

腓腹筋に電気刺激を付加したジャンプトレーニングは 運動効率を高めるか

Effects of consecutive rebound jump training with electromyostimulation to the gastrocnemius muscle on endurance jump performance

小木曾 一之
Kazuyuki Ogiso

要旨

本研究では、腓腹筋に経皮的な電気刺激（EMS）を与えながら行う連続したりバウンドジャンプ（RJ）のトレーニングが持続的なジャンプパフォーマンスにどのような影響を与えるかについて調査した。19名の男性が被験者となり、両脚で行うRJトレーニングを4週間にわたり隔日で行った。彼らはnon-EMS群とEMS群にランダムに分けられ、EMS群はRJ中、両脚の腓腹筋にEMSが与えられた。RJトレーニングは1日10回3セットから始め、最終的には1日20回4セットまで漸増された。最大等尺性足底屈トルクの10%から始められたEMS強度も20%まで漸増された。RJトレーニング後、80回連続RJ中におけるEMS群の平均跳躍高と酸素摂取量は有意に増加した。そのため、それらの割合であるエネルギー効率は変化しなかった。一方、non-EMS群の平均跳躍高は変化せず、酸素摂取量は有意に増加したため、そのエネルギー効率は有意に低下した。EMS付加によるこれらの違いは、EMS群でみられた80回連続RJ後半での跳躍高の低下と接地時間の増加の割合が低い水準で留まったこと、80回連続RJ終了5分後に血中乳酸値の有意な増加がみられなかったこと、そしてジャンプの「跳びやすさ」の自己評価が高く、「反発をもらえた」「弾む感じがした」「浮かんでいる感じがした」といった運動感覚の変化がみられたことなどから、アキレス腱の弾性が向上した結果であると考えられた。したがって、腓腹筋にEMSを与えながらの連続RJトレーニングは、持続的ジャンプパフォーマンスを高めることが示唆された。

1. 緒言

我々の持久性能力はパワー系能力と同様に、アンギオテンシン変換酵素遺伝子やHIF 遺伝子、

AMPD1遺伝子などによる生得的な影響を受ける^{10, 19)}。しかし、これらの要因が影響する最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2\max$) も無限に大きくなるわけではなく、世界トップレベルのマラソンランナーでもその値は約85 mL/kg/minほどで頭打ちになる。当然、持久力の指標であるこの $\dot{V}O_2\max$ が大きいほど長距離走のパフォーマンスは向上する傾向にあるが、同じ $\dot{V}O_2\max$ を持っていても、実際には個々のパフォーマンスに大きな差がみられる³¹⁾。これは、長距離走などに代表される持久力が $\dot{V}O_2\max$ だけではなく、そのエネルギー効率やより高い $\dot{V}O_2$ で走り続けることができる能力（無酸素性代謝閾値）に影響されるためと考えられる¹⁷⁾。

そのため、現在では、「走時間や走距離を大きく」といったトレーニングだけではなく、無酸素性代謝閾値を改善するための高強度インターバルやスプリントインターバルトレーニングといった短時間・高強度トレーニング^{1, 8, 18)} やエネルギー効率を向上させるためのプライオメトリックトレーニングやスプリント走といった爆発的なトレーニング^{28, 29)} なども持続的なトレーニングに取り入れられるようになってきた。しかし、 $\dot{V}O_2\max$ と走のエネルギー効率には逆の関係が認められるといった報告もまた見受けられ^{6, 11, 20)}、持久力を向上させるには $\dot{V}O_2\max$ を向上させるだけではなく、そのエネルギー効率も同時に高めていくようなトレーニングが求められている。

野生動物に見られる並外れた運動能力は、このような問いにヒントを与えてくれる。長く強靱なアキレス腱をもつアカカンガルーは、時速約70kmのスピードで約2kmも継続して走る（跳ぶ）ことができ、その移動距離は1日になんと200kmにも及ぶとされる。彼らは、速く跳ぶほど省エネルギーで移動できる特性を持ち、それは彼らがアキレス腱のパネを使い、脚の筋をあまり使わず跳ぶためだと考えられている⁵⁾。筋と骨をつなぐ腱組織は比較的非弾性な構造を持つが、アキレス腱などは伸張されながら弾性エネルギーを蓄え、その後反発する受動的な弾性要素としての役割も果たす。実際、カンガルーにみられるそのエネルギーの貯蔵と放出は、筋の短縮により移動する力全てを生み出す場合より約30%ものエネルギーを節約できることが予測されている^{21, 22)}。

筋と腱組織は解剖学的・機能的にも切り離すことができず、合わせて筋腱複合体（MTC）と呼ばれるが、我々のMTCもまたカンガルーと同じく、その運動時には伸張されてから短縮する伸張短縮サイクル（SSC）運動を繰り返す^{2, 12)}。その活動はランニング効率や長距離走パフォーマンスに大きな影響を及ぼし^{3, 4, 26, 28)}、実際にSSC運動の代表例であるリバウンドジャンプ（RJ）のパワーが高いほど長距離走の記録が高くなることも報告されている³²⁾。エリートランナーは、最大酸素摂取量が大きいだけではなく、より高い $\dot{V}O_2$ レベルで走り続けられる^{14, 15)} ことがそのパフォーマンスを大きくするが、その大きな要因の一つにこのSSC運動、特にカンガルーのような腱組織の働きによるエネルギー効率の高さがあると考えられる。

