

## 小学校5, 6年生男子児童における短距離走の回復脚の動作と疾走速度との関係: 回復脚の積極的な回復と膝関節の屈曲はどちらを優先して習得すべきか

関 慶太郎<sup>1)</sup> 鈴木 一成<sup>2)</sup> 山元 康平<sup>1),3)</sup> 加藤 彰浩<sup>4)</sup>  
 中野 美沙<sup>5)</sup> 青山 清英<sup>6)</sup> 尾懸 貢<sup>5)</sup> 木越 清信<sup>5)</sup>

Keitaro Seki<sup>1</sup>, Kazunari Suzuki<sup>2</sup>, Kohei Yamamoto<sup>1,3</sup>, Akihiro Kato<sup>4</sup>, Misa Nakano<sup>5</sup>, Kiyohide Aoyama<sup>6</sup>, Mitsugi Ogata<sup>5</sup> and Kiyonobu Kigoshi<sup>5</sup>: A study of leg recovery motion and sprint speed in male elementary school students: which motion should be learned, forward swing of the thigh or flexion of the knee in the recovery leg. *Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci.* 61: 743-753, December, 2016

**Abstract** : Although sprint running has been studied by many investigators, the running techniques taught by a coach have not been researched in detail. The purpose of the present study was to clarify how sprint running is taught to male elementary school students by a coach, focusing on how the motion of the recovery leg affects that of the support leg and running velocity, and whether the forward swing of the thigh or flexion of the knee joint of the recovery leg is most important. Thirty-four 5th and 6th grade elementary school children performed 50-m sprints, and their motions were recorded using a video camera (60 fps). The step length, step frequency, running velocity, relative velocity of the center of mass, and the angles and angular velocity of the thigh, leg and knee were calculated. The main results were as follows:

1. We found a significant positive correlation between running velocity and the relative velocity of the recovery leg around the support phase.
2. Subsequently to maximize the angular velocity of thigh recovery, a minimum angle of the recovery knee was obtained. These variables showed a significant positive correlation.
3. The time instant to reach the maximal forward swing velocity of the recovery leg was similar to the time instant to reach the maximal backward swing velocity of the support leg. When recovery leg and support leg velocity reached maximal, both leg were intersected.

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  
 2) 愛知教育大学教育学部  
〒448-8542 愛知県刈谷市井ヶ谷町広沢 1  
 3) 日本学術振興会特別研究員 DC  
〒102-0083 東京都千代田区麹町 5-3-1  
 4) 青山学院大学教育人間科学部  
〒150-8366 東京都渋谷区渋谷 4-4-25  
 5) 筑波大学体育系  
〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1  
 6) 日本大学文理学部  
〒156-8550 東京都世田谷区桜上水 3-25-40

連絡先 関 慶太郎

1) *Graduate School of Comprehensive Human Science, University of Tsukuba*  
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574  
 2) *Faculty of Education, Aichi University of Education*  
1 Hirosawa, Igaya-cho, Kariya, Aichi 448-8542  
 3) *Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science*  
5-3-1 Kojimachi, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0083  
 4) *College of Education, Psychology and Human Studies, Aoyama Gakuin University*  
4-4-25 Shibuya, Shibuya-ku, Tokyo 150-8366  
 5) *Faculty of Health and Sport Science, University of Tsukuba*  
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574  
 6) *College of Humanities and Science, Nihon University*  
3-25-40 Sakurajosui, Setagaya-ku, Tokyo 156-8550  
 Corresponding author k.seki.604@gmail.com

These results suggest that a coach should teach sprinters to swing the recovery leg forward prior to flexion of the recovery knee.

**Key words** : elementary school children, joint force, sprint motion

キーワード : 小学生, 関節力, 疾走動作

## I. 緒 言

これまでに短距離走の動作に関する研究は多く行われており, その対象は小学生から世界一流スプリンターまで多岐にわたる(阿江, 2001; 遠藤ほか, 2008; 伊藤ほか, 1998; 加藤ほか, 2001; 矢田ほか, 2012). これまでに行われてきた研究を概観すると, 成人スプリンターでは疾走速度と支持脚全体の後方スウィング速度との間に有意な正の相関関係が認められていることや, 疾走速度と地面に接していない脚(回復脚)の腿上げ角速度との間に有意な正の相関関係が認められることが報告されている(伊藤ほか, 1998). また, 世界一流スプリンターでは, 離地時から大きな股関節屈曲トルクを發揮して, 回復脚の前方への引き付けを早めていることが報告されている(矢田ほか, 2012). 一方, 小学生の疾走動作については, 加藤ほか(2001)が疾走能力の高い児童の特徴として, 回復脚の腿上げ角度が高いことや回復脚の膝関節がより屈曲していること, そして, 回復脚の腿上げ角速度と膝関節屈曲角速度が高いことを報告している. このように, これまでに短距離走において高い疾走速度を獲得するための動作について多くの有益な知見が得られてきた. 他方で, 疾走速度に影響を及ぼすとされる技術的な要因は相当数認められており, これが指導現場での混乱を招くことも危惧される. 特に, 小学生を対象とした場合には限られた授業時間内で疾走動作の改善を目指すことが求められるため, 様々な動作間の関係を明らかにすることで, 優先して習得すべき技術を明らかにする試みも必要であろう.

