

自転車の走行抵抗について

岐阜大学 正 加藤 晃
名城大学 正 高橋政松

1. まえがき

本報は、自転車の走行抵抗についてまとめた。

自転車が走行しようとするとき、自動車やモーターバイク $W = W_0 + W_k (kg)$ と同様に推進と妨けようとする多種多様の抵抗が働く。自転車の動力源は、他の車と違って人間にある。ゆえに動力の負担の苦痛は走行者にとって大きな問題といえる。したがって、自転車道路を計画、設計する者は他の道路の設計より以上に走行抵抗を配慮する必要がある。

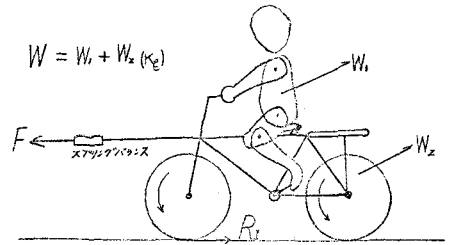


図-1. 路面抵抗係数測定法。

特に、自転車の走行抵抗は、坂路の勾配と勾配長の制限および幅員に大きく関係する。この問題を追究する意味で、ころがり抵抗、空気抵抗、勾配抵抗および加速抵抗について記す。

路面の種類	座標	路面抵抗係数	路面抵抗係数の範囲
コンクリート	A	0.004352	0.00348 ≤ μ ≤ 0.00459
	B	0.002875	0.00262 ≤ μ ≤ 0.00316
アスファルト	A	0.0038715	0.00282 ≤ μ ≤ 0.00492
	B	0.003085	0.00299 ≤ μ ≤ 0.00362
タール	A	0.0043206	0.00347 ≤ μ ≤ 0.00517
	B	0.0039049	0.00338 ≤ μ ≤ 0.00443
土	A	0.0045301	0.00354 ≤ μ ≤ 0.00521
	B	0.0044325	0.00391 ≤ μ ≤ 0.00495
砂利	A	0.0125465	0.01053 ≤ μ ≤ 0.01457
	B	0.0110400	0.00963 ≤ μ ≤ 0.01245

A: 軽快車 (婦人用)
B: ストロング車 (男用)

2. 自転車の各種抵抗

2-1 ころがり抵抗

ころがり抵抗は、自動車の場合と同様に次式で求めることができる。

$$R_r = \mu W \text{ (kg)} \dots\dots\dots ①$$

W : 搭乗者重量と、自転車重量 (kg) μ : 路面抵抗係数 表-1. 各種舗装のころがり抵抗係数 (μ) (路面抵抗係数) 係数。①式の μ は、図-1に示す方法で簡単に求めることができる。その時 $\mu = \frac{F}{W}$ である。上式の μ 値 (簡易測定方法) を車種別に、スポーツ、軽快車 (一般車) のタイプで測定した。自転車のタイヤ圧、タイヤの摩耗状況はすべて普通にした。図-2はタイヤのパターンを示す。測定路面状態は表-1に示すようにコンクリート、アスファルト、タール、土、砂利道の5種に別けた。測定 μ 結果は表に示す。なお、タイヤの空気圧 (P) と路面抵抗係数の関係は次式のようになる。

$$\mu = 0.0185P^{-0.54122} \quad \delta: 0.9955$$

また路面上に石などの障害物があるときは、 $R_r = \mu W$ の式が、次のようになる。

$$R_r = W \sqrt{(2r - \epsilon) \epsilon} \dots\dots\dots ② \quad (\text{図-3に示す})$$

r : 輪のハブからのタイヤ厚も含んだ半径 (m)

ϵ : 障害物の高さ (m)

なお α は障害物とハブまでの水平抵抗とすると、 $\alpha = \sqrt{(2r - \epsilon) \epsilon}$ となり、これを衝撃係数と称し、障害物の高さ (ϵ) が高くなるにしたがって衝撃抵抗は大きくなる。

α と ϵ の関係は、図-4に示す。また速度と路面抵抗係数の関係は、

図-2. タイヤのパターン。



$$\mu_1 = 0.0096V^{0.0738}$$

γ : 0.97815で表わされる。

2-2 空気抵抗

空気抵抗とは、自転車の進行方向に対して、向い側からうける空気の抵抗という。
この抵抗値も自動車の場合と同様に算出できる。(図-5に示す)

$$R_2 = \mu_2 \cdot A \cdot V^2 \text{ (kg)} \text{----- ③}$$

μ_2 : 空気抵抗係数

A : 前部投影面積(m^2)

