

〈原 著〉

最大無酸素パワーテスト後の血中乳酸濃度と発揮パワー、
スプリントパフォーマンスの関係
—高校生陸上短距離・跳躍選手での検討

**Relationship between power and sprint performance
and blood lactate level after the maximal anaerobic test
in high-school sprinters and jumpers**

手島 貴範¹, 星川 佳広^{1,2}, 夏井 裕明², 佐藤 耕平³, 定本 朋子²
TAKANORI TESHIMA¹, YOSHIHIRO HOSHIKAWA^{1,2}, HIROAKI NATSUI², KOHEI SATO³, TOMOKO SADAMOTO²

Abstract

Although the blood lactate level (BLa) during or after sprinting for medium to long distances (ex. 400-m or 800-m) has been recently examined in detail, few studies have reported the BLa after maximal exercise for a shorter duration to clarify the association of anaerobic glycolytic capability with sprinting for shorter distances (ex. 100-m). In this study, the peak BLa in both sexes after the maximal anaerobic power test were investigated in 55 high-school sprinters and high and long jumpers. The maximal anaerobic power (MP) was calculated from peak power values generated during maximal pedaling for 10 seconds with three different loads on a cycle ergometer. In addition, the 30-m sprint time was measured using infrared sensors. No significant difference between the sprinters and jumpers was found in MP in terms of the relative values to body mass (BM) or fat-free mass (FFM). The peak BLa after the power test was 11 to 12 mmol/L except in female high jumpers, and no difference was found among the athletic event groups. FFM was highly correlated ($r = 0.85$) with the MP and an equation of $MP = 16.833 \times FFM - 48.252$ was derived. The MP corrected by BM and FFM was significantly correlated with the peak BLa. In males, the differences between MP measured by the power test and that calculated using the equation exhibited moderate but significant positive and negative correlations with the peak BLa and 30-m sprint time, respectively. This suggests that maximal power that high-school sprinters and jumpers can generate within 10 seconds depends on the FFM and

¹Research Institute of Physical Fitness, Japan Women's College of Physical Education, 8-19-1 Kitakarasuyama, Setagaya-ku Tokyo 157-8565, Japan.

²Faculty of Sports and Health Sciences, Japan Women's College of Physical Education, 8-19-1 Kitakarasuyama, Setagaya-ku Tokyo 157-8565, Japan.

³Faculty of Education, Tokyo Gakugei University, Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501 Japan.

anaerobic glycolysis, and this may positively affect short-distance sprinting in males.

Key words: Anaerobic power, Short sprinting, Fat-free mass, Sex-difference

緒言

スポーツ生理学分野において血中乳酸濃度は、乳酸性閾値や OBLA (Onset of Blood Lactate Accumulation) など、有酸素性持久力の評価やパフォーマンスを予測する指標として広く利用されている。有酸素性トレーニングによる筋の脂質利用率の増加は、同一強度の運動に対する筋の乳酸産生量の低下（その結果、血中乳酸濃度の低下）をもたらし、持久的運動をより高い強度で実施することを可能とする。有酸素性指標としての血中乳酸応答やそのトレーニングによる変化については生理学的な検証が十分になされ、体力指標としての血中乳酸濃度の有用性を担保している（八田 2007, 2008）。

また、無酸素性、有酸素性のエネルギー供給機能がともに高度に働く競技、例えば 400m や 800m 走選手の体力評価としては、*Rusko et al.* (1993) により MART (Maximal Anaerobic Running Test) と呼ばれる初期走速度 250m/分から始まる血中乳酸濃度測定を伴う多段階負荷テストが開発されている。400~800m 走は数十秒から 2 分程度の運動であり、エネルギー供給に解糖系が最大限に働くため、競技後には血中乳酸濃度は 15mmol/L を超える値が観察される（森丘 2008, 持田 2009, 桜井 2008, *Tesch et al.* 1978）。そして、400m や 800m 走選手においては、最大下運動における血中乳酸濃度の低さよりも、最大運動時もしくは最大運動後の血中乳酸濃度の高さがパフォーマンス予測に利用される。最高血中乳酸濃度の高さが 400m や 800m 走パフォーマンスと有意に関連することがいくつか報告されており（森丘 2008, 桜井 2008, *Tesch et al.* 1978）、血中乳酸濃度の高さには、エネルギー源として糖利用率の高さ、す

なわち解糖系代謝能の向上による乳酸産生量の増加が反映すると考えられている。

その一方、競技時間が 10 秒程度の短距離走選手あるいは数秒の瞬発系スポーツ選手においては、パフォーマンス予測や体力指標として血中乳酸濃度が活用できるか否かはほとんど研究されていない。その理由としては、10 秒未満の短時間競技におけるエネルギー供給は、主に ATP-CP 系に依存し解糖系が寄与する程度が限定的と認識されていることが考えられる。しかし、近年の研究は、100m 走においてもエネルギー供給に対する解糖系の貢献度は約 50% あり（*Greenhaff and Timmons* 1998, 八田 2007, 2008）、従来考えられていた程度より高いことが明らかになっている。実際、*Korhonen et al.* (2005) は、30 代のマスターアスリートにおいて 100m 走後の最高血中乳酸濃度が 12-15mmol/L 程度であり、同一選手が 200m 走や 400m 走後に示す最高血中乳酸濃度よりはやや低いものの、高いレベルにあることを報告している。さらに、*Korhonen et al.* (2005) は、100m 走後の最高血中乳酸濃度についても、パフォーマンスの高さと関係性があることを示唆しており、これは上述通り解糖系能力が高いことが反映していると考えられる。したがって、100m 走に代表される競技時間が短い競技者においても、全力運動後の血中乳酸濃度は体力指標として有用である可能性がある。

