

高強度運動時に認知機能の低下が起こるのはなぜか —脳血流と脳酸素動態からの検証—

福岡大学 小見山 高明
(共同研究者) 同 檜 垣 靖 樹
電気通信大学 安 藤 創 一
明治安田厚生事業財団 須 藤 みず紀

The Effect of Intense Exercise on Cognitive Function: Focus on Influencing by Cerebral Blood Flow and Oxygenation

by

Takaaki Komiyama, Yasuki Higaki

Fukuoka University

Soichi Ando

The University of Electro-Communications

Mizuki Sudo

Meiji Yasuda Life Foundation of Health and Welfare

ABSTRACT

Cognitive function seems to decline during intense exercise. Concurrently, intense exercise decreases cerebral blood flow and cerebral oxygenation. Given that brain neuronal activity needs adequate oxygen delivery, decrease in cerebral blood flow and cerebral oxygenation may be associated with decline in cognitive function during intense exercise. The purpose of this study was to determine whether decrease in cerebral blood flow and cerebral oxygenation is associated with decline in cognitive function during intense exercise. Fifteen subjects (Age: 23.3 ± 1.8 yr, Height: 1.70

± 0.06 m, Weight: 64.4 ± 5.8 kg, BMI: 22.5 ± 1.9 m²/kg, peak oxygen uptake (peak $\dot{V}O_2$) : 47.3 ± 6.4 ml/min/kg) performed cognitive tasks at rest and during exercise on the cycle ergometer. Exercise intensities corresponded to 50% (moderate) and 80% (intense) of peak $\dot{V}O_2$, and exercise duration were 7 min, respectively. The cognitive tasks consisted of Spatial Delayed Response task and GO/NOGO task, which required working memory and executive function. Cognitive function was evaluated by accuracy rate and reaction time of the tasks. Middle cerebral artery mean velocity (MCA Vmean) and cerebral oxygenation were monitored continuously. Cerebral oxygenation was recorded by near infrared spectroscopy and was expressed as changes from baseline. Intense exercise significantly impaired accuracy of the cognitive task as compared with rest and moderate exercise (rest: $P < 0.05$, moderate $P < 0.01$). In contrast, reaction time in the cognitive task was not changed during intense exercise ($P = 0.31$). MCA Vmean significantly increased during moderate exercise compared with rest ($P < 0.01$). However, it significantly decreased during intense exercise compared with moderate exercise ($P < 0.01$). Cerebral oxygenation tended to decrease during intense exercise relative to rest ($P = 0.058$). These findings suggested that decreased in cerebral blood flow and cerebral oxygenation during intense exercise may be, least in part, associated with impairment in cognitive function.

要 旨

高強度運動時の認知機能の低下に関わる要因として、脳血流と脳酸素飽和度が関与している可能性がある。本研究では、15名の健常成人男性（年齢： 23.3 ± 1.8 歳，身長： 1.70 ± 0.06 m，体重： 64.4 ± 5.8 kg，最高酸素摂取量： 47.3 ± 6.4 ml/kg/min）を対象に、中強度及び高強度の運動中に認知課題を実施し、同時に中大脳動脈血流速度と前頭前野の脳酸素飽和度の測定を行い、高強度運動時の認知機能の低下と脳血流及び脳酸素飽和度の変化との関係性を明らかにすることを目的とした。

高強度運動時には、安静時及び中強度運動時と比較して認知課題の正解率は有意な低下が認められた（安静時： $P < 0.05$ ，中強度運動時： $P < 0.01$ ）。一方で反応時間に有意な差は認められな

かった（ $P = 0.31$ ）。脳血流速度は安静時と比較して中強度運動時に増加し（ $P < 0.01$ ），高強度運動時には中強度運動時と比較して有意な低下がみられた（ $P < 0.01$ ）。脳酸素飽和度は安静時と比較して高強度運動時に低下する傾向が認められた（ $P = 0.058$ ）。従って、高強度運動時の脳血流や脳酸素飽和度の低下は、認知機能の低下に関与している可能性が示唆された。

