

《原著論文》

手指の左右非対称動作における局所脳内酸素化動態

服部 由季夫¹⁾ 長田 典子²⁾

Changes in cerebral oxygenation during asymmetric motion of the fingers

Yukio Hattori¹⁾ Noriko Nagata²⁾

Abstract

In the cerebral cortex, the prefrontal area has many key human functions; in a word, it's important for ideas and emotions. In addition, the prefrontal area takes part in working memory and linguistics. Activating the function of prefrontal area is important to prevent dementia.

On the other hand, it is thought that finger motions activate the function of human brain. It is thought that asymmetric motion, which is used in rhythmic, frequently has a good effect on human brain. In addition, it is thought that asymmetric motion prevents dementia. So it is important to examine the influence of asymmetric motion on the prefrontal area.

In this study, we investigated how the changes in cerebral oxygenation are influenced by symmetric motion and asymmetric motion of the fingers. We investigated changes in cerebral oxygenation during both motions with Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS). Middle frontal gyrus and inferior frontal gyrus in the prefrontal area are more active with asymmetric motion than by symmetric motion with a significant difference. So asymmetric motion of the fingers can accelerate activity of middle frontal gyrus and inferior frontal gyrus. These areas take part in working memory and linguistics. These areas are activated with working memory exercises and copying motions. In addition, these areas are activated with hard exercise.

In this study, asymmetric motion of fingers with minimal energy consumption activated these areas. Symmetric motion did not activate these areas, so it is suggested that a simple asymmetric motion can activate the middle frontal gyrus and inferior frontal gyrus. Our next study will be to test the theory that asymmetric motion can accelerate working memory and can prevent dementia.

Key words: Asymmetric motion, Prefrontal area, Middle frontal gyrus, Inferior frontal gyrus, fNIRS

(J. Phy. Ex. Sports Sci. 20: 41-48 Dec. 2014)

キーワード: 左右非対称動作、前頭前野、中前頭回、下前頭回、fNIRS

1. 緒言

ヒトは様々な身体活動の中で、身体を思い通りに自由に動かさなくなる場面がある。例えば、ピアノの未経験者に“ドレミファソラシド”を弾かせる時に、右手、左手とそれぞれ片手ずつなら比較的容易に行えるが、両手

一緒に弾かせると途端に行うことが困難になる。また、ドラムなどで普通の8ビート行うことは比較的容易であるが、脚の動きを少し変則的にするだけで、手や脚が疎かになる。さらに、昔ながらの足踏みマシンなども使い始めは脚の動きと手の動きの連動が上手くいかないことも多く、初心者では満足に仕上がらない場合も多い。しかし、いずれの動作も訓練を重ねることによって徐々に慣れていき、さらに反復することで無意識に行えるよう

1) 星槎大学横浜情報処理センター
〒227-8522 神奈川県横浜市青葉区さつきが丘8-80

2) 関西学院大学神戸三田キャンパス
〒669-1337 兵庫県三田市学園2-1

1) Seisa University
8-80 Satsukigaoka Aoba-ku, Yokohama, Kanagawa, 227-8522, Japan

2) Kwansai Gakuin University
2-1 Gakuen, Sanda, Hyogo, 669-1337, Japan

になる。

ヒトの身体活動は、随意運動と不随意運動に区別される。不随意運動は反射と呼ばれるものであり、脳を介在することなく行われる。随意運動は横紋筋である骨格筋を脳と脊髄といった中枢神経の介在によってなされており、ゆえに随意である¹⁾。随意運動も日常活動は、随意ではあるが無意識になされている場合がほとんどである。随意運動は左右対称の動作、例えば両腕を同時、または交互にあげたり、腕を交互に振ったりといった連動を伴った動きは容易に誰もが出来る。しかし、前述の通り少しでも左右の連動性が損なわれ、ずれが生じた非対称的な動きになると、その容易さは失われる。

一方、反射ではない動きに対しては脳が関与しており、動きと脳に関わる研究は多く見られる。プロのピアニストやギターの奏者は左右肢の協調が上手く行われており、演奏が熟達していない一般人と比較して、脳梁が肥大しているという報告²⁾がある。ずれを伴うが、努力すれば出来るような動作は大脳の運動野を賦活化させることが確認されている^{3,4)}。また、太鼓やピアノなどの楽器の演奏においても同様の結果が報告^{5,7)}されている。しかしながら左右のずれを伴う動き、特に手指の左右非対称な動きによる前頭前野の酸素動態について検討した研究は見受けられない。

前頭前野は、思考、判断、計画を司るとされており、いわゆる人間らしい活動に関わっているとされている。ワーキングメモリーや言語活動にも関与しているとされている。本研究のタスクである左右のずれを伴う非対称動作は、アイスブレイクやリトミックにもよく利用され、脳への正の影響、すなわちワーキングメモリーの賦活化や認知症の予防などが期待されている。