ところで、星川と村松 (2010) は様々な競技スポーツ選手 854 名を対象として、30 秒間の Wingate テスト後の最高血中乳酸濃度を報告している。その中では男女ともに短距離走選手が全競技中最も高く平均で 13-14mmol/L を示し、続いて跳躍、投擲選手の順で、サッカー、バスケットボールなどの球技選手が中くらいに、長距離選手が 9-10mmol/L 程度で最も低い値で

あったことが報告されている。さらに星川 (2013) は、Wingate テストの平均パワーと除脂肪量が相関係数 0.8 以上の高い関係性を示すことを明らかにした上で、実際に発揮されたパワーがその選手の除脂肪量から予測される以上である選手や競技ほど最高血中乳酸濃度が高く、逆に除脂肪量から予測される以下のパワー発揮の選手や競技では最高血中乳酸濃度が低いことを示している。さらには、短距離走、跳躍選手が除脂肪量から予測される以上の発揮パワーを示す傾向を報告している。星川 (2013) は、この結果が短距離走、跳躍選手における速筋型の筋線維組成を反映する可能性や、全力運動に対する筋の動員率といった神経性要因を反映する可能性を考察している。

上述の先行研究は、無酸素性の全力運動のテストにおいてパワー発揮とともに除脂肪量、最高血中乳酸濃度を調べることで、その選手の筋線維組成やパワー発揮に対する筋の動員率の指標を得ることができる可能性を示唆する。一般に時間が 30 秒程度の Wingate テストは ATP-CP 系、解糖系能力をあわせ、スポーツ選手の無酸素性能力を総合的に反映するテストとして認識され、陸上選手のみならず競泳、球技種目、コンバットスポーツなど多くのスポーツ選手の無酸素性能力を評価する際に広く利用されている。その一方で 10 秒×3 セットで構成される最大無酸素パワーテストは、ATP-CP 系能力の高さを評価する目的で考案され (中村ら 1984, 宮下 1986)、3 段階の負荷に対する各 10 秒間のペダリングより、最大パワーが発揮されうる至適負荷を求めたうえで発揮パワーを計算することを特長とする。自転車ペダリング時の発揮パワーは、ペダリングの負荷と回転数の積で決定するが、Wingate テストが 1 つの負荷 (体重の 7.5%) のみに対するペダリングより発揮パワーを計算するのに対して、3 段階の負荷でペダリングを行う最大無酸素パワーテストの方がより妥当に選手のパワー発揮の能力を評価していると考えられる。したがって、100m 走など

の陸上短距離走や跳躍選手など競技時間が 10 秒もしくはそれ未満の競技者の無酸素性能力を評価する際は、Wingate テストよりも最大無酸素パワーテストを利用の方が適切と考えられる。

上述したように 10 秒程度の最大運動においても、解糖系はエネルギー供給への貢献が大きいため、短距離走選手のパフォーマンスに影響している。また 100m 走のベストタイムと除脂肪量は、短距離走選手という均一な集団内においても負の相関が見られる (安部 2009)。さらには、最大無酸素パワーテストの 3 段階の負荷に対するそれぞれのピークパワーと除脂肪量の間には相関係数 0.71~0.84 の強い相関関係があることが報告されている (田中と角田 2011)。したがって、星川と村松 (2010) が報告した Wingate テストの結果のみならず、最大無酸素パワーテストにおいても発揮パワーに加えて除脂肪量と最高血中乳酸濃度を調べることで、競技時間の短い短距離走選手あるいは瞬発系競技のスポーツ選手の競技力向上に資する知見を見出すことができる可能性が考えられる。特に本研究では思春期後期にある高校生の競技者を対象とするが、思春期は体重や身体組成が大きく変化する時期であるとともに、成人競技者と比較してトレーナビリティが高い時期でもある。最大無酸素パワーテストにおいて、発揮パワー、除脂肪量および最高血中乳酸濃度の関係性がわかることは、思春期後期から成人に至る数年間においてどのようなトレーニングをすべきかについて有用な情報を提供すると考えられる。

そこで本研究では、血中乳酸濃度の体力指標としての有用性を見出すことを念頭に、高校生の陸上短距離走および跳躍選手を対象にして最大無酸素パワーテストでの発揮パワーと最高血中乳酸濃度およびそれらの関連性を調べることを目的とした。さらには、その関連性がスプリントパフォーマンス (30m 走タイム) に対して影響するかをあわせて分析した。

方法

1) 被験者

被験者は、短距離走と跳躍を専門とする高校生男女陸上競技選手55名(男子:32名, 女子:23名)であった。専門種目が、走高跳、棒高跳の選手をHJ (High Jumper) 群、走幅跳、3段跳の選手をLJ (Long Jumper) 群、100m走、200m走、ハードル走(女子100m, 男子110m)の選手をSP (Sprinter) 群とした。選手はこれら以外にも400m走や400mハードル走、リレー種目、7種競技など複数の種目に競技参加していたが、本人が第一に挙げた種目によって分類した。本研究に参加した選手は、東京都競技力向上テクニカルサポートの対象選手であり、コンディショニングサポート事業における体力測定に参加し、すべてのデータがそろった選手を対象とした。また、被験者には2年間に渡って体力測定に参加した選手が含まれたが、その場合、測定値を平均しその被験者の値として利用した。被験者とその保護者には、事前に測定主旨および内容の説明を行い、任意参加の同意を書面により得た後に、被験者は測定に参加した。

