

簡易型近赤外分光法装置の前頭葉機能リハビリテーションへの 応用に関する実験的検討^{1,2}

柴 崎 光 世*

簡易型近赤外分光法 (near-infrared spectroscopic imaging; NIRS) 装置は、設備投資費が比較的安価で、携帯性に優れ、患者への負担も少ないことから、前頭葉機能の認知リハビリテーションに導入しやすい脳機能測定装置として期待できる。他方、簡易型 NIRS 装置は、測定部位が前額面のみと固定されているので、反応抑制機能のような前頭前野でも背外側とかかわり深い脳機能と関連した血流変化をどこまでとらえることができるのかといった問題も含んでいる。本研究は反応抑制障害の認知リハビリテーションに関する基礎研究の一環として、種類の異なる 2 つの stimulus-response compatibility (SRC) 課題を遂行中の健常者の脳血行動態を簡易型 NIRS 装置を用いて測定し、反応抑制に伴う血流変化をこのような NIRS 装置によって測定できるか否かについて検討をおこなった。その結果、簡易型 NIRS 装置を用いた前額面の脳血流測定であっても、背外側前頭前野の活動を起源とすると思われる反応抑制にかかわる脳血流変化をとらえられることが示唆され、前頭葉損傷者の反応抑制障害の評価や治療的介入に伴う訓練効果の測定に本研究で使用したような簡易型 NIRS 装置が適用できる可能性が示された。

Key Words : 脳損傷, 前頭葉, 反応抑制障害, 認知リハビリテーション, NIRS

脳血管障害や交通事故などによって脳の前頭前野が損傷されると、発動性やプランニング、認知的柔軟性、社会的認知といったいわゆる前頭葉機能の障害に加えて、患者の日常生活のさまざまなレベルにおいて抑制機能の障害が生じることが知られている。たとえば、保続に代表される習慣的動作や習慣的反応の抑制の失敗や、問題解決場面での課題無関連な刺激に対する注意や反応の抑制障害といった比較的単純なものから、社会的場面における情動の制御や場にそぐわない不適切な言動の表出など、多様な抑制機能障害が出現し、こうした障害が患者の日常生活場面や人間関係において種々のトラブルを引き起こすことも少なくない。抑制機能の障害は、患者の円滑な社会生活や社会復帰に悪影響を及ぼす重大な阻害要因の 1 つとなるため、発動性やプランニングなどのその他の前頭葉機能と同様

に、何らかの治療的アプローチが必要と考えられる。

前頭葉由来の抑制機能障害のうち、保続や攻撃行動・叫びといった問題行動、あるいは情動の抑制障害については、行動療法や認知行動療法を中心とした治療的介入が既に試みられており、一定の成果をあげている (Alderman, 1991, Alderman & Burgess, 1994, Alderman, Fry, & Youngson, 1995, Alderman & Knight, 1997, Alderman & Ward, 1991, Hanlon, Clontz & Thomas, 1993, Manchester, Hodgkinson, & Casey, 1997, Matthey, 1996, Medd & Tate, 2000, Watson, Rutterford, Shortland, Williamson, & Alderman, 2001)。たとえば、Alderman & Ward (1991) は、頻回に呈する繰り返しの発話によってリハビリテーションの進行が妨げられていた 36 歳のヘルペス脳炎患者に対し、レスポンスコストと認知的過剰学習を利用した行動療法的な認知リハビリテーションを実施した。この研究では、患者は、15 分の訓練セッションの冒頭に 50 ペンスを渡され、繰り返しの発話を発するごとに 1 ペンスを治療者に渡し、あわせて、「私は繰り返してはいけない (I must not repeat myself.)」と 1 分間言い続けるよう教示される。訓練セッション終了後に 46 ペンス以上が残っていたら、患者の好物のチョコレートと交換することができた。このような介入を 30 セッションに渡って実施したところ、患者の保続的な発話はベースラインやレスポンスコストのみの介入を単独におこなった場合と比べて大きく減少し、さらに、病

Correspondence concerning this article should be sent to : Mitsuyo Shibasaki, Department of Psychology, Meisei University, Hodokubo, Hino, Tokyo 191-8506, Japan (e-mail: mitsuyo@psy.meisei-u.ac.jp)

* 明星大学人文学部

¹ 本研究は科学研究費補助金若手研究 (B)、課題番号 : 21730566) による助成を受けた。

² 本研究の実施やデータ処理に関しては、明星大学人文学部心理・教育学科心理学専修平成 23 年度卒業生の鎌倉衣里さんと八巻温子さんにご協力いただきました。心より御礼申し上げます。

棟生活への訓練効果の般化や、訓練終了から3ヵ月後のフォローアップにおける訓練効果の維持も観察された。

Medd & Tate (2000) は、情動制御の問題に関して、認知行動療法的な手法に基づく認知リハビリテーションを実施した。この研究では、怒りの制御に問題のある頭部外傷者に対して、1) 脳損傷の原理や脳損傷の結果として生じる怒りの制御障害に関する心理教育、2) 自身の怒りについての気づきの促進、3) リラクゼーションやタイムアウト法などの怒り反応を軽減させる方略の適用、の3つの段階からなる訓練プログラムを導入したところ、このような治療的介入を受けた治療群では、自身の日々の怒りをモニターするのみであったウェイトリスト群に比べて、怒りに関する評価尺度 (State-Trait Anger Expression Inventory, STXI, Spielberger, 1988) に有意な改善が認められた。ただ、この効果は介入から2ヵ月後のフォローアップでも持続したものの、自尊感情や不安、抑うつ、自身の障害への気づきに関する各尺度における訓練効果の般化は示されなかった。

ところで、前頭葉損傷者が、Stroop 課題に代表される認知的葛藤事態で、課題に無関連な刺激に対する注意や反応を抑制できずに遂行障害を示すことはよく知られているが、前頭葉損傷による抑制機能障害のうち、特に、背外側前頭前野の損傷と関連が深い (Stuss, 2007, 2009) このような反応抑制障害については、これまで治療的アプローチが試みられることがほとんどなかった。そのため、こうした障害が認知リハビリテーション的な介入によって改善するかどうかについてはあまり検討されていないのが現状である。また、先に示した抑制機能障害の認知リハビリテーションでは、患者の抑制障害や訓練効果の評価に関しては、問題行動の生起頻度や質問紙といった行動尺度が主に用いられているが、機能的 MRI (fMRI) やポジトロン CT (PET) といった非侵襲的な脳機能測定装置の昨今のめざましい発展に伴い、脳損傷後遺症に対するリハビリテーションの領域にこうした技術を応用することに関心が高まっている (Carey & Seitz, 2007, Dobkin, 2004, Mainero, Pantano, Caramia, & Pozzili, 2006, Muñoz-Cespedes, Rios-Lago, Paul, Maestu, 2005, Strangman, et al. 2008)。なかでも、近赤外分光法 (near-infrared spectroscopic imaging; NIRS) は、その安全性の高さや拘束性の低さから、臨床応用に適した脳機能測定装置の1つと考えられ、とりわけ、前頭葉の血流測定に特化した簡易型 NIRS 装置は、設備投資費が比較的安価で、携帯性に優れ、大規模な NIRS

