

平成 30 年 1 月 23 日

報道関係者各位

国立大学法人 筑波大学

学校法人 中央大学

運動による脳疲労のメカニズムを解明

—低酸素環境で行う中強度運動は前頭前野機能を低下させる—

研究成果のポイント

1. 標高 3,500m 相当の低酸素環境（富士山頂上に匹敵する 13.5%酸素濃度）で行う 10 分間の中強度運動が、ヒトの注意・集中、計画・判断などの認知機能（実行機能）を低下させ、認知疲労を引き起こすことを確認しました。
2. この脳疲労のメカニズムとして左脳の前頭前野背外側部(DLPFC)の活動低下が関与することを、光トポグラフィー^{注1}装置を用いた脳機能イメージング法により初めて実証しました。
3. この成果は、高所登山時だけでなく、マラソンやトレイルラン、サッカーのロスタイムなど激運動時にアスリートが経験する運動性認知疲労対策への応用が期待されます。

国立大学法人筑波大学体育系の征矢英昭教授、大学院生の越智元太、中央大学理工学部の檀一平太教授らの共同研究グループは、登山といった高所でのレジャー活動時やスポーツの激しい運動時に感じる脳疲労、具体的には、注意・集中、計画・判断などの認知機能（実行機能）が低下する認知疲労を確認しました。さらに、その背景となる脳機構を、光による脳機能イメージング法である光トポグラフィー装置を用いて明らかにしました。

高所といった低酸素環境での運動時や強度の高い激しい運動時には、脳への酸素供給が低下することで脳が低酸素状態に陥り、注意・集中、計画・判断などの高次認知機能の低下（認知疲労）が起こることはよく知られた事実です。高所での登山時の遭難事故、マラソンやトレイルラン、サッカーのロスタイムでの集中力低下に伴う競技パフォーマンス低下には、この認知疲労が関与しているとも考えられます。しかし、その詳しいメカニズムについては明らかではありませんでした。

本研究は、低酸素環境で中強度運動（10分間）をおこなわせることで実行機能が低下し、それに伴って左脳の前頭前野背外側部の活動が低下することを見出し、運動による認知疲労の脳機構を初めて明らかにしました。

今後、本研究成果を足がかりとして、高所での登山時だけでなく、アスリートの競技時の運動性認知疲労を改善するための予防トレーニングやコンディショニング法の開発などが期待されます。

* 本研究成果は、ニューロイメージング研究の国際学術誌「NeuroImage」オンライン版で2018年1月2日（日本時間1月3日）に先行公開されています。

本研究は、文部科学省特別経費プロジェクト「ヒューマン・ハイ・パフォーマンスを実現する次世代健康スポーツ科学の国際研究教育拠点」（平成 26～30 年度）、日本学術振興会戦略的国際研究交流推進事業費補助金「頭脳循環を加速する戦略的国際研究ネットワーク推進プログラム：スポーツ神経科学の国際研究拠点－認知機能を高める運動処方を目指して」（征矢代表、平成 26～28 年度）・新学術領域研究「意欲と心身パフォーマンスを共に育む次世代運動プログラム」（平成 28～32 年度）、ならびに科学研究費補助金特別研究員奨励費 DC2（越智、15J00782）の助成を受けて実施されました。

研究の背景

高所といった低酸素環境でおこなう運動時や強度の高い激しい運動時には脳への酸素供給が低下し、脳が低酸素状態に陥ります。この脳の低酸素状態は、運動野から活動筋への中枢司令の低下（中枢疲労）による筋疲労だけでなく、前頭前野が担う注意・集中、計画・判断などの高次認知機能の低下（認知疲労）を引き起こします。高所での登山時の遭難事故やマラソンやトレイルラン、サッカーのロスタイム時に見られる集中・判断力低下に伴う競技パフォーマンス低下には、認知疲労が関与している可能性があります。しかし、運動による認知疲労の詳しい脳機構は明らかではありませんでした。

本研究グループはこれまで、10 分間の運動モデルを作成し、光を用いる脳機能イメージング法である光トポグラフィー装置とヒトの実行機能を評価できるストループ課題^{注2}を用いて、一過性の運動が実行機能を向上させる脳内神経機構を明らかにしてきました（文献1-4）。今回の研究では、標高 3,500m 相当の低酸素環境で運動することで実行機能が低下する認知疲労モデルを作成し、それに光トポグラフィー計測を適用することで、運動による認知疲労の脳機構を検証しました。

