

2023 年度 修士論文

腕振りがスプリント中の水平方向の力発揮に与える影響

早稲田大学 大学院スポーツ科学研究科

スポーツ科学専攻 コーチング科学研究領域

5022A064-2

根津 直岐

研究指導教員：岡田 純一 教授

目次

I.	緒言	1
1.	スプリントに求められること	1
2.	疾走速度と力積	2
3.	スプリントと上肢の関連	2
4.	床反力の測定	4
5.	本研究の目的	5
II.	関連文献の考証	6
1.	スプリントのキネマティクス	6
1)	疾走速度=ストライド長×ストライド頻度	6
2)	ストライド長とストライド頻度を規定する要因	6
2.	スプリントのキネティクス	8
1)	力学の原理原則	8
2)	力積と運動量	10
3.	体力的特徴	12
1)	最大筋力	12
2)	反応筋力	12
3)	力の立ち上がり速度	13
4)	高速筋力	14
4.	スプリントカー速度プロファイル	14
III.	方法	18
1.	被験者	18
2.	実験概要	18
3.	実験手順	19
4.	データ分析	20
5.	統計解析	21
IV.	結果	22
1.	被験者特性	22

2.	ラップタイム	22
3.	スプリント力-速度プロファイルの比較	23
4.	各区間における水平方向の力発揮の比較	24
V.	考察	26
1.	ラップタイムの比較	26
2.	スプリント力-速度プロファイルの比較	27
3.	水平方向に発揮した力の比較	28
4.	現場への応用と今後の展望	31
VI.	結論	32
	参考文献	33
	謝辞	37

I. 緒言

1. スプリントに求められること

多くのスポーツにおいて、スプリントはパフォーマンスに直結する重要な要素である。スプリントは一般的に加速局面、最大疾走局面、減速局面に分類され(31)、競技種目によって重要な局面が異なる。例えば、陸上競技では、最大疾走速度と 100m のパフォーマンスに強い負の相関が示されている(20)。一方で、サッカーやラグビーなどの球技種目では、距離にして 10-20m、時間にして 2-3 秒のスプリントが多く(44)、最大疾走速度に達するまでにスプリントが終了することから、短い距離を速く走る能力、もしくは短い時間で疾走速度を高める能力（加速能力）が重要であると考えられる。16 歳から 37 歳のサッカー選手 939 名を調査した研究では、1995 年から 2010 年にかけて 20m スプリントの疾走速度が高まってきていることが報告されており(17)、サッカーにおいては加速能力が高いほどドリブルやディフェンスの成功率は高くなると考えられている(19)。また、ラグビーでは、10m もしくは 20m のスプリントの疾走速度とディフェンスを躲すことやトライの獲得と正の相関があることが報告されている(43)。このように、加速局面と最大疾走局面のいずれにおいても、疾走速度を向上させることは多くのスポーツにおいて非常に重要であると考えられる。

2. 疾走速度と力積

疾走速度はストライド長とストライド頻度の積によって決まるが(33)、ストライド長はテイクオフ時の離地速度によって、ストライド頻度は支持期の接地時間によって決まることが報告されている(24,47)。力積と運動量の関係から、床反力と接地時間の積である力積を大きくすることで離地速度を速くすることができるが、疾走速度が速くなるにつれて接地時間は短くなるため(33)、短い接地時間で大きな床反力を獲得できる能力が必要である。実際に床反力と疾走速度の関係を検証した研究では、床反力が大きいほど疾走速度が速くなることが示され、特に水平方向の床反力は疾走速度に有意な影響を与える要因であることが報告されている(25)。したがって、床反力の獲得は疾走速度向上の鍵を握ると考えられ、先行研究では床反力の獲得に必要と考えられる最大筋力、反応筋力、力の立ち上がり速度、high-velocity strength が検討されている(5,10,29,38,41)。

3. スプリントと上肢の関連

スプリントの研究では下肢のバイオメカニクス的分析やそれに基づくトレーニング手法の開発が進められてきた。その一方で、スプリントと上肢の関連に着目した研究は少なく、特に、スプリントと腕振りに関する知見は限られている。

腕振りがランニングに与える影響を調査した Hinrichs ら(21,22)らは、腕振りがラン

ニング中の身体重心と下肢の角運動量に与える影響を検証している。腕振りは身体重心を鉛直上向きに持ち上げる揚力として小さいながらも貢献し、疾走速度が高まるにつれて腕振りの貢献度は大きくなることが報告されている。また、腕振りは下肢の角運動量とは逆位相の角運動量を生み出し、結果として身体全体に生じる角運動量を最小限に留める役割を果たすと報告されている。これらの研究では、トレッドミルで 3.8、4.5、5.4 m/s で走ったときのキネマティクスおよびキネティクスを検討しているが、等速のランニングにおける腕振りは、主に鉛直方向に果たす役割が大きいと結論づけられている。Ross ら(32)は、被験者の任意の疾走速度 3.1-4.5m/s で腕振りを制限して走ったときの床反力を測定し、通常のランニングよりもピークの鉛直方向の床反力が 10-13%低下して、前額面状の外側方向の床反力が 4-6%増加することを報告している。この研究結果は Hinrichs らの研究結果を裏付けるものと考えられる。また、腕振りを制限したランニング中の代謝を検証した研究では(3)、必要とされる酸素摂取量が通常のランニングよりも多くなることが報告されている。したがって、腕振りはランニングに対して、バイオメカニクスのにも生理学的にも影響を及ぼすものと考えられる。

これらのように、先行研究では腕振りが最大努力下におけるランニングに与える影響を対象としたものが多く、最大努力時のスプリントに与える影響についての情報が限られている。腕を胸の前で交差して腕振りを制限しながら 30m を最大努力で走ったときの 10m ごとのラップタイムに与える影響を調査した研究では、腕振りを制限する

ことで、差はわずかながらもラップタイムは増加することが報告されている(8)。また、40m スプリント中の全身の各セグメントの運動エネルギーを調査した研究では、上肢は加速初期の貢献が大きいと報告されている(42)。しかし、腕振りがスプリントに与える影響について調査した研究はキネマティック的要因を検討したものに限られていて、腕振りがスプリントにおいて重要だと考えられる水平方向の床反力に与える影響は明らかになっていない。

4. 床反力の測定

スプリント中の床反力の測定には一般的に床反力計が用いられる(25,35,47)。実測値であるため、正確な数値が測定可能である一方、高価であり、持ち運びが困難であることから実験室レベルの測定手法として確立している。また、1回のスプリントにつき一歩あたりの床反力しか測定できず、複数地点の床反力を測定する場合、被験者に複数回のスプリントを課すことになるため毎回同様の結果が得られるとは限らず、測定誤差が生じる可能性がある。そこで、近年、これらの問題を解決する手法であるスプリントカー速度プロファイルが開発されている(34,40)。スプリントカー速度プロファイルは、スプリント中の任意の疾走速度で発揮した水平方向の力を評価する手法であり、スプリントタイムなどの比較的簡便に測定できる数値から作成できる。スプリントカー速度プロファイルから得られた水平方向の力は推定値であり、モデル化された数値であることからブレーキ成分や推進成分となる詳細な床反力の検討は不可能である。しか

し、床反力計を用いた測定とは対照的に、疾走区間全域にわたる水平方向に発揮した力の評価が可能であり、床反力計を用いて実測された水平方向の床反力とスプリント力－速度プロファイルを用いて推定された水平方向の力は高い精度で一致することがMorin ら(34)によって報告されている。

