

メンタルコンディションとフィットネスパフォーマンスを繋ぐ 脳科学的機序の解明

赤 澤 暢 彦^{*,**}

RELATIONSHIP BETWEEN MENTAL CONDITION AND FITNESS PERFORMANCE: INSIGHT FROM FMRI STUDY

Nobuhiko Akazawa

Key words: force steadiness, brain activation, mental exertion, handgrip.

緒 言

身体パフォーマンスを向上させるためには、筋力や持久力のような運動を起こす力や運動を持続する力だけでなく、動きを調整する力などのフィットネスも必要となる。身体各部における運動の巧みな調節には、脳からの指令による運動を制御する機能が関与する。力調節安定性 (Steadiness) は、末梢性の骨格筋機能より中枢性の神経系に大きく依存されており、一定の力を持続するような運動の調節や制御の指標となる。Steadiness はスポーツのスキルとも関連し、アスリートの Steadiness は一般健常者に比べて高いことが報告されている⁵⁾。これらのことから、Steadiness は身体パフォーマンスを発揮するのに重要な役割を果たしていると考えられている。

身体機能や脳機能の発揮には最適なコンディショニングを実施しなければならない。モチベーション低下や疲労感などのネガティブな精神状態、いわゆるメンタルコンディションが低下すると、身体活動が低下したり、本来のパフォーマンスを発揮できなくなったりする。また、実験的にメン

タルに負荷をかけて精神的な疲労を惹起すると、筋持久力や全身持久力が低下することが報告されている¹⁾。

これらのことからメンタルコンディション低下による筋力発揮制御の低下を抑制することがパフォーマンス発揮に重要になると考えられる。近年、機能的核磁気共鳴画像法 (functional magnetic resonance imaging; fMRI) を用いた研究によると、運動時における主観的運動強度やモチベーションは、骨格筋を動かす指令を司る運動野だけでなく、集中・情報処理・判断などを司る実行機能にかかわる前帯状回や情動と関連する大脳基底核といった辺縁系の脳活動と関連することが報告されている⁴⁾。しかし、精神的な疲労がどのように力発揮の制御に関係しているのか脳科学的知見は乏しく、メンタルコンディション低下時における Steadiness と脳活動の関係については明らかにされていない。

本研究では、fMRI を用いた脳機能イメージングに着目し、精神負荷課題が Steadiness と力調節発揮時における脳活動賦活動態に及ぼす影響を検討することを目的とした。

* 早稲田大学スポーツ科学学術院 Faculty of Sport Sciences, Waseda University, Saitama, Japan.
** 国立スポーツ科学センター Japan Institute of Sports Sciences, Tokyo, Japan.

方 法

A. 対象者

健康な成人若年者11名を対象に実験を実施した(22±3 歳, 171±6 cm, 66±8 kg)。対象者に明らかな脳血管疾患および精神疾患を有する者、投薬治療中の者は含まれていなかった。研究に先立ち、対象者に研究の目的、内容、および手順を説明し、書面にて本人から参加の同意を得た。なお、本研究は、早稲田大学倫理委員会の承認(承認番号: 2022-202)を得て実施された。

B. プロトコル

本研究では、MRI 装置内で精神疲労を惹起する精神課題条件と精神疲労を惹起しない対照課題条件の2つの条件の試行を実施した。それぞれの課題前および課題直後にて、Steadiness とその力調節発揮時の脳活動を fMRI により評価した。なお、各条件の施行は、72時間以上の間隔を空けて順番をランダムに実施された。また、実験前日からアルコール摂取および激しい運動と、実験開始前2時間の飲食を控えるようにした。

C. 課題条件

精神課題条件では、精神疲労を惹起するストループテストの不一致課題の改訂版を実施した⁷⁾。対象者は、モニター上に書かれた意味と色が異なる文字の色を赤色、青色、緑色、黄色の4つのボタンから回答するように指示された。例えば、緑色で「あお」と書かれているときには、緑色のボタンを押すことになる。更に、赤色で書かれている場合には、色ではなくて、文字の意味のボタンを回答するように指示された。例えば、赤色で「あお」と書かれている場合には、青色のボタンを押すことになる。対照課題条件では、精神疲労を惹起しないストループテストの一致課題を実施した。一致課題では、意味と色が一致する文字の色を回答する。例えば、赤色で「あか」と書かれているので、赤色のボタンを押すことになる。各条件ともに、課題時間を5分間と設定した。

