小学生男子と成人男性との全力疾走時における動作の違い

山田 敦志^{1†}, 村木 里志², 古達 浩史¹, 濱中 伸介¹¹(株)ムーンスター 技術開発部技術開発課, ²九州大学大学院芸術工学研究院デザイン人間科学部門

要旨: 本研究では子どもの全力疾走時の動作特性を理解することを目的とし, 8歳から11歳までの小学生男子(子ども群: n=20)と20代の成人男性(大人群: n=10)を対象に全力疾走動作を三次元動作解析により測定し比較を行った. 体格の違いを考慮した疾走能力の指数において, 子ども群は大人群に比べ特にピッチ指数が低い値を示した. その原因として, 足部が前方で接地することと, その後の立脚期中盤に股関節と膝関節が屈曲する疾走動作が示唆された.

キーワード: 小学生, 成人, 疾走動作, ステップ長, ピッチ

1. 目的

運動やスポーツは楽しみ, 健康・体力増進, ライフワークといった様々な側面をもち, ヒトの生活に欠かせない. その運動やスポーツにはヒトの基本動作の一つである走行動作を伴うことが多い. それゆえ, 走行動作のパフォーマンス向上や走行動作に伴うけがの防止は, 運動やスポーツを実践する者や指導する者ならびに運動・スポーツ用品(靴やトレーニング機器)を製造する者にとっては大きな関心事である. このような背景から走行動作は様々な視点から研究が進められ, それらの知見はけがを防止する靴の開発^{1,2)}や, 走行パフォーマンスを向上する指導方法の開発^{3,7)}などに大きく貢献してきた.

一方で, 遊びの場や授業およびクラブ活動において走行の機会が多い小学生は, 受傷頻度が高くなり, 走行による受傷事例も多くあげられる⁸⁾. また体格が未熟な小学生期は足部に作用する負担が大人のそれとは異なることが示唆され, その身体機能特性に応じた運動靴の開発が求められている⁹⁾.

その子どもの身体機能特性を理解するためには, 子ども特有の疾走動作の特徴を理解する必要があると考える. 子どもを対象とした走行の研究には, その発達に関するもの^{3,4)}や着地時点に限定して疾走能力と関連のある動作の分析を行った研究⁵⁾が報告されている. また筆者ら¹⁰⁾も小学生男子20名を対象とした走行実験を行い, その中で走行タイムの速い子どもの疾走動作の特徴を報告している. しかしながら, 子どもと大人の疾走動作を直接比較することで子どもの全力疾走時の動作特性を研究した例はほとんど見られ

ない.

そこで本研究では子どもと大人の疾走動作の違いに着目し, 小学生男子と成人男性を対象とした走行動作の計測を行った. 疾走動作がより成熟した大人と子どもの動作とを疾走動作1サイクル(2歩)で比較し, 子ども特有の疾走動作の特徴を理解することを目的とした.

2. 方法

2.1 実験対象者

対象者は全力疾走に支障のない健常な8歳から11歳の小学生男子20名および20代の成人男性10名とした. 対象者はそれぞれを子ども群(小学生男子)と大人群(成人男性)とし, それぞれの特性を表1に示す. 外果を除く全ての身体寸法および体重において大人群が子ども群よりも有意に大きな値を示した. 対象者(子ども群の場合は対象者と保護者)には事前に実験内容を説明し, 協力の同意を得た.

表1 子ども群および大人群の特性

	大人群(n=10)	子ども群(n=20)
年齢 [yr.]	23.8 ± 1.5	10.1 ± 1.1 *
身長 [cm]	170.2 ± 5.6	139.3 ± 7.3 *
体重 [kg]	62.8 ± 5.7	32.0 ± 5.3 *
転子高 [cm]	87.7 ± 4.5	72.6 ± 5.5 *
膝関節高 [cm]	46.8 ± 1.9	38.4 ± 3.2 *
外果高 [cm]	7.7 ± 0.6	7.2 ± 0.9
大腿周囲径 [cm]	52.2 ± 2.9	39.9 ± 3.6 *
下腿周囲径 [cm]	36.4 ± 1.8	28.7 ± 2.3 *