5. 本研究の目的

スプリントにおいて、疾走速度の向上は多くの競技種目で重要である。疾走速度の向上には、スプリントのバイオメカニクスを分析することが重要であり、主として、接地時における力積が疾走速度を左右する大きな原因である。スプリントにおける力積とは、床反力と接地時間の積であり、床反力を大きくして接地時間を短縮することが疾走速度の向上につながる。それを可能にするために、多くのトレーニング方法が開発されてきた。しかし、これらのバイオメカニクスの分析やトレーニング論は下肢に着目したものが多い。走動作における上肢の代表的な動態は腕振りであり、その中でも腕振りが最大努力下のランニングに与える影響はバイオメカニクスや生理学の観点から明らかにされている。一方で、腕振りが最大努力時のスプリントに与える影響を調査した研究は限られていて、スプリントの疾走速度の原因となる水平方向の床反力に与える影響は明らかになっていない。そこで本研究の目的は、腕振りがスプリント中の水平方向の力発揮に与える影響を明らかにすることである。

II. 関連文献の考証

1. スプリントのキネマティクス

1) 疾走速度＝ストライド長×ストライド頻度

疾走速度は伝統的にストライド長とストライド頻度の積として求められてきた(33)。ストライド長とは、一方の足が接地してから同じ足が再び接地するまでに移動した距離と定義される。また、ストライド頻度とは1秒間あたりのストライド数と定義される。これらの積は1秒間に移動できる距離を表し、これが疾走速度として定義される。したがって、ストライド長とストライド頻度を規定する要因について検討することが疾走速度を高める知見を提供すると考えられる。

2) ストライド長とストライド頻度を規定する要因

ストライド長とストライド頻度を規定する要因はいくつか考えられるが、後天的に変化させることのできる変数は離地速度と接地時間である(24)。

ストライド長を伸ばすには離地速度を増加させることが重要であり(24)、それは物体の斜方投射を考えることで導き出せる。斜方投射したときの水平方向の移動距離を d とするとき、空気抵抗を無視した場合、重力加速度 (g : *gravitational acceleration*)、離地速度 (v_0 : *velocity*)、離地角度 θ を用いて下記のように表せられる。

$$d = \frac{v_0^2}{g} \sin 2\theta$$

重力加速度はおおよそ $9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$ という定数が与えられているので、離地速度もしくは離地角度を大きくすることでストライド長を伸ばすことができると考えられる。理論的には $\theta = 45^\circ$ のときに $\sin\theta$ の値が最大となるため移動距離が最も大きくなると考えられるが、離地角度が大きくなるほど滞空時間も長くなるためストライド頻度が低下する要因となる。したがって、離地角度ではなく、離地速度を大きくすることがストライド長を増大させるためには重要であると考えられる(24)。

滞空時間もしくは接地時間に関しては、Peter ら(47)の研究で報告されている。滞空時間に関しては、疾走速度が増加するにつれてランナーの滞空時間は一律に減少したが、被験者の最大疾走速度は $6.2\text{-}11.1 \text{ m/s}$ と 1.8 倍の幅があるにも関わらずランナー間の滞空時間に有意差は見られなかった。すなわち、速いランナーもしくは遅いランナーに関わらず、疾走速度が増加するにつれて滞空時間は個人の最適値に向けて減少していくことが考えられる。また、この研究では、一方の足が離地してから再びその足が接地するまでのスイング時間も検討している。スイング時間は2つの滞空時間と1つの接地時間から構成されるため、主として滞空時間に大きな影響を受けるが、速いランナーもしくは遅いランナーであっても、その最大疾走速度で走るときのスイング時間に有意差が見られないことを示した。このことから滞空時間はストライド長を規定する直接的な要因ではなく、むしろ滞空時間を大きくすることで空中に浮いている時間が長くなることからストラ

イド頻度を低下させ、結果的に疾走速度が低下することが考えられる。一方で、同研究では接地時間についての検証も行なっていて、接地時間は滞空時間と同様に疾走速度が向上するにつれて一律に減少していくが、速いランナーの方が遅いランナーと比較して接地時間は短いことを示した。

以上のことから、疾走速度を向上させるために重要なキネマティクスの変数は離地速度と接地時間であり、離地速度を速くし、接地時間を短縮することで疾走速度を向上させられると考えられる。これらはスプリント中の力発揮に依存するため、キネティクスの要因を検討することが必要となる。

2. スプリントのキネティクス

1) 力学の原理原則

スポーツ中に生じる身体運動や物体の運動の多くは、物理学における力学の原理原則に則っている。スプリントもその内のひとつであるため、疾走速度の向上を考えるにあたり、力学の原理原則を考慮することは重要である。力学の原理原則はイギリスの物理学者であるアイザック・ニュートン（1643 年－1727 年）が以下のように述べている(1)。

① ニュートンの第 1 法則

ニュートンの第 1 法則は、外力が作用しない限り、静止している物体は静

止し続け、運動している物体は等速直線運動をし続けることを示している。

すなわち、物体の運動を変化させるには外力を作用させる必要があることを示している。

② ニュートンの第2法則

ニュートンの第二法則は、力 (F : Force)、質量 (m : mass)、加速度 (a : acceleration) を用いて以下の式で表される。

$$F = ma$$

この式を加速度について解くと以下のように表される。

$$a = \frac{F}{m}$$

この式は、質量に対して力の大きさが大きくなるほど加速度も比例して大きくなることを表し、反対に、力に対して質量が大きくなるほど物体は加速しづらくなることを示している。

③ ニュートンの第3法則

ニュートンの第3法則は、物体に力を作用させるとき、大きさが等しく向きが反対の力（反作用）が生じることを示している。例えば、ヒトが地面に立っている時は、ヒトが地面に対して、質量と重力加速度の積である重力を鉛直下向きに作用させているが（厳密には万有引力や遠心力も考慮しなければならない）、同時に、地面もヒトに対して鉛直上向きで重力と同じ大きさの床

反力を作用させている。

2) 力積と運動量

上記のような力学の原理原則に基づいて、スポーツ中の身体運動や物体の運動が生じている。要約すると、運動を変化させる要因は力であり、スプリントにおいては床反力が疾走速度に関わるストライド長とストライド頻度を変化させる主要な力である。ストライド長とストライド頻度は離地速度と接地時間に影響を受けるが(24)、力積と運動量の関係について考察することで疾走速度向上のための戦略を得ることができると考えられる。

運動量と力積の関係はニュートンの第2法則から導くことができる。ニュートンの第2法則は $F = ma$ で表され、加速度 a は時間の変化(Δt)に対する速度の変化(Δv)の割合であるから以下の形で表される。

$$F = m \times \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

この式の両辺に Δt をかけると以下のような形で表される。

$$F \times \Delta t = m \times \Delta v$$

このとき、左辺を力積、右辺を運動量と呼ぶ。この式は力積が大きくなると運動量も大きくなることを示しているが、運動中のアスリートや道具などの質量は変わらないため、実際は力積が大きくなると速度が大きくなることを示す。この運動量と力積の関係をスプリントに置き換えると、 F は床反力、 Δt は接地時間、 m はアス

