

【総説】

疾走速度変化からみた疾走能力の評価

Evaluation of sprint ability in terms of changes in running speed

篠原 康男 (城西大学)

Yasuo SHINOHARA (Josai University)

前田 正登 (神戸大学)

Masato MAEDA (Kobe University)

陸上競技研究第121号 (2020. No.2) 抜刷, 2 ~ 14頁

Reprinted from Research Quarterly for Athletics No.121 (2020. No.2), pp.2-14

【総説】

疾走速度変化からみた疾走能力の評価

Evaluation of sprint ability in terms of changes in running speed

篠原 康男 (城西大学)

Yasuo SHINOHARA (Josai University)

前田 正登 (神戸大学)

Masato MAEDA (Kobe University)

1. はじめに

走運動は人間の基本運動の一つであり、これまでに様々な観点から研究が行われてきた。その中でも、疾走速度に関する研究は、古くは19世紀末にE.J. Mareyによって行われていたといわれている(猪飼ほか, 1963)。20世紀に入って以降、今日に至るまでも様々な手法を用いて疾走速度に関する検討は進められており、疾走能力の分析には欠かせない視点となっている。疾走速度の測定は、一定距離間隔毎の時間(通過時刻)を測定し、時間微分することで平均速度を算出してその大きさを求めるという手法(光電管など)が一般的である。しかし、このようにして算出された平均速度および算出法では、距離間隔の設定によっては疾走速度の瞬間的な変化を検討することが難しい場合もある。例えば、短距離走における100m走では、静止した状態から疾走を開始して以降、疾走速度は最大疾走速度へと漸増し、最大疾走速度に達して以降は、フィニッシュに向けて漸減していくの

が一般的である(図1)。また、レース中の最大疾走速度はレースの記録と有意な強い負の相関関係にあることが報告されており(松尾ほか, 2010)、出し得る最大疾走速度の大きさが疾走能力の評価指標となっている。そのため、最大疾走速度の大きさは、時々刻々と変化する中での瞬間的な値として捉える必要があり、その測定には、一定時間間隔毎の位置変化として検討する手法(レーザー速度測定器による測定など)が有効となる。ただし、いずれの測定手法を用いるにしても、疾走の一部の局面だけを切り取って検討するのではなく、疾走区間全体における速度変化として検討することで、疾走能力を多角的に検討することが可能となるものである。

本稿では、疾走速度変化の測定や分析、疾走速度変化を用いた疾走能力の評価について、疾走速度変化に関する著者らの研究も紹介しながら概説する。

2. 疾走速度変化の測定

2.1. 一定距離間隔毎の通過時間をもとにした疾走速度の測定

疾走速度の測定は古くから行われているが、20世紀の初め頃は電気的な方法を用いて測定されていた。Furusawa et al. (1927)は、図2の左図のような実験構成で60ヤード(約55m)と200ヤード(約183m)の疾走速度変化の測定を試みた。この手法は、走者の胸か腰に磁石を固定し、一定の距離間隔で設置した柱にコイルを取り付け、走者が通過した際に流れる電流を検出するものである。図2の右のグラフは200ヤードの各計測地点(1, 3, 6, 10, 15, 20ヤード, 以降は20ヤード刻みの計15地点)を走者が通過した際に流れた

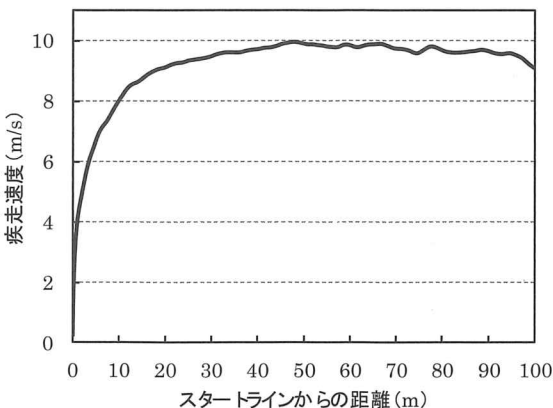


図1 100m走における疾走速度変化の一例(篠原・前田, 未公表データ)

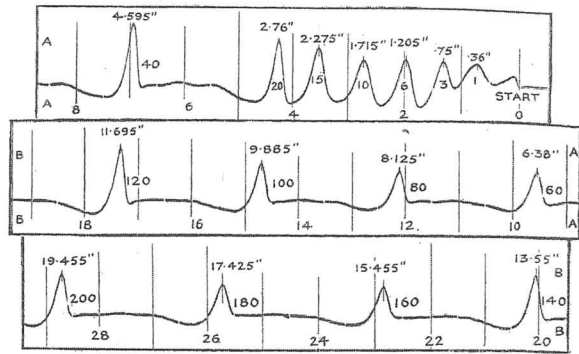
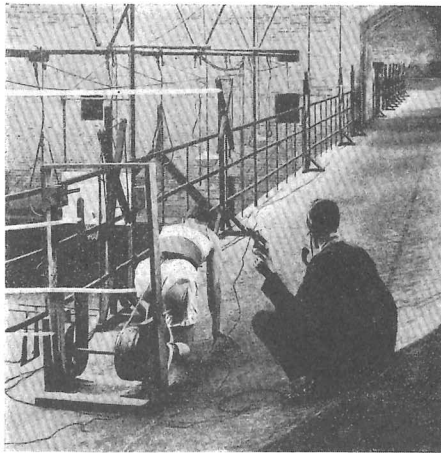


図2 コイルを用いた疾走速度変化の測定 (左: Best and Partridge, 1928; 右: Furusawa et al., 1927)

電流を検流計で測定し、オシログラフにより出力したものである。縦線は0.683秒間隔で、スタート以後の時間経過を表しており、Furusawa et al. (1927) は、得られた通過時刻を元に疾走速度変化の検討を行っている。概ね一定距離間隔での測定ではあるものの、スタート直後は他の地点に比べて測定地点が多く設置されており、疾走速度が急峻に変化する初期加速局面をできるだけ詳細に検討しようとしたことが窺える。

電氣的な計測方法は他にもみられているが、その中でも光電管を用いた測定は、現在でも用いられることの多い代表的な測定方法であろう。光電管は投光器と受光器からなり、投光される光が遮られた時に、受光器内部に組み込まれた光導電セルの抵抗値が変化し、電流が生じるという仕組みである。測定の際には、走路を挟んで投光器と受光器が向かい合うように設置する (図3)。猪飼ほか (1963) は、光電管を用いて、幅広い年齢層

の被験者および競技者を対象に疾走速度変化の測定 (6~11歳は50m, 12歳以上は100m) を行った。被験者は、6~20歳の男子360名, 6~18歳の女子318名, 五輪代表選手を含む男子短距離競技者47名, 女子短距離競技者6名の総計731名が対象であった。猪飼ほか (1963) も、Furusawa et al. (1927) と同じように初期加速局面を詳細に検討するために、スタート直後には測定地点を多く設けて (100mであれば1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30m, 以降は100mまで10m刻みの計16地点)、各測定地点に光電管を設置した。これらの各測定地点の通過時刻から、位置-時間変化を求め、その曲線を時間微分することで疾走速度変化を算出している。得られた疾走速度変化のデータからは、現在でも疾走速度変化の分析項目として用いられている加速度や最大疾走速度、速度減率を算出しており、当時の研究としては詳細に検討がなされている。得られた疾走速度曲線について、6~11歳の50mでは、年齢が増すごとに最大疾走速度や疾走速度変化の様態そのものが上昇すること、12~20歳の男子の100m走では、年齢が増すにつれて2次加速局面以降の速度や最大疾走速度の差が大きくなっていったことを報告している。また、最大疾走速度については、男子では13~14歳を境にそれ以降で急激に発達し、女子では14歳以降ほとんど発達していないことを報告している。

