

自転車走行における効率の研究

＜自転車の安全性、操縦性の研究＞

名古屋大学人間工学チーム 松井 秀治, 亀井 貞次
自振協技術研究所 服部 四土主

昭和50年度から、自転車の操縦性能と人間のエネルギー利用の面から、ミニサイクルおよび10段変速機付き自転車で、クランク回転数ならびにギヤ比の組合せが、走行時のエネルギー利用にどのような影響を与えているかを明らかにしてきた。

しかし、この実験過程において、乗車姿勢におけるサドルの高さおよびクランク回転数についてさらに検討を加えるべき問題点が出てきた。そこで本52年度は、

- (1) 座席の高さの変化が酸素消費量にどのような影響を与えるか
- (2) 人間にとって最も快適とされるペダリングピッチは毎分当たり何回であるか

の2点について検討した。

1 乗車姿勢

自転車の乗車姿勢は、人間と自転車が接触する2箇所すなわちサドル、ハンドルのにぎりめで決定される。

ところで、現在広く行われている3点調整法は、人間工学的に考えられており非常に優れているが、ミニサイクルおよび変速ギヤの開発により、多くの人が手軽に自転車を利用できる状態であり、また、現在の交通事情など自転車走行にとって必ずしも安全な状態ではない。走行中の自転車転倒ということはわれわれのまわりでしばしば見受けることであり、交差点で信号待ちのため自転車を斜めの状態で停止させていて、出発のときふらつくことも経験ずみのことである。

停車時において足が地面についた状態での乗車が行われれば、出発時のふらつきもなくなり、走行中に倒れなかった場合でも、転倒をある程度防止することができるであろう。そこで、座席の高さを変え、

- (1) サドルに座り、足が地面につかない場合（現在広く行われている、ペダルに足をのせ、ひざが軽く伸びた状態）
 - (2) サドルに座り、足が地面につく場合
- の二つの乗車姿勢における酸素消費量の測定および運動



写真1 モナーク改造エルゴメータ

感覚についての考察を行った。

2 クランク回転数の変化と 酸素消費量の関係

自転車走行において一定スピードを保持するためには、クランクの回転数とペダルに加える力という無数の組合せから、最も効率のよいものを選ぶことである。

昭和50年度は、ギヤ比の異なる4台の自転車を使って、実走行における酸素消費量の測定を行ったが、ギヤ比の相違と酸素消費量の間には関係が見られず、いずれのギヤ比（2.30, 2.44, 2.86, 2.88）においても酸素消費量はほとんど同じであった。

また、昨51年度は、10段変速機付き自転車を使って、同一速度走行に要する酸素消費量が、ギヤ比とクランクの回転数の相違により、どのような影響を受けるかを検討したが、最適ギヤ比の幅は大きく、クランクの回転数も45~80rpmの広範囲であった。

本52年度は、自転車の操縦者である人間が、最も快適な状態で走ることができるクランク回転数はどのくらいかということを中心に検討してみた。

ここ2年間の実験は、現在市販されている自転車を使
 った実走行であったが、本52年度は、写真1に示すよ
 うなモナーク改造エルゴメータを使って、クランク回転
 数の変化と酸素消費量の関係を検討した。

3 実 験

3.1 座席の高さの変化と酸素消費量の関係

表1に示す男子4名、女子4名、計8名の被検者が、
 改造エルゴメータならびに2台の自転車(20×1.75—40
 :14, 24×1.75—44:18)を使って、座席の高さを変え
 た状態〔(1) 足が地面につかない場合、(2) 足が地面に
 つく場合〕で走行したときの酸素消費量を測定した。

表1 被検者の身体特性

被 検 者	身長 (cm)	体 重 (kg)	年 令 (才)	
男	M ₁	164	55	20
	M ₂	167	58	19
	M ₃	166	56	20
	M ₄	170	59	19
女	W ₁	158	50	22
	W ₂	160	58	19
	W ₃	154	54	20
	W ₄	153	48	18

モナークエルゴメータの実験は、男子4名の被検者が
 50rpm, 60rpm, 70rpm のクランク回転数で15分間走行
 の後、2分間の呼気を採集し、分析した。女子4名は2
 台の自転車で車速10km/h, 15km/h, 20km/hの3種類
 の走行を行った。