リートの体重、 Δv は離地速度を示す。前述のように、疾走速度が高まるにつれて接地時間は短縮され、また、速いランナーほど接地時間は短いことから、短い接地時間で大きな床反力を獲得できるかが疾走速度を高められるかを左右することになる。床反力はベクトルであるから、力の大きさに加えて力を発揮する方向に着目することも重要であり、鉛直方向と水平方向の成分に分けて考えることが一般的である(25)。

① 鉛直方向の床反力

スプリント中に生じる鉛直方向の力は鉛直上向きの床反力と重力によって生じる鉛直下向きの力である(25)。鉛直上向きの床反力は重力に抗して滞空時間を得るために必要であると考えられる。疾走速度を高めるためには接地時間を短縮しつつも力積を維持することが必要になるが、鉛直上向きの発揮能力を改善することでそれが可能になると考えられる。

② 水平方向の床反力

スプリント中に生じる水平方向の力は進行方向の床反力、進行方向とは逆向きのブレーキ成分となる床反力、空気抵抗によって生じる力である(25)。空気抵抗を無視した場合、進行方向の床反力をブレーキ成分となる床反力よりも大きくすることで離地速度を大きくすることが可能になり、ストライド長の増大によって疾走速度の向上につながる事が Hunter らの研究から示唆

される(25)。

3. 体力的特徴

1) 最大筋力

下肢の最大筋力は床反力を獲得するための重要な要素であると考えられる。最大筋力とスプリントタイムの関係性を検証した研究では、ハーフスクワットの最大挙上重量と 10m および 30m のスプリントタイムには有意な負の相関($r = -0.94$, $r = -0.71$) があることが報告されている(48)。また、スクワットの最大挙上重量の効果量とスプリントタイムの効果量には有意な負の相関 ($r = -0.77$) があったことがメタ分析によって報告されている(41)。これらの研究では、最大筋力と 30m 以下のスプリントタイムとの有意な負の相関が報告されていることから、30m 以下のスプリントが多い球技選手にとって最大筋力は特に重要であると考えられる。

2) 反応筋力

反応筋力とは、着地と踏切を伴う跳躍運動中の対空時間あるいは跳躍高を接地時間で除した変数であり、競技パフォーマンスを推定する要因として使用されている(6,23)。反応筋力は Stretch-Shortening Cycle (SSC) の評価指標であり、SSC は筋腱複合体が一度伸ばされてから直ちに短縮する活動様式を意味する。SSC は多くの運動中において観察される。ひとつは、例えば、走動作において接地してから

らテイクオフに移行する局面を含むような主動作の反対方向への動きからの切り返しを伴う運動において観察される。もう一つは、例えば、投動作において体幹部が先行し最後に腕が振られるような身体の近位部が遠位部に先行して動く運動において観察される。SSC の能力を改善することで、骨格筋が発揮する力を増加させることや、消費エネルギーに対して発揮できるエネルギーを増加させることが先行研究から報告されている。スプリントにおいては、発揮する力を大きくすることで力積を大きくしてストライド頻度とストライド長の増加に貢献すると考えられるため、SSC の能力は重要であると考えられる。Oxfeldt ら(38)のメタ解析によれば、SSC を強調したトレーニング様式であるプライオメトリクスを健常な成人に 4 週間以上介入したとき、スプリントタイムに対しては小程度から中程度の効果があったと報告されている。

3) 力の立ち上がり速度

力の立ち上がり速度 (Rate of Force Development: RFD) とは、力-時間曲線における任意の時間 t_1 から t_2 に発揮した力の傾きを示し、傾きが大きいほど力を素早く発揮できることを示す。運動中に力を発揮できる時間は限られていて、非常に短時間であることから、スポーツパフォーマンスにおいて RFD は重要な指標であると言える。先行研究では、スプリントタイムとカウンタームーブメントジャンプとの相関が示されていることから(5)、RFD はスプリントにおいても重要であると

考えられる。

4) 高速筋力

一般的に、筋が収縮したときに発揮できる張力や動作速度と発揮できる力との間には「力-速度関係」というものが知られている(2,9)。これは筋の収縮速度や動作速度が、遅いときは大きな張力や力を発揮でき、速いときは張力や力は小さくなる関係のことを言う。スプリントにおいては、徐々に疾走速度が増加するため、動作速度が速くなっても力-速度関係の中でいかに発揮できる力を大きくするかが疾走速度向上のために重要であると言える。Cormie ら(10)の研究によると、爆発的な力発揮を要するジャンプスクワットを行わせた結果、40m スプリントの30-40m 付近でのスプリントタイムが向上することを示しており、これは高速で運動しているときの力発揮が改善されたことによるものと推察できる。

4. スプリント力-速度プロファイル

上述のように、動作速度と力発揮の大きさの間には力-速度関係が知られているが、これは個人によって異なり、また、競技特性によっても異なることが知られている(27)。この個人差を評価するのには、近年、力-速度プロファイルと呼ばれる手法が確立され、任意の速度における鉛直方向の力発揮能力と水平方向の力発揮能力を評価するものがある(40)。特に任意の速度における水平方向の力発揮能力を評価するものをスプ

リントカー速度プロファイルと呼ぶ。スプリントカー速度プロファイルで評価している水平方向の力とは、つまり、進行方向の床反力からブレーキ成分となる床反力と空気抵抗による力を差し引いたものであり（図 1）、スプリントカー速度プロファイルではこの力を水平方向の床反力とみなしている(40)。

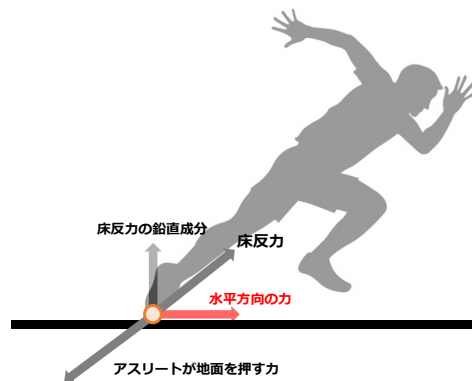


図 1 スプリントカー速度プロファイルで評価している力 スプリントカー速度プロファイルで評価している力とは水平方向の力である。これは床反力の推進成分から進行方向とは逆向きに作用する床反力のブレーキ成分と空気抵抗を差し引いたものであり、床反力計から得られた水平方向の床反力と一致する(34)。

スプリントカー速度プロファイルから得られる水平方向の床反力は、スプリント中の時間－速度データ、もしくは時間－位置データから加速度を求め、求めた加速度と走者の体重をニュートンの第 2 法則に代入することで算出される推定値である(40)。あくまで推定値であるという点は考慮しなければならないが、床反力計を用いて実測した水平方向の床反力と非常に高い精度で一致することが Morin ら(34)の研究で報告されている。そこで、本研究では、スプリントカー速度プロファイルを用いて水平方向の力発揮を評価する。以下にスプリントカー速度プロファイルの作成過程を示す。

第一に、最大努力のスプリント中の時間と疾走速度の関係は、最大疾走速度が出現するまで指数関数的に疾走速度が速くなることが報告されていて、以下の式のように任意の時間 t に対する疾走速度 v と最大疾走速度 v_{max} をモデル化できることが知られている(4,13)。

$$v(t) = v_{max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad [1]$$

[1]を時間について積分すると任意の時間 t に対する位置 x の式が得られる(40)。

$$x(t) = v_{max} \cdot \left(t + \tau \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}\right) - v_{max} \cdot \tau \quad [2]$$

また、[1]を時間について微分すると任意の時間 t に対する加速度 a の式が得られる(40)。

$$a(t) = \frac{v_{max}}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [3]$$

