

Discussion of the Relation between the Cerebral Blood Flow and Reaction Time during Stroop Test

Michihiro FUKUHARA^{*}, Mitsunori MIKI^{**}, Hisatake YOKOUCHI^{***} and Tomoyuki HIROYASU^{***}

(Received October 19, 2012)

In this paper, the effects of the cognitive conflicts on cerebral blood flow were considered. The cognitive conflicts were included by Stroop tests, and the changes in the cerebral blood flow were measured at multiple points, using fNIRS device. It is assumed that the brain activities during the Stroop tests are activated near the left inferior frontal gyrus including Broca's area, which is thought to be devoted to language comprehension. Because of this reason, this region of the brain has been often focused on many researches. However, it seems that the discussions including the other region of the brain, such as the right hemisphere and the frontal parts, using fNIRS, have not been held enough. Correspondingly, the study of the relationship between reaction time and cerebral blood flow seems to be insufficient. In this paper, the changes in cerebral blood flow during Stroop tests were measured using a multi-channel fNIRS device (Hitachi medical Co., Japan). From the results, it is indicated that the changes in the whole-brain cerebral blood flow has increased greater when performing incongruent tasks than performing congruent tasks. At the same time, it is recognized that the reaction time is short, the more the changes in the cerebral blood flow is increased.

Key words : functional near-infrared spectroscopy, Stroop test, Executive function

キーワード : fNIRS, ストロープテスト, 実行機能

ストロープテスト時における脳血流変化と課題成績の関係性の検討

福原理宏, 三木光範, 横内久猛, 廣安知之

1. はじめに

ストロープテストは、言語情報と感覚情報の2つの情報が入力されることが知られている。人間は複数の情報が交差したとき、取り入れた情報を選択的に取り出して独立に情報処理を行うことができない^{1, 2)}。取り入れた情報の中に矛盾が生じた場合、葛藤が起ることで

反応潜時が生じる。このような複雑な課題の遂行に対して、行動を制御する認知システムを実行機能と呼ぶ³⁾。ストロープテストは、被験者の実行機能の違いによって反応潜時が異なることを利用して、前頭前野の機能検査に用いられている⁴⁾。また脳研究も盛んにされており、fNIRS(functional near infrared spectroscopy)を用いた

^{*} Graduate school of Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone:+81-774-65-6130, Fax:+81-774-65-6780, E-mail:mhukuhara@mis.doshisha.ac.jp

^{**} Department of Knowledge Engineering and Computer Sciences, Doshisha University, Kyoto

Telephone:+81-774-65-6930, Fax:+81-774-65-6796, E-mail:mmiki@mail.doshisha.ac.jp

^{***} Department of Life and Medical Sciences, Doshisha University, Kyoto

Telephone:+81-774-65-6932, Fax:+81-774-65-6780, E-mail:tomo@mis.doshisha.ac.jp, hyokouch@mail.doshisha.ac.jp

ストループテストに関する先行研究として、左半球下前頭回付近における活動が認められている⁵⁾。しかし、ストループ効果中には複数の情報が入力されることから、脳内でも複数の箇所処理されている可能性が考えられる。

そこで本稿では、多点計測可能な fNIRS を用いて前頭部と側頭部におけるストループテスト時の脳血流変化の計測を行ない、多点による脳活動部位の調査と作業成績との関連について調査した。

2. ストループテスト時の脳血流変化の測定

2.1 ストループテスト

ストループ効果とは、色と語の意味が不一致なカラーワードに対して色命名反応がなされるとき、反応時間が増大し反応が困難であるという認知的葛藤現象である⁶⁾。例えば、文字色と文字意味が一致している文字（赤色で書かれた「赤」という文字など）と、文字色と文字意味が不一致の文字（赤色で書かれた「青」という文字）それぞれにおいて、文字のインクの色を答えるという課題を考える。この時、文字色と文字意味が不一致の場合、一致しているときと比較して、提示されてから正しく反応するまでの時間が長くなる傾向がある。これは、色名（感覚情報）でなく文字（言語情報）を回答する反応を抑制しているため反応潜在時間が長くなると考えられる⁷⁾。

この課題で得られる反応時間は、高い信頼性と安定性が得られると言われており⁸⁾、臨床分野をはじめ数多くの研究で用いられている。例えば、ADHD（注意欠陥・多動性障害）の患者と健常者のパフォーマンスが異なることを利用した研究などが報告されている⁹⁾。また健常者の中でも、年齢によってパフォーマンスが異なるといった結果も報告されている¹⁰⁾。このように、様々な要因が反応時間に影響を及ぼすことから、ストループテストにおける脳内の情報処理について検討する際には、反応時間との関連について検討することが重要であると考えられる。