他の電氣的な計測方法として、Volkov and

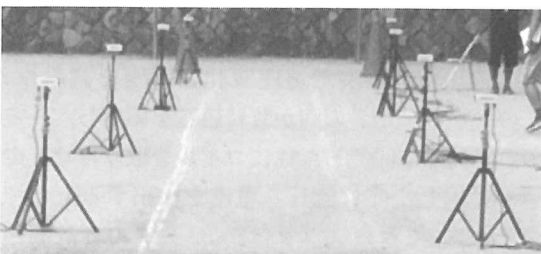


図3 走路に設置された光電管 (左列が投光器, 右列が受光器)

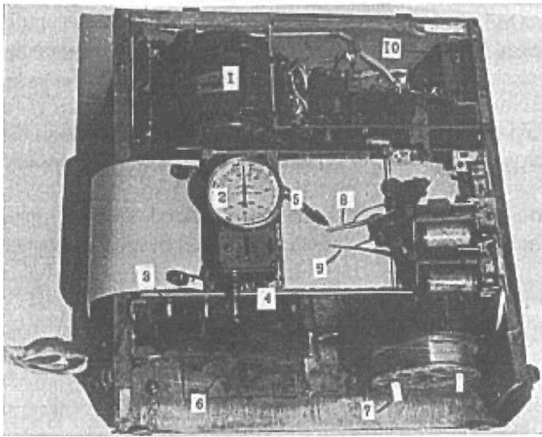


図4 巻き取り式のスピードメーター (Volkov and Lapin, 1979)

Lapin (1979) が、巻き取り式のスピードメーター (図4) を用いた測定で疾走速度変化の検討を行っている。スピードメーターによる測定は、当時としてはコイル式や光電管の測定に比べ、測定の構成がシンプルになるだけでなく、信頼性や携帯性に優れ、何より走者の位置変化を連続的に測定することが可能になり、画期的なものであった。Volkov and Lapin (1979) は図4のスピードメーターを用いて、短距離走競技者17名と初心者23名に150mの全力 (オールアウト) 走を行わせ、疾走速度変化を比較した。その結果、短距離走競技者は初心者に比べて最大疾走速度が高く、疾走タイムが短いことや、最大疾走速度と100mのタイムに有意な強い負の相関関係が認められたことを報告している。

スピードメーターは連続的に疾走速度を計測することはできるものの、コイル式や光電管と同じく、疾走速度を測定する専用の計測機器であり、高価であったことが推察される。一方で、専用の計測機器を用いなくとも、より安価にかつ手軽に疾走速度変化を測定できる手法には、ビデオカメラを用いた手法が挙げられる。図5のように、ビデオカメラと走路の通過地点 (測定地点) を結ぶ線上に棒などを設置し、走者が疾走する様子をビデオカメラでパニング撮影する。撮影後に得られた動画をコマ送りし、走者が棒を通過した瞬間がその地点に達した時刻として読み取ること、測定地点間の距離と合わせて、測定地点間の疾走速度を算出することが可能となる。ビデオカメラとそれをパニングするための三脚、通過時刻を特定するための棒状のものがあれば測定は可能となるため、小学生や中学生などの疾走能力の発達を検討する際に主に用いられた手法である (有川ほか, 2010; 池田ほか, 2013)。なお、ビデオカメラを用いた疾走速度変化の測定については、図5のような構成を設定できない場合、複数のカメラを用いて、各カメラを測定地点の延長線上に配置するという手法 (杉田・持田, 2002) もある。全てのカメラに疾走の合図 (スタートシグナルなど) を写し込むことで、スタートの合図から各測定地点に達するまでに要した時間を計測し、測定地点間の距離および所要時間をもとに疾走速度を算出するというものである。この手法は、特に陸上競技の競技会において、競技場のトラック内

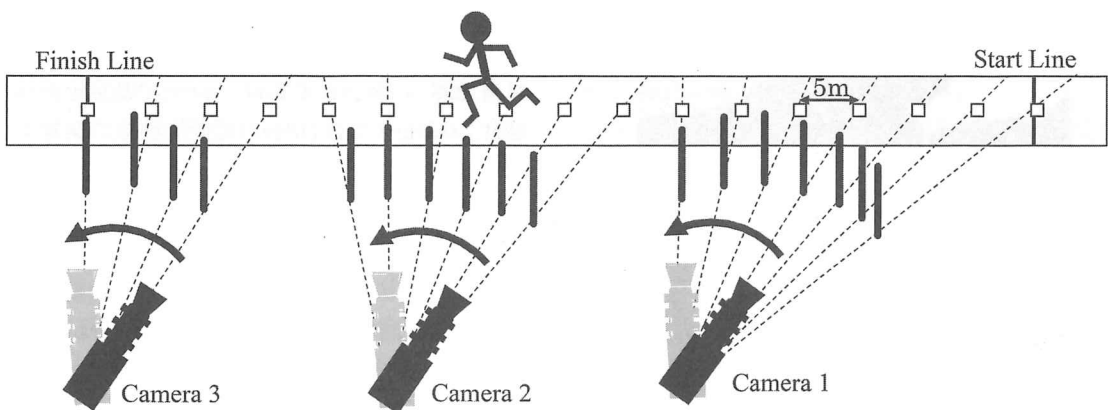


図5 カメラのパニングによる疾走速度の測定

にカメラを設置できない際に用いられており、競走種目の疾走速度変化について検討されてきた(阿江ほか, 1994; 沼澤・杉浦, 1994; 高橋ほか, 2012)。さらに近年では、走者が疾走する様子を撮影する前に測定地点の距離較正用の動画を撮影しておき、2つの動画をソフトウェア上で重ね合わせることで走者が測定地点を通過した時刻を読み取るというOverlay方式(持田ほか, 2007; 山元ほか, 2014)もみられている。

2.2. 一定時間間隔毎の移動距離をもとにした疾走速度の測定

これまでに紹介してきた疾走速度変化の測定手法は、いずれの方法も基本的には「測定地点を複数設定して通過時刻を測定することで、その区間の距離を移動するのに要した時間をもとめ、疾走速度やその変化を算出する」というものである。そのため、測定地点間の距離の設定によっては、疾走速度の瞬間的な変化を捉えることが困難な場合もある。特に、疾走速度変化を検討する上で欠かせない最大疾走速度については、測定地点間の平均速度として算出することになることから、最大疾走速度に到達した地点ではなく、到達区間といった特定区間の平均速度として検討されていた(阿江ほか, 1994; 加藤ほか, 2002)。また、最大疾走速度の到達時点についてはほとんど論じられていなかったが、そのことには測定値を各地点間の平均速度として算出していること、あるいは、到達距離にともなう疾走速度変化として表記されることが多かったことが背景にあるものと推察される。



