

近赤外線分光法 (near-infrared spectroscopy:NIRS) による

ストループ効果及びその年齢差の検討

河野 武志	埼玉大学教育学部附属特別支援学校
小林 久男	埼玉大学教育学部
石田 修	埼玉大学大学院教育学研究科
水谷 勉	立正大学大学院心理学研究科

キーワード : NIRS、ストループ効果、前頭前野、児童、年齢差

1. はじめに

ストループ課題は、1935年に Stroop が発見して以来 (Stroop, 1935)、定型的な神経心理学的な検査として広く利用されている。これまでに数多くのバリエーションのストループ課題が作成されているが (MacLeod, 1991)、検査として標準的であると考えられるものとして、色と一致しない語のカードと色のパッチのカードを用い、それぞれのカードの色を呼称し両者の時間差を求めるものや、色と色名が一致する語と一致しない語を使用し、語を読む時間と色を呼称する時間を計測して両者の間の時間差を求めるものなどがある。この両者の間の時間差が干渉効果 (あるいはストループ効果) といわれるものである。一般的には、色を呼称するよりも語を読む方が速い。この理由として、語の読みは自動化されているのに対して色の呼称は意識的に注意を向ける必要があるからだとされている (MacLeod, 1991)。とりわけこの効果は、ストループ課題では顕著に認められる。これは、語の読みと色の呼称との間に競合が起こるためである。

ストループ課題における干渉効果 (以後、ストループ効果とする) は、空間分解能が高い fMRI などの研究によれば、とくに前部帯状回 (anterior cingulate) や両側の下前頭回 (inferior

frontal gyrus) との関連が強いことが指摘されている (Laird, et al., 2005)。ただ、fMRI では、身体の拘束が強く、通常のストループ課題を実施するような形での課題遂行は困難であると推測され、ストループ効果そのものを計測しているとは言えない面もあると考えられる。そのため、最近では NIRS を用いてストループ課題遂行中の脳活動を直接計測することが行われている (Ehlis, et al., 2005; Leon-Carrion, et al., 2008; Schroeter, et al., 2002)。これらの研究では、ストループ効果は外側前頭前野や下前頭回の活動と関連していることが報告されている。しかし、これまでの NIRS による研究では課題が色一語マッチングストループ課題 (Color-Word Matching Stroop Task) を用いたものが多く (Schroeter, et al., 2002, 2004; Yanagisawa, et al., 2010; Zysset, et al., 2001)、また、多チャンネル同時記録をしたものは少ない (Ehlis, et al., 2005)。

ストループ効果の発達の研究も行われているが (Comalli, et al., 1962; 平澤 他, 2009; Schiller, 1966 など)、それらによると、ストループ効果は小学校 2 年生から 3 年生で最大に達し、その後 16 歳から 17 歳まで減少することが報告されている。また、Schroeter ら (2004) の NIRS による発達研究では、子どもでは血流動態反応が成人のそれよりも遅く起こることや、

ストループ効果による背外側前頭前野の脳の活性化は年齢に伴って増大することが報告されている。NIRS による発達研究は、筆者らの知る限り、子ども（平均年齢 10 歳）と成人（平均年齢 23 歳）で比較した Schroeter ら（2004）のものしかなく検討課題といえる。

そこで本研究では、まず、成人を対象に、NIRS の多チャンネル同時記録により、ストループ課題遂行中の脳活動を検討し（研究 1）、次に、将来の発達障害児への応用をめざし、健常学童を対象に、ストループ効果の年齢差について検討する（研究 2）。

2. 研究 1

2-1 目的

これまでの NIRS による研究では、色－語マッチングストループ課題 (Color-Word Matching Stroop Task) を用いたものが多く (Schroeter, et al., 2002, 2004; Yanagisawa, et al., 2010; Zysset, et al., 2001)、また、多チャンネルで同時に記録したものは少ない (Ehlis, et al., 2005)。色－語マッチングストループ課題は、反応がボタン押しであったり、口頭で答えるものでも『Yes』、『No』を使うなど、本来のストループ課題とは異なる反応様式を用いているうえに、マッチングストループ課題ではマッチン



Fig. 2 実験の様子

グの要素が強く、ワーキングメモリの関与が大きいなどの影響が推測される。そこで、研究 1 では、成人を対象に、NIRS の多チャンネル同時記録によりストループ課題遂行中の脳活動を検討することを目的とする。

2-2 方法

(1) 対象

健常成人（大学生）33 名（男 5 名・女 28 名；20 歳～23 歳；全員右利き）を対象とした。実験に際し、研究の趣旨、実験の内容及び本研究で得た情報の扱いに関して説明し同意を得た上で実験を行った。

(2) 課題及び手続き

WR (Word Reading) 課題、CN (Color Naming) 課題の両課題において、平仮名により 2 文字及び 3 文字で構成されている「あか」「あお」「きいろ」「みどり」「くろ」の 5 種の色名単語を使用した。また、これらの色名単語は、

