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

2-1　目的

PCr は筋運動のための直接のエネルギー源ではない．PCr は，あくまでも ATP 再合成のためのエネルギー源である．その特徴は，ATP 再合成過程にクレアチンキナーゼというひとつの酵素しか触媒として関与しないため，酸素をその反応過程に要さず，単位時間あたりに最も多くの ATP を再合成するということである．しかし，残念なことに，筋内の PCr はその量に限りがあるので短時間しか再合成が持続できないという短所もある．このような背景から，パフォーマンス向上のために Cr を積極的に経口摂取し，筋内 PCr をあらかじめ増大させようという発想が生まれた．その効果として，ATP 再合成速度の改善を促し（Greenhaff et al. 1993, 1994），筋疲労の遅延，回復を得ようというのである．以下に，Cr 経口摂取に関する先行研究をまとめる．

1990 年代に入って，Cr 経口摂取が，ヒト骨格筋内の Cr および PCr 含有量を増大させるという研究が相次いで報告されるようになった（Harris et al. 1992, Balsom et al. 1993, Greenhaff et al. 1993, 1994, Birch et al. 1994, Earnest et al. 1995, Maughan 1995, Hultman et al. 1996, Rossiter et al. 1996, Odoland et al. 1997, Kreider et

al. 1998)．この筋内 Cr および PCr の増大によって，運動後回復期の PCr 再合成の促進をひきおこすことや，間欠的な高強度運動の成績向上をもたらすことが確かめられている（Balsom et al. 1993, Greenhaff et al. 1993, Birch et al. 1994, Earnest et al. 1995, Rossiter et al. 1996, Kreider et al. 1998)．さらに，Jacobs et al.（1997）は5日間の Cr 経口摂取によって，高強度自転車運動中における最大酸素借が増大することを確かめ，無酸素性エネルギー供給機構に直接かかわる筋内 PCr 含有量の増大は無酸素性作業能力の向上をもたらすことを報告した．この結果は実に興味深い示唆を与えてくれる，すなわち，筋内 PCr 含有量は最大酸素借の生理的規定要因のひとつであるという可能性を示唆しているからである．

高強度自転車運動によって得られる P-t 直角双曲線関係を規定する W'の生理的規定要因のひとつとして，筋内の PCr 含有量が仮説されるが，Cr 経口摂取により骨格筋内の PCr を増加させることで，その仮説を検証することが可能であると考えられる．そこで本研究では，筋生検で PCr 含有量の有意な増大が確認されている多くの先行研究（Harris et al. 1992, Greenhaff et al. 1993, Maughan 1995）で奨励されているプロトコールに準じて Cr を経口摂取し，骨格筋の PCr 含有量の増大が想定される条件下で，脚自転車運動における発揮パワーと運動継続時間の直角双曲線関係を測定し，特に W'に及ぼす Cr 経口摂取の影響を検討することを目的とした．すなわち，もしも PCr 含有量が W'の成因のひとつであれば，Cr 摂取によって PCr が増大した条件下では W'は増加すると仮説したわけである．

2-2　方法

2-2-1　被検者

被検者は，健康な一般成人男性８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 1 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．

2-2-2　クレアチン経口摂取のプロトコール

Cr の摂取は多くの先行研究（Harris et al. 1992, Greenhaff et al. 1993, Maughan 1995）で奨励されているプロトコール（一般に "100g dosing" と呼ばれている方法）に従い，ダブルブラインド法によって，Cr（CR）もしくはプラセボ（PL）の摂取を行った．まず，被検者はランダムな 2 群（CR 群・ PL 群）に分けられた．CR 群は 1 日 20g，5 日間で総量 100g の Cr を経口摂取した．すなわち，CR 群は 6 ないし 7g の Cr（クレアット：イノム・バイオ・ジャパン社製）と人工甘味料 0.5g を，PL 群は，外見，味ともに Cr 群が摂取するものに偽装された粒状の粉糖 2g を，毎食後 1 日 3 回，カフェインレス・コーヒに溶かした形で 5 日間連続して経口摂取した．5 日間の摂取後，被検者は筋疲労曲線の測定および P-t 関係測定のための高強度一定負荷運動テスト（**2-2-3　パワーと運動継続時間**

Table 1 Physical characteristics of subjects.

