

自転車走行時の消費エネルギーと効率

＜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
 後 藤 サ ヨ 子

自振協技術研究所

服 部 四 士 主

ま え が き

自転車走行中の効率について，サイクリスト，一般成人らについては多くの研究があるが，自転車を始めて手にする子供たち，日常生活において利用度の高い婦人についてはほとんどない。一方，ミニサイクルの開発により多くの車種が手軽に利用されるようになったが，これらについてもほとんど究明されていない。

本研究は，車輪の径の呼び18, 20の子供用自転車，20, 22, 24のミニサイクル，26の普通自転車の6種類を使用し，室外実走行時の酸素消費量を測定し，車種および車速との相関を求め，走行効率を検討したものである。

1 試 験 要 領

被検者は表1に示すように，成人男子5名(M1～M5・25～41才)，女子5名(W1～W5・18～30才)，児童男(B)，女(G)6名(B1～B3・6～9才，G1

被 検 者		身 長(cm)	体 重(kg)	年 令(才)
男 子	M 1	165.0	60.0	38
	M 2	162.0	58.5	41
	M 3	166.0	53.0	28
	M 4	175.0	70.0	26
	M 5	162.5	55.5	25
女 子	W 1	158.0	50.0	30
	W 2	162.6	56.0	25
	W 3	161.5	62.5	18
	W 4	154.0	53.5	19
	W 5	152.7	46.5	18
男 子	B 1	126.0	26.0	9
	B 2	125.0	27.0	9
	B 3	111.0	20.0	6
女 子	G 1	133.0	37.0	10
	G 2	152.0	41.0	10
	G 3	114.0	18.5	7

表1 被検者の身体特性

～G3・7～10才)である。

実験に使用した自転車は現在市販されている次の6種類である。

		ギヤ比	
子 供 用	18×1.75	1.78 (32:18)	
	20×1.75	1.89 (36:19)	
	ミニサイクル	20×1.75	2.86 (40:14)
		22×1.75	2.88 (46:16)
	24×1.75	2.44 (44:18)	
	24×1.75	2.44 (44:18)	
軽 快 車	26×1 $\frac{3}{8}$	2.30 (46:20)	

タイヤ空気圧はほぼ3 kg/cm²に統一した。

テスト走路はコンクリート路面で1周188 mの周回路である(図1)。

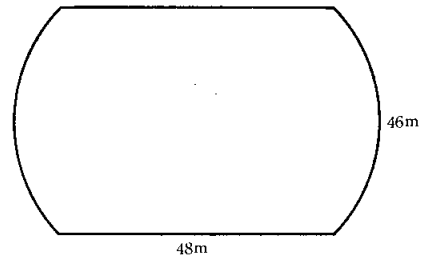


図1 実走路

酸素消費量の測定に当たっては定速走行の維持が最も問題である。このため，走行時の車速が一定に保たれるようスピードメータ装着の先導車が先行し，被検者はそれに随走していく方法をとった。メータ装着の先導車の乗員を常に同一人としたので，測定時における先導車のクランク回転数が車速10km/hで42～43，15km/hで60～62，20 km/hで82～84を示し，スピード規制は十分なされたものと思われる。

呼気の採集は被検者がダグラスバッグを背負い，上記の走路を被検者の代謝系が定常状態になるよう5分間走行した後，マスクとバッグを結ぶコックを開いて走行中の1分間の呼気を採集した。採集されたガスは三栄測器

製ガス分析器で分析した。

実験は昭和50年7月15日から9月5日の間で、夏期の高温時という条件下であったが、多少でもその影響を避けるためできるだけ早朝に行った。実験時の気温は26~30℃、風速は0~3 m/secであった。

2 試験結果

被検者が同一速度で2~4種類の自転車で走行し、実験した。

成人男女10名が20, 22, 24の3種類のミニサイクルと26の普通自転車で、車速10km/h, 15km/h, 20km/hで走行した際の1分間の呼気量, 酸素消費量, 心拍数の測定結果は表2のようである。