Samozino らは、30-40m スプリントから得られる時間－位置データ（任意のゲートを通過した時のスプリットタイム）を[2]の式に適合するように Microsoft Excel の Solver 機能を用いて最適化計算することで v_{max} と τ を算出する方法を提案している(40)。この方法によって得られた v_{max} と τ を[3]の式に代入することで任意の時間 t に対する加速度 a が求められる。この値に加えて、走者の体重と空気抵抗 F_{aero} を以下の[4]の式に代入することで任意の時間 t に対する水平方向の床反力 F が得られる(40)。

$$F(t) = m \cdot a(t) + F_{aero}(t) \quad [4]$$

空気抵抗 F_{aero} は以下の[5]の式から得られることが報告されている(4)。

$$F_{aero}(t) = k \cdot \{v(t) - v_w\}^2 \quad [5]$$

ここで v_w は風速を表し、 k は空気摩擦係数を表す。空気摩擦係数は走者の身長と体重および気温と気圧から求められる。以上が任意の時間に対する水平方向の床反力を算出する過程であり、任意の時間に対する速度と水平方向の床反力からスプリントカー速度プロファイルが作成される。なお、光電管を用いてスプリントカー速度プロファイルを作成する場合、30m スプリントの少なくとも 3 つ以上の地点の時間－位置データ（10、20、30m 地点のスプリットタイム）を取得することで信頼性の高いスプリントカー速度プロファイルを作成できることが報告されている(18)。また、光電管を用いる場合、0-10m のスプリットタイムは動き出してから 0m 地点のゲートを通過するまでの時間を考慮できていないため、スタート姿勢から動き出して 0m 地点のゲートを通過するまでの時間を考慮する必要がある(45)。

III. 方法

1. 被験者

被験者は、運動習慣のある 18-30 歳の男性 15 名とした（年齢： 22.5 ± 1.7 歳、身長： 170.4 ± 8.2 cm、体重： 65.3 ± 7.0 kg）。実験に先立ち、本研究の目的、内容および危険性について説明を行った上で、実験参加の同意を得た。なお、本研究は早稲田大学学術研究倫理委員会の承認を得て、実験は早稲田大学における学術研究倫理に係るガイドラインに従って実施された【申請番号：2022-462】。

2. 実験概要

本研究における実験の流れを図 1 に示した。被験者に統一された準備運動（w-up）を指示し、それを完遂した後に腕振りあり条件と腕振りなし条件で最大努力の 30m スプリントを 2 本ずつ実施した。0m、10m、20m、30m 地点に設置した光電管から 30m スプリントのスプリットタイムを取得し、得られたスプリットタイムからスプリント力-速度プロファイルを作成して、水平方向に発揮した力を評価した。

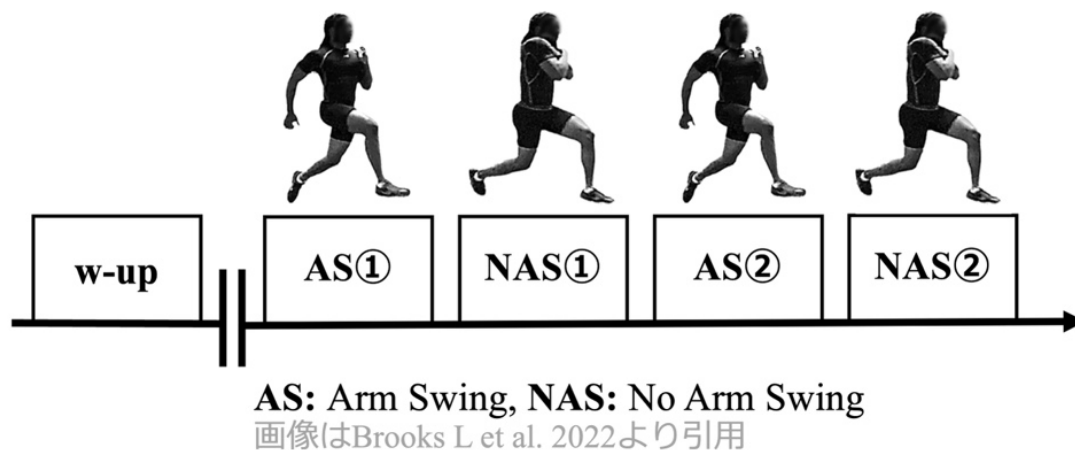


図2 実験の流れ

3. 実験手順

実験は風速の影響をなくするために屋内運動施設である体育館で実施した。被験者の服装は半袖およびハーフパンツとして、シューズは任意のランニングシューズとした。w-up 前に被験者の身長と体重を測定した。また、スプリントカー速度プロファイルを作成するために必要な室温と気圧もこの時点に測定した。室温と気圧の測定には、デジタル気圧・温度・湿度計（TR-73U、株式会社ティアンドデイ）を使用した。

実験前は被験者に統一された w-up を指示した。w-up は、5 分間のジョギングを行なった後に、Turki ら(46)の研究を参考に大殿筋、ハムストリングス、股関節外転/外旋筋群、股関節内転/内旋筋群、大腿四頭筋、下腿三頭筋のダイナミックストレッチを行なった。その後、最大努力の 50% の 20m スプリント（腕振りあり条件と腕振りなし条件で 1 本ずつ）、最大努力の 80% のスプリント（腕振りあり条件と腕振りなし条件で 1 本ずつ）を行なった。加えて、被験者の任意で、腕振りなし条件のスプリントに慣れる

まで、また、最大努力のスプリントを実施できる準備が整うまで w-up を行なわせた。

w-up 後、被験者は最大努力の 30m スプリントを腕振りあり条件と腕振りなし条件で交互に 2 本ずつ行なった。各条件のスタート姿勢はスタンディングスタートの姿勢とした。腕振りなし条件のスタートおよび疾走中の姿勢は図 2 のように胸の前で腕を交差させ、手は肩に置くように指示した。本試技における腕振り条件の順番は被験者によって無作為に割り当てた。各スプリント間の休憩時間は被験者の任意で十分に疲労が回復するまでとした。

30m スプリント中は 0、10、20、30m 地点に設置した光電管 (Brower Timing Systems, USA) から 10m ごとのラップタイムを得た。光電管の高さは 0m 地点を 1.0m として、その他の地点は 1.3m として設置した。スタート位置は 0m 地点から 0.5m 後方とした (12)。また、タイムシフトを算出するために、iPhone 14 pro を 0m 地点から 5m 離れた被験者の進行方向に対して右側面に設置し、240fps のハイスピードカメラで動き出しから 0m 地点のゲートを通過するまでの動作を撮影した。

4. データ分析

分析対象とするデータは、各条件で 2 本走った内の優れている方の 30m タイムとした。得られたラップタイムおよび身長、体重、室温、気圧のデータからスプリントカー速度プロファイルを作成した(12,20,34,40)。

また、スプリントカー速度プロファイルを算出する際は、0-30m の各区間のラップタイムだけでは疾走速度を過大評価してしまうため(12)、被験者が動き出してから最初の0m 地点のゲートを切るまでの時間（タイムシフト）を考慮に入れる必要がある。本研究では足関節の背屈が始まった時点「動き出し」と定義し、頭部が最初のゲートの高さに置かれたポールを通過するまでの時間をタイムシフトとした。タイムシフトの算出はスマートフォンアプリケーション（Jump Eye, Hikaru Ono）を用いて行い、目視によるフレーム選択によってタイムシフトを算出した(14,39)。

