

自転車エルゴメータ駆動時の負荷が
力効率指数に及ぼす影響

星川 秀利 玉木 啓一

The effect of exercise intensity during bicycle ergometer
cycling on indices of effectiveness

Hidetoshi HOSHIKAWA Keiichi TAMAKI

Abstract

The purpose of this study was to investigate the effect of exercise intensity on index of effectiveness (IE) during bicycle ergometer cycling. Four healthy males and one experienced cyclist performed incremental exercise on an electrically braked cycle ergometer. For measuring crank angle, pedal forces and pedal angles, rotary encoders and tri-axis force sensors were mounted on the ergometer. The resultant pedal force (FR) and the force perpendicular component of the crank (FE) were calculated. IE was calculated from the ratio of FE to FR. The work load was increased 20 W every 15 sec until they could not maintain pedalling at 90 rpm.

As exercise intensity was increased, IE during whole one cycle (0~360 deg ; tIE) and up phase (180~360 deg ; uIE) increased lineary, and IE during down phase (0~180 deg ; dIE) increased logarithmically. IE's at 50% of maximal work rate in the experienced cyclist were higher than other subjects. This result suggested that IE should be evaluated by relative work load.

キーワード：力効率指数、スキル、自転車運動

目 的

自転車駆動において、筋収縮により発揮された力を無駄なくペダル回転の力に変換することは、高いパフォーマンスを達成するために重要であると考えられる。つまり、力の変換効率が良いことは、短距離種目ではより大きな力をペダル回転として利用でき、また長距離種目ではエネルギーの損失を少なくできるものと考えられる。

この力の変換効率を示すものとして、LafortuneとCavanagh (1980)⁴⁾は、力効率指数を算出し、自転車駆動のスキル指標として提案した。ここで力効率指数は、ペダルに加えた力のうちの、自転車を駆動するために有効に用いられた力の割

合として定義される。

ところが、これまでにIEが負荷強度によって影響されることが示されてきた。^{3,5,6)} 力効率指数がスキルの指数として確立されるためには、これらの要因に一定の基準を設ける必要があろう。しかしながら、負荷強度の影響は十分に検討されておらず、これまでの研究は、ある限られた範囲の負荷でしかIEが算出されていない。負荷強度に一定基準を設けるには、軽い負荷から疲労困憊の強度まで、広範囲の負荷強度について、力効率指数の動態を検討する必要がある。

そこで本研究では、漸増負荷自転車エルゴメータ駆動中の力効率指数に及ぼす負荷の影響を検討することを目的とした。

方 法

被験者は、健常男性5名であった。彼らの年齢及び身体特性を表1に示した。被験者Dは大学自転車部員であり、自転車駆動には熟達した者であった。被験者には、あらかじめ実験の目的、内容及びそれに伴う危険性について説明し、実験参加への同意を得た。

被験者は、改良した自転車エルゴメータを用いて、0Wから15秒毎に20Wずつ増加する漸増負荷運動を、疲労困憊に至るまで行った。但し、被験者Dについては、初期負荷を50Wから開始した。ペダリング頻度は90rpmであり、電子メトロノームを用いて、設定頻度に相当するピッチ音を鳴らし、極力それに合わせるよう指示した。験者の励ましにもかかわらず、設定のペダリング頻度を維

持できなくなった時点を疲労困憊と判断し、自転車エルゴメータ駆動を中止させた。

クランク長は全ての被験者で共通(0.165m)とした。また、ペダルにはトゥクリップを装着した。

本研究で用いた装置およびシステムの概要を図1に示した。これは、自転車エルゴメータ(Powermax-V、コンビ)の両ペダルに3軸力覚センサー(TFS-3015、ニッタ)、さらに両ペダルとクランク軸にロータリーエンコーダー(OES-036、OME-036、三成電気)を装着し、自転車エルゴメータ駆動時の左右の踏力、ペダル角ならびにクランク角を同時に測定できるように改良されたものである。力信号および角度信号は、サンプリング頻度50Hzでコンピュータ(PC-286VF、EPSON)に取り込んだ。

