九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

ヒトの作業能力の評価法に関する研究 : 自転車運動におけるパワーと運動継続時間直角双曲線関係から推定される一定値パラメータ(W´)の生理的規定要因

三浦, 朗

https://doi.org/10.11501/3168349

出版情報：九州芸術工科大学, 1999, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：

第１章

序論

１-１　ヒトの作業能力

陸上走競技選手は自分の記録を 1 秒でも速く，投擲競技者は 1cm でも遠くへ投げようと努力する．労働の現場においても，管理者あるいは労働者自身は，その作業の能率を高めようとする．「能力の向上」への欲求は人間生来の宿命のようですらある．同時に，スポーツ競技に関心を持つ科学者は，時とともに記録がなぜ更新され変化するのかという分析に関心を抱き，労働を科学しようとする研究者は，作業能率の研究に挑む．ところで，研究者や指導者達が運動能力あるいは作業能力の詳細な分析を始めるにあたって，まず一番に始めなければならないことは，まぎれもなく，再現性が高く精度の良い評価法を確立することである．それがなされて初めて，成績を構成する要素が作業能力に与える影響を量的に評価することができるわけである．

作業能力とは身体運動を遂行する能力と言いかえることができる．ここで言う身体運動とは，筋内における化学的反応過程を経て供給されるエネルギーを，筋収縮という機械的なエネルギーに変換し，神経系の調節によって，目的とする一連の動きを実現することである．そういった意味で，しばしば人体は内燃機関にたとえられる．化学的エネルギーを機械的エネルギーに変換するというわけであ

る．入力としての化学的エネルギーが化学動力機関を介することでその一部が機械的仕事として出力され，その利用される割合が作業効率と呼ばれる．したがって，ヒトの作業能力も，その「入力：生理的メカニズムを背景とするもの」，「出力：最終的なパフォーマンスに近いもの」の両面からとらえることができる．

1-2　有酸素性作業能力と無酸素性作業能力

潜水艦は，2 種類の動力を備えている．海上を航行するときは，酸素を用いてディーゼル・エンジンを動かす．酸素の得られない海中では，酸素無しで動力の得られるバッテリー・モーターに動力源を切り変えて航行する． バッテリーが消耗したら，ディーゼル・エンジンを動かしてバッテリーを充電する．潜水艦の巡航能力は，このふたつの動力源によって説明される．ヒトの筋を動かす仕組みも，潜水艦とよく似ている．筋は酸素を用いてエネルギーを産成する有酸素性機構と，酸素を用いないでエネルギーを産生する無酸素性機構を備えている．有酸素性機構は大きなパワーは出せないがエネルギー容量は大きく，軽い運動や労働を含めて我々の日常的な活動に要するエネルギーのほとんどを生み出している．一方，無酸素性機構は，大きなパワーは出せるが容量が小さく，運動初期の酸素不足の状態の時や，激しい運動時に中心的役割を果たす．そして，消耗した無酸素性機構のエネルギーは，運動終了後に有酸素性機構によって回復させられる．ヒトの作業能力を評価しようとする場合には，この両者のエネルギー供給機構を

反映するような指標をあわせ用いて定量化することが望ましい.

ヒトの筋収縮のための化学的エネルギー生成，すなわち，アデノシン３燐酸（ATP）再合成には，有酸素性機構と無酸素性機構があり，後者はさらに乳酸性・非乳酸性機構に分けられる（Fox 1979）．生体における O_2 利用の発見以来，ヒトの酸素摂取動態を観察することで，有酸素性エネルギー供給量を測定する試みが繰り返し行われてきた．たとえば，有酸素性作業能としての最大酸素摂取量（$\dot{V}O_2max$：Maximal oxygen uptake；Astrand and Rodahl 1970）といった最大値，また，それを考慮した相対値として%$\dot{V}O_2max$ や PWC170（Physical working capacity 170; Astrand and Rodahl 1970）などである．近年では個人的な生理的負担度を考慮した無酸素性作業閾値（AT：anaerobic threshold；Wasserman et al. 1973）や乳酸の蓄積に着目した乳酸性作業閾値（LAT：Lactic acidosis threshold；Davis and Brooks 1985 の総説を参照）が考案された．特に AT や LAT は，有酸素的代謝のみでエネルギー供給可能な上限の運動強度，もしくは酸素摂取量水準を意味する（Wasserman et al. 1973）とされており，1990 年代に入ってから今日まで，この生理的なメカニズムから提唱された指標に基づく運動強度の決め方が主流となってきている．このように，入力側から見た持久性の作業能力を表す指標は数多くあり，スポーツ現場，臨床場面への応用も広く行われている（Astrand and Rodahl 1970, Wasserman et al. 1987）