装置に比べて患者への負担も少ないことから、前頭葉機能の認知リハビリテーションに導入しやすい脳機能測定装置として期待できる。しかし、簡易型 NIRS 装置は、測定部位が前額面のみと固定されているので、たとえば、反応抑制機能のような前頭前野でも背外側とかかわり深い脳機能と関連した血流変化をどこまでとらえることができるのかといった問題も含んでいる。そこで、本研究は反応抑制障害の認知リハビリテーションに関する基礎研究の一環として、認知的葛藤課題を遂行中の健常者の血行動態を簡易型 NIRS 装置で測定し、反応抑制に伴う血流変化をこのような NIRS 装置で測定できるか否かについて検討をおこなった。具体的に、本研究では、認知的葛藤課題のなかで、Stroop 課題と比べてこれまで NIRS 研究でとりあげられることの少なかった stimulus-response compatibility (SRC) 課題を使用し、実験1では2チャンネル、実験2では16チャンネルの簡易型 NIRS 装置を用いて、課題遂行中の実験参加者の前額面の脳血行動態を記録した。もしも、簡易型 NIRS 装置による前額面の血流測定においても、反応抑制と関連する血流変化をとらえることができるのであれば、前頭葉損傷者の反応抑制障害の評価や治療的介入に伴う訓練効果の評価にこうした装置を適用できる可能性が生じると思われる。

実験 1

目的 刺激と反応の空間的位置の一致性を操作する SRC 課題のうち、実験1では、Gohari & MacDonald (2009) の課題事態にならい、呈示された単語刺激が示す位置 (左または右) と実験参加者の反応の位置 (左または右) の一致性を操作する SRC 課題を使用して、課題遂行中の実験参加者の前額面の脳血行動態を2チャンネル型 NIRS 装置により測定した。

方法 実験参加者 健常な視力または矯正視力をもったエジンバラ利き手検査 (Oldfield, 1971) による平均利き手指数が 93.2 の 10 名の右利き大学生 (男性 2 名、女性 8 名、平均 21.2 歳) を実験参加者とした。

実験計画 単語刺激が示す位置と実験参加者の反応の位置の一致性に関して、単語刺激が示す位置と反応の位置が一致する一致条件、単語刺激が示す位置と反応の位置が一致しない不一致条件、一致条件と不一致条件の試行がランダムに出現する混合条件の3条件を設けた (Figure 1)。

刺激と装置 黒色画面の中央に呈示された赤色または緑色の漢字で書かれた単語「左」または「右」(い

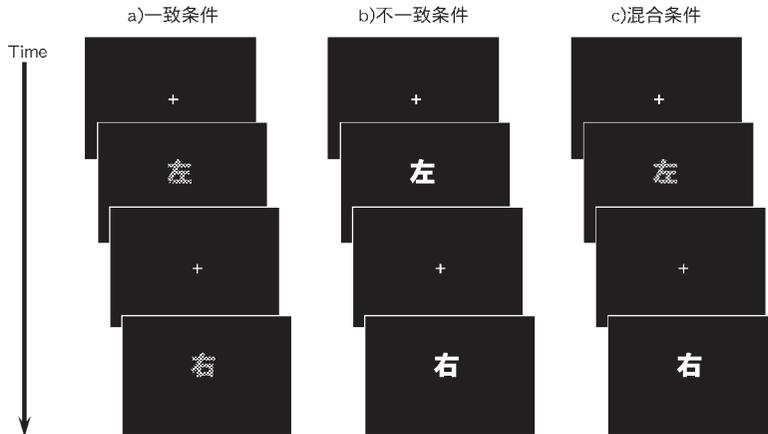


Figure 1 実験1の刺激例。実験参加者は単語刺激が緑色の場合は単語刺激と同じ位置のボタン、単語刺激が赤色の場合は単語刺激と左右が逆の位置のボタンをできるだけ速く正確に押すよう求められた。灰色で書かれた単語刺激は緑色、白色で書かれた単語刺激は赤色で呈示されたことをそれぞれ示す。

ずれも視角にして $4.5^{\circ} \times 4.5^{\circ}$)を刺激とした。刺激呈示と反応入力にノートパソコン(パナソニック, CF-YB), 17インチ・カラー液晶ディスプレイ(三菱電機, RDT17135), 外部スイッチ(Cedrus, RB-834), 課題遂行中の実験参加者の脳血行動態の測定・記録に2チャンネル型NIRS装置(浜松ホトニクス, NIRO-200)を使用した。

手続き 実験参加者は観察距離約60cmの位置から画面を観察した。各試行では、黒色画面の中央に白色の凝視点(視角 $0.8^{\circ} \times 0.8^{\circ}$)を1000ms呈示した後、刺激画面を700ms呈示した。実験参加者の課題は、単語刺激が緑色であった場合は単語刺激と同じ位置のボタン、単語刺激が赤色であった場合は単語刺激と左右が逆の位置のボタンをできるだけ速く正確に押すことであった。加えて、スイッチボックスの左側にあるボタンは左手、右側にあるボタンは右手を使って押すよう教示した。1つの課題ブロックにつきこれを20試行おこない、混合条件については、一致条件と不一致条件の各試行を10試行ずつランダムに呈示した。各課題ブロックの前後には30秒の安静時間を設け、個々の条件につき安静—課題—安静を1セッションとして3セッションずつ、計60試行ずつ実施した。3つの実験条件の実施順序は実験参加者間でランダムであった。

各条件のいずれについても、本試行に先立ち、4試行からなる練習試行をおこなった。

NIRSデータの測定 実験参加者の前額部の2箇所(国際10-20法におけるFp1とFp2)に近赤外光の照射部と検知部を装着し、課題遂行中の前頭前野の脳血行動態を測定した。サンプリングタイムは0.5秒で、測定

後のNIRSデータについては、5秒の移動平均処理を施した後、課題ブロック直前の10秒の平均ヘモグロビン濃度変化量を基準値とし、個々の測定値から基準値を減算するベースライン補正をおこなった。さらに、個々の実験参加者ごとに、各条件の3つの課題ブロックのヘモグロビン濃度変化量を加算平均した。NIRSデータのうち、酸素化ヘモグロビン(oxy-Hb)濃度変化量が脳血流の変化をもっとも反映すると考えられるため(Hoshi, Kobayashi, & Tamura, 2001), 本研究ではこれを分析対象とした。