D. メンタルコンディション

心理プロフィール検査(profile of mood states 2; POMS2)を用いて、各条件課題前後におけるメンタルコンディションを測定した。本検査は35の

質問項目からなり、得られた回答から怒り-敵意(Anger-Hostility: AH)、混乱-当惑(Confusion-Bewilderment: CB)、抑うつ-落込み(Depression-Dejection: DD)、疲労-無気力(Fatigue-Inertia: FI)、緊張-不安(Tension-Anxiety: TA)、活気-活力(Vigor-Activity: VA)、友好(Friendliness: F)の下位尺度と、総合的気分状態(Total mood disturbance; TMD)のスコアを標準化して評価した。

E. Steadiness

各条件の課題前後に、低強度の10%最大筋力(maximal voluntary contraction; MVC)と中強度の50% MVCにおける力調節発揮テストを実施した。各条件の施行前に、実験当日における左手のMVCを、非磁性体握力計FG1002(Uchida Denshi Inc, Tokyo, Japan)を用いて1分間の休憩を挟んで2回実施し、最大値をMVCとして採用した。対象者は、モニターに映し出された10% MVCと50% MVCのターゲットラインに20秒間維持するように指示され、それぞれの強度における左手の力調節発揮を交互に20秒間の休憩を挟んで3セット実施した。トルクのアナログ信号は、AD変換器(PowerLab/16SP, AD Instruments Inc, Castle Hill, Australia)に接続され、サンプリング周波数1000 HzにてPCに取り込まれた。20秒間の力調節発揮のうち、安定した15秒間の平均値および標準偏差を算出し、変動係数(coefficient variance; CV)を求め、それぞれの強度で3セットの平均をSteadinessの評価として採用した。

F. 脳活動

3T MRI(SIGNA PREMIER, GE HealthCare Inc, Waukesha, USA)により、64 chのヘッドコイルを用いて、頭部の構造画像および機能画像を撮像し、脳活動動態を測定した。構造画像は、安静時におけるT1強調画像をMPRAGE(magnetization prepared rapid gradient echo)法により撮像した(TR = 8.1 ms, TE = 3.4 ms, FOV = 218 mm × 218 mm, Flip angle = 90°, Thickness = 0.7 mm)。機能画像は、力調節発揮時におけるT2*強調画像をGE-EPI(gradient-echo planar imaging)法により撮像された(TR = 2000 ms, TE = 30 ms, FOV = 218 mm × 218 mm, Flip angle = 90°, Thickness = 3 mm, 31 slices)。得られた脳画像データはSPM12(Well-

come Department of Cognitive Neurology, London, UK) および MatLab (Math Works Inc, Massachusetts, USA) を用いて、動き補正の realignment、時間補正の slice timing、構造画像と機能画像の位置合わせの coregister、標準脳へ変換する normalization、空間的平滑化を行う smoothing の順に前処理し、BOLD (blood oxygen level-dependent) 信号のコントラスト統計量について解析し、力発揮時における脳活動賦活動態を評価した。

G. 統計

本研究における測定値は平均値 $\pm$ 標準偏差で示した。POMS2の各項目に対する各課題条件の影響を検討するために、Wilcoxon の符号付順位検定を用いた。また、Steadiness に対する各課題条件の影響を検討するためには、繰り返しのある二元配置分散分析 (repeated measure-two way

ANOVA) を用いた。交互作用もしくは主効果が有意であった場合、その後の検定として Bonferroni 法を用いた。本研究における統計処理には、統計解析ソフト SPSS24 (IBM Inc, Chicago, USA) を用いた。なお、有意水準を 5 % とした。脳活動の解析は SPM12 および MatLab を用いて、前処理された fMRI データを個人ごとに各条件の脳活動賦活を算出後、それぞれの課題条件での集団解析を one-sample t-test にて行い、力調節発揮時における賦活した脳部位を同定した。更に、Paired t-test の集団解析を行い、課題前に比べて課題後に脳活動賦活が増加している脳部位を同定した。これらの集団解析では、閾値をクラスターレベルで補正なしの $P < 0.001$ に設定した。なお本研究では、Steadiness を測定している力調節発揮中に 2 mm 以上頭部が動いた対象者 2 名を含まずに解析した。

