

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

A Study on Event-related Potentials for Detecting Delayed Auditory Feedback

樋田 浩一^{†‡}, 上野 佳奈子^{†‡}, 嶋田 総太郎^{†‡}
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
toida@meiji.ac.jp

Abstract

Temporal contingency between a motor command and corresponding auditory feedback is crucial for perception of self-generated sound as well as external auditory events. Here we examined the neural processing of detecting delayed auditory feedback using event-related potentials (ERPs). With an oddball paradigm, twelve participants were told to silently count the number of trials they could detect the delay of auditory feedback which was presented in 1000 ms intervals passively (passive condition) or in association with their mouse-click movement (active condition). The delay of the target auditory stimulus was set to 200 ms, while the standard stimulus was not delayed (0 ms). EEG data were recorded throughout the experiment and ERPs were calculated for each stimulus. The behavioral data showed that there was no significant difference in the number of delay detection between conditions. As for the EEG data, on the other hand, there was a significant difference between P2 components for the target and standard stimulus, which was more prominent in the active condition than in the passive condition. The present result is interpreted that P2 component is elicited by delayed auditory feedback, and self-movement affects the detection processing of delayed auditory feedback.

Keywords — Delayed auditory feedback, Motor-sensory, Event-related potentials (ERPs), Oddball paradigm, Attention

1. はじめに

我々は、外界からの情報を受動的に感知するだけでなく、能動的な身体運動とそれに伴う感覚フィードバックとを対応付けることで、身体と知覚世界との関係性を構築している。自らの身体運動とその感覚フィードバックを正しい組み合わせで対応付ける条件として、両者の時間的整合性が挙げられる。一方、実際の場面を想定すると、道具の使用や楽器演奏など、外部システムからのフィードバックに遅延が存在する場合がある。しかし、

我々は外部のシステムがもつ遅延に適応的に対処しており、脳には遅延感覚フィードバックを身体運動に付随するイベントとして処理する何らかのメカニズムが存在すると考えられる。

これまでに我々は、身体運動に対する感覚フィードバックの遅延弁別関に着目し、自らの身体運動に伴う聴覚フィードバックに遅延を伴う場合の知覚特性について心理学的手法を用いて調べてきた^[1]。本研究では、遅延聴覚フィードバックに対する検出過程の脳内メカニズムを探ることを目的とし、事象関連電位 (event-related potentials: ERPs) に着目した脳波測定を行った。

聴覚知覚に関連した ERPs として、周期的に呈示される聴覚刺激列中に逸脱刺激を混入した場合 (オドボール課題) に惹起される成分が知られている。顕著に見られる ERPs として、周波数弁別オドボール課題の逸脱刺激呈示時には、選択的注意を喚起する課題で出現する P300 と、それに先立つ前注意過程の表出とされるミスマッチ陰性電位 (mismatch negativity: MMN) が計測される^{[2][3]}。また、一般的注意によって惹起される N1 や選択的注意によって惹起される P2 は、逸脱刺激呈示時のみならず、聴覚刺激に対する注意資源量が大きいかほど高振幅に記録される^{[4][5][6]}。

本研究では、N1 やそれに後続する ERPs に着目し、遅延聴覚フィードバックを逸脱刺激として用いたオドボール課題遂行中の脳活動分析を行った。また、身体運動の有無を実験条件とし、遅延検出に伴う ERPs に身体運動が及ぼす影響を調べた。

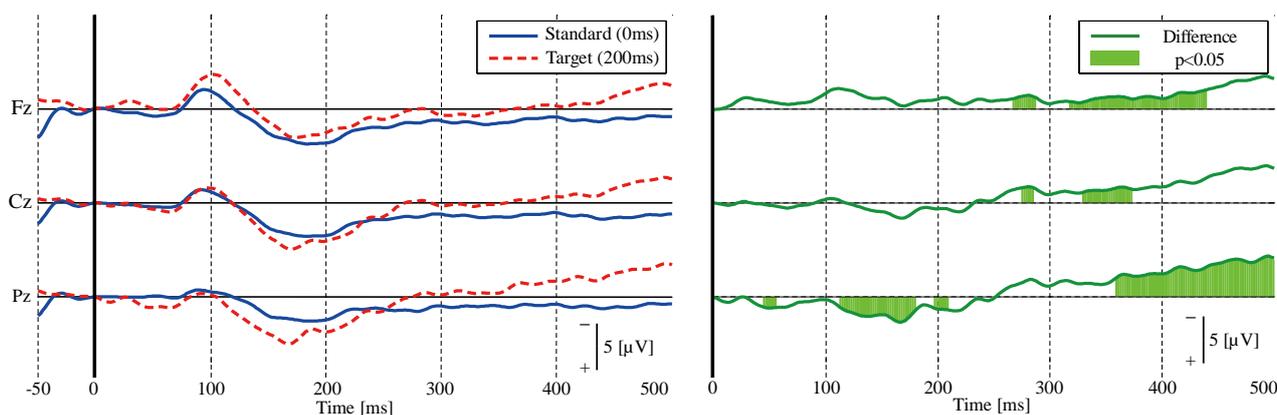


図1 総加算平均波形と差分波形(Passive条件)

