

Key Words【力積：impulse、運動量：momentum、仕事量：work、力：force、筋力：strength、スピード：speed】

パワフルなアスリートの育成 (パート1): 力学的基礎

Developing Powerful Athletes, Part 1: Mechanical Underpinnings

Anthony N. Turner,¹ Ph.D. Paul Comfort,² Ph.D. John McMahon,² Ph.D. Chris Bishop,¹ M.Sc.
Shyam Chavda,¹ M.Sc. Paul Read,^{3,4} Ph.D. Peter Mundy,⁵ Ph.D. Jason Lake,⁶ Ph.D.

¹London Sports Institute, Middlesex University, Greenlands Lane, United Kingdom

²University of Salford, School of Health and Society, Salford, United Kingdom

³Aspetar AspetarOrthopaedic and SportsMedicine Hospital, Doha, Qatar

⁴Centre for Exercise and Sports Science Research, Edith Cowan University, Joondalup, Australia

⁵Coventry University, Coventry, United Kingdom

⁶Chichester Institute of Sport, University of Chichester, Chichester, United Kingdom

要約

パート1は、パワー向上の理解を深めることを目的として、関係する主な力学的変数について説明する。パート2は、筋力&パワートレーニングの計画作成と期分け方法を示す。本稿では、力-時間曲線と力-速度曲線について論じ、力積ではなく、パワー、力の立ち上がり率、爆発力などの用語を利用することへの批判に答える。これらの用語は、研究者にとってもコーチにとっても、力学的、概念的に区別することが望ましく、データや練習方法を効率良く共有するにはきわめて重要なものである。

序論

ジャンプ、キック、ランジ、スローなどの運動スキルは、一定の可動域でできるだけ素早く行なうことが求められる。その動作の基礎となるものは、高水準の力発揮能力である。ボールを遠くまで飛ばすにせよ、敵より高く跳躍

するにせよ、敵よりも優れた身体パフォーマンスを示すには、急激に加速する必要がある。そのため、ストレングス&コンディショニング(S&C)コーチは、パワーのあるアスリートを育成しようとする。パワーの力学的定義を知り、競技動作やトレーニングドリルにおけるパワーと力-時間特性との関係を理解することは、期分けされたトレーニング計画を作成する助けとなる。また、様々な評価方法を利用して、データをグラフ化して分析することは、S&Cコーチの理解を深めることに役立つ。以下では、力-時間曲線と力-速度曲線について論じる。

S&C分野において「パワー」や「爆発的」などの用語が用いられることへの批判がある(9,15,22,23)。この批判はS&Cコーチの間に混乱を生み出しているため、それぞれの用語を明確に定義する必要がある。したがって、まずパワートレーニングにおいて様々な用語がもつ意味を解説する。また、それらの批判が実は妥当なものであるため、批判の論点を明確にする必要がある。アスリートのトレーニングや評価を行

なう際は、それらの点に留意しなければならない。これは、科学者とコーチの間でデータや練習方法を効率良く共有するには不可欠である。

用語の力学的な定義と現場での使用法

まず、S&C分野では「パワー」という用語が一般に使用されているが、学問的には誤用であるという批判がある(9,15,22,23)。指摘されている問題点は、パワーが実際の力学的定義によらず、「総合的な神経筋系のパフォーマンス特性、あるいはアスリートのパフォーマンス特性」を示す言葉として使われている点である。力学的には、パワーは単位時間当たりに行なわれる仕事量、つまり仕事率を示し、力×速度の式によって算定される(表1)。また同様に、パワフルな動作を「爆発的」と呼ぶことも、実際には何かが爆発するわけでもないために批判を招いている(23)。とはいえ、この言葉はパワートレーニングによって獲得させたいもの(負荷をできるだけ速く移動させる能力)がもつ側面をアスリートに伝達

表1 各用語の力学的定義と現場での使用法

用語	現場での使用法	力学的定義	算定式
パワー	総合的な神経筋系のパフォーマンス特性、あるいはアスリートのパフォーマンス特性。	単位時間当たりに行なわれる仕事量。	$\text{パワー} = \text{仕事量} \div \text{時間}$ $\text{仕事量} = \text{力} \times \text{変位}$ したがって $\text{パワー} = \text{力} \times \text{変位} \div \text{時間}$ ここで $\text{変位} \div \text{時間} = \text{速度}$ であるため $\text{パワー} = \text{力} \times \text{速度}$
爆発的	「素早く力強くプッシュまたはプルする」こと。	一定の可動域で力を含めて推進している場合はパワーを指し、一定の時間枠で力を含めて推進している場合は力積を指す。	パワー(上記) $\text{力積} = \text{力} \times \text{時間}$ (ニュートンの第二法則)
力の立ち上がり率	「爆発的な筋力」あるいは「素早く力強くプッシュまたはプルする」能力。	定められた時間における力の変化。	$\text{力の立ち上がり率} = \Delta \text{力} \div \Delta \text{時間}$ (Δは変化量)
一定時間枠の力積	「爆発的な筋力」あるいは「素早く力強くプッシュまたはプルする」能力。	一定時間枠の力積(力-時間曲線の下部の面積)。	$\text{力積} = \Delta \text{力} \times \Delta \text{時間}$ (Δは変化量)
力	筋力。	ある質量をもつ物体を加速する能力(ニュートンの第一法則)。	$\text{力} = \text{質量} \times \text{加速度}$
力積と運動量の定理	運動量という用語は現場ではあまり使用されないが、移動速度を変化させるアスリートの能力を指すことがある。	S&C分野では一般に質量は一定である。したがって、力積は速度の変化に直接釣り合う。	$\text{運動量} = \text{力} \times \text{時間} = \text{質量} \times \Delta \text{速度}$ (Δは変化量)

