

## 磁気共鳴画像 (MRI) 法を用いた骨盤の三次元動作を遂行する骨格筋の究明

吉本隆哉<sup>1</sup>, 安藤良介<sup>2</sup>, 大西貴弘<sup>2</sup>, 杉崎範英<sup>3</sup>, 土江寛裕<sup>4</sup>

<sup>1)</sup> 鹿児島国際大学, <sup>2)</sup> 国立スポーツ科学センター, <sup>3)</sup> 明治学院大学, <sup>4)</sup> 東洋大学

### 1. 緒言

スプリント動作は筋収縮によって関節運動を繰り返すことで実行され, より高いスプリントパフォーマンスを有する選手ほど1歩毎に発揮する関節トルクが大きく, それによって高い推進力を獲得している (Nagahara et al., 2017). つまり, より素早く疾走するためには, その原動力となる筋を効果的・効率的に活動させる必要があり, それらの動作に寄与する下肢筋群を特定し, 改善することが必要不可欠となる.

スプリント動作に関する先行研究を概観すると, 主に矢状面から下肢の運動を定量したものが多く (伊藤ら, 1998 ; Nagahara et al., 2017), 脚全体の後方へのスイング速度が走速度と強い相関関係にあることや, スプリント速度の向上に伴って膝関節角度の変化が小さくなることが報告されている. 加えて, 大腰筋, 大臀筋, 大腿直筋, ハムストリングスが走速度の獲得に重要な役割を担うことが明らかにされている (Sugisaki et al., 2018 ; Ema et al., 2018 ; Miller et al., 2020 ; Takahashi et al., 2021 ; Tottori et al., 2021).

近年では, ジャンプやスプリント走における骨盤の運動に注目が集まっている (Nagahara et al., 2018 ; Sado et al., 2020abc, 2023 ; 太田ら, 2022). スプリント走では, 骨盤が三次元的に可動し, 加速局面では遊脚側の骨盤の挙上動作が大きいほど地面反力の推進成分および鉛直成分に大きな力積を獲得できること, 中間疾走局面では遊脚側への腰仙関節捻転トルクが接地前から遊脚の後方スイング速度を高めることに寄与していることが報告されている (太田ら, 2022). 以上のことは, スプリントパフォーマンスに骨盤の運動が重要な役割を担うことを示唆している.

これまで, 骨盤の運動に関与する筋として, 中臀筋や小臀筋, 内転筋群などが挙げられている (Floyd, 2020). これらは主に筋の付着部と牽引する方向から類推したものであると考えられ, 実際に骨盤を動かし, その際にいずれの筋の活動水準が高まるのかを定量的に評価した研究は見当たらない. 骨盤の三次元的な運動に伴い, いずれの筋の活動量が高くなるのかを特定することができれば, 骨盤の動作改善に役立つ有用な資料になると考えられる.

近年, 表面筋電図法では評価できない深層の筋活動水準を求める手法として, MRI 法による T2 強調画像が用いられている. T2 強調画像から算出される T2 値は, 筋収縮に伴う代謝物を反映しているとされ, 筋の動員度と比例関係にあることが知られており (Prior et al., 2001), レジスタンス運動やスプリント運動における下肢筋群の筋活動水準が定量されている (Bourne et al., 2017, 2021 ; Yoshimoto et al., 2022).

本研究では, 上記の手法を用いて, 近年スプリント運動の決定因子として注目されている骨盤の三次元動作を取り上げ, MRI 法による T2 強調画像を用いてその動作を遂行する骨格筋を究明することを目的とする.