これまでに報告されてきた疾走速度に影響を及ぼす動作は, 大きく分けると支持脚に関するものと回復脚に関するものに分けることができる. 地

面との接点が生ずる支持脚であることから, 支持脚の動作が疾走速度に直接的に影響していることは言うまでもない. しかし, 支持脚に要する時間は約0.1秒と非常に短く, 小学生に支持脚の動作を意識させることは困難であると考えられる. 一方で, 走運動はサイクリックな運動であることから回復脚の動作が支持脚に影響を与えている可能性は否定できず, 木越ほか(2015)は回復脚の動作が疾走速度に影響を及ぼす可能性を指摘している. このことを考慮すると, 回復脚に着目して優先して習得すべき技術を明らかにすることが適切であると考えられる.

このような研究を基にした短距離走の技術改善のための取り組みの1つとして, 木越ほか(2012)は小学校高学年の児童を対象とした, 回復脚の膝関節をより屈曲させることを意識づけるための補助具を開発・提案している. そして, この補助具が回復脚膝関節を屈曲させる疾走動作の習得に有効な手段である可能性を示唆しているが, 疾走能力に劣る被験者にとっては有効であったことを報告している(木越ほか, 2012). このように補助具の効果にかたよりがみられるのは, この補助具が疾走動作の力学的メカニズムに合致していないためであると考えられる. 一方で, 疾走における回復脚膝関節の屈曲は, 大腿部の積極的な前方へのスウィングによって結果的に引き起こされる可能性も考えられ, 志賀ほか(2004)は, 回復脚の膝関節角度と大腿部の前方スウィング速度との間に有意な相関関係が認められたことを報告している. もし, 疾走における回復脚膝関節の屈曲が, 大腿部の積極的な前方へのスウィングによって結果的に引き起こされるのであれば, 疾走の指導では, 回復脚の膝関節屈曲よりも大腿部の積極的な回復を目指す必要がある. しかし, これまでに回復脚の膝関節角度と大腿部の前方スウィング速度との間に有意な相関関係が認められ

た理由については言及されていないことから、回復脚膝関節の屈曲は、大腿部の積極的な前方スウィングによって結果的に引き起こされるものと断定することも困難である。

このように、回復脚における大腿部の屈曲角速度と膝関節の屈曲角速度との関係をはじめ、各動作間の関係性についてはこれまで検討されておらず、これが短距離疾走の指導を混乱させる原因の1つと考えられる。動作間の関係を明らかにするためには、平均値や最大値などの変数間の代表関係や相関関係のみならず、各変数間のピーク値の現れるタイミング等についても検討する必要がある。このようなことを検討することは、これまでの研究で得られた知見を整理し、疾走の指導に関する新たな示唆を得ることに繋がると考えられる。そこで、本研究では小学生の疾走における回復脚の動作と疾走速度との関係を明らかにし、各動作間の関係を検討することで、疾走の指導の際に回復脚の積極的な回復と膝関節の屈曲はどちらを優先して習得すべきかを明らかにすることを目的とした。

## II. 方 法

### 1. 被験者

被験者は小学5、6年生の男子児童34名とした(身長:  $1.43 \pm 0.06$  m; 体重:  $37.6 \pm 8.1$  kg)。なお、計測に先立って研究の目的、方法、実験に伴う安全性に関して学校長および学級担任に十分な説明を行った後、児童およびその保護者から実験参加の同意を得た。

### 2. VTR 撮影およびデータ処理

小学校の土グラウンドにおいて50 m 走の測定を行った。スタートから35 m 地点の側方にVTR カメラ(Sony 社製, DCR-VX2100, 露出時間  $1/1000$  sec)を設置し、疾走動作を60 fpsでパニング撮影した。また、実長換算するために30 m から40 m 地点の間に2 m 間隔で較正マークを置いた。

VTR 映像をもとに30—40 m 地点において1

サイクル(2歩)の疾走動作について、身体23点と較正マーク4点をFrame-DIAS IV(ディ・ケイ・エイチ社製)を用いてデジタイズした。デジタイズによって得られた身体分析点の二次元座標値を較正マークの座標値からMatlab(MathWorks社製)にて作成されたプログラムを用いて実長換算した。実長換算した座標値は、分析点の座標成分ごとにWells and Winter(1980)の方法に基づいて最適遮断周波数を決定し(2.4—6.0 Hz), Butterworth Low-pass Digital Filterを用いて平滑化した。

### 3. 算出項目および算出方法

平滑化したデータから、身体を左右の手部、前腕、上腕、足部、下腿および大腿、そして体幹および頭部の14の部分からなるリンクセグメントモデルを作成し、回復脚の大腿角度、膝関節角度、そして支持脚の大腿角度、脚角度を算出した。大腿角度は大転子と膝関節を結んだ線分と大転子から伸ばした水平線のなす角とした。膝関節角度は大転子と膝関節を結んだ線分と膝関節と外果を結んだ線分のなす角とした。脚角度は大転子と拇指球を結んだ線分と大転子から伸ばした水平線のなす角とした。なお、脚セグメントは一般的に大転子と足関節を結んだ線分として定義されるが、脚のスウィングは足部を介して地面との接触によって走速度に影響すると考えられ、支持脚が走速度に与える影響を総合的に評価するために本研究では、大転子と地面との接点である拇指球を結んだ線分を脚セグメントとして定義した。また、それぞれの角度定義はFig. 1に示した。そして、大腿角度、膝関節角度、脚角度を時間微分したものをそれぞれ大腿角速度、膝関節角速度、脚スウィング速度(脚全体の角速度)とした。

