

周期的聴覚刺激の遅延逸脱に伴う事象関連電位成分の検討

A Study on Event-related Potentials for Delay Deviant During Cyclic Auditory Stimuli

桃川 智行^{†‡}, 富澤 創^{†‡}, 樋田 浩一^{†‡}, 上野 佳奈子^{†‡}, 嶋田 総太郎^{†‡}
Tomoyuki MOMOKAWA, So TOMIZAWA, Koichi TOIDA, Kanako UENO, Sotaro SHIMADA

[†]明治大学 [‡]独立行政法人科学技術振興機構, CREST
[†]Meiji University [‡]Japan Science and Technology Agency, CREST
ee21216@meiji.ac.jp

Abstract

To investigate neural processing of detecting the temporal deviant in cyclically presented auditory stimuli, we conducted an experiment to measure event-related potentials. With an oddball paradigm, participants were told to silently count the deviant stimuli while they listened to the stimuli delivered with 1000 ms intervals. The participant underwent four delay conditions (100, 200, 300, and 400 ms) and the control condition (standard stimulus only). We found that N300 amplitude increased as the delay lengthened, showing a significant correlation with the number of deviant stimuli counted by the participants. Hence we suggest that N300 component reflects the neural processing of detecting temporally-deviant in auditory stimulus sequences.

Keywords — Delayed auditory stimulus, Auditory processing, Event-related potentials

1. はじめに

我々が外界との関わりのなかで活動する上で、身体運動に伴う感覚フィードバックはきわめて重要である。両者が正しい組み合わせで対応付けられる条件として、身体運動と感覚フィードバックとの時間的整合性が挙げられる。そこで我々は、身体運動と聴覚フィードバックにおける時間的整合性のメカニズムを明らかにするため、脳波計測実験を通して遅延検出に関する生理的指標を検討してきた^[1]。

先行研究^[1]において、周期的な聴覚刺激列中に遅延を挿入すると、遅延検出に伴う事象関連電位(event-related potentials : ERPs)成分が惹起することが示されている。そこで本研究では、受動的に呈示される聴覚刺激列中に異なる遅延を挿入したときに、遅延検出に伴う ERPs 成分がどのような変調を受けるかを検討した。更に、能動的な運動に伴い聴覚刺激を呈示する実験^[2]の結果との比較も行った。

2. 実験

2.1 被験者

右利きの健聴者 16 名(男性 8 名, 女性 8 名, 20.9±1.8 歳, Mean±SD)を被験者とした。

2.2 実験条件

実験には、聴覚性オドボール課題を用いた。聴覚刺激として 1 kHz の純音 30 ms を用い、周期的に 1 秒間隔で呈示した。刺激は、S/N を十分に確保し、カナル型イヤホン(ER-4B ; Etymotic Research)を介して両耳に出力した。刺激の呈示には、E-Prime 2.0(Psychology Software Tools,Inc.)を用いた。遅延を含まない聴覚刺激(標準刺激)に対し、遅延を挿入した聴覚刺激(逸脱刺激)を 4 : 1 の割合で呈示した。逸脱刺激の遅延時間は、100・200・300・400 ms の 4 水準とした。実験条件は、各遅延時間を用いた 4 条件と、遅延を含まない聴覚刺激のみを呈示したコントロール条件の、全 5 条件とした。

2.3 手続き

1 条件 150 試行(2分 30 秒)を 1 ブロックとし、5 ブロックで 1 セッションとした。セッションは、1 ブロック目をコントロール条件とし、2~5 ブロック目はランダムに各遅延条件を設定した。セッション間に休憩(約 3 分)を挟み、全 3 セッション(各条件 450 試行)実施した。

被験者は防音室内の椅子に座り、前方を固視した状態で、刺激列中ランダムに呈示される逸脱刺激の回数を計数し、各ブロック終了後その回数を口頭で回答した。各遅延水準における計数の回答数から遅延検出の確率を計算し、ロジスティック曲線へのフィッティングを行い、遅延弁別閾(delay detection threshold : DDT)^[3]を算出した。

2.4 脳波計測と分析

脳波測定には、g.tec 社製の脳波測定用システム(BCI Research System)を用いた。反応は、Ag-AgCl 頭皮電極(活性電極)を国際 10-20 法の Fz(前頭)、Cz(頭頂)、Pz(後頭)、左耳朶(基準電極)、AFz(接地電極)の 5 ヶ所に貼付し計測した。全ての電極と皮膚間のインピーダンスは、10 kΩ 以下とした。脳波は、0.5~30 Hz の帯域通過フィルタをかけ、サンプリング周波数 512 Hz で記録した。