2) 形態

被験者の身長は、身長計を用いて、体重は体重計を用いて計測した。体脂肪量は、キャリパー法により上腕背部および肩甲骨下部の皮下脂肪厚を計測し、長嶺(1972)の15-18歳の男女別の身体密度推定式に当てはめた後、Brozekの式により体脂肪率を算出することで求めた。除脂肪量は、体重から体脂肪量を引くことで求めた。被験者の形態計測の結果他をTable 1にまとめた。

3) 最大無酸素パワー

最大無酸素パワーの測定は、電磁式自転車エルゴメータ (Power Max V III, コナミ社製) に

内蔵される「無酸素パワーテスト」を用いて実施した。このテストは、最大努力による10秒間の自転車駆動を2分間の休息を挟んで3セット繰り返すというものである(中村ら1984)。

1セット目の負荷は、各被験者の体重によって決定され、その後の2セット目および3セット目においては各被験者の発揮した前セットにおけるペダル回転数によって自動的に決定されるというものであった。測定開始に先立ち、エルゴメータのサドル位置を各被験者の最適な位置に設定した後に被験者を着座させ、足部を付属のトゥークリップとベルトで固定した。その後、被験者は椅坐位姿勢での全力ペダリング運動を実施した。本研究では、3セットの全力ペダリングにより得られた負荷と最大回転数との回帰直線から推定されるパワーの最高値を、最大無酸素パワー(W)としその後の分析に利用した。各群の最大無酸素パワーの平均および標準偏差をTable 1にまとめた。

4) 血中乳酸濃度

血中乳酸濃度の測定は、Lactate Proセンサー(アークレイ社製)を用いて、最大無酸素パワーテストの測定終了後、1, 3, 5, 6分のいずれか2時点において被験者の指先より血液を採取し行なった。この際、採血は実験に同席した医師により安全、衛生面に十分に配慮したうえで行われた。短時間の最大運動後の血中乳酸濃度は、運動終了直後よりも運動後3-5分で最大になることが知られている(八田2007)。また本研究において、3分後と5分後の2点で測定した被験者15名の結果では、血中乳酸濃度はそれぞれ $10.3 \pm 2.3\text{mmol/L}$ 、 $10.3 \pm 2.1\text{mmol/L}$ でありほぼ同じであった。そこで本研究では被験者全員のデータがそろった5もしくは6分後の値を最高血中乳酸濃度(Lapeak)として扱い、以後の分析に用いた。

5) スプリントパフォーマンス

最大無酸素パワーテスト終了後1時間以上の

Table 1 Characteristics of high-school jumpers and sprinters

		Number	Age(yrs)	Height(cm)	Body Mass(kg)	FFM(kg)	Maximal Power(W)	30m Time(s)
Female	HJ	6	15.8±0.7	166.2±4.9	54.2±4.6	44.3±4.7	656±84	4.60±0.15
	LJ	3	16.7±0.2	160.6±1.7	51.4±2.1	41.5±1.5	615±14	4.61±0.17
	SP	14	16.2±0.8	160.8±2.9	52.4±4.2	42.2±2.6	664±81	4.38±0.10*
	Average		16.2±0.8	162.2±4.2	52.7±4.2	42.6±3.3	656±78	4.47±0.17
Male	HJ	5	16.2±0.7	175.5±4.0	64.2±1.8	57.3±1.3	862±63	4.26±0.10
	LJ	8	16.6±0.4	172.4±6.9	63.2±2.4	56.6±2.3	895±59	4.05±0.17*
	SP	19	16.2±0.6	175.1±6.7	65.3±5.1	58.2±4.7	973±112	4.00±0.07*
	Average		16.3±0.6	174.5±6.5	64.6±4.3	57.6±3.9	936±105	4.05±0.14

* p < 0.05

FFM fat-free mass; HJ high jumper group; LJ long jumper group; SP sprinter group

休息をとった後、被験者は陸上競技専用トラックにてスプリントパフォーマンスとして30m走タイムの測定を行った。30m走はアップシューズにより行われた。30m走のスタートはスタンディングスタートとし、スタート時の後ろ足の離地をマットスイッチにより検知しスタート時間とした。30m走タイムはスタート時間から30m走地点に設置した光センサー（ヤガミ製）を切断するまでの時間とした。各被験者は2-3回の試行を行い、最も速い30m走タイムを分析に用いた。各群の30m走タイムの平均および標準偏差をTable 1にまとめた。

6) 分析

各測定値は平均±標準偏差で示した。最大無酸素パワーは、絶対値とともに体重で除した体重比、除脂肪量で除した除脂肪量比を計算した。また、発揮パワーの絶対値や体重比、血中乳酸濃度などにおいて競技種目特性がある可能性があるため、まずはHJ, LJ, SP群の比較を行った。ただし、群間に被験者数に偏りがあるため男女別にノンパラメトリックの手法であるKruskal-Wallis法を利用した。Kruskal-Wallis検定にて競技種目間に主効果が見られた場合、事後検定としてノンパラメトリック多重比較検定Steel-Dwass法を用いて各群ごとの比較を行った。Steel-Dwass法においてはエクセル統計（柳井 2011）のソフトウェアを使用した。また、各測定項目間の関係性はピアソンの相関

係数により評価した。

また、星川と村松（2012）、星川（2013）を参考に除脂肪量と最大無酸素パワーの関係性を検討したところ、本研究においても両者に強い相関性を認めた（詳細は結果内に記述）。そこで、最大無酸素パワーを従属変数、除脂肪量を独立変数として、除脂肪量から予測される最大無酸素パワーの一次回帰式を求めた。次に、最大無酸素パワーの実測値と各被験者の除脂肪量とこの一次回帰式より予測される最大無酸素パワーの予測値との差分（difference）を求め、30m走タイム、最高血中乳酸濃度との相関分析を行った。この差分がプラスの場合はその被験者の除脂肪量からみて発揮可能な最大無酸素パワーが平均より大きいことを意味する。また、30m走タイムが男女ともにSP群において有意に優れていたため、この相関分析は全被験者を対象とした場合に加え、SP群のみを対象とした場合も行った。各検定においては危険率5%未満を有意水準とした。

