©NSCA JAPAN
Volume 30, Number 8, pages 42-53

Key Words【生理学的変数のモニタリング：physiological monitoring、生化学的変数のモニタリング：biochemical monitoring、主観的変数のモニタリング：subjective monitoring、ジャンプパフォーマンスのモニタリング：jump performance monitoring】

競技会環境における生理学的変数とパフォーマンスのモニタリング：エリートクラスの個人競技のための文献レビュー

Physiological and Performance Monitoring in Competitive Sporting Environments：A Review for Elite Individual Sports

Michael Kiely, [1] M.Sc. **Giles Warrington,** [2] Ph.D. **Adrian McGoldrick,** [3] GMS
SarahJane Cullen, [1] Ph.D.
[1]Department of Sport and Exercise Sciences, Waterford Institute of Technology, Waterford, Ireland
[2]Physical Education and Sports Sciences Department, University of Limerick, Limerick, Ireland
[3]Irish Horse Racing Regulatory Board (IHRB), Kildare Co., Kildare, Ireland

要約

個人競技の競技会において、生理学的変数をモニタリングすることは広く支持されている。生理学的変数のモニタリングは、運動の用量-反応関係、運動強度、運動パフォーマンスに関する情報をもたらす。フィールドスポーツでは主観的変数と客観的変数のどちらも一般に利用されているが、競技会環境において各アスリートをモニタリングするツールの精度と適用可能性を調査した研究は限られている。本稿では、生理学的変数、生化学的変数、主観的変数など、多様な変数を測定する個々のデバイスの長所と短所を示す。また、先行研究をレビューし、各デバイスの現場への適用方法を伝える。

はじめに

アスリートの評価には、生理学的変数やパフォーマンスのモニタリングなど多様な方法が利用される。これは、適切なトレーニング負荷の推計、オーバートレーニングのスクリーニング、トレーニングと試合における生理学的要求のマッチングに利用される(64,72,110)。年齢、人種、性別、あるいは現在の体力レベルが類似していても、トレーニングや競技会のストレスに対する反応はアスリートによって異なる(12,101)。したがって、トレーニングでも競技会でも用量-反応関係を個別にモニタリングすることが不可欠である。トレーニングや競技会によって誘発された過度の身体的ストレスは、筋痛、気分状態、生化学的マーカー、神経反応回数などをめぐって、末梢反応や中枢反応の混乱を引き起こす(70)。アスリートの身体活動とトレーニング負荷をモニタリングすることは、トレーニングや競技会においてアスリートが機能的に至適ストレスを感じているのか、あるいは過度のストレスを感じているのかについて、きわめて重要な情報を伝える(98)。また、試合の要求を満たすには練習方法をどのように変更すれば最良であるかをアスリート、コーチ、サポートスタッフに教えてくれる(72)。

アスリートの身体属性については、運動強度を示す一般的な尺度(心拍数、多様な血液バイオマーカー、主観的運動強度など)に基づいて、アスリートに課される生理学的ストレスを定量化する(30,98)。トレーニングや競技会の外部属性については、ジャンプにおける発揮パワーや跳躍距離などのパフォーマンス尺度を利用する(124)。生理学的尺度(72)、生化学的尺度(120)、主観的尺度(99)およびジャンプパフォーマンス尺度(107)は、いずれも個々のアスリートのモニタリングに利用できる変数である。しかし、競技会環境におけるその利用方法はまだ確立されておら

ず、研究も進んでいない。

競技会中にパフォーマンスをモニタリングすることは、様々な要因によって困難である。例えば、規則や規定、環境条件、アスリートにおける用量-反応関係の個別性などが問題になる。第一に、競馬や格闘技などの競技では厳しい重量制限が課されるため(35,71,116)、付加重量のためにモニタリングデバイスを使用できない可能性がある。また、環境条件(競技会の主観的重要性も含む)は予期反応を誘発して、アスリートの身体、意欲、生理に影響を及ぼす可能性がある(57)。さらに、風速や気温の上昇などの気候因子も、競技会中にモニタリングする平均心拍数(HR)を変化させる可能性がある(57)。また、高強度競技における生理学的負荷の定量化は難しいことが判明している(41)。しかし、測定デバイスの技術的進歩によって、一般にHRモニターとグローバルポジショニングシステム(GPS)を利用して、競技中の身体活動を追跡して分析できるようになった(5,6,8)。そのため、HRは競技会中の個々のアスリートについて広くモニタリングされるようになったが(95,97,102)、他の生理学的変数のモニタリングを取り上げた研究は数少ない。運動に対する反応は生理学的なものに限らない。したがって本稿では、個人競技の競技会環境におけるアスリートの生理学的変数、生化学的変数、パフォーマンス変数、主観的変数の評価に利用される一般的な方法を検証する。それらの変数は、多様な個人競技について競技会環境において測定され、示されたものである(格闘技、自転車競技、馬術競技、モータースポーツ、ラケット競技、水上競技、陸上競技、ウエイトリフティングなど)。

生理学的尺度

生理学的情報を統合するツールには、競技会中の用量-反応関係と運動強度を決定して、トレーニングプログラムを設計する指針となることが期待される(72)。生理学的データは、HRモニター、加速度計、GPSユニット、および統合技術の導入によって入手しやすくなり、生理学的パフォーマンステストの場を実験室から競技場へと移すことが可能になった(66,72)。しかし、競技会における生理学的要求とパフォーマンス要求の分析は、運営組織が課す様々な制限によって定量化が困難なことが多い。

HRモニター

HRモニターは入手しやすい非侵襲的ツールであり(102)、主に平均HRとピークHRを記録するために利用されている(55)。個人競技の中には、競技の合間や競技中にHRが大きく変動するものもあるが、競技会が課す一時的な生理学的負荷を推計するには、リアルタイムでモニタリングすることが重要である(85)。HRは一般に運動強度を測定するために利用され、HRモニターのストラップを胸骨に沿って巻き付けて使用する(63)。胸の電極による測定の平均バイアスとばらつきは1分当たり1.0拍以下である(69)。また、低強度運動および高強度運動の測定において妥当性が示されている(55)。一般に利用され、精度の高いHRモニターの中でも、Polarは平均HRの測定について信頼性の高いツールであることが報告されている(55,68)。

複数の研究において、個人競技の競技会環境におけるHRデータが引用されている。個人競技の競技会における強度の測定にHRを利用した研究として、オンロードおよびオフロードの自転車競技(102,122)、競馬(84,115)、オリンピック馬術競技(95)、セーリング競技とモータースポーツ(25,97)があるが、これはほんの一例にすぎない**(表1)**。HRには気温(51)、高度(28)、およびオーバートレーニングなどの外的環境因子が影響する。それとともに、競技会がもたらすストレスも考慮する必要がある。例えば、プロのバドミントン選手について、高い集中力と正確な技術が必要とされる時間帯にエピネフリンの分泌が明らかに増加することが示されている(19)。このようなホルモン応答の増加は、実際の身体努力が必要とする以上のHR応答の増加を誘発する可能性がある。また、特に体重制限のある競技(27,125,127)に多くみられる脱水状態で競技することも、カーディアックドリフト(長時間の一定負荷による運動時に観察される心拍数の漸増現象)を誘発してHRに影響を及ぼす可能性がある(51)。さらに、筋圧増加部位の血流増加に対する代謝的反応と考えられる、偽等尺性収縮効果もHRを上昇させる可能性がある(105)。この現象は、長時間にわたって等尺性負荷が大腿四頭筋にかかるセーリングや馬術で発生し、酸素消費量に不釣り合いなHRの増加が観察される。このように、競技要求と環境因子を考慮する必要があるものの、HRモニターは利用しやすく、運動強度反応の信頼性と妥当性の高い測定方法であることが認められている。

GPS

GPSは、当初軍事目的の技術であったが(29)、現在は、空中、海中、地上環境において(29)、アスリートの位置、変位、動作スピード(38)などの定量的なデータの取得に利用されている。当初、競技目的では、地上局の参照ポイントをもつディファレンシャルGPSが利用されていた(29)。しかし最近では、デバイスが軽量でコストの安い、衛星ベースの非ディファレンシャルGPSが好まれている(33)。