しかし、SSC運動の代表的なトレーニングであるプライオメトリックトレーニングでは、脚にかかる大きな外力に対し腱組織の弾性をうまく使うことができず、筋と腱組織が同時に引き伸ばされてしまう、いわゆるつぶれた跳躍になってしまうことも多い。跳躍や歩行などの運動では、筋の長さがある程度一定に保ちながら腱組織を伸縮させ、その反動（弾性によるエネルギー）を利用することで、効率の良い動きが生み出される^{7, 30)}。しかし、外力に負け、至適長付近で等尺性に近い収縮をしながら腱組織の伸縮を利用することができなければ、その弾性エネルギーを有効に利用す

ることはできない。

そのため、以前の研究において、そのような筋腱動態を改善し、できる限り大きな力を発揮できる等尺性に近い状態で筋収縮を維持し、弾性組織である腱組織の大きな伸縮を引き出すため、連続RJ中の腓腹筋に経皮的電気刺激（EMS）を与えながらのトレーニングを行った²⁷⁾。これは、EMSが低強度から大きな力を素早く発揮できる速筋線維¹³⁾ もしくは筋線維タイプに依存しない動員を行うこと⁹⁾、筋線維により同期した収縮を導くこと、そして運動中の筋収縮により皮膚上のEMS電極と筋との相対的位置がずれ、より大きな範囲にEMSの作用が及ぶことなど、跳躍時に作用する大きな外力に対して、筋が等尺性状態を維持しやすい状況を作り出しやすいと考えたためである。その結果、その跳躍力は短期間で有意に向上し、最大足底屈力の向上とともに、特に引き伸ばされた状態でのアキレス腱硬度の有意な向上が認められた。また、トレーニング後、参加者は「ジャンプが軽くなった」「良く弾むようになった」という運動感覚の変化を示したことから、このトレーニングがアキレス腱の弾性を向上させ、SSC運動としての機能を向上させたことが示唆された。

したがって、連続RJ中の腓腹筋にEMSを付加するトレーニングは、受動的な弾性要素であるアキレス腱の弾性を高め、ジャンプ中におけるエネルギー効率を高める可能性が高い。そこで、本研究では、連続RJ中の腓腹筋にEMSを付加するトレーニングを行うことで、その運動効率を高めることができるという仮説を立て、その検証を行った。

2. 研究方法

1) 被験者

整形外科的あるいは神経筋疾患のない健康な男子大学生20名（年齢 20.7 ± 1.6 歳、身長 1.73 ± 0.07 m、体重 67.1 ± 9.8 kg）が本研究に参加した。彼らは、ジャンプを含めた定期的なトレーニングは行っていたが、ジャンプに関する専門的な指導は受けていなかった。参加者は、研究の内容およびそれに伴う危険性などについて十分に説明を受けた後、研究参加への同意書にサインした。なお、本研究は、K大学倫理委員会によって承認され、ヘルシンキ宣言の理念に従って実施された。

被験者は、跳躍能力のグループ間差異をできる限り少なくするため、事前に行われた最大努力での10回連続両脚RJの3回目から8回目の跳躍高の平均値順にランク付けされ、その後、Non-EMS群とEMS群にランダムに振り分けられた。ただし、EMS群に入った被験者1名は体調不良によりトレーニングを終えることができなかったため、最終的には19名の被験者がトレーニングを完遂することとなった。

EMS群は9名の被験者（年齢 19.9 ± 1.2 歳、身長 1.74 ± 0.08 m、体重 63.6 ± 6.3 kg）がEMSを下腿三頭筋に付加されながらRJを行い、Non-EMS群は10名の参加者（年齢 21.4 ± 1.4 歳、身長 1.71 ± 0.06 m、体重 70.2 ± 11.1 kg）がEMSの付加無しにRJを行った。

2) 連続リバウンドジャンプトレーニング

被験者は4週間にわたり1日おきに連続RJトレーニングを行った(合計15回)。最初の3回のトレーニングセッションでは1日10回の連続RJを3セット、4回目から6回目では1日15回の連続RJを3セット、7回目から9回目では1日20回の連続RJを3セット、10回目から15回目では1日20回の連続RJを4セット行った。すべてのセッションで、セット間には1分の休憩をはさんだ。1回のトレーニング時間は10分以下であった。被験者は、両手を腰に当て、同じ場所で最大努力のジャンプをするように指示された。なお、彼らにはジャンプに関する技術的なアドバイスは行われなかった。

