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

3-1　目的

第1章の繰り返しになるが，パワーと運動継続時間直角双曲線と漸近線に囲まれる一定値パラメータ W'（Fig.1 参照） は単位が仕事量（Joule）になることにより，生体の持つ一定のエネルギー容量を表すと予想され，その規定要因としては，筋中のグリコーゲン含有量，ATP ・ PCr 含有量さらにミオグロビンやヘモグロビン O_2 貯蔵量といったものが候補にあげられる．グリコーゲンの枯渇操作が運動継続時間を減少させることは繰り返し報告されてきた（Hultman and Greenhaff 1992 の総説を参照）．無酸素性エネルギー貯蔵量を反映すると考えられる，P-t 直角双曲線関係から推定される W'が事前のグリコーゲン枯渇操作によって減少するか否かを確かめることは，W'の生理的規定要因を探る意味でも大変意義深いことであると考えられる．

そこで，本研究では，上記の一定値パラメータ W'の規定要因のひとつと仮定される筋中のグリコーゲン含有量をあらかじめ減少させる操作（以下 GD 条件）が，W'に影響を与えるか否かを調べた．

3-2　方法

3-2-1　被検者

被検者は健康な成人男性 7 名であった．全ての被検者に対して，実験の目的，内容，危険性について十分に説明した．彼らは，実験を途中で辞退できることを周知理解の上，実験に参加することに承諾し同意書に署名した．各被検者の身体的特徴は Table 3 に示した．なお，体脂肪率の測定は，インピーダンス法（TBF-511：タニタ社製）によって行われた．

3-2-2　グリコーゲン枯渇のプロトコール

グリコーゲン枯渇のプロトコールは，Gollnick et al.（1972）に基づく Heigenhauser et al.（1983）の方法に準拠した．筋内グリコーゲン量を枯渇させるために，各被検者は，実験前夜夕食後に，60％$\dot{V}O_2max$ で 75 分間の脚自転車運動を行った．引き続いて，5 分間の休憩の後，115％$\dot{V}O2max$ の強度で 1 分間の脚自転車運動を 1 分間の休息を挟んで継続できなくなるまで繰り返し行った（Fig. 6）．この 115％$\dot{V}O2max$ 強度での 1 分間の運動における各被検者の平均持続回数は 8 回であった．各被験者は，翌朝実験を行うまで絶食とし（水およびお茶は許される），翌朝実験室にて，高強度一定負荷運動を行った．Heigenhauser et al.（1983）の筋生検による研究によると，この操作によって，各被検者の実験直前の安静時の脚筋内グリコーゲン量はおおよそ 50％に低下していたと推察される．

Table 3 Physical characteristics of subjects.

subj	age (yrs)	weight (kg)	%fat (%)	height (cm)	$\dot{V}O_2max$ ($ml^{-1} \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$)
a	22	57.4	16.4	172.0	37.5
b	22	71.6	19.7	181.0	52.4
c	33	82.2	28.7	176.0	32.8
d	21	71.0	17.7	176.0	37.3
e	22	73.0	21.1	179.0	39.0
f	40	70.7	21.9	176.5	36.8
g	23	67.7	16.8	178.0	43.6
mean	26.1	70.5	20.3	176.9	39.9
SD	7.4	7.3	4.2	2.8	40.3

