

fNIRSを用いた2種類のストロープ課題の比較検討

Comparing two types of Stroop tasks: an fNIRS study

19N3100022C 高橋 知樹 (応用認知脳科学研究室)

Tomoki TAKAHASHI/ Applied Cognitive Neuroscience Lab.

Key Word : Stroop task, executive function, task structure, DLPFC, fNIRS

1. 序論

実行機能を計測する際、ストロープ課題がよく用いられる。ストロープ課題とは、ある色で表示されている色の単語を見て、何色で表示されているかを判断する課題である¹⁾。課題中は、文字の意味ではなく、色に注意を向ける必要があり、3つの条件(中立条件、一致条件、不一致条件)の中でも、特に文字の意味と色が不整合な不一致条件では、干渉が発生するため、選択的な注意力がより求められる²⁾。その干渉を扱う時には不一致条件から中立条件の差分をとったストロープ干渉と呼ばれる指標が知られている。先行研究によると、ストロープ課題に

おいて、干渉は全帯状皮質という脳部位で賦活し、選択的注意の制御の役割は、前頭前野背外側部(DLPFC)という脳の部位が担っていることが明らかになっている³⁾。

一般的に、ストロープ課題は、主に二つの課題構造があることが知られている。1つ目の課題(Task I)は、文字の色を判断する課題である。被験者の認知プロセスは刺激の文字「赤色で書かれたあお」を読み、文字の色、つまりあかを判断し、赤、青、黄、緑の中から「赤」と回答する。これらの認知プロセスをCohenらが並列分散処理モデルを用いて、認知モデルを提唱している⁴⁾。モデルには文字、色情報の2つの処理経路が存在し、図中のTask demandと呼ばれるunitsで各処理経路に選択的注意を割り当てることで、課題遂行中に正しく文字の色を判断することができる(図1)。一方、2つ目の課題(Task II)は、上段の文字の色と下段の文字の意味が同じであるかを判

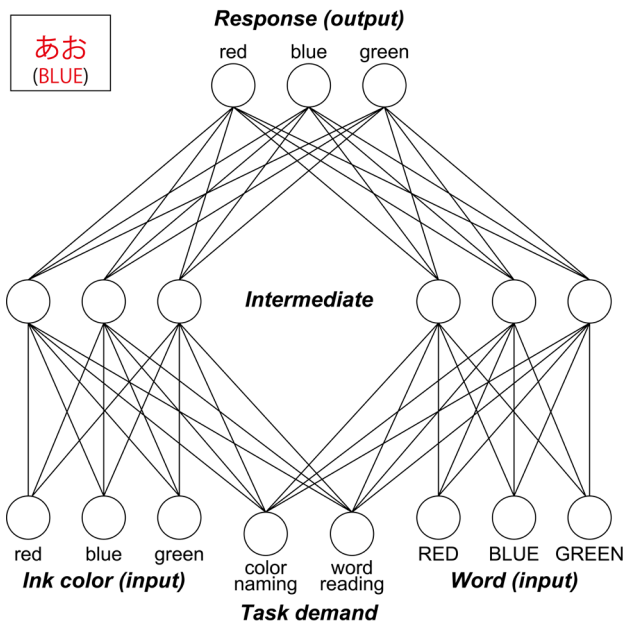


図-1 ストロープ課題(Task I)における認知モデル。左側が色情報の処理経路、右側が文字情報の処理経路を表している。この図は Cohen et al. (1990)を基に修正されたものである。