5. 統計解析

統計学的処理には SPSS statistics 29.0（IBM 社製）を用いた。データの正規性は Shapiro-Wilk 検定を用いて確認した。ラップタイムおよび各区間の水平方向に発揮した力の比較には、区間（0-10m vs 10-20m vs 20-30m）と条件（腕振りあり vs 腕振りなし）を要因とする反復測定二元配置分散分析を行った。データの球面性は Mauchly の球面性検定を用いて確認し、球面性が仮定されない場合は Greenhouse-Geisser の補正を行なった。事後検定は Bonferroni 補正を用いた対応のある t 検定を行なった。F₀、V₀、 τ の比較には対応のある t 検定を用いた。効果量は cohen's d を算出し、 $0.20 \leq d < 0.50$ を small、 $0.50 \leq d < 0.80$ を medium、 $0.80 \leq d$ を large とした。なお、有意水準は 5%未満とし、全てのデータは平均値±標準偏差で示した。

IV. 結果

1. 被験者特性

表 1 に被験者の特性を示した。年齢は 22.5 ± 1.7 歳、身長は 170.4 ± 8.2 cm、体重は 65.3 ± 7.0 kg であった。

表 1 被験者特性 (n = 15)

年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (kg)
22.5 ± 1.7	170.4 ± 8.2	65.3 ± 7.0

2. ラップタイム

ラップタイムを表 2 および図 3 に示した。反復測定二元配置分散分析の結果、区間と条件に有意な主効果が認められた (区間: $p < 0.01$; $F = 1668.9$; 偏 $\eta^2 = 0.99$ 、条件: $p < 0.01$; $F = 63.6$; 偏 $\eta^2 = 0.82$)。一方、区間と条件の間に有意な交互作用は認められなかった。事後検定の結果、腕振りあり条件と腕振りなし条件のいずれにおいても走行距離の増加に伴いラップタイムは有意に短縮された ($p < 0.01$)。なお、腕振りなし条件における変動係数は 1 本目と 2 本目のどちらも 0.04 であった。

表 2 ラップタイムの比較

区間 (m)	ラップタイム (秒)	
	腕振りあり	腕振りなし
0 - 10	2.07 ± 0.12	2.15 ± 0.07
10 - 20	1.28 ± 0.06	1.35 ± 0.07
20 - 30	1.21 ± 0.06	1.27 ± 0.06

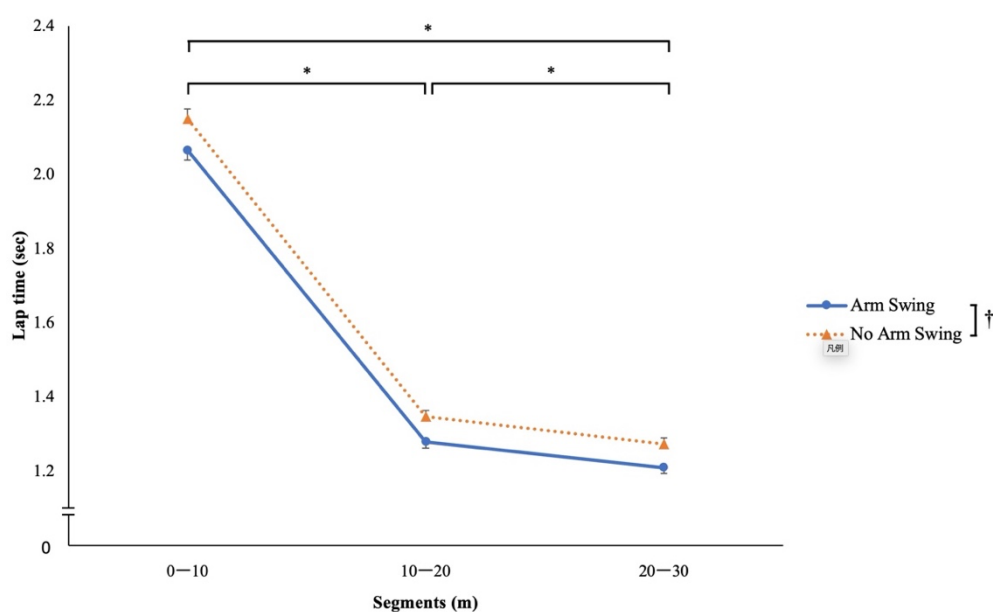


図 3 ラップタイムの比較 Segments effect: * $p < 0.01$, Arm conditions effect: † $p < 0.01$

3. スプリントカー-速度プロファイルの比較

スプリントカー-速度プロファイルの各変数の結果を表 3 に示した。対応のある t 検定の結果、 V_0 の腕振りあり条件と腕振りなし条件の間に有意差が認められた ($p < 0.01$)。一方で、 F_0 には有意差は認められなかった。

表 3 スプリント力-速度プロファイルの各変数の比較

変数	腕振りあり	腕振りなし	<i>p</i> -value	Cohen's <i>d</i>	95%信頼区間
F_0 (N/kg)	8.37 ± 1.34	7.76 ± 0.84	0.06	0.52	-0.26; 1.06
V_0 (m/s)	8.89 ± 0.53	8.40 ± 0.58	<0.01	1.35	0.63; 2.05

4. 各区間における水平方向の力発揮の比較

各区間における水平方向に発揮した力を図 4 に示した。反復測定二元配置分散分析の結果、区間と条件に有意な主効果が認められた（区間: $p < 0.01$; $F = 1642.6$; 偏 $\eta^2 = 0.99$ 、条件: $p < 0.01$; $F = 58.1$; 偏 $\eta^2 = 0.81$ ）。また、区間と条件の間に有意な交互作用が認められた（ $p < 0.01$; $F = 9.8$; 偏 $\eta^2 = 0.41$ ）。事後検定の結果、腕振りあり条件と腕振りなし条件のいずれにおいても走行距離の増加に伴い水平方向に発揮した力は有意に低下した（ $p < 0.01$ ）。また、0-10m、10-20m、20-30m のいずれの区間においても腕振りなし条件の方が腕振りあり条件よりも水平方向に発揮した力が有意に低かった（0-10m: $p < 0.01$; $F = 28.1$; 偏 $\eta^2 = 0.67$ 、10-20m: $p < 0.05$; $F = 5.1$; 偏 $\eta^2 = 0.27$ 、20-30m: $p < 0.01$; $F = 12.6$; 偏 $\eta^2 = 0.48$ ）。