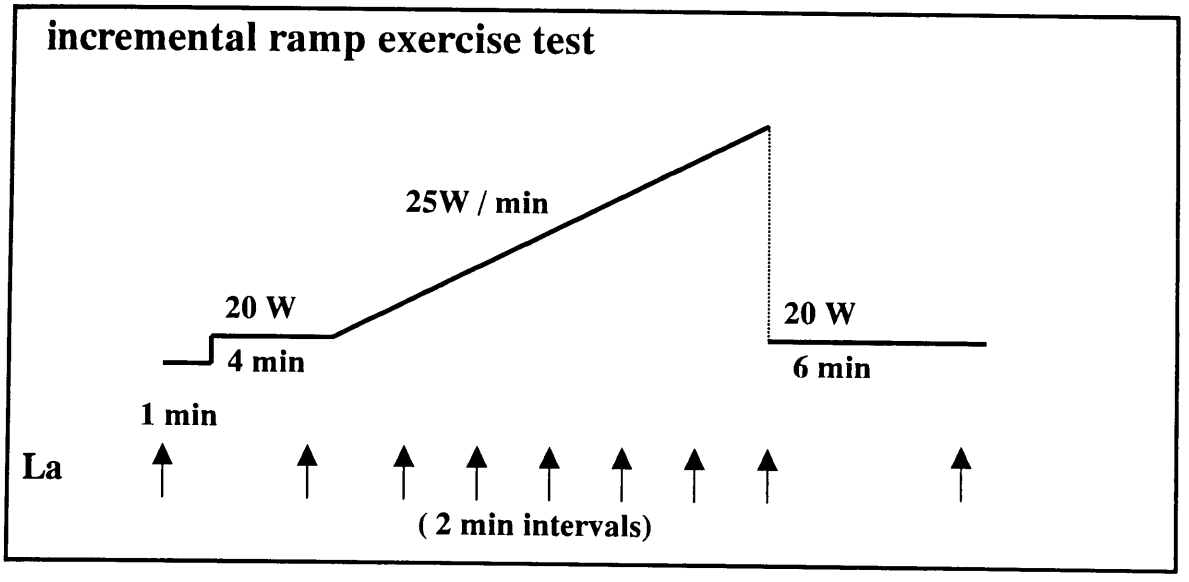
Subj.	age (years)	height (cm)	weight (kg)		body fat (%)		$\dot{V}O_2max$ ($ml^{-1} \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$)
			PL	CR	PL	CR	
1	20	170	68.8	71.6	18.8	20.0	42.0
2	18	167	55.9	57.5	15.6	15.3	49.1
3	19	167	61.6	63.7	16.4	17.2	48.2
4	21	175	63.8	63.2	19.5	19.5	43.3
5	21	167	69.1	68.9	17.4	17.4	51.4
6	20	184	83.0	82.6	20.2	20.8	42.0
7	20	168	62.0	63.6	17.5	17.5	49.0
8	22	181	70.5	70.5	18.8	20.4	39.0
mean	20	172.4	66.8	67.7	18.0	18.5	45.5
SD	1.2	6.8	8.1	7.6	1.6	1.9	4.5

PL: placebo supplementation, CR: creatine supplementation.

関係の測定を参照）を1日1回のペースで4日間連続して行い，その期間中もCr群は2gのCrと人工甘味料0.5gを，PL群は1gの粉糖を1日1回摂取した． 6週間の体内からのCrの洗い流し期間（Hultman et al. 1996）の後，CR群とPL群を入れかえて，同様のプロトコールでCRおよびPLを摂取後，同様の測定を行った． なお，6週間の期間をおいたCRおよびPLの両摂取条件下における，各被検者の体重と体脂肪率には，有意な差は認められなかった（Table 1）．また，本実験で用いたCrの経口摂取を行った際の大腿直筋内のPCr量の変化を，^{31}P-MRS法（Signa 1.5T：GE社製）で5名の被検者について予備実験として検討した．結果として，PCr/β-ATPは摂取前が4.27±0.46，摂取後が4.78±0.72（平均値±標準偏差）で9.13±5.29％の有意な増大を示し，本摂取法の妥当性を間接的ではあるが確認した．

2-2-3　パワーと運動継続時間関係の測定

電磁式ブレーキによる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，CRおよびPLの両条件下でそれぞれ行った（Fig. 2）．なお，このエルゴメータは，ペダル回転数が30rpmから90rpmの間は，ペダル回転数の如何に関わらず一定の負荷設定が可能である．各被検者は，実験に先立ち，サドル高の決定と，自転車エルゴメータ運動に慣れるための練習を行った．



