

不随意運動に伴う聴覚フィードバックに対する脳波 ERP 成分の検討 A Study on Event-related Potentials for Delayed Auditory Feedback of Involuntary Movement

桃川智行[†], 上野佳奈子[‡], 嶋田総太郎[‡]
Tomoyuki Momokawa, Kanako Ueno, Sotaro Shimada

[†] 明治大学大学院理工学研究科, [‡] 明治大学理工学部

[†] Graduate School of Science and Technology, Meiji University

[‡] School of Science and Technology, Meiji University
ce61071@meiji.ac.jp

Abstract

To investigate neural processing of detecting the delayed auditory feedback for involuntary movement, we conducted an experiment to measure event-related potentials. With an oddball paradigm, participants were told to silently count the number of delayed stimuli they could detect while they listened to the auditory feedback elicited by involuntary movements. The participant underwent four delay conditions (100, 200, 300, and 400 ms) and the control condition (standard stimulus only). We found that enhanced-P2 was observed in the 200- and 300-ms delayed conditions in the involuntary task, while it was observed in the 100- and 200-ms conditions in the voluntary task. This time lag between the two tasks suggests that the efference copy, which is the internal copy of the motor command, could expedite the early processing of auditory feedback of the self-body movement.

Keywords — **delayed auditory stimulus, auditory processing, event-related potentials, involuntary movement**

1. はじめに

我々が外界との関わりの中で生活していく上で、自らの身体運動とそれに伴う感覚フィードバックを対応付けることで、身体と知覚世界の関係性を構築している。両者を正しい組み合わせで対応付ける条件として、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]。この先行研究において、随意運動に伴う聴覚フィードバック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) 成分として P2 の増強成分である enhanced-P2 (EP2) と N300 が惹起することが示された。本研究では、不随意的な身体運動に伴い呈示される聴覚刺激に遅延を挿入した際の脳波を計測し、随意運動の場合との違いについて検討する。

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, 21.7 ± 1.6 才, 平均 ± 標準偏差) を被験者とした。

2.2 実験手続き

実験では、身体運動 (マウスクリック) に伴う聴覚刺激 (1000 Hz の純音 30 ms) を標準刺激とし、運動に対し遅延が挿入された聴覚刺激を標的的刺激とするオドボール課題を実施した。被験者は自動的にクリックさせる機構のマウス (G500s, Logicool) に指を置き、1~2s 間隔で不随意に運動が引き起こされた。刺激の呈示には、E-Prime 2.0 (Psychology Software Tools, Inc.) を用いた。標準/標的刺激はそれぞれ 4 : 1 の割合で呈示され、S/N 比を十分に確保したカナル型イヤホン (ER-4B; Etymotic Research) を介して両耳に出力された。実験条件は、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と、標的刺激の遅延時間を 100, 200, 300, 400 ms の各遅延時間を用いた 4 条件の、全 5 条件とした。1 条件 100 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。1 セッションにつきブロック順はランダムに設置した。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 300 試行) 実施した。

被験者は実験中、防音室内の椅子に座り、前方を固視した状態を維持した。身体運動に対し、遅れていると感じた聴覚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。

2.3 脳波計測

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。脳波は、Ag-AgCl アクティブ電極を拡張 10-20 法に則り、Fp1, Fpz, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, FCz, T7, C3, Cz, C4, T8, TP7, CP3, CPz, CP4, TP8, P7, P3, Pz, P4, P8, PO7, POz, PO8, O1, Oz, O2 の計 30 ヶ所に貼付し、基準電極を左耳朶、接

地電極をAFzに貼付し計測した。0.5~30Hzのバンドフィルタをかけ、サンプリング周波数512Hzで記録した。

2.4 解析

2.4.1 主観的報告

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て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) [2] を算出した。

2.4.2 EEG

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・標的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が混入した試行とみなし、加算平均波形から除外した。ベースラインは、 $t = -200 \sim 0$ ms における平均電位とした。

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。本研究では、先行研究[1]で遅延検出成分が生起されると示されている頭頂部 (Pz) に着目して分析を行った。