一方，生理的メカニズムの解析側から出てきた無酸素性作業能力の評価方法に

は，酸素負債（oxygen debt; Margaria et al. 1933）と最大酸素借（maximal oxygen deficit ; Medbo et al. 1988）というふたつの指標があげられる．無酸素性作業能力は，短時間の最大運動中に高エネルギー燐酸の加水分解（非乳酸性）と炭水化物の無酸素的異化作用（乳酸性）の両者を介して再合成された ATP の最大量として定義されている（Green and Dowson 1993, Vandewalle et al. 1987）． しかし，実際にその絶対量を測定することは困難である．そこで，観察しやすいヒトの酸素摂取量を観察することによって，作業中の無酸素性エネルギー供給量を概観しようというのが酸素負債と酸素借である．今世紀初頭に提案された酸素負債という指標は Margaria のグループによって精力的に検討されてきた．しかしながら，一定負荷運動時の初期に生ずる無酸素性エネルギー供給に関連すると考えられる酸素不足量と，運動後の酸素負債量が一致しないこと，また解糖によって生じた血中乳酸との因果関係も乏しいこともあって酸素負債という用語自体の使用についても論議の対象となり，無酸素性作業能力を説明するには無理があるという方向に論議が収束してきている（Gaesser and Brooks 1984, Green and Dowson 1993）．

一方の最大酸素借は，最大酸素摂取量よりも上の強度の運動（超最大運動）に必要とされる酸素需要量を推定して，実際の酸素摂取量との差を求めるものである．特に 2 分から 3 分で疲労困憊に至るような超最大運動において最大酸素借が得られることになり，Hermansen はそれを Anaerobic capacity と命名した（Hermansen and Medbo 1984）．この方法の問題点は超最大運動の酸素需要を最

大下の運動強度と酸素摂取量との関係から推定することである．このことは，運動強度が変化しても効率は変化しないという仮説に基づいており，反論も少なくない．しかし，この最大酸素借に変わりうる，入力側から見た信頼のおける無酸素性作業能力の評価法がないのが現状である．

これら作業能力の評価は，個人が有する全身的な能力を示す指標として，労働やスポーツといった場面でその有用性が広く認められている．ただし，これら入力側から見た身体的作業能力の指標を測定する場合，呼気ガス分析装置のような精巧な測定装置を必要とする．したがって，スポーツ選手とコーチあるいは，労働管理者や労働者自身が，簡便に自分たちだけで個々人の作業能力を測定することは容易ではない．また，現実には，厳密な意味で入力側の各エネルギー供給系の能力を直接的に測定することは不可能で，特に無酸素性作業能力の把握は困難を極める．前述の最大酸素借を求めるにしても，超最大運動の酸素需要量を求める必要があり，そのためには最大下の強度で酸素摂取量と強度の関係を個々人で求めなくてはならず非常に煩雑である．これは，たとえその詳細を知りたいスポーツ競技選手に用いるにしても限界があり，ただちに利用が広まるとは考えにくい．

そこで，主に目的とするエネルギー供給系によって発揮される出力側の外的仕事を測定することで，その能力を推定することを考える．その意味では，従来から広く行われている，走，跳，投，泳，漕艇，自転車競技といったオリンピック

競技やいわゆる体力テストも作業能力の評価法にあたり，主に出力としての仕事やパワーの構成要素である速度，力，距離，時間といったものを測定する．こういった出力側の測定値は，パフォーマンス（成績）と総称されている．パフォーマンス・テストの欠点は，その成績を得るために用いられる運動形態が，技術や用具，環境，戦術などによって影響され，その成績のみからでは，エネルギー供給能力を推定することが困難な場合が多く，基礎的な生理機構の把握には適当でないことである．ヒトの作業能力に関する運動生理学の研究において，古くから用いられてきている運動様式には自転車エルゴメータ運動やトレッドミル走およびステップテストがある．全身性の運動であり，技術，環境および戦術などによって影響を受けにくいという点で優れているからである．また，作業時の力学量（仕事，パワー）の算出が比較的容易であることも運動負荷を規定する上で重要な利点である（Astrand and Rodahl 1970）．

