

研究報告

単純動作と複雑動作時における脳活動の比較

—近赤外分光法 (NIRS) による検討*—

内藤 幾愛^{1) #} 大西 秀明²⁾ 古沢 アドリアネ明美²⁾

要旨

本研究の目的は、手指の複雑動作と単純動作遂行時における脳血流量変化と運動学習による脳血流量変化を近赤外分光法 (near infrared spectroscopy, NIRS) を用いて検討することである。課題動作は、複雑動作としてピンポン球とゴルフボールをそれぞれ2個ずつ、手掌で反時計回りに回転させる動作とし、単純動作は、ゴムボールを繰り返し握る動作とした。その結果、単純動作に比べ複雑動作遂行時には、筋活動が同程度であっても大脳感覚運動領野の脳血流量が有意に増加することが示された ($p < 0.01$)。また、6日間の複雑動作課題練習後では動作遂行速度が速くなるため、同一回転数での動作遂行時には、筋活動量および大脳運動感覚領野の脳血流量が減少することが示された。これらのことから、複雑動作遂行時には、脳血流量が増加していることが明らかになった。また、NIRSを用いて運動学習および運動制御機構における大脳皮質活動状態を検討することが可能であることが示唆された。

キーワード 近赤外分光法 (near infrared spectroscopy, NIRS), 大脳皮質局所血流, 運動制御

はじめに

近年の生体医工学技術の著しい発展に伴い、ヒトを対象とした非侵襲的脳機能イメージング装置が普及してきている。代表的なものとして、脳磁図 (Magnetoencephalography, MEG) や陽電子放射断層撮影装置 (positron emission tomography, PET)、機能的核磁気共鳴断層撮影装置 (functional magnetic resonance imaging, fMRI)、近赤外分光イメージング装置 (near infrared spectroscopy, NIRS) などがある。各計測装置にはそれぞれ特徴があり、時間分解能が著しく優れているのはMEGで、脳深部の活動を計測できるのがPETやfMRIである。NIRSは時間分解能や空間分解能がやや劣るものの、他の計測装置に比較して計測環境に制限が少ないことが最大の利点である。

NIRSは頭皮上より近赤外光を頭蓋内に向けて照射

し、脳を通過して頭蓋外に出てきた近赤外光を測定することにより、大脳皮質の酸素化ヘモグロビンおよび脱酸素化ヘモグロビン濃度を計測できる装置である¹⁾²⁾。1993年にHoshi Y³⁾⁴⁾ やKato T⁵⁾, Villringer Aら⁶⁾ が脳神経活動に同期して脳内ヘモグロビンが変化することを相次いで報告し、その後、急速な技術開発も相まってNIRSを利用した研究が発展してきた。近年では計測環境に制限が少ないという特徴をいかしてリハビリテーション領域でも積極的に活用されるようになり、トレッドミル歩行時における運動関連領野の活動についても報告されている⁷⁾⁸⁾。

ヒトを対象とした運動制御や運動学習に関する研究は幾つかあるが、PETやfMRIを利用したものが多く、どれも臥位姿勢で運動を遂行している⁹⁻¹¹⁾。これは、PETやfMRIを利用する際に計測環境が制限されるためである。しかし、日常生活における動作の多くは座位や立位など体幹を起こした姿勢での動作が多く、臥位姿勢以外での運動学習過程の解明が必要であると考えられる。2007年にHatakenakaら¹²⁾ は座位保持姿勢で回転板を利用した運動習熟に関する研究を行い、運動習熟にともない前補足運動野の活動が減少することを報告しているが、座位や立位姿勢での運動学習過程における脳活動についての研究は少ないのが現状である。

本研究においては、座位保持状態で2個の球を手掌で

* Oxygenation Changes in Sensory Motor Cortex during Simple and Complex Movements — A Near-Infrared Spectroscopy Study —

1) 筑波記念病院 リハビリテーション部

(〒300-2622 茨城県つくば市要1187-299)

Ikue Naito, RPT; Department of Rehabilitation, Tsukuba Kinen Hospital

2) 新潟医療福祉大学 理学療法学科

Hideaki Onishi, RPT, PhD, Akemi A. Furusawa, PhD; Department of Physical Therapy, Niigata University of Health and Welfare