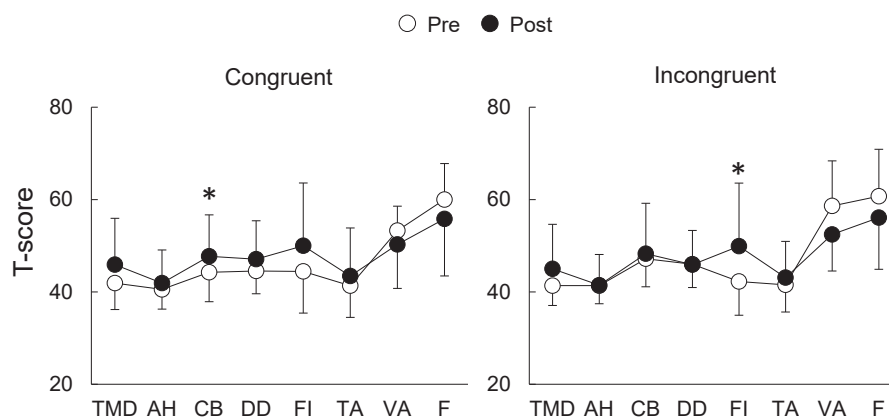


図 1. 各条件課題前後における POMS スコア

Fig.1. POMS (profile of mood status) score in each congruent and incongruent conditions. TMD: Total mood disturbance, AH: Anger-Hostility, CB: Confusion-Bewilderment, DD: Depression-Dejection, FI: Fatigue-Inertia, TA: Tension-Anxiety, VA: Vigor-Activity, F: Friendliness. * $P < 0.05$ vs pre.

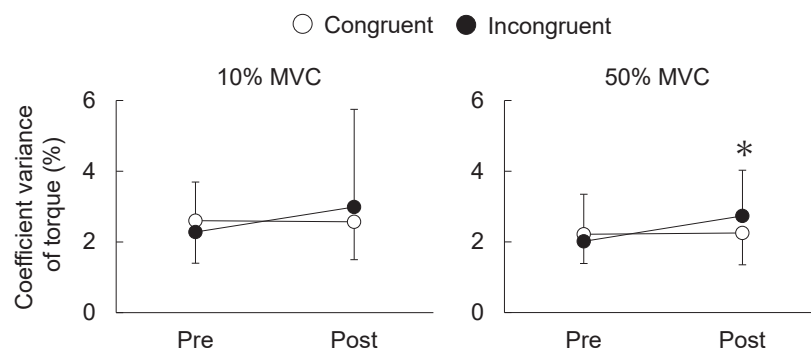


図 2. 各条件課題前後の力調節発揮変動係数

Fig.2. Coefficient of variance (CV) of torque in each congruent and incongruent conditions. * $P < 0.05$ vs pre.

表 1. 各課題条件前後における10%MVC および50%MVC 力調節発揮時の脳活動賦活

Table 1. Brain activation area during left handgrip steadiness task pre and post stoop test each congruent and incongruent task conditions.

Pre						Post					
Area	Cluster size	Coordinates			Z score	Area	Cluster size	Coordinates			Z score
		x	y	z				x	y	z	
10% Congruent											
L. Inferior occipital gyrus	269	−44	−68	4	5.06	L. Inferior occipital gyrus	250	−44	−66	8	4.91
R. Insula	228	42	8	−4	4.09	L. Middle temporal gyrus					
50% Congruent											
R. Precentral gyrus	270	36	−22	44	4.23	L. Precentral gyrus	206	−36	−10	54	3.85
L. Superior parietal lobule	198	−24	−62	58	3.67						
10% Incongruent											
R. Supermarginal lobule	656	34	−34	44	4.46						
R. Precenral gyrus	574	52	8	20	4.16						
50% Incongruent											
R. Postcentral gyrus	288	32	−32	46	4.24	L. Ventricle	1109	−20	−2	28	5.40
L. Precentral gyrus	260	−28	−14	46	4.45	L. Caudate					
						R. Ventricle	399	18	20	18	5.00
						R. Caudate					
						L. Superior parietal lobule	248	−30	−46	30	4.73
						L. Anterior cingulate cortex	283	−10	28	4	4.29
						L. Cerebellum	193	0	−66	−20	4.11
						L. Superior frontal gyrus	323	22	−4	50	3.92

