

原著

## ワーキングメモリ課題における 入出力モダリティの違いが前頭葉活動に及ぼす影響

山口美月\*<sup>1</sup> 彦坂和雄\*<sup>2</sup> 細川貴之\*<sup>2</sup>

### 要 約

言語聴覚療法の臨床場面では、Working Memory (WM) を測定するために数唱課題が広く使用されているが、聴覚入力-音声出力で実施する検査であるため、失語症や構音障害、聴覚障害をもつ人には使用しにくい。また、数唱課題を用いた脳機能イメージングは以前より研究されていたが、入力と出力のモダリティの影響についてはあまり研究されていない。今回、WM 課題における入出力モダリティの違いが脳活動に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、健常大学生19名を対象に、数唱課題を行っているときの脳活動を functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) で記録した。刺激は、ランダムな数字列を使用し、入力2種類（聴覚と視覚）、出力2種類（音声とタッチ）とし、順唱と逆唱を行った。その結果、ほとんどのチャンネルにて出力モダリティおよび順唱/逆唱の違いで脳活動に差が認められた。各条件での脳血流の時間的変化を比較したところ、順唱では出力モダリティの違いによって異なる時系列パターンを示したが、逆唱ではそのような傾向は見られず、出力モダリティに関係なく同じような波形を示した。一方で、前頭葉内で WM の入出力モダリティの違いによる機能局在は観察されず、前頭葉内で異なる WM が混在している可能性が示唆された。

### 1. 緒言

Working Memory (以下、WM) とは、作業に必要な情報を一時的に保存し処理するための記憶であり、行動のプランを考へることや、その実行にかかわる記憶をさす<sup>1)</sup>。たとえば料理をする際、今行っている作業をしながら、次の工程で必要となる作業を考へるためには WM が必要となる。WM の一般的なモデルとして、Baddeley<sup>2)</sup>によるものがある。そのモデルによると、WM は中央実行系と3つのサブシステム（音韻ループと視空間スケッチパッド、エピソードバッファ）から構成されている。音韻ループは言語性の WM、視空間スケッチパッドは視覚性の WM と対応している。一方で、エピソードバッファは、音韻ループと視空間スケッチパッドを調整し、知識に関わる長期記憶などをほかのサブシステムと接続する働きを担うと想定されている。これら3つのサブシステムは、中央実行系にて制御されている。

現在の言語聴覚療法の臨床現場では、注意機能や WM を簡便に調べるために、数唱課題などの行動課題が広く使用されている<sup>3,6)</sup>。数唱課題とはランダムな数字列を記憶する課題である。呈示されたのと同じ順番で復唱し答える順唱と、逆の順番で答える逆唱の2種類がある。しかし、失語症や構音障害の患者は話すことが難しかったり、聴覚障害の患者は声を聴くことが難しいため、これらの検査は使用しにくい。そのため、それぞれの患者の病態に合わせた、多様な WM 検査が必要とされている。しかし、WM 検査で使用される課題は、健常者を対象としたものが多く、健常者以外の被験者で WM にどのような影響があるかは明らかでないことが多い。さらに、そのような WM 課題の入力方法や出力方法を変化させた場合、脳の反応特性（機能局在など）がどうなるかについても不明である。

これまでの WM に関する脳活動は、多くの脳機能イメージング研究で調べられてきた。たとえ

\*1 川崎医療福祉大学大学院 医療技術研究科 感覚矯正学専攻

\*2 川崎医療福祉大学 リハビリテーション学部 視能療法学科

(連絡先) 細川貴之 〒701-0193 倉敷市松島288 川崎医療福祉大学

E-mail : t-hosokawa@mw.kawasaki-m.ac.jp

ば、二重課題時に中前頭回 (Brodmann Area (BA) 46/9野) や腹外側領域 (BA44, 45, 47などの下前頭回) などの前頭前野背外側部 (dorsolateral prefrontal cortex : DLPFC) が活性化することが知られている<sup>7)</sup>。しかし、研究によって活性化する脳部位に違いもみられており、その理由として、課題の難易度や刺激モダリティの違いが考えられる。

Rottschy et al.<sup>8)</sup>は、WM 課題において、どの脳領域がどのように活動するかを189の研究例で、大規模なメタ分析を行った。その結果、BA44/45、島皮質前方、上前頭回後方、下前頭回、前補足運動野、頭頂間溝、上頭頂小葉で一貫して両側性の活動が見られた。課題の難易度が高くなると、前補足運動野やBA44/45、腹側前運動野、前頭前皮質を含む下前頭回領域に高い活動が見られるようになった。さらに、覚える対象が言語性の刺激である場合は左側BA44/45で高い活性化がみられるのに対し、非言語性の刺激である場合は左側前補足運動野と両側背側前運動野がより強い活性化が見られた。また、ほかの研究では、前頭前野と頭頂葉皮質、小脳と基底核を含む様々なネットワークが活動するという報告がある<sup>9)</sup>。このようにWMにかかわる課題であっても、実験条件が異なると脳活動も異なることが分かっている。