するという点では優れた指導用語である。したがって、言葉を用いる背景と目的に従って、それらの用語を明確に区別して使用する必要がある。

次に、パワフルな動作の要件は力積と運動量の関係によって完全に説明される以上、S&Cコーチは力積およびその構成要素(力と力の適用時間)に目を向けるべきであるともいわれている(9,22,23)。例えば、S&Cの分野では、ジャンプのデータを利用して、アスリートのパワープロフィールが評価されている。しかし、跳躍高は離地速度を利用して算定され、離地速度は推進局面の力積を自重で除することによって得られるにもかかわらず、跳躍高の算定に利用される力積と運動量の定理(ニュートンの第二法則)は、評価も報告もされないことが多い。最後に、後述する図1と図2の分析からわかるように、ある時間枠(一般に最大0.3秒間)の力積、すなわち力-時間曲線の下部の面積は、力の立ち上がり率に相当する。時間枠が一定の場合は、発揮される力

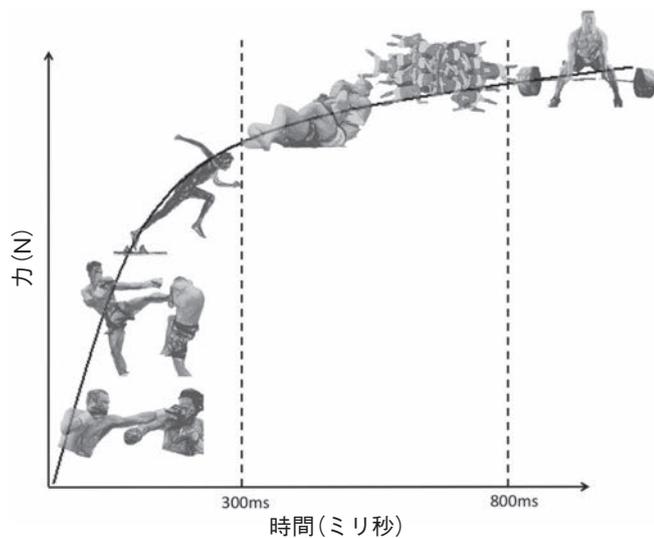


図1 力-時間曲線：筋による最大の力発揮には0.6～0.8秒を要する。しかし、ほとんどの競技動作は<0.3秒で行なわれる。

が、力積と力の立ち上がり率の2つの尺度の大きさを左右する。どちらの尺度にも力と時間が関与しているが、物体の速度の変化に直接関連する尺度は力積だけである(12)。

S&Cコーチが力積を報告せず、「爆発的」などの言葉を利用し、パワーと力の立ち上がり率に関するトレーニング

や評価にのみ注目する理由は何であろうか。その答えは、それらの用語がアスリートに対して有する伝達力と、コーチングキューがアスリートの学習と学習内容の保持に及ぼす影響に関連していると考えられる(21)。例えば、アスリートに対して、「爆発的」に動作を行なえと非常に簡単に指示すること

比べると、「力積」を高めろという指示はわかりにくいだろう。また、アスリートを「力積が高い」と評することは、同じimpulsiveという単語を用いる「衝動的である」という別のメッセージを伝える可能性もある。さらに、「力の立ち上がり率を評価するから、できるだけ素早くバーをプルまたはプッシュしろ」と指示することは、テストの焦点と重要性を明らかにするが、「力-時間曲線よりも下の部分の面積、すなわち力積を分析するから、できるだけ素早くバーをプルまたはプッシュしろ」と指示しても、びんとこないかもしれない。これらの用語（「パワフルに動作しろ」「爆発しろ」など）は、たとえ意味が明確でなくても、テストの概要を示し、データの関連性（立ち上がり率など）を伝えられる可能性がある。とはいえ、これらの用語の使用を止めさせることが我々の目的ではない。むしろ我々自身もたびたび使用する用語である。本稿の目的は、多くの他の言葉と同じく、これらの用語は異なる解釈が可能であるという事実を明示することにある。例えば、理論的に力学的な定義で使用されることもあれば、指導的実践的な定義で使用されることもある。データや練習方法を専門職間で明確に共有する上で、この区別は重要である。S&C専門職である我々は、研究(科学)と実践(指導)の間を絶えず行き来しなければならない。要するに、用語の使用方法が正しいかどうかは、状況に応じて判断しなければならない。アスリートに対する指示で、動作を「爆発的」に行なうように言うことはかまわない。しかし、科学的文献で、アスリートへの指示であるという断りなしに、そのような用語を利用することは認められない。科学的分析を行なう際は、そのような通用表現を力学的な表現に置き換える必要がある。表1に、本稿で利用する重要な用語の力学的定義と現場での使用法を挙げ、それらを算定する式を示した。

競技と動作	時間(秒)
離地	
スプリント	男：0.101 女：0.108
幅跳び	男：0.105～0.125
高跳び	男：0.150～0.230 女：0.140～0.180
高飛び込み	男：1.330(助走なし) 男：0.150(助走あり)
スキージャンプ	0.250～0.300
投てき	
砲丸投げ	男：0.220～0.270