身体重心は横井ほか(1986)、横井(1993)の身体部分慣性係数を用いて算出した。回復脚重心は回復脚の大腿、下腿、足の合成重心とした。回復脚重心相対速度は、回復脚重心の水平速度から身体重心の水平速度を減ずることで求めた。なお、走運動は水平方向に移動する運動であり、鉛直方向の運動は水平方向と比較して極めて小さい

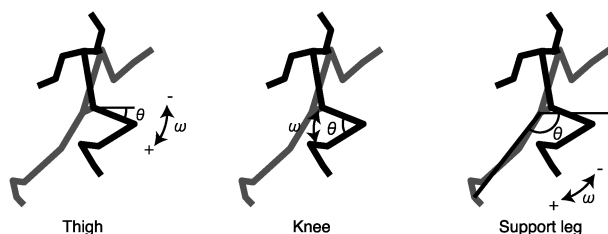


Fig. 1 Definition of angle and angular velocity

ものであることから本研究では水平速度に限定した。

ステップ長は1サイクル（一方の足が接地してから離地し、再び同じ足が接地するまで）で身体重心の進んだ距離の2等分とし、ステップ頻度は1サイクルに要した時間の2等分の逆数とした。また、疾走速度はステップ長とステップ頻度の積として算出した。

#### 4. 動作の局面分けおよびデータの規格化

回復脚として分析する脚を左脚とした場合、左足の離地から右足の接地までを回復期前半、右足の接地から離地までを支持期、右足の離地から左足の接地までを回復期後半として3つの局面に分け、それぞれを100%に規格化した。

#### 5. 統計処理

値はすべて平均値±標準偏差で示した。項目間の相関関係を検討するためにPearsonの積率相関係数を用いた。また、規格化したデータについては、10%ごとの平均値と疾走速度の間の相関関係を同様の方法で検討した。なお、有意性は危険率5%未満で判定した。

### Ⅲ. 結 果

Table 1は、各測定項目の平均値と標準偏差、および各測定項目と疾走速度との間の相関係数を示したものである。疾走速度は $5.75 \pm 0.53$  m/s、ステップ長は $1.27 \pm 0.13$  mを示した。回復脚について、支持期中の回復脚重心相対速度の最大値は $2.53 \pm 0.22$  m/s、回復脚膝関節角度の最小値

Table 1 Results of selected parameters and correlation coefficient between selected parameters and running velocity

	Mean ± SD	Correlation
Running velocity (m/s)	$5.75 \pm 0.53$	
Step length (m)	$1.27 \pm 0.13$	0.84***
Step frequency (Hz)	$4.55 \pm 0.27$	0.18
Maximal thigh lift angle (deg)	$29.34 \pm 5.83$	-0.45**
Angular velocity of support leg (deg/s)	$450.2 \pm 44.5$	0.78***
Angular velocity of support thigh (deg/s)	$448.3 \pm 59.7$	0.64***
Minimal angle of recovery knee (deg)	$44.30 \pm 8.90$	-0.48**
Minimal angular velocity of recovery thigh (deg/s)	$-711.9 \pm 80.0$	-0.23
Maximal relative velocity of recovery leg (m/s)	$2.53 \pm 0.22$	0.87***

p < 0.01: \*\*; p < 0.001: \*\*\*

（屈曲の最大値）は $44.30 \pm 8.90$  degを示した。また、支持脚について、支持脚全体の後方スウィング速度の平均値は $450.2 \pm 44.5$  deg/s、支持脚大腿角速度の平均値は $448.3 \pm 59.7$  deg/sを示した。次に、疾走速度と各測定項目との関係についてみると、疾走速度とステップ長との間（ $r = 0.84$ ,  $p < 0.001$ : Table 1）、および疾走速度と回復脚重心相対速度の最大値との間（ $r = 0.87$ ,  $p < 0.001$ : Table 1）に有意な正の相関関係が認められた。また、疾走速度と回復脚膝関節最小角度との間（ $r = -0.48$ ,  $p < 0.01$ : Table 1）、および疾走速度と腿上げ角度との間（ $r = 0.45$ ,  $p < 0.01$ : Table 1）に有意な負の相関関係が認められた。さらに、疾走速度と支持脚全体の後方スウィング速度との間（ $r = 0.78$ ,  $p < 0.001$ : Table

1), および疾走速度と支持脚大腿角速度との間 ( $r=0.64$ ,  $p<0.001$ : Table 1) に有意な正の相関関係が認められた。

Fig. 2 は, 回復脚重心相対速度の変化, およびそれぞれの区間における回復脚重心相対速度と疾走速度との相関関係を示したものである。回復脚重心相対速度は, 回復期前半の30%時点で回復脚重心相対速度は負から正に転じ, 前方への移動を開始し, 支持期中に前方移動速度のピークを迎える傾向が認められた (140%時点)。その後, 接地 (300%時点) に向かって減少し, 回復期後半の中盤 (260%時点) で負に転じる傾向が認められた。次に, 疾走速度と10%ごとの回復脚重心相対速度との関係を検討した結果, 回復期前半の序盤 (0—40%時点) では両者の間に有意な負の相関関係が認められ, 支持期前後 (80—250%時点) では両者の間に有意な正の相関関係が認められた。

Fig. 3 は, 回復脚の大腿角速度の変化, およびそれぞれの区間における回復脚の大腿角速度と疾走速度との相関関係を示したものである。回復脚の大腿角速度は回復脚が離地した後, 回復期前半の序盤 (30%時点) で正から負に転じ, 前方ス