本研究では、WM 課題における入出力モダリティの違いが脳活動に及ぼす影響を調べるため、数唱課題を刺激の呈示 (入力) 方法を聴覚と視覚の2種類、反応の表出 (出力) 方法を音声とタッチの2種類を組み合わせて実施した。さらに被験者がWM課題を遂行中に、機能的近赤外分光法 (functional near-infrared spectroscopy 以下、fNIRS) を用いて前頭葉の脳血流を測定した。fNIRSは近赤外光が皮膚や骨などの組織を透過し、血中のヘモグロビンに吸収されるという特性を利用することで、神経活動に伴って変化する酸素化ヘモグロビン (oxygenated hemoglobin 以下、oxy-Hb)、脱酸素化ヘモグロビン (deoxygenated hemoglobin 以下、deoxy-Hb) の濃度変化を定量化する手法である。これらの経時的な変化は、脳局所の神経細胞活動の結果、脳血流が増減することに起因すると考えられている<sup>10)</sup>。またfNIRSは、他の脳機能イメージング手法に比べて測定が簡便で、測定場所や測定時の被験者の動きに制約が少ないといった利点があり、日々の臨床場面でリハビリの効果を客観的に評価する指標となりやすい。この研究により、WM 課題の入出力モダリティの違いが脳活動にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることを目的とした。

## 2. 方法

### 2.1 被験者

脳血管疾患や精神疾患および視聴覚障害がない男女19名 (男性8名、女性11名、平均年齢21.3歳) に実施した。利き手は、右利き18名 (うち1名は矯正歴あり)、左利き1名であった。本研究の内容について十分な説明を行った後、同意が得られた者を研究の対象とした。また実験中、なるべく体動が少なくなるよう、椅子に深く腰掛けてもらった。

### 2.2 測定装置

脳血流の測定には、Spectratech社のfNIRS (Spectratech OEG-17APD)を使用した。Spectratech OEG-17APDは、6つの赤外光の照射プローブと6つの赤外光の受光プローブがあり、縦横3×4の構成となっており、全部で17チャンネルの測定が可能であった (図1A)。サンプリング周波数は12.2Hzであった。プローブ間の距離は30mmで、前額部に、国際法10-20法に従って、一番下の列の中央がFpzに対応するように配置した。

### 2.3 行動課題

#### 2.3.1 事前課題

まず、利き手の確認を行った。次に、本課題で使用する桁数を決定するために、被験者毎に標準注意検査法 (Clinical Assessment for Attention 以下、CAT) のDigit Spanのbackwardを実施した。ランダムな数字列を呈示し、その逆の順番で答えてもらった。2桁より開始し1つずつ桁数を増やし、各桁数で2つとも正答した桁数を被験者のWM容量とし、本課題にて使用した。

#### 2.3.2 本課題 (数唱課題)

数唱課題では、事前に決定した桁数の数字が順番に呈示され、被験者にそれを覚えてもらった (図1B)。すべての数字が呈示されたあと、被験者は呈示されたのと同じ順番 (順唱) もしくは呈示されたのと逆の順番 (逆唱) でその数字を表出することが求められた。呈示 (入力) 方法は聴覚と視覚の2種類、表出 (出力) 方法は音声とタッチの2種類とした。さらにそれぞれの入力-出力の組み合わせで、順唱と逆唱を実施した。つまり、入力 (2種類) × 出力 (2種類) × 順唱・逆唱 (2種類) の合計8条件を用意した。実験課題はPsychoPyで作成したプログラムをノートパソコン (HP Pavilion 15-eg2029TU) で動かすことで実施した。数字は1秒間隔で呈示され、視覚呈示条件では画面中央に数字が1つずつ呈示された。音声呈示条件では、スピーカーから事前に録音した音声呈示された。また音声出力条件では、刺激呈示後、被験者には声で数字を覚えてもらった。タッチ出力条件では、画面に表示された9つの数字を順

