

都市内道路における心拍指標を用いた自転車走行特性と

エネルギー消費に関する実験的研究

An Experimental Study on Cycling Conditions and Energy Consumption Using Heart Rate in Urban Road

都市基盤計画分野 野竹壮一郎

一般に、自転車利用は健康によいと考えられているが、わが国では低速で移動距離が短い。そこで、健康面の効果を向上させる自転車ネットワークの整備を進めているが、知見が得られていない。

本研究では、学生と一般人を対象に室内実験と実道路走行により、心拍数を用いて消費エネルギーを推計した。その結果、走行特性・走行空間（勾配・信号等）から個人差や異なる走行空間を考慮した、自転車走行時の消費エネルギーの推定式を構築した。

Generally it is considered that riding bicycle has brought some benefits to health while bicycle trip statistics in Japan showed that the travel speed was lower and the average trip distance was much shorter than other countries. Under these condition, some bicycle transport planners focuses on the engineering property of bicycle network to realize health benefit effectively, but there is few researches describing the effects on existent bicycle path conditions.

We conducted experiments in laboratory and urban road. In the result, we made an equation estimating energy consumption taking account of individual variation and bicycle bath conditions using heart rate.

1. はじめに

一般に、適度な身体活動をともなう自転車利用は健康によいと考えられており、健康志向の高まりとともに、環境負荷も小さいことから自転車利用に注目が集まっている。

しかし、現在都市部では軽車両である自転車の歩道走行が常態化しており、歩道は歩行者優先の原則を考慮すると、自転車は低速で走行しなければならない。また、自転車利用の大部分が5km圏内であり、1km以内の移動が約7割にも及び、移動距離の短い端末交通手段として利用されている¹⁾。現状の自転車利用では、健康面の効果は期待しにくい、車道を前提とした空間整備が進むことで、高速走行や代表交通手段としての利用に転換することで、健康面の効果が期待できる。

そこで、本研究では、自転車通勤・通学者の走行特性を明らかにし、その特性及び走行空間（勾配・信号等）が与える消費エネルギーへの影響を把握する。そして、走行特性・走行空間から、自転車走行時の消費エネルギーの推定式を構築することを目的とする。

最終的には、この式を用いて、消費エネルギーの増加が期待できる自転車ネットワーク整備の知見を得る。

2. 研究方法

(1) 研究フロー

図-1に研究フローを示す。大きく分けて学生を対象とした実走行実験と自転車通勤・通学を行っている一般人を対象とした走行状況計測がある。

実走行実験では、実験条件（速度や走行ルート等）をコントロールした上で心拍数の変動要因を把握し、心拍数が推定可能かどうか調査する。次に、実走行実験の結果を踏まえ、走行状況計測では、通勤・通学で代表交通手段として自転車を利用している一般人を対象に、実験条件をコントロールせずに走行時のデータを取得する。走行状況計測と同時並行で、室内実験では被験者ごとの心拍数と消費エネルギーの関係を表す回帰式を求める。この回帰式と実際に走行したときの心拍数から、消費エネルギーを推計する。重回帰分析によって、走行特性・走行空間（勾配・信号等）から自転車走行時の消費エネルギーの推定式を構築する。

本研究では、Paffenbargerら²⁾による消費エネルギーが増加するほど相対的に死亡率は減少するとの知見にしたがって、消費エネルギーが増加するほど健康面の効果が期待できると仮定する。

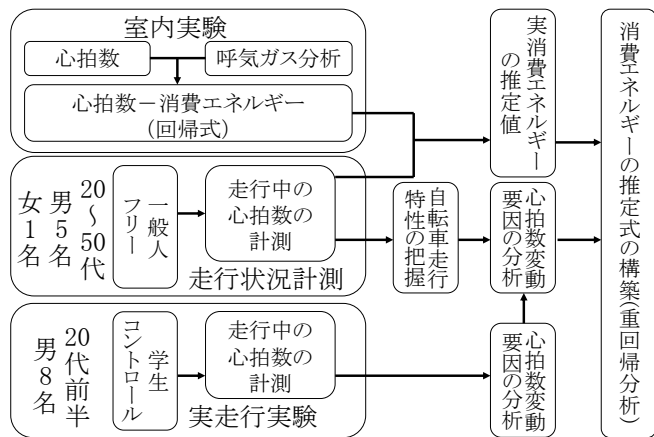


図-1 研究フロー

(2) 消費エネルギーの推定方法³⁾

エネルギー消費量の測定は、間接熱量測定法を用いる。これは、呼気ガス分析を行い、酸素消費量と炭酸ガス産出量を求め、間接的にエネルギー消費量を算出する方法である。この測定は実験室で行い、交通場面では心拍数のみを測定する。そして、実測の心拍数と実験室で得られた心拍数と消費エネルギーの関係を表す回帰式から消費エネルギーを推定することとした。