ウィングを開始する傾向が認められた。その後, 支持期中に前方スウィングのピークを迎え, 次の接地に向かって増加していき, 回復期後半の中盤 (240%時点) で角速度が負から正に転じる傾向が認められた。なお, 前方スウィングのピークは  $142.8 \pm 11.8\%$  時点, 大腿角速度が負から正に転じる (腿上げ角度の最大値) 時刻は  $222.9 \pm 14.0\%$  時点であった。次に, 疾走速度と10%ごとの回復脚の大腿角速度との関係を検討した結果, 両者の間には回復期前半の序盤 (0—30%時点) において有意な正の相関関係が認められた。さらに, 支持期前後 (90—230%時点) において疾走速度と回復脚の大腿角速度との間に有意な負の相関関係が多く認められた。

Fig. 4 は, 回復脚の膝関節角度の変化, およびそれぞれの区間における回復脚の膝関節角度と疾走速度との相関関係を示したものである。回復脚の膝関節角度は, 回復脚が離地した後, 160%時点に向かって屈曲を続け, 160%時点で最大屈曲を迎えた後, 次の接地に向かって伸展していく傾向が認められた。なお, 膝関節の最大屈曲は  $155.8 \pm 8.4\%$  時点で現れた。次に, 疾走速度と10%ごとの回復脚の膝関節角度との関係を検討

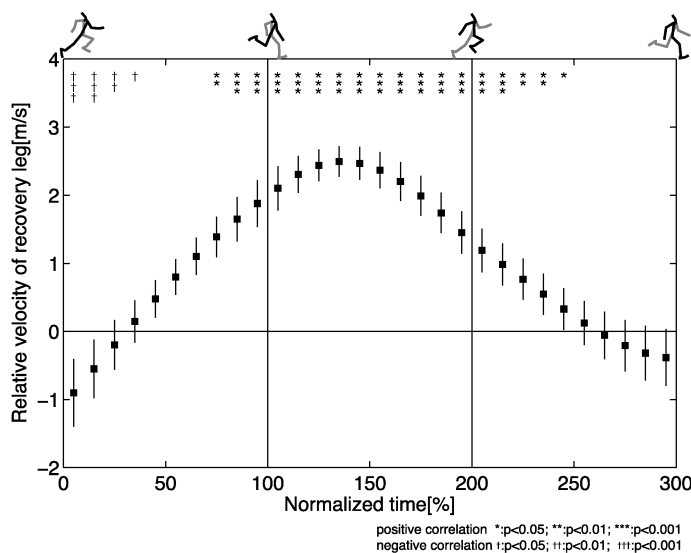
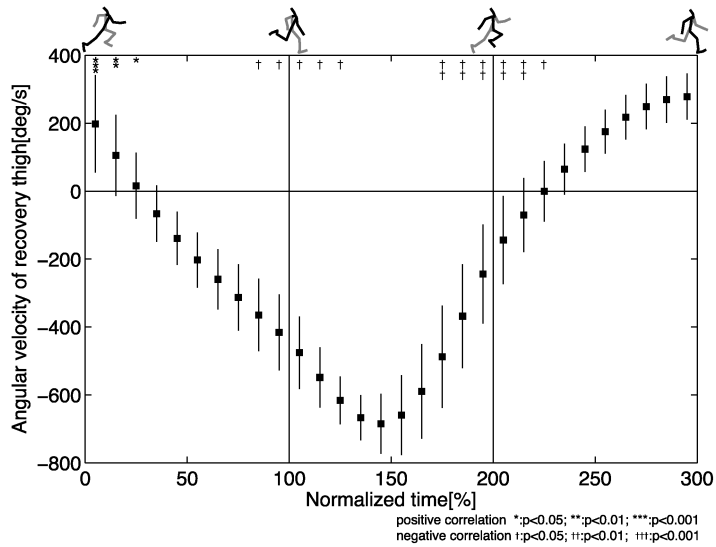
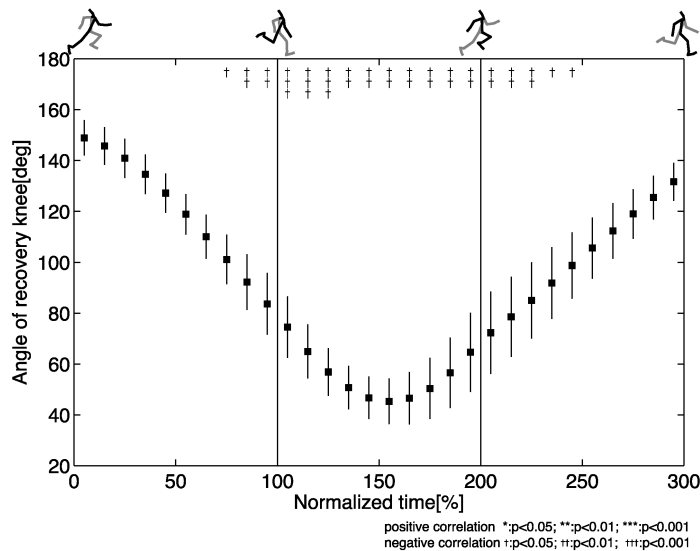


Fig. 2 Averaged patterns relative velocity of recovery leg and correlation coefficient between relative velocity of recovery leg and running velocity



**Fig. 3** Averaged patterns angular velocity of recovery thigh and correlation coefficient between angular velocity of recovery thigh and running velocity



