で，チェンジ選択時，ステイ選択時毎に，前半と後半の SPN 振幅差について発生源推定を行った．Statistical non-Parametric Mapping (SnPM) (Pascual-Marqui et al., 1994) を用いて，有意差検定を行った．

第3章 結果

3.3.1. 行動指標

客観的報酬獲得確率

本実験では、コンピュータプログラムを用いて、MHD 課題を再現した。コンピュータプログラムの妥当性を検証する目的で、カード位置や選択の違いによって、実際の報酬獲得確率がどのようなであったかを個人毎に算出した(Table 2)。3枚のカードには、一様に報酬選択肢が含まれていた(左: 33.0%, 中: 32.9%, 右 34.1%)。課題前半にチェンジ選択を行った際は、65.0%、後半にチェンジを選択した場合は、64.9%の報酬獲得確率であった。課題前半にステイ選択を行った際は、31.9%、後半にステイを選択した場合は、32.6%の報酬獲得確率であった。

Table 2. 個人毎の客観的報酬獲得確率

Participants	Actual % win (%)			
	1st half		2nd half	
	% win change	% win stick	% win change	% win stick
1	63.2	20.6	60.7	30.0
2	67.3	38.8	69.3	33.3
3	58.1	32.1	70.8	26.9
4	65.7	35.1	66.9	27.0
5	65.2	34.5	64.0	28.9
6	67.6	33.3	63.8	24.4
7	71.1	24.6	65.9	22.7
8	65.4	20.5	66.4	44.1
9	70.8	34.6	45.9	25.7
10	66.3	38.5	66.4	42.5
11	58.4	22.6	65.1	35.2
12	63.3	36.7	68.0	24.7
13	71.1	38.4	64.5	33.9
14	64.3	31.3	67.4	38.6
15	68.1	29.4	64.8	41.8
16	67.9	27.5	65.3	30.6
17	66.9	34.1	66.1	33.8
18	58.7	36.6	67.1	30.8
19	53.1	30.9	71.7	35.0
20	68.1	31.8	59.0	37.8
21	64.7	38.4	63.1	35.7
Mean	65.0	31.9	64.9	32.6

主観的報酬獲得確率

課題遂行前に実施した質問紙では、20名(21名中)が、チェンジ選択と、ステイ選択の報酬獲得確率は等しく50%と回答した。1名の参加者は、チェンジ選択時、ステイ選択時の報酬獲得確率は、33%だと回答した。3ブロック目終了時では、18名はチェンジ選択と、ステイ選択の報酬獲得確率は等しく50%と回答した。全てのブロック終了時には、16名がチェンジ選択と、ステイ選択の報酬獲得確率は50%と回答した。

主観的な選択の有利性

質問紙を用いて、いずれの選択が最良であるか尋ねた(1. ステイ選択, 2. チェンジ選択, 3. どちらも同じ)。チェンジ選択が有利と回答した参加者数と、それ以外(ステイ選択, どちらも同じ)と回答した参加者数について、時系列要因によって差が生じるか検討した。課題前は、チェンジ選択の方が有利だと回答した参加者は誰もいなかったが(0.0%)、3ブロック終了時では、47.6%、課題終了時には、66.7%の参加者がチェンジ選択の方が有利だと回答した。この時系列要因による差は、統計的に支持された($Q(2) = 22.29, df = 2, p < .0001$)。下位検定の結果、課題前と比較して、3ブロック終了時、課題終了後にはチェンジ選択の有利性に気づいた参加者が多いことが明らかになった(それぞれ、 $p = .002, p = .0001$)。3ブロック終了時と課題終了時の差は統計的に支持されなかった($p = .13$)。

チェンジ選択率

Figure 8 左に、ブロック毎のチェンジ選択率を示した。逆正弦変換後のチェンジ選択率について、ブロック(ブロック 1/2/3/4/5/6)の差を比較した。一要因分散分析の結

果，ブロックの主効果が認められた($F(5, 100) = 7.42, \varepsilon = .53, p = .0005$)。下位検定の結果，チェンジ選択率は，ブロック 1 よりもブロック 4, 5, 6 で高かった($ts(20) > 3.39, ps < .003$)。

また，時系列(前半，後半)によるチェンジ選択率の差を t 検定で比較した。その結果，前半(53.9%, $MSE = 2.8\%$)に比べ後半(65.5%, $MSE = 3.7\%$)で有意にチェンジ率は高かった($t(20) = 3.70, p = .001$)。

意思決定時間

Figure 8 右は，選択別意思決定時間の推移を示している。意思決定時間のデータは正規分布を示さなかったため，対数変換を行った後，統計検定に供した。二要因分散分析の結果，ブロックの主効果が認められた($F(5, 100) = 10.45, \varepsilon = .50, p < .0001$)。ブロック 1 とブロック 4, 5, 6 の間，ブロック 2 とブロック 5 の間，ブロック 3 とブロック 4 の間の差が統計的に認められた($ts(20) > 3.58, ps < .05$)。

選択別の意思決定時間に関して，時系列(前半，後半)の効果を二要因分散分析で検討した。その結果，時系列の主効果が有意であった($F(1, 20) = 20.23, p = .0002$)。選択の主効果($F(1, 20) = 1.93, p = .18$)，及び交互作用は認められなかった($F(1, 20) = 0.11, p = .74$)。

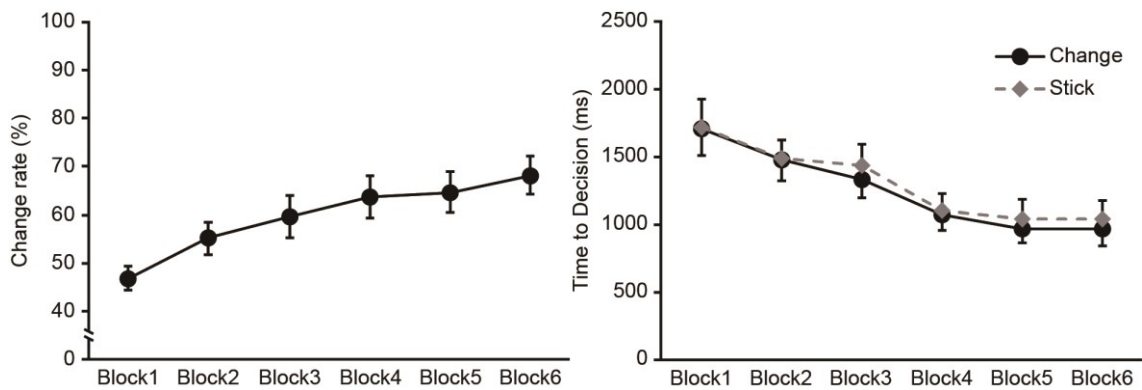


Figure 8. 前半, 後半のチェンジ選択率(左), 最終選択におけるチェンジ選択, ステイ選択毎の意思決定時間(右)

3.3.2. 生理指標

SPN

Figure 9 に SPN 波形及び頭皮上分布を示した。四要因分散分析の結果, 電極位置左右の主効果が認められた($F(1,20) = 6.69, p = .018$).

電極位置前後と時系列の交互作用が認められた($F(2,40) = 4.32, p = .020$). 前頭部位の電極(F3/F4)において, 前半から後半にかけて SPN 振幅は低下した($t(20) = 2.36, p = .028$). また, 電極位置前後と選択の交互作用が認められた($F(2, 40) = 3.91, \epsilon = .69, p = .046$). 前頭部位の電極(F3/F4)において, ステイ選択時よりもチェンジ選択時の SPN 振幅が大きかった($t(20) = 2.69, p = .014$).

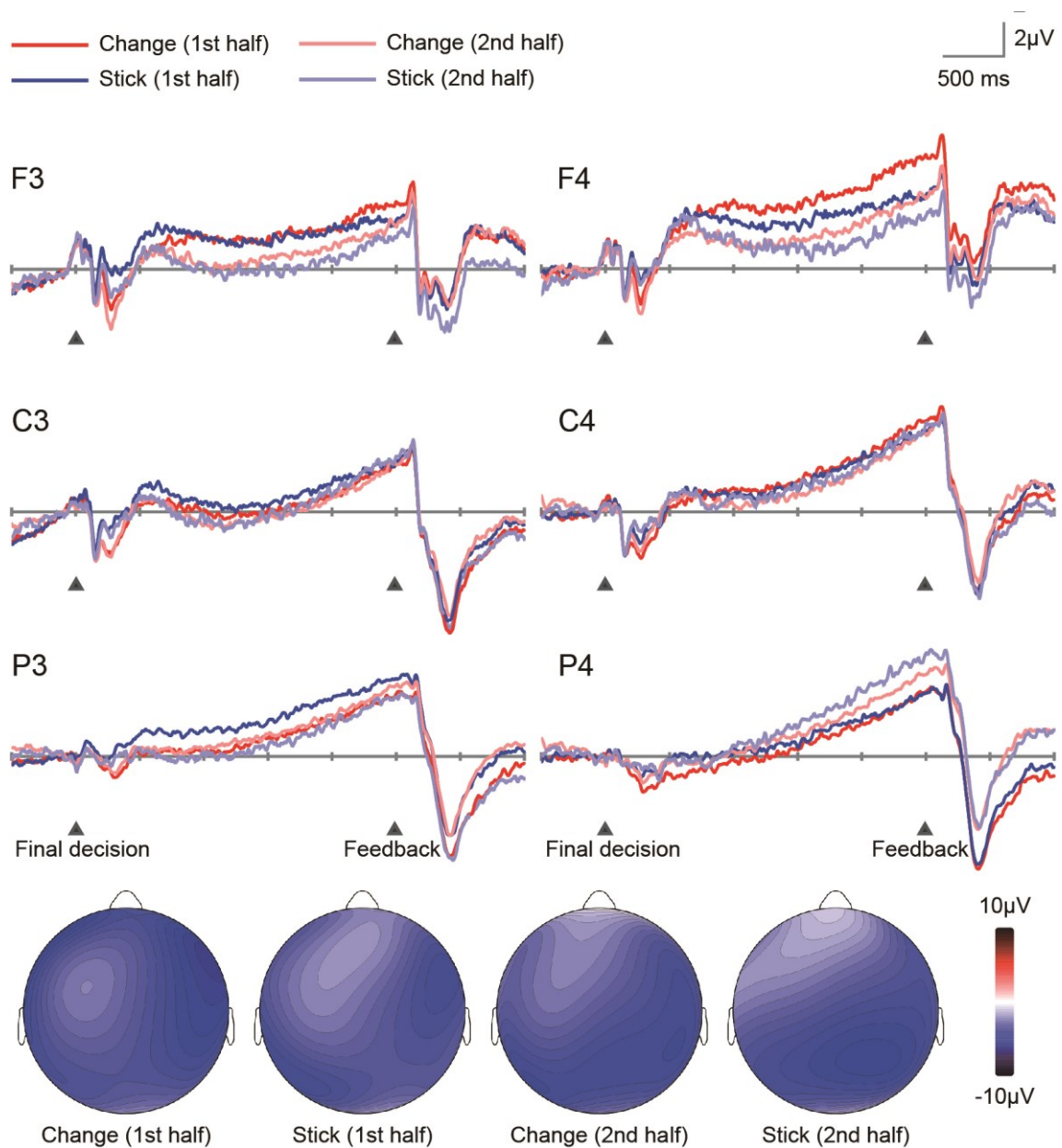


Figure 9. F3/F4, C3/C4, P3/P4 部位における時系列, 最終意思決定別の SPN 波形及び頭皮上分布.

