

5～6歳児と成人の有酸素的自転車運動における 機械的効率の比較

佐々木 弘 志* 四 伊 静 香**

Comparison of mechanical efficiency during aerobic cycling performed by 5 to 6 years old children and adults

Hiroshi Sasaki* Sizuka Shii**

Abstract

Mechanical efficiency is defined as the proportion of the chemical energy that is transformed into mechanical work. The mechanical efficiency of children is expected to be inferior to that of adults because their neuro-muscular and metabolic systems are not fully developed. However, classical investigations have shown that the mechanical efficiency of children is superior to that of adults. The purpose of this study was to compare the mechanical efficiency during aerobic cycling between children and adults. Ten kindergarten girls and 10 collegiate females participated in this study. Oxygen intake was measured at rest and during 4 minutes of cycling at the work rates of 0, 150 and 225 kgm/min, and mechanical efficiency was calculated as gross, net and work efficiencies. Furthermore, the adult subjects performed the cycling at the similar relative intensities to the children. The calculated mechanical efficiencies of the children were significantly higher than those of the adults at similar absolute work loads ($p<0.05$). However, at similar relative work loads, the gross efficiency of the children was significantly lower at 70% heat rate maximum (HRmax) and their work efficiency was significantly higher at 80%HRmax compared with those of the adults. The mechanical efficiencies were thus influenced by the work load. Peak value of the mechanical efficiencies was found in the adult subjects, which was

* ささき ひろし：大阪国際大学人間科学部助教授
** しい しずか：財団法人北陸体力科学研究所指導員
〔投稿者の資格基準〕①により承認〕〈2003.6.13 受理〉

similar to the highest value in the child subjects. However, the work load inducing the peak value was different from that of the child subjects, which might account for the differences in mechanical efficiency observed at similar work loads. In conclusion, the mechanical efficiency of the cycling performed aerobically is essentially the same in children and adults. The influence of work load on mechanical efficiency results in differences in mechanical efficiency between children and adults.

Key words

female, exercise economy, intensity

1 緒言

筋収縮は、筋で発生した化学的エネルギーが機械的エネルギーに変換することによって起こる。¹⁾ 筋作業時の機械的効率は、そのときに発生した化学的エネルギーの何割が機械的仕事に変換したかを示す。⁵⁾ したがって、作業時に消費したエネルギーと仕事量を測定することによって、機械的効率は求めることができる。有酸素的自転車運動は定常状態で行われた場合、その仕事量とエネルギー消費量が比較的求めやすいため、ヒトの機械的効率を算出するのによく用いられる。^{1,6-13)} しかし、その算出方法は、仕事量を全エネルギー消費量で除したもの (gross efficiency)、全エネルギー消費量から安静時のエネルギー消費量を減じて除したもの (net efficiency) および全エネルギー消費量から無負荷時の運動に消費したエネルギー量を減じて除したもの (work efficiency) などがある。このために、機械的効率の値はこれらの算出方法によって異なるが、⁷⁾ 自転車運動が有酸素的に行われた場合、gross efficiency は 11-17%、^{1,13)} net efficiency は 23-30% ^{1,6,12,13)} および work efficiency は 27-34% ⁶⁾ であることが報告されている。また、その機械的効率は、運動強度の影響を受け、例えば、Gaesser and Brooks ³⁾ は、自転車運動のブレーキ抵抗の増大に伴って機械的効率が增大することを報告した。Rawland et al. ¹²⁾ は、有酸素的自転車運動の強度に伴って net efficiency が増加し、一定の状態になることを報告した。

いっぽう、年齢が機械的効率に及ぼす影響を報告したものは、子どもが成人よりも gross および net efficiency が高い、^{1,11,13)} 両者で異なる ^{2,12)} などの報告が見られ、その結果は一致しない。この違いは、機械的効率の算出方法によるのか、運動強度によるのかあるいは子どものほうがより円滑にエネルギー変換が行われているのか明らかではない。しかし、神経・筋および代謝系の発達段階にある子どもでは、この機械的効率は成人と比較して低いことも考えられる。そこで本研究では、子どもの有酸素的自転車運動における機械的効率を成人と比較検討した。

