

自転車運動の効率とダグラスバック法を用いた 間接的熱量測定

－自転車運動時のペダル回転数の違いが運動の効率に及ぼす影響－

塩田正俊

The efficiency of cycling and the indirect calorimetric method using the Douglas bag
－The effect of pedaling frequency on cycling efficiency, fat and carbohydrate oxidation during
submaximal cycling exercise－

SHIOTA Masatoshi

(Received September 28, 2012)

Abstract

Purpose: This study was conducted to investigate whether the pedaling frequency at a constant mechanical power contributes to the cycling efficiency (η_{gross} and η_{net}), and the rate of fat and carbohydrate utilization during submaximal cycling exercise.

Methods: Healthy, recreationally active men ($n=11$) and women ($n=5$) cycled 5 min at workloads of about 54 watts at pedaling frequency of 45, 60 and 90 revolutions/min, respectively, and rested 3 min at approximately equal interval until the following step.

Results: Mean Gross Efficiency (η_{gross}) significantly decreased from $17.98 \pm 1.97\%$ and $16.77 \pm 0.94\%$, at 45 rpm and 60 rpm to $13.44 \pm 0.82\%$ at 90 rpm, and Net efficiency (η_{net}) similarly decreased from $25.60 \pm 4.75\%$ and $22.45 \pm 1.64\%$ at 45 rpm and 60 rpm to $16.97 \pm 1.33\%$ at 90rpm. Although the rate of fat oxidation was not changed in all pedaling frequency, the rate of carbohydrate oxidation gradually rose with increase in pedaling frequency, the rate of carbohydrate oxidation at 90 rpm significantly ($p < 0.05$) increased compared with these at 45 rpm and 60 rpm

Conclusion: These results in the practice biomechanics indicate that these values of η_{gross} and η_{net} indicated in this practice are consistent with those reported previously, and that the η_{gross} and η_{net} decrease and the rate of carbohydrate oxidation gradually increase, with increasing pedal frequency, respectively.

Key Words: pedaling frequency, gross efficiency, net efficiency, fat and carbohydrate oxidation

はじめに

バイオメカニクス実習において、「運動の効率」について実習している。運動を行ったとき発生した消費エネルギー全てが運動に利用されていると思いがちだが、実際には運動で利用されるエネルギー量はそれより少なく、効率 (η) という形で示すことができる。運動の効率を求めることは、運動時のエネルギー供給量 (E) と実際に運動で使用されたエネルギー量 (P: パワー発揮量) を求める必要があり、身体運動時のエネルギーの仕組みを体系的に理解するための基礎的な知識を与えることになる。

そこで、本実習の目的を「日常の生活の中で起こるヒトの身体活動や運動に伴うエネルギー現象を観察し、運動の基本的な法則とエネルギー発現の生化学・生力学的な基礎を理解する。運動の効率の実習を通じて、化学的なエネルギー量や運動エネルギー (パワー) 量などを求め、身体活動時のエネルギーの仕組みを体系的に理解する。」とした。

この実習では、ペダル回転数を変化させ、同じ仕事量 (外的パワー) の自転車運動を行った場合に、運動の効率がどのように変化するかについてレポートさせた。

以下に、実習の課題に沿ってレポートをまとめる。

課題1：実際に自分で求めた自転車運動の効率の妥当性について、これまでの報告と比較検討する。

課題2：ペダル回転数の変化に伴い自転車運動の効率はどのように変化したか、また、その原因は何かを検討する。

課題3：ペダル回転数の増加に伴い糖・脂質酸化量はどのように変化したか、その原因は何かを検討する。

1. 実習を行う上での基本的な知識

化学的エネルギーから機械的エネルギーの変換率は熱力学的効率 (Thermodynamic efficiency) として示されるが、身体運動ではエネルギー変換器である筋の変換効率を示す (深代ら, 2003)。この実習では、自転車運動時の酸素消費量から換算したエネルギー消費量と自転車運動で出力したパワーとの比率を筋の機械的効率 (η) とみなし、以下の式で算出させた。

$$\eta = (\text{出力パワー} / \text{エネルギー消費量}) \times 100 \quad (\%)$$

図1に、筋収縮全体の化学-機械エネルギーの変換過程について示した (Minetti, 2011; Whipp and Wasserman, 1969)。通常、我々の化学的エネルギーは、栄養基質と酸素を結合させ水と二酸化炭素へと分解する過程で産生される。化学的エネルギーで産生されたATP (アデノシン三リン酸) は加水分解により放出されたエネルギーにより筋の収縮が起こり、外的な負荷に対して身体がなした外的な仕事量 (Winter, 1979)、すなわち機械的パワーとして出力 (出力パワー) される。一方、利用されたATPを再補充するために糖質あるいは脂質を基質として酸化し、そこからATPを再合成する。

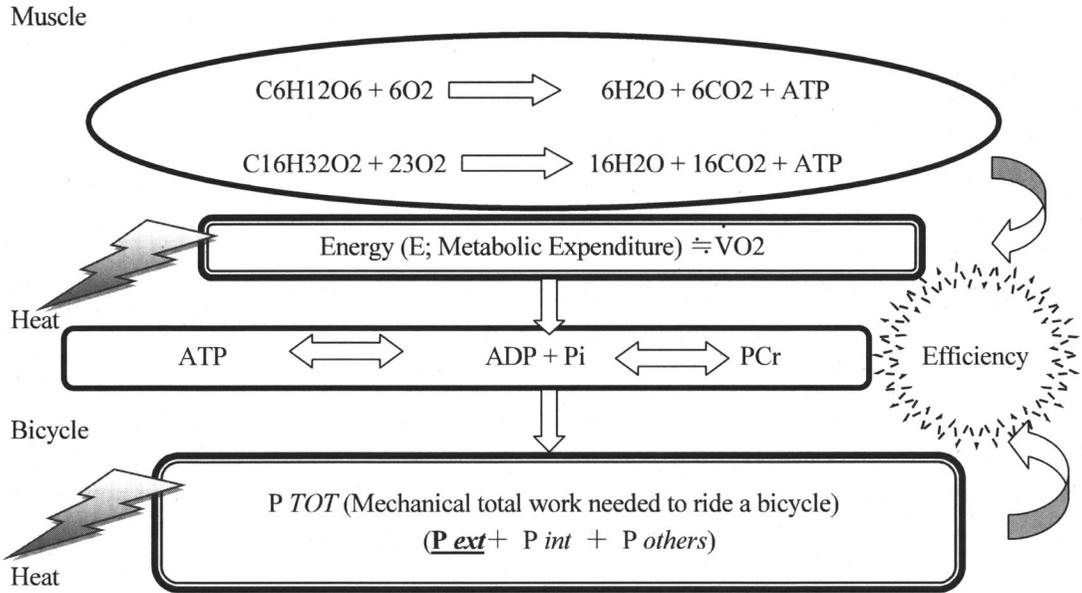


Figure. 1 Energy and efficiency processes. Mechanical efficiency during exercise in cycle-ergometer.