E-mail: reha@tsukuba-kinen.or.jp

(受付日 2007年7月21日/受理日 2008年1月10日)

回転させる複雑動作⁹⁾とゴムボールを握る単純動作遂行時における大脳皮質運動関連領域の活動を解析し、座位姿勢での手指巧緻動作の複雑性が脳活動に与える影響を明らかにすることを目的とする。また、6日間の複雑動作練習後の脳活動を解析し、運動技能習熟による大脳皮質活動の変化についても検討する。

方 法

1. 対象

健康成人女性6名(21.2 ± 0.4歳)を対象とした。研究実施前に被験者には実験内容を十分に説明して文書にて同意を得た。被験肢は利き手側としたが、今回は全被験者右利きであった。

2. 使用器具

実験には、24チャンネルの近赤外光イメージング装置(多チャンネル脳酸素モニタ OMM-3000/16, 島津製作所), 筋電計(DPA-2008, ダイアメディカルシステム, Power Lab 8/30, ADInstruments), メトロノーム, ピンポン球2個(3.8cm, 2g), ゴルフボール2個(4.0cm, 50g), ゴムボール1個(7.0cm, 25g)を使用した。

3. NIRS センサ装着位置(図1)

照射プローブ8本(T1からT8)および受容プローブ8本(R1からR8)を被験者の左前頭葉に4×4の配列で配置した。被験者間でプローブ位置のバラツキを減少させるために、左右の外耳孔を結んだ線(中心溝)と鼻

から垂線(大脳縦列)が交わる点(Cz)上に照射プローブ8(T8)が位置するように近赤外光プローブ固定用ホルダを設置した。プローブ間の間隔は3cmであった。照射プローブとそれに隣接する受容プローブの間がヘモグロビン濃度の計測部位になり、合計24チャンネルで計測を行った。

4. 測定肢位

測定肢位は、椅子に腰掛けた端座位姿勢で、肘関節屈曲、前腕回外位で前腕部を前方の机に乗せた状態とした(図2)。また、運動以外の脳賦活を避けるため、雑音の入りにくい実験室内で実験を行い、実験中は静かにし、被験者には前方の壁に貼付した黒点を凝視するように説明した。

5. 課題動作

Task1およびTask2は複雑な動作課題⁹⁾として、2個の球を手掌で反時計回りに転がす動作とした(図3A)。Task1は直径3.8cmのピンポン球を使用し、Task2では直径4.0cmのゴルフボールを使用した。Task3は単純な動作課題とし、直径7.0cmのゴムボールを一定リズムで握る動作とした(図3B)。

計測プロトコルは、休息20秒・課題動作20秒・休息20秒を1セットとして、3セット連続で行うように設定した。1回目の計測として、まずTask1およびTask2を最大努力で行わせた際の脳活動および筋活動(浅指屈筋と総指伸筋)を計測した。次に、Task3をTask1遂行