緒 言

認知機能は、スポーツにおいて重要な役割を果たしている。例えば、サッカーやバスケットボールなどの球技種目においては、周囲の状況が変化していく中でも、素早く正確な判断をすることが求められる。つまり、状況判断を担う認知機能をスポーツ場面でいかに働かせるかがパフォーマンスを左右する一つの要因となる。しかし、スポー

ツ時には身体を動かしながら判断を行うことが多く、このように二つの動作を同時に行うことが要求される二重課題時には状況判断を行うことが難しくなることが考えられ、注意の分散が起こることが報告されている¹⁷⁾。特に運動強度が高くなれば、状況判断はより困難になることが予想され、高強度運動では認知機能が低下することが報告されている¹¹⁾。

脳の神経活動に必要なエネルギー維持のためには、酸素の供給は欠かすことができない。脳への酸素供給には脳血流量や脳の酸素飽和度が重要となる。脳血流量は、低強度から中強度までの運動では直線的に増加する^{8, 18, 19)}。しかし、運動強度が高くなると、過換気が起こることを主要因として脳血流は減少することが報告されている^{4, 8, 21)}。また、脳酸素飽和度は脳への酸素の需要と供給のバランスを示しており、脳酸素飽和度が低下することは、脳での相対的な酸素不足が起きていると考えられる。脳酸素飽和度においても、脳血流量と同様に高強度の運動時には低下することが報告されている^{4, 19)}。従って、高強度での運動中には、脳への血流と酸素レベルが認知機能を働かせるのに十分でなくなる可能性が考えられる。

認知機能と脳血流に関する研究は限られているが、高齢者において安静時の脳血流が少ない程、認知機能が低下していることが報告されている^{3, 13)}。つまり、脳血流の変化は、認知機能を十分に働かせるために重要な役割を担っていることが考えられる。しかし、高強度の運動時における脳血流や脳酸素飽和度の低下が認知機能にどのような影響を及ぼすかは明らかとなっていない。そこで本研究では、高強度運動時の脳血流と脳酸素動態の変化が認知機能に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。高強度運動時に起こる脳血流と脳酸素飽和度の低下が、認知機能の低下を引き起こすという仮説を立て検証を行った。

1. 研究方法

1.1 対象者

本研究では、**実験 1** では 15 名 (平均値 $\pm$ 標準偏差, 年齢 = 23.3 ± 1.8 歳, 身長 = 1.70 ± 0.06 m, 体重 = 64.4 ± 5.8 kg, 最高酸素摂取量 = 47.3 ± 6.4 ml/kg/min), **実験 2** では 7 名 (平均値 $\pm$ 標準偏差, 年齢 = 22.9 ± 1.7 歳, 身長 = 1.72 ± 7.0 m, 体重 = 62.7 ± 8.9 kg, 最高酸素摂取量 = 52.7 ± 4.9 ml/kg/min) の健康成人男性を対象とした。全ての被験者は、本研究の目的及び内容、安全性に関する十分なインフォームドコンセントを行った上で、書面にて実験参加の同意を得た。本実験は、福岡大学倫理委員会の承認を得た後に実施した (承認番号 15-02-01)。

1.2 実験手順

実験 1 は 2 日に分けて実施された。最初にすべての被験者は自転車エルゴメータ (エアロバイク 75XL III) を用いてランプ式漸増運動負荷試験を行い、最高酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2peak}$) の測定を実施した。運動負荷試験は、1 分間の 10watts でのウォーミングアップ後、1 分間に 20watts ずつ負荷を増加させていき、被験者が回転数を維持できなくなる (回転数が 40rpm を下回る) まで実施した。運動負荷試験により得られた $\dot{V}O_{2peak}$ から中強度 ($\dot{V}O_{2peak}$ の 50% に相当する強度) 及び高強度 ($\dot{V}O_{2peak}$ の 80% に相当する強度) の運動強度をそれぞれ算出した。

1 回目の実験から少なくとも 3 日空けた別日に被験者は運動前の安静時、中強度及び高強度での運動中に認知課題を実施した。まず被験者は、自転車エルゴメータ上で座位安静にした状態で認知課題を実施した。課題終了後、被験者は自転車エルゴメータによる運動を開始した。運動は中強度及び高強度での運動を段階的に行い、それぞれ 7 分間実施した。それぞれの運動開始から 3 分後に