結果

1) 最大無酸素パワー

最大無酸素パワーの絶対値をTable 1に示した。男女ともに有意な群間差はみられなかった。最大無酸素パワーの体重および除脂肪量で除した値（体重比、除脂肪量比）をFig. 1に示した。体重比、除脂肪量比ともに、男女いずれ

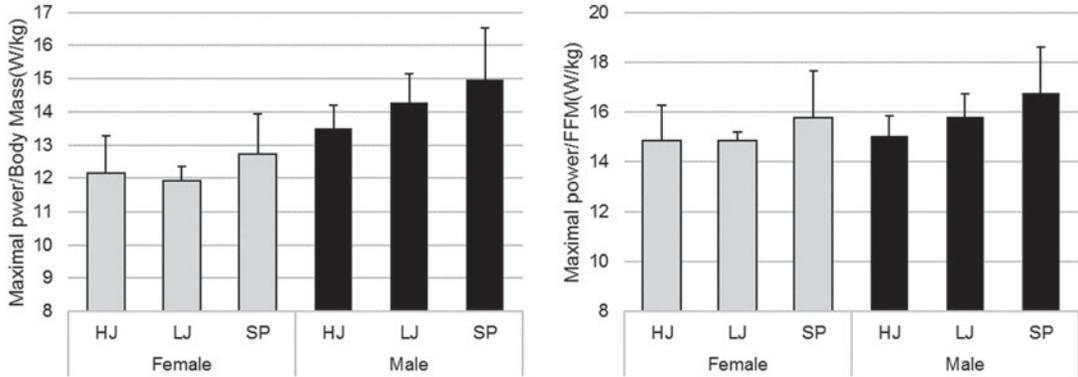


Fig. 1 Relative values of maximal power to body mass (left) and fat-free mass (right)

も SP が高い傾向にあったが群間に有意差はなかった。また、男女比 (女子/男子 $\times 100$) は、絶対値が 70.1% であったのに対して、体重比、除脂肪量比は、85.6%, 94.4% であった。

2) 最高血中乳酸濃度

最高血中乳酸濃度を Fig. 2 に示した。男女ともに群間に有意差はみられなかった。女子では HJ が顕著に低い傾向にあったが、被験者数が少なく統計的有意差には至らなかった。

最大無酸素パワーの絶対値、体重比、除脂肪量比と最高血中乳酸濃度の相関関係は、被験者全体で見た場合それぞれ相関係数 $r = 0.36$, 0.50 , 0.43 であった。絶対値とは有意な相関がみられなかったが、体重比、除脂肪量比については有意な相関関係を認めた。男女に分けて分

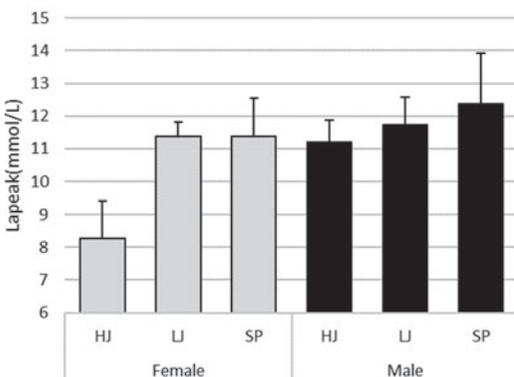


Fig. 2 Lapeak after maximal anaerobic power test

析した場合、女子ではいずれにも有意な相関関係はみられなかったが、男子では血中乳酸濃度と体重比、除脂肪量比とに相関係数 $r = 0.50$, 0.54 の有意な相関関係が見られた。

3) 除脂肪量と最大無酸素パワーの関係性

HJ, LJ, SP 全被験者による除脂肪量と最大無酸素パワーの相関関係は、男女それぞれで有意な相関関係 ($r = 0.46$, 0.41) にあった。男女まとめた場合は相関係数 $r = 0.85$ ($p < 0.05$) の非常に高い相関関係を認め、その一次回帰式は、最大無酸素パワー = $16.833 \times$ 除脂肪量 - 48.252 であった (Fig. 3)。また SP 群のみを対象とした場合も、両者には $r = 0.85$ ($p < 0.05$) の高い相関関係があり、一次回帰式は、最大無

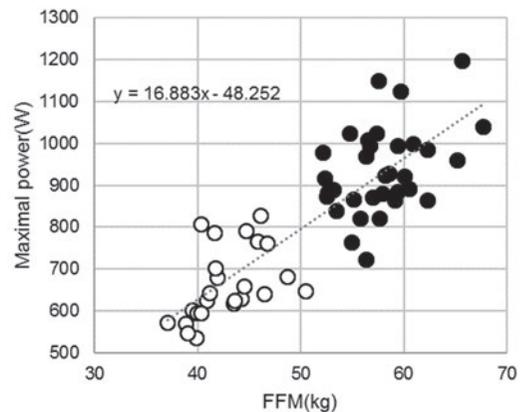


Fig. 3 Relation between FFM and maximal power (○Female ●Male)

酸素パワー = $17.381 \times \text{除脂肪量} 51.519$ であった。

4) 最大無酸素パワー実測値と予測値の差分と最高血中乳酸濃度, 30m 走タイムの関係

全被験者を対象とした場合：女子では、差分と最高血中乳酸濃度, 30m 走タイムの相関関係はそれぞれ $r = 0.26$, -0.23 であり有意性がみられなかった。その一方で男子では、それぞれ $r = 0.54$ ($p < 0.01$), -0.43 ($p < 0.05$) であり、有意な相関関係にあった。Fig. 4は女子(上段), 男子(下段)における両関係性を図示したものである。

