

# 身体運動に伴う聴覚フィードバックの遅延検出に関する脳活動 (2) -能動運動と受動運動の比較-

桃川智行<sup>†1</sup> 樋田浩一<sup>†1</sup> 上野佳奈子<sup>†1</sup> 嶋田総太郎<sup>†1</sup>

**概要:** 身体運動に伴う聴覚フィードバックに遅延が挿入された際の認知メカニズムを明らかにするため、事象関連電位に着目した脳波計測実験を行った。実験では、身体運動に伴う聴覚フィードバックに複数の遅延を挿入し、それらの刺激を聴取した際の脳活動を測定した。また、受動的に呈示される聴覚刺激列中に複数の遅延を挿入した聴覚刺激を聴取した際の脳活動を測定し、身体運動の有無による事象関連電位成分の比較を行った。実験の結果、遅延時間が200 ms 以下の場合、P2成分の振幅が増強し、300 ms 以上の場合は減衰した。また、遅延時間の増大に伴い、N300成分の振幅が増大した。更に、身体運動を伴うことで、N300成分の振幅はより大きくなった。これらの結果から、200~300 ms の時間を境に、異なる神経活動を反映する成分が惹起されることが示され、N300成分は身体運動に伴う聴覚フィードバックの遅延検出に関連した脳活動を反映した成分であることが示された。

**キーワード:** 遅延聴覚刺激, 自己身体認識, 事象関連電位, P2, N300

## 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と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間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感覚フィードバックに遅延が存在する場面が存在する。そこで我々は、身体運動とそれに伴う感覚フィードバックが時間的に不整合な環境における知覚プロセスを明らかにすることを目的とした。事象関連電位(event-related potentials: ERPs)に着目した脳波計測実験を通して、遅延検出に関する事象関連電位の同定を試みてきた[1]。

既報[2]において、身体運動に伴う聴覚フィードバックの遅延検出に関連する事象関連電位を同定するために実験3つを報告した(実験1~3)。実験1・2では、それぞれ周波数弁別課題遂行時と遅延検出課題遂行時の事象関連電位を測定し、身体運動の有無による影響を調べた。実験3では、周波数弁別成分と遅延検出成分の違いを詳細に検討し、選択的注意の影響についても検討を行った。これらの結果、遅延検出に伴い、P2成分が増強(enhanced-P2: EP2)すること、および、N300の表出がみられることが示された[1]。

本報では、これらの結果を踏まえ、身体運動に伴う聴覚フィードバックの遅延検出に関する事象関連電位の特徴についてより詳細な検討を行うため、2つの実験を行った。実験4では、身体運動に伴う聴覚フィードバックに挿入する遅延に複数の時間幅を設定し、遅延時間と遅延検出成分の関係について検討した。先行研究において、自己身体認識を構成する感覚の1つである自己主体感(sense of agency[3])、「この運動を行

っているのは自分自身である」という感覚であり、感覚フィードバックの遅延時間と関係があることが示されている[4]。そこで、本実験においても心理評価指標として自己主体感を用い、事象関連電位と自己主体感の関係についても検討を行った。また、感覚フィードバックに遅延を伴う環境における遅延の弁別精度は、身体運動の有無により異なることが示されている[4]。そこで、実験5では、受動的に聴覚刺激が呈示される環境下で実験4と同様の測定を実施した。両者の結果を比較することで、身体運動の寄与について検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 被験者

実験には、被験者として各実験につき男性8名女性8名、のべ32名の右利き健聴者(平均20.7±1.6歳)が参加した。

### 2.2 実験条件

実験において、身体運動は右手人差し指のマウスクリックとした。マウス(G500, Logicool)からの入力信号に対して、E-Prime 2.0(Psychorogy Software Tools, Inc.)を介し、カナル型イヤホン(ER-4B; Etymotic Research)から聴覚刺激を両耳に出力した。実験で使用したシステムには53 msの内在する遅延が存在した。聴覚刺激として1000 Hzの純音30 ms(立ち上がり・立ち下りに10 msの線形なフェードイン・フェードアウトを含む)を用いた。聴覚刺激の呈示方法にはオドボール課題を用いた。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(標的刺激)を4:1の割合で呈示した。標的刺激の遅延時間は、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。

