

Analysis of Working Memory Using the Reading Span Test: Basic Research of Regional Brain Activity on Brain Cortex Using Functional Near-infrared Spectroscopy

Tomoyuki HIROYASU* , Nozomi MASHIMA** and Utako YAMAMOTO*

(Received July 12, 2013)

In this paper, the relationship between a working memory capacity and a brain activity were evaluated using the results of a Reading Span Test (RST), which is a language working memory task. A cerebral blood flow change is one of the indexes of evaluating brain activities. functional Near-infrared Spectroscopy (fNIRS) is a non-invasive device to detect a cerebral blood flow change, so that it can be used to figure out the activated area of brain activities. In this paper, we focus on dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC) and the left inferior frontal gyrus (LIFG) as regions of interests (ROI). Functional activation of these ROIs was examined using fNIRS. It has been reported that DLPFC is responsible for continuing cautions, while LIFG manages language processing. Through the experiments, the following three points were observed. First, the functional relation between DLPFC and RST was observed. The subjects were classified into two groups; a high score and a low score groups. The cerebral blood flow changes in of the subjects in the low score group were greater than that of the subjects in the high score group. Second, in the both groups, LIFG was activated with the different active patterns; In LIFG, the brain activity was constant for in the high score group, while it was declining in the low score group. Lastly, the brain activity in the DLPFC region for the low score group increased.

Key words : functional Near-infrared Spectroscopy, Working memory, Reading span test, Inferior frontal gyrus

キーワード : fNIRS, ワーキングメモリ, リーディングスパンテスト, 下前頭回

リーディングスパンテストを用いたワーキングメモリの検討 : 大脳皮質の活性部位のfNIRSを利用した基礎的検討

廣安知之, 真島希実, 山本詩子

* Faculty of Life and Medical Sciences, Doshisha University, Kyoto
Telephone:0774-65-6932, Fax:0774-65-6780, E-mail:tomo@is.doshisha.ac.jp, uyamamot@mail.doshisha.ac.jp

** Graduate School of Life and Medical Sciences, Doshisha University, Kyoto
Telephone:0774-65-6020, Fax:0774-65-6019, E-mail:nmashima@mis.doshisha.ac.jp

1. はじめに

我々は、読んだり聞いたりした内容を並列的に保持しながら、続く情報処理に適切に対処することにより、様々な高次認知活動に対応している。例えば、会話の場面においても相手の話した内容を覚えておかなければ、会話を続けることができない。ワーキングメモリはこうした情報の処理と、処理した情報を活性化状態において一時的に維持する機能を支えている。ワーキングメモリのモデルにはいくつかのモデルが想定されている。その中でも最も一般的なのは Fig. 1 に示す Baddeley のモデルである¹⁾。

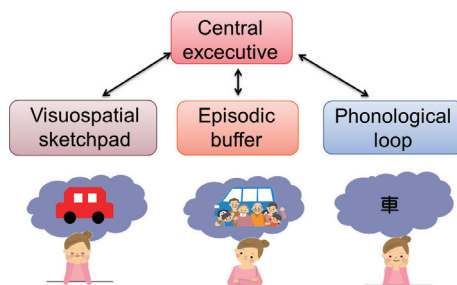


Fig. 1. Working memory model.

このモデルは、中心的な役割を担う中央実行系の制御のもとに言語的な情報処理に関わる音韻ループ、言語化できない情報を視覚情報・空間情報として維持する視空間スケッチパッド、エピソード情報などを扱うエピソードバッファの3つのサブシステムからなると考えられている。エピソードバッファはエピソード情報と音韻ループや視空間スケッチパッドで担いきれない情報を扱うために設定された。そして、3つのサブシステムに対応した長期記憶の関与が想定されており、自己経験や意味的理解の働きを助けるとされている。サブシステムの一つである音韻ループは音韻ストアに対応する領域が縁上回、構音リハーサルが下前頭回のブローカ領域で処理されていると考えられている。視空間スケッチパッドは右半球の前頭、運動前野、頭頂領域が活性すると考えられている。中央実行系の脳内機構については多くの研究で前頭前野のとくに前頭前野背外側部の活動が指摘されている¹⁾。

