

修士論文

視聴覚GO／NOGO課題の
難易度変化が脳活動に及ぼす影響の
fNIRSを用いた検討

同志社大学大学院 生命医科学研究科
医工学・医情報学専攻 医情報学コース
博士前期課程 2013年度 1036番

杉田 出弥

指導教授 廣安 知之教授

2015年01月23日

Abstract

We research the effects of changing task difficulties on brain activities from the point of view of the task performance. In this experiment, the subjects were to perform auditory and visual GO/NOGO task. The difficulty of these tasks was set 6 levels. The cerebral blood flow (CBF) in both sides of lateral and prefrontal cortex under GO/NOGO tasks were measured using functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). Twelve healthy adults participated as subjects of the experiment in this study. The CBF of the frontal pole (FP) activated significantly under easy tasks (audio: level 2, visual: level 1). In contrast, CBF of the right inferior frontal cortex (IFC) had shown the strongest activity under difficulty level 5. Next, we examined the effects of differences of task performance. In IFC, the CBF peak of the high score group (HSG) was more difficult than the low score group (LSG) under the both tasks. Through this experiment, it is suggested that the more difficult the task gets, the greater the brain activities gets in HSG. From the above discussion, there are differences of changing task difficulties on brain activities between HSG and LSG.

目次

1	はじめに	1
2	脳の反応抑制機能と脳機能イメージング	3
2.1	反応抑制とは	3
2.2	GO/NOGO 課題	3
2.3	fNIRS	3
3	視覚 GO/NOGO 課題の難易度変化による脳活動への影響	5
3.1	被験者	5
3.2	実験方法	5
3.3	データ処理	5
3.4	視覚 GO/NOGO 課題実験結果	6
4	聴覚 GO/NOGO 課題の難易度変化による脳活動への影響	8
4.1	被験者	8
4.2	実験方法	8
4.3	データ処理	8
4.4	聴覚 GO/NOGO 課題実験結果	9
5	考察	10
5.1	課題成績	10
5.2	脳活動変化	10
6	結論	12

1 はじめに

近年、脳機能イメージング装置を用いた研究が盛んに行われている。脳機能イメージング装置を用いた研究では、目的の脳機能が活動する課題を被験者に行ってもらい、その課題を遂行時の脳活動変化を計測する。しかし、ここで用いられる課題のパラメータが変化することによって、課題に対する脳活動量が異なることが考えられる。計算課題を例に挙げると、2桁の足し算か、5桁の掛け算かというように課題の難易度が脳の活動量に影響を及ぼすことが考えられるが、現状の脳機能研究においては、課題の難易度を考慮して課題が使用されておらず、脳機能が不明瞭であることが問題点である。そこで本研究では、課題の難易度が脳活動に及ぼす影響を明確にし、難易度を考慮した脳活動の検討を行うことによって、より詳細な脳活動計測をすることを目的としている。

本研究では人間の認知機能の1つである、実行機能という心理学的モデル¹⁾に焦点を当てる。人間は実行機能により、反応を抑制したり、一連の活動を計画的に行うなど、将来の目標のために適切な問題解決を行う精神的な構えを維持することができている。²⁾ またその実行機能には抑制機能、認知的柔軟性・表象の柔軟性、ワーキングメモリー、プランニング、注意の切り替えの異なる5つの因子が関係していると言われている³⁾。そのような実行機能の中で、Barkley(1997)は最も重要な機能が反応抑制であると報告している⁴⁾。反応抑制は抑制機能の1つであり、信号に対して有意な行動を抑制する機能である⁵⁾。例えば、点灯色が2種類あるランプを用意し、ある色ではボタンを押すが、もう片方の色では押さないとした時、ボタンを押さない時「ボタンを押す」反応を抑制していることになり、この際に反応抑制が働いていると言える。この機能が働くことによって、人はより正確な判断を行っている。反応抑制を計測する課題の1つとして用いられているのが、GO/NOGO課題である。GO/NOGO課題では、GO信号とNOGO信号の2種類の信号が提示されるが、それらの信号パラメータを変化させることにより、難易度付けが可能であると考えられる。

事象関連電位 (Event-Related Potential: ERP) 研究では、GO/NOGO課題の反応時間に制限を設けることで難易度付けされた課題遂行時、難易度の違いにより、ERPの振幅に影響が出たという報告がある⁶⁾。活性部位の範囲に関しては、個人の能力および衝動性によって差が出るという報告がある⁷⁾。機能的近赤外分光法 (functional Near-Infrared Spectroscopy: fNIRS) 研究では、課題が複雑になると、特定の部位において酸素消費量が増加し、その影響を計測するのにNIRS装置はふさわしいという報告がある他⁸⁾、反応抑制がより活動する時には、右の前頭前野がより活性するという事もわかっている⁹⁾。このように課題の難易度と脳活動の関係に関する研究は多数行われているが、反応抑制の度合いと脳活動の関係性は未だ明らかにされていない。そこで本稿では難易度付けしたGO/NOGO課題を用いて、課題の難易度変化が脳活動に及ぼす影響について検討する。

先行研究より注意をするときは注意をしないときよりも脳活動が増幅する¹⁰⁾と報告されている。難易度が上昇すると、被験者の課題に対する注意は増大すると考えられることから、GO/NOGO課題の難易度が上昇すると脳活動が活性化し、活性領域や活性量が増え

ることを仮説として、課題の難易度が脳の反応抑制に与える影響について検討する。本稿では視覚および聴覚刺激を用いた GO/NOGO 課題をそれぞれ用いて、GO/NOGO 課題の難易度変化による視聴覚の違いを fNIRS により脳活動を計測することによって検討する。2 章で反応抑制とそれを測定するために今回難易度付けした課題の説明をおこなう。3 章で作成した課題時の脳活動を fNIRS を用いて計測した結果を示し、4 章で 3 章の結果について考察を行う。本稿では、視覚および聴覚課題それぞれの課題の難易度変化に伴う脳活動変化を検討し、視覚実験と聴覚実験の違いも検討する。

2 脳の反応抑制機能と脳機能イメージング

2.1 反応抑制とは

人間は将来の目標のために、適切な問題解決を行う精神的な構えを維持するために実行機能という認知機能を持つ。その実行機能には抑制機能、認知的柔軟性・表象の柔軟性、ワーキングメモリー、プランニング、注意の切り替えの異なる5つの因子が関係しており³⁾、その中で、最も重要な機能が抑制機能の中の反応抑制であると報告されている⁴⁾。反応抑制は、信号に対して有意な行動を抑制する機能である。例えば点灯色が2種類あるランプを用意し、ある色ではボタンを押すが、もう片方の色では押さないとした時、ボタンを押さない時「ボタンを押す」反応を抑制していることになり、この際に反応抑制が働いていると言える。この機能が働くことによって、人はより正確な判断を行うことが出来ている。