図6 レーザー式速度測定器 (LDM301S, JENOPTIK)

これらの点を解決したのが、20世紀末頃から採用されているレーザー式速度測定器(図6)である。この測定方法であれば、対象者の疾走速度の変化を一定の時間間隔(1/100秒または1/2000秒間隔)での測定が一般的で連続的にかつ詳細に測定することが可能である。測定の原理としては、走者の背部にレーザービームを照射し、その反射光が返ってくるまでの時間から、時間—距離データを測定し、疾走速度を算出するというものである。なお、測定装置から照射されるレーザーの強さは安全規格で最も安全とされるクラス1であり、測定に関する危険性は極めて低いといわれている。測定の際には、レーザー式速度測定器をスタートライン後方(またはフィニッシュライン前方)に三脚で固定して設置し、疾走の一部始終において、対象者の腰部にレーザー光が当たるように、レーザー式速度測定器の向きを調整しつつ測定を行うことが一般的である。これは、レーザー式速度測定器が、その特性上、1直線上を移動するような運動でなければ正確に測定することができないためである。

なお、レーザー式速度測定器の測定誤差は、サンプリングレートが100Hzでの測定時には $\pm 2\text{cm}$ とされており、測定精度は高い。しかし、レーザー式速度測定器を用いて疾走速度の測定を行った場合、時間微分により得られる速度データにはノイズが含まれることが知られている(Harrison et al., 2005)。これは、人の疾走では接地期に減速と加速が繰り返して行われていること(福田・伊藤, 2004)や、対象者にレーザー光が当たるように測定器を操作する際の振動が含まれていること(金高, 1999)が影響しているものと考えられる。金高(1999)の報告によれば、50Hzで測定を行った場合、0.5Hzまたは1.0Hzの遮断周波数で測定データを平滑化すると適切にノイズを除去でき真の値を得ることができるとされる。なお、筆者らが2kHzで測定を行った事例で、Wells and Winter(1980)の方法により最適遮断周波数を算出すると、その範囲は3.8~5.0Hzであった(篠原ほか, 2012)。計測する際のサンプリングレートによって最適な遮断周波数が異なる可能性はあるものの、現状では100Hzのサンプリングレートで測定され

ることが多く、1.0Hz程度で平滑化を行うことによって疾走速度の瞬間的な変化を時間と距離の両面から十分検討することが可能になるものと考えられる。

また、Bezodis et al. (2012) によると、ビデオカメラの映像を元に身体各部をデジタイズしDLT法により身体重心を座標値化して得られる疾走速度と比較すると、レーザー式速度測定器により得られた疾走速度は、スタート後の最初の5m程度までは過大評価する可能性が高いことが報告されている。そしてこれらの比較検討から、疾走速度変化を検討する場合のレーザー式速度測定器の使用に際しては、疾走を開始してから10m以上の距離が経過（加速局面中期や最大疾走局面）していれば、疾走能力の評価に有用であると結論づけている。

このように、レーザー式速度測定器を用いて疾走速度変化を検討する場合、測定機器の特性を理解した上で、注意して測定や分析を行わなければならない。しかし一方で、従来までの疾走速度の測定手法に比べて、測定直後に疾走速度変化のデータを出力および表示することが可能であり、特に陸上競技の短距離走種目（100m, 110mH, 100mH）のレースや跳躍種目の試技、あるいはそれらの練習において、コーチや競技者に即時的にフィードバックできる点は競技者のパフォーマンス向上に大きく寄与できるものである（Harrison et al., 2005；Bezodis et al., 2012）。このことに関して、広川ほか（2005）は国内主要大会のレースにおける日本代表選手の疾走速度変化をレーザー式速度測定器により測定し、各レース時の最大疾走速度やその出現地点を選手にフィードバックしてレースパターンの検討を行っている。他にも、実際の競技会でのレースパターンに関して報告がなされている（広川ほか、2006；松尾ほか、2008；松尾ほか、2010）。

レーザー式速度測定器を用いた疾走速度の変化に関する研究は、陸上競技短距離走のレース分析に限ったものではない。高橋ほか（2013）は、ソフトボールの競技者と短距離走競技者の疾走速度変化を比較し、最大疾走速度の出現地点や疾走速度の立ち上がりの指標（最大疾走速度の63%到達

地点）の結果から、30m以上の疾走距離があれば疾走能力および加速能力の評価や競技種目に特化した能力を評価できることを報告している。また、黒須・中田（2010）は、野球の競技者とサッカーの競技者の疾走速度変化を比較し、加減速やスピード維持の観点から、競技特性に応じた測定距離があることを報告している。熊野ほか（2016）は、走幅跳競技者における最高疾走速度と助走速度の関係を検討し、助走最高速度は最高疾走速度よりも4%ほど有意に低く、現有する疾走能力をさらに活用することで助走速度を向上させる余地があることを報告している。

このように、レーザー式速度測定器を用いることで、瞬間的な速度を連続的に測定することができ、最大疾走速度出現地点など、より詳細に疾走能力を検討できるようになったといえる。その一方で、レーザー式速度測定器は「一定時間間隔毎の移動距離」をもとにした疾走速度の測定を行うことができ、時間と距離の両面から、疾走速度変化を検討することが可能となっている。しかし、これらの研究も含め、光電管やカメラを用いた測定と同様に疾走速度変化を検討する場合には到達距離にともなう推移や距離—速度関係に着目することが多い。確かに、走者を観察する側としては、疾走速度変化を到達距離の推移としてみることで、スタートしてからフィニッシュするまでに走者がどのように疾走していたのかが捉えやすい。しかし一方で、実際に疾走を行っている走者側の視点では、スタートしてからフィニッシュまでの各地点に到達する時間は個人によって異なるために、疾走している時間に関して疾走速度がどのように推移したのかについても検討しなければ疾走の実態を適切に捉えることはできない。

筆者らはレーザー式速度測定器を用いた測定結果を元に、疾走速度を到達距離にともなう変化と経過時間にともなう変化の2つの観点から検討を行ってきた。その一つに、球技系スポーツ種目の競技者と陸上競技の短距離走競技者の疾走速度変化を比較した研究がある（篠原ほか、2012）。この研究では、球技系スポーツの競技者（球技群）と短距離走競技者（陸上群）に静止または歩行からのスタート方法で50m程度の距離を疾走させ、

その際の疾走速度変化を比較した。図7は、短距離走競技者6名（陸上群）と野球の競技者12名（球技群）について、静止状態からスタートさせた際の疾走速度変化を到達距離（図7左）と経過時間（図7右）にともなう変化としてそれぞれ示したものである。図7より、到達距離にともなう変化と経過時間にともなう変化では、疾走速度の推移パターンが大きく異なっていることがわかる。また、陸上群と球技群を比較分析した結果、最大疾走速度は陸上群が球技群を有意に上回っていたものの、その出現時刻には差がみられなかった。一方で、球技群のサッカー群およびラクロス群において、静止状態からのスタートに比べて歩行からスタートする方が、出現地点および出現時点ともに早期に最大疾走速度に達するとの結果も得られた。これらのことから、球技の競技者の場合、競技場面に近いスタートでは、その種目の競技特性が疾走速度変化に影響することが示唆された。