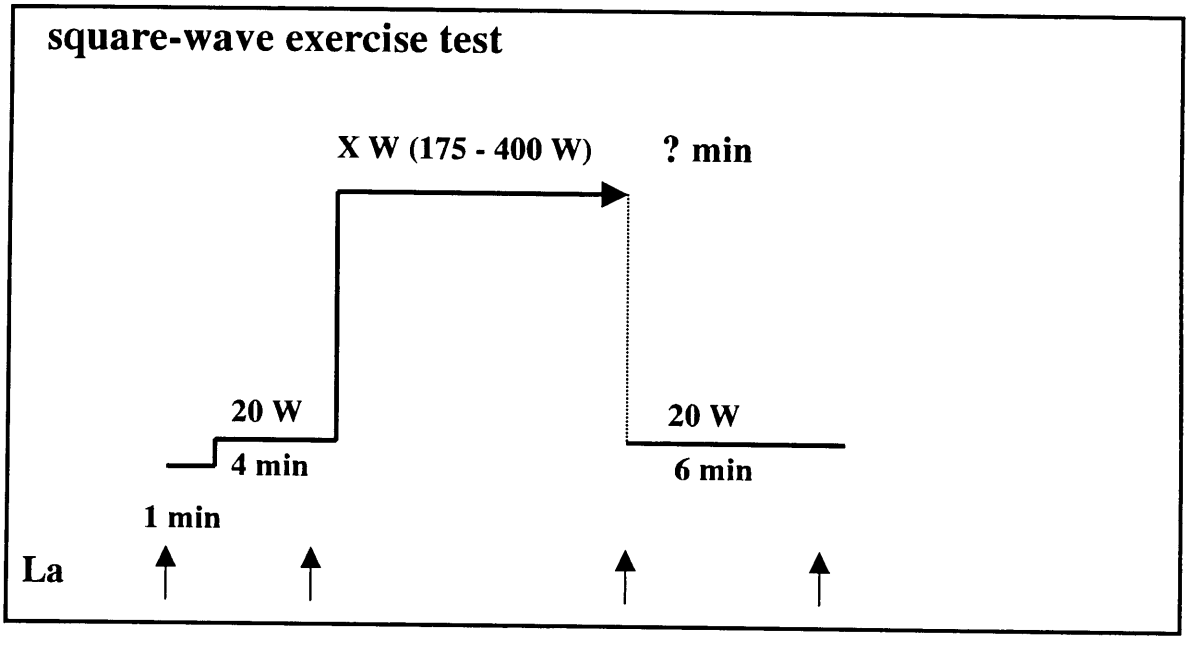


Fig. 2 Experimental protocol of ramp and step ergometer exercise.

ランプ負荷運動テストのプロトコールは，４分間の 20W のウオームアップ運動の後，毎分 25W で漸増するランプ負荷運動を疲労困憊に至るまで行った．その結果に基づいて全被検者の $\dot{V}O_2max$ および LAT を求めた．引き続いて，各被検者は 4 種類の異なる強度での一定負荷運動テストを，CR 条件と PL 条件でそれぞれランダムに 4 回ずつ，1 日に 1 回のペースで行った．テストは，4 分間の 20W のウオームアップ運動に続いて高強度一定負荷運動を疲労困憊まで行うもので，その時のペダル回転数は 60rpm でこぐように指示し，50 rpm を下回った時点を疲労困憊とした．高強度一定負荷運動の運動強度は，被検者の $\dot{V}O_2max$ および LAT を参考にしながら，2～10 分程度継続可能なものを選択した．すなわち，θ_F は $\dot{V}O_2max$ と LAT のほぼ中間の運動強度に相当すること（Poole et al. 1988, 1990）に着目して，あらかじめθ_F の運動強度を予想し，初回は，その約 130％にあたる運動強度を負荷した．そして，そこで得られた運動強度（P）と運動継続時間の逆数（1/t）のデータセットを，[$P = W' \cdot (1/t) + \theta_F$]（式 2） にプロットして，y 切片となる予想された θ_F の運動強度と直線で結び，その直線上にある 2～10 分程度継続可能な運動強度（175W から 400W の間で 4 種類）を予想した．このデータのプロット作業は毎回の実験終了後に行い，次回の運動負荷を，前回の予想と比較修正して選択した．なお，テスト全期間を通じて，被検者には，ペダル回転数の情報だけ知らされ，負荷設定や時間経過の情報は知らされなかった．

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．また，ランプ負荷テスト中には，安静時，運動開始後 2 分おき，および運動終了後 5 分目に，加温された指先から血液を採取し，乳酸分析装置（DIAGULUKA：東洋紡社製）を用いて血中乳酸値を測定し，LAT 判定のための資料とした．