また、ワーキングメモリは一般的に容量があり、そ

れには制限や個人差があること、加齢の影響によりワーキングメモリ容量が低下し、認知課題や遂行能力の低下を及ぼすという報告が多くなされている²⁾。また、ワーキングメモリはトレーニングによって容量を増加させることができると考えられており、直接トレーニングを行った課題だけでなく、様々な認知活動の向上にも貢献しているという報告がある³⁾。このように、ワーキングメモリは日常生活を送るために必須の能力であり、加齢に伴う容量の減少を防ぐことや様々な認知機能の向上を図れることから、ワーキングメモリ容量を増加させようとする動きが多くなされている。

しかしながら、脳機能と関連したワーキングメモリ容量の評価方法は確立されておらず、自身のワーキングメモリの状態を知ることは困難である。そこで、本稿では特に個人差が現れるとされる言語性ワーキングメモリに注目する。そして、時間分解能の高いfNIRSを用いて脳活動に伴い変化する脳血流量を測定し、ワーキングメモリの個人差と脳血流量の関係について検討する。

2. リーディングスパンテスト

リーディングスパンテスト (RST: Reading Span Test) とはワーキングメモリ容量を測定するために開発されたテストである^{4, 5)}。ワーキングメモリは言語理解など高次認知機能と関連する情報の処理と、処理した情報を活性化状態において一時的に維持する機能を支えている。しかしながら、ワーキングメモリの保持と処理を支える機能には処理資源の制限と個人差があるとされている。情報の保持や処理の量が多いほど処理資源は限界に近づくこととなり、情報処理速度の低下や誤りが増加、そして保持も困難となる。このように処理資源が制約を受けたとき、認知活動がどの程度できるかにより個人差が生じるとされている。この個人差が高次な認知活動、特に言語理解に様々な影響を及ぼしていることが指摘されている⁶⁾。

こうしたワーキングメモリの個人差を測定するために二重課題法が用いられている。一次課題 (貯蔵を

求める課題)と二次課題(処理を求める課題)を被験者に課すことにより、並列作業下での記憶機能、つまりワーキングメモリの処理資源を調べることができると考えられている。そのなかでも、よく利用されているものがDaneman&Carpenterにより開発されたリーディングスパンテスト(以下RST)である。彼らは、ワーキングメモリ容量の個人差は読解の特に、ワーキングメモリの処理と保持のトレードオフの関係にあるのではないかと考え、情報の処理と記憶のトレードオフの関係を測定するために開発された。RSTは被験者に短文を口頭で読ませながら、その短文中の単語を保持させる課題である。文章は2文条件から始まり、3文、4文、5文と増やしていき、それぞれ5試行ずつ行われた。従って、2文条件では合計10文、3文条件では合計15文、4文条件では20文、5文条件では25文であり、各文の最後の単語を報告させる。

この課題では口頭で読むという情報処理を行うことで、ワーキングメモリの処理資源の大部分を消費させてしまう。このようなワーキングメモリの容量が削減された状態で、どれくらいの単語を保持できるかにより、読みと関連したワーキングメモリの個人差を測定することができる。例えば、読みの得意な人は読みにさほど容量を用いることがないため残された容量を他の処理に配分することができ、単語を多数保持できると考えられる。しかしながら、読みの不得意な人は言語処理が非効率なため、音読することに容量の大部分を消費してしまい、指示された単語を保持することが困難になると考えられる。つまり、RSTの成績が良いほどワーキングメモリ容量は大きいとされ、RSTの成績が悪いほどワーキングメモリ容量は小さいとされる。彼らはRSTの評価値と文章理解に有意な相関をもつことを見出し、RSTの成績と読みの理解が関連していることを主張している。またこれは、読みに限定しない一般的な言語処理におけるワーキングメモリの働きを背景にもち、認知活動の個人差を検討する有効な指標とされている。