疾走速度の経過時間にともなう変化に関しては、筆者らは、小学生男子児童（5年生と6年生）の50m走における疾走速度変化について、特に時間の観点から検討した（藤村ほか, 2014）。その結果、小学校高学年の児童においては、最大疾走速度出現時点は50m走タイムと有意な関係になかったものの、疾走速度維持時間（最大疾走速度の95%に達してからフィニッシュに到達するまでの時間）は疾走全体の約66%を占めており、50m走タイム

とも有意な正の相関関係が認められた。これらのことから、小学校高学年の児童の疾走タイムには、最大疾走速度に到達した後の全力疾走局面や速度維持局面において、疾走速度を維持できる時間の長さが影響することを明らかにした。また、加藤ほか（2013）も、小学生の50m走における疾走速度変化を最大疾走速度の到達距離および時間に着目して検討しており、学年が上がるにしたがって50m走タイムが有意に短縮し、最大疾走速度が有意に増加していたことを報告している。さらに、最大疾走速度到達時間には学年間で有意な差がなかったことから、小学校の体育授業で短距離走を取り扱う際には、疾走する時間を一定にし（6秒間走）、その時間で到達できる距離の目標を学年によって変えることを提案している。このように、疾走速度変化を時間という観点で捉えることにより、疾走タイムとの関係やその内容を検討することが可能となり、疾走の内容に踏み込んで検討することが可能となる。したがって、疾走速度変化を到達距離と経過時間の両面から検討することは重要な視点であるといえる。

3. 疾走速度変化をもとにした疾走特性および疾走能力の評価・検討

3.1. 最大疾走速度を基準とした局面構成

本稿の冒頭でも述べたように、短距離走では静止した状態から加速し、最大疾走速度に到達して

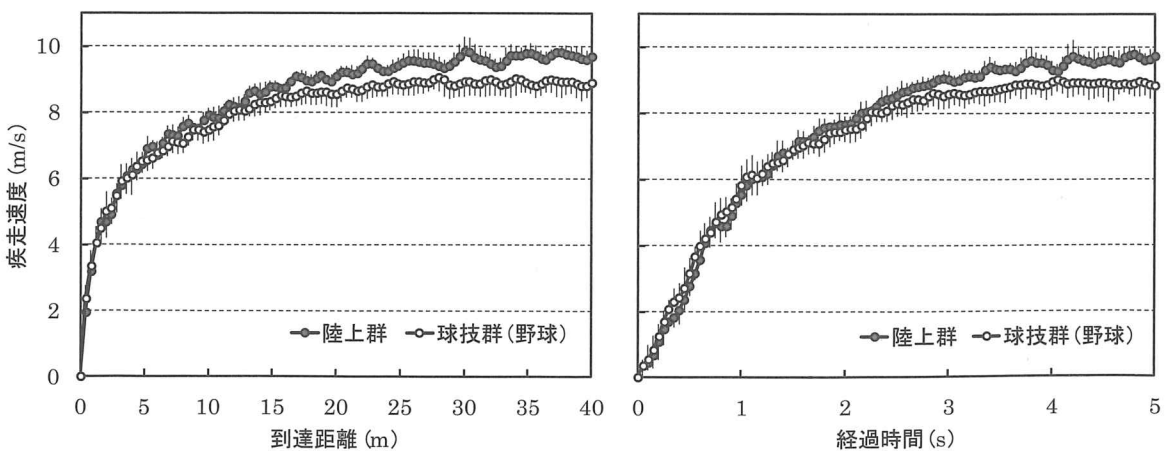


図7 陸上短距離走競技者と野球の競技者における到達距離および経過時間にともなう疾走速度変化（篠原ほか, 2012を著者改変）

以降は、疾走速度が漸減していく(図1)。このことから、疾走全体は疾走速度変化をもとに大別すると、加速疾走局面(以下、加速局面)、最大疾走局面(以下、疾走局面)、および、速度維持局面(以下、維持局面)の3つの局面に分けることができる(Volkov & Lapin, 1979; Mero et al., 1992; Mackala, 2007)。局面の分け方については、疾走中の最大疾走速度の98%を基準(加藤ほか, 2002)として分けられることが多いものの、これまでは一定区間ごとの区間平均速度をもとに検討されていたため、各局面を分ける地点や時点を特定することができず、詳細な局面の長さを検討することがほとんどできていなかった(加藤ほか, 2002; 池田ほか, 2013; 伊藤, 2007)。これらの問題点を解決するには、一定時間間隔での連続した疾走速度変化を測定できるレーザー式速度測定器による測定が有効となる。得られる時間—距離データおよび時間—速度データから、局面を距離だけでなく時間の長さからも検討することができ、疾走タイムがどのように構成されているのかについても検討することが可能となる。

筆者らは、小学校低学年から高学年までの児童を対象に、50m走の疾走速度変化を加速・疾走・維持の3つの局面に分け(図8参照)、小学生の50m走における各局面の構成と50m走タイムの関係について検討した(篠原・前田, 2016a)。被験者は小学校1年生から6年生の男子児童170名および女子児童179名とし、試技として、スタンディングスタートからの50m走を行わせ、レーザー式速度測定器を用いて、疾走速度変化を測定した。図9は、男子児童における50m走の局面構成を学年ごとに示したものである。図9の左のグラフは各学年の50m走における各局面の距離を示しており、それらの合計が50mとなって示されている。また、図9の右のグラフは各学年の50m走における各局面の時間を示しており、各局面の時間を足し合わせた横棒の長さが各学年の50m走タイムの平均値となって示されている。分析の結果、男女ともに高学年の児童は低学年の児童に比べて疾走タイムは有意に短く、最大疾走速度は有意に大きかった。また、高学年の児童は低学年の児童に比べて、加速距離および疾走距離が有意に長くなっ

ていたが、学年が異なっても、加速時間および疾走時間に有意な差はみられなかった。さらに、高学年の児童は低学年の児童に比べて、維持距離および維持時間が有意に短い疾走となっていた。以上のことから、小学生の50m走における局面構成については、疾走タイムが遅い低学年の児童は距離、時間ともに維持局面が大部分を占めることが明らかとなった。これは、前述した筆者らの研究(藤村ほか, 2014)で得られた速度維持時間の結果とも合致するものであり、小学校低学年にとっては50mの距離を疾走するには減速する距離および時間が長いために、走タイムへの影響も大きくなってしまおうといえる。一方、疾走タイムが速い高学年の児童では、加速局面と疾走局面の時間が低学年と変わらずとも、最大疾走速度の向上にもなって両局面の距離が長くなり、疾走全体に対する相対的な割合が増大していた。その結果、維持局面で走る距離が必然的に減少し、維持局面として疾走する時間(維持時間)も短くなることわかる。したがって、学年が上がるほど疾走タイムが減少していた主な要因は、維持時間の減少によるものと考えられる。ただ、その機序としては、速度を維持する能力の向上よりも加速局面および疾走局面に進むことができる距離が維持局面の距離と時間に反映されたことによるものであるといえる。