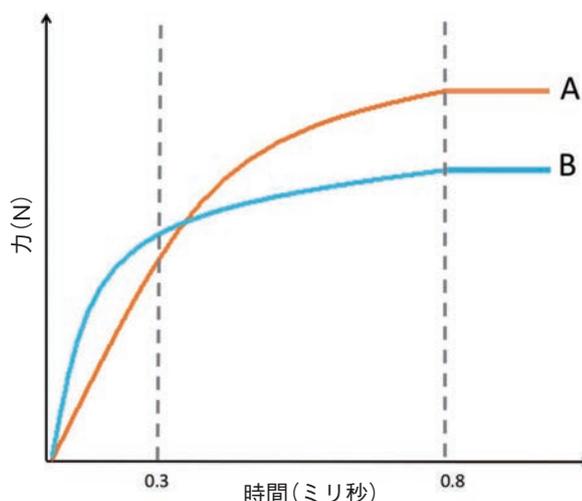


図2 競技で優れたパフォーマンスを示すのはAかBか？ 最大筋力が発揮されるならばA、競技動作が時間依存的であれば(つまり<0.3秒で行なわれるならば)Bである。このことから、筋力の大きさは確かに力積の大きさをもたらすが、力-時間曲線を分析することが重要であるとわかる。同様に、力の立ち上がり率の大きさも確かに好ましい特徴であるが、課題の完了に必要な力を発揮する能力が不可欠である。

力-時間曲線

まず、力-時間曲線(図1)を分析する。グラフから、等尺性筋活動の最大の力は瞬時に発揮されないことがわかる。レッグプレスでは約0.6～0.8秒(16)、等尺性ミッドサイブルでは約2.5秒(6,8)を要する。ところが、ほとんどの競技動作は<0.3秒で行なわれる(1,17,24)(表2)。したがって、最大の力を発揮する機会は減多に与えられないことになる。また、競技動作によって、時間の余裕があるものもあればないものもある(図1のイラスト参照)。これは、時間と可動域(力を適用

できる距離)が制約されている運動スキルを実施するには、従来の1RMテストが示す筋力の最も大きいアスリートが有利であるとは限らず、制約条件において最大の力を発揮できるアスリート(力の立ち上がり率と力積が大きく、加速能力が高いアスリート)が有利になることを示している。図2を例として、競技において、どちらのアスリートが優れたパフォーマンスを示すかを考えてみる。ベンチプレスなどのように、動作課題に時間制約がなく、最大筋力の発揮が目標である場合は、Aのほうが優れているだろう。これに対して、

投球など、必要な力を適用する時間が限られている競技動作の場合は、Bのほうが有利であろう。では、パンチ力が強いのはどちらのアスリートだろうか。パンチにおける筋の収縮時間は約0.05～0.25秒である(2)。したがって、Bのほうがより強いパンチを放つことができると考えられる。Bのほうが有利な競技や運動スキルは容易に思いつくが、Aのほうは難しい(ラグビーのスクラムやレスリングのピンフォールなど)。ほとんどの競技においては概ねBのほうが好ましい。この理屈に従うと、最も重要な部分は力-時間曲線の最初の0.3秒間であり、言い換えると、所与の時間で最大の力を発揮する能力である。また、力-時間曲線プロフィールにはこのような違いが存在することを考えると、アスリートによってトレーニングの焦点は異なっているべきである(パート2を参照)。

力積と力の立ち上がり率

図1と図2は、素早く力を発揮する能力(同じ時間軸の中では、力積と呼んでも力の立ち上がり率と呼んでもよい。アスリートへの説明では「爆発的筋力」としてもよい)を説明している。力-時間曲線の最初の部分(特定の競技動作に該当すると考えられる時間、0.25秒まで、0.30秒までなど)の重要性を考えると、一定の時間枠における力積と力の立ち上がり率を算定すべきである。例えば、等尺性ミッドサイブルにおける力積を算定するには、ある時点までにフォースプレートに適用される力の変化量を推計し、その値に時間の変化量を乗じる。逆に、力の立ち上がり率は、力の変化量を時間の変化量によって除する。等尺性ミッドサイブルの場合は、ある時点までに発生される力を記録して、それを時間で除することを意味する。力積の単位はニュートン秒(N・s)であり、力の立ち上がり率の単位はニュートン/秒(N/s)で

ある。図3にこの2つの尺度の微妙な違いを示す。力積は曲線下部の面積によって示され、力の立ち上がり率は時点間で直線的に増加する力によって示される。微妙な差があるとはいえ、両者はよく一致している。力積をアスリートの自重で除すると、アスリートの速度能力(動的課題では加速能力)を知ることができる。もちろん、課題(等尺性筋活動)による制約は受けるが、理論的には、ある時点でバーを放すことができれば、どれほど速く移動できるかを示している。これは、この種の課題で適用できる力積が大きいほど、速度能力が大きいことを意味しており、競技パフォーマンスにとって大きな意味をもちうる。

理論的には、一定の時間枠における力の立ち上がり率と力積は、同じ特性、すなわち一定時間に力を適用する能力を数値化したものである(時間枠が同じであるため、力の立ち上がり率と力積はどちらも力の発揮能力によってのみ左右される)。しかし、力積は運動量の変化と直接釣り合い、運動量は通常一定の質量を有する物体(アスリート、器具、アスリート+器具)の速度の変化(加速度)を示す。したがって、所与の開始時点からの加速の尺度を示すだけでなく、直接のパフォーマンス成果を示すことになり、所与の時間枠で力を

