

キツイ運動は一瞬の判断を鈍らせるか？ (運動中の認知課題のパフォーマンスからの検証)

京都府立医科大学 安藤 創一
(共同研究者) 福岡大学 山田 陽介
京都府立医科大学 木村 みさか

Does Strenuous Exercise Attenuate Cognitive Performance?

by

Soichi Ando, Misaka Kimura
Kyoto Prefectural University of Medicine
Yosuke Yamada
Fukuoka University

ABSTRACT

The purpose of this study was to examine effects of acute exercise on cognitive function. Ten participants (mean $\pm$ SD, age = 25.4 ± 3.2 yr; height = 1.75 ± 0.06 m; body mass = 70.4 ± 10.3 kg, peak oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) = 44.4 ± 6.6 ml $\cdot$ kg $^{-1}\cdot$ min $^{-1}$) cycled at three different workloads (40%, 60%, and 80% peak $\dot{V}O_2$) in an incremental manner. They performed a modified version of the Ericksen flanker task at rest and during cycling. Cerebral oxygenation was simultaneously monitored during the cognitive task over the right frontal cortex using near-infrared spectroscopy. Exercise at 40% peak $\dot{V}O_2$ did not affect cognitive performance. Cognitive performance improved during exercise at 60% peak $\dot{V}O_2$ relative to rest, while cerebral oxygenation was not different from that at rest. Despite substantial decrease in cerebral oxygenation during exercise at 80% peak $\dot{V}O_2$, cognitive performance was not affected by exercise at 80% peak $\dot{V}O_2$. We demonstrated that improvement in cognitive function during moderate exercise is not directly associated with changes in cerebral oxygenation.

要 旨

本研究の目的は、運動が認知機能に及ぼす影響を検討し、脳の組織酸素飽和度の変化との関係を明らかにすることであった。10名の健康な男性が実験に参加した。実験参加者は最高酸素摂取量の40%、60%、80%の運動強度での運動中に認知課題の一種であるフランク課題を行い、反応時間を測定した。あわせて脳の右前頭部から近赤外線分光法を用いて脳の組織酸素飽和度を測定した。その結果、低強度での運動は反応時間に影響を与えなかったが、中強度の運動中には不一致条件において反応時間に短縮がみられた。脳の組織酸素飽和度は中強度の運動中と安静時との間で差はみられなかった。高強度での運動中には脳の組織酸素飽和度は低下がみられたものの、反応時間は安静時と比較して差はみられなかった。以上の結果から、中強度での運動中にみられた認知機能の向上は、脳の組織酸素飽和度の変化とは直接は関係していないことが示唆された。

緒 言

サッカーやバスケットボールなどの球技ではスピードや持久力だけでなく“一瞬の判断”がパフォーマンスを左右する。これらのスポーツでは、選手は常に瞬時の状況判断を繰り返し、次のプレーの計画や実行を行っているといっても過言ではない。スポーツにおける状況判断とは、時々刻々と変化する周囲の状況から最適なプレーを選択することであり、これらの能力は認知機能の一種であることから、運動が認知機能にどのような影響を及ぼすのかがスポーツのパフォーマンスに果たす役割は大きい。

これまでに、一過性の運動が認知機能に及ぼす影響を検討した研究はあるが^{4,9,18)}、一致した見解は得られていない。その理由として、認知課題の性質・実験参加者の体力レベル・運動強度お

よび時間・認知課題を行うタイミング⁸⁾、あるいは認知機能の多様性⁷⁾などが挙げられている。スポーツにおける認知機能の重要性を考えると、運動がヒトの認知機能に及ぼす影響を明らかにすることは、パフォーマンス向上のための貴重な基礎的資料となることが考えられる。