妥当性研究によって、GPSは自転車競技において直線コースと非直線コースを問わず、定速移動についても変速移動についても正確であることが見出

表1　エリートクラスの個人競技における競技会環境について諸研究で利用された生理学的変数のモニタリングツール

測定される変数	測定デバイス	測定対象競技	長所	短所
心拍数	HRモニター	自転車競技(ロード、オフロード)、競馬、オリンピック馬術競技、セーリング競技、モータースポーツ	低強度運動および高強度運動の測定について妥当性が確認されている。 個人競技の競技会環境で一般に利用されている。	気温と水分状態が数値に影響する可能性がある。 長時間の等尺性運動が心拍数を上昇させる可能性がある。
位置、変位、速度	GPSユニット	個人競技の競技会環境に関する研究無し	デバイスがコンパクトで軽量。 距離が長いほど妥当性が高い。	非直線的な高速度動作の測定については信頼性を欠く。 人口密度が高い場所や包囲された場所では信号強度が減衰する。
動作の頻度と大きさ	加速度計	馬術、水泳、テニス	低強度運動の測定について妥当性が確認されている。 水泳のストロークやテニスの競技スキルの評価に以前から使用されている。	多くのアルゴリズムが存在するため、データの比較が困難である。 様々なタイプの身体活動を区別できない。 高強度運動の測定には適していない。
心拍数、呼吸数、皮膚温、深部体温	EQ 02 ライフモニター	競馬	最大50日間のデータの記録が可能な軽量デバイスである。	競技環境における妥当性が確認されていない。 皮膚パッチなどが再使用できないため、測定費用が高くつく。 汎用ベルトが利用されている。
心拍数と動作解析データの結合から得られたエネルギー消費量	Actiheart	個人競技の競技会環境に関する研究無し	低強度運動の測定については妥当性と信頼性が確認されている。 デバイスが軽量である。 充電式の内蔵電池をもつ。	HRモニターと加速度計は個別に較正する必要がある。 高強度運動の測定には適していない。
熱産生、二軸加速度、エネルギー消費量	SenseWear Pro3 アームバンド	卓球	最大5.5日間のデータの記録が可能な軽量装置である。	高強度運動の測定には適していない。 運動の前に15分間の慣化時間が必要である。
心拍数、GPSデータ、動作の頻度と大きさ	Minimax	個人競技の競技会環境に関する研究無し	個人競技を除けば諸研究で最も多く利用されているツールである。 デバイスが軽量である。 サンプリング周波数の大きい新しいデバイスであり、精度が高い。	非直線的な高速度動作の測定については妥当性が確認されていない。 運動強度と負荷の測定については研究者らの同意を必要とする。

された(58,130)。さらに、ウォーキングやジョギングなどの身体活動における総移動距離の測定についても妥当性のあることが示されている(33)。しかし、非直線の走行距離や移動速度が増加するにつれて妥当性は低下する。したがって、低速度で直線移動する長距離走などの持久系競技については、諸研究で報告された測定値は妥当であると考えられる(37,50,61,88,89)。

現在、サンプリング周波数15 Hzで位置情報を捉えるGPSデバイスが製造されている。しかし、非ディファレンシャルGPSの精度は、サンプリング周波数だけでなく衛星からの信号強度にも大きく依存する。人が大勢集まり、部分的に囲まれた場所では、受信機への信号が減衰することが知られている(5,33)。これは、馬術の障害飛越競技、水球、および一部のモータースポーツなどの競技に影響する可能性がある。信号の減衰はデバイスによる距離や変位の算出を誤らせる可能性がある(33)。筆者らの知るかぎりでは、屋内競技について公表されたGPSデータや測定結果は存在せず、GPS研究の大多数は、フィールドスポーツにおけるエリートクラスの男子選手の動作を調査対象としている。速度と方向を絶えず変化させる必要がある競技については、非ディファレンシャルGPSユニットから得られた選手の移動速度と変位に関する結果が一貫していない(33)。

加速度計

利用可能な最大サンプリング周波数が100 Hzに上る(113)加速度計の利用によって、研究は大きく進歩した(33)。加速度計は一軸または三軸方向で動作を測定し、身体活動の頻度、持続時間、強度を示す(17,22)。ある身体活動が一定の活動閾値に達した回数を数えるカウントデータではなく、生の加速データが得られることでエネルギー消費量(EE)の推計値が大きく進歩した(113)。加速度計は、個人競技におけるEE(128)や運動強度の推計、また水泳(カウントデータ)(31)やテニス(生の加速データ)(1)などの競技のスキル分析に利用されている。

加速度計は、馬術競技(128)、水泳

(20,31)、テニス(1)など、多くの個人競技について、身体活動の測定方法として役立つことが報告されている。身体活動に関する妥当性研究によって、酸素消費量と加速度計のカウントデータの間には中程度～強い相関関係(r=0.45～0.93)が見出された(114)。しかし、カウントデータは身体活動のタイプを区別できないため、報告される強度がその活動の動作背景と合致しない(自転車競技やウエイトリフティングなどに見出された)という問題がある(78)。したがって、スポーツにおいては生の加速度データのほうが好ましい。オーストラリアンフットボールの試合における身体活動について、加速度計による測定はデバイス間の信頼性は高いが、デバイス内の信頼性はそうではないことがわかっている(13)。しかし、個人競技の競技会環境についてはそのような研究が存在しない。

加速度計を利用して運動強度とEEを推計することは、分析面で多くの制限がある(113)。まず、様々な身体部位に装着された複数のセンサーからデータを収集する場合は、運動強度やEEとの相関関係が弱いためにデータの比較可能性が問題となる(109,113)。また、手首装着型の加速度計を利用するには、他の身体部位の活動強度を記録する際に、運動代謝コストの差を説明する回帰式を必要とするため、分析に多大な費用と時間を要する(109)。さらに、各デバイスにおいて運動強度の算出に用いられる閾値とアルゴリズムの違いも問題となる(113)。加速度計は低強度運動を測定するには妥当性の高いツールである。しかし、高強度運動と、高強度競技におけるEE算出については限界がある。したがって、加速度計の利用を検討する際は競技の強度要求を考慮する必要がある。

統合技術

EQ02ライフモニター

EQ02ライフモニター(EQ02; Hidalgo, Cambridge, United Kingdom)は、胸部にセンサーベルトを装着してHR、皮膚温、呼吸数(胸部の拡張による)、動作(三軸加速度による)のデータを得る。デバイスは軽量であり、最大50日間分のリアルタイムの生理学的および心理生理学的データを記録、送信することが可能である(76)。

EQ02ライフモニターは、歩行時の生理学的反応をモニタリングする上で、妥当性と信頼性の高いツールであると報告されている(76)。Liuら(76)によると、デバイスを利用して測定したHR、呼吸数、皮膚温、深部体温の間に強い相関関係が見出された。EEも算出されるが、それとは強い相関関係が見出されていない。EQ02ライフモニターは、競技会環境において競馬の騎手のモニタリングに利用されている(28)。しかし、このデバイスでEEを算出するには予備試験としてステップテストを実施する必要があり、これはエリートクラスのアスリートには適していない可能性がある。

汎用ベルトにテキスタイル電極を組み込んだ無線デバイスは、動作に伴う振動の影響を受けやすく、そのためHRのモニタリングにおいてR波の検出が阻害される可能性がある(81)。したがって、動的な競技環境では特に問題が大きい。また、テキスタイル電極が利用されているが、装着者にとっては他の統合技術のほうが快適であると考えられる(76)。測定にかかる費用も問題である。つまり、皮膚パッチも深部体温測定用のカプセルも再使用できないため、測定費用が高くなる(76)。要するに、EQ02ライフモニターは低強度運動のデータの記録には信頼性と妥当性の高いツールであるが(3)、より安価なツールのほうが利用しやすいと考えられる。

Actiheartモニター

Actiheartモニター(Actiheart; Cambridge Neurotechnology, Ltd., Cambridge, United Kingdom)は、HRと動作解析のデータを結合してEEを算出し、最大21日間の身体活動データを記録する。Actiheartは重さ10gと軽量であり、充電式の内蔵電池を備えた身体活動とEEの計測デバイスである(22)。心電図パッドを利用して胸部に装着することでHRとEEを測定する(14)。

HRは、EEを示すために利用することが可能である。しかし、HRと加速度のデータを結合することによって、EEの算出精度を高められる可能性がある(15,104)。Actiheartは、ウォーキングとジョギングのEEの測定について妥当性と信頼性の高いツールであると考えられている(14)。これまでは、個人アスリートにおいて利用されてきた(129)。しかし、男女バスケットボール選手に関する調査で示されているように(96)、強度の高い運動の測定については不正確であると考えられる。

