

# 定期的な有酸素性運動および筋力発揮調整能の課題を併用したトレーニングが筋力発揮調整能に及ぼす影響

## *Effects of Combined Training with Regular Aerobic Exercise and Exertion of Force Task on the Ability to Coordinate Exertion of Force*

出口 純次<sup>1,2)</sup> 三浦 哉<sup>3)</sup> 田村 靖明<sup>4)</sup> 石川 みづき<sup>5)</sup>

JUNJI DEGUCHI, MS<sup>1,2)</sup>, HAJIME MIURA, PhD<sup>3)</sup>, YASUAKI TAMURA, PhD<sup>4)</sup>, MIZUKI ISHIKAWA, PhD<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Physical Therapy, Tokushima College of Medical Sciences and Welfare, 128-1 Katsuura-cho, Katsuura-gun, Tokushima 771-4307, Japan TEL +81 885-42-4810 E-mail: j.deguchi.pt@tokushima-iryuu.ac.jp

<sup>2)</sup> Graduate School of Integrated Arts and Science, Tokushima University

<sup>3)</sup> Laboratory for Applied Physiology, Faculty of Integrated Arts and Science, Tokushima University

<sup>4)</sup> Department of Rehabilitation Medicine, Tokushima Prefecture Naruto Hospital

<sup>5)</sup> Department of Physical Therapy, Faculty of Medical Care, Osaka Yukioka Medical University

*Rigakuryoho Kagaku 37(1): 33-37, 2022. Submitted Aug. 4, 2021. Accepted Sep. 20, 2021.*

**ABSTRACT:** [Purpose] The purpose of this study was to examine the effects of a training program that combines aerobic exercise and the ability to coordinate exertion of force (ACEF). [Participants and Methods] The study included 10 healthy males and 6 females who were randomly divided into a group which performed 10 minutes of cycling at 60% $\dot{V}O_2$  max (AE) (n=8) and a group which performed sitting without exercise (CON) (n=8). The ACEF effect was evaluated using a continuous visual isometric grip task, and seven different force trials were performed 8 times each, for a total of 56 times. Three sets per week were performed for four weeks. [Results] In the AE group the number of successful grip tasks significantly increased after training compared to the value obtained before training. However, no significant change was observed in the CON group. [Conclusion] Training that combines aerobic exercise and ACEF may successfully promote ACEF.

**Key words:** ability to coordinate exertion of force, aerobic exercise, training

**要旨:**〔目的〕有酸素性運動および筋力発揮調整能の課題を併用したトレーニングが及ぼす影響を検討した。〔対象と方法〕健康成人16名であり60% $\dot{V}O_2$  maxで10分間の自転車こぎ運動後に筋力発揮調整能の課題を実施するAE群(n=8)、筋力発揮調整能の課題のみを行うCON群(n=8)に無作為に振り分けた。筋力発揮調整能の課題として、握力課題を実施し、頻度は週3回、4週間とした。握力課題の成功数および課題遂行時間を、トレーニング前後に測定した。〔結果〕握力課題の成功数は、AE群でトレーニング前と比較してトレーニング後に有意な増加が認められたが、CON群では有意差は認められなかった。〔結語〕有酸素性運動および筋力発揮調整能の課題を併用したトレーニングが、筋力発揮調整能を促進させる可能性が示唆された。

**キーワード:** 筋力発揮調整能, 有酸素性運動, トレーニング

<sup>1)</sup> 勝浦学園徳島医療福祉専門学校 理学療法学科: 徳島県勝浦郡勝浦町大字三溪字平128-1 (〒771-4307) TEL 0885-42-4810

