

研究報告

脳波音楽における ERP 測定に関する検討 Assessing the feasibility of ERP measurement for artistic performances

三井 颯人
Hayato MITSUI
筑波大学
Univ. of Tsukuba

寺澤 洋子
Hiroko TERASAWA
筑波大学
Univ. of Tsukuba

濱野 峻行
Takayuki HAMANO
株式会社 coton
coton Inc.

柴玲子
Reiko SHIBA
慶應義塾大学
Keio Univ.

三木則尚
Norihisa MIKI
慶應義塾大学
Keio Univ.

古川聖
Kiyoshi HURUKAWA
東京藝術大学
Tokyo Univ. of the Arts

概要

脳波による音楽において、事象関連電位（ERP）を用いた例は未だ多くない。その理由としては、パフォーマンス環境における ERP 計測の難しさ、つまりリアルタイム性の低さ、周辺雑音の影響、測定精度の不確かさが挙げられる。本研究では、パフォーマンスに適していると期待される DIY 用脳波計（Open BCI）とキャンドル型電極を用いて、通常の雑音がある環境における ERP の精度、パフォーマンスに必要な測定時間を検討した。

1. はじめに

1.1. 脳波を用いた音楽パフォーマンス

本研究を行う目的である、脳波音楽プロジェクトについて説明する。脳波音楽プロジェクトは、脳波を元に音楽や映像を生成する芸術パフォーマンスの実施と、必要な技術開発を行うプロジェクトである（BDM）。東京藝術大学の古川聖が構想し、東京藝術大学、筑波大学、慶應義塾大学等複数の機関で共同研究が行われている。

脳波音楽プロジェクトで行うライブパフォーマンスでは、複数人の参加者の脳波を同時に計測し、ほぼリアルタイムに可聴化することを目指している。また、単に脳波を計測するのではなく、刺激に対応した脳波の成分である事象関連電位を可聴化に用いる点が、本プロジェクトの特徴である。これによって、刺激に対応した参加者の驚きや関心といった情動の協調を音楽と

して表現することを目指している。加えて、脳波計の電極についても改良を進めている。

1.2. ERP と P300

ERP (event-related potential) は、特定の事象に関連して生じる脳の電位である。事象となるのは視覚や聴覚等の刺激であり、その事象に対する脳の認知過程が脳波に反映される。ERP は、脳活動に伴い常に生じている背景脳波と重なって発生する。背景脳波を除去するために、刺激提示を繰り返し行い、刺激発生のタイミングで分割した脳波の試行を加算平均する。

ERP 成分の中でも代表的なものとして、P300 が挙げられる。P300 は ERP 波形において刺激提示後約 300 ミリ秒後に出現する正電位のピークである。P300 は課題に対する注意や、予想と異なる刺激への驚きを表したものとされている。

P300 の特徴量として代表的なものに、潜時 (latency) と振幅 (amplitude) がある。潜時は刺激が提示された時刻から、P300 が頂点に達するまでの時間を指す。振幅は P300 頂点の電位と基準電位の差分となっており、基準電位は一般に刺激時刻の 0.1 秒前から刺激発生時刻までの電位の平均をとる。オドボール課題¹によって観測される P300 成分は、標的刺激が提示された時の方が振幅が大きくなることが知られている。これは頻度の低い刺激に対して、より多くの注意が向けられるためと考えられる。

¹ 頻度に差をつけた複数種類の刺激を、ランダムな順番で提示する課題。

2. 現在ある課題

ライブパフォーマンスで ERP を計測する試みはこれまで行われていない。その実施にあたっては、以下のような問題が発生することが予想される。

2.1. 計測場所

脳波は数十マイクロボルトの微弱な電位であり、外部のノイズの影響を受けやすい。学術研究を目的とした計測ではこうしたノイズの混入を減らすため、防磁の考慮がなされた実験室で計測を行うことが多い。一方ライブパフォーマンスにおいては、会場によって環境が異なり、ノイズへの対策が不十分となることが予想される。