研究内容と成果

本研究は2つの実験で構成されています（図1）。実験1では、実行機能が低下する低酸素環境での運動実験モデルを作成しました。健常成人 14 名の実験参加者に 10 分間の中強度運動^{注3}（ペダリング）をおこなわせ、その前後に実行機能課題であるストループ課題（図2）をおこないました。その結果、実験室内の常酸素環境の空気（20.9%酸素濃度）を吸引しながら運動する「常酸素条件」に比べて、標高 3,500m 相当の低酸素ガス（富士山の頂上と同様、13.5%酸素濃度）を吸引しながら運動する「低酸素条件（図3）」では、実行機能の指標であるストループ干渉処理時間が有意に遅延していました。したがって、標高 3,500m 相当の低酸素環境での 10 分間の中強度運動は実行機能を低下させることが明らかとなりました（図4A）。

次に、実験2では、実験1で確認した低酸素環境での中強度運動で実行機能が低下する脳内神経機構を、光トポグラフィー装置を用いて検証しました。健常成人 15 名の実験参加者は、実験1で用いた標高 3,500m 相当の低酸素ガスを吸引しながら、10 分間のペダリング運動前後にストループ課題をおこない、課題中の前頭前野の外側部の活動を光トポグラフィー装置によって評価しました（運動条件）。その結果、運動条件では、運動の代わりに 10 分間安静にする「対照条件」と比べて、ストループ干渉処理時間が有意に遅延し、さらに左の前頭前野背外側部^{注4}の活動が有意に低下していました（図4B）。本結果から、標高 3,500m 相当の低酸素環境での中強度運動は認知疲労を引き起こし、その脳機構として実行機能を担う脳部位の神経活動低下の関与が示唆されました。

今後の展開

本研究は、高所登山時にみられる認知疲労モデルとしてだけでなく、マラソンやトレイルラン、サッカーのロスタイム時などアスリートの競技時にみられる認知疲労のモデルとしても重要です。このモデルを用いて、認知疲労の背景にある脳機構（背外側前頭前野の活動低下）が本研究によって初めて明らかになりました。本研究の成果は、高所登山や激しい運動といった低酸素環境下での活動に対する予防・対処法の提案等に役立ちます。さらに本研究を端緒として、認知疲労を伴いがちな運動においても認知機能を維持するための予防トレーニング、あるいは酸素吸入やサプリメント摂取といったコンディショニングの開発が期待されます。

参考図

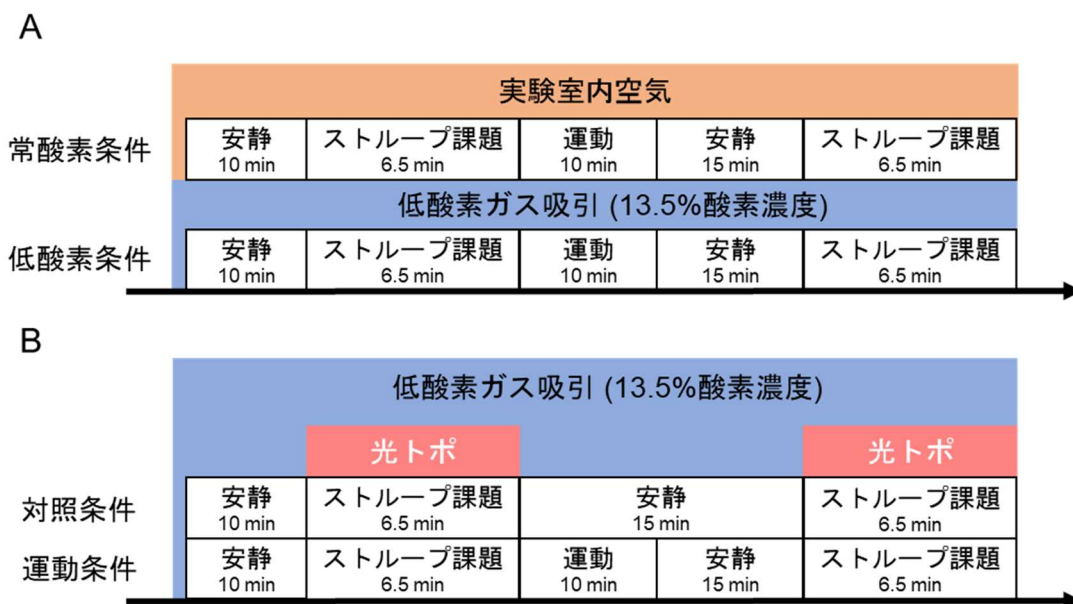


図1. 実験の流れ

本研究では2つの実験をおこないました。実験1では、常酸素環境と標高 3,500m 相当の低酸素環境において 10 分間のペダリング運動をおこない、その前後にストループ課題を実施しました（図2A）。実験2では、標高 3,500m 相当の低酸素環境において 10 分間の安静もしくはペダリング運動をおこない、その前後にストループ課題を実施しました。実験2では課題中の脳活動を、光トポグラフィー装置を用いて計測しました（図2B）。