<sup>2)</sup> 徳島大学大学院 総合科学教育部

<sup>3)</sup> 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部

<sup>4)</sup> 徳島県鳴門病院 リハビリテーション部

<sup>5)</sup> 大阪行岡医療大学 医療学部 理学療法学科



## I. はじめに

徒手筋力検査は、理学療法士が対象者の筋力を把握する1つの方法としてよく使用されており、これまで筋力測定の評価は、主として最大努力に基づいた測定方法が中心に行われている。しかし、我々が日常での生活で最大筋力を発揮する場面は少なく、コップを持つ、ドアノブを回す、フライパンを振るなど発揮筋力を調整して協調的に働かせる機会が多い。フィードバックされた情報から、視覚および手の協調等が重要であり、これが低下していると転倒、自動車事故などの傷害の発生率も高くなることが推察されている<sup>1)</sup>。高齢者では、このように発揮する筋力を協調的に行う機能が加齢とともに低下することが報告されている<sup>2-4)</sup>。そのため、加齢などの疾患を有する者が筋力発揮調整能を改善することは、日常生活を行ううえで重要な要素であることが考えられる。

これまで、認知課題の前後に15分間の有酸素性運動を行うことで、集中力と認知機能<sup>5)</sup>だけでなく、記憶力<sup>6)</sup>においても向上させることが実証されている。健康成人を対象とした高強度の自転車こぎ運動の急性効果として、運動学習に関連する脳由来神経栄養因子 (brain derived neurotrophic factor: 以下, BDNF)、血管内皮増殖因子、インスリン様成長因子、エピネフリン、ノルエピネフリン、ドーパミン、乳酸塩の血漿レベルの上昇<sup>7)</sup>などの代謝産物の増加および、皮質脊髄路の興奮性の増加<sup>8)</sup>が報告されている。さらに、週3回の自転車こぎ運動を8週間または12ヵ月継続して行うことで、トレーニング前と比較して高齢者の脳血流が増加することも報告されている<sup>9,10)</sup>。さらに、Lorásら<sup>11)</sup>は、有酸素性運動の急性効果として、25分間の中強度の自転車こぎ運動を実施することで、向上したゴルフパッティングの技能が24時間保持されることを明らかにしている。Roigら<sup>12)</sup>は、20分の高強度の自転車こぎ運動を実施すると、運動前と比較して運動学習課題であるvisuomotor accuracy-tracking taskの精度が24時間後および7日間後の保持に有意に高値を認め、運動学習に有効であることを報告している。また、10分間の短時間の自転車こぎ運動であっても、筋力発揮調整能が向上したことが明らかにされている<sup>13)</sup>。これらの知見は、有酸素性運動および課題の組み合わせが、加齢および神経学的障害後のリハビリテーションへの一助となる推測を導いている。

これらのことから、有酸素性運動を実施することで、認知機能の向上および運動学習の獲得あるいは保持の急性およびトレーニング効果が明らかとなっている<sup>5,6,9-13)</sup>が、筋力発揮調整能の課題トレーニング効果については十分に検討されていない。有酸素性運動および筋力発揮調整能の課題トレーニング効果を明らかにすることは、日常生活動作の維持および向上するために重要であると

考える。

そこで、本研究では10分間の自転車こぎ運動および筋力発揮調整能の課題を併用したトレーニングが、健康成人の筋力発揮調整能に及ぼす影響を検討した。

## II. 対象と方法

### 1. 対象

対象者は、Edinburgh 利き手テストにより右利きと確認された健康な成人男女20名 (男性12名, 女性8名, 年齢  $24.7 \pm 3.7$  歳: 平均  $\pm$  標準偏差) とした。除外基準は、整形外科的または精神医学的疾患、学習および中枢神経系への影響がある薬物を使用している者とし、各群1名ずつがトレーニング継続困難となり測定から除外した。

本研究は、徳島大学総合科学部人間科学分野における研究倫理委員会の承諾を得た (受付番号: 182)。対象者には、事前に文書および口頭にて研究内容・趣旨、参加の拒否・撤回・中断などについて説明し、書面にて承諾を得た後に実験を開始した。

### 2. 方法

全ての対象者は、60%最大酸素摂取量 ( $\dot{V}O_{2\max}$ ) で10分間の自転車こぎ運動直後に筋力発揮調整能の課題を行う (aerobic exercise: 以下, AE) 群、および10分間の座位保持直後に筋力発揮調整能の課題を行う (control: 以下, CON) 群に無作為に振り分けた (表1)。AE群の運動条件は、60%  $\dot{V}O_{2\max}$  にあたる時のwatt数を算出し、回転数は60回転、10分間の定常負荷で行った。筋力発揮調整能の課題は、1セッションを56回とし、両群それぞれ週3回、4週間のトレーニングを実施した。測定項目は、握力課題の成功数および課題成功に要した時間とし、トレーニング開始前 (以下, トレーニング前) およびトレーニング終了3日後 (以下, トレーニング後) に測定した。