SP 群を対象とした場合：女子では、差分と最高血中乳酸濃度, 30m 走タイムに有意な相関関係

は認められなかった。また男子においても、差分と 30m 走タイムの関係性は $r = -0.31$ であり有意性が見られなかった。しかし、差分と最高血中乳酸濃度においては相関係数 $r = 0.60$ ($p < 0.01$) の有意な関係性がみられた。Fig. 5は女子(上段), 男子(下段)における両関係性を図示したものである。

考察

本研究では高校生の短距離走, 跳躍選手を対象に, 10 秒 \times 3 セットの最大無酸素パワーテストにおける発揮パワーとテスト後の最高血中乳酸濃度を評価した。本研究における最大無酸素パワーは, 女子でおよそ体重比 12-13W/kg, 男

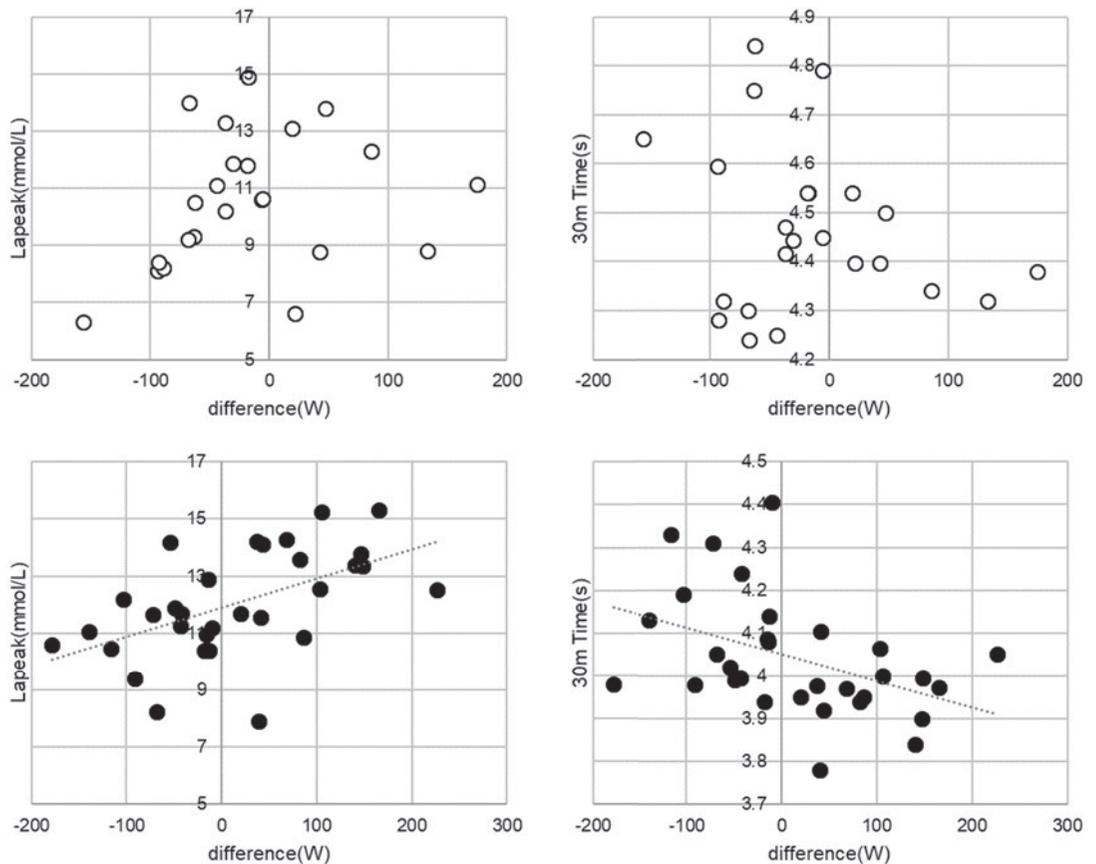


Fig. 4 Relation between the difference of maximal power and Lapeak (left) and 30-m time (right) in female (upper panel) and male (lower panel) in all group athletes.