データ分析の精度を上げるために、Spiererら(104)はHRモニターと加速度計を個別に較正を行なうことを提案した。HRと動作解析の正確なデータは、競技会における運動の用量-反応関係を調査するには不可欠である。しかし、他のツールと同様に、加速度計の装着位置が取得データの信頼性に影響を及ぼす可能性がある。Actiheartの加速度計は、腰回りに装着する他の加速度計と比較すると、水平ジョギングなどのより強度の高い運動の測定に関しては性能が劣っていることが示されている(104)。誤差を減らすには、Polar HRモニターのように胸骨に沿って装着することが最適である(15)。このように下胸に装着すれば、コンタクト競技の場合も接触を減らせるであろう。Actiheartは、低強度運動の測定については妥当性と信頼性の高いツールであ

るが、高強度競技に参加するエリートクラスのアスリートについては妥当性の確認が必要である。

SenseWear Pro 3 アームバンド

SenseWear Pro 3 アームバンド(Body Media, Pittsburgh, Pennsylvania)は、上腕に装着する多機能デバイスであり、熱産生、二軸加速度、およびEEを測定することができる(103)。デバイスは熱流束センサー、電気皮膚反応センサー、皮膚温センサー、身体周囲の環境温度センサーよりなる(74)。1分単位で最大5.5日分の生理学的データの収集と保存を行なうことができる(22)。

諸研究において、低〜中強度の自由生活活動におけるEEの推計について妥当性が確認されている(36,43,74)。しかし最近、ステッピング、ウォーキング、ジョギングの際のEEを過小評価することが示された(59,102)。加えて、強度が10 METS(代謝当量)以下の活動の測定に利用することが推奨されている(36)。デバイスの精度を向上させるには、エクササイズ固有のアルゴリズムを用いる必要があるかもしれない(59)。これまでは卓球競技の測定に利用されてきたが(103)、平均10 METS以上の強度をもつ競技に関する検証が必要である。身体活動の強度一覧表(2)には、10 METS以上の強度をもつ競技として陸上競技、インクラインスケート、ダイビングなどが挙げられている。

アームバンド型であるため軽量で、多くの競技環境において装着可能である。しかし、データ収集の前に、15分間座って、慣化時間を設けることが推奨されている(59)。多くの競技会環境では、試技や試合の前にウォーミングアップが必要であるためこれは難しい。SenseWear Pro 3 アームバンドは複数のセンサーから構成されており、単一センサーデバイスによるEEの算出に伴う限界を克服することができる(43)。しかし、運動のモニタリングモデルをさらに発達させる必要がある(22)。実験室外の高強度運動環境において信頼性があるかどうかは不明である(59,90)。

Minimax

定義は多様であるが、Dellaserraら(33)によると、統合技術とは1つのデバイスにGPSユニット、HRモニター、加速度計を含むものを指す。重力加速度を測定できる加速度計データを利用して、衝撃力も正確に測定できるものもある(106)。Catapult社は、インパクト競技のために、最大周波数15 Hzのコンパクトで軽量の耐久性の高いデバイスを設計している。そのなかでもMinimaxシリーズは、トレーニングにおいて最も多く利用され、調査でも頻繁に利用されるデバイスである(33)。

Catapult社によると、Minimaxは、団体競技において個々の選手の長距離低強度運動の測定について妥当性が確認されている(33)。しかし個人競技の競技会環境では、そのような研究はこれまでに行なわれていない。高速度動作の定量化については、周波数1 Hzのデバイスよりも5 Hzのデバイスのほうが精度も信頼性も高いことは知られている(60)。しかし、非直線の高速度動作の測定において、5 HzのMinimaxX V 2.0 よりも10 HzのMinimaxX V 4.0(どちらも重量は約67 g)のほうが高精度かどうかは不明である(121)。高速度のスプリント動作をモニタリングするには、統合技術の各構成要素を直線部分で同時に測定することが必要である。さもなければ、データの信頼性と妥当性が損なわれる可能性がある(6,33)。衝突変数については、統合技術で利用されるGPSでは衝撃力の正確な定量化は不可能である(106)。

専門職が、信頼性の高いデータを収集するにあたっては複数の障壁がある。例えば、水泳とテニスの一部運営団体および一部サッカー組織は、競技会における測定デバイスの利用を禁じている(33)。サッカーの競技会環境のデータは収集されているが、強度と運動負荷のマーカー(どの競技においてもツールの妥当性を確認する助けとなる)に関しては、チーム所属の研究者の合意を得る必要がある(29)。現在、HRモニター、GPS、加速度計、統合技術に関する研究が実施されているのは主に2つの領域である。すなわち、一般人口による低強度の身体活動か、様々な規則に従ったエリートクラスの男子サッカー選手のいずれかである(29)。したがって、高強度運動と個人競技に関しては今後多くの研究が必要である。

生化学的尺度

血中乳酸濃度

血中乳酸濃度は、エリートクラスとサブエリートクラスの個人競技における代謝的疲労の指標として利用されてきた(39,118,120)**(表2)**。疲労のモニタリングだけでなく、有酸素性体力と無酸素性体力の長期的変動の分析にも利用されてきた(39)。ラクテート・プロ(Akray, Nakagyo-ku, Kyoto-shi, Japan)は、標準酵素法と比較すると多数の分析デバイスよりも優れたツールである(7,48,91)。

デバイスや採取した血液サンプルと同じく、血液の採取部位(耳たぶ、指先)もテスト結果を左右する(39)。ラクテート・プロは血液をピペットで移す必要がなく、ごくわずかの血液(5 μL)を試薬紙に吸引させればよいため、実験誤差の可能性が下がる。採取部位による精度に関しては、耳たぶから得たサンプルは、指先から得たサンプルよりも一貫して乳酸濃度が低いことが示されている(39)。しかし、どちらの部位であっても濃度が十分であれば、ラクテート・プロと新しいラクテート・プラスは、あらゆるスポーツ分野において、乳酸濃度の測定について妥当性

表２　エリートクラスの個人競技における競技会環境について諸研究で利用された生化学的マーカー				
測定される変数	測定デバイス	測定対象競技	長所	短所
血中乳酸濃度	ラクテート・プロ	トライアスロン、競馬、サイクリング	あらゆる強度において妥当性と信頼性が高い。 血液をピペットへ移す必要がなく、簡便かつ直ちに測定することができる。	環境温度や水分状態が測定値に影響する可能性がある。 競技によって筋量の変化が異なるため、競技間のデータの比較可能性が低い。
コルチゾール	ELISAキット	テコンドー、ダウンヒルマウンテンバイク、水泳	妥当性と信頼性が高い。 非侵襲性の簡易な測定方法である。 心理生理学的反応を評価することができる。	血中濃度は１日の中で変動する。 急速な体重変化が血中濃度に有意な変化を及ぼす。 食事、カフェイン、エストロゲン、抗炎症剤が測定値の精度に影響する可能性がある。
免疫グロブリンA	BNプロスペック	水泳、パラリンピック水泳、テコンドー	感染症の検出において信頼性の高いバイオマーカーである。 オーバートレーニングや不十分な回復を示唆する可能性がある。	食事や水分摂取によって標本濃度が薄くなる可能性がある。 被験者間変動と被験者内変動が大きいことが報告されている。 高強度運動と不安が流量を低下させる可能性がある。
αアミラーゼ	Soma Science 口腔液採取キット	パラリンピック水泳、テコンドー	血中乳酸濃度および唾液中の免疫グロブリンA濃度と強い相関関係にある。 競技会によるストレスの指標として利用できる可能性がある。	即時的調査が主流である。 コルチゾールが存在するとαアミラーゼの産生が減少する可能性がある。

と信頼性の高いツールである(91,111)。

多くの競技では手を使うことが多く、一部の選手はグローブをはめる必要があるため、フィールドでは充血させた耳たぶの毛細血管から採血することが一般的である(24,57,91)。乳酸濃度は、疲労困憊まで行なう漸増負荷テストや連続的運動によって徐々に上昇するが、ピーク値は概ね運動後３～８分でみられる(48)。他の生理学的変数の測定ツールと同じく、外的および内的環境因子を考慮する必要がある。例えば、環境温度や水分状態は乳酸濃度のデータの解釈に影響を及ぼす可能性がある(12)。体重の減少が3.9％に至る脱水状態は、骨格筋の乳酸濃度の上昇を招いた(47)。さらに、競技間の比較を行なう際は、ランニングとサイクリングで観察されるような筋量の変化の違いのために、運動様式が乳酸の蓄積に影響することを理解しておかねばならない(108)。同一競技に参加する個々の選手を比較する場合は、トレーニング状態とトレーニング負荷が、最大努力による乳酸濃度と最大下努力による乳酸濃度の両方に影響することが示唆されている(62,119)。したがって、データ収集時にはこれを考慮する必要がある。