この英語版RSTを参考に、苧坂らにより日本語版RSTの開発が行われた⁵⁾。彼らは、読みと関連するワーキングメモリ容量を日本語版RSTを用いて測定し、英語版RSTとの比較を行った。日本語の短文は、高等学校の教科書から80文選択し、文の長さは20文から30文のものとした。この80文を7段階の難易度評定(1が非常にやさしい、7が非常に難しい)が行われ、各文の評定値が高すぎるものと低すぎるものについては削除した。ターゲット語は英語版RSTは最後の単語であったが、日本語で文末の単語をターゲット語とするとほとんどが動詞となってしまうため、文中の単語の下に赤線をひいたものをターゲット語とした。これは、名詞、副詞、形容詞や動詞が含まれるように配慮してある。このようにして行われた日本語版RSTと英語版RSTの相関係数は0.72と高く、統計的に優位であった。このことから日本語版RSTがワーキングメモリ容量の測定として適切であることが示唆されている⁵⁾。また、日本語版RSTも英語版RSTと同様にRSTの評価値と読解の評価値との相関を認める結果を得ている。

さらに、苧坂らは読みの処理プロセスでのワーキングメモリが脳内のどの部位に関わっているかについては明らかにされていないことから、日本語版RSTを用いて脳機能との関連も検討している¹²⁾。彼らはRSTの高成績群をワーキングメモリ容量の大きい群、低成績群をワーキングメモリ容量の小さい群とし、fMRI(functional Magnetic Resonance Imaging)を用いて両群の差異を検討した。その結果、彼らはワーキングメモリの注意の維持や言語処理に関わるとされる左下前頭回は両群とも活性したとされている。しかし、競合状況を抑制する前部帯状回は高成績群のみに活性が認められている。このことから、低成績群に対して高成績群では競合状況を上手く抑制、情報の処理を行うことができ、両間に強いネットワークがあると結論づけている。しかし、fMRIは時間分解能が低いため、時間変化による両群間の差異を検討することができない。そこで、本稿では時間分解能の高いfNIRSを用いて時間変化による両群間の差

異について検討する。

3. fNIRS

fNIRS(Functional Near-Infrared Spectroscopy)は、近赤外光を用いて生体のヘモグロビン濃度を計測し、脳の活性化に伴う血流変化を評価する脳機能イメージング装置である^{7, 8)}。fNIRSは脳の神経活動時に、脳血管が拡張し脳血流が上昇することを利用して大脳表面に流れる血流変化を得る。外界からの刺激に対して脳が活動することで、ヘモグロビンの酸化還元率が変化することを利用しており、ヘモグロビンの酸素化状態によって脳活動の変化を検出することができる。

Fig. 2 に測定原理の概略図を示す。

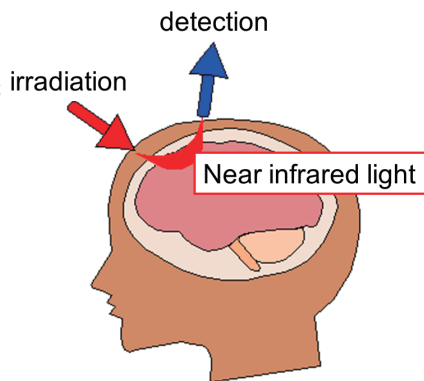


Fig. 2. Measurement principle.

