原 著

感情喚起下における生理反応の時系列相互相関^{1,2}

—前頭脳波 α パワー左右差と心拍数を指標として—

真田原行 関西学院大学大学院文学研究科, 関西学院大学応用心理科学研究センター³

小林正法 関西学院大学大学院文学研究科, 関西学院大学応用心理科学研究センター⁴

大竹恵子 関西学院大学文学部, 関西学院大学応用心理科学研究センター

片山順一 関西学院大学文学部, 関西学院大学応用心理科学研究センター

Time-series cross-correlation of physiological responses during emotion induction: A frontal alpha asymmetry and heart rate study

Motoyuki Sanada (*Department of Psychological Science, Kwansei Gakuin University/
Center for Applied Psychological Science (CAPS), Kwansei Gakuin University*)

Masanori Kobayashi (*Department of Psychological Science, Kwansei Gakuin University/
Center for Applied Psychological Science (CAPS), Kwansei Gakuin University*)

Keiko Otake (*Department of Psychological Science, Kwansei Gakuin University/
Center for Applied Psychological Science (CAPS), Kwansei Gakuin University*)

Jun'ichi Katayama (*Department of Psychological Science, Kwansei Gakuin University/
Center for Applied Psychological Science (CAPS), Kwansei Gakuin University*)

The purpose of this study was to unveil temporal relationship of physiological states during emotional experience. It has been widely accepted that emotion arises from interaction between cerebral processing and bodily response (i.e., autonomic nervous system: ANS). Therefore, we measured indices of both types of activities, using frontal alpha asymmetry (Davidson, Ekman, Saron, Senulis, & Friesen, 1990) for cerebral processing, and heart rate (HR) for ANS. Twenty-two participants watched six video clips for emotion induction (two each for negative, neutral, and positive emotions), during which electroencephalograms (EEGs) and electrocardiograms (ECGs) were recorded. Cross-correlation analyses revealed that the fluctuation of frontal alpha asymmetry synchronized with that of HR only when participants watched positive video clips. Because most participants changed their facial expression during the clips, it is possible that facial expression was induced by the synchronization of frontal alpha asymmetry and ANS activity. In addition, when they watched one of the positive clips, frontal alpha asymmetry fluctuation was preceded by HR variation. This indicated that ANS response might influence activity of cerebral area where frontal alpha asymmetry arises.

Key words: emotion, physiological response, cross-correlation

Correspondence concerning this article should be sent to: Motoyuki Sanada, Center for Applied Psychological Science (CAPS), Kwansei Gakuin University, 1-155 Uegahara Ichibancho, Nishinomiya, Hyogo 662-8501, Japan (e-mail: msanada@kwansei.ac.jp)

¹ 本実験は文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成事業（平成27～31年度，事業番号 S1511032）の一部として実施した。また，本研究の一部はJSPS科研費15K04165と17K13968の助成を受けた。

² 大森駿哉さん・小國龍治さん（実験実施補助）と伏田幸平さん・安富千尋さん（分析補助）に感謝します。

³ 現所属：日本学術振興会特別研究員（PD・関西学院大学）

⁴ 現所属：山形大学学術研究院

我々が日常的に経験する感情は時間によって変化する。本研究は、時間による感情状態の変化を明らかにする第一歩として、感情状態喚起下における複数の生理反応（脳波・心拍数）を計測し、それら生理反応間の時間的な関係性を調べた。

生理反応に着目した理由は、それ自体が感情の発生に深く関与していることにある。感情は脳（中枢神経系）と身体（自律神経系）の相互作用によって生じることは多くの研究者の共通見解であるといつてよいだろう。例えばソマティックマーカー仮説は、扁桃体が身体反応を引き起こし、また腹内側前頭前野が過去の経験と照らし合わせてその身体反応の良し悪しを判断することで、感情経験や意思決定が起こると主張する（Damasio, 1996）。これまで提唱された理論間で感情の生起メカニズムの説明に細かい違いはあるものの、どの理論も脳と身体生理反応の相互作用を重視していることは間違いない。よって感情の発生に関わる生理反応としては、中枢神経系・自律神経系の活動を合わせて計測するのが適切と考えられる。

本研究では、感情喚起下における生理反応間の時間的な関係性を明らかにすることを目的としたため、大脳皮質活動の指標として時間分解能の高い脳波を用いた。また自律神経系指標としては、末梢神経系指標の中では時間分解能が高い心拍数を指標として用いた。脳波は大脳皮質の電気的活動を反映し、ミリ秒単位の時間分解能で活動の変化を把握できる（金山, 2016）。また、心拍数は自律神経系の調整を受けて短期間でも揺らぐ。例えば、副交感神経系は1秒以内に心臓拍動に影響を及ぼしうる（Shaffer & Ginsberg, 2017）。