結果 行動データ 実験参加者が刺激画面の呈示からその直後のブランク画面の終了まで(刺激画面の呈示から1700ms以内)に正しく反応できた場合を正反応とした。Figure 2は全実験参加者の平均誤反応率と正反応時の平均反応時間を条件別に示したものである。平均誤反応率と平均反応時間の両方において、一致条件、不一致条件、混合条件の順で数値が大きくなる傾向が認められた。これらの2つの指標に関して、課題の種類(一致、不一致、混合)を実験参加者内要因とする1要因分散分析をおこなったところ、平均誤反応率と平均反応時間のいずれについても課題の種類の主効果が有意となった(平均誤反応率： $F(2,18)=10.15, p<.001$, 平均反応時間： $F(2,18)=74.36, p<.001$)。有意水準を0.05%に設定したうえでライアン法による多重比較をおこなった結果、平均誤反応率では、混合条件の平均誤反応率が一致条件や不一致条件に比べて有意に高いこと、平均反応時間については、すべての条件の一对比較の組み合わせにおいて有意差が認められることが明らかになった。

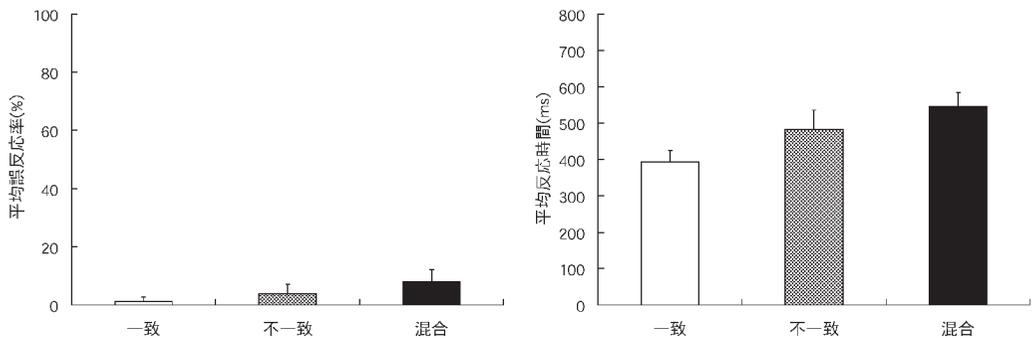


Figure 2 実験1の各条件における平均誤反応率(左)と平均反応時間(右)。

NIRS データ 全実験参加者の課題遂行中のチャンネル別条件別の平均 oxy-Hb 変化量を Figure 3 に示した。この図から、左前額部及び右前額部の両方のチャンネルで、混合条件の oxy-Hb 変化量が一致条件や不一致条件と比べて上昇していることがわかる。また、3つの条件ともに右前額部の oxy-Hb 変化量が左前額部より全般に大きくなっており、特に、混合条件のときにこの傾向が目立った。これらの NIRS データに関して、課題の種類(一致、不一致、混合)と部位(左前額部、右前額部)をそれぞれ実験参加者内要因とする2要因分散分析をおこなったところ、課題の種類の主効果が有意となり($F(2,18)=4.39, p<.05$)、ライオン法による多重比較の結果、混合条件のときの oxy-Hb 変化量が一致条件や不一致条件と比較して有意に大きいことが見出された($p<.05$)。さらに、部位の主効果も有意で($F(1,9)=10.73, p<.01$)、右前額部の oxy-Hb 変化量が左前額部より有意に大きいことが明らかになった。課題の種類と部位の交互作用については有意傾向であった($F(2,18)=2.70, p<.10$)。

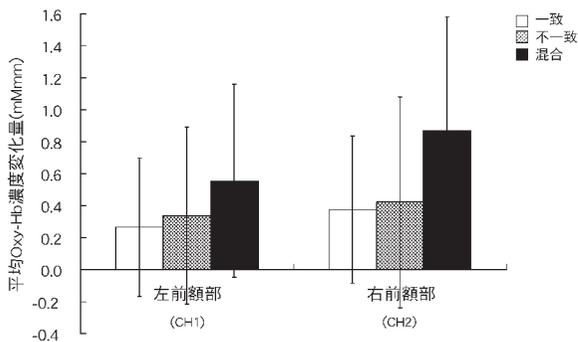


Figure 3 実験1の各条件における課題中の平均 oxy-Hb 濃度変化量。

考察 はじめに、行動データの結果に関して、平均誤反応率と平均反応時間の両方において一致条件、不一致条件、混合条件の順に数値が高くなる傾向が認められ、とりわけ、混合条件の場合に、平均誤反応率と平均反応時間のいずれについても他の2条件より有意に値が高くなった。混合条件では、認知的葛藤がない一致条件と認知的葛藤が生じる不一致条件の各条件の試行がランダムに呈示されるので、個々の試行では、それに先立つ先行試行からの干渉を他の2条件より受けやすくなる。たとえば、一致条件の試行の後に不一致条件の試行が呈示された場合の認知的葛藤の度合いは、不一致条件の試行のみが単独に呈示される不一致条件の場合より大きくなると考えられ、これに伴って、課題遂行に要求される反応抑制の量も混合条件において最大になると思われる。このことが、混合条件のときに実験参加者の遂行がもっとも低下したことと関係しているのであろう。また、平均反応時間では、不一致条件のときに一致条件より有意に平均反応時間が長くなったことをあわせると、実験1で用いた SRC 課題においては、一致条件、不一致条件、混合条件と反応抑制が要求されるに従って行動測度上にあらわれる実験参加者の遂行も低下したといえる。

次に、NIRS データについては、一致条件と不一致条件の間で oxy-Hb 変化量に有意差が認められなかったものの、3つの条件のなかで反応抑制がもっとも求められる混合条件のときに、他の2条件と比べて有意な血流上昇が観察された。そのため、本研究でおこなったような前額面の2チャンネルでの血流測定においても、反応抑制と関係深い背外側前頭前野をおそらく起源とする血流変化をとらえることができたと考えられる。他方、半球差に関しては、全般に右前額部に有意な血流上昇が認められ、特に、この傾向は反応抑制が