また、男女児童6名の18, 20の子供用自転車と20のミニサイクルで、車速10km/h, 15km/hで走行した際の酸素消費量を表3に示した。

2.1 車速10km/h 走行における車種別O₂消費量

男女10名の被検者が、車速10km/hで4種類の自転車で走行した際のO₂消費量を図2に示した。図2ならびに表1に示されるように、男子では被検者M2の22使用時の0.50ℓ/minからM4の20の0.75ℓ/minまでの間に分布しており、走行時の心拍数は68~86拍/分である。

女子ではW4の22, 26使用時の0.47ℓ/minからW3の20の0.69ℓ/minの間にあり、心拍数も75~110拍/

被検者	自転車車種	ミニサイクル 呼び20		ミニサイクル 呼び22		ミニサイクル 呼び24		普通車 呼び26		1分間当たり心 拍数	
		Ve ℓ/min	Vo ₂	Ve ℓ/min	Vo ₂	Ve ℓ/min	Vo ₂	Ve ℓ/min	Vo ₂		
男	10	M 1	18.6	0.65	19.9	0.69	19.6	0.69	19.1	0.62	81—86
		M 2	17.1	0.58	16.0	0.50	18.9	0.61	18.8	0.60	68—72
		M 3	17.4	0.59	14.6	0.51	15.9	0.60	15.3	0.53	80—83
		M 4	20.7	0.75	22.1	0.66	22.3	0.72	18.2	0.63	78—84
		M 5	16.9	0.61	17.3	0.60	16.6	0.59	16.9	0.62	80—86
	15	M 1	29.3	0.98	28.1	0.97	24.8	0.92	21.6	0.77	103—107
		M 2	23.8	0.86	24.3	0.77	20.7	0.75	23.4	0.80	78—87
		M 3	23.3	0.85	19.9	0.74	21.0	0.80	19.9	0.72	95—98
		M 4	24.0	0.95	24.2	0.87	31.6	1.07	28.4	0.97	97—100
		M 5	22.7	0.94	22.7	0.90	23.2	0.84	26.2	0.91	114—118
子	20	M 1	40.5	1.46	44.9	1.59	44.1	1.80	41.3	1.68	147—155
		M 2	40.3	1.55	37.8	1.39	35.0	1.25	36.3	1.30	108—114
		M 3	36.7	1.38	34.8	1.35	36.4	1.40	31.1	1.22	125—130
		M 4	44.4	1.71	37.4	1.42	34.9	1.36	35.6	1.30	116—130
		M 5	31.5	1.24	34.3	1.44	30.4	1.28	31.3	1.36	132—140
女	10	W 1	15.7	0.57	17.5	0.56	17.5	0.62	13.3	0.48	78—87
		W 2	17.6	0.61	18.0	0.64	17.0	0.56	16.5	0.55	86—89
		W 3	19.5	0.69	18.0	0.63	17.4	0.53	19.2	0.62	75—82
		W 4	15.0	0.52	14.0	0.47	15.3	0.57	14.6	0.47	96—105
		W 5	16.9	0.59	19.3	0.66	18.1	0.59	16.1	0.58	100—110
	15	W 1	20.4	0.74	20.4	0.76	20.5	0.69	22.5	0.76	130—139
		W 2	22.5	0.84							105
		W 3	27.0	1.03	23.7	0.92	24.2	0.86	26.8	0.93	101—108
		W 4	23.5	0.88	20.6	0.77	21.2	0.72	22.2	0.80	126—130
		W 5	27.8	0.94	27.5	0.76	26.3	0.79	25.8	0.86	135—146
子	20	W 1	41.5	1.37	35.0	1.20	34.8	1.27	40.5	1.19	149—156
		W 2	30.0	1.28	31.5	1.16	33.7	1.25	30.5	1.15	130—139
		W 3	40.8	1.59	36.2	1.45	38.2	1.46	38.0	1.31	146—150
		W 4	38.1	1.31	32.7	1.15	40.2	1.23	32.0	1.18	164—175
		W 5	56.2	1.30	40.5	1.29	48.2	1.22	49.5	1.39	160—180

注：Ve 最大換気量 Vo₂ 最大酸素摂取量

表2 走行中の酸素消費量(成人男女)