脳波では、ポジティブ・ネガティブ感情間（または接近・回避の動機間）で、前頭 α パワーの左右差が生じることが報告されている（Davidson, 1984; Davidson, Ekman, Saron, Senulis, & Friesen, 1990）。 α 波は8から13Hzで律動する脳波成分であり α パワーはその α 波成分の大きさを表す。また一般に α パワーの増大は、その起源となる皮質部位の活動抑制を反映する（Klimesch, Sauseng, & Hanslmayr, 2007）。Davidson (1984) は、感情（動機）の違いにより前頭 α パワー左右差が生じるメカニズムについて以下のように説明する。まず、左前頭葉がポジティブ感情状態における接近的行動の制御を、右前頭葉がネガティブ感情状態における回避的行動の制御を担っている。そして左右どちらかの前頭葉が活動するのに対応して、対側の前頭葉の活動が抑制され、その活動抑制が相対的な α パワーの増大をもたらす。この説によれば、例えば、お菓子を見てポジティブ感情が喚起され接近動機が高まった場合、左前頭葉が賦活する（抑制が外れる）ために左前頭 α パワーは右に比べて相対的に減少する（左<右）。一方、毛虫を見てネガティブ感情が喚起され回避動機が高まった場合、右前頭葉が賦活するため

に右前頭 α パワーは左に比べて減少する（左>右）。

また、心拍数も感情状態の違いによって変動する。身体の保護や行動の準備など身体の構えをつくるために自律神経系は循環器系の活動を調整するが、感情状態の違いによってとるべき身体の構えが異なるため、それに応じて心拍数の変動の仕方も異なると考えられている（Stemmler, 2004）。一般に、心拍数は交感神経系の賦活により上昇し、副交感神経系の賦活により低下するが、例えば恐怖状況では心拍数が増え、嫌悪（disgust）では心拍数は下がり、また楽しさを感じる場合に心拍数は上昇し、慈しみを感じる場合には低下する（Kreibig, 2010）。

このように、感情喚起下における生理状態について、脳波や心拍数を指標とした報告は多い。しかしながら、まず前頭 α パワー左右差についていえば、その時系列変化を扱った研究はほとんどない。これは脳波からある周波数帯域のパワーを抽出する場合、高速フーリエ変換（fast Fourier transformation: FFT）では時間情報を破棄してしまう（金山, 2016）ことが大きな原因である。唯一、Allen & Cohen (2010) はFFTではなくバンドパスフィルタによって α 成分を抽出し前頭 α パワー左右差の時間的な変動に着目したが、この研究は安静時データを用いており、感情を対象とはしていなかった。

一方、自律神経系活動を対象とした分野では、「主観的感情体験・表情などの行動・生理反応はそれぞれ連動するのか否か」という議論が存在し（Ekman, 1992）、Mauss, Levenson, McCarter, Wilhelm, & Gross (2005) は相互相関分析の導入によって主観的感情体験・表情・自律神経系反応の生起が連動することを報告した。しかし、これまで前頭 α パワー左右差と自律神経系活動とが連動するのかについて検討した研究はない。

そこで本研究は、まず、先行研究（Davidson et al., 1990; Kreibig, 2010）の報告を追試するため、感情喚起時各期間全体での前頭 α パワー左右差・心拍数を比較した。次に、前頭 α パワー左右差と心拍数の時系列データを算出して相互相関分析を行い、各指標が連動するのか否かについて調べた。特に、後者は新たな試みである。前頭 α パワー左右差と心拍数の変動に類似性はあっても時間差がある可能性もある。例えば、脳波は脳の電気活動を測定するため、脳活動に変化があればほぼ同時にその変化を反映しうるが、心拍間隔は短くても0.5秒程度のため（運動時を除く）、自律神経系活動に変化が生じてその変化を心臓の拍動が反映するには多くの場合脳波よりも時間を要すると考えられる。相互相関分析はこうした時間差（ラグ）も考慮に入れた上で各変動の類似性を検討できる。

本研究では、感情喚起のため動画を視聴させた。ネガティブ動画では、虫に対する「嫌悪」・ホラー映画

による「恐怖」、そしてポジティブ動画では赤ちゃんに対する「慈しみ」・他者が笑う場面の視聴による「楽しさ」というように、異なるカテゴリの感情を喚起する動画を用いた。