一過性の運動は呼吸循環系だけでなく中枢神経系、特に脳の活動にも大きな影響を与える^{12,13)}。ヒトの認知機能は脳の働きであることから、運動によって生じる生理的变化がヒトの認知機能に影響を及ぼし、スポーツにおける瞬時の状況判断に影響を与える可能性が考えられる。本研究では低強度・中強度・高強度での運動中に認知課題を行い、そのパフォーマンスを評価した。運動により生じる脳での生理的变化として、近赤外線分光法(NIRS: Near-infrared spectroscopy)を用いて脳での酸素供給と消費とのバランスを表す指標である組織酸素飽和度を測定した¹⁷⁾。近赤外線分光法では、体動を伴う際にも安定して脳の組織酸素飽和度を測定することが可能である。したがって、近赤外線分光法による脳の組織酸素飽和度の測定は、運動により生じる脳での生理的变化の指標として適していると考えられる。

本研究の目的は、異なる強度の運動が認知機能に及ぼす影響を反応時間という客観的評価の可能な指標を用いて検討し、脳の組織酸素飽和度の変化との関係を明らかにすることであった。本研究で用いた認知課題の遂行には、右前頭野、頭頂野、帯状回皮質などの脳活動が関係している⁶⁾。そこで、本研究ではそれらの脳の部位のうち、NIRSを用いて測定することが可能な右前頭部から脳の組織酸素飽和度を測定することとした。

1. 研究方法

1. 1 実験参加者

実験参加者は健康な男性10名(平均値±標準偏差、年齢=25.4±3.2 yr、身長=1.75±0.06 m、

体重 = 70.4 ± 10.3 kg) であった。実験は倫理委員会の承認を受けて行った。実験参加者には事前に測定項目や安全性に関する十分な説明を行い、書面にて実験参加の同意を得た。

1. 2 実験手順

実験は2日間に分けて行った。すべての実験参加者に対して、実験1日目に自転車エルゴメーター (Cordless bike V60: セノー社製) を用いて漸増負荷運動を行い、最高酸素摂取量 (peak $\dot{V}O_2$) を決定した。最初の4分間の運動負荷は80Wとし、その後1分間に10Wずつステップ方式で増加させた。実験参加者が運動を継続できなくなった時点での酸素摂取量の最高値を最高酸素摂取量とした。本研究の実験参加者の最高酸素摂取量は 44.4 ± 6.6 ml/kg/min. (平均値 $\pm$ 標準偏差) であった。

実験2日目には安静時および運動中に認知課題を行った。図1に実験のプロトコルを示す。運動負荷は最高酸素摂取量の40% (低強度: 82.8 ± 14.3 W), 60% (中強度: 140.6 ± 21.2 W), 80% (高強度: 198.6 ± 29.1 W) の順に増加させ、それぞれの運動負荷で6分30秒間運動を行った。運動中の認知課題は呼吸が定常状態に達する時間を考慮し、運動開始および運動負荷の上昇の3分後から行った (図内の点線が認知課題を行った時間を示している)。