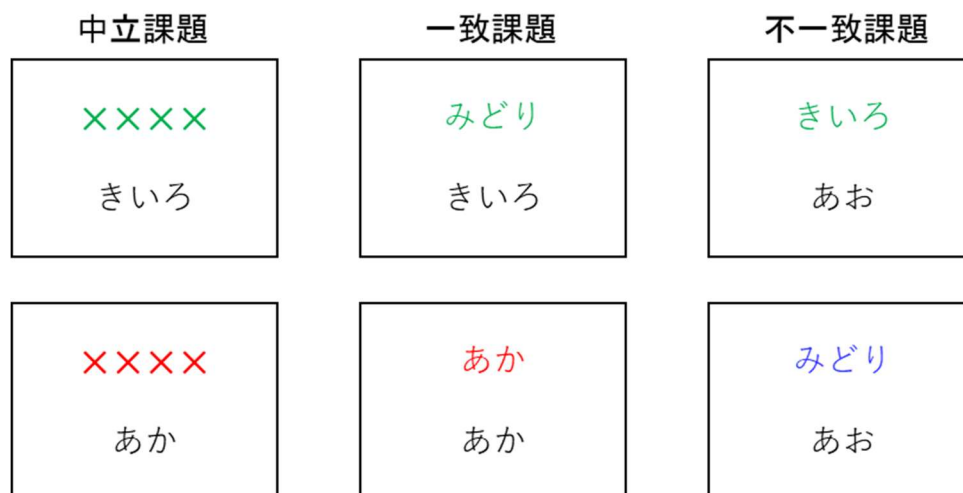


図2. ストループ課題

ストループ課題はパソコンの画面上段の単語の色が下段の色名单語の意味と一致しているかどうかを判断する課題です。中立課題、一致課題、不一致課題の順で難易度が増す。不一致課題のように「単語の意味と色が異なる色名单語」を選択するために情報処理過程に競合が生じ、これはストループ干渉と呼ばれます。このストループ干渉を処理する能力は、不一致課題と中立課題の成績の差から求められ、実行機能の指標として評価されます。図1に、上が不一致、下が一致の例を示しました。

A



B

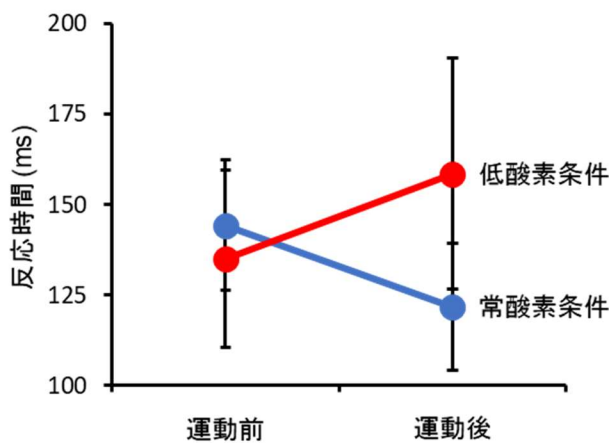


図3. 低酸素環境で運動をする実験条件

低酸素条件の実験の様子です。ダグラスバック（写真 オレンジ色の気密な袋）に充填してある低酸素ガスを、マスクを通じて吸引しながら実験はおこなわれました。（A）運動は座位姿勢でおこなうストレングスエルゴを用いておこないました。予め実験参加者ごとに計測された最高酸素摂取量^{注5}に基づき、その50%になるように運動負荷を設定しました。（B）ストループ課題はストレングスエルゴ上でおこなわれました。課題中に光トポグラフィー装置を用いて脳活動を計測しました。