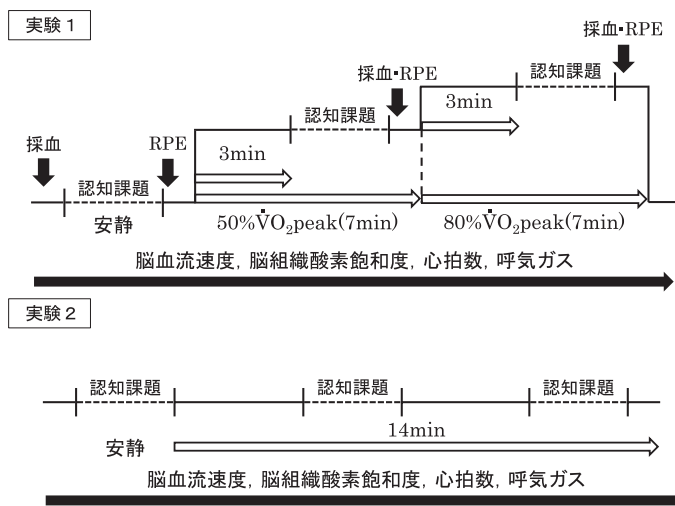


図1 実験プロトコル

認知課題を実施した (図 1)。

実験 2 では、運動は行わずに自転車エルゴメータ上で座位安静を行い、実験 1 と同様のプロトコルを用いて認知課題を実施した (図 1)。

1.3 測定項目

1.3.1 認知機能

認知機能の測定には、実行機能を評価する Go/NoGo 課題と作業記憶を評価する空間的遅延反応課題を組み合わせた課題を用いて、コンピュータ上で実施した^{7,9,10)}。実行機能とは、目標を達成するために行動や思考を計画、調整、統合する脳の高次機能である。また、作業記憶とは、情報を一時的に保持し、必要に応じてその情報を適切にコントロールする機能である。Go/NoGo 課題では、被験者は提示される 2 種類の図形に対して、一方の図形ではボタンを離す (Go 反応)、また別の図形ではボタンを押した状態を維持する (No-Go 反応) が求められた。それぞれの試行後に、音刺激によって正誤フィードバックを行った。連続正解することにより、図形と反応の関係性が変わり、さらに連続正確することにより、提示される図形の組み合わせが変わるように設定した。空間的遅延反応課題では、被験者は 8 ケ所

の内、1 か所に提示される図形の位置を記憶し、その後記憶した図形の位置を回答することが求められた。これらの課題を組み合わせを行い (図 2)、課題の試行数は全 18 試行とし、これらの課題の正解率および反応時間でそれぞれ評価した。

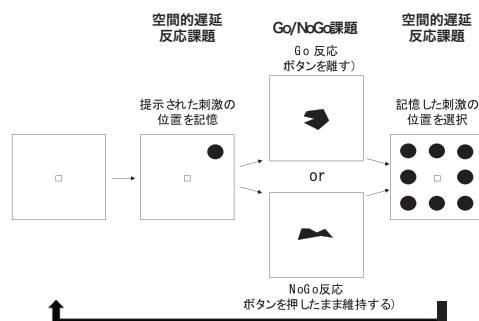


図2 認知課題の手順

1.3.2 中大脳動脈血流速度・脳酸素飽和度

中大脳動脈の平均血流速度 (Middle cerebral artery mean velocity :MCA V_{mean}) を 2-MHz の経頭蓋超音波ドプラ法 (TCD-X, Atys Medical) によって測定した。測定は右側頭骨窓から行い、最適な波形が得られるように、プローブの位置や角度を調整した後、プローブの固定を行った。

また左前額部から近赤外線分光法 (BOM-L1 TRW, Omegawave) によって酸素化ヘモグロビ

ン (Oxy-Hb), 脱酸素化ヘモグロビン (Deoxy-Hb), 総ヘモグロビン (Total-Hb) の測定を行った. Total-Hb は Oxy-Hb + Deoxy-Hb によって算出され, Oxy-Hb と Total-Hb から脳組織酸素飽和度を算出した ($\text{Oxy-Hb} / \text{Total-Hb} \times 100$). また, 認知課題前の安静時に 30 秒間測定を行い, このときの脳酸素飽和度をベースラインとした. それぞれの認知課題時の脳酸素飽和度を平均化し, さらにベースライン時からの変化量を算出した.