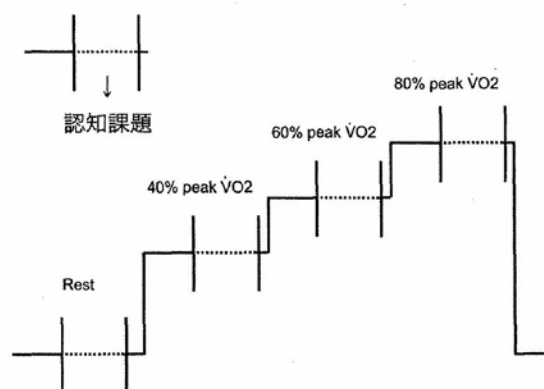


図1 実験のプロトコル

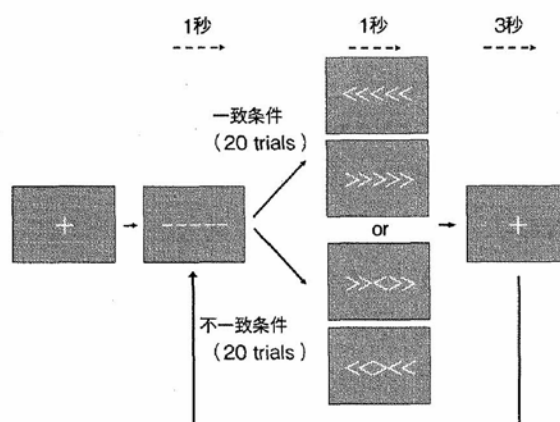


図2 認知課題の模式図

1. 3 測定項目

1) 反応時間 (Reaction time)

認知課題には判断の早さと正確さが要求されるフランカー課題^{6,15)}を用いた。図2にこの課題の模式図を示す。それぞれの試行の最初には、コンピューターディスプレイの中心にある注視点 (+) が水平に並んだ5つの水平の棒 (-----) にかわり、これが警告刺激として働いた。そして1秒後に水平に並んだ5つの矢印が視覚刺激として呈示された。一致条件では、中央の矢印とその周辺の4つの矢印の向きは同じであった (e.g. <<<<<). 不一致条件では中央の矢印とその周辺の4つの矢印の向きは反対であった (e.g. <<<><). 実験参加者は、一致条件・不一致条件のどちらの条件でも、中央の矢印の向いている方向のボタンをできるだけ早く離すことにより反応した。反応ボタンは自転車エルゴメーターの右ハンドル部・左ハンドル部の両方に取り付けることにより、運動中にも反応動作が行えるようにした。本研究では、反応時間は5つの矢印の列の呈示からボタン離しが完了するまでの時間とした。

認知課題のパフォーマンスは、反応時間と反応の正確性 (エラー率) から評価した。本研究では、正しく反応できなかった試行 (例: 右向きの矢印に対して左手で反応した場合) をエラー試行とした。

2) 呼吸ガス (Ventilatory parameters)

呼吸ガス分析装置 (AE-300 : ミナト医科学社製) を用いて, 換気量 ($\dot{V}E$), 酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$), 二酸化炭素排出量 ($\dot{V}CO_2$), 呼吸終末酸素分圧 ($PETO_2$), 呼吸終末二酸化炭素分圧 ($PETCO_2$), 一回換気量 (TV) を測定し, それぞれの指標の15秒間の平均値をデータとして用いた. 運動中の呼吸終末二酸化炭素分圧は, 動脈血二酸化炭素分圧 ($PaCO_2$) の値を反映させるために Jones ら¹⁰⁾ の式を用いて補正した.

3) 近赤外線分光法 (NIRS)

近赤外線分光法は, 生体組織での酸素化ヘモグロビン (oxy-Hb) と脱酸素化ヘモグロビン (deoxy-Hb) の吸光度の違いを利用することにより, 特定部位の組織酸素動態を測定する手法である¹⁷⁾. 本研究では近赤外線分光法 (BOM-L1 TRW : オメガウエーブ社製) を用いて, 脳の右前頭部から組織酸素飽和度 (Cerebral oxygenation) を測定した. 本研究では, 実験の開始時に自転車エルゴメーター上で安静を保った状態で脳の組織酸素飽和度を測定し, 30秒間の平均値をベースラインとした. 本研究では, 一つの発光部に対して二つの受光部を用いた. 発光部から受光部1までの距離は2cmとし, 受光部2までの距離は4cmであった. 受光部1と受光部2のそれぞれでヘモグロビン濃度を計算し, 受光部1で測定したヘモグロビン濃度を受光部2で測定したヘモグロビン濃度から引き算を行った. これにより脳の表面の血流 (皮膚血流など) が脳の組織酸素飽和度に及ぼす影響が取り除かれると考えられた.

4) 心拍数 (Heart rate)

安静時, 運動中, および運動後に心電図を連続的に測定し, 心電図のR波とR波との間隔 (R-R間隔) をもとにして心拍数を算出した.