その他の方法としては、小型の呼気ガス分析機を実際の走行中に用いて、エネルギー消費量を算出する方法もあるが、被験者への負担が大きく、消費量の測定誤差も大きくなる傾向があるため、上記の方法を用いることにした。

エネルギー消費量を求める手順は以下である。

- (i) 実験室において、被験者に身体的負荷変化を与えながら、肺換気量と吸気呼気の酸素、炭酸ガス濃度を測定し、同時に心拍数を計測する。
- (ii) 呼気ガスを分析し、以下のようにして身体エネルギー負荷を表す消費量を算出する。

本研究で用いる身体エネルギー消費量の単位は、安静時の体表面積 1m^2 当たりの仕事量で表し、これを1METSと定義する。次式で示す。

$$1[\text{METS}] = \text{被験者ごとの安静時消費量} [\text{W}/\text{m}^2]$$

したがって消費量は次式で求められる。

$$\text{消費量}[\text{METS}] = \frac{\text{産熱量}[\text{W}]}{\text{体表面積}[\text{m}^2]} \\ / \text{被験者ごとの安静時消費量}[\text{W}/\text{m}^2]$$

$$\text{産熱量} = f_1 (\text{呼気CO}_2\text{量}, \text{吸気O}_2\text{量}, \text{呼気時間}, \\ \text{吸気時間})$$

$$\text{体表面積} = f_2 (\text{体重}, \text{身長})$$

上記の各変数を次のように定義する。

Y : 消費量[METS], X_1 : 産熱量[W], X_2 : 体表面積 $[\text{m}^2]$,
 X_3 : 被験者ごとの安静時消費量 $[\text{W}/\text{m}^2]$,
 X_4 : 呼気 CO_2 量 $[\text{l}/\text{h}]$, X_5 : 吸気 O_2 量 $[\text{l}/\text{h}]$,
 X_6 : 呼気時間 $[\text{h}]$, X_7 : 吸気時間 $[\text{h}]$, X_8 : 身長 $[\text{cm}]$,

X_9 : 体重 $[\text{kg}]$, X_{10} : 呼吸商[N.D.]

実験によって直接求められる値は X_3, X_4, X_5, X_6, X_7 , 事前の測定で得られる値は X_8, X_9 である。人の産熱量は、糖質と脂質における化学的な燃焼熱と酸素消費量の積によって求められ、糖質と脂質における燃焼熱は、以下の式で求められる。

$$\text{糖質と脂質における燃焼熱}[\text{kcal}/\text{l}] \\ = 3.815 + 1.232 \times X_{10}$$

呼吸商は O_2 消費量に対する CO_2 産出量の比である。

$$X_{10} = (X_4 X_6) / (X_5 X_7)$$

したがって、産熱量は上記の燃焼熱に吸気酸素量を乗じて以下のようなになる。

$$\text{産熱量} X_1 [\text{W}] = (3.815 + 1.232 X_{10}) (X_5 X_7) / 1.163$$

一方、体表面積は

$$\text{体表面積} X_2 [\text{m}^2] = 71.84 X_9^{0.425} X_8^{0.725} / 10000$$

と表わすことができる。

よって、最終的に身体エネルギー消費量は

$$\text{消費量} Y [\text{METS}] = X_1 / X_2 / X_3 \\ = (3.815 + 1.232 X_{10}) (X_5 X_7) / 1.163 \\ / (71.84 X_9^{0.425} X_8^{0.725} / 10000) / X_3$$

として求められる。

- (iii) 被験者ごとに、心拍数と消費量の関係を表す回帰式を求める。
- (iv) 様々な交通場面で心拍数を測定し、これを(iii)で求めた回帰式に代入することで、その交通場面での消費量を推定することができる。