また、運動中の脳活動の測定は、機能的近赤外線分光法 (functional near-infrared spectroscopy: fNIRS) が適切であると考えられる。脳磁図検査法 (magnetoencephalography: MEG) や陽電子放射断層撮影法 (positron emission tomography: PET) は時間分解能に優れ、さらに深部測定による空間分解能に優れている。しかし、仰臥位にて測定を行うため、身体活動中の測定に大きな制限を受ける。fNIRSは生体に対して高い透過性を持っている近赤外線分光法を用い、血液中のヘモグロビンの量を測定する装置である。fNIRSはMEGやPETに比して、時間分解能や空間分解能はやや劣るが、非侵襲的な測定法であり、体位を自由にできるため、激しい動きを伴わない身体活動中における脳内の神経活動部位の酸素代謝や血行動態のダイナミックな変化を詳細に検討できる特徴がある^{3,4,9-14)}。

そこで本研究では、左右対称の動きからわずかに時間的なずれを伴い困難な動きであるが、繰り返しの練習でやがて出来るようになる左右非対称な動作が、前頭前野

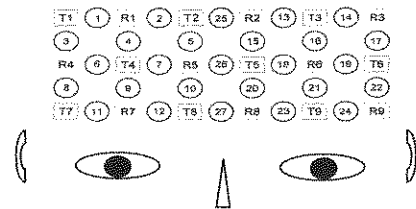
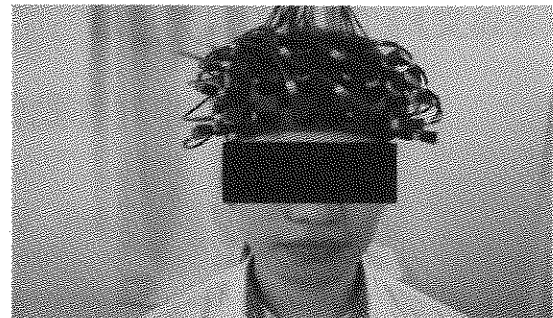


図1. プローブの装着

の酸素動態に及ぼす影響について、fNIRSを用いて検討することを目的とした。

2. 方 法

対象は四肢及び脳に障害を持たない健全な男性10名 (23.9±6.8歳、172.0±3.6 cm、71.4±10.0 kg) とした。なお全員が右利きだった。すべての対象者に対して、研究実施内容の詳細について口頭及び書面にて行い、本人署名による同意書を得て実施した。なお、本研究は、星槎大学倫理委員会の承認を得て実施された。

脳内酸素動態は近赤外線脳機能イメージング装置 (LABNIRS、島津製作所製) による機能的近赤外線分光法 (fNIRS) を用いて測定した。

国際10-20法でいわれるFpzに合わせ27チャンネルあるプローブを前頭前野に相当する位置に装着した (図1)。図1にあるTは近赤外線を送光するファイバで、Rは受光するファイバである。TとRの間にある○で囲まれた数字の部分に実際に測定されている部位である。図の通りチャンネル1~12は右脳側に、チャンネル13~24は左脳側に配置されており、チャンネル25、26、27は中央付近に当たる。

課題動作

指の折り曲げ動作の左右対称動作として、椅座にて手を腹部の前に出させ、掌を上に向けて、開いた状態より親指から一本ずつ折り曲げさせ、五指すべてが折り曲げられたら小指から開かせるよう指示した。左右の手は対称に同じ動きをする。20秒間その動作を繰り返させた。課題動作の時間が短かければ脳への影響が見取れず、また長時間では動作への集中が途切れるため、これらの動作を20秒間とした。動作終了時は元通り両手が開い