θ_F と W'の推定は，式 1 が，

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

と書きかえられることにより各被検者で得られた P-1/t のデータセットに対して，式 2 を最小自乗近似することで，その切片（θ_F）と傾き（W'）として求められた．上記の推定を PL 条件と Cr 条件の両条件下で行った（Fig. 1 参照）．

2-2-4　筋疲労曲線の測定

Cr 摂取がパフォーマンス向上に貢献することを示した先行研究の結果で一致して認められていることは，最大筋収縮を反復して繰り返すような，いわゆる筋疲労曲線を測定した際の有意な筋収縮力低下の遅延である（Greenhaff et al. 1993, Rossiter et al. 1996, Kreider et al. 1998）．そこで，本実験においても，Cr 経口摂取によって，骨格筋中の PCr 含有量が増大していたか否かを間接的に確かめるために，以下のような筋疲労曲線の測定を行った．この筋疲労曲線の測定とは，最大努力での等尺性脚伸展動作を 30 回繰り返すもので（2 秒収縮，1 秒休息），30

回を1セットとして，連続して5セット（互いのセット間は1分の回復期を置く）行い，発揮された筋力を測定した．筋力測定には，多用途筋力測定装置（TD-300A：ティアック社製）を用いた．測定時の被検者の姿勢は，椅座位で，体幹および大腿部をベルトで固定した．膝関節角度は 90 度とし，足関節にベルトをかけ，その水平軸上にストレインゲージ式ロードセルを連結して測定した．

2-2-5　統計処理

各測定項目は平均値と標準偏差で示し，PL と CR の両条件間の差異の検定は，Wilcoxon matched-pairs sign-rank test を用いた．ただし，筋疲労曲線における，各セットの総筋力の 1st セットに対する相対値については，PL ・ CR 摂取それぞれにおいて経時変化に関する 1 元配置による分散分析を行った．有意な効果が認められたものについては Fisher の post-hoc test を行った（Stat View ver.4.5, Abacus Concepts 社製）．なお，統計的有意水準は５％とした．

2-3　結果

Fig. 3[a] に，ある被検者の PL および CR 条件下で θ_F と W'の推定のために 4 回実施した高強度一定負荷運動での P-t 関係を示した．Fig. 3[b]のように，全ての被検者は P-1/t （式２）の関係において高い直線性を示した[r^2, PL: 0.910-1.000, CR: 0.914-0.998].

全被検者のθ_FとW'に対するCr経口摂取の影響をFig. 4に示した．θ_Fにおいて，Cr摂取による有意な変化は認められなかった[PL: 214.4±23.6, CR: 207±19.8W]．一方，W'はPL条件に比べて，CR条件において有意に増大した[PL: 10.9±2.7, CR: 13.7±3.0kJ; $p<0.05$]．全ての被検者におけるCr経口摂取によるW'の増加率は((CR－PL)/PL）0.05～0.78と大きな個体差が認められた．

各被検者における CR および PL の両摂取条件下の体重と体脂肪率には，有意な差は認められなかった（Table 1）．

CR および PL の両摂取条件下で行った 4 回の高強度一定負荷運動で到達した$\dot{V}O2$，$\dot{V}CO2$，$\dot{V}E$ といったガス交換諸量のピーク値や HR のピーク値には，いずれも，両条件下で有意な差は認められなかった（Table 2）．

Fig. 5は，30回連続の等尺性脚伸展力の低下を，1stセットの総筋出力を100％として，その後の 2nd から 5th セットまでを相対的に表したものである．PL 条件において，1st セットと 5th セットの間に有意な低下が認められたが，CR 条件においては，1stから5thセットまでに有意な差は認められなかった．

筋疲労曲線における 1st セットから 5th セットに至る筋収縮力低下に対するクレアチン経口摂取の効果を，1st セット 30 回の総筋出力を 100％として評価した5thセット目の総筋力における差（CR - PL）で評価した．各被検者におけるこの値と，W'に対するクレアチン経口摂取の効果，すなわちW'の差（CR - PL）との関係を調べたところ，両者の間には有意な相関関係は得られなかった[r^2=0.0083 ; $p>0.05$]．

