

Keywords【レジスタンストレーニング：resistance training、エキセントリック（伸張性）トレーニング：eccentric training、
傷害予防：injury prevention、身体パフォーマンス：physical performance、筋力とパワー：strength and power】

フライホイールエキセントリック トレーニング：

効果的な伸張性過負荷を生む方法

Flywheel Eccentric Training: How to Effectively Generate Eccentric Overload

David Martínez-Hernández,^{1,2} MSc

¹ Directorate of Sport, Exercise and Physiotherapy, University of Salford, Salford, United Kingdom

² Medical and Sports Science Department, Tottenham Hotspur Women Football Club, London, United Kingdom

要約

エキセントリック（伸張性）レジスタンストレーニングは、その特有の筋と神経の適応により、スポーツにおけるパフォーマンスや傷害予防に有益な効果をもたらすことが明らかになっている。伸張性過負荷を生じさせる様々な方法の中で、フライホイールエキセントリックトレーニング（FET）が近年注目されている。その理由は、機器の可搬性、豊富なエクササイズバリエーション、調節可能な抵抗など、他の方法にはない利点があるからである。フライホイール機器を用いて、伸張性過負荷の存在を裏づけるだけの十分なエビデンスを提供した研究はきわめて少ない。FETの実践的方法に関するガイドラインも、先行研究では数が限られる。本稿において我々は、FETの使用を支持する研究を紹介し、伸張性過負荷を可能にするエクササイズを開発するための実践的なガイドラインを提示する。

はじめに

レジスタンストレーニングがスポーツパフォーマンスの向上に重要な役割を果たすことは、すでに明らかになっている。実際、様々なレビューやメタアナリシスにより、筋力はジャンプ、スプリント、方向転換(COD)など、スポーツ全般の様々なスキルを向上させ、傷害のリスクを低減することが示されている(3,100,102,107)。筋力の向上に用いられる種々のトレーニング方法の中で、近年、エキセントリック（伸張性）トレーニングが特に注目を集めている(47)。伸張性収縮は、筋活動のうち力発揮を伴いながら筋が引き伸ばされる局面に相当する。筋は、この伸張性収縮中に、外部負荷によって生

じたエネルギーを吸収する(1)。

伸張性収縮時の具体的な神経的作用は完全には理解されていないが、脊髄および脊髄上レベルでの調節が、伸張性収縮時における随意活性化の調節に特に役立っている(29)。伸張性筋力は、男女とも短縮性筋力より約40%大きいこと、また、動作が速いほど大きいことが示されている(78)。伸張性エクササイズは、同じ力学的出力に対して、短縮性エクササイズに比べて代謝負荷が低く、運動単位の動員も少なくてすむ(82,83)。この活性化している運動単位の減少は、細かな運動制御の低下を伴い、伸張性協調運動に影響を及ぼす。これは、同じ仕事を行なうために必要な運動単位がより少ないからである(48)。短縮性収縮中の力-速度曲線とは対照的に、伸張性収縮中の力は、速度が速くなるにつれてある点までは増加し、そこから停滞するか、わずかに減少する(86)。また、速度が速いほど活動筋線維への力学的ストレスも高くなり(21)、なかには、高速の伸張性収縮では運動単位の動員順序がサイズに基づかないことを示唆する研究もある(49,72)。さらに伸張性収縮ののち、残存する力の増大がみられるが、それは、先立って伸張性収縮が行なわれない等尺性筋力と比較して、伸張性筋活動後には、定常状態での等尺性筋力が増加することを意味する(46)。これは、アクチンやミオシンと相互作用する構造タンパク質であるタイチンの受動的作用と関連があると考えられる(45)。

伸張性トレーニング：筋損傷と遅発性筋痛

短縮性収縮と比較すると、所定の負荷に対する伸張性収縮では、動員される運動単位の数が少ないため、活性化される

運動単位あたりの力が大きくなり、エクササイズによる筋損傷が生じる可能性がある(50,75)。最近の研究では、あらゆる点で、伸張性エクササイズ自体が筋損傷の唯一の原因ではないことが示されている。高強度の伸張性エクササイズに慣れないことも、筋損傷に重要な影響をもたらすからである(56)。負荷が大きく(77)、速度が速く(21,117)、筋長が長く(87)、経験が浅い人(76)のほうが、筋損傷が大きいことが明らかになっているが、遺伝的要素も重要な影響をもたらすことを考慮することがきわめて重要である(7)。伸張性収縮後の筋損傷を引き起こす最初の事象は、興奮-収縮連関システムの損傷とサルコメアの破壊が関連している(88)。これにより、能動的張力の減少、受動的張力の増加、能動的張力に最適な長さの変化、腫脹、疼痛、固有感覚の低下などが起こる可能性がある(87,88)。遅発性筋痛(DOMS)を回避するためには、繰り返し効果の役割を考慮することが重要である。繰り返し効果とはDOMSを防ぐ効果のことであり、1回の伸張性エクササイズで生じたDOMSや筋損傷を次の伸張性エクササイズで保護してさらなる損傷を防ぐことを意味し、これには神経的、力学的、細胞学的な適応が関係していると考えられている(66)。したがって、繰り返し効果がDOMSと筋損傷の影響をどのように軽減するかを理解することは、ストレングス&コンディショニング(S&C)プログラムの漸進と最適化に役立つだろう。例えば、伸張性トレーニングの時間は長いほうが短いよりも大きな適応を示すが(38)、長時間の伸張性トレーニングはより大きなDOMSを引き起こす可能性もある。筋損傷の悪影響を減らすためには、適切な漸進と過負荷が推奨される。

伸張性トレーニング後のトレーニング適応

このような伸張性収縮に固有の特性は、等尺性収縮や短縮性収縮と比較すると、際立った適応をもたらすと考えられる。実際、伸張性トレーニングは、短縮性トレーニングに比べ、筋力、筋肥大、および神経適応により大きな向上をもたらすことが明らかになっている(92,93)。伸張性トレーニングではより大きな負荷を挙上できるため、このトレーニング方法が、短縮性トレーニングに比べ、筋力全体のより大きな増加を示すことは驚くべきことではない(93,97)。伸張性トレーニングは、短縮性トレーニングに比べ、特有の筋や筋肥大の適応を引き起こす可能性がある。例えば、筋線維長の増加、遠位部における筋断面積の増加、羽状角の減少、サルコメア数の増加、筋スティフネスの促進などである(17,30,32)。このような筋や神経の特有の適応は、競技パフォーマンスや傷害予防に有益な効果をもたらす。実際、多くの研究が、伸張性トレーニングは、傷害のリスクを減らし、傷害の発生率や重症度を低下させ、他のトレーニング様式や治療介入よりも効果

が高いことを明らかにしている(52)。また、伸張性トレーニングは、身体能力の向上を誘発することも示されている。例えば、メタアナリシスによると、伸張性筋力に重点を置いてハムストリングスを鍛えると、スピードパフォーマンスが向上することが示されており(8)、これは速筋線維の肥大(33)や筋束長の増加(118)と関連していると思われる。また他の研究では、短縮性トレーニングと比較すると、伸張性トレーニングを行なったほうが、パワーの向上およびストレッショートニングサイクル(SSC)のパフォーマンス向上が大きいことも示されている(30,37,53)。さらに様々な研究により、従来のトレーニング(フリーウェイトなど)と比較して、伸張性筋活動を強調したトレーニング後は、CODパフォーマンスが向上することも明らかになっている(22,58,115)。これは、伸張性筋力がCOD活動中の素早い減速を促進することに関連があると考えられる(19)。

筋力の特異性

様々な研究で証明されているように、伸張性トレーニングは、他の方法(短縮性トレーニングや等尺性トレーニングなど)と比較すると、このトレーニングに関連した特異的な筋および神経の適応を生じさせられると思われる。この意味で、様々な研究がストレングストレーニングの特異性を示しており、実施したトレーニングの種類に特異的なテストにおいて、非特異的なテストと比較して、より大きな向上をもたらす(104)。したがって、アスリートのS&Cプログラムを作成する際には、当該スポーツの特性を考慮する必要がある。この意味において、各種のチームスポーツ(サッカー、ハンドボール、オーストラリアンフットボール、ホッケー、ラグビーリーグ、7人制ラグビー、ラグビーユニオン、バスケットボールなど)は、高強度および超高強度の減速をかなり多く行なうだけでなく、減速が加速よりも頻度が高いことが示されている(41,55,120)。いずれにしても、すべてのチームスポーツがこの傾向を示すわけではない。例えばアメリカンフットボール選手は、高強度の加速をより多く行なうことが明らかであり、ラクロスも同様の頻度を示す(44,125)。さらに、テニスやスカッシュなどの個人競技でも、多数の減速とCODが必要である(35,122)。急な減速は高強度の伸張性収縮を要するため(42,43)、この事実はきわめて重要である。したがって、例えば神経筋疲労はサッカーの試合中における激しいCODの回数と関係がある(73)。スプリントは大きな伸張性収縮を発生させ(98)、様々なチームスポーツにおいて、試合後の筋損傷に関係することが示されている(34,39)。この意味で、ストレングストレーニングは神経筋疲労の影響を軽減できる可能性がある。というのも、最近の研究では、等尺性筋力テストによって測定された最大筋力がより大きなアスリートほど、

回復が早いことが示されているからである(2,113)。一方で、最大伸張性筋力が試合後の疲労や回復にどのような影響を及ぼすかを分析した研究はまだ存在しない。試合後の筋損傷や疲労に関連する要因を考慮すると、力を吸収する能力が高ければ回復を促進する効果も高いことが示唆されるが、今後さらに研究が必要である。

興味深いことに、伸張性過負荷によるトレーニングプロトコルが加速と減速に及ぼす影響を分析した唯一の研究によると、試合中に行なわれた加速と減速の強度に関する変数が向上したことが確認された(74)。この知見は、試合でゴールを決める状況において直線運動と減速が重要な運動であることを考慮すると、より一層大きな意味をもつ(62,63)。したがって、減速やCOD、そしてスプリントが主体のスポーツでは、パフォーマンスの向上と回復の促進、さらに傷害の軽減を目指すのであれば、伸張性過負荷のトレーニングに特別な配慮をすることが勧められる(20)。

伸張性トレーニングの様式：フライホイールエキセン トリックトレーニング

先行研究には、様々な伸張性レジスタンストレーニングの方法が記載されている。例えば、テンポトレーニング(99)、伸張性負荷(123)、伸張性自転車トレーニング(6)、伸張性負荷を強調したプライオメトリックス(40)、水平減速(51)、方向転換トレーニング(27)、ダウンヒルランニング(14)、ウエイトリフティングのバリエーション(106)、フライホイール

エキセントリックトレーニング(FET)(12)などである。これらの方法の中で、近年、FETの人気の高まっている。このトレーニング機器は、回転シャフト(84)に取り付けられた1つまたは複数のフライホイール(弾み車)で構成される(図1)。フライホイール機器は、直前の短縮性局面で回転ホイールに蓄積された慣性を巻き戻すことにより、機械的な伸張性過負荷が可能となる(9)。運動を始め、やがてロープが十分に繰り出される(短縮性局面)と、その後は慣性によりフライホイールは回転を続け、ロープは巻き戻される。すると短縮性局面からの運動エネルギーが伸張性局面に伝達され、ディスクの回転を停止させるためには、同等の力積が必要となる(96)。

