

大阪商業大学学術情報リポジトリ

最大運動時の対側及び同側前頭葉の活性と連動性

メタデータ	言語: ja 出版者: 大阪商業大学商経学会 公開日: 2016-06-29 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 久保山, 直己, KUBOYAMA, Naomi メールアドレス: 所属:
URL	https://ouc.repo.nii.ac.jp/records/81

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



最大運動時の対側及び同側前頭葉の活性と連動性

久保山 直 己

- | | |
|---|--------|
| 1. はじめに | 3. 結 果 |
| 2. 実験方法 | 4. 考 察 |
| (1) 被験者 | 5. 結 論 |
| (2) 近赤外線分光法装置
(Near-infrared spectroscopy; NIRS) | |
| (3) 筋電図 (Electromyography; EMG) | |
| (4) 統 計 | |

1. はじめに

脳組織での酸素濃度（酸素動態）の変化は、脳細胞の活性化及び脳機能の発揮レベルと密接に関連している。脳の活性と脳機能の発揮レベルは、表現（発揮）できるパフォーマンスにも大きく影響を及ぼすことが多くの研究で報告されている（Colier et al. 1999, Kleinschmidt et al. 1996, Shibuya and Tachi 2006, Shibuya and Kuboyama 2007, Obrig et al. 1996b）。そのため、運動中の脳領域の酸素動態を観察し評価することは、なぜ運動を長時間継続することができないのか、などヒトの運動制御に関する課題を解明する上で極めて重要な意味がある。

脳内の酸素動態は測定技術の進歩により可能となった。近赤外線分光法（Near-infrared spectroscopy ; NIRS）や機能的磁気共鳴画像（functional magnetic resonance imaging; fMRI）は非侵襲的に脳の局所的酸素動態を即時に測定することが可能である（Kleinschmidt et al. 1996, Obrig et al. 1996, Shibuya and Kuboyama 2007, Mehagnoul-Schipper et al. 2000）。NIRSは観察下の組織の酸素化ヘモグロビン（[HbO₂]）、脱酸素化ヘモグロビン（[Hb]）及び総ヘモグロビン（[tHb]）の相対的量を高い時間分解能で連続的に測定することができる。[HbO₂] [Hb] 及び [tHb] の相対的量的変化から筋や脳などの観察下組織の活性化や機能発揮レベルの状況を推定することができる。例えば、[HbO₂] が安静時（基準値となる）よりも増加している場合は、その組織の細胞が活性化していると評価される（Kuboyama et al. 2004, Kuboyama et al. 2005）。脳組織においても同様の評価となる。fMRIなどでの測定では測定できる運動様式が静的な運動のみに限定される。一方、NIRSでの測定では指、手や足などでの動的な運動及び全身的で動的な運動でも測定が可能である。（Shibuya and Kuboyama 2010, Rasmussen et al. 2007,

Mehta and Parasuraman 2014)。

ヒトは、全力疾走のように、運動強度が高ければ高いほど、早期に疲労が生じ、その運動を長時間継続することができない。なぜ運動を持続できないのか、つまりどのようにして疲労が生じるのか、についての研究は現在でも生理学的または心理学的領域など様々な研究領域から行われている。しかし、未だにその解決を見ない。生理学的領域では、一般に、疲労とは運動中あるいは運動後に発揮できる力や筋の力発揮能力が低下する状態とされており、発揮できる力やパワーの低下といった客観的な測定量を用いる場合が多い (Bigland-Ritchie and Woods 1984, Nybo and Nielsen 2001, Booth and Thomason 1991)。他には、「楽である」、「ややきつい」、あるいは、「かなりきつい」など運動実践者の知覚を利用した主観的運動強度 (Ratings of Perceived Exertions; RPEs) を用いる測定がある。RPEs による疲労評価方法においては、疲労とは運動実践者が求められた運動強度を維持するのが困難な状態とされている (Nybo and Nielsen 2001, Williamson et al. 2001)。上記のように、疲労の定義はいくつか存在するが、運動実践者がするある一定のパフォーマンスレベルを発揮及び維持できなくなった状況と捉えて問題はない。生理学的領域からの疲労研究では、近年、脳が注目されるようになってきた。運動中の脳の活動に注目した研究では、疲労は運動中に脳の活性レベルが低下することにあるのではないかという指摘がなされ始めてきた。