**Fig. 4** Averaged patterns angle of recovery knee and correlation coefficient between angle of recovery knee and running velocity

した結果、両者の間には支持期前後（80—250%時点）において有意な負の相関関係が認められた。

次に各動作間の関係について検討する。Fig. 5は回復脚重心相対速度の最大値（前方スウィングの最大値）と支持脚角速度の支持期中の平均値（後方スウィング）との間の関係、Fig. 6は回復脚大腿角速度の最小値（前方スウィングの最大値）

と腿上げ角度（回復脚大腿角度の最小値）との間の関係、Fig. 7は腿上げ角度（回復脚大腿角度の最小値）と支持脚角速度の支持期中の平均値（後方スウィング）との間の関係、Fig. 8は、回復脚大腿角速度の最小値（前方スウィングの最大値）と回復脚膝関節角度の最小値との間の関係をそれぞれ示したものである。回復脚重心相対速度の最

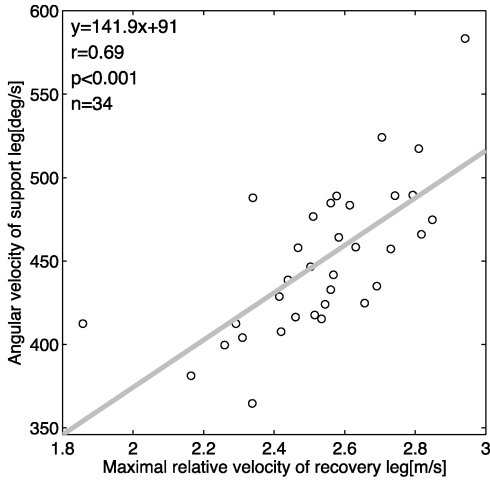


Fig. 5 Relationships between maximal relative velocity of recovery leg and angular velocity of support leg

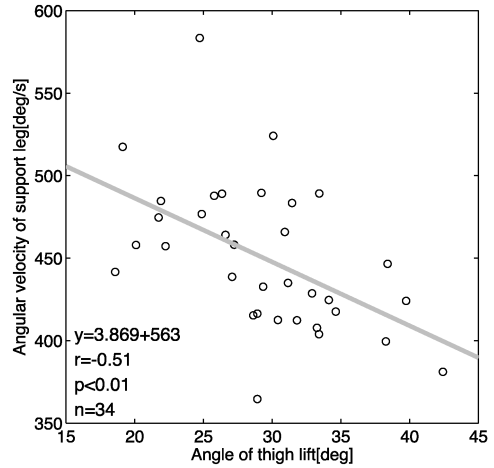


Fig. 7 Relationships between angle of thigh lift and angular velocity of support leg

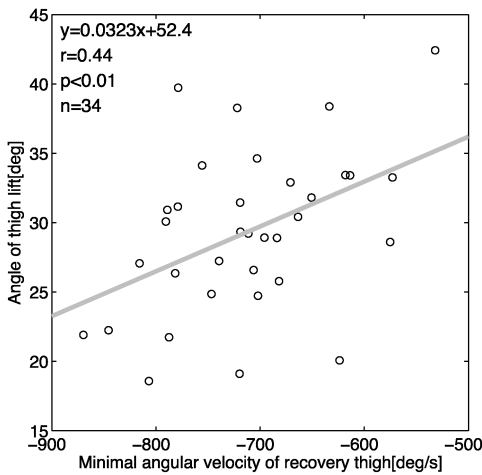


Fig. 6 Relationships between minimal angular velocity and angle of thigh lift

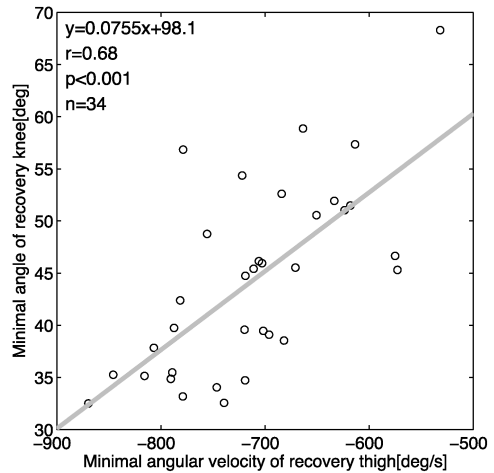


Fig. 8 Relationships between minimal angular velocity of recovery thigh and minimal angle of recovery knee

大値（前方スウィングの最大値）と支持脚後方スウィング速度の支持期中の平均値との間に有意な正の相関関係が認められた ( $r=0.69$ ,  $p<0.001$ : Fig. 5). また, 回復脚大腿角速度の最小値（前方スウィングの最大値）と腿上げ角度（回復脚大腿角度の最小値）との間には有意な正の相関関係 ( $r=0.44$ ,  $p<0.01$ : Fig. 6) が認められた. さらに, 腿上げ角度（回復脚大腿角度の最小値）と支持脚角速度の支持期中の平均値（後方スウィング）との間には有意な負の相関関係 ( $r=-0.51$ ,  $p<$

$0.01$ : Fig. 7) が認められた. 加えて, 回復脚大腿角速度の最小値（前方スウィングの最大値）と回復脚膝関節角度の最小値との間には有意な正の相関関係が認められた ( $r=0.68$ ,  $p<0.001$ : Fig. 8).