1.3.3 血中乳酸濃度, 血糖値, 主観的運動強度

血中乳酸濃度 (ラクテート・プロ 2 LT-1730, アークレイ), 血糖値 (グルテストエブリ, 三和化学研究所) 及び Borg Scale による主観的運動強度 (RPE) の測定を, 各認知課題前後に行った.

1.3.4 心拍数

実験中は連続的に心拍数の測定を行い (RS800CX, ポラール社製), 各認知課題時の平均心拍数を算出した.

1.3.5 呼気ガス

Breath by Breath 法を用いて生体ガス分析用質量分析装置 (ARCO-2000, アルコシステム) によって, 呼気ガスから換気量 ($\dot{V}_E$), 酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$), 二酸化炭素排出量 ($\dot{V}CO_2$), 呼気終末二酸化炭素分圧 ($P_{ET}CO_2$) の測定を行った. 呼気ガスのそれぞれの指標から, 各認知課題時の 1 分間の平均値を算出した.

1.4 統計処理

全てのデータは, 平均値 $\pm$ 標準偏差で示した. MCA V_{mean} について, 実験 1 では 15 名中 7 名において, 高強度運動による体動のため十分に信頼性のある波形が得られなかったため, 8 名のデータを示す. 統計検定には, 対応のある一元配置分散分析を行い, 事後検定として Bonferroni による多重比較を用いた (SPSS ver20, SPSS Inc). 全ての検定の有意水準は 5% 未満とした.

2. 研究結果

2.1 実験 1

2.1.1 認知機能

安静時, 中強度及び高強度運動時の認知課題の正解率及び Go/NoGo 課題における Go 反応時の反応時間を図 3 に示す. 認知課題の正解率は, 安静時と比較して, 中強度運動時には有意な差はみられなかった ($P = 0.54$). 一方で, 高強度運動時には, 安静時及び中強度運動時と比較して認知課題の正解率に有意な低下が認められた (安静時: $P < 0.05$, 中強度運動時: $P < 0.01$). Go/NoGo 課題の反応時間は, 安静時と比較して中強度及び高強度運動時において有意な差はみられず (安静時: 853 ± 234 ms, 中強度運動時: 907 ± 329 ms, 高強度運動時: 956 ± 252 ms, $P = 0.31$), 中強度運動時と比較して高強度運動時においても有意な差はみられなかった.

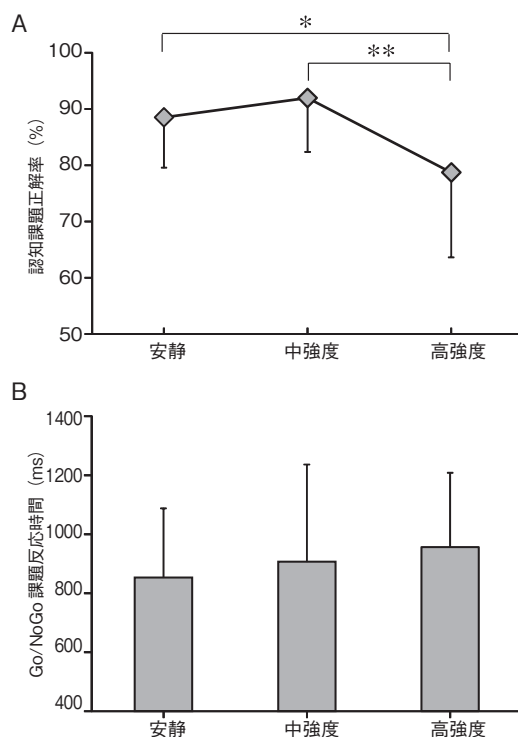


図3 安静時及び運動中の認知課題における正解率 (A) と反応時間 (B) (実験1)

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

2. 1. 2 MCA V_{mean} , 脳酸素飽和度

安静時, 中強度及び高強度運動時の MCA V_{mean} 及び脳組織酸素飽和度を図 4 に示す。MCA V_{mean} は, 安静時と比較して, 中強度運動時に有意な上昇が認められた ($P < 0.01$)。また, 高強度運動時において中強度運動時と比較して MCA V_{mean} の有意な低下が認められた ($P < 0.01$)。