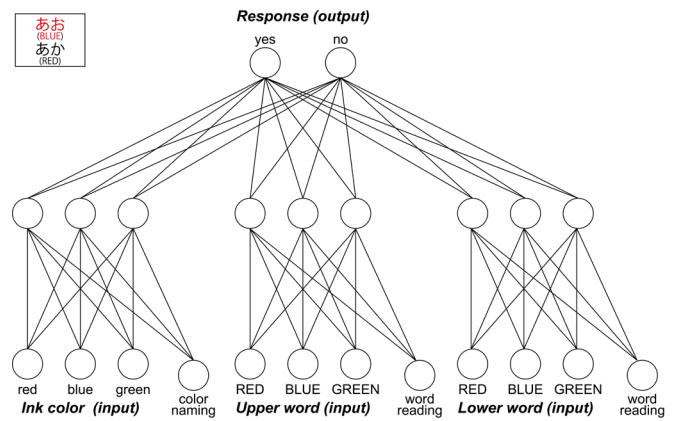


図-2 ストロープ課題(Task II)における認知モデル。図1の認知モデルに比べ下段の文字を読むという文字情報の処理経路が増えると考えられ、それに伴い、Task demand unitsの数が増えている。このモデルは Cohen et al. (1990)を基に作成された。

断する課題である。被験者の認知プロセスは上段の文字「赤色で書かれたあお」を読み、文字の色、つまりあかを判別する。次に、下段の文字「あか」を読んで、上段の文字の色と下段の意味が同じか違うか判断する。今回は同じであるため、被験者は「同じ」と回答する。これより、2つの課題は、認知プロセスや回答の方法が違い、認知モデルが異なることが明確になったが、Task IIの認知モデルは作成されていない。それ故、Task IIの認知モデルをCohenのモデルを基に作成した(図2)。これらのモデルを比較すると、Task demand unitsの数が違うなどの違いがあり、選択的注意つまり実行機能の負荷が異なると考えられる。

ストループ課題に伴う認知処理を理解する上で、血流動態反応の順序効果は無視することはできない。順序効果とは2つの実験セッションを休憩を挟んで行われた際、1つ目のセッションと2つ目のセッションを比較すると、2つ目のセッションにおいて脳活動が弱まっていることである。順序効果の発生事例はTask IIのみ報告されており、Task Iでは発生しない事例が報告されている^{5,6}。しかし、詳細な考察は言及されておらず、不明瞭な点が多い。

故に、本研究では異なる認知モデルである2種類のストループ課題によって脳機能に差異が生じるのかを目的とした。Study 1では課題ごとの脳活動パターンを明らかにすることを目的とし、Study 2では課題ごとで順序効果が発生するのかを探る。

2. 方法

(1) 被験者・実験デザイン

61人の日本人の被験者(平均年齢21.74 ± 0.94 歳、30人の男性と31人の女性)が本研究に参加した。実験前に、全ての被験者に十分な説明を行い、実験は同意を得てから行われた。被験者の参加は任意であり、実験後に謝礼金を支払った。本研究は最新のヘルシンキ宣言を基にして実施し、本研究は中央大学における倫理委員会の実施許可を得ている。

被験者を2つの群(Order A群: Task I→Task IIを行う群/Order B群: Task II→Task Iを行う群)に分け、2種類の課題を行ってもらった。実験中はfNIRSを用いて脳血流変化を計測した。2種類の課題は同等な条件にするため、試行数、色の種類、刺激ごとの間隔の時間、課題全体の時間、ボタンを押す比率は全て同じにした。

(2) fNIRSについて

日立製作所のETG-4000を用いて計測を行った。ETG-4000では2つの異なる波長の近赤外線(695 nmと830 nm)を頭皮に照射させ、その光の反射率から修正ランベール則⁷を用い、酸素化ヘモグロビン(oxy-Hb)の信号変化量、脱酸素化ヘモグロビン(deoxy-Hb)の信号変化量を

得ることができる⁸。各ヘモグロビン信号の単位は[mM・mm]とした。本研究では、血流変化の感度が高いといわれているoxy-Hb信号を解析に用いて、サンプリングレートは10 [Hz]とした。両極DLPFCの脳血流反応を得るため、先行研究を参照して、fNIRSのプロローブは3×11のマルチチャンネルプロローブホルダーを用いた。プロローブは17つの送光器と16つの受光器が交互に3 cmの間隔で配置されており、52チャンネルの部位で計測した。

(3) 空間解析

脳血流計測後に3Dデジタイザーを用いて空間データを取得し、確率的レジストレーションを用いてMNI (Montreal Neurological Institute)座標系により脳空間に投影した。投影された空間データを解剖学的ラベルに対応させた^{9,10}。解剖学的ラベルは、ブロードマンエリアに基づくラベリングと脳地図に確率表現を導入したLPBA40によるマクロアトミーを参照した¹¹。