走行は被検者の代謝系が定常状態に達するよう10分間
 の走行を行い、その後マスクとバッグを結ぶコックを開
 いて走行中の2分間の呼気を採集し、分析した。

いずれの場合も、採集された呼気は O₂ アナライザ
 (イングランド・モルガン社製)、CO₂ アナライザ (オラ
 ンダ・ゴダール社製) で分析した。

3.2 車速 16km/h 走行におけるクランク回転 数とギヤ比の組合せと酸素消費量の関係

表2に示す6名の被検者について、モナーク改造エル
 ゴメータで車速16km/hを保持できるよう、

- (1) クランク回転数50rpm, ギヤ比3.33
- (2) クランク回転数58rpm (以後60rpmと呼ぶ), ギヤ
 比2.86
- (3) クランク回転数70rpm, ギヤ比2.35

という三つの組合せで、被検者自身が定常状態にあり、
 かつ、一般的利用のときの乗車時間に近い15分間のペダ
 リングの後、2分間の呼気を採集し、分析した。分析法

表2 被検者の身体特性

被 検 者	身長 (cm)	体 重 (kg)	年 令 (才)
A	164	55	20
B	167	58	19
C	166	56	20
D	170	59	19
E	164	53	21
F	168	60	20

は3.1項の実験と同じ方法によった。

また、被検者が正確なクランク回転数を保持するた
 めに、リズマーでペダリングスピードを規制した。

3.3 クランク回転数の変化と酸素消費量の関係

2名の被検者(A, B)が、モナーク改造エルゴメ
 タのギヤ比を2.35に固定し、クランク回転数を50rpm,
 60rpm, 70rpm, 80rpm と変化させ、総仕事量が同一に
 なるような走行運動を行った。走行時間は表3に示すよ
 うに2分から3分12秒までである。各々の運動で定常状
 態が成立するよう10分間の走行の後、呼気の採集を行っ
 た。クランク回転数の規制は3.2項の実験と同じように
 リズマーで行い、ガスの分析は3.1項の実験の手法と同
 じであった。

表3 クランク回転数と走行時間の関係

ギヤ比	クランク回 転数(rpm)	運動時間	総仕事量 (kg·m)
2.35	50	3'12"	614
	60	2'40"	"
	70	2'17"	"
	80	2'00"	"

3.4 自転車走行における快適なクランク回転数

年齢19~23才の男子学生77名、女子学生(19~20才)
 65名、計142名の被検者たちが、改造モナークエルゴメ
 タで各々の被検者が最も快適と思われるペダリングス
 ピードでの5分間の走行を行った。

走行にあたっては、被検者に自分自身が最も快適と思
 われるペダリングピッチで走るように指示し、運動が安
 定した3分から4分、4分から5分の各々のクランク回
 転数をカウンタで測定し、平均値を求めた。

4 結 果

4.1 座席の高さの変化と酸素消費量の関係

男子4名、女子4名、計8名の被検者が、モナーク改
 造エルゴメータならびに2台の自転車で、サドルの高さ
 を調節して、

- (1) サドルに座って足が地面につかない場合

表 4 座席の高さの変化と酸素消費量 (男子)

被検者	状態	酸素消費量 (ℓ/min)					
		50rpm		60rpm		70rpm	
		足つかない	足がつく	足つかない	足がつく	足つかない	足がつく
M ₁		0.68	0.72	0.83	0.86	0.79	0.83
M ₂		0.85	0.81	0.93	0.82	1.06	1.01
M ₃				0.79	0.75		
M ₄				0.83	0.80		

表 5 座席の高さの変化と酸素消費量 (女子)

被検者	状態	酸素消費量 (ℓ/min)					
		10km/h		15km/h		20km/h	
		足つかない	足がつく	足つかない	足がつく	足つかない	足がつく
W ₁		0.45	0.48	0.72	0.76	1.29	1.19
W ₂		0.48	0.57	0.81	0.72	1.31	1.23
W ₃		0.67	0.63	0.96	0.92	1.53	1.45
W ₄		0.57	0.59	0.85	0.94	1.49	1.30