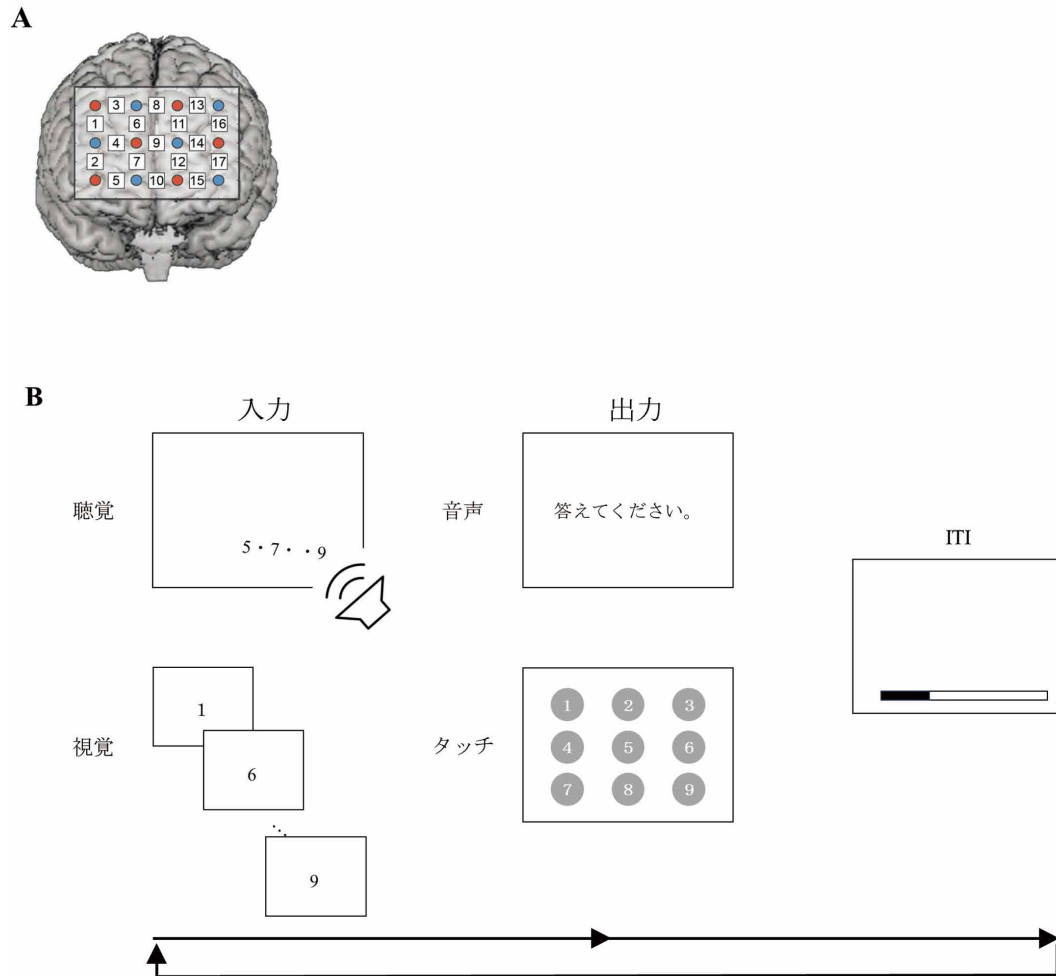


図1 NIRSプローブの配置と実験の流れ

A : fNIRS プローブの配置. 赤丸は照射プローブ, 青丸は検出プローブ, 番号は各チャンネルに対応する

B : 実験の流れと各条件でのディスプレイ表示  
ITI : inter-trial interval

番にタッチすることで答えてもらった。被験者の反応（音声およびタッチ）は課題プログラムを動かしているパソコンで記録した（音声は声の録音、タッチは反応した数字の記録を行った）。条件ごとに10試行繰り返した。

まず、課題を実施する前に練習を行い、呈示される刺激や出力の方法を確認してもらった。課題条件は、「聴覚入力—音声出力」「視覚入力—音声出力」「視覚入力—タッチ出力」「聴覚入力—タッチ出力」の順で、それぞれ順唱と逆唱を行い、10試行の数唱課題を行った。試行間（inter-trial interval ; ITI）には10秒間の待ち時間を設けた。各実験課題の合間には、被験者の疲労感に応じて休憩をとった。

#### 2.4 統計解析

被験者が数唱課題を遂行中の脳血流反応を解析した。毎試行、刺激呈示3秒前をベースラインとし、

刺激呈示から反応終了後7秒までを解析区間とした。一般的に、脳血流はイベントに対して反応が遅く<sup>11,12)</sup>、本研究においても反応終了後7秒付近まで脳血流の反応が残っていることが観察されたため、反応終了後7秒までを解析区間とした。fNIRS から得られた各チャンネルの oxy-Hb および deoxy-Hb のデータは、0.01-0.3 Hz のバンドパスフィルターでデジタル処理した。その後、Yamada et al.<sup>13)</sup> によって提唱された血流動態信号分離法によってデータを変換した。

①入力モダリティ（聴覚と視覚）、②出力モダリティ（音声とタッチ）、③順唱/逆唱の3要因の分散分析を各チャンネルのデータで行った。また脳活動の時系列パターンの類似性を定量化するため、各条件間で時系列データの相関係数（ピアソン相関係数）を計算した。

### 3. 結果

19名の被験者のうち、事前課題で決定した桁数は、3桁が2名、4桁が13名、5桁が4名であった。まず、入出力モダリティが前頭葉に与える影響について調べるために、8つの課題を各チャンネルごとに分散分析を行った(図2, 表1)。①入力モダリティ(聴覚と視覚)、②出力モダリティ(音声とタッチ)、③順唱/逆唱、の3つを要因とした。入力モダリティの要因では、どのチャンネルにおいても有意差は認められなかった。出力モダリティの要因では、チャンネル1, 4, 7, 10, 16以外で主効果が認められた。全体的に音声出力に比べてタッチ出力で高い活動が見られた。順唱/逆唱の要因では、チャンネル13以外で主効果が認められた。全般的に順唱に比べて逆唱で、高い活動が見られた。交互作用はどの要因の組み合わせでも認められなかった。

次に図3に、各チャンネルの脳血流の時間的変化を示した。順唱では、出力(音声とタッチ)の違いによって、異なる波形の時系列パターンが観察された。音声出力では、刺激呈示後から緩やかに上昇し、刺激呈示後8秒付近でピークを迎えそこから下降して

いるのに対し、タッチ出力では、刺激呈示後、ゆるやかに上昇し、明確なピークが見られないチャンネルが多かった。それに対し逆唱では、音声出力では順唱と同様に刺激呈示後8秒付近でピークが見られた。しかし、タッチ出力では、順唱と異なり、多くのチャンネルで刺激呈示後8秒付近にてピークが観察された。そこで、得られた波形のパターンがどの程度類似しているかを調べるために、異なる課題条件間で時系列パターンを比較した。比較する2つの条件間で、対応する各時点のデータをペアにし、それらのデータから相関係数を計算した。2つの条件における脳活動が似たような時間的変化をした場合、相関が高くなると考えられる(図4, 表2)。順唱における相関係数は、聴覚入力-音声出力と聴覚入力-タッチ出力が0.46, 聴覚入力-音声出力と視覚入力-音声出力が0.88, 聴覚入力-音声出力と視覚入力-タッチ出力が0.80, 聴覚入力-タッチ出力と視覚入力-音声出力が0.58, 聴覚入力-タッチ出力と視覚入力-タッチ出力が0.74, 視覚入力-音声出力と視覚入力-タッチ出力が0.78であった。一方に「聴覚入力-タッチ出力」条件がある時に相関係数が低くなる