2.2 GO/NOGO 課題

反応抑制を測定する際に、よく使用される課題がGO/NOGO課題である¹¹⁾。GO/NOGO課題はGO信号とNOGO信号の2種類の信号を持ち、被験者に対してどちらかをランダムで呈示する。GO信号に対しては応答し(GO反応)、NOGO信号に対しては応答をせず(NOGO反応)、GO反応時の反応時間、およびエラー率をパフォーマンスとして評価する。この課題ではNOGO反応時に、反応抑制機能が深く関係し、反応抑制は主にFig. 7に示す前頭葉の下前頭回で活動していると言われている¹²⁻¹⁵⁾。下前頭回は左右に存在するが、成長に伴い右有意性であること¹⁶⁾、高齢者においては、若年成人よりも抑制機能が弱く、半球非対称性が見られないことも報告されている¹⁷⁾。

本実験では視覚および聴覚GO/NOGO課題時の脳活動をそれぞれ計測し、反応抑制機能を比較する。

2.3 fNIRS

異なる波長をもつ2種類の近赤外光を用いることにより、脳内の酸素化ヘモグロビン(Oxygen-hemoglobin: Oxy-Hb)と脱酸素化ヘモグロビン(Deoxygen-hemoglobin: Deoxy-Hb)、その和である総ヘモグロビン(total-hemoglobin: Total-Hb)量を求める装置である¹⁸⁾。近赤外光を脳に照射すると、大脳皮質のOxy-HbとDeoxy-Hbに吸収・散乱される。この性質を用いて、入射光と反射光から血中のOxy-HbとDeoxy-Hbの濃度変化を計測することができる¹⁹⁾。

2.3.1 fNIRSの計測原理

fNIRSは、拡張ランベルト・ベールの法則²⁰⁾を用いて2つの異なる近赤外光の波長を利用し、Oxy-Hb濃度変化量とDeoxy-Hb濃度変化量を計測する。拡張ランベルト・ベールの法則とは、濃度が均一な散乱体である強度が I_E の近赤外光を照射するとき、物体を通

過する際に散乱や吸収が起こり減衰した I_D を，式 (2.1) により定義したものである．ただし， ϵ は散乱体のモル吸光係数， ΔC は散乱体の濃度， D は平均光路長， ΔS は散乱による影響である．

$$\log \frac{I_D}{I_E} = \epsilon \times \Delta C \times D + \Delta S \quad (2.1)$$

fNIRS ではこの原理を利用し，散乱体である大脳皮質の Oxy-Hb 濃度変化量と Deoxy-Hb 濃度変化量を計測する．しかし，実際には心拍や体動によって大脳皮質の Oxy-Hb，Deoxy-Hb は均一ではなくなり，近赤外光の減衰や散乱に大きな影響を及ぼすことに注意が必要である．

2.3.2 fNIRS の特徴

脳機能計測装置は，脳の神経活動そのものを測定する脳波計 (Electroencephalograph: EEG) や脳磁図 (Magnetoencephalography: MEG) と，神経活動に伴う脳血流の変化を測定するポジトロン断層法 (Positron Emission Tomography: PET)，単一光子放射断層撮影 (Single Photon Emission Computed Tomography: SPECT)，fNIRS，fMRI に分類することができる．脳機能測定方法の特徴を比較したものを Table 1 に示す²¹⁾．fNIRS は非侵襲であるため繰り返し計測が可能である点や，サンプリング周波数が 10 Hz と時間分解能が高い点も利点として挙げられる．身体の拘束が少ないため被験者への負担が小さく，また騒音などの障害が少ないため音を用いる実験に適しているなどの特徴がある．一方で空間分解能が低いため細部の計測が困難な点や，深部の測定が困難で測定部位が大脳皮質に限定される点などが欠点として挙げられる．その他にも fNIRS データを用いて Hb の絶対値を求めることができない．計測時は被験者ごとのチャンネルのずれを防ぐため，Fig. 1 に示す国際 10-20 法を参考にチャンネル配置を行う²²⁾．

3 視覚 GO/NOGO 課題の難易度変化による脳活動への影響

3.1 被験者

被験者は成人健常者 12 名（男性: 3 名, 女性: 9 名）であり, 年齢は 21~22 歳である. 利き手は 12 名全員が右手であり, 矯正視力を含んだ視力が 0.7 を下回るものは含まれない. また被験者全員が GO/NOGO 課題の経験者で, GO/NOGO 課題については理解しており, 実験前に今回の課題の目的や内容の説明を受ける.

3.2 実験方法

本実験では難易度付けした視覚 GO/NOGO 課題時の脳活動を fNIRS を用いて計測し, 課題の難易度が変化することによる脳活動変化を検討する. 実験風景を Fig. 2 に示す. 実験は室温 25.2 °C~28.4 °C の室内にて坐位で行う. 視覚刺激の提示はディスプレイ (EW2430 V: BenQ 製) を用いて, 1 m の距離で行う.

実験では視覚 GO/NOGO 課題の難易度変化による脳活動を計測し, 難易度変化に伴う反応抑制機能を検討する. 実験デザインを Fig. 3 に示す. 実験デザインはブロックデザインを採用し, レスト時間, タスク時間はそれぞれ 30 秒, 45 秒 に設定する. 1 つの難易度につきこの過程を 3 回繰り返し, 255 秒の課題を各難易度ごとに実施する. レスト区間は 1.0 秒の一定間隔で GO 信号を提示し, タッピング運動をするように教示する. 課題を行う順番は, カウンタバランスを考慮し, 被験者ごとでランダムに決定する. またタスク中の刺激提示時間, 刺激提示間隔, GO 信号と NOGO 信号の割合はどちらの課題でも共通であり, それぞれ 0.05 秒, 1.0~1.9 秒のランダム, 8:2 に設定する. 本実験で用いた視覚 GO/NOGO 課題の課題設計を以下に述べる. Fig. 4 に示すように, GO 信号に "○", NOGO 信号に 7, 9, 10, 11, 12, 13 角形を提示する. この時図形の直径は 50 mm, 線の太さは 5 mm である. 本実験における難易度設定は, GO 信号と NOGO 信号の概形が類似しているほど難易度が高く, 類似していないほど難易度が低いと定義し, 難易度レベルを level 1~level 6 で表す.