最大となる混合条件のときに顕著であった。SRC 課題に関する fMRI 研究では、刺激の位置と反応の位置が一致しない葛藤条件下で、右背外側前頭前野を中心とした賦活が確認されており (Casey, Thomas, Davidson, Kunz, & Franzen, 2002, Cieslik, Zilles, Kurth, & Eickhoff, 2010, Schumacher & D'Esposito, 2002, Schumacher, Elston, & D'Esposito, 2003), さらに, SRC 課題と同様の反応抑制課題である go/nogo 課題においても右背外側前頭前野の関与が報告されている (Aron & Poldrack, 2006, Coxon, Stinear, & Byblow, 2009, Goghari & MacDonald, 2009, Konishi, et al. 1999, Leung & Cai, 2007, McNab, et al. 2008)。Zheng, Oka, Bokura, & Yamaguchi (2008) は, 実験参加者に go/nogo 課題などの複数の反応抑制課題を課した際に, 右背外側前頭前野が共通に賦活し, 加えて, 行動的な遂行とも相関したことを明らかにしたうえで, 同領域が反応抑制の実行にかかわる神経ネットワークの鍵となる部位と結論づけた。実験 1 においては, 前額部の測定であっても, 反応抑制が強く必要とされる事態で, 先行研究と一致した右半球優位の結果が得られており, この点においても, 実験 1 でとらえた認知的葛藤事態の血流上昇が反応抑制機能にかかわるものであることを示唆している。

実験 2

目的 実験 2 では, 武澤・宮谷 (2007) にならい, 単語刺激の呈示位置 (左または右), 単語刺激のあらわす位置 (左または右), 実験参加者の反応の位置 (左または右) の 3 つの変数を操作する SRC 課題を用いて, 課題遂行中の実験参加者の前額面の脳血行動態を 16 チャンネル型 NIRS 装置により測定した。

方法 実験参加者 健常な視力または矯正視力をもったエジンバラ利き手検査による平均利き手指数が 93.2 の 16 名の右利き大学生 (男性 4 名, 女性 12 名, 平均 21.5 歳) を実験参加者とした。

実験計画 単語刺激の呈示位置, 単語刺激のあらわす位置, 反応の位置の 3 つの変数の一致性に関して, これらの 3 つが全く競合しない非競合条件, 単語刺激の呈示位置と反応の位置は一致するが, 単語刺激のあらわす位置と反応の位置が一致しない低競合条件, 刺激の呈示位置と単語刺激のあらわす位置が反応の位置とそれぞれ競合する高競合条件, 非競合条件, 低競合条件, 高競合条件の各試行がランダムに出現する混合条件の 4 つの条件を設けた (Figure 4)。

刺激と装置 黒色画面の左側または右側に呈示された赤色または緑色の漢字で書かれた単語「左」または「右」(いずれも視角にして $4.5^{\circ} \times 4.5^{\circ}$) を刺激とした。刺

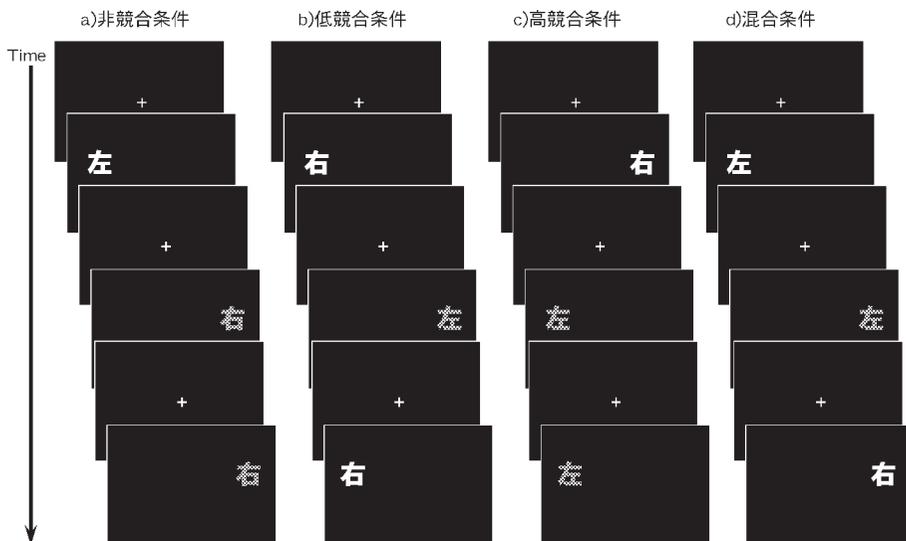


Figure 4 実験 2 の刺激例。実験参加者は単語刺激を口頭で読み上げつつ, 単語刺激の色が赤色であれば左側, 緑色であれば右側のボタンをできるだけ速く正確に押すよう求められた。白色で書かれた単語刺激は赤色, 灰色で書かれた単語刺激は緑色で呈示されたことをそれぞれ示す。

激呈示と反応入力にノートパソコン（パナソニック、CF-Y8）、17インチ・カラー液晶ディスプレイ（三菱電機、RDT17135）、外部スイッチ（Cedrus、RB-834）、ICレコーダ（パナソニック、RR-US900）、課題遂行中の実験参加者の脳血行動態の測定・記録に16チャンネル型NIRS装置（スペクトラテック、OEG-16）を使用した。

手続き 実験参加者は観察距離約60cmの位置から画面を観察した。各試行では、黒色画面の中央に灰色の凝視点（視角 $0.8^{\circ} \times 0.8^{\circ}$ ）を1000ms呈示した後、刺激画面を700ms呈示した。実験参加者の課題は、画面の左右のいずれかにランダムに呈示された単語刺激（「左」または「右」）を口頭で読み上げつつ、単語刺激の色が赤色であれば左側、緑色であれば右側のボタンをできるだけ速く正確に押すことであった。加えて、スイッチボックスの左側にあるボタンは左手、右側にあるボタンは右手を使って押すよう教示した。1つの課題ブロックにつきこれを18試行おこない、混合条件については、非競合条件、低競合条件、高競合条件の各試行が6試行ずつランダムな順序で出現した。各課題ブロックの前後には30秒の安静時間をそれぞれ設け、個々の条件につき安静—課題—安静を1セッションとして3セッションずつ、計54試行ずつ実施した。4つの条件の実施順序は実験参加者間でランダムであった。

各条件いずれについても、本試行に先立ち、6試行ずつの練習試行をおこなった。

NIRSデータの測定 実験参加者の前額部に近赤外分光の照射部と受光部が3cm間隔で交互に格子状に配置されたヘッドモジュールを装着し、全部で16チャンネルの同時計測をおこなった。なお、国際10-20法におけるFpzがヘッドモジュールの中央に位置した。サンプリングタイムは0.65秒で、測定データについては、5秒の移動平均処理をおこなった後、課題ブロック直前の5秒と、課題ブロック終了後に3秒の時

間間隔を置いた後の5秒をベースラインとし、これらの値を元に課題ブロック中の血中ヘモグロビン濃度変化量のベースライン補正をおこなった。さらに、個々の実験参加者ごとに、各条件の3つの課題ブロックのヘモグロビン濃度変化量を加算平均した。