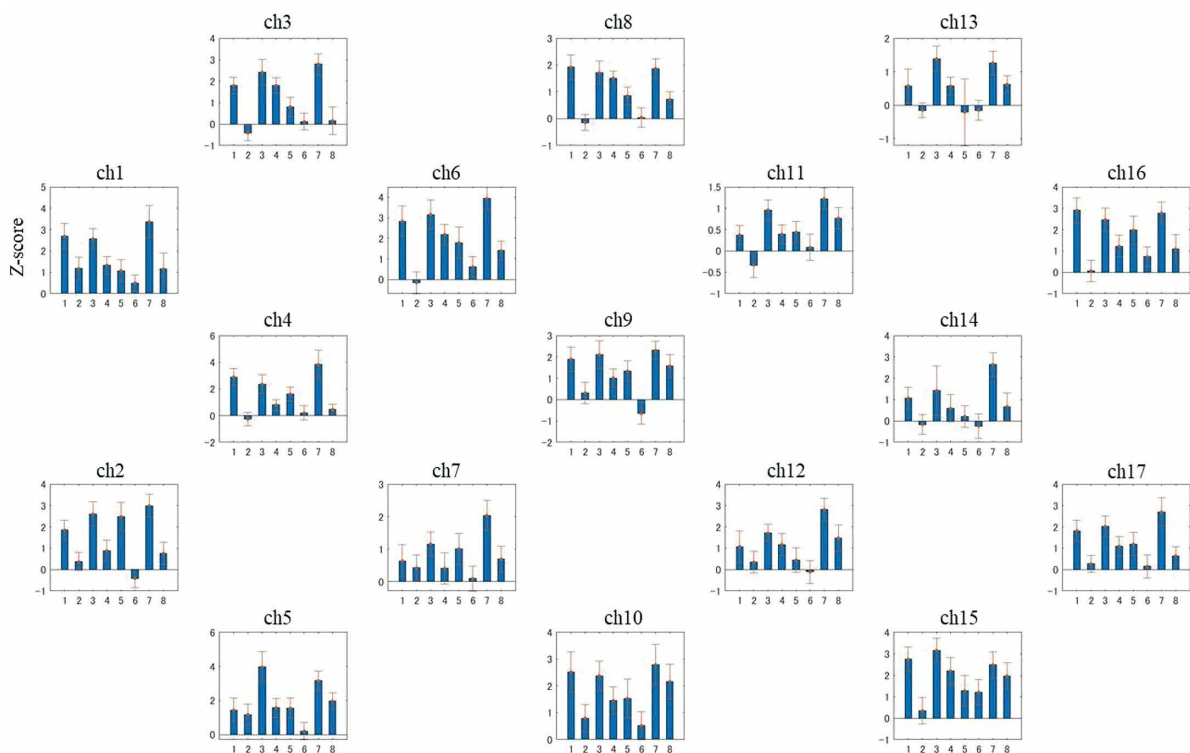


図2 入出力モダリティが前頭葉に与える影響

縦軸 標準化された脳活動 (Z-score, 平均±標準誤差)

横軸 1: 聴覚入力-音声出力-逆唱, 2: 聴覚入力-音声出力-順唱, 3: 聴覚入力-タッチ出力-逆唱, 4: 聴覚入力-タッチ出力-順唱, 5: 視覚入力-音声出力-逆唱, 6: 視覚入力-音声出力-順唱, 7: 視覚入力-タッチ出力-逆唱, 8: 視覚入力-タッチ出力-順唱

表1 有意差のあったチャンネルにおける分散分析の結果

**A**

チャンネル	音声 (平均±標準誤差)	タッチ (平均±標準誤差)	F値	p値
2	1.07±0.26	1.81±0.27	4.07	0.04
3	0.57±0.20	1.79±0.27	13.05	0.00
5	1.09±0.30	2.66±0.33	12.38	0.00
6	1.27±0.32	2.67±0.28	10.71	0.00
8	0.67±0.19	1.45±0.17	9.74	0.00
9	0.72±0.26	1.75±0.26	8.00	0.00
11	0.14±0.14	0.83±0.12	14.68	0.00
12	0.44±0.30	1.79±0.26	11.59	0.00
13	0.02±0.29	0.96±0.16	8.11	0.00
14	0.22±0.26	1.33±0.39	5.64	0.02
15	1.39±0.31	2.45±0.30	5.89	0.02
17	0.86±0.25	1.61±0.26	4.45	0.04