3.3 データ処理

3.3.1 成績データ処理方法

GO/NOGO 課題では, 反応時間とエラー率が課題に対する成績の指標として用いられる. 反応時間とは GO 信号に対する反応時間であり, エラー率とは提示された信号に対する NOGO 信号に誤って反応した反応および, 反応時間が 700 ms を超えた反応の和の割合である. それぞれの難易度の課題において, 被験者の平均反応時間およびエラー率を算出する.

また成績をもとに被験者を高成績者, 中成績者, 低成績者に分類し, 成績別の活性化変

化を検討する。成績の分類方法を以下に示す。

- (1) 各難易度の課題における平均反応時間および平均エラー率を被験者ごとに算出する。
- (2) 被験者の平均反応時間と平均エラー率を元に被験者を順位付けする。
- (3) 反応時間とエラー率の順位の和が小さいものから順に高成績者とする。

成績上位 4 名を高成績者 (High) , 次の 4 名を中成績者 (Middle) , 下位 4 名を低成績者 (Low) とする。

3.3.2 NIRS データ処理方法

fNIRS データの例を Fig. 5 に示す。データには課題による脳血流変化の他に、体動やゆらぎなどさまざまなノイズが含まれている。そのデータから本研究の検討に必要な脳血流変化のみを抜き出すために、以下の処理を行う。ローパスフィルタ (Low-pass filter: LPF) を 1.0 Hz, 移動平均区間を 5 秒に設定し、ノイズ成分を除去する。これらの処理を行ったデータの一部を Fig. 6(a) に示す。次に 3 回繰り返されている課題区間それぞれの最小値がゼロとなるようにゼロ点し、繰り返されたタスク 3 回の平均脳血流変化を加算平均処理により求める。難易度間において活性量変化を検討するために、各難易度における Oxy-Hb 平均値を算出し、Fig. 6(a) のように個人間で平均 2, 分散 1 となるように正規化する。個人ごとに活性量のスケールを揃えることにより、光路長の影響を省くことができ、難易度変化に対する活性量変化を比較できると考えられる。正規化した Oxy-Hb 平均値を今後の検討に用いる。計測部位は前頭部 (22 CH) , 両側頭部 (各 24 CH) , 頭頂部 (22 CH) , 後頭部 (24 CH) の計 116 CH である。そのうち着目部位を Fig. 7 に示す。これらの部位は反応抑制が深く関わっているとされる下前頭回 (Inferior frontal gyrus: IFG) (Probe 5, CH 9) , 未来の予知機能を担い GO/NOGO 課題において信号の判断を行うとされる前頭極 (Frontal pole: FP) (Probe 5, CH 7) , 視覚性の連合野であり、形状の認知をする とされる下側頭回 (Inferior temporal gyrus: ITG) (Probe 1, CH 3) である。

3.4 視覚 GO/NOGO 課題実験結果

3.4.1 視覚 GO/NOGO 課題成績

視覚 GO/NOGO 課題の難易度変化による成績推移を Fig. 8 に示す。課題の難易度が高くなるにつれて、平均反応時間、平均エラー率ともに、増加する傾向があり、難易度を一要因とする分散分析により比較したところ、反応時間のみ有意な差が認められた (RT: $F(5,66)=3.65, p < .05$, ERROR: $F(5,66)=1.38, p > .05$)。このことから、Fig. 4 のように GO 信号である円に対して、NOGO 信号の角数を変化させることにより、視覚 GO/NOGO 課題の難易度付けが可能であることが考えられる。

3.4.2 視覚 GO/NOGO 課題時の脳活動変化

難易度変化に伴う活性量の推移を Fig. 9 に示す。横軸に難易度レベル、縦軸に Oxy-Hb 平均値を表す。IFG と ITG においては、難易度レベルが上昇するにつれて活性量が増大す

る傾向が見られ、level 5 の時に活性量が最大となり、level 6 まで難しくなると、活性量が減少した。一方で FP においては、易しい課題であるほど活性量が大きくなる傾向が見られた。またこれらの結果を難易度を要因とする 1 元配置分散分析により比較すると、IFG と ITG において難易度間で有意な差が認められた (IFG: $F(5,66)=3.876$, $p < .05$, FP: $F(5,66)=0.629$, $p > .05$, ITG: $F(5,66)=2.880$, $p < .05$)。視覚 GO/NOGO 課題の難易度変化により、IFG と ITG では課題が難しくなるに伴い活性量が大きくなるが、難しすぎる課題では活性量が小さくなることがわかった。

また FP においては、難易度変化による活性量の変化に有意な差が認められなかったため、個人差が大きい事が示唆される。そこで FP の活性量変化を成績別に検討する。FP における成績グループ別の難易度変化に伴う活性量の推移を Fig. 10 に示す。横軸に難易度レベル、縦軸に Oxy-Hb 平均値を表す。高成績者および中成績者では課題が易しいほど活性量が大きくなったのに対し、低成績者ではそのような傾向が見られなかった。FP の脳機能は過去の自らの行動を評価したり²³⁾、未来の予測²⁴⁾を行うことであると言われている。高成績者と中成績者では課題の難易度に適応し、前頭極の活動を制御していた一方で、低成績者では、前頭極において難易度変化に適応した活性量の制御ができなかったため、成績が悪かった可能性が示唆される。

4 聴覚 GO/NOGO 課題の難易度変化による脳活動への影響

4.1 被験者

被験者は成人健常者 12 名（男性: 3 名, 女性: 9 名）であり, 年齢は 21~22 歳である. 利き手は 12 名全員が右手であり, 聴覚に難を持つ者は含まれない. また被験者全員が GO/NOGO 課題の経験者で, GO/NOGO 課題については理解しており, 実験前に今回の課題の目的や内容の説明を受ける.

4.2 実験方法

本実験では難易度付けした聴覚 GO/NOGO 課題時の脳活動を fNIRS を用いて計測し, 課題の難易度が変化することによる脳活動変化を検討する. 実験風景を Fig. 11 に示す. 実験は室温 25.2 °C~28.4 °C の室内にて坐位で行う. 聴覚実験での音刺激の提示はノイズキャンセラー付イヤホン (ATH-ANC 23: audio-technica 製) を用いる. 本実験では聴覚 GO/NOGO 課題の難易度変化による脳活動を計測し, 難易度変化に伴う反応抑制機能を検討する. 実験デザインは視覚実験時と同様のものを採用する.

本実験で用いた聴覚 GO/NOGO 課題の課題設計を Table 2 に示し, 以下に述べる. GO 信号に 1000 Hz の正弦波, NOGO 信号に 1020, 1030, 1040, 1050, 1060, 1100 Hz の正弦波を設定し, 刺激の音圧を 60 ± 3.5 dB SPL で提示する. 本実験における難易度設定は, GO 信号と NOGO 信号の周波数差が小さいほど難易度が高く, 大きいほど難易度が低いと定義し, 難易度レベルを level 1~level 6 で表す.