(2) 足が地面につく場合

の状態で行ったときの酸素消費量は、表 4, 5 に示すごとくである。

図 1 は 4 名の男子被検者が、改造エルゴメータでクランクの回転数を 50rpm, 60rpm, 70rpm に固定し、サドルの高さを変えた場合の酸素消費量の変化を示した。

サドルに座り、足が地面につかない場合では、被検者の平均酸素消費量がクランクの回転数 50rpm で 0.77ℓ/min, 60rpm で 0.85ℓ/min, 70rpm で 0.93ℓ/min であったのに対し、足が地面につく場合は各々 0.77ℓ/min, 0.81ℓ/min, 0.92ℓ/min とほとんど同じであった。

図 2 は 4 名の女子被検者が 2 台のミニサイクルを使って、車速 10km/h, 15km/h, 20km/h で走行した場合の酸素消費量を示した。図に示されるように、車速 10 km/h では走行に要する酸素消費量は、足がつかない場合で平均 0.57ℓ/min, 足がつく場合で 0.54ℓ/min とほとんど差が認められなかった。

また、車速 15km/h においては、座席の高さによって酸素消費量に差は見られず、両者ともに平均 0.84ℓ/min であった。

しかし、車速が 20km/h になると、4 名の被検者全員が足がつく場合に酸素消費量が大きく、足がつかない場合では平均 1.29ℓ/min であるのに対し、足がつく場合は平均 1.41ℓ/min と約 10% の酸素消費量の増大を示した。

4.2 車速 16km/h 走行におけるクランク回転数とギヤ比の組合せと酸素消費量の関係

6 名の被検者が改造エルゴメータで車速 16km/h で走

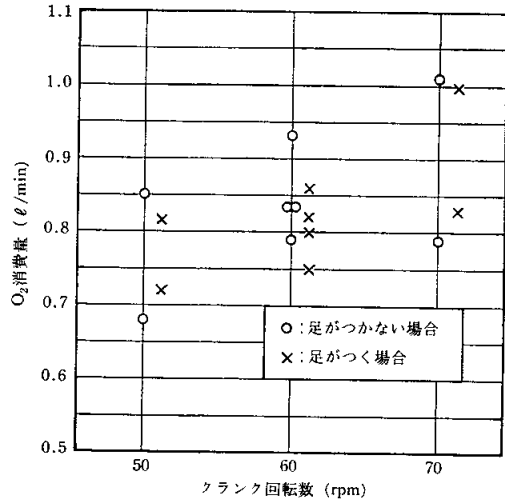


図 1 座席の高さの変化と酸素消費量の関係 (男子)

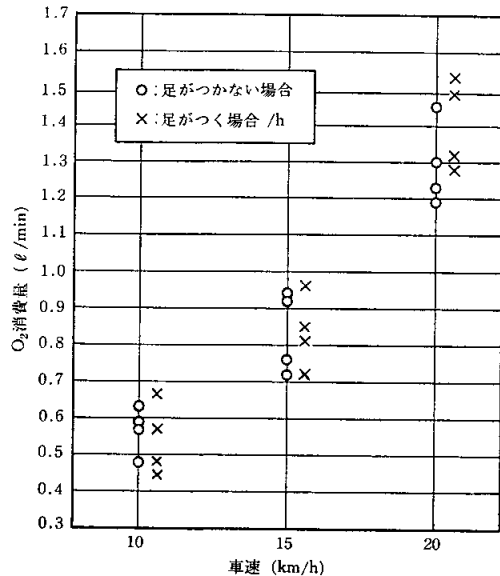


図 2 座席の高さの変化と酸素消費量の関係 (女子)

行する場合、

- (1) クランクの回転数 50rpm, ギヤ比 3.33
- (2) クランク回転数 60rpm, ギヤ比 2.86
- (3) クランク回転数 70rpm, ギヤ比 2.35