結果 行動データ 実験参加者が刺激画面の呈示からその直後のブランク画面の終了まで（刺激画面の呈示から1700ms以内）に正しく反応できた場合を正反応としたときの各条件の平均誤反応率と平均反応時間をFigure 5に示した。この図から、平均誤反応率と平均反応時間の両方において、混合条件のときに、他の3つの条件と比較して数値が大きくなり上昇し、また、平均反応時間に関しては、高競合条件の場合に非競合条件より長くなる傾向が認められる。平均誤反応率と平均反応時間の2つの指標について、課題の種類（非競合、低競合、高競合、混合）を実験参加者内要因とする1要因分散分析をそれぞれおこなったところ、平均誤反応率と平均反応時間のいずれについても課題の種類の主効果が有意となった（平均誤反応率： $F(3,45)=12.78, p<.001$, 平均反応時間： $F(3,45)=12.78, p<.001$ ）。有意水準を0.05%に設定したうえでライアン法による多重比較をおこなった結果、平均誤反応率では、混合条件の平均誤反応率が他の3つの条件と比べて有意に高いこと、平均反応時間では、混合条件の平均反応時間が他の3つの条件に比べて有意に長く、高競合条件の平均反応時間が非競合条件より有意に長いことが示された。

NIRSデータ Figure 6a及び6bは、全実験参加者の課題遂行中の平均oxy-Hb変化量をチャンネル別条件別にあらわしたものである。図に示したように、どのチャンネルも高競合条件や混合条件のときに非競合条件や低競合条件と比べてoxy-Hb変化量が全般に高くなる傾向が認められ、特に、こうした傾向は、右前額部のチャンネル6と中央部のチャンネル9、そ

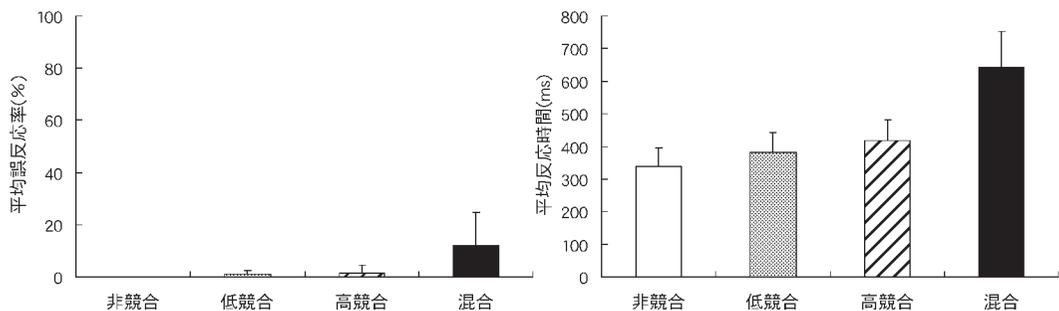


Figure 5 実験2の各条件における平均誤反応率(左)と平均反応時間(右)。非競合条件の平均誤反応率は0%であった。

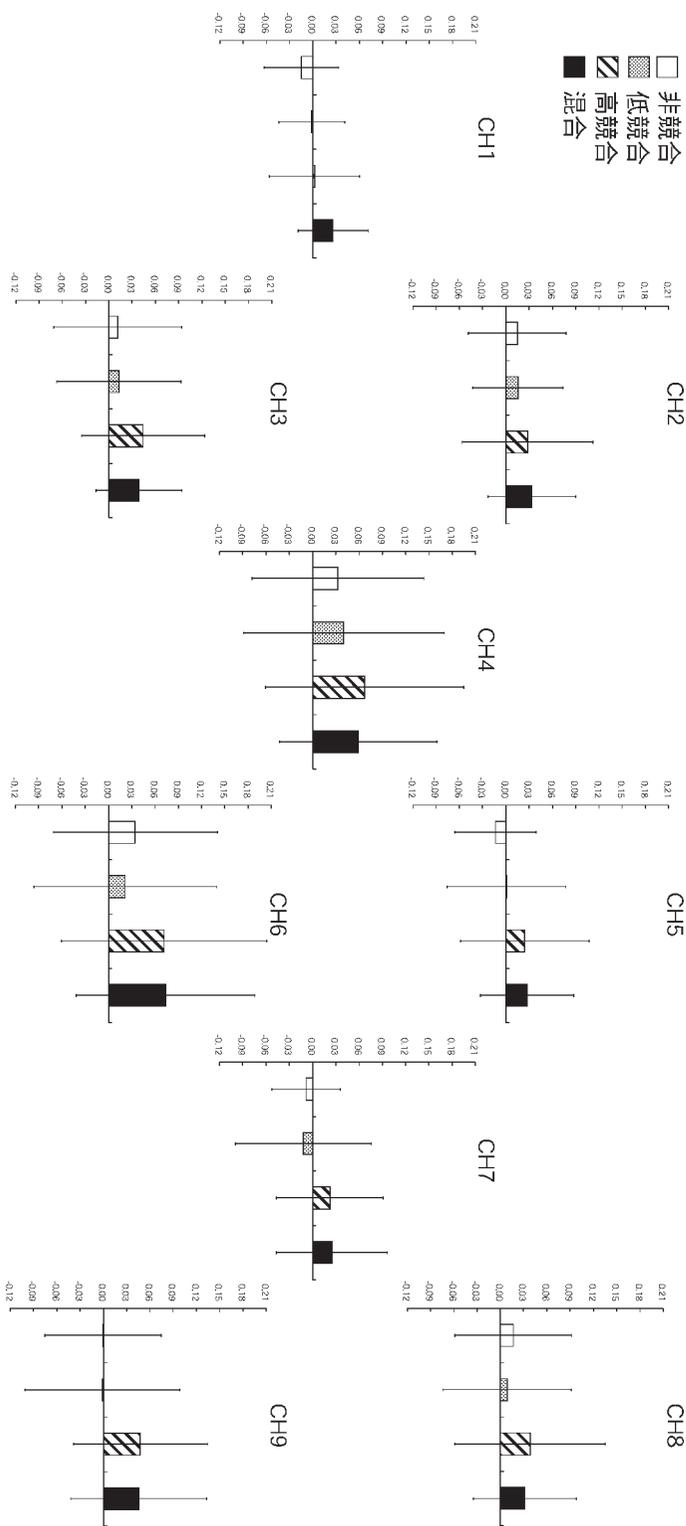


Figure 6a 実験2の各条件における課題中の平均 oxy-Hb 濃度変化量 (CH1~CH7：右前額部, CH8~CH9：前額部中央)。CH1 がもっとも右耳寄りのチャンネルとなる。各グラフの縦軸は平均 oxy-Hb 濃度変化量 (mMmm) を示す。