**B**

チャンネル	順唱 (平均±標準誤差)	逆唱 (平均±標準誤差)	F値	p値
1	1.04±0.27	2.42±0.30	11.76	0.00
2	0.40±0.23	2.48±0.28	32.33	0.00
3	0.41±0.23	1.95±0.25	21.04	0.00
4	0.30±0.23	2.67±0.39	28.00	0.00
5	1.23±0.27	2.52±0.36	8.39	0.00
6	1.00±0.25	2.93±0.35	20.23	0.00
7	0.41±0.21	1.21±0.23	6.87	0.00
8	0.53±0.15	1.59±0.20	17.61	0.00
9	0.56±0.24	1.91±0.27	13.96	0.00
10	1.23±0.28	2.30±0.35	5.80	0.02
11	0.23±0.14	0.75±0.12	8.29	0.00
12	0.72±0.27	1.51±0.29	3.95	0.05
14	0.21±0.29	1.34±0.37	5.76	0.02
15	1.43±0.31	2.42±0.31	5.11	0.02
16	0.77±0.27	2.53±0.29	19.48	0.00
17	0.54±0.23	1.94±0.28	15.21	0.00

有意差が見られたチャンネルの主効果のみ記載している。またF値の自由度はいずれも(1, 1513)であった。

A: 出力モダリティ(音声とタッチ)の主効果

B: 順唱/逆唱の主効果

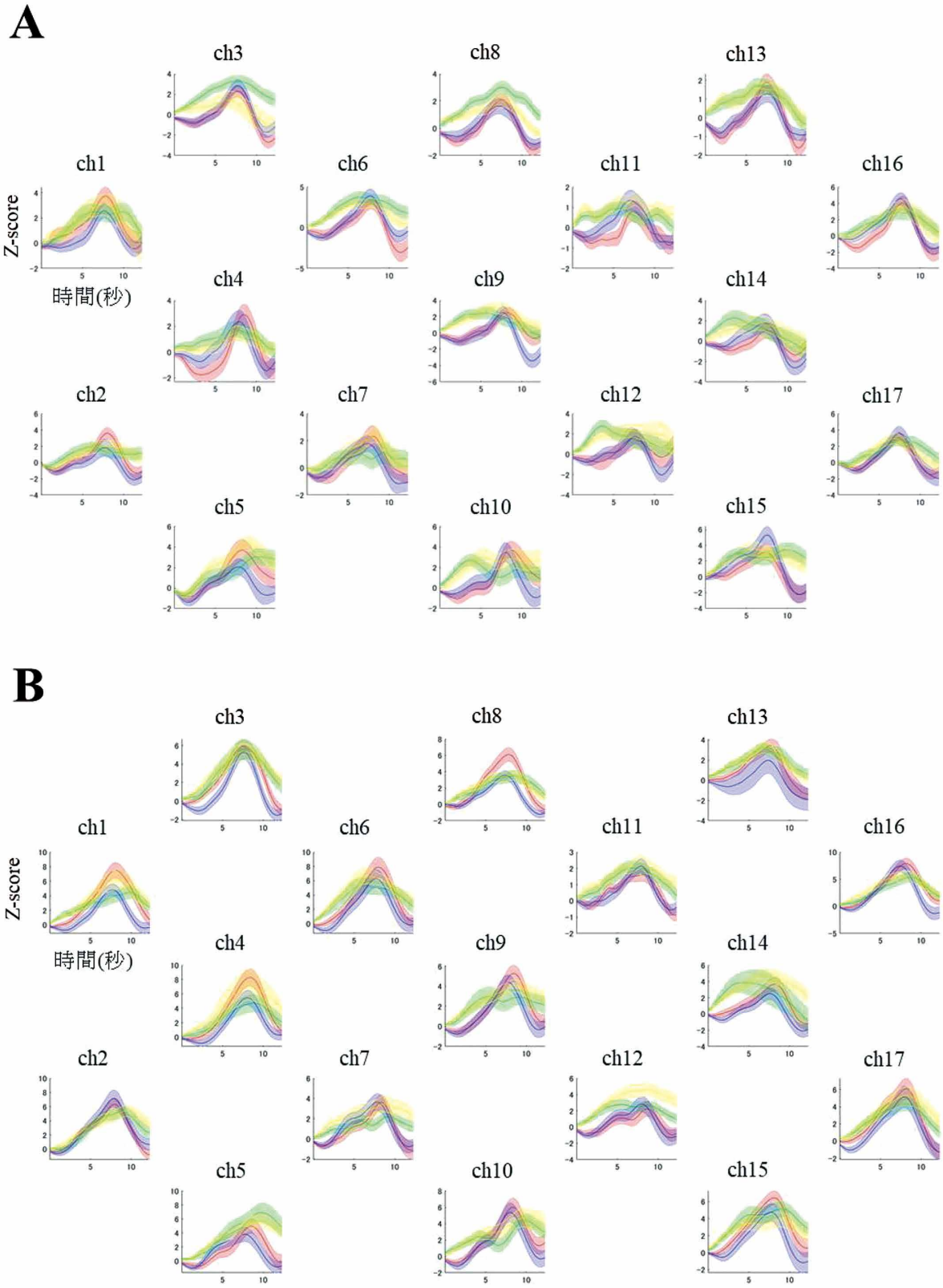


図3 脳血流の時系列データ

A：順唱での脳活動 B：逆唱での脳活動  
 縦軸 標準化された脳活動 (Z-score)  
 赤線は聴覚入力-音声出力，緑線は聴覚入力-タッチ出力，青線は視覚入力-音声出力，黄線は視覚入力-タッチ出力を表す。  
 横軸 刺激表示からの時間