2.2 fNIRS

fNIRS は、近赤外線分光法を用いた大脳皮質付近の神経活動に伴い変化する血流量の相対的変化を多点で計測し画像化する脳機能イメージング装置である^{11, 12)}。

近赤外線を頭皮上から脳に照射すると、オキシヘモグ

ロビン（以下 Oxy-Hb）とデオキシヘモグロビン（以下 Deoxy-Hb）に吸収・散乱される。一方、その他の脳を構成する組織からは大きな影響を受けないという性質がある。頭皮から照射された近赤外線は大脳皮質を通り、約 30mm 離れた頭皮上からヘモグロビンの影響で減衰して検出される。その際、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。fNIRS ではこの原理を用いて、脳内の各ヘモグロビン変化量を計測する。Oxy-Hb は神経活動におおよそ比例して変化するといわれており、大脳皮質における局所脳活動の指標として用いることができる。

他の脳機能イメージング装置と比較して、装着が容易で装置の可動性が高いことから、被験者への負担が少ないというメリットがある。このことから、より自然な状態で脳活動を計測することができ、臨床分野や脳研究分野などの分野で活躍している。

本稿の実験では、認知的な活動であるストループテストを取り上げたため、可能なかぎり自然な実験条件で実験を行うことが望ましい。そのため、着座状態の自然な状態で実験を行うことができる fNIRS による計測が適すると考えられる。

3. 実験

3.1 被験者と実験環境

被験者は、健康な男性 12 名（年齢：21-22、全員右利き）を対象に実験を行なった。その際、室温は 24.0～26.9 度、湿度は 61.0～66.0% という環境で行なった。

3.2 実験設計

実験設計はストループテストを扱った先行研究を参考に以下の流れで行った¹³⁾。

1. 被験者への実験内容の説明
2. 課題の練習と fNIRS の装着
3. 休憩 (1 分間)
4. 本実験 (ストループテスト)

本実験ではストループテストを行った。一致課題、不一致課題の順に実験を行い、その間には注視の時間を設けた (Fig. 1)。課題期間では Fig. 1 の下図に示した流れで実験を行なった。何も表示されない

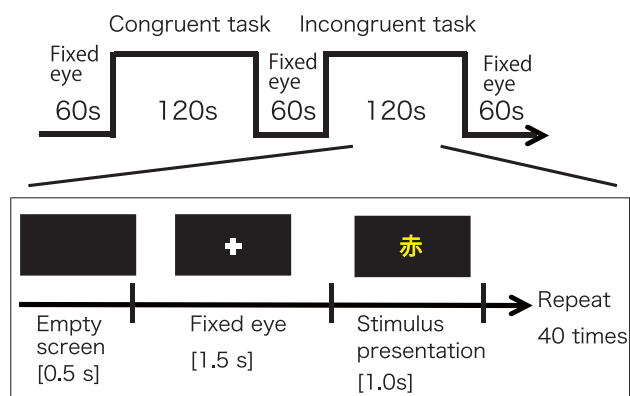


Fig. 1. Experimental procedure.

時間の後 (0.5 秒), 十字マークが表示され (1.5 秒), その後に色つき文字を表示した (1.0 秒). その際被験者は表示された色に対応する色ボタンを押した. 40 回回答が終了すると「注視」の状態に再び戻る. 色は、「青・赤・黄・緑」から構成される色文字を表示した.

3.3 解析方法

本実験では ETG-7100 (Hitachi medical Co., Japan) を用いて前頭部と両側頭部を計測した. 前頭部は 5 × 3 のプローブを設置し, 22CH で計測した. また両側頭部は, 4 × 4 のプローブを設置し, 24CH で計測した. 装置のサンプリング周波数は 10Hz である. また, 脳の神経活動に伴い増加する Oxy-Hb 濃度変化量を用いて検討を行った¹⁴⁾. 設置の際は国際 10/20 法を参考に設置方法を定めた¹⁵⁾.

Oxy-Hb 濃度変化量の処理方法について説明する. まず, 計測データを 10 秒間のサンプルサイズで移動平均処理を行った. さらに, 各課題直前の 10 秒間 (PreTime) と各課題終了から 20 秒後の 10 秒間 (PostTime) の値をもとにベースライン処理を行った. ベースライン処理とは PreTime と PostTime の値をもとに最小二乗法を用いて一次方程式 (Baseline) を算出し, Oxy-Hb 変化量を Baseline からの変化として補正する処理である. この処理により, レスト期間と課題期間の反応差を明確にすることができる.