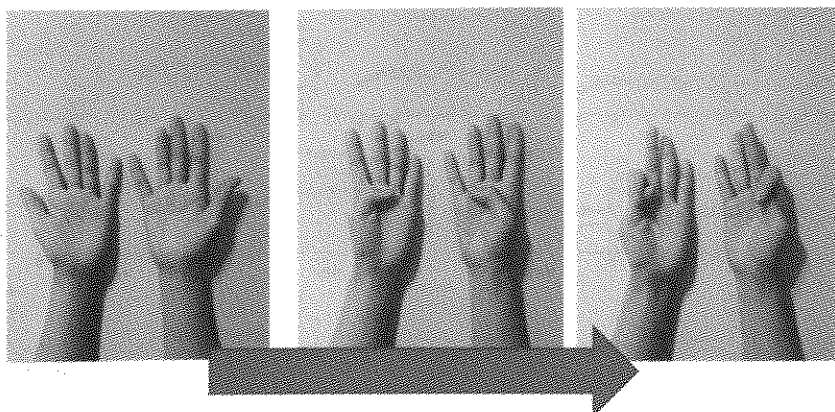


図2. 左右対称動作

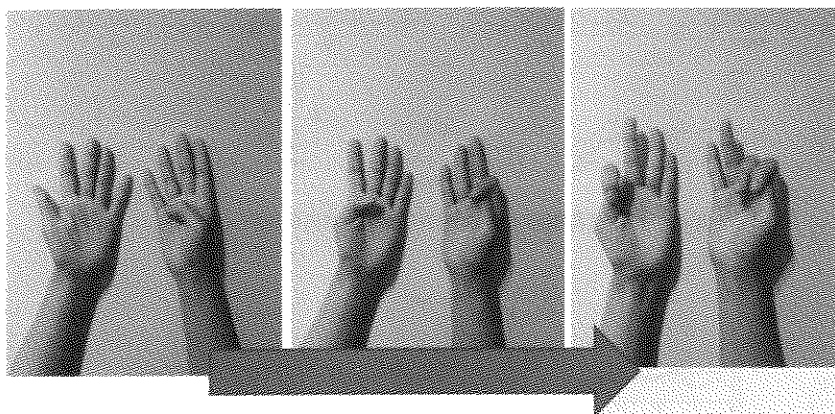


図3. 左右非対称動作

た状態となる (図2)。

レスト後の指の折り曲げ動作では左右非対称動作として、右手の親指だけ予め折り曲げておき、その状態から左右一緒に指の折り曲げ動作と伸展動作を行わせた。つまり常に左右の指が一本ずつずれた動きをしている動作である。実験では20秒間その動作を繰り返させた。動作終了時は右手の親指のみが曲げられており、左手は開いた状態に戻れば、正しく動作が遂行されたことになる (図3)。

なお、動作スピードのコントロールは行わなかったが、一つ一つの動作を正確に行うように指導した。また、頭部の上下動は血流の変化をもたらす、測定を不安定にさせることから、動作中は拍子をとるように頭を上り下りさせることは慎ませ、頭部の安定を図った。

手順

実験は、次の手順で左右対称動作と左右非対称動作の測定を行った。

レスト (1分間: 0~60秒)→左右対称動作として左右対称の指の折り曲げ (20秒間: 60~80秒)→レスト (30秒間: 80~110秒)→右手親指を曲げてから左右のずれ

を伴った指の折り曲げ (20秒間: 110~130秒)→レスト (30秒間: 130~160秒)

また、レストの状態では思考などをしないよう、何も考えないように指示した。さらに、頭部の挙動も起こさないよう、実験中は常に安静を保たせるようにした。

測定方法

fNIRSでは、各チャンネルで酸素化ヘモグロビン (oxy-Hb)、脱酸素化ヘモグロビン (deoxy-Hb)、そしてその和 (total-Hb) のデータを得ることが出来る。島津製作所製のLABNIRSでは、700~900 nmの近赤外線を用い、吸収の度合いにより酸素化ヘモグロビン、脱酸素化ヘモグロビン量を算出している。すなわち、酸素化ヘモグロビンは830 nm、脱酸素化ヘモグロビンは780 nmの近赤外線によって求めている。プローブのTファイバから投射された近赤外線はRファイバで受光されるが、さらにその光は光電子増倍管で電気信号に変換され、変形ランバート・ベールの法則に則って、ヘモグロビン量を算出している。本研究では、先行研究^{3,14)}によって最も感度が良いとされている酸素化ヘモグロビンを分析の対象とした。これは局所的な脳細胞の活動に伴