P_{ext}: Mechanical external work rate as imposed by a cycle-ergometer (W)

P_{int}: Mechanical internal work to accelerate the limbs during the pedaling cycle

P_{others}: Mechanical work of deformation of pedals during the push

実際には、安静時および運動時の酸素消費量から、安静時エネルギー量 (E_{rest})、運動時エネルギー量 (E_{total} = E_{rest} + E_{exercise}) として求める。また、自転車運動で出力された機械的パワーは、仕事量 (運動量 (kp/m/min) = 負荷重量 (kp) × 回転数 (rpm) × 6.12 (m/回転)) として求めることができる。それぞれワット (仕事率) などに換算し効率を求める。

2. 出力パワー (機械パワー) の評価

機械的パワー、いわゆる出力パワー (外的パワー; External power; P_{ext}) は上に述べたように仕事量 (W) として求めることができる。しかし、パワーは下記の式で示されるように力が0で無負荷の運動 (P_{ext} = 0) であっても筋は収縮・弛緩を繰り返す、エネルギーは消費される。

$$\text{パワー} = \text{力} \times \text{速度}$$

ここで消費されたエネルギーは四肢など作業筋自身によってなされた内的な仕事量 (Winter, 1979)、すなわち筋それ自体で生じるパワー出力で、内的パワー (Internal power; P_{int}) として定義される (深代ら, 2003)。すなわちP_{int}は、作業筋自身の運動であるため、P_{ext}出力を伴うかどうかにかかわらず、発生するパワーで、実際、無負荷の自転車運動 (P_{ext} = 0) では回転により筋の収縮・弛緩が起こり、エネルギーが消費される。一方、P_{ext}は身体の外に発揮されたパワーであり、本実習ではP_{ext}を機械的パワー (仕事量) とした (Minetti, 2011)。

その他、厳密にはペダリングのプッシュ時に生じるペダルのゆがみによるパワー発生など他のパワーの存在も知られるが、ここでは、外的パワーと酸素消費量から得られた運動時のエネルギー比から運動の効率（筋の機械的効率）として算出させた。

3. 運動の効率の評価

運動の効率 (η) は、ベースライン（消費エネルギー量）の捉え方によって異なる。最も基本的な η は、生体の全消費エネルギー量 (E_{total}) をベースラインとして、外的パワー (P_{ext}) との比を求めるもので、(1) 粗効率 (Gross efficiency; η_{gross}) と呼ばれている。次に、(2) 純効率 (Net efficiency; η_{net}) とは、全消費エネルギーから安静時の消費エネルギー (E_{rest}) を引いたエネルギー量 ($E_{total} - E_{rest}$) をベースラインとして、(3) 仕事効率 (η_{work}) は、全消費エネルギーから $P_{ext} = 0$ W の運動時の消費エネルギー ($E_{nonwork}$; $E_{unloaded pedaling}$) を差し引いたエネルギー量 ($E_{total} - E_{nonwork}$) をベースラインとして、それぞれ P_{ext} との比を求めるもので、それぞれ異なるベースラインを算出して運動時の η を評価する (Stainsby et al., 1980)。 η_{gross} 、 η_{net} および η_{work} の算出方法について下に示した。

$$\eta_{gross} = P_{ext} / E_{total} \times 100$$

$$\eta_{net} = P_{ext} / (E_{total} - E_{rest}) \times 100$$

$$\eta_{work} = P_{ext} / (E_{total} - E_{nonwork}) \times 100$$

この実習では、(1) 粗効率、(2) 純効率を求めさせた。

ところで、上に示した式からわかるように、各効率のベースラインとなる部分 (E_{total} など) は効率の捉え方によって変わり、その結果、効率自体も大きく異なってくる。さらに個々のベースラインについても、運動中の循環、体温、ホルモン動態の変化などにより代謝水準が変わる可能性があり (Stainsby et al., 1980)、必ずしも一様ではなく、また、効率を求める目的によってもベースラインの取り方が変わり、その評価は異なってくる。また、上述したように筋の仕事をパワーとして捉えた場合、自転車運動それ自体でなされた外的パワー (E_{ext}) の他に作業筋自身の収縮で生じる内的パワー (P_{int}) をどのように扱うかの問題がある。Kanekoら (1979) は、 P_{int} を含めた P_{total} から、真の効率 (η_{true}) を導き出している。本実習ではこの点については評価していないが、 P_{int} が加わることで当然の如く評価も変わってくる。これについては考察で述べたい。

4. 糖・脂質酸化の割合と酸化量の評価

糖および脂質の酸化率については、ダグラスバック法により酸素消費量 ($\dot{V}O_2$) 二酸化炭素排泄量 ($\dot{V}CO_2$) を求め、これらの値から、非タンパク呼吸商 (RQ) を求め (実際には、呼吸交換比: Respiratory exchangeable Ratio; RERとして求めさせ)、1 l の酸素に対する熱量 (kcal) を求めた。そこから同熱量に対する糖質および脂質の燃焼の割合 (%) を求めた。これらの値をもとに、実習において測定した安静時および運動時の $\dot{V}O_2$ から実際に消費された熱量 (E_{total} および E_{rest}) を算出し、これに先に求めた糖および脂質の燃焼の割合 ($\%E_{CHO}$ 、 $\%E_{fat}$) を乗じ、糖および脂質の酸化熱量 (E_{CHO} 、 E_{fat}) を算出した。また、この値から、糖質1 g当たり約4 kcal、脂質1 g当たり約9 kcalの熱量を発生するとし、それぞれの糖質および脂質酸化量を算出させた (伊藤と片桐、1972)。なお、運動時に利用されるタンパク質の量は僅かであり