の組合せで走行運動を行ったときの酸素消費量を表 6 および図 3 に示した。

図 3 に示されるように、クランクの回転数 50rpm では、酸素消費量は 6 名の平均が 0.49ℓ/min であった。

また、クランク回転数 60rpm では平均 0.52ℓ/min と、50rpm の場合とほとんど同じである。

しかし、回転数が 70rpm では平均 0.59ℓ/min と、50 rpm, 60rpm の場合に比べてやや大きな酸素消費量を示した。

表 6 車速 16km/h 走行における酸素消費量

ギヤ比	3.33	2.86	2.35
クランク回転数	50rpm	60(58)rpm	70rpm
被検者	酸素消費量 (ℓ/min)		
A	0.45	0.51	0.49
B	0.46	0.53	0.57
C	0.50	0.51	0.62
D	0.54	0.54	0.63
E	0.50	0.50	0.55
F	0.50	0.54	0.66

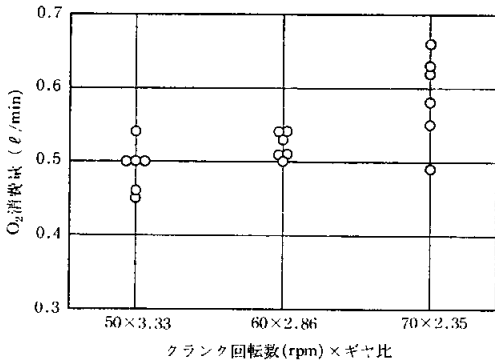


図 3 車速16km/h走行における酸素消費量

4.3 クランク回転数の変化と酸素消費量の関係

表 7 および図 4 は、ギヤ比を固定してクランク回転数を変えた場合に要した酸素消費量を示している。

図に示されるように、2名の被検者がともにクランクの回転数 70rpm で最小値 1.36ℓ/min, 1.94ℓ/min を示し、80rpm で最大値 1.75ℓ/min, 2.32ℓ/min を示した。そして、被検者 A ではその差が 30% であるのに対し、被検者 B では 20% である。

また、被検者 A では、クランク回転数 70rpm, 50rpm, 60rpm, 80rpm の順で酸素消費量の増大が見られるのに対し、被検者 B では 50rpm, 60rpm がほとんど同じであった。

4.4 自転車走行における快適なクランク回転数

表 8 および図 5 は、男子 77 名、女子 65 名、計 142 名の被検者がエルゴメータで、被検者自身が最も快適と感ずるクランク回転数で 5 分間の走行運動を行ったときの結果である。

図に示されるように、男子では最大値は 120rpm、最小値は 40rpm を示し、平均は 66rpm であった。最大値 120rpm を示した者はアマチュアの自転車クラブに所属しており、日ごろから速く走るトレーニングをしているとのことで、その影響と思われる。最小値を示した者は

表 7 クランク回転数の変化と酸素消費量の関係

クランク回転数 被検者	酸素消費量 (ℓ/min)			
	50rpm	60rpm	70rpm	80rpm
A	1.52	1.67	1.36	1.75
B	2.05	2.06	1.94	2.32

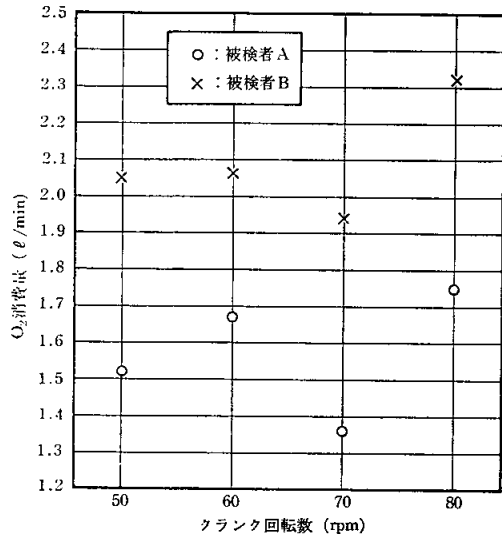


図 4 クランク回転数の変化と酸素消費量の関係

日常動作が緩慢であり、運動の不得手な学生であった。

また女子では、平均値が 67rpm、最大値が 96rpm、最小値が 40rpm であった。

以上のように、クランク回転数において男女差は全く認められなかった。

5 考 察

5.1 座席の高さの変化

座席の高さの変化と酸素消費量との関係は、前述した結果の項に示したように、男子の被検者が行ったエルゴメータでは、クランクの回転数が 50rpm, 60rpm, 70rpm のいずれの場合も酸素消費量に差は認められなかった。