いくつかの研究では、上述した RPEs を用いて疲労感覚と脳の活性との関係を検討している (Dalsgaard and Secher 2007, Dalsgaard et al. 2002, Dalsgaard et al. 2003, Nybo and Nielsen 2001)。Nybo and Nielsen (2001) は、前頭葉での脳活性と RPEs との間に有意な相関関係を報告している。しかし、この有意な相関関係は高温環境という特殊な環境下での運動時に認められている。そのため、一般的な環境下でもその関係が成り立つかどうかその再現性については不明である。また RPEs での疲労評価は、客観的な生理学的指標の測定量よりも実施者の知覚を基礎としているため、知覚の個人差が大きく影響する場合が考えられる。一方、Ide et al. と Ide and Secher は、12名の被験者に最大運動強度以下で自転車エルゴメーター運動を行ってもらい、NIRS で測定した前頭葉の酸素動態と運動強度との関係を検討し、運動強度が増加するにつれ前頭葉の活性も増加することを報告している (Ide et al. 1999, Ide and Secher 2000)。Gonzalez-Alonso et al. は13名の被験者に最大運動強度で自転車エルゴメーター運動を行ってもらい、前頭葉の酸素動態を観察し、最大運動強度時は脳の酸素動態は低下することを報告している (Gonzalez-Alonso et al. 2004)。Kuboyama et al. は指タッピング運動中の脳の酸素動態との関係を検討し、最大強度においては有意な増加は認められないが、最大運動強度では有意に増加したことを報告している (Kuboyama et al. 2004, Kuboyama et al. 2005)。Shibuya and Kuboyama (2010) は、高度にトレーニングをしている群とトレーニングをしていない群を対象に最大運動強度の50%で握力発揮運動を行い、疲労困憊まで運動を継続した時の運動野の酸素動態について検討している。この研究では、高度にトレーニングをしている群は疲労困憊時に酸素動態は低下しているが、トレーニングをしていない群は疲労困憊に達するまで酸素動態が上昇している。このように、運動時の脳の酸素動態については見解が異なる。これらの異なる見解を解明する視点として、脳の左右の半球の関係に注目することは非常に興味深い。事実、先行研究で

は運動中に補足運動野の対側と同側が連動していることを示唆している (Benwell et al. 2006)。

そこで本研究は、運動指令を統合するとされる前頭葉に着目し、最大運動時の対側及び同側の前頭葉の活性と両側の運動性について検討した。

2. 実験方法

(1) 被験者

7名の健常な成人男子が本実験に参加した。被験者全員(表1)が右利きであった。被験者は、実験中、マットの上に仰向けになり右手で最大握力を発揮した。測定開始後の2分間は安静を保ち、その後最大握力を3秒間発揮し、次に、3秒間安静状態を保った。被験者は3秒間の最大握力発揮と3秒間の安静を連続50回繰り返した。

各被験者は、測定前に、指示された握り方で握力が発揮できるように握力計を調節した。握力は握力計と握力記録システムからなる握力測定装置で測定した。握力の標本抽出率は33Hzとした。被験者は音刺激ソフトウェアから発生させたデジタル音を聞き握力運動を行った。デジタル音が鳴っている3秒間は最大握力運動を持続し、デジタル音が鳴りやむと運動を停止し、3秒間安静状態を保った。被験者はデジタル音が鳴っていない間は握力運動に動員される筋以外の筋も収縮させず弛緩させるように指示された。

表1 被験者(7名)の年齢、身長及び体重

被験者	A	B	C	D	E	F	G
年齢 (yrs)	21	26	25	23	25	23	24
身長 (cm)	172	178	177	174	171	173	169
体重 (kg)	69	74	78	71	67	65	67

(2) 近赤外線分光法装置 (Near-infrared spectroscopy ; NIRS)