この手続きを踏まえた上での仮説と予測は以下の通りである。まず、主観的感情状態は、動画の感情価（ネガティブ・ニュートラル・ポジティブ）により異なる。次に動画期間全体の前頭 α パワー左右差は、動画の感情価によって左右差のパターンが異なる (Davidson et al., 1990)。一方心拍数は感情価ではなく感情カテゴリによって変動の方向が異なる。具体的には、恐怖や楽しみを喚起する動画では、交感神経系賦活により安静時に比べて心拍数は増大し、一方の嫌悪や慈しみを喚起する動画では副交感神経系賦活により減少する (Kreibig, 2010)。

そして前頭 α パワー左右差は感情状態における接近・回避動機の制御を反映し、また心拍数は行動に備えた自律神経系による身体の変化を反映するが、各指標は深く関連する機能を反映するため、それらが連動することは十分に予測できる。さらに、もし動機の変化を受けて身体の変化が生じるならば前頭 α パワー左右差が心拍数に先行して変動し、もし身体反応の変化を受けて動機が生じるならば (Damasio, 1996)、その逆となると予測できる。

方 法

被験者

大学生・大学院生22名（女性14名、左利き4名、19-23歳）がインフォームドコンセントを得た後に参加した。なお、本研究は関西学院大学の研究倫理委員会による承認を得た上で実施した。心電図データに1名分不備があったため、心拍数および相互相関の分析は21名のデータに対して行った。

刺 激

開眼安静時には、白い背景に黒の十字（注視点）をモニタ上に2分間呈示した。また閉眼安静時には、黒背景に白文字で「眼を閉じてください」と2分間呈示した。各安静期間の最初には、白背景に黒文字で「3・2・1」と数字を呈示するカウントダウン（3秒間）を挿入した。各安静期の最後には実験者が終了を伝えた。

各感情状態（ポジティブ・ネガティブ・ニュートラル）を喚起するために音声付きの動画を用いた（各感情価2つ、計6つ）。ポジティブ感情喚起動画は、「赤ちゃんが笑っている様子」（1分29秒；以下、赤ちゃん動画）と「人が笑っている動画を見た別の人がまた笑いだす、笑いの連鎖の様子」（2分31秒；以下、笑い連鎖動画）であった。また、ネガティブ動画

は、「ムカデがゴキブリを捕食する様子」（1分17秒；以下、ムカデ動画）と映画『シャイニング（原題：The Shining, 監督：Stanley Kubrick, 公開年：1980年）』のワンシーン（2分9秒；以下、シャイニング動画）であった。ニュートラル動画は、「工場排水が貯められたプール」（1分18秒；以下、工場排水動画）と「ゴミ回収車が段ボールを潰す様子」（30秒；以下、段ボール動画）であった。なお、赤ちゃん動画は「慈しみ」、笑い動画は「楽しさ」、またムカデ動画は「嫌悪」、シャイニング動画は「恐怖」の各感情を喚起すると想定した。各動画の最初には、黒い背景に白文字で「3・2・1」と3秒間のカウントダウンを挿入した。

手続き

被験者を実験室内の一人掛けソファに座らせ、同意書記入の後、脳波・心電図・皮膚電気反応・呼吸を測定するための電極・センサを装着した（皮膚電気反応・呼吸は本研究では分析を行わなかったが、実験状況を明らかにするため記載しておく）。実験の手続きは、開眼安静（2分）、閉眼安静（2分）、感情喚起動画視聴1回目（ポジティブ・ネガティブどちらかを2つ）、ニュートラル動画視聴（工場排水動画）、感情喚起動画視聴2回目（ネガティブ・ポジティブどちらかを2つ）、ニュートラル動画視聴（段ボール動画）の順で構成された。安静時の刺激と動画は大画面液晶モニタ（65V型、Panasonic社製、TH-65LFE8J）に呈示し、被験者は約3m離れた位置から視聴した。感情喚起動画視聴の2つのフェーズでは、12名の被験者はポジティブ、ネガティブの順に、残りの被験者（10名）は逆順に視聴した。また各フェーズ内で視聴する2本の動画の順序は被験者間でランダムとした。各動画によって喚起された主観的な感情状態・覚醒状態を計測するため、各動画の前後で質問紙に回答を求めた（動画6本×前後2回の計12回）。質問紙では、直感的に判断しやすいよう絵を用いて感情状態・覚醒状態を表したThe self-assessment manikin (SAM, Bradley & Lang, 1994) の改良版を使用し、それぞれ7件法で回答を求めた。感情状態評定用項目では、1が最もポジティブを、7が最もネガティブを表した。また覚醒度評定用項目では、1が最も「穏やか・リラックス」を、7が最も「興奮・高ぶった」を表した。実験中の被験者の様子をビデオカメラで記録した映像（音声なし）から、実験目的を知らない評定者1名が動画視聴中に表情を1回でも表出したか否かの評定を行った。