走行速度 (km/h)	車種 被検者	呼び 18	呼び 20	呼び20ミニ
		子供用 Vo ₂ ℓ/min	子供用 Vo ₂ ℓ/min	サイクル Vo ₂ ℓ/min
10	B 1	0.38	0.35	0.37
	B 2	0.39	0.36	0.40
	B 3	0.35	0.39	
	G 1	0.42	0.41	0.41
	G 2	0.49	0.42	0.43
	G 3	0.34	0.36	
15	B 1	0.63	0.60	0.58
	B 2	0.67	0.59	0.65
	B 3			
	G 1	0.80	0.69	0.75
	G 2	0.87	0.78	0.83
	G 3			

表3 走行中の酸素消費量(児童)

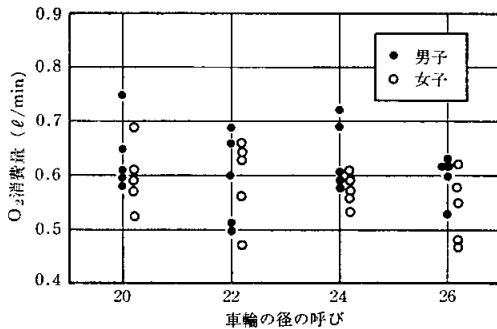


図2 10km/h 走行時のO₂消費量

分である。

男女10名の被検者が20, 22, 24, 26の4種類の自転車で車速10km/h走行時に要するO₂消費量は、図で示されるように車種別に差は認められない。図で見られるばらつきは被検者間の個人差である。

2.2 車速15km/h 走行における車種別O₂消費量

車速15km/h 走行における男女10名の結果を図3に

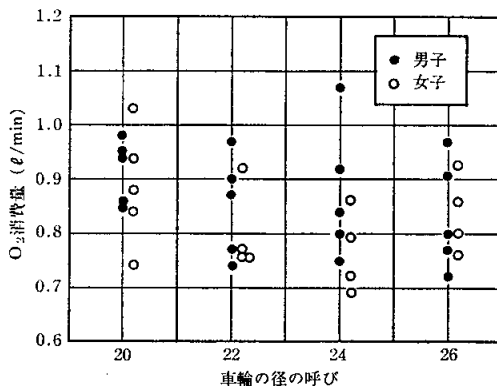


図3 15km/h 走行時のO₂消費量

示した。表1, 図3に示されるように男子では心拍数が78~118拍/分で、O₂消費量はM3の26使用時の0.72ℓ/minからM4の24の1.07ℓ/minの間に分布している。女子の場合はW1の24使用時の0.69ℓ/minからW3の20使用時の1.03ℓ/minの間に分布しており、心拍数は75~110拍/分である。

図で見られるO₂消費量のばらつきは10km/hの試験と同じように個人間の差であり、同一人が4種類の自転車で走行した際には車種間に有意な差は認められなかった。

2.3 車速20km/h 走行における車種別O₂消費量

車速20km/h 走行における男女10名のO₂消費量を図4に示した。

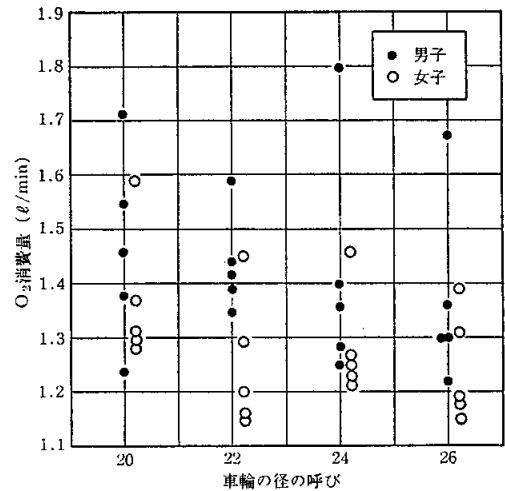


図4 20km/h 走行時のO₂消費量

図4および表1に示されるように20km/h走行時の心拍数は、M2の108~114拍/分からM1の147~155拍/分と被検者の体力により異なり、O₂消費量もM2の1.25ℓ/minから1.55ℓ/minに対して、M1では1.46ℓ/minから1.80ℓ/minと個人間の差が大きく見られる。しかし、5名の平均値で見ると20が1.47ℓ/min, 22が1.44ℓ/min, 24が1.42ℓ/min, 26が1.37ℓ/minで、O₂消費量に車種の差はほとんど認められない。