3.4 検討内容

本実験では, 3つの検討を行った.

- 一致課題と不一致課題における成績の差異の検討

一致課題と不一致課題時における反応時間と誤答数に関して, t 検定を用いて差異があるか検討することで, ストループ効果が生じているか確認した.

- Oxy-Hb 濃度変化量の検討

前頭部と両側頭部における脳血流変化量について, 12名の被験者のデータを平均した血流変化パターンを観察することで, 刺激に対する血流変化量の傾向を検討した.

- 反応時間と Oxy-Hb 濃度変化量の関係性の検討

不一致課題時における, 被験者の反応時間と Oxy-Hb 濃度変化量の関係性について検討した. 各被験者の反応時間は, 不一致課題時における 40 回の反応時間を平均した値を用いた. また Oxy-Hb 濃度変化量は, 不一致課題開始後 10 秒から 40 秒までの結果の平均値を用いた. その理由として, 血流変化は神経活動が生じてから約 10 秒程度でピークに達することから, 課題開始直後のデータを省いた. 検討に使用したチャンネルは左側頭部の下前頭回付近 (左側頭部の左下の CH) にあたる 1CH を用いた. この部位は, 先行研究において, 不一致課題時に反応が認められている部位である⁵⁾.

3.5 結果

3.5.1 課題成績

一致課題と不一致課題時における反応時間と誤答数の結果を Fig. 2 示す. 被験者 12 名の反応時間と誤答数の平均値と標準誤差を示している. 反応時間では, t 検定により 2 群を比較したところ, 有意差が認められた ($p < .05$).

また誤答数では, 一致課題時は 0.58 ± 0.11 回, 不一致課題時には 0.92 ± 0.18 回となり, どちらの課題でも約 1 問程度誤答する結果となった. 誤答数に対して 2 群に差は得られなかった ($p > .05$).

3.5.2 fNIRS による計測結果

fNIRS を用いて測定した被験者 12 名の Oxy-Hb 濃度変化量の平均変化量を Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 に示す. 各図の, 赤線は一致課題, 青線は不一致課題である. また, 緑色の斜線で囲んだ範囲は, 各課題期間である. グレーに塗られている CH は, 被験者のうち少なくとも一人が計測が出来なかった CH である.

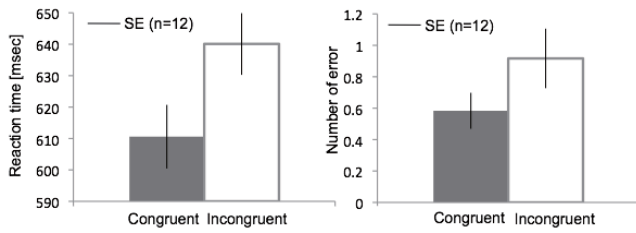


Fig. 2. Stroop performance (Reaction time and error).

左側頭部 (Fig. 3) では、脳下部になるほど課題間の脳血流変化の差異が大きかった。不一致課題においては、課題開始と同時に血流の増加がみられ、次第に減少していく傾向となった。また一致課題では、ほとんどの CH で脳血流が増加する傾向はみられなかった。下前頭回付近では血流が減少しており、課題途中で一度反応の立ち上がりがみられた。

右側頭部 (Fig. 4) では、左側頭部と比べ課題間の反応差は小さかった。しかし、不一致課題時において左側頭部と同様に、課題開始と同時に血流の増加がみられる CH が多数あった。また一致課題でも、減少している部位もみられたが、下前頭回付近では課題途中で立ち上がりがみられた。

前頭部 (Fig. 5) では、脳上部では課題間の脳血流変化に差はみられず、脳下部になるほど差異がみられた。不一致課題においては他の部位と同様に、課題開始と同時に脳血流の増加がみられた。しかし、課題終了時まで血流が減少しない傾向がみられた。一致課題においては、血流が顕著に増加している部位はみられなかった。また、両側頭部でみられた下前頭回付近における課題途中の反応は、前頭部の左側頭部側ではみられず、下部右寄りの CH のみで脳血流の立ち上がりがみられた。

3.5.3 反応時間と fNIRS の結果の比較

反応時間の速かった被験者順に並べた際の、不一致課題時の Oxy-Hb 濃度変化量を Fig. 6 に示す。反応時間の速い被験者ほど、Oxy-Hb 濃度変化が大きい傾向がみられた。