3. 室内実験

(1) 実験概要

関西医科大学附属枚方病院・健康科学センターで心肺運動負荷試験(CPX)に基づいて、被験者に徐々に負荷のかかる自転車エルゴメータを限界までこいでもらい、経過ごとの心拍数と呼気ガスを分析した。実験は2012年1月に実施した。被験者は20~50歳代の通勤・通学で代表交通手段として自転車を利用している一般人であり、これらの被験者は後述する一般人を対象とした走行状況計測の被験者でもある。表-1に各被験者のプロフィールを示す。

測定方法は、運動開始5分前に自転車エルゴメータに座してもらい、運動開始後は50rpm(1分間に50回転)を目安にこいでもらった。運動開始後、まずウォーミングアップとして20Wの負荷で4分間こいでもらい、それ以降は1分ごとに20W負荷が上昇する状態で限界までこいでもらった。呼気ガス採集と心拍数の計測は運動開始5分前から運動終了後4分間計測した。

表-1 被験者のプロフィール

被験者	年齢	性別	測定日	温度(°C)	身長(cm)	体重(kg)	体表面積(m ²)	体脂肪率(%)
A	52	男	12/15	25	169.5	70.0	1.806	22.2
B	45	男	1/19	25	163.0	62.8	1.675	20.2
C	31	女	1/22	25	157.0	54.0	1.531	26.3
D	28	男	1/22	25	172.0	63.7	1.754	20.3
E	27	男	1/19	25	165.0	72.6	1.797	23.3
F	25	男	1/19	25	177.0	74.4	1.913	18.7

(2) 心拍数と消費エネルギーの関係を表す回帰式

結果を示す前に心拍数の特性について説明すると、心拍数は心理的影響によって増加するが、この影響は安静時に強く働き、運動強度が高くなるにつれて、小さくなっていく⁴⁾。

図-2 に各被験者の心拍数と消費エネルギーの関係を示す。実験室での実験は閉鎖環境で実施したので、被験者による緊張の度合いは異なるが、何らかの緊張を受けて安静時の心拍数は増加していると考えられる。そこで、安静時の心拍数を正確に求めるために回帰式は3次式を用いた。3次式は心臓が停止した際に身体エネルギー消費が0となるようになっている。運動中は心理的影響による心拍数の増加が小さくなるので、運動中の心拍数は心理的影響のない運動のみによって増加する心拍数とする。運動中は1次式がよく当てはまる⁵⁾ので3次式と1次式の交点を境にして、安静時から低強度までの運動を3次式で、低強度以降の運動は1次式で表すこととした。

METS 数とは運動時消費量が安静時消費量の何倍であるかを表し、消費エネルギー(kcal)は METS 数に体重(kg)、運動時間(h)、係数 1.05 を乗じて求まる。

心拍数は負荷時に通常見られる範囲内にあるが、被験者によって1次式の切片、傾きが異なり身体的特性による個人差の影響が少なくない。しかし、各被験者においては、両指標間に明確な関係が得られているため、実際の交通場面において心拍数を測定しておけば、その被験者に関する自転車走行時の消費エネルギーの推定値を求めることは可能であると考えられる。