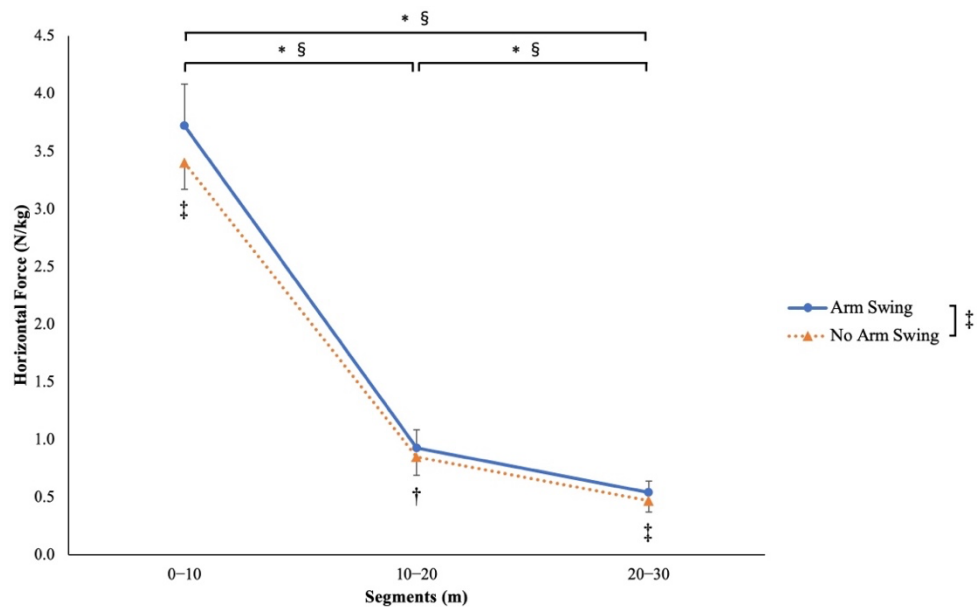


図 4 水平方向に発揮した力の比較 Segments effect: * $p < 0.01$ (Arm Swing), § $p < 0.01$ (No Arm Swing); Arm conditions effect: † $p < 0.05$, ‡ $p < 0.01$

V. 考察

本研究の目的は、腕振りがスプリント中の水平方向の力発揮に及ぼす影響を明らかにすることであった。水平方向の力発揮はスプリント力-速度プロファイルを用いて評価した。分析の結果、腕振りあり条件と比較して腕振りなし条件において、30m スプリントの全区間の水平方向に発揮した力の低下が認められた。とくに 0-10m 区間の水平方向の力発揮が低くなる傾向が見られた。

1. ラップタイムの比較

本研究では、腕振りあり条件と比較して腕振りなし条件において、全てのラップタイムが有意に低かった。これは同様の研究デザインである Brooks ら(8)の先行研究とは一致しない結果である。Brooks らの研究ではラップタイムの有意な低下は認められなかった。Brooks らは、合計で3回のセッションを設けていて、分析対象としたデータは2回のセッションを経た3回目のデータとしている。1、2回目のセッションは腕振りなし条件のスプリントを繰り返しているため、被験者は腕振りなし条件のスプリントに適応した可能性がある。一方、本研究は1回のみのセッションであり、腕振りなし条件のスプリントの練習を w-up で行っているため、本研究に参加した被験者が腕振りなし条件のスプリントに完全には適応せず、ラップタイムの低下率が Brooks らの先行研究と比較して大きかった可能性がある。しかし、先行研究と本研究のいずれにしても腕

振りなし条件におけるスプリントのラップタイムは減少傾向にある。したがって、腕振りはスプリントに影響を及ぼすことが考えられる。

2. スプリント力-速度プロファイルの比較

本研究では、腕振りあり条件と比較して腕振りなし条件において、 V_0 が有意に低かった。一方で、 F_0 には有意差が認められなかった。

V_0 は理論上の最大疾走速度であり、先行研究では、腕振りを制限することで最大努力のスプリントのラップタイムや疾走速度が低下することが報告されているため (8,30)、本研究の腕振りなし条件において V_0 が低下したことは先行研究の結果と一致している。一方、 F_0 は水平方向に発揮できる力の理論上の最大値であるが、 F_0 に条件間の有意差は認められなかった。しかし、 $p = 0.06$ 、Cohen's $d = 0.52$ 、95%信頼区間が -0.26 から 1.06 の範囲であり、また、本研究では、腕振りなし条件において、他の区間と比較して 0-10m 区間の力発揮が低い傾向にあるという結果が得られている。したがって、本研究の結果だけでは腕振りを制限することで F_0 が低くなる可能性は完全には否定できない。本研究の被験者は 15 名であったことから、被験者が少なかったことは有意差を認めなかった一因と考えられる。

3. 水平方向に発揮した力の比較

スプリントカー速度プロファイルを用いて水平方向の発揮した力を分析した結果、全区間において条件間との有意差が認められた。とくに腕振りなし条件の 0-10m 区間において、水平方向に発揮した力が低下する傾向にあった。この結果から腕振りがスプリント中の床反力にどのような影響を及ぼすか窺い知ることができる。

スプリントカー速度プロファイルはアスリートが地面に対して発揮した水平方向の力を分析する手法であるが、0-10m 区間においては、アスリートは地面に対して身体を前傾させて走るため(7,28)、アスリートにとっては鉛直方向の力発揮をして水平方向の推進力を得ることが考えられる。したがって、腕振りなし条件において 0-10m 区間の水平方向の力発揮が低かったことは、すなわち、腕振りはアスリートにとって鉛直方向の力発揮に影響を及ぼす可能性がある。

アスリートの鉛直方向の力発揮がスプリントに及ぼす影響に関しては、鉛直方向に力発揮をする代表的なエクササイズである SQ の 1RM とスプリントタイムについて、とくに疾走距離が短くなるほど SQ1RM とスプリントタイムとの相関が高くなることが報告されている(41)。したがって、0-10m 区間においては、アスリートの鉛直方向の力発揮能力が水平方向の床反力を獲得することに貢献するため、加速局面の特に初速を高めるためにはアスリートは鉛直方向に力を発揮する能力を高める必要があると考えられる。

Feltner ら(11)や Hara ら(15,16)は腕振りが鉛直方向の力発揮に及ぼす影響を明らかにしている。この研究では、鉛直方向の力発揮を必要とするカウンタームーブメントジャンプ (CMJ) において、腕振りあり条件と腕振りをなし条件の跳躍高を比較したとき、腕振りあり条件の方が下肢関節のトルクと跳躍高が有意に高かったという結果が得られている。そのメカニズムとして、腕振りを行うことで鉛直下向きに負荷が加わることで下肢関節の角速度が遅くなり、力-速度関係から筋の収縮速度が遅くなることで発揮できる力が大きくなった結果、関節トルクの増大、ひいては跳躍高の向上に貢献したと考察している。また、ジャンプのみならず、走動作においても腕振りは鉛直方向の力発揮に影響を及ぼす可能性が先行研究で示唆されている。腕振りがランニングに与える影響を調査した Hinrichs(22)は、腕振りは身体重心に対する揚力を生み出すと考察している。その後、腕振りがランニング中の床反力に与える影響を調査した Miller ら(32)は、腕振りを制限することで鉛直方向の床反力が 10%ほど低下することを報告している。以上のことから、腕振りはアスリートの鉛直方向の力発揮に影響を及ぼす可能性が高く、0-10m 区間のスプリントにおいてもジャンプと同様のメカニズムによって、腕振りをなし条件における力発揮が低下した可能性がある。

これらの知見は 0-10m の初期加速において、腕振りが水平方向の力発揮に及ぼす影響であるが、疾走速度がプラトーに到達する 20-30m の最大疾走局面での腕振りの役割とは異なると考えられる。最大疾走局面の走動作は立脚期と遊脚期に分けられ、