表1 被験者の年齢及び身体的特性

被験者	年齢 (yr)	身長 (cm)	体重 (kg)
A	26	178.1	72.0
B	23	182.0	80.0
C	26	170.0	64.5
D	22	180.0	81.1
E	22	172.5	68.5

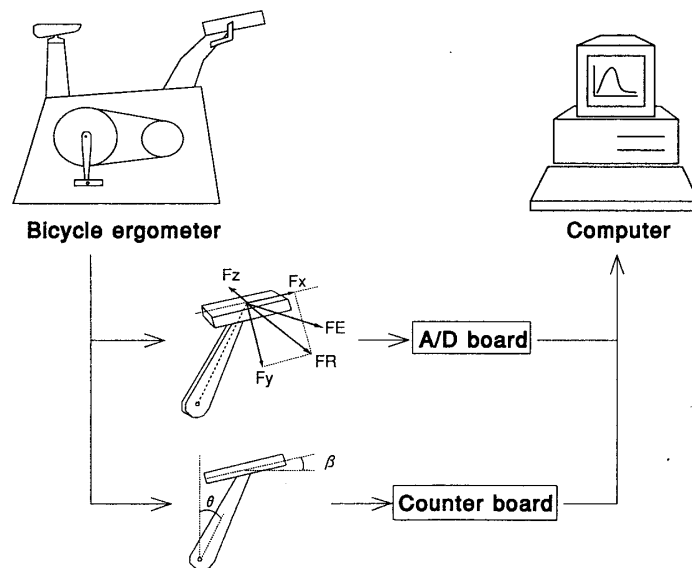


図1 本実験のシステムの概要

データの解析は、各負荷段階の5秒目からの連続した10回転分を用いた。そして、我々の報告³⁾と同様に、計測した力信号及び角度信号から、ペダル合力 (FR) 及びクランクに対する接線方向の力 (FE) を算出し、これらから力効率指数を求めた。

力効率指数の計算法

(1) 総力効率指数 (以下、tIE)

$$tIE = tFE / tFR \times 100$$

tFE、tFR：10回転分のFE、FR値の合計

(2) up及びdown phaseでの力効率指数

ペダル回転を、ペダルの最上点 (上死点) から最下点 (下死点) までのペダルを踏み込んでいくdown phase、及び下死点から上死点までの脚が引き上げられていくup phaseの、2つのphaseに分けた。そして、各々のphaseに関して力効率指数を算出した。

down phaseの力効率指数 (dIE) は次式によって求めた。

$$dIE = dFE / dFR \times 100$$

dFE、dFR：10回転分のdown phaseにおけるFE、FR値の合計

up phaseの力効率指数 (uIE) は次式によって求めた。

$$uIE = uFE / uFR \times 100$$

uFE、uFR：10回転分のup phaseにおけるFE、FR値の合計

結 果

図2に、自転車エルゴメータ駆動中の実際のペダリング頻度を示した。疲労困憊と判断し、運動を中止する以前のいずれの負荷においても、ほぼ設定通りのペダリング頻度が得られていた。また、自転車エルゴメータ駆動中の負荷装置での実際の負荷は、設定負荷よりも大きな値を示したが、いずれの被験者においても同等の強度が負荷されていた。

図3に、負荷装置部位で発揮された負荷を横軸としたときの、総力効率指数 (tIE) を示した。いずれの被験者においても、負荷の増加に伴ってtIEは直線的な増加を示した。同一負荷において、いずれの被験者も同様な値を示していた。

図4に、負荷装置部位で発揮された負荷を横軸としたときの、down phaseでの力効率指数 (dIE) を示した。dIEは、低強度では、負荷増加に伴って大きな増加を示したが、高強度では増加の割合が減少する傾向にあった。また、dIEは、個人毎にばらつきがみられた。