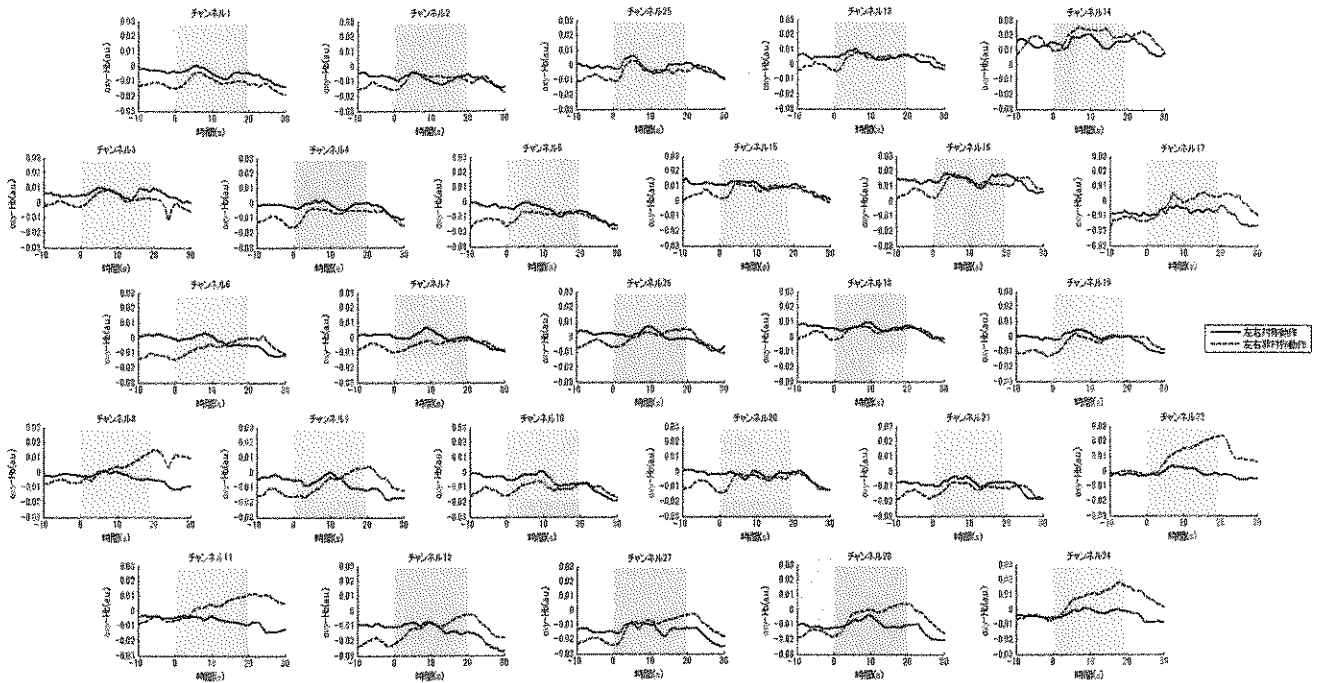


図4. 左右対称動作と左右非対称動作の10名の加算平均の比較

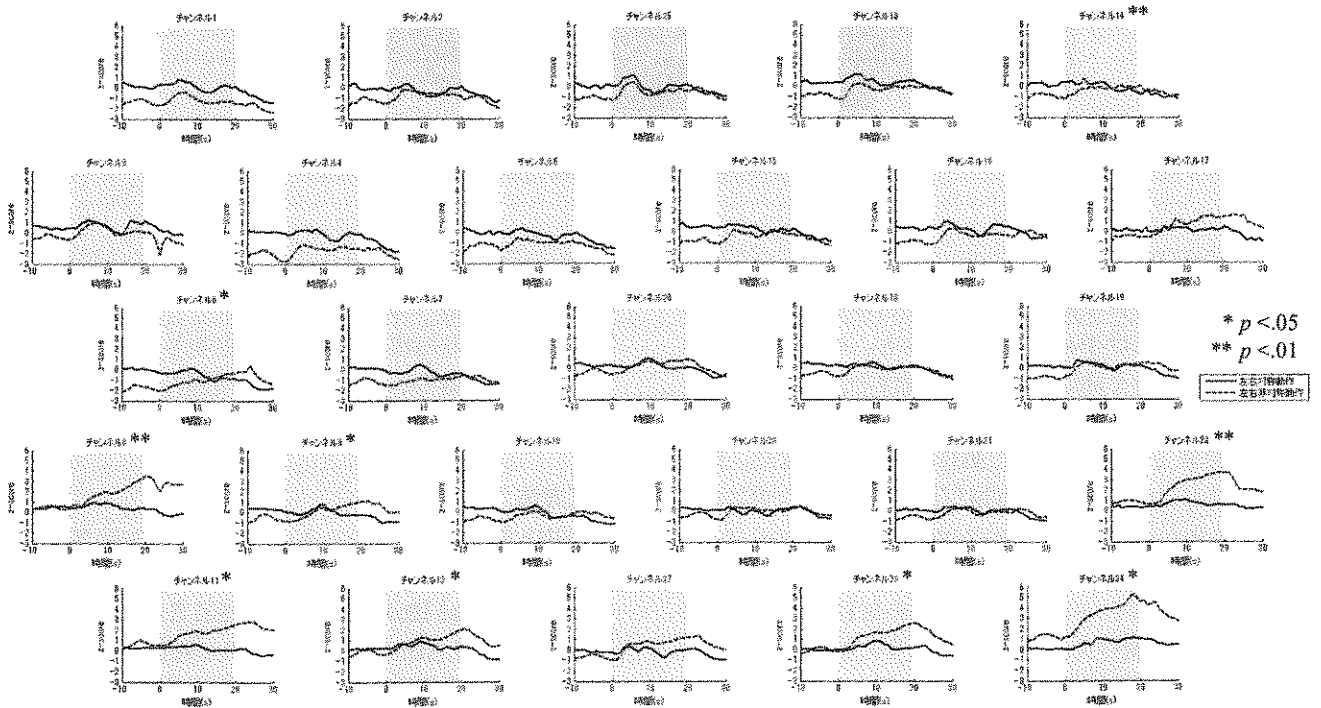


図5. 左右対称動作と左右非対称動作のZ得点（10名の加算平均）の比較

う酸素の消費を急速に補う場合、酸素化ヘモグロビンとの関連が強いとされているためである。なお、サンプリング周波数は10 Hzとした。

統計解析

10名のデータは課題動作20秒間の部分を加算処理し、最初の60秒のレストをベースとして標準化し、Z得点化した後、2元配置の分散分析にて検定を行い、ボンフェローニの多重比較を行った。有意水準は5%とした。なお、検定にはSPSS ver.21.0を用いた。

