

## プレセット局面中の脳内状態とドロップジャンプパフォーマンスの縦断的調査

吉田 拓矢<sup>1)</sup>

1) 筑波大学体育系

The purpose of this study was to investigate the change in drop jump (DJ) performance with a training process that focused on the state of the brain during the pre-set phase, the stretch reflex during the take-off phase, and the joint kinetics of lower extremities during take-off phase. Three male sprinters performed DJ from a drop height of 0.6 m. We measured variables for state of the brain during the pre-set phase, stretch reflex, and kinetics of lower extremities during take-off. The results revealed that the brain showed disinhibition during the pre-set phase, and stretch reflex facilitation, and an increase in force development of the ankle joint were observed during the take-off phase. Therefore, we propose that the mutual enhancement on component of performance in each phase may be effective in improving DJ performance during a training course.

### I. 緒言

走動作や跳動作などの人間の基本的な動作は、下肢筋が強制的に伸張されてから短縮する伸張-短縮サイクル (Stretch-shortening cycle: SSC) 運動によって遂行されている。このため、下肢の SSC 運動の遂行能力を高めることは、多くのスポーツ種目における走および跳パフォーマンスを向上するための一要因として考えられている。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 (以下、プライオメトリクス) があり、その代表的な手段の 1 つとしてドロップジャンプが挙げられる (Bobbert, 1990)。ドロップジャンプは、ある高さの台上から跳び降り、着地とともに即座に跳び上がるジャンプ運動であり、台高や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。またドロップジャンプは、リバウンドジャンプ指数 (以下、DJ-index) などのパフォーマンス変数を用いて選手の SSC 運動の遂行能力を評価するための手段としても用いられており、下肢の SSC 運動遂行能力を評価するための代表的なテスト運動といえる。

これまでのドロップジャンプに関する研究では、踏切直前の予備緊張、踏切局面中の伸張反射および下肢関節、特に足関節の力発揮などがパフォーマンスに影響し (Avela et al., 1996; Dyhre-Poulsen et al., 1991; Taube et al., 2012), そこには種々の運動連関が生じていることが明らかとなっている。さらに近年では、踏切直前よりさらに前の台上に位置して跳び降りる前の局面 (以下、プレセット局面) の脳内状態がドロップジャンプのパフォーマンスに影響する可能性が報告されている (吉田ほか, 2016ab, 2017)。これらの研究では、プレセット局面における運動野皮質内抑制回路の興奮性を二連発磁気刺激による短間隔皮質内抑制 (Short-interval intracortical inhibition, 以下 SICI) を用いて評価し、ドロップジャンプのパフォーマンスおよびパフォーマンスに影響する生理学および生体力学的な要因との関係性について検討した。その結果、日常的にプライオメトリクスを実施しており、優れたドロップジャンプパフォーマンスを有する陸上競技の跳躍選手は他の種目の選手よりもプレセット局面中の皮質内抑制回路の興奮性が低下する、いわゆる脱抑制状態になることが示された (吉田ほか, 2016a)。また、プレセットからパフォーマンス獲得に至るまでには、プレセット局面中における皮質内抑制回路の興奮性の低下によって踏切局面における伸張反射が促進し、その伸張反射

の促進によって足関節トルクが増大することにより、高いドロップジャンプのパフォーマンスを獲得する可能性が示された（吉田ほか, 2016b）。したがって、プレセット局面中の脳内状態は踏切局面中の力発揮を円滑にするための初期前提条件としてパフォーマンス獲得に影響することが考えられ、プライオメトリクスとしてドロップジャンプを用いる際にはこの点に注目することが重要であるといえる。

一方、これらの研究では、プレセット局面中の脳内状態に関するトレーナビリティの有無について明らかにしていない。このため、プレセット局面中の脳内状態に関する知見をトレーニング現場に応用するためには、トレーニング経過に伴う縦断的な調査を行う必要がある。そこで本研究は、トレーニング経過に伴うドロップジャンプパフォーマンスの変化を、プレセット局面中の脳内状態、踏切局面中の伸張反射および下肢関節の力発揮特性とともに検討し、プレセット局面中の脳内状態のトレーナビリティの有無について明らかにすることを目的とした。