また、女子 4 名による実走行の実験においても、前述した結果の項に示されるように、車速が 10~15km/h では座席の高さを変えても、酸素消費量に変化は認められなかった。また、被検者の乗車感覚を聞いたところ、いずれの走行においても差が認められなかった。

しかし、車速が 20km/h の場合は、サドルの高さによって酸素消費量に差が認められ、足が地面につく場合は、つかない場合に比べて約 10% から 15% 増を示した。

公安委員会編「交通の方法に関する教則」の第 2 章、

表 8 走行時における快適なクランク回転数

男子		女子	
クランク回転数 (rpm)	人数	クランク回転数 (rpm)	人数
40	1	40	1
48	4	45	1
50	4	50	1
52	2	52	3
54	3	54	3
56	4	56	3
58	5	58	1
60	7	60	4
62	5	62	8
64	8	64	3
66	3	66	3
68	5	68	8
70	5	70	4
72	4	72	5
75	2	74	3
76	1	76	2
78	2	78	4
80	3	80	3
82	1	82	1
85	2	84	1
90	4	88	1
100	1	92	1
120	1	96	1

自転車に乗る人の心得の第1節2. 自転車の点検(1)に「サドルはしっかりと固定されており、また、またがってハンドルを持った場合、両足先が軽く地面にとどき、上体が少し前に傾くよう調節されているか」という条項があるが、日常生活での自転車利用では10~30分程度の道のりでの利用が多く、車速も15km/h以下での走行がほとんどであることを考えると、自転車に乗り始めの人や、小学生たちに指導されている「サドルにまたがったとき、足が地面につくサドルの高さ」での乗車が一般にも広く行われることが望ましいと思われる。しかし、サイクリングのように、1日に数時間の走行、あるいは車速20km/h以上での高速走行の場合は、走行の効率を考えると、現在行われている調整法によるサドルの高さが適当と思われる。

5.2 走行時のクランク回転数

自転車が走るためには、一定の駆動力が必要であり、それは一般的には次式のごとく表わすことができる。

$$\begin{aligned} \text{駆動力} &= \text{走行抵抗} \\ &= \frac{\text{ペダル踏力} \times \text{ペダルの長さ}}{\text{後輪の半径}} \times \frac{1}{\text{ギヤ比}} \end{aligned}$$