図4に、負荷装置部位で発揮された負荷を横軸としたときの、down phaseでの力効率指数 (uIE) を示した。uIEが負の値を示すことは、up phaseで、ペダル回転を妨げる力が作用していたことを示すものである。uIEは、負荷の増加に伴って直線的に増加した。また、dIE同様、個人毎にばらつきがみられた。

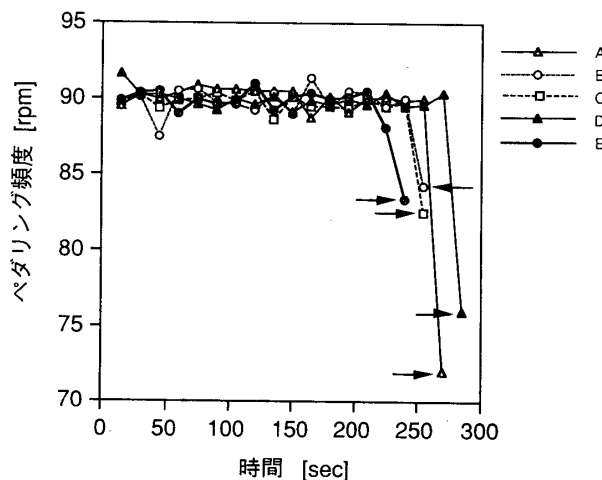


図2 漸増負荷運動中のペダリング頻度

矢印は、疲労困憊と判断した点で、データとしては削除した

自動車エルゴメータ駆動時の負荷が力効率指数に及ぼす影響

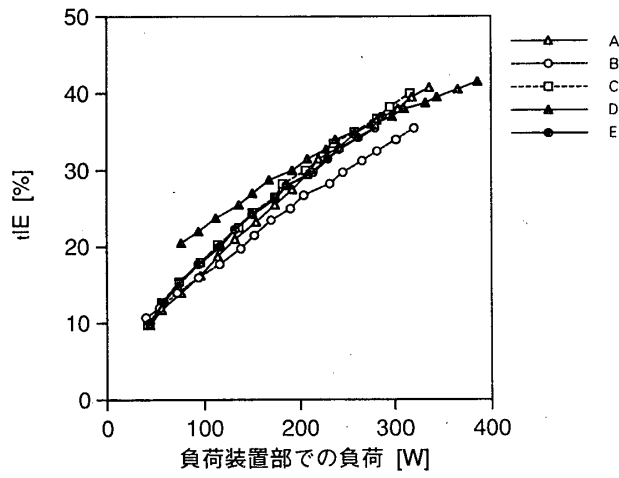


図3 漸増負荷運動中の総力効率指数

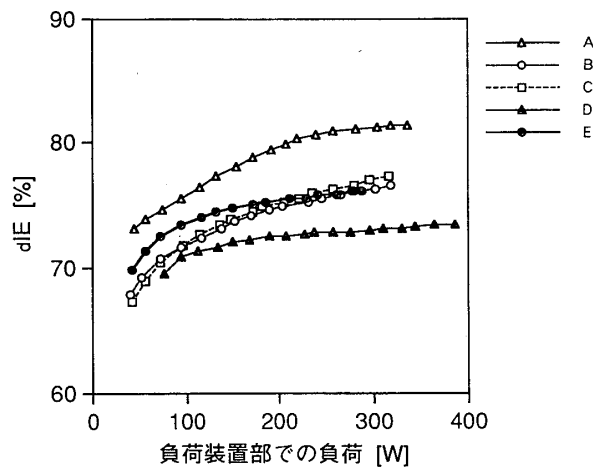


図4 漸増負荷運動中のdown phaseでの力効率指数

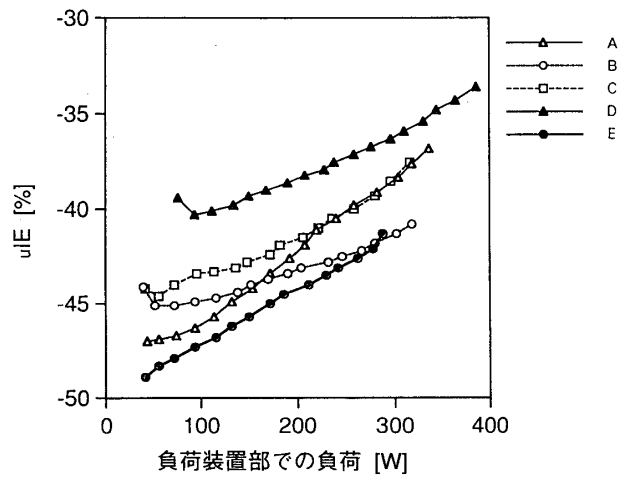


図5 漸増負荷運動中のup phaseでの力効率指数

表2 相対負荷での各力効率指数

被験者	WL(W)	tIE (%)	dIE (%)	uIE (%)
A	172.9(51.6)	25.3	78.8	-43.4
B	151.1(47.4)	21.5	73.7	-44.0
C	148.5(47.1)	24.3	73.9	-42.8
D	190.8(49.5)	30.0	72.5	-38.6
E	149.4(51.9)	24.2	74.8	-45.7

疲労困憊時の負荷を100% (Wmax) とした時の50% Wmax時の力効率指数

WL: 負荷装置部での実際の負荷であり、括弧内の数値はWmaxに対する%

tIE: 総力効率指数

dIE: down phaseでの力効率指数

uIE: up phaseでの力効率指数

表2に、疲労困憊時の負荷を100% (Wmax) とした時の、50% Wmaxに近い負荷での各力効率指数を示した。自転車部に所属する被験者Dで、tIE及びuIEについて他の被験者よりも大きな値を示した。