適用するアスリートの能力をより完全に捉えることが可能である。

力の立ち上がり率や力積などの算定に伴う測定誤差に注意を向けることも重要である。まず、2つの変数に内在する問題として、力発揮の開始点の決定(利用する閾値)と、標本抽出、原データのフィルタリングや平滑化に関連するものがある。これらの問題の詳細は、等尺性筋活動を例としたComfortら(4)を参照されたい。また、それぞれの尺度の算定方法も誤差に影響するが、力の立ち上がり率のほうが、影響が大きいと考えられる。例えば、力の立ち上がり率を算定するには、指定された時間で力を測定し、それを時間(0.25秒など)で除する。そのため、力の測定に伴う誤差が増幅される。もし力の変化量が1,000Nならば、力の立ち上がり率は $1,000 \div 0.25$ から4,000N/sとなる。したがって、力の変化量の測定に含まれる誤差も4倍になる。しかし、力積は曲線の下部の面積によって算定されるため、信号に含まれる雑音が抑制される。例えば、同じく0.25秒間にわたって力が適用されるとすると、力積は力の変化量に0.25を乗じたものに等しい。そのため、力の算定に含まれる誤差は1/4になる。ここで行なった計算は、微分(曲線の変化率を算定する)を利用する場合と、積分(曲線の下部の

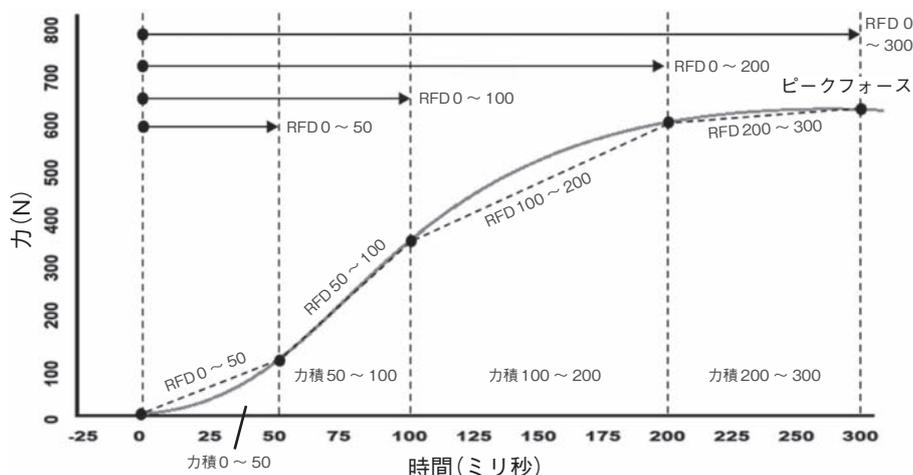


図3 ある時間枠における力の立ち上がり率と力積の決定 RFD=力の立ち上がり率

個々の領域の面積を合計して合計面積を算定する)を利用する場合における測定誤差(信号対雑音)の違いを示している。すなわち、前者は誤差が増大し、後者は誤差が減少する。とはいえ、力の立ち上がり率の信頼性とパフォーマンスとの関連性を指摘する研究は増えているため、力の立ち上がり率を算定しようとする場合にはこれらの点に留意する必要がある。この問題の詳細はHaffら(5)を参照されたい。

最後に、これらの算定に内在する測定誤差を考えると、ある時点に限って(表2に挙げたような基本的な運動スキルに最適な時間)力を測定すること(3,7,19)は、過去の数値と比較して、変化が発生しているかどうかを知ること役立つ。このような尺度は、今後、研究でも現場でも利用されることが増えるであろう。なぜなら、ある時点の力が増大していれば、同じ時間の力積と力の立ち上がり率が増大したと考えられるからである。さらに、現状では力だけが報告されているため(算定を必要としない)、数値の算定を介した誤差が入り込む余地はなく、力発揮の開始時点の閾値だけが影響を及ぼすことになる。このような主張の裏づけとして、特定時点の力を測定する方法は信頼性が高く(級内相関係数が0.95~1.00と0.921~0.968)、変動性が低い(変動係数が2.3~2.7%と6.2~8.0%)ことが示されている(5)。

パワー、力積、仕事-エネルギー定理

ジャンプの場合、理論的には、システムの重心で行なわれる仕事と跳躍高の間には直接の因果関係が存在する(仕事-エネルギー定理)。同様に、理論的には、システムの重心に適用される力積と跳躍高の間にも直接の因果関係が存在する(力積と運動量の定理)。システムの重心における運動量の変化はそこに適用される力積によるものであり、力積は力が適用される時間枠に依

存する。逆にいうと、システムの重心に対して仕事が行なわれると、重心の運動エネルギーは変化するが、これは力が適用される変位に依存する。行なわれる仕事量の増加と適用される力積の増加は、跳躍高の増加を生む。力積と運動量の定理はすでに述べたとおりであり、以下では仕事-運動エネルギー定理の因果関係を明らかにする。

引き続きジャンプを例にすると、仕事-運動エネルギー定理に従えば、ある物体に対して行なわれる仕事量は運動エネルギーの変化に等しく、次の式で表すことができる。

仕事量 = Δ運動エネルギー (初期エネルギーを0とする)

すなわち、

$$\text{力} \times \text{変位} = 1/2 \times \text{質量} \times \text{速度の2乗}$$

この定理を拡大して他の形式のエネルギーを含むことも可能であるが、簡略化のため運動エネルギーに限定する。力の影響下にある時は、仕事が行なわれるためにシステムの重心が加速する。ジャンプの推進局面で発生する変位は、脚長などの人体解剖学的特徴によって制約されていることを考えると、システムの重心に対して大きな仕事が行なされると(適用される力の影響だけを受ける)、離地局面の平均速度が大きくなるため(速度 = 変位 ÷ 時間であり、この例では変位が制約されている)、推進局面の継続時間が短くなる。そのため、発揮される平均パワー(パワー = 力 × 変位 ÷ 時間。ジャンプの推進局面で行なわれる仕事率)は、変位が制約され、至適化されているとすると、仕事量の増大につれて増加する。本質的に、仕事量(運動エネルギー)が大きくなるほど、発揮されるパワーも大きくなり、跳躍高が増大する。この場合、発揮パワーはパフォーマンス(跳躍高)と因果関係にある。仕事-運動エネルギー定理とカウンタームーブメントジャンプ(CMJ)のパフォーマンスについてはLinthorne(11)を参照されたい。