Fig. 2 に示すように、頭皮の上から近赤外光をファイバで照射することで、頭部の組織内で散乱・吸収を繰り返す、約 20mm 程度の大脳皮質まで到達する。ヘモグロビン濃度の違いにより近赤外光の強度が変化し、変化した近赤外光を約 30mm 程度離れた位置で検出する。この反射光を測定し、大脳皮質の酸素化ヘモグロビン (Oxy-Hb)、脱酸素化ヘモグロビン (Deoxy-Hb) の濃度変化を計測するシステムとなっている。

この生体組織の光測定には 700~900nm の近赤外光が使用される。これは近赤外光よりも波長の短い可視光ではヘモグロビンなどの吸収が大きく、長い波長では水の吸収が大きく、光が生体内を進めないためである。また、波長によって Oxy-Hb と Deoxy-Hb

の光の吸収スペクトルが異なるため、2 波長以上での吸光量を計測することで Oxy-Hb と Deoxy-Hb の濃度変化を算出することができる。つまり、波長の異なった近赤外光を用いることにより、脳内の Oxy-Hb と Deoxy-Hb の濃度変化量についての連立方程式を解くことができ、Oxy-Hb の相対的な増加量を検知することで脳活動の変化を測定することが可能となる。

fNIRS は他の脳機能イメージング装置と比べて非侵襲性で、時間分解能が高く、より自由な体勢で脳機能を測定できるという特徴から、躁鬱病の診断装置など臨床検査ツールとして期待されている^{9, 10)}。

4. 実験

4.1 被験者と実験環境

9 名 (男性:1 名, 女性:8 名) に参加して頂き、fNIRS を用いて脳血流量を測定した。fNIRS は日立メディコ製の ETG-7100 の 3 プローブ (72 チャンネル) を用いて国際 10 - 20 法に基づき、前頭部および両側頭部に設置した。室温は 21.3~24.5℃、湿度は 47~52% である。

4.2 実験概要

荻坂らの日本語版 RST⁵⁾ を参考に実験を行った。RST に用いる短文は提示画面内に高等学校の教科書から引用した。予備実験として 2 文条件から 5 文条件までそれぞれ 5 セットずつ行った。短文は提示画面内の 1 行に収まるようにし、文中の単語の下に赤線を引いた単語をターゲット語とし、記憶、解答させた。セット間には白紙の画面を表示した。このように RST を用いて実験を行い、各条件ごとに得点化した結果、成績の悪い被験者と成績の良い被験者の差が大きかったのは 5 文条件であった。これより、5 文条件が被験者間でワーキングメモリ容量の差異が現れると考えた。また、十分に容量を使った時により個人差が現れる⁶⁾ という報告より、5 文条件の RST 課題時の脳血流量変化を fNIRS で測定した。実験後は、どのような方法で単語を記憶したかアンケートを実施した。実験設計を Fig. 3 に示す。

レスト期間は 60 秒間画面を注視しながら「あいう

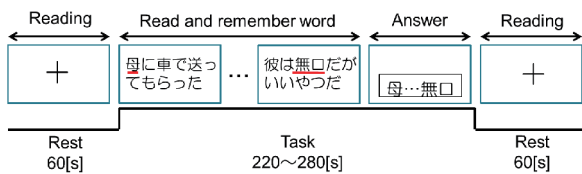


Fig. 3. Flow of experience.

えお」と音読する。タスク期間は1文を読みながら赤線のターゲット語を覚えることを5文繰り返し、白紙の画面が表示されたら記憶した単語を口頭で回答する。これを5回繰り返す。