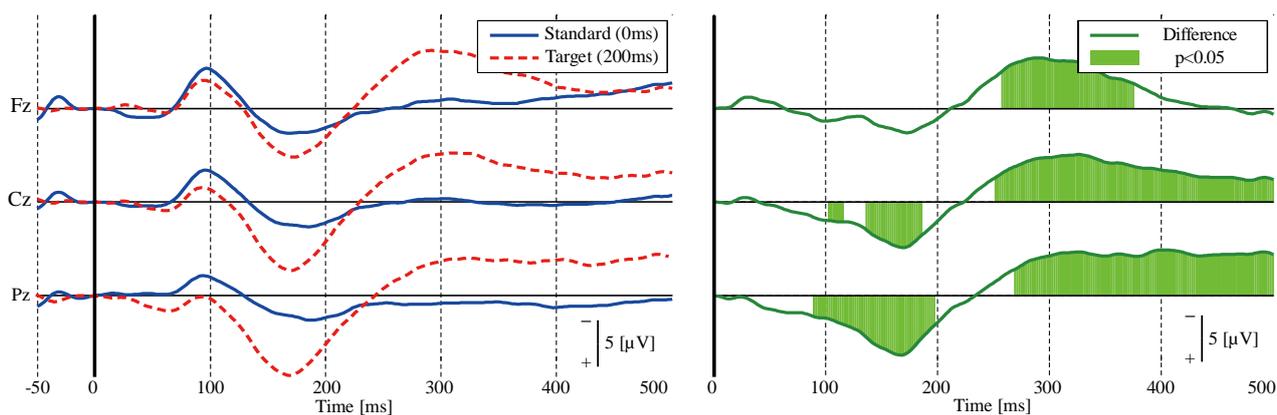


図2 総加算平均波形と差分波形(Active条件)

2. 実験

2.1. 被験者

聴覚の正常な右利き大学生 12名(男性 6名, 女性 6名, 21.9 ± 0.3 歳, Mean \pm SD)を被験者とした。

2.2. 実験条件

実験では, 1秒間隔で呈示される聴覚刺激を受動的に聴く Passive条件と, 被験者の右手人指し指によるマウスクリックに対して聴覚刺激が呈示される Active条件の2条件実施した。両条件ともオドボール課題を用い, 遅延を含まない標準刺激(standard stimulus)に対し, 逸脱刺激(target stimulus)には200msの遅延を挿入した。聴覚刺激は1000Hzの純音(継続時間30ms)とし, 標準刺激と逸脱刺激は4:1の割合で呈示した。刺激は, S/Nを十分に確保し, カナル型イヤホン(ER-4B; Etymotic Research)を介して両耳に入力した。刺激の呈示には, E-Prime 2.0(Psychology Software Tools, Inc.)を用いた。なお, 実験で利用したシステムには, マウスクリックから聴覚刺激呈示までに53.3msの実験装置固有の遅延が内在するが, この状態を遅延のない状態($t = 0$ ms)と定義した。

2.3. 手続き

被験者は防音室内の椅子に座り, 前方の注視点を固視した状態で, 刺激列中にランダムに呈示される逸脱刺激の回数を計測した。実験の開始前には, メトロノームに合わせ1秒間隔でマウスクリックを行う練習を行った。1条件450試行(約7分30秒)を1セッションとし, 2条件実施した。

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10k Ω 以下とした。脳波は, 0.5~30Hzの帯域通過フィルタをかけ, サンプリング周波数512Hzで記録した。

被験者ごとの各電極のデータは, 聴覚刺激呈示時を起点($t = 0$)として $t = -250 \sim +750$ msの区間を切り出し, 標準刺激・逸脱刺激ごとに加算平均波形を求めた。±80 μ V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

均から除外した。加算平均波形では、 $t=0$ における電位をベースラインと設定した。

ERPs 成分として、 $t=50\sim 150$ ms の加算平均波形の陰性ピークを N1、 $t=150\sim 250$ ms の加算平均波形の陽性ピークを P2 と定義した。更に、被験者ごとの加算平均波形から、全被験者の総加算平均波形 (grand mean waveform : GMW) とその差分波形を算出した。各電極において、標準刺激と逸脱刺激の加算平均波形を 1 サンプルごとに t 検定し、有意差のある区間を算出した。