したがって、CMJ、あるいは推進方向の変位を一定にしたスクワットジャンプ(開始姿勢を膝関節の屈曲90°に固定)において、跳躍高を増加させることはパワーを増加させることに等しい。しかし、漸進的負荷によってCMJ高を測定するケースもある。自重→自重+30kg→自重+50kg→自重+80kgという漸進を想定すると、もはや跳躍高の変化(減少)はパワーの変化(減少)と完全には一致しない。近年S&Cコーチが跳躍高に興味を失い、成果(跳躍高)よりも優れた指標として過程(ジャンプ方法)に目を向けるようになったのはこのせいかもしれない。逸話的ではあるが、おそらく誰もが、CMJの負荷の増大とともに、代償的にジャンプ方法が変化するのを目にしたことがあるだろう。つまり、負荷が増大すると、アスリートはより深く腰を落として大きな反動動作を行なう。漸増するシステム重量に対抗するために、システムの重心を下げて可動域(仕事量)と力の適用時間を増加させるのである。推進方向の変位が負荷とともに増大する、つまり条件によって異なる場合、パワーと跳躍高の関係は弱まる。跳躍高は離地時の速度によって決定されるという事実と合わせて考えると、距離が時間とともに増加し、速度が距離 ÷ 時間によって求められるならば、速度はシステム重量の増加につれて減少し続ける。跳躍高とパワーの乖離は、パワーが力と速度によって決定されることの結果である。この例では、力は速度の低下を代償して、発揮パワーの低下を減らそうとする。最後に繰り返しになるが、これらの様々な負荷条件にわたって、変位を制約する、すなわち反動動作を制御したり、一定の膝関節角度で実施させたりすると、跳躍高とパワーは強い相関関係を取り戻す。しかし、跳躍高からパワーを決定しようとして変位を制約する際は、テストの生態学的妥当性を減じる可能性があることに留意

する必要がある。

次に、もうひとつの関連領域に目を向ける。それは、S&Cコーチがアスリートを評価する際に、パワーではなく力積(仕事量)を報告すべきかどうか、もし報告すべきであるとしたら、発揮パワーを最大化する負荷ではなく、踏み切りの際の力積を最大化する負荷を利用すべきかという問題にかかわっている。これに対する最も優れた答えは、漸進的負荷を利用したジャンプによってアスリートを評価したMundyら(14)に見出すことができる。彼らの研究によると、CMJにおける力積は、無負荷から自重の75%までは増え続け、以後、減少し、自重の100%ではかろうじて跳ぶのみであった。これは、バーベルの負荷が増加する(システム重量が増す)につれて、速度変化が減少することによって説明される(推進局面開始時は速度0)。ただし、すべての負荷条件にわたって、平均速度の減少がシステム重量の増加と釣り合っていたわけではない。システム重量の増加が25%、50%、75%、100%に対して、平均速度の減少は13%、25%、34%、44%であった。要するに、質量の増加が速度の減少を超えており、そのために運動量が増加し続ける。したがって、ジャンプのトレーニングでは自重の75%のバーベルを利用することが推奨されそうであるが(この点はまだ検証されていない)、この負荷で達成された最大の力積は質量増加の結果であり、動作速度と時間を犠牲にしている(この場合は踏み切り局面の延長)ことに注意しなければならない。おそらく、競技においては可動域の変化(変位)は高速度で行なわれるべきであり、時間制約のある運動スキルについて力積を最大化するトレーニング変数を処方すれば、パフォーマンスへの転移が最大とならない可能性がある。報告変数としてパワーが一般に利用されるようになったのは、大きなパワーを発揮する