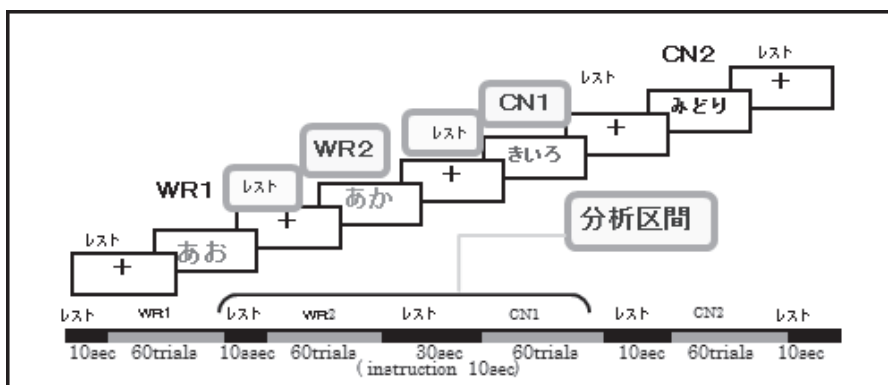


Fig. 1. 実験デザイン

文字の色とは異なる色ですべて組み合わせた。WR 課題を始めるにあたり、提示される平仮名を読むこと、また読む際にはなるべく速く読むよう教示した。教示後、10 秒間のレスト(休憩)をとり WR 課題を 60 試行行い、さらに 10 秒のレストとった後再び WR 課題を 60 試行行った。その後、10 秒間のレストをとった後、今度は平仮名を読むのではなく、平仮名の色を言うように教示し、10 秒間のレスト後 CN 課題を 60 試行行った。そして 10 秒間のレストの後、再度 CN 課題を 60 試行行い、10 秒間のレスト後実験を終了した (Fig. 1)。

(3) 刺激

刺激は、椅子に座ってもらい、眼前 60cm に配置された白色ディスプレイ (48 cm×27 cm) の中央に提示した。レスト時には「+」を静かに見てもらい、その後 5 種の色名单語を一つずつ提示し、被験者が答え終わった直後に画面を切り替え次の色名单語を提示した。なお、色名单語は WR 課題、CN 課題ともランダムに提示した (Fig. 2)。

(4) 脳血流計測

NIRS は、OMM-3000 (島津製作所製) を使用し、プローブは、側頭葉ファイバホルダの下段最端部を国際 10-20 法の Fp1 と Fp 2 に合わせ (Fig. 3)、Oxy-Hb (酸素化ヘモグロビン)、Deoxy-Hb (脱酸素化ヘモグロビン)、Total-Hb (総ヘモグロビン) の濃度変化を計測した。また、プローブは、左右の背外側前頭前野を中心にそれぞれ上下に 4 本配置することで、計 20 チャンネル (右: ch1~ch10、左: ch11~ch20) の計測を行った (Fig. 4)。

プローブの位置については、3 次元位置計測装置 FASTRAK (POLHEMUS 社製) を使用して記録した (Fig. 5)。

(5) 分析

脳血流については、各被験者の WR 課題の 2 回目と CN 課題の 1 回目の 45 秒間の Oxy-Hb の平均値を算出し、両課題間で比較した。行動指標については、WR 課題と CN 課題における各被験者の課題遂行時間(reaction time:RT)を



Fig. 3. ファイバホルダとプローブの装着部位

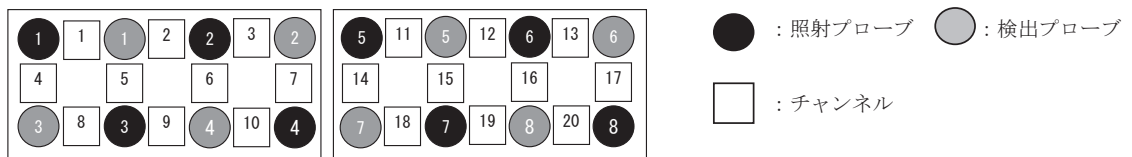


Fig. 4 プローブの配置とチャンネルの配列

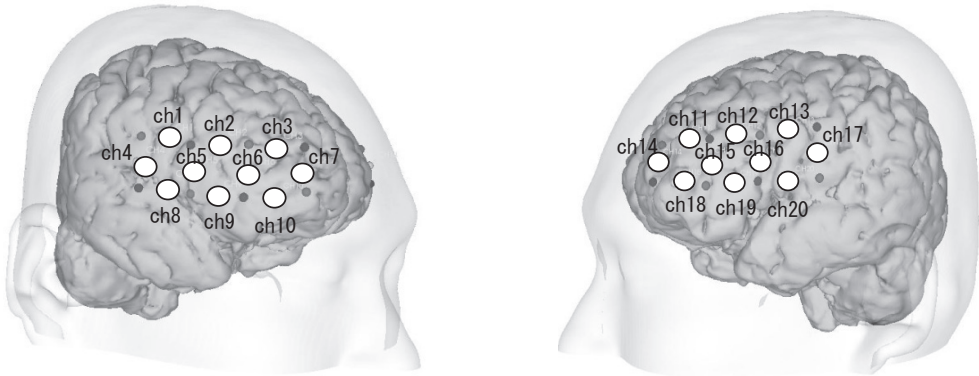


Fig. 5 前頭前野におけるチャンネルの配置

計測し、両課題間の差を求めた。そして、その長短によって2群にわけ、RT と脳血流計測の結果を比較した。

2-3 結果

(1) WR 課題と CN 課題における脳血流の比較

WR 課題及び CN 課題の 45 秒間の Oxy-Hb の平均値について分析したところ、背外側前頭前野の左側、ch16、ch17、ch18、ch19 で有意な差がみられ、右側については、ch1、ch5、ch9 で有意な差がみられた (Fig.6)。分析区間の Oxy-Hb、Deoxy-Hb、Total-Hb の変化について 1 被験者の例 (Fig.7) でわかる通り、WR 課題から CN 課題への切り替え時において、いくつかのチャンネルで血流の変化が大きくなっている。WR 課題と CN 課題における前頭前野の左右差についても分析したが、有意な差はみられなかった。しかし、WR 課題と CN 課題の課題開始後 20 秒後の値を MRI 画像 (島津製作所の MRI フュージョンソフトと MRI 画像を使用)

に貼り付けたもの (Fig.8) からわかる通り、WR 課題の時に比べ特に左側の下前頭回から上側頭回にかけて CN 課題遂行時における Oxy-Hb の変化がみられる。