A

運動前後における
ストループ干渉による反応時間の変化
（低酸素条件 v.s. 常酸素条件）



B

低酸素運動により脳活動が低下した部位

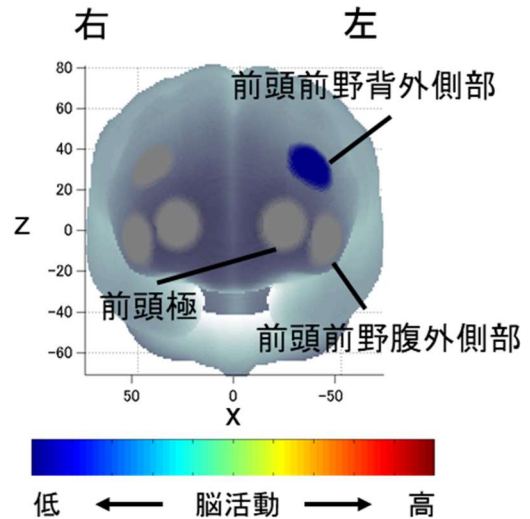


図4. ストループ課題成績及び光トポグラフィーデータ

（A）実験1での低酸素条件、常酸素条件において、運動前と運動終了15分後に実施したストループ課題に対する反応時間の解析結果。値が大きいほど反応時間が遅く、課題成績が悪い（実行機能が低い）ことを示します。標高3,500m相当の低酸素環境で運動した低酸素条件では、常酸素条件と比べて、運動後に反応時間が遅延し、実行機能が低下しました。（B）実験2での、標高3,500m相当の低酸素環境での運動後にストループ干渉による脳活動が有意に低下した部位。

用語解説

注1) 光トポグラフィー:

近赤外分光法 (near-infrared spectroscopy: NIRS)、機能的近赤外分光分析法 (fNIRS)、光機能イメージング法などとも呼ばれる。近赤外光を利用し、脳神経活動によって引き起こされる局所的な脳血流の変化を、血中の酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンの濃度変化からモニターする計測法。他の脳機能イメージング法と比較して、装置がコンパクトであり、低拘束、完全無侵襲で測定できるという利点を持つ。

注2) ストループ課題:

1935年に心理学者ジョン・ストループが考案した認知課題で、実行機能の検査に用いられる。色と意味が異なる色名単語を見たときに、意味に対する反応が優先的に起こってしまい、色に対する反応が遅れてしまう現象を利用している。このように競合する刺激が与えられたときに認知的葛藤が起こる現象は、発見者の名前からストループ干渉と呼ばれる。現在までに様々なバリエーションのストループ課題が作られてきたが、最も一般的なものが、今回の研究でも用いたカラー・ワード・ストループ課題である。

注3) 中強度運動:

最大酸素摂取量の46~64%の強度と定義され、心拍数は若齢者でおよそ115~140拍/分、高齢者でおよそ100~120拍/分程度になる運動。主観的には、ややきつと感じる程度。

注4) 前頭前野背外側部:

大脳の前頭葉の前方に位置する前頭前野の一領域。ブロードマンの46野に相当する。実行機能を担う中心的領域であり、注意・集中やワーキングメモリなどに関わる部位である。

注5) 最高酸素摂取量:

全身持久力の指標。通常、10分程度で最大努力に到達するような漸増負荷運動を行わせ、その間の呼気ガスを採取し、体重1kgあたり1分間にどれだけ体内に酸素を取り込めるかを測定する。

参考文献

1. Kujach S. et al. *NeuroImage* 169: 117–125, 2018.
2. Byun K. et al. *NeuroImage* 98: 336–345, 2014.
3. Hyodo K. et al. *Neurobiology of Aging* 33: 2621–2632, 2012.
4. Yanagisawa H. et al. *NeuroImage* 50: 1702–1710, 2010.

掲載論文

【題名】 Neural basis for reduced executive performance with hypoxic exercise

(低酸素環境下の運動で生じる認知疲労の脳機構)

【著者名】 Genta Ochi^{a, b}, Yuhki Yamada^a, Kazuki Hyodo^a, Kazuya Suwabe^{a, b}, Takemune Fukuie^{a, b}, Kyeongho Byun^{a, b}, Ippeita Dan^c and Hideaki Soya^{a, b}

^aLaboratory of Exercise Biochemistry and Neuroendocrinology;

^bDepartment of Sports Neuroscience, Advanced Research Initiative for Human High Performance (ARIHHP), Faculty of

Health and Sport Sciences, University of Tsukuba, Ibaraki, Japan

°Applied Cognitive Neuroscience Lab, Faculty of Science and Engineering, Chuo University, Tokyo, Japan

【掲載誌】 NeuroImage

Doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.12.091

問合わせ先

征矢英昭（そや ひであき）

筑波大学 体育系 教授(運動生化学研究室)

〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1

Tel: 029-853-2620

E-mail: soya.hideaki.gt@u.tsukuba.ac.jp