SPN (数学的に無謬な回答を行った 16 名に限定)

脳波解析に用いた 21 名の内, 5 名が数学的に起こりえない回答を行った(例えば, チェンジの報酬獲得確率は 50%, かつステイの報酬獲得確率は 33%), MHD 課題における学習の効果をよりクリアに検証するため, 数学的に誤った回答を行った 5 名

のデータを除外した。当該解析では、電極部位を F4 及び P4 に絞って統計解析した。右前頭部位(F4)は、学習にともなうフィードバック情報価の低下を反映し、SPN 振幅が低下すると報告されている部位であった(Morís et al., 2013)。また、右頭頂部位は、フィードバック情報価の大きさを反映し、振幅が変化することが報告されている部位であった(Chwilla & Brunia, 1991)。

数学的に無謬な回答を行った 16 名の SPN 波形を Figure 10 に示した。当該データに対し、電極(F4, P4) × 時系列(前半, 後半) × 選択(チェンジ選択, ステイ選択)の三要因分散分析を行った結果, 選択の主効果が有意であった, チェンジ選択の際に SPN は大きかった($F(1, 15) = 6.55, p = .022$)。また, 電極と時系列の交互作用が認められた($F(1, 15) = 8.13, p = .012$)。F4, P4 の両電極において, 前半と後半の差が有意な傾向であった(それぞれ, $p = .096, p = .077$)。前半において, F4 の SPN 振幅は P4 よりも大きい傾向だった($p = .061$)。

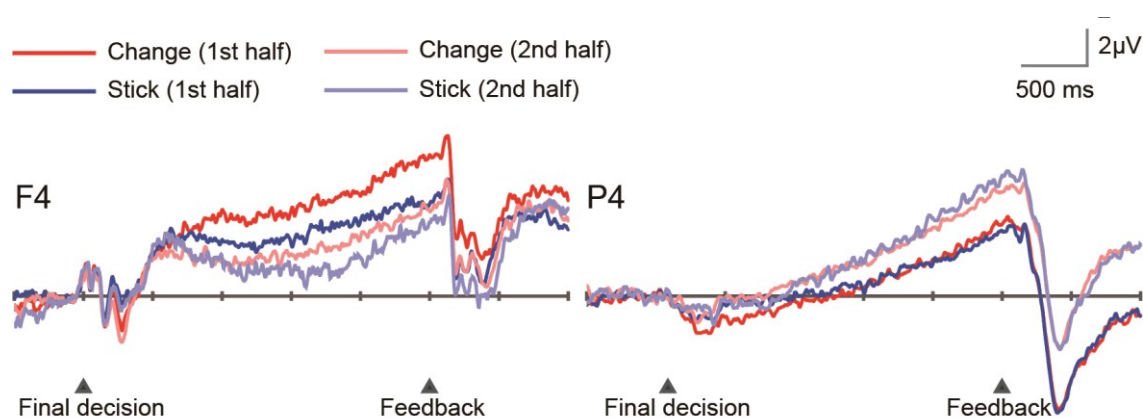


Figure 10. 数学的に無謬な回答を行った 16 名の SPN 波形。

LORETA を用いた電源推定

Precentral gyrus (右中前頭回): Brodmann area 43, X, Y, Z = 50, -10, 10 (mm), Insular(右島皮質): Brodmann area 13, X, Y, Z = 45, -10, 10 (mm)において, 後半(チェンジ選択

時)よりも前半(チェンジ選択時)の活動が大きかった($p < .05$).

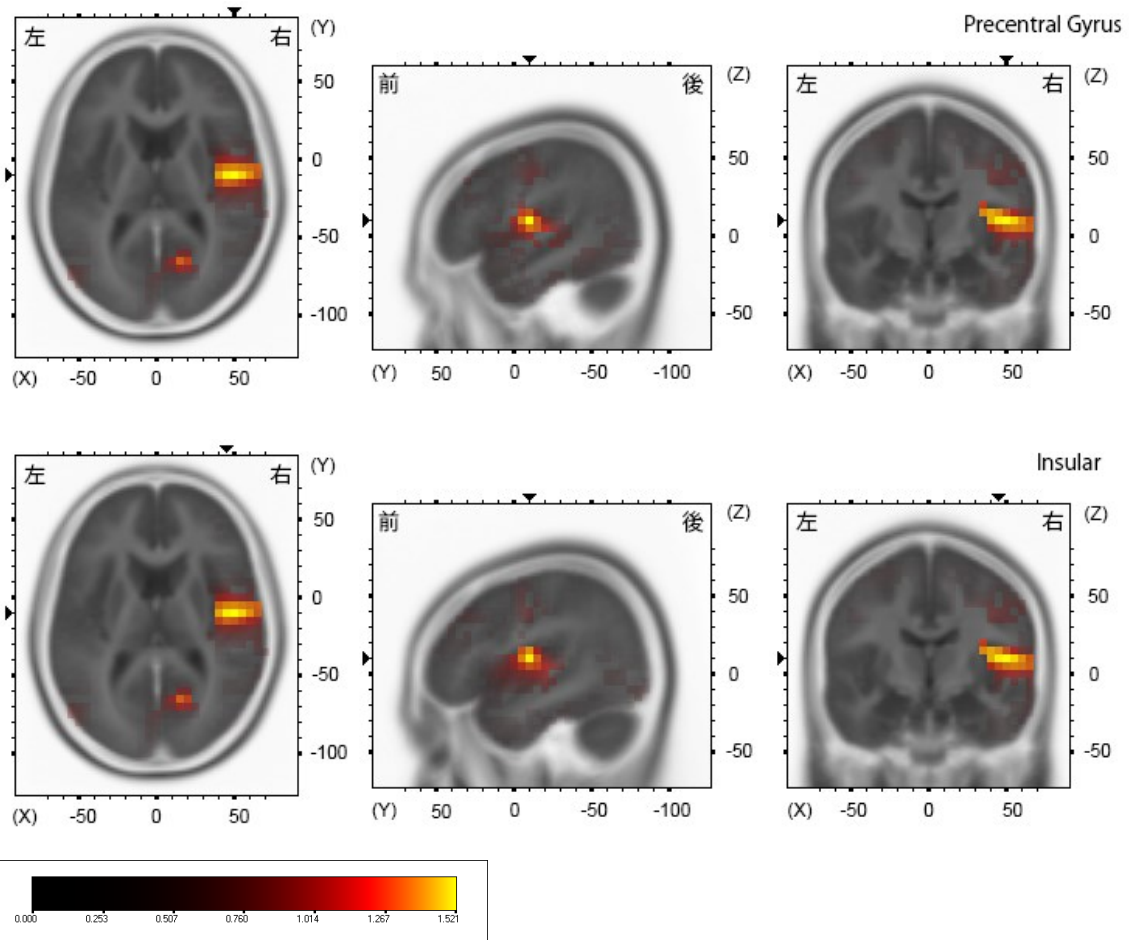


Figure 11. LORETA による電源推定の結果.

客観的報酬獲得確率とチェンジ選択率及び SPN の個人差

Table 3 に、客観的報酬獲得確率とチェンジ選択率の相関関係、Table 4 に、客観的報酬獲得確率と SPN 振幅の相関関係結果を示した。表中には、相関分析の r 値を示した。本実験では、コンピュータプログラムで MHD 課題を再現したため、参加者間で経験した報酬獲得確率は、理想的な確率(チェンジ選択: 66%, ステイ選択: 33%)から、わずかにばらつきがあった。経験した報酬獲得確率に関する参加者間の差が選択行動に影響を与える可能性があるため、経験した報酬獲得確率に関する参加者間

の差と、チェンジ選択率や SPN 振幅と相関分析を行った。しかしながら、いずれの相関分析においても統計的な有意性は認められなかった($p > .05$)。

Table 3. 客観的報酬獲得確率とチェンジ選択率の相関関係

	Actual % win (1st half)	
	% win change	% win stick
Change rate (1st half)	-.28	.11
	Actual % win (2nd half)	
	% win change	% win stick
Change rate (2nd half)	-.11	.35

Table 4. 客観的報酬獲得確率と SPN 振幅の相関関係

1st half				2nd half			
% win change		% win stick		% win change		% win stick	
F3 Change 1st half	.135	F3 Stick 1st half	-.138	F3 Change 2nd half	.072	F3 Stick 2nd half	-.245
F4 Change 1st half	.248	F4 Stick 1st half	-.431 [†]	F4 Change 2nd half	-.184	F4 Stick 2nd half	.074
C3 Change 1st half	.193	C3 Stick 1st half	-.131	C3 Change 2nd half	-.116	C3 Stick 2nd half	.040
C4 Change 1st half	.010	C4 Stick 1st half	-.403	C4 Change 2nd half	-.135	C4 Stick 2nd half	.063
P3 Change 1st half	-.040	P3 Stick 1st half	-.214	P3 Change 2nd half	-.095	P3 Stick 2nd half	.240
P4 Change 1st half	-.027	P4 Stick 1st half	-.262	P4 Change 2nd half	-.057	P4 Stick 2nd half	.173

†: $p < .10$

第4章 考察

本実験では、MHD 課題の反復遂行によって、チェンジ選択の有利性の学習が生じるのか検討した。また、学習が生じた場合、結果予期に関する神経活動は、どのように変調するのか、SPN を指標として検討した。MHD 課題の行動のみを検討した先行研究と同様に、MHD 課題の反復遂行によって、チェンジ選択率は有意に増加した。反復遂行によって、後半におけるチェンジ選択率は、65.5%に達した。これは前半のチェンジ選択率 53.9%よりも有意に高かった。チェンジ選択率の増加より、本実験の MHD 課題において学習が生じたといえる。また、前半から後半にかけて前頭部位の SPN 振幅は有意に低下した。

本実験の参加者の中に、MHD 課題に内包する数学的構造について知っている者は含まれなかった。課題遂行前に取得した主観的な報酬獲得確率に関する質問では、20名(21名中)が、チェンジ選択とステイ選択の報酬獲得確率は等しく 50%であると回答した。課題遂行後に取得した同様の質問を行った際には、16名の参加者がチェンジ選択とステイ選択の報酬獲得確率は等しく 50%であると回答した、一方、4名は、チェンジ選択では 50%だが、ステイ選択では 33%と回答した。この回答は、数学的には正しくないが(チェンジ選択、ステイ選択の報酬獲得確率の和は 100%になるべきである)、チェンジ選択の有利性を経験的に学習した結果であると考えられる。MHD 課題の反復遂行を通して、数学的な理解は進まなかったが、チェンジ選択の有利性を経験的に学習した。この結果は、行動指標のみを検討した他の先行研究と類似していた(e.g., Franco-Watkins et al., 2003)。

本実験では、コンピュータプログラムで MHD 課題を再現したため、参加者間で経験した報酬獲得確率は、理想的な確率(チェンジ選択: 66%, ステイ選択: 33%)から、わずかにばらつきがあった。経験した報酬獲得確率に関する参加者間の差が選

択行動に影響を与える可能性があった(e.g., subjective sampling bias; Hertwig & Erev, 2009). それ故, 経験した報酬獲得確率に関する参加者間の差と, チェンジ選択率や SPN 振幅と相関分析を行ったが, 統計的な有意性は認められなかった.

確率判断を伴う意思決定課題では, 参加者は maximizing strategy もしくは matching strategy を適用した選択行動を行うことが知られている(West & Stanovich, 2003). MHD 課題における maximizing strategy とは, 毎試行チェンジ選択を行うことである. 一方, matching strategy とは, 報酬獲得確率にあわせた選択配分を行うことであり, MHD 課題では, チェンジ選択率が 66.7%, ステイ選択率が 33.3%となることである. MHD 課題の選択行動を検討した先行研究においても, MHD 課題の反復遂行では, maximizing strategy が採用されないことが知られている(e.g., Herbranson & Schroeder, 2010). 本実験では, 360 試行の反復遂行を求められた. この試行数は, MHD 課題の行動面のみを検討した先行研究と比較して(e.g., 60 試行程度の反復遂行), 多い繰り返しであった. 本実験における MHD 課題の反復遂行(360 試行)では, matching strategy にあてはまる選択行動が観察された.