4.3 解析方法

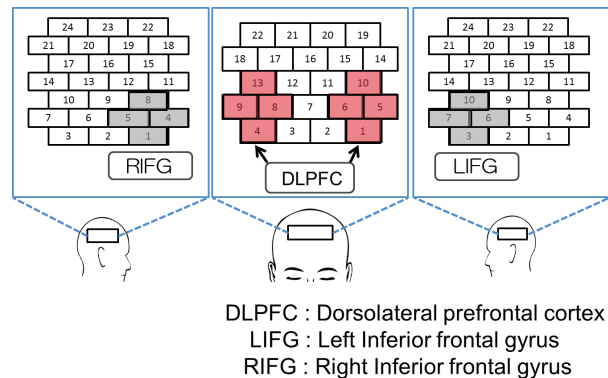
fNIRS から得られたデータの処理方法は、フィルタ処理としてローパスフィルタ 1.0 Hz をかけた。また、ノイズの影響を取り除くため移動平均時間 10s で移動加算平均処理を行った。これによりターゲットとなる反応を明瞭化したり、アーチファクトと呼ばれる光ファイバの接触不良などといった脳機能に関係しない Oxy-Hb の変化を軽減できるとされる。さらに、生理的なゆらぎ (様々な周波数帯域の大小様々な変動) が偽りの脳活動変化を表していることがある。数回の加算平均では消失しない変動であり、単純な引算法による分析を行うと、脳活動があるかのような変化が現れることがある。ゆらぎが偽りの脳活動を引き起こしているかは課題の進行と同期して、Oxy-Hb が変化しているかどうかにより判断することができる¹¹⁾。そのため、ゆらぎがあるか目視で確認を行い、同一条件で比較するためタスク開始直前の 30 秒間とタスク終了から 30 秒後の 30 秒間でベースライン処理を行った。

RST の正答率より正答率の高い被験者 4 名を高成績群、低い被験者 4 名を低成績群とした。fNIRS では光路長の長さを測定できないので、同じチャンネルでも被験者により異なる可能性はある。したがって、原理的には複数人データの加算平均や被験者間データの比較などの分析は、問題があることになる。しかしながら、光路長の個人差やチャンネル間の差は小さいという報告があることから、実際の計測では大きな問題とはならないとされている¹¹⁾。よって、

今回は脳活動の傾向を検討するため、両群の加算平均処理をした fNIRS データを用いる。

4.4 検討方法

Baddeley のワーキングメモリのモデルに基づき、着目部位を決定した。ワーキングメモリの概念で制御作用を果たす中央実行系と、言語に関わる処理を行う音韻ループに着目する。中央実行系は前頭前野背外側部 (Dorsolateral prefrontal cortex : DLPFC)、音韻ループは左下前頭回 (Left Inferior frontal gyrus : LIFG) にあるとされている¹⁾。前頭前野背外側部と下前頭回は以下に示すチャンネルの加算平均した値を用いた。



DLPFC : Dorsolateral prefrontal cortex
LIFG : Left Inferior frontal gyrus
RIFG : Right Inferior frontal gyrus

Fig. 4. Dorsolateral prefrontal cortex and Inferior frontal gyrus.

本実験では前頭前野背外側部 (以下 DLPFC) と左下前頭回 (以下 IFG) に着目し、RST 成績による 3 つの検討を行った。

- RST 成績

RST 成績を算出し、課題成績の高い被験者 4 名と課題成績の低い被験者 4 名の平均値を t 検定により、優位な差があるのか確認する。

- RST 成績と DLPFC の関係の検討

ワーキングメモリ概念のうち注意の機構を行うとされる DLPFC において脳血流量変化と RST 成績との関係を検討する。左右の DLPFC の機能に大きな差はないとの報告から左右の DLPFC の平均値を用いて RST との関係性を確認した。

- 高成績群と低成績群の脳血流量変化の差異の検討
RST は言語性ワーキングメモリ課題であることから、言語処理を行う LIFG において両群間での脳血流量変化パターンの差異を確認した。また、RST は言語処理と注意の機構を必要とする言語性ワーキングメモリ課題であるので、高成績群と低成績群において DLPFC と LIFG の関係について脳血流量変化に差異があるか検討した。

5. 結果

5.1 RST 成績

RST の得点法は個人差を検討するならばスパン得点法以外の方法が良い¹³⁾ ことから正再生数を採用した。RST5 文条件の 9 名の正答率を Table.1 に示す。

Table 1. RST of percentage of correct answers.