## II. 方法

### 1. 対象者および実験試技

対象者は、3名の陸上競技短距離選手とした（年齢：20±1.73歳、身長：1.80±0.03m、体重：71.20±4.03kg）。本研究は、事前に筑波大学体育系倫理委員会の承認を得た上で実施した。測定に先立ち、対象者には、本研究の目的および実施への参加に伴う危険性について十分な説明を行い、実験参加の同意を書面で得た。

実験試技は、0.6mからのドロップジャンプとした。この高さは、我々の研究から、プレセット局面中の脱抑制状態が顕著に現れた高さである（吉田ほか, 2016b）。対象者には、できるだけ短い時間で高く跳ぶよう指示を出した。なお、測定は、冬季トレーニング前後の合計2回実施した。

### 2. 測定項目

測定項目は、プレセット局面中の脳内状態、踏切局面中の伸張反射、下肢関節の力発揮特性に関する変数およびパフォーマンス変数とした（表1）。測定方法の詳細は以下に示す。

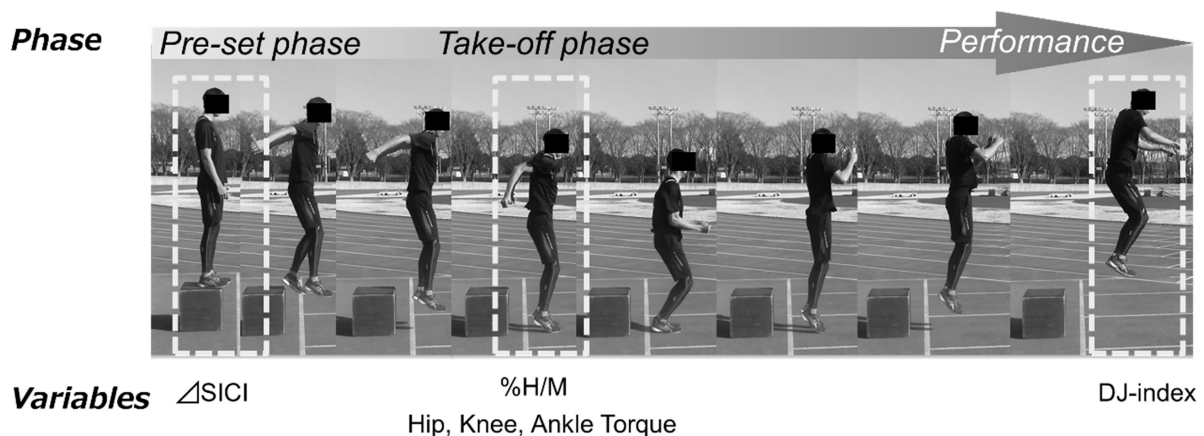


図1 各局面における測定項目

#### 2.1 プレセット局面中の脳内状態

プレセット局面中の脳内状態は、二連発磁気刺激による SICI によって評価した（Kujirai et al.,

1993) . 2 台の経頭蓋磁気刺激装置 (Magstim 200, Magstim 社製) とダブルコーンコイル (ダブルコーンコイル, Magstim 社製) を用いて, 腓腹筋支配領域から運動誘発電位を記録した. なお, 測定はすべて台上での立位状態で行われた. 対象者ごとに最適な位置にコイルを当てるために, 頭上にフェルトペンで印を付け, 試技毎に刺激部位を確認した. また, 刺激強度を決定するために, 安静時運動閾値を測定した. SICI を算出するために, 2 種類の刺激方法 (テスト刺激のみ, コンディショニング刺激+テスト刺激) を用いた. テスト刺激は約 1mV の運動誘発電位を誘発にできる強度, コンディショニング刺激は安静時運動閾値の約 70%の強度に設定した. テスト刺激のみによって記録された運動誘発電位を MEPTTEST とし, コンディショニング刺激の 3ms 後にテスト刺激を行うことによって記録された運動誘発電位を MEP3ms とした. また, MEPTTEST に対する MEP3ms の相対値によって %SICI を算出した. また, ドロップジャンプを行う試技 (プレセット時) における %SICI を, ドロップジャンプを行わない試技 (安静時) における %SICI で差し引くことにより,  $\Delta$ SICI を算出し, これをプレセット局面中の脳内状態を評価する指標として用いた.