脳の機能に関する画像的研究は、脳血流量の増減を画像化し機能を評価する。脳血流量の増減は血液の酸素含有量を測定することで捉えることが可能である (Silva et al. 1999)。毛細血管での酸素含有量に依存した脳での酸素拡散能は神経学的脳機能への理解の基礎となる (Gjedde et al. 2005)。毛細血管の酸素化はNIRSを用いることで非侵襲的に連続して観察することができる。観察環境は外科手術から激しい全身運動まで幅広く測定できる (Skak et al. 1997, Nielsen et al. 2001)。本実験では、対側及び同側の前頭葉の酸素動態は、3波長 (775, 810, 及び850 nm) のNIRS (NIRO-200; Hamamatsu Photonics, Japan) で測定した。NIRO-200は観察下の筋組織の酸素化を定量化することが可能である。しかし頭蓋骨で覆われている脳の場合、骨組織を透過した後の近赤外線光量を定量化するため、その光量が正確な指標であるかについて未だに議論されている。

光学的プローブは放射器と検出器が1対で構成されている。1つの放射器及び1つの検出器はそれぞれ3つのセンサーが備わっている。本研究では、2つの放射器と2つの検出器を

利用した。2対の光学的プローブは被験者の左右の前頭葉に装着した。装着位置は脳波測定用の10-20システム(American Electroencephalographic Society Guidelines, 1994)に規定されているAF3とAF4の位置に該当する。1対の放射器と検出器の距離は4cmであった。正確に測定するため、本測定前に握力運動を行い、検出された酸素動態を評価した。本測定前の握力運動で酸素動態を検出できない場合は光学的プローブを数mm移動させ最も検出量が多い位置に設定しなおした。測定位置を決定した後に光学的プローブを遮光テープで固定した。NIRSのサンプル頻度は2Hzとした。本実験では、安静時の酸素化ヘモグロビン[HbO_2]、脱酸素化ヘモグロビン[Hb]、ヘモグロビン差[Hbdiff]($[\text{Hbdiff}] = [\text{HbO}_2] - [\text{Hb}]$)を基準とした相対的濃度変化を測定した。[HbO_2]は局所的脳血流の最も感度が高い指標であり、[Hb]は組織での脱酸素化ヘモグロビン動態を示す(Hoshi et al. 2001)。また[Hbdiff]は酸素動態の指標としては最も評価が高く(Wagner et al. 2011)、脳血流量と高い相関を示す(Tsuji et al. 2000)。

(3) 筋電図 (Electromyography ; EMG)

表面筋電図は双極Ag/AgClプローブを用い右の指屈筋の筋腹で測定した。放射器と検出器との距離は2cmとした。双極間の低インピーダンス($< 5 \text{ k} \Omega$)は皮膚の毛を剃った後、研磨し洗浄した後、90%アルコールで清浄した。基準プローブは同じ手の肘に設置した。アーチファクトを最小限に抑えるために、プローブとケーブルは伸縮性のあるネットで固定した。EMGは安静時から運動終了まで連続的に測定し装置に記録した。EMG信号は1000倍に増幅し周波数を選択した。その後、濾過(30-500Hz)し1000Hzで検出したEMGを積分した(integrated Electromyography ; iEMG)。握力運動時のiEMGは握力発揮曲線の最大値の前後0.5秒の値から算出した。

(4) 統計

指標は平均値 \pm 標準偏差(S.D.)で示した。有意差の基準は $p < 0.05$ とした。[HbO_2]、[Hb]、[Hbdiff]、iEMG及び握力は有意差の検定を行うため、一元配置分散分析を行い、Dunnett testで事後検定を行った。

3. 結果

全被験者が50回反復の最大握力発揮運動を行った。運動中の対側及び同側前頭葉の[HbO_2]、[Hb]、[Hbdiff]、最大筋力及びiEMGは図1、2、3及び4に示した。対側前頭葉の[HbO_2]は運動中有意に変化した($F = 3.002$, $p < 0.01$)(図1)。安静時のレベルと比較すると、対側前頭葉の[HbO_2]は10から30回目にかけて著しく増加した($p < 0.05$)。その後、徐々に低下した。一方、運動中の同側前頭葉の[HbO_2]も有意に変化した($F = 3.254$, $p < 0.01$)(図1)。安静時のレベルと比較すると、[HbO_2]は5回目から50回目にかけて著しく増加した($p < 0.05$)。対側前頭葉の[Hb]は運動中に有意に変化した。安静時レベルと比較すると、30回目と40回目に有意に低下した($F = 2.008$, $p < 0.05$)(図