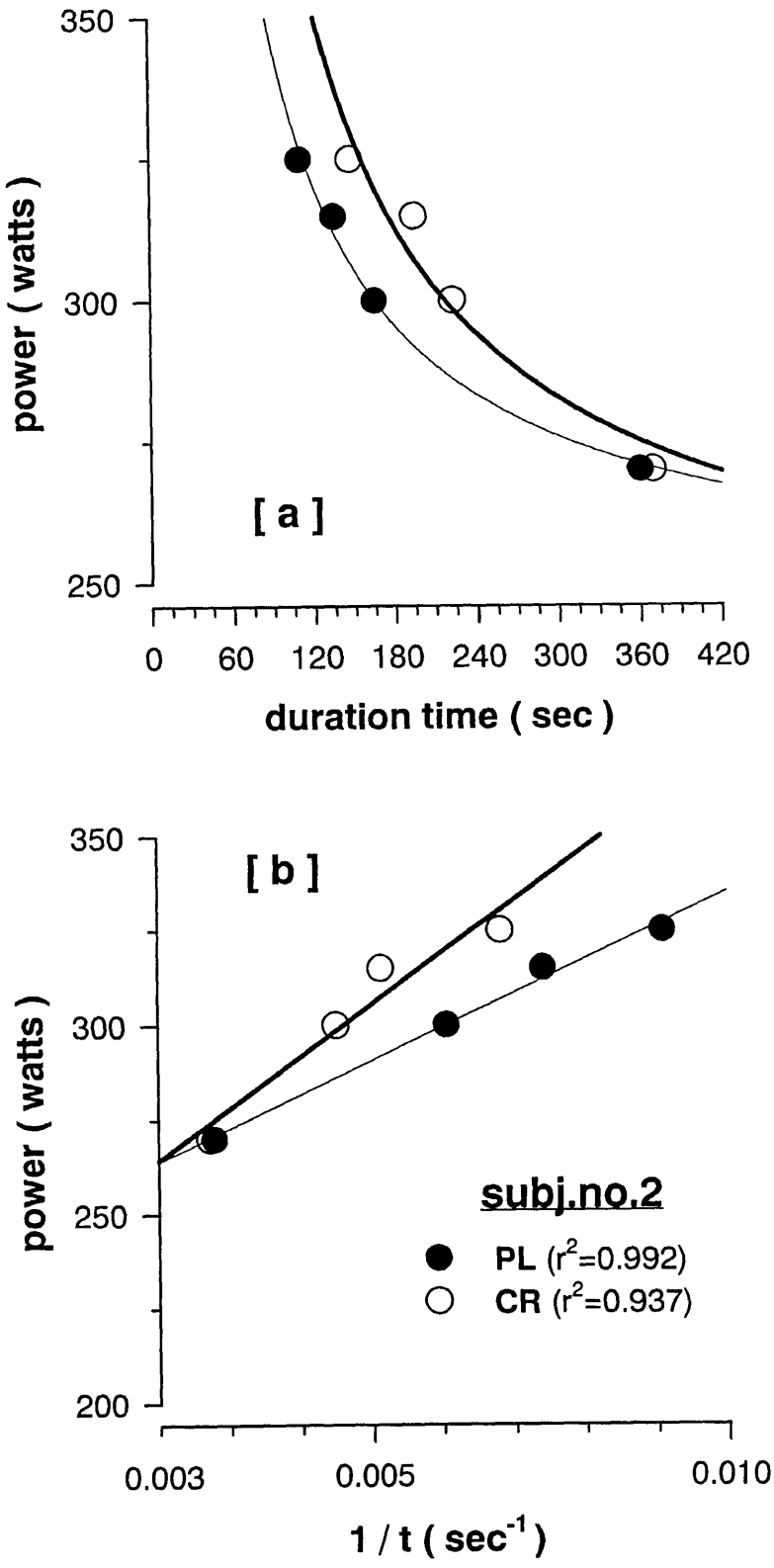


Fig. 3 Typical example of the power-duration relationships under Cr supplementation (CR: open circle) and placebo (PL: closed circle) conditions (subj. no.2). Top panel [a]; power versus time to exhaustion at different power outputs. Bottom panel [b]; power versus the inverse of time for data in the top panel. Each estimated curve under CR or PL conditions are shown in bold or solid line, respectively.