実験4において、被験者は、1秒間隔でマウスクリックを

<sup>†1</sup> 明治大学 理工学部  
Meiji University, School of Science and Technology

行い、それに伴う聴覚フィードバックを聴取した。なお、実験で使用したシステムには 53 ms の内在する遅延が存在するが、この状態を遅延のない状態( $t=0$  ms)とした。実験 5 では、被験者は、身体運動をせずに、1 秒間隔で呈示される聴覚刺激列を聴取した。周期的な聴覚刺激列中に、遅延逸脱していると感じた聴覚刺激の数を計数した。

## 2.3 手続き

1 条件 150 試行を 1 ブロックとし、5 ブロックで 1 セッションとした。セッション内は、1 ブロック目は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、全 3 セッション(各遅延条件 450 試行)実施した。順序効果を考慮し、条件の実施順序は被験者間でカウンターバランスをとった。実験 4 では、各ブロック終了後、自己主体感に関する 4 つの質問項目(Q1: 音は自分が出ているように感じましたか; Q2: 音は自分の意図通りに鳴りましたか; Q3(ダミー): 音が自分の手を動かしているように感じましたか; Q4(ダミー): 音が自分の意志をコントロールしているように感じましたか)について、「とても感じる(+3)」から「とても感じない(-3)」の 7 段階で評価し、アンケートに記入した。なお、Q3 および Q4 は、ダミーの質問項目であるため、以降の分析からは除外した。

被験者は、照度および静穏環境を統制した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標的刺激の回数を計数した。先行研究において、遅延の大きさとその遅延に対する弁別感度に関する指標として、遅延弁別閾(delay detection threshold: DDT)が示されている[5]。本研究においても遅延の弁別確率に関する指標として導入し、各被験者の計数の回答数から(1)式に示すロジスティック曲線へのフィッティングを行った。この際、遅延に気付いた割合が 50% となる遅延時間を DDT として算出した。

$$P(t) = \frac{1}{1 + \exp[-a(t - t_{DDT})]} \quad (1)$$

ここで、 $t$  は聴覚刺激の遅延時間、 $P(t)$  は遅延検出率、 $a$  は回帰曲線の傾き、 $t_{DDT}$  は遅延検出率が 50% となる遅延時間を表す。

## 2.4 脳波計測と分析

脳波測定には g.tec 社製の生体計測システム(BCI Research System)を用いた。反応は Ag-AgCl 頭皮電極(Active 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 k $\Omega$  以下とした。脳波は、0.5~30 Hz の帯域フィルタをかけ、サンプリング周波数 512 Hz で記録した。

各電極のデータは、独立成分分析(ICA)により眼電成分を除去した。聴覚刺激呈示時を起点( $t=0$  ms)として  $t=-300$  ~  $+700$  ms の区間を切り出し、 $t = -200$  ~  $0$  ms 区間の平均電位をベースラインとし、標準・標的の刺激ごとに加算平均波形を求めた。±80  $\mu$ V を越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。

各被験者の加算平均波形から全被験者の総加算平均波形とその差分波形を算出した。ERPs 成分として、 $t=75$ ~ $150$  ms の加算平均波形の陰性ピークを N1、 $t=150$ ~ $250$  ms の加算平均波形の陽性ピークを P2、 $t=150$ ~ $250$  ms の差分波形の陽性シフトを enhanced-P2、同じ潜時における陰性シフトを MMN[6]、 $t=250$ ~ $450$  ms の加算平均波形の陰性ピークを N300 と定義した。差分波形から導出する enhanced-P2 に関しては、既往の研究[7]に則り、ピーク潜時±40 ms の区間における面積振幅を振幅とした。

## 3. 実験 4: 遅延検出成分の特徴 (能動運動)

### 3.1 概要

既報の実験 1~3 において、身体運動に伴う聴覚フィードバックの遅延検出に関連する成分として、enhanced-P2 と N300 が示されている。しかし、それらの遅延検出成分の特徴については明らかではない。そこで、本実験では、身体運動に伴う聴覚フィードバックに異なる遅延幅を挿入し、遅延検出成分と遅延時間の関係について検討を行った。

### 3.2 結果

#### (1) 心理評価

被験者の計数の平均回答数と自己主体感の心理評価値の平均を図 1 に示す。なお、エラーバーは標準誤差を示す。被験者の平均回答数は、300 ms の範囲までにおいて、遅延が大きくなるにつれて増大した(One-way ANOVA:  $F_{(4,75)} = 87.7, p < 0.01$ ; Tukey-Kramer's HSD,  $p < 0.05$ )。なお、DDT は 158.1 ms であった。