## 2.2 踏切局面中の伸張反射

踏切局面中の伸張反射は, 電気刺激による H 反射および M 波によって評価した. 誘発電気刺激装置 (ニューロパック S1, 日本光電社製) を用いて, 脛骨神経への電気刺激により腓腹筋から H 反射および M 波を記録し, H/M 比を算出した. 測定は, フォースプレート側方の床面上に光電管を設置して, 足部が光電管を通過し, TTL 分岐ボックスを介したトリガー信号により電気刺激を行った. 電気刺激の刺激強度は最大 M 波の 15-35%に設定した.

## 2.3 踏切局面中の下肢関節の力発揮特性およびパフォーマンス変数

ドロップジャンプにおける身体座標を測定するために, 赤外線カメラ (Vicon MX+250 Hz, Vicon Motion Systems 社製) を用いて, 反射マーカーを添付した身体計測点 12 点 (左右の拇指 MP 関節内側面, 踵, 外果, 腓骨頭, 大転子, 肩峰突起) の 3 次元座標データを収集した. Wells and Winter<sup>24)</sup> の方法を用いて, 身体計測点毎に最適遮断周波数 (20.5-28.25 Hz) を決定し, 4 次の位相ずれのない Butterworth digital filter による平滑化を行った. また, 地面反力を測定するために, フォースプレート 2 台 (9281A ; 9287C, Kistler 社製) を用いた. サンプリング周波数は 1000 Hz とし, 静止座標系 X, Y, Z 方向の力を, 左右脚それぞれ, A/D 変換ボードによってパーソナルコンピュータへ取り込んだ. 静止座標系は, 試技開始時の被験者前方に直行する方向を X 軸, 被験者前方を Y 軸, 鉛直上向きを Z 軸とした. 本研究では矢状面上での分析を行うために, YZ 平面上における座標値とフォースプレートデータを用いて足関節トルクを算出した. 足関節トルクを算出するために, 下肢を足, 膝, および股関節で分割した 2 次元リンクセグメントモデルを構築した. また, Free Body diagram にもとづき, 各部分の近位端に作用するトルクを運動方程式により算出した. 足関節トルクは, 重心と仮定した両大転子中心の最下点を基準とした踏切前半の底屈最大値, 膝関節および股関節トルクは, 重心と仮定した両大転子中心の最下点を基準とした踏切前半の屈曲伸展最大値とした. 身体部分慣性係数およびセグメント重心は, 阿江(1996) の方法を用いた.

ドロップジャンプのパフォーマンスの評価には, DJ-index を用いた (跳躍高/接地時間; 因子ほか, 1993) . すべての試技において鉛直地面反力の波形から滞空時間と接地時間を算出した. 跳躍高は滞空時間と重力加速度を用いて, Asmussen and Bonde-Petersen (1974) が示した自由落下に基づいた公式を用いて算出した.

### 3. データ処理

全ての測定項目は、5回の平均値±標準偏差で示した。トレーニング経過に伴う（pre・post）各測定項目の比較には、preおよびpostの平均値とともに、preに対するpostの各測定項目の変化率を用いた。

### III. 結果

トレーニング経過に伴うドロップジャンプパフォーマンスの結果を表1に示した。その結果、DJ-indexおよび跳躍高はpreと比べてpostで増大する傾向を示した（DJ-index: 15.31%増大, 跳躍高: 14.78%増大）。また、接地時間は短縮する傾向を示した（0.69%短縮）。