したがって、自転車走行において一定スピードを保持

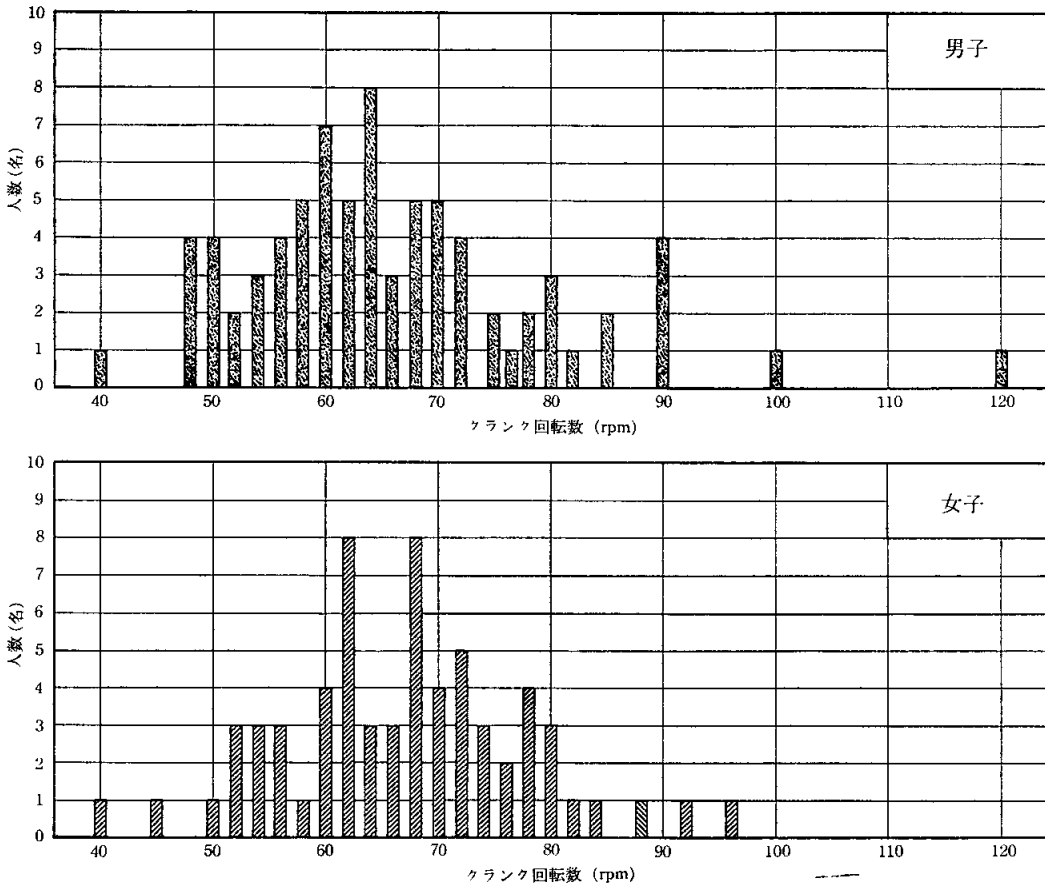


図 5 走行時における快適なクランク回転数

するためには、ペダルに加える力とクランクの回転数という無数の組合せから、最も効率のよいものを選ぶことが必要である。走行中の酸素消費量から、ここ2年間、ギヤ比の異なるミニサイクルと軽快車ならびに10段変速機付き自転車を用いて、ギヤ比とクランクの回転数を中心に、この問題について論議してきた。

図6は、昨51年度に行った10段変速機付き26インチの自転車における、各種のスピードにおけるギヤ比とクランク回転数の関係を示したものである。走行時の酸素消費量から、これらの中で最適な組合せを示してある。

この図に示されるように、同一速度内においても、エネルギー面から見た場合に、適当と思われるクランク回転数とギヤ比の組合せは、被検者によって異なり、その幅は大きい。またクランクの回転数は30rpmから80rpmまでの間に分布しており、それに対応するギヤ比が有効ギヤ比となっている。

そこで、本52年度は、クランク回転数を中心にこの問題を究明するために、これまでの実験において、エネルギー面から見て優れていたクランクの回転数を中心にこの問題を究明した。

前述した結果の項に示したように、車速を16km/hに固定し、回転数50rpm、60rpm、70rpmとした場合の走行中の酸素消費量の平均値は、クランクの回転数が50rpm、60rpmの場合は、6名の平均が0.49ℓ/min、0.52ℓ/minと差が見られず、2名の被検者では全く同じ酸素消費量であった。ところが、クランクの回転数が70rpmの場合は、6名の平均が0.59ℓ/minと、50rpm、60rpmに比べてやや増大している。このことは、昨51年度の結果

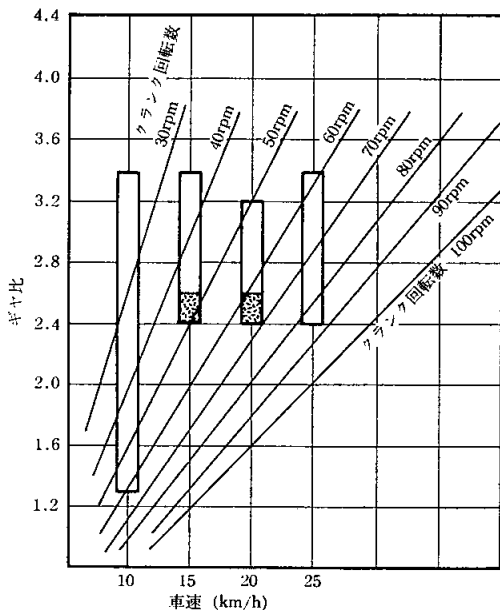


図6 走行時の最適ギヤ比

でもたびたび認められたことである。しかし、被検者Aにおいては、60rpmのときよりも小さな値を示していることは注目すべきことである。

次に、ギヤ比を2.35に固定して、クランクの回転数を変えることによって、同一仕事量(614kg・m)に要する酸素消費量を測定した結果、2名の被検者がともに70rpmにおいて最小値を示した。被検者Aにおいては、70rpm時を100%とすると、50rpmが111%、60rpmが122%、80rpmが129%であった。