(2) 行動指標

WR 課題の 2 回目と CN 課題の 1 回目の RT の平均は、それぞれ 55.43 秒、69.80 秒であり、CN 課題のほうが有意に長かった ($t(32)=17.82, p<0.01$)。WR 課題と CN 課題の間の時間差と脳血流との関係について脳血流計測で有意差があった部位で検討したところ、両課題間の課題遂行時間の長短と脳血流との間には一定の関係はみられなかった。

2-4 考察

脳血流計測の結果からは、WR 課題から CN 課題に切り替わった際に、脳の左側では、中前頭回、下前頭回及び中心前回において、右側では下前頭回や中心前回の一部で、Oxy-Hb の有意な増加がみられた。また、これらの部位は、

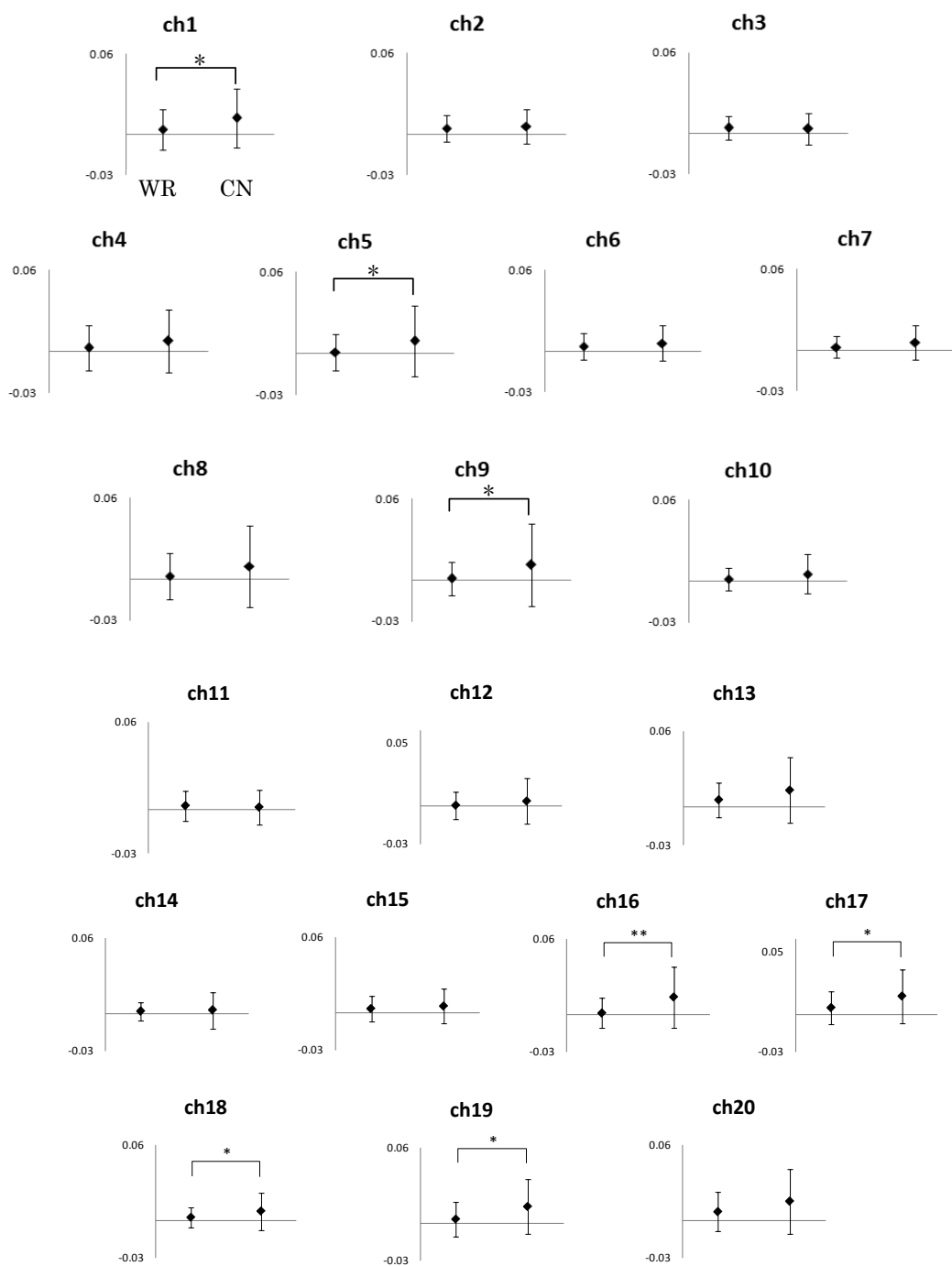
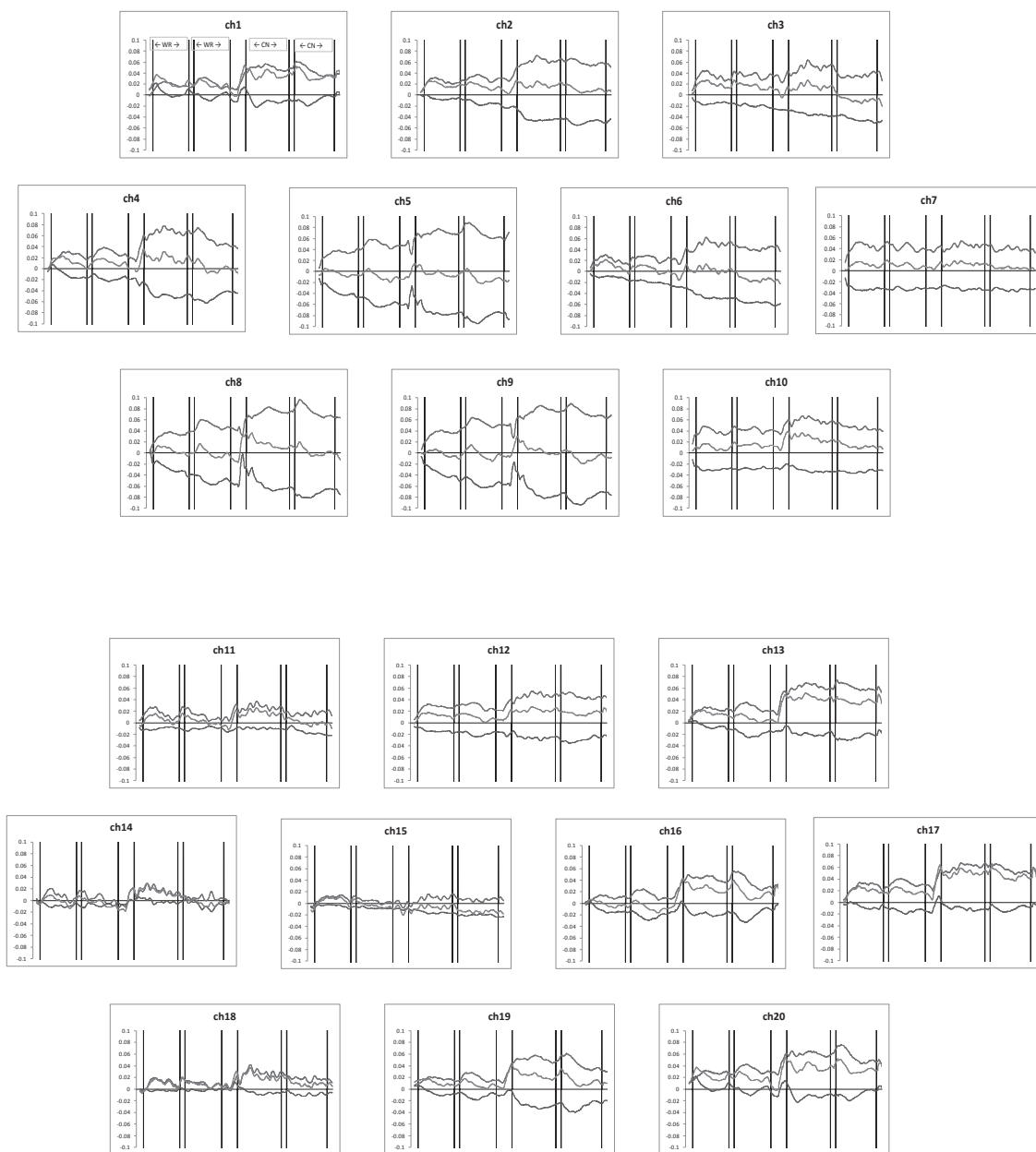