FETは魅力的な選択肢であり、以下のようないくつかの利点がある。(a)多種多様なエクササイズが可能でなく、運動学的三平面のすべてにおいて、競技によく似た、競技特異的な動作を行なうことができる(85)。(b)初回レップから最大努力となる負荷を提供する(112)。(c)あらゆる角度で、スティッキングポイントなしで、最大の力が発揮できる(119)。(d)各レップまたはセットの各段階において、提供される負荷の連続的な変化が可能である(114)。(e)持ち運びが容易で、様々な場所で利用できる(110)。

フライホイールシステムには様々なタイプがある(図1)。水平シリンダー型(フライホイールスクワット、レッグカール、レッグエクステンション、レッグプレス、プーリー、およびマルチジム)と垂直円錐型である。この垂直円錐型は、コニカルプーリーとも呼ばれ、上から下に向かってディスクの



図1 各種のフライホイールシステム。(写真)一般名一販売商品名。(A)フライホイールスクワットーDesmotec D.Evo、(B)フライホイールマルチジムーacceleration multigym、(C)フライホイールレッグカールーacceleration leg curl、(D)フライホイールプーリーーDesmotec V.Full、(E)コニカルプーリーーacceleration pulley fast、(F)フライホイールレッグエクステンションーacceleration leg extension、(G)フライホイールレッグプレスー#212 YoYo leg press

半径が大きくなっている(23,70)。水平シリンダー型の機器であれば、伸張性局面でより大きな力を発揮できるが、垂直円錐型の機器は、より高速でエクササイズを行なえることが示されている(70)。

FETを行なう場合、従来のストレングストレーニングで用いられる負荷の強度とは用語の使い方が異なる。フライホイールトレーニング中の低慣性／高慣性は、従来のストレングストレーニングにおける低負荷／高負荷に相当する。ディスク(円盤)やコーン(円錐)の慣性によって、処方されるエクササイズは力-速度曲線の異なる部分を目標にすることになる(低慣性は力-速度曲線の右方への移動を刺激し、高慣性は力-速度曲線の上方への移動を刺激する)(65)。フライホイール機器を用いたテストでは、男性の競技アスリートや活動的な男女において、力-速度曲線の様々なスペクトルにおいて信頼性が高いことが示されている(11,105)。トレーニング負荷は、速度を上げたり、フライホイールの重量を追加したりすることで変更できるが、伸張性過負荷をかけるこのトレーニング方法の有効性は、短縮性局面では、できるかぎり最大速度で力を発揮し、伸張性局面で回転運動を停止させようと意図することにある(10,60,109)。実生活の場面で、伸張性筋活動の動作を単独で行なうことはほとんどなく、通常は、SSC(伸長、償却、短縮)の中で行なわれる(59)。引き伸ばされていない筋と比較すると、伸張性筋活動中の予備伸張が、後続の短縮性収縮中に、より大きな力とパワーを生み出すことが一貫して証明されている(15)。この意味で、FETは、重力に依存している他のエクササイズ(カウンタームーブメントジャンプなど)(71)よりも負荷の大きな、SSCに基づくトレーニングであり(71)、最近の研究では、単独の短縮性筋活動(61)と比較すると、SSCを組み合わせたほうが、より大きな力が発揮されることが示されている。さらに言えば、慣性のレベルはSSCの利用程度に影響を及ぼし、低-中強度の慣性を使用する場合に最大となる(61)。

FET後のトレーニング効果

身体パフォーマンス

伸張性トレーニングを適用することの一般的な利点については本稿ですでに述べたとおりであるが、FETは、アスリートの様々な身体能力の向上に対する複数の利点が示されている。このトレーニング法の人気が最近高まっているため、いくつかのメタアナリシスやナラティブレビューにより、アスリートの筋力、パワー、スピード、CODなどの様々な身体能力の向上効果が分析された。注目すべき数のメタアナリシスおよびナラティブレビューにおいて、フライホイールトレーニングがコントロール群または従来のトレーニング群に比べ、筋力とパワーおよび／または各種ジャンプをより向上さ

せることができることが裏づけられている(4,59,91,96)。ただし、Vicens-Bordasら(121)は、フライホイールによる伸張性トレーニングと重力依存型のレジスタンストレーニングとの差はないとしている。興味深いことに、Petreら(84)は、若年者や十分に鍛練を積んだアスリートにおいて、FETの実施によってより高い改善効果が認められたとし、これは、経験豊富なアスリートが、短縮性・伸張性局面においてより活動的であることと関連があると仮定される。FET中のパワーおよび／またはジャンプの変数における改善は、理論的には伸張性過負荷の刺激に関連していると考えられ、それにより、SSCとスティフネスの改善、および短縮性筋活動の連続的な向上と結びついた運動パターンの改善がもたらされる可能性がある(91)。前述したように、FET後の筋力増大は、特に過負荷を伴うFET後に有意に高い筋力の増加が認められた場合は、生じた伸張性過負荷に関連している可能性があると考えられる(96)。

また、様々なメタアナリシスも、FETがスプリントパフォーマンスを向上させることを示している(59,84,91)。複数の著者が、異なるFET種目(スクワット、レッグカール、レッグプレス、マルチジムなど)で改善が得られた事実を強調している(26,91)。FETによるスプリント能力の向上は、潜在的に、より速いタイプの筋線維への移行を引き起こす伸張性過負荷トレーニングに関連していると考えられる(33)。FETがCODのパフォーマンスを向上させる能力についても、様々なメタアナリシスで検証されている(4,19,54,91)。考慮すべき重要な点として、これらのメタアナリシスの中では、Raya-Gonzálezら(91)がFETだけを取り上げていること、Liuら(54)がフライホイール機器を用いた11件の研究のうち8件を対象としていること、またAllenら(4)がサッカー選手のみを対象としていることである。これらのメタアナリシスにより、FETは、CODパフォーマンスの向上に関して、コントロール群および／または従来のレジスタンストレーニングよりも優れた方法であることが明らかとなった。伸張性過負荷によるトレーニング後の特異的な適応は、これらの研究結果を正当化しうるが、他の特徴もまた、これらの有望な結果を説明することができるだろう。例えばFETは、多平面での特異的なストレングストレーニングを容易に行なえるため(36)、競技特異的な動作を最適化することができる(85)。また、FET後における運動学的変数の変化も重要な役割を果たす可能性がある(54)。というのも、CODのパフォーマンスが改善することは、接地時間が短くなり、制動力や推進力、力積が大きくなることに関係するからである(28,103)。この意味において、de Hoyoら(25)は、U19のサッカー選手を対象に、FET後のCODテストを実施し、制動および推進の接地時間が有意に短いこと、また制動力と推進力および力積が大きいことを

見出した。この研究において、実験群は、最高出力を達成する慣性を利用したFET（ハーフスクワット、レッグカール）を週1〜2回、10週間行なったのに対し、コントロール群はこの間にいかなる種類のレジスタンストレーニングも行なわなかった。これは正しい方向へ踏み出した研究といえるが、今後、研究者は、特定のチームスポーツ環境においてFETの有効性を検証することを目指すべきである。例えば、Nevado-Garrosaら(74)による最近の研究では、23歳以下の女子選手を対象に、フライホイールによる伸張性過負荷トレーニング群または少人数のミニゲーム(SSG)を行なった群とコントロール群とを比較し、サッカーの試合中における加速および減速の変数に及ぼす影響を分析した。選手は、フライホイール機器を用いた伸張性過負荷トレーニングを10セッション行なった。選手は、5種目の下半身エクササイズを6レップ1セットから始め、7レップ2セットで終えた。実施したエクササイズは、異なるフライホイール機器による、スクワットとラテラルスクワット、ライインググルートキックバック、スプリット、およびダブルレッグカールであった。SSG群では、運動レップ数や加速、減速を長時間維持する能力などの変数に改善が認められたが、伸張性過負荷群では、コントロール群に比べ、高強度での加速と減速を伴う移動距離、最大加速および減速、平均加速および減速の改善が認められた(74)。この先駆的な研究は、コントロールされた環境で見出された利点を裏づけるものではあるが、FETが個人およびチームスポーツのパフォーマンスや、試合後の回復にどのような影響を与えるかについてより深く理解するためには、さらに多くの研究が必要である。

傷害予防

FETは、筋や関節の傷害からアスリートを守る積極的な適応を促進すること(68)、また腱障害の治療に効果的なトレーニング方法であることが示されている(16)。チームスポーツのアスリートを対象に行なわれた研究によると、FETはインシーズンにおける傷害数の減少に効果的であることが明らかになっているが(5,24)、これは筋束長の増加など、特定の神経筋適応に関連している可能性がある(5,79)。いずれにせよ、これらの研究はFETをコントロール群と比較したものである。他のレジスタンストレーニング方法に対する有効性を理解するためには、さらに研究が必要である。

FETの導入

近年、FETに対する関心が高まり、研究数も飛躍的に増加してはいるが、この方法は、従来のレジスタンストレーニングやパワートレーニングなど、他のトレーニング方法と比べるとまだ新しい。したがって、様々な著者がトレーニングプ

ログラムにおけるガイダンスや実践方法の不足を強調し、そのため、FETによる介入の利用を具体的に進めることは難しいと論じていることは、驚くべきことではない(81)。数名の著者が、入手可能な研究に基づいた適切なガイドラインを提案している。研究者らは、2〜3種目のエクササイズを推奨し、6〜8レップを1〜6セット、セット間の休息は1分30秒〜3分以上取ることを助言している(10,12,89,111,112)。これについては、使用する慣性によって必要な休息時間が決まり、慣性が高いほど休息時間は長くなる(94)。また、フライホイールを加速させるために、1〜4レップが別途必要であることを考慮することも重要である(57,95)。

トレーニング強度に関して、研究者は、筋力の適応には高慣性($>0.050\text{ kg}\cdot\text{m}^2$)を、パワーの適応には低慣性($0.025\sim 0.050\text{ kg}\cdot\text{m}^2$)を推奨している(12)。トレーニング頻度に関しては、著者らは週1〜3セッション、セッション間に48時間の回復時間を設けることを推奨している(10,89,111,112)。これはシーズンの時期によって異なり、研究者らはオフシーズンには週2回、インシーズンには少なくとも週1回の実施を推奨している(12,89)。最後に、エクササイズの選択をみてみると、筋力やパワーを強化するためには多関節エクササイズが推奨され、それが競技パフォーマンスに繋がる可能性があるのに対し、傷害予防を目的とする場合には、単関節エクササイズのほうがより有益であると思われる(12)。Raya-Gonzálezら(89)は、パフォーマンスの向上には低慣性から高慣性を、傷害予防には高慣性を提案している。これらの推奨事項は、一般的に入手可能な実験的研究に基づいており、従来のストレングストレーニングと比較した数は少ないため、注意が必要である。FETを通じて様々な身体能力を向上させるためのトレーニングを推奨する際には、FETおよびその他の伸張性過負荷トレーニングに関する入手可能な研究(伸張性負荷局面強調法、テンポトレーニングなど)を検討すべきであり、さらに、従来のストレングストレーニングやパワートレーニングに関する幅広いエビデンスも考慮する必要がある。**表1**に、フライホイール機器を使用したパワートレーニングとストレングストレーニングおよび傷害予防トレーニングのガイドラインを示す。この表は、ピリオダイゼーションの段階に応じて設定可能な、一般的な推奨事項を示している。シーズンの各段階に応じた具体的な指針を論じることは、本稿の範囲を超えている。