3. 実験結果

3.1 主観的報告

被験者の遅延検出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, $F_{(4, 70)} = 46.5, p < 0.01$)。図中に、有意な差のみられた条件を示す (Tukey-Kramer's HSD, $p < 0.05$)。

3.2 総加算平均波形

各遅延条件における標的刺激呈示時の総加算平均波形 (Pz 電極) 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、各遅延条件の標的刺激の波形から標準刺激の波形を差し引いた差分波形を図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、聴覚刺激への一般的注意により惹起されるN1成分[3]がみられた。また、N1に後続しP2成分がみられた。コントロール条件に比べ100ms遅延条件では変化がみられなかったが、200, 300ms遅延条件ではP2の増強がみられ、400ms遅延条件ではP2の減衰がみられた (One-way ANOVA, $F_{(3, 56)} = 7.8, p < 0.01$)。以下、差分波形から導出したP2の増強成分をEP2とする。更に、N1-P2成分に後続して、N300成分がみられた。

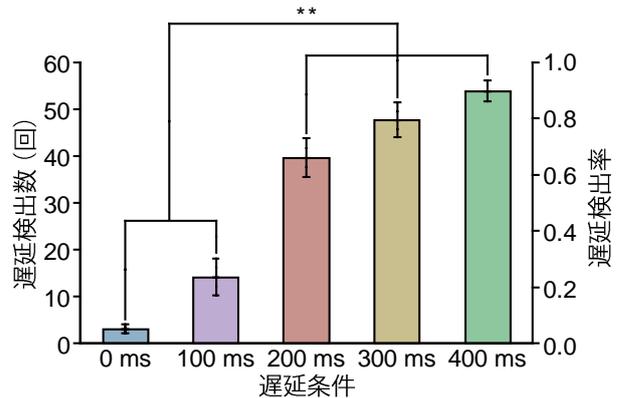


図1. 計数の平均回答数

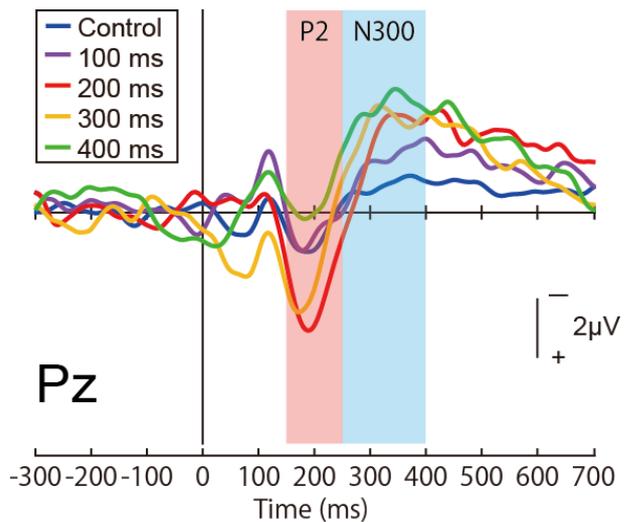


図2. 各条件の標的刺激に対する ERP 波形

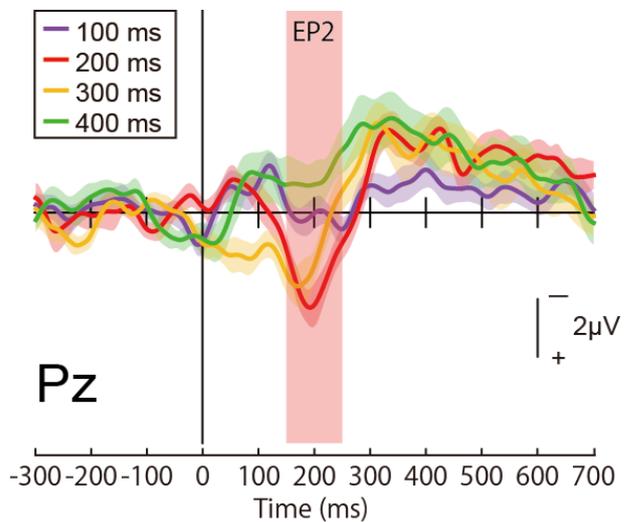


図3. 各条件における標的刺激と標準刺激の ERP 差分波形

3.3 先行研究との比較

本実験 (以下, Involuntary 課題) と被験者の随意運動 (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, Voluntary 課題[1]) との課題間での比較を行った。