以下に自転車エルゴメータを用い，出力側の外的仕事を測定することで，ヒトの作業能力を推定するある興味深い試みについて述べることにする．初めに付け加えておくと，この推定法の特徴は，いくつかの検討の余地を残してはいるものの，持久性運動の能力の上限を示すパラメータ（有酸素的能力）と無酸素性エネルギー容量を反映すると予想されるパラメータ（無酸素性能力）のふたつを同時に得ることができ，かつ，精密機器を用いることなく，自転車エルゴメーターとストップウオッチによって，ヒトの作業能力を評価できるという点である．すな

わち，この測定法は，これまで述べてきた作業能力の評価法が抱える問題点，

1）無酸素性作業能力を表す簡便で妥当性のある指標がないこと.

2）精密な測定機器を必要とすること.

を一気に解決する可能性を秘めていることになる.

1-3　自転車エルゴメータによるパワーと運動継続時間直角双曲線関係の測定

ヒトの脚自転車エルゴメータ運動において，数十秒から十数分以内で疲労困憊にいたるような，いくつかの異なった強度での運動を行わせ，その発揮パワー（P: watts）と運動継続時間（t: sec）の関係（以下 P-t 関係）をみると，Fig. 1 に示したような，あるユニークな漸近レベルをもつ直角双曲線として記述できることが知られている（Hill 1993 の総説を参照）.

$$(P - \theta_F) \cdot t = W' \qquad \text{（式１）}$$

ここで W'は一定値で，この漸近レベルのθ_Fは「クリティカルパワー（Critical power）」あるいは「疲労性作業閾値（Fatigue threshold）」と呼ばれ，理論的にはある程度の長い時間に渡って運動が継続可能な上限の運動レベルを意味すると考えられる．すなわち，θ_Fは，疲労をともなうことなく，運動を継続できる上限の運動強度，いいかえれば持久性能力の上限を示していると予想され，またそれを