アスリートは足を接地してからミッドサポートを経てテイクオフ、フォロースルーという流れで脚を後方にスイングする。最大疾走局面においては脚の後方へのスイングスピードが疾走速度と正の相関を示すことが報告されている(26,37)。腕振りがスプリントの最大疾走局面に及ぼす影響を調査した前田と三木(30)は、腕振りを制限することでピッチとストライドの低下による疾走速度の低下が認められたとして、また、離地距離と下肢の角運動量の低下により下肢の後方のスイングが十分に行われなかったことを報告している。Hinrichs(21)は腕振りの役割のひとつに下肢の角運動量と逆位相の角運動量を生み出し身体全体のバランスを保持することを報告している。したがって、腕振りを制限することで下肢の角運動量を相殺するだけの上肢の角運動量を生み出せず、結果的に下肢の角運動量も低下せざるを得なくなることが推察される。西守と伊藤(36)は疾走速度が増加するにつれて骨盤回旋角度振幅が大きくなることを示していて、このことは疾走速度を向上させるためには骨盤の回旋可動域を大きくする必要があることを示唆している。これらのことから、最大疾走局面において、腕振りは下肢の角運動量を相殺してスプリント中のバランス保持に貢献するとともに、脚を後方にスイングするためにも腕振りが貢献している可能性がある。

本研究では、2つの限界が考えられる。第一に、サンプルサイズが小さいことである。本研究の被験者は15名であるが、類似した方法であるBrooksら(8)の先行研究では被験者が17名であることから被験者が少ない可能性がある。第二に、スプリントカー速

度プロフィールは詳細に力発揮を評価できない点である。水平方向の力発揮は進行方向に作用する推進成分と進行方向とは逆方向に作用するブレーキ成分に分けられるが、スプリントカー速度プロフィールはそれらの差である水平成分しか評価できない。したがって、床反力計を用いたときのように詳細に評価できない点は本研究の限界であると考えられる。しかし、スプリントカー速度プロフィールを用いたことで、疾走区間全域に渡り水平方向の力発揮を評価できたことは本研究の利点とも考えられる。

4. 現場への応用と今後の展望

本研究では、腕振りが水平方向の力発揮に影響を及ぼす可能性が示唆され、とくに0-10m の初期加速の区間の水平方向の力発揮に影響を及ぼす可能性が示唆された。したがって、腕振りは初期加速において重要な役割を果たす可能性があり、ショートスプリントが多い球技系のアスリートは腕振りを効果的に使うことでスプリントの疾走速度を高められると考えられる。本研究では、腕振りがスプリント中の水平方向の力発揮にどのような影響を及ぼすのかを検討するのに留まっているため、今後は、どのような腕振りがスプリントに貢献するのか、すなわち、バイオメカニクス、上半身の形態学的特徴、体力的特徴の観点から腕振りとスプリントの関連を明らかにしていくことが期待される。

VI. 結論

本研究は、腕振りがスプリント中の水平方向の力発揮に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、スプリントカー速度プロファイルを用いて 30m スプリントを分析した結果、腕振りを制限することで初期加速区間（0-10m）の水平方向の力発揮に影響を及ぼすことが示唆された。

参考文献

1. 阿江通良, 藤井範久. スポーツバイオメカニクス20講. 第1版. 朝倉書店, 2002.
2. Alcazar, J, Csapo, R, Ara, I, and Alegre, LM. On the shape of the force-velocity relationship in skeletal muscles: The linear, the hyperbolic, and the double-hyperbolic. *Front Physiol* 10, 2019.
3. Arellano, CJ and Kram, R. The metabolic cost of human running: Is swinging the arms worth it? *Journal of Experimental Biology* 217: 2456–2461, 2014.
4. Arsac, LM and Locatelli, E. Modeling the energetics of 100-m running by using speed curves of world champions. *J Appl Physiol* 92: 1781–1788, 2002.
5. Bachero-Mena, B, Pareja-Blanco, F, Rodríguez-Rosell, D, et al. Relationships between Sprint, Jumping and Strength Abilities, and 800 M Performance in Male Athletes of National and International Levels. *J Hum Kinet* 58: 187–195, 2017.
6. Barr, MJ and Nolte, VW. Which Measure of Drop Jump Performance Best Predicts Sprinting Speed? *J Strength Cond Res* 25: 1976–1982, 2011.
7. Bezodis, NE, North, JS, and Razavet, JL. Alterations to the orientation of the ground reaction force vector affect sprint acceleration performance in team sports athletes. *J Sports Sci* 35: 1817–1824, 2017.
8. Brooks, LC, Weyand, PG, and Clark, KP. Does restricting arm motion compromise short sprint running performance? *Gait Posture* 94: 114–118, 2022.
9. Cormie, P, McCaulley, GO, and McBride, JM. Power versus strength-power jump squat training: Influence on the load-power relationship. *Med Sci Sports Exerc* 39: 996–1003, 2007.
10. Cormie, P, McGuigan, MR, and Newton, RU. Adaptations in athletic performance after ballistic power versus strength training. *Med Sci Sports Exerc* 42: 1582–1598, 2010.
11. Feltner, ME, Frascetti, DJ, and Crisp, RJ. Upper extremity augmentation of lower extremity kinetics during countermovement vertical jumps. *J Sports Sci* 17: 449–466, 1999.
12. Fornasier-Santos, C, Arnould, A, Jusseaume, J, et al. Sprint Acceleration Mechanical Outputs Derived from Position– or Velocity–Time Data: A Multi-System Comparison Study. *Sensors* 22, 2022.
13. Furusawa, K, Hill, AV, and Parkinson, JL. The dynamics of “sprint” running. *Proceedings of the Royal Society of London Series B, Containing papers of a biological character* 102: 29–42, 1927.
14. García-Pinillos, F, Bujalance-Moreno, P, Lago-Fuentes, C, et al. Effects of the menstrual cycle on jumping, sprinting and force-velocity profiling in resistance-trained women: A preliminary study. *Int J Environ Res Public Health* 18, 2021.
15. Hara, M, Shibayama, A, Takeshita, D, and Fukashiro, S. The effect of arm swing on lower

- extremities in vertical jumping. *J Biomech* 39: 2503–2511, 2006.
16. Hara, M, Shibayama, A, Takeshita, D, Hay, DC, and Fukashiro, S. A comparison of the mechanical effect of arm swing and countermovement on the lower extremities in vertical jumping. *Hum Mov Sci* 27: 636–648, 2008.
 17. Haugen T, Tønnessen E, and Seiler S. Anaerobic Performance Testing of Professional Soccer Players 1995–2010. *Int J Sports Physiol Perform* 8: 148–156, 2013.
 18. Haugen, TA, Breitschädel, F, and Samozino, P. Power-Force-Velocity Profiling of Sprinting Athletes: Methodological and Practical Considerations When Using Timing Gates. *J Strength Cond Res* 34: 1769–1773, 2020.
 19. Haugen, TA, Tønnessen, E, Hisdal, J, and Seiler, S. The role and development of sprinting speed in soccer. *Int J Sports Physiol Perform*. 9: 432–441, 2014.
 20. Healy, R, Kenny, IC, and Harrison, AJ. Profiling elite male 100-m sprint performance: The role of maximum velocity and relative acceleration. *J Sport Health Sci* 11: 75–84, 2022.
 21. Hinrichs, RN. Upper Extremity Function in Running. II: Angular Momentum Considerations. *International Journal of Sport Biomechanics* 3: 242–263, 1987.
 22. Hinrichs, RN, Cavanagh, PR, and Williams, KR. Upper Extremity Function in Running. I: Center of Mass and Propulsion Considerations. *International Journal of Sport Biomechanics* 3: 222–241, 1987.
 23. 廣橋健二, 相澤純也, 大見武弘, 大路駿介, 柳下和慶. 片脚垂直連続ホッピングにおけるReactive strength index計測の再現性. *日本臨床スポーツ医学会誌* 28: 291–297, 2020.
 24. Hunter, JP, Marshall, RN, and McNair, PJ. Interaction of Step Length and Step Rate during Sprint Running. *Med Sci Sports Exerc* 36: 261–271, 2004.
 25. Hunter, JP, Marshall, RN, and McNair, PJ. Relationships Between Ground Reaction Force Impulse and Kinematics of Sprint-Running Acceleration. *J Appl Biomech* 21: 31–43, 2005.
 26. 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.
 27. Jiménez-Reyes, P, Samozino, P, García-Ramos, A, et al. Relationship between vertical and horizontal force-velocity-power profiles in various sports and levels of practice. *PeerJ* 2018, 2018.
 28. King, D, Burnie, L, Nagahara, R, and Bezodis, NE. Relationships between kinematic characteristics and ratio of forces during initial sprint acceleration. *J Sports Sci* 40: 2524–2532, 2022.
 29. Kraemer, WJ, Duncan, ND, and Volek, JS. Resistance training and elite athletes: Adaptations and program considerations. *J Orthop Sports Phys Ther* 28: 110–119, 1998.
 30. 前田正登, 三木健嗣. スプリント走における腕振りの役割. *陸上競技研究* 80: 13–19,