被検者Aの場合には、前述の実験でも70rpmにおいて小さな酸素消費量を示している。また被検者Fでは、50rpm、60rpmの場合が106%、80rpmの場合には120%とかなりの増大を示した。そして、これらの結果は、エルゴメータを使って Cathcart が報告している、クランク回転数70~80rpmにおいて最高の効率をあげることができることと一致している。

また、男女142名の被検者について行った最も快適と思われるクランク回転数の結果、男子は66rpm、女子が67rpmという結果は、上述の酸素消費量の結果から見ると妥当な数字と思われる。そして、Dickinson が自転車エルゴメータを用いて、ペダリングの速さをいろいろ変えたときの効率を検討した結果(図7)に示される1ストロークに要する至適時間0.9秒、すなわち66.7rpmのクランク回転数において、最大効率21.5%をあげることができたことと一致している。

このことは、われわれが日ごろ自転車を利用することによって、筋感覚がトレーニングされ、最適のリズムを身につけたものと思われる。

図8は奥山が歩行における歩幅、歩数と至適速度を求めたものであるが、歩行の場合は歩数103歩、時速3.66kmが至適速度であると報告しているが、歩行速度の変化に伴う各スピードでの歩数と歩幅の組合せは異なり、それが至適線として表わされている。図で示されるように、エネルギー効率から見ると、足の動きは、歩数1分間に100から140の範囲が良好とされている。

人間の歩行は系統発生的運動であり、生後1年からだ

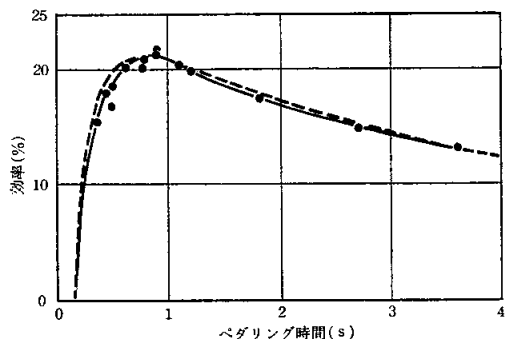


図7 ペダリング時間と効率(ディッキンソン)

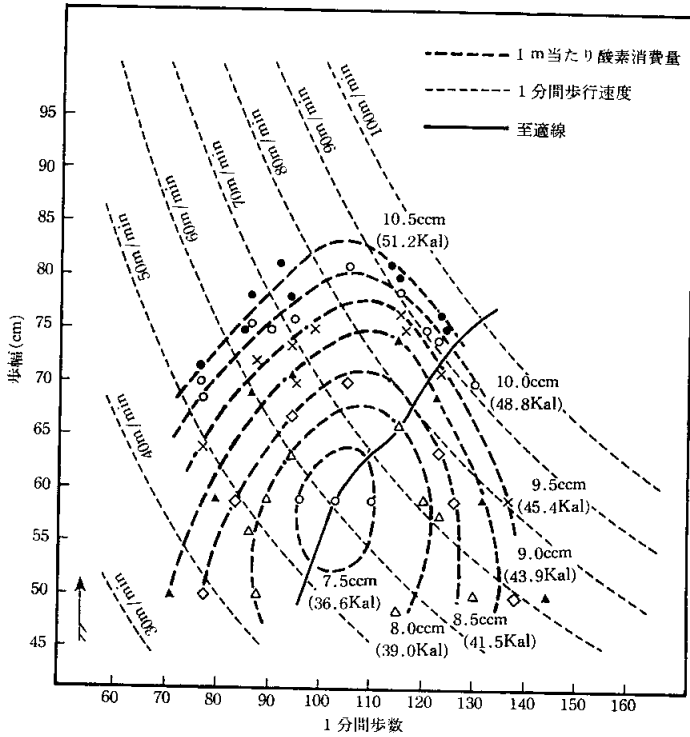


図 8 歩行における歩幅、歩数と至適速度 (奥山, 1933)