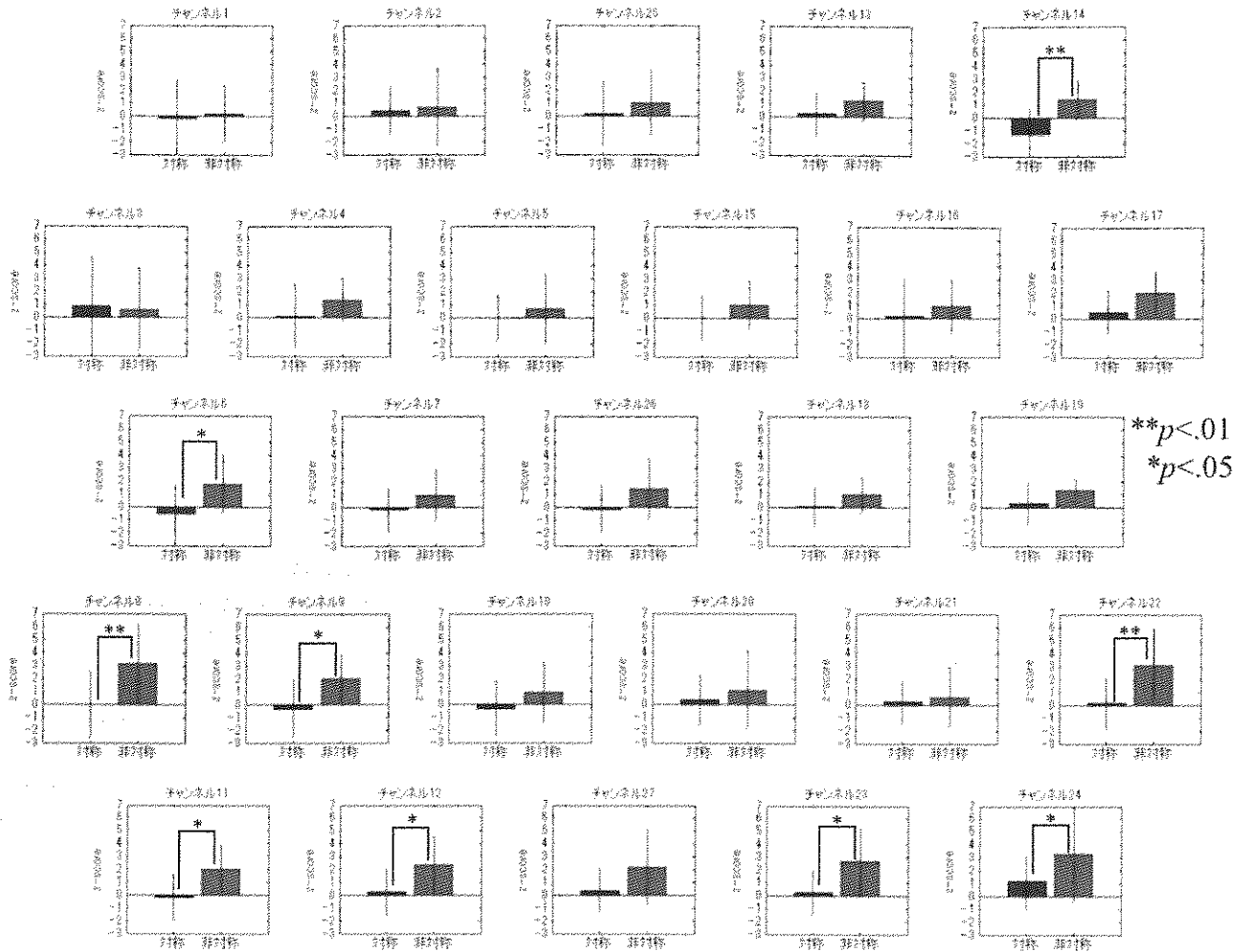


図6. 左右対称動作と非対称動作のZ得点の比較

3. 結果

まず課題動作の達成について、左右対称動作はすべての被験者が全く淀みなく行うことができたが、左右のずれを伴った非対称動作を、実験中完遂できた者は、一人もいなかった。特に折り返しのところ、つまり小指まで閉じて、また開いていくところで左右非対称の動作から対称の動作に戻ってしまい、また最初からやり直すということになっていた。なお、左右対称動作は20秒間で3~4回繰り返すことができるスピードで行われていた。

左右対称に指曲げ動作を行った時の10名の加算平均のデータと左右非対称に指曲げ動作を行った時の10名の加算平均のデータの比較を図4に示した。図中の網掛け部分が課題動作中である。

続いて、左右対称動作では素化ヘモグロビンに変化が見られなかったが、左右非対称動作では酸素化ヘモグロビンの上昇が明らかに認められる部分が見られた。そこで課題動作前のレストをベースとして、10名の加算平均のデータを標準化してZ得点化し、左右対称に指曲げ

動作を行ったZ得点と左右非対称に指曲げ動作を行ったZ得点との比較を図5に示した。

また、それぞれのチャンネルにおいて、左右対称動作と左右非対称動作で分散分析を行った結果を図6に示した。

その結果、チャンネル6 ($p < .05$)、チャンネル8 ($p < .01$)、チャンネル9 ($p < .05$)、チャンネル11 ($p < .05$)、チャンネル12 ($p < .05$)、チャンネル14 ($p < .01$)、チャンネル22 ($p < .01$)、チャンネル23 ($p < .05$)、チャンネル24 ($p < .05$) において、それぞれ有意に酸素化ヘモグロビンの増加が左右非対称動作で認められた。