2) 40回目以降は徐々に増加した。同側前頭葉の [Hb] は運動終了まで有意な変化はなかった ($F = 0.015, p > 0.05$) (図2)。対側前頭葉の [Hbdiff] は運動中に有意に増加した ($F = 4.337, p < 0.05$)。対側前頭葉の [Hbdiff] のレベルは10回目から40回目にかけて有意に増加し、その後徐々に減少した (図3)。同側前頭葉の [Hbdiff] は5回目から50回目まで有意に増加した ($F = 5.584, p < 0.01$) (図3)。

最大握力は図4に示した。最大握力は2回目以降有意に低下した ($F = 35.491, p < 0.01$)。iEMGは2回目以降有意に低下した ($F = 50.294, p < 0.01$)。iEMGは図4に示した。最大握力とiEMGは同様の傾向を示した。

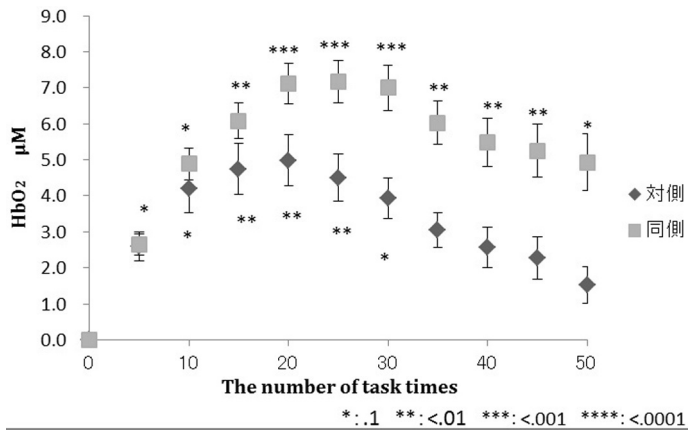


図1. 対側及び同側前頭葉の [HbO₂] の最大握力発揮運動時の変化

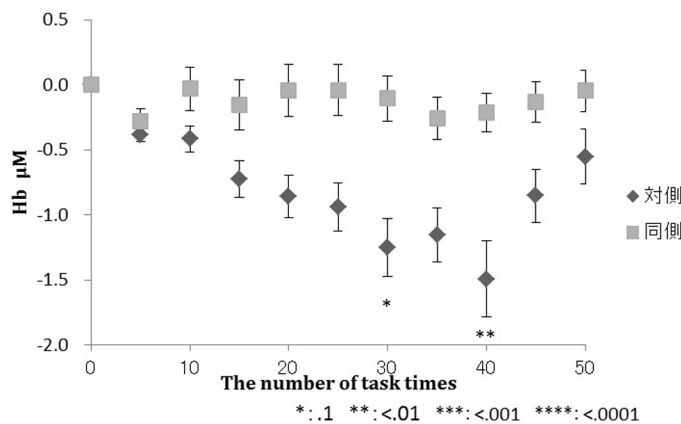


図2. 対側及び同側前頭葉の [Hb] の最大握力発揮運動時の変化

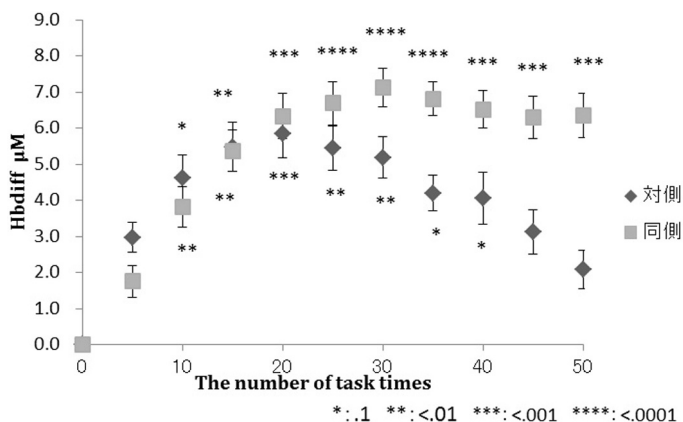


図3 . 対側及び同側前頭葉の [Hbdiff] の最大握力発揮運動時の変化

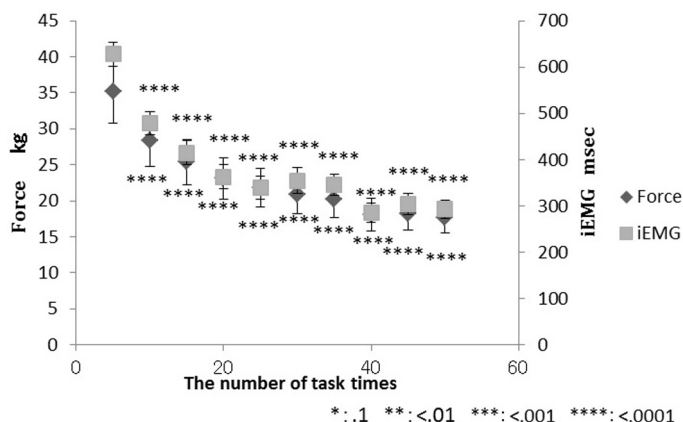


図4 . 最大握力及び iEMG の変化

4 . 考 察