4 実走行実験と走行状況計測

(1) 概要と分析方法

表-2 に学生、一般人を対象とした実走行実験・走行状況計測のそれぞれの概要と分析方法を示す。学生を対象とした実走行実験では、走行空間の異なる3つの

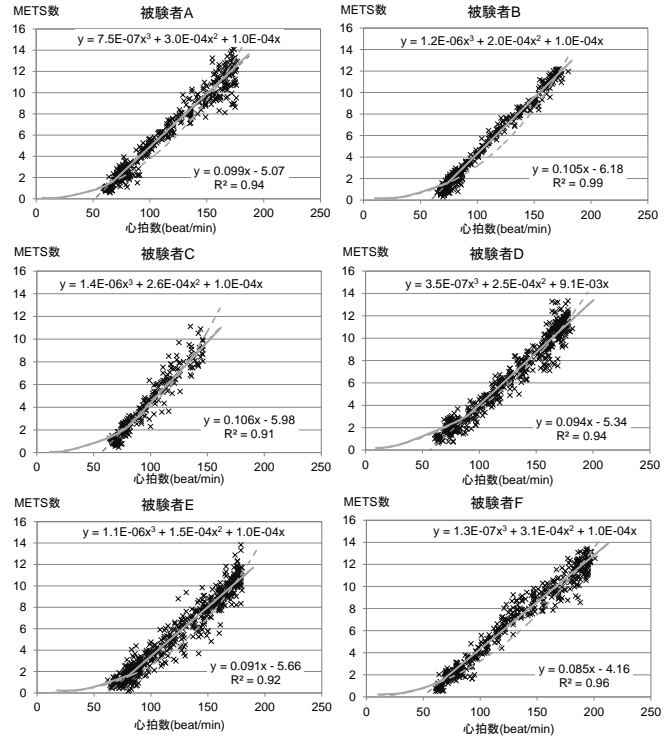


図-2 各被験者の心拍数と消費エネルギーの関係を表す回帰式

表-2 それぞれの実験の概要と分析方法

	学生実験	一般実験
ルート	コントロール ルート1(勾配, 信号無) ルート2(勾配多い) ルート3(信号多い)	フリー
速度	15~17km/h(目安を指示)	自由
タイプ	シティサイクル(変速機なし)	ロード, クロス
その他	全ルートを1回走行	同じルートを3回走行
分析方法	重回帰分析	重回帰分析
目的変数	心拍数	心拍数
説明変数	速度, 経過時間, 勾配	速度, 経過時間, 勾配, ペダル負荷, 速度0時間
データ	ルートごとの5秒ごと	全走行日の1秒ごと

ルートを設定し、速度は15~17km/hを目安に走行してもらい走行データ(5秒間隔で計測)を取得した。一般人を対象とした走行状況計測では、被験者が通勤・通学で使用する自転車に機器を取り付け、日ごろ走行するルートを普段通りに3日間走行してもらった。3日も同一ルートを走行し、そのときの走行データ(1秒間隔で計測)を取得した。心拍数の変動要因を明らかにするために、分析方法はどちらも重回帰分析を用いた。説明変数は速度、経過時間、勾配は共通の変数として用い、一般人を対象とした走行状況計測では、学生を対象とした実走行実験の結果を踏まえて、変数にペダル負荷と速度0時間を加えた。速度0時間とは信号の影響を表す説明変数である(詳しくは表-7で説明する)。

表-3 一人の学生のルートごとの分析結果

変数名	ルート1		ルート2		ルート3	
	標準 偏 回帰 係数	t 値	標準 偏 回帰 係数	t 値	標準 偏 回帰 係数	t 値
速度(km/h)	0.27	4.36 **	0.24	9.30 **	0.28	6.25 **
経過時間(分)	0.29	4.62 **	0.18	6.49 **	0.35	7.47 **
勾配(%)			0.76	27.21 **	0.42	8.85 **
定数項	72.81	21.59 **	81.79	52.42 **	85.06	55.03 **
サンプル数	228		270		272	
決定係数	0.14		0.83		0.48	

(2) 学生を対象とした実走行実験の分析結果

表-3 に一人の学生のルートごとの重回帰分析の結果を示す。決定係数をみると、ルートによって値が大きく異なっている。t 値をみると、すべてのルートで速度、経過時間、勾配の値が正（有意）である。

決定係数が異なるのは、ルート2のように勾配が支配的なルートでは精度よく心拍数の推定は可能であるが、ルート1のように勾配や信号がない平坦なルートや、ルート3のように信号停止が多いルートでは精度よく推定することができないことがわかった。そこで、一般人を対象とした走行状況計測では、上記の点を踏まえて、平坦なルートでは心拍数はペダルを漕ぐときの負荷に依存すると考え、ペダルを漕ぐときの負荷（以下、ペダル負荷）を新たに計測し、信号停止時の回復については、新たな説明変数を用いることとした。

(3) 一般人を対象とした走行状況計測の分析結果

表-4 に被験者 A と被験者 E の重回帰分析の結果を示す。表-4 をみると、新たに加えた説明変数も含め、すべての説明変数が有意であった。しかし、決定係数が 0.5 を越える被験者は一人だけで、残りの被験者は 0.5 を下回っており、速度が約 30km/h にも及ぶ場合、下り勾配時、上り勾配が長く続いた後の心拍数の回復の遅れ、信号停止が長時間に及ぶ場合等を十分に説明できていないことがわかった。