4.3 データ処理

4.3.1 成績データ処理方法

成績データ処理方法は, 視覚実験と同様である. 但し成績をもとにした被験者の分類は, 聴覚実験および視覚実験の課題成績それぞれを元に行うため, 同被験者が聴覚実験と視覚実験で異なる群に所属することがある.

4.3.2 fNIRS データ処理方法

fNIRS データ処理方法は視覚課題と同様である. 計測部位は前頭部 (22 CH) および両側頭部 (各 24 CH) の計 70 CH である. そのうち着目部位を Fig. 7 に示す. 視覚課題時と同様に, 下前頭回 (IFG), 未来の予知機能を担い GO/NOGO 課題において信号の判断を行うとされる前頭極 (FP), また聴覚性の連合野であり, 音の聞き分けを行うとされる上側頭回 (Superior temporal gyrus: STG) (Probe 1, CH 13) に着目する.

4.4 聴覚 GO/NOGO 課題実験結果

4.4.1 聴覚 GO/NOGO 課題成績

聴覚 GO/NOGO 課題の難易度変化による成績推移を Fig. 12 に示す。課題の難易度が高くなるにつれて、平均反応時間、平均エラー率ともに増加する傾向があり、難易度を一要因とする分散分析により比較したところ、反応時間 ($F(5,66)=3.56, p < .05$)、エラー率 ($F(5,66)=7.54, p < .05$) とともに難易度間で有意な差が認められた。このことから GO 信号と NOGO 信号の周波数差を変化させることにより、聴覚 GO/NOGO 課題の難易度付けが可能であることが考えられる。

4.4.2 聴覚 GO/NOGO 課題時の脳活動変化

被験者全員の難易度変化に伴う平均活性量の推移を Fig. 13 に示す。横軸に難易度レベル、縦軸に Oxy-Hb 平均値を示す。難易度レベルは、NOGO 信号の周波数が小さいほど難易度のレベルが高いとする。IFG と STG においては、難易度の変化に伴う顕著な傾向は見られなかった。一方 FP においては、易しい課題である難易度レベルが 2 の難易度で活性量が最大となり、難易度レベルが上昇するにつれて活性量が減少する傾向が見られた。またこれらの結果を難易度を要因とする 1 元配置分散分析により比較すると、FP においてのみ難易度間で有意な差が認められた (IFG: $F(5,66)=0.864, p > .05$, FP: $F(5,66)=4.317, p < .05$, STG: $F(5,66)=0.393, p > .05$)。このことから、聴覚課題の難易度変化による脳活動変化では、易しい課題である level 2 の難易度で FP での活性量が有意に最大となったことがわかった。また IFG, STG においては、難易度変化による活性量の変化に有意な差が認められなかったため、個人差が大きい事が示唆される。そこで IFG, STG の活性量変化を成績別に検討する。

IFG における成績グループ別の難易度変化に伴う活性量の推移を Fig. 14 に、STG における成績グループ別の難易度変化に伴う活性量の推移を Fig. 15 に示す。横軸に難易度レベル、縦軸に Oxy-Hb 平均値を表す。IFG においては、高成績者では level 5、中成績者では level 3、低成績者では level 2 において活性量が最大となり、その難易度から離れるにつれて、活性量が減少する傾向があった。一方で STG においては、高成績者では level 4 において活性量が最大となったのに対し、中成績者および低成績者では level 2 において活性量が最大となった。IFG と STG のどちらの部位においても、被験者の課題成績がよいほど、難しい課題における活性量が大きくなることがわかった。

以上のことから聴覚 GO/NOGO 課題の難易度変化に対する脳活動への影響は、GO/NOGO 課題の主な機能である反応抑制機能を司る IFG、音の聞き分けを行う STG では、課題成績が良いほど難しい課題において活性量が大きくなることがわかった。脳をより活発化させる難易度の課題を被験者に提供するためには、被験者の課題成績を考慮し、成績に合わせた難易度の課題を提供する必要があることが示唆される。また FP の活性量が難易度に適応することによって、成績の制御を上手く行っている可能性が考えられる。

5 考察

視覚実験と聴覚実験において、難易度変化による脳活動への異なる影響が見られた。聴覚実験では、IFCにおける活性量が最大となる難易度は被験者の成績がよいほど難しくなることがわかった。一方視覚実験では、IFCにおける活性量に被験者で異なる変化傾向はなく、level 5で活性量が最大となった。またFPにおいては、聴覚実験では課題が易しくなるに伴い活性量が大きくなる傾向があり、被験者による異なる傾向が見られなかったのに対し、視覚実験では高成績者および中成績者では聴覚実験での結果と同様の傾向が見られたが、低被験者では難易度変化に伴う活性量変化は見られなかった。このことから、課題の難易度変化に伴う活性量変化は、視覚実験と聴覚実験で異なることと言える。本節では各実験結果を比較し、視聴覚間での結果を比較する。

5.1 課題成績

Fig. 16に視覚実験と聴覚実験での課題成績の差を示す。反応時間およびエラー率はそれぞれ約30 ms, 約0.7%程度、聴覚実験のほうが視覚実験より小さいことがわかった。エラー率には700 ms以上必要とした反応と、NOGO信号に間違えて反応してしまった反応を含んでいる。このことよりエラー率の視覚と聴覚実験での差は、反応時間が長いものに起因していると思われるので反応時間について検討する。視覚実験での反応時間よりも、聴覚実験での反応時間のほうが27 ms早かった。聴覚情報の知覚時間は視覚情報の知覚時間よりも早いことがわかっている。このことから、視覚課題と聴覚課題における反応時間の差は、感覚器から信号が入力されて意識に到達出来るまでの時間の差によるものだと考えられる。

次に、視覚課題と聴覚課題それぞれにおける全被験者の平均反応時間の分散をFig. 17に示す。横軸に難易度レベル、縦軸に反応時間の分散を表す。Fig. 17より、聴覚課題よりも視覚課題のほうが、反応時間の分散が小さく、課題成績の個人差が小さいことがわかった。