EMS群の被験者には連続RJ中、ベルト電極骨格筋電気刺激システム(ATPRUII-0013、ホーマーイオン研究所)を用いて、指数関数波形をもつ周波数20 Hz(パルス幅260 μ s)のEMSを両脚の腓腹筋に付加した。電極は、EMSを付加する筋の横幅長と6 cmの垂直長をもつベルト式電極を用いた。電極は通電のため適度な水で湿らせた後、その陽極と陰極を腓腹筋の近位端と遠位端の皮膚上にベルトを巻き付け固定した。

EMSの周波数を20 Hzに設定したのは、1) 20 Hzより低い周波数は不安定な筋収縮を導く、2) 50 Hzより高い周波数は急速な筋疲労を導く²³⁾、3) 20Hzから30Hzの周波数で被験者は最もジャンプの軽さや弾みを感じ、ジャンプもコントロールしやすくなる²⁴⁾、ためであった。パルス幅を260 μ sに設定した理由は、予備実験においてそのパルス幅でのEMSが最も不快さが小さく、ジャンプもしやすかったためである。なお、260 μ sのパルス幅とEMSの指数波形は、EMS中に参加者が一般的に感じるチクチクした皮膚の痛みを大きく低下させた。

電気刺激の強度は、多用途筋機能評価運動装置(BIODEX system4, BIODEX)を用いて足関節角度90度での最大等尺性足底屈トルク(MVIC_{PF})を事前に測定し、その10%(平均電流値:1.8 \pm 0.3mA)、15%(2.0 \pm 0.3mA)、20%(2.1 \pm 0.3mA)が発揮される強度とした。また、その強度は、筋痛や怪我が生じないように、1週目は10%、2週目は15%、3週目から5週目は20%と漸増的に増加させた。

3) トレーニング効果の測定

連続RJトレーニングの効果を評価するため、トレーニング前(pre)、トレーニング終了後(post)、トレーニング終了から1週間後(1w)に、3種類の跳躍方法による跳躍高と接地時間、80回連続RJ中における $\dot{V}O_2$ 、連続RJ前後における血中乳酸値を測定するとともに、質問紙による運動強度等に関する調査を行った。

被験者は、反動を用いた垂直跳(CMJ)と30cmの台高からのドロップジャンプ(DJ)を各2回、10回連続RJを1回、種目間に5分の休憩をはさんで行い、その跳躍高と接地時間が測定された(接地時間はDJとRJのみ)。彼らは、腕の振り込みによる反動の影響をなくすため、腰に手を当てた状態で跳躍を行った。全ての試技は、跳躍高と接地時間が測定できるマルチジャンプテスト(PH-1260, DKH)上で行われ、CMJとDJは2回のうち跳躍高が高い試技を、RJは跳躍高が安定する3回

目から8回目までの平均値を分析した。

3種類のジャンプ測定後、被験者は腰に手を当てた状態で80回連続RJを行った。彼らは呼気ガス測定装置 (MetaMax3B、Cortex) を装着し、運動開始前に座位での安静時10分間のうち最後の3分間と80回連続RJ中、そして80回連続RJ終了後10分間の $\dot{V}O_2$ を測定した。これらのデータには安静時の測定開始時と終了時、80回連続RJの開始時と終了時、80回連続RJ中の10回RJ毎、終了5分後と10分後にイベントマークを打ち込んだ。80回連続RJのペースは、事前に全力で行った10回連続RJ時における接地時間と滞空時間の合計から計算した個々のジャンプ周波数 (被験者全体の平均値: $1.5 \pm 0.1\text{Hz}$) を被験者に提示し、そのペースをできるだけ維持するよう指示した。このペースはファンクション・ジェネレータ (FG-274、ニッケテクノシステム) でJumping Pace Maker (SUNメディカルシステム) を制御することによって、LEDによる光刺激と音刺激として被験者に提示した。体重当たりの $\dot{V}O_2$ は、安静時の値が減じられた後、その80回連続RJ中と終了後10分間の合計値が計算され、それで80回連続RJの平均跳躍高を除することで、簡易的な80回連続RJにおけるエネルギー効率を算出した。

80回連続RJ前の安静時とその終了直後、5分後、10分後には、血中乳酸測定器 (ラクテート・プロ、アークレイ) を用いて、ごく少量の血液を指先から採血し、血中乳酸値 (BLa) を測定した。BLaは80回連続RJ直後、5分後、10分後の値を80回連続RJ前の値に対する倍率として表した。

80回連続RJ終了直後には、被験者に主観的運動強度 (RPE) の聴取を行い、トレーニング前後の比較を行った。また、Post時と1w時における各跳躍パラメータの測定後には、トレーニング前と比較したトレーニング後のVJ、DJ、RJ、80回連続RJのジャンプの「跳びやすさ」について、1: とても跳びにくい 2: 跳びにくい 3: 変わらない 4: 跳びやすい 5: とても跳びやすい の5段階で自己評価させた。同時に、トレーニング前後におけるジャンプ時の運動感覚の違いについても調査した。