被験者	A	B	C	D	E	F	G	H	I
正答率	36	44	48	52	56	68	72	72	88

この中で、正答率の低い被験者 4 名 (A,B,C,D) の平均値と分散、正答率の高い被験者 4 名 (F,G,H,I) の平均値と分散を Fig. 5 に示す。RST の正答率の平均は低成績群で 45 %、高成績群で 75 %で、t 検定により有意差 ($P < .01$) が認められた。ただし、標準偏差は高成績群で 0.13、低成績群で 0.16 であった。

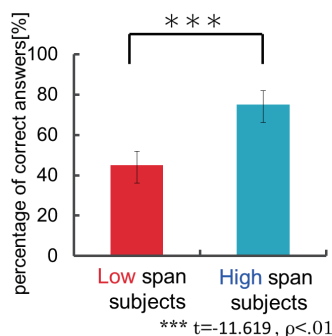


Fig. 5. Percentage of correct answers.

5.2 RST 成績と DLPFC の関係の検討

DLPFC と RST 成績の関係を Fig. 6 に示す。ただし、DLPFC は前頭部の左右にあるが、ワーキングメモリの注意を維持する機能に差異はないと考えられていることから、左右の活性の大きさを平均したものをを用いた。

モリの注意を維持する機能に差異はないと考えられていることから、左右の活性の大きさを平均したものをを用いた。

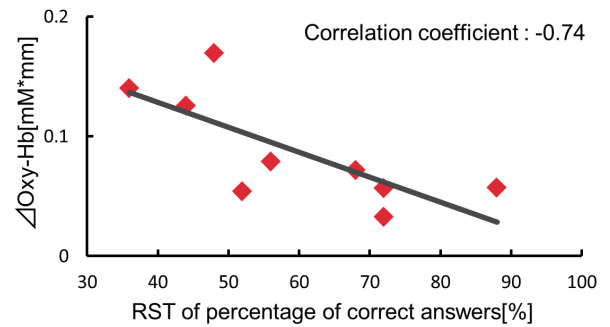


Fig. 6. Relationship between RST results and changes in Oxy-Hb.

Fig. 6 より、DLPFC において成績の低い人ほど活性が大きく、成績の高い人ほど活性が小さい傾向が得られた。DLPFC において両群にの血流変化パターンに差異が生じることがわかった。

5.3 高成績群と低成績群の脳血流量変化の検討

RST5 文条件を 5 回繰り返し時 (レスト含め約 300 秒) の脳血流量変化を Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 に示す。ただし、60 秒後からがタスク開始で緑で囲まれた部分で示す。また、青色が高成績群、赤色が低成績群の Oxy-Hb 濃度の変化である。

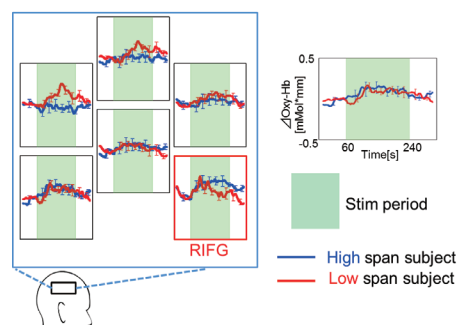


Fig. 7. Changes in Oxy-Hb at right temporal region.

これより、着目していた DLPFC やワーキングメモリ部位である両下前頭回、右頭頂付近に活性がみられた。

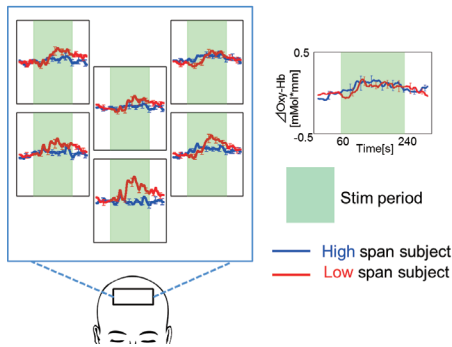


Fig. 8. Changes in Oxy-Hb at prefrontal cortex.