2.2. 機材

学術研究で用いられる本格的な脳波計は大型かつ高価で、複数台の準備が現実的ではない。また、玩具や健康グッズとして、安価な脳波計が一般向けに販売されている。しかし、こうした脳波計は、専用ソフトウェアを通じてデータを表示するため、生の脳波データの利用が難しい。また、拡張性に乏しく、電極やヘッドセットの改良が難しい。

そこで、本研究では DIY 用の脳波計である OpenBCI 社の Cyton Biosensing Board(以下 OpenBCI)(OpenBCI)を用いる。OpenBCI は、乾電池で駆動し最大 8 チャンネルの脳波を計測可能な脳波計である。小型、軽量であり、データをワイヤレスで PC に送信して MATLAB や Python 等で取り扱うことができる。加えて、価格も約 500 米ドル(2020 年 1 月現在)と脳波計としては安価である。したがってライブパフォーマンスで利用する脳波計として適していると考えられる。ただ、OpenBCI は基盤がむき出しであり、先述したノイズへの耐性には疑問が残る。

2.3. 計測時間

ライブパフォーマンスではパフォーマンス中に脳波を計測するため、計測時間は短いほどよい。ERP は 1 章で説明したように、背景脳波を打ち消すために加算平均を行う。加算回数は一般に P300 の場合、数十回程度である。ただし、計測時の瞬き、体動等は大きなノイズを混入させるので除去する必要がある。加えて、先述した計測条件の違いがあるため、必要な計測回数は検討の余地がある。

3. 関連研究と本研究の位置づけ

本章では、脳波によって音楽を制作する試み、ERP 算出に関する研究、脳波計や電極に関する研究の 3 点から、先行研究について述べる。

3.1. 脳波を用いた音楽に関する研究

脳波を用いて音楽を制作する試みは、1960 年代頃から行われてきた。その手法は大別して 2 種類ある。

ひとつは、脳波成分を何らかのアルゴリズムで音のパラメータに変換するものである。最初期のパフォーマンスとして、Lucier の "Music for Solo Performer" が挙げられる(Strabel 2014)。この作品は脳波のアルファ波(安静を表す 10Hz 前後の成分)を増幅し、スピーカーを介して複数の打楽器を演奏した。近年の例を挙げる。Leslie ら(Leslie 2011)は 0.1-30Hz の脳波を 6 つの帯域に分け、その振幅を独自のアルゴリズムで 2 つの感情の軸に変換し、それを元に音と映像を生成した。

もうひとつは、脳波で音楽情報を入力するものである。音楽版の BCI(ブレイン・コンピュータ・インターフェース)といえる。Hamadicharef ら(Hamadicharef 2010)は、P300 を利用して文字入力を行う P300 Speller を応用し、音符や休符の入力、旋律の再生を行うシステムを作成した。

本研究が目的とするパフォーマンスと比較すると、前者の形式で P300 を利用する事例は見つからない。後者の形式は P300 を利用する点は共通しているが、想定する目的が大きく異なるほか、測定環境、条件に関する検討は十分になされていない。

3.2. ERP に関する研究

ERP の加算回数に関する研究を紹介する。Cohen と Polis(Cohen 1997)は 24 人の被験者に対して音声、映像オドボール課題の ERP を測定し、P300 成分の潜時と振幅について検討を行った。この研究では全参加者の脳波を加算する区画を前半から後半に徐々に変えて算出した ERP と、加算回数を増やした ERP の両面から検証を行っている。その結果、前者では P300 の測定値は変動するものの、区画による有意差はみられなかった。後者では加算回数の増加に伴い P300 の振幅は減少し、潜時はわずかに長くなった。また、標的刺激の生成確率や刺激の種類によらず ERP は一定のパターンを示すこともわかった。さらに、p300 の潜時と振幅は、加算回数 20 回程度で統計的に安定することも示された。

Cohen らの研究は P300 成分と加算区画、加算回数との関係を明らかにしている。これは本研究の目的と近いものの、脳波を計測する環境や装置の条件が異なるため、同様の結果が得られるとは限らない。そのた