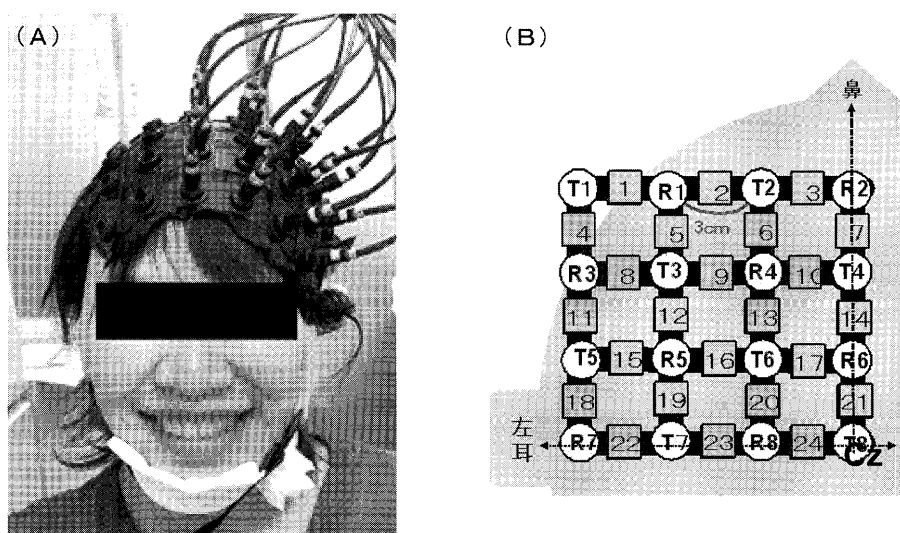


図1 NIRS照射・受光プローブの装着図とプローブ配置図

(A) 1名の被験者がプローブ固定用ホルダを装着した状態

(B) 照射プローブおよび受光プローブの配置図。左右の外耳孔を結んだ線(中心溝)と鼻から垂線(大脳縦列)が交わる点をCzと規定し、全被験者の測定位置が等しくなるようCz上に照射プローブ8(T8)が一致するようにプローブ固定用のホルダを被験者の左前頭葉に設置した。照射プローブ(T)と受容プローブ(R)の間隔は3cmで、照射プローブ8本と受光プローブ8本を4×4の配列で配置した。隣接するプローブ間で計測が可能であり全24チャンネルで計測した。

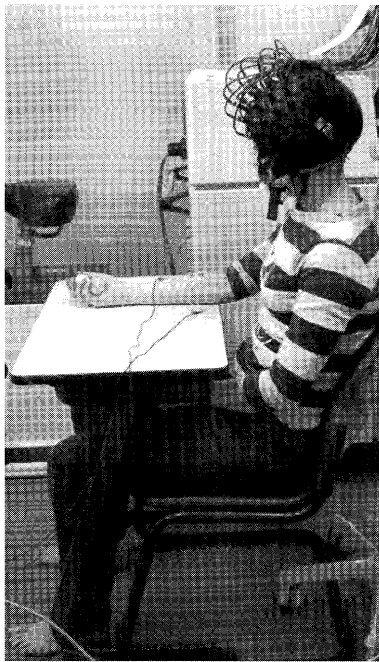


図2 計測肢位

計測肢位は、椅子に腰掛けた端坐位姿勢で、肘関節屈曲、前腕回外位で前腕部を前方の机に乗せた状態とした。また、運動以外の脳賦活を避けるため、雑音の入りにくい実験室内で実験を行い、実験中は静かにし、被験者には前方の壁に貼付した黒点を凝視するように説明した。

時における浅指屈筋の筋電図整流波形の振幅値とほぼ同様の筋活動が得られるようにパーソナルコンピュータの画面で確認しながら実施した。1回目の計測後、各被験者にピンポン球を2個渡し、翌日よりTask1の動作を1日15分程度、6日間継続して練習してもらい、7日目に2回目の計測を実施した。2回目の計測はTask1のみとし、最大努力で回転させる条件（最大努力条件）と練習前のボール回転数と等しい回転数に調節した条件（回転数調整条件）で計測した。回転数調整条件ではメトロノームを利用した。

6. 筋電図導出と解析方法

筋電図の導出には表面電極を用い、被験肢側の浅指屈筋および総指伸筋の2筋を筋活動導出対象とした。浅指屈筋の電極位置は、前腕最大回外位で被験者の手関節手掌面を験者が右手で握り、験者の示指を上腕二頭筋腱に向かって伸ばした位置とした。総指伸筋は、前腕を最大回内位で前腕近位1/3のところに験者が右手掌をあて、橈骨と尺骨を母指と中指で掴み、さらにその間を示指で2等分した位置とした。また、それぞれ電極間距離は約2cmとした。