生理反応測定・解析

脳波は、頭皮上30部位（拡張10-20法、Fp1/2・F3/4・F7/8・FT7/8・T7/8・FC3/4・C3/4・TP7/8・P7/8・CP3/4・P3/4・O1/2・Fz・FCz・Cz・CPz・Pz・

Oz) と両耳 (A1/2) から銀塩化銀電極 (EASYCAP, EASYCAP社製) によって測定した (基準電極は鼻尖, グランド電極はAFz)。NuAMP (NeuroScan社製) を用いてバンドパス0.1-100Hz, サンプリングレート1000Hzで記録した。なお, 脳波分析時の基準電極も鼻尖を使用した。

脳波データは, Matlab (バージョン: R2014b, 8.4.0.150421, Mathworks社製)・EEGLAB toolbox (バージョン: 13.6.5b, Delorme & Makeig, 2004)・ERPLAB toolbox (バージョン: 5.1.1.0, Lopez-Calderon & Luck, 2014) を用いて分析した。まず, 各安静時・各動画視聴時に対応するエポックを切り出した後, エポックのみを連結したデータに対して独立成分分析を行い, ADJUST (バージョン: 1.1.1, Mogron, Jovicich, Bruzzone, & Buiatti, 2011) によってアーチファクトと判定された全ての独立成分を, 脳波データから除去した。その後再度エポックを切り出した。

前頭部における α パワー分析は, 各エポック全体でのパワー平均値の算出と各エポック内での時系列データ算出を行った。エポック全体の α パワー算出では, 各エポック全体のデータに対してFFTを行った (分析窓: 2048 point, 窓関数: Hamming Window, NFFT: 2048 point, 分析窓同士の重複: 1024 point)。NFFTは分析に用いたデータ数を表す。算出されたパワー値を自然対数変換した後, α 帯域 (8-13Hz) の平均パワー値を計算し, 前頭部左右の比較のためF8電極 (右前頭) の値からF7電極 (左前頭) の値を差分した。F7・F8電極は, 心拍数との相互相関を調べる目的に合わせて, 左右差が明瞭であった部位を採用した。次に各エポック内でのパワー値時系列データ算出のため, 各エポックの脳波データに対して, ERPLABのフィルタ機能を用い8-13Hzのバンドパスフィルタ (FIR Filter, 遮断周波数での信号減衰率: -3dB, order: 4092) をかけ α 帯域の成分を抽出した。なお, orderは減衰特性の傾きを表し, 高いほど急峻となる。パワー値算出のため, F7・F8電極における振幅値を自乗し自然対数変換したものを0.2秒ごとに平均した。そしてF8電極の値からF7電極の値を差分して左右差を算出し, 1.8秒幅の移動平均をかけて波形を平滑化した。この平滑化は, ノイズによる変動を低減し, 相互相関の検出率を上げる目的で行った (Kettunen, Ravaja, & Keltikangas-Järvinen, 2000)。

心電図は, 第II誘導 (右鎖骨上と左第八肋骨上, グランドは左第七肋骨上) でディスポーザブル電極 (Blue Sensor・Ambu社製) と8ch多用途生体アンブシステム (ニホンサンテック社製) を用いて測定した。また記録ソフトウェアはInput Monitor (ニホンサンテック社製) を用いて, バンドパス1.5-30Hz, サンプリングレート1000Hzで記録した。

心電図データを各期間で切り分け, ARTiFact (パー

ジョン: 2.09, Kaufmann, Sütterlin, Schulz, & Vögele, 2011) を用いてR-R間隔から瞬時心拍数を算出した。その後脳波同様, 各期間での平均心拍数と, 動画開始から0.2秒ごとの時系列データを算出し, 後者は1.8秒幅の移動平均で平滑化した。

前頭 α パワー左右差と心拍数の相互相関分析については, Mauss et al. (2005) を参考に行った。まず, 各動画視聴期間の前頭 α パワー左右差・心拍数時系列データから, 被験者ごとの最大相互相関係数を求めた (ラグは-10秒から+10秒)。この最大相互相関係数をフィッシャーの z 変換によって正規分布化し, 統計的分析では基準値0と z 変換後の最大相互相関係数との間で1サンプルの t 検定を行った。また, 各期間の平均最大相互相関係数を算出するため, z 変換後の最大相互相関係数を被験者間で平均したものを相互相関係数 (r) に逆変換した。

また多重比較・ t 検定の効果量Cohen's d は, 各標本の平均値差分を両標本の不偏標準偏差 (ただし1サンプル t 検定の場合は1標本の不偏標準偏差) で割った値を用いた。