3. 結果

両条件における逸脱刺激の計数の平均回答数は、正答 90 回に対し、Active 条件が 76.3 ± 4.0 回 (Mean \pm SD)、Passive 条件が 81.7 ± 11.0 回であり、条件間に有意な差はみられなかった ($t(11)=1.80$, $p=0.56$)。このことから、身体運動の有無によらず、遅延の検出率に差はないことが示された。

両条件の GMW 及び差分波形を図 1 と図 2 に示す。なお、Active 条件のマウスクリックの間隔は、 1135.0 ± 117.9 ms であった。両条件ともに、標準刺激・逸脱刺激呈示時のいずれにおいて、N1 が確認された。一方、逸脱刺激呈示時には P2 が高振幅となる傾向が Active 条件でみられた。

被験者ごとに求めた N1-P2 頂点間振幅および標準偏差を図 3 に示す。両条件とも、Cz・Pz で標準刺激・逸脱刺激呈示間で有意差が確認された。条件間で比較を行った結果、逸脱刺激呈示時の Cz・Pz において有意な差が確認された。同様に、N1 および P2 の平均潜時と標準偏差を図 4 と図 5 に示す。どちらの成分も、Active 条件の Cz・Pz において標準刺激・逸脱刺激呈示間に有意差が確認された。また、P2 の潜時は、Passive 条件と比較して Active 条件の方が有意に短いことが示された。

4. 考察

刺激への一般的注意の表出とされる N1 に後続し、P2 成分が逸脱刺激呈示時に高振幅で発現することから、P2 は刺激の遅延検出に伴う神経活動を反映した成分だと考えられる。P2 に着目すると、

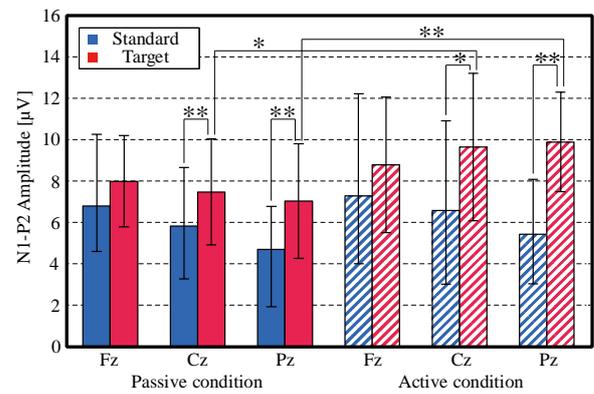


図 3 N1-P2 頂点間振幅

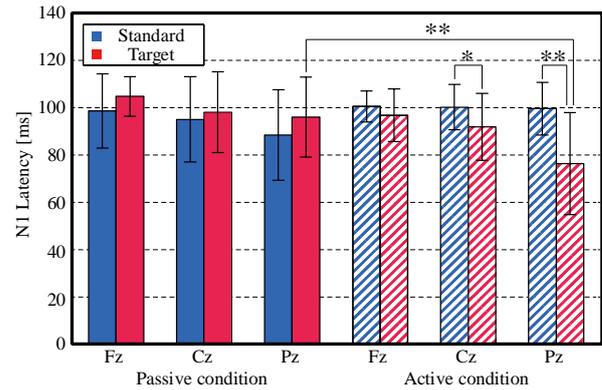


図 4 N1 潜時

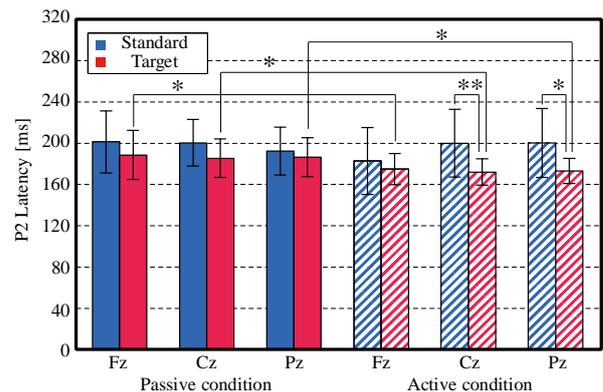


図 5 P2 潜時

Passive 条件よりも Active 条件の方がその振幅は大きく、潜時は短い。これは、刺激が受動的に呈示される Passive 条件よりも、自らのマウスクリックに伴い刺激が呈示される Active 条件の方が、聴覚刺激が届くタイミングを予測しやすいことに起因しているためだと考えられる。この理由として、能動的な身体運動と感覚フィードバックの間には強い因果関係あり、両者が知覚的に強く結びつきやすいことが挙げられる [7][8]。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送られる (遠心性コピー)。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ことができる (フォー