筋電信号は前置増幅器（DPA-10P、ダイヤモンドカルシステム）および増幅器（DPA2078、ダイヤモンド

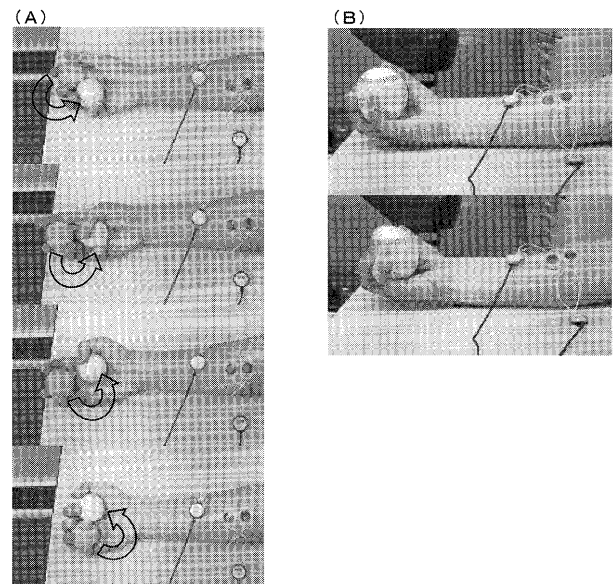


図3 Task遂行時の状態

(A)はTask1およびTask2遂行時の状態を示している。Task1およびTask2は2個の球を手掌で反時計回りに転がす複雑な動作課題とした。1回目の計測は動作を全く練習していない状態とし、2回目の計測は、1回目の翌日よりTask1動作を1日15分程度、6日間継続してもらい、7日後に実施した。

(B)は、単純動作として設定したTask3の状態を示している。Task3を遂行する際には、複雑動作として設定したTask1遂行時の筋電図全波整流波形の振幅と同程度になるようにパーソナルコンピュータの画面で確認しながら実施した。

カルシステム）で増幅し、サンプリング周波数1kHzでパーソナルコンピュータに取り込んだ。筋電図波形の取り込みおよび解析には生体信号解析システム（Power Lab 8/30 and Chart & Scope, ADInstruments）を使用した。Task3においては浅指屈筋の筋電図全波整流波形を表示し、動作強度を調整して実施した。さらに全課題終了後に各動作遂行20秒間の筋電図積分値（IEMG）を算出した。

7. NIRS解析方法

それぞれのTaskにおいて、動作前の休息時の状態を基線とし、3セット連続して得られた酸素化ヘモグロビンデータを加算平均した。各動作遂行時における20秒間の酸素化ヘモグロビンの値から、全24チャンネルの平均値を算出し、著しく酸素化ヘモグロビンの増加がみられた5つのチャンネル（18, 19, 20, 22, 23チャンネル）を選択した。次に、選択した5つのチャンネルの平均値を算出し、被験者6人の平均値を代表値として検定した。

8. 統計処理

IEMGおよびNIRSデータともに、一元配置分散分析を用いて検定した。また、事後検定にはTukey HSDを用い、有意水準は5%とした。

結 果

1. 2個の球の回転数

練習前の Task1 および Task2 遂行時において、2 個の球を回転させた回数はそれぞれ 7.2 ± 4.6 回 (Task1) と 7.8 ± 5.5 回 (Task2) であった。6 日間の練習後、Task1 の最大努力条件では 14.7 ± 4.3 回であり、練習前に比較して有意に高い値であった ($p < 0.01$)。練習後の回転数調整条件においては、 7.2 ± 4.6 回 (Task1) であり練習前と有意な差は認められず、回転数の調整がスムーズに行われていた。

2. 筋活動

練習前の各課題遂行時における浅指屈筋の IEMG は、 $0.86 \pm 0.44 \text{ mV} \cdot \text{s}$ (Task1), $0.84 \pm 0.36 \text{ mV} \cdot \text{s}$ (Task2) および $0.94 \pm 0.33 \text{ mV} \cdot \text{s}$ (Task3) であり、それぞれ有意な差は認められなかった。また、総指伸筋の筋電図積分値は $0.64 \pm 0.44 \text{ mV} \cdot \text{s}$ (Task1), $0.56 \pm 0.24 \text{ mV} \cdot \text{s}$ (Task2), $0.69 \pm 0.22 \text{ mV} \cdot \text{s}$ (Task3) であり、浅指屈筋と同様にそれぞれ有意な差は認められなかった。

練習前後の Task1 での筋電図積分値を比較すると、練習後の回転数調整条件では、浅指屈筋および総指伸筋ともに他の 2 条件に比較して有意に小さな値を示した ($p < 0.01$) (表 1, 表 2)。