結 果

主観評定・表情表出

感情状態・覚醒度に関する評定値をFigure 1に示す。ポジティブ・ネガティブ動画順に視聴した被験者と逆順に視聴した被験者で分けて評定値を算出したところ (Figure 1a), ネガティブ動画では1本目の動画の視聴によりネガティブ感情状態が喚起され, 次の動画前に少しニュートラルに回復し, 2本目の動画視聴により再度ネガティブ感情状態が喚起されていた。一方ポジティブ動画視聴時では, 1本目の動画視聴によりポジティブ感情状態が喚起され, 2本目の動画前後の値は1本目の動画視聴後と大きな変動はなかった。そこで各動画前後の評定値差分の使用は妥当でないと判断し, 感情状態の統計的分析には各動画視聴後の評定値と最初の動画視聴前の評定値との差分値を用いた。この値を感情価 (ネガティブ・ニュートラル・ポジティブ) 各2動画間で平均し, 感情価を要因とした1要因3水準の分散分析を行った。検定の結果, 要因の主効果が有意であった ($F(2,42) = 74.28, p < .01, \eta_p^2 = 0.78$)。また多重比較 (Holmの補正) を行ったところ, 全水準の組み合わせ間で有意差があった ($ps < .01, ds > 1.25$)。この結果とFigure 1cから, 予測通りネガティブ動画後はその他動画後に比べてよりネガティブに, ポジティブ動画後はその他動画後に比べてよりポジティブになったことがわかる。

覚醒度もその持続の程度にポジティブ・ネガティブ動画で違いが見られたため (Figure 1b), 感情状態と同様の手順を用い分散分析 (1要因3水準) を行った。

Figure 1. 感情状態および覚醒度の心理評定値の平均値と標準誤差

動画前後の (a) 感情状態 (b) 覚醒度の評定平均値を視聴順に並べたもの。NPはネガティブ・ポジティブの順、PNはポジティブ・ネガティブの順で視聴した被験者のデータ。(c) 感情状態 (d) 覚醒度の主観評定平均値。各グラフのエラーバーは標準誤差を示す。

Table 1
各動画視聴時に表情表出した人数

感情価	動画	表情表出した人数
ネガティブ	ムカデ (嫌悪)	8
	シャイニング (恐怖)	2
ニュートラル	工場排水	0
	段ボール	1
ポジティブ	赤ちゃん (慈しみ)	9
	笑い連鎖 (楽しさ)	10

有意な要因の主効果が見られ ($F(2,42) = 45.65, p < .01, \eta_p^2 = 0.49$), 多重比較 (Holmの補正) の結果, 全水準の組み合わせ間で有意差があった (ニュートラル・ポジティブ間: $p = .04, d = 0.87$; その他 $ps < .01, ds > 1.42$)。この結果と Figure 1d から, ネガティブ動画後にはその他動画後に比べて覚醒度が高く, またポジ

ティブ動画後にはニュートラル動画に比べて覚醒度が高くなったことがわかる。

表情表出した人数を Table 1 に示す。その人数は笑い連鎖動画で最も多く, 以下赤ちゃん・ムカデ・シャイニング・段ボール・工場排水動画と順に少なくなった。ただしフリードマン検定を行ったところ, 動画間で人数に有意な差は見られなかった ($p = .67$)。

各期間全体における前頭 α パワー左右差・心拍数

各期間全体における前頭 α パワー左右差を Figure 2a に示す。主観評定と同様感情価各2動画間で平均し, 1 要因3水準の分散分析を行った結果, 要因の主効果が有意であった ($F(2,42) = 3.63, p = .04, \eta_p^2 = 0.15$)。多重比較 (Holmの補正) の結果, ネガティブ・ニュートラル間では有意差が見られず ($p = .81$), その他水準間では有意差が見られた ($ps < .05, ds > 0.61$)。この結果と Figure 2a からポジティブ動画視聴時には予測

Figure 2. 前頭 α パワー左右差と心拍数の平均値と標準誤差
(a) 前頭 α パワー左右差 (b) 心拍数の平均値。各グラフのエラーバーは標準誤差を示す。