また、筆者らはこのような疾走全体の局面構成に着目して、主観的努力度が疾走全体に及ぼす影響やその調節の仕方についても検討した(篠原・前田, 2016b)。陸上競技経験の異なる男子大学生(陸上群6名、非陸上群6名)に対し、4つの努力度(100%, 90%, 70%, 50%)による50m走を行わせ、各試技の疾走速度変化をレーザー式速度測定器で測定した。得られた疾走速度変化をもとに、疾走全体を速度増大区間、速度定常区間、速度減速区間の3つに区分し、努力度や陸上経験によって区間構成がどのように異なるかを検討した。その結果、最大疾走速度は両群とも努力度が大きい試技ほど大きかったものの、陸上群は努力度の変化に対して、主に速度増大区間(加速局面)の割合を調節していた。一方、非陸上群では、努力度によって疾走全体の構成における各区間の相対

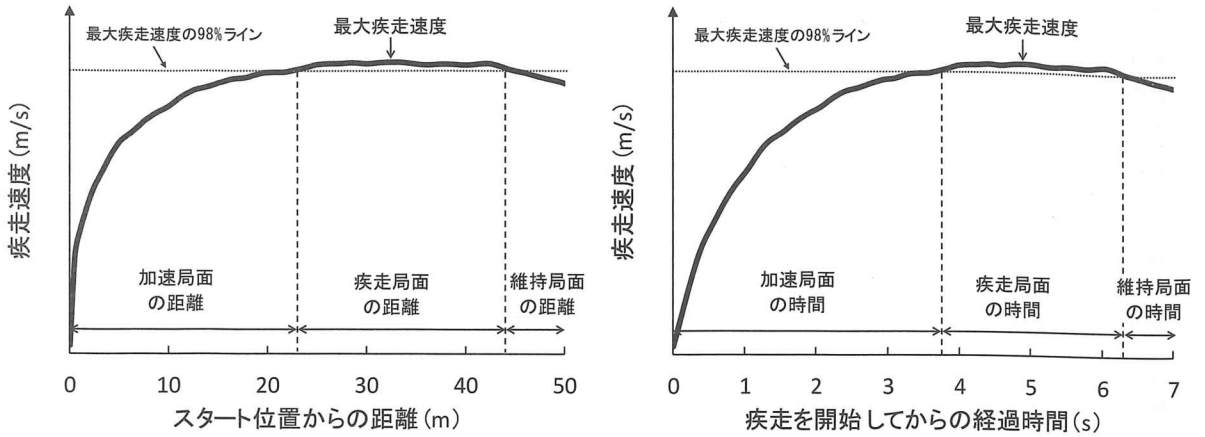


図8 疾走速度変化の局面分け(篠原・前田, 2016a)

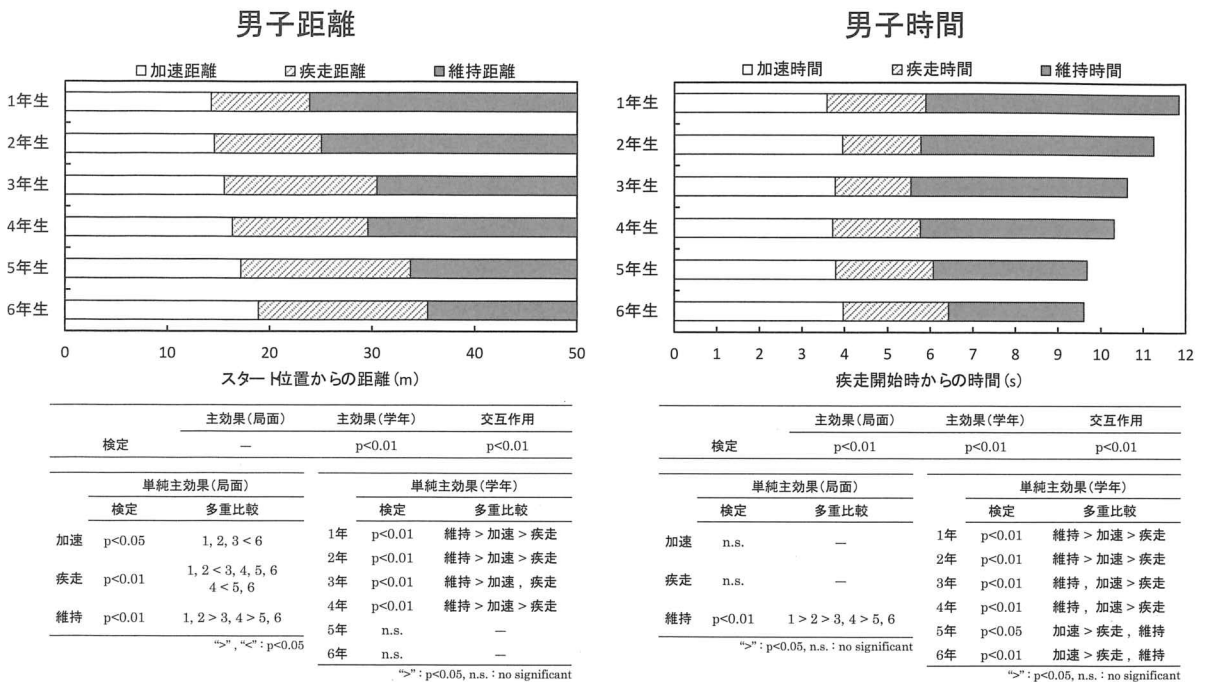


図9 小学生男子児童における50m走の局面構成(左:距離, 右:時間; 篠原・前田, 2016aより著者改変)

的な関係が変化しており, 特に, 疾走速度が逡減する区間の変化量が大きかった。努力度合を用いた疾走トレーニングの経験を数多く積んでいる陸上群は, 全力疾走である100%努力度において自身が出し得る疾走速度の最大値を手掛かりに努力度の調節をしているものと考えられ, 各区間の相対的な大小関係を努力度によって大きく変えることなく, 疾走を行っていたものと推察される。一

方, 努力度合を用いた疾走トレーニングの経験がほとんどない非陸上群は, 全力疾走において自身が出し得る疾走速度の最大値を基準に努力度を調節するのではなく, 疾走全体に要する疾走タイムを手掛かりとしていたものと考えられる。そのため, 特に疾走速度が逡減する区間の距離および時間の増減が大きく, 努力度によって, 速度増大区間または速度定常区間の距離と時間の両方を変え

て調節をしていたものと推察される。したがって、陸上群と非陸上群では、様々な努力度で疾走する際に、努力度の調節を行う際の方策が異なっていたものと考えられる。

このように、疾走の局面構成に着目し、時間と距離の両面から検討することで、疾走の内容やその実態に迫ることが可能となる。今後は、疾走能力が向上する際の走タイムの短縮について、局面構成と体力指標の関係からも検討することで、疾走能力が向上する機序をより深く検討することが可能になるものと考えられる。