3. NIRS

課題遂行時における酸素化ヘモグロビン、脱酸素化ヘモグロビンおよび総ヘモグロビンの典型的な変化パターンを図 4 に示す。課題動作の開始に伴い、酸素化ヘモグロビンと総ヘモグロビンの増加と、脱酸素化ヘモグロビンの減少がみられた。これは、全ての Task において同様の傾向であった。

安静時を基準として動作遂行時の酸素化ヘモグロビン量をみると、練習前に行った Task1 遂行時には $0.0152 \pm 0.0015 \text{ mM} \cdot \text{mm}$ であり、Task2 ($0.0126 \pm 0.0016 \text{ mM} \cdot \text{mm}$) と比べて有意な差は認められなかった。しかし、Task3 では $0.0074 \pm 0.0014 \text{ mM} \cdot \text{mm}$ であり、Task1 および Task2 の値よりも有意に小さな値を示した ($p < 0.01$) (表 3)。

練習前後の酸素化ヘモグロビン量を比較すると、練習後の回転数調整条件では酸素化ヘモグロビンは、他の 2 条件に比べて有意に小さい値を示した ($p < 0.05$) (表 4)。

考 察

本研究において、動作の複雑性が脳活動に与える影響と、運動技能習熟による脳活動の変化について NIRS を利用して検討した。NIRS を利用することにより、脳内の酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンおよび総

表 1 練習前後における Task1 遂行時の浅指屈筋の筋電図積分値

被験者	練習前 最大努力条件	練習後 最大努力条件	練習後 回転数調整条件
Y. E.	0.45	1.18	0.54
Y. S.	1.05	0.98	0.39
H. I.	0.81	0.66	0.33
Y. K.	0.57	0.37	0.20
H. H.	0.64	0.50	0.42
T. W.	1.65	1.51	1.03
平均値	0.86	0.87	0.49 *
標準偏差	0.44	0.44	0.29

(単位: $\text{mV} \cdot \text{s}$) (*: $p < 0.01$)

表 2 練習前後における Task1 遂行時の総指伸筋の筋電図積分値

被験者	練習前 最大努力条件	練習後 最大努力条件	練習後 回転数調整条件
Y. E.	0.33	0.62	0.28
Y. S.	0.85	0.70	0.33
H. I.	0.33	0.45	0.20
Y. K.	0.55	0.39	0.16
H. H.	0.35	0.37	0.27
T. W.	1.45	1.21	0.64
平均値	0.64	0.62	0.31 *
標準偏差	0.44	0.32	0.17

(単位: $\text{mV} \cdot \text{s}$) (*: $p < 0.05$)

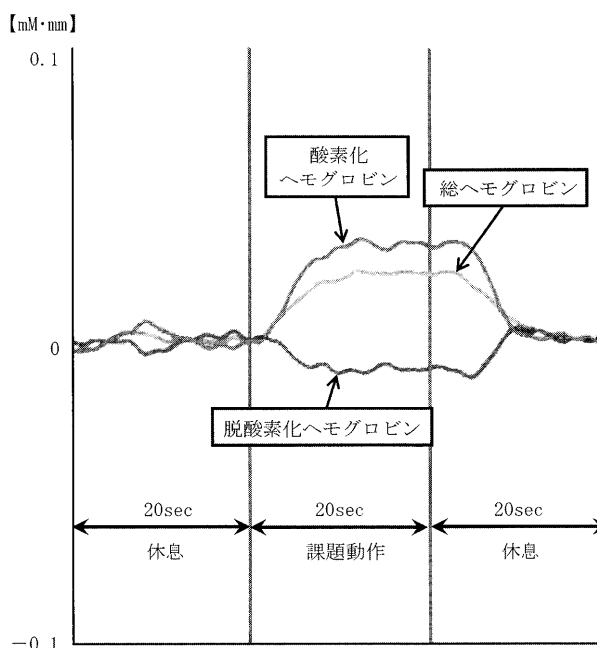


図 4 練習前の Task2 遂行時における被験者 T.W. の NIRS 波形 (19 チャンネル)

