

プレセット中の運動野短間隔皮質内抑制がドロップジャンプのパフォーマンスに及ぼす影響

吉田 拓矢¹, 丸山 敦夫², 菊山 靖³, 林 陵平¹, 関子 浩二⁴

Effect of short-interval intracortical inhibition in motor cortex during pre-set on rebound drop jumping performance

Takuya Yoshida¹, Atsuo Maruyama², Yasushi Kariyama³, Ryohei Hayashi¹ and Koji Zushi⁴

¹筑波大学大学院人間総合科学研究科, 〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1 (*Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574, Japan*)

²新潟医療福祉大学健康スポーツ学科, 〒950-3198 新潟県新潟市北区島見町1398 (*Department of Health and Sports, Niigata University of Health and Welfare, 1398 Shimamicho, Kitaku, Niigata, Niigata 950-3198, Japan*)

³山梨学院大学スポーツ科学部, 〒400-8575 山梨県甲府市酒折2-4-5 (*Faculty of Sport Science, Yamanashi Gakuin University, 2-4-5 Sakaori, Kofu, Yamanashi 400-8575, Japan*)

⁴筑波大学体育系, 〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1 (*Faculty of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574, Japan*)

Received : April 5, 2016 / Accepted : May 31, 2016

Abstract This study aimed to assess the effect of short-interval intracortical inhibition (SICI) before a jump off a platform (pre-set) on drop jump (DJ); the purpose was to investigate the relationship between this activity and performance, and the different effects of SICI on agonist and antagonist muscles during pre-set for jump athletes. Jump athletes (Jumper group, n=13) and Other athletes (Other group, n=9) performed DJ from drop heights of 0.30, 0.45, and 0.60 m). DJ performance was evaluated with DJ-index which was calculated from contact time and jump height. SICI was calculated from motor evoked potentials (MEP) recorded using paired-pulse transcranial magnetic stimulation for the medial gastrocnemius (MG) and tibialis anterior (TA) muscles in 7 jump athletes. Significantly higher DJ performance was observed for the Jumper group at all drop heights, and the Jumper group exhibited greater performance for the highest drop height than the Other groups. Significant decreases in SICI for MG were observed for the Jumper groups, and this decrease in inhibition was more prominent for the highest drop height during pre-set. Furthermore, the correlation between SICI for MG and DJ-index was stronger for increased drop heights, and a significantly positive correlation between these variables was observed at a height of 0.60 m. However, the SICI during the pre-set for TA exhibited no significant change under any of the conditions. The results of the present study suggest the importance of selective disinhibition of brain areas associated with the agonistic muscles during pre-set for higher DJ performance.

Jpn J Phys Fitness Sports Med, 65(4): 401-413 (2016)

Keywords : stretch-shortening cycle, TMS, DJ-index, plyometric training, SICI

緒 言

走動作や跳動作などの重力環境下で行われる人間の基本動作は、下肢の主働筋がエキセントリックに強制伸張した後にコンセントリックに短縮する伸張-短縮サイクル運動 (Stretch-shortening cycle movement, 以降SSC運動と略す) によって遂行されている¹⁾。また、多くのスポーツ種目に内在する走動作や跳動作の中にも、このSSC運動によって遂行されているものが多数存在する。そのためにスポーツにおけるパフォーマンスを向上させるためには、下肢のSSC運動の遂行能力を高めることが

重要な一要因となることが指摘されている²⁾。この下肢のSSC運動の遂行能力を高めるためのトレーニング法としてプライオメトリックトレーニングがあり³⁾、代表的な下肢のエクササイズとしてドロップジャンプ (Drop jump, 以降DJと略す) が挙げられる⁴⁾。DJとはある高さの台上から飛び降り、着地とともに即座に跳び上がる跳躍運動のことであり、台高を変更することや下肢3関節の運動範囲を変化させて跳躍技術を変更することによって様々なトレーニング負荷を課すことができる。また、DJでは着地瞬間を知覚してから運動を開始すると、着地直後から瞬間的にかかる大きな地面反力を下肢の主働筋

群で受け止めるための力発揮が間に合わず、下肢関節が大きく屈曲する動きが出現することになる。そのために、着地の約100 ms前から下肢の主働筋には予備緊張、いわゆる pre-activation を生じさせるとともに、運動の先取り動作が開始される^{5,6)}。この予備緊張を伴った先取り動作によって、着地前から下肢の主働筋群は接地前から力を発揮して、瞬時にかかる大きな地面反力に抗することができるようになる。その際、接地瞬時から下肢の主働筋群が強制的に伸張されることによって伸張反射が出現する^{7,8)}。さらに下肢の主働筋群およびそれに関連した腱部には弾性エネルギーが貯蔵されることになり⁶⁾、その後のコンセントリックな収縮による筋力発揮に加えて、この弾性エネルギーが解放されて高い跳躍高を獲得している^{1,9)}。したがって、DJにおける一連の運動機序には、pre-activation局面、踏切前半局面、踏切後半局面という時系列な局面構造が存在していることが考えられる。

このような一連の運動機序から、DJによるトレーニング効果は、主働筋に関連した筋-腱複合体の強化だけでなく、中枢神経の皮質脊髄系の興奮性増大に対しても起こると考えられる。伸張反射は、大部分が脊髄レベルでの伸張反射に由来するが、上位中枢である大脳の運動野、高次運動野、小脳などの興奮性に影響を与えると示唆される¹⁰⁻¹²⁾。これまでの研究から、伸張反射は台高を高めると促通するが、台高がある高さ以上になると抑制が生じるようになり、伸張反射の働きが低下することが報告されている^{6,9,11,13,14)}。Taube et al.⁶⁾は台高を高めると伸張反射の働きは低下し、それに伴ってDJのパフォーマンス¹⁵⁾も低下することを示している。また、Taube et al.¹⁰⁾はDJ中の伸張反射が運動皮質の影響を受けていることについて、経頭蓋磁気刺激(Transcranial magnetic stimulation, 以降TMSと略す)を用いて検討した。その結果、運動誘発電位(Motor evoked potential, 以降MEPと略す)が記録できる強度のTMSを、伸張反射成分の短潜時、中潜時、長潜時が出現するタイミングで与えると、接地後約100 ms以降の長潜時伸張反射が促通されることを示している。さらに、Zuur et al.¹²⁾は運動野皮質内抑制性介在ニューロンを介して同回路の活動を高める強度のTMS¹⁶⁾を、連続ホッピングにおける伸張反射成分の短潜時が出現するタイミングで与えると、接地後約40 msに出現する短潜時伸張反射が抑制されることを示している。一方、Petersen et al.¹⁷⁾は経頭蓋電気刺激では伸張反射へ影響しないと指摘しており、その理由として運動野皮質内抑制性介在ニューロンを介さない皮質脊髄路の軸索を直接刺激しているためTMSとは異なる反応であると示唆している。このような運動野皮質内抑制性介在ニューロンで制御されるDJ中の伸張反射は小脳などの皮質下領域に制御されていると考えられており、動物実験から脊髄Ia求心性入力から脊髄小脳求心性神経

を介した小脳-視床運動野回路や運動野-小脳回路へ伝達されることが報告されている¹⁸⁾。つまり、DJをトレーニングとして用いることによって、伸張反射による繰り返しの求心性入力が高次運動野や運動野皮質にSSC運動プログラムを構築し、小脳などの皮質下領域に定着される可能性があると考えられる。よって、小脳に定着した運動プログラムがDJにおける接地のタイミングを予測するために、小脳-運動野からの想起が起りフォワードフォワード制御として、踏切中の伸張反射に影響することが考えられる。

これらのことから、跳躍における踏切動作を日常のトレーニングの中で数多く行っており、高いDJパフォーマンスが発揮できるSSC運動の遂行能力を効果的に身につけている跳躍選手のような場合、DJにおける踏切中の伸張反射をより適切に働かせるために、pre-activation局面よりも前の局面、すなわち台上に位置するプレセット局面で運動野皮質内興奮性をより高める状態となっている可能性があると考えられる。運動野皮質内興奮性を評価する方法として、二連発経頭蓋磁気刺激(Paired pulse TMS)があり、特に、運動学習や運動準備による効果を検討する場合、運動野短間隔皮質内抑制(Short-interval intracortical inhibition, 以降SICIと略す)が利用される¹⁹⁾。SICIを用いたこれまでの研究では、光信号が呈示された後に手関節の伸展動作を素早く行う試技において、動作の直前にSICIが低下すること^{20,21)}、一定期間の筋力トレーニングによって最大筋力が向上すると、その筋群の力発揮中のSICIが低下すること²²⁾などが明らかにされている。このようなSICIの低下は、主に働く運動ニューロンを選択的に活性化させて^{22,23)}大きな力を発揮する脳内状態になっていることを示すことが報告されている²⁴⁾。これらのことから、SICIの活用は、DJにおけるプレセット局面の脳内状態を評価することができるとともに、この状態が一連の機序に関連し合っただけでパフォーマンスに影響していることを明らかにできると考えられる。