5.2 脳活動変化

結果より、課題の難易度変化によって、脳の活性量が最大となる難易度が存在した。先行研究²⁵⁾において、課題が難しくなるに伴い、脳活動が増大すると報告されているが、本研究では課題が一定以上難しくなると活性量が減少した。これは課題の難易度が高すぎたことによるものであると考えられる。ものを細かく見分ける力は、目の構造と、脳の「注意を向ける能力」によって制限され、目の解像度だけでなく、注意機能が重要であることが言われている²⁶⁾。このことから、本実験において活性量が減少した難易度の高い課題では、図形の形や音を区別するための注意機能の欠如が、活性量の減少に関係していた可能性が示唆される。そして信号を見極める課題における脳活動を検討する際には、目や耳などの感覚器の能力だけでなく、それに意識を向ける認知機能にも着目する必要があることが言える。

また活性量が最大となる難易度は視覚課題では課題成績の影響を受けず、全被験者が level 5 で活性量が最大となる傾向が示されたのに対し、聴覚課題では課題成績の影響を受け、高成績者ほど難しい課題で活性量が大きくなる傾向があった。これは視覚課題と聴覚課題における成績分散の違いが関係していると示唆される。Fig. 17 では、視覚課題と聴覚課題の反応時間の分散を比較すると、視覚課題のほうが小さいことがわかった。視覚課題における全被験者の平均反応時間に対する分散が小さく、成績に個人差がなかったことが、脳活動の個人差が小さくなった要因であることが考えられる。

6 結論

本研究では課題の難易度変化による脳活動変化を考慮した脳機能計測を行うために、課題の難易度が脳活動に及ぼす影響を明確にすることを目的とする。本稿では人間の認知機能の1つであり、実行機能の中でも大切であると言われる反応抑制機能に着目する。反応抑制機能を測るために使用される視覚と聴覚 GO/NOGO 課題に難易度付けを行うことによって、GO/NOGO 課題の難易度変化が脳活動に及ぼす影響を fNIRS を用いて脳活動を計測することにより検討した。反応抑制機能を司る下前頭回付近の活性量は、聴覚課題では高成績者が低成績者より難しい課題でより大きい傾向があったが、視覚課題では成績の影響を受けず、全被験者で難しい課題における活性量が大きくなった。本実験の結果より、課題の難易度は脳の活性量に影響を及ぼし、活性量が最大となる難易度が存在すること、また聴覚課題では活性量が最大となる難易度は、成績がよいほど難しくなることが明らかになった。

謝辞

この研究をするにあたり、私に適切なアドバイスを下さり、研究に集中できる環境を提供して下さった廣安先生にはとても感謝しております。廣安先生がどんなに忙しくても元気に明るく動き回っている姿を見て、私は前向きに研究を頑張ることができました。これからも今と変わらず、元気でパワフルな廣安先生でいてください。また NIRS 認知負荷班の研究ミーティングなど、近い距離で私を指導して下さった山本詩子先生、先生が着任されてから、研究のことで気づいたこと。教えていただいたことは数え切れません。この修論も細かなチェックをしていただきありがとうございました。

私に近い研究を行い、いつもそばで支えてくれたコーチである木村茜さん。茜さんの真面目さ、粘り強さは本当に尊敬しています。3年間同じ研究班で研究をしたのは、茜さんだけです。本当にありがとう。またいつも研究ミーティングで意見をくださった認知負荷班の皆様、貴重な助言をありがとうございました。私の弟子であった真島希実さん、ほわほわした雰囲気にも癒されていました。コーチミーティングや帰り道も楽しかったです。いつも思ったことを直球で飛ばしてくる滝謙一さん、厳しい言葉もいっぱいかけられたように思いますが、滝さんの人情の強さを陰ながら感じていました。そして、今年度になって認知負荷班に入って来てくれた、信楽慧くん、宮島めぐみさん。お二人の可愛い仕草、純粹に頑張ってる姿を見て、自分も頑張らなきゃなと思えました。研究班が同じという接点がみんなとあったこと、嬉しく思います。

この修士論文を執筆するにあたり、添削や修正に関する助言を多く提供してくれた井上楓彩さん、言葉使いや図のレイアウトなど、楓彩さんから学ぶことはとても多かったです。そして同期生のみなさま、研究室生活を送るに当たり、みんなと話し合い、助け合いながら研究したことによって、私のこの修士論文が完成したと思っています。研究は一人ではできないと私に感じさせてくれたのは、同期生の存在が大きかったです。個性がいろいろある中で、みんなそれぞれが活躍している姿はとても素敵でした。

最後になりましたが、研究室のみなさま、1~3年間私のことを支えて下さりありがとうございました。研究の真面目な話から、たわい無い話まで、みんなと過ごしてきたこの3年はとても大切な期間でした。私は3年間医療情報システム研究室で研究が出来たことを、とても嬉しく誇りに思っております。卒業後も、この3年間で培ったことを活かし社会で活躍できるように努めたいと思います。本当にありがとうございました。

参考文献

- 1) A.R. Luria, *The Working Brain: An Introduction To Neuropsychology*, Basic Books, 1976.
- 2) B.F. Pennington and S. Ozonoff, “Executive functions and developmental psychopathology,” *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, Vol.37, pp.51–87, 1996.
- 3) P.D. Zelazo and Ul. Muller, *Executive Function in Typical and Atypical Development*, Blackwell Publishing, 2002.
- 4) R.A. Barkley, *ADHD and the Nature of Self-control*, Guilford Press, 1997.
- 5) L. Hasher, S. Tonev, C. Lustig and R.T. Zacks, “Inhibitory control, environmental support, and self-initiated processing in aging,” *Perspectives on human memory and cognitive aging: Essays in Honour of Fergus Craik*, pp.286–297, 2001.
- 6) N. Benikos, S.J. Johnstone and S.J. Roodenrys, “Varying task difficulty in the go/nogo task: The effects of inhibitory control, arousal, and perceived effort on erp components,” *International Journal of Psychophysiology*, Vol.87, pp.262–272, March 2013.
- 7) S. Asahi, Y. Okamoto, G. Okada, S. Yamawaki and N. Yokota, “Negative correlation between right prefrontal activity during response inhibition and impulsiveness: A fmri study,” *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, Vol.254, No.4, pp.245–251, Aug. 2004.
- 8) M. Verner, M.J. Herrmann, S.J. Troche, C.M. Roebbers and T.H. Rammsayer, “Cortical oxygen consumption in mental arithmetic as a function of task difficulty: a near-infrared spectroscopy approach,” *Frontiers in Human Neuroscience*, Vol.7, No.217, pp.1–9, May 2013.
- 9) T. Tsujii, K. Sakatani, E. Nakashima, T. Igarashi and Y. Katayama, “Characterization of the acute effects of alcohol on asymmetry of inferior frontal cortex activity during a go/no-go task using functional near-infrared spectroscopy,” *Psychopharmacology*, Vol.217, No.4, pp.595–603, Oct. 2011.
- 10) V. Poghosyan and A.A. Ioannides, “Attention modulates earliest responses in the primary auditory and visual cortices,” *Neuron*, Vol.58, pp.802–813, 12 June 2008.
- 11) S. Kaisera, J. Ungerb, M. Kieferb, J. Markelaa and C. Mundta, “Executive control deficit in depression: event-related potentials in a go/nogo task,” *Psychiatry Research: Neuroimaging*, Vol.122, pp.169–184, April 2003.