課題動作の開始に伴い、酸素化ヘモグロビンと総ヘモグロビンの増加と、脱酸素化ヘモグロビンの減少がみられた。これは全ての Task において同様であった。

ヘモグロビンが計測される。脳細胞の活動に伴い消費された酸素を急速に補うために局所的に血流量が増加し、その結果として酸素化ヘモグロビンや総ヘモグロビンが

表3 練習前における3種類のTask遂行時における酸素化ヘモグロビン量

課題動作	酸素化ヘモグロビン (mM・mm)	
Task1	0.0152 ± 0.0015	$\left. \begin{array}{c} \text{N.S.} \\ * \end{array} \right\} *$
Task2	0.0126 ± 0.0016	
Task3	0.0074 ± 0.0014	

(*: p < 0.01)

表4 3条件下におけるTask1遂行時の酸素化ヘモグロビン量

条件	酸素化ヘモグロビン (mM・mm)	
練習前 (最大努力条件)	0.0152 ± 0.0015	$\left. \begin{array}{c} \text{N.S.} \\ * \end{array} \right\} *$
練習後 (最大努力条件)	0.0140 ± 0.0024	
練習後 (回転数調整条件)	0.0054 ± 0.0024	

(*: p < 0.05)

増加する。これらのうち酸素化ヘモグロビンが局所脳血流と関連が強いと報告されており¹³⁾、本研究課題においても酸素化ヘモグロビンを解析の対象とした。

複雑な動作である2個の球を回転させる課題を2種類と、単純な動作であるボール握り課題遂行時における脳活動を比較した結果、複雑動作遂行時には、単純動作遂行時に比較して有意に運動感覚領野の活動が増強した。PETを利用した先行研究では、指屈伸の単純動作遂行時と鉄球を手掌で回転させる複雑動作遂行時の脳活動を比較した結果、複雑な運動においては一次運動野・感覚野、運動前野、補足運動野の活動が強くなることと、運動と同側の一次運動野・感覚野、運動前野に活動が認められると報告している¹⁴⁾。しかし、動作遂行時における筋活動を比較しておらず、動作遂行の困難さを反映しているのか、筋活動量の違いによるものかが明らかでない。本研究においては、3種類の課題において動作を遂行している主筋群の活動レベルに有意な差が認められなかった。このことから、動作課題による脳活動の違いは、筋活動による影響ではなく動作遂行の困難さを反映したものであると考えられる。

複雑な動作課題である2個の球を手掌で回す練習を6日間継続することにより、一定時間内に回転させることができる最大回転数は有意に増加した。これは複雑な動作課題を練習することによって学習された結果であると考えられる。

練習前後の最大努力条件の脳活動を比較すると、両者に有意な差が認められなかった。また、筋活動も同様に練習前後の最大努力条件では有意な差が認められなかった。このことは、運動学習により動作遂行が容易になったものの、いずれも最大努力で動作を遂行している場合、筋活動および脳活動のレベルに変化が認められないことを示唆していると考えられる。また、練習後に練習前と同じ回転数で2個の球を回転させた課題においては、練

習前に比較して筋活動および脳活動ともに有意に低下していた。筋出力と一次運動野の血流状態とが正の相関関係にあることが報告されており¹⁵⁾、本研究においても、巧緻性を必要とする複雑な動作を練習することにより、パフォーマンスの向上として動作遂行がスムーズになり、同じスピードで動作を遂行するには少ない努力(筋活動)で動作を遂行できるようになったため、大脳皮質において活動状態が減少したものと考えられる。

これらのことから、同じ筋活動量で動作を遂行していても、複雑な課題を遂行している場合は大脳皮質の活動が増加することと、運動学習により動作遂行がスムーズになった場合、動作遂行時の筋活動減少とともに脳活動も減少することが明らかになった。また、PETやfMRIのような高価な機器に比較して、比較的安価なNIRSを利用することにより、ヒトを対象とした運動学習状況を捉えることが可能であることを示すことができた。しかし、脳血流量は運動をイメージするだけでも変化することから⁷⁾、本実験における最大努力での複雑動作遂行時の脳血流量に、最大努力という心理的状态が影響を及ぼしていることも否めない。そのため、最大努力での複雑動作遂行時における脳活動についても更に追求していく必要があると考える。また、本研究においては被験者数が6名と少数であったことや酸素化ヘモグロビンのみを解析対象としているため、今後、被験者数を増やすとともに脱酸素化ヘモグロビンの解析や脳活動部位の同定解析を含めてさらに検討を加えていきたい。