3.2. 疾走速度変化の数式化

これまでに紹介してきた研究から、レーザー式速度測定器を用いることで、時間の観点から疾走速度変化を検討できるだけでなく、疾走の一部始終にわたる局面構成も検討できるといえる。しかし、局面構成はあくまで最大疾走速度を基準として局面分けがなされたものであり、どのように疾走速度を加速させたのか等の疾走速度変化の推移や様態そのものを定量的に評価および検討することは難しい。このことに関して、時間経過にともなう疾走速度変化（時間—速度データ）を数式に当てはめることで、数式に含まれる係数の値から疾走速度変化の推移や様態に関する検討が行われてきた。その中でもFurusawa et al. (1927)の研究が最も古く、測定地点と通過時刻の関係をもとに疾走の一部始終を時間—位置変化として捉えて、数式に当てはめる（最小二乗法）ことで、連続した時間—速度データを得ている。

$$y(t)=fga\{t-a(1-e^{-t/a})\} \quad \dots (1)$$

$$v(t)=fga(1-e^{-t/a}) \quad \dots (2)$$

$$v(t)=V_{\max}(1-e^{-t/a}) \quad \dots (3)$$

式 (1) と式 (2) はFurusawa et al. (1927) の提案する数式である。式 (1) は時間—位置変化を表しており、式 (2) は式 (1) を時間微分したもので、時間—速度変化を表した式である。式中の y は位置（距離）、 v は疾走速度、 t は時間、 f は推進力係数、 g は重力加速度、 a が時定数、 e が自然対数の底を表しており、 fga の部分が最大疾走速度 (V_{\max}) を表すといわれている（図10、式 (3)）。Furusawa et al. (1927) はこれらの式をもとに、疾走速度を生じさせる力や筋の生理学的な

検討を行った結果、走者の加速と最大疾走速度については、自らが発揮できる最大力（推進力）と筋肉の内部抵抗の2要因が関係することを報告している。また、猪飼ほか（1963）はこの数式の時定数 a に着目し、疾走速度の立ち上がり、いわゆる加速能力について検討している。様々な年齢の最大疾走速度と時定数 a を検討した結果、年齢とともに最大疾走速度は増大するが、時定数 a の値も大きくなることを報告している。この時定数 a については、最大疾走速度が同程度であった場合、値が小さくなると加速の立ち上がりが鋭く、逆に値が大きいくほど加速の立ち上がりは緩やかになる。図11は、筆者らが測定したデータをもとに、時定数 a と最大疾走速度 (V_{\max}) の組み合わせが異なる場合の時間—速度変化を表したものである。前述したように、最大疾走速度 (V_{\max}) が同程度であれば、時定数 a が小さいと（太実線）、時定数 a が大きい場合（太点線）に比べて、疾走速度の立ち上がりは急峻になる。また、3本の疾走速度変化はそれぞれ変化パターンが異なることになるが、このように、時定数 a と最大疾走速度 (V_{\max}) の値をもとにすれば、変化パターンを2つの係数で量的に比較することが可能となることがわかる。

このように、疾走速度変化を数式化することの利点は、時間—速度変化データを連続的に得られることや、疾走速度の推移を式中の係数によって表すことが可能となっただけではない。数式を微分することで加速度の時間変化を求めることも可能となり、疾走速度の測定時における風力なども合わせて測定することで、疾走中の競技者における運動方程式を立てることも可能となる。これらの手続きにより、疾走中に競技者によって発揮された力を求めることもでき、測定により得られた疾走速度を掛け合わせることで、疾走中に競技者が発揮したパワーの算出が可能となる（図12）。また、疾走速度変化を用いて算出された力やパワーの妥当性・信頼性については、高い精度であったことが先行研究によって検証され、明らかになっている（Samozino et al., 2016 ; Morin et al., 2019）。この手法は測定室ではなく実際にプレーするフィールドで、疾走中に発揮された力やパワーの測定ができる簡便な方法として

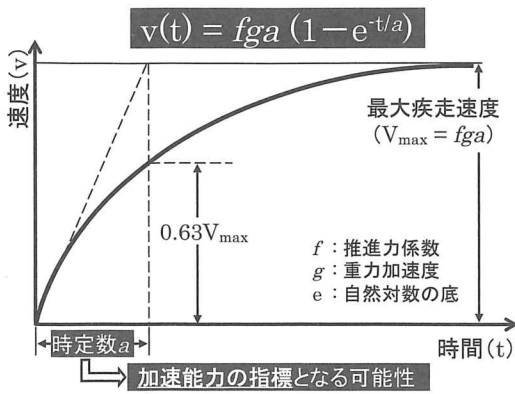


図10 Furusawa et al. (1927) の理論式による疾走速度変化

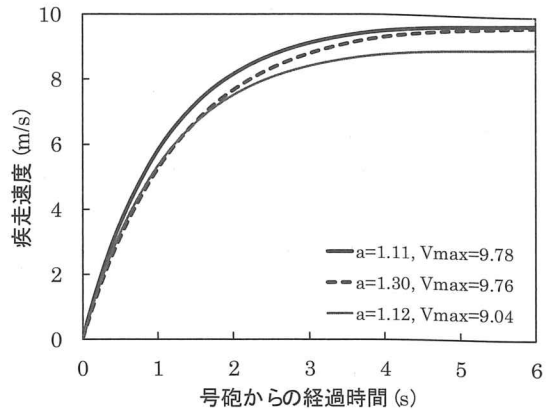


図11 時定数aと最大疾走速度 (V_{max}) の組み合わせが異なる際の疾走速度変化 (篠原・前田, 未公表データ)

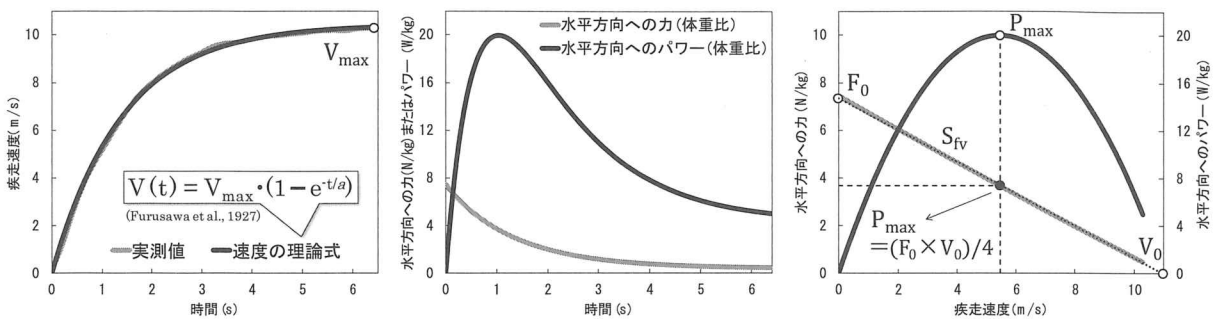


図12 疾走速度変化の数式化による走パワー発揮特性の検討

の利点があり、特に球技系スポーツの競技者を対象に研究が進められている (Mendiguchia et al., 2014; Buchheit et al., 2014; Haugen et al., 2020)。Nagahara et al. (2016) はサッカーの試合において、前半開始前と終了後、後半開始前と終了後にそれぞれ最大努力でのスプリント走 (35m) を行わせ、測定した疾走速度変化を数式化し、疾走中に競技者が発揮した力やパワーを算出した。その結果、初期加速での最大水平力 (F_0) は試合を通じて大きく変化しなかったものの、理論上の最大疾走速度 (V_0) は試合を通じて有意に減少したことや、発揮される最大パワー (P_{max}) がハーフタイム後の後半直前に有意に減少したことを明らかにしている。これらの結果から、サッカーの試合における疲労は、初期加速時の水平方向への力発揮能力よりも最大疾走能力に影響を及ぼすこと、また、ハーフタイムによる休息で疾走中の最大パワー発揮能力が低下してしまうことを報告してい