(4) 前処理

ファーストレベル解析では、応用認知脳科学研究室で開発されたMATLABの解析ツールを使用してoxy-Hbの個人ごとの時系列データのGLM解析を行った。GLM解析を行う前に、信号の変動が、10%以下のチャンネルは測定不良とみなし、解析から除外し、呼吸や心臓の動きなどの測定ノイズの影響を除去するために、wavelet minimum description length (Wavelet-MDL) を適用した¹²。GLM解析では、Box-car関数を畳み込み積分した合成関数をHRFとして、リグレッサーは作成された。これらの式から得られたβ値を脳活動の指標として用いた。

(5) 解析

セカンドレベル解析では、2つの解析が行われた。1つ目は先行研究通りの結果が確認できるかということと、課題間の比較を検証する解析であり、2つ目は順序効果を検証する解析である。解析する際は、IBM SPSS Statistical version 25とMATLAB 2007bを使用した。

a) Study 1

1つ目の解析では、先行研究通り賦活しているか確認するため、各条件とストループ干渉で従属変数を52チャンネルのβ値として、1サンプルのt検定(vs. 0)を行った。補正法はMeff補正を用いた¹³。尚、1つ目の解析では、1回目のデータ(Order A群のTask IとOrder B群のTask II)のみを解析に用いた。これは、2回目のデータは順序効果の影響でTask IIの波形が1回目のデータの波形と大きく異なっていたためである。