4) 統計処理

全てのデータは平均 \pm 標準偏差として表した。反復測定による二元配置分散分析を用いて、測定・分析した各変数、自覚的運動強度および自己評価をNon-EMS群とEMS群およびPre、Post、1 W時点に対して評価した。Mauchlyの球面性検定を用いて、被験者内因子の分散が等しいかどうかの検定を行い、Mauchly's testが球面性の仮定が満たされない場合、Greenhouse-Geisserのイプシロンによって補正された自由度をANOVAに適用し、その有意性を補正した有意性値から決定した。相互作用 (群 \times 時間) が有意でなく、主効果のいずれかが有意である場合、Bonferroniのpost hoc testを主効果のある因子のレベルの間に適用した。相互作用が有意である場合、Bonferroniのpost hoc testを、1つの因子の各レベル (時間) および他のレベル (群) の間に適用した。危険率は5%未満 ($p < 0.05$) を有意水準とした。

3. 結果

1) ジャンプパラメータの変化

CMJとDJの跳躍高には、群と測定時間間に有意な交互作用はみられず、それぞれの主効果も見られなかった。有意な交互作用はRJにおいてのみみられた ($F_{1.4, 24.4} = 9.11, p = 0.003$)。EMS群ではトレーニング後、RJの跳躍高は16.5%ほど有意に増加し ($p < 0.05-0.001$)、Non-EMS群では逆に9.4%ほど有意に減少した ($p < 0.05$ 、図1)。結果として、トレーニング後、EMS群の跳躍高はNon-EMS群より有意に大きくなった ($p < 0.01$)。DJの接地時間は210msから220ms、RJの接地時間は180msから190msほどで両群ともほぼ一定となり、トレーニング後の有意な変化は見られなかった。

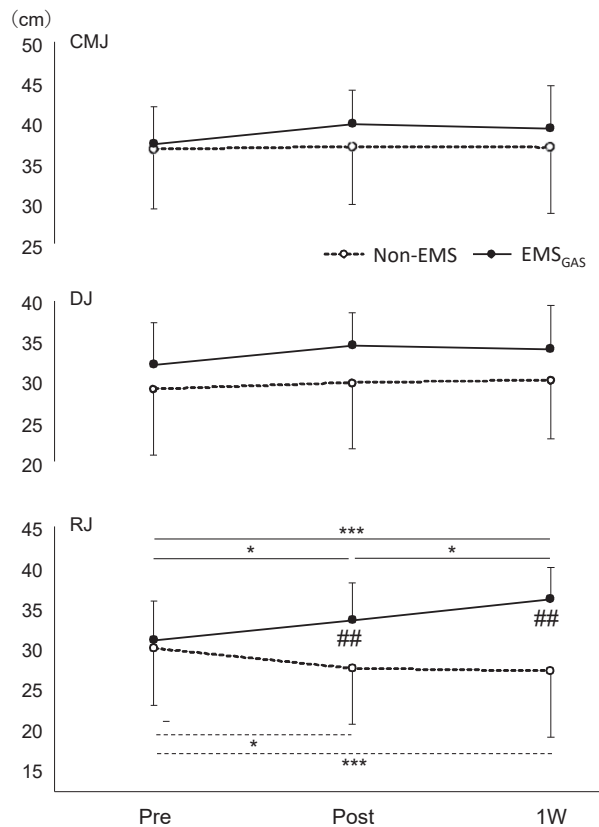


図1. CMJ、DJ、RJの跳躍高の変化

* : 測定間に見られた有意な変化 (*: $p < 0.05$, ***: $p < 0.001$)

: 群間に見られた有意な変化 (##: $p < 0.01$)

2) 80回連続ジャンプ時におけるジャンプパラメータの変化

80回連続ジャンプ中における跳躍高は、両群ともにその跳躍回数の増加とともに徐々に低下した。Non-EMS群は最初の10回と比較して、71回目から80回目の跳躍高がPre時に $83.2 \pm 15.1\%$ 、Post時に $78.0 \pm 13.0\%$ 、1W時に $78.4 \pm 10.5\%$ まで、EMS群はそれぞれ $85.0 \pm 10.2\%$ 、 $85.3 \pm 9.7\%$ 、 $84.1 \pm 4.4\%$ まで低下した(図2)。一方、接地時間はNon-EMS群で $115.2 \pm 12.2\%$ 、 $116.4 \pm 15.0\%$ 、 $113.5 \pm 13.5\%$ まで、EMS群で $115.3 \pm 10.3\%$ 、 $111.5 \pm 15.0\%$ 、 $109.7 \pm 5.5\%$ まで増加した。トレーニング後、ジャンプ後半にいくにしたがって、Non-EMS群よりEMS群でその跳躍高が大きく、接地時間が短い傾向がみられたが、群と測定時間との間に有意な交互作用やそれぞれの主効果はみられなかった。