脳の酸素動態の変化は脳の機能的活動に影響を及ぼす (Colier et al. 1999, Kleinschmidt et al. 1996, Obrig et al. 1996)。本研究では最大強度での反復最大握力運動中の対側及び同側の前頭葉の活性と最大握力との関係について検討した。両側の前頭葉の活性状況はNIRSで測定した酸素動態の変化量を利用した。本研究の結果は、以下の通りであった。1) 対側前頭葉の活性は運動開始後には上昇したが、その後徐々に安静時レベルにまで低下した、2) 同側前頭葉の活性は運動終了まで上昇し続けた、3) 対側前頭葉の活性は反復の最大握力運動中に上昇しその後徐々に低下したが、最大握力は終始一貫して低下した。つまり、対側前頭葉の活性状態と発揮された最大握力の変化については対応が認められない、4) 同側前頭葉の活性も、対側前頭葉の活性と同様に、最大握力運動中における最大握力の変化との対応

は認められなかった、5) 他の研究同様に、発揮された力と iEMG との間に強い相関が認められた。

脳内で形成された運動指令は、運動中、脳（最終的には対側の一次運動野）から脊柱を介して絶えず筋に向かって送られていると考えられている。上述したように、本研究は運動中对側と同側前頭葉とではその活性傾向が異なることを確認した。一般的に、右四肢の運動は左半球が、左四肢の運動は右半球が主として制御していると考えられている。つまり、四肢に対して対側の半球が運動を制御する。本実験では運動に深く関与しているとされる対側前頭葉の活性は運動開始後すぐに増加したにもかかわらず、その後徐々に減少した。一方運動には関与しないとされる同側前頭葉の活性は増加したままであった。