## 2. 方法

### 2.1 対象者

本研究では、大学男子スプリンター6名（年齢  $19.3 \pm 0.5$  歳，身長  $172.6 \pm 2.1$  cm，体重  $67.3 \pm 4.2$  kg）を対象とした。いずれの対象者も上肢あるいは下肢に障害を有しておらず，筋機能に影響を与えるような薬を服用していなかった。本実験は，ヘルシンキ宣言における科学のおよび倫理的規範に準じて行うこととし，事前に新潟食料農業大学倫理委員会の承認を得た（15-231204）。測定の実施に先立ち，対象者には，本研究の目的および実験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。

### 2.2 T2 値の測定および分析

骨盤部の T2 値の測定には，MRI 法を用いた。3.0T の MRI 装置（Vantage Galan 3T, Canon, Japan）により，被検者の脊椎が撮像されるように体幹部の前額面，矢状面および水平面画像を取得し，その後転子点を中心として体幹下部，骨盤部，大腿上部のマルチエコーを取得した。エコータイムは，16～90 までの 16ms 毎に 5 エコーを取得した。取得した T2 画像を解析用パソコンに転送し，解析ソフト（ImageJ 1.52v, Wayne Rasband, National Institutes of Health, USA）を用いてファーストエコーを除いた 4 エコーの画像を使用して T2 画像を作成した。各運動前後の T2 画像から筋の形状に沿った Region of Interest（ROI）をスライス毎に作成し，2 枚以上のスライスを用いて腹斜筋，外側腹筋群（内腹斜筋，外腹斜筋，腹横筋），大腰筋，腸骨筋，中・小臀筋，大臀筋，梨状筋，大腿筋膜張筋，縫工筋，大腿直筋，外側・中間・内側広筋，双子筋，内閉鎖筋，外閉鎖筋，大腿方形筋，恥骨筋，内転筋群（短内転筋，長内転筋，大内転筋）の T2 値を求めた。なお，腹直筋と脊柱起立筋は画像から T2 値の算出が困難な対象者が存在したため，分析対象から除外した。運動後の T2 値を運動前の T2 値で除することで変化率を求めた。なお，撮像はスパインマトリクスコイルとボディマトリクスコイルで被検者を挟んで実施した。撮像シーケンスはスピンエコー法とし，撮像条件は繰り返し時間 2500ms，撮像領域は  $400 \times 300$ ，マトリクス  $256 \times 256$ ，フリップ角（FA）180deg，積算 1 回，スライス厚は 10mm とした。

### 2.3 骨盤の三次元運動

本研究では，骨盤の三次元運動として土江（2023）を参考に，シングルホップを採用した（Fig 1）。この動きは，片脚で前方向に跳躍を行う運動であった。すべての被検者において，支持脚を右脚，遊脚を左脚に規定した。なお，骨盤の三次元動作がみられない運動として，ダブルホップについても検討した（Fig 2）。各運動は，1m 毎に 20 台のミニハードルを設置し，それらを跳び越える運動を 5 往復（計 10 本）実施した。シングルホップでは，支持期において支持脚側の骨盤を下方，遊脚側の骨盤を上方の側方傾斜をできるだけ強調し，骨盤と脚で地面を押すように教示した（Fig 3）。各運動はランダムに実施し，いずれかの運動を実施した後の休息は 24 時間以上設け，対象者に筋痛が残っている場合は消失するまで間隔をあけることとした。



Fig 1. Single hop



Fig 2. Double hop

## 2.4 統計処理

測定値はすべて平均値±標準偏差で示した。運動前後の T2 値の変化率の比較（運動間，左右間）には 2 要因の分散分析（対応あり×対応あり）を用いて，主効果および交互作用を確認した。交互作用が有意でなく，主効果のみが有意であった場合には Bonferroni 法による多重比較を行った。有意な交互作用が認められた場合には，要因毎に単純主効果の検定を実施した。すべての統計処理は，統計処理ソフト（IBM SPSS Statistics 26，IBM Japan 製）を用いて行い，いずれの場合も危険率 5%未満をもって有意とした。