筋力発揮調整能の課題のシステムは、Nagasawaらの

表1 対象者の身体的特性

	AE 群 (n=8)	CON 群 (n=8)
年齢 (歳)	25.0 $\pm$ 4.1	24.3 $\pm$ 3.6
性別 (男/女)	5/3	5/3
身長 (cm)	162.3 $\pm$ 6.6	166 $\pm$ 5.2
体重 (kg)	56.3 $\pm$ 3.2	58.0 $\pm$ 6.1
最大酸素摂取量 ( $\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ )	36.3 $\pm$ 9.3	37.8 $\pm$ 4.9

平均値  $\pm$  標準偏差。AE群: aerobic exercise群, CON群: control群。

表2 トレーニング前およびトレーニング後の握力発揮調整能課題の結果

	AE 群		群内 p 値	CON 群		群内 p 値	群 × 時間 p 値
	トレーニング前	トレーニング後		トレーニング前	トレーニング後		
課題遂行時間 (ms)	52.4 ± 16.2	45.9 ± 15.6	0.139	55.9 ± 15.6	48.4 ± 1.6	0.093	0.855
成功数 (回)	9.7 ± 4.1	14.0 ± 4.6*	0.005	10.0 ± 3.1	13.3 ± 3.7	0.053	0.634

平均値 ± 標準偏差. AE 群: aerobic exercise 群, CON 群: control 群. \*:  $p < 0.05$  (vs トレーニング前).

方法<sup>14)</sup>を参考にし、握力用アタッチメント (T. K.K.5710b, 竹井機器工業社製) と、生体信号を電気アナログ信号に変換するアイソメトリックダイナモメータを使用し、その後、ストレインアンプ (ストレインアンプ TSA-210, 竹井機器工業社製) によりアナログ信号をデジタル化した。目標範囲に到達する握力発揮を、視覚的に波形としてコンピュータ画面に表示し、波形数値を 1/100 ms ごとに Excel に数字として変換して記録した。測定の際に対象者は、コンピュータの前に椅座位となり、非利き手で握力計を把持し、事前に測定された最大の等尺性収縮 (10 ± 5%, 15 ± 5%, 20 ± 5%, 25 ± 5%, 30 ± 5%, 35 ± 5%, および 40 ± 5%) の 7 つの強度をそれぞれ 8 回、計 56 回を無作為に実施した。筋力発揮調整能の指標として、目標範囲にピーク値を到達させるのに要した課題遂行時間とした。そして、目標範囲内に握力を発揮させて、目標範囲内にピークを到達させた課題成功数の 2 つを評価した。

最大酸素摂取量は、運動時の運動強度を設定するために、自転車エルゴメータ (232C MODEL50, Combi 社製) を使用し、東大式の多段階負荷法を一部改訂して  $\dot{V}O_{2\max}$  を測定した。対象者は、3 分間の安静後に 40 Watts の負荷から開始し、1 分ごとに 20 Watts 漸増させる最大負荷テストを実施した。なお、ペダルの回転数は毎分 60 回転に規定した。 $\dot{V}O_{2\max}$  の決定には、 $\dot{V}O_2$  の leveling off, 予測最大心拍数 (220-年齢) 以上、呼吸商が 1.2 以上および Borg Scale が 19 以上のうち、2 項目が該当することを条件とした<sup>15)</sup>。

統計解析では、各群間における測定値の比較には、反復測定による二元配置分散分析 (群 × 時間) を行い交互作用および主効果の有無を検定した。二元配置の分散分析においては、Mauchly の球面性の検定を行い、球面性が仮定できなかった時には Greenhouse-Geisser のイプシロンを用いて自由度を修正した。反復測定による二元配置の分散分析により交互作用および主効果が認められた場合には、Bonferroni の方法を用いて多重比較検定を行った。なお、データの解析には、統計処理ソフト (SPSS 27.0, IBM 社製) を使用した。