#### IV. 考 察

本研究では, 回復脚全体の動作を反映する指標として, 回復脚重心相対速度を用いた. 回復脚重

心相対速度は、支持期全体にわたって疾走速度との間に有意な正の相関関係が認められた (Fig. 2). これを詳細に検討するため、回復脚の大腿角速度の時系列変化をみてみると、支持期全体にわたって疾走速度との間に有意な負の相関関係が認められる局面が多い傾向が認められた (Fig. 3). これは回復脚大腿の前方スウィング速度が大きい者ほど疾走速度が高いことを示している. 本研究において疾走速度と回復脚の大腿角速度との間に認められた有意な相関関係は、児童を対象に検討した加藤ほか (2001) や成人を対象とした伊藤ほか (1998) の報告においても同様に認められており、高い疾走速度を有する者は大腿の前方スウィング速度が高いことは、児童にも大人にも共通の特徴といえる.

次に、膝関節角度の変化と疾走速度との関係に着目してみると、回復期前半の中盤から回復期後半の中盤 (80—250%時点) にかけて疾走速度との間に有意な負の相関関係が認められた (Fig. 4). また、疾走速度と回復脚の膝関節角度の最小値 (屈曲の最大値) との間にも有意な負の相関関係が認められた ( $r = -0.48$ ,  $p < 0.01$ : Table 1). 先行研究においても、高い疾走能力をもつ小学生の特徴として、回復脚の膝関節がより屈曲位にあること (加藤ほか, 2001; 末松ほか, 2008) が報告されており、本研究の結果はこれを支持するものであった. これらの相関関係に加えて、膝関節角度と回復脚大腿角速度の最大値との間にも有意な正の相関関係が認められた ( $r = 0.68$ ,  $p < 0.001$ : Fig. 8). これらの結果は、回復脚の膝関節がより屈曲位になることで回復脚大腿の前方スウィング速度が大きくなる可能性と、回復脚大腿の前方スウィング速度が大きくなることで回復脚の膝関節がより屈曲位になる可能性の2つを示唆するものである. この2つの可能性のうち、どちらが支持されるのかを検討することは、優先して習得すべき技術を明らかにするために必要である.

まず、膝関節がより屈曲位になることで大腿の前方スウィング速度が大きくなる可能性を検討する. 角運動量が同じであれば、慣性モーメントが

小さいと角速度は大きくなることから、膝関節が屈曲すると、股関節の動作に関わるモーメントアームが小さくなり、股関節まわりの慣性モーメントも小さくなることが推察される. そして、股関節まわりの慣性モーメントが小さくなれば、大腿の前方スウィング速度が大きくなる可能性が考えられる. しかし、回復脚大腿角速度の最小値 (前方スウィングの最大値) の出現した時刻が  $142.8 \pm 11.8\%$  時点であるのに対して、回復脚膝関節角度の最小値 (屈曲の最大) の出現した時刻は  $155.8 \pm 8.4\%$  時点であり、すべての被験者において膝関節角度の最小値 (屈曲の最大値) は大腿角速度の最小値 (前方スウィングの最大値) が出現した後に現れていた. 膝関節がより屈曲位になることで大腿の前方スウィング速度が大きくなるのであれば、膝関節角度の最小値 (屈曲の最大値) が出現した後に大腿角速度の最小値 (前方スウィングの最大値) が出現するはずであろう. しかし、本研究の結果では、大腿角速度の最小値 (座前方スウィング速度の最大値) が出現した後に膝関節角度の最小値 (屈曲の最大値) が出現している. このことは、膝関節がより屈曲位になることで大腿の前方スウィング速度が大きくなるという仮説を棄却するものである.

続いて、もう一方の仮説である大腿の前方スウィング速度が大きくなることで膝関節がより屈曲位に変位する可能性を検討する. 下腿の動きは足関節トルク、膝関節トルクの他に、足関節と膝関節で下腿に作用する関節力によって決定される. 回復脚では足部に作用する外力は0とみなすことができ、足関節トルクはほぼ0になることが報告されており (馬場ほか, 2000; 遠藤ほか, 2008; 矢田ほか, 2012), 足関節で下腿に作用する関節力もほぼ0となる. したがって、下腿に作用しているのは膝関節トルクと膝関節で下腿に作用する関節力が主であると考えられる. 回復期前半では膝関節が屈曲しているのに対して、伸展トルクを発揮していることが報告されている (馬場ほか, 2000; 遠藤ほか, 2008; 矢田ほか, 2012). また、矢田ほか (2012) は回復期前半において、学生短距離選手よりも世界一流短距離選



手の方が有意に大きい膝関節伸展トルクを發揮したことを報告している。膝関節伸展トルクが發揮されているにも関わらず、膝関節が屈曲しているのは、下腿に作用するモーメントが膝関節屈曲方向に作用しているためであると考えられる。膝関節力は分解して考えると、①股関節の加速度による力、②下腿の角加速度による力、③下腿の角速度による力、④大腿の角加速度による力、⑤大腿の角速度による力、⑥下腿の重量に対する力の6つで構成されている(阿江・藤井, 2002)。この中でも、回復脚の前方スウィング時には、大腿の角加速度による力(接線力)と大腿の角速度による力(求心力)によって下腿に時計回り(膝関節屈曲方向)のモーメントが発生すると考えられる。したがって、回復脚大腿の前方スウィング速度が高ければ、膝関節力によって生じるモーメントが下腿を回転させ、膝関節が屈曲する可能性が考えられる。さらに、膝関節の最大屈曲は大腿の前方スウィングの最大値が出現した後に現れていることも、この仮説の正統性を裏付けるものである。したがって、回復脚膝関節の屈曲は大腿の前方スウィング角速度によって引き起こされると考えられる。