5) 眼電図 (EOG)

小型皿電極を用いて水平方向, 垂直方法の眼電図を測定した. 眼電図は, 実験中に実験参加者が注視点を注視していたことを確認するために測定した. 全ての測定において, 反応動作中に眼球運動や瞬目がみられた試行はその後のデータ解析から取り除いた.

6) 主観的運動強度 (RPE)

安静時および運動中のそれぞれの認知課題の直後に, 主観的運動強度²⁾ を実験参加者に回答してもらった.

1. 4 データ解析および統計検定

反応時間はエラー試行および眼球運動または瞬目がみられた試行を取り除いた後, 一致条件, 不一致条件ごとに平均した値をそれぞれの実験参加者の反応時間とした. 呼吸ガス指標, 心拍数, および脳の組織酸素飽和度は認知課題中の値を平均した. 脳の組織酸素飽和度はベースラインからの相対値とした. 測定された指標は, 運動負荷 (運動前, 低強度, 中強度, 高強度) を因子として分散分析を行い, 多重比較にはダネットの検定を用いて, 安静時との比較を行った. 一致条件と不一致条件との比較には対応のあるt検定を用いた. データはすべて平均値と標準偏差で示し, 全ての検定において有意水準は5%未満に設定した.

2. 研究結果

2. 1 反応時間

図3に反応時間の結果を示す. 不一致条件の反応時間は, 安静時およびすべての運動負荷での運動中に, 一致条件と比較して有意に大きい値を示した (低強度: $p < 0.001$, 中強度: $p < 0.001$, 高強度: $p < 0.01$). 低強度での運動中には, 一致条件, 不一致条件ともに安静時と比較して変化はみられなかった. 不一致条件では, 中強度の運動中

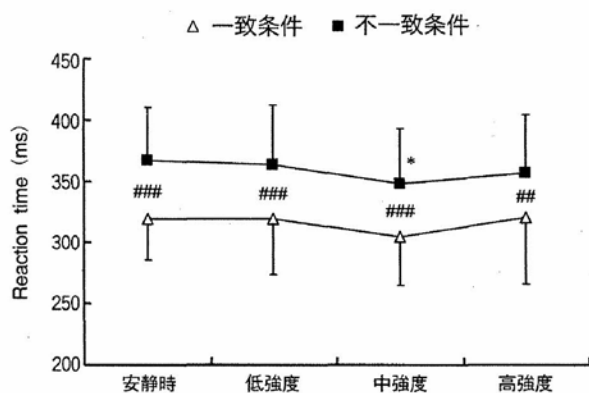


図3 安静時及び運動中の認知課題の反応時間

一致条件と不一致条件との比較, ## $p < 0.01$; ### $p < 0.001$.
* 安静時との比較, $p < 0.05$

の反応時間 (347.7 ± 44.8 ms) は安静時 (366.7 ± 43.9 ms) と比較して有意に小さい値を示した ($p < 0.05$). 一致条件では, 中強度の運動中の反応時間は安静時と比較して差はみられなかった ($p = 0.17$). 高強度の運動中の反応時間は, 一致条件, 不一致条件ともに安静時と差はみられなかった.

一致条件ではエラー試行はほとんどみられなかった (全試行の0.8%). 不一致条件では, 安静時 (3.8 ± 3.6 %) と運動中 (低強度: 3.8 ± 1.7 %, 中強度: 4.0 ± 3.9 %, 高強度: 4.8 ± 3.3 %) との間でエラー率に大きな差はみられなかった.

2.2 呼吸ガス指標, 心拍数, RPE

表1に呼吸ガス指標, 心拍数, RPEの結果を示す. 換気量, 酸素摂取量, 心拍数, RPEはそれぞれ運動負荷の増加とともに増加した. 呼吸終末酸素分圧は, 低強度の運動中に安静時と比較して有意に低下し ($p < 0.01$), 高強度での運動中に有意

に増加した ($p < 0.01$). 呼吸終末二酸化炭素分圧は低強度, 中強度での運動中に安静時と比較して有意に増加した (それぞれ $p < 0.001$). その後, 高強度での運動中には安静時より低い値まで低下した.