(Blomstrand and Saltin、1999)、本実習でも運動時のタンパク質の酸化量は考慮せず、非タンパク呼吸商を元に糖質と脂質の酸化量について求めさせた。

方法

1. 対象学生

対象学生は、スポーツ健康科学コース3年生17名である。17名のうち男子学生9名、女子学生6名であった。この実習においては、運動負荷試験を行うことになるので、事前に体調、怪我などについて調べ、運動が無理な場合には測定者としてのみ参加することもある。

2. 実習方法

実習は、5～6名の3グループに分け、日を変えて全員が自転車エルゴメータによる運動を行った。

実習は、ダグラスバック法を用いた呼気ガス分析により、酸素消費エネルギーを求めた。

実習生は本日の実習内容の説明を理解したうえで、本実習を開始した。まず、椅座位安静を15分間以上保ち、安静状態とみなせた時点から5分間の呼気ガス採取を行った。呼気ガス採取4分目には心拍数(Cyteye社、Heartbeat counter PL-6000)を確認させた。安静時の測定終了後に、自転車エルゴメータ(Cyteye社、Cateye ergociser EC-1600)の座席の高さを調節し、メトロノームの電子音に合わせ45回転/分、60回転/分、90回転/分の順番でそれぞれ5分間の自転車運動を行った。各回転数での負荷重量は順に、1.2 kp、0.9 kp、0.6 kpであった。いずれも仕事量(外的パワー)としては330.48 kpm/min (54 W)であり、低負荷量で回転数の影響をみる運動条件であった。5分間の運動途中4分目に心拍数および主観的運動強度(Rating of Perceived Exertion; RPE)(小野寺と宮下、1976)を測定した。各回転数での自転車運動後には、運動後の心拍数が安静時心拍数近くまで低下したのを確認してから、次の回転数の運動に取り掛かった。このような方法で順次、被験者を変え安静時および自転車運動時の呼気ガス採取、心拍数測定およびRPEの測定を繰り返した。

呼気ガスの分析には、呼気ガス分析装置(Arco System社、O₂郎AR-1)を用い、酸素濃度(O₂)と二酸化炭素濃度(CO₂)を測定した。換気量の測定には乾式ガスメータ(品川精器社、CO₂ NDS-5A-T)を用い測定した。これらのデータから安静時および各回転数での運動時の酸素消費量を求めた。

3. 統計処理法

求めた各測定値はすべて平均値±標準偏差で示した。各回転数での自転車運動時の心拍数、RPE、酸素消費量、 η_{gross} および η_{net} などについては、運動時の測定値について一元配置分散分析法を用いて分析し、有意差が認められた場合には、Tukey-Kramer法を用いて各群間の有意差検定を行った。いずれも有意水準を危険率5%未満とした。

なお、この紙面では統計処理を行っているが、実際の実習では、統計処理法については3年後期に行うので、本実習ではこの統計処理法までは求めていない。

結果

1. 自転車運動の効率； η_{gross} と η_{net} の変化

図2に、回転数と η_{gross} と η_{net} との関係について示した。

H_{gross} と η_{net} ともペダル回転数の増加に伴い減少し、その関係は η_{gross} および η_{net} とも45 rpm > 60 rpm > 90 rpm順に低値となりであり、 η_{gross} の値は順に17.98±1.97%、16.77

$\pm 0.94\%$ 、 $13.44 \pm 0.82\%$ 、 η_{net} の値は順に $25.60 \pm 4.75\%$ 、 $22.45 \pm 1.64\%$ 、 $16.97 \pm 1.33\%$ であった。また、 η_{net} の値は η_{gross} の値よりいずれの回転数でも高い値を示した。

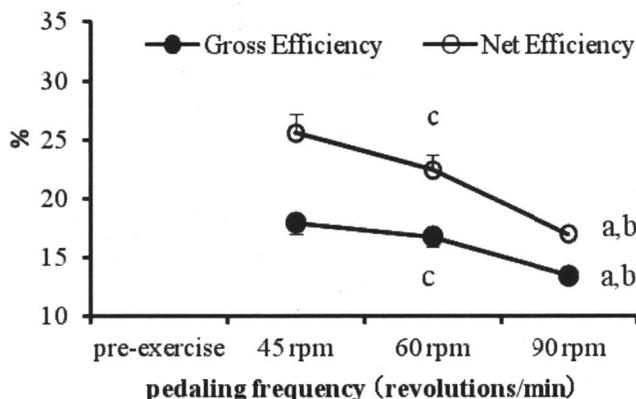


Figure 2. The effects of pedaling frequency on Gross efficiency (η_{gross}) and Net efficiency (η_{net}), during submaximal cycling
 One-way analysis of variance, η_{gross} : $p < 0.0001$, η_{net} : $P < 0.0001$
 post-hoc test, a: $p < 0.05$ vs. 45 rpm, b: $p < 0.05$ vs. 60 rpm.

2. 運動前および運動時の心拍数、酸素消費量 ($\dot{V}O_2$) および二酸化炭素排泄量 ($\dot{V}CO_2$) の変化と運動時RPEの変化

図3に、運動前および運動時の心拍数、 $\dot{V}O_2$ および $\dot{V}CO_2$ の変化と運動時RPEの変化について示した。

自転車運動時のHRは、90 rpmでのHRが45 rpmおよび60 rpmでのHRより有意に高い値を示した、しかし、45 rpmと60 rpmでの自転車運動時のHRには有意差は見られなかった。

自転車運動時のRPEは、90 rpmのRPEが45 rpmでのRPEに比べ有意に高値であった。

自転車運動時の $\dot{V}O_2$ および $\dot{V}CO_2$ は、いずれも90 rpmの測定値が60 rpmおよび45 rpmでの測定値より、有意に高くなったが、45 rpmと60 rpmでの自転車運動時の $\dot{V}O_2$ および $\dot{V}CO_2$ にはいずれも有意差は見られなかった。

3. 安静時および運動時のエネルギー消費量、呼吸交換比 (Respiratory exchangeable ratio; RER)、脂質・糖質の酸化の割合 (%E_{CHO}、%E_{fat}) および糖・脂質酸化量 (E_{CHO}、E_{fat}) の変化図4に、安静時および運動時のエネルギー消費量、RER、%E_{CHO}と%E_{fat}およびE_{CHO}とE_{fat}の変化について示した。

