

NIRS によるワーキングメモリ課題を用いた読解力の神経基盤に関する研究

Relationship between neural activity during working memory task and reading comprehension skill: A NIRS study

安村 明, 松田 剛, 開 一夫
Akira Yasumura, Goh Matsuda, Kazuo Hiraki

東京大学
University of Tokyo
a_yasumura@ardbeg.c.u-tokyo.ac.jp

Abstract

This study examined neural basis of reading comprehension skill by using near-infrared spectroscopy (NIRS). Hemodynamics in prefrontal cortex was measured while participants (15 adults) performed oral reading-span test (RST). There was significant correlation between behavioral performance and neural activity in left inferior frontal gyrus (IIFG) during oral RST. This result indicates that there is neural basis of reading comprehension skill in IIFG region.

Keywords — reading comprehension, working memory, Inferior frontal gyrus, Near-infrared spectroscopy(NIRS)

1. はじめに

読解力の個人差に関する研究は、認知心理学や認知科学における重要なテーマのひとつである。特に子どもの学習面で重要で、過去に行動指標を用いた多くの研究が行われている。しかし、その神経基盤については議論がまとまっていない。読解とは、文章などを読んでその内容を理解することであり、統語、意味、語用といった複数の構成要素から成り立っている。そのため、一般的な読解力を測定する課題は複雑になる傾向があり、課題中の脳活動計測を効率的に行うことは難しい。そこで本研究では、手順が比較的単純な Reading Span Test(RST)を用い、読解力の神経基盤を探ることを目標とした。RST は、ワーキングメモリの個人差を測定するために開発され、短文を読みな

がら文中の指定された単語を記憶するといった単純な課題であるにもかかわらず、その成績は他の読解力課題（言語性学力テスト、読んだ文章の内容を問う質問、文中の代名詞が示す対象を問う質問など）と高い相関を示すことが知られている[1]。これまでの RST を使用した読解力の神経基盤に関する研究では、脳活動計測に fMRI が用いられており、その装置の特性から本来の音読ではなく、黙読での RST が実施されている[2]。過去の研究[1]から、黙読よりも音読での RST がより他の読解力課題との相関が高いことが示されているため、本研究では測定中の発話が可能な近赤外分光法（NIRS）を用い、音読での RST 遂行中の脳活動計測を実施した。音読での RST が読解力との高い相関を示す理由は、リハーサル等の内的な処理の余地を少なくすることが出来るためと言われている。本研究での関心領域は、過去の RST を用いた fMRI の研究[2]で、記憶を要求しない音読と比較して黙読の RST で有意な活動が見られた左下前頭回(IIFG)に設定した。

2. 方法

2.1 実験参加者

日本語を母国語とする成人 18 名(女性 4 名, 男性 14 名, 平均 28.22 歳, SD=5.50)が参加した。参加者の全員は顕著な病歴が無い健康な人で、測定時に実験に影響を及ぼすような薬等は服用していなかった。実験の前にインフォームドコンセントが行われ、全員が承諾した。なお、本研究は東

京大学大学院総合文化研究科の倫理審査委員会で承認されている。(課題番号: 208)

2.2 課題

RST は文章を読むこととターゲットの単語を覚えることが並行して要求される二重課題である[1]. 本研究では, 日本語版 RST[3]に準拠して, 高等学校の教科書から 20~30 文字の漢字仮名交じり文を 70 文用意した.

参加者は規定数の文章を読み上げた後に, 各文章に 1 つずつ含まれていたターゲット単語を全て再生することが求められた. 読み上げる文章の数は 2 文から 5 文まで 1 つずつ増加され, それに伴い覚えるべき単語数も, 2 つ, 3 つ, 4 つ, 5 つと, 1 つずつ増加した. 各文章はノート PC の 15 インチ液晶画面の中央に, 背景色は黒, 文字色は白で提示された. ターゲット単語の下部には赤線が引かれていた.