そこで本研究では、下肢のSSC運動の遂行能力が最もパフォーマンスに影響を及ぼしていることが考えられる跳躍選手を対象にして、DJにおける台から飛び降りる前のプレセット局面中の運動野皮質内抑制回路の興奮性を二連発経頭蓋磁気刺激(Paired-pulse TMS)を用いて評価するとともに、同局面中の主働筋である腓腹筋と拮抗筋である前脛骨筋における皮質内抑制回路の興奮性の相違点についても検討した。

方 法

実験1. 主働筋群を対象にして跳躍選手の特徴を検討した実験

被験者 Table 1に被験者の特性を示した。被験者は大

学陸上競技部に所属する男子大学生22名であった（年齢：22.04±2.68歳，身長：1.76±0.07 m，体重：64.27±5.44 kg）。被験者の特徴は，跳躍選手（Jumper群；n=13），短距離選手とハードル選手および中長距離選手（Other群；n=9）であった。Jumper群は普段のトレーニングにおいてDJを多く取り入れている被験者であり，Other群は普段のトレーニングにおいてDJをあまり取り入れていない被験者であった。実験を開始するにあたり，全ての被験者に対して本研究の目的，方法および実験にともなう安全性を説明した上で，実験に参加するための同意を得た。なお，本研究ではヘルシンキ宣言を満たす筑波大学人間総合科学研究科の研究倫理委員会によって承認された（承認番号：体25-99）。

実験試技 ある高さの台上から飛び降り，着地とともに即座に跳び上がる跳躍運動であるDJを実験試技として用いた。また，用いた台高は0.30 m，0.45 m，0.60 mの3種類（以下，DJ0.30，DJ0.45，DJ0.60と略す）であり，腕の振り込みの影響のないように手を腰に当てる姿勢で行わせた。試技回数はそれぞれの台高ごとに3回ずつ行わせた。なお，疲労の影響のないように，試技間の休息時間は十分に取った。被験者には，試技を行う際にできるだけ短い接地時間で高く跳び上がるように指示をした。試技方法を正確にできるようにするために，事前に練習を行わせた。

測定項目および測定方法 DJにおけるパフォーマンスの指標には，リバウンドジャンプ指数（Rebound Jump index，以降DJ-indexと略す）を採用した²⁵⁾。マットスイッチ（マルチジャンプテスト，DKH社製）を用いて，リバウンドジャンプにおける接地時間と滞空時間を計測し，

滞空時間から算出した跳躍高を接地時間で除すことによってDJ-indexを算出した。3つの台高における試技のDJ-index，接地時間，跳躍高は3回の試技を平均した値を代表値とした。

DJ中のMEP測定は，後述する刺激強度と刺激部位を決定した後に，被験者が台上に位置し，飛び降りる直前のプレセット局面中に実施し，それぞれの測定条件で誘発されるMEPを記録した。測定条件は台上に位置し，TMSを受けるがDJを行わない条件（コントロール条件，a条件）とTMSを受けた直後にDJを実施する条件（プレセット条件，b条件）の2つであった（Fig. 1）。プレセット条件では，被験者が台上で立位姿勢を取った後，頭蓋上の刺激部位上部にコイルを設置し，Paired-pulse TMSを約4秒の間隔で3発ずつ発射した。その直後に台上から飛び降りDJを実施させた。Paired-pulse TMSとは，当該する筋からMEPが生じない弱い刺激強度を用いて条件刺激（Conditioning stimulation，以降CSと略す）を行い，引き続きMEPが生じる強度のテスト刺激（Test stimulation，以降TSと略す）を与えることによって，CSがTSのMEPに与える影響を評価する方法である¹⁹⁾。本研究では，TSのみの刺激およびCSとTSを組み合わせた刺激の2種類の刺激をランダムに3発ずつ行った。1回のDJにつきMEPの記録に要する時間は，刺激間隔を含めて約24秒であった。この時間はTMSから記録したMEPを加算平均するために複数回行う必要があり，TMSの刺激間隔（約4秒の刺激間隔）を考慮した結果であった。また，合計6発のMEPを記録している間，すべての被験者に対し，「いつでも台から飛び降りることができる状態で準備して下さい」と指示を与えた。

下肢の筋群からの筋電図信号の導出は，直径8 mmの

Table 1. Best records of subjects from each group.

Jumper group			Other group		
Subjects	Events	Best records (m)	Subjects	Events	Best records (sec.)
A	Pole vault	5.00	N	5000m	16'20
B	High jump	2.28	O	5000m	15'46
C	High jump	2.28	P	5000m	15'22
D	High jump	2.14	Q	1500m	3'59
E	High jump	2.06	R	110m Hurdle	14"60
F	Long jump	7.62	S	400m Hurdle	52"82
G	Long jump	7.32	T	100m	10"78
H	Long jump	7.22	U	100m	10"71
I	Long jump	7.17	V	400m	49"17
J	Long jump	7.10			
K	Long jump	6.94			
L	Triple jump	15.92			
M	Triple jump	14.85			

Ag-CI電極 (Blue sensor, メッツ社製) を用いて左脚の内側腓腹筋 (以降MG筋と略す) から記録した. 電極の装着に先立ち, 電極設置部位は生体電流に対する電氣的抵抗値を最小限にするために, 研磨剤 (スキンピュアー, 日本光電社製) により皮膚と電極間のインピーダンスを減少させた. 導出した筋電図信号は, 生体増幅器 (AB-601G, 日本光電社製) により増幅し, A/D変換器 (Micro 1401, Cambridge Design Limited, CED社製) を介して

サンプリング周波数 4 kHz, 通過帯域 5-1000 Hz^{26,27)} でパーソナルコンピュータ (VersaPro, NEC社製) に取り込んだ.

Paired-pulse TMSにおける刺激については, 2台の磁気刺激装置 (Magstim 200, Magstim社製) と刺激用コイル (ダブルコーンコイル, Magstim社製) を使用した. 刺激部位は, 国際脳波記録法 (10-20法) で定められている頭頂部位 (Cz) から, わずかに側方に位置するMG筋の支配領域とした²⁸⁾. すべての刺激は, いずれの試技も台上立位状態で行われた. 刺激の至適部位は, 被験者の大脳の形態的違いから多少異なるために, 各被験者において筋電図反応が最も大きく誘発される部位を探索し, その部位に刺激用コイルを設置した. また, 刺激用コイルの位置は, 試技ごとに同一場所に再配置するために, コイルスタンド (AO-TMS, Magstim社製) で固定するとともに, 被験者の許可を得た上で頭蓋上に位置を記録した. 磁気刺激の強度は刺激装置の最大出力を100%とし, 試技中の刺激強度を決定するために, 各被験者の安静時運動閾値 (Relaxed motor threshold, 以降RMTと略す) を測定した. RMTは立位で安静を保った状態で5回中3回の試技において, 上下の最高点間の電位差 (peak-to-peak振幅) が50 μ V以下となる強度とした^{29,30)}. MEP振幅値は, peak-to-peak振幅として計測した. TSの刺激は, すべての測定条件において約1 mVのMEPを生じさせる強度に設定した²⁶⁾. なお, 図中 (Fig. 2, 5, 10) に表記されているMEP_{TEST}はTSによって記録したMEPの振幅とした. CSの刺激強度はRMTの70%とした^{21,30)}. 図中 (Fig. 2, 5, 10) に記載されているMEP_{3ms}はPaired-pulse TMSによって連発されたMEPの振幅とした. SICIは以下に示す通り, Paired-pulse TMSにより連発されたMEPの振幅値を, TSによって誘発されたMEPの振幅値で除した相対値で評価した値とした¹⁸⁾.

$$\text{SICI}(\%) = \text{MEP}_{3\text{ms}} / \text{MEP}_{\text{TEST}} \times 100$$

また, コントロール条件に対する各台高のプレセット条件におけるSICIの変化を評価するために, Δ SICI (各台高のプレセット条件のSICIをコントロール条件のSICIで差し引いた値) を算出した.

$$\Delta\text{SICI}(\%) = \text{各台高のSICI} - \text{安静時のSICI}$$

先行研究³¹⁾では, MEPを誘発するための運動閾値が当該筋の随意的な筋収縮 (5% MVC以上) によって低下することが報告されている. このために, 本研究ではすべての試技で筋放電が変化しているかどうかを確認するために, 刺激開始の約0.1秒前の期間の筋放電活動を全波整流して, 平均筋電図を算出し, background EMGと定義した.