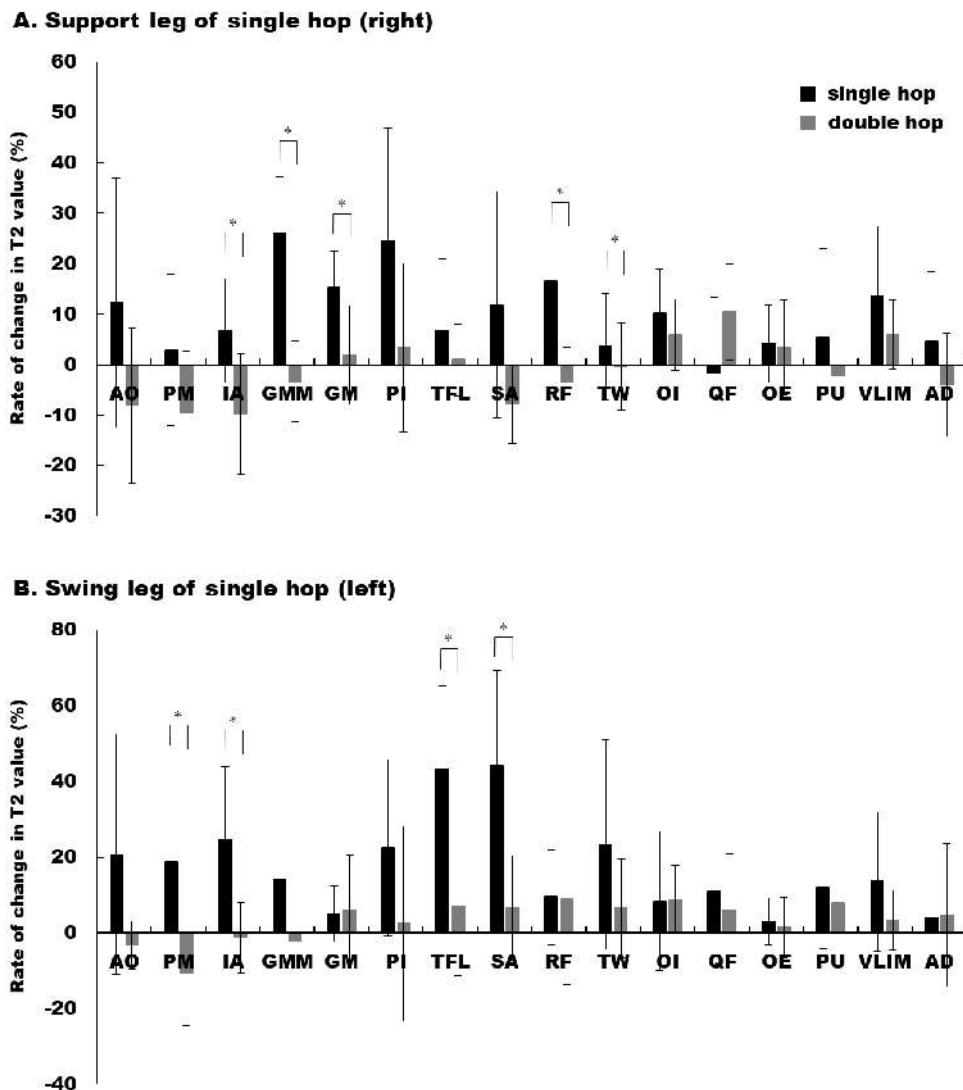


Fig 3. Lateral tilt of the pelvis

### 3. 結果

Fig 4 に、シングルホップとダブルホップにおける運動前後の T2 値の変化率を示す。ダブルホップと比較して、シングルホップにおける支持脚側の腸骨筋、中・小臀筋、大臀筋、大腿直筋および双子筋、遊脚の大腰筋、腸骨筋、大腿筋膜張筋および縫工筋において、T2 値の変化率が有意に高かった。

Fig 5 に、シングルホップにおける支持脚と遊脚の T2 値の変化率を示す。シングルホップにおける支持脚と遊脚の T2 値の変化率は、遊脚側が支持脚側と比較して中・小臀筋および大臀筋において有意に低く、大腰筋、腸骨筋、大腿筋膜張筋および縫工筋において有意に高かった。ダブルホップでは、いずれの筋も支持脚と遊脚の T2 値の変化率に有意な差が認められなかった。



\*  $P < 0.05$

Fig 4. Rate of change of T2 values in single and double hops

AO, abdominal obliques; PM, psoas major; IA, iliac; GMM, gluteus medius/gluteus minimus; GM, gluteus maximus; PI, piriformis; TFL, tensor fasciae latae; SA, sartorius; RF, rectus femoris; TW, twins; OI, obturator internus; QF, quadratus femoris; OE, obturator externus; PU, pubic; VLIM, vastus lateralis/vastus intermedius/vastus medialis; AD, adductor

