

〔博士論文概要〕

コンカレントトレーニングを構成する
トレーニングの順序が骨格筋に与える影響

令和2年

白井隆長

筑波大学大学院人間総合科学研究科体育科学専攻

アスリートは、日々厳しいトレーニングと絶え間ない努力を積み重ねることで身体の可能性を広げ、パフォーマンスを高めている。そのトレーニングの効果が最も顕著に現れる器官の一つが骨格筋である。骨格筋は、ヒトの身体のうち女性で30%以上、男性で38%以上の重量を占めるとされており、身体活動の原動力となる不可欠な器官であり、運動時にはグルコースを取り込み、エネルギー代謝を行うなど重要な役割を果たしている。また、骨格筋は非常に可塑性に富んだ組織であり、外部からの刺激に応じて量的・質的に変化する特性を有している。継続的な筋収縮は特定の分子や細胞応答を活性化させ、代謝及び形態学的適応を引き起こす。

多くのスポーツでは、競技中に様々な運動強度での運動を行う場面に遭遇する。アスリートはこのような場面を想定し、複数の代謝機構によりエネルギー供給がなされるような強度の異なる運動を組み合わせるトレーニングを行う。競技力を高めるために多われるトレーニングは、体力トレーニング、技術トレーニング、戦術トレーニング、メンタルトレーニングの4種類に分類される。この中でも体力トレーニングはアスリートの身体能力を向上させるために非常に重要な要素の一つであり、この「体力」はさらに「筋力、スピード、持久力」の3つに分類される。これら3種類の体力要素を高めるために、以下の3種類のトレーニングが行われる。

①筋力トレーニングやウェイトリフティングなどのレジスタンス運動は、自体重や重りを用いて筋収縮を行うことで筋損傷を引き起こし、筋組織の修復の過程で、筋肥大・筋力向上など骨格筋の量的変化を引き起こす(Ogasawara *et al.*, 2011; Ogasawara *et al.*, 2013)。レジスタンストレーニングにより骨格筋量が増加した結果、基礎代謝量が増加することも知られている(Touron *et al.*, 2019)。

②ランニングやジョギング、スイミングなどの持久性運動は、酸素を利用し、糖質の他、脂肪も燃焼させエネルギーを発生させている。その結果、長時間持続する運動に適した反応を起こし、酸化・代謝能力の向上、ミトコンドリア容量の増加、毛細血管新生の促進など、骨格筋の質的变化を引き起こす(Olesen *et al.*, 2010)。

③タバタプロトコルに代表される高強度インターバル運動(High Intensity Interval Exercise : HIIE)は、高強度の運動と休息を交互に繰り返す、短時間で行われる特徴を持つ運動様式である(Tabata *et al.*, 1996)。HIIEは主に糖をエネルギーとして代謝し、間欠的持久能力や解糖系代謝酵素の増加が引き起こされ、従来の持久性運動と比べ、短時間で効率よく代謝能力を向上させることができる(Burgomaster *et al.*, 2008; Gibala, 2009)。また、HIIEを繰り返し行った高強度インターバルトレーニングは最大酸素摂取量やVO₂ピークを増加させ、持久性能を向上させることが報告されている(Knowles *et al.*, 2015)。

上述のように、アスリートは技術・戦術練習に加え、上述の3種類の運動様式を組み合わせ、自身のスポーツパフォーマンスの向上を狙っている。特に、サッカーやバスケットボール、ラグビーをはじめとする球技は筋力、持久性能、解糖系代謝能力を全て必要とし(Krustrup *et al.*, 2006)、いずれかのトレーニングを行わない選択肢はあり得ないため、日々の競技練習の中でこれらのトレーニングを組み合わせ、パフォーマンスを最大限高めるためのメニューを組み立てている。これらの体力要素を高めるトレーニングは、構成によって日を分けて行なった方が効果が高いという報告もなされており(Sale *et al.*, 1990)、アスリートには目的に応じたトレーニングメニューの組み立てが求