自転車運動時の消費エネルギー量 (E_{total}およびE_{rest}) は、E_{rest}が 1.16 ± 0.20 kcal/minであり、自転車運動時E_{total}は45 rpm、60 rpmおよび90 rpmにおいて順に、 4.34 ± 0.40 、 4.62 ± 0.27 、 5.77 ± 0.36 kcal/minであり、90 rpmのE_{total}が45 rpmおよび60 rpmのそれらより有意に高値を示した。

自転車運動時のRERは、45 rpm、60 rpmおよび90 rpmの平均値において0.83~0.88 (個人のRERの範囲: 0.75~0.92) の範囲であり、運動前RER (0.83 ± 0.05) とほぼ同様な値であったが、90 rpmでのRERは45 rpmのRERに比べ有意に高かった。

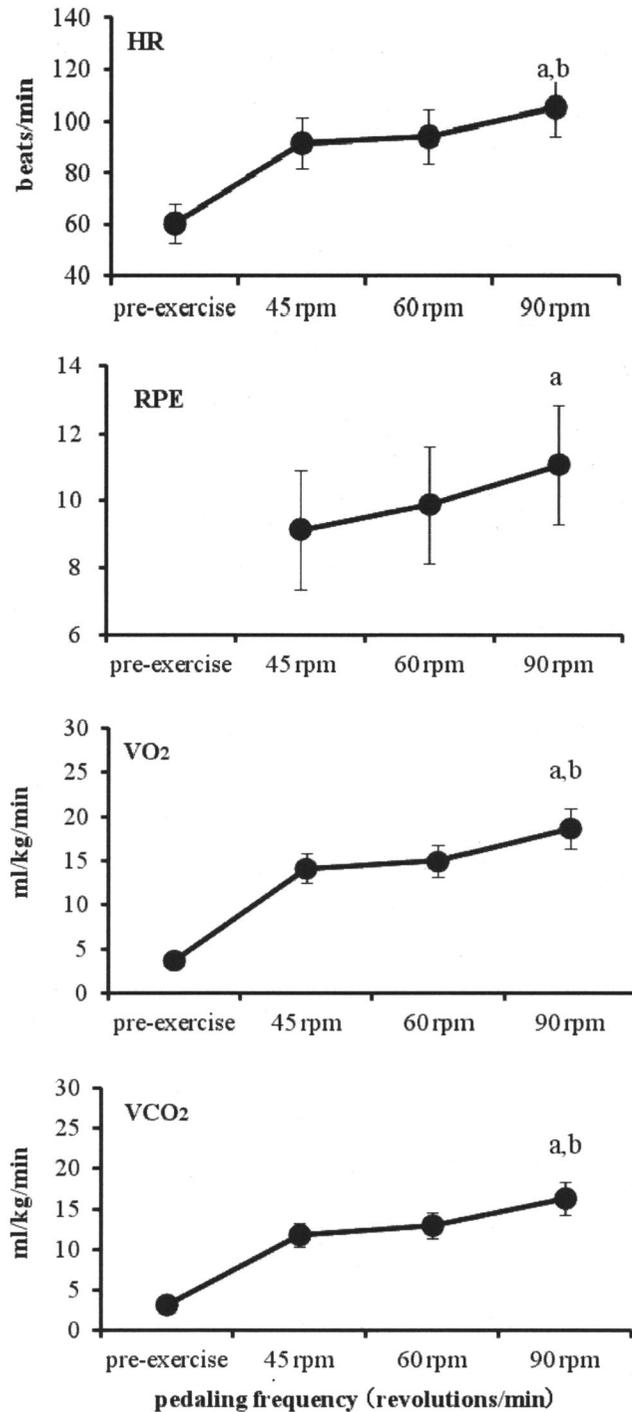


Figure 3. The effects of pedaling frequency on cycling HR, RPE, VO₂ and VCO₂ during submaximal cycling exercise

One-way analysis of variance, HR: $p < 0.01$, RPE: $p < 0.05$, VO₂: $p < 0.0001$, VCO₂: $p < 0.0001$. post-hoc test, a: $p < 0.05$ vs. 45 rpm, b: $p < 0.05$ vs. 60 rpm