V : 空気に対する自転車の相対速度 m/s

前部投影面積の標準を採用すると、

$$R_2 = 0.6 \mu_2 V^2 \text{ となるが}$$

近藤政市氏は風洞実験から $\mu_2 A = 0.025$ を求め

$$R_2 = 0.025 V^2 \text{ としている。}$$

2-3. 勾配抵抗

自転車走行者は、坂路走行が一番苦痛になる。

わが国は、オランダその他の欧国と異なっており、山・丘が非常に多い。したがって動力源が人間の力にかかっている以上、各種抵抗のうち特に坂路時の抵抗と十分配慮し勾配と、又勾配長を決める必要がある。図-6に示す勾配抵抗は、次式により求まる。

$$R_3 = W \sin \theta (1 + \tan \beta) \text{----- ④}$$

上式の $W \sin \theta \tan \beta$ は、坂路時における $W \sin \theta$ と、自転車の

蛇行のもとになるハンドルのふれ角のベクトルを考慮

して式にした。 β : 直進方向からハンドルのふれ角とあらわ

す。

このふれ角による式は、坂路のみならず平坦路においても無論

蛇行があるので $(1 + \tan \beta)$ は利用できる。

なお、坂路勾配(%)と、自転車のハンドルのふれ角と実験した結

果は図-7のようになった。この結果より β と勾配(%)の関係

は次のようになる。

$$\beta = 0.39x + 1.178 \text{----- ⑤}$$

⑤式の勾配を度に変換し、④式に代入すると、

$$R_3 = W \sin \theta \{1 + \tan (39 \tan \theta + 1.178)\} \text{----- ⑥}$$

したがって、自転車が坂路を登る時の推進力 F は、

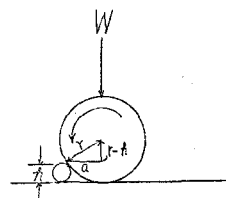


図-3. 路面上の障害物。



図-5. 前部投影面積。

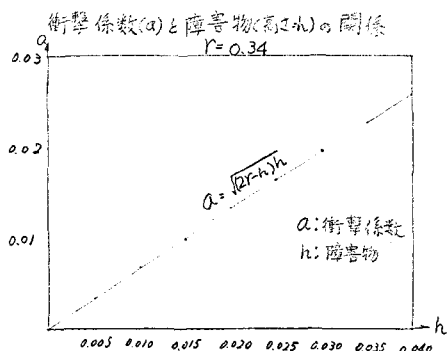


図-4. a と h の関係。

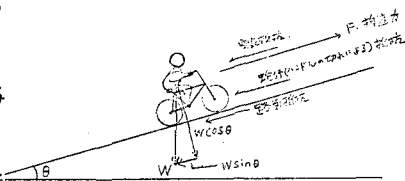


図-6. 坂路走行と各種抵抗。

β : ハンドルのふれ角(度)

x : 勾配(%)

路面が舗装されているとき、

$$F \geq W(\sin\theta + \mu_1)(1 + \tan\beta) + \mu_2 A^2 \geq W(\sin\theta + \mu_1)\{1 + \tan(39\tan\theta + 1.198)\} + \mu_2 \cdot A \cdot V^2$$

また路面工に障害物がある場合

$$F \geq W(\sin\theta + \sqrt{(2r-A)r})(1 + \tan\beta) + \mu_2 \cdot A \cdot V^2$$

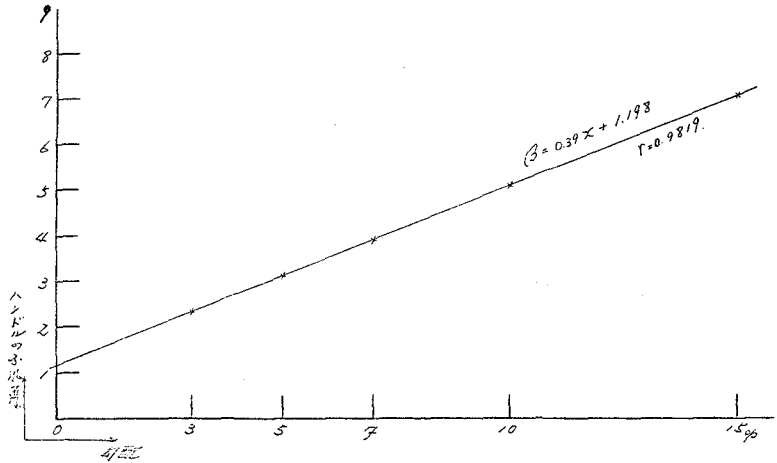


図-17. 自転車のハンドルのふれ角と坂路勾配。

$$\geq W(\sin\theta + \sqrt{(2r-A)r})\{1 + \tan(39\tan\theta + 1.198)\} + \mu_2 \cdot A \cdot V^2.$$