4. 考察

本研究では、左右対称な指の折り曲げ動作時と、わずかなずれを伴う左右非対称な指の折り曲げ動作時の前頭前野の脳内酸素動態について検討を行った。本研究における課題動作の差異は、指の折り曲げ動作時において右手親指一本をあらかじめ曲げておくか否かにすぎない。

すなわち左右対称の動きであれば極めて容易な動作であるが、わずか一本の指をあらかじめ曲げてずれを生じさせた状態を作り出すことで、動作を困難なものにしている。しかし運動そのものに関わるエネルギー消費や動作そのものの難易度は高いものではない。本研究で採用した課題動作は大筋群の筋活動がないため、両動作とも手指以外は安静にしている状態であり、健常者であれば容易に行うことができる動作であることは想像に難くない。

左右対称動作に比して、左右非対称動作で賦活化が確認された部分は、チャンネル8、チャンネル11、チャンネル22、そしてチャンネル24であった。これらのチャンネルの位置はこめかみより上のあたりであり、先行研究から下前頭回（44、45野：ブローカ野）であることが分かっている³⁷⁾。中前頭回は下前頭回より中心寄りであることからチャンネル6、チャンネル9、チャンネル12、チャンネル14、チャンネル23が中前頭回であると考えられる。しかし、本実験では上前頭回の関与は認められなかった。

前頭前野は人間らしい活動、すなわち感情や意識、知能を司っていると考えられている。その中で中前頭回は顔や名前の記憶、ワーキングメモリーに関与しているとされている¹⁷⁻²²⁾。この部分はオッドボールパラダイムや振り付け記憶課題のような刺激では賦活化が認められていない^{16, 26, 27)}。また、下前頭回、特に44野はブローカ野と知られており、言語活動に関わっているとされている²⁸⁻³⁰⁾。佐々らの研究³¹⁾によれば言語処理に下前頭回、すなわちブローカ野だけでなく、中前頭回の関与も示唆されている。本研究では右側の中前頭回が有意に賦活化されていたが、この部分はワーキングメモリーでも特に空間認識を司る部分とされている³⁸⁾。この部位は、ワーキングメモリーや言語活動と、これまで強く関連が認められてきた部位である。つまり振り付け記憶課題も記憶に関わる課題であるものの、それによっては賦活化されず、かつ言語活動に寄与している部位が、左右非対称動作で賦活化されており、左右非対称動作を実施することで、ワーキングメモリーの改善が期待され得る。

運動には運動野や高次運動野が関与し、複雑動作時に運動感覚領野の活動が増加することは報告³⁾されている。それはむしろ当然であるが、複雑とまではいかない指一本の差異による左右非対称動作により前頭前野の賦活化が認められている。

運動や計算などで、前頭前野の活動が高まる報告²³⁾も見られる。運動強度と比例して前頭前野の血流の増大を報告している研究もあるが^{24, 25)}、これは体全体の血流量の増加によって齎されていると考えられる。これに対して本研究の特徴は、激しい身体活動を伴うわけでもなく、大筋群の動きを伴わず、指の屈伸運動のみで運動強

度は極めて低く、両タスク間の運動強度の差はないといえる。本研究の独自性は、複雑な思考やタスクをこなすわけでもなく、ほんのわずかな左右の差異、つまり片手のみ指一本をあらかじめ曲げておくことによって前頭前野の賦活化が認められている点にある。本研究では左右非対称動作により、前頭前野の前頭極や上前頭回ではなく、中前頭回や下前頭回の賦活化が認められており、それらの部位はワーキングメモリーや言語活動といった精神的な活動に使われると考えられている³⁸⁾。下前頭回が指運動や模倣動作などに関係していることは宮本ら³³⁾のほかにもいくつか報告^{34, 35)}があり、指運動という点では本研究の結果とも符合するが、左右対称動作では賦活化は認められないため、左右非対称動作の影響と考えられる。

左右非対称動作を行う場合、無意識で行えば左右対称になってしまう動きを制御しようとしていることも考えられる。Aronらの研究³⁶⁾によれば右下前頭回は人の行動抑制を司っているとしており、本研究の下前頭回の賦活化も行動抑制によるものとも考えられた。

本研究では、わずか指一本の左右のずれを伴う動作によって、中前頭回、下前頭回の賦活化が認められており、ワーキングメモリーのエクササイズや模倣動作などの特別な動作を実施しなくとも、個人のみで行える動作で前頭前野が賦活化されることが示唆され、何か道具を準備したりせずとも、左右対称動作をわずかにずらす動作だけで前頭前野の活動を賦活化させられることが可能と考えられる。

前頭前野の賦活化は認知症の予防、改善に繋がる³⁹⁾とされており、左右非対称な動きを行うことで中前頭回、下前頭回の賦活化がなされれば、認知症の予防に繋がることも考えられる。