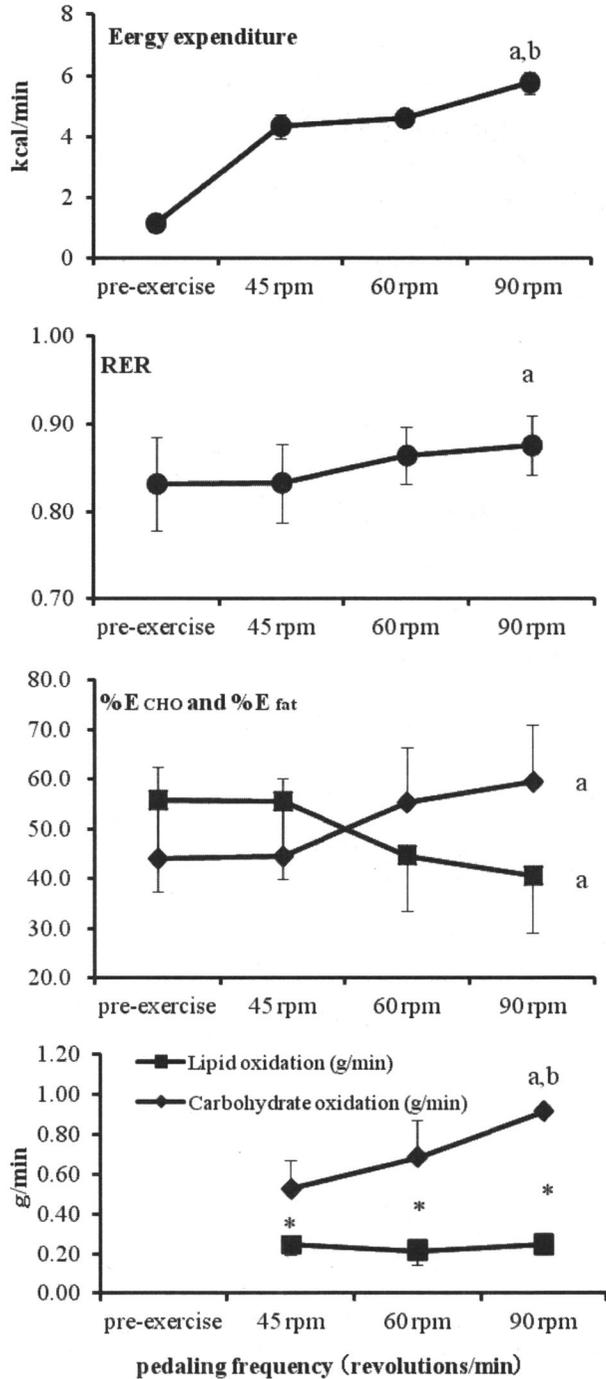


Figure 4. The effects of pedaling frequency on cycling energy expenditure (EE), RER, and %E CHO and %E fat, and E CHO and E fat during submaximal cycling exercise

One-way analysis of variance, EE: $p < 0.0001$, RER: $P < 0.01$, %E fat: NS and %E CHO: $p < 0.001$, E fat: NS and E CHO: $p < 0.001$.

自転車運動時の各回転数における熱量に対する糖・脂質燃焼の割合は、%E_{CHO}が順に44.6±15.6%、55.4±11.0%および59.5±11.5%であり、回転数の増加に伴い徐々に増加し、90 rpmの%E_{CHO}が45 rpmでのそれに比べ有意に高値であった。一方、%E_{fat}では順に55.5±15.6%から44.6±11.0%、40.6±11.5%と徐々に低下し、45 rpmでの%E_{fat}が90 rpmでのそれに比べ有意に低い値であった。自転車運動時のE_{CHO}はペダル回転数の増加に伴い上昇し(45 rpm: 0.525±0.201 g/min、60 rpm: 0.684±0.148 g/min、90 rpm: 0.914±0.185 g/min)、45 rpmおよび60 rpmでのE_{CHO}に比べ90 rpmのE_{CHO}は有意に高値を示した。しかし、E_{fat}は順に45 rpm: 0.248±0.061 g/min、60 rpm: 0.215±0.051 g/min、90 rpm: 0.244±0.071 g/minであり、いずれの回転数でもほぼ同水準を維持した。

考察

本実習の結果から、(1) η grossおよび η netは、45 rpm、60 rpmおよび90 rpmのペダル回転数において、順に η grossの値は17.98±1.97%、16.77±0.94%、13.44±0.82%、 η netの値は順に25.60±4.75%、22.45±1.64%、16.97±1.33%であった。また、(2) η grossおよび η netは回転数の増加に伴い有意(p<0.05)に低下し、 η grossおよび η netいずれにおいても45 rpmでの自転車運動の効率に比べ60 rpmでの効率が、さらに45 rpmおよび60 rpmでの自転車運動時の効率に比べ90 rpmでの効率は有意に低下した。(3) 各回転数での自転車運動時の糖および脂質酸化量は、脂質酸化量についてはペダル回転数の増加に伴う変化は見られなかったが、糖質酸化量については、回転数の増加に伴い有意に増加し(p<0.05)、90 rpmでの糖酸化量が、50 rpmおよび60 rpmでの糖酸化量に比べ有意に高値であった。

以上の結果から、 η grossおよび η netは回転数の増加に伴い低下すること、その低下の原因として、脂質の酸化量に変化はないが、ペダル回転数の増加に伴い糖質の利用が増大し、結果的にベースラインとしてのエネルギー消費量が増大し、運動の効率が低下したと考えられた。

以下に課題1～3について考察する。

1. 本実習で求めた η grossおよび η netの妥当性

本実習で求めた η grossの平均値の範囲は13.44～17.98%であり、 η grossの値は順に17.98±1.97%、16.77±0.94%、13.44±0.82%、 η netの平均値の範囲は16.97～25.60%であった。Böningら(1984)は40、60、70、80および100 rpmのペダル回転数で50 W、100 Wおよび200 Wの仕事率(量)の時の効率について求め、 η grossの効率の範囲は約10～22%で、 η netについては13～27%の範囲にあり、いずれも仕事率(W)が大きくなればなるほど効率が高くなることを示した。本実習での仕事率(W; P_{ext})は約54 Wであり、この仕事率(50 W)でのBöningらの η grossおよび η netの範囲は順に、10～16.5%、13～26.5%であり、本実習の結果とほぼ一致した。また、HansenとSjøgaard(2007)は低P_{ext}および中等度のP_{ext}での η grossの平均値は、61 rpm、88 rpmおよび115 rpmの順に、低P_{ext}で20.2、18.5および15.2%、中等度のP_{ext}で21.9、21.4および18.3%といずれの強度でも回転数の増加に伴い低下することを報告している。ChavarrenとCalbet(1999)は、自転車運動における η grossの平均値の範囲は13～20%、Sidossisら(1992)は、自転車運動での η grossの平均値の範囲が18.5～21.5%であったことを示しており、実施したペダル回転数および仕事率は異なっていたが、本実習で求めた η grossおよび η netは、これまでの報告とほぼ一致しており、実習自体は正確に行われていたと評価できる。

2. なぜ、ペダル回転数の増加に伴い自転車運動の効率は低下したのか？

Böningら (1984) は、100 Wおよび200 Wにおける自転車運動において最も効率のよいペダル回転数は60~70 rpmであり、それ以上、回転数が遅くても速くても効率は低下することを示している。本実習においても60 rpmのペダル回転数の時に最も効率が良くなると考え、45 rpm、60 rpmおよび90 rpmの回転数を設定したが、この目論みは見事に外れた。本実習における η_{gross} および η_{net} は、ペダル回転数の増加に伴い低下した。なぜこのような結果が生じたのか？

本実習の結果については、Böningらの50 Wでの自転車運動の効率が同様な結果を示している。すなわち、50 Wの自転車運動では、40 rpmにおける回転数で最も効率が良く、それ以上の回転数での効率は低下するという結果であった。ペダル回転数の増加に伴い自転車運動の効率が低下するという結果は、ChavarrenとCalbetおよびSidossisらの報告にも見られ、その傾向は低い運動強度ほどペダル回転数の増加に伴い低下する範囲が広くなり、運動強度の上昇に伴い効率低下の範囲は狭くなる傾向を示している。