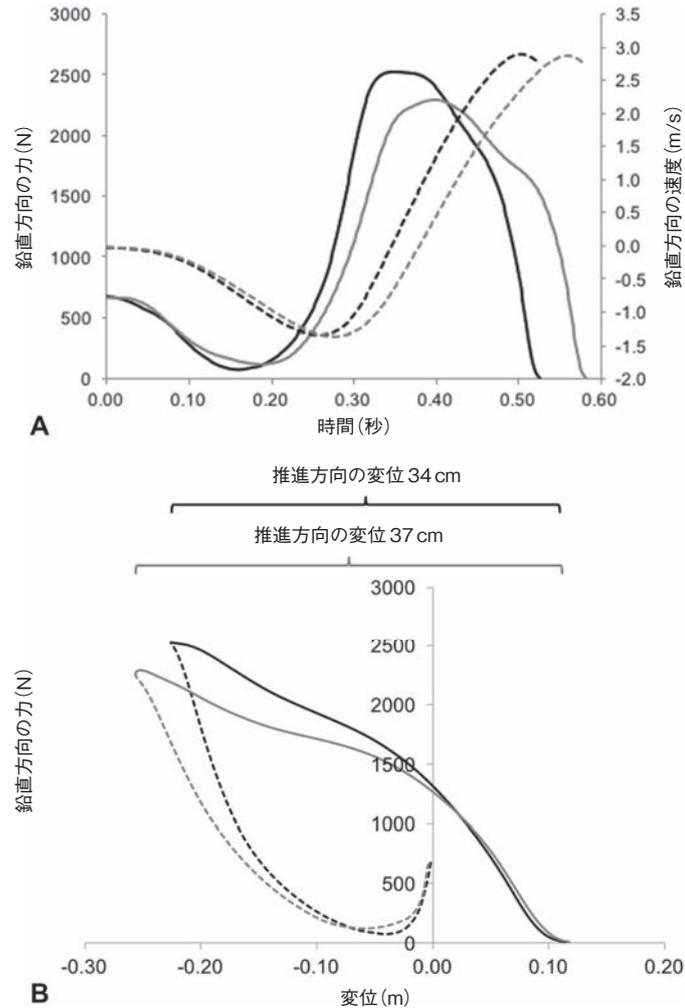


図4 Aは、1人のアスリート(体重71.8kg)による、2回のCMJにおける動作開始時～離地の間の力-時間曲線を示す。2回の試技のどちらも跳躍高は同じである(点線で示した離地速度が同じ)。また、無負荷局面と制動局面の力積は同じく95~96Nsであった。しかし黒線で示した1回目の試技は大きな力と短い時間を特徴としており、灰線で示した2回目の試技はその逆であった。Bは、アスリートによって行なわれる力学的仕事量は同じであるが、1回目の試技(黒線)は力の大きさと推進方向の変位の短さを特徴とし、2回目の試技(灰線)はその逆であった。力-変位曲線の点線は、CMJの反動動作局面(無負荷局面+制動局面)を示している(13)。

ことは中程度以上の速度に依存しており、競技要求に従っているからだと考えられる。力と速度は反比例するため、パワーの値が1つ測定できれば、競技の特異性に合わせて調整可能である(次項参照)。

要するに、力積は適用される力を増大させるか、適用時間を増大させるかによって最大化される可能性がある(後者は、可動域が増大しなければ速度の低下を招く)。例えば、**図4A**は、1人のアスリートによるCMJの力-時間曲線と速度-時間曲線を示している。跳

躍高と力積は2回の試技において同じであるが、それぞれを達成するために用いられた方法が異なる。1回目の試技(黒線)では、制動局面の力積が力の大きさと時間の長さ(競技において望ましいパフォーマンス成果)を特徴としており、逆に、2回目の試技(灰線)のように、力または力が適用される変位を増加させることによって仕事量が最大化すると、力が適用される時間を延長してパワーが最大化する(13)。**図4B**は**図4A**と同じアスリートによるCMJの力-変位曲線を示している。

2回の試技で同じ量の力学的仕事が行なわれているが、1回目の試技(黒線)は力の大きさと推進方向への変位の短さを特徴としており、2回目の試技(灰線)はその逆である。ほとんどの競技活動は時間と可動域が制約されていることを考えると、力の適用時間や変位を増加させることによって力積や仕事量を増加させる方策を選択することが、最適とは限らない可能性がある(この点も未検証)。そのため、力積を評価する際は、適用される力の大きさと力の適用時間の両方に注目する必要があるだろう。どちらの変数も向上させることが望ましいため、力積だけでなくこれらの変数を報告すると役立つであろう。パワーについても同じであり、基礎となる力、変位、時間の3つの構成要素を考える必要がある。エクササイズであれ、競技動作であれ、特定の動作の完了に時間がかかりすぎるアスリートは、筋力、力の立ち上がり率(爆発的筋力)、技術的能力のいずれか(あるいは複数)を欠いている。これらの構成要素が向上すれば、力-時間曲線はプラスの方向へ変化するはずである。したがって、実際の力の変化を分析すべきである。

パワーと力-速度曲線

最後に、力-速度曲線(図5)を分析する。力-速度曲線は、パワー発揮が最大となるトレーニング負荷を見出し、その経時の変化を追跡するために利用される。また、低速または高速で力を発揮する能力の向上を目指すトレーニングへの適応を確認するためにも利用される。アスリートを評価し、トレーニング目標を決定する際に注意を払うべき点がある。それは、力と筋線維束の短縮に基づくWickiewiczら(20)やKomi(10)の独創的な研究は別として、本稿も含めてS&Cにおいて注目され、報告される力と速度の関係は、ジャンプ、スクワット、ウエイトリフティング

の派生形などの全身動作の短縮性局面(推進局面)の分析と関連していることである。また、リフトの際は常に「爆発的」であるようにアスリートに指示するが、身体やバーベルの動作速度は、軽負荷は高速を可能にし、高負荷は低速をもたらすという点で抵抗負荷の結果である。この違いが、1つの筋線維においては放物曲線がみられるにもかかわらず、S&C分野では力と速度の間に直線関係を見出そうとする理由かもしれない。また、これが理由でこの曲線を負荷-速度曲線と呼ぶのかもしれない。

力-速度曲線を十分に活用するために、まず、定量的でスポーツ的なパワーの定義、すなわち力×速度について説明し、続いて力-速度曲線について論じる。理論上、力か速度のどちらか一方が増加すれば、他方が一定でもパワーは増加する。図5は、低速では大きな力が発揮され、高速では小さな力が発揮されることを示している。つまり、力と速度の間には反比例の関係が存在する。理論的には、発揮されるパワーが最大となるのは、2つの変数が至適方法によって折り合っている場合(エクササイズ、アスリート、測定方法によって異なる)である。競技活動では、一定の可動域でできるだけ素早く動作を行なうことが求められる。したがって、競技で行なわれる運動スキルが力-速