3.5.4 考察

一致課題と不一致課題において、誤答数には有意差がみられなかった。これは、実験指示で回答速度について特に指示しなかったことから、慎重に回答を行い正答率

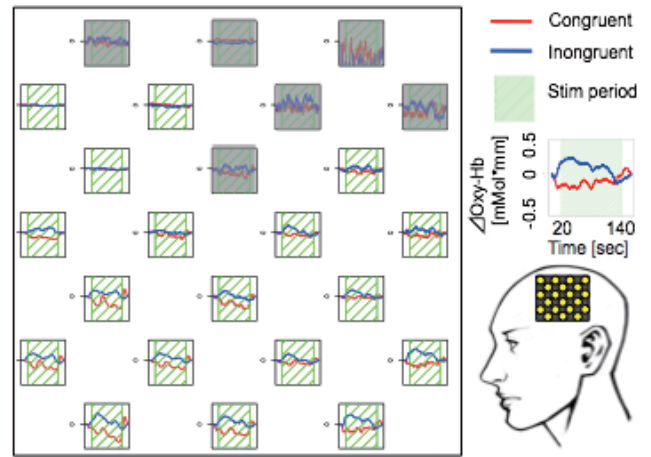


Fig. 3. Changes in Oxy-Hb at left temporal region.

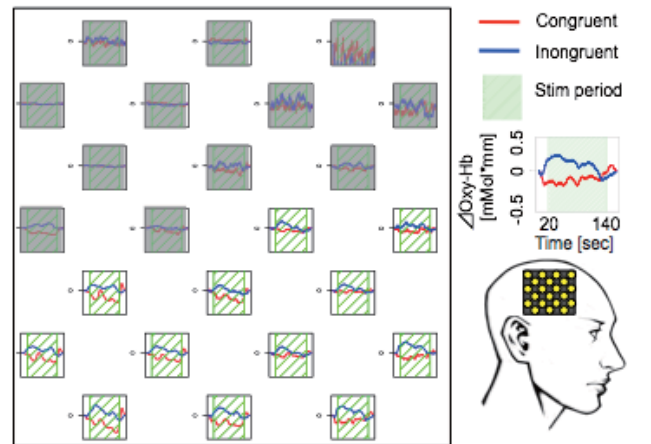


Fig. 4. Changes in Oxy-Hb at right temporal region.

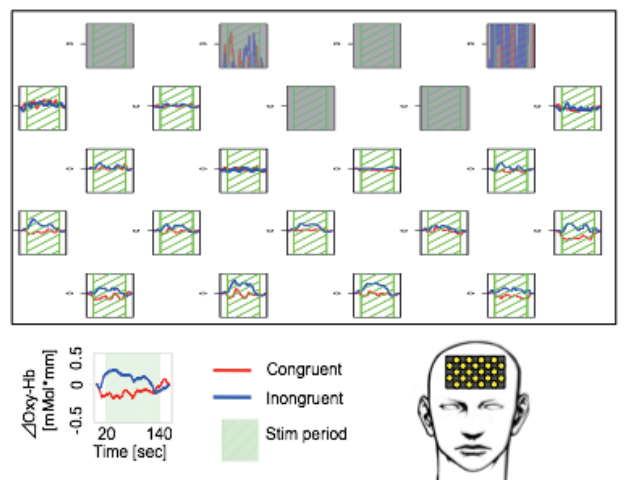


Fig. 5. Changes in Oxy-Hb at prefrontal cortex.

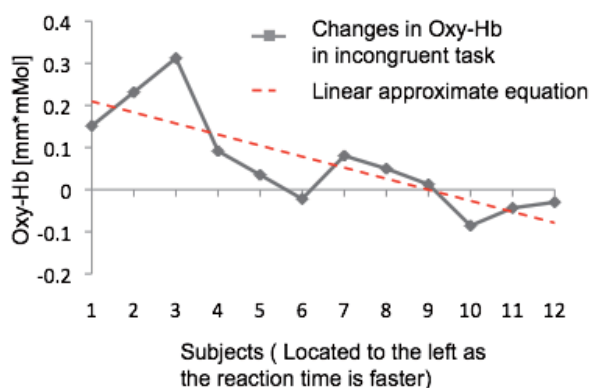


Fig. 6. Relationship between reaction time and changes in Oxy-Hb.