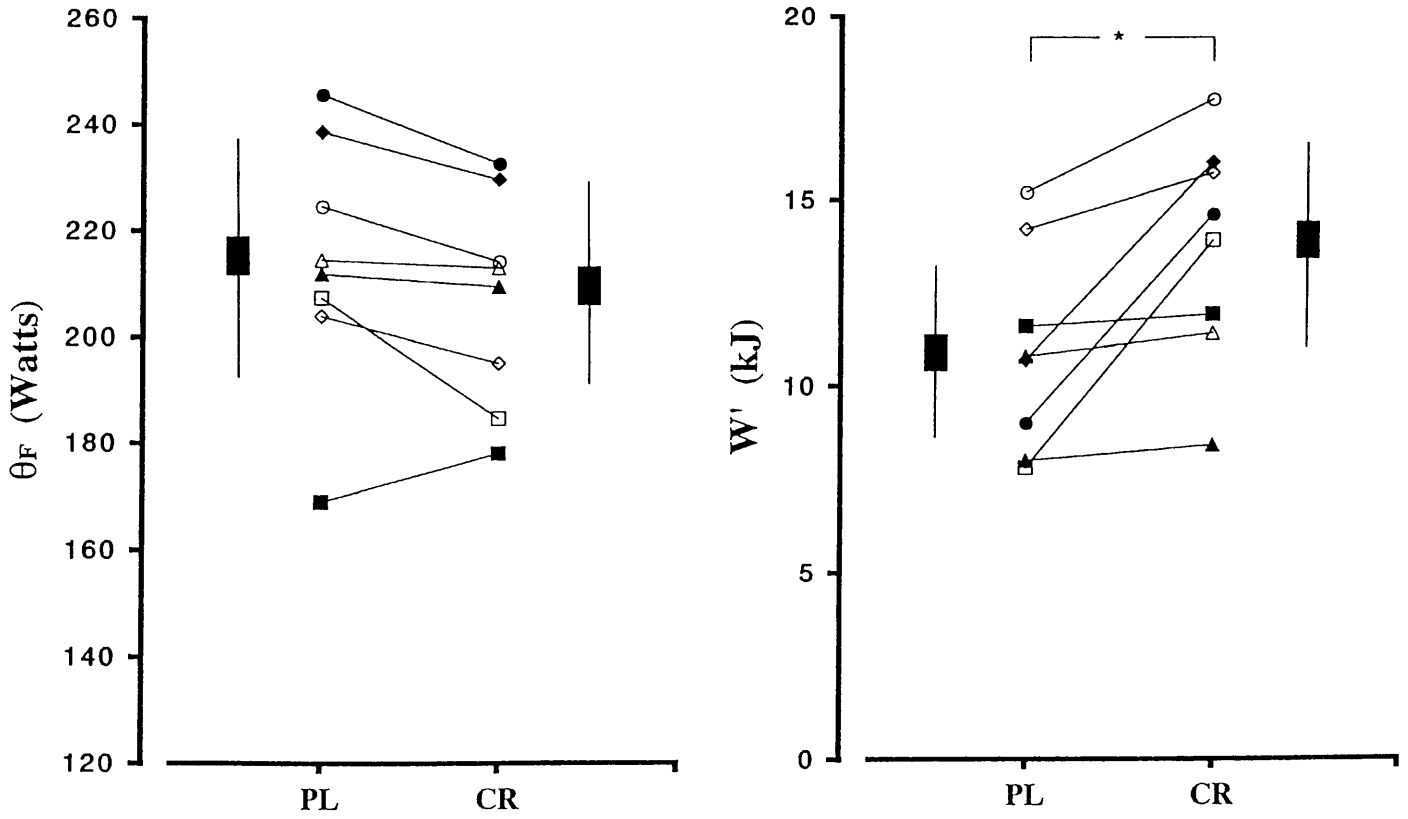


Fig. 4 Effects of Cr supplementation on θ_F and W' of the P-t hyperbolic curve.
* shows the significant difference between Cr supplementation (CR) and placebo (PL) conditions ($P<0.05$). Large closed circle with vertical bar indicates mean ± SD.

Table 2 The individual peak values of cardio-respiratory variables attained during four high-intensity exercise bouts under PL and CR 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.	**PL**	**CR**	**PL**	**CR**	**PL**	**CR**	**PL**	**CR**
1	113.3	144.7	4167	4337	3513	3743	167	165
2	107.5	141.3	3515	3243	2658	2947	184	174
3	109.5	129.7	3675	3598	3058	2975	175	178
4	128.5	121.0	3923	4380	3453	3783	161	184
5	110.5	122.3	3783	3685	2873	2830	177	177
6	121.0	125.0	3217	3337	2740	2620	174	177
7	133.0	121.0	4045	4030	3393	3245	181	168
8	123.3	115.0	3597	3520	3033	2933	170	162
mean	118.3	127.5	3740	3766	3090	3135	174	173
SD	9.5	10.5	307	435	330	425	7	7

PL: placebo supplementation, CR: creatine supplementation.