本実習の結果とこれらの報告から、ペダル回転数の増加に伴い自転車運動の効率は低下するが、これには運動強度（仕事率）が関係し、50~60 W程度の低い運動強度の時にその傾向が表れることが明らかになった。また、それ以上の運動強度での自転車運動における最も良い効率のペダル回転数は60~70 rpmであることが分かった、ことなどが考察として上げることができる。

では本題に戻って、なぜ、ペダル回転数の変化に伴い自転車運動の効率は低下したのか。本実習では、自転車運動の仕事量 (P_{ext}) は54 Wと一定であり、 P_{ext} 以外に原因があることが分かる。その原因（手がかり）の一つに、回転数の増加に伴う $\dot{V}O_2$ および E_{total} の上昇が挙げられ、いずれも45 rpmをベースラインとして、そこからの上昇量あるいは低下量 (Δ) として求めた $\Delta\eta_{gross}$ および $\Delta\eta_{net}$ は、同様にして求めた $\Delta\dot{V}O_2$ および ΔE_{total} との相関関係において、 $\Delta\eta_{gross}$ と $\Delta\dot{V}O_2$ および ΔE_{total} との相関関係は順に、 $r=-0.971$ 、 $r=-0.943$ 、 $\Delta\eta_{net}$ と $\Delta\dot{V}O_2$ および ΔE_{total} との相関関係は順に、 $r=-0.729$ 、 $r=-0.713$ といずれも有意 ($p<0.05$) に高い相関関係を示した。したがって、ペダル回転数の増加は P_{ext} 以外に $\dot{V}O_2$ あるいは E_{total} を増加させた原因を考える必要がある。その一つは P_{int} の存在であるが、ここでは P_{int} については想定しておらず、他の原因を考える必要がある (P_{int} については後述する)。他の一つは回転数の増加に伴う身体重心のずれであり、他の身体部位の無駄な動きである。他の一つは、ペダル回転数の増加に伴い動員される筋線維タイプに違いがあったことが考えられる。

3. なぜ、ペダル回転数の増加に伴い糖質酸化量が増加したのか？

回転数が速くなると脚の動きとともに上体が左右上下に僅かながら動くことがある。それと同時に、上肢が下肢の動きに合わせて必要以上に動くことがある。これらの動きはスポーツという効率を低下させる原因となるものと考えられる。しかし、自転車運動のこれらについての詳細な記載をした文献はない。これについてはカメラ撮影などを行い、身体各部位を剛体として捉えその重心の変動から運動量として捉える必要があると思われる。

次は、ペダル回転数の増加に伴い動員される筋線維タイプの違いについてである。ヒトの筋線維はType I とType II に、Type II はさらにType II aとType II bに分けられる。Type I は、収縮速度が遅いが持久性に優れ、酸化能力が高く有酸素性エネルギー供給機構を利用することから、遅筋線維と呼ばれる。一方、Type II b はいわゆる速筋線維で、収縮速度が速く発揮筋力は

強いが疲労しやすい。無産生エネルギー供給機構を利用している。Type II aは、収縮速度が速く持久性にも優れ、有酸素性エネルギー供給機構、解糖系およびPcr系による無酸素性エネルギー供給能力に優れた遅筋線維と速筋線維との性質を兼ね備えている（宮下と石井、2009）。筋線維にはエネルギー効率のよい繊維と悪い繊維があり、遅筋線維と呼ばれるType I 線維の動員数が多いほど効率は高くなり（Coyleら、1992）、しかし、速筋線維であるType II 線維が動員されるのは発揮筋力が強く、収縮速度が速いときであり、Type I 線維に比べエネルギーの効率が悪い（Hanら、2001）。

これらのことから、ペダル回転数の増加に伴い動員された筋線維タイプの割合が、低い回転数、45 rpmではType I 線維が主でエネルギーの効率が良く、そのときに利用された糖・脂質燃焼の割合は約44対56%であったのに対し、60 rpmでは55対45%、90 rpmでは59対41%と逆転してくる。また、45、60および90 rpmの回転数の平均脂質酸化量が0.25、0.21、0.24 g/minと大きな変化がなかったのに対し、平均糖質酸化量は0.52、0.68、0.91 g/minと徐々に増加してきており、回転数の増加に伴い筋収縮速度は高まり、エネルギー効率の悪いType II 線維が動員され、そのため解糖系によるエネルギー利用が高まり、糖酸化量が増加してきたと考えられる。

4. 総パワー (P_{tot})、外的パワー (P_{ext}) および内的パワー (P_{int}) の関係

図5に、自転車運動時の総パワー、外的パワーおよび内的パワーの関係について示した。

本実習では、実際に出力した外的パワー (P_{ext}) から運動の効率を算出したが、内的パワー (P_{int}) を加えた総パワー (P_{total}) と全消費エネルギー (E_{total}) から効率を考えることもできる。すなわち、筋それ自体が発生させたエネルギー量をも含めて総運動量 (P_{total}) として運動の効率を算出しようとする考え方である。Kanekoら (1979) は、カメラ撮影により下肢の運動時の変化から実際の P_{int} を算出し、真の効率 (η_{true}) を次の式から算出した。

$$\eta_{true} = (P_{ext} + P_{int}) / (E_{total} - E_{rest})$$

本実習では、 P_{int} を Minettiら (2002) の報告に基づき次式から算出した。その結果、 P_{ext} は54 Wで一定であるが、 P_{int} は回転数の増加に伴い 4.1 ± 0.5 W、 9.8 ± 1.2 W、 33.0 ± 4.1 Wと増加し、とくに90 rpmでは約8倍の急激な増加を示した (図5)。

$$P_{int} \text{ (W)} = 0.153 \times \text{BM} \times f^3 \quad f: \text{ペダル周波数 (Hz)}$$