統計処理 各実験条件 (Control · DJ0.30 · DJ0.45 · DJ0.60) から得られた値は, 平均 \pm 標準誤差で表した.

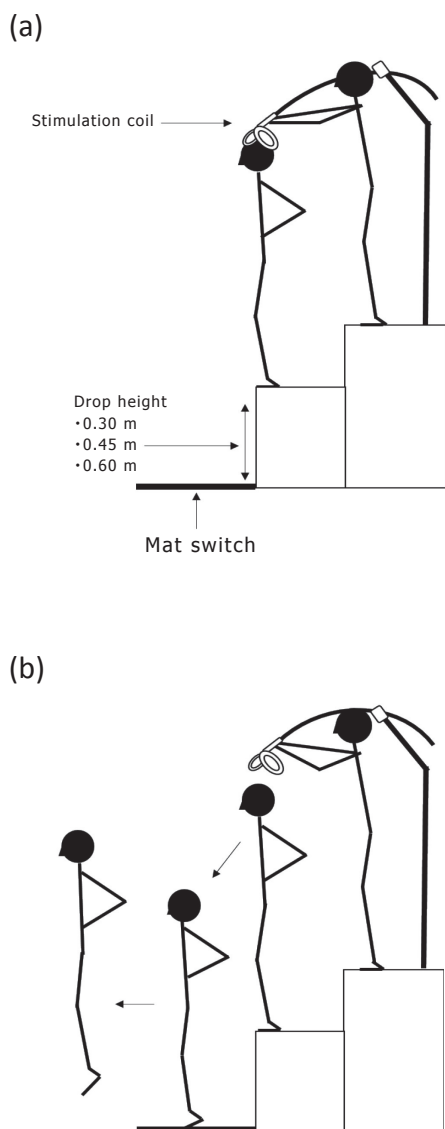


Fig. 1 Illustration of the experiment procedure. (a) Control condition. TMS was applied to the primary motor cortex of the leg area using a double-cone coil. After the subject assumed the standing posture on the platform, the coil was installed by the examiner on the stimulation site on the skull, and Paired-pulse TMS (TS and TS with ISI 3ms CS) were performed for three rounds each, for a total of six rounds. Control condition was not followed by the DJ. (b) Preset condition. Immediately after stimulation (Like the stimulation of control condition) was complete and the coil was removed from the skull by the examiner, the subject was asked to jump down and perform the DJ as soon as possible.

DJパフォーマンス (DJ-index・接地時間・跳躍高)の実験条件 (DJ0.30・DJ0.45・DJ0.60) および群間 (Jumper・Other) の比較は、繰り返しのある2要因分散分析で行った。コントロール条件の台高間 (0.30 m・0.45 m・0.60 m) の比較はそれぞれの刺激ごとに繰り返しのある1要因分散分析を行った。Background EMGの実験局面 (Control・DJ0.30・DJ0.45・DJ0.60) ごとの比較は、繰り返しのある1要因分散分析を行った。MEP_{TEST}、MEP_{3ms}の実験局面 (Control・DJ0.30・DJ0.45・DJ0.60)、群間の比較は繰り返しのある2要因分散分析を行った。SICIの実験局面 (Control・DJ0.30・DJ0.45・DJ0.60) および群間の比較は繰り返しのある2要因分散分析を行った。△SICIの実験局面 (DJ0.30・DJ0.45・DJ0.60) と群間の比較は繰り返しのある2要因分散分析を行った。事後検定は、Bonferroni-Dunn法による多重比較を行った。△SICIとDJ-indexの相関関係はピアソン積率相関係数を用いた。有意水準はすべての項目において5%未満とした。

実験2. 跳躍選手を対象にして主働筋群と拮抗筋群の相違点を検討した実験

被験者 被験者は、実験1に参加したJumper群の選手7名であった (年齢: 22.85 ± 3.02歳, 身長: 1.75 ± 0.10 m, 体重: 64.11 ± 4.29 kg)。

実験試技 実験試技は、実験1と同様に3種類の台高からのDJを行った。実験1と実験2は、疲労の影響を避けるために別日に行った。また、実験2の主働筋と拮抗筋の測定も疲労の影響を避けるために別日に行った。

測定項目および測定方法 実験1と同様に、DJにおけるパフォーマンスの指標にはDJ-indexを採用した。下肢の筋群からの筋電図信号の導出は、直径8 mmのAg-CI電極を用いて左脚のMG筋および前脛骨筋 (以降TA筋と略す) から記録した。Paired-pulse TMSにおける刺激については、2台の磁気刺激装置とダブルコーンコイルを使用し、刺激部位は、国際脳波記録法 (10-20法) で定められているMG筋支配領域およびTA筋支配領域とした³⁰⁾。Paired-pulse TMSにおける測定は、実験1と同様の方法を用いてMEP_{TEST}、MEP_{3ms}を記録し、SICIを算出した。また、実験1と同様に、すべての試技で筋放電が変化しているかどうかを確認するために、刺激開始の約0.1秒前の期間のBackground EMGを算出した。

統計処理 各実験条件 (Control・DJ0.30・DJ0.45・DJ0.60) から得られた値は、平均 ± 標準誤差で表した。なお、後述する2要因分散分析を行うに当たり、すべての測定項目は球面性の確認を行い、いずれの値も有意差が認められないことを確認した。DJパフォーマンス

(DJ-index・接地時間・跳躍高)の実験条件 (DJ0.30・DJ0.45・DJ0.60) および群間 (Jumper・Other) の比較は、繰り返しのある2要因分散分析で行った。Background EMGの実験局面 (Control・DJ0.30・DJ0.45・DJ0.60)、筋間 (MG・TA) の比較は、繰り返しのある2要因分散分析を行った。MEP_{TEST}、MEP_{3ms}の実験局面 (Control・DJ0.30・DJ0.45・DJ0.60)、筋間の比較は繰り返しのある2要因分散分析を行った。SICIの実験局面 (Control・DJ0.30・DJ0.45・DJ0.60) および筋間の比較は繰り返しのある2要因分散分析を行った。事後検定は、Bonferroni-Dunn法による多重比較を行った。有意水準はすべての項目において5%未満とした。

結果

実験1. 主働筋群を対象にして跳躍選手の特徴を検討した実験

Fig. 2は異なる台高を用いたコントロール条件におけるMEP_{TEST}、MEP_{3ms}およびSICIの値を示したものである。いずれの台高と群間においても有意差は認められなかった。Fig. 3は異なる台高を用いたDJにおける刺激0.1秒前から開始までのBackground EMGを示したものである。いずれの台高条件およびコントロール条件、群間においても有意差は認められなかった。

Fig. 4は異なる台高を用いたDJにおけるパフォーマンス変数を示したものである。各台高 (0.30 m, 0.45 mおよび0.60 m) におけるDJ-indexはJumper群が2.92 ± 0.10, 3.06 ± 0.11, 3.18 ± 0.12, Other群が1.88 ± 0.10, 1.95 ± 0.11, 1.90 ± 0.14であった。DJ-indexでは交互作用は認められなかったが、群に対して主効果が認められた (F(1, 20) = 44.301, P < 0.01)。多重比較の結果、いずれの台高においてもJumper群がOther群と比較して有意に高いことが認められた。接地時間では群間と台高には交互作用が (F(2, 40) = 4.113, P < 0.05)、群と台高には主効果が認められた (群: F(1, 20) = 50.271, P < 0.01, 台高: F(2, 40) = 3.832, P < 0.05)。また、多重比較の結果、いずれの台高においてもJumper群がOther群と比較して有意に短く、Other群のDJ0.30はDJ0.60と比較して有意に短いことが認められた。さらに、跳躍高では群間と台高に主効果が認められた (群: F(1, 20) = 50.271, 台高: F(2, 40) = 3.832, いずれも P < 0.01)。また、多重比較の結果、いずれの台高においてもJumper群はOther群と比較して有意に高く、Jumper群のDJ0.60がDJ0.30およびDJ0.45と比較して有意に高いことが認められた。