2.3 脳の組織酸素飽和度

図4に脳の組織酸素飽和度のデータを示す. 脳の組織酸素飽和度は安静時と低強度および中強度の運動中との間で差はみられなかった. しかし高強度での運動中には著しく低下し, 安静時と比較して有意に小さい値を示した ($p < 0.001$).

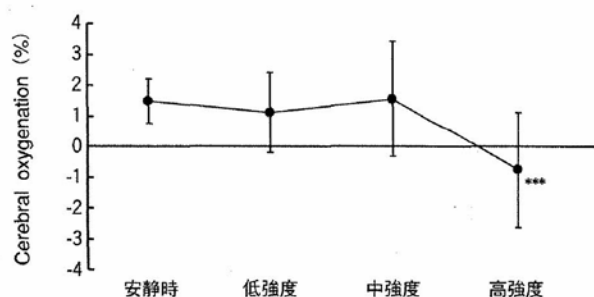


図4 脳の組織酸素飽和度の変化

*** 安静時との比較, $p < 0.001$

3. 考 察

本研究では, 低強度での運動中には安静時と比較して認知課題の反応時間に差はみられなかった. このことは, 低強度の運動は認知機能に変化をもたらすには十分でなかったことを示している. それに対して, 中強度の運動中には反応時間が有意に短縮した. 中強度の運動はエラー率に影響を与えなかったことから, この結果は speed-accuracy

表1 呼吸ガス指標, 心拍数, およびRPE. *安静時との比較

指標	安静時	運動中		
		40%peak VO ₂	60%peak VO ₂	80%peak VO ₂
VE, l/min	11.9 ± 1.4	37.0 ± 5.4 *	57.8 ± 8.1*	92.8 ± 10.3*
VO ₂ , ml/kg/min.	4.6 ± 0.5	19.0 ± 2.4*	28.2 ± 3.0*	38.2 ± 4.0 *
P _{ET} O ₂ , Torr	106.0 ± 3.9	101.3 ± 2.5 *	104.0 ± 2.5	110.6 ± 3.2 *
P _{ET} CO ₂ , Torr	36.4 ± 2.8	41.1 ± 2.4 *	40.1 ± 2.5 *	34.9 ± 2.8
HR, bpm	75.6 ± 10.7	109.5 ± 13.2 *	142.5 ± 12.4 *	176.4 ± 11.0 *
RPE	6.8 ± 1.5	9.7 ± 1.6 *	13.1 ± 1.9 *	16.6 ± 1.6 *

trade-off¹⁴⁾とは関係がないと考えられる。

最大下運動中に認知課題のパフォーマンスが向上することは先行研究で報告されている^{4,18)}。本研究の結果もこれらの先行研究の結果を支持するものであった。本研究の一致条件において、中強度での運動中の反応時間は安静時と比較して差はみられなかった。しかし、不一致条件において、中強度での運動中には反応時間に短縮がみられた。この結果は、中強度の運動中にみられる認知課題のパフォーマンスの向上が、より難易度の高い課題においてのみみられたことを示している。不一致条件では、正しい反応を行うためには、実験参加者はターゲットの矢印の周辺の矢印からの情報をもとにした反応を抑制する必要がある。そのため、選択的注意や誤った反応を誘発する手がある中での反応の決定に関連する脳の領域が活動することが考えられる⁶⁾。本研究の結果は、難易度が高く広い範囲で脳の活動がみられる課題ほど、運動中に認知課題のパフォーマンスの向上がみられやすいことを示唆しているのかもしれない。