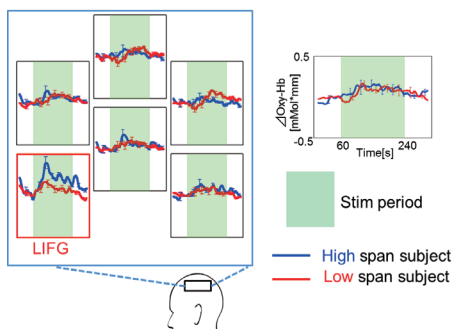


Fig. 9. Changes in Oxy-Hb at left temporal region.

6. 考察

LIFGには言語処理を司るとされるブローカ領域があるとされる。高成績群が低成績群に比べ、活性が大きい理由は単語の覚え方に差がある可能性が考えられる。実験後のアンケートで、高成績群は単語のイメージや作文をつくるなど方略を利用しているのに対し、低成績群ではほとんど方略は利用されていない。高成績群は方略を必ず利用しているのに対し、低成績群は全く使用していないものもいた。低成績群はどこに焦点を与えるべきなのかといった自己モニターができていない可能性がある¹⁴⁾。これより高成績群はどのように単語を覚えたらよいのかを試してみたり、どこに注意の焦点を与えるべきなのかを判断することで、多くの単語を記憶することができ、高成績に繋がったと考えることができる。一方で、低成績群では上手く方略を利用することができず、単語を完全に覚える間もなく次の課題に進まなければならない可能性が考えられる。

高成績群と低成績群では言語を理解する構成要素、言語処理が異なり、これが総容量の差異として表れる^{6, 15)}。このことから、高成績群は言語処理が優位に働いたことでLIFGにおける脳血流の活性が大きく、持続されている可能性が考えられる。それに対して、低成績群は高成績群に比べて活性が小さく、時間とともに活性が低下する傾向にある。

そこで、両群のワーキングメモリに関わるDLPFCとLIFGの関係をFig. 10に示す。

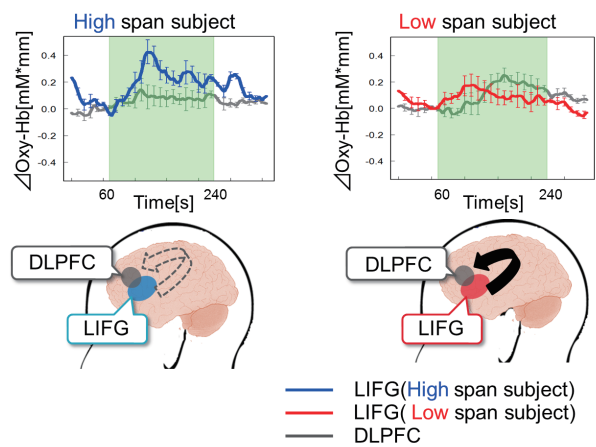


Fig. 10. Relationship between DLPFC and LIFG.

Fig. 10に示すように両群ともにLIFGの活性は認められるが、活性パターンに違いがある。高成績群ではLIFGで大きい活性があり、活性も持続している。しかし、DLPFCでの活性はほとんどみられない。それに対して、低成績群ではまずLIFGで活性するが、徐々に活性の低下がみられた。それと同時にLIFGの機能を補うかのようにDLPFCでの活性が上昇する傾向が得られた。このように低成績群においてのみ時間差で注意の機構に関わる部位の活性が認められた。RSTは言語の処理と注意の維持が処理資源を分け合っている¹⁴⁾という報告がある。この文献より、低成績群は高成績群に比べて言語処理が上手く機能できなかったため、言語処理の違いを補うために注意の機構に関わる部位を活性させることで、課題処理に対応しようとした可能性が考えられる。

また、低成績群においてみられた前頭部と右頭頂付近の活性は上手く自己モニターできないためであると考えられる。低成績群は注意のフォーカスの移

動に時間がかかり、対象の課題に対して注意を向け、不要となるものを抑制することが困難とされる¹⁴⁾。活性が認められた前頭部の右半球や右頭頂部は出来事を抑制する注意の機構があることから不要なものを抑制し、正しい課題目標に注意をむけようと奮闘したことが、低成績群の前頭部や右頭頂付近の大きい活性に繋がった可能性が考えられる。