II 研究方法

A 被検者

本研究の被検者は、幼稚園女兒 10 名と大学生女子 10 名であり、それぞれ子どもの群、成人の群とした。子どもの群の被検者については、その保護者と幼稚園長から、成人の群の被検者については、彼女らからそれぞれ本研究に参加するための承諾書を得た。被検者の年齢、身長、体重および体脂肪率は Table 1 に示した。

Table 1. Physical characteristics of the subjects.

Group	age (yr)	stature (cm)	weight (kg)	%fat (%)
children	5.8±0.4	114.5±5.8	21.4±4.4	16.9±8.1
adults	21.8±0.4	160.5±5.8	55.3±3.8	25.5±2.3
<i>p</i>	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.01

B 実験手順

被検者は、呼気ガス採集用のマスクを鼻と口を覆うようにして装着し、また胸部双曲誘導による心電図記録のための電極を胸に装着してから椅座位にて安静を保った。この間心電図を監視し、被検者が安静状態を保っていることを心拍数の値から確認した後、5 分間の呼気採集を行い、その終末に心電図の記録を行った。その後被検者は自転車エルゴメーター（モナーク社）に乗り、ペダルを踏み込んで真下に来たときの膝関節屈曲角度が 15 度になるようにサドルの高さを調節した。被検者は、ペダルの回転数が 1 分間に 50 回転になるようにしたリズムにあわせて、初めは無負荷で 4 分間行い、そのまま負荷を 150kgm/min に増加して 4 分間自転車運動を行なった。その後被検者は、約 20 分間の休息を保った後さらに 225kgm/min に負荷を増して 4 分間の自転車運動を行った。運動の間、検者は常にペダル回転数を監視し、50rpm を保つように被検者に指示を与えた。

大学生の被検者には、子供の被検者の推定最高心拍数に対する割合（%HRmax）と同一になるように負荷強度を増加して運動を行わせた。

C 測定項目と機械的効率の算出

それぞれ 4 分間の自転車運動の間、酸素摂取量（ $\dot{V}O_2$ ）と呼吸交換比を自動呼気ガス分析装置（ミナト医療社）を用いて測定し、この 4 分間の運動終末 1 分間のエネルギー消費量をそれらの値から算出した。また、心拍数（HR）を監視し、それぞれ 4 分間の終末時に記録した。各負荷強度における仕事量は、自転車のブレーキ抵抗にペダルの 1 回転当たりの動輪回転距離および回転数を乗じて算出し、これを kcal 値に換算した。

機械的効率は、gross, net および work efficiency について次のように算出した。

$$\text{Gross efficiency} = \text{仕事量 (kcal)} \div \text{運動中の全エネルギー消費量 (kcal)} \times 100$$

Net efficiency = 仕事量 (kcal) ÷ (運動中の全エネルギー消費量 - 安静時エネルギー消費量) (kcal) × 100

Work efficiency = 仕事量 (kcal) ÷ (運動中の全エネルギー消費量 - 無負荷時のエネルギー消費量) (kcal) × 100

D 統計

本研究では、子どもと成人の被検者群について得た各測定項目の値を、平均値と標準偏差 (SD) で示した。また、その両群間における差の検定には、分散分析 (ANOVA) を用い、有意性が見られたとき、post-hoc を用いて検定した。なお、その差の有意性は $p < 0.05$ とした。