週の組み立て

週単位の組み立てに目を向けると、Beatoら(12)は最近、FETを取り入れた具体的な週間ピリオダイゼーションを提案している。著者らは、オフシーズン、インシーズン、週に2試合という3つの異なるシナリオを用意しており、オフシー

表1 フライホイールエキセントリックトレーニングのガイドライン

身体能力	レップ数	セット数	休息	エクササイズ	慣性	セッション／週	推奨機器
パワー	2+3～6	1～3	2分	1～4	低～中	1～2	コニカルプーリー、フライホイールプーリー、フライホイールスクワット
筋力	2+5～8	1～4	3分	1～4	中～高	1～3	フライホイールスクワット、フライホイールマルチジム、フライホイールレッグプレス、フライホイールレッグエクステンション、フライホイールレッグカール、フライホイールプーリー
傷害予防	2+5～8	1～4	2～3分	1～6	低～高	1～3	フライホイールレッグカール、フライホイールレッグエクステンション、フライホイールプーリー、コニカルプーリー

ズンおよびインシーズンに、2～3セッションのFETを提案している。オフシーズンにおいては、初回FETのセッションを試合日(MD)の4日前(MD-4)における午前中に行なう一方、試合日の2日前(MD-2)には、トレーニングセッションの前にパワーセッションを行なうことを推奨している。一方インシーズンにおいて、Beatoら(12)は、控えの選手には試合日の2日後(MD+2)に筋力／傷害予防(IP)セッションを、試合日の4日前(MD-4)に筋力とIPセッションを先発と控えの選手にそれぞれ提案している。また、MD-2には先発と控えの選手のパワーセッションをそれぞれ実施することを提案している。我々は表2で、プレシーズンとインシーズンに実施できる、チームスポーツのための代替スケジュールを提案する。控えの選手は筋力／IPセッション(FETを含む)を試合後に行なう。次に、先発も控えの選手もパワーセッション(FETを含む)をMD-4に行なう。MD-4のトレーニング前にパワーセッションを行なうことの利点は、選手が試合後約

72時間の休息を取り(MD+2で何らかの軽いトレーニングを行なう可能性もあるが)、疲労していない状態でこのパワーセッションを行なうことに関係している。トレーニングを実施する前にこのパワーセッションを行なうことで、活動後増強効果が得られる可能性もある(13)。表2では、MD-4で、練習後における上半身のセッションと、筋力とIPのためのマイクロドージングセッション(フライホイールエクササイズ1～2種目を含む1～4種目を1～2セット)を提案する。これは、大きな疲労を生じさせることなく、わずかな筋力刺激を与えることになるだろう。その後、試合日の3日前(MD-3)の練習後に、アスリートは主要な筋力およびIPのセッションを実施することになる。

しかし、週に2日試合が行なわれる場合において、Beatoら(12)は、第1試合日のMD+2／MD-2および第2試合日の翌日(MD+1)／MD-2にフライホイールパワーセッションを提案している。我々は、控えの選手には、週半ばの試合後

表2 プレシーズンとインシーズンの週：試合日は週1日

	MD	MD+1	MD+2	MD-4	MD-3	MD-2	MD-1	MD
	試合	休日	積極的回復	筋力	持久力	スピード	活性化	試合
午前中	試合準備			全員：パワー（フライホイールトレーニングを含む）				試合準備
昼前			練習	練習	練習	練習	練習	
午後	試合			全員：上半身+下半身の筋力／IP微量処方（フライホイールトレーニングを含む）	全員：下半身の筋力／IP（フライホイールトレーニングを含む）			試合
夕方	NS：下半身の筋力／IP（フライホイールトレーニングを含む）							NS：下半身の筋力／IP（フライホイールトレーニングを含む）

IP＝傷害予防、MD-1＝試合日の前日、MD-2＝試合の2日前、MD-3＝試合の3日前、MD-4＝試合の4日前、MD+1＝試合の翌日、MD+2＝試合の2日後、MD＝試合日、NS＝控え選手、S＝先発選手

表3 プレシーズンとインシーズンの週：試合日は週2日

	MD	MD-2	MD-1	MD	MD+1	MD-2	MD-1	MD
	試合	回復	活性化	試合	回復	回復	活性化	試合
午前中	試合準備			試合準備		NS：パワー（フライホイールトレーニングを含む）		試合準備
昼前			練習		練習	練習	練習	
午後	試合			試合				試合
夕方	NS：下半身の筋力／IP（フライホイールトレーニングを含む）			NS：下半身の筋力／IP（フライホイールトレーニングを含む） S：下半身のマイクロドージング 筋力／IP（フライホイールトレーニングを含む）				NS：下半身の筋力／（フライホイールトレーニングを含む）

IP＝傷害予防、NS＝控え選手、S＝先発選手

に筋力およびIPのセッションを行ない、パワーセッションを第2試合日の2日前(MD-2)で行なうことを提案する(表3)。しかし先発選手には、週半ばの試合後に筋力およびIPのための微量の刺激を処方する。これは、アスリートが筋力刺激を受けることにより、疲労および／または筋痛のマーカーをわずかに増加させる可能性はあるが、回復戦略が優先されるMD-2および試合前日(MD-1)の間、筋に損傷を与える可能性のある他の刺激に曝されないことが有益であることを意味する。この筋力刺激は選手にとってリスクを意味するといえなくはないが、常に毎週2日試合を行なうチームでは、ストレングストレーニングを実施できる時間は非常に限られている。もしこれを除外すれば、実施する場合のリスクを上回るだろう。この方策を用いる場合には、繰り返し効果の利点を享受し、さらなるDOMSを避けるために、選手が習熟しているエクササイズを行なうことを推奨する。表2、3には、筋力、IP、およびパワーの目的だけが明記されているが、CODの向上やスピードに特化したエクササイズや運動も加えることができる。その意味で我々は、ストレングスプロトコルの一部として、FETを用いてCODに重点を置いたエクササイズを取り入れるだろう。一方、パワーセッションではスピードエクササイズを取り入れることを推奨する。

フライホイールトレーニングは伸張性過負荷を生み出せるか？

短縮性、等尺性、伸張性の筋活動を含む従来のレジスタンストレーニングでは、3つの局面すべてで同じ絶対負荷がかかるため、相対的な伸張性負荷は低くなる。したがって、同じ絶対負荷で伸張性局面だけを取り出すと、実質的に負荷が不

足する。しかし、伸張性過負荷をかけるということは、短縮性局面で選手が挙上する負荷よりも高い負荷を課すことになる(33)。この違いはきわめて重要である。FET中に伸張性過負荷を生み出すことができれば、過負荷のないFETと比べ、有意に大きな力の増加が示されるからである(96)。

研究によると、FETを実施している対象集団に基づくと、この種の伸張性過負荷エクササイズは、非鍛錬者および／またはオフシーズン中により適していることが示唆されている(111)。しかし最近の研究では、鍛錬者におけるFETの優位性が強調されているし(84)、他の著者らも、インシーズンにおけるFETの利用を支持している(12)。

フライホイール機器は伸張性過負荷を生じさせることができるのか、あるいは、伸張性刺激は、短縮性局面で発生したエネルギーと同程度にすぎないのか議論されてきた(110)。最近のメタアナリシスによると、フライホイール機器を使用した79件の研究のうち、伸張性過負荷の存在を確認するのに十分なデータが得られたのは17件のみであった(69)。それらの研究では、伸張性過負荷のエビデンスを示す指標は、ピークパワーとピーク速度であった(69)。これらの研究で伸張性過負荷が生じなかったことのひとつの説明としては、実施された運動の運動学と運動力学に関連している可能性がある。例えば、フライホイールスクワットマシンでのスクワット中は、力学的に有利な膝関節と股関節が相対的に伸展している際に短縮性の最大の力が発生するが、伸張性のピークフォースは、膝関節と股関節が切り返し点付近で伸展している、力学的に不利な位置で発生する(101)。さらに、スクワット中に異なる筋群が組み合わさって(複数の筋群が収縮して)生じる力のタイミングは、伸張性収縮と短縮性収縮中のあるサイクル

を通して異なっている(101)。伸張性過負荷が不十分なもうひとつの理由は、短縮性局面が最大強度で行なわれないことに関係している。それは、伸張性局面で最大努力よりも少ない筋力しか必要としないことを意味する。例えば、新人アスリートがフライホイールレッグエクステンションのマシンを使ってレッグエクステンションを行なう場合に、経験不足や理解不足により、ゆっくりとした短縮速度で行なうと、アスリートが伸張性局面全体を通して吸収する運動エネルギーは、伸張性過負荷を生じさせるには十分ではない。伸張性過負荷を生じさせるためには、伸張性局面のテンポと可動域を調節すること(すなわち伸張性局面の終了時に減速し、ゆっくり行なうこと)を著者は推奨している(71)。水平シリンドー式および高慣性では、伸張性過負荷を生じる可能性がより高いことが示されている(61,70)。最後に、アスリートの経験や性差も、伸張性過負荷を生じさせる(または生じさせない)ことに影響する可能性がある(61,116)。

フライホイールエクササイズを追加する際の重要な留意点
S&Cプログラムの一部としてのFET

FETを処方する際は、これをプログラム全体の一部として活用することが重要であり、正当な根拠もなく、単に「混ぜる」ためにエクササイズを追加してはならない。例えば、エクサ

サイズプログラムの中で、アスリートがフリーウェイトを用いたスクワットを行なう必要性を認識したとすると、この運動は、フライホイール機器でスクワットを行なう場合と、バイオメカニクスのにも神経筋的にも若干の違いはあるものの(18,64)、非常によく似たエクササイズである。したがって、大抵、アスリートのニーズに基づいて代替のフライホイールエクササイズを実施することは合理的である。表4~6に、フライホイールエクササイズをトレーニングプログラムに取り入れる方法の具体例を示す。

エクササイズ種目の数

プログラム内におけるフライホイールエクササイズの数にも、特に注意が必要である。FET経験の浅いアスリートの場合、1セッション当たり1~2種目、1~2セットから開始すれば十分であるが、高度な専門能力を有するアスリートであれば、より多量のエクササイズ(2~4種目を2~4セット)に耐えることができるだろう。実際、伸張性エクササイズは筋損傷を起こす可能性があるため、チームや個人が行なうその他の主要なトレーニングセッションに影響を及ぼす可能性のある極度のDOMSを避けるためには、エクササイズの量、強度、漸進性、セッションのタイミングを考慮する必要がある。伸張性過負荷を増加させる際には、特に高慣性と高過負荷のエ