め、改めて実験を行い、我々が想定する条件での検討を行う。

3.3. 脳波計と電極に関する研究

本研究で用いる DIY 用脳波計である OpenBCI についての研究を紹介する。Jérémy(Jeremy 2016)は OpenBCI と研究用脳波計の双方に、電気回路を用いて分離した同一の電極を接続した。被験者に P300 Speller で文字入力を行わせ、その認識率および計測した脳波の相関を調べた。入力精度は OpenBCI が 0.918 で研究用脳波計が 0.961 で、有意差は認められなかった。脳波についても非常に高い相関を示した。

続いて、脳波音楽プロジェクトで開発中のキャンドル型電極について述べる。既存の皿型電極は頭皮と電極間の抵抗値を下げるために、導電性のジェルを塗付ける必要がある。これは時間がかかる上、計測者にとっても負担となる。一方、キャンドル型電極は多数の微小な針を備えており、針が角質層を貫通することでジェルを用いずに抵抗値を減らすことができる。キャンドル型電極を用いて Yoshida ら (Yoshida 2018) は ERP を計測した。純音および言語による音声オドボール課題により ERP を計測したところ、P300 およびミスマッチ陰性電位を正常に計測できた。

Jérémy の研究、Yoshida らの研究により、OpenBCI およびキャンドル型電極が ERP を計測する機材として有用であることが示されている。しかし、加算回数および計測回数に関する検討はなされていない。また、脳波計、電極の横断的な考察も行われてはいない。

3.4. 本研究の位置づけ

先行研究では、理想的な測定条件における加算回数と ERP の推移と、本研究で用いる脳波計と電極で P300 が測定可能であることが分かっている。本研究がこれらと異なる点は、ノイズの混入を含めた実際の計測時間を検証する点と、脳波計や電極の条件について横断的な比較を行う点にある。

4. 実験

本研究の目的は、DIY 用脳波計の OpenBCI と新型電極を用いて、一般的な環境で ERP を計測可能かどうかを検証することである。実験 1 では 10 人の被験者にオドボール課題を課して脳波を計測し、ERP 波形および P300 をリファレンスデータと比較する。実験 2 では同じ環境で機材を変えた場合の比較を行うため、研究用の小型脳波計と、脳波音楽プロジェクトで開発中の新型電極を用意した。これらと OpenBCI を用いて同一被験者で脳波を計測し、得られた ERP を比較する。

4.1. 実験 1: 手法

実験は筑波大学内春日エリア 7B 棟 232 教室 (音響・心理ラボ)、脳波計は OpenBCI を用いた。実験室はある程度の遮音性が備わっているが、本格的な防磁環境ではない。ライブパフォーマンスを行う会場は、照明装置や観客の電子機器など、更に多くのノイズが想定される。本研究では脳波計や電極の比較に主眼を置くことにし、実験の統制のためにこの計測場所を選んだ。

実験参加者は、21-24 歳 (平均年齢 22.5 歳) の健康な男女 10 名である。参加者には実験概要書および口頭で実験目的、方法、プライバシーの保護、安全性、参加の自由意志等を説明し、同意書に記載を行った上で参加してもらった。本実験は筑波大学の倫理審査委員会より承認を得ている。

参加者には椅子にリラックスした状態で座り、視線は前方においた小物に向けるよう指示した。脳波計の電極は右耳朶を基準電極、国際 10-20 法における F4(右前頭部)と P3 (左頭頂部) の位置に計測用電極、左耳朶を接地とした。抵抗値は 30k オーム～80k オーム程度で、参加者によって差異がみられた。加えて、後半に計測した 6 人については、計測の前後で抵抗値を比較した。電極の抵抗値は連続的に変化していたが、平均して約 10k オームほど抵抗値が増加していた。

刺激には音声オドボール課題を用いた。標準刺激は 440+880+1760Hz、標的刺激は 247+494+988Hz の短いサイン波の合成音で、1 秒の間隔で 4:1 の確率でランダムに提示された。標準刺激は 400 回、標的刺激は 100 回提示された。音声刺激の提示はスピーカー (Generec 8020C、1 台) で行い、音量は参加者の好みの音量に設定した。刺激提示中は、標準刺激が聞こえた場合にキーボードのキーを押す課題を課した。刺激の提示および、脳波計から送信されたデータの記録はラップトップを使用した。