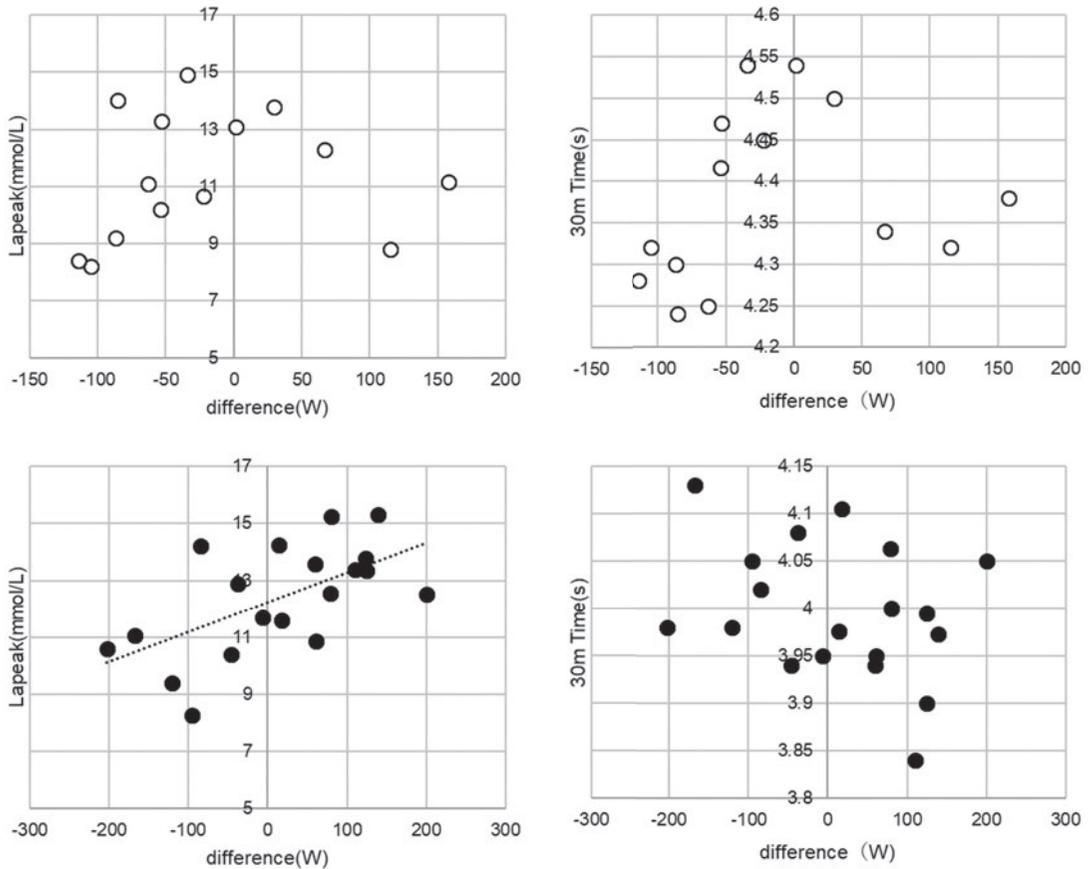


Fig. 5 Relation between the difference of maximal power and Lapeak (left) and 30-m time (right) in female (upper panel) and male (lower panel) SP groups.

子で体重比 13-15W/kg であった。最大無酸素パワーテストの評価基準 (宮下 1986) を参照すると、本研究の女子の平均体重 52.7kg, 平均パワー656W は「優れている (7段階評価中上から3段階目)」、男子の平均体重 64.6kg, 平均パワー936W は「普通 (7段階評価中4段階目)」であった。一方、この水準の発揮パワーに対して、テスト後の最高血中乳酸濃度は女子HJ以外は 11-12mmol/L であり、Wingate テスト後の 13-14mmol/L (星川 2013) とほぼ同程度か、わずかに低い程度であった。最大無酸素パワーの絶対値と最高血中乳酸濃度には相関がみられなかったが、最大無酸素パワーの体重比、除脂肪量比と最高血中乳酸濃度は中程度 ($r = 0.5$ 程度) に相関した。このことは競技時間が

10秒もしくはそれ未満の競技者の評価により適していると考えられる最大無酸素パワーテストにおいても、体重、除脂肪量あたりにパワー発揮の大きな選手ほど、最高血中乳酸濃度が高いことを示している。

乳酸は糖分解の代謝産物であり、血中乳酸濃度は解糖系が作用した程度と解釈できる (八田 2008)。Margaria *et al.* (1964) の初期の研究では、数秒から数十秒で疲労困憊にいたる激運動時には、より早くエネルギー供給が可能な Alactacid 過程 (ATP-CP 系) が先に働き、続いて lactacid 過程 (解糖系) によりエネルギー供給がなされるが、両供給系が最大限に働いた場合には無酸素性のエネルギー供給は約 40 秒で枯渇すると計算されている。これに基づき、従

来は数十秒程度の競技種目において解糖系が主たるエネルギー供給系になり、競技力向上にその強化が主張されてきた。実際に陸上競技の400m～1500m選手では、最高血中乳酸濃度が高い選手でパフォーマンスが高いこと（持田2009, 森丘2008, *Tesch, et al.* 1978）、2年間のトレーニングによる800m走の走タイム短縮と最高血中乳酸濃度の増加が相関することが報告されている（桜井2008）。しかし全力運動においては、糖分解は運動開始後1秒ですぐに亢進（八田2008）し、時間が10秒程度の100m走においてもエネルギー供給におけるATP-CP系と解糖系の配分はほぼ同じ程度である（*Greenhaff and Timmons* 1998）。したがって、400m～1500m走より競技時間が短い競技種目にあっても最高血中乳酸濃度と、発揮パワーやパフォーマンスとの関係性が予測されるが、最大無酸素パワーテストあるいは10秒程度の全力運動後の最高血中乳酸濃度はほぼ報告されていない。

最大無酸素パワーテストにおける最大無酸素パワーと除脂肪量は、男女まとめた場合、係数0.85の高い相関関係にあった（Fig. 3）。この相関係数はスプリントパフォーマンスに優れるSP群に限定した場合もまったく同じであった。田中と角田（2011）は、様々なスポーツを専門とする体育系大学生男女239名を対象に、最大無酸素パワーテストの3段階の負荷それぞれにおけるピークパワーと除脂肪量とは0.71～0.84の高い相関関係があることを報告しているが、本研究では、短距離走選手という極めて均一な集団においても除脂肪量が短時間の最大発揮パワーに強く関係することが明らかになった。本研究での最大無酸素パワーの除脂肪量比は、男女比（女子/男子×100）が94%とほぼ男女差が消失し、そのことを確認したうえで全被験者対象で最大無酸素パワー＝16.833×除脂肪量-48.252、短距離走選手のみを対象で最大無酸素パワー＝17.381×除脂肪量-51.519のほぼ同様の一次回帰式が得られた。この結果は男女