結 果

図 1 に各条件の課題前後における POMS2 のスコアの変化を示す。対照課題条件において、CB スコアが有意に増加した。精神課題条件では、FI スコアが有意に増加した。なお、TMD、AH、DD、TA、VA、F スコアの有意な変化は認められなかった。

図 2 に各条件の課題前後における Steadiness の変化を示す。10% MVC の CV は、精神課題条件および対照課題条件ともに課題前後の有意な変化は認められなかった。50% MVC の CV は、対照課題条件では有意な変化がなかったが、精神課題条件では課題後に有意に増加した ($P < 0.05$)。

各条件における課題前後の脳活動賦活を表 1 に示す。対照課題条件において、10% MVC 力調節発揮時の脳活動は、課題前に下後頭回および島の賦活が認められ、課題後で下後頭回および中側頭回の賦活が認められた。また、50% MVC 力調節発揮時の脳活動は、課題前に前中心回および上頭

頂小葉の賦活が認められ、課題後で前中心回の賦活が認められた。精神課題条件において、10% MVC 力調節発揮時の脳活動は、課題前に前中心回および縁上回の賦活が認められ、課題後では脳活動の有意な賦活は認められなかった。また、50% MVC 力調節発揮時の脳活動は、課題前に前中心回および後中心回の賦活が認められ、課題後には、尾状核、上頭頂小葉、前帯状回、小脳、上前頭回の賦活が認められた。更に、精神課題条件のみ課題前に比べて課題後の前帯状回、中前頭回、尾状核において有意に脳活動賦活が増加した (図 3, 表 2)。

考 察

筋力発揮には、運動野、大脳基底核、小脳などの運動関連領域の脳活動が賦活する。また、Steadiness などの力調節機能には、強度やエフォートに比例して帯状回、島、前頭前野、後頭回などの運動非関連領域の脳活動も賦活する⁸⁾。本研究でも同様に、力調節発揮時において運動野、

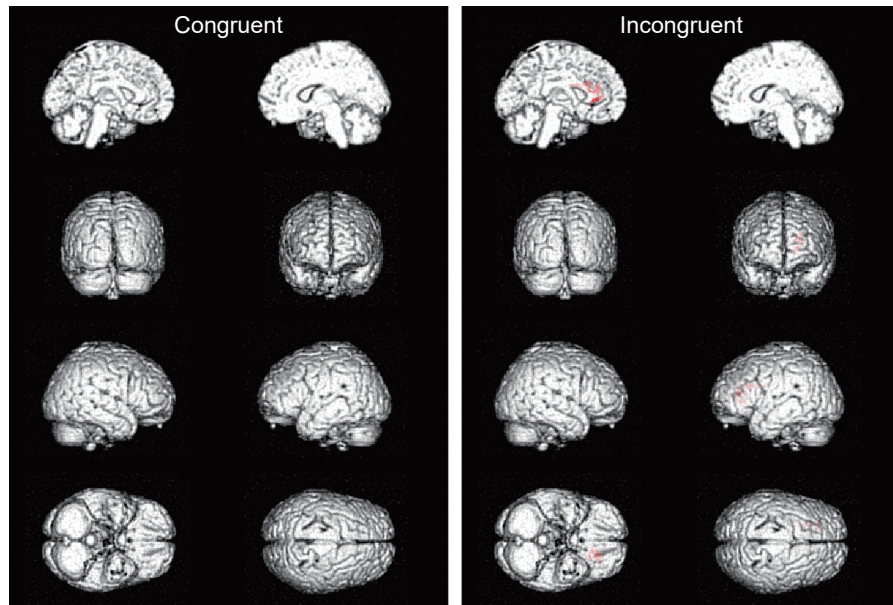


図3．各条件の課題後に脳活動賦活が増加した脳部位

Fig.3. Brain activation volume showing significant differences pre and post incongruent task condition.

Pre < Post. The activation regions were thresholded with uncorrected $P < 0.001$ for each voxel and an activation cluster minimum of 433 voxels.

表2．精神課題後に脳活動賦活が増加した脳部位

Table 2. Brain area showing significantly different level of activation from pre and post incongruent task condition.