表4 鍛練者で能力の低い対象へのフライホイールトレーニング

	セット数	レップ数	機器	慣性
パワー				
フライホイールスクワット with プランターフレクション	2	2+5	フライホイールスクワット	低
DL CMJ to ボックス	2	5		
バンジーアクセレーションステップ	2	5		低
パワーステップアップ	2	5		
DL ブロードジャンプ	2	5		
コニカルプーリー・サイドオープンステップ(最終2/3で減速)	2	2+5	コニカルプーリー／フライホイールプーリー	低
下半身の筋力、マイクロドージング				
コペンハーゲン	2	30秒		
フライホイールスクワット with ターン	1	2+5	フライホイールスクワット	中
SL ダンベルカーフレイズ	2	12		
下半身の筋力				
ヘキサゴンバーデッドリフト	3	5		
フライホイールアシスティッド・スプリットスクワット	2	2+5	フライホイールスクワット	中
フライホイールサイドランジ with プランターフレクション	2	2+5	フライホイールスクワット	中
DL バーベルヒップスラスト	3	5		
SL マシンニーエクステンション	3	8		
SL マシンレッグカール	3	8		

2+5とは、2レップでフライホイールを加速し、続いて最大強度で5レップ行なうことを意味する。
CMJ=カウントームーブメントジャンプ、DL=ダブルレッグ、SL=シングルレッグ

表5 鍛練者で能力が中程度の対象へのフライホイールトレーニング

	セット数	レップ数	機器	慣性
パワー				
SLフライホイールスクワット with プランターフレクション	2	2+5	フライホイールスクワット	低
SL CMJ to ボックス	2	5		
コニカルプーリー・クロスオーバーステップ(最終2/3で減速)	2	2+5	コニカルプーリー／フライホイールプーリー	低
DLバンドアシスティッドジャンプ	2	8		
SLブロードジャンプ	2	4		
コニカルプーリー・90° オープンステップ	2	2+5	コニカルプーリー／フライホイールプーリー	低
下半身の筋力、マイクロドーピング				
コペンハーゲン with オボジットレッグリフト	2	30秒		
フライホイール・コンセントリックアシスティッドスクワット	1	2+5	フライホイールスクワット	中
SLカーフレイズ on レッグプレス	2	12		
下半身の筋力				
スプリット・ヘキサゴンバーデッドリフト	3	5		
フライホイール・サイドターンスクワット(最終1/3で減速)	2	2+5	フライホイールスクワット	高
フライホイール・ローテーションサイドランジ	2	2+5	フライホイールスクワット	高
SLヒップスラスト	3	5		
リバースノルディックカール	3	8		
コニカルプーリー・ヒップエクステンション(最終1/3で減速)	3	8	フライホイールスクワット	中

2+5とは、2レップでフライホイールを加速し、続いて最大強度で5レップ行なうことを意味する。

CMJ=カウンタームーブメントジャンプ、DL=ダブルレッグ、SL=シングルレッグ

表6 鍛練者で能力の高い対象へのフライホイールトレーニング

	セット数	レップ数	機器	慣性
パワー				
SLフライホイール1/4~1/2スクワット(低慣性)	2	2+5	フライホイールスクワット	低
スプリンター CMJ	2	5		
コニカルプーリー・90° クロスオーバーターン+アクセルステップ(連結)	2	2+5	コニカルプーリー／フライホイールプーリー	低
ボックス to ボックスジャンプ	2	8		
ドロップジャンプ to SLブロードジャンプ	2	4		
コニカルプーリー・90° オープンステップ to 90° クロスオーバーステップ	2	2+5	コニカルプーリー／フライホイールプーリー	低
下半身の筋力、マイクロドーピング				
バンドサイドプランク	2	30秒		
フライホイール・サイド to サイドターンスクワット+キャッチ	1	2+5	フライホイールスクワット	中
フライホイールマルチジム・DLカーフレイズ	2	12	フライホイールマルチジム	高
下半身の筋力				
バーベルステップアップ	3	5		
フライホイールスクワット・アップ with 2, ダウン with 1	2	2 + 5	フライホイールスクワット	中
フライホイール・フォワード to バックターンランジ	2	2 + 5	フライホイールスクワット	高
SLバーベルフィートエレベティッド・グルートブリッジ	3	5		
SLニーエクステンション in フライホイールレッグエクステンション	3	2 + 5	フライホイールレッグエクステンション	高
ノルディックカール	3	5		

2+5とは、2レップでフライホイールを加速し、続いて最大強度で5レップ行なうことを意味する。

CMJ=カウンタームーブメントジャンプ、DL=ダブルレッグ、SL=シングルレッグ

エクササイズを処方する場合は、適切なタイミングを考慮する必要がある。特に、週2回とはいわないまでも、ほぼ毎週試合の予定が組まれているようなチームスポーツでは注意が必要である。トレーニング負荷の低い週やインターナショナルブレイクの週(国際試合に出場する選手以外)、試合間に複数の週が挟まる場合(試合間が7日以上空く場合)、または補完セッション中(先発出場しない場合や出場停止処分中など)は、プログラムを修正して伸張性過負荷を増加させる理想的なシナリオとなる可能性がある。

漸進前の適切なテクニック

特に重要なことは、傷害や傷害に繋がる代償運動を確実に回避するために、これらの伸張性過負荷におけるエクササイズを適切なテクニックで行なうことである。アスリートは超最大負荷に曝されるため、これは決定的に重要である。したがって、これらの機器を使い始め、より高い過負荷やより困難なエクササイズへと漸進する際には、アスリートが十分なテクニックでその負荷に耐えられることを確認する必要がある。その意味において、現在の研究では、フライホイール機器の使用を開始する適切な年齢は推奨されていないが、様々な研究が13歳以上のアスリートを対象として実験を行なっている(31)。テクニックやトレーニング経験など、年齢以外におけるパラメータのほうが、意思決定プロセスでは一層重要であると思われる。

安全性

フライホイールエクササイズ、特に高い伸張性過負荷のエクササイズを行なう場合は、失敗した場合にアスリートが伸張性局面で安全に停止できるようにしなければならない。これは、フライホイールレッグカール、レッグエクステンション、レッグプレス、プーリー、マルチジム、コニカルプーリーなどの特定の機器では、慣性を別の方法で止めることができるため、必要ではないかもしれないが、フライホイールスクワットマシンでエクササイズを行なう場合は、注意しなければならない。フライホイールスクワットマシンの中には、アスリートがつかまる必要がある場合(すなわち、伸張性局面で生じる運動エネルギーにアスリートが対応できない場合)に備えて、つかまるためのバーが取り付けられているものもある。もうひとつの重要な注意点は、ハーネスを適切に調節し、フライホイール機器と適切に接続することである。ハーネスは(ヒップハーネスを使用する場合を除き)肩周りに装着し、胸部の安全クリップをしっかりと固定する。エクササイズを行なう前に、アスリートはこれから行なうエクササイズの短縮性局面における最終姿勢(スクワットでは、膝関節と股関節を伸展させた状態)で静止し、短縮性局面から伸張性局面へ

移行する際に弛みや遅れが生じないように、ロープの長さを調整する。

よくみられるエラーテクニック

短縮性局面が股関節と膝関節の伸展で終了するエクササイズ中は、経験の浅いアスリートは、伸展した姿勢を保持する傾向にあり、これは大きなリスクとなりうるため、短縮性局面が終了したら直ちに膝関節と股関節を曲げ始めるように指導することが重要である。フライホイールスクワットでエクササイズを行なう際、前傾姿勢や後傾姿勢になるとバランスを崩しやすくなり、アスリートが傷害を負う危険性がある。さらにコーチは、特に軽量のフライホイールスクワットマシンの上では、エクササイズ中にアスリートの身体が移動しないように、足をプラットフォームの前部や後部の端に置かず、必ず中央に置くように注意する。最後に、エクササイズを安全に終了するために、装置に設置されている「STOP(停止)」の使い方をアスリートに教育することが必要である。

スムーズな移行のために足関節底屈を加える

足関節の底屈は、それ自体が伸張性局面に過負荷をかけるために推奨される方法のひとつであるが、股関節と膝関節の完全伸展が必要とされるほとんどのエクササイズにおいて、ある程度の足関節底屈が推奨される。なぜなら、それによりアスリートが短縮性局面から伸張性局面へ移行する時間を確保できるからである。例えば、スクワットをフライホイールスクワットマシンで行ない、ロープ/コードが全長の終端(短縮性局面の終端)に達した時にアスリートが膝関節と股関節を完全伸展させた場合、股関節と膝関節を伸展させた位置で「動けなくなる(Stuck)」前に伸張性局面を始める時間は最小限しかない。これが起こると、(すべてではないにせよ)大量の運動エネルギーが、力学的に有利な伸張性局面の最初に吸収されることになるだろう。

特異性

前述したように、FETの利点のひとつは、スポーツと同様の運動学により、三平面すべてにおいて多種多様なエクササイズを行なえることである(85)。S&Cプログラムを作成する際、この利点を生かすためには、私たちが向上を目指している身体特性を考慮し、それをどのように目標とすることができかを検討することが必要になるだろう。例えば、選手の水平方向における減速能力を向上させたい場合は、矢状面でのストレングスエクササイズ(コニカルプーリー/フライホイールプーリーやフライホイールスクワットを使ったフォワードランジなど)を処方することが妥当である(図2)。ここで、短縮性局面では、運動エネルギーは後方に向かって生み

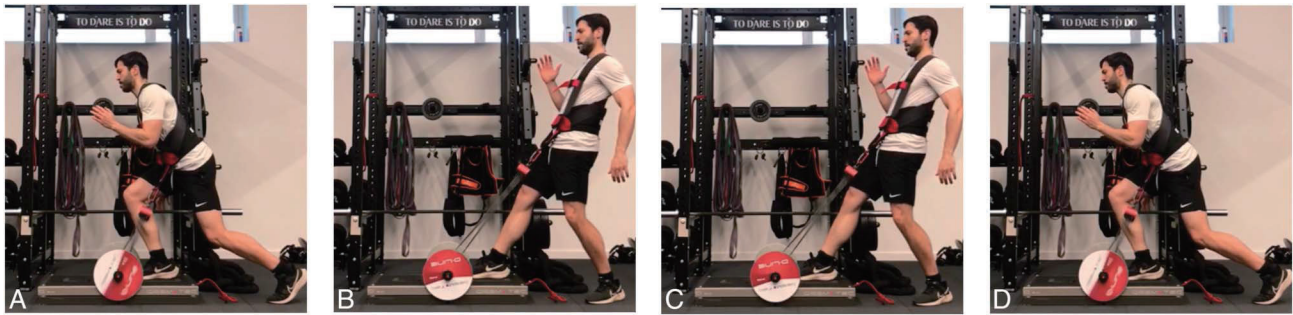


図2 フライホイールスクワットでのフォワードランジ。(A)短縮性局面の開始、(B)短縮性局面の終了、(C)伸張性局面の開始、(D)伸張性局面の終了

出され、伸張性局面では、運動エネルギーは前方に向かって吸収される。しかし、ジャンプ能力を向上させるためであれば、足関節底屈を伴うフライホイールスクワットでスクワットを行ない、低慣性を利用して、ダブルレッグまたはシングルレッグのジャンプを行なうだろう(図4、写真1)。この意味で、足関節底屈を用いてこのエクササイズを行なうことは、伸張性過負荷を可能にするだけでなく、爆発的ではないスクワットとの比較によると潜在的利益が明らかな爆発的エクササイズを行なうことにもなるだろう(108,109)。