5. 自転車走行特性の把握

(1) 平均速度

表-5 に各被験者の全走行日の走行場所時間割合の平均と信号による影響を除いた速度（以下、信号除き速度）の平均と標準偏差を示す。表-6 に被験者 A, B, D, E の信号除き速度の平均より速度が 5km/h 以上の高速走行時の割合と、そのときの平均速度を示す。

表-4 被験者 A, E の分析結果

変数名	被験者 A			被験者 E		
	偏回 帰係 数	標準 偏 回帰 係数	t 値	偏回 帰係 数	標準 偏 回帰 係数	t 値
速度(km/h)	0.58	0.40	43.99 **	0.57	0.33	20.81 **
経過時間(分)	0.04	0.06	8.30 **	0.32	0.12	9.95 **
勾配(%)	1.00	0.12	17.19 **	2.24	0.14	11.19 **
ペダル負荷(W)	0.07	0.33	40.61 **	0.13	0.40	27.97 **
速度0時間(s)	-0.11	-0.08	-9.88 **	-0.10	-0.10	-6.15 **
定数項	108.18		333 **	114.66		155 **
サンプル数	11747			3644		
決定係数	0.43			0.50		

表-5 各被験者の走行場所割合と信号除き速度

被 験 者	走行場所時間割合(%)				信号除き速度(km/h)	
	歩道	車道	自歩道	自歩専 用道	平均	標準偏差
A	3	52	0	44	21.8	7
B	20	74	7	0	20.3	5.9
C	21	78	2	0	15.1	3.6
D	2	97	2	0	23	8.5
E	0	100	0	0	19.8	7.5
F	53	20	25	2	18.4	3.6

表-6 高速走行割合とそのときの平均速度

被験者	走行時間(s)	平均+5km/h 時間(s)	割合(%)	平均速度 (km/h)
A	3744	808	21.6	30.2
B	1630	295	18.1	28.4
D	1528	433	28.3	31.6
E	1050	232	22.1	29.4

表-5 をみると、相対的に標準偏差の大きい被験者 A, D, E の走行場所は比較的速度が出しやすい車道や高幅員の自歩専用道の割合が大きい。それに比べて、相対的に標準偏差の小さい被験者 C, F の走行場所は歩道や自歩道の割合が高い。実際に標準偏差の値が大きい被験者 A, B, D, E は信号除き速度の平均よりもかなり高速で走行している区間があった。表-6 をみると、信号除き速度の平均よりも 5km/h 以上の速度で走行している割合は約 2~3 割であり、またそのときの平均速度は約 30km/h であることがわかる。

以上より、車道や高幅員の自歩専用道を走行する割合が大きい被験者は、速度の変動が大きく、平均速度よりもかなり高速で走行する場面が増加する傾向にあることがわかった。

(2) 下り勾配

上り勾配では、自転車走行においてペダルを漕がなければ走行できないので、行動は「ペダルを漕ぐ」の1種類であるが、下り勾配では、「ペダルを漕ぐ」と「ペダルを漕がない」の2種類の行動が考えられる。自転車走行時の消費エネルギーを考える上で、ペダルを漕ぐ場合は運動になり、ペダルを漕がない場合は回復になるので、2種類の行動は大きく異なり、これらは分けて考える必要がある。

本研究では、下り勾配でペダルを漕いでいるかどうか実際に観測しているわけではないので、その判断をする上で、平均ペダル負荷とペダル負荷割合（下り勾配走行時間に対するペダリングしている時間）の両指標を用いる。ペダルを漕いでいる・漕いでいない、の判断基準として、「平均ペダル負荷が20W以上かつ負荷割合が50%以上」とした。この理由は、機器の誤作動や超低負荷運動（身体活動にならないレベルの運動）の継続によって負荷割合が50%以上になる場合や、数秒の高負荷が平均負荷の値を過大にする場合があるので、両指標を用いて正確に判断するためである。

この基準を用いて、下り勾配時に漕いでいるかどうかを判断したが、各被験者の3日分のデータがとれている下り勾配29ケースに対して、24ケースが同一の行動（漕ぐ・漕がない）をとっていた。このことから、下り勾配時の行動は、その日の気分等の主観的判断ではなく、道路構造によって行動が規定されている可能性がある。