表1 トレーニング経過に伴うドロップジャンプパフォーマンスの結果

	Sub.	DJ-index (m/sec)	Contact time (sec)	Jump height (cm)
<b>Pre</b>	A	<b>2.10</b>	0.19	<b>40.22</b>
	B	<b>1.43</b>	0.18	<b>25.75</b>
	C	<b>1.36</b>	0.21	<b>28.33</b>
	Mean	<b>1.63</b>	0.19	<b>31.43</b>
	SD	<b>0.41</b>	0.01	<b>7.72</b>
<b>Post</b>	A	<b>2.30</b>	0.19	<b>43.10</b>
	B	<b>1.64</b>	0.19	<b>30.92</b>
	C	<b>1.71</b>	0.20	<b>34.23</b>
	Mean	<b>1.88</b>	0.19	<b>36.08</b>
	SD	<b>0.37</b>	0.01	<b>6.30</b>
<b>Pre/Post (%)</b>		<b>115.31</b>	99.31	<b>114.78</b>

表2 トレーニング経過に伴う踏切局面中の下肢関節トルクの結果

	Sub.	Peak hip joint torque (Nm/kg)	Peak knee joint torque (Nm/kg)	Peak ankle joint torque (Nm/kg)
<b>Pre</b>	A	4.86	4.80	<b>3.68</b>
	B	5.27	4.79	<b>3.44</b>
	C	9.98	4.77	<b>2.75</b>
	Mean	6.71	4.78	<b>3.29</b>
	SD	2.85	0.01	<b>0.48</b>
<b>Post</b>	A	6.23	4.97	<b>5.52</b>
	B	7.60	4.25	<b>5.28</b>
	C	8.26	5.26	<b>3.19</b>
	Mean	7.37	4.83	<b>4.66</b>
	SD	1.04	0.52	<b>1.28</b>
<b>Pre/Post (%)</b>		109.85	100.89	<b>141.70</b>