Mean ± SD * p < 0.05 vs. 大人群

2.2 実験手順

走行は平坦な板張り床上(屋内競技場)で行った. 靴の疾走動作への影響を考慮し, 両群はそれぞれ統一の特殊な機能のない運動靴(子ども群:(株)ムーンスター製 SUPERSTAR J121, 大人群: 同社製 SC アスレチック 007)を使用した. スタート姿勢はスタンディングスタートに統一し, 子どもと大人の疾走速度が安定する距離を考慮して

2012年8月22日受付 2013年7月20日受理

† 〒830-8622 福岡県久留米市白山町60

株式会社ムーンスター技術開発部技術開発課

山田 敦志

Tel: 0942-30-1141 (ダイヤルイン) Fax: 0942-30-1192

E-mail: atsushi@moonstar.co.jp

子ども群は 20[m], 大人群は 30[m] の全力疾走を行った。疾走路の終わりに伴う疾走速度の減速を防ぐため、対象者には疾走路の距離の 5[m] 先まで全力で走るよう指示した。またその後も減速に必要な距離を確保し、正面の壁には衝突時の安全性を考慮して緩衝用のマットを配置した。

2.3 測定項目

反射マーカを用いた三次元動作解析システムを用いて、子ども群は 15 ～ 20[m], 大人群は 22 ～ 28[m] の区間における疾走動作の測定を行った。カメラは Motion Analysis 社製 Hawk を計 9 台、測定ソフトは Motion Analysis 社製 EvaRT、解析ソフトはキッセイコムテック社製 KinemaTracer を使用した。人体へのマーカ取り付け位置は、頭頂点、前額点、後頭部、肩峰点（左右）、橈骨点（左右）、前腕遠位背側点（左右）、転子点（左右）、大腿骨外側上顆点（左右）、外果点（左右）とし、靴については人体の第 5 中足骨頭（左右）、踵骨隆起（左右）、足尖点（左右）に相当する部位とし、計 21 箇所を分析点とした。

これらのマーカよりスティックピクチャを作成し、次に示す項目の解析を行った。なお身体重心の分析は、江原ら¹¹⁾による身体を 7 つのセグメントの剛体リンクモデルに近似して重心を計算する方法に基づいて行った。この際、対象者に対し進行方向を x 軸、左右方向を y 軸、上下方向を z 軸とした。なお利き足の影響を考慮して、左右の脚について分析できる項目については両者の平均値を用いた。

・ステップ長、ピッチおよび疾走速度

計測区間における対象者の身体重心の進行方向速度を分析し、その平均値を疾走速度とした。スティックピクチャより接地時点および離地時点进行分析し、1 ステップ区間の重心の移動距離をステップ長、1 ステップに要する時間の逆数をピッチとした。Alexander¹²⁾ および齊藤ら⁴⁾ を参考に、下肢長の影響を考慮したステップ長指数、ピッチ指数および速度指数を式 (1) ～ (3) から算出した。

$$\text{ステップ長指数} = \frac{\text{ステップ長}}{\text{下肢長}} \quad \text{式 (1)}$$

$$\text{ピッチ指数} = \text{ピッチ} \times \sqrt{\frac{\text{下肢長}}{\text{重力加速度}}} \quad \text{式 (2)}$$

$$\begin{aligned} \text{速度指数} &= \text{ピッチ指数} \times \text{ステップ長指数} \\ &= \frac{\text{疾走速度}}{\sqrt{\text{下肢長} \times \text{重力加速度}}} \end{aligned} \quad \text{式 (3)}$$

・立脚期時間、遊脚期時間および立脚期割合

上記の接地時点および離地時点から、1 ステップ中の立脚期と遊脚期の時間を求め、それぞれを立脚期時間、遊脚期時間とした。さらに 1 ステップに要する時間に占める立脚期の割合を立脚期割合をとした。

・足底面角度および脚角度

初期接地における接地部位により、走行中の接地方式は大別して踵接地とつま先接地の 2 種類に分けられる。踵接地は後足部が最初に接地し、つま先接地は前足部が最初に接地する接地方式である。その接地方式を比較するため、踵とつま先のマーカを結んだ線と地面とが成す角度を足底面角度として分析した (図 1-A)。靴サイズやマーカ位置の違いによる角度の違いを考慮して、初期接地時の足底面角度と、足底接地時の足底面角度との差を接地時の足底面角度とした。接地時の足底面角度は踵接地で正となり、つま先接地で負となるよう設定した。