また、本研究から得られた下り勾配での被験者の行動の傾向としては、

- i)勾配が2.0%以下ではペダリングを行う。
- ii)勾配の大小に関係なく、勾配後に減速・停止を余儀なくされる場合は、勾配中はペダリングを行わない。
- iii)勾配の大小に関係なく、勾配後に減速・停止をする可能性が極めて低い場合は、ペダリングを行い、速度を上げる。
- iv)下り勾配で速度を上げた場合は、その後の平坦走行時も速度の維持に努める。

である。

iv)に関して、自転車走行時の消費エネルギーを増加させるための大きな要因となる可能性がある。

6. 自転車走行時の消費エネルギーの推定式の構築

5章から明らかになった自転車走行特性を考慮して、高負荷時や疲労の影響等を説明するための変数を設定し、重回帰分析から自転車走行時の消費エネルギーの推定式を構築する。

(1) 用いる説明変数

表-7に重回帰分析で用いる説明変数の一覧を示す。「28km/h 越え時間」、「28km/h 後回復時間」とはセットで用いる説明変数であり、高速、つまり高負荷時の疲労による心拍数の低負荷時とは異なる増加・回復を説明する変数である。「走行距離」は4章で用いた「経過時間」の代わりとなる変数で、走行距離が長くなることによって生じる疲労を表す説明変数である。「速度0時間」とは、信号等の停止によって速度減少では説明できない心拍数の回復を表す説明変数である。「上り勾配時間」、「上り勾配後回復時間」とは、「28km/h 越え時間」、「28km/h 後回復時間」と同様の高負荷時の疲労・回復の影響を表す説明変数である。「漕ぎ有時下り勾配」、「漕ぎ無時下り勾配回復時間」とは、5章(2)で明らかとなった下り勾配時の2種類の行動による心拍数の変動を表す説明変数である。

ここで、「28km/h 越え時間」、「28km/h 後回復時間」の高負荷による影響が現れる速度の境界を28km/hと設定しているが、これはデータから判断した。

変数を使用するかどうかは、重回帰分析の結果のt値から判断し、有意である場合は使用する。また、走行中にその説明変数を用いる場面がない被験者は、その説明変数を用いていない。

表-7 用いる説明変数一覧

変数名	データの説明	変数使用被験者							
速度(km/h)	計測した1秒ごとのデータ	A	B	C	D	E	F		
28km/h 越え時間(s)	速度が28km/hを越えたところから1秒ずつ増加するデータ	A	B		D	E			
28km/h 後回復時間(s)	28km/h 越え時間が終了してからその時間と等しい時間 1秒ずつ減少するデータ		A	B		D	E		
ペダル負荷(W)	計測した1秒ごとのデータ	A	B	C	D	E	F		
走行距離(km)	計測した1秒ごとの開始からの相対距離のデータ	A	B	C	D	E	F		
速度0時間(s)	速度が0km/hのときに1秒ずつ増加するデータ	A	B	C	D	E	F		
上り勾配(%)	上り勾配の間、勾配(%)の値を入れるデータ		B		D				
上り勾配時間(s)	上り勾配時に1秒ずつ増加するデータ	A	B				E	F	
上り勾配後回復時間(s)	上り勾配時間が終了してからその時間と等しい時間、1秒ずつ減少するデータ		A	B				E	F
漕ぎ有時下り勾配(%)	下り勾配でペダルを漕いでいる間、勾配(%)の値を入れるデータ	A	B	C	D	E	F		
漕ぎ無時下り勾配回復時間(s)	下り勾配でペダルを漕いでいない場合に1秒ずつ増加するデータ	A	B	C					F

(2) 重回帰分析による結果

目的変数に METS 数, 説明変数に表-7 に示しているすべての説明変数として, 全被験者の 1 秒ごとのデータを重回帰分析した. ここで, データを全被験者とする事で, 個人差や異なる走行空間を考慮した消費エネルギーの推定が可能となる. また, 各被験者で走行時間が異なるためにサンプル数に偏りがでるので, 全被験者のサンプル数を 3500 として, 合計 21000 で分析を行った. サンプル数の選定は, 走行日の早いデータから使用し, 少なくとも被験者ごとのルートの開始から終了までの全データが 1 つは含まれるようにした. ただし, 被験者 A の走行ルートは他の被験者よりも走行距離が長く, 走行開始から終了までの全データを用いておらず, 途中までのデータである.