にかかわらず、除脂肪量1kgあたりの増加がおよそ17Wの最大無酸素パワーの増加を意味しており、選手の発揮パワー予測やトレーニング効果確認において、目安としての利用価値があると考えられる。

本研究では、Wingateテストを用いた星川と村松（2012）、星川（2013）を参考に上記の一次回帰式から予測される最大無酸素パワーの予測値と、最大無酸素パワーの実測値の差分（difference）を求め、その値と最高血中乳酸濃度、30m走タイムとの相関関係を分析した。一般に、筋断面積と筋力の高い関係性において、単位断面積あたりの筋力は男女ともに平均的には6kg重/cm²であるが大きな個人差が存在し、それには筋線維組成の違いや力発揮における神経性要因の差異が影響することが知られている（福永2002）。本研究の除脂肪量に対する最大無酸素パワーにおいても、単位断面積あたりの筋力の個人差と同様の解釈が成り立つと考えられる。すなわち、除脂肪量あたりにより強いパワー発揮ができる選手における速筋比率の高さや全力のパワー発揮時の神経性要因の高さを反映する可能性が考えられる。速筋線維はグリコーゲン貯蔵量が多く、解糖系酵素活性が高いなどの特性により糖分解に優れ、乳酸の多くは速筋で生成され、遅筋線維で代謝されるため（八田2008）、速筋比率の高い選手は血中乳酸濃度が高くなると考えられる（*Tesch, et al.* 1978）。そこで、本研究では、短距離走選手や跳躍選手の評価により適した最大無酸素パワーテストを用い、上述の除脂肪量と最大無酸素パワーの一次回帰式を利用し、除脂肪量から予測される値よりも実測の発揮パワーが大きい選手は、高い最高血中乳酸濃度を示すかどうか、さらには実際のパフォーマンス（30m走）が優れるかどうかを検討した。

その結果、差分と最高血中乳酸濃度には、男子においてのみ被験者全体で見た場合（Fig. 4）および短距離走選手に限った場合（Fig. 5）いずれにおいても中程度（ $r = 0.5 \sim 0.6$ ）に有意

に相関するというものであった。この結果は、除脂肪量に対して最大無酸素パワーが高い選手ほど解糖系をより強く働かせた証左であり、その選手の速筋比率の高さや神経性要因の高さを反映したものと推測される。さらには、被験者全体で見ただけの場合には差分と30m走タイムにも中程度の有意な負の相関 ($r = -0.43$, Fig. 4) がみられ、除脂肪量に対する最大無酸素パワーの高さがスプリントパフォーマンスの一要因になりうることを示す結果であった。安部 (2008) は短距離走選手という均一な集団内においても、除脂肪量と100m走タイムに負の相関があることを報告し、除脂肪量そのものが短距離走選手のパフォーマンスを予測する因子であることを示している。本研究結果は、除脂肪量に加えて最大無酸素パワー、血中乳酸濃度を測定することで、競技時間が10秒程度の短距離走選手においてより精度高くパフォーマンスを予測できる可能性を示唆するものである。加えて、測定を受ける選手の競技力向上や最大無酸素パワーの向上において除脂肪量不足 (筋量不足) が課題なのか、体力資源の活用 (神経性要因) が課題なのかの情報を提供できる可能性、さらには速筋比率から競技距離の適性に関する情報をも提供できる可能性も示唆する。これらの情報は、発育発達途上にある高校生選手にとり、より高い競技力獲得のために有用と考えられる。

一方、女子においては、差分と最高血中乳酸濃度、30m走タイムに、男子のような相関性を確認できなかった。その理由は不明であるが、本研究における女子では最大無酸素パワーの体重比、除脂肪量比と最高血中乳酸濃度自体に有意な相関性がみられなかったことから、最大無酸素パワー発揮における解糖系の貢献度あるいはエネルギー供給の比率において男子とは異なる生理的背景の存在も予想される。また、最大無酸素パワーテストにおける最大無酸素パワーの算出が、低、中、高の3段階の負荷に対するペダル回転数から回帰するものであり、女子では3段階目の高負荷に対して回転数を十分にあげ

られない (パワー発揮が十分にできない) ことが最大無酸素パワー算出の誤差要因になりうる可能性も考えられる。この場合にはテスト後の最高血中乳酸濃度も低くなることが予想され、特に、HJ群の女子では最大無酸素パワーに対して顕著に低い最高血中乳酸濃度を示しており (Fig.2)、走高跳選手では高負荷に不慣れなために、その選手の能力が適切に反映しなかった可能性もある。

日本を代表するスポーツ選手のデータに基づく国立スポーツ科学センターの評価基準表 (国立スポーツ科学センターWEBサイト) では、最大無酸素パワーテストにおけるシニア選手の評価5 (最も優れる群) の基準値は男子20.6W/kg、女子17.0W/kg以上であり、本研究の被験者は当該値を男女ともに5W/kg以上下回る。本研究の被験者は将来の活躍を嘱望されるハイレベルな高校生であるものの、短距離走選手、跳躍選手としてより高い競技力に到達するには一段高い無酸素性パワーの獲得が不可欠であることは明白である。本研究がより発展し、最大無酸素パワーテストと除脂肪量、血中乳酸濃度の関係性がより明確になれば、ジュニアからシニアなど中長期のトレーニングの方向性を考える際に、特に男子では得られる示唆が大きいと予想される。本研究結果を踏まえ、今後さらに最大無酸素パワーテスト後の血中乳酸濃度の体力指標としての意味づけを明確にするには、成長やトレーニングによる除脂肪量の増大や発揮パワーの増加など、縦断的な変化に対して最高血中乳酸濃度がどのように応答するかを検討が必要である。