### III. 結果

AE 群および CON 群のトレーニング前およびトレーニング後の課題遂行時間の変化について表 2 に示すとおりであり、AE 群ではそれぞれ 52.4 ± 16.2 ms および 45.9 ± 15.6 ms, CON 群ではそれぞれ 55.9 ± 15.6 ms および 48.4 ± 1.6 ms であり、交互作用および有意な主効果は認められなかった。

AE 群および CON 群のトレーニング前およびトレーニング後の課題成功数の変化について表 2 に示すとおりであり、AE 群ではそれぞれ 9.7 ± 4.1 回および 14.0 ± 4.6 回, CON 群ではそれぞれ 10.0 ± 3.1 回および 13.3 ± 3.7 回であり、交互作用は認められなかった。課題成功数において有意な主効果が認められ ( $F_{(1,7)} = 15.9$ ,  $p < 0.05$ ), 多重比較の結果, AE 群において、トレーニング前に比べてトレーニング後で有意な増加が認められた。

### IV. 考察

本研究では、10 分間の自転車こぎ運動および筋力発揮調整能の課題を併用したトレーニングが、筋力発揮調整能の向上に与える影響を検討した。その結果、筋力発揮調整能の課題の成功数は AE 群でトレーニング前と比較し、トレーニング後に有意な増加が認められた。一方、課題遂行時間において、交互作用および主効果は認められなかったが、AE 群では課題遂行時間が遅延せずに、成功数が増加したことが示唆された。

AE 群において、トレーニング前と比較してトレーニング後に成功数が増加した要因として、定期的に自転車こぎ運動を実施したことで、運動技能に関係する代謝産物が増加したことが考えられる。定期的な運動を行うことで、BDNF およびカテコールアミンレベルの強い増加が報告<sup>6)</sup>されている。さらに、BDNF およびカテコールアミンは、運動学習を改善する仲介物質であり、BDNF は長期増強への影響を介して、運動によって誘発される学習の変化を仲介するうえで重要な役割を果たしている<sup>16)</sup>。

中強度の運動を行うと生理学的覚醒が高まり、学習課題中に従事できる注意、集中などの認知面での環境が最



適化され<sup>17)</sup>、その結果、課題の獲得が容易になる<sup>18)</sup>。Yerkes-Dodsonの法則では、過小興奮および過大興奮はより低いパフォーマンスレベルを示すが、最も顕著なパフォーマンス効果は中程度の興奮状態で期待される<sup>17,19)</sup>。本研究においても自転車こぎ運動により覚醒度が増加したことで、適切な覚醒度で筋力発揮調整能の課題に取り組めたのではないかと考えられる。

さらに、成功数の増加した要因として脳血流量の増加も考えられる。有酸素性運動によって誘発される脳血流量の増加は、代謝産物の増加、また、そのような代謝資源の利用可能性および老廃物の除去をもたらし、次に、認知処理の促進を誘発し、神経応答を変化させる可能性がある<sup>20,21)</sup>。より多い脳血流量の増加は、認知機能の改善につながることも報告されている<sup>22,23)</sup>。成人を対象とした報告では、脳血液量の増大は、最大酸素摂取量の約60%以上の中強度から高強度の間に発生するとされている<sup>24,25)</sup>。また、高齢者を対象とした研究では、有酸素性運動を行うことにより、認知機能の改善と並行して、前頭葉の脳血流量の増加にもつながることが示されている<sup>26,27)</sup>。今回は、脳血流量の変化まで測定できていないが、中強度の自転車こぎ運動を実施したことにより、より良い代謝産物の供給が、その後の学習によって誘発され、脳の可塑性変化の可能性に寄与したと考えられる<sup>27)</sup>。