スポーツや運動時のヒトの動きは、左右の連動的な動きで構成されている。連動的な動き、もしくは反射的な動きはいわゆる健常者であれば容易である。しかし楽器演奏や武道的な攻防では、左右の連動がむしろ損なわれた動きが起り得る。そうした左右の連動を伴わない左右非対称な動きは、中前頭回や下前頭回を賦活化させることが本研究で示唆された。楽器演奏や運動がもたらす身体への正の影響の一つになり得ると考えられる。運動が呼吸循環器や筋、骨格に対して良い効果をもたらすだけでなく、脳、それも運動野でなく、前頭前野、特に中前頭回や下前頭回といった記憶や言語活動を司る部分への正の影響が認められた。学習障がい児は、ワーキングメモリー課題において中前頭回の賦活化が認められておらず⁴⁰⁾、左右非対称動作の認知症予防や発達障がい者・児への改善的な効果も期待でき得る。

今後は、今回局所脳内酸素動態に影響を及ぼした左右非対称動作を繰り返し行うことにより、継続的に中前頭

回、下前頭回を賦活化し得るか否かについて検討を行いたい。左右非対称動作である楽器の演奏において、熟練者は前頭前野の活動が抑えられるとの報告⁴⁾もあり、左右非対称な動きを繰り返すことで、容易にその動作ができるようになった状況での脳活動についても検討を行っていきたい。さらに認知症や発達障がいへの改善への効果についても検討したい。

まとめ

本研究では、手指の左右対称動作と左右非対称動作が局所脳内酸素動態に及ぼす影響について検討した。

結果として、左右対称動作に比べて左右非対称動作において、左右の中前頭回、下前頭回の賦活化が認められた。これらの部位はワーキングメモリーに重要とされている部位であり、ワーキングメモリーエクササイズや複雑系の運動、楽器演奏などにおいて賦活化が認められている部位であるが、簡単な左右非対称動作でも賦活化が可能であることが示唆された。

したがって左右非対称動作を実施することにより、ワーキングメモリーや認知症予防などの改善が期待できる結果となった。学習障がい児・者はワーキングメモリーが賦活化せず、短期記憶が苦手で、学習に困難を抱えている³⁸⁾とされている。今後は短期記憶が難しい者や、認知症の可能性のある者に対して左右非対称動作を行い、該当部位の賦活化がなされるかについて、さらには当該部位の賦活化が学習障がいの軽減に繋がるかについて研究を重ねる予定である。

文 献

- 1) 中野昭一 (2001) 図解・運動の仕組みと応用—運動・生理・生化学・栄養。医歯薬出版株式会社：東京, 105-107.
- 2) Schlaug G., Jäncke L., Huang Y., Staiger J. F., Steinmetz H. (1995) Increased corpus callosum size in musicians. *Neuropsychologia* 33: 1047-1055.
- 3) 内藤幾愛, 大西秀明, 古沢アドリア明美 (2008) 単純動作と複雑動作時における脳活動の比較. *理学療法学* 35(2): 50-55.
- 4) 川島隆太, 井上健太郎, 松村道一 (1998) PETによるヒトの手の運動機能マップ. *神経研究の進歩* 42(1): 139-145.
- 5) 山岡 晶, 森 悠太, 須田一哉ら (2006) 和太鼓の効用に関する脳活動計測. *情報処理学会研究報告*: 29-34.
- 6) 藤居宏平, 柴田智広, 小林亮太他 (2010) NIRSを用いた基礎的なドラム演奏時における熟達者-非熟達者間の脳活動比較. *電子情報通信学会技術研究報告 NC*: 31-36.
- 7) 中島淑恵, 市江雅芳 (2009) ピアノ演奏習熟度別初見課題遂行時における脳神経活動に関するNIRSを用いた調査. *医療看護研究* 5(1): 40-44.
- 8) Hoshi Y. (2005) Functional near-infrared spectroscopy: Potential and limitations in neuroimaging studies. *Int Rev Neurobiology* 66: 238-268.
- 9) Hoshi Y., Tamura M. (1993) Dynamic multichannel near-infrared optical imaging of human brain activity. *J Appl Physiol* 75: 1842-1846.
- 10) Hoshi Y., Tamura M. (1993) Detection of changes in cerebral oxygenation coupled to neural function during mental work in man. *Neurosci Lett* 150: 5-8.
- 11) Kato T., Kamei A., Takashima S., et al. (1993) Human visual cortical function during photic stimulation monitoring by means of near-infrared spectroscopy. *J Cereb Flow Metab* 13: 516-520.
- 12) Villringer A., Planck J., Hock C., et al. (2001) Near infrared spectroscopy: A new tool to study hemodynamic changes during activation of brain function in human adults. *Neurosci Lett* 154: 101-104.
- 13) Miyai I., Tanabe H. C., Sase I., et al. (2001) Cortical mapping of gait in humans: A near-infrared spectroscopic topography study. *Neuroimage* 14: 1186-1192.
- 14) 福田正人 (2009) 精神疾患とNIRS. 中山書店：東京, 7-12.
- 15) Hoshi Y., Kobayashi N., Tamura M. (2001) Interpretation of near-infrared spectroscopy signal: A study with a newly developed perfused rat brain model. *J Appl Physiol* 90: 1657-1662.
- 16) 山口修平, 卜蔵浩和, 小林祥泰 (2010) 注意・記憶機構における前頭葉の役割. *老年期認知症研究会誌* 16: 16-19.
- 17) 高橋一夫, 山口修平, 小林祥泰 (2010) 顔と名前の記憶想起に関する機能的MRI~加齢の影響について~. *老年期痴呆研究会誌* 15: 160-164.
- 18) Campanella S., Joassin F., Rossion B., et al. (2001) Association of the distinct visual representations of faces and names: A PET activation study. *Neuroimage* 14: 873-882.
- 19) 三村 将, 板村 雄 (2003) ワーキングメモリーをめぐる最近の動向. *リハビリテーション医学* 40: 314-322.
- 20) 斎藤恵一, 安藤貴泰, 百瀬桂子 (2009) 機能的MRIを用いた視覚性ワーキングメモリー課題における脳活動の検討. *バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌* 11(2): 87-91.
- 21) Jonides J., Smith E. E., Koeppel R. A., Awh E., et