女子も男子と同じように心拍数が130~180拍/分、O₂消費量が1.15~1.59ℓ/minとばらつきが大きい。5名の平均値は1.37ℓ/min, 1.25ℓ/min, 1.29ℓ/min, 1.24ℓ/minとなり、車種間にO₂消費量の差は認められなかった。

2.4 速度変化に伴うO₂消費量

男女10名の被検者が4種類の自転車で車速10km/h、

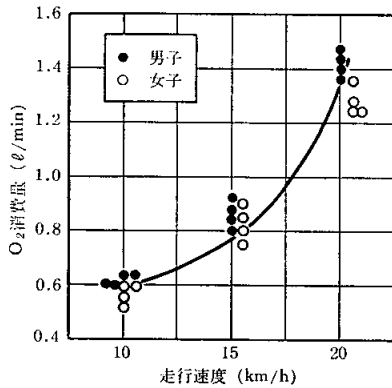


図5 走行速度とO₂消費量の関係

15km/h, 20km/h で走行した際の O₂ 消費量を男女別に各車種ごとに平均値を求め、その関係を図 5 に示した。

速度の増加に伴う O₂ 消費量の変化は、図で示されるようにいずれの車種も同様な傾向を示している。男子の 26 の場合について見ると、10km/h で 0.60 l/min であるのが、15km/h では 0.80 l/min、20km/h で 1.37 l/min と指数的に増加し、その増加率は 15 km/h で 133 %、20km/h で 228 %となる。

女子においても男子とほぼ同傾向であり、24 について例示すれば、10 km/h で 0.57 l/min、15 km/h で 0.77 l/min (135%)、20 km/h で 1.29 l/min (226%) となっている。

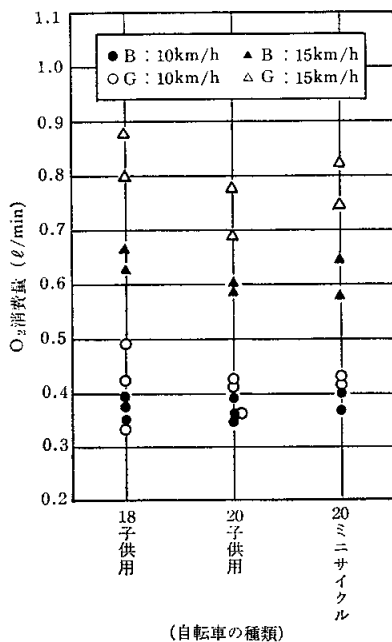


図6

2.5 男女児童による子供自転車ならびに 20ミニサイクル使用時の O₂ 消費量

男女児童 6 名が 18, 20 子供用自転車と 20 ミニサイクル車で、車速 10km/h, 15km/h で走行した際の O₂ 消費量を図 6 に示した。

表 3, 図 6 に示されるように、10km/h 走行時では O₂ 消費量は 0.34 l/min から 0.49 l/min の間にある。

車速 15km/h 走行時は 0.58 l/min から 0.87 l/min の間に分布している。10km/h, 15km/h 走行時の O₂ 消費量で見られるばらつきは、成人男女の場合と同じように個人間の差であり、車種による差は認められなかった。

3 考 察

3.1 自転車の車体条件の O₂ 消費量への影響

自転車走行の O₂ 消費量に影響を及ぼす因子としては、①クランク長、②サドル位置、③ハンドル位置、④ギヤ比、⑤タイヤなどが考えられる。しかし、本実験は市販の自転車を対象としたのでクランク長は 165mm と一定であり、サドル位置は乗車位でひざが伸びた状態になるよう調整し、上記①、②の影響の消去について配慮した。また、ハンドル位置は、日常生活の自転車使用ではハンドルの高さの調整はほとんどなされていないので、すべての被検者とも同一の高さで走行を行った。この点、被検者の身長差があることから、O₂ 消費量に若干の影響があると思われるが無視した。