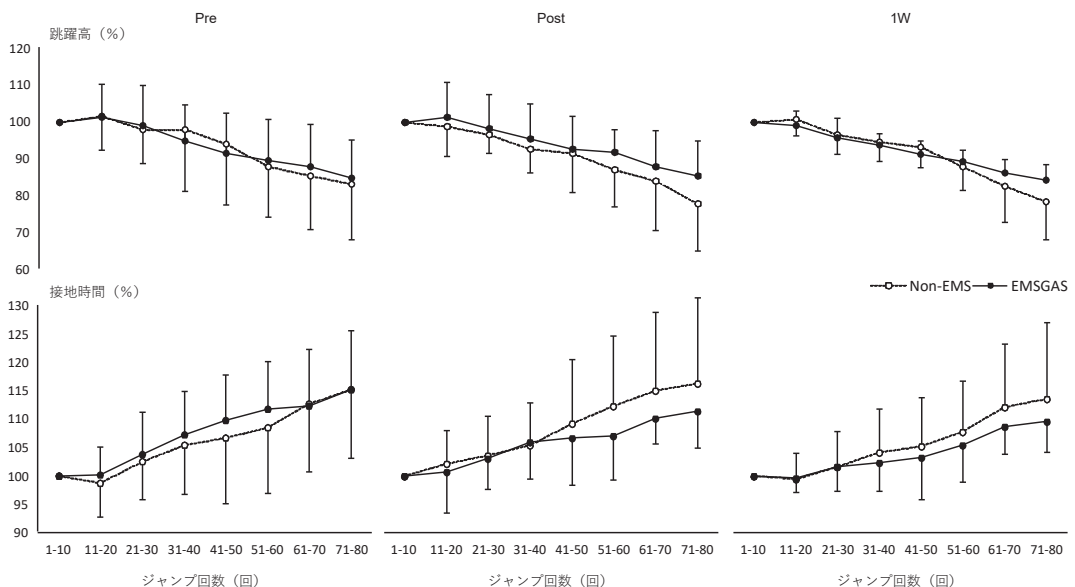


図2. 80回連続RJ中における10回毎の跳躍高と接地時間の変化. 値は1回目から10回目の値に対する割合.

80回連続ジャンプの平均跳躍高には群と測定時間との間に有意な交互作用がみられた ($F_{1.5, 24.6} = 3.77, p = 0.050$)。EMS群ではトレーニング後、その跳躍高は13.2%ほど有意に増加したが ($p < 0.001$)、Non-EMS群ではほとんど増加しなかった(図3 上)。その結果、トレーニング後、EMS群の平均跳躍高はNon-EMS群より有意に大きくなった ($p < 0.05-0.01$)。一方、平均接地時間は220msから240msほどで両群ともほぼ一定となり、トレーニング後の有意な変化はみられなかった。

3) 80回連続ジャンプ時の酸素摂取量

80回連続RJ中とその終了後10分間の体重当たりの $\dot{V}O_2$ の合計値には、群と測定時間間に有意な交互作用はみられなかった。有意な主効果は測定時間に対してみられ ($F_{2,34} = 19.22, p < 0.001$)、両群ともにトレーニング後、その値は有意に増加した ($p < 0.01-0.001$ 、**図3**中)。

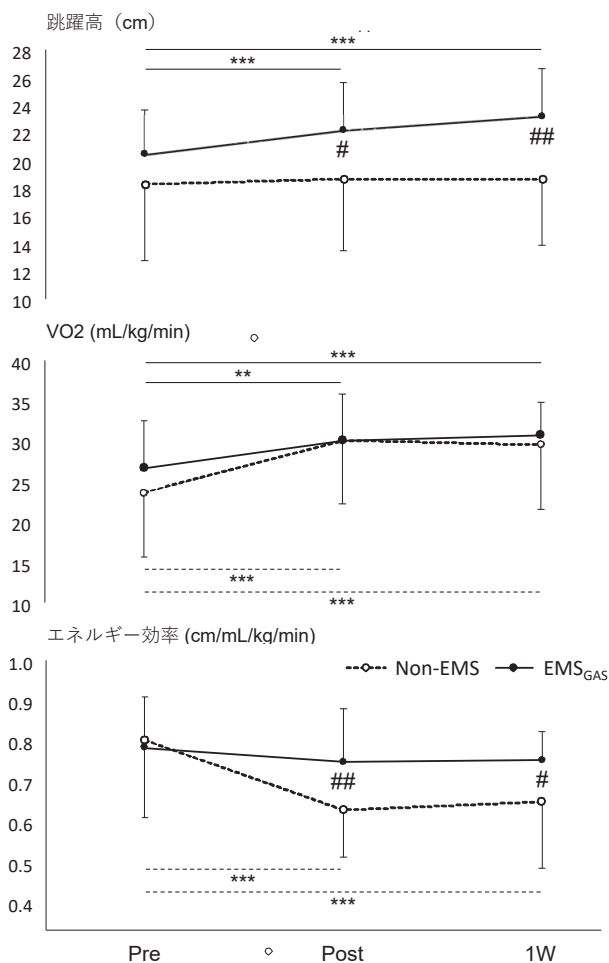


図3. 80回連続RJの平均跳躍高、酸素摂取量、エネルギー効率の変化

* : 測定間に見られた有意な変化 (**: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$)

: 群間に見られた有意な変化 (#: $p < 0.05$, ##: $p < 0.01$)