これまでSmithら<sup>28)</sup>は、健常成人を対象とした低～高強度の自転車こぎ運動後15分後に、運動を行っていない上肢の筋肉における短潜時皮質内抑制の減少および皮質内促進の増加を報告した。中強度運動の直後および30分後に、非運動下の上肢筋肉における短潜時皮質内抑制の減少および皮質内促進の増加が示された<sup>29)</sup>。このように、自転車こぎ運動後の皮質内興奮性の調節は、運動に関与する筋肉に限定されず、上肢領域における皮質内抑制の減少および皮質内促進の増加をもたらす、運動が一次運動野の可塑性に好ましい条件を作り出したと考えられる。これらのことが、運動学習の促進をもたらす良好な皮質内の環境がAE群における成功数の増加の一つと考えられる。

フィードバックされた情報を元に、目標値と実行値との誤差修正を求められる課題であり、感覚フィードバックは将来のフィードフォワード制御を可能にする内部モデルにも関与していることが報告<sup>30)</sup>されている。本研究に用いた筋力発揮調整能の課題は、握力計を把持した手指、パソコンの画面に映し出された張力の波形を視覚などから得られたパフォーマンスに関する情報を、感覚フィードバックとして利用し、課題遂行時の運動制御に利用されて運動機能の修正しているため、CON群においても課題成功数の増加傾向がみられたのではないかと考えられた。

なお、本研究の限界としては、対象者が健常者に限ら

れているために、体力レベルの状態などが異なる対象者も今後対象に検討し、これらを含め、本研究で観察された行動効果の根底にあるメカニズムを調べることで、筋力発揮調整能に及ぼす影響を明らかにする必要がある。また、リハビリテーション治療の長期的な成果を改善する可能性があるため、日常生活動作に影響を及ぼす他の要因についても検討し、握力発揮調整能を伴う課題を行う前に有酸素性運動を併用することで、動作獲得につながり、本研究結果がその一部に貢献できるのではないかと考えられる。そして、加齢などで低下している筋力発揮調整能の能力が低下している回復期および慢性期の対象者において、物を把持したりなどの日常生活動作の獲得の一助につながると示唆される。

本研究では、有酸素性運動および筋力発揮調整能の課題を併用したトレーニングが、筋力発揮調整能を促進させる可能性が示唆された。

**利益相反** 本論文に関して、開示すべき利益相反関連事項はない。

**謝辞** 本研究の実施にあたり、ご協力いただいた徳島大学応用生理学研究室のスタッフの皆さまに感謝いたします。

## 引用文献

- 1) 大築立志：力のグレーディング。Jpn J Sports Sci, 1989, 8: 663-667.
- 2) 木村みさか, 平川和文, 奥野直・他：体力診断バッテリーテストからみた高齢者の体力測定値の分布および年齢との関連。体力科学, 1989, 38: 175-185.
- 3) 宮口和義, 出村慎一, 宮口尚義：高齢ゲートボール愛好者の体力特性。体力科学, 1990, 39: 262-269.
- 4) Seidler RD, Bernard JA, Burutolu TB, et al.: Motor control and aging: links to age-related brain structural, functional, and biochemical effects. Neurosci Biobehav Rev, 2010, 34: 721-733.
- 5) Schneider S, Vogt T, Frysich J, et al.: School sport—a neurophysiological approach. Neurosci Lett, 2009, 467: 131-134.
- 6) Winter B, Breitenstein C, Mooren FC, et al.: High impact running improves learning. Neurobiol Learn Mem, 2007, 87: 597-609.
- 7) Skriver K, Roig M, Lundbye-Jensen J, et al.: Acute exercise improves motor memory: exploring potential biomarkers. Neurobiol Learn Mem, 2014, 116: 46-58.
- 8) Ostadan F, Centeno C, Daloz JF, et al.: Changes in corticospinal excitability during consolidation predict acute exercise-induced off-line gains in procedural memory. Neurobiol Learn Mem, 2016, 136: 196-203.
- 9) Kleinloog JP, Mensink RP, Ivanov D, et al.: Aerobic exercise training improves cerebral blood flow and executive function: a randomized, controlled cross-over trial in sedentary older men. Front Aging Neurosci, 2019, 11: 333.