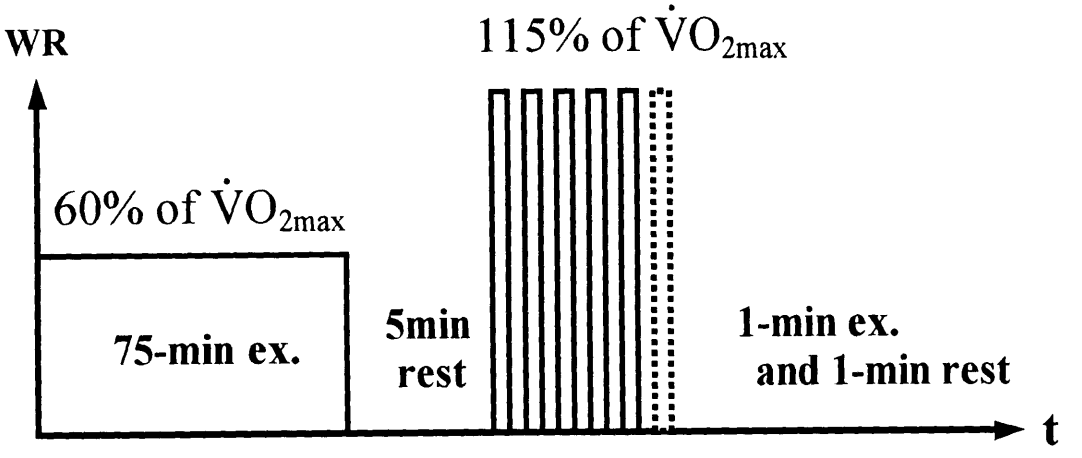


Fig. 6 Manipulation protocol for depleting muscular glycogen content.
WR: Work rate, t: time

なにも操作を与えない条件（以下 NG 条件）では，各被検者は，特別な操作を要求されなかったが，実験日の前日には，激しい運動を避けるように指示された．

3-2-3　パワーと運動継続時間関係の測定

各被検者は，iso-power タイプの自転車エルゴメータ（232cXL：コンビ社製）を用いて，1 回のランプ負荷テストと 4 回の高強度一定負荷での疲労困憊までの運動テストを，NG および GD の両条件下でそれぞれ行った（Fig. 2）．

ランプ負荷テストは，4 分間 20Wのウオームアップ運動の後，毎分 25Wの増加率で疲労困憊に至るまで行われた．

次に，各被験者は 4 回（175W から 400W の間で 4 種類）の一定負荷運動を疲労困憊に至るまで行った．各被検者は，運動前に 15 分間のベッドレストを行い，その時の呼吸交換比（RER：$\dot{V}O_2/\dot{V}CO_2$）を調べ（Table 4 を参照），その後 4 分間 20Wのウオームアップ運動の後，高強度一定負荷運動を行った．高強度一定負荷運動の強度設定については，**第 2 章　2-2-3　パワーと運動継続時間関係の測定**と同様の方法で行った．自転車運動時のペダル回転数は 60rpm でこぐように指示し，50rpm を下回った時点を疲労困憊と定義した．運動中は連続してガス交換諸量（$\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, $\dot{V}E$）および心電図の測定を breath-by-breath タイプの測定装置（エアロモニタ：ミナト医科学社製）で測定した．各運動は，NG 条件と GD 条件でそれぞれ 4 回ずつランダムに合計 8 回行ない，GD 条件による高強度

一定負荷運動は最低 1 週間の間隔をおいて行われた．GD 条件による高強度一定負荷運動実験は，実験前夜と翌朝の実験日に続けて最大努力運動を行うため，被検者への生理的負担度が大きい．したがって，GD 条件は同一週内に 2 回行わないようにして，最大でも 1 週間内に，GD 条件と NG 条件の 1 回づつの測定となるように考慮しつつ，NG 条件と GD 条件でランダムに 4 回の異なる負荷設定で合計 8 回行なった．なお，被検者には，負荷設定や運動継続時間などの情報は全く知らされなかった．

その後，**第 2 章，2-2-3　パワーと運動継続時間関係の測定関係の測定**と同様の方法で，各被検者において P-1/t 関係に直線関係［$P = W' \cdot (1/t) + \theta_F$（式 2）］が成立するか否かをその有意性によって確かめ，GD 条件と NG 条件の両条件下におけるそれぞれのθ_Fと W'の推定をおこなった．