III 研究結果

本研究に参加した被検者の年齢および身体的特性は両群の間で有意に異なった (Table 1)。

A 絶対負荷強度における機械的効率

仕事率 150kgm/min で行った自転車運動における gross、net および work efficiency は、子どもの群でそれぞれ 13.2 ± 2.2 、 18.8 ± 4.4 および $29.4 \pm 7.3\%$ であった。いっぽう、成人の群ではそれぞれ 11.9 ± 0.9 、 19.3 ± 2.4 および $21.2 \pm 5.3\%$ であり、work efficiency が子どもの群で有意に高かった ($p < 0.05$)。また、仕事率 225kgm/min におけるそれらの値は、子どもの群でそれぞれ 17.5 ± 3.3 、 23.8 ± 5.9 および $34.7 \pm 9.8\%$ 、成人の群で 14.4 ± 0.8 、 20.7 ± 1.5 および $31.8 \pm 8.0\%$ であり、150kgm/min では work efficiency が、225kgm/min では gross efficiency が子どもの群で成人の群よりも有意に高かった (Fig 1)。

V_{O_2} は、安静時および運動中に成人の群で子どもの群よりも有意に高かった (Table 2)。心拍数は、150 および 225kgm/min の運動時に子どもの群が推定最高心拍数の 70.8 ± 4.2 および $78.9 \pm 5.1\%$ に、成人の群が 46.1 ± 4.4 および $52.2 \pm 5.2\%$ に相当した。

B 相対負荷強度における機械的効率

子どもの群と相対的負荷強度を同一にして成人の群に 70%HRmax の強度で自転車運動を行ったとき、gross、net および work efficiency は、 20.5 ± 3.8 、 24.3 ± 4.4 および $28.2 \pm 6.1\%$ となり、gross efficiency が成人の群で有意に高かった ($p < 0.001$)。また 80%HRmax のとき、それぞれの値は 19.3 ± 0.9 、 22.4 ± 1.2 および 25.4 ± 2.3 ($p < 0.05$) と work efficiency が子どもの群で有意に高かった (Fig. 2)。またこのとき、成人の群では gross、net efficiency が 70%、work efficiency が 52%HRmax のときにピークに達した (Fig. 2)。Work efficiency の最大値は、両群とも 225kgm/min の仕事率のときに見られ、それは両群で有意に異ならなかった。

5～6歳児と成人の有酸素的自転車運動における機械的効率の比較

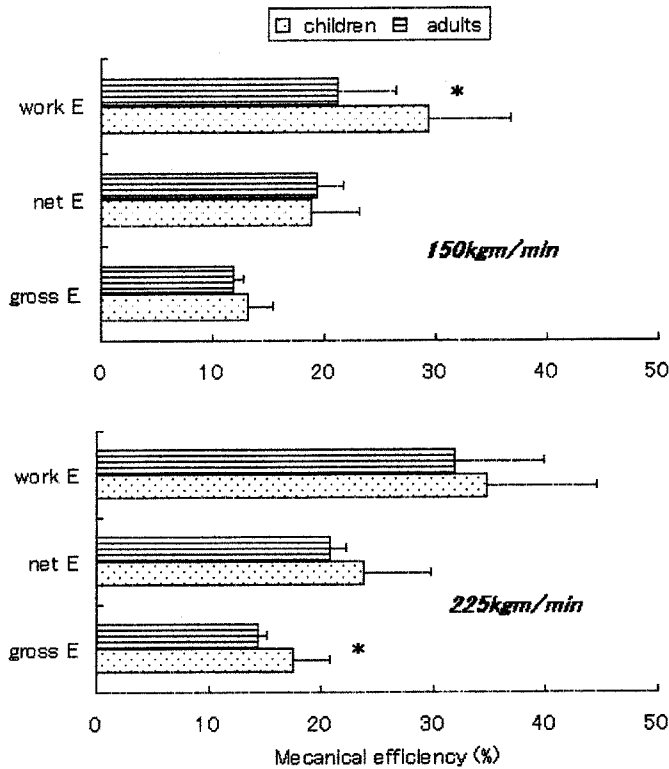


Fig.1. Comparison of the gross, net and work efficiencies of the child and adult subjects performing bicycle ergometer at the similar absolute work loads. Significant differences were found in the work efficiency at 150 kgm/min and in the gross efficiency at 225 kgm/min (* $p < 0.05$).