度曲線のどこに位置するかは、動かす物体の質量に依存すると考えられる。例えばラグビーユニオンのタックルでは、野球の投球で求められるよりも大きな力が必要とされ、両者は曲線の対極に位置する。しかし大多数の競技では、力-速度曲線の全体に及ぶ多様な運動スキルが要求される(図6)。したがって、トレーニングプログラムでは曲線全体を適切にカバーする必要がある。そのためのエクササイズ様式やトレーニング負荷の操作はパート2で論じる。

パワーの測定に関しては、これまで注目されていた平均パワーではなく、瞬時のピークパワーを対象とするケースがある。しかしこれは、実践面よりも研究面で利点があると考えられるかもしれない。例えばMundyら(14)によると、負荷を用いたCMJでは、ピークパワーにおける個人内の差異のほとんどが、変動係数よりも小さいか、あるいは最小有効変化よりも小さかった。また、この変数は、データの収集間隔が1,000Hzであれば、約1ミリ秒の数値を示すだけであり、これは推進局面の約1%にしか相当しない。力学的観点からすると、平均パワーのほうがパフォーマンスの代理尺度として優れているかもしれない。瞬時のピークパワーとは異なり、平均パワーはあらゆるアスリートについて同一の負荷で見

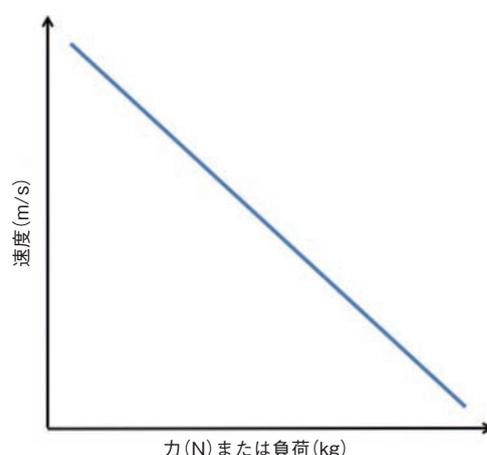


図5 理論上の力-速度関係

出される。CMJの場合、これは一般に自重である(18)。負荷の増大に伴ってみられる平均パワーの低下は、個人内の変動によっては説明できない。そのためMundyら(14)は、力学的理論を利用してシステムレベルでこれを説明した。外部負荷が増大すると、同じ高さを跳ぶために必要な力学的仕事量(仕事=力×変位)も増大する。反動動作による変位は人体解剖学的特徴によって制約されているため(伸張-短縮サイクルを最も適切に利用しようとする)、より大きな力を適用することが必要になる。しかし、負荷が追加されるにつれて、それによって引き起こされる平均速度の低下を代償すること(力を産生する能力を考えると、その負荷に応じることが徐々に困難になる。これは、推進局面の持続時間の増加に繋がる。そのため、観察されるパワーの低下(パワー=仕事量÷時間)は、推進局面において解剖学的制約を受けることよりも、力学的仕事を行なうために必要な時間の増加によって説明される。

結論と現場への応用

パワー、力の立ち上がり率、力積はいずれもアスリートの進歩を効果的にモニタリングするとともに、トレーニングに適した変数の決定に利用できる尺度である。しかし、力積を利用する際は、尺度の変化を力と時間の点で捉えることも重要である。力-時間曲線と力-速度曲線を含めるとよいだろう。しかし運動パフォーマンスの観点からすると、目標は、高速および低速で発揮される力を増大させると同時に力の適用時間を減らすことである。素早く力を発揮する能力を報告し、評価する際は、0.1～0.3秒など、特定の時点の力を測定することを勧める。なぜなら、ある時点に発揮される力が増加しているならば、同じ時間の力積と力の立ち上がり率も増加しているに違いないからである(自重が一定ならば)。さらに、

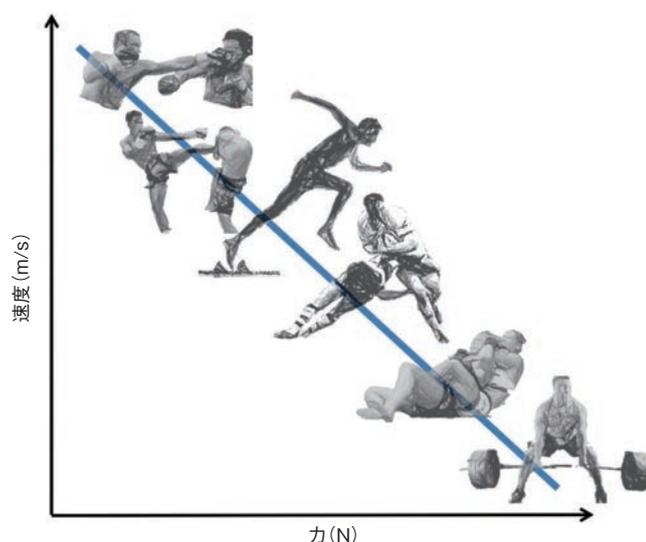


図6 力-速度曲線における様々な競技の運動スキルの位置。各運動スキルの位置は、移動させる物体の質量に依存する。物体の質量は動かすために必要な力に正の影響を及ぼし、その移動速度に負の影響を及ぼすからである。

この方法を用いれば測定誤差が制限される。最後に、科学的研究結果を発表する際は、通用表現を力学的用語に置き換えるべきである。ただし、動作を「爆発的」に行なうようにアスリートに指示することはかまわない。なぜならこの言葉はコーチの意図を適切に伝えるからである。◆

References

1. Aagaard P. Training -induced changes in neural function. *Exerc Sport Sci Rev* 32: 61-67, 2003.
2. Aagaard P, Simonsen E, Andersen J, Magnusson P, Dyre-Poulsen P. Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. *J Appl Physiol* 93: 1318-1326, 2002.
3. Chavda S, Turner A, Comfort P, et al. A practical guide to analysing the force-time curve of isometric tasks in Excel. *Strength Cond J* 42: 26-37, 2020.
4. Comfort P, Dos'Santos T, Beckham G, et al. Standardization and methodological considerations for the isometric mid-thigh pull. *Strength Cond J* 41: 57-79, 2018.
5. Haff G, Ruben R, Lider J, Twine C, Cormie P. A comparison of methods for determining the rate of force development during isometric midhigh clean pulls. *J Strength Cond Res* 29: 386-395, 2015.
6. Haff G, Stone M, O'Bryant H, et al. Force-time dependent characteristics of dynamic

and isometric muscle actions. *J Strength Cond Res* 11: 269-272, 1997.