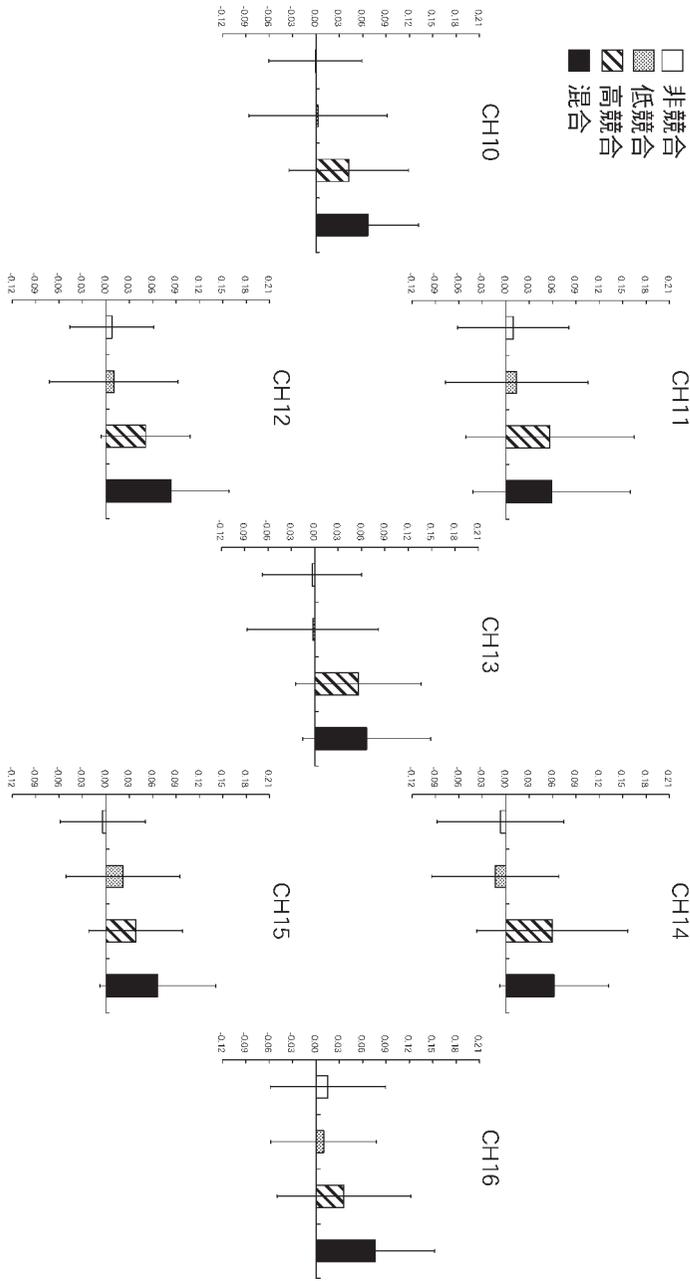


Figure 6b 実験2の各条件における課題中の平均oxy-Hb濃度変化量(CH10~CH16:左前額部)。CH16がもっとも左耳寄りのチャンネルとなる。各グラフの縦軸は平均oxy-Hb濃度変化量(mMmm)を示す。

して、左前額部のすべてのチャンネルにおいて顕著であった。さらに、左前額部のチャンネル 10, 12, 13, 15, 16 では、混合条件のときに、oxy-Hb 変化量が他の 3 つの条件と比較してもっとも高くなった。これらのデータに関して、チャンネルごとに課題の種類を実験参加者内要因とする 1 要因分散分析をおこなった結果、チャンネル 10, 12, 13, 14, 15, 16 において課題の種類の主効果が有意となり (チャンネル 10: $F(3,45)=3.29, p<.05$, チャンネル 12: $F(3,45)=3.84, p<.05$, チャンネル 13: $F(3,45)=4.39, p<.01$, チャンネル 14: $F(3,45)=4.86, p<.01$, チャンネル 15: $F(3,45)=3.84, p<.05$, チャンネル 16: $F(3,45)=3.73, p<.05$), ライアン法による多重比較をおこなったところ、チャンネル 14 では、高競合条件と混合条件の oxy-Hb 変化量が非競合条件や低競合条件と比較して有意に高いこと、チャンネル 12, 13, 16 では、混合条件の oxy-Hb 変化量が非競合条件や低競合条件より有意に高いこと、チャンネル 15 では、混合条件の oxy-Hb 変化量が非競合条件と比べて有意に高いことがそれぞれ明らかになった (いずれも $p<.05$)。チャンネル 10 については主効果のみが有意であった。

次に、課題遂行時の脳血行動態の半球差について検討するために、右半球チャンネル(チャンネル 1 から 7)と左半球チャンネル (チャンネル 10 から 16) の oxy-Hb 変化量の平均値を算出した (Figure 7)。図に示したように、混合条件のときに左前額部の oxy-Hb 変化量が右前額部より高くなり、加えて、左前額部においては、混合条件の oxy-Hb 変化量が他の 3 つの条件に比べてとりわけ高くなった。Figure 7 のデータに関して、課題の種類 (非競合, 低競合, 高競合, 混合) と部位 (左前額部, 右前額部) をそれぞれ実験参加者内要因とする 2 要因

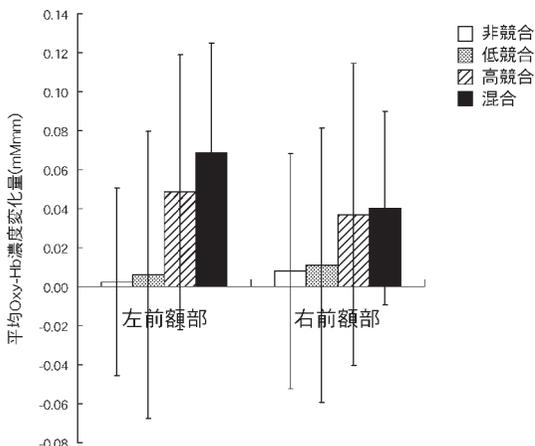


Figure 7 実験 2 の各条件における課題中の平均 oxy-Hb 濃度変化量 (半球ごとの分析)。

分散分析を実施したところ、課題の種類の主効果と課題の種類と部位の交互作用がおのおの有意となった (課題の種類主効果: $F(3,45)=2.92, p<.05$, 課題の種類と部位の交互作用: $F(3,45)=5.54, p<.005$)。このうち、課題の種類主効果については、ライアン法による多重比較の結果、どの条件の組み合わせにおいても有意差は認められなかったが、課題の種類と部位の交互作用に伴う単純主効果検定では、混合条件のときに、左前額部の oxy-Hb 変化量が右前額部より有意に高いこと、また、左前額部において混合条件の oxy-Hb 変化量が非競合条件と低競合条件に比べて有意に高いことがそれぞれ示された ($p<.05$)。