- 12) A.R. Aron and T.W. Robbins, "Inhibition and the right inferior frontal," *TRENDS in Cognitive Sciences*, Vol.8, No.4, pp.170–177, April 2004.
- 13) E.A. Drewe, "Go/nogo learning after frontal lobe lesions in humans," *Cortex*, Vol.11, No.1, pp.8–16, 1975.
- 14) O. Godefroya and M. Rousseaux, "Divided and focused attention in patients," *Brain and Cognition*, Vol.30, No.2, pp.155–174, March 1996.
- 15) T. Tsujii, "Belief-bias effect on deductive reasoning: a neuro-developmental study," *Human Developmental Research*, Vol.26, pp.95–102, 2012.
- 16) T. Tsujii and S. Watanabe, "Neural correlates of dual-task effect on belief-bias syllogistic reasoning: A near-infrared spectroscopy study," *Brain research*, Vol.1287, pp.118–125, 1 September 2009.
- 17) T. Tsujii and S. Watanabe, "Neural correlates of belief-bias reasoning under time pressure: A near-infrared spectroscopy study," *NeuroImage*, Vol.50, pp.1320–1326, 15 April 2010.
- 18) S. Bunce, M. Izzetoglu, K. Izzetoglu, B. Onaral and K. Pourrezaei, "Functional near-infrared spectroscopy," *Engineering in Medicine and Biology Magazine*, Vol.25, pp.52–62, 2006.
- 19) 灰田宗孝, "脳機能計測における光トポグラフィ信号の意味," *Medix*, pp.17–21, 2002.
- 20) A. Villringer and B. Chance, "Non-invasive optical spectroscopy and imaging of human brain function," *TINS*, Vol.10, No.20, pp.435–442, 1997.
- 21) 福田正人, 精神疾患とNIRS: 光トポグラフィ検査による脳機能イメージング, 中山書店, 2009.
- 22) H.H. Jasper, "The ten-twenty electrode system of the international federation," *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, Vol.10, pp.371–375, 1958.
- 23) S. Tsujimoto, A. Genovesio and S.P. Wise, "Evaluating self-generated decisions in frontal pole cortex of monkeys," *Nature Neuroscience*, Vol.13, pp.120–126, Dec. 2010.
- 24) J. Okuda, T. Fujii, H. Ohtake, T. Tsukiura, K. Tanji, K. Suzuki, R. Kawashima, H. Fukuda, M. Itoh and A. Yamadori, "Thinking of the future and past: The roles of the frontal pole and the medial temporal lobes," *NeuroImage*, Vol.19, pp.1369–1380, Aug. 2003.
- 25) 中川尊雄, "プログラム理解の困難さの脳血流による計測の試み," *FOSE 2013*, Vol.31, No.3, pp.270–276, 2013.

26) T. Stafford, Mind Hacks: 実験で知る脳と心のシステム, オライリー・ジャパン, 2005.

付 図

1	国際 10-20 法	1
2	視覚実験風景	2
3	実験の流れ	2
4	視覚実験の難易度設定	2
5	脳血流データ（前頭部）	3
6	fNIRS データの一例	4
7	着目部位	4
8	視覚実験成績	5
9	視覚課題の難易度変化に伴う脳活性量の推移	5
10	成績別の視覚課題の難易度変化に伴う FP における脳活性量の推移	5
11	聴覚実験風景	6
12	聴覚実験成績	6
13	聴覚課題の難易度変化に伴う脳活性量の推移	6
14	成績別の聴覚課題の難易度変化に伴う IFG における脳活性量の推移	7
15	成績別の聴覚課題の難易度変化に伴う STG における脳活性量の推移	7
16	視覚実験と聴覚実験の課題成績の差	7
17	反応時間の分散	8

付 表

1	脳機能測定装置の比較 ²¹⁾	1
2	聴覚実験の難易度設定	3

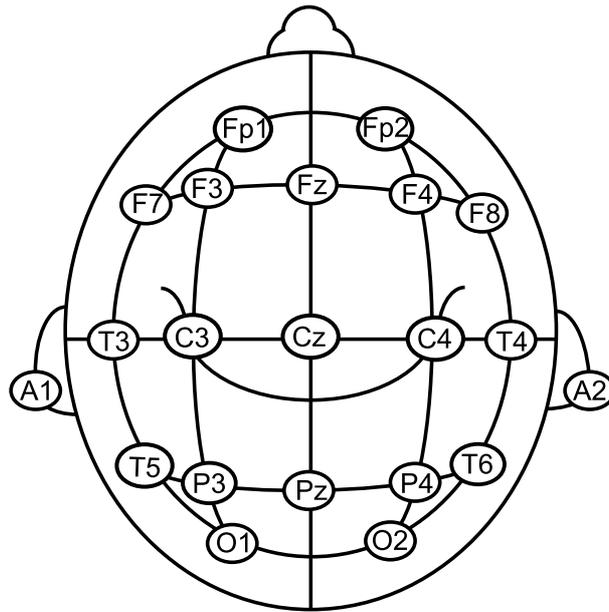


Fig. 1 国際 10-20 法

Table 1 脳機能測定装置の比較²¹⁾

方法	測定対象	空間分解能	時間分解能
PET	脳血流	中	低
SPECT	脳血流	中	低
EEG	神経活動	低	高
MEG	神経活動	高	高
fNIRS	脳血流	低	高
fMRI	脳血流	高	中