直接的フィードバック

フライホイールには通常、エンコーダーおよび／またはフォースプレートが組み込まれているため、直接的なフィードバックを検討する必要がある(69)。フライホイールの関連企業は大概、ピークパワーや平均パワー、あるいは短縮性局面および伸張性局面における力などの指標を示す即時的フィードバックを可能にするアプリを提供している。これにより、以下のことが可能になる。(a)アスリートに、発揮されたパワーおよび／または力を認識させ、各レップ中に伸張性過負荷が発生しているか否かを理解させ、必要があればテク

ニックをわずかに修正すること。(b)週ごとの変化を追跡すること。(c)新しいエクササイズを行なう際に、かかった過負荷を認識し、実質的な増加があるかを理解すること。(d)直接的フィードバックを受けることによって、アスリートがモチベーションを高めること(124)。

フライホイール機器を使用する際に伸張性過負荷を生み出す方法

FET中の伸張性過負荷を促進するために、様々な方法を用いることができる。それぞれの方法は、種類の異なるフライホイールに適しており、レベルの異なる過負荷を生じる可能性がある(図3)。図4は、フライホイールスクワットマシンを例として、伸張性過負荷を生じさせるために提案されている各方法を連続撮影した写真である。それぞれ、短縮性局面の開始、短縮性局面の終了、伸張性局面の開始、伸張性局面の終了を示している。

短縮性局面における可動域の拡大

足関節底屈を加える(初級)

(スクワット動作などに)足関節底屈を加えると、短縮性局

方法	短縮性局面の 可動域を広げる		伸張性局面の 可動域を狭くする			コーチ／ アスリートの 補助による過負荷		局面間のエクサ サイズ／片側・ 両側の入れ替え		伸張性過負荷法 の組み合わせ	
方法の バリエーション	足底屈を 加える	股関節 回旋を 加える	可動域を 変える	最終1/3で 慣性を 止める	キャッチ	短縮性局面 の補助 (アスリート または コーチ)	伸張性局面 の補助 (アスリート または コーチ)	伸張性局面 で負荷を 追加する	局面間で エクササ イズを 変える	局面間で 両側性と 一側性を 入れ替える	2種類以上 の方法を 組み 合わせる
過負荷 レベル	+	++	+	+++	++++	++	+++	++	+++	++++	+++++
フライホ イール機器	Fスクワット、 Fマルチジム、 フレッグプレス、 Fプーリー、 コニカルプー リー	Fスクワット、 Fプーリー、 コニカルプー リー	Fスクワット、 Fマルチジム、 フレッグカール、 フレッグエクステンション、 フレッグプレス、 YOYOプーリー、 コニカルプー リー			Fスクワット、 Fマルチジム、 フレッグカール、 フレッグエクステンション、 フレッグプレス、 YOYOプーリー、 コニカルプー リー			Fスクワット、 Fプーリー、 コニカル プーリー	Fスクワット、 Fマルチジム、 フレッグカール、 フレッグカール、 フレッグエク ステンション、 YOYOレッグ プレス、 YOYOプーリー、 コニカルプー リー	Fスクワット、 Fマルチジム、 フレッグカール、 フレッグエク ステンション、 フレッグプレス、 Fプーリー、 コニカル プーリー

図3 フライホイール機器を使用して伸張性過負荷を生む方法。 F=フライホイール

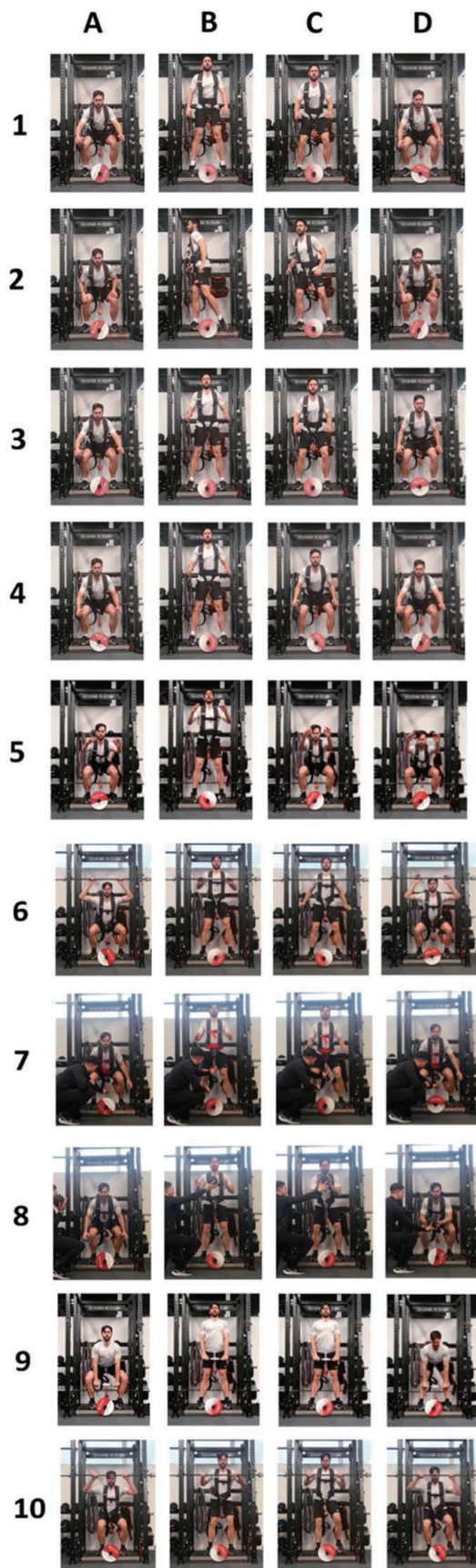


図4 伸張性過負荷を生じさせる各方法の連続写真。(1)足関節底屈を加える (2)股関節回旋を加える (3)可動域を変える (4)最終1/3で慣性を止める (5)キャッチ (6)短縮性局面の補助 (7)伸張性局面の補助 (8)伸張性局面における負荷の追加 (9)局面間でエクササイズを変える (10)局面間で両側性から一側性に変える (A)短縮性局面の開始 (B)短縮性局面の終了 (C)伸張性局面の開始 (D)伸張性局面の終了

面の可動域を広げることになるが、伸張性の足関節底屈局面が存在するとは限らない(アスリートはそのままスクワットの伸張性局面に入る)ため、可動域が伸張性局面に吸収されることはない。すなわち伸張性局面において、より少ない時間で吸収すべき運動エネルギーが増えることになる。さらに、足関節底屈筋のように伸張性局面では関与しない筋群の力が短縮性局面で加えられるため、一層効果的である。この方法の各局面を図4に示す。

股関節の回旋を加える(中級)

足関節底屈を加えるのと同様に、短縮性局面における最後の1/3で股関節の回旋を加えることで、股関節回旋筋の可動域を広げ、特定の股関節回旋筋の関与を高めることができる。例えば、回旋を伴うスクワットを行なう場合、短縮性可動域が増加し、生成される運動エネルギーの量も増加する。伸張性局面では、アスリートは当然、この局面の最初に発生した運動エネルギーの吸収を避け、スクワットの自然な立位姿勢に戻るためにまだ回旋しているが、最初の回旋後(すなわち、伸張性局面における最初の1/3ののち)、つまりより水平または対称な姿勢になった時に、力の吸収をわずかに遅らせることになる。この方法の各局面を図4に示す。

伸張性局面における可動域の減少

交互可動域(初級)

この方法は、同じエクササイズをレップごとに異なる可動域で行なう。例えば、ハーフスクワット後にクォータースクワットを行なう。この場合、ハーフスクワットの短縮性局面で発生したすべての運動エネルギーを、クォータースクワットで吸収しなければならず、伸張性過負荷が生じる。この方法の欠点は、エクササイズにおける次の段階であるクォータースクワット中に、力を発揮する時間が短くなり、その力がハーフスクワットで吸収されてしまうことである。アスリートは可動域内で「遊び」を作ることができ、伸張性過負荷がかかる局面とかからない局面を交互に繰り返すことができるため、伸張性過負荷プログラムの入門にもなる。この方法の各局面を図4に示す。

伸張性局面における最後の1/3で慣性を止める(中級)

この場合、短縮性局面で発生したすべての運動エネルギーを、より短い可動域で吸収する必要が生じる。動作における最後の1/3で慣性を停止させることは、フライホイール機器で伸張性過負荷を発生させるために、研究で最もよく用いられる方法であるが(69,90)、アスリートには、別のポイント(すなわち下降局面の途中、動作における最初の1/3)で慣性を停止させることもできる。この方法の各局面を図4に示す。

キャッチ(上級)

この場合、アスリートは短縮性局面後、最下点に近い位置で力を吸収しようと試みる。短縮性局面で蓄積された力は、等尺性筋活動により短時間で吸収されることになる。ほとんどすべての場合、アスリートはその姿勢を保持することができず、運動エネルギーがアスリートをさらに押し下げ、伸張性収縮が生じる。これには、等尺性動作の失敗とそれに続く伸張性収縮が含まれ、研究では伸張性準等尺性収縮と呼ばれている(80)。主な違いは、研究におけるこの用語の説明によると、等尺性収縮から伸張性収縮への移行を意味するが、その移行は、疲労により筋が引き伸ばされるまで、できるだけ長時間、等尺性収縮に可能なかぎり抵抗することによって生じる疲労に起因する(80)。そのかわり、フライホイールエクササイズにおける伸張性局面でのキャッチでは、伸張性筋活動は等尺性収縮の継続による疲労から生じるのではなく、キャッチ、すなわち等尺性収縮中に短縮性筋活動により生じた運動エネルギーを筋群が吸収しきれず、残りの運動エネルギーが伸張性収縮によって吸収されることから生じるのである。これは、説明した方法の中で最も高い伸張性過負荷をもたらすエクササイズのひとつである。この方法の各局面を図4に示す。

コーチ／アスリート／負荷による過負荷の補助

短縮性局面の補助(中級)

この方法は、運動の短縮性局面ではアスリート自身またはコーチ／トレーナーが補助し、伸張性局面ではアスリートが補助なしで運動を完了できるようにする。この意味で、最近の研究では、フライホイールスクワットマシンでアシステッドスクワットを行なうと、より大きな伸張性の発揮筋力をもたらす、より大きな短縮性の発揮筋力が認められた(126)。実際、アスリートが短縮性局面を補助つきで行なう場合、短縮性局面において、アスリートが自力で生成できる運動エネルギーよりも多くの運動エネルギーが産生され、下降局面ではその余分な運動エネルギーを吸収しなければならない。例えば、フライホイールスクワットマシンでスクワットを行なう場合、アスリートは短縮性局面で動かない用具(バーベル、ラックなど)を手で持って押すことで補助し、下降する際は両手を自由にすることにより、アスリートは下肢から発生する運動エネルギーだけでなく、上半身から発生する運動エネルギーも吸収しなければならない。コーチが補助する場合は、短縮性局面でロープを引き上げ、伸張性局面でロープを放す。これにより発生する追加的な運動エネルギーをコントロールできなくなるため、アスリートにとってより困難なエクササイズとなる。この方法の各局面を図4に示す。