Fig.6 WR 課題と CN 課題各 45 秒間における 0xy-Hb の変化の比較

黒丸は平均、縦線は標準偏差を示す * : $p < 0.05$ **: $p < 0.01$



— Oxy-Hb
 — Deoxy-Hb
 — Total-Hb

Fig. 7 ある大学生における WR 課題と CN 課題の血流の変化

左右のほぼ同じ場所でもあり、fMRI 等の研究結果(Laird,et al.,2005)とほぼ一致している。行動指標の結果からは、WR 課題と CN 課題における RT を比較すると、後者が有意に延長していたが、両課題間の RT の差と脳血流との間には一定の関係はみられなかった。両課題間の RT の差が短い者では、課題をより効率的に遂行するのに対して、長い者では、非効率的な遂行が考えられ、これが脳血流に反映されることも考えられるが、今回の検討からは、RT と脳血流との間に一定の関係がみられなかった。このことは、被験者の課題に対する処理には方略などの複雑な要因が関与しており、そのためにストループ課題の処理が直接的に脳血流に反映されないという可能性を含んでいる。本実験においては、行動指標と脳血流との間には一定の関係は認められなかったが、fMRI 等の知見とほぼ同様の結果が得られたことから、NIRS によるストループ課題の検討や本実験デザインについて一定の有効性が示唆されたと考えられる。

3. 研究 2

3-1 目的

ストループ課題の発達的研究は、行動指標によるもの(Comalli, et al., 1962;平澤他,2009;Schiller,1966;)と NIRS によるもの(Schroeter, et al.,2004)がある。行動指標による研究からは、ストループ効果は小学校 2 年生から 3 年生で最大に達し、その後大学生まで減少するというもの(Comalli, et al., 1962;Schiller,1966)と 16 歳から 17 歳まで減少し、その後増加するというもの(平澤他,2009)がある。2 年生から 3 年生という学年は、読みの技能が急激に発達する時期であり、ストループ効果が最も強く現れると考えられる(Comalli, et al., 1962)。また、NIRS による研究からは、①子ども(平均年齢 10 歳)の血流動態反応は成人(平均年齢 23 歳)のそれよりも遅く起こること、②ストループ効果による背外側前頭前野の脳の活性化は年齢に伴っ

て増大することなどが明らかにされている。NIRS による発達研究は、前述したように、子ども(平均年齢 10 歳)と成人(平均年齢 23 歳)で比較した Schroeter ら(2004)のものしかなく検討課題といえる。そこで、研究 2 では、小学校 1・2 年生と小学校 5・6 年生を対象に、ストループ課題遂行中における脳血流を計測し、ストループ効果の年齢差について検討する。