る。このように、実際の競技場面やそれに近い環境下で発揮された力やパワーを測定することは、競技者の加速疾走特性を評価することや、トレーニング計画の立案に際しての検討に非常に有効であるといえる (Morin and Samozino, 2016)。

なお、Furusawa et al. (1927) や Samozino et al. (2016) の手法は疾走を開始してから最大疾走速度に達するまでの加速局面を対象としたものであり、スタートしてからフィニッシュするまでの疾走全体を数式化する際には、式の中に2つの指数関数を含めることで、経過時間にもなう加速と減速を表すことが可能となる (Volkov and Lapin, 1974; Morin et al., 2006; Prendergast, 2001)。このことに関して、Slawinski et al. (2017) は、1987年から2012年までの世界陸上競技選手権大会における男子100mおよび女子100mの決勝レースの通過タイムおよび風速を用いて、100mレース中の疾走速度変化を数式化し、得られた係数から

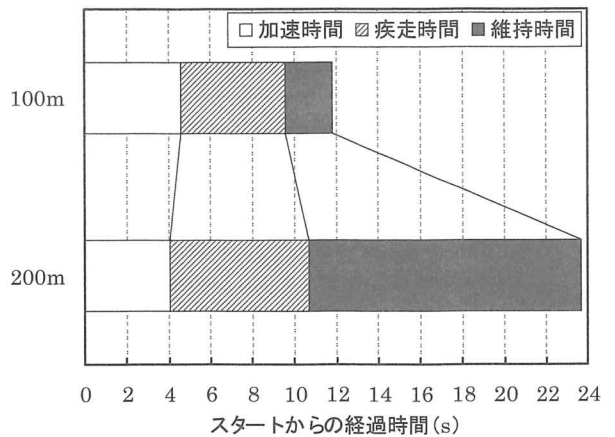
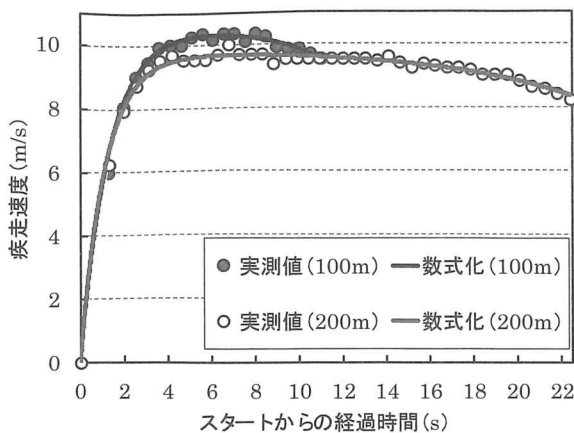


図13 200m走と100m走の疾走速度変化の数式化および局面構成 (篠原・前田, 2019のデータをもとに著者作成)

レース中に発揮された力やパワーを算出した。その結果、レース中の最大疾走速度と平均発揮パワーが100mレースのタイムに強く関係することを明らかにし、高い疾走速度においても地面に対して水平方向に力を加え続けられる能力が重要であると結論付けている。筆者らも、Prendergast (2001) の手法を用いて、学生男子短距離競技者に200m走と100m走を行わせ、その際の5mごとの通過時刻をもとに疾走速度変化を算出し (図13)、その特性を比較した (篠原・前田, 2019)。その結果、200m走では100m走よりも維持局面の割合が疾走全体に対して大きく、疾走速度の維持能力が疾走タイムに対して大きく影響することが明らかとなった。このように、疾走全体を数式化すれば、局面構成についてのより深い検討も可能となり、これまでに行われてきた短距離走のレース分析に加えて、レース内容を数量的に理解し、究明することもできるといえる。パフォーマンスレベル別に各局面の長さ (距離, 時間) の指標が明らかとなれば、練習やトレーニングにも活用できることから、今後もさらに知見が積み重なっていくことが期待される。

4. おわりに

冒頭で挙げた図1のように、疾走速度変化はグラフで表すとたった1本の線でしかない。しかし、この1本の線には競技者の疾走能力の全てが詰まっており、用いる分析・検討手法によっては、

多くの有益な情報を我々にもたらしてくれる。本稿で紹介した研究は、必ずしも最新の研究ばかりではないが、過去の研究者たちの着眼点や発想を礎に、「たった1本の線」から疾走能力とは何かを深く考察し、探究していくことが重要である。今後、疾走速度変化に関する研究が進み、多くの知見が積み上げられていくこと、ひいては、疾走速度変化の捉え方がアップデートされていくことを期して、本稿の結びとしたい。

文献

- 阿江通良, 鈴木美紗緒, 宮西智久, 岡田英孝, 平野敬靖 (1994) 世界一流スプリンターの100mレースパターン分析—男子を中心に—, 世界一流競技者の技術. 第3回世界陸上競技選手権大会バイオメカニクス班報告書. 日本陸上競技連盟強化本部バイオメカニクス班編 ベースボール・マガジン社: 東京, 14-28.
- 有川秀之, 太田 涼, 椿 智絵, 八坂和典, 柳田 勇 (2010) 男女中学生の50m疾走速度に関する縦断的研究. 埼玉大学紀要教育学部, 59 (1) : 49-57.
- Best, C.H. and Partridge, R.C. (1928) The equation of motion of a runner, exerting a maximal effort. Proceedings of the Royal Society of London. Series B, 103 : 218-225.
- Bezodis, N.E., Salo, A.I.T. and Trewartha, G. (2012) Measurement error in estimates of sprint velocity from a laser displacement measurement device. International journal of sports medicine, 33 (6) : 439-444.
- Buchheit, M., Samozino, P., Glynn, J.A., Michael, B.S., Al Haddad, H., Mendez-Villanueva, A. and Morin, J.B. (2014) Mechanical determinants of acceleration and maximal sprinting speed in highly trained young soccer players. Journal of Sports Science, 32 (20) : 1906-1913.
- 藤村美歌, 篠原康男, 前田正登 (2014) 小学校高学年の児童におけ