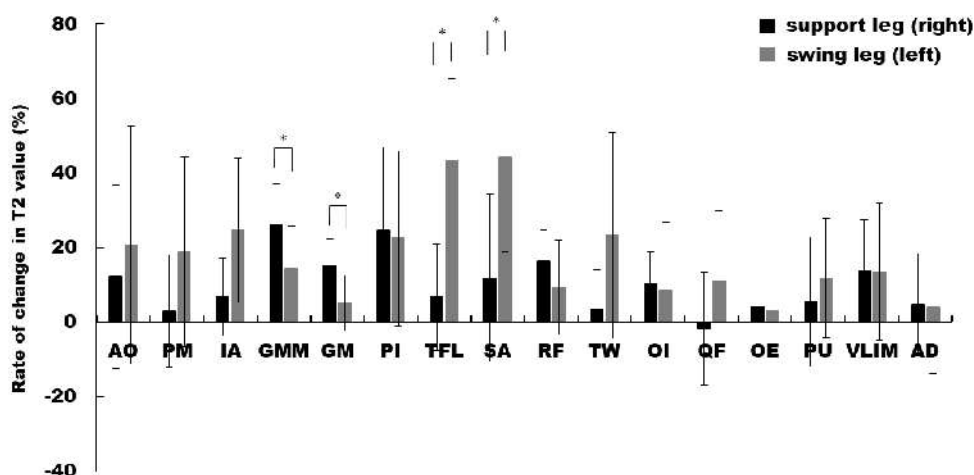
\*  $P < 0.05$ 

Fig 5. Rate of change in T2 values for support leg and swing leg in a single hop

#### 4. 考察

本研究では、MRI 法による T2 強調画像を用いて、骨盤の三次元動作を遂行する骨格筋を特定することとした。これまで、運動後の T2 値の変化は、30 分程度残存することが報告されている (Fisher et al., 1990) が、本研究では、各運動の終了後、2 分以内に T2 強調画像の撮像を開始し、10 分以内に撮像を終了した。このことから、本研究では各筋の T2 値の変化を正確に検証できたといえる。

本研究の結果、シングルホップでは支持脚側における腸骨筋、中・小臀筋、大臀筋、大腿直筋および双子筋、遊脚側における大腰筋、腸骨筋、大腿筋膜張筋および縫工筋においてダブルホップと比較して有意に高い T2 値の変化率を示した。また、シングルホップにおける T2 値の変化率は、遊脚側が支持脚側と比較して大臀筋および中・小臀筋が有意に低く、大腰筋、腸骨筋、大腿筋膜張筋および縫工筋が有意に高かった。以上のことから、骨盤の三次元動作の遂行に支持脚側の臀筋群と遊脚側の大腰筋、腸骨筋、大腿筋膜張筋および縫工筋が貢献することが示唆される。

本研究では、シングルホップにおける支持脚側の大臀筋において高い T2 値がみられた。臀筋群の 1 つである大臀筋は主として股関節の伸展および外旋に関与する筋であるとされる (Floyd, 2020)。シングルホップは、滞空期後半から支持期後半にかけて股関節の伸展がみられ、前方向に身体を移動させる運動であることから、大臀筋の力発揮が直接的に影響すると考えられる。また、ダブルホップにおいても股関節を伸展させるものの、股関節の内外旋はみられず、加えて両脚で関節運動を実施することから、シングルホップと比較して大臀筋の筋活動が小さくなったと推察される。以上のような要因によって、ダブルホップではシングルホップと比較して大臀筋の T2 値の変化率が小さかったものと推察される。支持脚における中および小臀筋においても、ダブルホップと比較してシングルホップで有意に高い T2 値がみられ、遊脚側と比較しても高値であった。中および小臀筋は股関節外転の際に主動筋となる (Floyd, 2020) が、接地時において支持脚の中および小臀筋を収縮させることで、遊脚側の骨盤を上方、支持脚側の骨盤が下方になる側方傾斜がみられることが予測される。事実、本研究におけるシングルホップでは、支持期中に骨盤の側方傾斜がみられている (Fig3)。したがって、シングルホップにおいて骨盤の三次元動作がみられた要因として、支持脚における大臀筋を中心とする股関節伸展および外旋と、中および小臀筋に