考察 まず、行動データの結果では、平均誤反応率と平均反応時間の両方において、混合条件のときに他の 3 つの条件と比較して大きく上昇する傾向が示された。実験 2 においても、課題遂行に要求される反応抑制の量は、認知的葛藤がない非競合条件と、認知的葛藤が生じる低競合条件と高競合条件の 3 つの条件の各試行がランダムに呈示される混合条件の場合に最大になると考えられ、このことが同条件において実験参加者の遂行がとりわけ低下したことと関係していると思われる。一方、同じ認知的葛藤事態であっても、低競合条件と高競合条件については、平均反応時間に関しては高競合条件と非競合条件との間に有意差が認められたものの、混合条件の場合と違って、これらの 2 つの葛藤条件下での個々の実験参加者の遂行が非競合条件と比べて極端に低下することはなかった。また、低競合条件と高競合条件の比較においても、2 つの条件間で有意な遂行差は認められなかった。そのため、実験 2 に参加した実験参加者にとっては、低競合条件と高競合条件は、認知的葛藤事態といえども比較的容易な実験事態であったことが想定され、行動測度上では、これらの 2 条件間の遂行差や非競合条件との間の遂行差が天井効果のためにあらわれにくくなったと考えられる。

他方、NIRS データの結果では、行動データで顕著な傾向が認められた混合条件に加えて、低競合条件よりも認知的葛藤が大きくなると考えられる高競合条件のときにも全般に血流が上昇し、特に、左前頭部背側寄りのチャンネル 14 では、混合条件にあわせて高競合条件の oxy-Hb 変化量が非競合条件や低競合条件より有意に高くなった。このことは、行動測度と対照的に、脳血流測度上では低競合条件と高競合条件の 2 つの葛藤条件を区別したことが効果的であったこと、すなわち、実験 2 の課題においては、脳血流測度のほうが行

動測度よりも反応抑制にかかわる条件設定に対して感受性が高いことを示唆している。したがって、実験2に関しても、実験1と同様に反応抑制に関連した血流変化を簡易型 NIRS 装置を用いた前額面の測定によりとらえることができたといえる。なお、低競合条件については、行動測度の場合と同様に、脳血流測度上においても非競合条件との条件差が明らかでなかった。

続いて、半球差については、左半球の各チャンネルで高競合条件と混合条件のときに目立った血流上昇が観察され、Figure 7 に示した半球ごとの oxy-Hb の平均値に関する分析においても、左前額部でこの傾向が顕著となった。さらに、反応抑制量が最大となる混合条件では、左前額部の血流が右前額部より有意に上昇し、実験2の SRC 課題に関しては、認知的葛藤条件下で左半球優位な結果が得られた。しかし、前述のように、SRC 課題に関する fMRI 研究では、葛藤条件下で右背外側前頭前野の賦活が報告されており、本研究の結果と一致しない。ただ、同じ認知的葛藤事態でも、Stroop 課題に関する機能画像研究では、課題遂行と両側前頭前野とのかわりが指摘されているものの、どちらかという左前頭前野（左背外側前頭前野）に優位な結果が得られている (Roberts & Hall, 2008)。本研究で使用した SRC 課題は、ドットや円といった非言語的な刺激が用いられることが多かった従来の SRC 課題と違って、「右」や「左」といった位置を示す単語が刺激として用いられている点が特徴的である。加えて、実験2では、課題遂行時に画面に呈示された単語刺激を口頭で読み上げるよう各実験参加者に求めており、単語に対する意味処理を促進させるような手続きをとっている。そのため、実験2の葛藤条件では、単語の意味に従って自動的に反応することを抑制しつつ、新しい刺激—反応連合を形成していくという Stroop 課題と類似した機序がより強く関与していると考えられ、このことが Stroop 課題の場合と同様に本研究においても左前頭前野に優位な血流上昇が得られたことと関係している可能性がある。

総合考察

本研究は、反応抑制障害の認知リハビリテーションに関する基礎研究の一環として、種類の異なる2つの SRC 課題を遂行中の健常者の脳血行動態を簡易型 NIRS 装置を用いて測定し、反応抑制に伴う血流変化をこのような NIRS 装置によって測定できるか否かについて検討することを目的とした。先述のように、実験1と実験2のいずれについても、反応抑制が強く

求められる実験事態で前額部の有意な賦活が観察され、とりわけ、実験2においては、行動測度よりも簡易型 NIRS 装置による脳血流測度のほうが、反応抑制に関する条件設定に対し感受性が高くなった。また、本研究の2つの実験結果から、簡易型 NIRS 装置による前額面の測定でも、課題要求の違いによって反応抑制にかかわる優位半球が異なる様子もあわせて観察された。以上の結果は、2チャンネルまたは16チャンネルの簡易型 NIRS 装置を用いた前頭極を中心とした脳血流測定であっても、背外側前頭前野の活動を起源とすると思われる反応抑制機能と関連した脳血流変化をとらえられることを示唆している。さらに、このことは、反応抑制障害の認知リハビリテーションに本研究で用いたような簡易型 NIRS 装置を適用可能であること、すなわち、患者の反応抑制障害の評価や治療的介入に伴う訓練効果の測定に簡易型 NIRS 装置が利用できる可能性を示していると考えられる。

脳損傷後の機能回復の脳内機序について検討した脳機能画像研究は、現在のところ、失語症や片側麻痺に関するものが主流で、空間的認知障害や記憶障害、遂行機能障害といった、そのほかの脳機能障害（特に高次脳機能障害）の自然回復のメカニズムについてはあまり検討されていない (Muñoz-Cespedes, et al. 2005)。さらに、自然回復でなく、これらの高次脳機能障害に対する認知リハビリテーション的な介入によって引き起こされる脳内機序の変化については、コンピュータを利用した視覚機能訓練や注意機能訓練が、視野障害を呈す卒中患者や、視空間的注意障害を呈す脳外傷者の脳に可塑的な変化をもたらすことをそれぞれ示した Julkunen, et al. (2006) や Kim, et al. (2009) の PET または fMRI 研究があるものの、さらにエビデンスが少なくなる。こうしたなか、本研究の結果は、PET や fMRI と比べて格段に安価で入手しやすい簡易型 NIRS 装置であっても、場合によっては、高次脳機能障害の認知リハビリテーションに十分に活用できる可能性を示しており、認知リハビリテーションによってもたらされる脳の可塑的变化をとらえる1つの手段として、こうした装置を利用した介入研究が今後積極的に進められることが望まれる。

引用文献

- Alderman, N. (1991). The treatment of avoidance behaviour following severe brain injury by satiation through negative practice. *Brain Injury*, 5, 77-86.