したがって、O₂ 消費量に影響を及ぼす因子としてはこのハンドル位置に加えて、④ギヤ比、⑤タイヤが考えられることになるが、今回の実験では日常多用されている市販の自転車を対象に、走行中の定時スピード下における O₂ 消費量からその自転車の効率問題を考えようと試みたので、これらについても個々の厳密な区分をすることなく、これらの総合されたものが実走行時にどのように影響するかを論議した。

実験で使用した自転車のギヤ比は前述のとおりである。

これらの自転車を 5 人の被検者が乗車した際の O₂ 消費量についてみると、表 1 に見られるように同一速度、同一車種において各被検者の O₂ 消費量の値に大きな個人差が認められるが、これは個人の体力レベルの差や、自転車走行における習熟度の差が大きく影響しているものと思われる。

運動強度の指標として、エネルギー代謝率 (R. M. R.) が一般に用いられているが、運動に対する習熟度や体力レベルが R. M. R. に大きく影響する。

井上の自転車エルゴメータによる実験によれば、R. M. R. 8 前後の運動で、体格のよい者は劣者に対して20%ほど低い値を示すと報告している。今回の測定結果において見られた被検者間のばらつきはほぼ20%範囲のものであり、車速が変化してもこのばらつきは変わらず、このばらつきは被検者の体力差と走行の習熟度差とによってよいであろう。

3.2 車種ならびに走行速度と O₂ 消費量との関係

図2～図4に示したように、走行速度ごとの車種別 O₂ 消費量には男女ともに車種による特定な傾向は認められなかったが、車種および走行速度と O₂ 消費量との関係を、男女各5名の被検者の走行速度ごとの O₂ 消費量の平均値から検討するために、各々の平均値を求め表4に示した。

走行速度 km/h	車輪の径の 呼び	走行中酸素消費量平均値 ℓ/min	
		男 子	女 子
10	20	0.64	0.60
	22	0.59	0.59
	24	0.64	0.57
	26	0.60	0.54
15	20	0.92	0.90
	22	0.85	0.80
	24	0.88	0.77
	26	0.80	0.84
20	20	1.47	1.37
	22	1.44	1.25
	24	1.42	1.29
	26	1.37	1.24

表4 走行速度と O₂ 消費量との関係

ほとんどの車種および走行速度において男子が女子よりも大きな O₂ 消費量を示しているが、安静時においても O₂ 消費量は男子の方が女子よりも大きく、運動時ではこの傾向がやや助長されたといえる。しかし、10km/h および 15 km/h 時に見られる男女差はほぼ等しい。このことは、この程度の低速な自転車走行では特に運動負荷の影響がないことを意味するものといえる。

表4に示されるように走行速度ごとの車種別 O₂ 消費量は、男女ともに同様な傾向で車種間で差は認められない。しかし、速度増加に伴う O₂ 消費量は増加が明らかに認められる。

この方面の研究では服部らが競走用自転車を用いて同種の測定を行っているが、10～15km/hの走行では今回の結果とほぼ同じである。

しかし、車速 20km/h 走行では 0.9～1.1 ℓ/min であったと報告しており、今回の結果はこれより 30～40%

大きな値である。

これらのことから、車速 15km/h 以下の低速走行では車の形状や機能などを含めた車種そのものの影響が、走行時の O₂ 消費量にほとんど見られないのに対し、この速度以上の走行では、日常常用されている車種間ではまだ差は認められないが、形状や機能の異なるスポーツ車との間では明らかな差が見られ、実験に使用した家庭用実用車は高速走行ではスポーツ車に対して明らかに不利である。

走行速度と O₂ 消費量の関係でいま一つ検討しなければならない問題は、速度増加量と O₂ 消費量の増加の関係である。

走行速度 km/h	車輪の径の 呼び		20	22	24	26
	性 別					
15	男	子	144	144	138	133
	女	子	150	136	135	156
20	男	子	230	244	222	228
	女	子	228	212	226	230

表5 走行速度の増加と O₂ 消費量との関係
(10kmを100とした場合)