よる骨盤の側方傾斜が関与している可能性がある。

シングルホップにおける遊脚では、ダブルホップと比較して大腰筋、腸骨筋、大腿筋膜張筋および縫工筋に高い T2 値の増大がみられた。大腰筋および腸骨筋は、股関節屈曲の際に主動筋の役割を果たし、縫工筋は股関節の屈曲に加え、膝関節の屈曲と股関節の外旋に作用する (Floyd, 2020)。また、大腿筋膜張筋は股関節の外転に関与する筋となる。シングルホップにおける遊脚は、支持脚の接地瞬間から強く股関節を屈曲し、脚を引き上げ、遊脚側の骨盤を上方として側方傾斜する動きである。本研究では、特に遊脚側の大腰筋と縫工筋の T2 値に大きな変化率がみられた (Fig 5) ことから、骨盤の動きにおいて上記に示した 2 つの筋が特に強く活動している可能性がある。

本研究の限界として、シングルホップおよびダブルホップにおける動作を検証していないことから、2 つの動きの違いが筋活動水準に与える影響を詳細に分析することができなかった。加えて、骨盤部を中心に撮像範囲を設定したため、磁場の影響から腹直筋および脊柱起立筋の T2 を算出できず、骨盤の三次元動作の遂行に関与するであろう大腿および下腿の筋も定量することができなかった。今後、2 つの動きにおいて動作分析を実行するとともに、被検者および撮像範囲を追加することで、より詳細な検証を実施する必要がある。加えて、本研究では骨盤の三次元動作としてシングルホップを採用したが、骨盤の側方傾斜、内外旋をそれぞれ単独で行った際に、いずれの筋が活動するのかを明らかにすることが求められる。

## 5. 結論

本研究では、MRI 法による T2 強調画像を用いて、骨盤の三次元動作を遂行する骨格筋を究明することを目的とした。骨盤の三次元動作がみられる運動としてシングルホップを、三次元動作のみ見られない運動としてダブルホップを採用し、2 つの動作における運動前後の T2 値の変化率を求めた。その結果、T2 値の変化率は、ダブルホップと比較してシングルホップにおいて支持脚側の腸骨筋、中・小臀筋、大臀筋、大腿直筋および双子筋で、遊脚側の大腰筋、腸骨筋、大腿筋膜張筋および縫工筋で有意に高い値を示した。加えて、シングルホップの T2 値の変化率は、支持脚側と比較して遊脚側の臀筋群が有意に低く、大腰筋、腸骨筋、大腿筋膜張筋および縫工筋が有意に高かった。以上のことから、骨盤の三次元動作の遂行には、支持脚側の臀筋群と遊脚側の大腰筋、腸骨筋、大腿筋膜張筋および縫工筋が関与することが示唆された。

## 謝辞

本研究の実施にあたって、新潟食料農業大学の山中亮准教授、新潟医療福祉大学の児玉直樹教授、山代幸哉准教授、佐藤大輔教授に多大なるご助力を賜りました。厚く御礼申し上げます。また、公益財団法人ミズノスポーツ振興財団の皆様のご支援をいただくことで本研究を行うことができました。格別なご配慮をいただき、心より感謝申し上げます。

## 引用文献

- Bourne, M. N., Duhig, S. J., Timmins, R. G., Williams, M. D., Opar, D. A., Al Najjar, A., Kerr, G. K., Shield, A. J. (2017) Impact of the Nordic hamstring and hip extension exercises on hamstring architecture and morphology: implications for injury prevention. *Br J Sports Med.* 51(5): 469-477.
- Bourne, M. N., Pollard, C., Messer, D., Timmins, R. G., Opar, D. A., Williams, M. D., Shield, A. J. (2021)