- 10) Thomas BP, Tarumi T, Sheng M, et al.: Brain perfusion change in patients with mild cognitive impairment after 12 months of aerobic exercise training. *J Alzheimers Dis*, 2020, 75: 617–631.
- 11) Lorås H, Haga M, Sigmundsson H: Effect of a single bout of acute aerobic exercise at moderate-to-vigorous intensities on motor learning, retention and transfer. *Sports Basel*, 2020, 8: 15.
- 12) Roig M, Skriver K, Lundbye-Jensen J, et al.: A single bout of exercise improves motor memory. *PLoS One*, 2012, 7: e44594.
- 13) 出口純次, 三浦 哉, 田村靖明・他: 課題前の有酸素性運動が筋力発揮調整能に及ぼす影響. *理学療法科学*, 2021, 36: 453–456.
- 14) Nagasawa Y, Demura S: Development of an apparatus to estimate coordinated exertion of force. *Percept Mot Skills*, 2002, 94: 899–913.
- 15) 山地啓司: 最大酸素摂取量の科学. 杏林書院, 東京, 2001, pp3–55.
- 16) Fritsch B, Reis J, Martinowich K, et al.: Direct current stimulation promotes BDNF-dependent synaptic plasticity: potential implications for motor learning. *Neuron*, 2010, 66: 198–204.
- 17) Yerkes RM, Dodson JD: The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *J Comp Neurol Psychol*, 1908, 18: 459–482.
- 18) Sanders AF: Towards a model of stress and human performance. *Acta Psychol (Amst)*, 1983, 53: 61–97.
- 19) Audiffren M: Acute exercise and psychological functions: a cognitive-energetic approach. In: McMorris T, Tomporowski P, Audiffren M (eds): *Exercise and Cognitive Function*. Wiley-Blackwell, Hoboken, 2009, pp3–39.
- 20) Delp MD, Armstrong RB, Godfrey DA, et al.: Exercise increases blood flow to locomotor, vestibular, cardiorespiratory and visual regions of the brain in miniature swine. *J Physiol*, 2001, 533: 849–859.
- 21) Pereira EM, Santos FA, Machado CM, et al.: Substitution of corn grain by wheat middlings or corn gluten feed in the finishing bulls diet. *Acta Sci Anim Sci*, 2007, 29: 49–55.
- 22) Stillman CM, Cohen J, Lehman ME, et al.: Mediators of physical activity on neurocognitive function: a review at multiple levels of analysis. *Front Hum Neurosci*, 2016, 10: 626.
- 23) Stimpson NJ, Davison G, Javadi AH: Joggin' the Noggin: towards a physiological understanding of exercise-induced cognitive benefits. *Neurosci Biobehav Rev*, 2018, 88: 177–186.
- 24) Smith KJ, Ainslie PN: Regulation of cerebral blood flow and metabolism during exercise. *Exp Physiol*, 2017, 102: 1356–1371.
- 25) Rooks CR, Thom NJ, McCully KK, et al.: Effects of incremental exercise on cerebral oxygenation measured by near-infrared spectroscopy: a systematic review. *Prog Neurobiol*, 2010, 92: 134–150.
- 26) Chapman SB, Aslan S, Spence JS, et al.: Shorter term aerobic exercise improves brain, cognition, and cardiovascular fitness in aging. *Front Aging Neurosci*, 2013, 5: 75.
- 27) Alfini AJ, Weiss LR, Nielson KA, et al.: Resting cerebral blood flow after exercise training in mild cognitive impairment. *J Alzheimers Dis*, 2019, 67: 671–684.
- 28) Smith AE, Goldsworthy MR, Garside T, et al.: The influence of a single bout of aerobic exercise on short-interval intracortical excitability. *Exp Brain Res*, 2014, 232: 1875–1882.
- 29) Singh AM, Duncan RE, Neva JL, et al.: Aerobic exercise modulates intracortical inhibition and facilitation in a nonexercised upper limb muscle. *BMC Sports Sci Med Rehabil*, 2014, 6: 23.
- 30) 中村隆一, 齋藤 宏, 長崎 浩: 基礎運動学, 第6版補訂. 医歯薬出版, 東京, 2014, p475.