Table 2
各期間における前頭 α パワー左右差と心拍数の相互相関

感情価	期間・動画	被験者全体 最大相互相関係数			代表1名 (S20) 最大相互相関係数	
		z 変換値の平均 (標準誤差)	逆変換 r	ラグ平均 (標準誤差)	r	ラグ
ネガティブ	開眼安静	-0.05 (0.16)	.05	0.20s (1.15s)	.52	-1.0s
	閉眼安静	0.20 (0.17)	.19	0.59s (0.91s)	.26	10.0s
	ムカデ (嫌悪)	-0.08 (0.17)	-.08	0.73s (0.94s)	.40	9.4s
ニュートラル	シャイニング (恐怖)	0.00 (0.14)	.00	0.40s (0.93s)	-.57	-1.2s
	工場排水	-0.22 (0.15)	-.22	-0.14s (1.00s)	-.31	-3.2s
	段ボール	-0.16 (0.19)	-.16	-1.16s (1.03s)	-.65	4.8s
ポジティブ	赤ちゃん (慈しみ)	0.19 (0.09)	.19 [†]	1.81s (1.24s)	-.20	9.8s
	笑い連鎖 (楽しさ)	0.30 (0.14)	.29*	2.11s (0.95s)*	.85	1.0s

[†] $p < .1$, * $p < .05$

通りその他動画視聴時より右前頭 α パワーが左に比べて増大したことがわかる。

各期間における平均心拍数をFigure 2bに示す。心拍数は感情カテゴリによって予測が異なるため、各動画視聴中から開眼安静時の心拍数を差分した後、各動画を水準とする1要因6水準の分散分析を行った。しかし要因の主効果は有意でなかった ($F(5,100) = 1.52$, $p = .19$, $\eta_p^2 = 0.07$)。

前頭 α パワー左右差と心拍数の相互相関分析

最大相互相関係数を z 変換した値の被験者間平均値と標準誤差、及びその平均値を逆変換して相互相関係数 (r) に戻した値、そして相互相関係数が最大となったラグの被験者間平均と標準誤差をTable 2に示す。ラグが負の時は前頭 α パワー左右差に心拍数が連

動し、正の時はその逆を意味する。 z 変換後の最大相互相関係数と0の間で1サンプルの t 検定 (両側・補正無) を行った結果、ポジティブ動画時に有意・有意傾向の弱い正の相関が見られた (笑い連鎖: $r = .29$, $t(20) = 2.13$, $p = .046$, $d = 0.46$; 赤ちゃん: $r = .19$, $t(20) = 2.08$, $p = .05$, $d = 0.45$)。ラグも同様に1サンプルの t 検定 (両側・補正無) を行った結果、笑い連鎖動画において正のラグが有意であった ($t(20) = 2.23$, $p = .04$, $d = 0.49$)。つまり笑い連鎖動画において心拍数に前頭 α パワー左右差が続く形で連動が見られた。

時系列データの振る舞いは個人差が大きく、被験者間平均値のグラフを示すことは妥当でないと判断し、笑い連鎖動画時の相互相関係数が高かった被験者 (ID=S20) を代表としてその相互相関係数とラグをTable 2に、また各動画視聴時における前頭 α パワー

Figure 3. 各期間における前頭 α パワー左右差（実線）と心拍数（点線）の時系列変化の比較。変動パターンは個人差が大きいため、相互相関係数の高かった個人（S20）のデータを示す。なお、心拍数の軸のスケールは各図で異なるので注意。

左右差（実線）と心拍数（破線）の時系列データを重ねてFigure 3に示しておく。

考 察

本研究の目的は、感情体験時における、複数の生理反応間の時間的な関係性を明らかにすることであった。

まず主観評価の結果から、ネガティブ・ポジティブ各動画視聴時に、対応する感情状態が喚起されていたことが確認された。次に各期間の前頭 α パワー左右差は、ポジティブ動画視聴時に最も右優位のパターンを示した。この結果は予測と一致するが、ネガティブ動画視聴時には左右差が生じず、これは予測と一致しない。この理由の1つとして、本研究の実験ではポジティブ動画に比べネガティブ動画視聴時に被験者の表情表出が少なかったことが考えられる（Table 1）。Davidson et al. (1990) は、被験者が表情表出した間のデータのみを用いて前頭 α パワー左右差の算出を行った。本研究では、表情表出が見られた被験者が少ないこと、映像からは表情生起の正確なタイミングの判定が困難であることから、表情表出時だけのデータを用いた分析は行っていない。しかし統計的に有意ではないものの、表情表出をした人数はポジティブ動画で多く、これは前頭 α パワー左右差のパターンと一致

する。（Table 1, Figure 2a）。一方で、 α パワー左右差の程度は、主観的感情状態の程度とは一致していない（Figure 1c, 2a）。このことから、感情状態喚起下における前頭 α パワー左右差の出現には、感情状態の強度より表情表出が関係している可能性も考えられる。今後感情研究において前頭 α パワー左右差を用いる場合、表情についても筋電図などで定量的な記録することが重要と考えられる。