この P_{int} を用いて、 η_{true} を算出した結果、45 rpmで $26.63 \pm 3.88\%$ 、60 rpmで $26.54 \pm 2.06\%$ 、90 rpmで $27.22 \pm 2.44\%$ となり、いずれの回転数でも差はなくなった。Kanekoらが報告では、 η_{true} は25.1~32.4%の範囲にあり、そのときの η_{net} は20~27%の範囲であった。本実習で求めた η_{net} の値の範囲は17~26%であり、ほぼKanekoらの効率の値と一致した。また、HnsenとSjøgaard (2007) は、ペダル回転数61 rpm、81 rpmおよび115 rpmで、40% $\dot{V}O_{2max}$ および70% $\dot{V}O_{2max}$ 強度の運動を実施し、筋の機械的効率を求めている。その結果、 η_{true} は順に低強度で24.8~26.6%、中等度の強度で24.9~26.9%の範囲であり、同時に求めた η_{gross} の範囲は低強度で20.2~15.2%、中等度の強度で21.9~18.3%の範囲であったと報告している。本実習で求めた η_{gross} の値の範囲は17.98~13.44%であった。

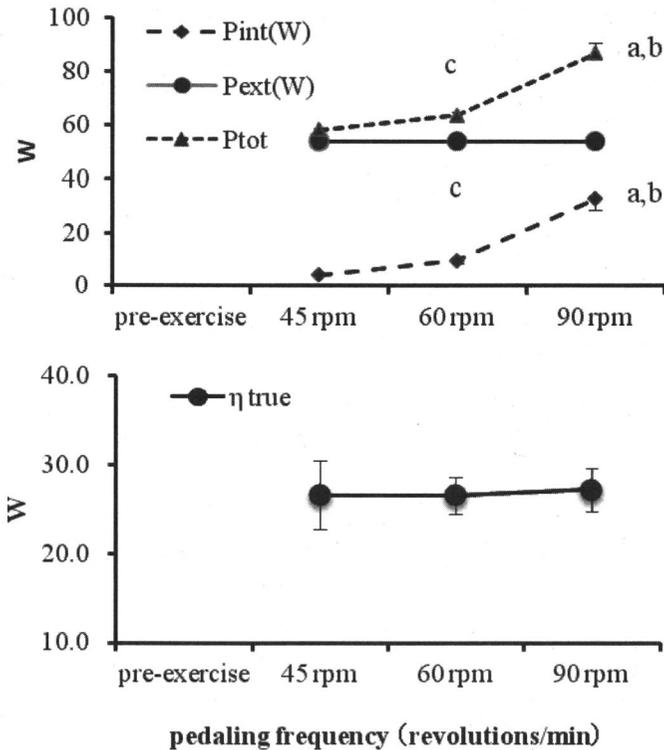


Figure 5. The effects of pedaling frequency on P_{tot}, P_{ext}, P_{int} and η_{true} during submaximal cycling

$$\eta_{true} = (P_{int} + P_{out}) / (E_{exercise} - E_{rest})$$

One-way analysis of variance, P_{tot}: p<0.0001, P_{ext}: NS,

P_{int}: p<0.0001, η_{true}: NS.

post-hoc test, a: p<0.05 vs. 45 rpm, b: p<0.05 vs. 60 rpm,

c: p<0.05 vs. 45 rpm.

本実習の結果とHansenとSjøgaardの結果から、ほぼ同じ運動強度であればη_{true}はほぼ同じ水準(本実習のη_{true}は26.5~27.2%、HansenとSjøgaardの報告したη_{true}は24.8~26.9%)にあり、ペダル回転数の影響は受けないことが分る。また、その時のη_{net}およびη_{gross}はペダル回転数の影響を受け、回転数の増加に伴い低下することが分る。

このように、運動の効率の求め方には種々あり、求め方によって運動の効率はペダル回転数の影響を受けることが分る。Hansenら(2004)は、4名の研究者のP_{int}算出モデルを参考に、ペダル回転数を61 rpm、81 rpmおよび115 rpmに設定し、40% $\dot{V}O_2$ maxおよび70% $\dot{V}O_2$ max強度の運動を実施し、比較検討した。その結果、いずれのモデルでもP_{int}はペダル回転数が90 rpmを超えるあたりから、急激に増加する傾向を示したと報告している。この結果は、本実習の結果とほぼ同様であった。また、4名のP_{int}モデルのうち、本実習と最も近い値を示した

のはWinterモデルのものであり、61 rpmで約6.8~8.6W、88 rpmで28.8~29.9W、115rpmでは76.2~84.3Wを示し、本実習で求めた60 rpmおよび90 rpmのP *int*の値（45 rpmで4.1±0.5W、60 rpmで9.8±1.2W、90 rpmで33.0±4.1W）とほぼ同様であった。なお、本実習のP *int*はMinettiら（2002）の計算モデルから算出している。

運動の効率（ η ）は、実際に出力した外的パワー（P *ext*）から算出した方が理解しやすい面があるが、内的パワー（P *int*）を加えた総パワー（P *total*）から求められる η *true*は筋それ自体がなした仕事量を反映しており、筋の機械的効率を評価するうえでは重要な考え方を示している。

要約

(1) η *gross*および η *net*は、45 rpm、60 rpmおよび90 rpmのペダル回転数において、順に η *gross*の値は17.98±1.97%、16.77±0.94%、13.44±0.82%、 η *net*の値は順に25.60±4.75%、22.45±1.64%、16.97±1.33%を示した。

(2) η *gross*および η *net*は回転数の増加に伴い有意（ $p<0.05$ ）に低下し、 η *gross*および η *net*いずれにおいても45 rpmでの自転車運動の効率に比べ60 rpmでの効率が、さらに45 rpmおよび60 rpmでの自転車運動時の効率に比べ90 rpmでの効率は有意に低下した。

(3) 各回転数での自転車運動時の糖および脂質酸化量は、脂質酸化量についてはペダル回転数の増加に伴う変化は見られなかったが、糖質酸化量については、回転数の増加に伴い有意に増加し（ $p<0.05$ ）、90 rpmでの糖酸化量が、50 rpmおよび60 rpmでの糖酸化量に比べ有意に高値であった。

以上の結果から、本実習においては η *gross*および η *net*はこれまでの報告とほぼ一致する値が示された。また、 η *gross*および η *net*は回転数の増加に伴い低下すること、ペダル回転数の増加に伴い糖質酸化量が増大すること、などが明らかとなった。

ペダル回転数の増加に伴い糖質酸化量が増大する原因として、筋線維タイプの動員率が関係し、比較的ゆっくりした低い回転数ではType I線維が主に動員され、有酸素的な過程からのエネルギーが利用されたと考えられ、一方、回転数が速くなるに従い速筋線維であるType II線維が多く動員され、解糖系を中心とした無酸素的な過程からのエネルギーが利用増大し、運動の効率が低下したと考えられた。