両課題における遅延弁別曲線を図4に示す。各課題のDDTは、Involuntary課題で180.2 ms、Voluntary課題で166.2 msであり、有意な差はみられなかった ($t_{29}=0.53, p=0.29$)。

先行研究[1]の差分波形において、100, 200 ms 遅延条件ではEP2がみられるが、300, 400 ms 遅延条件でみられないこと、および総加算平均波形の全遅延条件においてN300が惹起され、遅延幅の大きさに相関して増大することが示されている。そこで、本研究においてもEP2と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EP2の平均振幅(Pz)とN300の平均振幅(Pz)を図5にそれぞれ示す。各成分に対し、課題(Involuntary, Voluntary)と遅延条件を要因とした二元配置分散分析を行った。EP2においては交互作用がみられ ($F_{(3,87)}=6.1, p<0.01$)、下位検定を行った結果、100 msと300 ms 遅延条件で課題による単純主効果が、また、各課題において遅延による単純主効果がみられた ($p<0.01$)。多重比較を行ったところ、Involuntary課題においては100 msと200 ms 遅延条件間に、200, 300 msは400 ms 遅延条件との間に有意差がみられ、Voluntary課題では100, 200 ms 遅延条件それぞれに対し、300, 400 ms 遅延条件との間に有意差がみられた(Tukey-Kramer's HSD, $p<0.05$) (図5(a))。また、N300においては遅延による主効果がみられた (N300 : $F_{(4, 112)}=41.5, p<0.01$)。多重比較の結果、コントロール条件は全遅延条件との間に、100 ms 遅延条件は300, 400 ms 遅延条件との間に、200 ms 遅延条件は400 ms 遅延条件との間に有意差がみられた (Tukey-Kramer's HSD, $p<0.05$) (図5(b))。

両課題において各被験者から算出したN300の振幅のピーク値と被験者の計数の対応を調べた結果、両課題とも、負の相関がみられた (Spearman's correlation coefficient; Involuntary : $\rho=-0.47, p<0.01$, Voluntary : $\rho=-0.57, p<0.01$) (図6)。

4. 考察

先行研究[1]において、EP2は随意身体運動に伴う感覚刺激を運動のフィードバックとして対応づける際の時間的整合性の判断基準が200 ms前後である[4-6]ことを反映していると考察されていた。本実験では、EP2の変化が300 ms前後で生じた。これは、不随意運動であったために遠心性コピー[6]が生じないことが原因であると考えられる。遠心性コピーとは、人間が体を動かすとき、運動野から筋肉へ動作指令が出るのと