b) Study 2

2つ目の解析を行う前に解析結果の解釈が複雑なることを防ぐため、Study 1で有意差又は有意傾向が認められたチャンネルを解剖学的ラベルごとにとまとめた。

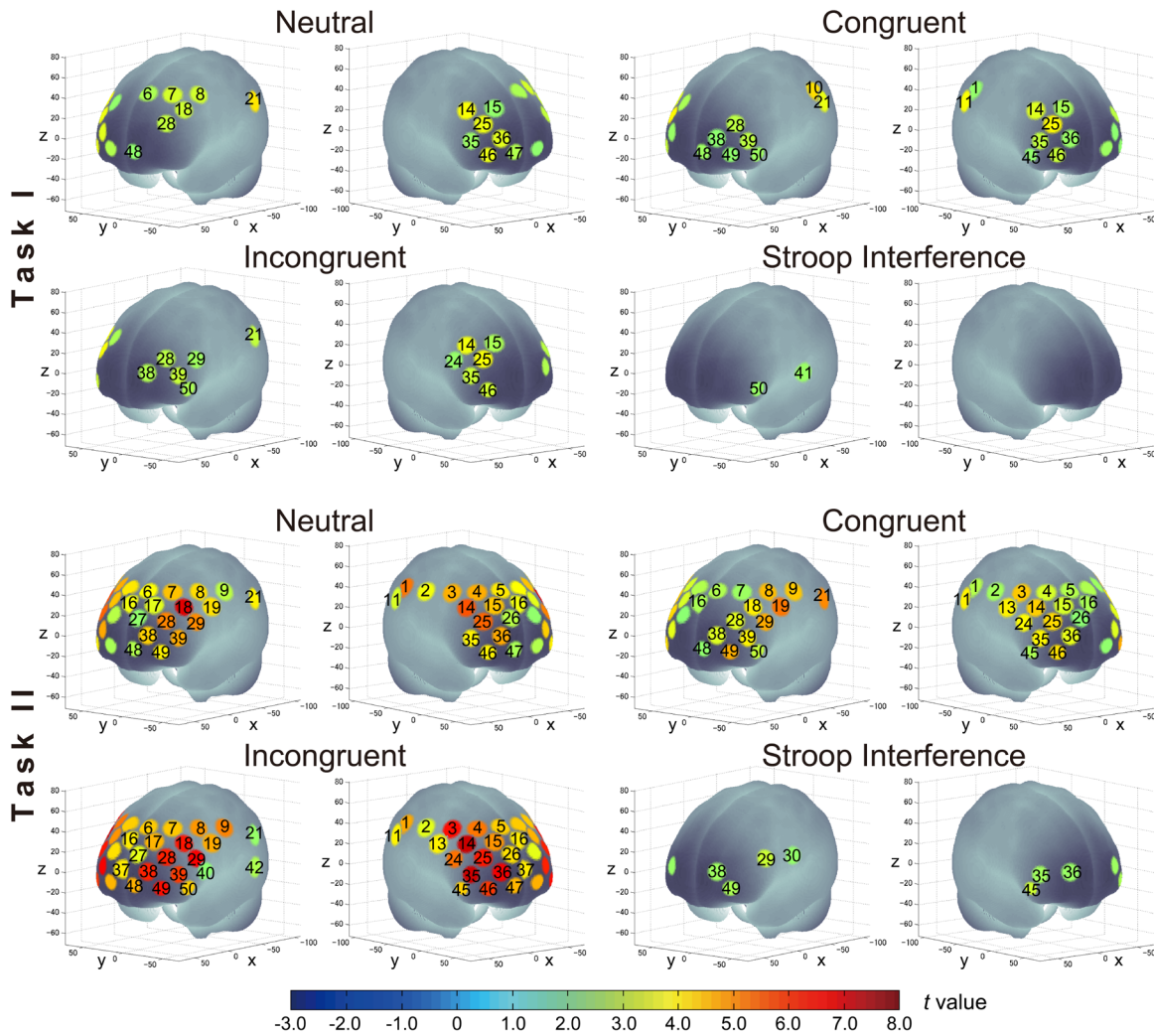


図-3 各課題の oxy-Hb の脳活動の結果。有意・有意傾向が認められたチャンネルの t 値を示している。3, 4, 5, 6, 7, 8, 15, 16, 17, 25, 28, 35, 46 のチャンネルが DLPFC を表している。

その後、順序効果を検証するため、独立変数を1回目と2回目のデータか、従属変数を脳部位ごとの β 値として独立2群の t 検定を行った。

3. 結果

(1) Study 1 結果

ワンサンプル t 検定(vs. 0)の結果を図3に示す。2つの課題のすべての条件でDLPFCの賦活を確認することができ、Task IIは広範囲の賦活が認められた。ストロープ干渉に関しては、Task IIのみでDLPFCの賦活を確認することができたが、Task Iでは賦活は確認できなかった。

(2) Study 2 結果

独立2群の t 検定の結果を図4に示す。Task IIの不一致条件、ストロープ干渉において順序効果を確認することができた。DLPFCに関しては、Task IIの不一致条件で順序効果が発生したことを確認した。

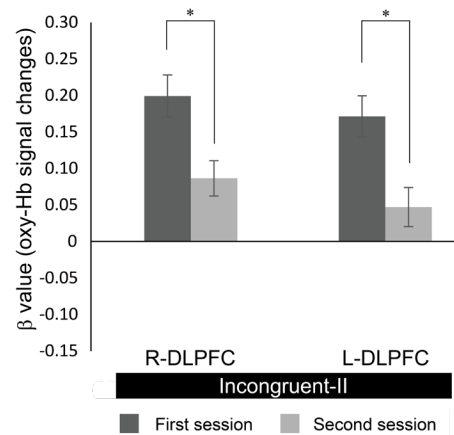


図-4 順序効果の結果(一部)。*は $p < .05$ 、エラーバーは標準誤差を表している。ボンフェローニ補正を使用。

4. 考察

(1) Study 1

全ての条件においてDLPFCが賦活していたため、ストループ課題の認知プロセスに実行機能が関与していて、図1, 2に含まれるTask demand unitsが課題を処理するために選択的注意を割り振っていたと考えられる。MacDonaldらによると、DLPFCはストループ課題において、選択的注意の制御の役割を担っていると報告している³⁾。なぜなら、文字情報処理に比べ、色情報処理の方が、選択的注意を割り振る作業の必要が生じ、DLPFCの活性が認められていたためである。