一方、自己主体感については、いずれの質問においても、自己主体感は聴覚フィードバックの遅延時間が大きくなるほど弱まることが示された(One-way ANOVA; Q1:  $F_{(4,75)} = 18.0, p < 0.01$ ; Q2:  $F_{(4,75)} = 21.1, p < 0.01$ )。下位検定の結果、Q1 ではコントロール条件とそれ以外の条件間で、Q2 ではコントロール条件とそれ以外の条件間および 100 ms 遅延条件と 300・400 ms 遅延条件で有意な差がみられた(Tukey-Kramer's HSD:  $p < 0.05$ )。

#### (2) 総加算平均波形

Pz における各遅延条件の総加算平均波形と差分波形を図 2 に示す。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[8]が確認された。N1 に後続する成分として、100・200 ms 遅延条件においては P2 成分の増強(enhanced-P2)がみられたが、300・400 ms 遅延条件ではみられなかった。また、これらの成分に後続して、N300 成分がみられた。遅延時間が大きくなるにつれ、N300 の振幅は増大する傾向がみられた。

#### (3) 事象関連電位

Pz における enhanced-P2 と N300 の振幅と潜時を図 3 に示す。各成分の振幅と潜時について、有意差のみられた条件間を図中に示す。(One-way ANOVA; enhanced-P2 振幅:  $F_{(3,60)} = 11.6, p < 0.01$ ; N300 振幅:  $F_{(4,75)} = 18.0, p < 0.01$ ; Tukey-

Kramer's HSD,  $p < 0.05$ ).

N300 の振幅に着目し、各被験者のピーク値と計数の平均回答数、または自己主体感に関する心理評価値の関係をを行った。両者の散布図を図 4 に示す。計数の平均回答数と N300 の振幅の両者に相関がみられた ( $Pz$ : Spearman's correlation coefficient,  $\rho = -0.565, p < 0.01$ )。また、いずれの質問においても、自己主体感の評価値が減少するに従い N300 の振幅が増大しており、両者に負の相関がみられた。(Spearman's correlation coefficient; Q1:  $\rho = -0.490, p < 0.01$ ; Q2:  $\rho = -0.499, p < 0.01$ )。

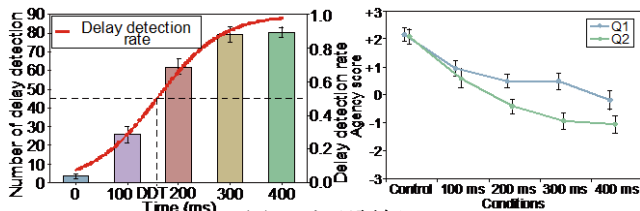


図 1 心理評価

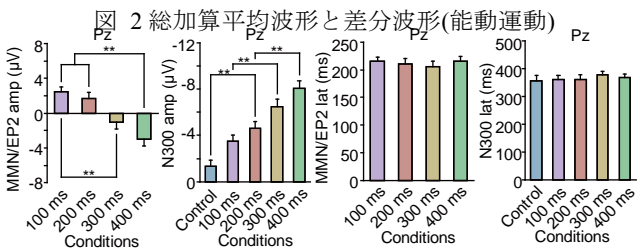
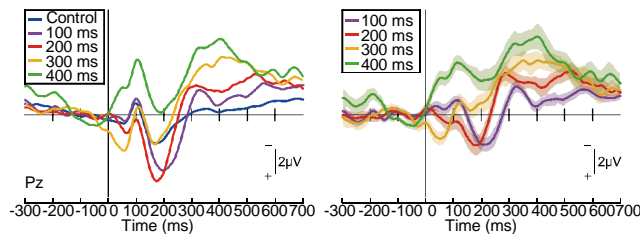


図 3 特徴的な事象関連電位成分の振幅と潜時(能動運動)