選択の有利性に関する主観的な報告では, 課題遂行前は, チェンジ選択が有利だと回答した参加者はいなかったが, 3 ブロック目終了時には, 47.6%, 課題の反復終了時には, 66.7%の参加者がチェンジ選択のほうが有利だと回答した. 課題遂行前と 3 ブロック終了時の差は統計的に認められたが, 3 ブロック終了時と課題の反復終了時の差は, 統計的に有意でなかった. この統計結果は, チェンジ選択率の結果と符合していた. 3 ブロック目までは, 大きなチェンジ選択率の増加が観察できたが, 4 ブロック目以降は, チェンジ選択率の増加がわずかであった. これらの結果は, 3 ブロック目までに学習はある程度完了していたことを示していた. 言い換えると, 4 ブロック目以降のフィードバック情報価は, 3 ブロック目以前よりも小

さかったといえる。この解釈は、意思決定時間の結果(時系列とともに短縮していたが、特に3ブロック目までの短縮が大きかった)とも一致していた。本実験では、360試行のMHD課題反復遂行が求められた。学習を進める必要があるために、前半180試行のフィードバック情報は、後半180試行と比較して、非常に重要度が高く、情報価値が高かったと考えられる。

行動指標の結果と一致して、SPN振幅は、後半で低振幅化した。この結果は、SPN振幅はフィードバック情報値の低下を反映し、学習とともに低下するという我々の仮説と一致したものであった。学習に伴うSPN振幅の変化を検討した研究論文は非常に少ない。Moris et al. (2013)は、強化学習課題を用いて、学習に伴うSPN振幅の変化を検討した。SPN振幅は、報酬への期待を反映して、増大することが繰り返し報告されており(Kotani, Hiraku, Suda, & Aihara, 2001; Masaki et al., 2006), 学習が進み報酬獲得確率が高くなると、SPN振幅が増大することが考えられたが、彼らの研究では、SPNが学習の進行に伴って低振幅化した。さらにこの低振幅化は、右前頭部位で大きく認められた。この結果は、学習に伴うフィードバック情報値の低下がSPNに影響を与えたと考えられた。彼らの解釈は、本実験で得られた結果とも一致している。

しかしながら、本実験の学習に伴うSPN振幅の変化は他の解釈も可能であると考えている。本実験のSPN振幅は、学習に伴って右前頭部位で低下した、その一方、右頭頂部位では増大する傾向にあった。Moris et al. (2013)以前の研究では、フィードバックの情報値は右頭頂部位のSPN振幅に影響を与えられていた(Chwilla & Brunia, 1991)。学習とともにフィードバックの情報値は増大しており、右頭頂部位のSPNは振幅増大した。水平方向にダイポールが存在、右前頭部位では振幅が低下したのかもしれない。右頭頂部位における振幅増大は有意な傾向であ

ったことを考慮すると、この解釈は妥当でない可能性もある。学習に伴うフィードバック情報価の変化と SPN の関係性について、より明確にするには、さらなる研究が必要である。しかしながら、前頭部位の SPN 振幅は情動的な動機付けの影響を受けることを考慮すると、本研究の結果は、学習に伴いフィードバック情報価が低下した結果、フィードバックへの情動的な動機付けが低下し、前頭部位の SPN が低振幅化したと解釈するのが妥当なのかもしれない。

本学位論文の実験 1 では、認知的なバイアスに起因して、チェンジ選択時よりもステイ選択時に SPN 振幅は大きかった。しかしながら、学習が進行するに従い、チェンジ選択時の SPN 振幅は増大すると考えられたため、本実験では、選択と時系列の変化で交互作用(チェンジ選択とステイ選択の SPN 振幅を比較した際に、前半では、ステイ選択時の SPN 振幅がより大きく、後半ではチェンジ選択の方が大きい)が認められると予想した。しかしながら、本実験では、一貫してステイ選択時よりもチェンジ選択時に SPN 振幅は大きかった。仮説と一致しない結果が得られた原因として、選択別の結果表示を採用したことが考えられる。実験 1 では、選択別の結果を表形式で呈示しなかったが、実験 2 では、学習を促進する目的で採用した。実際、本実験の参加者は選択と結果の関係性を学習し、ブロック毎にチェンジ選択率を漸増させた。しかしながら、表形式の表示することで、チェンジ選択の有利性が時系列的により早い段階で明確になってしまったため、本実験ではステイ選択の際の振幅増大が認められなかったのかもしれない。SPN の加算回数が少なくなるため解析の妥当性はないが、1 ブロック目のみの SPN 振幅を算出した場合、数値的には、チェンジ選択よりもステイ選択で大きかった(解析の妥当性がないため、統計的な処理は行っていない。また図示もしなかった)。

フィードバックへの動機付けは、SPN 振幅に影響を与えることが繰り返し報告されている(Fuentemilla et al., 2013; Masaki et al., 2006; Zheng et al., 2015; Zheng & Liu, 2015). ギャンブル課題において、報酬獲得、損失の順序効果を検討した場合、金額の大きな報酬を得た後の試行で、SPN 振幅が増大する(Masaki et al., 2006). つまり、前の試行で大きな金額を獲得した場合、当該試行では、フィードバックに対するポジティブな情動的な動機付けが高まり、SPN 振幅が増大する. 本実験で観察されたチェンジ選択時の SPN 振幅増大は、報酬獲得へのポジティブな情動的な動機付けが原因だと考えられる.

本実験では、学習に伴って SPN 振幅が低下すること、またステイ選択よりもチェンジ選択時に SPN 振幅は増大することを示した. また、これらの差は、前頭部位(F3/F4)において選択的に認められた. SPN の主な発生源は右の島皮質であることから、SPN は右半球優位性を有する. 本実験の三次元電流密度解析も、学習に伴うチェンジ選択時の振幅低下は、右の島皮質の活動が低下していることを示していた. しかしながら、学習による振幅低下及びチェンジ選択時の振幅増大は、右半球に限定されなかった. ポジティブな情動(i.e., 接近動機)が左前頭部位をより賦活し、ネガティブな情動(i.e., 回避動機)は右前頭部位を賦活させることが報告されている(valence model; Davidson, Ekman, Saron, Senulis, & Friesen, 1990). 通常は右半球優位性を有する SPN が、ポジティブな事象の予期の際には、左右差がなくなることも先行研究で示されている(Ohgami et al., 2006). 本実験では、有利な選択肢の学習を行った. フィードバックに対するポジティブな報酬予期が、左前頭部位に影響を与えた結果、SPN 振幅変化の左右差は消失したのかもしれない.

本実験は、結果のポジティブな予期が SPN 振幅を増大させること、学習によるフィードバック情報価の低下が SPN 振幅を低下させることを同時に示した初めて

の研究である。Gating model によると(Brunia, 1999), SPN は課題の特徴に影響を受けることが考えうる。また, 島皮質, 前帯状回をはじめとする複数の脳領域の活動が SPN の生起には関与している(Kotani et al., 2015)。つまり, 主発生源である島皮質以外の領域活動が SPN 振幅に影響を与える可能性もある。しかしながら, 脳波データを解析して得られる結果は, 空間分解能の低く, いずれの脳領域活動が SPN 振幅に影響を与える要因を検討する際には, fMRI 等の空間分解能が高いデータを使用し, その要因に関する脳領域特定することが求められる。

本実験では, チェンジ選択時及びステイ選択時において, 妥当な SPN を算出するために, 偏った選択傾向を示した 7 名の参加者データを除外したが, この除外した 7 名の偏った選択傾向にも意味があると考えられる。SPN の加算回数が不足しているため, 本実験ではこの 7 名の神経活動について検討できなかった。今後は, 実験計画を工夫することで, この偏った選択傾向に関する神経活動も検討されるべきである。また, 本実験では, 性格特性などの個人差を取得しなかったが, 個人特性は, MHD 課題のパフォーマンス及び SPN 振幅に影響を及ぼす可能性が考えられる。例えば, 選択の正解, 不正解によって金銭が与えられるようなギャンブル課題において, ハイリスクな選択とローリスクな選択では, ハイリスク選択の際に SPN 振幅は増大することが知られている(Zheng et al., 2015)。リスクの高い選択に対する好悪は, MHD 課題の選択及び SPN 振幅に影響を与える可能性があった。また, MHD 課題のような数学的計算を要する課題に直面した場合, 利益を最大とする選択を数学的に解き明かそうとする者, 試行錯誤で選択と結果の関係性を暴こうと試みる者等が存在する。利益を最大にする選択肢を見つけるために利用する選択方略にも個人差が存在すると考えられる。この選択に関する方略は, SPN 振幅に影響を与える可能性が大きい。例えば, MHD 課題の解について数学的な解法がわからな

い中でも、MHD 課題の背景には何らかの解法が存在すると信じて課題を遂行する者、背景に存在する数学的仕組みを全く気にせず課題を遂行する者では、結果フィードバックに対する動機付けは異なると考えられる。主観的な信念が SPN 振幅に影響を与えることは本学位論文の実験 1 でも示されている(Hirao et al., 2016)。今後は、性格特性や選択傾向等の個人特性と、SPN 振幅の関係性も明らかにする必要がある。

MHD 課題の選択行動のみを検討した先行研究の結果と一致して(e.g., Tubau & Alonso, 2003), 本実験の参加者も漸進的にチェンジ選択率を増加させた。また、本実験では、MHD 課題において、学習に伴って SPN 振幅が低下することを示した。これらの結果は、選択と結果の関係性を学習し、フィードバック情報価が低下すると共に、SPN 振幅が低下することを示していた。

第IV部 実験 3: 内受容感覚とフィードバック予期

第1章 序論

刺激予期中は、刺激呈示の直前に、心拍数が減少することが知られている(Damen & Brunia, 1987; Poli, Sarlo, Bortoletto, Buodo, & Palomba, 2007). Damen & Brunia (1987) は、時間評価課題を用いて、結果予期中のフィードバック刺激呈示直前には、心拍数が低下し、同時に SPN が生起することを示した。全身の生理的な状態はたえず変化している。内蔵を含めた身体内部の生理的な状態に関する感覚は、内受容感覚 (interoception) と呼ばれ(Craig, 2002), 身体の状態に関する情報は、全身に張りめぐらされた求心性線維を介し、島皮質に投射されることが知られている(Craig, 2002, 2003a; Critchley et al., 2004). 特に、右の島皮質前部は、心拍活動の気づきに重要な役割を担うと考えられている(Critchley et al., 2004). このような経路で得た生理的な情報は、運動強度の調整などに利用される可能性が示唆されており(Paulus et al., 2010, 2012), アスリートは、この内受容感覚変化に関する予期機能が非アスリートと異なることが報告されている。たとえば、日頃過酷な環境下で試合を行うアドベンチャーレーサーは、内受容感覚が変化する時に、あらかじめ右島皮質を賦活し、内受容感覚の変化を予期することにより、内受容感覚が変化する過酷な環境下でも最適なパフォーマンスを行うことができる(Paulus et al., 2012).

内受容感覚変化に敏感であるアスリートとして、陸上競技の長距離選手が挙げられる。長距離競技では、競技中に自らの身体内部の状態をモニタリングし、最良の運動強度に調整することが、高パフォーマンスにつながる。長距離選手は、レース前に決められたペース通りに走る能力を有することが報告されていることから(Takai, 1998), 長距離選手は内受容感覚への気づきが優れている可能性が高いと示唆される。

本実験では、内受容感覚への気づきに関する能力が、結果予期中の神経活動に与える影響を検討した。内受容感覚への気づき能力が高い群として、長距離選手を採

用した。コントロール群として、短距離選手を採用した。

心拍カウント課題を用いて、両群の内受容感覚の気づきに関する能力を評価した。この課題は、一定期間内の心拍数をカウントしてもらう簡単な課題であるが、内受容感覚を評価する目的で多くの先行研究で用いられているものである (Pollatos, Kirsch, & Schandry, 2005; Pollatos & Schandry, 2004)。内受容感覚とは、内蔵を含めた身体内の生理的変化に関する感覚であるが、この心拍カウント課題では、心拍由来の感覚を評価するのに適していると考えられた。時間評価課題を用いて、両群の結果フィードバック予期に関する神経活動変化を測定した。短距離選手と比較して、長距離選手は、内受容感覚への気づき能力が高いことが予想された。時間評価課題では、両群において、フィードバック呈示前の心拍数低下が観察される。内受容感覚変化に敏感である長距離選手は、短距離選手と比較して、心拍数低下前により大きな SPN 振幅(より大きな島皮質の活動)が生起すると予想された。