- 2010.
31. Mero, A, Komi, P V., and Gregor, RJ. Biomechanics of Sprint Running: A Review. *Sports Medicine*. 13: 376–392, 1992.
 32. Miller, RH, Caldwell, GE, Van Emmerik, REA, Umberger, BR, and Hamill, J. Ground reaction forces and lower extremity kinematics when running with suppressed arm swing. *J Biomech Eng* 131, 2009.
 33. Moir, GL. Biomechanics of Fundamental Movements: Sprint Running. 2015. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/286779787>
 34. Morin, JB, Samozino, P, Murata, M, Cross, MR, and Nagahara, R. A simple method for computing sprint acceleration kinetics from running velocity data: Replication study with improved design. *J Biomech* 94: 82–87, 2019.
 35. Nagahara, R, Kanehisa, H, Matsuo, A, and Fukunaga, T. Are peak ground reaction forces related to better sprint acceleration performance? *Sports Biomech* 20: 360–369, 2021.
 36. 西守隆, 伊藤章. 歩行と走行の移動速度変化における骨盤と体幹回旋運動の相互相関分析. *理学療法学* 33: 318–323, 2006.
 37. 太田和希, 吉田拓矢, 小野響也, 前村公彦, 谷川聡. 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* 21096, 2022.
 38. Oxfeldt, M, Overgaard, K, Hvid, LG, and Dalgas, U. Effects of plyometric training on jumping, sprint performance, and lower body muscle strength in healthy adults: A systematic review and meta-analyses. *Scand J Med Sci Sports*. 29: 1453–1465, 2019.
 39. Romero-Franco, N, Jiménez-Reyes, P, Castaño-Zambudio, A, et al. Sprint performance and mechanical outputs computed with an iPhone app: Comparison with existing reference methods. *Eur J Sport Sci* 17: 386–392, 2017.
 40. Samozino, P, Rabita, G, Dorel, S, et al. A simple method for measuring power, force, velocity properties, and mechanical effectiveness in sprint running. *Scand J Med Sci Sports* 26: 648–658, 2016.
 41. Seitz, LB, Reyes, A, Tran, TT, de Villarreal, ES, and Haff, GG. Increases in Lower-Body Strength Transfer Positively to Sprint Performance: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Sports Medicine*. 44: 1693–1702, 2014.
 42. Slawinski, J, Houel, N, Moreau, C, Mahlig, A, and Dinu, D. Contribution of segmental kinetic energy to forward propulsion of the centre of mass: Analysis of sprint acceleration. *J Sports Sci* 40: 1282–1289, 2022.
 43. Smart, D, Hopkins, WG, Quarrie, KL, and Gill, N. The relationship between physical fitness and game behaviours in rugby union players. *Eur J Sport Sci* 14, 2014.
 44. Spencer M, Bishop D, Dawson B, and Goodman C. Physiological and metabolic responses of

- repeated-sprint activities- specific to field-based team sports. *Sports medicine* 35: 1025–1044, 2005.
45. Stenroth, L, Vartiainen, P, and Karjalainen, PA. Force-velocity profiling in ice hockey skating: reliability and validity of a simple, low-cost field method. *Sports Biomech* 22: 874–889, 2023.
 46. Turki, O, Chaouachi, A, Behm, DG, et al. The Effect of Warm-Ups Incorporating Different Volumes of Dynamic Stretching on 10- and 20-m Sprint Performance in Highly Trained Male Athletes. *J Strength Cond Res* 26: 63–72, 2012.
 47. Weyand, PG, Sternlight, DB, Bellizzi, MJ, and Wright, S. Faster top running speeds are achieved with greater ground forces not more rapid leg movements. *Journal of applied physiology (1985)* 89: 1991–1999, 2000.
 48. Wisløff, U, Castagna, C, Helgerud, J, Jones, R, and Hoff, J. Strong correlation of maximal squat strength with sprint performance and vertical jump height in elite soccer players. *Br J Sports Med* 38: 285–288, 2004.

謝辞

本研究は、指導教員である岡田純一教授のご指導のもと実施いたしました。岡田教授には研究の意義をはじめ、実験デザインやデータの解釈の仕方など、研究のいろはを懇切丁寧にご指導いただきました。岡田教授には心より感謝申し上げます。また、副査を快く引き受けてくださった広瀬統一教授、磯繁雄教授にも併せて御礼申し上げます。

208 研究室の皆様にも多大なるご協力を頂きました。岡田研究室の卒業生であり、現慶應義塾大学体育研究所特任助教の西岡卓也先生には本研究の構想からご協力いただき、さらには研究の世界の奥深さをご指導いただきました。岡田研究室助教の趙寒曄先生には、研究のみならず、大学院で活動する上で多くのご指導をいただき、特に修士2年目の2023年度は研究をより良くするための助言を多く頂きました。1学年上の先輩である秤谷名鷹さんには大学院に入学する前から面倒を見ていただき、私が研究に悩んでいるときは親身にご相談に乗っていただきました。また、岡田研究室のみならず、広瀬研究室や金岡研究室の方々とも会話をさせていただき機会が多く、様々な刺激をもらいました。深く御礼申し上げます。

岡田研究室の同期にはいつも元気をもらっていました。みんなで苦労しながら実施したバイオデックスや筋電図の測定、研究計画書を研究室に泊まり込みで書き上げたことは良い思い出です。下坂豪克さん、許博雷くん、小鷹翔大くん、藤原昂史くんのおかげでここまで頑張ることができました。ありがとう。

大学院進学と同時に世話になりはじめた合同会社 OneSelF のスタッフ一同にも大変お

世話になり心の支えでした。トレーナーとしてのみならず人としても大事なことを教えていただき、修士課程の2年間で大きく成長できたと思います。これからは正社員として、この2年間で培ったことを組織に還元し、OneSelfの一員として社会貢献していけるように日々精進いたします。引き続きどうぞよろしくお願いいたします。

最後に、大学院進学を快く応援してくれ、また、いつも私のことを気にかけて下さった両親をはじめ家族のみんなには心より感謝の意を表します。ありがとう。

2024年1月12日 根津直岐