4) 80回連続ジャンプ時のエネルギー効率

80回連続ジャンプ時のエネルギー効率には、群と測定時間の間に有意な交互作用がみられた ($F_{2,34} = 4.26, p = 0.022$)。トレーニング後、EMS群では有意な変化はみられなかったが、Non-EMS群ではその効率が有意に減少した ($p < 0.001$)。その結果、トレーニング後、EMS群のエネルギー効率はNon-EMS群より有意に大きくなった ($p < 0.05-0.01$, 図3下)。

5) 80回連続ジャンプによる血中乳酸値の変化

80回連続RJを行う前のBLaはPre、Post、1W時ともに1.5から1.8mg/dLほどであった。そのBLaには、全ての測定時において群と測定時間の間の有意な交互作用はみられず、Post時 ($F_{1,3,20.4} = 10.74, p < 0.001$) と1W時 ($F_{2,32} = 5.76, p < 0.01$) においてのみ、測定時間に対する有意な主効果がみられた (図4)。Non-EMS群のBLaは80回連続RJ直後から5分後にかけて有意に増加し ($p < 0.01-0.001$)、5分後から10分後にかけて有意に減少した ($p < 0.001$)。一方、EMS群ではRJ直後もしくは5分後から10分後にかけては有意に減少したが ($p < 0.05-0.01$)、RJ直後から5分後にかけての有意な増加は示されなかった。EMS群のBLaは、Pre時とPost時においてNon-EMS群より小さくなる傾向を示したが、それは有意なものではなかった。

6) 80回連続ジャンプ時の自覚的運動強度と跳びやすさの自己評価

RPEはNon-EMS群でPre時が 15.8 ± 1.9 、Post時が 16.1 ± 1.9 、1W時が 15.6 ± 2.2 、EMS群ではそれぞれ 14.4 ± 2.3 、 15.1 ± 2.0 、 14.4 ± 1.9 となり、群と測定時間の間に有意な交互作用は見られず、それぞれの主効果も見られなかった。Pre時を3.0とした時の「跳びやすさ」の自己評価は、Non-EMS群でPost時が 3.0 ± 0.0 、1W時が 3.1 ± 0.5 、EMS群で 3.1 ± 0.9 、 3.6 ± 0.7 となり、EMS群で向上する傾向は見られたが、群と測定時間の間の有意な交互作用やそれぞれの有意な主効果は見られなかった。ただし、EMS群からは、トレーニング後、ジャンプ時の感覚がトレーニング前と比べ、「反発をもたえた」「弾む感じがした」「浮かんでいる感じがした」といった運動感覚の変化が報告された。

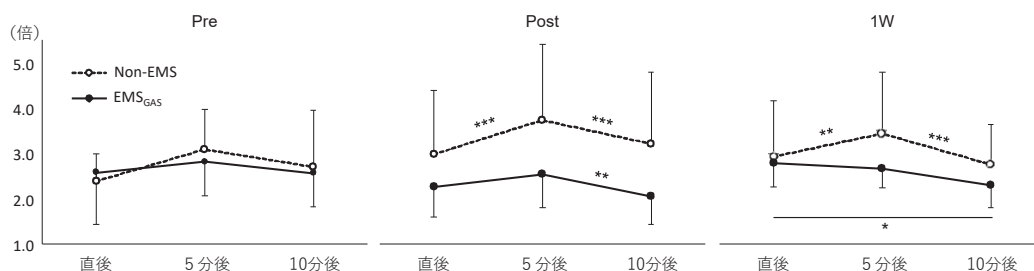


図4. 80回連続RJ後の血中乳酸値の変化. 値はRJ前の値に対する割合.

: 測定間に見られた有意な変化 (: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$)

4. 考察

1) EMSを腓腹筋に付加したリバウンドジャンプトレーニングの効果

EMSを腓腹筋に付加したEMS群では、RJトレーニング後、トレーニングと同じ動作のRJにおける跳躍高のみが有意に増加した。以前の研究²⁷⁾では、RJだけではなく、CMJ、DJともその跳躍高が有意に向上したことが報告されているが、本研究では同様な結果はみられなかった。一方、EMSを用いなかったnon-EMS群では、すべてのジャンプで跳躍高は増加しなかった。これらのことは、ジャンプに関する技術的なアドバイスもなく、単にRJを行っているだけではそのトレーニング効果を得ることが難しい一方で、EMSを付加した場合は、技術的なアドバイスがない場合でも、少なくともそのトレーニングで用いた動作においてはパフォーマンスが向上することを示唆している。

2) 80回連続ジャンプ時のエネルギー効率の変化

トレーニング後、EMS群は80回連続RJにおいてもその平均跳躍高が有意に増加した。しかし、 $\dot{V}O_2$ あたりの跳躍高として計算したエネルギー効率は $\dot{V}O_2$ もまた有意に増加したため、変化しなかった。一方、non-EMS群は平均跳躍高が増加せず、 $\dot{V}O_2$ は有意に増加したため、そのエネルギー効率は有意に低下した。その結果、トレーニング後、両群のエネルギー効率には有意な差が生じた。筋の酸素代謝機能は短期間のレジスタンストレーニングでも向上することが観察されていることから^{16, 25)}、本研究で見られたこの $\dot{V}O_2$ の増加は、RJトレーニングが筋の酸化系機構を刺激したことによる影響と考えられる。実際、Pre時に行った80回連続RJ後のBLaの変化は、その5分後、10分後に有意な変化を示さず、トレーニング前の段階では、RJ時における筋の活性化が十分でなかった可能性がある。