各電極のデータは、聴覚刺激呈示時刻を起点 ($t = 0$) として $t = -300 \sim +700$ ms の区間を切り出し、標準・逸脱刺激毎に加算平均波形を求めた。±80 μV を超える電位が含まれた試行は、アーティファクトの混入とみなし、加算平均波形から除外した。ベースラインは、 $t = 0$ における電位とした。

ERPs 成分として、加算平均波形の $t = 75 \sim 150$ ms の陰性ピークを N1、 $t = 150 \sim 250$ ms の陽性ピークを P2、 $t = 250 \sim 400$ ms の陰性ピークを N300 と定義した。更に、被験者毎の加算平均波形から、全被験者の総加算平均波形を算出した。

3. 実験結果

3.1 計数の平均回答数

被験者の計数の平均回答数を図 1 に示す。なお、図中のエラーバーは標準誤差を示す。被験者の平均回答数は、遅延が大きくなるにつれて増大した(One-way ANOVA, $F_{(4,75)} = 48.5, p < 0.01$)。図中に、有意な差のみられた条件を示す(Tukey-Kramer's HSD, $p < 0.05$)。なお、DDT は 96.4 ms であった。

3.2 総加算平均波形

各遅延条件における逸脱刺激呈示時の総加算平均波形を図 2 に示す(コントロール条件のみ全刺激呈示時の総加算平均波形)。また、Cz における差分波形を図 3 に示す。差分波形の塗りつぶしは、標準誤差の範囲を示す。いずれの条件においても、聴覚刺激の入力に伴い、N1 成分(一般的注意^{[4])がみられた。また、N1 に後続し、100・200 ms 遅延条件では頭頂-後頭優位で P2 成分の増強がみられた。一方、300・400 ms 遅延条件では P2 成分の増強はみられなかった。以下、差分波形から導出した P2 成分の}

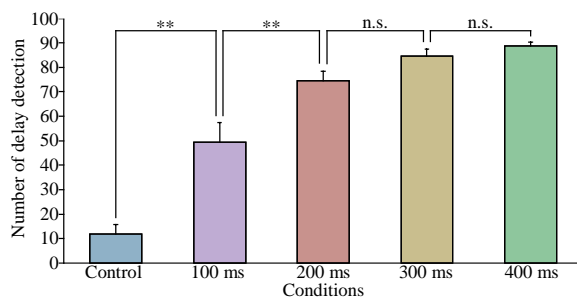


図 1 計数の平均回答数

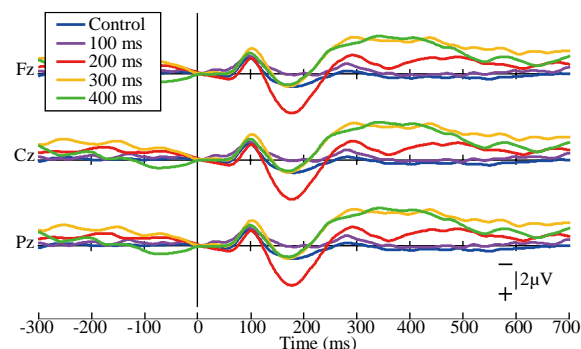


図 2 総加算平均波形

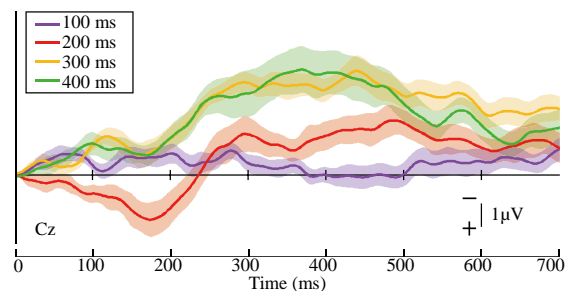


図 3 差分波形

増強成分を enhanced-P2 とする。更に、N1-P2 成分に後続して、頭頂優位で N300 成分(遅延検出成分^{[2])がみられた。各被験者から算出した N300 成分の振幅のピーク値と被験者の計数の対応を調べた結果、両者に負の相関がみられた(Cz : Spearman's correlation coefficient, $\rho = -0.51, p < 0.01$)。}

3.3 Active 課題との比較

本実験(以下、Passive 課題)とは独立に、同様の手続きを用いて、被験者の能動的運動(マウスクリック)に伴う聴覚フィードバックの遅延検出課題(以下、Active 課題)が行われている^[2]。そこで、特徴的な結果について、課題間での比較を行った。

計数の平均回答数に着目すると、全ての遅延条件において、Passive 課題の回答数は Active 課題を上回った。両条件における遅延弁別曲線と DDT を図 4 に示す。課題間で DDT に有意な差がみられた(Welch's t -test, $t_{(15)} = -2.54, p < 0.05$)。