Fig. 2 視覚実験風景

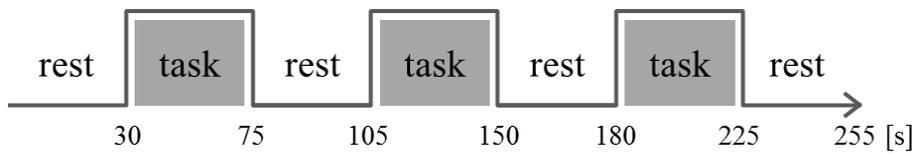


Fig. 3 実験の流れ

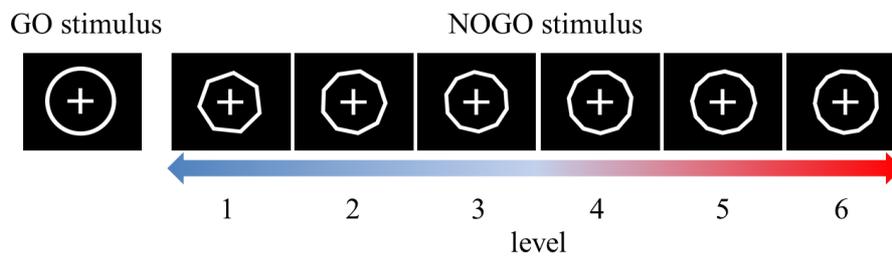


Fig. 4 視覚実験の難易度設定

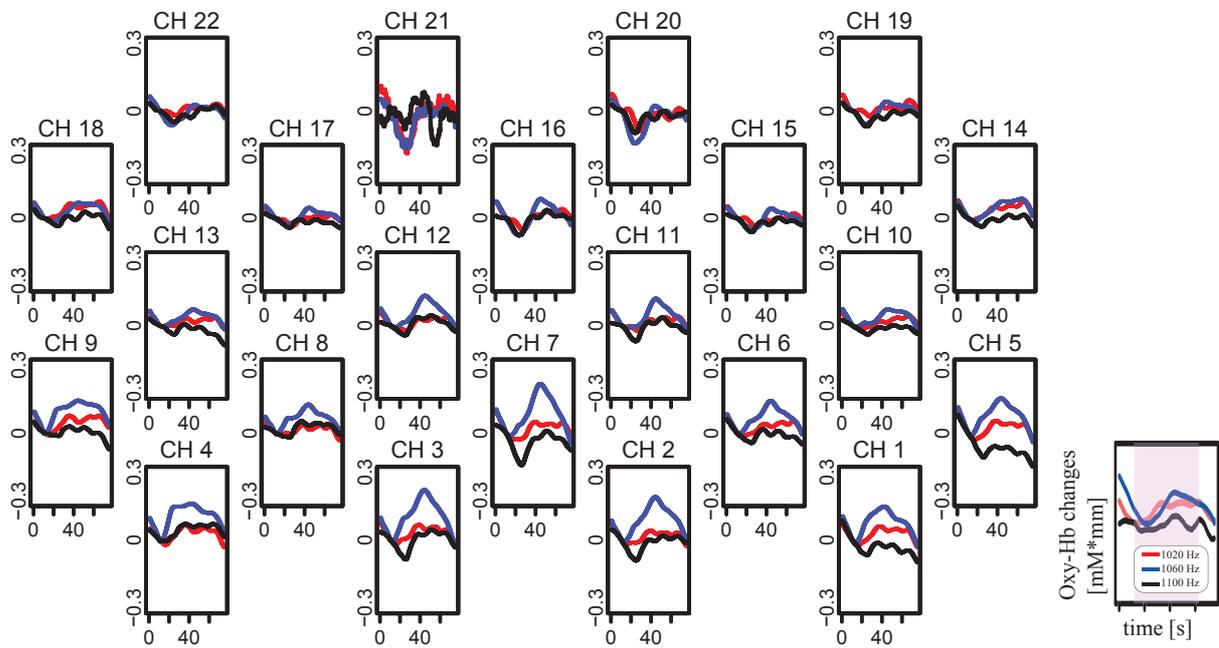
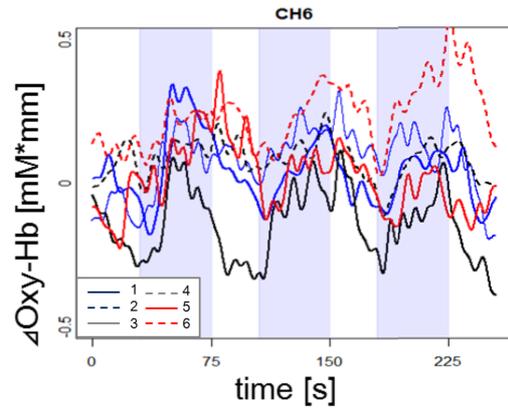


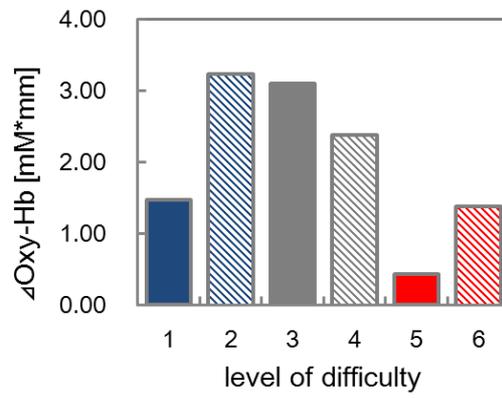
Fig. 5 脳血流データ (前頭部)