文 献

- 1) Jobsis FF: Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. *Science* 198; 1264-1267, 1977.
- 2) Hoshi Y: Functional near-infrared spectroscopy: potential and limitations in neuroimaging studies. *Int Rev Neurobiology* 66: 238-268, 2005.
- 3) Hoshi Y, Tamura M: Dynamic multichannel near-infrared optical imaging of human brain activity. *J Appl Physiol* 75: 1842-1846, 1993.
- 4) Hoshi Y, Tamura M: Detection of dynamic changes in cerebral oxygenation coupled to neural function during mental work in man. *Neurosci Lett* 150: 5-8, 1993.
- 5) Kato T, Kamei A, *et al.*: Human visual cortical function during photic stimulation monitoring by means of near-infrared spectroscopy. *J Cereb Blood Flow Metab* 13: 516-520, 1993.
- 6) Villringer A, Planck J, *et al.*: Near infrared spectroscopy (NIRS): A new tool to study hemodynamic changes during activation of brain function in human adults. *Neurosci Lett* 154: 101-104, 1993.
- 7) Miyai I, Tanabe HC, *et al.*: Cortical mapping of gait in humans: A near-infrared spectroscopic topography study. *NeuroImage* 14: 1186-1192, 2001.
- 8) Miyai I, Suzuki M, *et al.*: Effect of body weight support on cortical activation during gait in patients with stroke. *Exp Brain Res* 169: 85-9, 2006.
- 9) Kawashima R, Matsumura M, *et al.*: Regional cerebral

- blood flow changes in human brain related to ipsilateral and contralateral complex hand movements—a PET study. *Eur J Neuroscience* 10: 2254–2260, 1998.
- 10) Floyer-Lea A, Matthews PM: Changing brain networks for visuomotor control with increased movement automaticity. *J Neurophysiol* 92: 2405–2412, 2004.
 - 11) Floyer-Lea A, Matthews PM: Distinguishable brain activation networks for short- and long-term motor skill learning. *J Neurophysiol* 94: 512–518, 2005.
 - 12) Hatakanaka M, Miyai I, *et al.*: Frontal regions involved in learning of motor skill —a functional NIRS study—. *Neuroimage* 34: 109–116, 2007.
 - 13) Hoshi Y, Kobayashi N, *et al.*: Interpretation of near-infrared spectroscopy signals: a study with a newly developed perfused rat brain model. *J Apply Physiol* 90: 1657–1662, 2001.
 - 14) 川島隆太, 井上健太郎・他: PETによるヒトの手の運動機能マップ. *神経* 42: 139–145, 1998.
 - 15) 南部功夫, 大須理英子・他: 手指筋出力を運動野活動との関係—NIRSとfMRIによる比較—, *電子情報通信学会技術研究報告*. NC, *ニューロコンピューティング* 104: 25–30, 2005.

〈Abstract〉

Oxygenation Changes in Sensory Motor Cortex during Simple and Complex Movements —A Near-Infrared Spectroscopy Study—

Ikue NAITO, RPT

Department of Rehabilitation, Tsukuba Kinen Hospital

Hideaki ONISHI, RPT, PhD, Akemi A. FURUSAWA, PhD

Department of Physical Therapy, Niigata University of Health and Welfare

The purpose of the present study was to investigate the regional cerebral blood flow (rCBF) changes, using near infrared spectroscopy (NIRS), in response to two-ball-rotation tasks. Effects of motor learning were also investigated after 6 days training tasks. Subjects were requested to rotate 2 balls with the fingers in an anticlockwise direction using the right hand. In the simple task a rubber ball and for the complex task, table-tennis and golf ball were used. The EMG results indicated no significant underactivity among the tasks; however the rCBF activity in primary sensorimotor cortex at a complex task was much higher than at a simple task ($p < 0.01$). The effect of motor learning after 6 days training showed that with improvement of subjects' performance, the rCBF activity in sensory motor cortex decreased. These results demonstrated that EMG activity under the tasks showed similar activation pattern and the rate of rCBF was much higher in complex task than in simple task. In addition, NIRS is a useful system to investigate motor learning process, moreover can monitor the motor cortex oxygenation changes.