また接地時における接地足と身体重心との位置関係の評価として、転子点と外果を結んだ線の前額面からの角度を脚角度として分析した (図 1-B)。

図 1 立脚期における下肢の分析動作

・ブレーキ作用時間

立脚期中における全身の動作を評価するため、ブレーキ作用時間を分析した (図 1-C)。ブレーキ作用時間は接地から身体重心がつま先マーカの鉛直線上を通過するまでの時間が立脚期全体に占める割合とした。

・立脚期の動作

立脚期全体の下肢動作の解析として、股関節・膝関節・足関節 (図 1-D) の角度と伸展を正 (足関節は底屈が正) とした角速度 (単位時間当たりの角度の変化量) の解析を行った。図 2 にその結果の一例を示す。立脚期において接地を 0[%], 離地を 100[%] とし、a: 接地時, b: 最小値, c: 最大値, d: 離地時の値を求めた。a は接地時の角度と角速度の値とし、接地に伴う衝撃の緩衝によりもたらされる下肢関節の屈曲時の角度と角速度の最小値 (b) を求め、離地に至る間に下肢関節が伸展するときの角速度の最大値 (c) と、d で離地時の角度と角速度の値をそれぞれ比較した。

2.4 統計処理

2 群間の比較には対応のない t 検定を用い、有意水準は 5[%] 未満とした。

図2 立脚期における角度と角速度の変化
(子ども群の平均値：結果参照)

3. 結果

・疾走速度

疾走速度において群間に有意差 ($t=7.16$, $p<0.05$) が認められ、大人群 (745.8 ± 45.6 [cm/s]) は子ども群 (595.2 ± 58.0 [cm/s]) よりもおおよそ 20[%] 大きな値を示した。またその疾走速度を下肢長で補正した速度指数についても、大人群 (2.55 ± 0.18) は子ども群 (2.23 ± 0.18) より有意に大きな値を示した ($t=4.50$, $p<0.05$)。

・ステップ長、ピッチおよび立脚期割合

図3に子ども群と大人群のステップ長、ステップ長指数、ピッチおよびピッチ指数を示し、図4に両群の立脚期割合、立脚期および遊脚期の時間の比較を示す。ステップ長は約 16[%]、ピッチは約 5[%] 大人群が子ども群よりも大きく、ステップ長に有意差 ($t=5.35$, $p<0.05$) が認められ、ピッチには有意な差は認められなかったものの大人群は子ども群より高い値を示す傾向が見られた ($t=1.87$, $p<0.1$)。一方でステップ長指数には両群間に有意差が認められなかったのに対し、ピッチ指数は子ども群より大人群の方が有意に大きな値を示した ($t=5.37$, $p<0.05$)。1歩に占める立脚期の割合は有意な差は認められなかったが、大人群 (25.9[%]) が子ども群 (27.1[%]) より少なくなる傾向が見られた ($t=1.87$, $p<0.1$)。その立脚期の時間は子ども群 (69.0[ms]) が大人群 (62.6[ms]) より有意に長かった ($t=3.15$, $p<0.05$)。しかし

遊脚期については子ども群 (186.1[ms]) と大人群 (179.6[ms]) に有意差は認められなかった。

図3 ステップ長、ピッチ、ステップ長指数およびピッチ指数

図4 立脚期割合、立脚期時間および遊脚期時間

・足底面角度および脚角度

図5に接地方式の分析として両群の接地時の足底面角度と脚角度を示す。足底面角度は子ども群 (5.90[deg]) が大人群 (-7.45[deg]) より有意に大きな値を示した ($t=4.38$, $p<0.05$)。脚角度は子ども群が大人群と比べて有意に大きく ($t=3.80$, $p<0.05$)、足部が体幹のより前方に接地していた。

図5 接地時の足底面角度および脚角度

・ブレーキ作用時間

図6に子ども群と大人群の立脚期中に占めるブレーキ作用時間の割合を示す。ブレーキ作用時間は子ども群が 45.5[%]、大人群が 40.6[%] となり、子ども群が大人群より有意に大きな値を示した ($t=4.57$, $p<0.05$)。