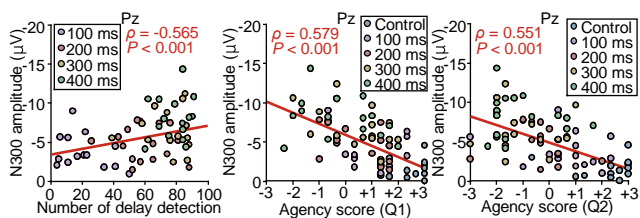


図 4 計数・心理評価と N300 と振幅の相関

### 3.3 考察

N300 の振幅は、遅延時間が大きくなるに従い増大した。また、N300 成分と計数の平均回答数に相関があったことから、N300 成分は遅延検出成分であると考えられる。P2 成分の振幅は、200 ms 以下の遅延においては増強し (enhanced-P2)、300 ms 以上の遅延では減衰した。この結果から、200 ms 以下の遅延と 300 ms 以上の遅延で異なる神経基盤による時間知覚がなされている可能性が考えられる。

## 4. 実験 5 : 遅延検出成分の特徴 (受動運動)

### 4.1 概要

実験 4 では、身体運動に伴う聴覚フィードバックに異なる遅延幅をもつ遅延を挿入した場合の遅延検出成分の特徴が示された。しかし、既往の研究で身体運動の有無により遅延の検出感度が異なることが示されている[4]。そこで実験 5 では、実験 4 と同様の条件で受動的に聴覚刺激を聴取する実験を行い、刺激列から遅延逸脱した刺激を聴取した際に惹起される事象関連電位成分について能動実験との比較を行った。

### 4.2 結果

#### (1) 計数の平均回答数

被験者の計数の平均回答数を図 4 に示す。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,  $F_{(4,75)} = 48.5, p < 0.01$ )。Control 条件と 100 ms 遅延条件で、その他の遅延条件に対して有意差がみられた (Tukey-Kramer's HSD,  $p < 0.05$ )。なお、DDT は 120.5 ms であった。

#### (2) 総加算平均波形

Pz における各遅延条件の総加算平均波形と差分波形を図 5 に示す。能動実験と同様に、いずれの条件においても、N1 成分、これに後続する成分として、100・200 ms 遅延条件においては P2 成分の増強 (enhanced-P2) がみられたが、300・400 ms 遅延条件ではみられなかった。また、これらの成分に後続して、N300 成分がみられた。遅延時間が大きくなるにつれ、N300 の振幅は増大する傾向がみられた。

#### (3) 事象関連電位

Pz における MMN もしくは enhanced-P2 と N300 の振幅と潜時を図 3 に示す。各成分の振幅と潜時について有意差のみられた条件間を図中に示す。(One-way ANOVA; enhanced-P2 振幅:  $F_{(3,60)} = 11.5, p < 0.01$ ; N300 振幅:  $F_{(4,75)} = 14.0, p < 0.01$ ; Tukey-Kramer's HSD,  $p < 0.05$ )。

また、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 ( $Pz$ : Spearman's correlation coefficient,  $\rho = -0.48, p < 0.01$ )。

### 4.3 考察

enhanced-P2 と N300 について、受動実験においても、能動実験と同様の結果が得られた。これは、1 秒間隔のリズム感覚を認識し、次に来る聴覚刺激のタイミングを予測することができることから、周期的な聴覚刺激列中の逸脱刺激に対して、予測したタイミングとの時間的な不整合の検出が可能であることを示していると考えられる。

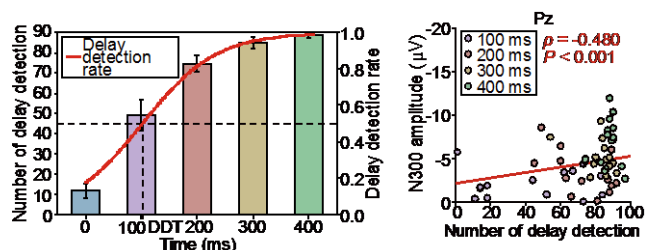


図 5 計数・心理評価と N300 と振幅の相関

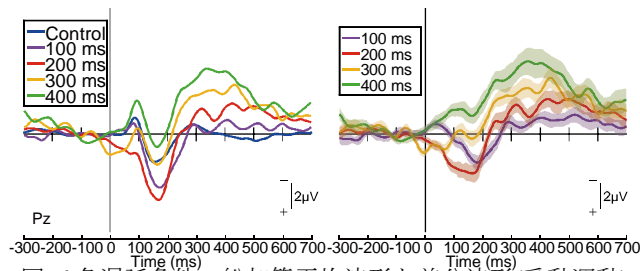


図 6 各遅延条件の総加算平均波形と差分波形(受動運動)