- Alderman, N., & Burgess, P. (1994). A comparison of treatment methods for behaviour disorder following herpes simplex encephalitis. *Neuropsychological Rehabilitation*, **4**, 31-48.
- Alderman, N., Fry, R. K., & Youngson, H. A. (1995). Improvement of self-monitoring skills, reduction of behavioral disturbance and the dysexecutive syndrome : Comparison of response cost and a new programme of self-monitoring training. *Neuropsychological Rehabilitation*, **5**, 193-221.
- Alderman, N., & Knight, C. (1997). The effectiveness of DRL in the management and treatment of severe behaviour disorders following brain injury. *Brain Injury*, **11**, 79-101.
- Alderman, N. & Ward, A. (1991). Behavioural treatment of the dysexecutive syndrome : Reduction of repetitive speech using response cost and cognitive overlearning. *Neuropsychological Rehabilitation*, **1**, 65-80.
- Aron, A. R., & Poldrack, R. A. (2006). Cortical and subcortical contributions to stop signal response inhibition : Role of the subthalamic nucleus. *The Journal of Neuroscience*, **26**, 2424-2433.
- Carey, L. M., & Seitz, R. J. (2007). Functional neuroimaging in stroke recovery and neurorehabilitation : Conceptual issues and perspectives. *International Journal of Stroke*, **2**, 245-264.
- Casey, B. J., Thomas, K. M., Davidson, M. C., Kunz, K., & Franzen, P. L. (2002). Dissociating striatal and hippocampal function developmentally with a stimulus-response compatibility task. *Journal of Neuroscience*, **22**, 8647-8652.
- Cieslik, E. C., Zilles, K., Kurth, F., & Eickhoff, S. B. (2010). Dissociating bottom-up and top-down processes in a manual stimulus-response compatibility task. *Journal of Neurophysiology*, **104**, 1472-1483.
- Coxon, J. P., Stinear, C. M., & Byblow, W. D. (2009). Stop and go : The neural basis of selective movement prevention. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **21**, 1193-1203.
- Dobkin, B. H. (2004). Neurobiology of rehabilitation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **1038**, 148-170.
- Goghari, V. M., & MacDonald III, A. W. (2009). The neural basis of cognitive control : Response selection and inhibition. *Brain and Cognition*, **71**, 72-83.
- Hanlon, R., Clontz, B., & Thomas, M. (1993). Management of severe behavioural dyscontrol following subarachnoid haemorrhage. *Neuropsychological rehabilitation*, **3**, 63-76.
- Hoshi, Y., Kobayashi, N., & Tamura, M. (2001). Interpretation of near-infrared spectroscopy signals : A study with a newly developed perfused rat brain model. *Journal of Applied Physiology*, **90**, 1657-1662.
- Julkunen, L., Tenovuo, O., Vorobyev, V., Hiltunen, J., Teräs, M., Jääskeläinen, S. K., & Hämäläinen, H. (2006). Functional brain imaging, clinical and neurophysiological outcome of visual rehabilitation in a chronic stroke patient. *Restorative Neurology and Neuroscience*, **24**, 123-132.
- Kim, Y-H., Yoo, W-K., Ko, M-H., Park, C-H., Kim, S. T., & Na, D. L. (2009). Plasticity of the attentional network after brain injury and cognitive rehabilitation. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, **23**, 468-477.
- Konishi, S., Nakajima, K., Uchida, I., Kikyo, H., Kameyama, M., & Miyashita, Y. (1999). Common inhibitory mechanism in human inferior prefrontal cortex revealed by event-related functional MRI. *Brain*, **122**, 981-991.
- Leung, H. C., & Cai, W. (2007). Common and differential ventrolateral prefrontal activity during inhibition of hand and eye movements. *The Journal of Neuroscience*, **27**, 9893-9900.
- Mainero, C., Pantano, P., Caramia, F., & Pozzilli, C. (2006). Brain reorganization during attention and memory tasks in multiple sclerosis : Insights from functional MRI studies. *Journal of the Neurological Sciences*, **245**, 93-98.
- Manchester, D., Hodgkinson, A., & Casey, T. (1997). Prolonged, severe behavioural disturbance following traumatic brain injury : What can be done ? *Brain Injury*, **11**, 605-617.
- Matthey, S. (1996). Modification of perseverative behaviour in an adult with anoxic brain damage.

- Brain Injury*, **10**, 219-227.
- McNab, F., Leroux, G., Strand, F., Thorell, L., Bergman, S., & Klingberg, T. (2008). Common and unique components of inhibition and working memory : An fMRI, within-subjects investigation. *Neuropsychologia*, **46**, 2668-2682.
- Medd, J., & Tate, R. L. (2000). Evaluation of an anger management therapy program following acquired brain injury : A preliminary study. *Neuropsychological Rehabilitation*, **10**, 185-201.
- Muñoz-Céspedes, J. M., Rios-Lago, M., Paul, N., & Maestu, F. (2005). Functional neuroimaging studies of cognitive recovery after acquired brain damage in adults. *Neuropsychology Review*, **15**, 169-183.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness : The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, **9**, 97-113.
- Roberts, K. L., & Hall, D. A. (2008). Examining a supramodal network for conflict processing : A systematic review and novel functional magnetic resonance imaging data for related visual and auditory Stroop tasks. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **20**, 1063-1078.
- Schumacher, E. H., & D'Esposito, M. (2002). Neural implementation of response selection in humans as revealed by localized effects of stimulus-response compatibility on brain activation. *Human Brain Mapping*, **17**, 193-201.
- Schumacher, E. H., Elston, P. A., & D'Esposito, M. (2003). Neural evidence for representation-specific response selection. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **15**, 1111-1121.
- Spielberger, C. D. (1988). *State-Trait Anger Expression Inventory*. Orlando, FL : Psychological Assessment Resources.
- Strangman, G. E., O'Neil-Pirozzi, T. M., Goldstein, R., Kelkar, K., Katz, D. I., Burke, D., Rauch, S. L., Savage, C. R., & Glenn, M. B. (2008). Prediction of memory rehabilitation outcomes in traumatic brain injury by using functional magnetic resonance imaging. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **89**, 974-981.
- Stuss, D. T. (2007). New approaches to prefrontal lobe testing. In B. L. Miller, & J. L. Cummings (Eds.), *The human frontal lobes : Functions and disorders*. New York : The Guilford Press. pp. 292-305.
- Stuss, D. T. (2009). Rehabilitation of frontal lobe dysfunction : A working framework. In M. Oddy, & A. Worthington (Eds.), *The rehabilitation of executive disorders : A guide to theory and practice*. Oxford : Oxford University Press. pp. 3-17.
- 武澤友宏・宮谷真人 (2007). 競合量の検出に基づく自動的な反応の活性化の抑制 認知心理学研究, **4**, 57-64.
- Watson, C., Rutterford, N. A., Shortland, D., Williamson, N., & Alderman, N. (2001). Reduction of chronic aggressive behaviour 10 years after brain injury. *Brain Injury*, **15**, 1003-1015.
- Zheng, D., Oka, T., Bokura, H., & Yamaguchi, S. (2008). The key locus of common response inhibition network for no-go and stop signals. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **20**, 1434-1442.