このようなことから、回復脚膝関節を積極的に屈曲させる指導は力学的メカニズムに合致していないと言える。また、膝関節の屈曲は大腿の前方スウィングによって引き出されると考えられ、膝関節を積極的に屈曲させることよりも、大腿を積極的に前方にスウィングさせることを優先して習得すべきであると言える。さらに、大腿の前方スウィング速度、または前方スウィング加速度が高くなることで膝関節は屈曲し、膝関節が屈曲することで股関節まわりの慣性モーメントが小さくなり、回復脚を前方に運び易くなると考えられる。

木越ほか(2012)は小学校5年生および6年生の目指すべき疾走動作として、「回復脚の膝関節をしっかりと屈曲させて振り出し、腿をしっかりと上げること」を挙げ、回復脚の膝関節をより屈曲させることを意識づける補助具を開発・提案している。木越ほか(2012)の補助具は、回復脚の膝関節を十分に屈曲できない児童や腿上げ角

度の小さい児童にとって、これらの動作を修正するために有効な手段である可能性を示唆している。この補助具は前者の可能性から考案されたものであるが、先行研究や本研究の結果から総合的に考えると、木越ほか(2012)の補助具は回復脚の膝関節屈曲のメカニズムに一致していないと考えられる。先述のように、この局面では膝関節伸展トルクが發揮されており、膝関節の屈曲は膝関節に作用する関節力によって生じるモーメントが引き起こしていることが推察される。したがって、膝関節を積極的に屈曲させる意識を持たせることは回復期前半において膝関節屈曲トルクを発生させる可能性があり、回復脚のメカニズムに合致していないと考えることができる。また、膝関節を屈曲させる意識を持たせることによって反射抑制が起こり、大腿直筋などの股関節屈筋群の活動が抑えられる可能性があり、回復脚大腿の回復が遅れることも想定される。しかし、木越ほか(2012)の補助具でも、前述の通り一部の児童、つまり回復脚の膝関節を十分に屈曲できない児童や腿上げ角度の小さい児童にとって有効であったと報告されていることを考慮すると、力学的メカニズムに合致していない指導であっても、動作を改善する方法として有効であった可能性がある。

このようなことが起こる理由として、動作の意識が運動の熟練度や個人によって異なる場合があることや、動作意識と力学的メカニズムが異なる場合があることが考えられるためである。一方で、指導者が選手の動作を評価する際には、選手自身の動作意識とは関係なく、力学的メカニズムに沿った評価が求められる。そのため、指導者は膝関節を積極的に屈曲させる技術よりも大腿を積極的に前方へスウィングさせる技術が力学的なメカニズムに合致していることを知識として有しておくべきであると考えられる。

ここまで回復脚の動作について検討してきたが、回復脚の動作が直接的に疾走速度に影響するとは考えがたい。回復脚の動作は支持脚の動作を介して疾走速度に影響すると考えられることから、回復脚の動作が支持脚の動作に与える影響についても検討する。回復脚重心相対速度の最大値

(前方スウィングの最大値)と支持脚角速度の支持期中の平均値(後方スウィング)との間には、有意な正の相関関係が認められた( $r=0.69$ ,  $p<0.001$ ; Fig. 5). 末松ほか(2008)は、回復脚の大腿を後方から前方へ大きく振りこむ動作を行うことがステップ長の獲得に貢献している可能性を指摘している。また、回復脚の大腿角速度の時系列変化を検討した結果、回復脚大腿の前方スウィング速度の最大値は支持期中である、 $142.8 \pm 11.8\%$ 時点に出現することが明らかになった。加藤ほか(2001)や伊藤ほか(1998)は回復脚の大腿角速度を最大腿上げ角速度と表現している一方で、角速度の最大値が出現する局面は明らかにしていない。そこで、本研究では、回復脚大腿角度の最小値(腿上げ)が出現する時刻を検討したところ、 $222.9 \pm 14.0\%$ 時点であり、腿上げの局面は回復脚大腿の前方スウィング速度の最大値が出現する局面のしばらく後であることが明らかになった。支持脚後方スウィング速度の最大値が出現した時刻は $150.1 \pm 7.1\%$ 時点であり、左右の大腿の最大スウィング角速度が出現した絶対時刻の差は $0.02 \pm 0.04$ 秒であったことから、両者のピークが現れたのはほぼ同時期であると言え、さらに、これは左右の大腿が重なる局面であることが明らかになった。

一方、支持脚後方スウィング速度と回復脚前方スウィング速度のピークがほぼ同時期に現れたことは、回復脚重心相対速度が高い者では接地前後において支持脚と回復脚を挟み込むような動作である「シザース動作」(阿江, 2001; 阿江, 2002)が強調されていることを示唆している。この「シザース動作」は両脚間のエネルギーの流れを促進するものであると言われている(阿江, 2002)。窪(2013)は下肢の部分が垂直位に近い状態で角速度を生じさせることで、セグメントの角速度に由来する接線力(関節力)が推進方向となり、両脚間のエネルギー伝達が促進されると述べている。左右の大腿が重なる局面において、大腿が垂直位に近い状態で、支持脚の後方スウィング速度の最大値と回復脚大腿の前方スウィング速度の最大値が出現することは、左右の脚の間のエネル