Fig. 5は台高条件およびコントロール条件におけるMEP_{TEST}、MEP_{3ms}を示したものである。方法で述べた通り、プレセット時の6発のTMS刺激に要する時間はおよそ24秒であった。そのため、測定時刻によってMEP振幅値が変化しているかを確認する必要がある。

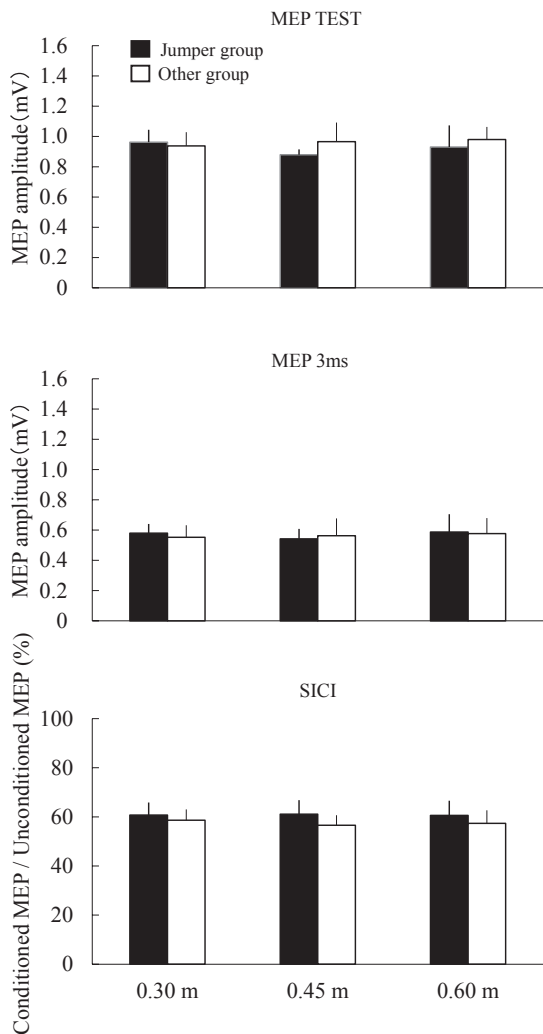


Fig. 2 Comparison of MEP TEST, MEP 3ms induced by TMS, and SICI in control conditions for each drop height each group. MEP TEST is MEP amplitude value generated only TMS with TS. MEP 3ms is MEP amplitude value generated by paired-pulse TMS with ISI 3ms CS. SICI is relative value obtained by dividing the MEP amplitude value generated in succession by paired-pulse TMS (MEP 3ms / MEP TEST *100). Results did not shown significant change in any of the drop heights.

6発のTMS刺激を前半(1-3発目)と後半(4-6発目)とに分けて、MEP TESTおよびMEP 3msの値の差を台高(0.30 m, 0.45 m, 0.60 m)および群(Jumper群, Other群)で検討したところ、いずれの値も有意差は認められなかった(Jumper群, MEP TEST: P=0.532, P=0.310, P=0.216, MEP 3ms: P=0.470, P=0.686, P=0.358; Other群, MEP TEST: P=0.747, P=0.617, P=0.456, MEP 3ms: P=0.365, P=0.547, P=0.190)。また、プレセット後半に一方の刺激のみが多く与えられていないかをすべての台高で確認したところ、いずれの台高においても刺激回数に偏りは見られなかった。

MEP TESTは、いずれにおいても有意差は認められな

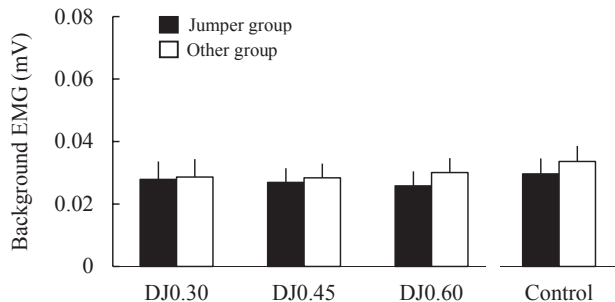


Fig. 3 Comparison of Background EMG in control conditions and in preset conditions at each drop height on each group. Results did not shown significant change in any of the conditions.

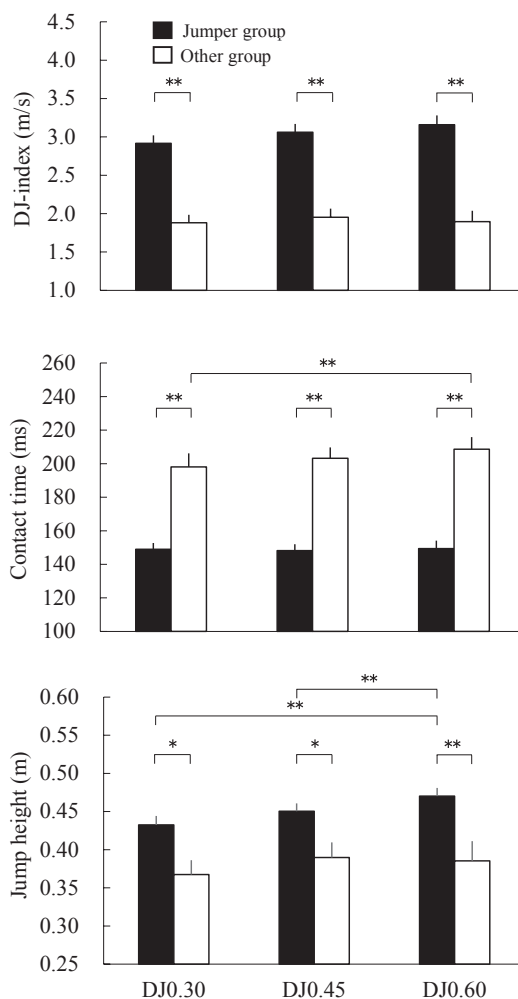


Fig. 4 Comparison of DJ performance at each drop height. DJ-index was calculated by dividing the jump height by the ground contact time. ** Significant between group and inter-group difference (P < 0.01).

かった。しかし、MEP 3msは、群間に交互作用 (F(3, 60) = 8.907, P < 0.01)、台高条件およびコントロール条件に主効果が認められた (P < 0.05)。また、多重比較の結果、

Jumper群ではDJ0.45およびDJ0.60がControlと比較して有意に高いことが認められた。

Fig. 6は台高条件およびコントロール条件におけるSICIを示したものである。SICIは、台高条件およびコントロール条件、群間に交互作用 ($F(3, 60)=9.224, P<0.01$), 台高条件およびコントロール条件に主効果が認められた ($F(3, 60)=3.178, P<0.05$)。また、多重比較の結果、Jumper群がOther群と比較してDJ0.60で有意に高いことが認められた。さらに、Jumper群ではDJ0.60がControl, DJ0.30およびDJ0.45と比較して有意に高く、DJ0.45がControlと比較して有意に高いことが認められた。

Fig. 7は異なる台高条件におけるプレセット条件のSICIの変化率 (Δ SICI)を示したものである。 Δ SICIでは台高条件および群間に交互作用 ($F(2, 40)=4.250, P<0.05$), 群間に主効果が認められた ($F(1, 20)=18.092, P<0.01$)。また、多重比較の結果、いずれの台高においてもJumper群がOther群と比較して有意に高いことが認められた。さらに、Jumper群ではDJ0.60がDJ0.30およびDJ0.45と比較して有意に高いことが認められた。

Fig. 8は、異なる台高条件におけるDJ-indexと Δ SICIの間の相関関係を示したものである。これらの間には、DJ0.30 ($r=0.30, n.s.$)とDJ0.45 ($r=0.41, n.s.$)では有意な相関関係は認められなかったが、DJ0.60では有意な正の相関関係が認められた ($r=0.57, P<0.01$)。