また, 比較のため, 単語を覚える必要がない音読課題も実施された. この課題では, RST と同じ文章が用いられたが, 文中に赤線は引かれておらず, 参加者は提示された文章をただ読み上げることが求められた.

2.3 手続き

参加者は刺激提示用のノート PC が置かれたテーブルに向かって座り, 頭部には NIRS 装置の送受光プローブが装着された. 液晶画面と参加者の顔の距離は約 60cm であった.

RST では, 15s のレストの後に文章が提示され, 参加者が一つの文章を読み終わるとすぐに次の文章が提示された(図 1). 音読するスピードは参加者の自由とした. 規定数の文章を読み終わると, 画面には「赤線の単語は何ですか?」と表示され, 参加者は覚えているターゲット単語を口頭で再生した. 再生の制限時間は Daneman and Carpenter [1]に準拠して一語につき 5s とした. したがって 2 文条件で 10s, 5 文条件では 25s であった. 2~5 文の各条件につき 5 試行ずつ繰り返し測定された. RST と音読課題の順番は参加者間

でカウンターバランスをとった.

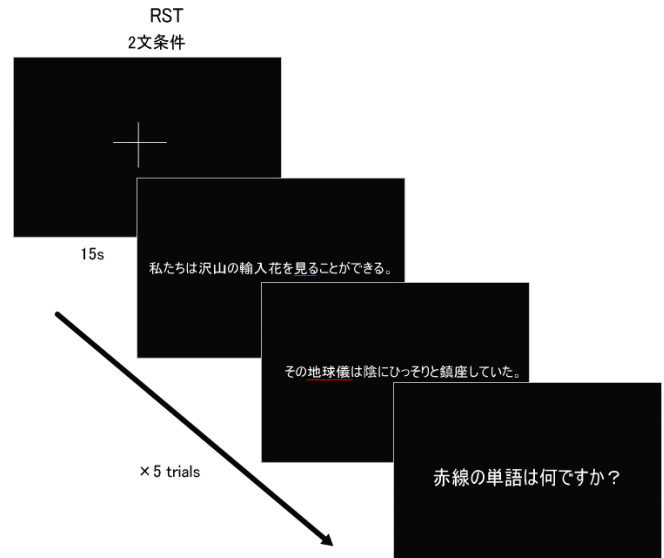


図 1: 2 文条件での RST の流れ. レスト時間は 15s で, 5 試行繰り返される.

2.4 データの記録・解析

RST の成績は日本語版 RST[3]に準拠して評価した. 各文条件 5 試行のうち 3 試行正解の場合はその条件をパスしたものとし, 2 文条件をパスすると 2 点, 3 文条件をパスすると 3 点と評価した. また, 2 試行だけ正解のときは 0.5 点の評価とした. 例えば, 3 文条件をパスし次の 4 文条件を 2 試行だけ正解した場合は合計で 3.5 点である.

脳活動計測のための NIRS はスペクトラテック社製の OEG-16 を使用した. 測定部位は国際 10-20 法における Fpz を中心とした縦 3cm, 横 15cm の領域で, 全 16 チャンネルを使用した(図 2). データの取得間隔は 0.66s であった. 関心領域となる IIFG は 14~16 チャンネルの位置とし, 右下前頭回(rIFG)は 1~3 チャンネルの位置とした. 脳活動の指標には酸化ヘモグロビンの変化量を使用した. まず各参加者の各チャンネルのデータに測定時間に応じたバンドパスフィルタ(2 文条件: 0.033-5Hz, 3 文条件: 0.022-5Hz, 4 文条件: 0.017-5Hz, 5 文条件: 0.013-5Hz)を適用したのち, ベースラインとなるレストの後半 10s の平均値が 0, 標準偏差が 1 となるように数値を標準化 (Z スコア化)した. そして RST および音読課題遂行時