脳酸素飽和度は, 安静時と比較して中強度運動時には有意な差はみられず ($P = 0.30$), 中強度運動時と比較して, 高強度運動時に有意な変化はみられなかった ($P = 0.26$)。しかしながら, 高強度運動時において脳酸素飽和度は安静時と比較して低下する傾向が認められた ($P = 0.058$)。

2. 1. 3 血中乳酸濃度, 血糖値, RPE, 心拍数, 呼気ガス

表 1 に安静時, 中強度及び高強度運動時の血中乳酸濃度, 血糖値, RPE, 心拍数, 呼気ガス ($\dot{V}E$, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, $P_{ET}CO_2$) の変化を示す。血中乳酸濃度, RPE, 心拍数, $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ は安静時と比較して中強度運動時で増加し ($P < 0.01$, respectively), さらに, 高強度運動時には安静時及び中強度運動時と比較すると有意な増加が認められた ($P < 0.01$, respectively)。また, 血糖値は運動による変化はみられなかった ($P = 0.30$)。 $P_{ET}CO_2$ は, 安静時と比較して, 中強度運動時に有意な上昇が認められた ($P < 0.01$)。また, 高強度運動時には, 中強度運動時と比較して有意な減少が認められた ($P < 0.01$)。

表 1 安静時及び運動中の血中乳酸濃度, 血糖値, RPE, 心拍数, 呼気ガス

項目	安静時	中強度	高強度
血中乳酸濃度, mmol/L	1.0 ± 0.2	2.8 ± 0.7^a	$6.9 \pm 1.8^{a,b}$
血糖値, mg/dL	82.4 ± 12.6	73.6 ± 5.8	75.4 ± 3.4
RPE	6.9 ± 1.0	12.6 ± 0.9^a	$17.7 \pm 1.6^{a,b}$
心拍数, beats/min	74.5 ± 9.6	138.0 ± 12.7^a	$176.7 \pm 11.2^{a,b}$
$\dot{V}E$, L/min	7.7 ± 2.7	39.5 ± 7.6^a	$80.7 \pm 19.3^{a,b}$
$\dot{V}O_2$, mL/min	232 ± 76	1558 ± 253^a	$2442 \pm 437^{a,b}$
$\dot{V}O_2$, mL/kg/min	3.6 ± 1.2	24.4 ± 4.4^a	$38.2 \pm 7.6^{a,b}$
$\dot{V}CO_2$, mL/min	197 ± 66	1578 ± 258^a	$2650 \pm 503^{a,b}$
$P_{ET}CO_2$, mmHg	26.2 ± 3.3	37.9 ± 3.5^a	31.7 ± 4.6^b

Values are mean $\pm$ SD. ^a $p < 0.01$ vs. 安静時, ^b $p < 0.01$ vs. 中強度
血中乳酸濃度: $n = 6$, 血糖値: $n = 7$, $P_{ET}CO_2$: $n = 7$