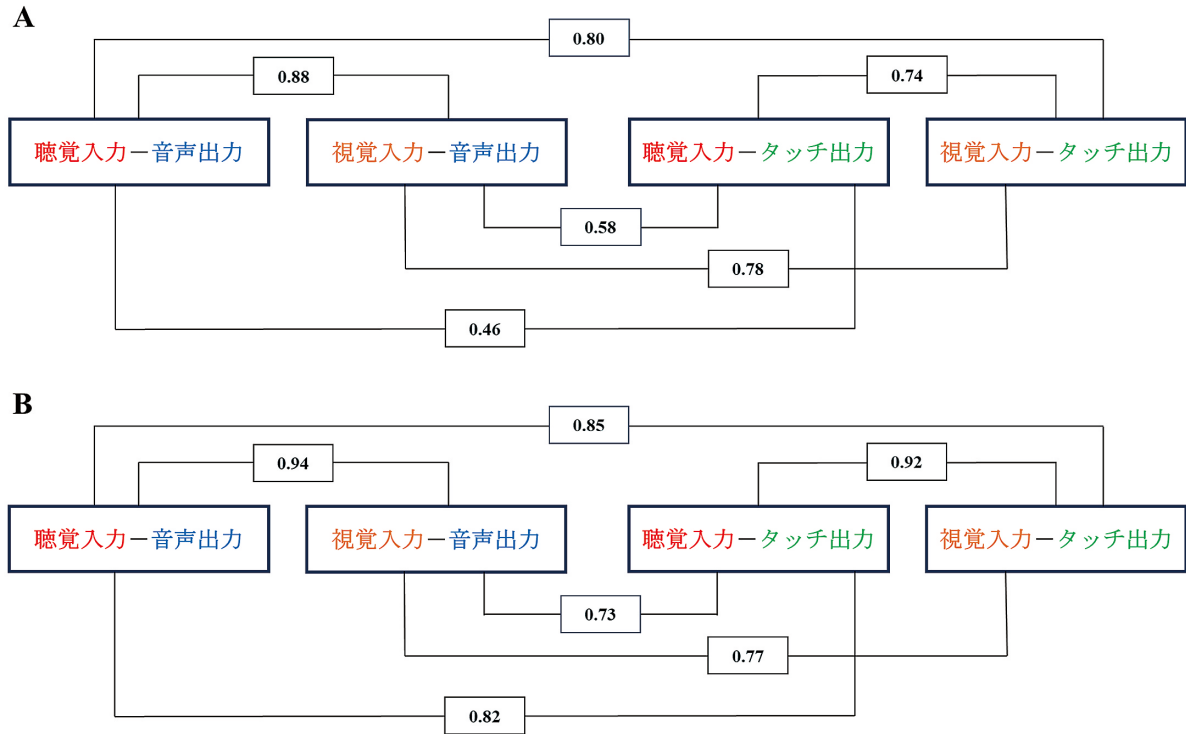


図4 条件間での脳活動の相関係数（全17チャンネルの平均）

A：順唱 B：逆唱

傾向にあった。そのほかの組み合わせでは高い相関を示したが、その中でも2つの条件が音声出力の場合に、より高い相関を示した。逆唱における相関係数は、聴覚入力-音声出力と聴覚入力-タッチ出力が0.82、聴覚入力-音声出力と視覚入力-音声出力が0.94、聴覚入力-音声出力と視覚入力-タッチ出力が0.85、聴覚入力-タッチ出力と視覚入力-音声出力が0.73、聴覚入力-タッチ出力と視覚入力-タッチ出力が0.92、視覚入力-音声出力と視覚入力-タッチ出力が0.77であった。逆唱では順唱とは違い、どの条件においても高い相関を示した。

#### 4. 考察

今回、異なる入力・出力方法モダリティを用いたWM課題を遂行している時の前頭葉の活動を調べた。その結果、出力の違い（音声とタッチ）によって、前頭葉の時系列的パターンに違いが見られた。順唱では、音声出力条件（聴覚入力-音声出力および視覚入力-音声出力）では脳血流のピークが刺激呈示後8秒付近に出現するチャンネルが多かったのに対して、タッチ出力条件（聴覚入力-タッチ出力および視覚入力-タッチ出力）ではピークが見られないチャンネルが多かった。2種類の時系列の異なるWM活動について、音声出力は音韻ループを、

タッチ出力は視空間スケッチパッドに関与する活動を反映しているのかもしれない。一方、逆唱では、いずれの条件でも刺激呈示後8秒付近に脳血流のピークが見られるようになり、結果として、出力のモダリティに関わらず同じような時系列パターンが観察された。このように順唱では出力条件の違い（音声出力、タッチ出力）によって異なる脳活動が見られたのに対し、逆唱ではそのような違いが見られなくなった。この理由として、逆唱は難易度が高い課題であり、モダリティに関係なく働いている中央実行系に負荷がかかった結果、前頭前野が似た反応をするようになったのではないかと推測される。Rottschy et al.<sup>8)</sup>やEmch et al.<sup>9)</sup>は、難易度の増大に伴って前頭前野が両側性に広く活性化すると述べている。また、Barbey et al.<sup>14)</sup>は、右側の前頭前背外側は、簡単なWMの保持・モニタリング・認知負荷下ではあまり重要でなく、難易度が高くなると広く活性化すると述べている。杉谷ら<sup>15)</sup>は三宅式記銘力検査において、同一の課題や難度の低い課題を行うことによって脳血流の減少を認めたと述べている。また別の解釈として、逆唱では提示された数字を一度、頭のなかで逆の順番に入れ替える必要があり、その際、頭の中でのリハーサル、すなわち、内言語を使用するために、タッチ出力条件であっても