- る疾走速度推移に関する研究. 陸上競技学会誌, 12 : 21-32.
- 福田厚治, 伊藤 章 (2004) : 最高疾走速度と接地期の身体重心の水平速度の減速・加速 : 接地による減速を減らすことで最高疾走速度は高められるか, 体育学研究, 49 : 29-39.
- Furusawa, K., Hill, A.V. and Parkinson, J.T. (1927) The dynamics of sprint running. Proceedings of the Royal Society of London. Series B, 102 : 29-42.
- Harrison, A.J., Jenson, R.L. and Donoghue, O. (2005) A comparison of laser and video techniques for determining displacement and velocity during running. Measurement in physical education and exercise science, 9 (4) : 219-231.
- Haugen, T.A., Breitschädel, F. and Seiler, S. (2020) Sprint mechanical properties in soccer players according to playing standard, position, age and sex. Journal of sports sciences, 38 (9) : 1070-1076.
- 広川龍太郎, 高野 進, 末續慎吾, 金子太郎, 植田恭史 (2005) 陸上競技短距離競技者“末續慎吾”の100m走中の疾走速度分析. 東海大学紀要 体育学部, 34 : 93-96.
- 広川龍太郎, 杉田正明, 松尾彰文, 金子太郎 (2006) 国内GPにて収集した外国人選手の疾走速度分析. 陸上競技研究紀要, 2 : 90-91.
- 猪飼道夫, 芝山秀太郎, 石井喜八 (1963) 疾走能力の分析—短距離走のキネシオロジー—. 体育学研究, 7 (3) : 59-70.
- 池田泰明, 三村達也, 下野誠仁, 鈴木智喜, 大森純子, 加藤謙一 (2013) 中学生における短距離走の適正距離に関する研究. 陸上競技研究, 93 : 7-14.
- 伊藤 宏 (2007) 小学高学年の望ましい短距離疾走距離についての研究. スプリント研究, 17 : 32-40.
- 加藤彰浩, 永原 隆, 杉本和那美, 木越清信 (2013) 小学生の体育授業における短距離走の距離の検討—最大疾走速度到達距離および時間に着目して—. 陸上競技研究, 94 : 11-17.
- 加藤謙一, 佐藤里枝, 内原登志子, 杉田正明, 小林寛道, 岡野 進 (2002) 小学生スプリンターにおける短距離走の適正距離の検討. 体育学研究, 47 : 231-241.
- 金高宏文 (1999) レーザー速度測定器を用いた疾走速度測定におけるデータ処理の検討. 鹿屋体育大学学術研究紀要, 22 : 99-108.
- 熊野陽人, 大沼勇人, 平野裕一 (2016) 走幅跳選手における最高疾走速度と助走速度及び走幅跳記録の関係. 陸上競技学会誌, 14 : 27-32.
- 黒須雅弘, 中田有紀 (2010) レーザー速度計を用いたスプリント評価の試み. 東海学園大学研究紀要, 15 (B) : 139-144.
- Mackala, K. (2007) Optimisation of performance through kinematic analysis of the different phases of the 100 metres. New Studies in Athletics, 22 (2) : 7-16.
- 松尾彰文, 広川龍太郎, 柳谷登志雄, 土江寛裕, 杉田正明 (2008) 男女100mレースのスピード変化. バイオメカニクス研究, 12 (2) : 74-83.
- 松尾彰文, 広川龍太郎, 柳谷登志雄, 杉田正明, 土江寛裕, 阿江通良 (2010) 100mのレース分析. 世界一流陸上競技者のパフォーマンスと技術 : 第11回世界陸上競技選手権大会大阪大会日本陸上競技連盟バイオメカニクス研究班報告書, 財団法人日本陸上競技連盟, pp.14-28.
- Mendiguchia, J., Samozino, P., Martinez-Ruiz, E., Brughelli, M., Schmikli, S., Morin, J.B. and Mendez-Villanueva, A. (2014) Progression of mechanical properties during on-field sprint running after returning to sports from a hamstring muscle injury in soccer players. International Journal of Sports Medicine, 35 (8) : 690-695.
- Mero, A., Komi, P.V., Gregor, R.J. (1992) Biomechanics of sprint running. Sports medicine, 13 (6) : 376-392.
- 持田 尚, 松尾彰文, 柳谷登志雄, 矢野隆照, 杉田正明, 阿江通良 (2007) Overlay表示技術を用いた陸上競技400m走レースの時間分析. 陸上競技研究紀要, 3 : 9-15.
- Morin, J.B., Jeannin, T., Chevallier, B., Belli, A. (2006) Spring-mass model characteristics during sprint running: Correlation with performance and fatigue-induced changes. International Journal of Sports Medicine, 27 : 158-165.
- Morin, J.B. and Samozino, P. (2016) Interpreting power-force-velocity profiles for individualized and specific training. International journal of sports physiology and performance, 11 (2) : 267-72.
- Morin, J.B., Samozino, P., Murata, M., Cross, M.R. and Nagahara, R. (2019) A Simple method for computing sprint acceleration kinetics from running velocity data: replication study with improved design. Journal of Biomechanics, 94 : 82-87.
- Nagahara, R., Morin, J.B. and Koido, M. (2016) Impairment of sprint mechanical properties in an actual soccer match: A pilot study. International journal of sports physiology and performance, 11 (7) : 893-898.
- 沼澤秀雄, 杉浦雄策 (1994) 200m, 400mレースの時間分析, 世界一流競技者の技術. 第3回世界陸上競技選手権大会バイオメカニクス班報告書. 日本陸上競技連盟強化本部バイオメカニクス班編 ベースボール・マガジン社 : 東京, 50-56.
- Prendergast, K. (2001) A mathematical model of the 100m and what it means. New Studies in Athletics, 16 (3) : 31-36.
- Samozino, P., Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Peyrot, N., Saez de Villarreal, E. and Morin, J.B. (2016) A simple method for measuring power, force, velocity properties, and mechanical effectiveness in sprint running. Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports, 26 : 648-658.
- 篠原康男, 曾谷英之, 前田正登 (2012) 疾走速度曲線からみた球技系スポーツ選手の加速局面に関する研究. トレーニング科学, 24 (2) : 151-160.
- 篠原康男, 前田正登 (2016a) 疾走速度変化からみた小学生の50 m 走における局面構成. 体育学研究, 61 (2) : 797-813.
- 篠原康男, 前田正登 (2016b) 陸上競技経験の有無が主観的努力度と疾走速度変化の関係に及ぼす影響. トレーニング科学, 27 (3) : 81-92.
- 篠原康男, 前田正登 (2019) 学生短距離選手における100m走との比較からみた200m走の疾走速度変化. 陸上競技学会誌, 17 : 67-77.
- Slawinski, J., Termoz, N., Rabita, G., Guilhem, G., Dorel, S., Morin, J. B., Samozino, P. (2017) How 100-m event analyses improve our understanding of world-class men's and women's sprint performance. Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports, 27 (1) : 45-54.
- 杉田正明, 持田 尚 (2002) スピードをはかる～インターハイ陸上選手のスピード曲線～. 体育の科学, 52 (9) : 705-710.

- 高橋恭平, 松尾彰文, 広川龍太郎, 柳谷登志雄, 貴嶋孝太, 松林武生, 山本真帆, 綿谷貴志, 渡辺圭佑 (2012) 2011年世界および日本トップスプリンターの200mにおける走パフォーマンス分析. 陸上競技研究紀要, 8 : 25-34.
- 高橋流星, 筒井崇護, 柏木 悠, 船渡和男 (2013) レーザードップラー方式距離計測装置を用いた短距離疾走能力評価方法~大学生のソフトボール選手と陸上短距離選手の比較~. 日本体育大学紀要, 42 (2) : 103-110.
- Volkov, N.I. and Lapin, V.I. (1979) Analysis of the velocity curve in sprint running. *Medicine and Science in Sports*, 11 (4) : 332-337.
- Wells, R.P. and Winter, D.A. (1980) : Assessment of signal and noise in the kinematics of normal, pathological, and sporting gaits. In: *Human locomotion I: Pathological gait to the elite athlete*, Proceedings of the special conference of the Canadian Society for Biomechanics : 92-93.
- 山元康平, 宮代賢治, 内藤 景, 木越清信, 谷川 聡, 大山下圭悟, 宮下 憲, 尾縣 貢 (2014) 陸上競技男子400m走におけるレースパターンとパフォーマンスとの関係. *体育学研究*, 59 : 159-173.