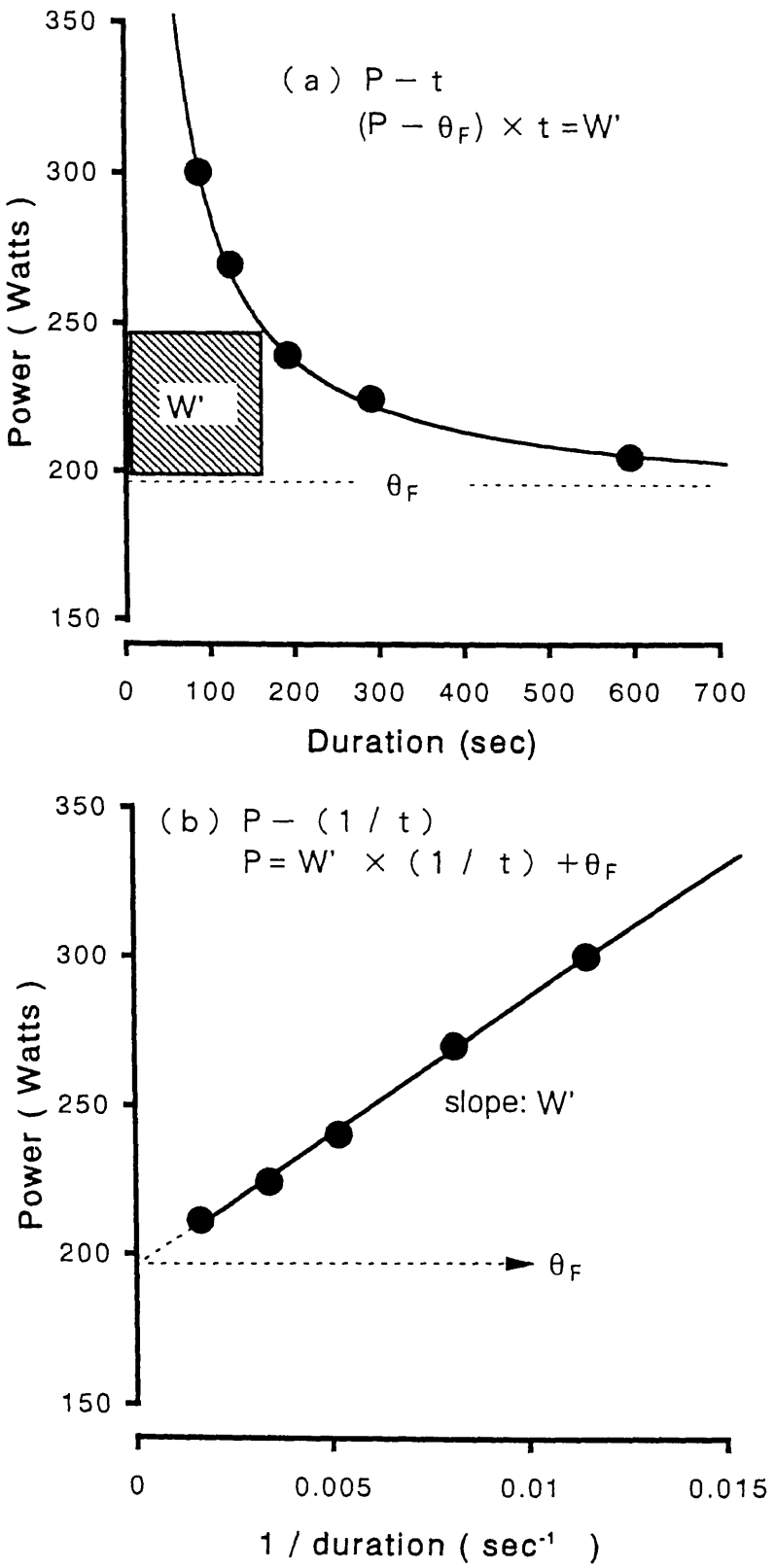

Fig. 1 Typical example of the power-duration relationship.
Top panel; time to exhaustion at five different power outputs.
Bottom panel; power plotted against the inverse of time for data of top panel.

支持する先行研究も見られる（Monod and Scherrer 1965, Moritani et al. 1981, Knuttgen 1986, Poole et al. 1988, 1990, Whipp and Ward 1994）.

一方，P-t 関係のカーブの膨らみを決める W'は一定値となり，θ_Fより上でなすことができる一定の仕事量を表す（Moritani et al. 1981, Whipp et al. 1982, Poole et al. 1988, 1990, Fukuba and Whipp 1996）.

もし，この関係が直角双曲線関係であれば，P−t 関係はパワーと運動継続時間の逆数によって直線関係，すなわち

$$P = W' \cdot (1/t) + \theta_F \qquad \text{（式２）}$$

として表される．この直線性の成立によって P-t 関係が直角双曲線関係（以下 P-t 直角双曲線関係）であることが確認される（Hill 1993 の総説を参照）.

また，この P-t 直角双曲線関係は，疲労困憊に至るような局所の動的筋運動（Monod and Scherrer 1965）や，パワーを速度に置き換えることによって，トレッドミル走（Hughson et al. 1984）や水泳においても成り立つことが知られている (Wakayoshi et al. 1992). また，Sato and Ohashi（1988）は等尺性筋力と筋収縮持続時間の関係にも，直角双曲線関係をより一般化した対数比例関係が成立することを明らかにし，静的筋運動においても筋運動が継続可能な上限の筋出力レベルがあることを報告している.

1-3-1　クリティカルパワー（θ_F）の生理的規定要因

θ_F の生理的な規定要因に関してはすでにいくつかの先行研究によって明らかにされてきた（Moritani et al. 1981, Whipp et al.1982, Gaesser and Willson 1988, Poole et al. 1988, 1990, Whipp and Ward 1994, Fukuba and Whipp 1996）．すなわち，θ_F はすでにのべた LAT や AT と同様な指標とも思われるが，LAT や AT が生理的メカニズムの解析側からでてきた指標であるのに対し，この θ_F は生体のなした筋出力側を測定するという考え方から提唱されているものであるので，その生理的な意義については，さらなる検討を要するものと思われる．先行研究（Poole et al. 1988, 1990）を取り上げて説明すると，θ_F のわずか 10％下の運動強度では，血中乳酸の増加，筋内 pH の低下が，ともに数分経過した後には定常状態になり，全被検者で 24 分の運動継続が可能であったのに対し，θ_F よりわずか 10％上の運動強度では，血中乳酸の増加，筋内 pH の低下がともに続き，24 分以内で全被検者が疲労困憊に至ったと報告している．このことからも，生理的メカニズム側から提案される LAT とパフォーマンス側から提案される θ_F との運動強度をとらえる際の生理的意義の違いが示唆される．