唾液中バイオマーカー

コルチゾール

唾液中コルチゾール(免疫抑制ホルモン)は、タンパク質合成を減少させるため、骨格筋の異化過程を担う主要タンパク質であると考えられている(123)。コルチゾールは、運動中のステロイド、ペプチド、免疫マーカーのモニタリングに利用されてきた(87)。馬術競技、モータースポーツ、水泳など、複数の個人競技において、心理生理学的反応を示す指標として測定されてきた(95,100,102)。唾液中コルチゾールは、単一あるいは反復運動における心理生理学的反応を決定するために利用することができる(102)。ただし、１つのホルモンによってオーバートレーニング症候群の検出は不可能であるとも主張されている(119)。

研究では、コルチゾール(ng/mL)は市販のELISAキット(ELISA SLV-2930; DRG Instruments GmbH, Marburg, Germany)を利用して測定されることが多い。テコンドー(116)、ダウンヒルマウンテンバイク(102)、水泳(46)、およびパラリンピック水泳(100)など、様々な個人競技において、スワブによるコルチゾールの分析キットが利用されている。さらに、コルチゾールの唾液中濃度と血中濃度の間には有意な相関関係が見出されており、唾液中コルチゾールは正確な測定方法であることが証明されている(75,87)。唾液の採取方法に関しては、スワブだけでなく、「個別解析」と「流涎」によるポイントオブケア検査方式(患者の目の前で行なう方式の検査)も妥当性と信頼性が高い(40)。

唾液中コルチゾールの分析は、競技会におけるエリートクラスのアスリートの生理学的反応を知る簡易な非侵襲的プロトコルとして利用されている

(116)。他の生理学的変数と同じく、鍛錬されたあるいはエリートクラスのアスリートは、24時間で大きな周期的変化を示す可能性がある(34,126)。コルチゾールの分泌は起床後の早朝にピークに達し、以後、血中濃度が低下する。そのため、結果の誤解釈を避けるために、臨床環境と競技環境の両方でテストを繰り返し、時間を定めてサンプルを採取するべきである(65,126)。また、他の制限事項や交絡因子も考慮する必要がある。例えばTsaiら(116)によると、格闘技選手における急激な体重変化は、高強度トレーニングとともに、試合前4週間でコルチゾール濃度を有意に低下させた。さらに、臨床環境と競技環境のどちらで採取する場合も、サンプルの質は利用するプロトコルに大きく依存する。サンプルの汚染を避けるため、採取30分前は、喫煙、食事、あるいは果汁やカフェインを含む液体を摂取させないことが重要である(65)。生化学的レベルでは、エストロゲン、経口避妊薬、月経周期も、コルチゾールの結合に影響を及ぼすことが知られている(53)。また、喘息、腰痛、炎症などに処方される抗炎症剤に含まれるコルチコステロイドも、唾液中コルチゾールの測定に用いられる免疫測定法で使用される抗体と、交差反応する可能性のあることが知られている(49)。そのため、結果の誤解釈を避けるには、サンプル採取前にアスリートが摂取した薬剤や食品について知っておくことが重要である。

αアミラーゼ

唾液中αアミラーゼは、唾液に含まれる最も重要な酵素である。コルチゾールと同じく、運動に対する身体的ストレス反応と交感神経活動のバイオマーカーとして利用されてきた(10)。口腔液採取キットによって採取されたαアミラーゼ(100)は、コルチゾールよりも感度の高いバイオマーカーと考えられる。血液から唾液へと運搬されるコルチゾールとは異なり、唾液腺から分泌されるからである。αアミラーゼは、個人競技の競技会環境でモニタリングされてきた(100)。

αアミラーゼは、非競技会環境においてランニング時の無酸素性作業閾値と強い相関関係にある(21)。しかしテコンドーの競技会では、血中乳酸濃度との間にも強い相関関係がみられた(23)。これは、トレーニングや競技会における運動強度のマーカーとしての利用可能性を示しているとも考えられる。

αアミラーゼは、競技会に参加する個々のアスリートについてその場で測定されてきた。しかし、疲労、疾病、競技会後の長期的パフォーマンスのバイオマーカーとして利用可能かどうかは今後の調査が必要である(87)。また、唾液中のコルチゾールが増加すると、唾液中における免疫グロブリンA(IgA)の分泌と濃度の減少を伴う(52)。ここで提示した生化学的マーカーは、パフォーマンスの低下を引き起こす可能性のある免疫抑制ホルモン(92)を検出することができる。しかし、運動誘発性の免疫抑制とアスリートにおいて確認された疾患の発生率の増加を実際に関連づけた研究はほぼ存在しない(45)。

免疫グロブリンA

唾液中に分泌されるIgAは、上気道の感染に対する防御機構として働き、先行研究(45)では、唾液中の免疫グロブリンの濃度とアスリートにおける疾病発生率の間に逆相関関係が報告されている。唾液中のIgAの濃度の変化は、不十分な回復やオーバートレーニングを示唆している可能性もある(73,87)。唾液中のIgAの濃度は、絶対濃度によっても分泌速度によっても示すことができる(87)。

BNプロスペック分析デバイスを利用して個人競技の競技会で測定したIgA(73)は、エリートクラスのアスリートにおいて感染リスクを特定する信頼性の高いバイオマーカーであることが見出された(82)。しかし、基底値に対する被験者間および被験者内の変動が大きい(82)。さらに、エリートクラスのアスリートでは、レクリエーション活動を行なう被験者や非活動的な被験者と比べて、被験者内変動が大きいことも示された(42)。IgAの基底値は個人特異的であるため、信頼性の高い基準値を確立するにはかなり多くの標本を必要とする(82)。データ収集において最も意味のある方法は、流量を考慮して利用可能な唾液中IgAの正確な量を示す、唾液中分泌速度であると考えられる(87)。

エリートクラスのアスリートにおける唾液中IgAの濃度は一般人を上回る。しかし、高負荷による高強度トレーニング期間は唾液中IgAの濃度が低下する可能性がある(44)。IgAだけでなく主観的運動強度も測定して、アスリートの疲労状態の把握に努めるべきである(82)。

ジャンプのパフォーマンス尺度

競技会前後の跳躍高は、運動強度と神経筋系の疲労の関係について貴重なデータを提供するだろう(77,79)。個人競技では最大努力の行使(反復垂直跳びやサイクリングなどの非荷重運動など)に伴って、運動直後にパフォーマンスの低下がみられる(18)。疲労は、筋による発揮筋力と収縮速度の低下を特徴とすると考えられている(9,83)。さらに、カウンタームーブメントジャンプ(CMJ)テストは、神経筋系の疲労がもたらす、脚伸展筋による力発揮能力のわずかな変化にも鋭敏であることが知られている(94)。

CMJは再テスト法による信頼性が高いことが報告されている(77,93,94)。例えばMarkovicら(77)によると、CMJ

の信頼性係数は0.98（$p<0.01$）であった。また、他のジャンプテストと比較しても信頼性係数が高く、下肢の爆発的パワーの近似値として最も妥当性の高いテストであった(77)。さらに、一般に実施されているスクワットジャンプと、30 cmの高さからのデプスジャンプは、どちらもCMJよりも信頼性係数が低かった(26,77)。フォースプレートは滞空時間を測定する最も標準的な方法であり、光学センサーを利用するオプトジャンプは妥当性と信頼性の高い測定値を与える(4)。しかし、あらゆるレベルについて妥当性の高い測定値が得られる安価なツールとして、ボスコジャンプマット(Chronjump-Bosco system; Chronojump, Barcelona, Spain)がある。男女アスリートの跳躍高の記録に利用したところ、ボスコジャンプマットは、男性被験者のCMJについては中程度の信頼性を有する測定方法であったが、女性被験者のCMJについては高い信頼性を有していた(86)。