第2章 方法

4.2.1. 実施日時・場所

本実験は、2017年9月1日から9月30日にかけて、早稲田大学100号館F棟570実験室で実施された。実験室は、防音のシールドルームで、参加者は外部刺激の影響を受けることなく課題を遂行することが可能であった。室内の温度は、エアコンによって実験者の要望に合わせて、調整した。また、実験中、参加者の方とコミュニケーションをとるため、実験室内の卓上にマイクروفオンとスピーカーを設置した。実験中の参加者の様子を確認できるように実験者の後方には、カメラが設置されていた。

4.2.2. 参加者

早稲田大学に所属し、陸上競技に従事している大学生 32 名が本実験に参加した。参加者は普段従事している競技種目によって群分けされた。短距離競技(100 m, 200 m, 400 m, 100 m ハードル, 110 m ハードル, 400 m ハードル)に従事している参加者は 16 名(男性 14, 女性 2 人, 平均年齢 19.94 ± 1.02 歳), 長距離競技(3000 m 障害, 5000 m, 10000 m, ハーフマラソン, フルマラソン)に従事している参加者は 16 名であった(男性 14, 女性 2 人, 平均年齢 19.69 ± 1.08 歳)。常用手は、エディンバラの利き手調査質問紙(Oldfield, 1971)を用いて評価した。本研究は、早稲田大学の人を対象とする研究に関する倫理審査委員会から承諾を受けており、実験前には、全ての実験参加者からインフォームドコンセントを取得した。

4.2.3. 課題

心拍カウント課題, 時間評価課題といった実験課題は, Presentation 9.20(Neurobehavioral 社製)を用いて, コンピュータプログラムで作成した。時間評価課題において, 視覚刺激は参加者の 1 m 前に設置した CRT モニタ(株式会社イーヤマ製)に呈示された。

心拍カウント課題

一定時間の心拍数をカウントする課題であった。課題の成績が良いほど, 内受容感覚が高いと考えられている(Godefroid, Pourtois, & Wiersema, 2016; Ring & Brener, 1996)。参加者は心臓の拍動に注意を向けることで, 心拍数をカウントすることを求められた。カウントは 6 試行行った。それぞれの試行におけるカウント時間は, 三種類(25 秒, 35 秒, 45 秒)の長さから, ランダムに一種類選ばれた。以下の式でパフォ

パフォーマンスを評価した。

$$\text{Perception score (PS)} = 1/6 \sum (1 - \frac{|\text{recorded heartbeats} - \text{counted heartbeats}|}{\text{recorded heartbeats}}).$$

時間評価課題

3秒間を正確にカウントする課題であった。カウント開始の合図を示す音刺激(1000 Hz)が呈示された後、参加者は3秒経過したと思ったタイミングでボタン押しを行った。ボタン押しの2500 ms後、時間評価パフォーマンスに関するフィードバックが呈示された(Figure 12)。ボタン押しは、右手人差し指を使用した。ボタン押しに関連した脳活動を同定する目的で、フィードバックが呈示されない条件を設けた。1ブロックは、60試行で構成されており、フィードバック有り条件2ブロック、フィードバック無し条件1ブロックを遂行した。フィードバック無し条件は、予期とは関係のない運動関連の神経活動を同定する目的で設置された。

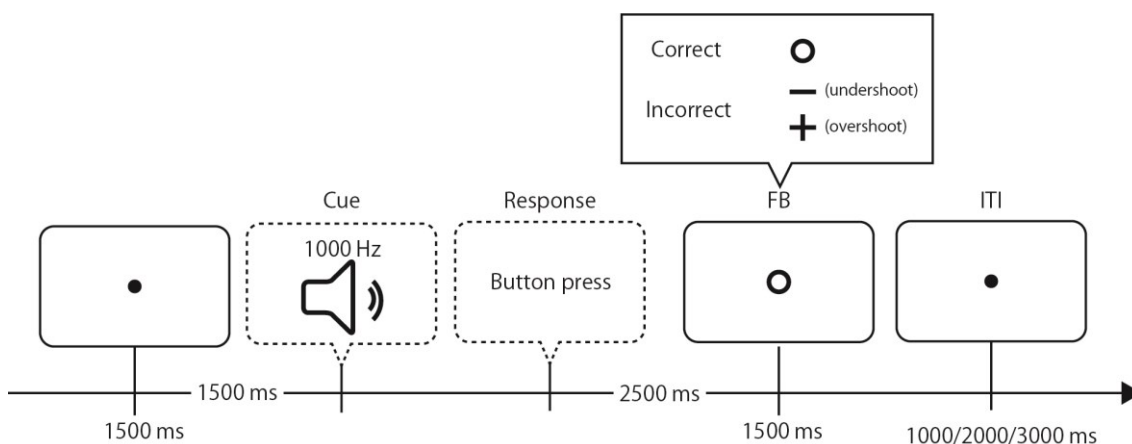


Figure 12. 時間評価課題の流れ。

4.2.4. 測定装置及び記録方法

脳波は、128ch デジタル脳波計(Biosemi 社製)を用いて、サンプリングレート 1024Hz で DC 記録した。電極は、Biosemi 電極キャップを用い、頭皮上 128 部位に装着した。

また、眼電図(electrooculogram : EOG)の記録には、フラットタイプ外部電極を用いた。左右のマストイドの電極から得られたデータは、オフラインで基準電極とした。左眼眼窩上下縁に取り付けた外部電極により、垂直方向の EOG を記録し、平行方向の EOG 記録には、両眼外側の眼窩縁に取り付けた電極を用いた。心拍は、第 I 誘導で導出した。

4.2.5. 実験手続き

実験室において、紙面及び口頭で詳細な実験説明を行った後、インフォームドコンセント記入を求めた。同意が得られた参加者は、シールドルームに移動し、測定のための電極を装着した。

4.2.6. データ解析

統計解析は SPSS 22(IBM 社製)を用いて行った。分散分析では、Mauchly 球面性の検定を行い、球面性の仮定が棄却された場合は、Greenhouse-Geisser の ϵ を用いて自由度修正をした後に有意性の検定を行った。タイプ I エラー率の増大をさけるため、下位検定として、多重比較を行う際には、Bonferroni 補正を使用した。全ての統計検定において有意水準は 5%であった。

生理指標

SPN

Vision Analyzer2(Brain Products 社製)を用いて解析した。脳波データは、フィードバック刺激呈示を 0 ms とし、前 6000 ms、後 1000 ms の 7000 ms エポックを切り出した。エポックを切り出した後、Gratton & Coles 法を用いて、EOG アーチファクトを取り除いた(Gratton et al., 1983)。ベースラインは、-5700 ms から-5500 ms の平均

電位であった。EOG 以外のアーチファクトを除去するため、目視で全ての確認し、アーチファクトの混入している試行は取り除き、条件毎に加算平均を行った。SPN はフィードバック刺激前 200 ms の平均電位の値として算出した。統計解析では、F3, F4, C3, C4, P3, P4 の頭皮上部位を用い、電極位置前後(前頭部位, 中心部位, 後頭部位) × 電極位置左右(左半球, 右半球) × グループ(長距離選手, 短距離選手)の三要因分散分析に供した。

三次元脳内電流密度解析 (low resolution brain electromagnetic tomography: LORETA)

LORETA-KEY software, v20170220 を用いて電源推定を行った (<http://www.uzh.ch/keyinst/NewLORETA/Software/Software.htm>)。SPN 振幅の群間差に関する脳内発生源を検討した。Statistical non-Parametric Mapping (SnPM) (Pascual-Marqui et al., 1994)を用いて、有意差検定を行った。

瞬時心拍数

SPN 算出と同様の区間(フィードバック前 6000 ms, 後 1000 ms)において、インター・ビート・インターバルを 500 ms 毎に算出した。インター・ビート・インターバルは beats per minute: bpm に変換した(Graham, 1978)。bpm は、SPN 算出に使用した試行と同様の試行のみを使用し、条件毎に平均化した。

第3章 結果

4.3.1. 心拍カウント課題

Figure 13 に、参加者 32 名の心拍カウント課題パフォーマンスを図示した。逆正弦変換を適用し、t 検定に供したところ、短距離選手よりも、長距離選手の方が身体内

部感覚の気付きは高い傾向だった($t(30) = 2.02, p = .052$).

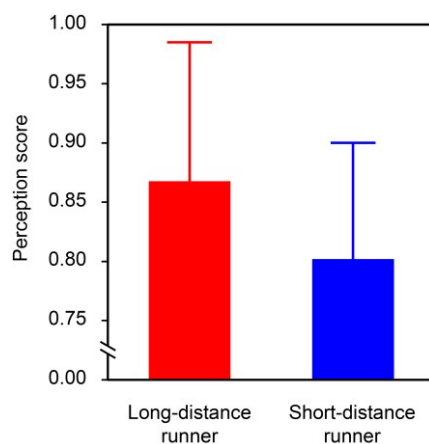


Figure 13. 各群の心拍カウント課題パフォーマンス.

4.3.2. 時間評価課題

瞬時心拍数

時間評価課題における瞬時心拍数の時系列的な変化を Figure 14 に示した。ボタン押し前から、瞬時心拍数の減少が観察され、その減少はボタン押しの 500 ms 前でピークを迎えた(長距離選手のフィードバック無し条件では、ボタン押し前の心拍数減少が観察できなかった)。ボタン押し後、心拍数は増加するが、フィードバック有り条件では、フィードバック呈示前から再度瞬時心拍数の低下が観察された。フィードバック呈示による心拍数低下は、呈示後 500–1000 ms でピークに達した。本実験で観察されたフィードバック呈示による心拍数の時間的变化は、時間評価課題において、瞬時心拍数記録した先行研究と類似した結果であった(Damen & Brunia, 1987)。フィードバック呈示による心拍数変化を評価するため、フィードバック呈示後 500–1000 ms の瞬時心拍数を二要因分散分析に供した。その結果、条件の主効果が有意であった($F(1, 29) = 35.35, p < .0001$)。フィードバック有り条件において、有意な瞬時心拍数の低下が認められた。

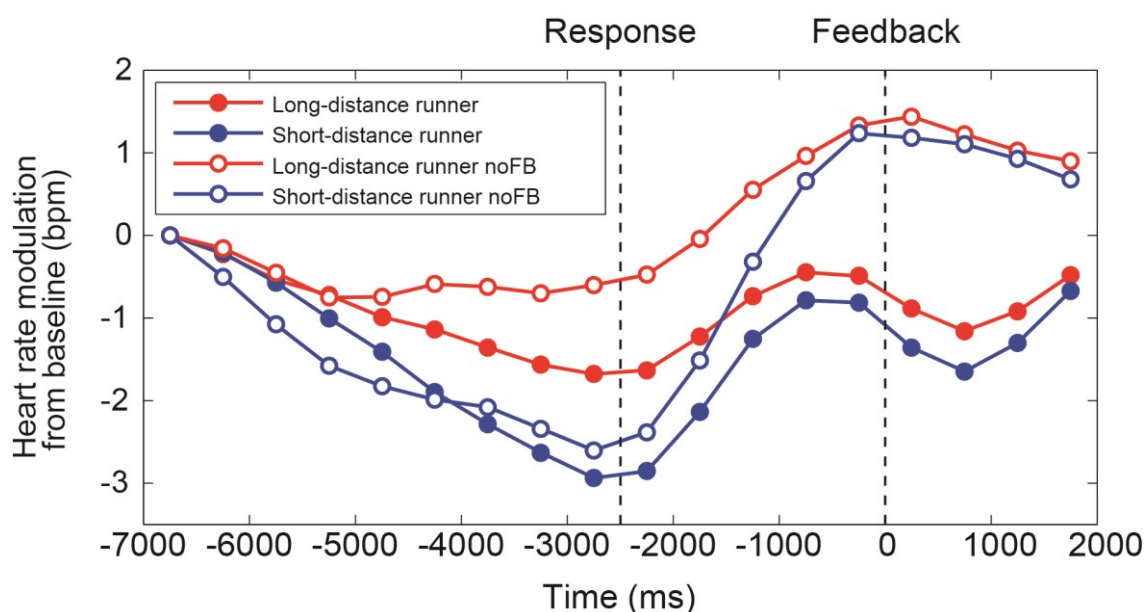


Figure 14. 各群の瞬時心拍数変化.