論 議

力効率指数 (IE) は、Lafortune と Cavanagh (1990)⁴⁾によって提案された自転車駆動のスキル指標である。しかし、この指標の妥当性はまだ十分検討されていない。すなわち、いかなる条件のもとでIEを算出すべきかという一定の基準が明らかにされていない。IEは、負荷に影響されることが報告されており^{3,5,6)}、この影響についての検討はこれからはなされなければならない。本研究では、設定負荷に一定の基準を設ける手掛かりとして、広範囲にわたる負荷がIEに及ぼす影響を検討しようとした。この結果、tIE、uIEは負荷に伴って直線的に増加し、高負荷でより大きな値が示された。dIEは対数曲線状に増加し、高強度でほぼ一定の値を示す傾向にあった (図3、4、5)。

先行研究^{2,3,4,5,6)}は、検討された負荷の範囲が狭く、本研究のように連続的に負荷を増加させたときの力効率指数を求めたものはない。本研究での各力効率指数の値は、一定負荷で算出された先行研究の値よりも低いものであった。例えば、以前一定負荷で我々が算出した各力効率指数は³⁾、200W時で、おおよそtIEが55%、uIEが-17%であ

り、本研究ではこの負荷に相当する強度でそれぞれ、29%、-42%と、かなり低い値であった。一方、dIEに関しては、75%前後と同様な値が示された。tIEは、dIEとuIEの加算と近似できるので、先行研究との違いは、uIEの違いであると考えることができる。しかし何故、漸増負荷時におけるup phase中での力効率指数が、一定負荷時と比較して低い値を示す、すなわちペダル回転をより妨げるような力が作用していたのかは、現段階では明らかではない。しかし、先行研究のように、短時間の間欠的な運動は、実際の走行を反映しているとは考えにくく、本研究の様な数分間にわたる連続的なペダリングを評価することは意味のあることかも知れない。