まとめ

本研究では高校生の短距離走、走高跳、走幅跳選手を対象に、除脂肪量と最大無酸素パワーテストにおける発揮パワーおよびテスト後の最高血中乳酸濃度を評価した。その結果、以下のような結果が得られるとともに、短時間の高強

度運動のパフォーマンス指標として、血中乳酸濃度の有用性を示唆するものであった。

1. 最大無酸素パワーの体重比、除脂肪量比ともに競技種目差がみられなかった。また、体重比、除脂肪量比それぞれと最高血中乳酸濃度は中程度に相関 ($r = 0.5$ 程度) し、体重、除脂肪量あたりの最大無酸素パワーの大きな選手ほど、最高血中乳酸濃度が高いことが示された。
2. 最大無酸素パワーと除脂肪量は高く相関 ($r = 0.85$) し、最大無酸素パワー = $16.833 \times$ 除脂肪量 $- 48.252$ の回帰式が得られた。
3. 男子においては、最大無酸素パワーの実測値と回帰式からの予測値の差分が、最高血中乳酸濃度と中程度に相関 ($r = 0.5 \sim 0.6$) した。この差分はその選手の速筋比率の高さや神経性要因の高さを反映する可能性が考えられた。
4. 男子においては、差分と 30m 走タイムが中程度に負に相関 ($r = -0.43$) し、除脂肪量に対する最大無酸素パワーの高さが、短時間のスプリントにおけるパフォーマンスの一要因になりうることを示された。

謝辞

本研究成果は、公益財団法人東京都スポーツ文化事業団による平成 21 年度からのスポーツ医・科学サポート事業（平成 26 年度よりテクニカルサポート事業（大学連携事業）に名称変更）に日本女子体育大学が連携し得られたものである。

参考文献

安部孝：身体組成と筋形態・形状から見たスプリンターの特性。スプリントトレーニング-速く走る・泳ぐ・滑るを科学する。日本トレーニング

- 科学会編，朝倉書店，東京，42-48，2009。
 福永哲夫：身体運動における筋の機能を決定する構造的因子。筋の科学事典—構造・機能・運動—，福永哲夫編，朝倉書店，東京，pp.78-114，2002。
 Greenhaff, P. L. and Timmons, J. A.: Interaction between aerobic and anaerobic metabolism during intense muscle contraction. *Exerc. Sports Sci Rev.* **26**: 1-30, 1998。
 八田秀雄：乳酸—「運動」「疲労」「健康」との関係は？ 講談社サイエンティフィック，p66，2007。
 八田秀雄：乳酸をどう活かすか。杏林書院，東京，2008。
 Hill, D. W.: Energy system contributions in middle-distance running events. *J. Sports Sci.* **17**: 477-483, 1999。
 Hirvonen, J., Nummela, A., Rusko, H., Rehunen, S. and Härkönen, M.: Fatigue and changes of ATP, creatine phosphate, and lactate during the 400-m sprint. *Can. J. Sport Sci.* **17**: 141-144, 1992。
 星川佳広，村松正隆：スポーツ選手における除脂肪量とウィングートテストの発揮パワー，最高血中乳酸濃度の関係：性差を中心に。日本体育学会大会予稿集 **61**，p137，2010。
 星川佳広：スポーツ選手の体力の共通性と個人差：体力を「冗長性」で解釈する。体育の科学，**63**：472-477，2013。
 国立スポーツ科学センター：フィットネス・チェック マニュアル。最大無酸素パワー。 https://www.jpnsport.go.jp/jiss/Portals/0/column/fcmanual/11_sa_idaimusansopower.pdf
 Korhonen, M. T., Suminen, H. and Mero, A.: Age and sex differences in blood lactate response to sprint running in elite master athletes. *Can. J. Sports Sci.* **30**: 647-665, 2005。
 持田尚：エネルギー代謝からみたスプリントトレーニングの方法。スプリントトレーニング-速く走る・泳ぐ・滑るを科学する。日本トレーニング科学会編，朝倉書店，東京，67-76，2009。
 Margaria, R., Cerretelli, P. and Mangili, F.: Balance and kinetics of anaerobic energy release during strenuous exercise in man. *J. Appl. Physiol.* **19**: 623-628, 1964。
 森丘保典：血中乳酸濃度をどう活かすか～陸上競技 2～。乳酸をどう活かすか。八田秀雄編，杏林書院，東京，p79-92，2008。
 宮下充正：一般人・スポーツ選手のための体力診断

- システム. ソニー企業, 東京, 1986.
- 長嶺晋吉: 皮下脂肪厚からの肥満の判定. 日本医師会雑誌, **68**: 919-924, 1972.
- 中村好男, 武藤芳照, 宮下充正: 無酸素パワーの自転車エルゴメータによる測定法. *Jpn. J. Sports Sci.* **3**: 824-839, 1984.
- Rusko, H., Nummela, A. and Mero, A.:* A new method for the evaluation of anaerobic running power in athletes. *Eur. J. Appl. Physiol.* **66**: 97-101, 1993.
- 桜井智野風: 血中乳酸濃度をどう活かすか〜陸上競技1〜. 乳酸をどう活かすか. 八田秀雄編, 杏林書院, 東京, p66-77, 2008.
- 田中重陽, 角田直也: 男女スポーツ選手における下肢の筋形態が無酸素性パワーに及ぼす影響. 日本生理人類学会誌, **16**: 141-151, 2011.
- Tesch, P. E., Sjodin, B. and Karlsson, J.:* Relationship between lactate accumulation, LDH activity, LDH isozyme and fibre type distribution in human skeletal muscle. *Acta Physiol. Scand.* **103**: 40-46, 1978.
- 柳井久江: 4steps エクセル統計, 第3版, オーエムス出版, 埼玉, 2011.