SPN

電極位置前後(前頭部位, 中心部位, 後頭部位) × 電極位置左右(左半球, 右半球) × グループ(長距離選手, 短距離選手) × 条件(フィードバック有り, フィードバック無し)の四要因分散分析の結果, 条件の主効果が認められた, フィードバック有り条件の方が, フィードバックなし条件よりも振幅が大きかった($F(1, 29) = 19.31, p = .0001$).

フィードバック有り条件, フィードバック無し条件それぞれにおいて, 電極位置前後 × 電極位置左右 × グループの三要因分散分析に供した. フィードバック有り条件では, グループの主効果が認められた($F(1, 29) = 6.17, p = .019$). 一方, フィードバック無し条件では統計的に有意な差は認められなかった($ps > .05$).

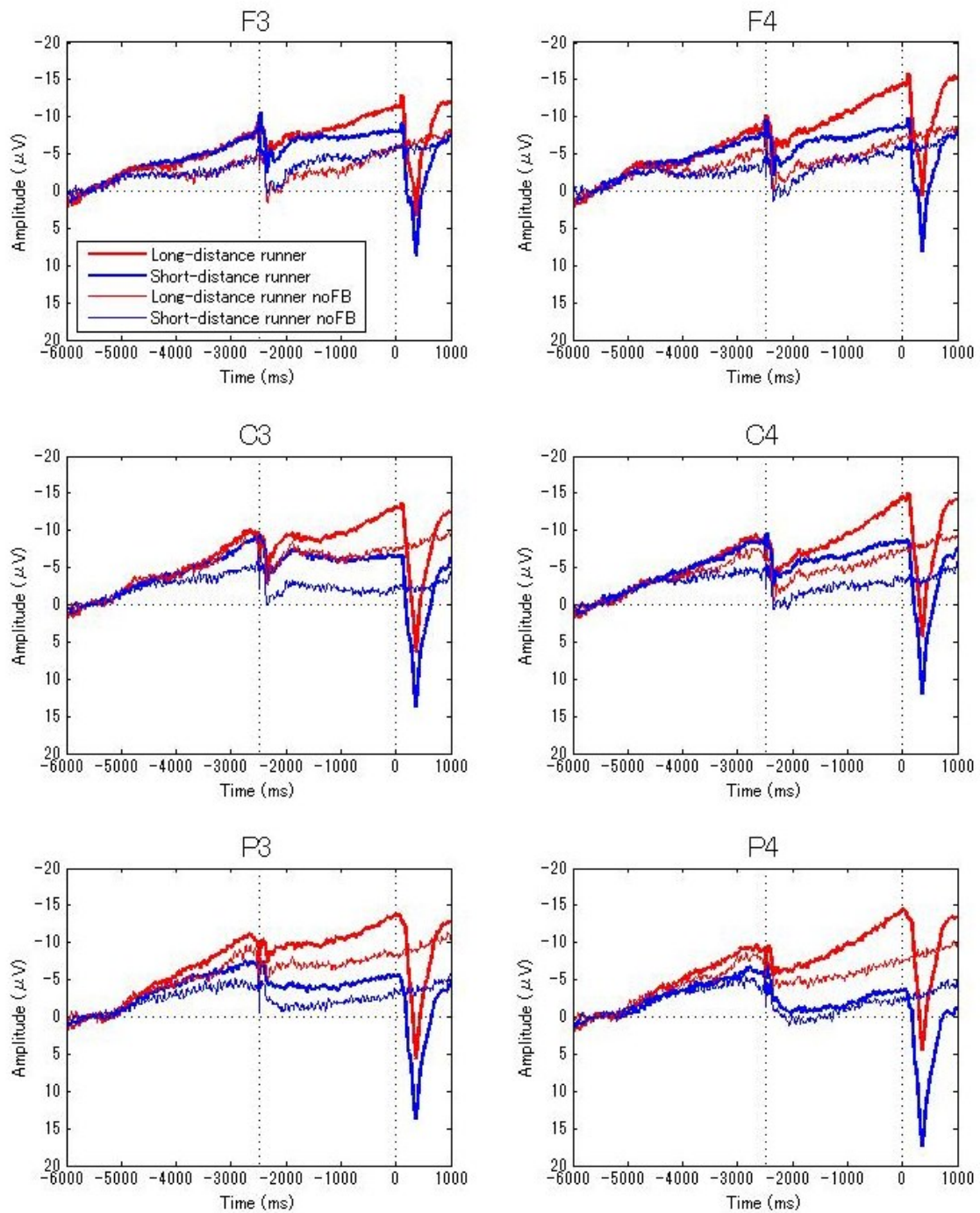


Figure 15. 各群における条件毎の SPN 波形.

SPN (差波形)

フィードバック有り条件とフィードバック無し条件の差分波形を Figure 16 に示した。電極位置前後 × 電極位置左右 × グループの三要因分散分析の結果、統計的に

有意な差は検出されなかった($ps > .05$).

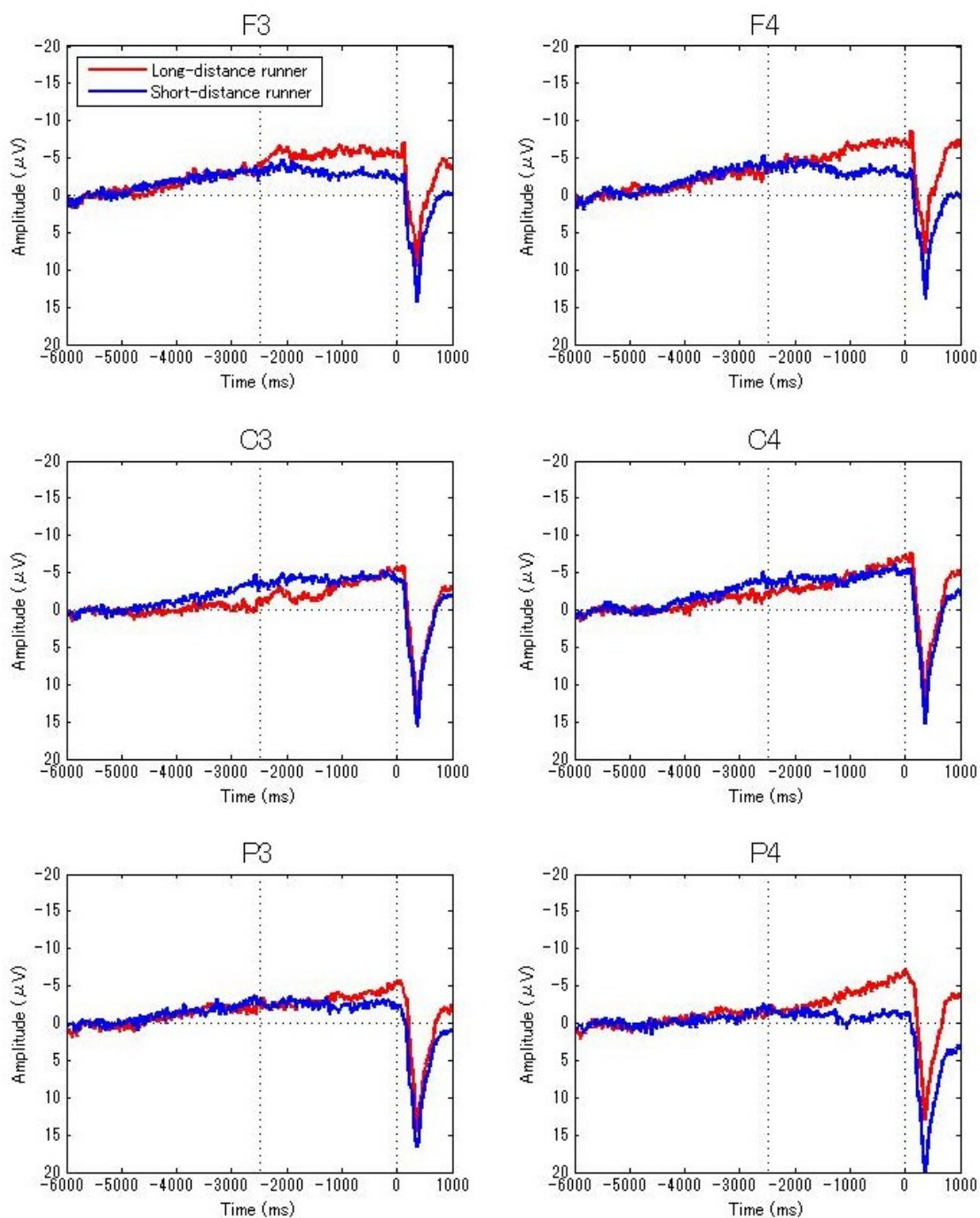


Figure 16. 各群の SPN 差波形(フィードバック有り条件とフィードバック無し条件の差分).

LORETA を用いた電源推定

フィードバック有り条件において、長距離選手の SPN 振幅は短距離選手よりも大

きかった。当該条件における SPN 振幅の群間比較を LORETA で行った結果、右島皮質を含む、複数の脳領域が同定されたが、いずれの領域の差も有意ではなかった ($p > .05$)。Figure 17 は、活動差が同定された脳領域の一部(右島皮質)を示した。

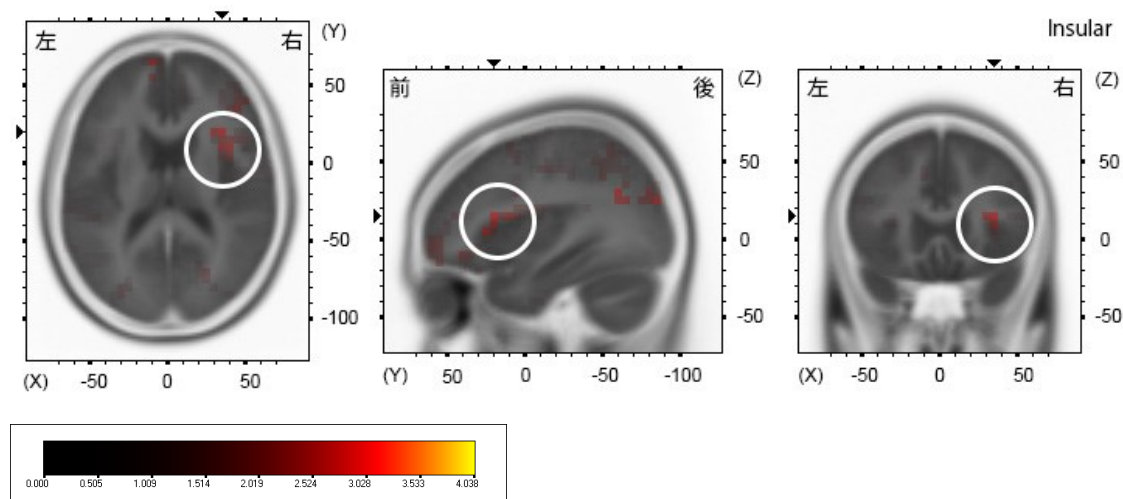


Figure 17. LORETA による電源推定の結果。

内受容感覚能力と SPN 振幅の個人差

心拍カウント課題で測定した内受容感覚能力と SPN 振幅(フィードバック有り条件とフィードバック無し条件の差波形)について、相関分析を行った。頭皮上いずれの部位においても、内受容感覚と SPN 振幅の間に有意な相関は認められなかった($p \geq .13$)。

第4章 考察

本実験では、陸上競技長距離選手と短距離選手の内受容感覚への気付きは異なるのか、また、内受容感覚への気付き能力は、結果予期中の神経活動にどのような影響を与えるのか検討した。

心拍カウント課題の結果から、長距離選手は、短距離選手よりも内受容感覚への気づき能力が高い傾向であった。有意な差を得ることはできなかったが、内受容感覚の情報処理に関して、アドベンチャーレーサーは、非アスリートと異なる(Paulus et al., 2012)といった先行研究の知見を踏まえ、積極的に解釈するならば、内受容感覚の気づきに関して、長距離選手は、短距離選手よりも優れていると解釈できるだろう。

時間評価課題において、フィードバック予期に対する内受容感覚の変化(時系列に伴う心拍数変動)及び神経活動(SPN)を検討した。各群ともにフィードバック無し条件では、フィードバック呈示前に心拍数の低下は観察できなかったが、フィードバック有り条件ではフィードバック呈示前に心拍数の低下がみられた。この結果は、各群ともにフィードバック呈示前に身体内部の状態が変化していることを示していた。