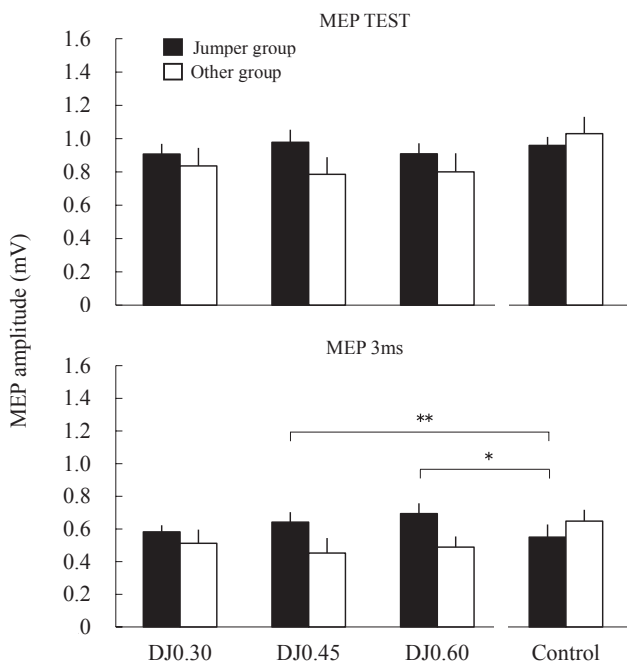


Fig. 5 Comparison of MEP_{TEST} and MEP_{3ms} under the control and preset conditions for each drop height. *, ** Significant inter-group difference ($P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively).

実験2. 跳躍選手を対象にして主働筋群と拮抗筋群の相違点を検討した実験

Fig. 9は台高条件およびコントロール条件におけるMG筋およびTA筋の刺激0.1秒前から開始までのBackground EMGを示したものである。いずれの台高条件およびコントロール条件においても有意差は認められなかった。

Fig. 10は台高条件およびコントロール条件におけるMEP_{TEST}, MEP_{3ms}を示したものである。MEP_{TEST}はいずれの条件においても有意差は認められなかった。MEP_{3ms}は台高条件およびコントロール条件に主効果があり ($F(3, 60)=0.780, P<0.01$), 多重比較の結果、MG筋においてDJ0.60がDJ0.30よりも有意に高いことが認められた。

Fig. 11は台高条件およびコントロール条件における

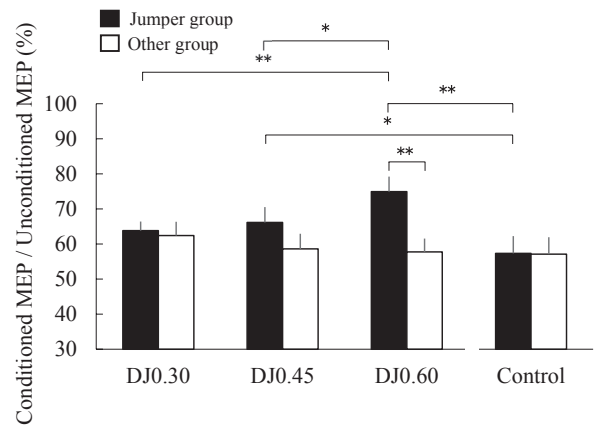


Fig. 6 Comparison of SICI in control and preset conditions for each drop height. *, ** Significant between group and inter-group difference ($P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively).

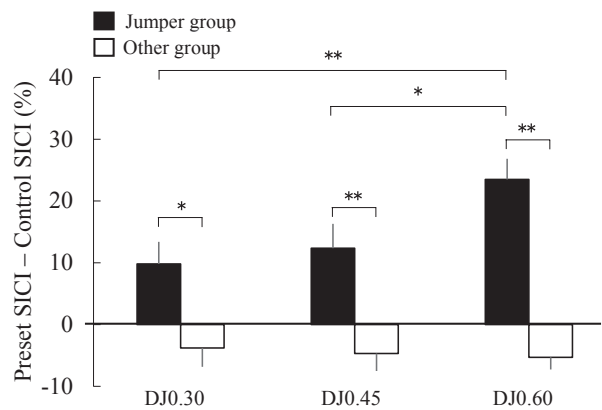


Fig. 7 Comparison of Δ SICI values for DJ at each platform height. Δ SICI is the value obtained by subtracting the SICI for preset conditions with each drop height by the SICI for control conditions. *, ** Significant between group and inter-group difference ($P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively).

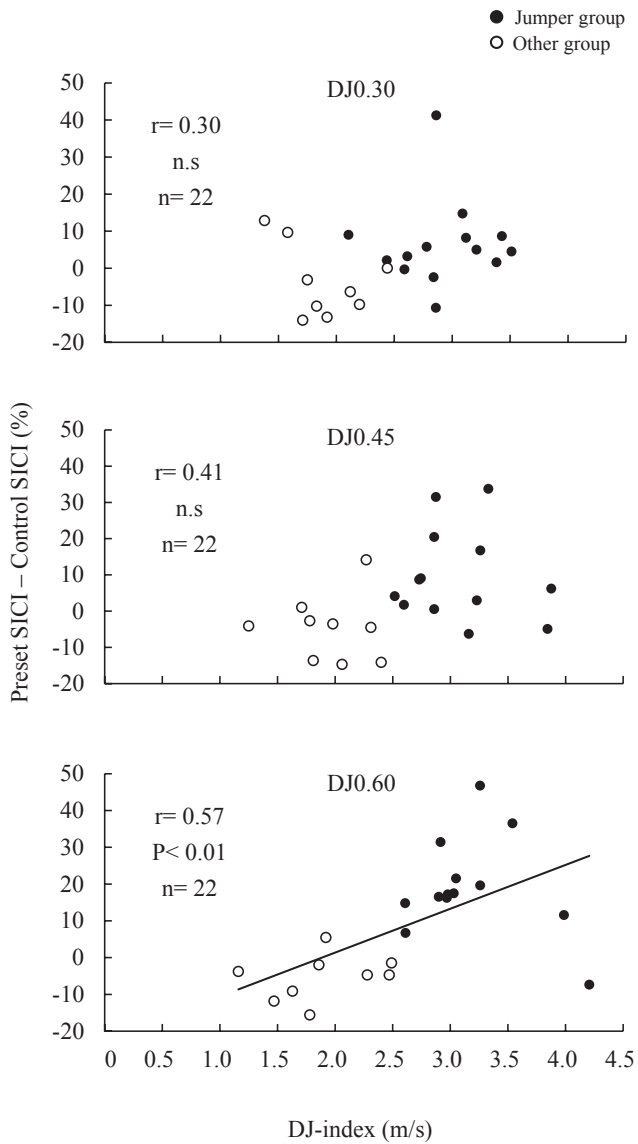


Fig. 8 Relationship between Δ SICI and DJ-index in preset conditions at each platform height.

SICIを示したものである。台高条件およびコントロール条件と筋群に交互作用 ($F(3, 36)=4.716, P<0.01$)、台高条件およびコントロール条件に主効果が認められた ($F(3, 60)=5.130, P<0.01$)。また、多重比較の結果、DJ0.45およびDJ0.60ではMG筋がTA筋よりも有意に高く、さらに、MG筋ではDJ0.60がControlおよびDJ0.30よりも有意に低く、DJ0.45がControlよりも有意に低いことが認められた。

なお、Table 2は異なる台高を用いたDJにおける平均RMT、TS強度、CS強度を示したものである。

考 察

実験設定の妥当性について 先行研究³¹⁾では、MEPを誘発するための運動閾値が当該筋の随意的な筋収縮（5% MVC以上）によって変化することが報告されている。DJのプリセット中においてSICIの活動を適切に評価するためには、TMSの刺激強度を決定したコントロール条件とプリセット条件で、刺激前の筋放電量に相違がないことが前提条件となる。そこで本研究では、コントロール条件と各台高のプリセット条件における刺激前のBackground EMGを比較し、実験試技の妥当性を確保した。まず、コントロール条件として使用する台高を決定するために、MEP_{TEST}、MEP_{3ms}およびSICIが台高間で相違がないかどうかについて検証した (Fig. 2)。その結果、いずれの台高においても全ての項目に有意差が認められなかったことから、最も低い0.30 mをコントロール条件の台高とした。次いで、コントロール条件と各台高でのプリセット条件との刺激前のBackground EMGを比較したところ、いずれの条件においても有意差は認められなかった (Fig. 3)。これらのことから、本研究の実験設定は、DJにおけるプリセット中のMEP_{TEST}、MEP_{3ms}さらにSICIの特徴を明らかにするために妥当なものであったことが判断できる。

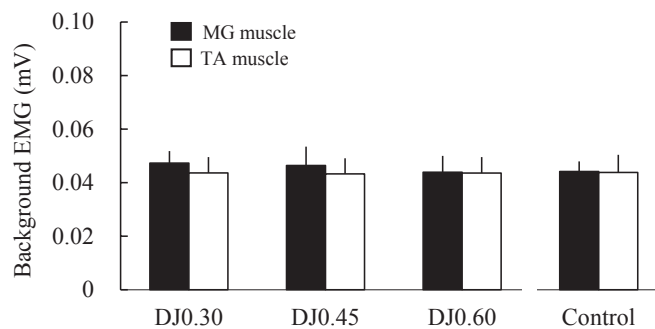


Fig. 9 Comparison of Background EMG in control and in preset conditions on MG muscle of agonist muscle and TA muscle of antagonist muscle for each drop height. Results did not shown significant change in any of the conditions.