ところで、IEがスキルの指標として妥当性を持つためには、スキルレベル相応のIEを示すことが必要である。つまり、スキルの高いと思われる者で、高い値を示すことが必要となろう。これに対し、Coyleら (1991)¹⁾は、90rpmのペダリング頻度で「1時間続けられる」負荷を用いて、一流長距離自転車選手群 (A群) とこれより若干レベルの劣る群 (B群) で、IEの比較を行った。その結果、tIE、dIEのいずれの指標においても、B群で高い値を示した。さらに、我々は (1993)³⁾、明らかにレベルが異なると思われる、一般男性と大学自転車部員を対象として、ペダリング頻度90rpmで150、200及び250Wの一定負荷の自転車エルゴメータ駆動中のIEの算出を行った。結果は、いずれの条件においても両群で差が認められな

かった。このように、IEのスキル指標としての意義について、肯定的な結果は得られていない。しかし、Coyleらの用いた、「1時間続けられる」という相対負荷は、負荷設定としては曖昧である。つまり、全被験者が同一の相対強度に達していたかは疑問が残る。また、我々は絶対負荷での比較しか行っておらず、相対負荷での検討は行っていない。従って、これらの結果からは、IEのスキル評価としての妥当性を否定することはできないものと考えられる。

さて、本研究の結果から、力効率指数が負荷の要因で変動することが示された。このことは、駆動できる最大負荷能力の異なる者について、同一絶対強度で比較することは、生体にかかっている強度という点で、条件が一定でなく、指標の意味も異なってくると思われる。例えば、200Wでの力効率指数は、ある者では「軽い」強度での指標であり、別のものでは「きつい」強度の指標になる。したがって、各個人の生体負担度を同一にするような、最大能力の相対値で指標を評価することは重要であると思われる。

そこで本研究の試みとして、疲労困憊時の負荷を100% (Wmax) とした時の、50% Wmaxの相対負荷で各力効率指数を比較してみた(表2)。この結果、自転車部に所属する被験者Dで、tIE、uIEで他の被験者よりも良い値が示された。これから即、最大負荷に対する相対負荷での比較が、スキル評価として妥当であるとは言えないが、力効率指数のスキル評価としての可能性を示していると思われる。しかし、本研究では被験者数が5人と少なく、今後一般人と自転車経験者のそれぞれの被験者数を増やし、さらに検討していく必要がある。

自転車駆動のスキル評価が可能となれば、競技力向上を目的としたトレーニングにおいて有効であると思われる。力効率指数は、このような指標として期待されるが、評価基準での問題点を含んでいる。本研究の結果は、被験者数が5名と少な

いが、広範囲にわたる負荷を用いて力効率指数を算出し、負荷による力効率指数の影響を明らかにし、力効率指数の評価にあたっては、相対負荷を用いる必要性があることを示しているものと思われる。相対負荷については、本研究では疲労困憊時の最大負荷を基準として評価したが、自転車熟練者で高い値が示され、これは評価基準として有効であるかも知れない。今後被験者を増やし、さらに検討していく必要がある。

文 献

- 1) Coyle, E. F., Feltner, M. E., Kautz, S. A., Hamilton, M. T., Montain, S. J., Baylor, A. M., Abraham, L. D. and Petrek, G. W. : Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 23, 93-107 (1991)
- 2) Davis, R. R. and Hull, M. L. : Measurement of pedal loading in bicycling : II. analysis and results, *J. Biomechanics*, 14, 857-872 (1981)
- 3) 星川秀利, 玉木啓一, 中村好男, 木村裕一, 藤本浩志, 村岡功 : ペダリングにおけるスキルの評価, *バイオメカニズム学会誌*, 17(3), 173-182 (1993)
- 4) Lafortune, M. A. and Cavanagh P. R. : Force effectiveness during cycling, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 12, 95 (1980)
- 5) Patterson, R. P. and Pearson, J. L. : The influence of flywheel weight and pedalling frequency on the biomechanics and physiological responses to bicycle exercise, *Ergonomics*, 26 (7), 659-668 (1983)
- 6) Patterson, R. P. and Moreno, M. I. : Bicycle pedaling forces as a function of pedalling rate and power output, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 22, 512-516 (1990)