7. James L, Roberts L, Haff G, Kelly V, Beckman E. Validity and reliability of a portable isometric mid-thigh clean pull. *J Strength Condi Res* 31: 1378-1386, 2017.
8. Kawamori N, Rossi S, Justice B, et al. Peak force and rate of force development during isometric and dynamic mid-thigh clean pulls performed at various intensities. *J Strength Cond Res* 20: 483-491, 2006.
9. Knudson D. Correcting the use of the term power in the strength and conditioning literature. *J Strength Cond Res* 23: 1902-1908, 2009.
10. Komi P. Measurement of the force-velocity relationship in human muscle under concentric and eccentric contractions. In: *Biomechanics III* (Vol 8), 1973, pp. 224-229.
11. Linthorne N. Analysis of standing vertical jumps using a force platform. *Am J Phys* 69: 1198-1204, 2001.
12. McBride J, Kirby T, Haines T, Skinner J. Relationship between relative net vertical impulse and jump height in jump squats performed to various squat depths and with various loads. *Int J Sports Physiol Perform* 5: 484-496, 2010.
13. McMahon J, Suchomel T, Lake J, Comfort P. Understanding the key phases of the countermovement jump force-time curve. *Strength Cond J* 40: 96-106, 2018.
14. Mundy P, Smith N, Lauder M, Lake J. The effects of barbell load on countermovement vertical jump power and net impulse. *J Sports Sci* 35: 1781-1787, 2017.

15. Ruddock A, Winter E. Jumping depends on impulse not power. *J Sports Sci* 34: 584-585, 2015.
16. Siff M. Biomechanical foundations of strength and power training. In: *Biomechanics in Sport: Performance Enhancement and Injury Prevention* (Vol 9). Zatsiorsky V, ed. Oxford, United Kingdom: Blackwell Science, 2000. pp. 103-139.
17. Stone M, Pierce K, Sand W, Stone M. Weightlifting: A brief overview. *Strength Cond J* 28: 50-66, 2006.
18. Swinton P, Stewart A, Lloyd R, Agouris I, Keogh J. Effect of load positioning on the kinematics and kinetics of weighted vertical jumps. *J Strength Cond Res* 26: 906-913, 2012.
19. Wang R, Hoffman J, Tanigawa S, et al. Isometric mid-thigh pull correlates with strength, sprint, and agility performance in collegiate rugby union players. *J Strength Cond Res* 30: 3051-3056, 2016.
20. Wickiewicz T, Roy R, Powell P, Perrine J, Edgerton V. Muscle architecture and force-velocity relationships in humans. *J Appl Physiol* 57: 435-443, 1984.
21. Winkleman N. Applied coaching science. In: *Advanced Strength and Conditioning: An Evidence-Based Approach*. Turner A, Comfort P, eds. Oxon, United Kingdom: Routledge, 2017. pp. 327-346.
22. Winter E, Fowler N. Exercise defined and quantified according to the Systeme International d'Unites. *J Sports Sci* 27: 447-460, 2009.
23. Winter E, Abt G, Brookes F, et al. Misuse of power and other mechanical terms in sport and exercise science research. *J Strength Cond Res* 31: 292-300, 2016.
24. Zatsiorsky V. Biomechanics of strength and strength training. In: *Strength and Power in Sport* (Vol. 2). Komi P, ed. Oxford, United Kingdom: Blackwell Science, 2003. pp. 114-133.

From *Strength and Conditioning Journal*
Volume 42, Number 3, pages 30-39.

著者紹介



Anthony N. Turner :
Middlesex University London Sport Instituteのストレングス&コンディショニングの准教授であり、スポーツの大学院プログラムの責任者。



Paul Comfort :
University of Salfordのストレングス&コンディショニングの修士課程プログラムの准教授、ストレングス&コンディショニングコーチ、プログラムリーダーであり、Edith Cowan Universityの非常勤教授。



John McMahon :
University of Salfordのスポーツバイオメカニクスとストレングス&コンディショニングの講師。



Chris Bishop :
Middlesex University London Sport Instituteのストレングス&コンディショニングコーチであり、ストレングス&コンディショニングの修士課程プログラムのプログラムリーダー。



Shyam Chavda :
Middlesex University London Sport Instituteのストレングス&コンディショニングコーチ、技術指導員であり、同大ウェイトリフティングクラブの主任コーチ、British Weightliftingの地区コーチ。



Paul Read :
Aspetar Orthopaedic and Sports Medicine Hospitalのストレングス&コンディショニングコーチ、臨床研究者。



Peter Mundy :
Coventry Universityのバイオメカニクスの助教であり、ストレングス&コンディショニングのコース責任者。



Jason Lake :
University of Chichesterのスポーツ&運動バイオメカニクスの准教授であり、スポーツ&運動科学部のストレングス&コンディショニングの修士課程プログラムのプログラムリーダー。