伸張性局面の補助(上級)

この方法は、短縮性局面の補助とは対照的に、アスリートが補助を受けずに短縮性局面を行ない、伸張性局面でコーチ／トレーナーがロープ／コードを引き下ろすことで補助する。これは、アスリートが短縮性局面でそれまでに発生した運動エネルギーよりも多くの運動エネルギーを吸収する必要があることを意味することになる。他の方法と比較すると、吸収されるエネルギーはコーチ／トレーナーがロープ／コードを引く速度に依存するため、アスリートは伸張性局面自体をコントロールすることができない。この方法を安全に行なうには、アスリートもコーチも豊富な経験が必要である。これに代わる方法としては、アスリートが自分自身を押し下げ、外部の物体(ラックやラックにかけられたバーベルなど)に力を加える方法がある。アスリートが下肢を用いて減速しようとする時に、フライホイールの慣性が同時にアスリート自身を押し下げるため、難易度は顕著である。これは、FETの経験が浅いアスリートにとってはきわめて困難である。この方法の各局面を図4に示す。

伸張性局面での負荷／重量の追加(中級)

この方法は、伸張性局面で挙上される負荷が短縮性局面で挙上される負荷よりも大きいという点で、伸張性負荷強調法やプライオメトリックスの伸張性負荷強調によく似た原理である。だが、FETの性質により、アスリートがハーネスを装着し、同一セットにおいて、短縮性動作と伸張性動作を停止せずに連続して行なう場合、加えられる追加の負荷における特性は、伸張性負荷強調法やプライオメトリックスの伸張性負荷強調とは異なるだろう。伸張性局面の終了時にアスリートを追加された負荷から解放し、短縮性局面の終了時／伸張性局面の開始時にコーチがアスリートに手渡せるように、扱いやすく素早く追加できる負荷であることが必要である(メディシンボール、ケトルベルなど)。例えば、コーチが短縮性局面の終わりにメディシンボールをアスリートにパスすると、アスリートは伸張性局面全体を通して追加された負荷を担わなければならないため、伸張性過負荷が生じる。伸張性局面が終了した時点で、アスリートはメディシンボールをコーチに返す。この方法の各局面を図4に示す。

局面間におけるエクササイズ／片側・両側の入れ替え

局面間におけるエクササイズの変更(上級)

Tous (114)は、FET中に同一セット内でのエクササイズを連結することについて説明している。この方法が実施されるのは、あるエクササイズが他のエクササイズよりも短縮性局面でより大きな運動エネルギーを発生させるためである。運動エネルギーの大きいエクササイズを伸張性局面中に別の

エクササイズに切り替えると、伸張性過負荷が生じる可能性がある。いずれにせよ、伸張性過負荷が生じるのは、短縮性局面で行なわれるエクササイズが、伸張性局面で行なわれるエクササイズに比べ、より速い速度で、および／または、より大きな可動域で(より大きな運動エネルギーを発生させて)完遂された場合に限られる。例えば、フライホイールスクワットマシンを用いて、短縮性局面でスクワットを行ない、伸張性局面でルーマニアンデッドリフト(RDL)を行なう場合などである。スクワットの短縮性局面では、アスリートはRDLを行なう短縮性局面に比べより高速を発揮するため、アスリートはスクワットの短縮性局面で発生した運動エネルギーをRDLの伸張性局面で吸収する必要があるだろう。この方法の各局面を図4に示す。

局面間における両側性から一側性への変更(上級)

この方法は、フライホイール(69)やフリーウェイト(67)のエクササイズで以前から提案されているもので、左右両脚で行なう短縮性局面と片脚で行なう伸張性局面が含まれる。フライホイール機器でこのエクササイズを行なう場合、両脚で発生させた運動エネルギーは、伸張性局面において、すべて片脚で吸収することになる。その性質上、ある種のエクササイズでは、補助(ラックに置かれたバーベルにつかまるなど)が必要となる。例えば、(フライホイールスクワットマシンでは)短縮性局面で両脚スクワットを行ない、伸張性局面で片脚スクワットを行なう場合がある。伸張性局面でアスリートが片脚スクワットに移行すると、運動エネルギーがアスリートをフライホイールの中央に向かって斜めに押し下げることになる(ロープが巻き戻されるため)。アスリートはバーベルやラックなどを握り、バランスを取らなければならないだろう。これは、ある程度の運動エネルギーが腕に吸収されることを意味する。これらのエクササイズは、説明した方法の中で最も大きな伸張性過負荷を生み出すことになる。この方法の各局面を図4に示す。

複数の方法の組み合わせ(上級)

この方法は、伸張性過負荷を生じさせるために提案した方法を組み合わせる。このような過負荷や複雑な動作に耐えられるのは、高度な専門技術をもつ上級レベルのアスリートに限られる。組み合わせは数限りなくある。例えば、スクワットの短縮性局面で回旋を加え、伸張性局面の最後の1/3で減速する。この例では、回旋要素を加えることによって、短縮性局面で運動エネルギーを生み出す時間を長くし、動作における最後の1/3で停止することによって、生み出された運動エネルギーを吸収する時間を短くしている。別の例としては、短縮性局面ではアスリートを補助し、伸張性局面

で機器を「キャッチ」する方法が考えられる。この場合、アスリートを補助することによって短縮性局面で発生した追加的な運動エネルギーは、キャッチ局面で吸収することが必要となる。

現場への応用

各種のフライホイールシステムが市販されており、それらを適切に使用すれば、伸張性過負荷を効果的に提供できる。だが、フライホイール機器を使用さえすれば伸張性過負荷が当然得られると考えるべきではない(69)。伸張性過負荷が達成されるか否かは、特定の運動学的および運動力学的理由(61,101)や、エクササイズを行なうアスリートの特性(61,116)によって説明できるが、特にエクササイズの選択は、達成される過負荷のレベルを決定する可能性があるため注意が必要である。伸張性過負荷を生じさせるためには様々な方法が活用できる。短縮性局面の時間を長くする、伸張性局面の時間を短くする、短縮性局面と伸張性局面の過負荷を補助する、局面間でエクササイズを交互に変えるなどである。現場の専門職は、様々な方法を組み合わせ、エクササイズにおける過負荷の程度や複雑さを漸進させることができる。

現場の専門職は、アスリートのレベルに基づいて、彼らの週間スケジュールを考慮しながら、短期、中期、長期の明確な戦略をもつべきである(表2、3)。さらに、FETは、総合的かつ特異的な目的を考慮しつつ、アスリートのプログラム(表4~6)に連結する一部分として取り入れることが必要である。◆

謝辞

著者は、フライホイールトレーニングの方法論を紹介し、本稿で重要な役割を果たしてくれたJulio Tous-Fajardo氏に謝意を表したい。

From Strength and Conditioning Journal
Volume 46, Number 2, pages 234-250.

REFERENCES

1. Abbott BC, Bigland B, Ritchie JM. The physiological cost of negative work. *J Physiol* 117: 380-390, 1952.
2. Abbott W, Clifford T. The influence of muscle strength and aerobic fitness on functional recovery in professional soccer players. *J Sports Med Phys Fitness* 62: 1623-1629, 2022.
3. Al Attar WSA, Soomro N, Sinclair PJ, Pappas E, Sanders RH. Effect of injury prevention programs that include the nordic hamstring exercise on hamstring injury rates in soccer players: A systematic review and meta-analysis. *Sports Med* 47: 907-916, 2017.
4. Allen WJC, De Keijzer KL, Raya-Gonzalez J, et al. Chronic effects of flywheel training on physical capacities in soccer players: A systematic review. *Res Sports Med* 31: 228-248, 2023.
5. Askling C, Karlsson J, Thorstensson A. Hamstring injury occurrence in elite soccer players after preseason strength training with eccentric overload. *Scand J Med Sci Sports* 13: 244-250, 2003.
6. Barreto RV, de Lima LCR, Denadai BS. Moving forward with backward pedaling: A review on eccentric cycling. *Eur J Appl Physiol* 121: 381-407, 2021.
7. Baumert P, Lake MJ, Stewart CE, Drust B, Erskine RM. Genetic variation and exercise-induced muscle damage: Implications for athletic performance, injury and ageing. *Eur J Appl Physiol* 116: 1595-1625, 2016.
8. Bautista IJ, Vicente-Mampel J, Baraja-Vegas L, et al. The effects of the nordic hamstring exercise on sprint performance and eccentric knee flexor strength: A systematic review and meta-analysis of intervention studies among team sport players. *J Sci Med Sport* 24: 931-938, 2021.
9. Beato M, De Keijzer KL, Leskauskas Z, et al. Effect of postactivation potentiation after medium vs. high inertia eccentric overload exercise on standing long jump, countermovement jump, and change of direction performance. *J Strength Cond Res* 35: 2616-2621, 2021.
10. Beato M, Dello Iacono A. Implementing flywheel (iso-inertial) exercise in strength training: Current evidence, practical recommendations, and future directions. *Front Physiol* 11: 569, 2020.
11. Beato M, Fleming A, Coates A, Dello Iacono A. Validity and reliability of a flywheel squat test in sport. *J Sports Sci* 39: 482-488, 2021.
12. Beato M, Maroto-Izquierdo S, Hernandez-Davo JL, Raya-Gonzalez J. Flywheel training periodization in team sports. *Front Physiol* 12: 732802, 2021.
13. Beato M, McErlain-Naylor SA, Halperin I, Iacono AD. Current evidence and practical applications of flywheel eccentric overload exercises as postactivation potentiation protocols: A brief review. *Int J Sports Physiol Perform* 15: 154-161, 2020.
14. Bontemps B, Vercruyssen F, Gruet M, Louis J. Downhill running: What are the effects and how can we adapt? A narrative review. *Sports Med* 50: 2083-2110, 2020.
15. Bosco C. The effect of prestretch on skeletal muscle behavior. *J Appl Biomech* 13: 426-429, 1997.
16. Burton I, McCormack A. Inertial flywheel resistance training in tendinopathy rehabilitation: A scoping review. *Int J Sports Phys Ther* 17: 775, 2022.
17. Butterfield TA, Leonard TR, Herzog W. Differential serial sarcomere number adaptations in knee extensor muscles of rats is contraction type dependent. *J Appl Physiol* (1985) 99: 1352-1358, 2005.
18. Calatayud J, Pérez-Alenda S, Carrasco JJ, et al. Feasibility, safety and muscle activity during flywheel vs traditional strength training in adult patients with severe haemophilia. *Haemophilia* 27: e102-e109, 2021.
19. Chaabene H, Markov A, Prieske O, et al. Effect of flywheel versus traditional resistance training on change of direction performance in male athletes: A systematic review with meta-analysis. *Int J Environ Res Public Health* 19: 7061, 2022.
20. Chaabene H, Prieske O, Negra Y, Granacher U. Change of direction speed: Toward a strength training approach with accentuated eccentric muscle actions. *Sports Med* 48: 1773-1779, 2018.
21. Chapman D, Newton M, Sacco P, Nosaka K. Greater muscle damage induced by fast versus slow velocity eccentric exercise. *Int J Sports Med* 27: 591-598, 2006.
22. Coratella G, Beato M, Ce E, et al. Effects of in-season enhanced negative work-based vs traditional weight training on change of direction and hamstrings-to-quadriceps ratio in soccer players. *Biol Sport* 36: 241-248, 2019.
23. Cuenca-Fernandez F, Lopez-Contreras G, Mourao L, et al. Eccentric flywheel post-activation potentiation influences swimming start performance kinetics. *J Sports Sci* 37: 443-451, 2019.
24. de Hoyo M, Pozzo M, Sanudo B, et al. Effects of a 10-week in-season eccentric-overload training program on muscle-injury prevention and performance in junior elite soccer players. *Int J Sports Physiol Perform* 10: 46-52, 2015.
25. de Hoyo M, Sanudo B, Carrasco L, et al. Effects of 10-week eccentric overload training on kinetic parameters during change of direction in football players. *J Sports Sci* 34: 1380-1387, 2016.
26. de Keijzer KL, Gonzalez JR, Beato M. The effect of flywheel training on strength and physical capacities in sporting and healthy populations: An umbrella review. *PLoS One* 17: e0264375, 2022.
27. Dos Santos T, McBurnie A, Comfort P, Jones PA. The effects of six-