ドモデル)と考えられている^{[9][10]}。即ち、Active条件ではフォワードモデルに基づき聴覚フィードバックの到来時刻を予測できたために遅延の検出時間が短くなり、P2の潜時が短いと考えられる。一方で、電極位置によるP2の振幅および潜時に着目すると、両条件どちらにおいてもCz・Pzで有意差が確認されており、後頭優位な成分だと考えられる。このことから、頭頂葉へと送られた遠心性コピーと実際の感覚情報の到来時刻との時間的整合性判断が行われた結果は、後頭部において遅延への「気付き」として処理されると考えられる。なお、本実験と同様の実験システムを用いて周波数弁別オドボール課題を行った先行研究^[11]において、身体運動の有無によらずほぼ同様のERPsが得られ、波形の差異は小さいと確認されている。

これまでの研究において、N1やP300などのERPsについては、どのような刺激属性・認知活動と対応付けられているかが報告されている一方で、P2に関する研究は少ない。しかし、視覚性オドボール課題遂行中に刺激へ注意を向けた場合に確認されることが報告されており^[6]、N1-P2波形は刺激に対する注意資源量との関係が示されている。また、P2は感覚情報と保存されている記憶との比較を行う認知照合プロセスを反映した成分の可能性も示唆されており^{[12][13]}、今回の実験結果は、身体運動と聴覚フィードバックの時間的整合性の照合処理を行った結果、不整合が検出された際の反応であり、認知照合プロセスにおいて手掛かりとなる情報が多いため、Active条件の方が高振幅で表出した可能性が考えられる。

5. まとめ

身体運動に伴う聴覚フィードバックの遅延検出が脳内においてどのように処理されるのかを探ることを目的とし、ERPsの測定を行った。実験の結果、刺激の遅延検出に伴う神経活動を反映した成分としてP2成分が惹起される可能性が示された。また、P2は受動的聴取時よりも、能動的運動に伴う聴覚刺激に遅延を伴う場合の方が、高振幅で記録されることが示された。

参考文献

- [1] Toida K, Ueno K & Shimada S, (2014) “Recalibration of subjective simultaneity between self-generated movement and delayed auditory feedback”, *NeuroReport*, vol.25(5), pp284-288.
- [2] Sams M, *et al.*, (1985) “Auditory frequency discrimination and event-related potentials”, *Electroen. Clin. Neuro.*, vol.62, pp.437-448.
- [3] Näätänen R, *et al.*, (2004) “The mismatch negativity (MMN): towards the optimal paradigm”, *Clin. Neurophysiol.*, vol.115, pp.140-144.
- [4] Hillyard SA & Picton TW, (1979) “Event-related brain potentials and selective information processing in man”, *Prog. in Clin. Neurophysio.*, Basel, Karger, Switzerland, vol.6, pp.1-50.
- [5] King J & Kutas M, (1995) “Who did what and when? Using word- and clause-level ERPs to monitor working memory usage in reading”, *J. Cogn. Neurosci.*, vol.7, pp.376-395.
- [6] Furutsuka T, (1989) “Effects of rapid attention switching on the N1-P2 amplitude of the visual event-related potentials”, *Research and Clinical Center for Child Development*, vol.11, pp.55-64.
- [7] Haggard P, Clark S & Kalogeras J, (2002) “Voluntary action and conscious awareness” *Nat. Neurosci.*, vol.5(4), pp.382-385.
- [8] Tsakiris M & Haggard P, (2003) “Awareness of somatic events associated with a voluntary action”, *Exp. Brain Res.*, vol.149(4) pp.439-446.
- [9] 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.
- [10] Sciutti A, *et al.* (2010) “Predicted sensory feedback derived from motor commands does not improve haptic sensitivity”, *Exp. Brain Res.*, vol.200(3-4), pp.259-67.
- [11] 樋田, 他, (2014) “身体運動に伴う聴覚フィードバックに対する脳活動分析 - 逸脱刺激呈示時の脳波成分の検討 -”, *日本音響学会講演論文集*, pp593-594.
- [12] Tremblay TL, *et al.*, “Is the auditory evoked P2 response a biomarker of learning?”, *Frontiers in Systems Neuroscience*, vol.8:28, 2014.
- [13] Luck SJ & Hillyard SA, (1994), “Electrophysiological correlates of feature analysis during visual search”, *Psychophysiology*, vol.31, pp.291-308.