- al. (1993) Spatial working memory in humans as revealed by PET. *Nature* 363: 623-625.
- 22) Awh E., Jonides J., Smith, E. E., et al. (1999) Rehearsal in spatial working memory: Evidence from neuroimaging. *Psychological Science* 10: 437-443.
- 23) 中前智通, 篠原英記, 松尾善美ら (2007) 記憶課題による脳賦活効果の検討: 近赤外分光法 (NIRS) を用いた研究. *神戸学院総合リハビリテーション研究* 2(2): 15-21.
- 24) 松尾善美, 春藤久人, 中前智通ら (2007) 運動療法強度が前頭前野の血流動態に及ぼす影響. *神戸学院総合リハビリテーション研究* 2(2): 31-35.
- 25) Ide K., Horn A., Secher N. H., et al. (1999) Cerebral metabolic response to submaximal exercise. *J Appl Physiol* 87: 1604-1608.
- 26) 小山悟史, 小久保秀之, 上之真太郎 (2009) 音楽DVDを用いた振り付け記憶課題の研究—fNIRSによる脳血流変化の測定—. *J Int Soc Life Info Sci* 27(2): 197-199.
- 27) McCarthy G., Puce A., Constable R. T., et al. (1996) Activation of human prefrontal cortex during spatial and nonspatial working memory tasks measured by functional MRI. *Cereb Cortex* 6: 600-611.
- 28) Stromswold K., Caplan D., Alpert N., et al. (1996) Localization of syntactic comprehension by positron emission tomography. *Brain & Language* 52: 114-116.
- 29) Just M. A., Carpenter P. A., Keller T. A., et al. (1996) Brain activation modulated by sentence comprehension. *Science* 274: 114-116.
- 30) Chee M. W., O'Craven K. M., Bergida R., et al. (1999) Auditory and visual word processing studied with fMRI. *Human Brain Mapping* 7(1): 15-28.
- 31) 佐々裕子, 杉浦元亮, 渡辺丈夫ら (2002) 言語処理とその脳の活動領域の考察. *自然言語処理* 150(14): 91-97.
- 32) 南部功夫, 大須理英子, 内藤栄一ら (2005) 手指筋出力と運動活動との関係. *信学技報* 141: 25-30.
- 33) 宮本礼子, 菊池吉晃, 妹尾淳史 (2008) 鏡模倣に対する解剖模倣の特異的神経基盤. *日本保健科学学会誌* 11(3): 153-161.
- 34) Binkofski F., Amunts K., Stephan K. M., et al. (2000) Broca's region subserves imagery of motion: A combined cytoarchitectonic and fMRI study. *Human Brain Map* 11: 273-285.
- 35) Iacoboni M., Woods R. P., Brass M., et al. (1999) Cortical mechanisms of human imitation. *Science* 286: 2526-2528.
- 36) Aron A. R., Fletcher P. C., Bullmore E. T., et al. (2003) Stop-signal inhibition disrupted by damage to right inferior frontal gyrus in humans. *Nat Neurosci* 6: 115-116.
- 37) 古屋晋一 (2012) 『ピアニストの脳を科学する 超絶技巧のメカニズム』春秋社: 東京, 77.
- 38) T. P.アロウェイ (2011) 『ワーキングメモリと発達障害 教師のための実践ガイド2』北大路書房: 京都, 5.
- 39) 高橋真悟, 児玉直樹, 小杉尚子ら (2014) 近赤外線を用いた認知症患者における前頭前野血流量の検討. *電気学会論文誌C* 134(1): 35-40.
- 40) 小池敏英 (2004) ワーキングメモリの評価と学習障害児. 第2回光脳機能イメージング研究会抄録集.
2014年4月2日 受付
2014年11月7日 受理