図6 ブレーキ作用時間

・立脚期中の関節角度および角速度

図7に接地から離地に至るまでの子ども群と大人群の下肢関節の角度と角速度を示す。接地時(図7-a)では、膝関節角度において子ども群が大人群よりも有意に大きく($t=3.27$, $p<0.05$), より伸展して接地していた。しかしそれ以外の股関節と足関節の角度では子ども群と大人群の間には有意な違いは認められなかった。角速度については、足関節角速度は子ども群が大人群よりも有意に大きく、底屈していた($t=3.09$, $p<0.05$)。股関節と膝関節の角速度には有意差は認められなかった。次に角度と角速度の最小値の結果を記す(図7-b)。角度では全ての関節(股関節, 膝関節, 足関節)で両群間に有意差は認められなかった。角速度では、股関節角速度($t=4.24$, $p<0.05$)および膝関節角速度($t=4.67$, $p<0.05$)は子ども群が大人群よりも有意に小さな値を示した。足関節角速度では両群間に有意な差は

認められなかった。角速度最大値(図7-c)は全ての関節(股関節, 膝関節, 足関節)の角速度で子ども群が大人群よりも小さく、足関節では有意差($t=3.06$, $p<0.05$)が認められ、股関節と膝関節では有意な差は認められなかった。離地時(図7-d)の関節角度では、膝関節角度で有意差($t=1.93$, $p<0.05$)が認められ、子ども群が大人群よりも伸展して離地していた。それ以外の股関節および足関節の角度については2群間に有意差は認められなかった。角速度は全ての関節で子ども群が大人群よりも有意に大きな角速度を示した(股関節: $t=3.12$, $p<0.05$, 膝関節: $t=6.06$, $p<0.05$, 足関節: $t=3.14$, $p<0.05$)。

4. 考察

子ども群は大人群よりも疾走速度とそれを決定づけるステップ長が有意に小さな値を示した(図3)。しかしながら、子ども群は大人群よりも体格が小さく(表1), 疾走能力を評価する上で体格の違いを考慮する必要がある。そこで下肢長で補正したステップ長指数とピッチ指数および速度指数を比較したところ、子ども群のステップ長指数は大人群のそれより低くなく、ピッチ指数と速度指数は子ども群が大人群より小さな値を示した(図3)。このことから疾走速度を決定付けるステップ長とピッチの内、子ども群はピッチを高める機能の方がより未発達であったと考えられる。齊藤ら⁴⁾は2歳児から世界一流短距離選手までの疾走能力を横断的に調査し、ピッチ指数において2歳から大学生まで増加傾向にあったことを報告しており、本研究と同じくピッチを生み出す機能の重要性にも言及している。一方、ピッチの低下は1ステップの時間の延長によって起こり、その1ステップは立脚期と遊脚期の一部からなる。1ステップ中の遊脚期の時間は大人群(179.6[ms])と子ども群(186.1[ms])に違いは見られなかったが、立脚期の時間は大人群(62.6[ms])より子ども群(69.0[ms])の方が有意に長かった(図4)。よってピッチの未発達には立脚期の延長が関係していると考えられる。

その立脚期において子ども群のブレーキ作用時間(45.5[%])は大人群(40.6[%])と比べて長く(図6), この立脚期前半の時間延長が立脚期全体の延長に大きく関係していると推測する。また大工谷¹³⁾は走行時(全力疾走やジョギングを含む)において特に速度が高い全力疾走時は、その運動エネルギーを支持脚で吸収するというよりは、素早く対側へ移行させる作用が重要であることを述べている。立脚期前半が長い子ども群は大人群より支持脚の運動エネルギーを素早く対側へ移行させる作用が未発達であることが示唆される。

立脚期前半の時間が長くなる一要因として、足部の接地する位置と下肢関節角度の違いが考えられる。接地時における子ども群の脚角度は大人群よりも大きく、足部がより前方で接地していた(図5)。その結果、接地時において子ども群は踵側から接地し、つま先が上向きとなった(図5)。