表2 各チャンネルにおける条件間の相関係数

**A**

条件 チャンネル	聴覚-音声	聴覚-音声	聴覚-音声	聴覚-タッチ	聴覚-タッチ	視覚-音声
	聴覚-タッチ	視覚-音声	視覚-タッチ	視覚-音声	視覚-タッチ	視覚-タッチ
1	0.747	0.973	0.936	0.66	0.838	0.865
2	0.553	0.939	0.792	0.469	0.876	0.612
3	0.666	0.976	0.814	0.739	0.374	0.69
4	0.694	0.768	0.877	0.857	0.914	0.875
5	0.752	0.841	0.93	0.398	0.906	0.72
6	0.586	0.895	0.839	0.815	0.908	0.895
7	0.665	0.862	0.973	0.53	0.762	0.817
8	0.79	0.987	0.926	0.805	0.769	0.941
9	0.147	0.736	0.703	0.631	0.703	0.79
10	-0.255	0.718	0.597	-0.114	0.352	0.486
11	0.091	0.838	0.698	0.454	0.586	0.799
12	-0.167	0.715	0.559	0.408	0.434	0.469
13	0.861	0.98	0.868	0.883	0.978	0.874
14	0.19	0.827	0.664	0.674	0.711	0.901
15	-0.066	0.983	0.646	0.067	0.662	0.701
16	0.839	0.961	0.899	0.824	0.979	0.879
17	0.724	0.994	0.929	0.762	0.822	0.934

**B**

条件 チャンネル	聴覚-音声	聴覚-音声	聴覚-音声	聴覚-タッチ	聴覚-タッチ	視覚-音声
	聴覚-タッチ	視覚-音声	視覚-タッチ	視覚-音声	視覚-タッチ	視覚-タッチ
1	0.874	0.932	0.974	0.653	0.949	0.851
2	0.824	0.978	0.659	0.897	0.958	0.756
3	0.941	0.97	0.911	0.883	0.989	0.831
4	0.96	0.984	0.945	0.91	0.995	0.901
5	0.794	0.784	0.798	0.463	0.987	0.508
6	0.879	0.985	0.895	0.872	0.992	0.901
7	0.67	0.94	0.693	0.566	0.962	0.627
8	0.878	0.941	0.957	0.68	0.928	0.848
9	0.709	0.931	0.875	0.663	0.885	0.754
10	0.508	0.964	0.755	0.299	0.894	0.587
11	0.914	0.941	0.853	0.875	0.973	0.86
12	0.824	0.912	0.748	0.837	0.839	0.676
13	0.91	0.977	0.959	0.835	0.964	0.904
14	0.578	0.932	0.819	0.727	0.472	0.698
15	0.85	0.953	0.866	0.684	0.982	0.726
16	0.964	0.894	0.961	0.769	0.964	0.868
17	0.937	0.989	0.836	0.943	0.961	0.867

A : 順唱 B : 逆唱



脳活動が音声出力条件の活動に近くなったのではないかと考えることもできる。

一方で、入出力モダリティの違いによって、前頭葉内にはっきりとした部位特異的な反応は見られなかった。また、明らかな前頭葉機能の左右差は認められなかったことから、言語性 WM 課題であっても左前頭葉が優位であるわけではないことが示唆された。このような結果となった理由として、被験者ごとに覚える方略（言語的イメージすなわち、音声リハーサルなどや視覚的イメージすなわち位置で覚える、数字の羅列など）が異なっているため、明確な左右差が出なかった可能性が考えられる。また、すべての条件で同じ桁数を使用したがる、課題条件によって難易度が違っていた可能性も考えられる。一方、南と乾<sup>16)</sup>は、形態情報 WM と位置情報 WM に関係するニューロンは、前頭前野のあらゆる場所で見つかり、領域特異性がないと述べている。このことから、前頭葉の中でモダリティの異なる WM が混在している可能性も十分に考えられる。

WM モデルでは入力—保持—出力のプロセスが

想定されているが、前頭葉はどの段階で、どのような働きをしているのだろうか。動物実験では、WM の保持をしているときに前頭葉の神経細胞が活性化すると報告されている<sup>17)</sup>。ヒトの前頭葉損傷例では、一般的に情報の処理と保持を要する2重課題が困難になりやすい<sup>18)</sup>。さらに今回の研究では、出力の種類によって異なる時系列パターンが観察された。これらのことから、WM の入力—保持—出力の各段階のうち、前頭葉は特に保持および出力の変換に関わっているのではないかと考えられる。

本研究の結果にはいくつかの点で限界がある。まず fNIRS のデータには脳血流のほか皮下水流なども含まれるが、本研究では WM を必要としないコントロール課題を用いておらず、発声や指の運動動作を反映した血流変化を除外することができていない。さらに本研究では、前頭葉の活動のみを測定したが、WM は脳全体の神経ネットワークが働く機能であるため、モダリティの違いによる脳活動への影響を調べるためには fMRI などによる脳全体の測定をする必要があると考える。

#### 倫理的配慮

本研究は、当学の倫理委員会にて承認され（承認番号：22-021）、本研究参加者には、研究目的、方法、自由意思に基づく参加で拒否による不利益はないこと、及び、個人情報保護について、文書と口頭にて説明を行い、書面にて同意を得ました。また、発表に際しての利益相反はありません。