- weeks change of direction speed and technique modification training on cutting performance and movement quality in male youth soccer players. *Sports (Basel)* 7: 205, 2019.
28. Dos'Santos T, Thomas C, Jones PA, Comfort P. Mechanical determinants of faster change of direction speed performance in male athletes. *J Strength Cond Res* 31: 696-705, 2017.
 29. Duchateau J, Baudry S. Insights into the neural control of eccentric contractions. *J Appl Physiol* (1985) 116: 1418-1425, 2014.
 30. Elmer S, Hahn S, McAllister P, Leong C, Martin J. Improvements in multi-joint leg function following chronic eccentric exercise. *Scand J Med Sci Sports* 22: 653-661, 2012.
 31. Fiorilli G, Mariano I, Iuliano E, et al. Isoinertial eccentric-overload training in young soccer players: Effects on strength, sprint, change of direction, agility and soccer shooting precision. *J Sports Sci Med* 19: 213-223, 2020.
 32. Franchi MV, Atherton PJ, Reeves ND, et al. Architectural, functional and molecular responses to concentric and eccentric loading in human skeletal muscle. *Acta Physiol (Oxf)* 210: 642-654, 2014.
 33. Friedmann-Bette B, Bauer T, Kinscherf R, et al. Effects of strength training with eccentric overload on muscle adaptation in male athletes. *Eur J Appl Physiol* 108: 821-836, 2010.
 34. Gastin PB, Hunkin SL, Fahrner B, Robertson S. Deceleration, acceleration, and impacts are strong contributors to muscle damage in professional Australian football. *J Strength Cond Res* 33: 3374-3383, 2019.
 35. Giles B, Peeling P, Reid M. Quantifying change of direction movement demands in professional tennis matchplay: An analysis from the Australian Open Grand Slam. *J Strength Cond Res*, 2022.
 36. Gonzalo-Skok O, Tous-Fajardo J, Valero-Campo C, et al. Eccentric-overload training in team-sport functional performance: Constant bilateral vertical versus variable unilateral multidirectional movements. *Int J Sports Physiol Perform* 12: 951-958, 2017.
 37. Gross M, Luthy F, Kroell J, et al. Effects of eccentric cycle ergometry in alpine skiers. *Int J Sports Med* 31: 572-576, 2010.
 38. Guex K, Degache F, Morisod C, Saily M, Millet GP. Hamstring architectural and functional adaptations following long vs. short muscle length eccentric training. *Front Physiol* 7: 340, 2016.
 39. Hader K, Rumpf MC, Hertzog M, et al. Monitoring the athlete match response: Can external load variables predict post-match acute and residual fatigue in soccer? A systematic review with meta-analysis. *Sports Med Open* 5: 48, 2019.
 40. Handford MJ, Rivera FM, Maroto-Izquierdo S, Hughes JD. Plyo-accentuated eccentric loading methods to enhance lower limb muscle power. *Strength Cond J* 43: 54-64, 2021.
 41. Harper DJ, Carling C, Kiely J. High-intensity acceleration and deceleration demands in elite team sports competitive match play: A systematic review and meta-analysis of observational studies. *Sports Med* 49: 1923-1947, 2019.
 42. Harper DJ, Kiely J. Damaging nature of decelerations: Do we adequately prepare players? *BMJ Open Sport Exerc* 4: e000379, 2018.
 43. Harper DJ, McBurnie AJ, Santos TD, et al. Biomechanical and neuromuscular performance requirements of horizontal deceleration: A review with implications for random intermittent multi-directional sports. *Sports Med* 52: 2321-2354, 2022.
 44. Hauer R, Tessitore A, Hauer K, Tschan H. Activity profile of international female lacrosse players. *J Strength Cond Res* 35: 3207-3212, 2021.
 45. Herzog W. Mechanisms of enhanced force production in lengthening (eccentric) muscle contractions. *J Appl Physiol* (1985) 116: 1407-1417, 2014.
 46. Herzog W, Schappacher G, DuVall M, Leonard TR, Herzog JA. Residual force enhancement following eccentric contractions: A new mechanism involving titin. *Physiology (Bethesda)* 31: 300-312, 2016.
 47. Hody S, Croisier JL, Bury T, Rogister B, Leprince P. Eccentric muscle contractions: Risks and benefits. *Front Physiol* 10: 536, 2019.
 48. Hoppeler H. Moderate load eccentric exercise: A distinct novel training modality. *Front Physiol* 7: 483, 2016.
 49. Howell JN, Fuglevand AJ, Walsh ML, Bigland- Ritchie B. Motor unit activity during isometric and concentric-eccentric contractions of the human first dorsal interosseus muscle. *J Neurophysiol* 74: 901-904, 1995.
 50. Isner-Horobeti ME, Dufour SP, Vautravers P, et al. Eccentric exercise training: Modalities, applications and perspectives. *Sports Med* 43: 483-512, 2013.
 51. Keller S, Koob A, Corak D, von Schöning V, Born D-P. How to improve change-of-direction speed in junior team sport athletes: horizontal, vertical, maximal, or explosive strength training? *J Strength Cond Res* 34: 473-482, 2020.
 52. Krizaj L, Kozinc Z, Lofler S, Sarabon N. The chronic effects of eccentric exercise interventions in different populations: An umbrella review. *Eur J Transl Myol* 32: 10876, 2022.
 53. Liu C, Chen CS, Ho WH, et al. The effects of passive leg press training on jumping performance, speed, and muscle power. *J Strength Cond Res* 27: 1479-1486, 2013.
 54. Liu R, Liu J, Clarke CV, An R. Effect of eccentric overload training on change of direction speed performance: A systematic review and meta-analysis. *J Sports Sci* 38: 2579-2587, 2020.
 55. Luteberget LS, Spencer M. High-intensity events in international women's team handball matches. *Int J Sports Physiol Perform* 12: 56-61, 2017.
 56. Margaritelis NV, Theodorou AA, Chatzinikolaou PN, et al. Eccentric exercise per se does not affect muscle damage biomarkers: Early and late phase adaptations. *Eur J Appl Physiol* 121: 549-559, 2021.
 57. Maroto-Izquierdo S, Bautista IJ, Martin Rivera F. Post-activation performance enhancement (PAPE) after a single bout of high-intensity flywheel resistance training. *Biol Sport* 37: 343-350, 2020.
 58. Maroto-Izquierdo S, Garcia-Lopez D, de Paz JA. Functional and muscle-size effects of flywheel resistance training with eccentric-overload in professional handball players. *J Hum Kinet* 60: 133-143, 2017.
 59. Maroto-Izquierdo S, Garcia-Lopez D, Fernandez- Gonzalo R, et al. Skeletal muscle functional and structural adaptations after eccentric overload flywheel resistance training: A systematic review and meta-analysis. *J Sci Med Sport* 20: 943-951, 2017.
 60. Maroto-Izquierdo S, Raya-Gonzalez J, Hernandez-Davo JL, Beato M. Load quantification and testing using flywheel devices in sports. *Front Physiol* 12: 739399, 2021.
 61. Martinez-Aranda LM, Fernandez-Gonzalo R. Effects of inertial setting on power, force, work, and eccentric overload during flywheel resistance exercise in women and men. *J Strength Cond Res* 31: 1653-1661, 2017.
 62. Martínez-Hernández D, Quinn M, Jones P. Linear advancing actions followed by deceleration and turn are the most common movements preceding goals in male professional soccer. *Sci Med Footb* 7: 25-33, 2023.
 63. Martínez-Hernández D, Quinn M, Jones P. Most common movements preceding goal scoring situations in female professional soccer. *Sci Med Footb*: 1-9, 2023.
 64. McErlain-Naylor SA. A practical open-source comparison of discrete and continuous biomechanical analysis techniques. *ISBS Proc Archive* 38: 180, 2020.
 65. McErlain-Naylor SA, Beato M. Concentric and eccentric inertia-velocity and inertia-power relationships in the flywheel squat. *J Sports Sci* 39: 1136-1143, 2021.
 66. McHugh MP. Recent advances in the understanding of the repeated bout effect: The protective effect against muscle damage from a single bout of eccentric exercise. *Scand J Med Sci Sports* 13: 88-97, 2003.
 67. Mike J, Kerkick CM, Kravitz L. How to incorporate eccentric training into a resistance training program. *Strength Cond J* 37: 5-17, 2015.
 68. Monajati A, Larumbe-Zabala E, Goss-Sampson M, Naclerio F. Injury prevention programs based on flywheel vs. body weight resistance in recreational athletes. *J Strength Cond Res* 35: S188-S196, 2021.
 69. Muñoz-López A, de Souza Fonseca F, Ramírez- Campillo R, et al. The use of real-time monitoring during flywheel resistance training programmes: How can we measure eccentric overload? A systematic