謝辞

本実習を遂行するに当たり、平成24年度 学部長裁量経費（設備更新）「ダグラスバック採取用品」の補助を得た。記してお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Blomstrand E and Saltin B: Effect of muscle glycogen on glucose, lactate and amino acid metabolism during exercise and recovery in human subjects. *Journal of Physiology* 514: 293-302, 1999
- 2) Böning D, Gönen Y and Maassen N: Relationship between work load, pedal frequency, and physical fitness. *Int J Sports Med* 5:92-97, 1984
- 3) Chavarren J and Calbet JAL: Cycling efficiency and pedaling frequency in roadcyclists. *Eur T Appl Physiol* 80: 555-563, 1999

- 4) Coyle EF, Sidossis LS, Horowitz JF and Beltz JD: Cycling efficiency is related to the percentage of type I muscle fibers. *Med Sci Sports Exerc* 24: 782-788, 1992
- 5) 深代千之、桜井伸字二、平野裕一、阿江通良: スポーツバイオメカニクス. 朝倉書店、東京、初版第3刷、pp123~126、2003
- 6) Hansen E and Sjøgaard G: Relationship between efficiency and pedal rate in cycling: significance of internal power and muscle fiber type composition. *Scand J Med Sci Sports* 17: 408-414, 2007
- 7) Han Y-S, Proctor DN, Geiger PC, and Sieck GC: Reserve capacity for ATP consumption during isometric contraction in human skeletal muscle fibers. *J Appl Physiol* 90: 657-664, 2001
- 8) 伊藤寛志、片桐鎮夫: 図解 臨床生理検査の実技. 医学書院、東京、第1版1刷、pp1~4、1972
- 9) Kaneko M, Yamazaki T and Toyooka J: Direct determination of the internal mechanical work and the efficiency in bicycle pedaling. *J Physiol Sci Japan* 41: 68-69, 1979
- 10) Minetti AE: Bioenergetics and biomechanics of cycling: the role of 'internal work'. *Eur J Appl Physiol* 111: 323-329, 2011
- 11) Minetti AE, Pinkerton J and Zamparo P: From bipedalism to bicyclism: evolution in energetic and biomechanics of historic bicycles. *Pro R Sci Lond B* 268: 1351-1360, 2001
- 12) 宮下充正、石井喜八編著: 新訂 運動生理学概論. 大修館書店、東京、第26刷、pp 58-62、2009
- 13) 小野寺孝一、宮下充正: 全身持久性運動における主観的強度と客観的強度の対応性. *体育学研究* 21: 191-203、1976
- 14) Sidossis LS, Horowitz JF and Coyle EF: Load and velocity of contraction influence gross and delta mechanical efficiency. *Int J Sports Med* 13:407-411, 1992
- 15) Stainsby WN, Gladden LB, Barclay JK: Exercise efficiency: validity of base-line subtractions. *J Appl Physiol* 48: 518-522, 1980
- 16) Winter DA: A new definition of mechanical work done in human movement. *J Appl Physiol* 46: 79-83, 1979
- 17) Whipp BJ and Wasserman K: Efficiency of muscular work. *J Appl Physiol* 26: 644-648, 1969

List of abbreviations (略記号)

ADP: adenosine diphosphate アデノシン二リン酸

ATP: adenosine triphosphate アデノシン三リン酸

BM: body mass; kg 体重

CO₂: carbon dioxide ・ 二酸化炭素 ・

CON: concentric contraction 短縮性筋収縮

E *ana*: anaerobic energy expenditure 無酸素性エネルギー消費量

E *aro*: aerobic energy expenditure 有酸素性エネルギー消費量

ECC: eccentric contraction 伸張性筋収縮

E *exercise*: energy expenditure for exercise 運動のためのエネルギー消費量 (安静時から運動時へのエネルギーの増加分とした)

E *nonwork*: energy expenditure during nonwork $P_{ext} = 0$ 運動時エネルギー消費量

EP: phosphorylative coupling efficiency 燐酸化連関過程の効率

E *rest*: energy expenditure at resting state 安静時エネルギー消費量

E *total*: total energy expenditure 総エネルギー消費量

ε : thermodynamic efficiency 熱力学的効率 (理想状態における最大有効仕事に対する現実になされた仕事の割合)

f: pedal frequency; Hz ペダル周波数

η (イータ): muscular efficiency 筋の機械的効率 (本研究では、E *total* に対するP *ext* の割合として定義した)

η *gross*: gross efficiency (E *total* に対するP *ext* の割合から評価する効率値)

η *net*: net efficiency (E *exc* (E *total* - E *rest*) に対するP *ext* の割合から評価する効率値)

η *true*: true efficiency (E *exc* に対するP *total* (P *ext* + P *int*) の割合から評価する効率値)

η *work*: work efficiency {(E *total*-E *nonwork*) に対するP *ext* の割合から評価する効率値)

Kp: kilopond キロポンド {1 kp とは正常な重力加速度下において1 kg の質量に加わる力 (1 kp = 9.80665 N)}

[La]b: whole blood lactate concentration 血中乳酸濃度

[La]m: muscle lactate concentration 筋乳酸濃度

LT: lactate threshold 乳酸性閾値

MVC: maximal voluntary contraction 最大随意収縮

O₂: oxygen 酸素

OE: oxygen energy equivalent; J · ℓ⁻¹ 酸素当量

PCr: phosphocreatine クレアチン燐酸

P *ext*: external power 外的パワー

P *int*: internal power 内的パワー

P *tot*: total power 総パワー

R (RER) : respiratory exchangeable ratio 呼吸交換比 ($\dot{V}CO_2/\dot{V}O_2$)

$\dot{V}CO_2$: carbon dioxide output; m ℓ · min⁻¹ 二酸化炭素排出量

$\dot{V}E$: ventilatory volume; ℓ · min⁻¹ 換気量

$\dot{V}O_2$: oxygen uptake; m ℓ · min⁻¹ 酸素摂取量

$\dot{V}O_{2max}$: maximal oxygen uptake 最大酸素摂取量

VT: ventilatory threshold 換気性閾値