Table 2. Oxygen intake (ml/min) at rest and during exercises.

Group	at rest	during exercises		
		0 kgm/min	150kgm/min	225kgm/min
children	152.6 ± 17.6	293.3 ± 61.4	545.0 ± 88.9	619.0 ± 102.3
adults	225.8 ± 32.7	389.4 ± 83.7	606.9 ± 46.8	741.2 ± 39.2
<i>p</i>	< 0.001	< 0.05	<i>ns</i>	< 0.01

IV 考察

本研究は、5～6歳児の有酸素的自転車運動における機械的効率は、絶対的強度で成人と比較したとき、同等かもしくは高いことを示した。

Taylor et al.¹³⁾ は、6～8歳と12～15歳の男子に自転車運動を行わせ、このときの

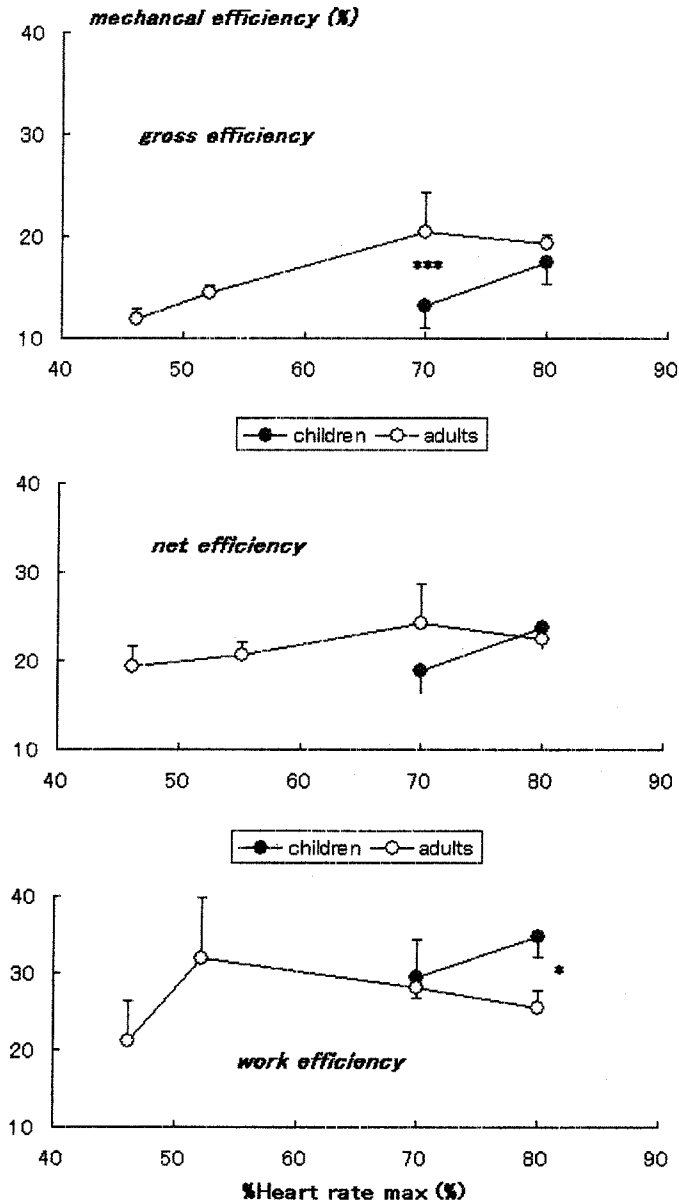


Fig.2. Comparison of the gross, net and work efficiencies of the child and adult subjects at similar relative work loads. The gross efficiency of the adult subjects at 70%HRmax was significantly higher than that of the child subjects (** $p < 0.001$). On the other hand, their work efficiency at 80%HRmax was significantly lower compared with that of the child (* $p < 0.05$).