められる。しかし、様式ごとに別日にトレーニングセッションを設けるということは、球技の技術・戦術練習以外でトレーニングセッションを設ける必要があり、トレーニング頻度とその運動量が低下し、目的としたトレーニング効果を得られない可能性がある。実際、多くのアスリートは時間的な制約から、異なる様式の体力トレーニングを同日に行うことがほとんどである。このように同日中に異なる様式のトレーニングを行う場合、目的としたトレーニング効果を得るには、どのようにトレーニングを行えば良いのだろうか。そこで私が着目したのがコンカレントトレーニング (Concurrent Training: 以下 CT) である。CT とは、同日中に異なる二つの運動様式を組み合わせるトレーニング法のことである (Hickson, 1980; Ogasawara *et al.*, 2014)。このトレーニング法では選択した二つのトレーニング様式の両効果を得ることを狙っている (Shirai *et al.*, 2020)。CT の効果を最大限に得るためには、選択した運動の実施順序が重要となってくる。トレーニングの種類や方法により、得られる効果は異なるため、それらが目的に応じて適切に実施されていなければその効果が最適化されているとは言いがたい。一般的に、トレーニング効果が期待したほど得られない原因の一つとして、トレーニング処方への過ちがあげられる。同じ時間でもトレーニングの様式、強度、時間、頻度により骨格筋への影響が異なるため (Shirai *et al.*, 2020)、より効果的に目的を達成できる方法を検討する必要があると考えた。一般的な CT の効果や背景にあるメカニズムの解析は多く行われているのに対し、その CT を構成する運動の実施順序が、骨格筋に与える影響やその分子メカニズムに関する研究は乏しいのが現状である。そこで本研究は、CT の実施順序に着目し、侵襲的解析が可能な動物実験モデルを用いて、CT を構成する運動の実施順序が骨格筋に与える影響を、分子シグナルの活性化を指標として明らかにすることを目的とした。具体的な骨格筋分子シグナルとして、レジスタンス運動で向上する筋力増加・筋肥大関連分子シグナル、持久性運動で向上する酸化・代謝能力関連分子シグナル、HIIE で向上する解糖系代謝関連分子シグナルに着目し、包括的な検討を行った。

本研究の目的として、選択した2種類の運動様式を組み合わせたコンカレントトレーニングにおいて、両運動の効果を得やすい実施順序を検討することとし、コンカレントトレーニングの研究として以下の3パターンを構成し、3つの研究課題を設定した。

研究課題 1: レジスタンス運動と持久性運動で構成されたコンカレントトレーニングの順序の違いによる骨格筋適応

研究課題 2: レジスタンス運動と高強度インターバル運動で構成されたコンカレントトレーニングの順序の違いによる骨格筋適応

研究課題 3: 持久性運動と高強度インターバル運動で構成されたコンカレントトレーニングの順序の違いによる骨格筋適応

研究課題 1 では、レジスタンス運動と持久性運動を組み合わせたコンカレントトレーニングを行った結果、レジスタンス運動を先に行うことによって筋肥大に関わる分子シグナルの発現量が高値を示すことが示唆された。一方で持久性運動に関連する分子シグナルおよび、代謝の中心的役割を果たすミトコンドリアのタンパク質の発現量は、レジスタンス運動と持久性運動のどちらを先に行っても発現量に変化はないことが示唆された。これらの

結果を踏まえ、レジスタンス運動と持久性運動を組み合わせたコンカレントトレーニングを行う場合、両運動の効果を得るためにはレジスタンス運動を先に行うことが効果的であることが明らかとなった。

研究課題 2 では、レジスタンス運動と高強度インターバル運動を組み合わせたコンカレントトレーニングを行った結果、高強度インターバル運動を先に行うことによって筋肥大に関わる分子シグナルの発現量が高値を示すことが示唆された。また解糖系シグナルの発現量に対しては実施順序による影響はなく、どちらの運動を先に行っても解糖系に関わるタンパク質および遺伝子の発現量には影響を与えないことが示唆された。これらの結果を踏まえ、レジスタンス運動と高強度インターバル運動を組み合わせたコンカレントトレーニングを行う場合、両運動の効果を得るためには高強度インターバル運動を先に行うことが効果的であることが明らかとなった。

研究課題 3 では、持久性運動と高強度インターバル運動を組み合わせたコンカレントトレーニングを行った結果、持久性能力のパフォーマンステストである漸増負荷試験の最大走行距離、最大走速度、オールアウトまでの時間は、持久性運動を先に行うことで高値を示すことが明らかとなった。また、酸化系代謝に関わる分子シグナルは、実施順序に関係なく高値を示すことが明らかとなった。一方で、解糖系代謝に関わる分子シグナルの発現量は、持久性運動を先に行うことで高値を示すことが明らかとなった。これらの結果を踏まえ、持久性運動と高強度インターバル運動を組み合わせたコンカレントトレーニングを行う場合、両運動の効果を得るためには持久性運動を先に行うことが効果的であることが明らかとなった。

本研究では、本研究では課題ごとに、選択した運動様式の代謝特性に応じた分子シグナルの発現検討を行なった。それぞれの研究課題で 2 種類の運動様式の実施順序により異なる反応性を示す分子が見つかり、トレーニング効果を出すのに有効な順序を提案することができた。本博士論文では、3 種類の運動様式の中から 2 種類を選択した CT について、両運動効果を得やすい実施順序の検討を行った。時間的制約の多いアスリートは競技練習に集中して取り組むために、いかに効率良く効果的に身体パフォーマンスを高めることができるかが重要となってくるため、筋力、持久性能力、解糖系能力を必要とするアスリートが自身のパフォーマンスを向上させるためのトレーニング順序を考える上で有意義なエビデンスとなった。本研究結果は、運動様式による分子の反応性がトレーニング適応に密接にリンクしていることを示唆するものであるため、本研究結果をもとに、各アスリートが競技特性や身体能力レベルに応じたより具体的なトレーニング戦略を練ることで、効率的かつ効果的なトレーニング処方を考案できると考えている。