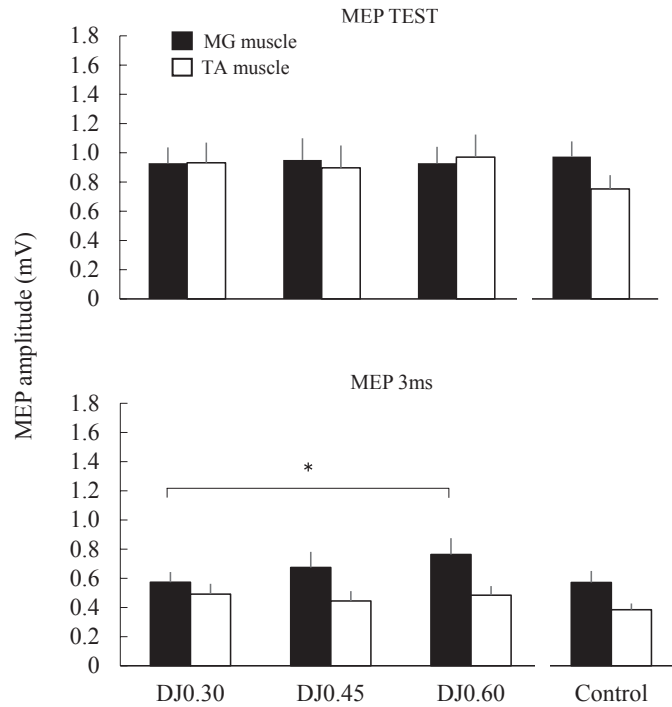


Fig. 10 Comparison of MEP_{TEST} and MEP_{3ms} under the control and preset conditions on MG muscle of agonist muscle and TA muscle of antagonist muscle for each drop height. MEP_{TEST} is MEP amplitude value generated only TMS with TS. MEP_{3ms} is MEP amplitude value generated by paired-pulse TMS with ISI 3 ms CS. * Significant between group and inter-group difference (P < 0.05).

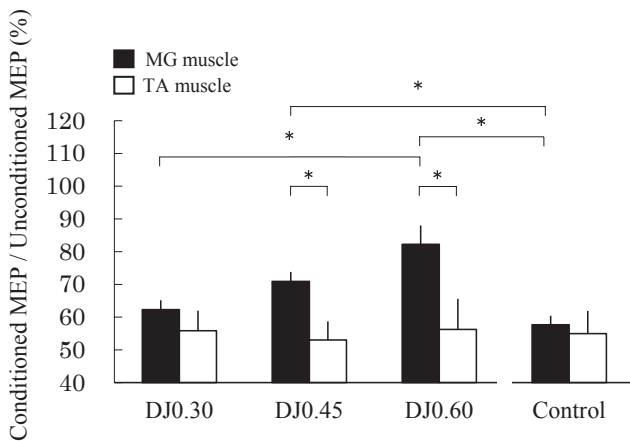


Fig. 11 Comparison of SICI under control and preset condition on MG muscle of agonist muscle and TA muscle of antagonist muscle for each drop height. * Significant between group and inter-group difference (P < 0.05 and P < 0.01, respectively).

本研究では被験筋を左内側腓腹筋としたが、Jumper群の中には踏切脚が右脚の被験者も存在した。踏切脚の影響については、先行研究³²⁾では、利き手と非利き手との間にはSICIに有意差が認められなかったことが示されている。また、本研究の実験試技のような両脚で行うDJは、地面反力に左右差がみられないことが示されて

いる³³⁾。これらのことを考慮すると、踏切脚によるSICIの影響は少ないと考えられる。

跳躍選手のDJパフォーマンスとSICIとの関係について

DJパフォーマンスに着目すると、Jumper群はOther群と比較して、いずれの台高においてもDJ-indexおよび跳躍高は有意に高く、接地時間は有意に短かった (Fig. 4)。さらに、DJ0.60はDJ0.30の条件と比較して、Jumper群においては跳躍高が有意に高く、Other群においては接地時間が有意に長いことが認められた。これらの結果は、Jumper群はOther群よりも、全ての台高条件でDJパフォーマンスは高く、特に伸張負荷が最も高いDJ0.60において最も高いDJパフォーマンスとなることを示すものであった。そこで本研究では、優れたDJパフォーマンスを有しているJumper群における運動野皮質内抑制回路（以下、皮質内抑制回路と略す）の状態をSICIを評価することによって検討した。なお、SICIは値が高くなるほど、皮質内抑制回路の状態が低下していることを意味する。SICIは、Jumper群のみで、DJ0.45およびDJ0.60の条件がコントロール条件と比較して有意に低下すること、また台高間ではDJ0.30と比較してDJ0.60で有意に低下することが認められた (Fig. 6)。さらに、DJ0.60の条件ではJumper群がOther群と比較して有意に低下することも認められた (Fig. 6)。コントロール条

Table 2. Mean RMT, TSI, and CSI (\pm SE) for the each group.

Jumper group			
Subjects	RMT (%)	TSI (%)	CSI (%)
Mean	48.25	58.63	29.86
\pm SE	0.52	0.63	0.28
Other group			
Subjects	RMT (%)	TSI (%)	CSI (%)
Mean	48.36	58.66	29.36
\pm SE	0.74	0.90	0.51

RMT: Resting motor threshold
 TSI: Test stimulation intensity
 CSI: Conditioning stimulation intensity

件に対する相対値である Δ SICI は、いずれの台高においても Jumper 群では正の値、Other 群は負の値となり、両群間に有意差が認められた (Fig. 7)。また、Jumper 群は DJ0.60 が DJ0.30 および DJ0.45 の条件と比較して有意に高いことが認められた。これらのことから、Other 群では全ての台高によるプレセット条件において、コントロール条件と同じ皮質内抑制回路の活動状態であることに対して、Jumper 群ではコントロール条件とは異なり、すべての台高で皮質内抑制回路がより脱抑制状態になっていることが考えられる。さらに、0.60 m という伸張負荷の最も高い条件においてその傾向は顕著になり、脱抑制状態がより促進していたことが考えられる。そこで DJ-index と Δ SICI との間の関係について検討した結果、相関係数は台高増大に伴って大きくなり、DJ0.60 の台高で有意な正の相関関係が認められた (Fig. 8)。これまでに示した結果は、プレセット中において皮質内抑制回路がより脱抑制状態になっていることが、高い DJ パフォーマンスを発揮するために影響している可能性を示唆するものである。特に、伸張負荷が高い DJ0.60 の台高では、その傾向が顕著になることを意味するものであった。Jumper 群は Other 群に比較して、跳躍における踏切動作を日常のトレーニングの中で数多く行っており、高い DJ パフォーマンスが発揮できる SSC 運動の遂行能力を身につけている選手である。本研究の結果は、この SSC 運動の遂行能力は下肢の筋力やパワー発揮などの身体的な要因だけではなく、プレセット中において皮質内抑制回路を脱抑制状態にできる能力が重要な一要因になっていることを示唆するものである。

プレセットにおける SICI 低下の機序について SICI の低下は、抑制性運動皮質介在ニューロンの感受性の減少を示すものであること^{23,34)}、運動野における経シナプス性結合¹⁹⁾、あるいはシナプスの脱マスキングおよび運動皮質レベルでのシナプス可塑性^{35,36)}を示すものであることが報告されている。これらの知見と運動プログラムが