しかし、同じRJのトレーニングを行ったにもかかわらず、ジャンプ中の腓腹筋にEMSを付加しただけで、そのエネルギー効率に有意な違いが生じたことは、EMSが持続的なジャンプパフォーマンスを向上させる上で重要な役割を果たしていることを示している。Ogiso and Miki²⁷⁾は、ジャンプ中の腓腹筋へのEMSによるジャンプパフォーマンスの向上は、筋力の増加だけではなく、アキレス腱の弾性力の向上にも影響されると述べている。本研究においても、トレーニング後、EMS群はnon-EMS群に比べ、①80回連続RJの後半における跳躍高の低下と接地時間の増大が低く抑えられる傾向にあったこと、②80回連続RJ終了5分後のBLaが有意に増加しなかったこと、そして③ジャンプの「跳びやすさ」の自己評価がより高くなる傾向にあり、その運動感覚も「反発をもらえた」「弾む感じがした」「浮かんでいる感じがした」などに変化したことが示された。アキレス腱の受動的な伸縮によるエネルギーの貯蔵と放出は、筋の出力だけで運動を行うよりもそのエネルギー効率を向上させる^{5, 21, 22)}。よって、これらの結果は、RJトレーニング中における腓腹筋へのEMSの付加がアキレス腱の弾性を向上させ、持続的なジャンプパフォーマンスを向上させたことを強く示唆するものである。

3) 方法学的な問題

本研究では、被験者に80回連続RJのペースを提示し、そのペースをできるだけ維持するよう指示した。しかし、実際には、トレーニングによりRJの跳躍高が変化したことに加え、80回連続RJ中のペースもジャンプ回数の増加とともに変化したことから、本研究の結果にこのペースを維持することを指示した影響が含まれていることは間違いない。したがって、自由なペースで最大努力のジャンプを行うなど、持続的なジャンプパフォーマンスを測定するより適した方法を考えていく必要がある。また、80回連続RJはその継続時間が1分強のものであり、エネルギー代謝の面からもこの運動を持久的運動ということは難しい。しかし、80回連続RJのRPEがきつい～かなりきつい水準にあったように、最大努力で長時間ジャンプすることは非常に難しいため、今後、運動強度や持続時間の面から持続的なジャンプパフォーマンスを評価する方法を検討していく必要がある。

しかし、持久性能力を高めるため、一般的に行われているトレーニングと比べ、その時間や量が顕著に少ない本研究で行われたプライオメトリックストレートニングに類するトレーニングであっても、腓腹筋にEMSを付加した場合、80回連続RJの平均跳躍高やエネルギー効率が有意に向上したことは、持続的な能力を向上させる目的でEMSを用いた本研究のトレーニング方法が持続的なパフォーマンスをより大きく向上させる可能性を示唆している。

参考文献

1. Bishop DJ, Granata C, Eynon N. (2014) Can we optimise the exercise training prescription to maximise improvements in mitochondria function and content? *Biochim. Biophys. Acta* 1840(4): 1266-1275.
2. Cavagna GA, Dusman B, Margaria, R. (1968) Positive work done by a previously stretched muscle. *J. Appl. Physiol.* 24(1): 21-32.
3. Conley DL, Krahenbuhl GS. (1980) Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.* 12(5): 357-360.
4. Creer AR, Ricard MD, Conlee RK, Hoyt GL, Parcell AC. (2004) Neural, metabolic, and performance adaptations to four weeks of high intensity sprint-interval training in trained cyclists. *Int. J. Sports Med.* 25: 92-98.
5. Dawson TJ, Taylor CR. (1973) Energetic cost of locomotion in kangaroos. *Nature* 246(5431): 313-314.
6. Fletcher JR, Esau SP, MacIntosh BR. (2009) Economy of running: beyond the measurement of oxygen uptake. *J. Appl. Physiol.* 107: 1918-1922.
7. Fukunaga T, Kubo K, Kawakami Y, Fukushima S, Kanehisa H, Maganaris CN. (2001). In vivo behaviour of human muscle tendon during walking. *Proc. R. Soc. Lond B* 268: 229-233.
8. Gibala MJ, Little JP, MacDonald MJ, Hawley JA. (2012) Physiological adaptations to low-volume, high-intensity interval training in health and disease. *J. Physiol.* 590(5): 1077-1084.
9. Gregory M, Bickel CS. (2005) Recruitment patterns in human skeletal muscle during electrical stimulation. *Phys. Ther.* 85(4): 358-364.