4.2. リファレンスデータについて

比較対象に用いたデータセットは、ブレイン・コンピュータ・インターフェスを推進するためのプロジェクトである BNCI Horizon 2020 の公開データセット (BNCI Horizon) のひとつ、5. Auditory oddball during hypnosis (005-2014) である。リファレンスデータでは聴覚オドボール課題を用いている。各刺激は本実験と同様の合成音で、およそ 1 秒の間隔で 7:1 の確率でランダムに提示された。標準刺激は 420 回、標的刺激は 60 回提示され、2 人の被験者を対象に 4 回ずつ計測が行われた。

本実験ではリファレンスデータの 8 つのデータのうち、ノイズの混入が少ないと判断した 4 つ (2 人の被験者からそれぞれ 2 つずつ) を採用し、今後の分析に利用する。以下このデータを、リファレンスと呼称する。

4.3. 実験 2:手法

実験 2 は、脳波計と電極の変化が ERP に及ぼす影響を調べるため、同一の被験者で複数回脳波を計測し、ERP を算出した。

実験 2 を実施した場所は慶應義塾大学矢上キャンパスの会議室である。実験 1 と場所が異なっているが、これは使用機材の都合である。この場所も特に防磁に配慮された環境ではない。

脳波計は実験 1 で使用した OpenBCI に加え、ミュキ技研のポリメイトミニ AP108(Polymate) (以下ポリメイトミニと呼称) を使用した。ポリメイトミニは研究用のワイヤレス生体計測装置で、脳波、筋電図、心電図等を計測できる。研究用の小型脳波計として広く用いられており、OpenBCI と比較する機材としてふさわしいと考えられる。

電極は関連研究で述べたキャンドル型電極と、通常の皿型電極である。実験参加者は、24 歳の男性 1 名である。実験の手続きは、おおむね実験 1 と同様に行った。

実験 2 では脳波計と電極を組み合わせ、表 1 に示した 3 条件で計測を行った。当初は OpenBCI とキャンドル型電極の組み合わせでも計測する予定だったが、実験当日に接続不良があり、測定を成功させられなかったため断念している。電極の抵抗値はキャンドル型電極を用いた条件 1 が約 200k オーム、それ以外は約 30k オームであった。

表 1: 実験 2 で用いた機材の組み合わせ

条件名	脳波計	電極
条件 1	ポリメイトミニ	キャンドル型電極
条件 2	ポリメイトミニ	皿型電極
条件 3	OpenBCI	皿型電極

4.4. 実験 1、2 のデータ処理、分析

収録した脳波およびリファレンスの脳波から F4 で計測した脳波を取得し、各データの全体に 1Hz のハイパスフィルタおよび 40Hz のローパスフィルタを適用した。その後、刺激提示時間の 0.2 秒前から 0.8 秒後までを試行として切り分けた。続いて、目視で各試行の脳波を確認し、大きなノイズを含む試行を除外した。標準刺激、標的刺激それぞれ 40 試行ずつを取得した。

分析に用いる P300 の特徴量として、潜時 (latency) と振幅 (amplitude) を算出した。P300 の頂点は刺激発生時刻から 0.2-0.4 秒の間の最大電位とした。基準電位は、刺激発生時刻の 0.1 秒前から刺激発生時刻までの電位の平均とした。求めた P300 頂点を潜時、P300 頂点の電位と基準電位の差を振幅とした。

加算回数を 0-4、0-8、...、0-40 回と 4 回刻みで増やしていき、それぞれの ERP を算出して P300 の潜時と振幅を求めた。さらに、実験 1 の結果について、加算回数が増えたら P300 特徴量への影響を分析するために対応あり二元配置分散分析 (ANOVA) を行った。要因には、刺激の種類と加算回数の 2 要因を設定した。