運動野で形成されることを考慮すれば、本研究の DJ のプレセット中における SICI の低下は、高い伸張負荷に抗するために運動野内で生じている現象を反映したものであることが考えられる。さらに、主働筋に対する高い伸張負荷が DJ のパフォーマンスを高めることには、伸張反射が影響していることが示されている^{7,8)}。この伸張反射は、台高の増大とともに促通するが、過度な高さになると上位中枢からの抑制が生じて低下することが示されている^{6,9,11,13,14)}。また、台高の増大による伸張反射の変化を検討した研究⁶⁾では、高い台高 (0.75 m) では低い台高 (0.3 m) と比較して、H 反射が低下しパフォーマンス¹⁵⁾も低下したことから、DJ パフォーマンスの低下に伸張反射の低下が影響していることが示されている⁶⁾。さらに、DJ を用いたトレーニングによってパフォーマンスが向上した際には、伸張反射も高まっていたことが示されている³⁷⁾。この伸張反射と運動野内で生じている現象との関係については、DJ およびホッピングにおける伸張反射が運動皮質の影響を受けていること^{10,12)}、伸張反射を制御する領域は小脳などの皮質下であること¹¹⁾、この領域が運動学習による運動プログラム形成に関与し、接地までの時間を予測して筋の伸張を適切に行うことに貢献することが示されている^{38,39)}。Luft et al.¹⁸⁾ は、伸張反射がトレーニングによって脊髄 Ia 求心性入力を増大させ、脊髄小脳求心性神経を介した小脳-視床運動野回路や運動野-小脳回路を形成することを動物実験から報告している。さらに、Daskalakis et al.⁴⁰⁾ は、小脳への TMS によるプルキンエ細胞の活性化が視床腹側を經由して SICI を低下させ、刺激の増大によってプルキンエ細胞の活性度が高くなるほど SICI の低下も顕著であることを示している。運動を行うためのプログラムが運動皮質で統合されていることを考慮すれば、小脳などの皮質下領域によって構築される運動プログラムは、プレセット局面で伸張負荷に応じて皮質内抑制回路の活動を低下させるためのフィードフォワード制御として、踏切中の伸張反射に影響する可能性がある。これらのことか

ら、本研究の結果である Jumper 群における高い DJ パフォーマンスは、DJ におけるプレセット中に、皮質内抑制回路の活動がより脱抑制状態になることによって、高い伸張負荷刺激に対して伸張反射が促通し、主働筋である MG 筋が高い筋出力を発揮したことによる可能性が推察できる。

プレセット中の SICI における主働筋と拮抗筋の相違について 一方、これまでに示したプレセット中の SICI の低下は拮抗筋である TA 筋では生じなかった (Fig. 11)。これらのことは、プレセット中の SICI の低下が主働筋のみに選択的に生じていることを示すものである。光信号が呈示された後、手関節の伸展動作を素早く行う運動では、その直前に主働筋の SICI が低下すること^{20,21)}、筋力トレーニングによって最大筋力が向上した際に、主働筋の SICI が低下したことが示されている²²⁾。このような SICI の低下は、主運動のための運動ニューロンを選択的に活性化させ^{22,23)}、大きな力を発揮することに貢献することが考えられている²⁴⁾。一方、主働筋が活動する際に、拮抗筋は逆静止や半回抑制などの状態になることが示されている⁴¹⁾。これらのことと本研究の結果を合わせて考えると、DJ の踏切中に主働筋である MG 筋が接地直後から瞬間的に大きな力を発揮するためには、プレセット中に主働筋を支配する脳領域が選択的に脱抑制状態となり、拮抗筋となる TA 筋を支配する脳領域が必ずしも脱抑制状態にならないことが明らかとなった。すなわち、本研究の結果は、DJ のプレセットの段階で主働筋と拮抗筋における皮質内抑制回路の機能局在が確立されていることを示すものである。

本研究の結果から、高い DJ パフォーマンスを有する Jumper 群は、身体的な要因だけではなく、プレセット中において皮質内抑制回路を脱抑制状態にできる脳内の状態になるという特徴を持っていることが明らかにされた。また、主働筋である MG 筋を支配する脳領域が選択的に脱抑制状態となり、拮抗筋となる TA 筋を支配する脳領域には必ずしも脱抑制状態は生じないことが明らかにされた。これらのことから、プライオメトリックトレーニングとしてドロップジャンプを用いる際には、飛び降りる直前、すなわち台上にいるプレセット中の脳内の状態が非常に重要であることを指摘することができる。

なお、本研究では、プレセット局面の皮質内抑制回路の活動と予備緊張の量や時間との関連性については検討していないため、今後の課題として検討していく必要がある。また、本研究ではプレセット局面の皮質内抑制回路の活動がどの程度の高さから脱抑制状態から抑制状態になるのかについては検討していない。そのため、今後は抑制状態となる高さを明らかにするとともに、抑制状態は跳躍選手やその他の種目の選手で異なるのかについ

ても検討する必要がある。さらに、DJ におけるプレセット局面の皮質内抑制回路の活動とパフォーマンスについて検討したものであった。したがって、プレセット中の皮質内抑制回路の状態が踏切中の伸張反射に影響を及ぼし、それが主働筋である MG 筋の活動を高めた結果、足関節の力学的なトルクや仕事が増大し、パフォーマンスを高めるという一連の運動連関については、今後詳細に検討していく必要がある。

結 論

本研究では、下肢の SSC 遂行能力が競技のパフォーマンスに大きく影響していると考えられる陸上競技の跳躍選手を対象にして、DJ における台から飛び降りる前のプレセット局面中の運動野皮質内抑制回路の状態を二連発磁気刺激 (Paired-pulse TMS) を用いて評価するとともに、これらの脳内状態が DJ のパフォーマンスに及ぼす影響について検討した。さらに、跳躍選手を対象にして、同局面中の主働筋である腓腹筋と拮抗筋である前脛骨筋における運動野皮質内抑制回路の状態の相違点についても検討した。陸上競技の跳躍選手 13 名 (Jumper 群) と陸上競技の短距離、中長距離およびハードル選手 9 名 (Other 群) に、3 種類の台高から手を腰に当てた状態での DJ を行わせ、その際の DJ パフォーマンス変数およびプレセット中の内側腓腹筋 (MG 筋) を対象とした運動野皮質内抑制回路の状態を評価する変数を算出した。また、Jumper 群のうち 7 名においては拮抗筋である前脛骨筋 (TA 筋) を対象とした運動野皮質内抑制回路の状態を評価する変数を算出した。主な結果は以下の通りである。

- (1) Jumper 群は Other 群と比較して、すべての台高条件でパフォーマンスは高く、最も伸張負荷が高い条件において最も高いパフォーマンスを示した。
- (2) Jumper 群はプレセット中に運動野皮質内抑制回路が低下する、いわゆる脱抑制状態になることが示された。また、最も伸張負荷が高い台高条件においてその傾向は顕著になり、脱抑制状態がより促進することが示された。さらに、プレセット局面中に脱抑制状態と DJ-index との関係性は、台高の増大に伴って高くなることが示された。
- (3) プレセット中の脱抑制状態は、主働筋である MG 筋のみに選択的に生じ、逆に拮抗筋となる TA 筋においては生じなかった。

本研究の結果から、プライオメトリックトレーニングとしてドロップジャンプを用いる際には、飛び降りる直前、すなわち台上にいるプレセット中の脳内の状態がパフォーマンスを左右することになることから、高いトレーニング効果を得るためにはこの点に注目することが重要になることが指摘できる。