が向上したことが原因だと考えられる。そのため本実験では、ストループ効果は Fig. 2 の結果にみられるとおり、反応時間の違いに現れたと考えられる。

次に、fNIRS による脳血流変化量の測定結果について考察する。一致課題においては、両側頭部において下前頭回付近で他の部位と異なった平均変化パターンが示された。この部位は、言語処理を行うブローカ野が存在する部位である。このことから、人間は色文字を読む際に、言語情報を優先して処理している可能性が示唆された。

また不一致課題時において先行研究⁵⁾で報告されていた左半球下前頭回付近における反応以外においても多数の部位で脳血流の増加がみられた。大脳皮質の脳下部全体で活動していたことが分かった。特に、前頭部は課題が終わるまで継続的な反応が示されたことから、認知活動において前頭部が重要な役割を果たしていることが分かる。これらのことから、ストループテストのような複雑な認知課題においては、前頭部を中心に脳の複数の部位が関連して活動していることが示唆された。

脳血流変化と反応時間の関係性の結果 (Fig. 6) から、反応時間が短いほど血流変化が増加する傾向がみられた。ストループテストは実行機能の検査に用いられる認知課題である。このことから、実行機能の高い被験者ほど血流変化が増加することが示唆された。

4. まとめ

本稿では、ストループテスト時における脳血流変化を多点計測可能な fNIRS 装置を用いて計測し、活動部位と反応時間との関係性について調査した。

その結果、不一致課題時における脳血流変化は、先行研究で報告されていた下前頭回付近だけではなく前頭部や右側頭部においても反応がみられた。特に、前頭部は課題終了時まで継続的な反応が示されたことから、前頭部を中心として脳全体で活動することが分かった。また、反応時間が速い被験者ほど、Oxy-Hb 濃度変化量が大きいことが分かった。

参考文献

- 1) H. Damasio, T. J. Grabowski, D. Tranel, R. D. Hichwa and A. R. Damasio, "A neural basis for lexical retrieval", *Nature*, **380**, 490-505 (1996).
- 2) M. L. G. Tempini, C. J. Price, O. Josephs, R. Vandenberghe, S. F. Cappa, N. Kapur, R. S. Frackowiak and M. L. Tempini, "The neural systems sustaining face and proper-name processing", *Brain*, **121**, 2103-2118 (1998).
- 3) S. Ozonoff, B. F. Pennington and S. J. Rogers, "Executive function deficits in high-functioning autistic individuals: relationship to theory of mind", *Journal of child psychology and psychiatry*, **32**, 1081-1105 (2006).
- 4) J. M. G. Williams, A. Mathews and C. MacLeod, "The emotional Stroop task and psychopathology", *Psychological bulletin*, **120**, 3-24 (1996).
- 5) A. C. Ehlis, M. J. Herrmann, A. Wagener and A. J. Fallgatter, "Multi-channel near-infrared spectroscopy detects specific inferior-frontal activation during incongruent Stroop trials", *Biological psychology*, **69**, 315-331 (2005).
- 6) J. R. Stroop, "Studies of interference in serial verbal reactions", *Journal of experimental psychology*, **18**, 643-662 (1935).
- 7) 渡辺静代, "成人用数のストループ課題の作成", *心理科学*, **29**, 32-45 (2009).
- 8) 脇坂佳子, 橋本修左, "難易度の異なるストループ課題が P300 におよぼす影響: 1 単語 5 色課題と 5 単語

- 語5色課題の比較”, 日本生理人類学会誌, **17**, 23-30 (2012).
- 9) J. A. King, M. Colla, M. Brass, I. Heuser, and D. Y. Von Cramon, “Inefficient cognitive control in adult ADHD: evidence from trial-by-trial Stroop test and cued task switching performance”, *Behavioral and Brain Functions*, **3**, 42-61 (2007).
- 10) P. E. Comalli Jr., S. Wapner, and H. Werner, “Interference Effects of Stroop Color-Word Test in Childhood, Adulthood, and Aging”, *The Journal of Genetic Psychology*, **100**, 47-53 (1962).
- 11) A. Villringer, J. Planck, C. Hock, L. Schleinkofer, and U. Dirnagl, “Near infrared spectroscopy (NIRS): a new tool to study hemodynamic changes during activation of brain function in human adults”, *Neuroscience Letters*, **154**, 101-104 (1993).
- 12) H. Owen-Reece, M. Smith, C. E. Elwell, and J. C. Goldstone, “Near infrared spectroscopy”, *British Journal of Anaesthesia*, **82**, 418-426 (1999).
- 13) J. Sun, J. Zhai, R. Song, L. Zou, and H. Gong, “Reduced prefrontal cortex activation in the color-word Stroop task for Chinese dyslexic children: a near-infrared spectroscopy study”, *Journal of Physics: Conference Series*, **277**, 1-7 (2011).
- 14) P. T. Fox and M. E. Raichle, “Focal physiological uncoupling of cerebral blood flow and oxidative metabolism during somatosensory stimulation in human subjects”, *Proceeding of the National Academy of Sciences*, **83**, 1140-1144 (1986).
- 15) H. Jasper, “Report of committee on methods of clinical exam in EEG”, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **10**, 370-375 (1958).