両者の関係を表5に示すが、10km/hの走行での O₂ 消費量は男子ではほぼ 0.6 ℓ/min であるが、50%速度増の 15km/h では O₂ 消費量は 0.80～0.92 ℓ/min で、10km/h 時の平均 40% 増である。女子の場合も同様な傾向を示している。

20km/h 走行では走行速度は 10km/h 時の 100% 増となるのに対して O₂ 消費量は平均 130% 増となり、それは速度の指数関数的な増加を示している。R. M. Sargent は、人間のランニング時の O₂ 需要量を諸種のランニング速度について測定しているが、そこでのランニングスピードと O₂ 需要量との関係は、ランニングスピードの 3.8 乗に比例すると報告しているが、自転車走行速度とその際の O₂ 消費量との関係も、上記のように指数に違いはあるが、ランニングと同じように指数関数的増加が見られるといえる。

また、自転車走行のエネルギー効率を検討する際、考慮しなければならないことは単位時間当たり（1分間当たり）のペダリング数である。この方面の研究はこれまで、Hansen, garry ら、Karpovich らおよび Taylor らなどのものがあるが、最大効率を発揮するペダル回転数は 50～60 回転/分であると報告している。また、Dickinson は自転車エルゴメータを用いて、最大効率発揮の際のペダリング時間が 0.9 秒であると報告しているが、これは 1分間当たり 65 回転に相当する。

今回の測定は走行時間が 6分間と短いものであったが、この関係を確認する資料を得た。車速 10km/h 走行時のペダリング回転数は約 40 回転/分であり、15km/h

走行では60~65回転/分であった。また、両走行速度時のO₂消費量はすでに述べたように車種による変動はほとんどなく、走行速度の増加に比してもO₂消費量の増加が低かった。この結果は上記のTaylorやDickinsonの結果と一致するものであり、家庭用自転車での走行では車速15km/h程度の走行が最も高い効率を示すものといえる。

あ と が き

車輪の径の呼び20, 22, 24のミニサイクルおよび26の普通自転車を用い、成人男女を被検者とし、車速10km/h, 15km/h, 20km/hの速度で走行し、その際のO₂消費量から自転車走行のエネルギー効率を検討したが、最も高い効率の見られる速度は15km/h程度の速度であり、1分間のペダリング回転数は約60であることがわかった。

自転車走行における効率に関する因子としては、前述のように、自転車部材の諸寸法が考えられる。これらの効率に及ぼす影響については、今後なお追求されなくてはならないであろう。

おわりに、本研究は「自転車の安全性、操縦性研究委員会」の委員の助言によって推進されたもので、関係各位に厚くお礼申し上げる。

文献

- 1) S. Dickinson
The efficiency of bicycle pedalling as affected by speed and load
J. Physiol. 67; 242-255 1929
- 2) D. B. Dill, John C Seed and Francis N. Marzulli
Energy expenditure in bicycle riding
J. Appl. Physiol. 7; 320-324 1954
- 3) R. C. Garry and G. M. Wishart
The efficiency of bicycle pedalling in the trained subject
J. Physiol 82; 200-206 1934
- 4) E. Hansen
Zum Vergleich des Energieumsatzes beim Radfahren und beim Treppensteigen.
Arbeitsphysiol. 7; 299-307 1933
- 5) 服部進ほか
自転車の人間工学的研究〔II〕
昭和43年度自転車生産技術研究報告書
- 6) 服部四土主ほか
自転車の人間工学的研究Ⅲ,Ⅳ
昭和44, 45年度自転車生産技術研究報告書
- 7) A. V. Hill
The maximum work and mechanical efficiency of human muscle and their most economical speed
J. Physiol. 56; 19-41 1926
- 8) P. V. Karpovich
Ergogenic aids in work and sport
Res. Quart 12; 432 1941
- 9) R. Passmore and J. V. G. A. Durnin
Human energy expenditure
Physiol. Rev. 35 801-840
- 10) R. M. Sargent
Relation between oxygen requirement and speed in running
Proc. Roy. Soc. s. B. 100; 10 1926
- 11) Clara M. Taylor, Mary E. R. Bal, Mina. W. Lamb and Grace Macleod
Mechanical efficiency in cycling of boys seven to fifteen years or age
J. Appl. Physiol. 2; 563-570 1950