(注) 上式はすべて加速抵抗を無視した状態である。したがって、当然 $W\sin\theta + \mu_1 W$ の次に加速抵抗値を加えることを忘れてはいけな。

2-4 加速抵抗

加速抵抗は、自動車を加速また減速するときの慣性抵抗であって、減速するとき負の値となる。この抵抗は、自動車の場合と同様に次式により求められる。

W : 自転車重量 + 乗客重量(kg)

$$R_4 = \frac{C}{g}(W + \Delta W) \text{-----} \textcircled{7}$$

ΔW : 回転部分相当重量(kg)

自転車実用便覧によると、軽快車は、 $0.16W$ になっている。

⑦式と利用度の高い軽快車を採用して、下記の条件下 g : 重力加速度 m/sec^2

のもとで簡潔にすると、

C : 加速度 m/sec^2

条件 $W = 75 \text{ kg}$ (自転車重量 20kg + 乗客重量 55kg)

$$\Delta W = 0.16W \quad g = 9.8 m/sec^2$$

$$R_4 = 5.9388C \text{-----} \textcircled{8}$$

⑧式は平均数量を採用しているが、一般公式として使用でき加速抵抗値は簡単に得られる。

2-5 全走行抵抗

自転車の全走行抵抗は、前述した各々の走行抵抗、 R_1, R_2, R_3, R_4 の総計で算出できる。ただし平坦路においても坂路と同様にハンドルのふれ角(β)が影響するが、全走行抵抗(R)は、次のようになる。

路面が舗装されているとき、

$$\begin{aligned}
 R &= (R_1 + R_4 + W \sin \theta)(1 + \tan \theta) + R_2 \\
 &= \left(\mu_1 W + \frac{C(W + \Delta W)}{g \cdot f} + W \sin \theta \right)(1 + \tan \theta) + \mu_2 \cdot A \cdot V^2 \\
 &= \left(\mu_1 W + \frac{C(W + \Delta W)}{g \cdot f} + W \sin \theta \right) \left\{ 1 + \tan (39 \tan \theta + 1/198) \right\} + \mu_2 \cdot A \cdot V^2 \\
 &= W \left(\mu_1 + \frac{C + \Delta C}{g \cdot f} + \sin \theta \right) \left\{ 1 + \tan (39 \tan \theta + 1/198) \right\} + \mu_2 \cdot A \cdot V^2 \quad \text{--- (9)}
 \end{aligned}$$

路面上に障害物のある場合、

$$\begin{aligned}
 R &= (R_1 + R_4 + W \sin \theta)(1 + \tan \theta) + R_2 \\
 &= \left(W \sqrt{(Zr - R)R} + \frac{C(W + \Delta W)}{g \cdot f} + W \sin \theta \right) \left\{ 1 + \tan (39 \tan \theta + 1/198) \right\} + \mu_2 \cdot A \cdot V^2 \\
 &= W \left(\sqrt{(Zr - R)R} + \frac{C + \Delta C}{g \cdot f} + \sin \theta \right) \left\{ 1 + \tan (39 \tan \theta + 1/198) \right\} + \mu_2 \cdot A \cdot V^2 \quad \text{--- (10)}
 \end{aligned}$$

となる。

なお、⑨式を下記の条件を入れて簡潔に（た、一般公式とすると次のようになる。

条件 舗装（アスファルトコンクリート），自転車重量 20 kg，搭乗者平均重量 55 kg。

$\mu_1 = 0.0039$, $V = 3.3 \text{ m/sec}$ (坂路も含む) $\mu_2 A$: 0.025 を採用, $R_4 = 5.9388 C$ 。

$$R = (0.0039 + 5.9388 C + 7.55 \sin \theta) \left\{ 1 + \tan (39 \tan \theta + 1/198) \right\} + 0.2722 \quad \text{--- (11)}$$

③、あとがき。

自転車の走行抵抗は、自動車の走行抵抗およびモペットの算出方法に理論的にまったく同一と云ってよいが、動力源が根本的に異なるものであることから、蛇行時に生じるハンドルのふれ角が影響し、走行時の抵抗が増大する。このふれ角は坂路の勾配と勾配長又走行幅員に最も関係するので設計時に考慮する必要がある。

今後、勾配と勾配長の利限について試みたいと考えている。

参考文献

1. 道路工学 加藤 晃、植下 協(共著)。
2. 二輪車の力学 近藤政中。
3. 自転車実用便覧 自転車振興会公編。
4. 交通工学 米谷栄二、渡辺新三、毛利正光 共著。