3-2 方法

(1)対象

小学校 1・2 年生 9 名(男 3 名:女 6 名)、平均年齢 7.3 ± 0.7 歳、小学校 5・6 年生 9 名(男 7 名:女 2 名)、平均年齢 11.2 ± 0.7 歳を対象とした。実験に際し、対象児童の保護者には、参加が任意であること、また実験の内容について伝え同意を得た。さらに実験の直前には、対象児童に実験の手順を説明し同意を得たうえで行った。

(2)課題及び手続き

課題については、研究 1 と同様である。手続きについては、大学生に比べ注意の持続時間が短くなることを想定し、WR 課題と CN 課題をそれぞれ 1 回ずつとした。まず、提示される平仮名を読むこと、また読む際にはなるべく速く読むよう教示した。教示後、20 秒間のレストをとり WR 課題を 60 試行を行った。その後 20 秒間のレストをとり、今度は平仮名を読むのではなく、描かれている平仮名の色を言うように教示し、20 秒間のレスト後、CN 課題を 60 試行を行った。教示は、取り組む課題が理解できるようにゆっくり説明したため、研究 1 の大学生より長く時間をとった。課題終了後 20 秒間のレストをとり実験を終了した。

(3)刺激及び脳血流計測

刺激及び脳血流計測については研究 1 と同様である。

(4)分析

脳血流については、研究 1 と同様に、Oxy-Hb、

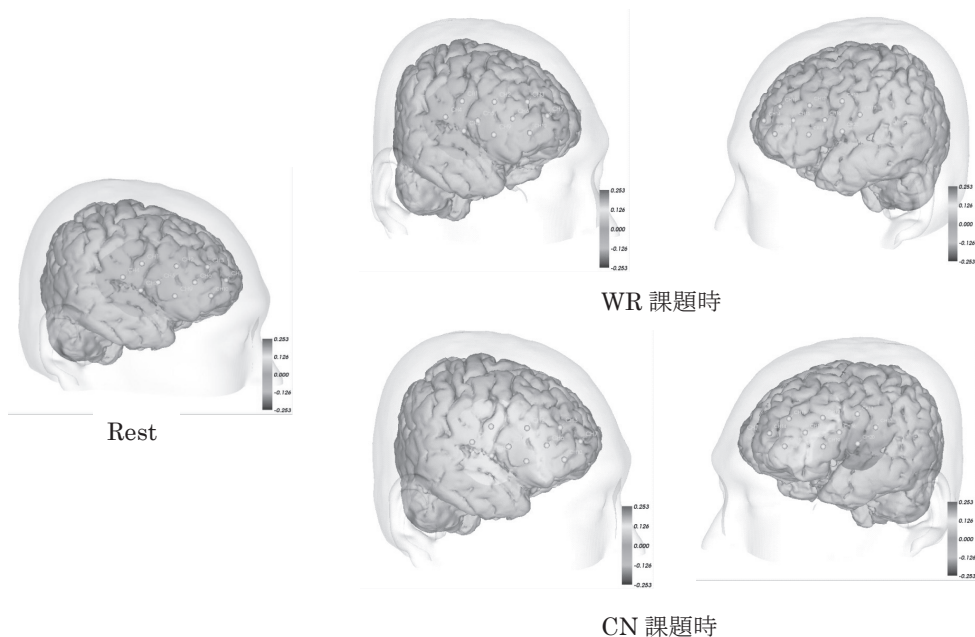


Fig. 8. WR 課題と CN 課題における課題開始から 20 秒後の脳の賦活の変化

Deoxy-Hb、Total-Hb について計測した。本実験では、小学校 1・2 年生と小学校 5・6 年生それぞれの WR 課題と CN 課題の Oxy-Hb の平均値を算出し、それらを両課題間で比較した。この平均値については、WR 課題の課題遂行時間が最も短い対象児にあわせてため、45 秒間とした。さらに、WR 課題と CN 課題においてそれぞれ 1・2 年生と 5・6 年生の平均値から年齢差について検討した。行動指標については、WR 課題と CN 課題における各被験者の課題遂行時間 (RT) の平均値を算出し、両課題間で比較すると同時に、反応時間と脳血流との相関を求め検討した。

3-3 結果

(1) 各群の WR 課題と CN 課題における脳血流の比較

WR 課題及び CN 課題の 45 秒間の Oxy-Hb の平均値について分析したところ、小学校 1・2 年生では、背外側前頭前野の左側 ch17 で有意

な差 ($t(16)=2.74$, $p<0.05$) がみられ、右側については、ch1 と ch3 でそれぞれ有意な差 ($t(16)=2.77$, $p<0.05$, $t(16)=2.61$, $p<0.05$) がみられた。小学校 5・6 年生では、有意な差はみられなかった。ただ、小学校 1・2 年生と 5・6 年生のある児童の血流の変化をみると、1・2 年生は、WR 課題と CN 課題の両課題で脳が賦活している様子がみられるが、5・6 年生は、CN 課題において WR 課題より大きな賦活をしている様子がみられる (Fig. 9, Fig.10)。

(2) WR 課題における各群の比較

WR 課題において、小学校 1・2 年生と 5・6 年生の 45 秒間の Oxy-Hb の平均値を比較したところ、背外側前頭前野の左側 ch12 ($t(16)=1.76$, $p<0.05$)、ch15 ($t(16)=1.89$, $p<0.05$)、ch17 ($t(16)=3.53$, $p<0.01$)、右側では、ch1 ($t(16)=1.76$, $p<0.05$) で有意な差がみられた。