CMJは、跳躍高の測定について再テスト法による信頼性が高い。しかし、競技会後の疲労の検出に関しては、正確なモニタリングツールといえるかどうか議論がある(18)。この点を考慮すると、力の立ち上がり率を測定するテストが、競技会の前後で神経筋系の疲労をモニタリングする代替方法となる可能性がある。力の立ち上がり率の測定にジャンプパフォーマンスを利用することは有効である(80)。また、鉛直方向の動作を必要とする競技では、鉛直方向のスティフネスが神経筋系の疲労を測定する代替変数となる可能性がある(16)。さらに、ランニングを伴う競技に参加するアスリートにとっては、鉛直方向のスティフネスを生かして、貯蔵された弾性エネルギーを利用することが重要である(16)。Butlerら(16)によって指摘されているように、鉛直方向のスティフネスの測定は、パフォーマンスのモニタリングに重要な役割を果たす可能性があり、フォースプレートを利用して得られた鉛直方向のピーク床反力を、接地中の重心の鉛直方向の最大変位によって除する方法が提案されている。鉛直方向のスティフネスと傷害の間には直接の関係が見出されていない。しかし、基準値からのパフォーマンスの減衰は疲労とランニングエコノミーの低下を示す可能性がある(67)。問題は、たとえ、フォースプレートによるモニタリングが鉛直方向のスティフネスの測定値として妥当性が高いとしても(16)、競技会中にそれを実施するには時間を要することである。

Hoffmanら(56)によると、競技会環境では、パワー発揮能力が維持されて、運動直後は疲労が検出されない可能性がある。これは筋痛が即座に発生しないためかもしれない(18)。あるいはTillin＆Bishop(112)が示唆するように、高強度運動のあとの疲労の鎮静は活動後増強よりも速いペースで生じるのかもしれない。しかし、低強度運動に関しては、トライアスロン選手の跳躍高はレース後に有意に低下し(107)、高強度競技と低強度競技とでは感度の違いが存在する可能性のあることが示唆されている。ボスコジャンプマットによって測定したCMJは、跳躍高を測定する上で信頼性の高い測定値である。ただし、一般的な着地方法によって行なう必要がある(77)。競技会後の疲労のモニタリングをめぐるCMJの妥当性は、高強度競技については議論がある。したがって今後の調査によって、疲労検出への利用の適否を検証する必要がある。パフォーマンスや疲労のモニタリングにジャンプテストを利用することは、実施が容易であり、アスリートにもたらす疲労も比較的小さいという利点がある(117)。

主観的尺度

トレーニングや競技会に対する生理学的反応を評価する主観的ツールとして最も広く受け入れられているものは、BorgのRPEスケールである(11)。Fosterら(41)はBorgのカテゴリー比スケール(CR 10)を基に、セッションRPE(sRPE)と呼ぶ評価方法を開発した。これは、各セッションのRPEスコア(1～10)にセッションの継続時間(分)を乗じたものである。この尺度は、運動強度と主観的な生理学的負荷を算出する有効な方法とみられる。Borgのスケール(6～20)に似たリッカート尺度はほかにも存在する(11)。しかし、sRPEは主観的な努力度と負荷を算出する最も標準的な方法であると考えられる(32)。

sRPEは、その評価に応じてトレーニング負荷を操作することによって、トレーニングによる好ましくない影響を最小化できる精度の高いツールであり、運動強度を定量化することが証明されている主観的なアプローチである(32,54)。持久系競技でも高強度の間欠的競技でも、sRPEはトレーニングの負荷と強度を算出する妥当性の高い測定値であると考えられている(41)。高強度、中強度、低強度のセッションを調査したところ、級内相関係数は0.88であった(32,54)。さらに、sRPEは、トレーニング負荷の内的測定値(26,41)ともトレーニング強度の客観的測定値(54)とも密接に相関している。

sRPEは、トレーニング環境においては、すでに妥当性が証明されたトレーニング強度の算出方法である。しかし、個々のアスリートの競技会環境における妥当性はまだ証明されていない。先行研究ではほとんど欠点が指摘されていないが、最近、Wallaceら(124)とScottら(99)によって、長時間と短時間のランニングに対して0～10のRPEスケールを利用して評価させると、大きな測定誤差が生じることが報告され

た。また、近年の研究はほとんどが持久系アスリートを被験者としている。したがって、今後の研究によって競技会環境におけるsRPEの利用を調査し、競技会関連のストレスの測定における妥当性を検証する必要がある。実施する際は、他のアスリートのスコアに基づくバイアスを避けるために、RPEの評価は個別に行なわせるべきである。また、RPEがセッション全体の強度ではなく最後に実施した運動の強度だけを反映することがないように、一時的な疲労が消散してから評価を行なわせるべきである。したがって、RPEの評価は運動後10～30分の間に実施することを勧める(109)。

現場への応用

多くのモニタリングツールは有用なデータを提供するが、測定環境への適合性を考慮する必要がある。エリートクラスのアスリートの測定においてツールが効果を発揮するには、使用が容易であり、時間効率が良く、さらに、パフォーマンス前のルーティンに負の影響を及ぼさないことが不可欠である。競技会中に装着する必要があるならば、アスリートにとって装着が不快ではないように気を配るとともに、運営組織によって承認されなければならない。生化学的マーカーやジャンプパフォーマンスの項で取り上げた、競技会前後の測定値を提供するツールからは妥当性の高いデータが得られるであろう。しかし、生理学的変数とパフォーマンス変数について、競技会環境で複数の時点にわたって一貫したデータを収集するには、競技会の要件を知ることが助けになる。モニタリングセッションで使用する予定の正確なプロトコルを書面にして、モニタリング環境の標準化に努め、比較可能なものとするべきである。これはsRPEなどの主観的尺度についても同じである。

また、特に運動の用量-反応関係のばらつきについては、アスリートの個別性が重要であることも認識するべきである。多くの個人アスリートについてデータの分析と比較を行なう際は、個人間の差異を意識する必要がある。水分状態、栄養摂取、薬剤服用、気候、心理状態などの内的および外的因子は、データの背景情報として、競技会の準備とその最中のどちらにおいても注意を払うことが重要である。このようにすれば、あるモニタリングセッションで得た結果を前後のデータと比較して、注目に値する変化が生じているかどうかを評価することが可能になる。

まとめ

数多くのモニタリングツール(HRモニター、GPS、統合技術、生化学的マーカー、ジャンプパフォーマンス、主観的尺度)から、運動の用量-反応関係、運動強度、運動パフォーマンスなどについて信頼性と妥当性の高いデータが得られる。しかし、個人競技と競技会環境については、どちらもさらなる調査が必要なことは明らかである。有益な改善の可能性はほかにも存在する。まず、高強度の非直線的な動作パターンを有する競技については、ツールの妥当性を調査し、確認する必要がある。次に、競技会環境で使用するデバイスは、重さ、装着の快適さ、装着位置などのデザイン面に注意を払う必要がある。最後に、既知の生理学的変数が競技会の要件に対して特異的な値を示すことを測定によって捉え、個人競技のトレーニングを実施する専門職の能力を向上させる必要がある。◆