先行研究で握力運動において補足運動野の対側だけではなく同側も活性化し、その両側が運動していることを示唆している (Benwell et al. 2006)。この研究では 1 kg の力を発揮させる非常に低い運動強度での握力運動と最大握力の 30% を発揮させる握力運動をそれぞれ 10 分間継続させ、運動中の両側の脳血液動態を測定し比較している。補足運動野では対側と同側が同様の酸素動態を示し、対側と同側が同調するように運動開始直後から増加しその後減少している。Shibuya らは同側の脳は対側の脳の機能が低下するとその機能を補足するように連動することを指摘している (Shibuya et al. 2008)。これらの研究はこれまで考えられていたように、運動は対側の脳だけが関与するのではなく、両半球が連動することを示している。脳の構造上左右の半球は脳梁で連結しており、連動することは十分考えられる。しかし、いずれの研究においても両半球が連動する現象は疲労が生じている状況下で観察されていることから、疲労を伴わない運動強度において左右の半球が連動するかどうかは不明な点が多い。本研究は最大握力発揮運動を疲労困憊まで 50 回繰り返した。その結果、疲労がまだ生じていないであろうと推測される運動開始直後から、対側の前頭葉では活性が低下しているのに対し、本来、運動には関与しないと考えられる同側の前頭葉は運動終了まで活性し続けていた。つまり、疲労困憊時だけではなく、疲労が比較的軽い状況においても対側の活性は低下 ([Hbdiff]) し、一方で同側の活性 ([Hbdiff]) は上昇している状況が認められた。同側の継続した活性については、Benwell ら及び Shibuya らの研究を考慮すると、対側の前頭葉での機能を補足するために、同側の前頭葉が活性している可能性が強い。つまり、疲労により利き手 (右) での対側の前頭葉の機能が低下したため、握力運動の継続が困難となり、同側の前頭葉が対側の前頭葉の機能を回復あるいは強化するために活性しているのではないかという可能性も否定できない。しかし、運動終了時まで続いた同側の活性は対側の機能の強化のためであるのか、あるいは反対に、抑制を意味しているのかについては本研究では解明できない。今後更なる追加研究が必要である。ただし、本研究結果により最大握力運動時には、対側と同側の前頭葉での酸素動態は異なっており、対側の前頭葉は同側の前頭葉の活性状況と連動した活性状況を示す可能性は十分に示唆される。また、本研究では対側の前頭葉の活性は発揮される力の程度とは同調していないことも明らかとなった。

5. 結 論

本研究は運動中の対側及び同側の前頭葉の酸素動態は異なっていることを明らかにした。また対側の前頭葉の活性が低下するとその活性を補足するように同側の前頭葉が活性し、続ける対側と同側の前頭葉が連動した活性状況を示す可能性を強く示唆した。

参考文献

- Benwell, N.M., Mastaglia, F.L. & Thickbroom, G.W. (2006) Reduced functional activation after fatiguing exercise is not confined to primary motor areas. *Exp Brain Res*, 175(4), 575-83.
- Bigland-Ritchie, B. & Woods, J.J. (1984) Changes in muscle contractile properties and neural control during human muscular fatigue. *Muscle Nerve*, 7(9), 691-9.
- Booth, F.W. & Thomason, D.B. (1991) Molecular and cellular adaptation of muscle in response to exercise: perspectives of various models. *Physiol Rev*, 71(2), 541-85.
- Colier, W.N., Quaresima, V., Oeseburg, B. & Ferrari, M. (1999) Human motor-cortex oxygenation changes induced by cyclic coupled movements of hand and foot. *Exp Brain Res*, 129(3), 457-61.
- Dalsgaard, M.K., Ide, K., Cai, Y., Quistorff, B. & Secher, N.H. (2002) The intent to exercise influences the cerebral O₂/carbohydrate uptake ratio in humans. *J Physiol*, 540 (Pt 2), 681-9.
- Dalsgaard, M.K., Nybo, L., Cai, Y. & Secher, N.H. (2003) Cerebral metabolism is influenced by muscle ischaemia during exercise in humans. *Exp Physiol*, 88(2), 297-302.
- Dalsgaard, M.K. & Secher, N.H. (2007) The brain at work: a cerebral metabolic manifestation of central fatigue? *J Neurosci Res*, 85(15), 3334-9.
- Gjedde, A., Johannsen, P., Cold, G.E. & Ostergaard, L. (2005) Cerebral metabolic response to low blood flow: possible role of cytochrome oxidase inhibition. *J Cereb Blood Flow Metab*, 25(9), 1183-96.
- Gonzalez-Alonso, J., Dalsgaard, M.K., Osada, T., Volianitis, S., Dawson, E.A., Yoshiga, C.C. & Secher, N.H. (2004) Brain and central haemodynamics and oxygenation during maximal exercise in humans. *J Physiol*, 557(Pt 1), 331-42.
- Hoshi, Y., Kobayashi, N. & Tamura, M. (2001) Interpretation of near-infrared spectroscopy signals: a study with a newly developed perfused rat brain model. *J Appl Physiol (1985)*, 90(5), 1657-62.
- Ide, K., Horn, A. & Secher, N.H. (1999) Cerebral metabolic response to submaximal exercise. *J Appl Physiol (1985)*, 87(5), 1604-8.
- Ide, K. & Secher, N.H. (2000) Cerebral blood flow and metabolism during exercise. *Prog Neurobiol*, 61(4), 397-414.
- Kleinschmidt, A., Obrig, H., Requardt, M., Merboldt, K.D., Dirnagl, U., Villringer, A. & Frahm, J. (1996) Simultaneous recording of cerebral blood oxygenation changes during human brain activation by magnetic resonance imaging and near-infrared spectroscopy. *J Cereb Blood*

Flow Metab, 16(5), 817-26.