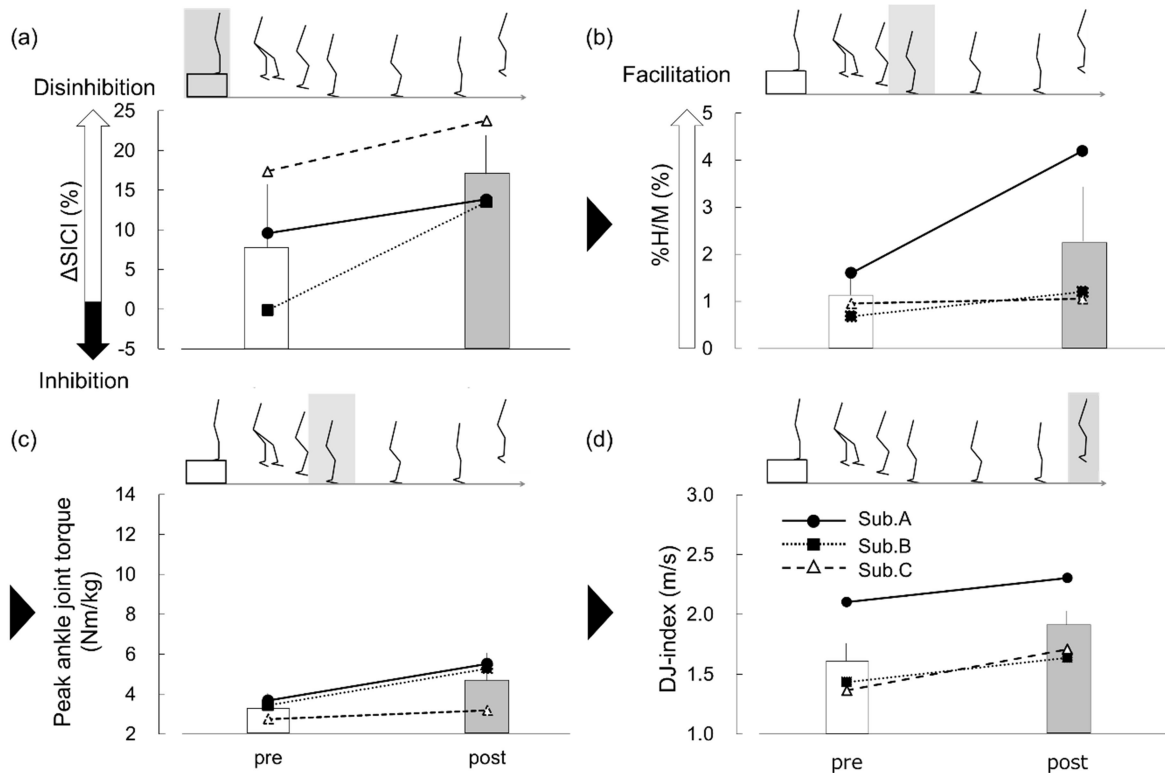


図2 トレーニング経過に伴う各局面で測定した変数の結果. プレセット局面中の脳内状態 (a) , 踏切局面中の伸張反射 (b) , 同局面中の最大足関節トルク (c) , パフォーマンス変数 (d) .

トレーニング経過に伴う踏切局面中の下肢関節トルクの結果を表 2 に示した. その結果, 最大足関節トルクが最も増大する傾向を示し (41.70%), 最大股関節トルク (9.85%), 最大膝関節トルク (0.69%) の順に増大した.

図 2 は, トレーニング経過に伴うプレセット局面中の  $\Delta$ SICI, 踏切局面中の %H/M, 足関節トルクおよび DJ-index の結果を時系列に示した. その結果, プレセット局面中の SICI (図 2a) は, pre と比べて post で 90.44% 増大した. また, 踏切局面中の %H/M (図 2b) は pre と比べて post で 99.31% 増大した. トレーニング前後における踏切局面中の最大足関節トルク (図 2c) および DJ-index (図 2d) は上述した通り増大し, 選手別にみてもすべての選手で増大傾向を示した.

#### IV. 考察

ドロップジャンプのパフォーマンス変数は, DJ-index および跳躍高は増大傾向, 接地時間は短縮傾向を示した (表 1) . 加えて, 下肢 3 関節のトルクをみると, いずれも増大傾向を示し, 特に最大足関節トルクの増大が最も顕著であった (表 2) . これらの結果は, トレーニングの経過に伴い足関節の力発揮能力の改善により短い時間で高い跳躍高を獲得する能力を高めていたことが考えられる. これまでの研究では, ドロップジャンプや連続リバウンドジャンプにおける跳躍高や接地時間と踏切局面中の足関節トルクとの間に関係性が認められていることが報告されている (Yoon et al., 2007) . したがって, 本研究の結果は先行研究の結果を支持するものであり, 下肢の SSC 運動の遂行能力を高めるために足関節における力発揮能力を改善することの重要性を示唆している.

次に、プレセット局面中における脳内状態をみてみると、トレーニングの経過に伴い $\angle$ SICI が高くなる傾向を示した (図 2c) .  $\angle$ SICI は皮質内抑制回路の興奮性を評価する指標であり、値が高くなるほど皮質内抑制回路の興奮性が低下する、いわゆる脱抑制状態になることを意味している。本研究の結果は、トレーニングの経過に伴い主働筋を制御する脱抑制状態が促進された可能性とともにプレセット局面中の脳内状態にはトレーナビリティが存在する可能性を示唆するものである。先行研究では、特異的な筋力トレーニングが対象筋における力発揮中の脱抑制状態を促進させることが報告されている (Weier et al., 2012) . プレセット局面は台上に位置して運動を開始する前の局面である。このことと本研究の結果を踏まえて解釈すると、ドロップジャンプのようなバリスティックな下肢の SSC 運動に対しては、プレセット局面が踏切中に力発揮を円滑にするための準備状態として形成されている可能性を示唆している。