	Area	Coordinates			Z score
		x	y	z	
Pre < Post	L. Angular cingulate cortex	-16	34	18	4.75
	L. Middle cingulate cortex	-20	18	26	4.49
	L. Caudate	-22	6	22	4.01
	L. Ventricle				

島、後頭回の脳活動が賦活し、更に縁上回や上頭頂小葉などの賦活も認められていた（表1）。ただし、先行研究でみられたような、10% MVC と50% MVC の力調節発揮時の脳活動賦活に運動強度による差は認められなかった。Steadiness は、一般的に強度が低いほどCVが高くなるが、本研究では、10% MVC のCVと50% MVC のCVにも差がなかったことから、脳活動にも大きな差はなかったかもしれない。これらのことから、力調節発揮時の脳活動には、対象者の運動能力などの特性も関係する可能性が示唆された。

精神課題条件の課題後には、課題前に認められなかった小脳、尾状核、前帯状回の脳活動の賦活が認められた（表1）。小脳は、感覚運動の制御にかかわっており、発揮筋力が増加するほど、小

脳の脳活動も大きくなるとされている。また、痛みの感覚、情動、認知行動にも関連するとの報告もあり、運動野とともに動きの制御や感覚の統合に重要な役割を担っている³⁾。更に、自転車エルゴメータによる全身の疲労困憊運動は、掌握運動時における尾状核や大脳基底核の一部の脳活動を変化させることが示されている²⁾。本研究では、ストループテスト不一致課題の後に小脳や尾状核の活動賦活が認められたことから、精神課題は力調節発揮時の小脳や大脳基底核の脳活動に影響することが示唆された。

本研究では、精神課題条件後において POMS2 で評価した FI（疲労－無力感）のスコアが有意に増加することが認められた（図1）。本研究で用いたストループテストの不一致課題は、実験的

に精神疲労を惹起する代表的な課題の1つであり、実行機能を評価している認知課題である。実行機能の抑制や情報処理などの能力は前頭前野と前帯状回が支配している。また、前帯状回は感情の処理、自己制御、努力/報酬の処理、および運動中の労力感知などのメンタルコンディションとも関連している。更に、アスリートは精神疲労による前帯状回の脳活動賦活が抑制されていることも報告されている⁶⁾。本研究では、精神疲労が惹起されたストローク不一致課題後において、前帯状回の脳活動増加と Steadiness の低下が認められた。これらのことから、精神疲労によりメンタルコンディションが低下すると、同じ運動でも努力感や労力感が増加することで前帯状回が賦活し、このことが力調節機能の低下に関与していることが示唆された。

総 括

本研究により、精神課題条件では、50% MVC 力調節発揮時の CV が有意に増加し、前帯状回や尾状核の脳活動賦活が有意に増加することが認められた。すなわち、メンタルコンディション低下に伴う発揮制御能力低下には、大脳辺縁系の脳活動が関与していることが示された。これらの知見により、力発揮時における脳活動動態の評価はメンタルコンディションのスクリーニングに応用できることが期待される。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、多大なる助成を賜りました公益財団法人明治安田厚生事業団に深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Bray SR, et al. (2008): Effects of self-regulatory strength depletion on muscular performance and EMG activation. *Psychophysiology*, **45**, 337-343.
- 2) Hou LJ, et al. (2016): Decreased activation of subcortical brain areas in the motor fatigue state: an fMRI study. *Front Psychol*, **7**, 1154.
- 3) Martin K, et al. (2018): Mental fatigue impairs endurance performance: a physiological explanation. *Sport Med*, **48**, 2041-2051.
- 4) Pageaux B, et al. (2015): Mental fatigue induced by prolonged self-regulation does not exacerbate central fatigue during subsequent whole-body endurance exercise. *Front Hum Neurosci*, **9**, 67.
- 5) Salonikidis K, et al. (2009): Force variability during isometric wrist flexion in highly skilled and sedentary individuals. *Eur J Appl Physiol*, **107**, 715-722.
- 6) Stoodley CJ, et al. (2010): Evidence for topographic organization in the cerebellum of motor control versus cognitive and affective processing. *Cortex*, **46**, 831-844.
- 7) Wallace HM, et al. (2002): The effects of success versus failure feedback on further self-control. *Self and Identity*, **1**, 35-41.
- 8) Yoon T, et al. (2014): Brain areas associated with force steadiness and intensity during isometric ankle dorsiflexion in men and women. *Exp Brain Res*, **232**, 3133-3145.