(3) CN 課題における各群の比較

CN 課題において、小学校 1・2 年生と 5・6

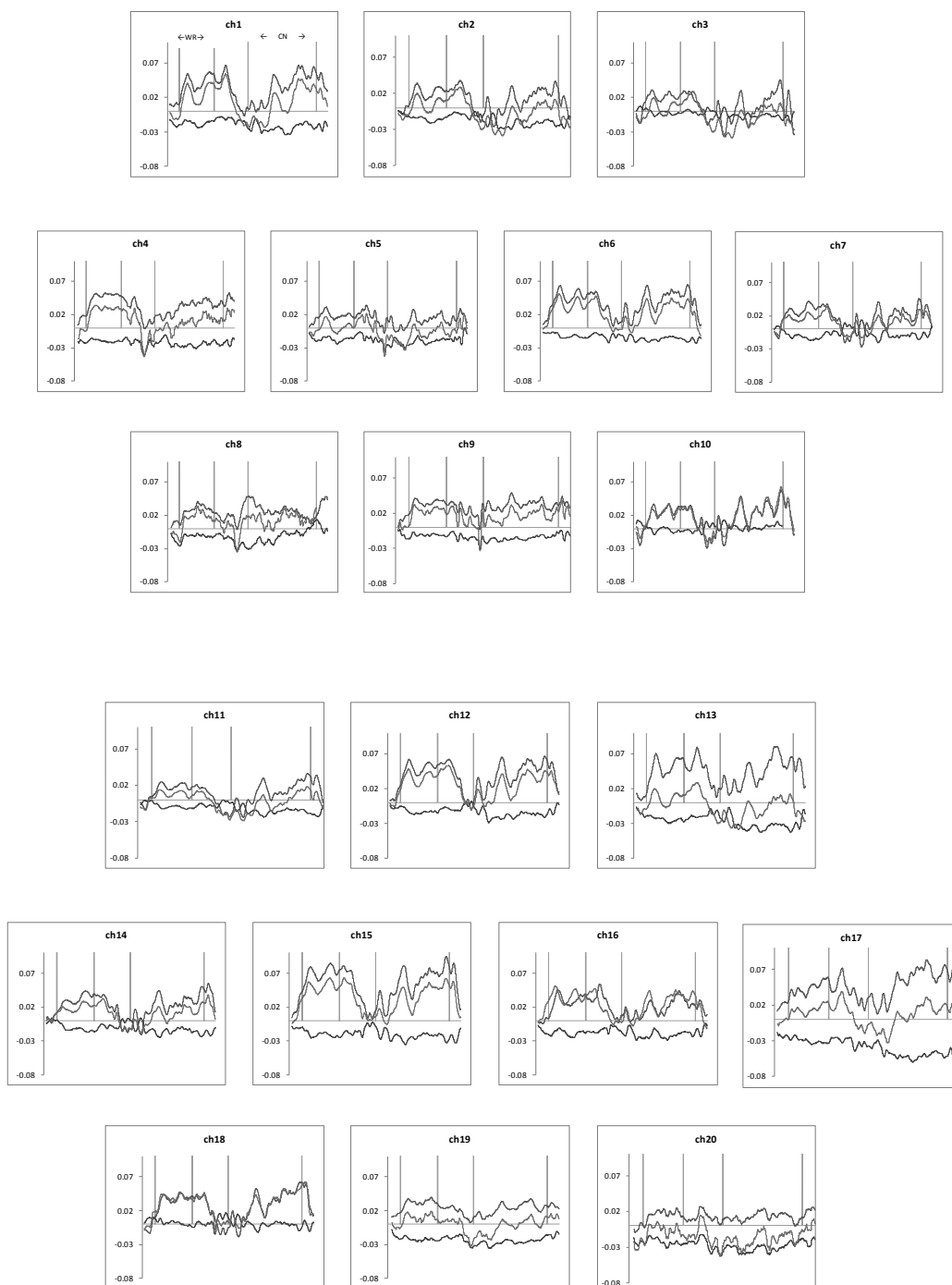


Fig.9 小学校 1・2 年生の一児童における WR 課題と CN 課題遂行時の脳血流の変化

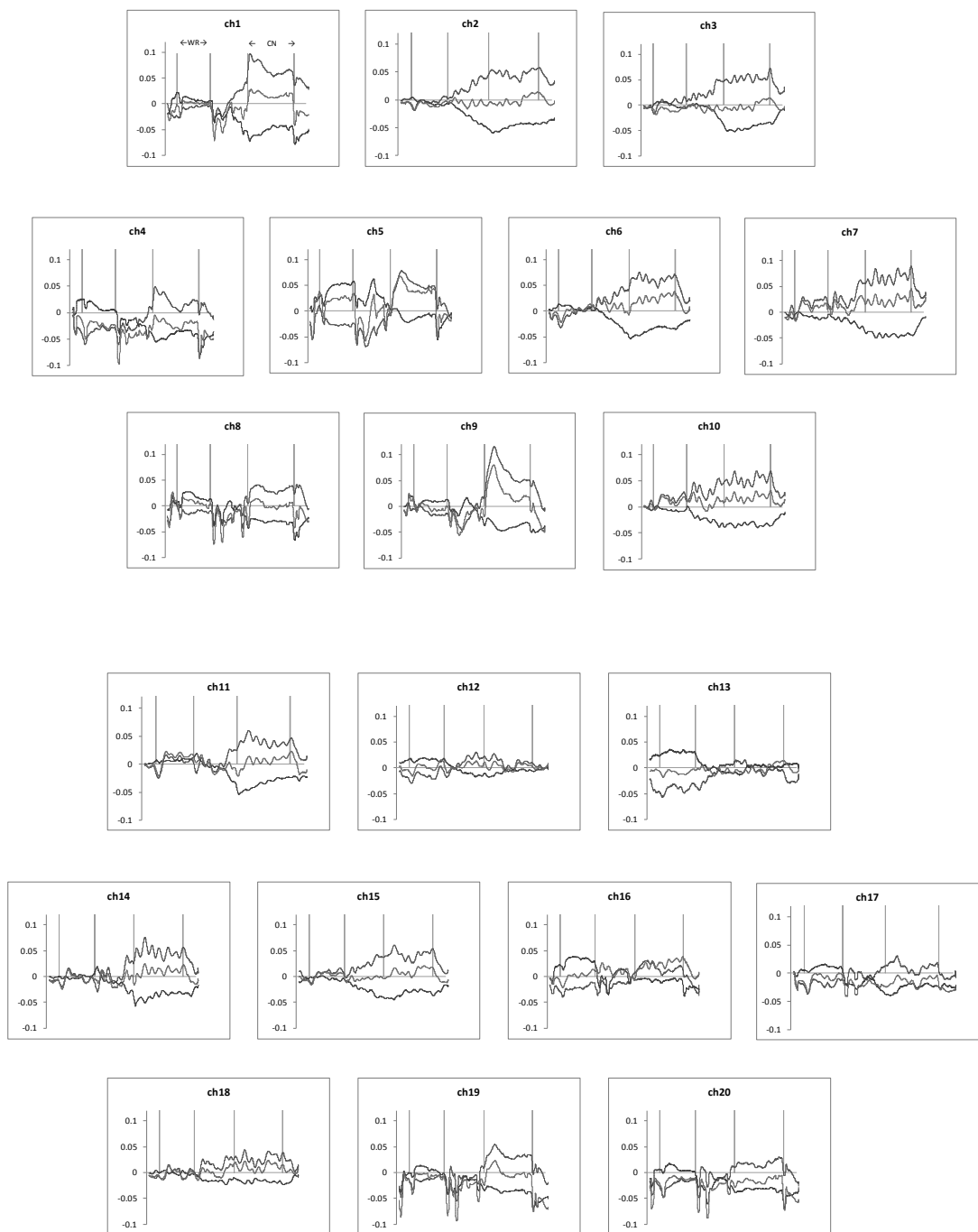


Fig.10 小学校 5・6 年生の一児童における WR 課題と CN 課題遂行時の脳血流の変化

Table 1 WR 課題及び CN 課題の課題遂行時間 (RT)

対象群	平均±SD	
	WR	CN
小学 1・2 年生(n=9)	65.79±17.84**	124.92±38.41**
小学 5・6 年生(n=9)	55.63±7.15	76.42±5.3

** : WR 課題と CN 課題でt検定をした結果、1%水準であつたことを示す。

年生の 45 秒間の Oxy-Hb の平均値を比較したところ、背外側前頭前野の左側 ch12($t(16)=1.82, p<0.05$)、ch18($t(16)=1.83, p<0.05$)、右側では、ch10($t(16)=1.78, p<0.05$)で有意な差がみられた。

(4)各群の行動指標

CN 課題では 5・6 年生群が 1・2 年生よりも有意に速かつた($t(16)=3.75, p<0.01$)。WR 課題では、5・6 年生が平均値では速いが、1・2 年生群との間には有意な差はなかった

Table 2 小学校 1・2 年生と 5・6 年生の CN 課題遂行時における

各チャンネル毎の Oxy-Hb の変化の平均と標準偏差

	1・2 年			5・6 年		
	Oxy-Hb			Oxy-Hb		
	Mean(nM)	SD	<i>r</i>	Mean(nM)	SD	<i>r</i>
Ch1	0.0043	0.0096	0.603	-0.0033	0.0227	-0.276
Ch2	0.0052	0.0127	0.903 **	-0.0002	0.0128	-0.781 *
Ch 3	0.0027	0.0101	0.742 *	0.0001	0.0090	-0.233
Ch 4	0.0058	0.0159	0.239	0.0018	0.0150	0.238
Ch 5	0.0084	0.0107	0.197	0.0095	0.0340	-0.240
Ch 6	0.0058	0.0084	0.520	0.0073	0.0107	-0.226