References

1. Ahmadi A, Rowlands D, James DA. Towards a wearable device for skill assessment and skill acquisition of a tennis player during the first serve. *Leis Loisir* 2: 129–136, 2009.
2. Ainsworth BE, Haskell WL, Herrmann SD, Meckes N, Bassett DR, Tudor-Locke C, Greer JL, Vezina J, Whitt-Glover MC, Leon AS. Compendium of physical activities: A second update of codes and MET values. *Med Sci Sports Exerc* 43: 1575–1581, 2011.
3. Akintola AA, van de Pol V, Bimmel D, Maan AC, van Heemst D. Comparative analysis of the equivital EQ02 lifemonitor with holter ambulatory ECG device for continuous measurement of ECG, heart rate, and heart rate variability: A validation study for precision and accuracy. *Front Physiol* 7: 1–14, 2016.
4. Attia A, Dhahbi W, Chaouachi A, Padulo J, Wong DP, Chamari K. Measurement errors when estimating the vertical jump height with flight time using photocell devices: the example of Optojump. *Biol Sport* 34: 63–70, 2017.
5. Aughey RJ. Applications of GPS technologies to field sports. *Int J Sports Physiol Perform* 6: 295–310, 2011.
6. Aughey RJ, Falloon C. Real-time versus post-game GPS data in team sports. *J Sci Med Sport* 13: 348–349, 2010.
7. Baldari C, Bonavolontà V, Emerenziani GP, Gallotta MC, Silva AJ, Guidetti L. Accuracy, reliability, linearity of Accutrend and Lactate Pro versus EBIO plus analyzer. *Eur J Appl Physiol* 107: 105–111, 2009.
8. Bangsbo J, Mohr M, Krustrup P. Physical and metabolic demands of training and match-play in the elite football player. *J Sports Sci* 24: 665–674, 2006.
9. Bigland-Ritchie B. Change in muscle contractile properties and neural control during human muscular fatigue. *Muscle Nerve* 7: 691–699, 1984.
10. Bishop NC, Gleeson M. *School of Sport and Exercise Sciences*. Loughborough, United Kingdom: Loughborough University, 2009. pp. 4444–4456.
11. Borg G. Borg's percieved exertion and pain scales. *Med Sci Sport Exerc* 14: 377–381, 1982.
12. Borresen J, Lambert MI. The quantification of training Load, effect on performance. *Sport Med* 39: 779–795, 2009.
13. Boyd LJ, Ball K, Aughey RJ. The reliability of MinimaxX accelerometers for measuring physical activity in Australian football. *Int J Sports Physiol Perform* 6: 311–321, 2011.
14. Brage S, Brage N, Franks PW, Ekelund U, Wareham NJ. Reliability and validity of the combined heart rate and movement sensor Actiheart. *Eur J Clin Nutr* 59: 561–570, 2005.
15. Brage S, Brage N, Franks PW, Ekelund U, Wong M, Anderson LB, Froberg K, Wareham NJ. Branched equation modeling of simultaneous accelerometry and heart rate monitoring improves estimate of directly measured physical activity energy expenditure. *J Appl Physiol* 96: 343–351, 2003.
16. Butler RJ, Crowell HP, Davis IMC. Lower extremity stiffness: Implications for

performance and injury. *Clin Biomech* 18: 511–517, 2003.
17. Butte NF, Ekelund U, Westerterp KR. Assessing physical activity using wearable monitors: Measures of physical activity. *Med Sci Sports Exerc* 44: 5–12, 2012.
18. Byrne C, Twist C, Eston R. Neuromuscular function after exercise-induced muscle damage: Theoretical and applied implications. *Sports Med* 34: 49–69, 2004.
19. Cabello Manrique D, González-Badillo JJ. Analysis of the characteristics of competitive badminton. *Br J Sports Med* 37: 62–66, 2003.
20. Callaway A, Cobb J, Jones I. A comparison of video and accelerometer based approaches applied to performance monitoring in swimming. *Int J Sport Sci Coach* 4: 139–153, 2009.
21. Calvo F, Chicharro JL, Bandrés F, Lucía A, Pérez M, Alvarez J, Mojares LL, Vaquero AF, Legido JC. Anaerobic threshold determination with analysis of salivary amylase. *Can J Appl Physiol* 22: 553–561, 1997.
22. Chen KY, Bassett DR. The technology of accelerometry-based activity monitors: Current and future. *Med Sci Sports Exerc* 37: S490–S500, 2005.
23. Chiodo S, Tessitore A, Cortis C, Cibelli G, Lupo C, Ammendolia A, De Rosas M, Capranica L. Stress-related hormonal and psychological changes to official youth Taekwondo competitions. *Scand J Med Sci Sports* 21: 111–119, 2011.
24. Collins D, Doherty M, Talbot S. Performance enhancement in motocross: A case study of the sport science team in action. *Sport Psychol* 7: 290–297, 1993.
25. Collins DK, Reilly T, Morton JP. Anthropometric and performance characteristics of elite Hurling players. *J Athl Enhanc* 3: 6, 2014.
26. Cormack SJ, Newton RU, Mcguigan MR. Neuromuscular fatigue and endocrine responses in elite australian rules football players. *Int J Sports Physiol Perform* 3: 359–374, 2008.
27. Cotugna N, Snider OS, Windish J. Nutrition assessment of horse-racing athletes. *J Community Health* 36: 261–264, 2011.
28. Cullen S, O'Loughlin G, McGoldrick A, Smyth B, May G, Warrington GD. Physiological demands of flat Horse Racing jockeys. *J Strength Cond Res* 29: 3060–3066, 2015.
29. Cummins C, Orr R, O'Connor H, West C. Global positioning systems (GPS) and microtechnology sensors in team sports: A systematic review. *Sports Med* 43: 1025–1042, 2013.
30. Currell K, Jeukendrup AE. Validity, reliability and sensitivity of measures of sporting performance. *Sports Med* 38: 297–316, 2008.
31. Davey N, Anderson M, James DA. Validation trial of an accelerometer-based sensor platform for swimming. *Sport Technol* 1: 202–207, 2008.
32. Day ML, Mcguigan MR, Brice G, Foster C. Monitoring exercise intensity during resistance training using the session RPE sclae. *J Strength Cond Res* 18: 353–358, 2004.
33. Dellaserra CL, Gao Y, Ransdell L. Use of integrated technology in team sports: A review of opportunities, challenges, and future directions for athletes. *J Strength Cond Res* 39: 1–16, 2013.
34. Dimitriou L, Sharp NCC, Doherty M. Circadian effects on the acute responses of salivary cortisol and IgA in well trained swimmers. *Br J Sports Med* 36: 260–264, 2002.
35. Dolan E, O'Connor H, McGoldrick A, O'Loughlin G, Lyons D, Warrington G. Nutritional, lifestyle, and weight control practices of professional jockeys. *J Sports Sci* 29: 791–799, 2011.
36. Drenowatz C, Eisenmann JC. Validation of the SenseWear Armband at high intensity exercise. *Eur J Appl Physiol* 111: 883–887, 2011.
37. Duffield R, Reid M, Baker J, Spratford W. Accuracy and reliability of GPS devices for measurement of movement patterns in confined spaces for court-based sports. *J Sci Med Sport* 13: 523–525, 2010.
38. Dwyer D, Gabbett TJ. Global positioning system data analysis: Velocity ranges and a new definition of sprinting for field sport athletes. *J Strength Cond Res* 26: 818–824, 2012.
39. Faude O, Kindermann W, Meyer T. Lactate threshold concepts: How valid are they? *Sport Med* 39: 469–490, 2009.
40. Fisher R, McLellan C, Sinclair W. The validity and reliability for a salivary cortisol point of care test. *J Athl Enhanc* 4: 1–6, 2015.
41. Foster C, Florhaug JA, Franklin J, Gottschall L, Hrovatin LA, Parker S, Doleshal P, Dodge C. A new approach to monitoring exercise training. *J Strength Cond Res* 15: 109–115, 2001.
42. Francis JL, Gleeson M, Pyne DB, Callister R, Clancy RL. Variation of salivary immunoglobulins in exercising and sedentary populations. *Med Sci Sports Exerc* 37: 571–578, 2005.
43. Fruin ML, Rankin JW. Validity of a multi-sensor armband in estimating rest and exercise energy expenditure. *Med Sci Sports Exerc* 36: 1063–1069, 2004.
44. Gleeson M. Mucosal immune responses and risk of respiratory illness in elite athletes. *Exerc Immunol Rev* 6: 5–42, 2000.
45. Gleeson M. Immune function in sport and exercise. *J Appl Physiol* 103: 693–699, 2007.
46. Gleeson M, Hall ST, McDonald WA, Flanagan AJ, Clancy RL. Salivary IgA subclasses and infection risk in elite swimmers. *Immunol Cell Biol* 77: 351–355, 1999.
47. González-Alonso J, Teller C, Andersen SL, Jensen FB, Hyldig T, Nielsen B. Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *J Appl Physiol* 86: 1032–1039, 1999.
48. Goodwin ML, Harris JE, Hernández A, Gladden LB. Blood lactate mmeasurements and analysis during exercise: A guide for clinicians. *J Diabetes Sci Technol* 1: 558–569, 2007.
49. Granger DA, Hibel LC, Fortunato CK, Kapelewski CH. Medication effects on salivary cortisol: Tactics and strategy to minimize impact in behavioral and developmental science. *Psychoneuroendocrinology* 34: 1437–1448, 2009.
50. Gray AJ, Jenkins D, Andrews MH, Taaffe DR, Glover ML. Validity and reliability of GPS for measuring distance travelled in field-based team sports. *J Sports Sci* 28: 1319–1325, 2010.
51. Hamilton MT, Gonzalez-alonso J, Montain SJ, Coyle F, Marc T. Fluid replacement and glucose infusion during exercise prevent cardiovascular drift. *J Appl Physiol (1985)* 71: 871–877, 1991.
52. He CS, Tsai ML, Ko MH, Chang CK, Fang SH. Relationships among salivary immunoglobulin A, lactoferrin and cortisol in basketball players during a basketball season. *Eur J Appl Physiol* 110: 989–995, 2010.
53. Hellhammer DH, Wüst S, Kudielka BM. Salivary cortisol as a biomarker in stress research. *Psychoneuroendocrinology* 34: 163–171, 2009.
54. Herman L, Foster C, Maher M, Mikat R, Porcari J. Validity and reliability of the session RPE method for monitoring exercise training intensity. *South Afr J Sport Med* 18: 14, 2006.
55. Hernando D, Garatachea N, Almeida R, Casajús JA, Bailón R. Validation of heart rate monitor Polar RS800 for heart rate variability analysis during exercise. *J Strength Cond Res* 32: 716–725, 2018.
56. Hoffman JR, Nusse V, Kang J. The effect of an intercollegiate soccer game on maximal power performance. *Can J Appl Physiol* 28: 807–817, 2003.
57. Hopkins WG. Quantification of training in competitive sports. Methods and applications. *Sports Med* 12: 161–183, 1991.
58. Hurst HT, Sinclair J. Validity and reliability