これまでの多くの先行研究から、覚醒レベルがヒトの認知機能に影響を与えることが示唆されている⁴⁾。したがって、本研究でみられた運動中の認知課題のパフォーマンスの向上は覚醒レベルの上昇によって説明できると考えられる。運動中の覚醒レベルの上昇に関して、例えばChmuraら⁵⁾は運動中の覚醒レベルの上昇とアドレナリンやノルアドレナリンの血中濃度との間に関係があることを示唆しているが、覚醒レベルの上昇をもたらす生理的要因はまだ明らかになってない。本研究では、中強度の運動中に認知課題のパフォーマンスに向上がみられたが、脳の組織酸素飽和度は、安静時での認知課題中と比較して差はみられなかった。この結果は、中強度での運動中にみられた認知課題のパフォーマンスの向上が脳の組織酸素飽和度の変化とは直接は関係していないことを示唆している。運動中の覚醒レベルの上昇には、運

動中にみられる神経伝達物質の増加¹¹⁾などの要因が大きく貢献しているのかもしれない。

本研究において、高強度での運動中には脳の組織酸素飽和度は著しく低下した。脳の組織酸素飽和度は、脳での酸素供給と利用のバランスを反映する指標である³⁾。したがって、高強度での運動中にみられた脳の組織酸素飽和度の低下は、様々な脳の領域で利用できる酸素の低下をもたらした可能性を考えられる。本研究でみられた脳の組織酸素飽和度の低下は呼気終末二酸化炭素分圧の低下を伴っていたことを考えると、脳の組織酸素飽和度の低下をもたらした要因の一つとして、高強度での運動時における過換気が推察される^{1,16)}。本研究では、脳の組織酸素飽和度の低下にもかかわらず、高強度での運動中には認知課題のパフォーマンスは安静時と比較して差はみられなかった。中強度での運動中にみられた認知機能への有益な効果がみられなかったことは、高強度での運動が中強度での運動中にみられた有益な効果を相殺した可能性がある。この点については、今後のさらなる検討が必要であると考えられる。

本研究では、脳の組織酸素飽和度は右前頭部から測定した。近赤外線分光法は運動中にも脳の組織酸素飽和度を計測できるという利点があるが、その測定は脳の表層部に限られている。そのため、本研究の解釈には、認知課題中に右前頭部から測定した組織酸素飽和度が脳全体の組織酸素飽和度をある程度反映しているという前提が必要であり、これは本研究の限界であると考えられる。特に認知課題においては右前頭野以外の脳活動も関係していることから、今後は脳の様々な部位での活動が運動中にどのように変化するかを検討する必要があると考えられる。さらに、本研究では受光部を二つ用いることにより、皮膚血流など脳の表層での血流変化が脳の組織酸素飽和度に与える影響を取り除くこととした。しかし、この手法により、本当に皮膚血流の影響が取り除かれているか、実

際に頭皮からどれくらいの距離の組織の状態を反映しているか、などの問題は今後の検討課題である。また、本研究は実験室で行った研究であり、時々刻々状況が変化する中で行う実際のスポーツの場面からはややかけ離れた状況下で行われたことは否めない。したがって、今後の課題としてフィールド上での測定など、実際のスポーツの場面により近い状況で、運動が認知課題のパフォーマンスに及ぼす影響を検討する必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究では、一過性の運動が認知機能に及ぼす影響を検討するために低強度・中強度・高強度での運動中に認知課題の反応時間を測定した。低強度での運動は反応時間に影響を与えなかったが、中強度の運動中には不一致条件において反応時間に短縮がみられた。脳の組織酸素飽和度とは中強度の運動中と安静時との間で差はみられなかった。高強度での運動中には脳の組織酸素飽和度には低下がみられたものの、反応時間は安静時と比較して差はみられなかった。本研究から、中強度での運動中にみられる認知機能の向上は、脳の組織酸素飽和度の変化とは直接は関係していないことが示唆された。