図7 立脚期中の下肢関節の角度と角速度

そのため接地した足部の上を重心が通過するまでに時間がかかり、立脚期が長くなったと考えられる。森と若吉¹⁴⁾は小学生に対し10[min]程度の簡単なスポーツ教室を週に一度の頻度で計10週にわたって行い、実施前後の疾走能力の変化を調査・分析した。その結果ピッチが上昇した子ども達において接地時間が有意に短縮し、接地時の膝関節角度に減少傾向が見られたことを報告している。本研究においても大人群は子ども群より接地時の膝関節角度が有意に小さく、接地時における子ども群の脚角度と膝関節角度が大きな走行様式（足部をより前方で踵から着地させる走行様式）がピッチに影響していたことが考えられる。Perry¹⁵⁾によると接地時に踵を中心として足関節が底屈することで、衝撃緩衝に貢献するとされている。子ども群が踵から接地する走行動作を行う要因として、つま先接地を行うのに十分な筋力や動作の習熟が不足している可能性や、衝撃吸収を目的として踵接地を行っている可能性などが考えられる。

一方で接地後の下肢関節の動作にも違いが現れていた。接地後の股関節の角速度をみると、大人群は正の値を示し、股関節が伸展していたのに対し、子ども群は負の値を示し、股関節が一時的に屈曲していた（図7-b）。また子ども群は大人群より接地後の膝関節角速度最小値（負の値）が有意に小さく（図7-b）、膝関節屈曲の度合いが大きかった。股関節や膝関節が屈曲すると、その屈曲した角度だけ余分に伸展する必要があるため、立脚期の時間が長くなると考える。つまり子ども群は足部が前方に着地することに加え、股関節と膝関節が屈曲することで時間的なロスとなり、立脚期前半の時間が長くなっていたことが示唆される。馬場ら¹⁶⁾は大学男子短距離選手の全力疾走中の筋活動を計測し、立脚期前半の股関節や膝関節の伸展に関わる筋として股関節では大殿筋や大腿二頭筋、膝関節では主に外側広筋が伸展トルクを発揮したことを報告している。また松尾ら¹⁷⁾は疾走時に立脚期前半で活動する筋として大殿筋、大腿二頭筋、外側広筋に加え、大内転筋、大腿筋膜張筋、中殿筋、内側広筋、半腱様筋といった大腿部の筋を挙げている。さらには股関節伸筋の拮抗筋の一つである腸腰筋や、膝伸筋であるが股関節の屈曲にも作用する大腿直筋の活動も無視することは出来ないと考える。金久ら¹⁸⁾は6～19歳の体脂肪断面積の身長を基準とする相対発育について検討し、大腿部の筋は12～16歳の思春期にかけて顕著な発育がみられたことを報告している。本研究の実験対象者は子ども群が思春期前、大人群が思春期後の年齢層に属しており、大腿部の筋の発達度合いが大きく異なることが考えられる。子ども群は股関節と膝関節の伸展に関わる筋が未発達であるために、着地の衝撃に耐えられずに股関節と膝関節が屈曲してしまった、もしくは筋だけではなく股関節と膝関節の屈曲により衝撃緩衝を行っていたと考える。

以上のことから子ども群はピッチを高める機能が低く、その原因は足部が前方で踵から接地することと、その後の立脚期中盤に股関節と膝関節が屈曲する疾走動作にあるこ

とが示唆された。子ども群がこれらの疾走動作を行う要因として、筋が発達段階にあるために大人のような疾走動作を行うのに十分な筋力が得られないためである可能性が示唆された。また筋が発達段階にあるために接地の衝撃を緩衝する作用が不十分であり、関節運動による衝撃緩衝作用を併用していた可能性も示唆された。