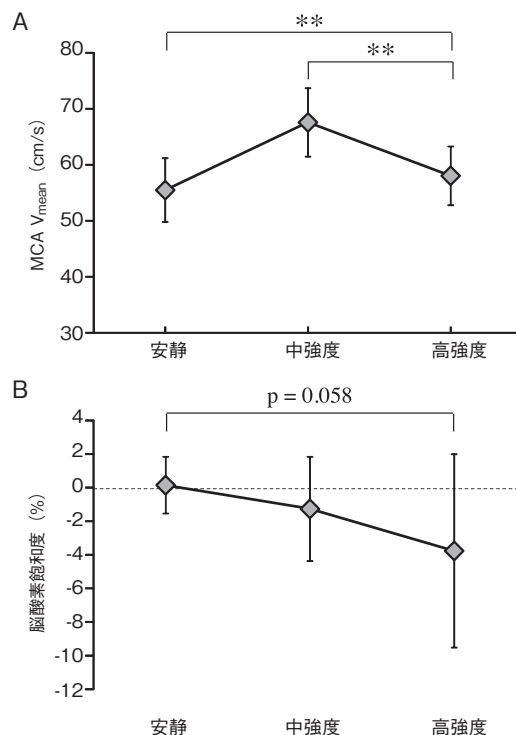


図 4 安静時及び運動中の中大脳動脈血流速度 (A) と脳酸素飽和度 (B)
** $p < 0.01$

2. 2 実験 2

2. 2. 1 認知機能

認知課題の正解率及び Go/NoGo 課題における Go 試行時の反応時間を図 5 に示す。認知課題の正解率及び Go/NoGo 課題における Go 試行時の反応時間は, 時間経過による影響はみられなかった (認知課題正解率: $P = 0.32$, Go/NoGo 課題反応時間: $P = 0.89$)。

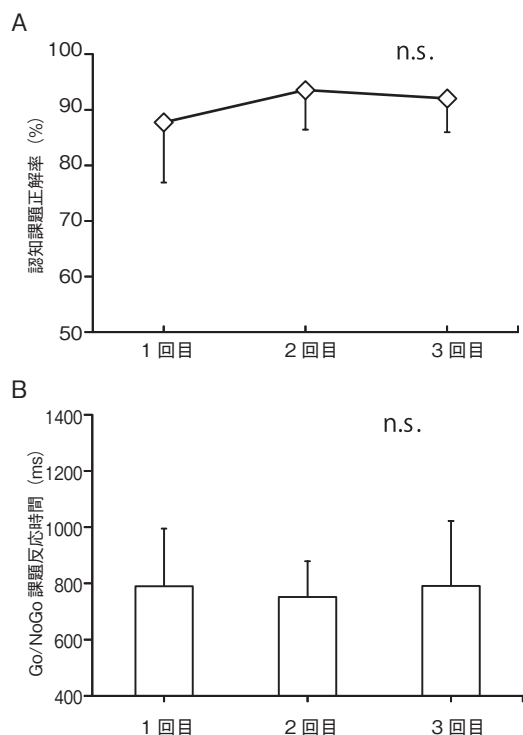


図5 時間経過による認知課題の正解率 (A) 及び反応時間 (B) の変化

2. 2. 2 MCA V_{mean} , 脳酸素飽和度

MCA V_{mean} は時間経過による変化はみられなかった (1回目: 53.7 ± 10.6 cm/s, 2回目: 52.1 ± 11.4 cm/s, 3回目 54.2 ± 11.2 cm/s, $P = 0.13$). 同様に, 脳酸素飽和度も時間経過による変化はみられなかった (1回目: 0.42 ± 1.32 %, 2回目: 0.31 ± 1.74 %, 3回目: 0.54 ± 1.88 %, $P = 0.82$).

3. 考 察

本研究では, 高強度運動時の認知機能と脳血流及び脳酸素飽和度の変化との関係性について検証を行った. 高強度運動時には認知課題における反応時間に変化はみられなかったが, 正解率は低下が認められた. また, 高強度運動時には脳血流及び脳酸素飽和度の低下が認められた. さらに実験2の結果から, 高強度運動時の認知機能, 脳血流及び脳酸素飽和度の低下は運動によるものと確認された. 従って, 高強度運動時の脳血流や脳酸素

飽和度の低下は認知機能の低下に関与している可能性が示唆された.

高強度時に認知課題の正解率に低下がみられた要因として, これまで注意の分配や覚醒レベルが関与していることが考えられている. 運動と認知課題を同時に行うような二重課題遂行時には, 注意資源の分配が行われる¹⁷⁾. これらの運動と認知課題の遂行への注意資源の分配は, 運動強度と関係していることが考えられる. つまり, 低強度から中強度までの運動では, 認知課題に対する注意資源が維持されているが, 高強度での運動では認知課題に対する注意資源が維持されていない可能性が考えられる. また, 運動による覚醒レベルの変化も認知機能に影響しており^{5, 12, 20)}, 運動による覚醒レベルの変化と認知機能の変化は逆U字の関係にあることが示唆されている. さらに, この運動による覚醒レベルの変化にはカテコラミンなどの神経伝達物質が関与していることが推察されている⁶⁾. また, 運動による認知機能の変化とカテコラミン濃度は認知機能の変化と関係があることが示唆されている¹⁴⁾. つまり, これまでの知見からすると, 高強度の運動ではカテコラミン濃度の上昇により至適な覚醒レベルを超えてしまったために, 認知機能の低下が起きたことが推察される.