Table 2 聴覚実験の難易度設定

level	1	2	3	4	5	6
周波数差	100	60	50	40	30	20



(a) 計測データ



(b) 平均値

Fig. 6 fNIRS データの一例

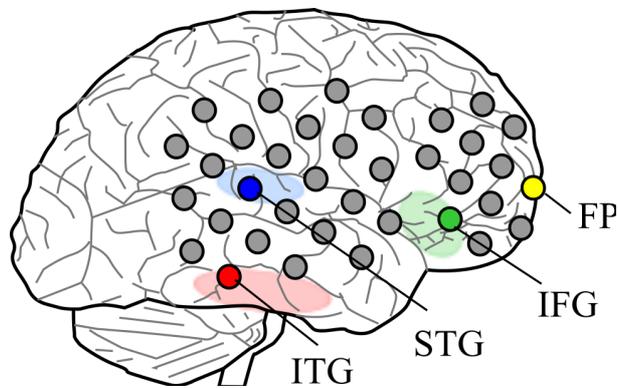


Fig. 7 着目部位

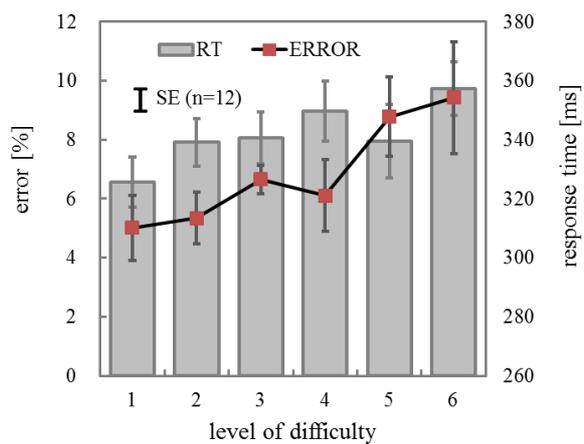


Fig. 8 視覚実験成績

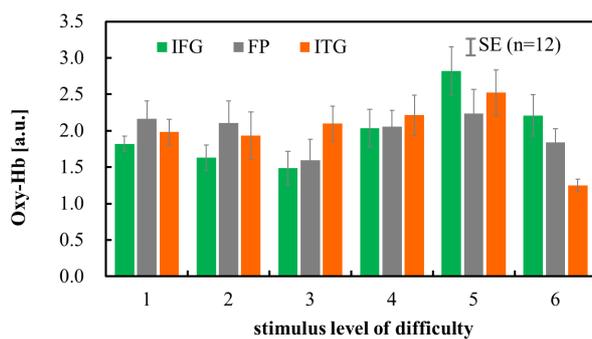


Fig. 9 視覚課題の難易度変化に伴う脳活性量の推移

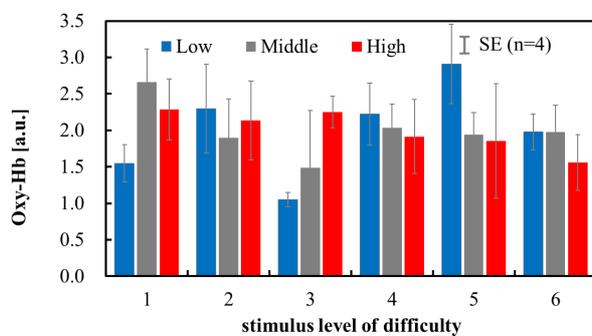


Fig. 10 成績別の視覚課題の難易度変化に伴う FP における脳活性量の推移



Fig. 11 聴覚実験風景

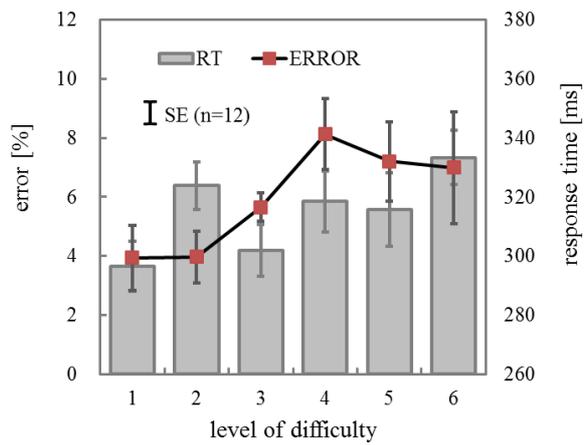


Fig. 12 聴覚実験成績

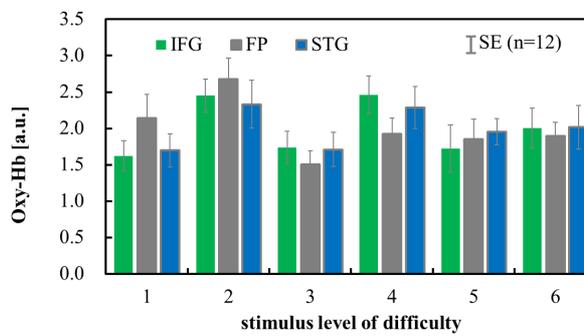


Fig. 13 聴覚課題の難易度変化に伴う脳活性量の推移

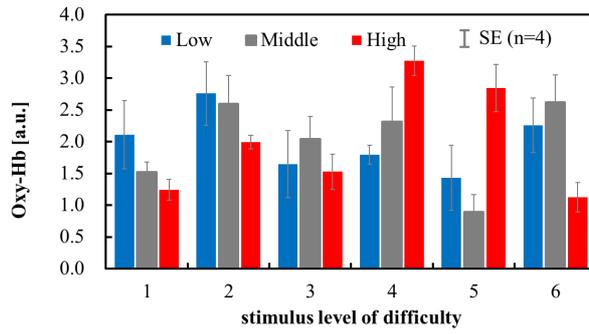


Fig. 14 成績別の聴覚課題の難易度変化に伴う IFG における脳活性量の推移

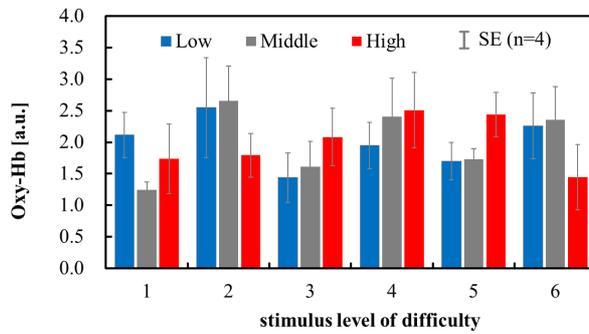


Fig. 15 成績別の聴覚課題の難易度変化に伴う STG における脳活性量の推移

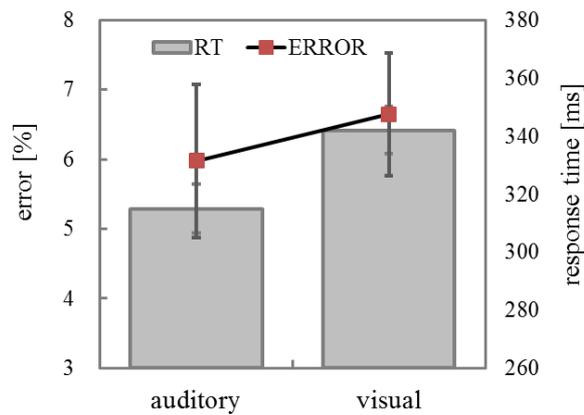


Fig. 16 視覚実験と聴覚実験の課題成績の差

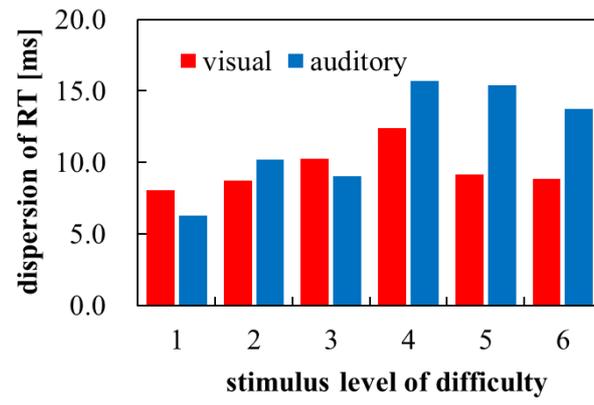


Fig. 17 反応時間の分散