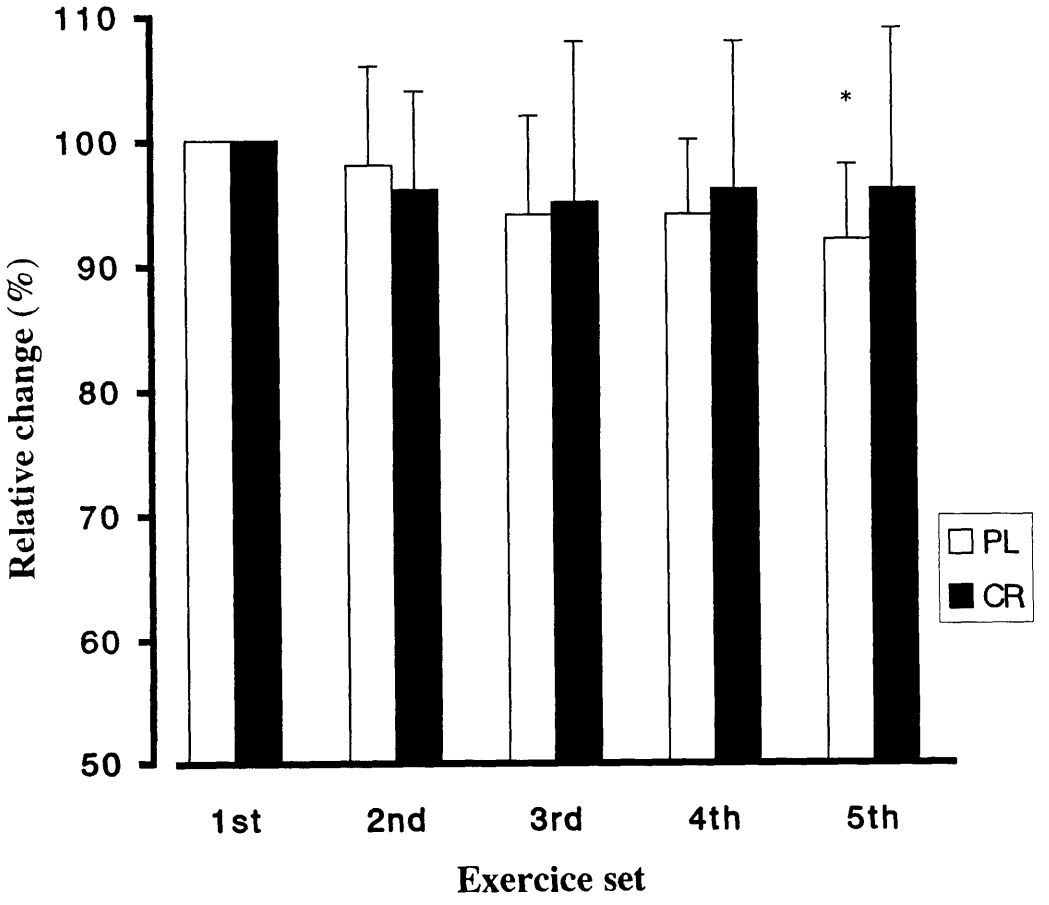


Fig. 5 Relative change of total muscle strength of repeated 30 times maximal isometric contractions for each set expressed as percent of 1st set for Cr supplementation (CR) and placebo (PL). Values are mean ± SD. * shows the significant difference between 1st and 5th set in PL conditions ($p<0.05$).

2－4　考察

θ_Fと W'の推定のために 4 回実施した高強度一定負荷運動での P-1/t は，PL および CR 両条件において有意な直線関係を示した．このことは両条件下において P-t 間に直角双曲線関係が成立していたことを意味する．

Cr 経口摂取による影響はθ_Fと W'で違っていた．すなわち，θ_Fは影響を受けなかったが，W'は有意に増加した．本研究を行うにあたっての仮説は，もしも PCr 含有量が W'に影響する要因のひとつであれば，Cr 摂取によって PCr が増大した条件下では W'は増加するというものであった．本研究の結果は，この仮説を支持したことになる．

近年，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り，W'の無酸素性作業能の指標としての可能性が示唆されるようになってきた（Whipp and Ward 1994 の総説を参照）．また，θ_F以下の低強度有酸素性トレーニングによって，W'の増加を伴わないθ_Fの増大が報告され（Gaesser and Willson 1988, Poole et al. 1988），さらに興味深いことに，高強度インターバルトレーニングによって，θ_Fの増大をともなわない W'の増加が報告された（Jenkins and Quigley 1993）．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が，W'の生理的規定要因は明らかにされておらず，いうなれば，間接的な状況証拠