10. Hagberg JM, Ferrell RE, McCole SD, Wilund KR, Moore GE. (1998) $\dot{V}O_2$ max is associated with ACE genotype in postmenopausal women. *J. Appl. Physiol.* 85(5): 1842-1846.
11. Hunter GR, Bamman MM, Larson-Meyer DE, Joanisse DR, McCarthy JP, Blaudeau TE, Newcomer BR. (2005) Inverse relationship between exercise economy and oxidative capacity in muscle. *Eur. J. Appl. Physiol.* 94: 558-568.
12. Komi PV. (2000) Stretch-shortening cycle: a powerful model to study normal and fatigued muscle. *J. Biomech.* 33: 1197-1206.
13. Kubiak RJ, Whitman KM, Johnston RM. (1987) Changes in quadriceps femoris muscle strength using isometric exercise versus electrical stimulation. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 8(11): 537-541.
14. Larsen HB. (2003) Kenyan dominance in distance running. *Comp. Biochem. Physiol. A Mol. Integr. Physiol.* 136: 161-170.
15. Lucia A, Esteve-Lanao J, Oliva'n J, Gomez-Gallego F, SanJuan AF, Santiago C, Perez M, Chamorro C, Foster C. (2006) Physiological characteristics of the best Eritrean runners—exceptional running economy. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 31: 1-11.
16. 増田和実・秋間広・衣笠竜太 (2006) 運動トレーニングが骨格筋の酸素利用能力に及ぼす影響. *デサントスポーツ科学*27 : 41-48.
17. Midgley AW, McNaughton LR, Jones AW. (2007) Training to enhance the physiological determinants of long distance running performance: Can valid recommendations be given to runner and coaches based on current scientific knowledge? *Sports Med.* 37(10): 857-880.
18. Milanovic Z. (2015) Effectiveness of High-Intensity Interval Training (HIT) and Continuous Endurance Training for VO_{2max} Improvements: A Systematic Review and Meta-Analysis of Controlled Trials. *Sports Med.* 45(10): 1469-1481.
19. Montgomery HE, Marshall R, Hemingway H, Myerson S, Clarkson P, Dollery C, Hayward M, Holliman DE, Jubb M, World M, Thomas EL, Brynes AE, Saeed N, Barnard M, Bell JD, Prasad K, Rayson M, Talmud PJ, Humphries SE. (1998) Human gene for physical performance. *Nature* 393(6682): 221-222.
20. Mooses M, Mooses K, Haile DW, Durussel J, Kaasik P & Pitsiladis YP. (2015) Dissociation between running economy and running performance in elite Kenyan distance runners. *J. Sports Sci.* 33: 136-144.
21. Morgan DL. (1977) Separation of active and passive components of short-range stiffness of muscle. *Am. J. Physiol.* 232(1): 45-49.
22. Morgan DL, Proske U, Warren D. (1978) Measurements of muscle stiffness and the mechanism of elastic storage of energy in hopping kangaroos. *J. Physiol.* 282: 253-261.
23. Moritani T, Muro M, Kijima A, Gaffney FA, Parsons D. (1985) Electromechanical changes during electrically induced and maximal voluntary contractions : surface and intramuscular EMG responses during sustained maximal voluntary contraction. *Exp. Neurol.* 88(3): 484-499.
24. 長岡大地・竹中睦・瀧下渡・小木曾一之 (2016) 跳躍中の下腿三頭筋への電気刺激がそのパフォーマンスに及ぼす影響. *トレーニング科学*27(1): 47-54.
25. 永澤健 (2006) レジスタンス運動は運動後の非活動筋エネルギー消費量を亢進させるか. *デサントスポーツ科学* 27 : 32-40
26. Nummela AT, Paavolainen LM, Sharwood KA, Lambert MI, Noakes TD, Rusko HK. (2006) Neuromuscular

- factors determining 5 km running performance and running economy in well-trained athletes. *Eur. J. Appl. Physiol.* 97: 1-8.
27. Ogiso K, Miki S. (2020). Consecutive rebound jump training with electromyostimulation of the calf muscle efficiently improves jump performance. *Transl. Sports Med.* 3(5): 454-463.
 28. Paavolainen L, Häkkinen K, Hämmäläinen I, Nummela A, Rusko H. (1999) Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *J. Appl. Physiol.* 86(5): 1527-1533.
 29. Spurrs RW, Murphy AJ, Watsford ML. (2003) The effect of plyometric training on distance running performance. *Eur. J. Appl. Physiol.* 89(1): 1-7.
 30. Vigreux B, Cnockaert JC, Pertuzon E. (1980) Effects of fatigue on the series elastic component of human muscle. *Eur. J. Appl. Physiol.* 45(1): 11-17.
 31. 山地啓司・池田岳子・横山泰行・松井秀治（1990）最大酸素摂取量から陸上中長距離走、マラソンレースの競技記録を占うことは可能か. *ランニング学研究*1(1)：7-14.
 32. 関子浩二・平田文夫（1999）下腿の神経・筋・腱系の状態が長距離走者の競技成績に及ぼす影響. 第14回日本バイオメカニクス学会大会論文集. *バイオメカニクス研究概論*：172-176.