#### 謝 辞

データ測定に当たり快くご協力をいただいた皆様に感謝いたします。誠にありがとうございました。

#### 文 献

- 1) Osaka M, Komori M, Morishita M and Osaka N : Neural bases of focusing attention in working memory: An fMRI study based on group differences. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 7(2), 130-139, 2007.
- 2) Baddeley A: The episodic buffer: A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 417-423, 2000.
- 3) St Clair-Thompson HL and Allen RJ : Are forward and backward recall the same? A dual-task study of digit recall. *Memory and Cognition*, 41(4), 519-532, 2013.
- 4) 前澤聡, 二村美也子, 藤井正純, 松井泰行, 若林俊彦 : fMRI を用いた作業記憶の局在評価—数唱課題の有用性—。高次脳機能研究, 34(2), 226-233, 2014.
- 5) 石島恵太郎, 高橋知音 : 順唱と逆唱に関わる認知機能。日本教育心理学会第57回総会発表論文集, 484, 2015.
- 6) 横田友子, 大東祥孝 : 脳損傷患者におけるスパン課題とワーキングメモリ。認知リハビリテーション研究会編, 認知リハビリテーション, 新興医学出版社, 東京, 59-64, 2005.
- 7) D'Esposito M, Detre JA, Alsop DC, Shin RK, Atlas S and Grossman M : The neural basis of the central executive system of working memory. *Nature*, 378, 279-281, 1995.
- 8) Rottschy C, Langner R, Dogan I, Reetz K, Laird AR, Schulz JB, Fox PT and Eickhoff SB : Modelling neural correlates of working memory: A coordinate-based meta-analysis. *NeuroImage*, 60, 830-846, 2012.
- 9) Emch M, von Bastian CC and Koch K : Neural correlates of verbal working memory: An fMRI meta-analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13, 2019.
- 10) 福田正人 : 精神疾患と NIRS—光トポグラフィ—検査による脳機能イメージング—。中山書店, 東京, 2009.
- 11) Huppert TJ, Hoge RD, Diamond SG, Franceschini MA and Boas DA : A temporal comparison of BOLD, ASL,

- and NIRS hemodynamic responses to motor stimuli in adult humans. *NeuroImage*, 29, 368-382, 2006.
- 12) 山下豊：時間分解スペクトロスコピーの測定原理。酒谷薫監修，岡田英史，星詳子，宮井一郎，渡辺英寿編，NIRS—基礎と臨床—，新興医学出版，東京，19-22，2012。
  - 13) Yamada T, Umeyama S and Matsuda K : Separation of fNIRS signals into functional and systemic components based on differences in hemodynamic modalities. *PLOS ONE*, 7(11), 2012.
  - 14) Barbey AK, Koenigs M and Grafman J : Dorsolateral prefrontal contributions to human working memory. *Cortex*, 49(5), 1195-1205, 2013.
  - 15) 杉谷竜司，本田憲胤，東本有司，前田和成，岡島聡，白石匡，福田寛二：三宅式記銘力検査における得点と脳血流の変化。理学療法科学，26(4)，537-540，2011。
  - 16) 南哲人，乾敏郎：形態と位置のワーキングメモリモデル。認知科学，9(1)，149-157，2002。
  - 17) Funahashi S, Bruce CJ and Goldman-Rakic PS : Mnemonic coding of visual space in the monkey's dorsolateral prefrontal cortex. *Journal of Neurophysiology*, 61(2), 331-349, 1989.
  - 18) 荻阪直行：意識と前頭葉—ワーキングメモリからのアプローチ—。心理学研究，77(6)，553-566，2007。

(2023年11月2日受理)

## Effects of Different Input/Output Modalities on Frontal Lobe Activity in Working Memory Tasks

Fuzuki YAMAGUCHI, Kazuo HIKOSAKA and Takayuki HOSOKAWA

(Accepted Nov. 2, 2023)

Key words : working memory, frontal lobe, fNIRS, functional localization, input/output modalities

### Abstract

In clinical speech-language therapy, the digit-span task is widely used to measure Working Memory (WM). However, it is less applicable for individuals with aphasia, articulation disorders, or hearing impairments, because the task is conducted with auditory input and speech output. Additionally, functional brain imaging using the digit-span task has been studied previously, but there has been limited research on the effects of different input and output modalities. This study aimed to elucidate the impact of input-output modality differences on brain activity in WM tasks. Nineteen healthy university students participated, and they performed the digit-span task under functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). Stimuli consisted of randomized sequences of numbers, with two input types (auditory and visual) and two output types (verbal and tactile), involving both forward and backward recall. The results revealed significant variations in brain activity due to differences in the output modality and forward/backward recall conditions across most channels. When comparing the temporal changes in cerebral blood flow for each condition, we found differential time-series patterns according to the output modality differences in the forward recall condition, whereas we found similar time-series patterns regardless of the output modality in the backward recall condition. On the other hand, no functional localization based on input-output modality differences in the prefrontal cortex was observed. This suggests the potential coexistence of different WM processes within the frontal lobe.

Correspondence to : Takayuki HOSOKAWA

Department of Orthoptics

Faculty of Rehabilitation

Kawasaki University of Medical Welfare

288 Matsushima, Kurashiki, 701-0193, Japan

E-mail : t-hosokawa@mw.kawasaki-m.ac.jp

(Kawasaki Medical Welfare Journal Vol.33, No.2, 2024 215-224)