動画視聴中の平均心拍数は、どれも開眼安静期間と比べて有意な差が見られず予測と一致しなかった。しかし、心拍数は感情状態だけではなく注意状態によっても大きく影響を受けることから（Lacey, 1959）、注意の効果が交絡していた可能性もある。

前頭 α パワー左右差と心拍数の相互相関分析では、ポジティブ動画において弱い相関が有意・有意傾向で見られた（Table 2）。この結果は感情状態における動機と身体反応との関連性を考えるうえで興味深い。近年、前頭 α パワー左右差の有力な電源候補として背外側前頭前野（dorsolateral prefrontal cortex: DLPFC）が挙げられている（Berkman & Lieberman, 2010）。また前頭 α パワー左右差は、感情よりもむしろ接近・回避の動機の指標として扱われることが最近では一般的である（Harmon-Jones & Allen, 1998）。DLPFCはまさに認知・行動の制御を担うことから（MacDon-

ald, Cohen, Stenger, & Carter, 2000), 前頭 α パワー左右差という現象が行動の構え・動機という心理機能に深く関与することは理解しやすい。そして自律神経系活動が感情状態によって変動するのは、感情の種類の違いによってとるべき行動の構えが異なるからと考えられている (Stemmler, 2009)。これらを踏まえれば、ポジティブ動画視聴時に前頭 α パワー左右差と心拍数が緩やかに連動していた結果は、感情状態というより動機の違い (接近・回避) と身体の構えが連動する様子を反映したのかもしれない。

ポジティブ動画のみで前頭 α パワー左右差と心拍数の連動が観察されたことは、これらの動画視聴時に多くの被験者が表情表出をした事実と関係する可能性がある。前頭 α パワー左右差の電源候補であるDLPFCと自律神経系は、感情状態下における動機と身体の構えを制御するシステムとして存在するため、これらの活動が連動することで表情という行動が現れたのかもしれない。ただしネガティブ動画で比較的表情表出が多かったムカデ動画では相互相関の傾向は見られず (Table 1, 2), 感情価や感情カテゴリによってその機序は異なる可能性もある。これらの可能性の検証は今後の課題である。

また笑い連鎖動画において、心拍数に2秒程度遅れる形で前頭 α パワー左右差が連動していたことは (Table 2), 動機が身体反応の変化を受けて生じるという予測を支持する結果であり、中枢神経系と自律神経系の関係のダイナミズム解明において重要な知見と言える。Berkman & Lieberman (2010) によれば、前頭 α パワー左右差の電源候補であるDLPFCは、知覚した対象が観察者にもたらす感情よりも、その対象に接近するか回避するかという最終的な行動の動機によって賦活の左右差が決定される。言い換えれば、意思決定とほぼ同じタイミングでDLPFCの賦活左右差が生じており、またソマティックマーカー仮説によれば、腹内側前頭前野が身体反応を判断した結果意思決定が生じる。これらを踏まえれば、前頭 α パワー左右差は、最終的な意思決定レベルでの動機を反映しており、それが自律神経系活動による身体反応の影響を受けている可能性も理解できる。ただしソマティックマーカー仮説では、意思決定が必要な場面において前頭前野は身体反応を参照するという一時的な過程が想定されていたのに対し、本研究が示すところは前頭 α パワー左右差の電源部位は身体反応を継続的にモニタしているというものであった。前頭 α パワー左右差の電源部位が実は身体反応をモニタし続けており、その反応がある閾値を超えた場合に初めて意思決定・行動が生じると考えればソマティックマーカー仮説との矛盾は回避できるが、その解明は今後の課題である。また自律神経系反応・前頭 α パワー左右差の連動には約2秒という大きな遅延があったことから、自律

神経系反応の生起とそれに従う前頭前野の活動との間に複数の過程が介在する可能性も考えられる。ただしこの点もより詳細な検討が必要と言える。また被験者1名のデータではあるがFigure 3の笑い連鎖動画における時系列変化を見ると、心拍数・前頭 α パワー左右差変動のどちらが先かは時間によって異なる印象もあり、心拍数に続く前頭 α パワー左右差の変動という現象が普遍的か今後検討する必要がある。

本研究の問題点としては、まず有意な相互相関がポジティブ動画時に見られたもののその効果量が小さいことが挙げられる。これは被験者間で相関の正負・程度の一貫性が低いことを意味するが、何が相関の正負・程度を決定する要因なのか検討していくことは今後の課題である。そして今回みられた連関が自律神経系反応と脳活動以外の要因により生じた疑似相関でないことを今後立証していく必要もある。また、本研究では、感情状態というよりも動機・行動の構えを各生理指標が反映していた可能性があり、さらにその指標に対して注意が交絡していた可能性を排除できていない。感情と動機とはそもそも独立した心理機能ではないとも考えられるが (戸田, 1992), 感情カテゴリに着目すれば感情価と動機の方向性が一致しないもの (例: 怒りはネガティブかつ接近) もあり、こうした点に着目することで感情・動機が前頭 α パワー左右差・自律神経系・またそれらの連動に対しどのような影響を与えるか個別に検証することが可能かもしれない。また注意の効果が交絡していた可能性については、将来的には、注意状態を明確に反映する指標や、注意状態を実験的に操作する手続きなどを用い、検討していく必要がある。