フィードバック有り条件における SPN を群間比較した結果、SPN 振幅は、短距離選手よりも長距離選手の方が大きかった。本実験の結果から、SPN 振幅は、内受容感覚変化に関する予期を反映する可能性が示唆された。fMRI により結果予期に関する脳領域を特定し、特定された領域にダイポールを立て、結果予期に関する脳活動がどのように脳波に影響を与えるのか検討した研究がある(Kotani et al., 2015)。fMRI は空間分解能に優れており、SPN 振幅に影響を与える脳領域はどこであるか詳細に知ることができた。Kotani et al. (2015)は、時間評価課題の結果予期において、島皮質、帯状回等の活動が SPN 振幅に影響を与えていることを明らかにした。これらの脳領域は、心拍知覚の際にも賦活することが fMRI を用いた研究で報告されている(Critchley et al., 2004)。これらの fMRI 研究の知見を踏まえると、長距離選手と短距離選手では、結果予期中の島皮質、帯状回活動が異なるのかもしれない

い。この解釈は、アドベンチャーレーサーは、健常者と異なる島皮質の活動を示した Paulus et al. (2012)とも一致する。

心拍カウント課題で測定した内受容感覚能力と SPN 振幅の間に有意な相関は認められなかった。内受容感覚が優れているほど、SPN 振幅が大きいという個人差を検出できなかった。SPN 振幅は、フィードバックに対する動機付けを反映することがこれまで繰り返し報告されてきた(e.g., Masaki et al., 2006)。本実験では、各参加者がどの程度フィードバックに対して動機付けられているか聴取しなかったが、参加者毎のフィードバックに対する動機付けの大きさにはばらつきがあったと予想される。この動機付けの個人差が影響し、内受容感覚と SPN 振幅に相関が認められなかった可能性が考えられる。本実験では、各群 16 名の参加者データを使用した。この数は、妥当性の高い相関分析を行なうには不十分であった。本実験の結果だけで、内受容感覚と SPN 振幅の個人差に相関がないとは結論付けることはできないと考えている。

本実験では、Schandry (1981)の心拍カウント課題を用いて、短距離選手と長距離選手の内受容感覚を比較した。短距離選手よりも長距離選手の方が、心拍カウント課題のパフォーマンスが高い傾向にあった。この結果は、長距離選手の方が優れた内受容感覚を有することを支持するものであった。本実験で用いた心拍カウント課題は、先行研究でも、内受容感覚を評価する目的で繰り返し用いられている。さらに、当該課題のパフォーマンスが優れた者は、島皮質(心拍等の身体内部の求心性情報が投射される脳領域)の活動が大きいことも示されている(Pollatos et al., 2005; Pollatos & Schandry, 2004)。それ故、本実験の結果は、島皮質の担う内受容感覚の情報処理を SPN が反映し得ることを示していたと考えられた。

しかしながら、本実験で用いた実験参加者の特徴を考慮するならば、本実験における心拍カウント課題のパフォーマンス結果は、慎重に結論付けられるべきである。なぜなら、短距離選手と長距離選手では、平常時の心拍数に違いがあった。また、本実験では測定しなかったが、脂肪量などの体組成にも差異があった可能性がある。これらの要因が、心拍カウント課題パフォーマンスに影響を与えた可能性が考えられる。

本実験では、内受容感覚への気づき能力は、短距離選手よりも長距離選手の方が高い傾向であった。また、長距離選手の SPN 振幅は、短距離選手よりも大きいことを示した。本実験の結果は、内受容感覚の違いが SPN 振幅に影響を与える可能性を示していた。

第V部 結果フィードバック予期に関する神経活動の総括

実験 1 では、保守的な選択行動が、SPN 振幅を増大することを示した。MHD 課題のチェンジ選択では、報酬獲得確率は 66%、ステイ選択では報酬獲得確率は 33% であった。チェンジ選択の方が二倍高い報酬獲得確率を有しているにも関わらず、ステイ選択時に SPN 振幅は増大した。この結果は、認知バイアスが、フィードバックに対する情動・動機付けを高めることを示した。認知バイアスによる主観的な信念が、客観的な報酬獲得確率とは独立して、結果予期中における脳内報酬系活動を高めたものと解釈された。

実験 2 では、MHD 課題でチェンジ選択の有利性が学習された場合、チェンジ選択時の SPN 振幅が増大することを示した。一方、時系列の分析では、MHD 課題における選択と結果の経験的な学習に伴って、前頭部位の SPN 振幅が低下することを示した。また、チェンジ選択時の SPN 振幅は、ステイ選択時よりも大きかった。前頭部位の SPN 振幅は、フィードバックへの情動的な動機付けを反映することが報告されている。学習に伴ってフィードバックへの情報価が低下した結果、フィードバックに対する動機付けが低下し、SPN 振幅が低下したものと考えられた。

実験 3 では、時間評価課題を用いて長距離選手と短距離選手の SPN を比較し、内受容感覚の差異をフィードバック予期の視座から検討した。内受容感覚への気づき能力は、短距離選手よりも長距離選手の方が高い傾向であった。また、長距離選手の SPN 振幅は、短距離選手よりも大きかった。本実験の結果は、内受容感覚変化の予期に関する神経活動が、SPN 振幅に影響を与える可能性を示唆した。

実験 1 及び実験 2 の結果は、フィードバック刺激に対する主観的な情動的動機付けが SPN 振幅を変調させることを示していた。フィードバックに対する情動的な動機付けが SPN に影響をあたえることは、先行研究でも繰り返し報告されている (e.g., Masaki et al., 2006)。実験 1 では、認知バイアスにより生じたより主観的な情

動的な動機付けが SPN 振幅に影響を与えることを示した。実験 2 では、認知的な学習に伴い、予期に関する神経活動が変化する(SPN 振幅が低下する)ことを示した。学習に伴ってフィードバックへの情報価値が低下した結果、フィードバックに対する動機付けが低下した可能性が考えられた。フィードバックに対する情動的な動機付けは、瞬時心拍数などの身体内部の変化を生じさせる可能性がある。例えば、情動を喚起する画像刺激に対する予期を検証した研究では、画像刺激の予期中に、瞬時心拍数が低下し、SPN 振幅が増大することを示した(Poli et al., 2007)。本研究の実験 3 では、内受容感覚変化の予期に関する神経活動を反映して、SPN が生起することを示した。内受容感覚変化の予期が SPN 振幅に影響を与える包括的な要因であるのかもしれない。

これまで、SPN の生起には、報酬系の活動が関与することが報告されている(Hackley et al., 2014)。サルを対象とし、報酬予期の神経細胞活動を観察した研究では、中脳の黒質緻密部や腹側被蓋野のドーパミン細胞の活動が報酬予期中に観察された。視覚刺激に報酬(ジュース)を対呈示させる形で古典的条件付けし、学習過程のドーパミン細胞の活動を記録した場合、学習初期では、報酬を得た時点でドーパミン細胞の発火が観察されるが、視覚刺激と報酬の連合を十分に学習した後は、報酬付与時点での発火が観察できなくなる。学習後は、報酬付与時点での発火が消失するが、その代わりに、報酬を予測する視覚刺激が呈示された時点でドーパミン細胞の発火が認められた(Schultz, Tremblay, & Hollerman, 2000)。さらに、Schultz らの追試では、報酬獲得確率が異なる複数の視覚刺激を用いて、報酬獲得確率とドーパミン細胞の活動について調べている。その結果、視覚刺激呈示時点のドーパミン細胞の発火は、報酬獲得確率が高いほど大きく、報酬付与時点でのドーパミン細胞の発火は、報酬獲得確率が低いほど大きいことがわかった(Fiorillo, Tobler, & Schultz,

2003). つまり、報酬がもらえない可能性が高い時に報酬を得ると、ドーパミン細胞はより活動し、反対に、報酬がもらえる可能性が高い時に、報酬を得ることができないと、ドーパミン細胞活動は抑制されることがわかった。これらの結果から、ドーパミン細胞の活動は、報酬予期誤差を反映すると考えられている。報酬の獲得、損失を示す結果フィードバックの前には、報酬予期の活動が存在し、実際に結果が得られた際に、予測よりも報酬が多ければドーパミン細胞は興奮し、報酬が少なければ抑制する。さらに、結果予期中の報酬系活動は、報酬獲得確率が高ときほど大きくなることが報告された。これまで、この報酬予期の活動が SPN 振幅に影響を与えることは、複数の研究で示されている。例えば、ドーパミンの枯渇がみられるパーキンソン病の患者は、健常者よりも SPN 振幅が小さいことが示されている(Mattox, Valle-Inclán, & Hackley, 2006)。また、中脳ドーパミンの主な投射先である線条体の活動が、SPN 振幅に影響を与えることも示されている。自らの選択と関係なくランダムに結果が提示される際と比較して、自らの行動と結果が随伴している際には、報酬系を構成する脳部位である線条体の活動が大きくなることが fMRI を用いた研究で示された(Tricomi et al., 2004)。さらに、この fMRI 研究の知見と一致して、行為と結果の随伴性が高い際には SPN 振幅が増大することが報告されている(Masaki et al., 2010)。

この報酬系の脳活動が SPN に影響を与えるという見解は、本学位論文実験 1 の結果と符合する。実験 1 では、MHD 課題のステイ選択が SPN 振幅を増大させることを示した。ステイ選択も、チェンジ選択も参加者自身が選択した意思決定であるため、結果と行為の随伴性は、客観的には同じである。しかしながら、ステイ選択は、第一選択及び最終選択で同じ選択を選ぶ行為であり、参加者はステイ選択の際に、選択に対する制御感をより強く感じていた可能性がある。参加者は、チェンジ

選択時よりもステイ選択の際に、結果と行為の随伴性を高く感じた結果、結果予期中の線条体活動が増大し、SPN 振幅が増大したと考えられた。

本学位論文の実験 2 では、実験 1 と異なり、ステイ選択時よりもチェンジ選択時の SPN 振幅は大きかった。また、チェンジ選択の有利性を学習するに連れて、前頭部位の SPN は低振幅化した。MHD 課題では、ステイ選択よりもチェンジ選択の方が二倍高い報酬獲得確率を有する。故に、MHD 課題を反復遂行した実験 2 では、参加者はチェンジ選択の有利性を経験的に学習し、漸進的にチェンジ選択率を増加させた。チェンジ選択時の SPN 振幅は、ステイ選択時よりも大きかったが、この振幅値の差は、チェンジ選択有利性を学習したことに起因すると考えられた。つまり、チェンジ選択の有利性を学習した結果、当該選択時において結果に対するポジティブな期待が大きくなり、SPN 振幅は増大した。この結果は、報酬獲得確率が高い際には、報酬予期でドーパミン細胞が発火するという従来の見解と一致したものであった。つまり、チェンジ選択時の SPN 振幅増大は、報酬予期活動の増大を反映したものと考えられた。一方、実験 2 において時系列の分析を行った場合、学習の進行に伴って前頭部位の SPN 振幅が低下することがわかった。この学習に伴う SPN 振幅の変動は、報酬系の活動だけでは説明ができないものであった。

Fiorillo et al. (2003)の見解を踏まえると、学習が進み報酬獲得確率が高くなるほど、報酬予期活動は大きくなると考えられる。SPN 振幅が報酬予期に関する活動のみを反映するならば、学習が進むに連れて SPN 振幅は増大するはずであるが、本実験では、むしろ逆であった。学習に伴う SPN 振幅低下についてより詳細に分析するため、頭皮上 64 部位の脳波データを用いて電流源推定を行った。その結果、学習による SPN 振幅の低下は、右島皮質活動の低下に起因したものと推定された。島皮質は、顕著性ネットワークと呼ばれる脳内を構成する主たる脳部位であることが