総加算平均波形において、本実験の結果と同様に、100・200 ms 遅延条件では P2 成分が増強し、300・400 ms 遅延条件では P2 成分の増強がみられないことが示された。また、全条件において N300 成分が確認された。そこで、共通してみられた特徴的な ERPs 成分 (enhanced-P2・N300) に着目し、結果の比較を行った。

両課題における各被験者の enhanced-P2 の平均振幅 (Cz) と N300 の平均振幅 (Cz) を図 5 にそれぞれ示す。いずれの成分も、両課題で類似した傾向がみられた。そこで、課題と遅延条件による二元配置分散分析を行った結果、どちらの成分においても遅延による主効果がみられた (enhanced-P2 : $F_{(3,90)} = 14.1, p < 0.01$; N300 : $F_{(3,90)} = 15.7, p < 0.01$)。更に、N300 成分では、課題間による主効果に有意傾向がみられた ($F_{(1,30)} = 4.0, p = 0.057$)。

4. 考察

いずれの課題においても N300 成分の振幅と計数の結果に相関がみられた。このことから、N300 成分は遅延検出に関する認知活動を反映した ERP 成分であると考えられる。

また、Active 課題の N300 成分の振幅は、Passive 課題と比較して全遅延条件で大きい傾向がみられた。更に、遅延弁別閾に着目すると、Passive 課題の DDT は Active 課題と比較して有意に短い。

これらの理由として、能動的な運動と感覚フィードバックとの間には強い因果関係があり、両者が知覚的に強く結びつきやすいことが考えられる^[5]。人間が身体を動かすとき、運動野から筋肉へ動作指令が出るのと同時に、その情報が運動野から頭頂葉へと送られる (遠心性コピー)^[6]。この遠心性コピーの情報によって、運動に伴うフィードバックの到来時刻や様相について予測を立てる (フォワードモデル) ことができると考えられている^[7]。このことから、Active 課題の方が、N300 成分の振幅が大きくなったと考えられる。更に、遅延した刺激に対しても自らのフィードバックと結び付けやすいため、計数の平均回答数が少なくなり、Passive 課題の方が Active 課題よりも DDT が短くなったと考えられる。

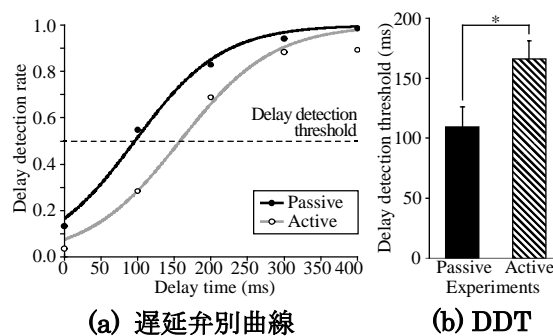


図 4 Active/Passive の遅延弁別閾

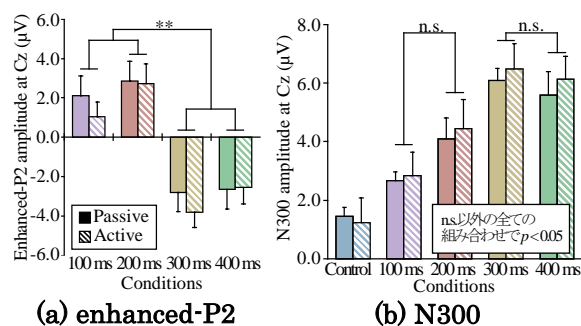


図 5 特徴的な事象関連電位成分の振幅

参考文献

- [1] 樋田浩一, 上野佳奈子, 嶋田総太郎 (2014) “聴覚フィードバックの遅延検出に対する事象関連電位成分の検討”, 日本認知科学会第 31 回大会, pp.462-465.
- [2] 樋田浩一, 上野佳奈子, 嶋田総太郎 (2015) “自己主体感に関連する事象関連電位成分 — 身体運動に伴う聴覚フィードバックの遅延検出 —”, 日本認知科学会第 32 回大会, in press.
- [3] Toida K, Ueno K & Shimada S (2014) “Recalibration of subjective simultaneity between self-generated movement and delayed auditory feedback”, NeuroReport, vol.25(5), pp.284-288.
- [4] Hyde M (1997) “The N1 response and its applications”, Audiol. Neurootol., vol.2, pp.281-307.
- [5] Haggard P, Clark S & Kalogeras J (2002) “Voluntary action and conscious awareness”, Nat. Neurosci., vol.5, pp.382-385.
- [6] Shimada S, Qi Y & Hiraki K (2010) “Detection of visual feedback delay in active and passive self-body movements”, Exp. Brain Res., vol.201, pp.359-364.
- [7] Frith C D, Blakemore S J & Wolpert D M (2000) “Abnormalities in the awareness and control of action”, Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci., vol.355, pp.1771-1788.