引用文献

- Allen, J. J., & Cohen, M. X. (2010). Deconstructing the "resting" state: Exploring the temporal dynamics of frontal alpha asymmetry as an endophenotype for depression. *Frontiers in Human Neuroscience*, 4, 232.
- Berkman, E. T., & Lieberman, M. D. (2010). Approaching the bad and avoiding the good: Lateral prefrontal cortical asymmetry distinguishes between action and valence. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22, 1970-1979.
- Bradley, M. M., & Lang, P. J. (1994). Measuring emotion: The self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, 25, 49-59.
- Damasio, A. R. (1996). The somatic marker hypothesis and the possible functions of the prefrontal cortex. *Philosophical Transactions of the Royal Society B. Biological Sciences*, 351, 1413-1420.
- Davidson, R. J. (1984). Affect, cognition, and hemi-

- spheric specialization. In C. E. Izard, J. Kagan, & R. B. Zajonc (Eds.), *Emotions, cognition, and behavior* (pp. 320-365). New York: Cambridge University Press.
- 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.
- Delorme, A., & Makeig, S. (2004). EEGLAB: An open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, 134, 9-21.
- Ekman, P. (1992). An argument for basic emotions. *Cognition & Emotion*, 6, 169-200.
- Harmon-Jones, E., & Allen, J. J. (1998). Anger and frontal brain activity: EEG asymmetry consistent with approach motivation despite negative affective valence. *Journal of Personality and Social Psychology*, 74, 1310-1316.
- 金山範明 (2016). 脳波の測定・収録 開 一夫・金山範明 (編) 脳波解析入門——EEGLABとSPMを使いこなす——(pp. 11-32) 東京大学出版会
- Kaufmann, T., Sütterlin, S., Schulz, S. M., & Vögele, C. (2011). ARTiiFACT: A tool for heart rate artifact processing and heart rate variability analysis. *Behavior Research Methods*, 43, 1161-1170.
- Kettunen, J., Ravaja, N., & Keltikangas-Järvinen, L. (2000). Smoothing facilitates the detection of coupled responses in psychophysiological time series. *Journal of Psychophysiology*, 14, 1-10.
- Klimesch, W., Sauseng, P., & Hanslmayr, S. (2007). EEG alpha oscillations: The inhibition-timing hypothesis. *Brain Research Reviews*, 53, 63-88.
- Kreibig, S. D. (2010). Autonomic nervous system activity in emotion: A review. *Biological Psychology*, 84, 394-421.
- Lacey, J. I. (1959). Psychophysiological approaches to the evaluation of psychotherapeutic process and outcome. In E. A. Rubinstein, & M. B. Parloff (Eds.), *Research in psychotherapy* (pp. 173-192). Washington, D.C.: American Psychological Association.
- Lopez-Calderon, J., & Luck, S. J. (2014). ERPLAB: An open-source toolbox for the analysis of event-related potentials. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 213.
- MacDonald, A. W. 3rd, Cohen, J. D., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2000). Dissociating the role of the dorsolateral prefrontal and anterior cingulate cortex in cognitive control. *Science*, 288, 1835-1838.
- Mauss, I. B., Levenson, R. W., McCarter, L., Wilhelm, F. H., & Gross, J. J. (2005). The tie that binds? Coherence among emotion experience, behavior, and physiology. *Emotion*, 5, 175-190.
- Mognon, A., Jovicich, J., Bruzzone, L., & Buiatti, M. (2011). ADJUST: An automatic EEG artifact detector based on the joint use of spatial and temporal features. *Psychophysiology*, 48, 229-240.
- Shaffer, F., & Ginsberg, J. P. (2017). An overview of heart rate variability metrics and norms. *Frontiers in Public Health*, 5, 258.
- Stemmler, G. (2004). Physiological processes during emotion. In P. Philippot, & R. S. Feldman (Eds.), *The regulation of emotion* (pp. 33-70). Erlbaum: Lawrence Erlbaum Associate.
- 戸田正直 (1992). 感情——人を動かしている適応プログラム 東京大学出版会

(2018年3月24日受稿, 2019年1月10日受理)