更に、Task IIにおいて広範囲のDLPFCの賦活が確認できた。よって、Task IIはTask Iに比べモデルに含まれるTask demand unitsの数が多いため、選択的注意つまり実行機能の負荷が高いということが示唆される。

ストループ干渉はTask IIのみDLPFCの賦活を確認することができた。これは、前述の通り、Task IIの方が実行機能の負荷が高く、Task IIの不一致条件はTask Iの不一致条件に比べ、負荷が高かったことが考えられる。これにより、各課題の不一致条件と中立条件の差分が大きくなったのではないだろうか。

(2) Study 2

Task IIの不一致条件でDLPFCの賦活の度合いが、1つ目のセッションに比べ、2つ目のセッションは小さくなっており、順序効果を確認することができた。これは、ストループ課題における練習効果によって、認知モデルの処理経路の強さが変化し、実行機能の必要とされる度合いが少なくなったからではないだろうか。

Stroopは課題を何度も繰り返すことで練習効果が生じると述べている¹⁾。彼の研究によると、練習効果により色情報の処理が早くなり、文字情報の処理が遅くなると報告している。更に、Cohenは練習効果を認知モデルの処理経路の強さの変化として説明している⁴⁾。Cohenは、処理経路の強さが強いほど、処理が早く、弱いほど、処理が遅いと定義しており、ストループ課題初心者の場合、前者が文字処理であり、後者が色処理という状態である。ところが、練習効果によって処理経路の強さが逆転してしまう。そのため、2つ目のセッションにおいて、色情報の処理経路の強さが強くなったと考えられ、処理経路の強さの変化によって、選択的注意が要求される度合いが低減し、DLPFCの賦活が弱まったと考えられるのではないだろうか。

参考文献

1) Stroop, J.R., *Studies of interference in serial verbal reactions*. Journal of Experimental Psychology, 1935.

- 2) MacLeod, C.M., *Half a century of research on the Stroop effect: an integrative review*. Psychological Bulletin, 1991. **109**(2): p. 163-203.
- 3) MacDonald, A.W., et al., *Dissociating the role of the dorsolateral prefrontal and anterior cingulate cortex in cognitive control*. Science, 2000. **288**(5472): p. 1835-1838.
- 4) Cohen, J.D., K. Dunbar, and J.L. McClelland, *On the control of automatic processes: A parallel distributed processing account of the Stroop effect*. Psychological Review, 1990. **97**(3): p. 332-361.
- 5) Yanagisawa, H., et al., *Acute moderate exercise elicits increased dorsolateral prefrontal activation and improves cognitive performance with Stroop test*. NeuroImage, 2010. **50**(4): p. 1702-1710.
- 6) Skau, S., et al., *Mental Fatigue and Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS) - Based Assessment of Cognitive Performance After Mild Traumatic Brain Injury*. Front Hum Neurosci, 2019. **13**: p. 145.
- 7) Cope, M., et al., *Methods of quantitating cerebral near infrared spectroscopy data*. Adv Exp Med Biol, 1988. **222**: p. 183-9.
- 8) Maki, A., et al., *Spatial and temporal analysis of human motor activity using noninvasive NIR topography*. Medical Physics, 1995. **22**(12): p. 1997-2005.
- 9) Okamoto, M., et al., *Three-dimensional probabilistic anatomical cranio-cerebral correlation via the international 10-20 system oriented for transcranial functional brain mapping*. Neuroimage, 2004. **21**(1): p. 99-111.
- 10) Okamoto, M. and I. Dan, *Automated cortical projection of head-surface locations for transcranial functional brain mapping*. Neuroimage, 2005. **26**(1): p. 18-28.
- 11) Rorden, C. and M. Brett, *Stereotaxic display of brain lesions*. Behav Neurol, 2000. **12**(4): p. 191-200.
- 12) Jang, K.E., et al., *Wavelet minimum description length detrending for near-infrared spectroscopy*. J Biomed Opt, 2009. **14**(3): p. 034004.
- 13) Uga, M., et al., *Exploring effective multiplicity in multichannel functional near-infrared spectroscopy using eigenvalues of correlation matrices*. Neurophotonics, 2015. **2**(1): p. 015002.