Ch 7	0.0093	0.0181	0.758 *	-0.0008	0.0170	0.434
Ch 8	0.0126	0.0189	-0.133	0.0124	0.0281	0.170
Ch 9	0.0131	0.0159	-0.254	0.0167	0.0289	0.071
Ch 10	0.0123	0.0133	0.672 *	0.0024	0.0100	-0.300
Ch 11	0.0067	0.0167	0.795 *	0.0052	0.0110	0.4365
Ch 12	0.0078	0.0135	0.482	-0.0016	0.0075	0.089
Ch 13	0.0116	0.0164	0.627	0.0033	0.0165	-0.232
Ch14	0.0017	0.0182	0.708 *	0.0023	0.0207	0.576
Ch 15	0.0130	0.0200	0.846 **	0.0012	0.0077	0.144
Ch 16	0.0074	0.0117	0.637	0.0046	0.0135	-0.421
Ch 17	0	0.0204	0.406	0	0.0139	-0.138
Ch 18	0.0074	0.0143	0.802 **	-0.0020	0.0057	-0.276
Ch 19	0.0123	0.0150	0.356	-0.0056	0.0274	-0.753 *
Ch 20	0	0.0301	0.069	0.0017	0.0297	0.036

r : Oxy-Hb の平均と反応時間の相関で、* : $P<0.05$, ** : $P<0.01$ で有意であることを示す

(Table 1)。また、WR 課題と CN 課題の間の時間差と脳血流との関係について脳血流計測で有意差があった部位で検討したところ、両課題間の課題遂行時間の長短と脳血流との間には一定の関係はみられなかった。

(5) CN 課題における遂行時間と脳血流との相関

小学校 1・2 年生においては、背外側前頭前野の左側 ch15 と ch18 で 1% 水準で有意な相関がみられ、ch11 と ch14 では 5% 水準で有意な相関がみられた。また右側でも、ch2 で 1% 水準で有意な相関がみられると同時に、ch3、ch7、ch10 では 5% 水準で有意な相関がみられた (Table 2)。小学校 5・6 年生では、左側の ch19 と右側の ch2 で負の相関がみられた。