θ_F は AT と $\dot{V}O_2max$ のほぼ中間にある運動強度（Poole et al. 1988, 1990）で，これは，従来から提案され，スポーツ現場で広く認められている血中乳酸値を用いた持久性作業能力の指標 OBLA や 4mEq/L-AT と近い運動強度をさし示す指標であるものと考えられる．OBLA や 4mEq/L-AT は，血中乳酸の絶対値（4 mM）

を用いた指標であり，生理的なメカニズムの解析側から出てきた指標であるのに対し，このθ_Fは最終的なパフォーマンスに近い，生体のなした出力側を測定するという発想から生まれたものである．このことは，θ_Fが競技成績やその影響諸要因の解析に対してより有用であることを想像させる．

θ_Fの下の運動強度領域は，理論的には長時間に渡って運動継続可能と捉えられるが，特に LATとθ_Fの間の運動強度領域はいずれは運動継続が困難となるものと予想される．例えば，長時間の運動において，HR は時間経過にともなってわずかづつ漸増する．これは，いわゆる "cardiovascular drift"とよばれ（Rowell 1993），運動性体温上昇による放熱のための皮膚血流の増加を反映している．また，マラソンのような長時間の運動においては，エネルギー基質の補給，発汗による体液損失といった生理的諸要因によって，P-t 直角双曲線関係は制限を受ける（Fukuba and Whipp 1999）．つまり，エネルギー論から提案されている P-t 直角双曲線関係は，それ以外の生理的要因によって，その適応範囲が限定されていると考えるのが適切である．また，ウエイト・リフティングのような，極めて短時間しか継続できないような運動強度の場合も適応範囲外であると考えるのが妥当である．したがって，P-t 直角双曲線関係は，最低 1，2 分から 30 分程度の時間にわたって継続可能な，比較的高強度の持久性運動に対して適応可能であると考えるべきであろう．

1-3-2　一定値パラメータ（W'）の生理的規定要因

一方，θ_F より上でなすことができる一定の仕事量を表す W'の規定要因としては，その運動様式から予想されるエネルギー供給系を考慮すると，筋内グリコーゲン，ATP ・クレアチンリン酸（PCr）などのエネルギー基質の含有量やミオグロビンの酸素貯蔵量といった酸素借に対応する要因が想定されている（Moritani et al. 1981, Whipp et al. 1982, Poole et al. 1988, 1990, Fukuba and Whipp 1996）．運動初期には，筋内に元々ある ATP やミオグロビン・ヘモグロビンの貯蔵酸素が利用されるが，それらが動員できる時間はごくわずかであるとされており（Spriet 1995 の総説を参照），したがって，グリコーゲンや PCr 含有量にそのエネルギー供給が依存していると考えられる．

近年，W'と短時間の全力自転車駆動テスト（Wingate test）の成績との相関関係（Vandewalle et al. 1987, Nebelsick-Gullett et al. 1988, Bulbulian et al. 1996）や最大酸素借との相関関係（Hill and Smith 1993, Sato et al. 1996）が報告されるようになった．しかしながら， W'自体の生理的規定要因に関する報告は皆無である．

この W'を規定する生理的規定要因には非常に興味が持たれるが，想定されるもののひとつとしては，W'はその単位（Joules）がエネルギー量であることからも筋内の ATP，PCr やグリコーゲン量といったエネルギー基質の含有量に関連している可能性が高い．すでに高強度運動のパフォーマンスに対する筋グリコーゲン含有量の関連性についてはいくつか報告されている（Hultman and Greenhaff

1992 の総説を参照)．また近年では、クレアチン（Cr）の経口摂取によって筋中の PCr 含有量を増加させると、筋収縮後の PCr 再合成が高められ，無酸素性エネルギー生成が向上するという報告（Harris et al. 1992, Blalsom et al.1993, Maughan 1995, Hultman et al. 1996）もなされている。こういった先行研究の結果から， P-t 直角双曲線関係から求められる W'の大小にはグリコーゲンや PCr といったエネルギー基質の絶対的な含有量が影響を及ぼしているものと仮説した。

1-4　目的

そこで本研究では，W'の生理的規定要因を探る目的で，筋中のエネルギー基質である PCr およびグリコーゲン含有量を人為的にあらかじめ増加もしくは減少させる操作を行い，W'への影響を調べることとした.