3-2-4　統計処理

各測定項目は平均値と標準偏差で示し，GD と NG の両条件間の差異の検定は，paired t-test を用いた．4 回の高強度一定負荷運動における peak $\dot{V}O_2$, peak $\dot{V}CO_2$, peak $\dot{V}E$ および peak HR については，各条件と高強度運動の運動負荷条件の 2 元配置による分散分析を行った．有意な主効果が認められたものについては Scheffe の post-hoc test を行った．また，P-1/t 関係は最小自乗法により回帰直線で示した．すべての統計処理は SPSS for Windows, version 6.01（SPSS 社製）によって行われ

た．なお，統計的有意水準は5%とした．

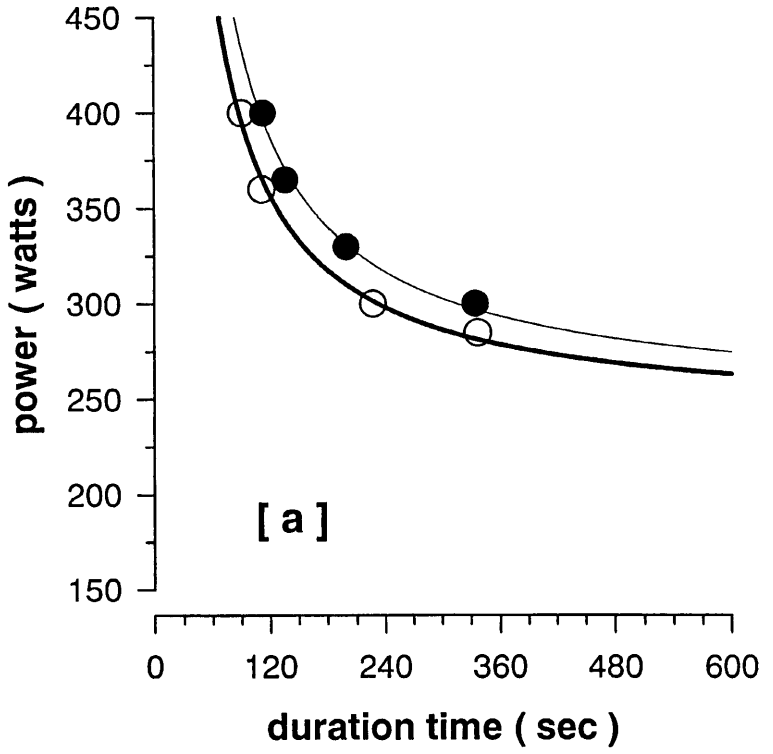
3-3　結果

NG条件とGD条件における，P-t関係の典型例をFig. 7[a] に示した．Fig. 7 [b] は時間の逆数とパワーの関係を示したものである．すべての被検者において高い直線性が認められた [r^2: NG; 0.986-1.000, GD; 0.938-0.999].

各被検者における，グリコーゲン枯渇によるθ_F と W'への影響を Fig. 8 に示した．GD条件とNG条件でθ_Fに有意な差は見られなかった [NG: 197.1±31.9, GD: 190.6±28.2 Watts]．一方，W'は GD 条件において NG 条件に比べて有意に低い値を示した[NG: 12.83±2.21, GD: 10.33±2.41kJ]

θ_F と W'の推定のための高強度一定負荷運動直前の，15 分間ベッドレスト時の定常状態下における RER は GD 条件において，NG 条件のそれに比較して有意に低かった（Table 4）.

GDおよびNG条件における高強度運動の生理的ストレスを確かめるためのガス交換諸量およびHRのピーク値を，4回の高強度一定負荷それぞれについて示したものが Table 5 である．4回の高強度一定負荷運動における peak $\dot{V}O_2$ の平均値は，GD条件とNG条件でおおよそ同じレベルを示した．また，peak HR の平均値も同様であった．一方，peak $\dot{V}E$ と peak $\dot{V}CO_2$ はグリコーゲン枯渇操作によって有意に減少していた．