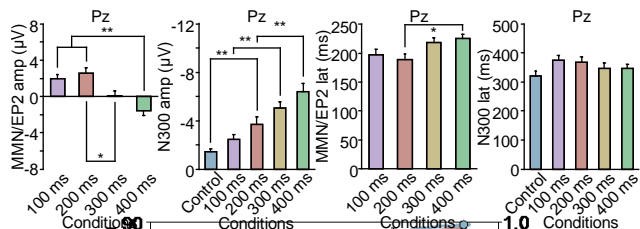


図 7 特徴的な事象関連電位成分の振幅と潜時(受動運動)

## 5. 能動実験と受動実験の比較

### 5.1 DDTの比較

実験 4 における DDT の平均回答数に着目すると、全ての遅延条件において、能動実験の回答数は受動実験を下回った。能動実験の DDT は受動実験と比較して有意に大きかった (Welch's  $t$ -test,  $t_{(15)} = 2.8, p < 0.05$ )。

図 8 能動運動と受動運動の DDT

### 5.2 事象関連電位成分の比較

特徴的な時事象関連電位成分の振幅に着目すると、両実験共に、100・200 ms 遅延条件では P2 成分が増強し (enhanced-P2), 300・400 ms 遅延条件では P2 成分は減少する (MMN) 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。いずれの成分も、両課題で類似した傾向がみられた。課題と遅延条件の 2 要因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 (MMN/enhanced-P2:  $F_{(3,120)} = 22.3, p < 0.01$ ; N300:  $F_{(4,150)} = 31.9, p < 0.01$ )。更に、N300 成分では、課題間による主効果がみられ、能動実験の方が受動実験と比較して有意に大きい ( $F_{(1,150)} = 7.6, p < 0.01$ )。

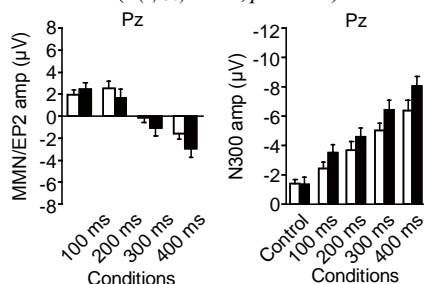


図 9 能動・受動実験における事象関連電位成分の振幅

### 5.3 考察

実験 2 において、150 ms の遅延を挿入した場合には、P2 成分は身体運動に対する聴覚フィードバックの遅延検出に伴い増強された。すなわち、enhanced-P2 がみられることが示されているが、実験 4・5 では 300 ms 以上遅延した条件ではみられなかった。身体運動に起因する感覚フィードバックは遅延が 200~300 ms の範囲内の場合に整合性をもつとされ、この範囲の遅延時間は脳が自己身体を構成する為に必要な時間窓であることが複数の研究で報告されている。聴覚刺激を用いた実験では、約 300 ms までの遅延聴覚フィードバックに対しては、適応的に対処できることが示されている[5]。ロボットハンドを用い、自分で反対の自分の手をくすぐる実験では、触覚刺激に遅延を挿入した場合、100 ms 以上の遅延からからくすぐったさを感じ始め、300 ms までくすぐったさが上昇することが示されている[9]。また、左右の手に、わずかな時間差を挿入した触覚刺激を呈示し、どちらの刺激が先に提示されたか、時間順序判断をさせた実験において、両腕を交差させると、刺激時間差が 300 ms 以内だと逆の手を回答してしまうことが示されている[10]。これらの研究からも、200~300ms の範囲に身体運動と感覚フィードバックとを対応付ける時間窓が存在することが示唆されており、本研究でみられた P2 の振幅の振る舞いに関しても、それらに関連した認知メカニズムに基づくと考えられる。すなわち、200 ms の遅延までは自らの身体運動に伴う感覚フィードバックとして対応付けられた結果として enhanced-P2 がみられ、300 ms 以上の遅延では、自らのフィードバックとして対応付けることができず P2 は増強されなかったと考えられる。

能動・受動両実験において、N300 成分の振幅と計数の平均回答数に相関がみられた。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事象関連電位成分であると考えられる。同時に、自己主体感が遅延の増大とともに弱まること、すなわち、感覚フィードバックが時間的に不整合な場合に弱まることを示された。N300 と自己主体感に相関関係がみられたことから、N300 は自己主体感に伴う認知活動を反映した生理指標として有効であると可能性が考えられる。