- Kuboyama, N., Nabetani, T., Shibuya, K., Machida, K. & Ogaki, T. (2004) The effect of maximal finger tapping on cerebral activation. *J Physiol Anthropol Appl Human Sci*, 23(4), 105-10.
- Kuboyama, N., Nabetani, T., Shibuya, K., Machida, K. & Ogaki, T. (2005) Relationship between cerebral activity and movement frequency of maximal finger tapping. *J Physiol Anthropol Appl Human Sci*, 24(3), 201-8.
- Mehta, R.K. & Parasuraman, R. (2014) Effects of mental fatigue on the development of physical fatigue: a neuroergonomic approach. *Hum Factors*, 56(4), 645-56.
- Nielsen, H.B., Boesen, M. & Secher, N.H. (2001) Near-infrared spectroscopy determined brain and muscle oxygenation during exercise with normal and resistive breathing. *Acta Physiol Scand*, 171(1), 63-70.
- Nybo, L. & Nielsen, B. (2001) Perceived exertion is associated with an altered brain activity during exercise with progressive hyperthermia. *J Appl Physiol (1985)*, 91(5), 2017-23.
- Obrig, H., Hirth, C., Junge-Hulsing, J.G., Doge, C., Wolf, T., Dirnagl, U. & Villringer, A. (1996) Cerebral oxygenation changes in response to motor stimulation. *J Appl Physiol (1985)*, 81(3), 1174-83.
- Rasmussen, P., Dawson, E.A., Nybo, L., van Lieshout, J.J., Secher, N.H. & Gjedde, A. (2007) Capillary-oxygenation-level-dependent near-infrared spectrometry in frontal lobe of humans. *J Cereb Blood Flow Metab*, 27(5), 1082-93.
- Shibuya, K. & Kuboyama, N. (2010) Decreased activation in the primary motor cortex area during middle-intensity hand grip exercise to exhaustion in athlete and nonathlete participants. *Percept Mot Skills*, 111(1), 19-30.
- Shibuya, K., Sadamoto, T., Sato, K., Moriyama, M. & Iwadate, M. (2008) Quantification of delayed oxygenation in ipsilateral primary motor cortex compared with contralateral side during a unimanual dominant-hand motor task using near-infrared spectroscopy. *Brain Res*, 1210, 142-7.
- Silva, A.C., Lee, S.P., Yang, G., Iadecola, C. & Kim, S.G. (1999) Simultaneous blood oxygenation level-dependent and cerebral blood flow functional magnetic resonance imaging during fore-paw stimulation in the rat. *J Cereb Blood Flow Metab*, 19(8), 871-9.
- Skak, C., Rasmussen, A., Kirkegaard, P. & Secher, N.H. (1997) Cerebral oxygen saturation and blood flow during liver transplantation. *Anesth Analg*, 84(4), 730-3.
- Tsuji, M., Saul, J.P., du Plessis, A., Eichenwald, E., Sobh, J., Crocker, R. & Volpe, J.J. (2000) Cerebral intravascular oxygenation correlates with mean arterial pressure in critically ill premature infants. *Pediatrics*, 106(4), 625-32.
- Wagner, B.P., Ammann, R.A., Bachmann, D.C., Born, S. & Schibler, A. (2011) Rapid assessment of cerebral autoregulation by near-infrared spectroscopy and a single dose of phenylephrine. *Pediatr Res*, 69(5 Pt 1), 436-41.
- Williamson, J.W., McColl, R., Mathews, D., Mitchell, J.H., Raven, P.B. & Morgan, W.P. (2001) Hypnotic manipulation of effort sense during dynamic exercise: cardiovascular responses and brain

activation. *J Appl Physiol* (1985), 90(4), 1392-9.