7. まとめ

本研究では、RST を用いてワーキングメモリ容量の個人差と脳血流量変化の関係性について検討することを目的とした。実験の結果は、DLPFC において RST 成績と脳血流量変化の関係は成績の良い人ほど活性は小さく、成績の悪い人ほど活性が大きかった。また、高成績群と低成績群において脳血流量変化を検討した時、高成績群は LIFG での活性が持続しているが、DLPFC では活性が認められなかった。低成績群では LIFG での活性は低下すると同時に DLPFC での活性が上昇した。また、低成績群のみに前頭部や右頭頂部付近に大きな活性が認められた。これらの結果から、ワーキングメモリ容量の差異により脳血流量変化にも違いが生じることが示唆された。

参考文献

- 1) A. Baddeley, “The episodic buffer : a new component of working memory?”, *Trends in Cognitive Sciences*, **11**(4), 417–423 (2000).
- 2) 山口典子, 大崎聡美, 二木淑子, “注意切替課題実施時の前頭前野領域における脳賦活に対して, 年齢・課題遂行・課題特性が及ぼす影響—NIRS による検討—”, *健康科学*, **7**, 9–16 (2011).
- 3) 川島隆太, “咀嚼は脳トレになるか”, *日本顎口腔機能学会雑誌*, **18**(1), 1–5 (2011).
- 4) M. Daneman and P. A. Carpenter, “Individual difference in working memory and reading”, *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, **19**(4), 450–466 (1980).
- 5) 苧坂満里子, 苧坂直行, “読みとワーキングメモリ容量—日本語版リーディングスパンテストによる測定—”, *The Japanese Journal of Psychology*, **65**, 339–345 (1995).
- 6) M. A. Just and P. A. Carpenter, “A Capacity Theory of Comprehension : Individual Differences in Working Memory”, *Psychological Review*, **10**(20), 435–442 (1994).
- 7) A. Villringer, J. Planck, C. Hock and L. Schleinkofer, “Near infrared spectroscopy (NIRS): a new tool to study hemodynamic changes during activation of brain function in human adults”, *Neuroscience Letters*, **154**, 101–104 (1990).
- 8) 小泉英明, 牧敦, 山本強, 山本由香里, 川口英夫, “脳と心を観る—無侵襲高次脳機能イメージング—”, *電気情報通信学会誌*, **87**(3), 207–214 (2004).
- 9) 福田正人, “精神疾患の診断・治療のための臨床検査としての NIRS 測定”, *MEDIX*, **39**, 4–10 (2003).
- 10) 上床真美, 俣江忠, 塗木淳夫, 辻村誠一, 湯ノロ万友, 黒野明日嗣, “Sternberg 課題遂行中の脳波トポグラフィによる認知症早期診断法の予備的研究”, *生体医工学*, **47**(1), 64–69 (2009).
- 11) 福田正人, 亀山正樹, “NIRS”, *臨床精神医学*, 584–588 (2004).
- 12) N. Osaka, M. Osaka, H. Kondo and M. Morishita, “The neural basis of executive function in working memory : an fMRI study based on individual differences”, *NeuroImage*, **21**, 623–631 (2004).
- 13) 大塚一徳, 宮谷真人, “日本語リーディングスパン・テストにおけるターゲット語と刺激文の検討”, *広島大学心理学研究*, (7), 19–33 (2007).
- 14) 苧坂直行, *ワーキングメモリの脳内表現*, (京都大学学術出版会, 京都, 2008), p.77-102.
- 15) 中西弘, 横川博一, “リーディングスパンテストの再生成績に影響を与える処理要因—日本語英語学習者を対象にした実証研究—”, *信学技報*, **11**(47), 49–54 (2011).