5～6歳児と成人の有酸素的自転車運動における機械的効率の比較

gross および net efficiency を比較した。その結果、前者の gross および net efficiency はそれぞれ 13.0 および 24.6% であり、後者ではそれぞれ 12.0 および 23.7% で、6～8歳児が 12～15歳児よりも高い傾向にあることを報告した。また Bal et al.¹²⁾ は、6～9歳および 12～14歳女子の自転車運動における gross および net efficiency が、前者は 12.3 および 23.4%、後者は 12.3 および 29.0% であり、net efficiency が 12～14歳児で高いことを報告した。いっぽう、石橋ら⁹⁾ は若年者 (19.0 ± 0.4 歳) の gross (11～16%)、net (20～22%) および work (27～34%) efficiency が、中年齢者 (40.6 ± 3.8 歳) と比較して異なることを示した。このように、年齢が機械的効率に及ぼす影響に関する所見は必ずしも一致しないように思われる。

本研究の子どもの群が 2 種類の強度で行った自転車運動の gross および net efficiency の値は、Taylor et al.¹³⁾ および Bal et al.¹⁾ のそれらの値とほぼ一致した。また、成人の群のそれらの値と work efficiency は、石橋らのそれらの値⁹⁾ とよく一致した。そして、本研究の gross efficiency が子どもの群で高かった知見は、Taylor et al.¹³⁾ に一致した。

Gross efficiency は、行われた仕事量を全エネルギー消費量で除すため、安静時のエネルギー消費量がこの値に影響を及ぼすであろう。本研究および Taylor et al.¹³⁾ の gross efficiency は、体表面積が小さい群の被検者ほど安静時のエネルギー消費量が低いため、その面積が大きい被検者群より高くなったものと思われる。したがって、net efficiency は、安静時のエネルギー消費量を減じて求めたため、両群間で有意に異ならなかったものと思われる。この知見は net efficiency が子どもで幾分高いが、成人と比べて有意に異なることを示したこれまでの研究^{2,12)} と一致するであろう。

さらに、自転車運動は主にブレーキ抵抗に対する仕事 (外的仕事) と下肢を動かす仕事 (内的仕事) から成る。⁹⁾ 成人は下肢の質量が子どもに比べて大きいため、その内的仕事量はより大きくなるであろう。それ故、無負荷時のエネルギー消費量を減じて算出した work efficiency は成人の群が子どもの群よりも高くなることを予測した。しかし、無負荷でのエネルギー消費量は、成人の群が子どもの群よりも有意に高かったにもかかわらず、work efficiency は子どもの群が成人の群よりも有意に高かった。

これには運動強度が影響を及ぼしたものと思われる。Rawland et al.¹²⁾ は、思春期前の男子と大学生では、低強度の運動で機械的効率が低いことおよびそれが前者で 60% Vo_2max から、後者で 40～50% Vo_2max から一定の水準に達することを見出した。本研究でも相対的強度を同一にしてこれらの機械的効率を両群間で比較した。本研究の子どもの群は、70 から 80% HRmax に運動強度が増加するのに伴い機械的効率が増加した。いっぽう、成人の群は 4 種類の強度で運動を行い、gross, net efficiency は 70% HRmax のときに、work efficiency は約 50% HRmax のときにピーク値を示した。そしてこの 80% HRmax における work efficiency は、子どもの群が成人の群よりも有意に高かった。しかしその値は、成人の群で work efficiency がピークになった 50% HRmax のときの値と比較すると有意に異ならなかった。これは機械的効率の最大値は本質的に子どもと成人で異なるが、相対的運動強度の違いによる見かけ上の差が両者で存在することを示すものであろう。