謝 辞

本研究に対して助成を賜りました財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、本研究を遂行するにあたり京都大学高等教育研究開発推進センターの國部雅大氏に多大なご協力をいただきました。ここに記して、心より感謝の意を表します。

文 献

- 1) Bhambhani Y., Malik R., Mookerjee S., Cerebral oxygenation declines at exercise intensities above the respiratory compensation threshold., *Respir. Physiol. Neurobiol.*, 156:196-202 (2007)
- 2) Borg G., Simple rating for estimation of perceived exertion. In: Borg G (ed) *Physical Work and Effort*. Pergamon, New York (1975)
- 3) Boushel R., Langberg H., Olesen J., Gonzales-Alonzo J., Bülow J., Kjaer M., Monitoring tissue oxygen availability with near infrared spectroscopy (NIRS) in health and disease., *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 11:213-22 (2001)
- 4) Brisswalter J., Collardeau N., Arcelin R., Effects of acute physical exercise characteristics on cognitive performance., *Sports Med.*, 32:555-566 (2002)
- 5) Chmura J., Nazar K., Kaciuba-Uścilko H., Choice reaction time during graded exercise in relation to blood lactate and plasma catecholamine thresholds., *Int. J. Sports Med.*, 15:172-176 (1994)
- 6) Colcombe S.J., Kramer A.F., Erickson K.I., Scalf P., McAuley E., Cohen N.J., Webb A., Jerome G.J., Marquez D.X., Elavsky S., Cardiovascular fitness, cortical plasticity, and aging., *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 101:3316-3321 (2004)
- 7) Coles K., Tomporowski P.D., Effects of acute exercise on executive processing, short-term and long-term memory., *J. Sports Sci.*, 26:333-344 (2008)
- 8) Collardeau M., Brisswalter J., Vercruyssen F., Audiffren M., Goubault C., Single and choice reaction time during prolonged exercise in trained subjects: influence of carbohydrate availability., *Eur. J. Appl. Physiol.*, 86:150-6 (2001)
- 9) Etnier J.L., Salazar W., Landers D.M. et al., The influence of physical fitness and exercise upon cognitive functioning: a meta-analysis., *J. Sport. Exerc. Psychol.*, 19:249-277 (1997)
- 10) Jones N.L., Robertson D.G., Kane J.W., Difference between end-tidal and arterial PCO₂ in exercise., *J. Appl. Physiol.*, 47:954-960 (1979)
- 11) Kashiara K., Maruyama T., Murota M., Nakahara Y., Positive effects of acute and moderate physical exercise on cognitive function., *J. Physiol. Anthropol.*, 28:155-164 (2009)
- 12) Meeusen R., Watson P., Hasegawa H. et al., Central fatigue: the serotonin hypothesis and beyond., *Sports Med.*, 36:881-909 (2006)
- 13) Nybo L., Secher N.H., Cerebral perturbations provoked by prolonged exercise., *Prog. Neurobiol.*,

- 72:223-261 (2004)
- 14) Pachella R.G., The interpretation of reaction time in information-processing research. In: Kantowitz BH (ed) Human Information Processing: Tutorials in Performance and Cognition. Laurence Erlbaum Associates, New York (1974)
 - 15) Pontifex M.B., Hillman C.H., Neuroelectric and behavioral indices of interference control during acute cycling., *Clin. Neurophysiol.*, 118:570-80 (2007)
 - 16) Secher N.H., Seifert T., Van Lieshout J.J., Cerebral blood flow and metabolism during exercise: implications for fatigue., *J. Appl. Physiol.*, 104:306-14 (2008)
 - 17) Subudhi A.W., Dimmen A.C., Roach R.C., Effects of acute hypoxia on cerebral and muscle oxygenation during incremental exercise., *J. Appl. Physiol.*, 103:177-83 (2007)
 - 18) Tomporowski P.D., Effects of acute bouts of exercise on cognition., *Acta. Psychol.*, 112:297-324 (2003)