の平均値を条件ごとに求め、それらと RST の成績との相関関係を調べた。ただし Z スコアの平均が 2SD 以上のデータは解析から除外し、15 名(女性 2 名, 男性 13 名)のデータを最終的に使用した。また, RST における文の増加による被験者内の脳活動の変化を調べるために, 各条件の Z スコアの平均を使用して一元配置分散分析(ANOVA)を行った。

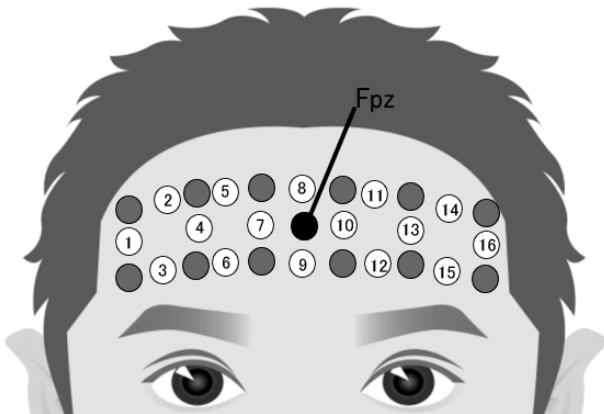


図 2: NIRS の測定場所. 国際 10/20 システムに準拠した Fpz を中心に設定し, lIFG は 14~16 チャンネルの平均により算出した。

3. 結果

一元配置分散分析により, RST において文の増加による脳活動の変化に有意差が見られなかったため, 2~5 文すべての Z スコアの平均を算出し, それらと RST の成績との相関係数を求めた。その結果, RST 遂行時の lIFG の活動変化と RST の成績との間に有意な正の相関が認められた ($r=0.68, p<0.01$)。また, RST 中の rIFG の活動変化と RST の成績との間には有意な相関が見られなかった ($r=0.48, p=0.07$)。さらに, 音読課題での lIFG の活動変化と RST の成績との間にも有意な相関は認められなかった ($r=-0.2, p=0.50$)。

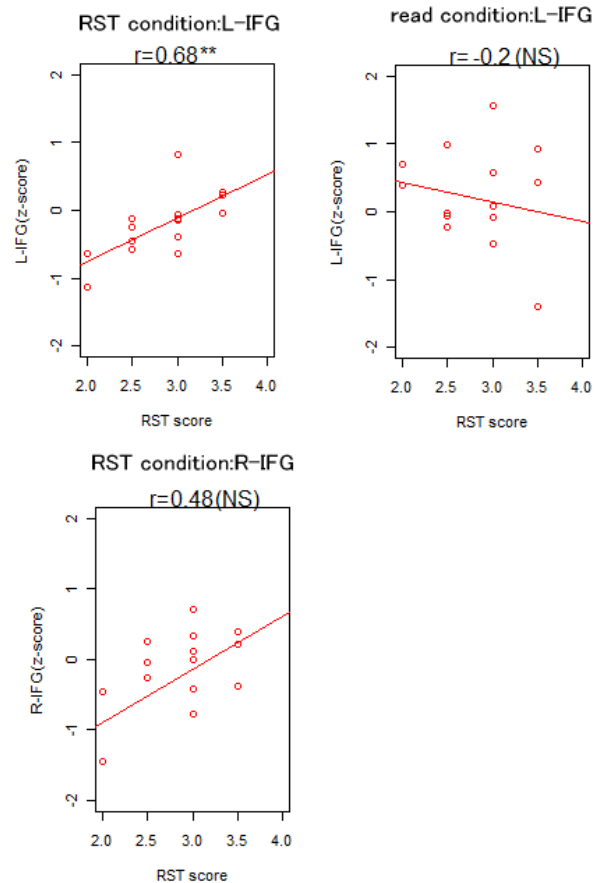


図 3: 左上が RST 遂行時の lIFG の活動変化と RST の成績との相関関係, 右上が音読遂行時の lIFG の活動変化と RST の成績との相関関係, 下が RST 遂行時の rIFG の活動変化と RST の成績との相関関係。