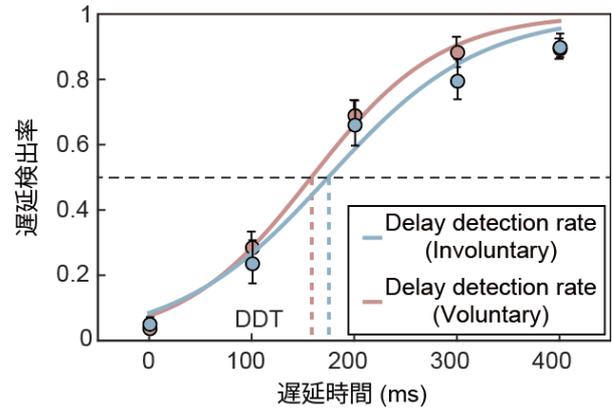


図4. 遅延弁別曲線

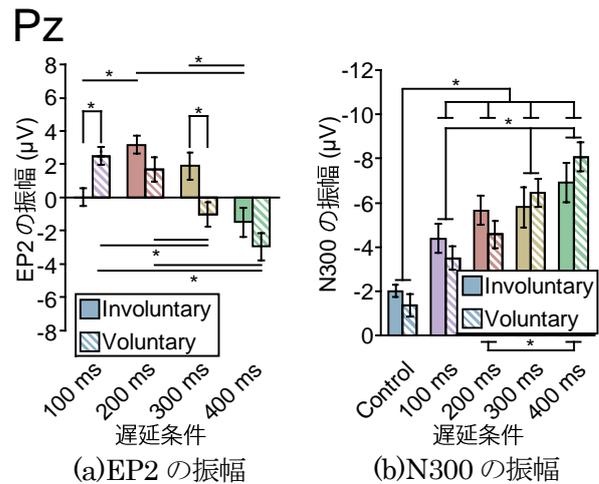


図5. 各遅延条件におけるEP2とN300の振幅

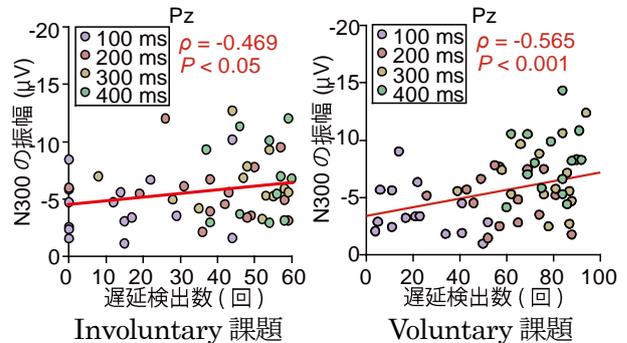


図6. N300の振幅と遅延検出数の相関

同時に、その情報が運動野から頭頂葉へと送られる信号のことである。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と考えられている (フォワードモデル) [7]。したがって本実験の結果より、不随意的な運動の場合、遠心性コピーを利用することができないためにフィードバック予測の内部生成が100 ms程度遅くなることを反映している可能性が考えられる。

また、不随意運動時のDDTが随意運動時と比べ有意差がないことより、不随意的な運動であっても遅延に対する気づきの程度が随意運動時と同様であることが考

えられる[6]。さらに、先行研究[1]と同様に本実験も計数の平均回答数と N300 成分の振幅に相関がみられたことより、N300 成分は遅延検出に関わる脳波成分であることが示唆された。一方、上述の結果より、EP2 は無意識的な身体運動とそれに伴う感覚フィードバックを対応付ける脳活動を反映していると考えられる。遠心性コピーの有無が EP2 に影響を与えた一方で N300 には影響を与えなかったことなど、EP2 と N300 の関係についてはまだ十分に明らかではなく、今後のさらなる検討が必要である。

参考文献

- [1] Toida, K., Ueno, K., & Shimada, S. (2016), "Neural basis of the time window for subjective motor-auditory integration", *Frontiers in Human Neuroscience*, Vol. 9, No. 688, pp. 1-12.
- [2] Toida, K., Ueno, K., & Shimada, S. (2014), "Recalibration of subjective simultaneity between self-generated movement and delayed auditory feedback", *NeuroReport*, Vol. 25 No. 5, pp. 284-288.
- [3] Hyde, M. (1997), "The N1 response and its applications", *Audiol. Neurootol.*, Vol. 2, pp. 281-307.
- [4] Blakemore, S. J., Frith, C. D., & Wolpert, D. M. (1999) "Spatio-temporal prediction modulates the perception of self-produced stimuli", *Journal of Cognitive Neuroscience*, Vol. 11, pp. 551-559.
- [5] Yamamoto, S., and Kitazawa, S. (2001), "Reversal of subjective temporal order due to arm crossing", *Nature Neuroscience*. Vol. 4, pp. 759-765.
- [6] Shimada, S., Qi, Y., & Hiraki, K. (2010) "Detection of visual feedback delay in active and passive self-body movements", *Experimental Brain Research*, Vol. 201 No. 2, 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.