表-8 に重回帰分析の結果を示す. 「漕ぎ無時下り勾配回復時間」は被験者ごとで重回帰分析をした場合, 有意であったが, 被験者全体では, 説明変数を用いる事象が少ないために, t 値が低く有意でなかったため, この分析結果からは除外している.

表-8 をみると, 決定係数は 0.617 と当てはまりが良いことがわかる. 表-4 で用いた説明変数で同様に分析すると決定係数は 0.481 であったので, 新たに説明変数を用いることで精度が大きく向上していることがわかる. t 値をみると, すべての変数が有意であることがわかる. また, 疲労の影響を表す「28km/h 越え時間」, 「28km/h 後回復時間」, 「走行距離」, 「上り勾配時間」, 「上り勾配後回復時間」の標準偏回帰係数をみると値が大きく, 疲労による消費エネルギーに与える影響が大きいことがわかる.

表-8 重回帰分析の結果

変数名	偏回帰係数	標準偏回帰係数	t 値
速度(km/h)	0.047	0.265	43.452 **
28km/h 越え時間(s)	0.029	0.245	49.681 **
28km/h 後回復時間(s)	0.034	0.287	66.496 **
ペダル負荷(W)	0.005	0.270	54.464 **
走行距離(km)	0.097	0.240	54.949 **
速度 0 時間(s)	-0.010	-0.066	-12.458 **
上り勾配(%)	0.106	0.050	8.852 **
上り勾配時間(s)	0.015	0.076	13.487 **
上り勾配後回復時間(s)	0.025	0.123	28.415 **
漕ぎ有時下り勾配(%)	-0.186	-0.071	-16.221 **
定数項	3.766		178.627 **
サンプル数	21000		
決定係数	0.617		

7. 研究のまとめと今後の課題

自転車走行は歩行と比べて速度変化が大きく, 勾配の影響を強く受けるので, 運動強度が頻繁に変化する. そのため, 同じ走行距離であっても走行特性・走行空間(勾配・信号等)が異なることで消費エネルギーが大きく変動すると考えた.

本研究では, 自転車通勤・通学者の走行特性から, 消費エネルギーが変動する要因を明らかにし, 走行特性・走行空間および疲労の影響を考慮した自転車走行時の消費エネルギーの推定式の構築を試みた.

自転車走行特性の把握より, 自転車通勤・通学で比較的速度の出しやすい車道や高幅員の自歩専用道を走行している人は, 速度の変動が大きく, 平均よりもかなり高速で走行する割合が高くなることがわかった. また, 下り勾配で漕ぐか漕がないかは, 道路構造に依存し, 漕ぐ場合は勾配中に速度を上げ, 勾配後も速度の維持に努めることがわかった.

自転車走行時の消費エネルギーの推定式の構築により, 高負荷や疲労の影響を表す説明変数を用いることで, 個人差や異なる走行空間を考慮した精度の良い自転車走行時の消費エネルギーの推定式の構築が可能となった. また, この式から疲労による消費エネルギーに与える影響が大きいことがわかった.

以上より, 疲労の影響や走行空間(坂・信号等)の違いで消費エネルギーは大きく異なる. そこで, 自転車利用において, 消費エネルギーから健康便益を評価する場合には, これらの影響を考慮するためにも, 実交通条件に近い状態で評価する必要がある.

今後の課題は, 信号停止時に推定値が観測値と大きく異なっていたことから回復メカニズムの解明により, 新たな説明変数等を用いることによって推定精度を上げる必要がある. また, 本研究で得られた推定式は説明変数が多く, 実用しにくいと考えられる. したがって, 心拍数変動のメカニズムを詳細に把握し, 説明変数の削減を図る必要がある.

参考文献

- 1) 第 82 回交通工学講習会: 自転車~ひとつの交通モードとして~, 2008.
- 2) Paffenbarger, R. S. Jr., Hyde, R. T., Wing, A. L. and Hsieh, C. C.: Physical activity, all-cause mortality, and longevity of college alumni, *New England Journal of Medicine*, Vol. 314, No. 10, pp. 605-613, 1986.
- 3) 中山照雄: エネルギー代謝の測定, 温熱生理学, pp. 75-80, 理工学社, 1981.
- 4) 山地啓司: 運動処方のための心拍数の科学, 大修館書店, 1981.
- 5) 橋本勲, 山川喜久江, 小林修平, 長嶺晋吉: 心拍数による 1 日のエネルギー消費量の測定に関する研究, 日本栄養改善学会講演集, Vol. 30, pp. 288-289, 1983.