また，W'がエネルギー量を表すことからも筋内の ATP，PCr やグリコーゲン量といったエネルギー基質の含有量に関連している可能性が高いことはすでに述べた．また，数多くの先行研究により，筋生検で確かめられた安静時の単位筋容積あたりの各エネルギー基質の量は，筋繊維タイプ別に標準値（グリコーゲン：遅筋；364-399，速筋；445-480，PCr；遅筋；72.3-85.4，速筋；82.7-89.6，ATP：遅筋；23.7-25.5，速筋；25.0-25.9　mM/kg dry muscle，Spriet 1995 の総説から引用）として示されている．これらのことは，筋肉量自体が増大すればエネルギー基質の量も増えるということを意味している．Davies（1992）は，最大努力の連続で

の等速性脚筋出力時の最大パワーと骨を含む筋横断面積との間に正の相関関係があることを報告しており，秋間ら（1992）は，40 秒間の全力自転車駆動運動において，運動開始後 30 秒から 40 秒に発揮された平均パワーと大腿部筋横断面積の関係を報告し，高強度運動におけるパワー出力を支える活動筋の横断面積とパフォーマンスの相関関係に言及している.

そこで，筋量自体が W'の大小関係をある程度は規定しているのではないかと考え，筋量の代用の指標として，自転車運動における作業筋である大腿部筋横断面積を求め，両者の関係を検討することとした.

本研究において行われた実験は以下の３つである.

1）パワーと運動継続時間関係から推定される一定値パラメータ（W'）に及ぼすクレアチン経口摂取の影響.

2）パワーと運動継続時間関係から推定される一定値パラメータ（W'）に及ぼすグリコーゲン枯渇操作（以下グリコーゲン枯渇）の影響.

3）パワーと運動継続時間関係から推定される一定値パラメータ（W'）と大腿部筋横断面積の関係.

今一度強調しておきたいことは，この P-t 関係から得られるパラメータはふたつあり，ひとつは理論的にはある程度の長い時間にわたって運動が継続可能な上

限の運動レベルを意味し，持久性運動の能力の上限を示していると想定される「θ_F：クリティカルパワー」．もうひとつは，無酸素性エネルギー容量を反映すると考えられる「W'：現時点で適当な用語が存在していない」である．もし，本研究において，W'が無酸素性作業容量を反映すると確認されるようないくつかの傍証が得られたとすれば，精密機器を用いることなく，自転車エルゴメーターとストップウオッチによって，ヒトの作業能力が，有酸素性作業能力と無酸素性作業能力を表すふたつのパラメータによって評価できるということになり，その応用的利用価値は極めて高いものであると想像される．

1-5　本論文の構成

第１章「序論」では，まずヒトの作業能力を有酸素性作業能力と無酸素性作業能力に分けて概観した後に，パワーと運動継続時間関係から推定されるふたつのパラメータ，θ_FとW'に関する先行研究をふまえて本研究の目的を述べた．第２章「パワーと運動継続時間関係から推定される一定値パラメータ（W'）に及ぼすクレアチン経口摂取の影響」では，Crの経口摂取により筋中のPCr 含有量を増加させた場合のパワーと運動継続時間関係の検討を行い，W'への影響を検討した．第３章「パワーと運動継続時間関係から推定される一定値パラメータ（W'）に及ぼすグリコーゲン枯渇の影響」では，筋内のグリコーゲンをあらかじめ枯渇操作した状態でのパワーと運動継続時間関係の検討を行い，W'への影響を検討

した．第４章「パワーと運動継続時間関係から推定される一定値パラメータ（W'）と大腿部筋横断面積の関係」では，W'の量的側面を規定するのではないかと予想される作業筋量の指標としての筋横断面積との関連性について検討した．第５章「まとめ」では本研究で得られた結果を総括し，W'の生理的規定要因および無酸素性作業能力の指標としての妥当性を検討した．その上で，パワーと運動継続時間関係から推定されるふたつのパラメータ，θ_FとW'の作業能力評価への可能性について考察した．

なお，第２章は，Japanese Journal of Physiology, 49, 169-174,（1999年）掲載の「The effect of oral creatine supplementation on the curvature constant parameter of the power-duration curve for cycle ergometry in humans」（著者：Akira Miura, Fumiko Kino, Saori Kajitani, Hironori Sato, Haruhiko Sato, and Yoshiyuki Fukuba）に基づいている．

さらに，第３章は，Ergonomicsに受理印刷中の「The effect of glycogen depletion on the curvature constant parameter of the power-duration curve for cycle ergometry」（著者：Akira Miura, Hironori Sato, Haruhiko Sato, Brian J.Whipp, and Yoshiyuki Fukuba）に基づいている．