また、能動実験の N300 成分の振幅は、受動実験と比較して全遅延条件で大きく、更に、遅延弁別閾は受動実験と比較して有意に大きい。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[11]。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[12])。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。このことから、能動実験の方が、N300成分の振幅が大きくなったと考えられる。一方、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、能動実験の方が受動実験よりもDDTが大きくなったと考えられる。

## 6. 総括

本研究では、身体運動とそれに伴う感覚フィードバックが時間的に不整合な環境に着目し、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。実験1~3において、周波数弁別課題と遅延検出課題では、異なる性質をもつ事象関連電位成分が観測された。このことから、周波数弁別と遅延検出において、脳内における認知処理メカニズムが異なる可能性が示された。また、200msの遅延までは、enhanced-P2がみられ、300msを超えるとみられなくなることから、300ms以上の遅延では、自らのフィードバックとして対応付けることができずP2は増強されなかったと考えられる。実験4・5において、N300の振幅が計数の平均回答数と相関があることからN300は遅延検出に関する認知活動を反映した成分であると考えられる。

**謝辞** 本研究は、科学技術振興機構／戦略的創造研究推進事業ならびに科学研究費補助金(25700015, 26119529, 15J05359)の助成を受けて実施した

## 参考文献

- [1] Toida, K., Ueno, K., and Shimada, S. Neural basis of the time window for subjective motor-auditory integration. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2016, vol.9 : 688, p.1-12.
- [2] 樋田浩一, 上野佳奈子, 嶋田総太郎. “身体運動に伴う聴覚フィードバックの遅延検出に関する脳活動-ピッチ知覚と遅延検出の比較”. 第111回音楽情報科学研究発表会, in press.
- [3] Gallagher S. Philosophical conceptions of the self : Implications for cognitive science. *Trends in Cognitive Science*, 2000, vol.4, p.14-21.
- [4] Shimada, S., Qi, Y., and Hiraki, K. Detection of visual feedback delay in active and passive self-body movements. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2010, vol.11, p.551-559.
- [5] Toida, K., Ueno, K., and Shimada, S. Recalibration of subjective simultaneity between self-generated movement and delayed auditory feedback. *NeuroReport*. 2014, vol.25, p.284-288.
- [6] Sams, M., Paavilainen, P., Alho, K., and Näätänen, R. Auditory frequency discrimination and event-related potentials. 1985, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology.*, vol.62, p.437-448.
- [7] Näätänen, R., Pakarinen, S., Rinne, T., and Takegata, R. The mismatch negativity(MMN): towards the optimal paradigm. *Clinical Neurophysiology*. 2004, vol.115, p.140-144.
- [8] Hyde, M. The N1 response and its applications. *Audiol Neurootol*. 1997, vol.2, p.281-307.
- [9] Blakemore, S, J., Frith, C, D., and Wolpert, D, M. Spatio-temporal prediction modulates the perception of self-produced stimuli. 1999, *Journal of Cognitive Neuroscience*. vol.11, p.551-559.
- [10] Yamamoto, S., and Kitazawa, S. Reversal of subjective temporal order due to arm crossing. *Nature Neuroscience*. 2001, vol.4, p.759-765.
- [11] Haggard, P., Clark, S., and Kalogeras, J., Voluntary action and conscious awareness. *Nature Neuroscience*. 2002, vol.5, p.382-385.
- [12] Frith, C, D., Brakemore, S, J., and Wolpert, D, M., Abnormalities in the awareness and control of action. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*. 2000, vol.355, p.1771-1788.

正誤表

---

3 頁左段 9 行目

誤・ Q1 :  $\rho = -0.490, p < 0.01$  ; Q2 :  $\rho = -0.499, p < 0.05$

正・ Q1 :  $\rho = 0.58, p < 0.01$  ; Q2 :  $\rho = 0.55, p < 0.05$

3 頁右段 12 行目

誤・ 図 4

正・ 図 5

3 頁右段 19 行目

誤・ 図 5

正・ 図 6

3 頁右段 27 行目

誤・ 図 3

正・ 図 7

4 頁左段 6 行目

誤・ 実験 4 と実験 5 における…

正・ 実験 4 と実験 5 における DDT を図 8 に示す.

4 頁左段 8 行目

誤・ 特徴的な事象関連電位成分の振幅に着目をする、

正・ 実験 4 と実験 5 の Pz における enhanced-P2 と N300 の平均  
振幅を図 9 に示す.