報告されている(Menon & Uddin, 2010; Seeley et al., 2007). 顕著性ネットワークは、実行系のネットワークと安静時のネットワークの切り替えを担うと考えられている。学習初期は、選択とその選択がもたらす結果の関係性について全く知識がないため、フィードバック呈示前に、フィードバック情報処理に必要な脳領域を予め賦活し効率よくフィードバック情報を処理する必要がある。一方、ある程度学習が完了すると、学習に必要な脳領域をあらかじめ活動させる必要がなくなる。つまり、学習初期は、顕著性ネットワークが、フィードバック処理に必要な脳領域を活動させる必要があるが、学習が完了すると、この脳活動の切り替えが必要でなくなる。この学習に伴う、顕著性ネットワーク活動の低下を反映し、SPN 振幅は低下した可能性が考えられる。これまで、学習に伴う SPN 振幅の変動を検討した研究は、本学位論文の実験 2 を含め三報存在する。使用した実験課題は異なるが、三報全てにおいて、学習に伴う振幅が観察されている(ギャンブリング課題: Hirao, Murphy, & Masaki, 2017; アレルギー課題: Morís et al., 2013; 運動学習課題: Ren, Valle-Inclán, Tukaiev, & Hackley, 2017)。これら三つの研究では、学習すべき事柄は異なったため、フィードバック刺激の確認によって得られる情報は異なった。しかしながら、これら三つの研究で共通して学習に伴う SPN 振幅低下が認められたことから、学習に伴う SPN 振幅低下は、課題遂行に特化した脳領域の低下等を示すというよりも、より一般的な学習に伴う脳活動変動を表している可能性が高い。SPN 振幅が結果予期段階での顕著性ネットワーク活動を反映していることを示していたと考えられた。

SPN の主な発生源である島皮質は、顕著性ネットワークを構成する脳部位である一方で、身体内部状態に関する求心性情報が投射される脳部位であることも広く知られている(Craig, 2002)。実験 3 では、心拍変動の知覚能力である内受容感覚が

SPN 振幅に影響を及ぼすのか調べた。本実験によって、内受容感覚が高いグループは、SPN 振幅が大きいことが示された。本実験は、内受容感覚の視座から、結果予期に関する神経活動を検討した初めての研究であった。グループ間の SPN 振幅差を電流源推定した結果、有意な脳領域は認められなかった。しかしながら、SPN の主な発生源が島皮質であることが繰り返し報告されていることを考えると、グループ間の SPN 振幅差も、島皮質活動の差を表しているのかもしれない。フィードバック呈示前には心拍数が減少するが、内受容感覚が優れた者は、島皮質を活動させることにより、この内受容感覚変化の予測を行っていたのかもしれない。

実験 3 の結果は、内受容感覚変化の予測とは、異なる視座より解釈することもできると考えている。島皮質は、末梢からの身体内部情報を受容、解釈し、その結果を他の脳領域に伝達する役割を有することが知られている(Craig, 2002)。顕著性ネットワークを働かせるのかどうか、報酬系の脳領域を働かせるのかといった判断材料として、身体内部の情報が使われている可能性が考えられる。例えば、身体内部を含めた末梢からの情報が、意思決定に影響を与えるとする学説に、ソマティック・マーカ仮説がある(Bechara & Damasio, 2005; Bechara, Damasio, Tranel, & Damasio, 1997)。この学説では、意思決定を行なう際には、意思決定に先行して生じる情動反応存在し、その情動反応が意思決定に影響を与えると考えられている。我々は重要な意思決定を行なう際は、心臓の鼓動が早くなったり、口が乾いたり、情動性の身体的反応(ソマティック・マーカ)が生じる。この身体性反応が求心性の情報として脳に送られ、脳はこれらの情報を判断材料とすることで、効率的に最適な意思決定を導くことができると考えられている。実験 3 では、内受容感覚能力が SPN 振幅に与える影響を検討したが、この内受容感覚能力は、情動反応の気づきと密接に関係している。内受容感覚の高い者は、身体内部の情報を鋭敏に感

じ取ることができるため、その背景にある情動反応を感じやすいと考えられている (Craig, 2003b)。結果予期の際にも、類似した情動性の身体的反応を使用した脳内情報処理プロセスが存在するのかもしれない。顕著性の検出、身体内部の状態に関する求心性情報の受取といった機能を島皮質が担うことを考慮すると、心拍変動等の身体内部情報を顕著性の検出に役立てている可能性がある。我々は、結果予期中において顕著性ネットワークを働かせることで、結果フィードバック情報を処理する前に、あらかじめ必要な脳領域を活動させる。例えば、フィードバックで報酬獲得損失に関する情報が得られる場合は、顕著性ネットワークの活動により、報酬系の脳領域が賦活される。視覚フィードバックが得られる場合は、視覚野等の視覚処理に関する脳領域が顕著性ネットワークの活動によりあらかじめ賦活される。顕著性ネットワークに関する活動を働かせるか否かといった判断には、常に島皮質に投射されている心拍変動等の身体内部情報も使用されているのかもしれない。

一連の実験結果より、SPNは、島皮質を主な構成部位とする顕著性ネットワークの活動、報酬系の神経活動の複合により生起することが明らかとなった。先行研究において、SPNの頭皮上分布に知見の一致がみられないことについては、異なる脳活動の複合の視座から説明可能であることを強調した。さらに、SPN振幅が内受容感覚によって変化するという新しい知見を得たことで、結果予期中の顕著性ネットワーク活動は、身体内部情報によって調整される可能性が示された。

参考文献

- Amiez, C., Sallet, J., Procyk, E., & Petrides, M. (2012). Modulation of feedback related activity in the rostral anterior cingulate cortex during trial and error exploration. *NeuroImage*, *63*, 1078–1090. doi:10.1016/j.neuroimage.2012.06.023
- Bechara, A., & Damasio, A. R. (2005). The somatic marker hypothesis: A neural theory of economic decision. *Games and Economic Behavior*, *52*, 336–372. doi:10.1016/j.geb.2004.06.010
- Bechara, A., Damasio, H., Tranel, D., & Damasio, A. R. (1997). Deciding advantageously before knowing the advantageous strategy. *Science*, *275*, 1293–1295. doi:10.1126/science.275.5304.1293
- 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. *International Journal of Psychophysiology*, *43*, 77–90. doi:10.1016/S0167-8760(01)00180-5
- 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 Topography*, *7*, 71–88. doi:10.1007/BF01184839
- Brunia, C. H. M. (1988). Movement and stimulus preceding negativity. *Biological Psychology*, *26*, 165–178.
- Brunia, C. H. M. (1993). Waiting in readiness: Gating in attention and motor preparation. *Psychophysiology*, *30*, 327–339. doi:10.1111/j.1469-8986.1993.tb02054.x
- Brunia, C. H. M. (1999). Neural aspects of anticipatory behavior. *Acta Psychologica*, *101*, 213–242. doi:10.1016/S0001-6918(99)00006-2
- 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. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *69*, 234–243.

doi:10.1016/0013-4694(88)90132-0

Brunia, C. H. M., de Jong, B. M., van den Berg-Lenssen, M. M. C., & Paans, A. M. J.

(2000). Visual feedback about time estimation is related to a right hemisphere activation measured by PET. *Experimental Brain Research*, *130*, 328–337.

doi:10.1007/s002219900293

Brunia, C. H. M., & van Boxtel, G. J. M. (2004). Anticipatory attention to verbal and non-verbal stimuli is reflected in a modality-specific SPN. *Experimental Brain Research*, *156*, 231–239. doi:10.1007/s00221-003-1780-2

Chwilla, D. J., & Brunia, C. H. M. (1991). Event-related potentials to different feedback stimuli. *Psychophysiology*, *28*, 123–132. doi:10.1111/j.1469-8986.1991.tb00400.x

Craig, A. D. (2002). How do you feel? Interoception: the sense of the physiological condition of the body. *Nature Reviews Neuroscience*, *3*, 655–666. doi:10.1038/nrn894

Craig, A. D. (2003a). A new view of pain as a homeostatic emotion. *Trends in Neurosciences*, *26*, 303–307. doi:10.1016/S0166-2236(03)00123-1

Craig, A. D. (2003b). Interoception: the sense of the physiological condition of the body. *Current Opinion in Neurobiology*, *13*, 500–505. doi:10.1016/S0959-4388(03)00090-4

Critchley, H. D., Wiens, S., Rotshtein, P., Ohman, A., Dolan, R. J., Öhman, A., & Dolan, R. J. (2004). Neural systems supporting interoceptive awareness. *Nature Neuroscience*, *7*, 189–195. doi:10.1038/nn1176

Damen, E. J. P., & Brunia, C. H. M. (1987). Changes in heart rate and slow brain potentials related to motor preparation and stimulus anticipation in a time estimation task. *Psychophysiology*, *24*, 700–713. doi:10.1111/j.1469-8986.1987.tb00353.x

Davidson, R. J., Ekman, P., Saron, C. D., Senulis, J. A., & Friesen, W. V. (1990).

Approach-withdrawal and cerebral asymmetry: Emotional expression and brain physiology: I. *Journal of Personality and Social Psychology*, *58*, 330–341.

doi:10.1037/0022-3514.58.2.330

- Fiorillo, C. D., Tobler, P. N., & Schultz, W. (2003). Discrete coding of reward probability and uncertainty by dopamine neurons. *Science*, *299*, 1898–1902.
doi:10.1126/science.1077349
- Franco-Watkins, A., Derks, P., & Dougherty, M. (2003). Reasoning in the Monty Hall problem: Examining choice behaviour and probability judgements. *Thinking & Reasoning*, *9*, 67–90. doi:10.1080/13546780244000114
- Friedman, D. (1998). Monty Hall's three doors: Construction and deconstruction of a choice anomaly. *American Economic Review*, *21*, 711–723. doi:10.1177/0146167295217006
- Fuentemilla, L., Cucurell, D., Marco-Pallarés, J., Guitart-Masip, M., Morís, J., & Rodríguez-Fornells, A. (2013). Electrophysiological correlates of anticipating improbable but desired events. *NeuroImage*, *78*, 135–144.
doi:10.1016/j.neuroimage.2013.03.062
- Gehring, W. J., & Willoughby, A. R. (2002). The medial frontal cortex and the rapid processing of monetary gains and losses. *Science*, *295*, 2279–2282.
doi:10.1126/science.1066893
- Gilovich, T., & Medvec, V. (1995). The experience of regret: What, when, and why. *Psychological Review*, *102*, 379–395. Retrieved from
<http://psp.sagepub.com/content/21/2/182.short>
- Godefroid, E., Pourtois, G., & Wiersema, J. R. (2016). Joint effects of sensory feedback and interoceptive awareness on conscious error detection: Evidence from event related brain potentials. *Biological Psychology*, *114*, 49–60.
doi:10.1016/j.biopsycho.2015.12.005
- Graham, F. K. (1978). Constraints on measuring heart rate and period sequentially through real and cardiac time. *Psychophysiology*, *15*, 492–495. doi:10.1111/j.1469-8986.1978.tb01422.x
- Granberg, D. (1999). A new version of the Monty Hall Dilemma with unequal probabilities.