利益相反自己申告：申告すべきものはなし

引用文献

- 1) Komi PV. Stretch shortening cycle. In Komi PV (ed) *Strength and Power in Sport*. Oxford Blackwell science, pp 184-202, 2003.
- 2) 図子浩二, 高松 薫：バリスティックな伸張-短縮サイクル運動の遂行能力を決定する要因-筋力および瞬発力に着目して-, *体力科学*, 44: 147-154, 1995.
- 3) 菊山 靖, 遠藤俊典, 藤井宏明, 森 健一, 尾縣 貢, 図子浩二：片脚踏切を用いたりバウンド型ジャンプの動作および力発揮特性：両脚踏切を用いたりバウンド型ジャンプと比較して, *体育学研究*, 57: 143-158, 2012.
- 4) Bobbert MF. Drop jumping as a training method for jumping ability. *Sports Med* 9: 7-22, 1990.
- 5) Horita T, Komi PV, Nicol C, Kyrolainen H. Stretch shortening cycle fatigue: interactions among joint stiffness, reflex, and muscle mechanical performance in the drop jump. *Eur J Appl Physiol* 73: 393-403, 1996.
- 6) Taube W, Leukel C, Lubert B, Gollhofer A. The drop height determines neuromuscular adaptations and changes in jump performance in stretch-shortening cycle training. *Scand J Med Sci Sports* 22: 671-683, 2011.
- 7) Dyhre-Poulsen P, Simonsen EB, Voigt M. Dynamic Control of muscle stiffness and H reflex modulation during hopping and jumping in man. *J Physiol* 437: 287-304, 1991.
- 8) Avela J, Santos PM, Komi PV. Effects of differently induced stretch loads on neuromuscular Control in drop jump exercises. *Eur J Appl Physiol* 72: 553-562, 1996.
- 9) Komi PV, Gollhofer A. Stretch reflex can have an important role in force enhancement during SSC-exercise. *J Appl Biomech* 13: 451-460, 1997.
- 10) Taube W, Leukel C, Schubert M, Gruber M, Rantalainen T, Gollhofer A. Differential modulation of spinal and corticospinal excitability during drop jumps. *J Neurophysiol* 99: 1243-1252, 2008.
- 11) Taube W, Leukel C, Gollhofer A. How Neurons Make Us Jump: The Neural Control of Stretch-Shortening Cycle Movements. *Exerc Sport Sci Rev* 40: 106-115, 2012.
- 12) Zuur AT, Lundbye-Jensen J, Leukel C, Taube W, Grey MJ, Gollhofer A, Nielsen JB, Gruber M. Contribution of afferent feedback and descending drive to human hopping. *J Physiol* 588: 799-807, 2010.
- 13) Leukel C, Gollhofer A, Keller M, Taube W. Phase- and task-specific modulation of soleus H-reflexes during drop-jumps and landings. *Exp Brain Res* 190: 71-79, 2008.
- 14) Leukel C, Taube W, Gruber M, Hodapp M, Gollhofer A. Influence of falling height on the excitability of the soleus H-reflex during drop-jumps. *Acta Physiol* 192: 569-576, 2008.
- 15) Taube W, Kullmann N, Leukel C, Kurz O, Amtage F, Gollhofer A. Differential reflex adaptations following sensorimotor and strength training in young elite athletes. *Int J Sports Med* 28: 999-1005, 2007.
- 16) Davey NJ, Romaguere P, Maskill DW, Ellaway PH. Suppression of voluntary motor activity revealed using transcranial magnetic stimulation of the motor cortex in man. *J Physiol* 477: 223-235, 1994.
- 17) Petersen NT, Butler JE, Marchand-Pauvert V, Fisher R, Ledebt A, Pyndt HS, Hansen NL, Nielsen JB. Suppression of EMG activity by transcranial magnetic stimulation in human subjects during walking. *J Physiol* 537: 651-656, 2001.
- 18) Luft AR, Manto MU, Taib OB. Modulation of motor cortex excitability by sustained peripheral stimulation: The interaction between the motor cortex and the cerebellum. *Cerebellum* 4: 90-96, 2005.
- 19) Kujirai T, Caramia MD, Rothwell JC, Day BL, Thompson PD, Ferbert A, Wroe S, Asselman P, Marsden CD. Corticocortical inhibition in human motor cortex. *J Physiol* 471: 501-519, 1993.
- 20) Reynolds C, Ashby P. Inhibition in the human motor cortex is reduced just before a voluntary contraction. *Neurology* 53: 730-735, 1999.
- 21) Gilio F, Curra A, Inghilleri M, Lorenzano C, Suppa A, Manfredi M, Beraedelli A. Abnormalities of motor cortex excitability preceding movement in patients with dystonia. *Brain* 126: 1745-1754, 2003.
- 22) Weier AT, Pearce AJ, Kidgell DJ. Strength training reduces intracortical inhibition. *Acta Physiol* 206: 109-119, 2012.
- 23) Floeter MK, Rothwell JC. Releasing the brakes before pressing the gas pedal. *Neurology* 53: 664-665, 1999.
- 24) Carroll TJ. Emerging evidence that exercise-induced improvements in muscular strength are partly due to adaptations in the brain. *Acta Physiol* 206: 96-97, 2012.
- 25) 図子浩二, 高松 薫, 古藤高良：各種スポーツ選手における下肢の筋力およびパワー発揮に関する特性, *体育学研究*, 38: 265-278, 1993.
- 26) Maruyama A, Matsunaga K, Tanaka N, Rothwell JC. Muscle fatigue decreases short-interval intracortical inhibition after exhaustive intermittent tasks. *Clin Neurophysiol* 117: 864-870, 2006.
- 27) Sato D, Yamashiro K, Yoshida T, Onishi H, Shimoyama Y, Maruyama A. Effects of water immersion on short- and long-latency afferent inhibition, short- interval intracortical inhibition, and intracortical facilitation. *Clin Neurophysiol* 124: 1846-1852, 2013.
- 28) Oya T, Hoffman BW, Cresswell AG. Corticospinal-evoked responses in lower limb muscles during voluntary contractions at varying strengths. *J Appl Physiol* 105: 1527-1532, 2008.
- 29) Rossini PM, Barker AT, Berardelli A, Caramia MD, Caruso G, Cracco RQ, Dimitrijevic MR, Hallett M, Katayama Y, Lucking CH, Maertens de Noordhout AL, Marsden CD, Murray NMF, Rothwell JC, Swash M, Tomberg C. Non-invasive electrical and magnetic stimulation of the brain, spinal cord and roots: basic principles and procedures for routine clinical applica-

- tion. Report of an IFCN committee. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 91: 79-92, 1994.
- 30) Perez MA, Lungholt BK, Nyborg K, Nielsen JB. Motor skill training induces changes in the excitability of the leg cortical area in healthy humans. *Exp Brain Res* 159: 197-205, 2004.
 - 31) Hess CW, Mills KR, Murray NM. Responses in small hand muscles from magnetic stimulation of the human brain. *J Physiol* 388: 397-419, 1987.
 - 32) Cicinelli P, Traversa R, Oliveri M, Palmieri MG, Filippi MM, Pasqualetti P, Rossini PM. Intracortical excitability and inhibitory phenomena to paired transcranial magnetic stimulation in healthy human subjects: differences between the right and left hemisphere. *Neurosci Lett* 288: 171-174, 2000.
 - 33) Ball NB, Stock CG, Scurr JC. Bilateral contact ground reaction forces and contact times during plyometric drop jumping. *J Strength Cond Res* 24: 2762-2769, 2010.
 - 34) Butefisch CM, Davis BC, Wise SP, Sawaki L, Kopylev L, Classen J, Cohen LG. Mechanisms of use-dependent plasticity in the human motor cortex. *Proc Nat Acad Sci USA* 97: 3661-3665, 2000.
 - 35) Carroll TJ, Riek S, Carson RG. Corticospinal responses to motor training revealed by transcranial magnetic stimulation. *Exerc Sport Sci Rev* 29: 54-59, 2001.
 - 36) Pascual-Leone A, Nguyet D, Cohen LG, Brasil-Neto JP, Cammarota A, Hallett M. Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills. *J Neurophysiol* 74: 1037-1045, 1995.
 - 37) Schmidtbleicher D, Gollhofer A, Frick U. Effects of a stretch-shortening type training on the performance capability and innervation characteristics of leg extensor muscles. In Groot G, Hollander AP, Huijijng PA, Ingen Schenau GJ van (eds) *Biomechanics XI-A*. Free University Press, Amsterdam, pp 185-189, 1988.
 - 38) Allen GI, Tsukahara N. Cerebrocerebellar communication systems. *Physiol Rev* 54: 957-1006, 1974.
 - 39) Duncan A, McDonagh MJ. Stretch reflex distinguished from preprogrammed muscle activations following landing impacts in man. *J Physiol* 526: 457-468, 2000.
 - 40) Daskalakis ZJ, Paradiso GO, Christensen BK, Fitzgerald PB, Gunraj C, Chen R. Exploring the connectivity between the cerebellum and motor cortex in humans. *J Physiol* 557: 689-700, 2004.
 - 41) Nielsen J, Kagamihara Y. The regulation of disynaptic reciprocal Ia inhibition during co-contraction of antagonistic muscles in man. *J Physiol* 456: 373-391, 1992.