- review and meta-analysis. *Biol Sport* 38: 639-652, 2021.
70. Muñoz-López A, Galiano C, Nunez FJ, Floria P. The flywheel device shaft shape determines force and velocity profiles in the half squat exercise. *J Hum Kinet* 81: 15-25, 2022.
 71. Muñoz-López A, Nakamura FY. Measuring and testing with flywheel resistance training devices. In: *Resistance Training Methods: From Theory to Practice*. Muñoz-López A, Taiar R, Sañudo B, eds. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2022. pp. 181-194.
 72. Nardone A, Romano C, Schieppati M. Selective recruitment of high-threshold human motor units during voluntary isotonic lengthening of active muscles. *J Physiol* 409: 451-471, 1989.
 73. Nedelec M, McCall A, Carling C, et al. The influence of soccer playing actions on the recovery kinetics after a soccer match. *J Strength Cond Res* 28: 1517-1523, 2014.
 74. Nevado-Garrosa F, Torreblanca-Martínez V, Paredes-Hernández V, Del Campo-Vecino J, Balsalobre-Fernández C. Effects of an eccentric overload and small-side games training in match accelerations and decelerations performance in female under-23 soccer players. *J Sports Med Phys Fitness* 61: 365-371, 2021.
 75. Newham DJ, Mills KR, Quigley BM, Edwards RH. Pain and fatigue after concentric and eccentric muscle contractions. *Clin Sci (Lond)* 64: 55-62, 1983.
 76. Newton MJ, Morgan GT, Sacco P, Chapman DW, Nosaka K. Comparison of responses to strenuous eccentric exercise of the elbow flexors between resistance-trained and untrained men. *J Strength Cond Res* 22: 597-607, 2008.
 77. Nosaka K, Newton M. Difference in the magnitude of muscle damage between maximal and submaximal eccentric loading. *J Strength Cond Res* 16: 202-208, 2002.
 78. Nuzzo J, Pinto M, Nosaka K, Steele J. How much stronger are muscles eccentrically than concentrically?: Meta-analysis of the influences of sex, age, joint action, and velocity. *SportRxiv*, 2022.
 79. O'Brien J, Browne D, Earls D, Lodge C. The efficacy of flywheel inertia training to enhance hamstring strength. *J Funct Morphol Kinesiol* 7: 14, 2022.
 80. Oranchuk DJ, Storey AG, Nelson AR, Cronin JB. Scientific basis for eccentric quasi-isometric resistance training: A narrative review. *J Strength Cond Res* 33: 2846-2859, 2019.
 81. Page J, Moody JA, Esformes JI, Byrne PJ. Effects of flywheel resistance training on sprinting and change of direction performance in elite adolescent football players. *J ISSN* 3: 693-701, 2022.
 82. Penailillo L, Blazevich A, Numazawa H, Nosaka K. Metabolic and muscle damage profiles of concentric versus repeated eccentric cycling. *Med Sci Sports Exerc* 45: 1773-1781, 2013.
 83. Perrey S, Betik A, Candau R, Rouillon JD, Hughson RL. Comparison of oxygen uptake kinetics during concentric and eccentric cycle exercise. *J Appl Physiol* (1985) 91: 2135-2142, 2001.
 84. Petré H, Wernstål F, Mattsson CM. Effects of flywheel training on strength-related variables: A meta-analysis. *Sports Med Open* 4: 1-15, 2018.
 85. Prieto-Mondragón LdP, Camargo-Rojas DA, Quiceno CA. Isoinertial technology for rehabilitation and prevention of muscle injuries of soccer players: Literature review. *Rev Fac Med* 64: 543-550, 2016.
 86. Pilutsky B. Eccentric muscle action in sport and exercise. In: *Biomechanics in Sport Performance Enhancement and Injury Prevention* (Vol. 1). Zatsiorsky V, ed. Oxford, United Kingdom: Blackwell Science, 2003. pp. 54-86.
 87. Proske U, Allen TJ. Damage to skeletal muscle from eccentric exercise. *Exerc Sport Sci Rev* 33: 98-104, 2005.
 88. Proske U, Morgan DL. Muscle damage from eccentric exercise: Mechanism, mechanical signs, adaptation and clinical applications. *J Physiol* 537: 333-345, 2001.
 89. Raya-González J, Castillo D, Beato M. The flywheel paradigm in team sports: A soccer approach. *Strength Cond J* 43: 12-22, 2021.
 90. Raya-González J, Castillo D, Domínguez-Díez M, Hernández-Davo JL. Eccentric-overload production during the flywheel squat exercise in young soccer players: Implications for injury prevention. *Int J Environ Res Public Health* 17: 3671, 2020.
 91. Raya-González J, Prat-Luri A, López-Valenciano A, Sabido R, Hernández-Davo JL. Effects of flywheel resistance training on sport actions. A systematic review and meta-analysis. *J Hum Kinet* 77: 191-204, 2021.
 92. Reeves ND, Maganaris CN, Longo S, Narici MV. Differential adaptations to eccentric versus conventional resistance training in older humans. *Exp Physiol* 94: 825-833, 2009.
 93. Roig M, O'Brien K, Kirk G, et al. The effects of eccentric versus concentric resistance training on muscle strength and mass in healthy adults: A systematic review with meta-analysis. *Br J Sports Med* 43: 556-568, 2009.
 94. Sabido R, Hernández-Davó JL, Capdepon L, Tous-Fajardo J. How are mechanical, physiological, and perceptual variables affected by the rest interval between sets during a flywheel resistance session? *Front Physiol* 11: 663, 2020.
 95. Sabido R, Hernández-Davo JL, Pereyra-Gerber GT. Influence of different inertial loads on basic training variables during the flywheel squat exercise. *Int J Sports Physiol Perform* 13: 482-489, 2018.
 96. Sanchez FJN, de Villarreal ES. Does flywheel paradigm training improve muscle volume and force? A meta-analysis. *J Strength Cond Res* 31: 3177-3186, 2017.
 97. Sato S, Yoshida R, Murakoshi F, et al. Effect of daily 3-s maximum voluntary isometric, concentric, or eccentric contraction on elbow flexor strength. *Scand J Med Sci Sports* 32: 833-843, 2022.
 98. Schache AG, Wrigley TV, Baker R, Pandy MG. Biomechanical response to hamstring muscle strain injury. *Gait Posture* 29: 332-338, 2009.
 99. Shibata K, Takizawa K, Nosaka K, Mizuno M. Effects of prolonging eccentric phase duration in parallel back-squat training to momentary failure on muscle cross-sectional area, squat one repetition maximum, and performance tests in university soccer players. *J Strength Cond Res* 35: 668-674, 2021.
 100. Silva JR, Nassis GP, Rebelo A. Strength training in soccer with a specific focus on highly trained players. *Sports Med Open* 1: 17, 2015.
 101. Sjöberg M, Berg HE, Norrbrand L, et al. Comparison of joint and muscle biomechanics in maximal flywheel squat and leg press. *Front Sports Act Living* 3: 686335, 2021.
 102. Soomro N, Sanders R, Hackett D, et al. The efficacy of injury prevention programs in adolescent team sports: A meta-analysis. *Am J Sports Med* 44: 2415-2424, 2016.
 103. Spiteri T, Cochrane JL, Hart NH, Haff GG, Nimphius S. Effect of strength on plant foot kinetics and kinematics during a change of direction task. *Eur J Sport Sci* 13: 646-652, 2013.
 104. Spitz RW, Kataoka R, Dankel SJ, et al. Quantifying the generality of strength adaptation: A meta-analysis. *Sports Med* 53: 637-648, 2022.
 105. Spudis D, Smajla D, Sarabon N. Validity and reliability of force-velocity outcome parameters in flywheel squats. *J Biomech* 107: 109824, 2020.
 106. Suchomel TJ, Lake JP, Comfort P. Load absorption force-time characteristics following the second pull of weightlifting derivatives. *J Strength Cond Res* 31: 1644-1652, 2017.
 107. Suchomel TJ, Nimphius S, Stone MH. The importance of muscular strength in athletic performance. *Sports Med* 46: 1419-1449, 2016.
 108. Suchomel TJ, Sato K, DeWeese BH, Ebben WP, Stone MH. Potentiation effects of half-squats performed in a ballistic or nonballistic manner. *J Strength Cond Res* 30: 1652-1660, 2016.
 109. Suchomel TJ, Taber CB, Sole CJ, Stone MH. Force-time differences between ballistic and non-ballistic half-squats. *Sports* 6: 79, 2018.
 110. Suchomel TJ, Wagle JP, Douglas J, et al. Implementing eccentric resistance training-Part 1: A brief review of existing methods. *J Funct Morphol Kinesiol* 4: 38, 2019.
 111. Suchomel TJ, Wagle JP, Douglas J, et al. Implementing eccentric resistance training-Part 2: Practical recommendations. *J Funct Morphol Kinesiol* 4: 55, 2019.
 112. Tesch PA, Fernandez-Gonzalo R, Lundberg TR. Clinical applications of iso-inertial, eccentric-overload (YoYo) resistance exercise. *Front Physiol* 8: 241, 2017.

113. Tofari PJ, Kemp JG, Cormack SJ. Measuring the response to simulated fixture congestion in soccer. *Sci Med Footb* 4: 293-304, 2020.
114. Tous-Fajardo J. Todo es fuerza. In: *El entrenamiento en los deportes de equipo*. Seirulo\$lo Vargas F, ed. Barcelona, Spain: Mastercede, 2017. pp. 43-79.
115. Tous-Fajardo J, Gonzalo-Skok O, Arjol-Serrano JL, Tesch P. Enhancing change-of-direction speed in soccer players by functional inertial eccentric overload and vibration training. *Int J Sports Physiol Perform* 11: 66-73, 2016.
116. Tous-Fajardo J, Maldonado RA, Quintana JM, Pozzo M, Tesch PA. The flywheel leg-curl machine: Offering eccentric overload for hamstring development. *Int J Sports Physiol Perform* 1: 293-298, 2006.
117. Ueda H, Tsuchiya Y, Ochi E. Fast-velocity eccentric cycling exercise causes greater muscle damage than slow eccentric cycling. *Front Physiol* 11: 596640, 2020.
118. Van Hooren B, Vanwanseele B, van Rossom S, et al. Muscle forces and fascicle behavior during three hamstring exercises. *Scand J Med Sci Sports* 32: 997-1012, 2022.
119. Tous-Fajardo J. Todo es fuerza. In: *El entrenamiento en los deportes de equipo*. Seirulo\$lo Vargas F, ed. Barcelona, Spain: Mastercede, 2017. pp. 43-79.
120. Vázquez-Guerrero J, Suarez-Arrones L, Gómez DC, Rodas G. Comparing external total load, acceleration and deceleration outputs in elite basketball players across positions during match play. *Kinesiology* 50: 228-234, 2018.
121. Vicens-Bordas J, Esteve E, Fort-Vanmeerhaeghe A, Bandholm T, Thorborg K. Is inertial flywheel resistance training superior to gravity-dependent resistance training in improving muscle strength? A systematic review with meta-analyses. *J Sci Med Sport* 21: 75-83, 2018.
122. Vuc kovic G, Dežman B, Erc ulj F, Kovac ic S, Per s J. Differences between the winning and the losing players in a squash game in terms of distance covered. In: *Science and Racket Sports III*. London: Routledge, 2004. pp: 202-207.
123. Wagle JP, Cunanan AJ, Carroll KM, et al. Accentuated eccentric loading and cluster set configurations in the back squat: A kinetic and kinematic analysis. *J Strength Cond Res* 35: 420-427, 2021.
124. Weakley JJ, Wilson KM, Till K, et al. Visual feedback attenuates mean concentric barbell velocity loss and improves motivation, competitiveness, and perceived workload in male adolescent athletes. *J Strength Cond Res* 33: 2420-2425, 2019.
125. Wellman AD, Coad SC, Goulet GC, McLellan CP. Quantification of competitive game demands of NCAA division I college football players using global positioning systems. *J Strength Cond Res* 30: 11-19, 2016.
126. Wren C, Beato M, McErlain-Naylor SA, Iacono AD, De Keijzer KL. Concentric phase assistance enhances eccentric peak power during flywheel squats: Intersession reliability and the linear relationship between concentric and eccentric phases. *Int J Sports Physiol Perform* 1: 1-7, 2023.

著者紹介



David Marti'nez :
University of Salfordの博士課程に在籍中で、Tottenham Hotspur Women FC のS&C コーチを務める。