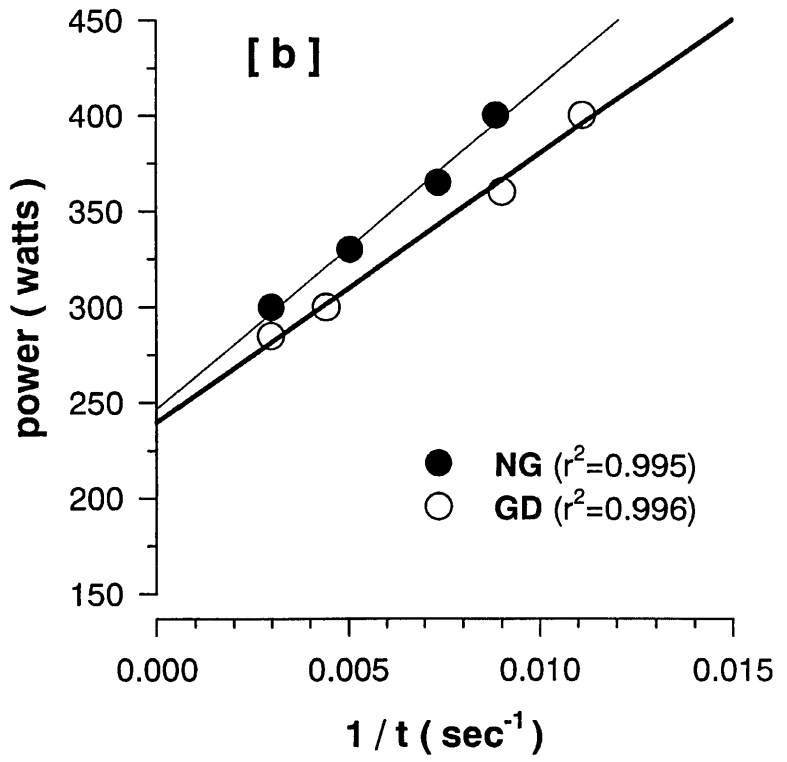


Fig. 7 Typical example of the power-duration relationship under glycogen depleted (GD: open circle) and normal glycogen (NG: closed circle) states (subj. b). Top panel [a]; power versus time to exhaustion at different power outputs. Bottom panel [b]; power versus the inverse of time for data in the top panel. Each estimated curve under GD or NG state are shown in bold or solid line, respectively.