- Behavioural Processes*, 48, 25–34. doi:10.1016/S0376-6357(99)00066-2
- Granberg, D., & Brown, T. A. (1995). The Monty Hall Dilemma. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 21, 711–723. doi:10.1177/0146167295217006
- Granberg, D., & Dorr, N. (1998). Further exploration of two-stage decision making in the Monty Hall Dilemma. *The American Journal of Psychology*, 111, 561–579.
doi:10.2307/1423551
- Gratton, G., Coles, M. G. H., & Donchin, E. (1983). A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 55, 468–484.
doi:10.1016/0013-4694(83)90135-9
- Gray, H. (1918). *Anatomy of the Human Body*.
- Hackley, S. A., Valle-Inclan, F., Masaki, H., & Hebert, K. (2014). Stimulus-Preceding Negativity (SPN) and Attention to Rewards. In G. R. Mangun (Ed.), *Cognitive Electrophysiology of Attention: Signals of the Mind* (1st ed., pp. 216–225). ACADEMIC PRESS. doi:10.1016/B978-0-12-398451-7.00017-8
- Herbranson, W. T., & Schroeder, J. (2010). Are birds smarter than mathematicians? Pigeons (*Columba livia*) perform optimally on a version of the Monty Hall Dilemma. *Journal of Comparative Psychology*, 124, 1–13. doi:10.1037/a0017703
- Hertwig, R., & Erev, I. (2009). The description-experience gap in risky choice. *Trends in Cognitive Sciences*, 13, 517–523. doi:10.1016/j.tics.2009.09.004
- Hirao, T., Murphy, T. I., & Masaki, H. (2016). Stimulus-preceding negativity represents a conservative response tendency. *NeuroReport*, 27, 80–84.
doi:10.1097/WNR.0000000000000495
- Hirao, T., Murphy, T. I., & Masaki, H. (2017). Brain activities associated with learning of the Monty Hall Dilemma task. *Psychophysiology*, 54, 1359–1369.
doi:10.1111/psyp.12883
- 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. doi:10.1037/0033-295X.109.4.679
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1982). The psychology of preferences. *Scientific American*, *246*, 160–173.
- Kotani, Y., Hiraku, S., Suda, K., & Aihara, Y. (2001). Effect of positive and negative emotion on stimulus-preceding negativity prior to feedback stimuli. *Psychophysiology*, *38*, 873–878. doi:10.1111/1469-8986.3860873
- Kotani, Y., Kishida, S., Hiraku, S., Suda, K., Ishii, M., & Aihara, Y. (2003). Effects of information and reward on stimulus-preceding negativity prior to feedback stimuli. *Psychophysiology*, *40*, 818–826. doi:10.1111/1469-8986.00082
- Kotani, Y., Ohgami, Y., Ishiwata, T., Arai, J., Kiryu, S., & Inoue, Y. (2015). Source analysis of stimulus-preceding negativity constrained by functional magnetic resonance imaging. *Biological Psychology*, *111*, 53–64. doi:10.1016/j.biopsycho.2015.08.005
- Kotani, Y., Ohgami, Y., Kuramoto, Y., Tsukamoto, T., Inoue, Y., & Aihara, Y. (2009). The role of the right anterior insular cortex in the right hemisphere preponderance of stimulus-preceding negativity (SPN): an fMRI study. *Neuroscience Letters*, *450*, 75–79. doi:10.1016/j.neulet.2008.11.032
- Kotani, Y., Ohgami, Y., Yoshida, N., Kiryu, S., & Inoue, Y. (2017). Anticipation process of the human brain measured by stimulus-preceding negativity (SPN), *6*, 7–14. doi:10.7600/jpfsm.6.7
- Langer, E. (1975). The illusion of control. *Journal of Personality and Social Psychology*, *32*, 311–328. doi:10.1037/0022-3514.32.2.311
- 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*, *1105*, 110–121. doi:10.1016/j.brainres.2006.01.022

- Masaki, H., Yamazaki, K., & Hackley, S. A. (2010). Stimulus-preceding negativity is modulated by action-outcome contingency. *NeuroReport*, *21*, 277–281.
doi:10.1097/WNR.0b013e3283360bc3
- Mattox, S. T., Valle-Inclán, F., & Hackley, S. A. (2006). Psychophysiological evidence for impaired reward anticipation in Parkinson's disease. *Clinical Neurophysiology*, *117*, 2144–2153. doi:10.1016/j.clinph.2006.05.026
- Menon, V., & Uddin, L. Q. (2010). Saliency, switching, attention and control: a network model of insula function. *Brain Structure and Function*, 1–13. doi:10.1007/s00429-010-0262-0
- Morís, J., Luque, D., & Rodríguez-Fornells, A. (2013). Learning-induced modulations of the stimulus-preceding negativity. *Psychophysiology*, *50*, 931–939.
doi:10.1111/psyp.12073
- Ohgami, Y., Kotani, Y., Arai, J.-I., Kiryu, S., & Inoue, Y. (2014). Facial, verbal, and symbolic stimuli differently affect the right hemisphere preponderance of stimulus-preceding negativity. *Psychophysiology*. doi:10.1111/psyp.12234
- 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.
doi:10.1111/j.1469-8986.2004.00203.x
- Ohgami, Y., Kotani, Y., Tsukamoto, T., Omura, K., Inoue, Y., Aihara, Y., & Nakayama, M. (2006). Effects of monetary reward and punishment on stimulus-preceding negativity. *Psychophysiology*, *43*, 227–236. doi:10.1111/j.1469-8986.2006.00396.x
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, *9*, 97–113. doi:10.1016/0028-3932(71)90067-4
- Pascual-Marqui, R. D., Michel, C. M. M., Lehmann, D., Pascual-Marquia, R. D., D.Lehmannb, & Michel, C. M. M. (1994). Low resolution electromagnetic tomography: A new method for localizing electrical activity in the brain. *Int J*

Psychophysiol, 18, 49–65. doi:10.1016/0167-8760(84)90014-X

- Paulus, M. P., Flagan, T., Simmons, A. N., Gillis, K., Kotturi, S., Thom, N., ... Swain, J. L. (2012). Subjecting elite athletes to inspiratory breathing load reveals behavioral and neural signatures of optimal performers in extreme environments. *PLoS ONE*, 7, e29394. doi:10.1371/journal.pone.0029394
- Paulus, M. P., Potterat, E. G., Taylor, M. K., Van Orden, K. F., Bauman, J., Momen, N., ... Swain, J. L. (2009). A neuroscience approach to optimizing brain resources for human performance in extreme environments. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 33, 1080–1088. doi:10.1016/j.neubiorev.2009.05.003
- Paulus, M. P., Simmons, A. N., Fitzpatrick, S. N., Potterat, E. G., van Orden, K. F., Bauman, J., & Swain, J. L. (2010). Differential brain activation to angry faces by elite warfighters: Neural processing evidence for enhanced threat detection. *PLoS ONE*, 5. doi:10.1371/journal.pone.0010096
- Petrocelli, J. V., & Harris, A. K. (2011). Learning inhibition in the Monty Hall problem: the role of dysfunctional counterfactual prescriptions. *Personality & Social Psychology Bulletin*, 37, 1297–1311. doi:10.1177/0146167211410245
- Poli, S., Sarlo, M., Bortoletto, M., Buodo, G., & Palomba, D. (2007). Stimulus-preceding negativity and heart rate changes in anticipation of affective pictures. *International Journal of Psychophysiology*, 65, 32–39. doi:10.1016/j.ijpsycho.2007.02.008
- Pollatos, O., Kirsch, W., & Schandry, R. (2005). Brain structures involved in interoceptive awareness and cardioafferent signal processing: A dipole source localization study. *Human Brain Mapping*, 26, 54–64. doi:10.1002/hbm.20121
- Pollatos, O., & Schandry, R. (2004). Accuracy of heartbeat perception is reflected in the amplitude of the heartbeat-evoked brain potential. *Psychophysiology*, 41, 476–482. doi:10.1111/1469-8986.2004.00170.x
- Ren, X., Valle-Inclán, F., Tukaiev, S., & Hackley, S. A. (2017). Changes in the stimulus-

- preceding negativity and lateralized readiness potential during reinforcement learning. *Psychophysiology*, 1–13. doi:10.1111/psyp.12859
- Ring, C., & Brener, J. (1996). Influence of beliefs about heart rate and actual heart rate on heartbeat counting. *Psychophysiology*. doi:10.1111/j.1469-8986.1996.tb02430.x
- Ritov, I., & Baron, J. (1994). Judgements of compensation for misfortune: The role of expectation. *European Journal of Social Psychology*, 24, 525–539. doi:10.1002/ejsp.2420240502
- Saenen, L., Van Dooren, W., & Onghena, P. (2014). A randomised Monty Hall experiment: The positive effect of conditional frequency feedback. *Thinking & Reasoning*, 21, 176–192. doi:10.1080/13546783.2014.918562
- Samuelson, W., & Zechhauser, R. (1988). Status quo bias in decision making, 59, 7–59.
- Schandry, R. (1981). Heart beat perception and emotional experience. *Psychophysiology*, 18, 483–488. doi:10.1111/j.1469-8986.1981.tb02486.x
- Schultz, W., Tremblay, L., & Hollerman, J. R. (2000). Reward processing in primate orbitofrontal cortex and basal ganglia. *Cerebral Cortex*, 10, 272–284. doi:10.1093/cercor/10.3.272
- Seeley, W. W., Menon, V., Schatzberg, A. F., Keller, J., Glover, G. H., Kenna, H., ... Greicius, M. D. (2007). Dissociable intrinsic connectivity networks for salience processing and executive control. *J Neurosci*, 27, 2349–2356. doi:10.1523/JNEUROSCI.5587-06.2007
- Selvin, S., Bloxham, M., Khuri, A. I., Moore, M., Coleman, R., Bryce, G. R., ... Smith, G. N. (1975). Lettrs to the Editor. *The American Statistician*, 29, 67–71. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/2683689>
- Singer, T., Critchley, H. D., & Preuschoff, K. (2009). A common role of insula in feelings, empathy and uncertainty. *Trends in Cognitive Sciences*, 13, 334–340. doi:10.1016/j.tics.2009.05.001

- Sutton, R. S., & Barto, A. G. (1998). *Reinforcement Learning: An Introduction*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Takai, K. (1998). Cognitive strategies and recall of pace by long-distance runners. *Perceptual and Motor Skills, 86*, 763–770. doi:10.2466/pms.1998.86.3.763
- Tricomi, E., Delgado, M. R., & Fiez, J. A. (2004). Modulation of caudate activity by action contingency. *Neuron, 41*, 281–292. doi:10.1016/S0896-6273(03)00848-1
- Tricomi, E., Delgado, M. R., Mccandliss, B. D., Mcclelland, J. L., & Fiez, J. A. (2006). Performance feedback drives caudate activation in a phonological learning task. *Journal of Cognitive Neuroscience, 18*, 1029–1043. doi:10.1162/jocn.2006.18.6.1029
- Tsukamoto, T., Kotani, Y., Ohgami, Y., Omura, K., Inoue, Y., & Aihara, Y. (2006). Activation of insular cortex and subcortical regions related to feedback stimuli in a time estimation task: An fMRI study. *Neuroscience Letters, 399*, 39–44. doi:10.1016/j.neulet.2006.01.061
- Tubau, E., Aguilar-Lleyda, D., & Johnson, E. D. (2015). Reasoning and choice in the Monty Hall Dilemma (MHD): implications for improving Bayesian reasoning. *Frontiers in Psychology, 6*, 1–11. doi:10.3389/fpsyg.2015.00353
- Tubau, E., & Alonso, D. (2003). Overcoming illusory inferences in a probabilistic counterintuitive problem: the role of explicit representations. *Memory & Cognition, 31*, 596–607. doi:10.3758/BF03196100
- van Boxtel, G. J. M., & Böcker, K. B. E. (2004). Cortical measures of anticipation. *Journal of Psychophysiology, 18*, 61–76. doi:10.1027/0269-8803.18.23.61
- West, R. F., & Stanovich, K. E. (2003). Is probability matching smart? Associations between probabilistic choices and cognitive ability. *Memory & Cognition, 31*, 243–251. doi:10.3758/BF03194383
- Zeelenberg, M., van den Bos, K., van Dijk, E., & Pieters, R. (2002). The inaction effect in the psychology of regret. *Journal of Personality and Social Psychology, 82*, 314–327.

doi:10.1037/0022-3514.82.3.314

Zheng, Y., Li, Q., Wang, K., Wu, H., & Liu, X. (2015). Contextual valence modulates the neural dynamics of risk processing. *Psychophysiology*, *52*, 895–904.

doi:10.1111/psyp.12415

Zheng, Y., & Liu, X. (2015). Blunted neural responses to monetary risk in high sensation seekers. *Neuropsychologia*, *71*, 173–180. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2015.04.002

Zhou, Z., Yu, R., & Zhou, X. (2010). To do or not to do? Action enlarges the FRN and P300 effects in outcome evaluation. *Neuropsychologia*, *48*, 3606–3613.

doi:10.1016/j.neuropsychologia.2010.08.010

Zink, C. F., Pagnoni, G., Martin-Skurski, M. E., Chappelow, J. C., & Berns, G. S. (2004). Human striatal responses to monetary reward depend on saliency. *Neuron*, *42*, 509–

517. doi:10.1016/S0896-6273(04)00183-7