of 5 Hz GPS for measurement of non- linear cycling distance and velocity. *Int J Sport Sci Eng* 07: 11–16, 2013.
59. Jakicic JM, Marcus M, Gallagher KI, Randall C, Thomas E, Goss FL, Robertson RJ. Evaluation of the SenseWear Pro Armband to assess energy expenditure during exercise. *Med Sci Sports Exerc* 36: 897–904, 2004.
60. Jennings D, Cormack S, Coutts AJ, Boyd L, Aughey RJ. The validity and reliability of GPS units in team sport specific running patterns. *Int J Sports Physiol Perform* 5: 328–341, 2010.
61. Jennings D, Cormack S, Coutts AJ, Boyd LJ, Aughey RJ. Variability of GPS units for measuring distance in team sport movements. *Int J Sports Physiol Perform* 5: 565–569, 2010.
62. Jeukendrup AE, Hesselink MK. Overtraining—What do lactate curves tell us? *Br J Sports Med* 28: 239–240, 1994.
63. Jeukendrup A, VanDiemen A. Heart rate monitoring during training and competition in cyclists. *J Sports Sci* 16(Suppl): S91–S99, 1998.
64. Kraemer WJ, Spiering BA, Volek JS, Martin GJ, Howard RL, Ratamess NA, Hatfield DL, Vingren JL, Ho JY, Fragala MS, Thomas GA, French DN, Anderson JM, Häkkinen K, Maresh CM. Recovery from a national collegiate athletic association division I football game: Muscle damage and hormonal status. *J Strength Cond Res* 23: 2–10, 2009.
65. Kudielka BM, Broderick JE, Kirschbaum C. Compliance with saliva sampling protocols: Electronic monitoring reveals invalid cortisol daytime profiles in noncompliant subjects. *Psychosom Med* 65: 313–319, 2003.
66. Larsson P. Global positioning system and sport-specific testing. *Sports Med* 33: 1093–1101, 2003.
67. Latash M, Zatsiorsky V. Joint stiffness: Myth or reality? *Hum Mov Sci* 12: 653–692, 1993.
68. Laukkanen RM, Virtanen PK. Heart rate monitors: State of the art. *J Sports Sci* 16(Suppl): S3–S7, 1998.
69. Léger L, Thivierge M. Heart rate monitors: Validity, stability, and functionality. *Phys Sportsmed* 16: 143–151, 1988.
70. Lehmann M, Knizia K, Gastmann U, Petersen KG, Khalaf AN, Bauer S, Kerp L, Keul J. Pituitary function in recreational athletes. *Br J Sport Med* 27: 186–193, 1993.
71. Leydon MA, Wall C. New Zealand jockeys' dietary habits and their potential impact on health. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 12: 220–237, 2002.
72. Li RT, Kling SR, Salata MJ, Cupp SA, Sheehan J, Voos JE. Wearable performance devices in sports medicine. *Sports Health* 8: 74–78, 2016.
73. Libicz S, Mercier B, Bigou N, Le Gallais D, Castex F. Salivary IgA response of triathletes participating in the French iron tour. *Int J Sports Med* 27: 389–394, 2006.
74. Liden CB, Wolowicz M, Des JSM, Teller A, Vishnubhatla S, Pelletier R, Farringdon J. *Accuracy and Reliability of the SenseWear TM Armband as an Energy Expenditure Assessment Device*. BodyMedia Inc, 2002. pp. 1–15.
75. Lippi G, De Vita F, Salvagno GL, Gelati M, Montagnana M, Guidi GC. Measurement of morning saliva cortisol in athletes. *Clin Biochem* 42: 904–906, 2009.
76. Liu Y, Zhu SH, Wang GH, Ye F, Li PZ. Validity and reliability of multiparameter physiological measurements recorded by the equivital lifemonitor during activities of various intensities. *J Occup Environ Hyg* 10: 78–85, 2013.
77. Markovic G, Dizdar D, Kukic I, Cardinale M. Reliability of CMJ and squat jump pdf. *J Strength Cond Res* 3: 551–555, 2004.
78. Matthews CE. Calibration of accelerometer output for adults. *Med Sci Sports Exerc* 37: S512–S522, 2005.
79. McLean BD, Coutts AJ, Kelly V, McGuigan MR, Cormack SJ. Neuromuscular, endocrine, and perceptual fatigue responses during different length between-match microcycles in professional rugby league players. *Int J Sports Physiol Perform* 5: 367–383, 2010.
80. McLellan CP, Lovell DI, Gass GC. The role of rate of force development on vertical jump performance. *J Strength Cond Res* 25: 379–385, 2011.
81. Nangalia V, Prytherch DR, Smith GB. Health technology assessment review: Remote monitoring of vital signs—Current status and future challenges. *Crit Care* 14: 233, 2010.
82. Neville V, Gleeson M, Folland JP. Salivary IgA as a risk factor for upper respiratory infections in elite professional athletes. *Med Sci Sports Exerc* 40: 1228–1236, 2008.
83. Nummela A, Vuorimma T, Rusko H. Changes in force production blood lactate and EMG acitvity in the 400 m sprint. *J Sports Sci* 10: 217–228, 1991.
84. O'Reilly J, Cheng HL, Poon ETC. New insights in professional horse racing; "in-race" heart rate data, elevated fracture risk, hydration, nutritional and lifestyle analysis of elite professional jockeys. *J Sports Sci* 35: 441–448, 2017.
85. Padilla S, Mujika I, Orbañanos J, Santisteban J, Angulo F, José Goiriena J. Exercise intensity and load during mass-start stage races in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc* 33: 796–802, 2001.
86. Pagaduan J, De Blas X. Reliability of countermovement jump performance on chronojumpboscosystem in male and female athletes. *Sport Sci Pract Asp* 10: 5–8, 2013.
87. Papacosta E, Nassis GP. Saliva as a tool for monitoring steroid, peptide and immune markers in sport and exercise science. *J Sci Med Sport* 14: 424–434, 2011.
88. Petersen C, Pyne D, Portus M, Dawson B. Validity and reliability of GPS units to monitor cricket specific movement patters. *Int J Sports Physiol Perform* 4: 381–393, 2009.
89. Portas MD, Harley JA, Barnes CA, Rush CJ. The validity and reliability of 1-Hz and 5-Hz global positioning systems for linear, multidirectional, and soccer-specific activities. *Int J Sports Physiol Perform* 5: 448–458, 2010.
90. Powell C, Carson BP, Dowd KP, Donnelly AE. The accuracy of the SenseWear Pro3 and the activPAL3 Micro devices for measurement of energy expenditure. *Physiol Meas* 37: 1715–1727, 2016.
91. Pyne DB, Boston T, Martin DT, Logan A. Evaluation of the Lactate Pro blood lactate analyser. *Eur J Appl Physiol* 82: 112–116, 2000.
92. Pyne DB, Gleeson M. Effects of intensive exercise training on immunity in athletes. *Int J Sports Med* 19(Suppl 3): S183–S184, 1998.
93. Raastad T, Glomsheller T, Bjøro T, Hallén J. Recovery of skeletal muscle contractility and hormonal responses to strength exercise after two weeks of high-volume strength training. *Scand J Med Sci Sports* 13: 159–168, 2003.
94. Raastad T, Hallén J. Recovery of skeletal muscle contractility after high- and moderate-intensity strength exercise. *Eur J Appl Physiol* 82: 206–214, 2000.
95. Rincon JAG, Turco JV, Martinez IM, Vaque IC. A comparative study of the metabolic effort expended by horse riders during a jumping competition. *Br J Sports Med* 26: 33–36, 1992.
96. Santos DA, Silva AM, Matias CN, Magalhães JP, Fields DA, Minderico CS, Ekelund U, Sardinha LB. Validity of a combined heart rate and motion sensor for the measurement of free-living energy expenditure in very active individuals. *J Sci Med Sport* 17: 387–393, 2014.
97. Schwaberger G. Heart rate, metabolic and hormonal responses to maximal psycho-emotional and physical stress in motor car racing drivers. *Int Arch Occup Environ Health* 59: 579–604, 1987.
98. Scott BR, Lockie RG, Knight TJ, Clark AC, Janse de Jonge XA. A comparison of methods to quantify the in-season training load of professional soccer players. *Int J Sports Physiol Perform* 8: 195–202, 2013.
99. Scott TJ, Black CR, Quinn J, Coutts AJ. Validity and reliability of the session-RPE