本研究では, 高強度運動による認知機能の低下に, 脳血流や脳酸素飽和度の低下が関与しているという仮説のもと検証を行った. これまでの研究では, 一過性の運動による脳血流や脳酸素飽和度の変化が運動時の認知機能に直接的には影響していないことが示唆されている. Lucas らは, 若年者と高齢者を対象に, 安静時及び運動中に認知課題と脳血流の測定を行った結果, 運動中の認知機能の変化と脳血流の変化には関係がみられなかったことを報告している¹³⁾. また, Ando らは, 低・中・高強度動時にフランカー課題の反応時間を測定し, 脳酸素飽和度との関係性を検討しており,

認知機能の向上には酸素飽和度の変化とは関係がないことを示唆している²⁾。さらに Ogoh らは、長時間運動時に、高炭酸ガスを負荷し脳血流を維持させ、脳血流が認知機能の向上と関係しているかを検討している¹⁶⁾。しかし、脳血流とは関係なく認知機能の向上がみられたことを報告している。これらの研究から、一過性の運動による認知機能の向上については脳血流や脳酸素飽和度の変化は直接的な関係がないことが考えられる。しかしながら本研究では、高強度運動時に認知機能の低下が起こり、同時に脳血流や脳酸素飽和度の低下も認められた。高強度運動時には、全体的な脳の酸素不足が惹き起こされるために、脳の神経活動に十分な酸素が供給されず、認知機能は低下する可能性が考えられる。また、加齢に伴って脳血流は減少することが報告されており^{1, 3)}、さらにはこの脳血流の低下が認知機能の低下と関係していることが示唆されている^{3, 13)}。つまり、認知機能の低下については、運動時においても脳血流や脳酸素飽和度の低下が影響するのかもしれない。しかしながら、高強度運動による脳血流や脳酸素飽和度の低下が直接的に認知機能の低下に関与しているかどうかについては明らかではない。脳血管は動脈血二酸化炭素分圧 (PaCO_2) に対して感受性が高い特性がある。 PaCO_2 の上昇によって、血管が拡張し、脳血流は増加することが報告されている^{15, 21)}。この特性を利用し、高強度運動時に二酸化炭素を負荷させ、高強度運動時に起こる脳血流の低下を防ぐことで、認知機能の低下が起こらなくなるのかについて検証を行い、高強度運動による認知機能の低下に脳血流や脳酸素飽和度の低下が関与しているのかについて検証する必要がある。

4. まとめ

本研究では、高強度運動時の認知機能と脳血流及び脳酸素飽和度の変化との関係性を明らかにす

ることを目的とした。高強度運動時には認知機能の低下が起こり、脳血流や脳酸素飽和度の低下が認知機能の低下に影響している可能性が示唆された。しかしながら、脳血流や脳酸素飽和度の低下が直接的な要因であるかどうかは明らかではない。今後はさらにサンプルサイズを増やすことにより十分なエビデンスを提供することや、高強度運動時に二酸化炭素負荷を行うことにより、高強度運動時に起こる脳血流の低下を防ぎ、認知機能の低下を防ぐことができるのかについて検証することが課題である。

謝 辞

本研究に対してご助成賜りました公益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参加して頂いた対象者の皆様、福岡大学スポーツ科学部の田上友季也氏、畑本陽一氏ならびに運動生理学研究室の皆様から多大なご協力を頂きましたので、ここに感謝の意を表します。