5. 結果

5.1. 実験 1

リファレンス、本実験の双方について、加算回数を変えた場合の P300 特徴量の推移を以下の図 1~4 に示す。また、条件毎に全てのデータを総加算した ERP 波形のうち、加算回数 16 回のを以下の図 5、6 に示す。

いずれの条件でも 0.3 秒付近で電位が高まっており、P300 が観測できていると思われる。一方で、リファレンスは刺激提示直後の電位が、本実験は P300 より後の電位が高くなっており、ERP の概形に違いはみられる。

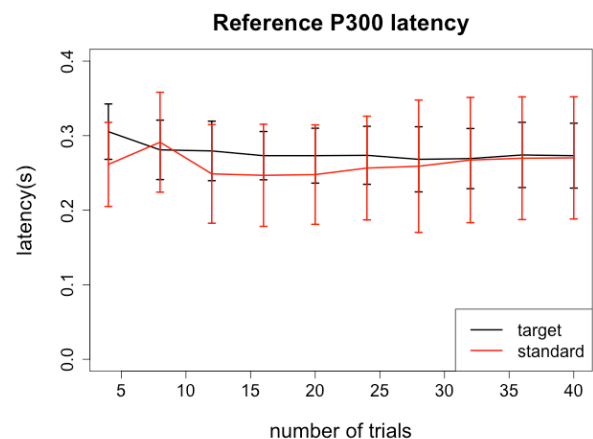


図 1: 加算回数と潜時の推移 (リファレンス)

続いて、二元配置分散分析の結果を以下の表 2、3 に示す。加算回数の要因については、本実験の振幅で有意差がみられた。図 4 より、加算回数が増加するにつれて振幅が小さくなっていることがわかる。

刺激の種類については、本実験の潜時と振幅で有意差がみられた。図 3 より、本実験の潜時は標的刺激の方が全体的に長いことが読み取れる。図 4 からは、振幅は標的刺激の方が全体的に大きいことがわかる。

5.2. ノイズ混入試行数の比較

ノイズの混入率から必要な計測回数を検討するため、標的刺激において 15 試行のデータを得るまでに除外した試行数を計測した。結果を以下の表 4 に示す。条件間で t 検定を行った結果、 $p = 0.1526$ となり、有意差はみられなかった。

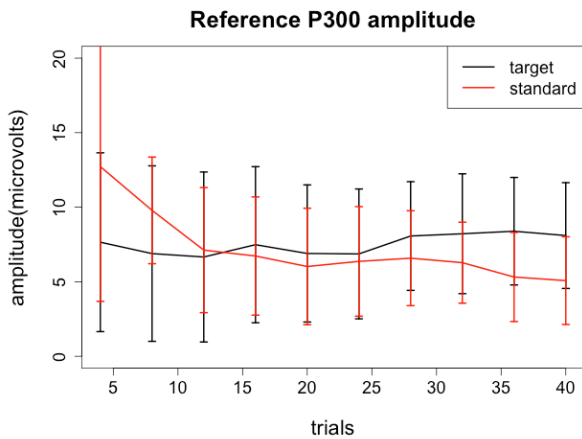


図 2: 加算回数と振幅の推移 (リファレンス)

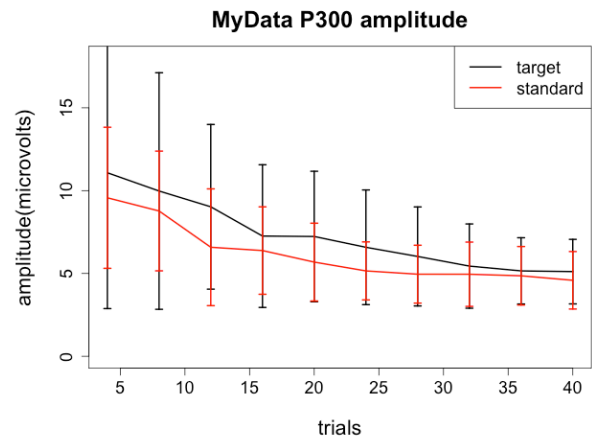


図 4: 加算回数と振幅の推移 (本実験)