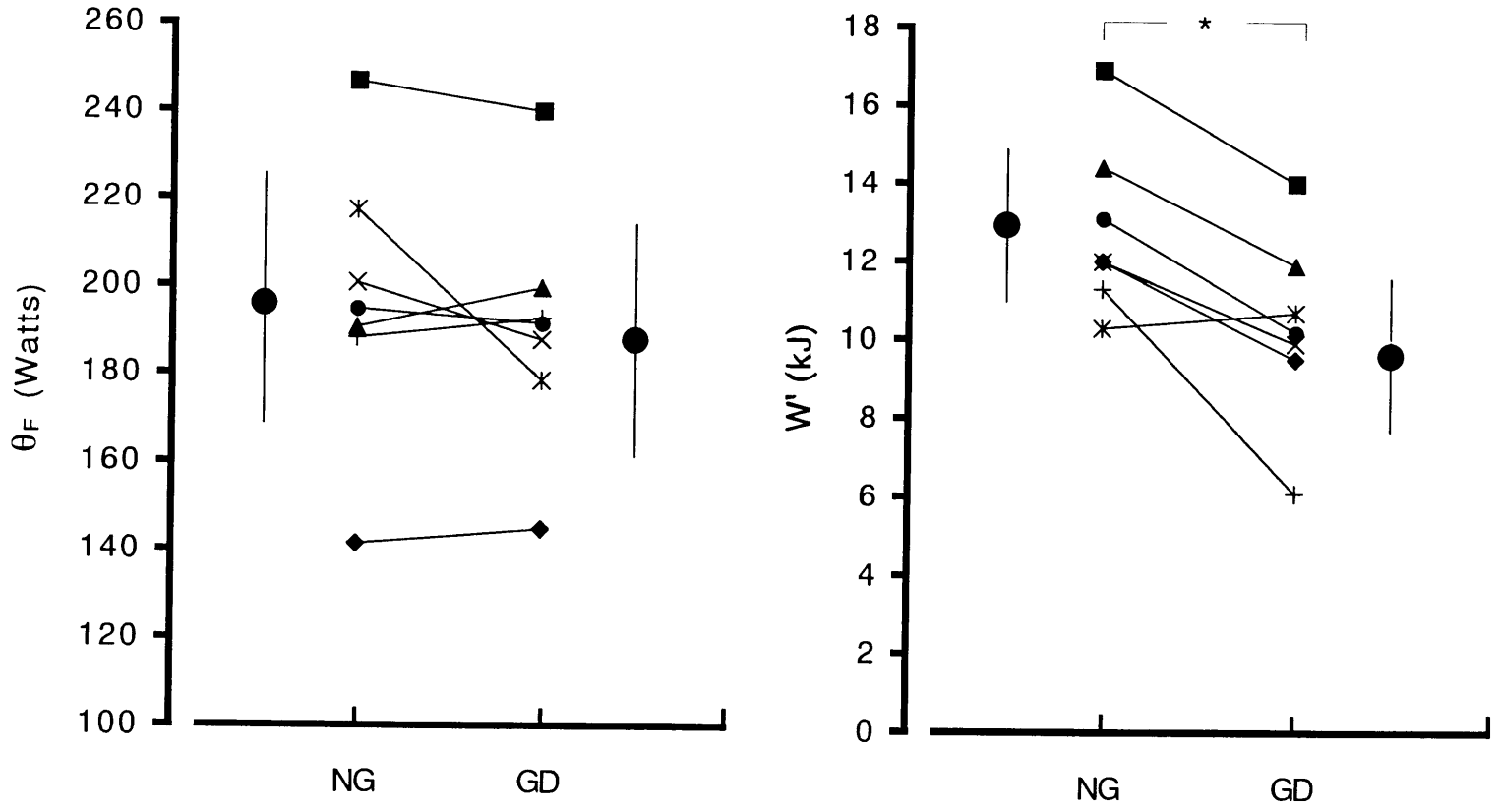


Fig. 8 Effects of glycogen depletion in θ_F and W' of the P-t hyperbolic curve.
* shows the significant difference between glycogen depleted (GD) and normal glycogen (NG) conditions ($p<0.05$). Large closed circle with vertical bar indicates mean ± S.D.

Table 4 The mean and individual values of RER prior to the high-intensity exercise.

subj	**NG**	**GD**
a	0.975	0.881
b	0.950	0.829
c	0.899	0.806
d	0.951	0.804
e	0.934	0.872
f	0.955	0.884
g	0.941	0.823
mean	0.944	0.843*
SD	0.038	0.026

NG: Nomal Glycogen states

GD: Glycogen Depleted states

* : significant difference between NG and GD, $p < 0.05$.

Table 5 The individual peak values of cardio-respiratory variables attained during four high-intensity exercise bouts in normal glycogen (NG) and glycogen **depleted (GD) conditions.**

	$\dot{V}E$ ($l \cdot min^{-1}$)		$\dot{V}CO2$ ($ml \cdot min^{-1}$)		$\dot{V}O2$ ($ml \cdot min^{-1}$)		HR (bpm)	
subj.	**NG**	**GD**	**NG**	**GD**	**NG**	**GD**	**NG**	**GD**
a	92.0	85.8	2911	2713	1901	1944	175	172
b	125.7	113.7	4560	4090	3218	3229	186	178
c	140.3	124.8	4050	3655	2653	2633	182	183
d	115.3	105.4	3930	3318	2875	2667	171	170
e	92.0	85.8	3687	2894	2842	2579	186	168
f	137.5	119.9	3913	3404	2470	2334	159	162
g	140.3	124.8	3684	2978	2705	2614	180	157
mean	120.4	108.6*	3819	3293*	2666	2571	177	170
SD	21.4	17.0	497	479	409	387	10	9

NG: Nomal Glycogen condition, GD: Glycogen Depleted condition.