method for quantifying training in Australian football: A comparison of the CR10 and CR100 scales. *J Strength Cond Res* 27: 270–276, 2013.
100. Sinnott-O'Connor C, Comyns TM, Nevill AM, Warrington GD. Salivary biomarkers and training load during training and competition in paralympic swimmers. *Int J Sports Physiol Perform* 13: 839–843, 2017.
101. Skinner JS, Jaskólski A, Jaskólska A, Krasnoff J, Leon AS, Rao DC. Age, sex, race, initial fitness, and response to training: The Heritage Family Study. *Am Physiol (1985)* 90: 1770–1776, 2001.
102. Sperlich B, Achtzehn S, Buhr M, Zinner C, Zelle S, Holmberg HC. Salivary cortisol, heart rate, and blood lactate responses during elite downhill mountain bike racing. *Int J Sports Physiol Perform* 7: 47–52, 2012.
103. Sperlich B, Koehler K, Holmberg HC, Zinner C, Mester J. Table tennis: Cardiorespiratory and metabolic analysis of match and exercise in elite junior national players. *Int J Sports Physiol Perform* 6: 234–242, 2011.
104. Spierer DK, Hagins M, Rundle A, Pappas E. A comparison of energy expenditure estimates from the Actiheart and Actical physical activity monitors during low intensity activities, walking, and jogging. *Eur J Appl Physiol* 111: 659–667, 2011.
105. Spurway NC. Hiking physiology and the "quasi-isometric" concept. *J Sports Sci* 25: 1081–1093, 2007.
106. Suarez-Arrones L, Arenas C, Lopez G, Requena B, Terrill O, Mendez-Villanueva A. Positional differences in match running performance and physical collisions in men rugby sevens. *Int J Sports Physiol Perform* 9: 316–323, 2014.
107. Suzuki K, Peake J, Nosaka K, Okutsu M, Abbiss CR, Surriano R, Bishop D, Quod MJ, Lee H, Martin DT, Laursen PB. Changes in markers of muscle damage, inflammation and HSP70 after an Ironman Triathlon race. *Eur J Appl Physiol* 98: 525–534, 2006.
108. Svedahl K, MacIntosh BR. Anaerobic threshold: The concept and methods of measurement. *Can J Appl Physiol* 28: 299–323, 2003.
109. Sweet TW, Foster C, McGuigan MR, Brice G. Quantitation of resistance training using the session rating of perceived exertion method. *J Strength Cond Res* 18: 796–802, 2004.
110. Taha T, Thomas SG. Systems modelling of the relationship between training and performance. *Sports Med* 33: 1061–1073, 2003.
111. Tanner RK, Fuller KL, Ross MLR. Evaluation of three portable blood lactate analysers: Lactate Pro, Lactate Scout and Lactate Plus. *Eur J Appl Physiol* 109: 551–559, 2010.
112. Tillin NA, Bishop D. Factors modulating post-activation potentiation and its effect on performance of subsequent explosive activities. *Sports Med* 39: 147–166, 2009.
113. Troiano RP, McClain JJ, Brychta RJ, Chen KY. Evolution of accelerometer methods for physical activity research. *Br J Sports Med* 48: 1019–1023, 2014.
114. Trost SG, Mciver KL, Pate RR. Conducting accelerometer-based activity assessments in field-based research. *Med Sci Sports Exerc* 37: 531–543, 2005.
115. Trowbridge EA, Cotterill JV, Crofts CE. The physical demands of riding in National Hunt races. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 70: 66–69, 1995.
116. Tsai ML, Ko MH, Chang CK, Chou KM, Fang SH. Impact of intense training and rapid weight changes on salivary parameters in elite female Taekwondo athletes. *Scand J Med Sci Sports* 21: 758–764, 2011.
117. Twist C, Highton J. Monitoring fatigue and recovery in rugby league players. *Int J Sports Physiol Perform* 8: 467–474, 2013.
118. Urhausen A, Gabriel H, Kindermann W. Diagnosis of overtraining: What tools do we have? *Sport Med* 32: 95–102, 2002.
119. Urhausen A, Gabriel HHW, Weiler B, Kindermann W. Ergometric and psychological findings during overtraining: A long-term follow-up study in endurance athletes. *Int J Sports Med* 19: 114–120, 1998.
120. Vangelakoudi A, Vogiatzis I, Geladas N. Anaerobic capacity, isometric endurance, and Laser sailing performance. *J Sports Sci* 25: 1095–1100, 2007.
121. Varley MC, Fairweather IH, Aughey RJ. Validity and reliability of GPS for measuring instantaneous velocity during acceleration, deceleration, and constant motion. *J Sports Sci* 30: 121–127, 2012.
122. Viru A, Viru M. Nature of training effects. *Exerc Sport Sci* 6: 67–95, 2000.
123. Viru A, Viru M. Cortisol—Essential adaptation hormone in exercise. *Int J Sports Med* 25: 461–464, 2004.
124. Wallace LK, Slattery KM, Coutts AJ. A comparison of methods for quantifying training load: Relationships between modelled and actual training responses. *Eur J Appl Physiol* 114: 11–20, 2014.
125. Warrington G, Dolan E, McGoldrick A, McEvoy J, Macmanus C, Griffin M, Lyons D. Chronic weight control impacts on physiological function and bone health in elite jockeys. *J Sports Sci* 27: 543–550, 2009.
126. Wehr TA, Aeschbach D, Duncan WC. Evidence for a biological dawn and dusk in the human circadian timing system. *J Physiol* 535: 937–951, 2001.
127. Wilson G, Pritchard PP, Papageorgiou C, Phillips S, Kumar P, Langan-Evans C, Routledge H, Owens DJ, Morton JP, Close GL. Fasted exercise and increased dietary protein reduces body fat and improves strength in jockeys. *Int J Sports Med* 36: 1008–1014, 2015.
128. Wilson G, Sparks A, Drust B, Morton JP, Close GL. Assessment of energy expenditure in elite jockeys during simulated race-riding and a working day: Implications for making-weight. *Appl Physiol Nutr Metab* 38: 1–25, 2012.
129. Wilson G, Sparks SA, Drust B, Morton JP, Close GL. Assessment of energy expenditure in elite jockeys during simulated race riding and a working day: Implications for making weight. *Appl Physiol Nutr Metab* 38: 415–420, 2013.
130. Witte TH, Wilson AM. Accuracy of WAAS-enabled GPS for the determination of position and speed over ground. *J Biomech* 38: 1717–1722, 2005.

From Strength and Conditioning Journal
Volume 41, Number 6, pages 62-74.

著者紹介

Michael Kiely：
Waterford Institute of Technologyのスポーツ＆運動科学部の研究員。

Giles Warrington：
University of Limerickの身体教育および運動科学部長であり、スポーツ＆運動生理学の上級講師。

Adrian McGoldrick：
Irish Horse Racing Regulatory Boardの上級医務官。

SarahJane Cullen：
Waterford Institute of Technologyのスポーツ＆運動科学部のコースリーダーであり、運動生理学の助講師。