の積み重ねであった．今回の結果は，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筋内 Cr と PCr，もしくはいずれか一方の含有量が，P-t 直角双曲線関係のカーブの膨らみを決める一定値パラメータ W'の規定要因であるということを明らかにしたことになり．このことによって，W'が無酸素性エネルギー供給機構と強い関連性があることを示すとともに，無酸素性作業能力の指標としての妥当性を支持することとなった．

CR および PL の両摂取条件下で行った 4 回の高強度一定負荷運動で到達した $\dot{V}O2$，$\dot{V}CO2$，$\dot{V}E$ といったガス交換諸量のピーク値や，HR のピーク値には，いずれも，両条件下で有意な差は認められなかった．このことにより，CR および PL 両条件下における高強度運動中の生理的負担度に著しい違いがなかったこと，いいかえると，両条件下共に類似した all-out に到達していたことが確認された．

5 日間の Cr の経口摂取が安静時の筋内 Cr および PCr の含有量を増加させた結果として，Cr/ATP 比を増加させることが報告されている（Harris et al. 1992, Odland et al. 1997）．本実験では，直接的に活動筋内の Cr や PCr を測定してはいないが，多くの先行研究が，本研究と同様の摂取法で Cr や PCr の増加を確認している（Harris et al. 1992, Greenhaff et al. 1993, Maughan 1995）．加えて，非侵襲的にではあるが，本実験で用いた Cr の経口摂取を行った際の大腿直筋内の PCr 量の変化を，^{31}P-MRS 法で測定し，本摂取法の妥当性を間接的ではあるが確認した．さらに，Greenhaff et al.（1993）は筋生検によって，本研究と同様の Cr 摂取法が，

筋内 Cr および PCr 含有量を増加させることを確かめ，同時に 5 日間の摂取前後で，連続 30 回，5 セットの脚伸展力の疲労曲線を検討し，Cr 摂取によって 30 回の筋力低下の度合いが低かったことを報告している．本研究でも彼らと同様の筋疲労曲線の検討を行い，間接的にではあるが本摂取法における妥当性を検討した．30 回連続の等尺性脚伸展力の低下を，1st セットの総筋出力を 100％として，その後の 2nd から 5th セットまでを評価したところ，PL 条件においては 1st セットと 5th セットの間に有意な低下が認められたが，CR 条件においては 1st から 5th セットまでに有意な差は検出されなかった．このことは，CR 条件では，作業筋内の Cr および PCr 含有量の増加が繰り返しの最大筋出力時のエネルギー供給に改善をもたらしたものと考えられ，本研究の被検者群において，Cr 経口摂取によって骨格筋内の PCr の増加は起こっていたものと考えられた．

多くの先行研究によって，健康な一般成人を対象とした，Cr 経口摂取による高強度運動時のパフォーマンスの改善が報告されている（Harris et al. 1992, Balsom et al. 1993, Greenhaff et al. 1993, 1994, Birch et al. 1994, Ernest et al. 1995, Maugham 1995, Odland et al. 1997）．しかしながら，William et al.（1995）は健康な一般成人を対象とした，高強度自転車運動中のパワーや疲労耐性に対して積極的な効果を見いだせなかったと報告している．本研究においても，全ての被検者における Cr 経口摂取による W'の増加率（(CR－PL)/PL）は 0.05～0.78 と広い範囲にあり，Cr 経口摂取によるパフォーマンスの改善に個人差が存在することを印象づけた．

Greenhaff et al.（1994）の研究によれば，Cr 経口摂取による筋内の PCr 濃度の上昇は，その被検者の総 Cr 量の飽和水準の上限によって規定されているとされている．さらに，Delanghe et al.（1989）によると，筋生検によって確かめられた Cr 経口摂取の効果は，菜食主義者においてより大きいという．すなわち，Cr 経口摂取の効果の大小は，各被検者の筋内 Cr の初期値に大きく依存し，そのことがその効果の個人差を生む要因となっている可能性がある．本研究の被検者群においても Cr 摂取前の筋内 PCr 量に何らかの理由で個人差が存在し，ある被検者においては Cr を摂取しても有意な PCr 増加に結びつかなかった可能性も否定できない．

本章の結果をまとめると次のようになる．すでに広く効果が認められているプロトコールに基づいた Cr 経口摂取は，P-t 直角双曲線関係から推定される W'における，θ_F の増加を伴わない有意な増加をもたらした．この結果は，筋内 Cr と PCr，もしくはいずれか一方の含有量は，P-t 直角双曲線関係から推定される，無酸素性エネルギーの容量側面を示すと考えられる W'の重要な規定要因であることを示唆している．