さらに、トレーニングの経過に伴い踏切局面中の $\%H/M$  (図 2b) が増大傾向を示し、反射能力が改善されていた。加えて、上述の通り、本研究では、トレーニング経過に伴い、最大足関節トルクが増大し DJ-index を高くなっていった (図 2c および d) . 先行研究では、プレセット中の $\angle$ SICI と踏切前半の $\%H$ -reflex との間、踏切前半の $\%H$ -reflex と踏切前半の足関節最大底屈トルクとの間、および踏切前半の足関節最大底屈トルクと DJ-index との間に有意な正の相関関係が認められたことが報告されている (吉田ほか, 2016b) . これらの報告から、ドロップジャンプにおけるプレセットからパフォーマンスに至るまでには、まず、高い伸張負荷条件で大きな足関節の力発揮による踏切動作を遂行するために、プレセット中における皮質内抑制回路の興奮性の低下によって踏切前半における伸張反射が促通する。次いで、その伸張反射の促通によって足関節トルクが増大し、これらの時系列的な運動連関によって高いパフォーマンスが獲得されることを示唆している。したがって、本研究の結果は、トレーニングの経過に伴いある局面のみだけではなく、ドロップジャンプのパフォーマンスに獲得に起因する生理学および生体力学的な要因が相互に高まっていた可能性を示唆している。

## V. まとめ

本研究の目的は、トレーニングの経過に伴うドロップジャンプパフォーマンスの変化を、プレセット局面中の脳内状態、踏切局面中の伸張反射および下肢関節の力発揮特性に着目して検討し、プレセット局面におけるトレーナビリティの有無について明らかにすることであった。3名の陸上競技短距離選手を対象者とし、0.6 mからのドロップジャンプを行わせ、プレセット局面中における脳内状態、踏切局面中の伸張反射および下肢関節の力発揮、パフォーマンスに関する変数を算出した。

その結果、トレーニングの経過に伴い DJ-index および跳躍高が増大傾向、接地時間が短縮傾向を示した。また、その際、下肢関節トルクの中でも足関節最大トルクに最も大きな増大傾向を示した。そこで、トレーニング経過に伴うドロップジャンプパフォーマンス向上に伴う脳内状態の変化を見ると、プレセット局面中の脳内状態を評価する $\angle$ SICI が増大傾向を示した。さらに、踏切局面中の伸張反射を評価する $\%H/M$  も増大傾向を示した。

以上のことから、プレセット局面中の脳内状態にはトレーナビリティが存在する可能性とともに、トレーニング経過に伴うドロップジャンプパフォーマンスを効果的に向上されるためには、パフォーマンス獲得に起因する各種要因が相互に影響する必要があることが示唆された。

## 参考文献

- Asmussen E, Bonde-Petersen F. Storage of elastic energy in skeletal muscles in man. *Acta Physiologica Scandinavica* 91: 385-392, 1974.
- Avela J, Santos PM, Komi PV. Effects of differently induced stretch loads on neuromuscular control in drop jump exercises. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 72: 553-562, 1996.
- Bobbert MF. Drop jumping as a training method for jumping ability. *Sports Med* 9: 7-22, 1990.
- 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.
- 吉田拓矢, 丸山敦夫, 荻山 靖, 林 陵平, 関子浩二: 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, *体力科学*, 65: 401-413, 2016a.
- 吉田拓矢, 中宗一郎, 荻山 靖, 林 陵平, 高橋和孝, 関子あまね, 関子浩二: ドロップジャンプにおけるパフォーマンス獲得に至るまでの時系列的な運動連関, *体力科学*, 65: 479-489, 2016b.
- 吉田拓矢, 関子浩二: プライオメトリックトレーニングを効果的に実施するためには?: ドロップジャンプにおける時系列的な運動連関に着目して, *陸上競技研究*, 1: 2-13, 2017.
- 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.
- 阿江通良: 日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数, *J J Sports Sci* 15: 155-162, 1996.
- Wells RP, Winter DA. Assessment of signal and noise in the kinematics of normal, pathological and sporting gaits. In: *Human locomotion 1 (Proceedings of the first biannual conference of the Canadian society of biomechanics)*. pp. 92-93, 1980.
- Yoon S, Tauchi K, Takamatsu K. Effect of Ankle Stiffness during Eccentric Phase in Rebound Jumps on ankle Joint torque at Midpoint. *Int J Sports Med* 28: 66-71, 2007.
- Weier AT, Pearce AJ, Kidgell DJ. Strength training reduces intracortical inhibition. *Acta Physiologica (Oxf)* 206: 109-119, 2012.
- 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.

関子浩二, 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.