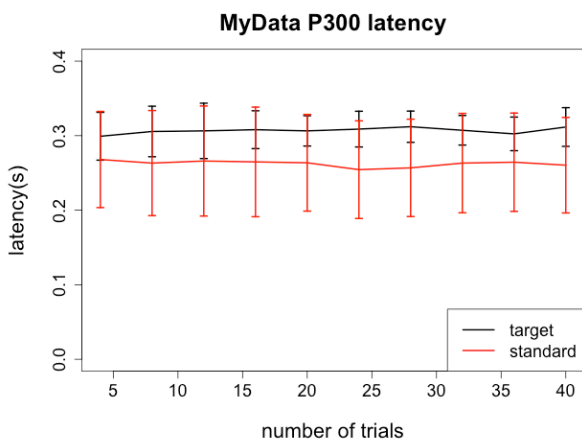


図 3: 加算回数と潜時の推移 (本実験)

5.3. 実験 2

各条件について、加算回数を変えた場合の P300 特徴量の推移を以下の図 7～8 に示す。

図 7 から、どの条件でも加算回数による潜時の変化は少ないことがわかる。図 8 から条件 1 においては加算回数が増加しても、振幅の変化が小さいことがわかる。条件 2 と 3 では、加算回数が増えるにつれて振幅が減少している。

6. 考察

6.1. P300 特徴量の推移

先行研究では、P300 特徴量は加算回数による影響をあまり受けないという結果が出ている。実験 1 のリファレンスの値の推移は先行研究と同様の傾向であった。一方、実験 1、実験 2 で皿型電極を用いたデータでは、加算回数が増加するにつれて振幅が減少した。こ

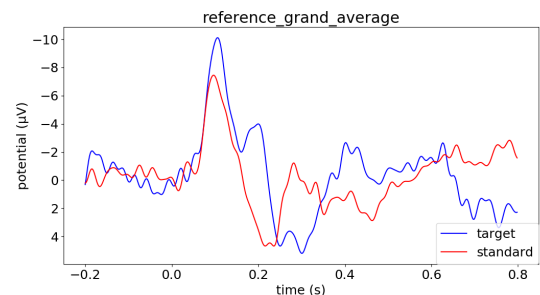


図 5: 総加算 ERP 波形 (リファレンス)

れはおそらく、実験 1 で確認した抵抗値の増加が影響している。抵抗値の増加の要因として、電極の固定が不十分で、計測中に次第に浮いたことが考えられる。

実験 2 でキャンドル型電極を用いた条件 1 では、振幅の低下がみられなかった。実験 2 は計測データ数が 1 であり断定は出来ないものの、皿型電極よりも確実な固定ができていたことが示唆される。

刺激条件間の P300 特徴量の差異は、本実験で特にみられた。標的刺激の方が潜時が長く振幅が大きいという傾向は、先行研究と一致している。リファレンスでも部分的には同様の傾向がみられるものの、データ数が少ないため個々の計測のばらつきによって有意差が出ていないと思われる。

6.2. ノイズ混入試行数

15 試行のデータを得るまでに除外した試行数に有意差はなかった。ノイズの成分は、瞬目によるものと、体動に伴うものが中心だった。これらの要因は計測環境よりも被験者本人に由来するため、リファレンスと実験データに有意差がなかったと考えられる。

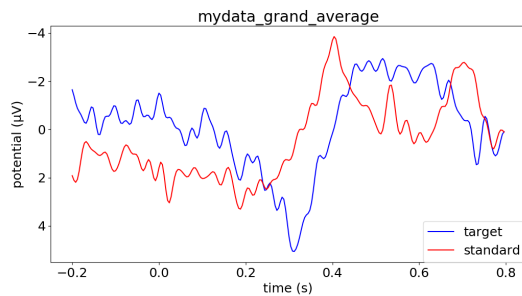


図 6: 総加算 ERP 波形 (本実験)

表 2: Anova (加算回数と P300 特徴量の関係)