(6) WR 課題における遂行時間と脳血流との相関

小学校 1・2 年生においては、有意な相関はみられなかった。小学校 5・6 年生では、ch11 に負の相関($r=-0.74$, $p<0.05$)がみられた。

3-4 考察

小学校 1・2 年生、5・6 年生の行動指標の結果では、両者とも WR 課題よりも CN 課題の RT が長く、この結果より両者にストループ効果を認めることができる。とりわけ、CN 課題においては、5・6 年生よりも 1・2 年生の反応時間が有意に長いことから、1・2 年生により強くストループ効果があらわれたと考えることができる。課題そのものは、ストループマッチング課題よりも平易であるが、1・2 年生と 5・6 年生の間に大きな差があるということは、この間にストループ効果に関連した脳の機能的な面に大きな発達があると考えられ、Comalli ら (1962)、Schiller(1966)、また平澤ら(2009)の行動指標における結果を支持している。その一方で、WR 課題と CN 課題の RT の差と脳血流との間には一定の関係はみられなかった。Schroeter ら(2004)の実験で扱ったストループ

マッチング課題では、FC3、FC4 の脳の部位に RT と血流に有意な相関がみられているが、これは本実験の課題との違いからくるものと考えられ、課題のそのもの差異が結果として示されたと考えられる。

脳血流計測の結果から、1・2 年生は、WR 課題から CN 課題に切り替わった際に、脳の右側の中前頭回と左右の中心前回周辺において、Oxy-Hb の有意な増加がみられた。本研究の成人の結果と比べ、有意な差がでたチャンネルは多くないが、5・6 年生では有意な差がでなかったことを考えると、ストループ課題における脳の賦活は小学校 1・2 年生の方が大きく、やはりここでも 1・2 年生におけるストループ効果の大きさが認められた。

4. 今後の課題

ストループ効果において、1・2 年生と 5・6 年生の間に発達における大きな変化がみられることが、NIRS においても示されたが、どの時点でその変化が顕著に表れるのかといった点については明確にできていない。また被験者についてもまだ人数が少ないため、今後はさらに小学校の各学年のデータを収集したうえで本研究の結果を検討していくとともに、発達の変化をより明確に示していくことが課題となる。

謝辞

本研究の趣旨にご理解をいただき、多大なるご協力をいただいた学童クラブの皆様、被験者の保護者の皆様、また大学生の皆さまに深く感謝いたします。

引用文献

- Adleman, N. E., Menon, V., Blasey, C. M., White, C. D., Warsofsky, I. S., Glover, G. H. & Reiss, A. L. (2002) A developmental fMRI study of the stroop color-word task. *Neuroimage*, 16, 61-75.
- Comalli, P. E., Jr., Wapner, S. & Werner, H.

- (1962) Interference effects of stroop color-word test in childhood, adulthood, and aging. *Journal of Genetic Psychology*, 100, 47-53.
- Ehlis, A. -C., Herrmann, M. J., Wagener, A. & Fallgatter, A. J. (2005) Multi-channel near-infrared spectroscopy detects specific inferior-frontal activation during incongruent stroop trials. *Biological Psychology*, 69, 315-331.
- 平澤利美・眞田敏・柳原正文・津島靖子・加戸陽子・荻野竜也・中野広輔・渡邊聖子・大塚頌子 (2009) 改訂版 Stroop テストの年齢別標準値および干渉効果に関する指標の発達的变化. *脳と発達*, 41, 426-430.
- Laird, A. R., McMillan, K. M., Lancaster, J. L., Kochunov, P., Turkeltaub, P. E., Pardo, J. V. & Fox, P. T. (2005) A comparison of label-based review and ALE meta-analysis in the stroop task. *Human Brain Mapping*, 25, 6-21.
- Léon-Carrion, J., Damas-López, J., Martín-Rodríguez, J. F., Domínguez-Roldán, J. M., Murillo-Cabezas, F., Barroso y Martin, J. M. & Domínguez-Morales, M. R. (2008) The hemodynamics of cognitive control: The level of concentration of oxygenated hemoglobin in the superior prefrontal cortex varies as a function of performance in a modified stroop task. *Behavioural Brain Research*, 193, 248-256.
- Macleod, C. M. (1991) Half a century of research on the stroop effect: An integrative review. *Psychological Bulletin*, 109, 163-203.
- Schiller, P. H. (1966) Developmental study of color-word interference. *Journal of Experimental Psychology*, 72, 105-108.
- Schroeter, M. L., Zysset, S., Kupka, T., Kruggel, F. & von Cramon, D. Y. (2002) Near-infrared spectroscopy can detect brain activity during a color-word matching stroop task in an event-related design. *Human Brain Mapping*, 17, 61-71.
- Schroeter, M. L., Zysset, S., Wahl, M. & von Cramon, D. Y. (2004) Prefrontal activation due to stroop interference increases during development—an event-related fNIRS study. *Neuroimage*, 23, 1317-1325.
- Stroop, J. R. (1935) Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662.
- Yanagisawa H., Dan. I., Tsuzuki, D., Kato, M., Okamoto, M., Kyutoku, Y. & Soya, H. (2010) Acute moderate exercise elicits increased dorsolateral prefrontal activation and improves cognitive performance with Stroop test. *Neuroimage*, 50, 1702-1710.
- Zysset, S., Müller, K., Lohmann, G. & von Cramon, D. Y. (2001) Color-word matching stroop task: separating interference and response conflict. *Neuroimage*, 13, 29-36.

(2010年9月30日提出)

(2010年10月15日受理)