ギー伝達を促進するものであると考えられる。したがって、回復脚重心相対速度が大きくなることは、左右の脚のエネルギー伝達を促進することで、支持脚の後方スウィング速度も大きくなると考えられる。これらのことから、回復脚の前方スウィング速度は、支持脚の後方スウィング速度に影響を及ぼす要因の1つであることが示唆された。末松ほか(2008)は、「シザース動作」を促すことがステップ頻度を高めることに貢献している可能性も指摘している。このように、回復脚の積極的な回復はステップ頻度の増大に貢献している可能性があることから、回復脚膝関節の屈曲と比較して、優先して習得すべきであると言える。

以上のことから、小学生の短距離疾走の指導現場において、回復脚大腿の前方スウィング速度を大きくすることは、優先して習得すべき技術であることが示唆された。また、回復脚大腿の前方スウィング速度の最大値と支持脚の後方スウィング速度の最大値が出現する時刻はほぼ同時であり、解剖学的正位付近で出現することから、回復脚大腿は腿上げよりも積極的な前方への回復を優先させることが望ましいと考えられる。回復脚大腿の前方スウィング速度が大きくなることで、回復脚膝関節の屈曲も大きくなり、これらの相互作用によって回復脚全体の前方スウィングがし易くなると考えられ、これは力学的メカニズムに合致していると言える。

## V. 要 約

本研究の目的は、小学生の疾走における回復脚の動作と疾走速度との関係を明らかにし、各動作間の関係を検討することで、疾走の指導の際に回復脚の積極的な回復と膝関節の屈曲はどちらを優先して習得すべきかを明らかにすることであった。被験者には小学校5-6年生の男子児童34名を用い、50 m走の35 m地点の1サイクルについて検討した。本研究において得られた主な結果は以下の通りである。

1. 疾走速度と回復脚重心相対速度との関係を検討した結果、支持期前後では両者の間に有意

な正の相関関係が認められた。

2. 回復脚大腿の前方スウィング速度の最大値が現れた後に回復脚膝関節角度の最小値が現れ、これら両者の値の間には有意な正の相関関係が認められた。
3. 回復脚大腿の前方スウィング速度の最大値と支持脚の後方スウィング速度の最大値はほぼ同時期に現れ、これは左右の大腿が重なる局面であった。

以上のことから、回復脚の前方スウィング速度が大きくなることで、回復脚膝関節の屈曲が大きくなり、これらの相互作用によって回復脚全体の前方スウィングがし易くなる。また、回復脚の前方スウィング速度が大きくなると、左右の脚の間のエネルギー伝達が促進されることによって、支持脚の後方スウィング速度が増大し、高い疾走速度の獲得に繋がる。したがって、小学生の疾走においては、回復脚膝関節の屈曲よりも回復脚の積極的な回復を優先して習得すべきであることが示唆された。

### 参考文献

阿江通良 (2001) スプリントに関するバイオメカニクスの研究から得られるいくつかの示唆. スプリント研究, 11: 15-26.

阿江通良 (2002) 関節力およびトルクパワーからみたモーリス・グリーン短距離走法 (特集 スポーツ現場に活かすバイオメカニクス). 体育の科学, 52(9): 715-720.

阿江通良・藤井範久 (2002) スポーツバイオメカニクス20講. 朝倉書店.

馬場崇豪・和田幸洋・伊藤 章 (2000) 短距離走の筋活動様式. 体育学研究, 45(2): 186-200.

遠藤俊典・宮下 憲・尾縣 貢 (2008) 100 m 走後半の速度低下に対する下肢関節のキネティクスの要因の影響. 体育学研究, 53: 477-490.

伊藤 章・市川博啓・斉藤昌久・佐川和則・伊藤道郎・小林寛道 (1998) 100 m 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.

加藤謙一・宮丸凱史・松元 剛 (2001) 優れた小学生スプリンターにおける疾走動作の特徴. 体育学研究, 46: 179-194.

木越清信・加藤彰浩・筒井清次郎 (2012) 小学生における合理的な疾走動作習得のための補助具の開発. 体育学研究, 57(1): 215-224.

木越清信・山元康平・関慶太郎・中野美沙・尾縣 貢 (2015) 短距離走における疾走速度と回復脚の動作との関係. 陸上競技学会誌, 13: 45-52.

窪 康之 (2013) スピードを生み出す身体の動き: 種々の動作における力学的エネルギーの発生と利用に着目して. 体育の科学, 63(7): 517-521.

志賀 充・尾縣 貢・福岡直樹・関岡康雄 (2004) スプリント走における疾走動作間の関係—中学生を対象として—. いばらき健康・スポーツ科学, 22: 19-28.

末松大喜・西嶋尚彦・尾縣 貢 (2008) 男子小学生における疾走能力の指数と疾走中の接地時点の動作との因果構造. 体育学研究, 53: 363-373.

矢田恵大・阿江通良・谷川 聡 (2012) 世界一流および学生短距離選手の回復脚におけるキネティクスの相違. 陸上競技研究, 90: 9-16.

横井孝志 (1993) 剛体リンクモデルのための身体部分剛体特性定数. バイオメカニクス学会誌, 17(4): 241-249.

横井孝志・渋川侃二・阿江通良 (1986) 日本人幼少年の身体部分係数. 体育学研究, 31: 53-66.

Wells, R.P. and Winter, D.A. (1980) Assessment of signal noise in kinematics of normal, pathological and sporting gaits. In Proc. Of the first Con. Of the Can. Soc. Biomech., Human Locomotion I, pp. 92-93.

(2015年9月1日受付)  
(2016年4月8日受理)