データ種類	特徴量	回数の要因	
		f 値	p 値
リファレンス	潜時	0.2391	0.6262
リファレンス	振幅	2.1183	0.1496
本実験	潜時	0.00	0.9992
本実験	振幅	42.828	5.05e-10 **

(* p<.05, ** p<.01)

6.3. 使用した脳波計の時間精度について

本実験で用いた OpenBCI Cyton Board について、内部クロックの時間精度が低いという問題が見つかった。当初は設計上のサンプリング周波数通りに分析を行っていたが、良好な結果が得られなかった。そこで検証のため生データのタイムスタンプを確認したところ、1分あたりの誤差が-0.09~0.45 秒存在した。実験は8分ほど行うので、累積で-0.73~4.2 秒の誤差が生じていた。その後このタイムスタンプに基づいて分析を行ったところ、本論文で示したような結果になった。

今回の計測でみられた誤差は一度の計測内ではほぼ線形であり、補正は比較的容易である。誤差の要因としては気温、電源電圧などが考えられる。ERP の算出において時間精度は非常に重要であるため、この問題はより詳細な検討が求められる。

6.4. P300 計測に必要な計測回数、時間について

最後に、最適な加算平均に用いる試行数を考察する。12 試行あたりまでは個々の試行の影響が大きく、P300 の潜時や振幅に大きな変動が見られる事例が多かった。それ以降は P300 や ERP の変化は少なくなる。したがって、加算回数は 15 回程度が望ましい。また、15 試行のデータを得るまでに除外した試行数は 7 回程度となっている。この 2 つを総計すると、標的刺激を 24 試行程度提示して脳波を計測すれば、ライブパフォーマンスにおいて P300 を算出できると考えられる。

表 3: Anova (刺激の種類と P300 特徴量の関係)

データ種類	特徴量	刺激の要因	
		f 値	p 値
リファレンス	潜時	1.6077	0.2086
リファレンス	振幅	0.1128	0.7378
本実験	潜時	40.358	1.43e-09 **
本実験	振幅	4.827	0.02918 *

(* p<.05, ** p<.01)

表 4: 15 試行までのノイズ混入数の平均

	リファレンス	実験データ	t 検定の p 値
標的刺激	4.75	6.5	0.1526

音声オドボール課題の刺激の頻度は 1:3 から 1:7 程度が一般的である。1:3 とした場合、標的刺激を 24 試行提示する間に提示される標準刺激は 72 試行である。1 試行の提示には 1 秒を要し、計測時間は合計で約 72 秒となる。芸術表現として完成度を高めるためには、ERP の計測中にも何らかの手段で音楽を生成する、あるいは加算平均によって ERP が抽出される過程を可聴化するなどの対応が必要になると思われる。

6.5. 今後の課題

ノイズがより多い環境での計測について、検証の余地がある。脳波に与える影響はもちろん、データをワイヤレスで送信しているため、伝送に遅延や欠落が発生することもある。

また、脳波音楽プロジェクトの目的の一つに、複数人の ERP の協調を捉えることがある。本研究で 1 人の計測における特性が明らかになった。次の段階では、複数人に同時に刺激を提示し、脳波を計測する。そして、算出した各被験者の ERP の関係性を明らかにすることが求められる。

7. まとめ

本研究では、脳波を可聴化するライブパフォーマンス時に P300 という ERP 成分を計測するための技術検討として、安価な DIY 用脳波計と、装着が簡単な新型電極を用いて脳波の計測を行った。研究用のリファレンスデータと得られた ERP を比較した上で、必要な計測時間について検討した。その結果、P300 を計測することが可能であり、その特徴量の推移も概ね先行研究やリファレンスデータと同様であることがわかった。一方で、脳波計の内部クロックの誤差については注意