率から見た適正回転数は57~70rpmの範囲であった。したがって、これらの回転数をひき出すギヤ比との組合せが最適であると思われる。

参考文献

- 1) Benedict and Cathcart, Carnegie Inst Publ. No. 187, Washington 1913
- 2) A. C Bobbert, Energy, expenditure in level and grade walking, J. appl, physiol 15 : 1015~1026, 1960
- 3) J. Booyenns and W. R. Keatinge. Energy expenditure during walking, J. physiol. 138 : 165~171. 1957
- 4) S. Brunnstrom, Clinical Kinesiology
- 5) A. S. Bryant and J. N. Bruce, metabolic cost and perception of effort during bicycle ergometer work performance, Medicine and science in Sports, 6 : 226~231, 1974
- 6) S. Dickinson, The efficiency of bicycle pedalling as affected by speed and load, J. Physiol, 67 : 242~255, 1929
- 7) D. B. Dill, John C Seed and Francis N. Marzulli Energy expenditure in bicycle riding, J. appl, physiol, 7 : 320~324, 1954
- 8) R. C, Garry and Wishart, The efficiency of bicycle pedalling in the trained subject, J. physiol, 82 : 200~206, 1934
- 9) Scott C. Henderson and etc. The effect of circular and elliptical chain wheels on steady-rate cycle ergometer work efficiency, Medicine and science in sports, 9 : 202~207, 1977
- 10) A. V. Hill. The maximum work and mechanical efficiency of human muscle and their most economical speed. J. physiol, 56 : 19~41, 1926
- 11) 名取礼二, 増田允, 芝山秀太郎. サイクリングの負担量ならびにその至適量決定に関する研究, 体力研究. 11 : 36~46. 1967
- 12) Katherine S. Nordeen-snyder. The effect of bicycle seat height variation upon oxygen consumption and lomer limb Kinematics, Medicine and science in sports. 9 : 113~117, 1977
- 13) 奥山美佐雄, 無負荷走行時の瓦斯代謝, 労働科学研究, 10 : 30
- 14) R. Passmore and J. V. G. A. Durnin Human energy expenditure. Physiol Rev. 35 : 801~840
- 15) A. J. Sargeant and C. T. M. Davies Forces applied to crank of a bicycle ergometer during one-and two-leg cycling, J. affl physiol, 42 : 514~518, 1977
- 16) P. L. Shennum and H. A. de Vries. The effect of saddle height on oxygen consumption during bicycle ergometer work. Medicine and science in sports, 8 : 119~121, 1976

れでも行うことのできる運動である。自転車走行における脚の動きは、歩行の動きと非常に類似しており、歩行でのリズムは自転車走行に生かされていると思える。

駆動動作は、歩行の動作が身体全体を上下に動かしながら移動するのに対して、自転車走行ではサドルに座ったままであることや、歩行では足が地面に接するときに摩擦によってエネルギーを失うのに対して、自転車での脚の動きをクランクによって回転に変えるため、小さなエネルギーで大きな推進力を得ることができる。これまでの研究によれば、自転車走行は歩行の3~5倍のエネルギー効率で仕事をなしうることが可能とされている。

これらのことから、日常生活での自転車利用におけるクランク回転数は50~70rpmの範囲であるならば、エネルギー効率の面から最適である。

まとめ

自転車走行時の乗車姿勢のうち、座席の高さの変化と酸素消費量について検討した結果、日常生活利用では座席に座ったとき、足が地面につく高さが安全面から見た場合も適当と考えられる。しかし、サイクリング、高速走行(20km/h以上)では、現在行われている座席の高さが適していた。一方、走行時のクランク回転数についてみると、人間が最も快適とする回転数は男女とも66~67rpmであった。また、実走行におけるエネルギー効