参考文献

- 1) Cheung, R. T. H. and Ng, G. Y. F.: Efficacy of motion control shoes for reducing excessive rearfoot motion in fatigued runners, *Physical Therapy in Sport*, 8(2), 75-81, (2007).
- 2) Butler, R. J., Hamill, J. and Davis, I.: Effect of footwear on high and low arched runners' mechanics during a prolonged run, *Gait & Posture*, 26(2), 219-225, (2007).
- 3) 宮丸凱史：疾走能力の発達，70-86，杏林書院，(2001).
- 4) 斉藤昌久，伊藤章：2歳児から世界一流短距離選手までの疾走能力の変化，*体育学研究*，40，104-111，(1995).
- 5) 末松大喜，西嶋尚彦，尾縣貢：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，(2008).
- 6) 伊藤章，市川博啓，斉藤昌久，佐川和則，伊藤道郎，小林寛道：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，(1998).
- 7) Weyand, P. G., Sternlight, D. B., Bellizzi, M. J. and Wright, S.: Faster top running speeds are achieved with greater ground forces not more rapid leg movements, *Journal of Applied Physiology*, 89, 5, 1991-1999, (2000).
- 8) 井上禎三：若年層のスポーツ外傷・障害 - 開業整形外科医からみて，*臨床スポーツ医学*，21(3)，279-285，(2004).
- 9) Walther, M., Herold, D., Sinderhauf, A. and Morrison, R.: Children sport shoes—A systematic review of current literature, *Foot and Ankle Surgery*, 14(4), 180-189, (2008).
- 10) 山田敦志，村木里志，古達浩史，濱中伸介，平田靖幸：走行タイムの速い子どもに見られる疾走動作の特徴，*バイオメカニズム学会誌*，35(1)，(2011).
- 11) 江原義弘，山本澄子：ボディダイナミクス入門 立ち上がり動作の分析，11-15，医歯薬出版，(2001).
- 12) Alexander, R. McN.: Terrestrial locomotion (7), In: Alexander, R. McN. and Goldspink, G. (Eds): *Mechanics and Energetics of Animal Locomotion*, 168-203, Chapman and Hall, (1977).
- 13) 大工谷真一：ランニング動作，*関西理学*，2，45-47，(2002).
- 14) 森智美，若吉浩二：スポーツ教室開催に伴う児童の疾走能力および動作の変化，*奈良教育大学紀要*，54(2)，49-56 (2005).
- 15) Perry, J.: Basic functions (Chapter 3), In: Perry, J. and Burnfield, J. (Eds): *Gait analysis normal and pathological function(Second edition)*, 19-48, SLACK Incorporated, (1992).
- 16) 馬場崇豪，和田幸洋，伊藤章：短距離走の筋活動様式，

体育学研究, 45, 186-200, (2000).

- 17) 松尾信之助, 藤井宏明, 苅山靖, 大山卞圭悟: 走速度変化に伴う股関節内転筋群活動の変化, 体育学研究, 56, 287-295, (2011).
- 18) 金久博昭, 角田直也, 池川繁樹, 福永哲夫: 相対発育からみた日本人青少年の筋断面積, 人類誌, 97(1), 63-70, (1989).

山田敦志 (やまだ あつし)

2010 年九州大学大学院芸術工学府デザイン人間科学コース修士課程修了. 同年株式会社ムーンスターに入社. 現在 技術開発課所属. 靴機能の研究開発等に従事. 日本人間工学会正会員.

村木里志 (むらき さとし)

1997 年広島大学大学院生物圏科学研究科博士課程後期修了 (学術 (博士)). 現在, 九州大学大学院芸術工学研究院デザイン人間科学部門准教授. 専門は福祉人間工学. (バイオメカニズム学会正会員)

Differences in sprint motion between male children and adults

Atsushi YAMADA^{1†}, Satoshi MURAKI², Hiroshi FURUTACHI¹, Shinsuke HAMANAKA¹

¹Technological Development Dept. MoonStar Company, ²Dept. of Human Science, Faculty of Design, Kyushu University

Abstract : The purpose of this study was to investigate the characteristics of sprint motion in children. Therefore, the 3D sprinting movements of male children aged from 8 to 11 years old (child group: n=20) and adults in their 20s (adult group: n=10) were measured. The child group showed a particularly low step frequency index, in which the effects of leg length were eliminated. This is one of the factors determining sprint speed. This originated from the fact that, in children, their feet land at positions further from the body at initial contact, and the hip and knee joints flex immediately after the initial contact.

Key Words : Child, Adult, Sprint motion, Step length, Pitch

Received Aug. 22, 2012 Accepted Jul. 20, 2013

[†]Atsushi YAMADA

Technological Development Dept, MoonStar Company,
60 Shirayama-machi, Kurume, Fukuoka, 830-8622, JAPAN
Tel: 0942-30-1141 (Direct Dialing) Fax: 0942-30-1192
E-mail: atsushi@moonstar.co.jp