自転車のペダル回転数と機械的効率の関係について、Maris et al.⁹⁾ は腕のエルゴメータ

一運動で被検者が自発的に選択したペダル回転数よりも低い回転数で net efficiency が高くなることを報告している。これと同様の結果が脚でのエルゴメーター運動でも認められている。¹⁰⁾ また Gaesser and Brooks⁹⁾ は、自転車運動のペダル回転数の増加に伴い効率が減少し、そのブレーキ抵抗の増加に伴い効率が增加することを報告した。ペダル回転数の増加は内的仕事を増加させるため、⁸⁾ その仕事を考慮しなければ機械的効率は低く見積もられるであろう。いっぽう、摘出筋の効率について、その最大値は等尺性筋力の40%の負荷で出現することが示されている。^{4,14)} これは、ペダルにかかる踏力の大きさが機械的効率に影響を及ぼすことを示唆するであろう。したがって、自転車運動の機械的効率はペダルの回転数およびブレーキ抵抗の影響を受け、最も効率が良くなる条件が存在するものと思われる。本研究ではペダル回転数を一定にしたため、機械的効率に及ぼすブレーキ抵抗の影響が認められ、その機械的効率が最も高くなる負荷強度は子どもと成人で異なることを示すであろう。このことは子どもと成人で機械的効率に差が見られたことを説明するものと思われる。

V 結論

有酸素的自転車運動の機械的効率は5～6歳児と成人で本質的に異ならない。機械的効率は負荷強度の影響を受け、それが最も良くなる強度は子どもと成人で異なる。これは機械的効率が両者の間で異なる原因となる。

参考文献

- 1) Bal M E R, Thompson E M, McIntosh E M, Taylor C M and Macleod G (1953) Mechanical efficiency in cycling of girls six to fourteen years of age. *J Appl Physiol* 6: 185-188.
- 2) Bar-Or (1983) *Pediatric sports medicine for the physical practitioner* 1-65 Springer-Verlag New York.
- 3) Gaesser G A and Brooks G A (1975) Muscle efficiency during steady state rate exercise: effects of speed and work rate. *J Appl Physiol* 38: 1132-1139.
- 4) Gibbs C L and Gibson W R (1972) Energy production of rat soleus muscle. *Am J Physiol* 223: 864-871.
- 5) Hill A V (1927) *Muscular movement in man: The factor governing speed and recovery from fatigue*. McGraw-Hill, New York.
- 6) 石橋健司 岡内優明 前田寛 (1997) 中年者と若年者における自転車エルゴメーター運動のペダリングの効率と頻度. *大分大学教育学部研究紀要* 19: 407-413.
- 7) 金子公宥 (1976) 筋作業の機械的効率. *体育の科学* 28: 751-758.
- 8) 金子公宥 山崎武 (1977) 自転車エルゴメーター作業における内的機械的仕事の測定. *大阪体育大学紀要* 9: 29-35.
- 9) Maris G, Dupont L, Maillet M, Weissland T, Vanvelcenaher J and Playo P (2002) Spontaneously chosen crank rate variations in submaximal arm exercise with inexperienced subjects. Effects on cardiorespiratory and efficiency parameters. *Int J Sports Med* 23: 120-124.
- 10) Marsh A P and Martin P E (1993) The association between cycling exercise preferred and most economical cadences. *Med Sci Sports Exerc* 25: 1269-1274.
- 11) Rode A and Shephard R J (1973) On the mode of exercise appropriate to a "Primitive Community"

5～6歳児と成人の有酸素的自転車運動における機械的効率の比較

Int Z angew Physiol 31: 187-196

- 12) Rawland T W, Staab J S, Unnithan V b, Rambusch J M and Siconolfi S F (1990) Mechanical efficiency during cycling in pubertal and adult males. Int J Sports Med 11: 452-455
- 13) Taylor C M, Bal M E R, Lamb M W and MacLeod G (1950) Mechanical efficiency in cycling of boys seven to fifteen years of age. J Appl Physiol 2: 563-570.
- 14) Wendt I R and Gibson W R (1973) Energy production of rat extension digitorum longus muscle. Am J Physiol 224: 1081-1086
- 15) Wilkie D R (1954) Fact and theory about muscle. Progr Biophysics and Biophysical Chem 4: 228-324.