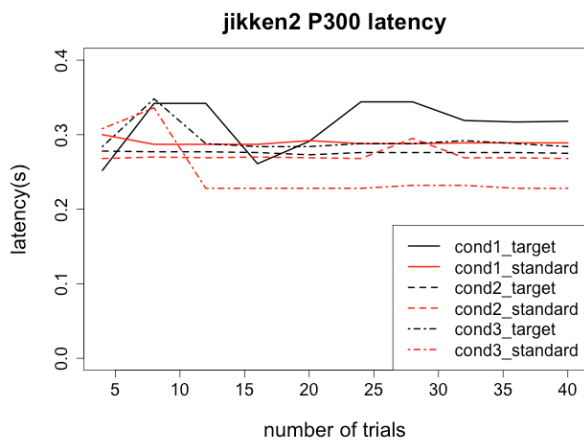


図 7: 加算回数と潜時の推移 (実験 2)

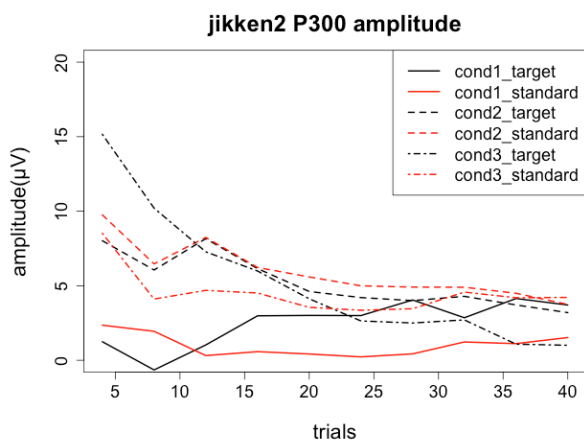


図 8: 加算回数と振幅の推移 (実験 2)

すべき問題があった。そして、P300 を計測するためには低頻度刺激を約 24 試行、時間にして約 72 秒を要すると結論づけた。

8. 謝辞

本研究は、科学研究費 17K02347、および 19K21947 の助成を受けている。

9. 参考文献

FurukawaLab. "Brain dreams Music." <https://brain-dreams-music.tumblr.com/> Accessed March 22, 2020.

Yoshida Y, Kudo Y, Hoshino E, Minagawa Y, Miki N. 2018. "Preparation-Free Measurement of Event-Related Potential in Oddball Tasks From Hairy Parts Using Candle-Like Dry Microneedle

Electrodes." 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 18-21.

OpenBCI. "OpenBCI - Open Source Biosensing Tools(EEG, EMG, EKG, and more)." <https://openbci.com/> Accessed March 22, 2020.

Volker Straebel, Wilm Thoben. 2014. "Alvin Lucier's Music for Solo Performer: Experimental music beyond sonification." Cambridge University Press: 26 February 2014, 17-29.

Grace Leslie, Tim Mullen. 2011. "MoodMixer: EEG-based Collaborative Sonification." Proceedings of The International Conference on New Interfaces for Musical Expression, 296-299.

Brahim Hamadicharef, Mufeng Xu and Sheel Aditya. 2010. "Brain-Computer Interface (BCI) based Musical Composition." International Conference on Cyberworlds, 282-286.

Jill Cohen and John Polich. "On the number of trials needed for P300." International Journal of Psychophysiology, 25-3(1997), 249-255.

Jérémy Frey. 2016. "Comparison of a consumer grade EEG amplifier with medical grade equipment in BCI applications." International BCI meeting, May 2016, Asilomar, United States. hal-01278245.

BNCI Horizon 2020. "Data sets." <http://bnci-horizon-2020.eu/database/data-sets> Accessed March 22, 2020.

ミユキ技研. "製品：ポリメイト AP108." <http://www.miyuki-net.co.jp/jp/polymate/AP108/> Accessed March 22, 2020.

10. 著者プロフィール

三井 颯人 (Hayato MITSUI)

筑波大学情報学群情報メディア創成学類 4 年。2020 年度より筑波大学大学院に進学予定。音楽、生体信号処理を中心に研究を行う。



この作品は、クリエイティブ・コモンズの表示 - 非営利 - 改変禁止 4.0 国際 ライセンスで提供されています。ライセンスの写しをご覧になるには、<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> をご覧ください、Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA までお手紙をお送りください。