*: significant difference between NG and GD, $p<0.05$.

3-4 考察

本実験では，直接的に作業筋内のグリコーゲン量を測定してはいない．しかし，先行研究が，同様のグリコーゲン枯渇操作で，筋生検を用いて筋内グリコーゲン量の減少を報告している（Gollnick et al. 1972, Heigenhauser et al. 1983）．また，筋生検によってグリコーゲン枯渇操作による外側広筋のグリコーゲン量の減少が確認されたとき，その条件下における安静時の定常状態における RER 値が有意に低下することも報告されている（Hughes et al. 1982, Heigenhauser et al. 1983）．この低い安静時の定常状態における RER 値は，低い糖質代謝を示唆するとともに，エネルギー供給系に脂質代謝がより高い比率で関与していることを意味している．本研究において，θ_F と W'の推定のための高強度一定負荷運動直前の 15 分間のベッドレスト時定常状態下における RER は GD 条件において有意に低い値を示している．このことは，本研究の被検者においても，先行研究（Gollnick et al. 1972, Heigenhauser et al. 1983）と同様に筋内グリコーゲン量が減少していたことを示すひとつの傍証となろう．また，本研究において，GD 条件下での４つの高強度一定負荷運動における peak $\dot{V}O_2$ と peak HR は NG 条件と検出できるほどの差が生じていないにも関わらず，peak $\dot{V}E$ と peak $\dot{V}CO_2$ においては，GD 条件で有意に低い値を示している．これは，筋内グリコーゲン利用の低下による影響と考えられ，おそらくは，ベッドレスト時定常状態下における低い RER と同様に，有酸素性エネルギー供給に対する，脂質代謝の比率向上が関与していると見なすこと

ができる.

本研究において，グリコーゲン枯渇条件下でも通常の条件下と同様に，P-t 関係に直角双曲線関係が成立することは確認された．しかし，その関係から推定されるθ_F と W'への影響は同じではないことがわかった．すなわち， GD 条件と NG 条件でθ_Fに有意な差は生じなかったが，W'は GD 条件において NG 条件に比べて 7 名中 6 名の被検者が減少し，全体の平均値の有意な差を示した.

高酸素吸入 (hyperoxia) によってθ_Fは有意に増大し W'は影響を受けない (Whipp et al. 1982)．低酸素吸入（hypoxia）によってθ_Fは，有意に減少する（Moritani et al. 1981, Whipp et al.1982)．また，Gaesser and Wilson（1988）は，θ_Fより下の低強度の継続的なトレーニングによって W'の変化をともなわないθ_F の増大を報告し，興味深いことに，Jenkins and Quigley（1993）は，W'は高強度インターバル・トレーニングによってθ_F の変化をともなうことなく増大することを報告している．さらに，W'と Wingate test 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．これら一連の研究報告は，W'が無酸素性作業能力を表すひとつの指標であるという可能性を支持するものではある．しかし，そのような間接的指標との関係のみで，結論を導くことは危険であり，直接的な根拠によって，W'の生理的規定要因を解明する必要があると考えられる.

本研究の結果，すなわち筋内グリコーゲン量の減少が，W'の減少を引き起こ

したという事実は，第2章の高強度運動中の主要な無酸素性のエネルギー源としての筋内の PCr の含有量増大が W'の増大をもたらしたこととあわせて，グリコーゲン含有量や PCr 含有量といった高強度運動における主要なエネルギー源が，P-t 直角双曲線関係における W'のまぎれもない生理的規定要因であることを意味している．高強度運動中に，より高い比率で無酸素性エネルギー供給が要求されるような条件下で，筋内グリコーゲン含有量や PCr 含有量の変化が W'に強い影響を与えたことは，W'が無酸素性エネルギー供給機構と強い関係があることを意味するとともに，無酸素性作業能の指標としての妥当性を支持するものであると考えられる．