文 献

- 1) Ainslie P.N., Cotter J.D., George K.P., Lucas S., Murrell C., Shave R., Thomas K.N., Williams M.J.A., Atkinson G., Elevation in cerebral blood flow velocity with aerobic fitness throughout healthy human ageing. *J. Physiol.*, **586**: 4005–10(2008)
- 2) Ando, S., Kokubu, M., Yamada, Y., & Kimura, M. Does cerebral oxygenation affect cognitive function during exercise? *Eur. J. Appl. Physiol.*, **111** (9), 1973–1982. doi: 10.1007/s00421-011-1827-1(2011)
- 3) Bertsch K., Hagemann D., Hermes M., Walter C., Khan R., Naumann E., Resting cerebral blood flow, attention, and aging. *Brain Res.*, **1267**: 77–88(2009)
- 4) Bhambhani Y., Malik R., Mookerjee S., Cerebral oxygenation declines at exercise intensities above the respiratory compensation threshold. *Respir. Physiol. Neurobiol.*, **156**: 196–202(2007)
- 5) Brisswalter J., Callardeau M., René A., Effects of acute physical exercise characteristics on cognitive performance. *Sport Med.*, **32**: 555–566(2002)
- 6) Dietrich A., Audiffren M., The reticular-activating

- hypofrontality (RAH) model of acute exercise. *Neurosci. Biobehav. Rev.*, **35**: 1305–1325 (2011)
- 7) Harada T., Okagawa S., Kubota K., Jogging improved performance of a behavioral branching task: Implications for prefrontal activation. *Neurosci. Res.*, **49**: 325–337 (2004)
- 8) Ide K., Secher N.H., Cerebral blood flow and metabolism during exercise. *Prog. Neurobiol.*, **61**: 397–414 (2000)
- 9) Komiyama T., Sudo M., Higaki Y., Kiyonaga A., Tanaka H., Ando S., Does moderate hypoxia alter working memory and executive function during prolonged exercise? *Physiol. Behav.*, **139**: 290–296 (2015)
- 10) Komiyama T., Sudo M., Okuda N., Yasuno T., Kiyonaga A., Tanaka H., Higaki Y., Ando S., Cognitive function at rest and during exercise following breakfast omission. *Physiol. Behav.*, **157**: 178–184 (2016)
- 11) Labelle V., Bosquet L., Mekary S., Bherer L., Decline in executive control during acute bouts of exercise as a function of exercise intensity and fitness level. *Brain Cogn.*, **81**: 10–17 (2013)
- 12) Lambourne K., Tomporowski P., The effect of exercise-induced arousal on cognitive task performance: A meta-regression analysis. *Brain Res.*, **1341**: 12–24 (2010)
- 13) Lucas S.J.E., Ainslie P.N., Murrell C.J., Thomas K.N., Franz E.A., Cotter J.D., Effect of age on exercise-induced alterations in cognitive executive function: Relationship to cerebral perfusion. *Exp. Gerontol.*, **47**: 541–551 (2012)
- 14) McMorris T., Collard K., Corbett J., Dicks M., Swain J.P., A test of the catecholamines hypothesis for an acute exercise-cognition interaction. *Pharmacol. Biochem. Behav.*, **89**: 106–115 (2008)
- 15) Ogoh S., Ainslie P.N., Cerebral blood flow during exercise: mechanisms of regulation. *J. Appl. Physiol.*, **107**: 1370–1380 (2009)
- 16) Ogoh S., Tsukamoto H., Hirasawa A., Hasegawa H., Hirose N., Hashimoto T., The effect of changes in cerebral blood flow on cognitive function during exercise. *Physiol. Rep.*, **2**: 1–8 (2014)
- 17) Pontifex M.B., Hillman C.H., Neuroelectric and behavioral indices of interference control during acute cycling. *Clin. Neurophysiol.*, **118**: 570–580 (2007)
- 18) Querido J.S., Sheel A.W., Regulation of Cerebral Blood Flow During Exercise. *Sport Med.*, **37**: 765–782 (2007)
- 19) Rooks C.R., Thom N.J., McCully K.K., Dishman R.K., Effects of incremental exercise on cerebral oxygenation measured by near-infrared spectroscopy: A systematic review. *Prog. Neurobiol.*, **92**: 134–150 (2010)
- 20) Tomporowski P.D., Effects of acute bouts of exercise on cognition. *Acta Psychol (Amst)*, **112**: 297–324 (2003)
- 21) Willie C.K., Macleod D.B., Shaw A.D., Smith K.J., Tzeng Y.C., Eves N.D., Ikeda K., Graham J., Lewis N.C., Day T.A., Ainslie P.N., Regional brain blood flow in man during acute changes in arterial blood gases. *J. Physiol.*, **590**: 3261–75 (2012)