4. 考察

我々がある文章を読解するためには, 文章を読む以前にその文章に現れる単語の意味をある程度知っておく必要がある。つまり一定の単語情報が脳内に貯蔵されていなくてはならない。これは記憶システムのうちの長期記憶と関係があると考えられる。さらには, 読んだ単語がどのような意味を持っているのかという情報を脳内から検索する間, 一時的に文字情報を保持しておく必要がある。このような一時的な情報保持は, 短期記憶のシステムと関係がある。このようなことから, 読解は記憶システムと関連が深いと考えられている[4]。そして, 文中の一つの単語に複数の意味が考えられる場合などは, 前後の文脈を基に適切な意味を

推測する必要がある。また、文章を素早く読み進めるためには、次に書かれている内容をある程度予測する必要も生じる。このように、読解には記憶の保持と予測や推測といった処理が同時に求められる。本研究で使用した RST もターゲット語の記憶と音読といった処理が同時に求められるため、特性が似ている。本研究により、RST の成績と RST 遂行時の脳活動に有意な相関が認められたことから、読解力の神経基盤としての IIFG の関与を示唆することができた。

保持と処理は役割が異なるため、同時に要求される場合はエネルギーの配分を制御する必要がある。このような制御機構は、脳内の中央実行系が行っていると言われている[5]。本研究の関心領域である IIFG は、背外側前頭前野 (DLPFC) 近傍であり、中央実行系の制御機能の関与が示唆される。しかし、本研究では前頭領域のみの計測のため、他の前部帯状回 (ACC) などの中央実行系に関わる領域との関連性については言及できず、今後の課題である。また、一般的な読解力検査を実施しておらず、脳活動と一般的な読解力検査との直接の相関関係についても本研究では言及できず、今後の課題である。

本研究に NIRS を使用した理由は、参加者に対する低拘束性から、発声を伴う実験にも耐えうるためであるが、NIRS は子どものような動きのアーチファクトが生じやすい参加者に対しても比較的ロバストである[6][7][8]。その特性を生かすことで、まだ文字を知らない子どもの脳活動計測によって、将来の読解力を予測するようなことが期待できる。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(研究課題番号:18200018)の助成を受けて行われた。

参考文献

[1]Daneman M, Carpenter PA.(1980) Individual differences in working memory and reading. J.Verb.Learn.Verb.Behav, 19,450-466

[2]Osaka N,Osaka M,Kondo H,Morishita M,Fukuyama H,Shibasaki H.(2004) The neural basis of executive function in working memory:an fMRI study based on individual differences. Neuroimage , 21, 623-631

[3]Osaka M,Osaka N.(1994) Working memory capacity related to reading:measurement with the Japanese version of reading span test.Jpn.J.Psychol,65,339-345

[4]Just, M.A., and Carpenter, P.A.(1992) A capacity theory of comprehension:individual differences in working memory. Psychological Review,99,122-149.

[5]Baddeley,A.(1996) Exploring the central executive. The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 49A, 5-28

[6]Otsuka Y, Nakato E, Kanazawa S, Yamaguchi MK, Watanabe S, Kakigi R.(2007) Neural activation to upright and inverted faces in infants measured by near infrared spectroscopy. Neuroimage, 34,399-406.

[7]Tsujimoto S, Yamamoto T, Kawaguchi H, Koizumi H, Sawaguchi T.(2004) Prefrontal cortical activation associated with working memory in adults and preschool children: an event-related optical topography study. Cereb Cortex, 14,703-712.

[8] Matsuda, G., Hiraki, K. (2006) Sustained decrease in oxygenated hemoglobin during video games in the dorsal prefrontal cortex: A NIRS study of children. Neuroimage, 29, 706-711.