- Hamstring and gluteal activation during high-speed overground running: Impact of prior strain injury. *J Sports Sci.* 39(18): 2073-2079.
- Ema, R., Sakaguchi, M., Kawakami, Y. (2018) Thigh and Psoas Major Muscularity and Its Relation to Running Mechanics in Sprinters. *Med Sci Sports Exerc.* 50(10): 2085-2091.
- Fisher, M. J., Meyer, R. A., Adams, G. R., Foley, J. M., Potchen, E. J. (1990) Direct relationship between proton T2 and exercise intensity in skeletal muscle MR images. *Invest Radiol.* 25(5): 480-485.
- Floyd, R. T. (2020) Manual of structural kinesiology. McGraw-Hill Education – Europe. 21: 227-274.
- 伊藤章, 市川博啓, 斉藤昌久, 佐川和則, 伊藤道郎, 小林寛道 (1998) 100m 中間疾走局面における疾走動作と速度との関係. 体育学研究. 43 : 260-273.
- Miller, R., Balshaw, T. G., Massey, G. J., Maeo, S., Lanza, M. B., Johnston, M., Allen, S. J., Folland, J. P. (2020) The Muscle Morphology of Elite Sprint Running. *Med Sci Sports Exerc.* 53(4): 804-815.
- Nagahara, R., Zushi, K. (2017) Development of maximal speed sprinting performance with changes in vertical, leg and joint stiffness. *J Sports Med Phys Fitness.* 57(12): 1572-1578.
- Nagahara, R., Matsubayashi, T., Matsuo, A., Zushi, K. (2018) Kinematics of the thorax and pelvis during accelerated sprinting. *J Sports Med Phys Fitness.* 58(9): 1253-1263.
- 太田和希, 吉田拓矢, 小野響也, 前村公彦, 谷川聡 (2022) スプリント走の加速局面と中間疾走局面における骨盤挙動と地面反力および脚のスイング速度との関係. 体育学研究. 67: 793-808.
- Prior, B. M., Ploutz-Snyder, L. L., Cooper, T. G., Meyer, R. A. (2001) Fiber type and metabolic dependence of T2 increases in stimulated rat muscles. *J Appl Physiol.* 90(2): 615-623.
- Sado, N., Yoshioka, S., Fukashiro, S. (2020a) Free-leg side elevation of pelvis in single-leg jump is a substantial advantage over double-leg jump for jumping height generation. *J Biomech.* 104: 109751.
- Sado, N., Yoshioka, S., Fukashiro, S. (2020b) Non-extension movements inducing over half the mechanical energy directly contributing to jumping height in human running single-leg jump. *J Biomech.* 113: 110082.
- Sado, N., Yoshioka, S., Fukashiro, S. (2020c) Three-dimensional kinetic function of the lumbo-pelvic-hip complex during block start. *PLoS One.* 15(3): e0230145.
- Sado, N., Yoshioka, S., Fukashiro, S. (2023) Pelvic elevation induces vertical kinetic energy without losing horizontal energy during running single-leg jump for distance. *Eur J Sport Sci.* 23(7): 1146-1154.
- Sugisaki, N., Kobayashi, K., Tsuchie, H., Kanehisa, H. (2018) Associations Between Individual Lower-Limb Muscle Volumes and 100-m Sprint Time in Male Sprinters. *Int J Sports Physiol Perform.* 13(2): 214-219.
- Takahashi, K., Kamibayashi, K., Wakahara, T. (2021) Muscle size of individual hip extensors in sprint runners: Its relation to spatiotemporal variables and sprint velocity during maximal velocity sprinting. *PLoS One.* 16(4): e0249670.
- 土江寛裕 (2023) 陸上競技入門ブック, スプリント・リレー (第2版). ベースボール・マガジン社: 東京, pp. 94.
- Tottori, N., Suga, T., Miyake, Y., Tsuchikane, R., Tanaka, T., Terada, M., Otsuka, M., Nagao, A., Fujita, S., Isaka, T. (2021) Trunk and lower limb muscularity in sprinters: what are the specific muscles for superior sprint performance? *BMC Research Notes*, 14(1), 74.
- Yoshimoto, T., Chiba, Y., Ohnuma, H., Yanaka, T., & Sugisaki, N. (2022) Measuring Muscle Activity in Sprinters Using T2-Weighted Magnetic Resonance Imaging. *Int J Sports Physiol Perform.* 17(5): 774-779.