討議

討議 [矢持進]

論文では、目的として、健康面の効果を向上させるために、どのような自転車ネットワークにするべきかを明らかにすると書いてあるが、自転車ネットワークに関する研究には至っていないのではないかと。

回答

確かに本研究では走行特性・走行空間（勾配・信号等）から自転車走行時の消費エネルギーの推定式を構築したところで終わっており、どのような自転車ネットワークにするべきかまでは明らかにできていない。今後の課題として、この消費エネルギーの推定式を用いて、健康面の効果が期待できる自転車ネットワークのあり方について研究を進めようと考えている。

討議 [内田敬]

本研究の重回帰分析で構築した消費エネルギーの推定式から都市整備に関して得られる知見は何か。

回答

走行空間（勾配・信号等）による消費エネルギーに与える影響が大きいことがわかり、消費エネルギーを考える場合、走行空間を考慮する必要があることが知見として得られた。

また、高負荷や疲労による消費エネルギーに与える影響が大きいこともわかり、自転車走行空間を整備することは、高負荷や疲労による影響が加わるので、単なる速度上昇による消費エネルギーの増加のみの効果ではなく、それ以上の消費エネルギーの増加効果があることが知見として得られた。

討議 [日野泰雄]

本研究の被験者のように車道を走行している状態で高速走行になるのであれば、自転車利用者が車道を走行すればよいのであって、自転車レーン整備等の自転車走行空間の整備は必要ないのではないかと。

回答

本研究の被験者は自転車通勤・通学をしており、日頃から車道走行することに慣れているので、車道でも高速走行ができています。しかし、日頃から歩道を低速で走行している人にとって、いきなり車道を走行することは無理があると考えられる。そこで、自転車レーン等、自転車が走行しやすい走行空間を車道に整備する必要があります。それによって、自転車利用者が歩道走行から車道走行に変わることによって、高速になり、消費エネルギーの増加が期待できる。

討議 [日野泰雄]

背景でどれぐらいの延長にすべきかと言っていたが、道路延長に関する議論はどうなったのか？

回答

さきほどの自転車ネットワークの議論と同様で、本研究では、走行特性・走行空間（勾配・信号等）から自転車走行時の消費エネルギーの推定式を構築したところで終わっているため、道路延長についてはどれぐらい必要か明らかになっていない。今後の課題として、この消費エネルギーの推定式を用いて、勾配・信号等がある場合の必要な道路延長等について明らかにしていく。

討議 [内田敬]

重回帰分析の説明変数の中で、「28km/h 越え時間」、「28km/h 後回復時間」とあるが、この28km/hはどういう根拠で決めているのか。

回答

これはデータから判断している。28km/h 以下では概ね速度に比例して心拍数は増加するが、これ以上になると心拍数は速度に比例せず急激に増加し、定速になっても増加を続ける。この状態が表れると速度が低下しても心拍数の回復は常時よりも遅くなる。これは高負荷による影響と考えられる。この心拍数の変動を説明するために、「28km/h 越え時間」、「28km/h 後回復時間」を用いた。

本研究では、この高負荷による影響が表れる速度をデータから判断しており、根拠がないので、高負荷時の心拍数の変動メカニズムを明らかにし、高負荷の影響が表れる境界を明確にすることは今後の課題である。

討議 [日野泰雄]

推定式の使用法のスライドで、端末交通手段として自転車を利用している場合の消費エネルギーに階段昇降等の消費エネルギーが入っていないのではないかと。

回答

確かに階段昇降による消費エネルギーは入っていないので入れる必要はある。ただ、推定式の使用法のスライドは、あくまでも本研究で構築した消費エネルギーの推定式の使用法として、どういったことが考えられるのかを説明するための一例であり、端末交通手段から代表交通手段に変わることによる消費エネルギーの増加量がどれくらいあるのかを見るためのものではない。厳密に計算しようとなると、他にも様々な要素を考える必要があるため、このスライドでは大まかに消費エネルギーを計算している。