

惰行試験に関する研究

＝普通乗用車への適用＝

山 崎 保 輔・佐 藤 圭 佑*

A coast testing for common sedans

Yasusuke YAMAZAKI and Keisuke SATO*

(2006年11月30日受理)

A solar car performance worked on this study should be analyzed and connected to its drag (C_d), rolling resistance (μ_r), mechanical transmission efficiency (η_m). It will be probably complicated for us to chase the air drag for common sedans.

Formerly the rolling and air resistance were measured by means of pulling the solar car at various speeds. It ended with the result that the values obtained were not thoroughly credible.

Therefore in this study coast testing was taken in, the investigation along the test has been proceeding.

This study has been formed two years ago. In the beginning to this trial it was so difficult that the time measurement could not be succeeded enough. The biggest reason on this trouble was that eye measurement and stop watches were used to the various distances on the test. As a result in this stage C_d has obtained 0.58 that is different from automakers.

After that for precise time records oscillographes measurement was planned into the test systems. Owing to the voltage confusion, C_d could not be gripped clearly. But by using shield electric wire, C_d has been fairly close 0.45 to the value which is published (0.32). The data given from the test used sedan were stable under the medium velocity (50Km/h<).

1. 緒言

本研究室において製作したソーラーカーは2004年8月1日から3日間秋田県大潟村で行われたワールドソーラーカーラリー (WSR) に参加した。この後、レースに参加した車両の走行性能向上を目指し、いずれ走行抵抗低減に寄与すると考えられる実験的研究を進めた。ソーラーカーの走行性能を支配する主因子として空気抵抗、転がり抵抗、駆動系伝達効率が挙げられ、これらの算定が本研究の主目的である。形状抵抗係数 C_d 、転がり抵抗係数 μ_r を求めるには惰性走行試験^{1,2,3)} (以下、惰行試験) があり、本研究では C_d が公表された乗用車に対する上記試験の信頼性把握、並びに試験法習得を目的としている。試験に使用した車は $C_d=0.32$ 、車両質量

$W=1330\text{kg}$ のマニュアル車 (SUBARU レガシー E-BD5) 及び $C_d=0.32$ 、車両質量 $W=1040\text{kg}$ のマニュアル車 (日産パルサー E-FN15) である。又、本研究では製作したソーラーカーに対する惰行試験の適用を考えているが、本研究室で予備試験を行った結果、妥当な値を得ることは出来なかった。そこで問題は初速計測の曖昧さに起因すると考え試験方法を改善することにした。しかし、それによっても問題は十分な改善には到らず、この問題を解決することが目的として残った。

2. 惰行試験

2.1 目的

ラリーに参加したソーラーカーの走行抵抗把握を目指し、惰行試験による走行抵抗測定を試みることにした。走行抵抗把握に当たり、この試験法の信頼

* 秋田工業高等専門学校専攻科学生

性を確かめるため形状抵抗係数 C_d の公表された乗用車で予備試験を実施した。本研究室では予備試験として乗用車を用い試験を行ってきたが、転がり抵抗係数 μ_r 並びに形状抵抗係数 C_d の公表値とはかなりの相違が見られた。この原因を追及し、時間測定精度を向上させることを狙って、更に惰行試験の予備試験を続行した。

2.2 惰行試験の原理

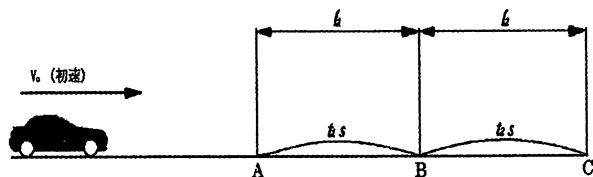


図1 惰行試験方法

まず、図1のようになるべく水平平坦路に任意の距離 l_1 , l_2 を取り、車を初速度 V_0 で進入させこの区間を惰性（惰力）によって走行させる。その時の t_1 , t_2 を計測し、平均減速度 α を以下の計算によって求める。平均減速度 α を求める式は

$$\alpha = \frac{l_1/t_1 - l_2/t_2}{(t_1 + t_2)/2} \quad [\text{m/s}^2] \quad (1)$$

となり、さらに走行抵抗 R [N] は

$$R = \alpha \times m \quad [\text{N}] \quad (2)$$

となる。ただし、 m は車両質量 [kg]。

この時、惰行運動の走行抵抗の内訳は

R [N] = 転がり抵抗 + 空気抵抗

$$= R_r + R_a = \mu_r mg + \frac{1}{2} C_d \rho S V_0^2 \quad (3)$$

となり、ここで μ_r : 転がり抵抗係数, g : 重力加速度 [m/s^2], C_d : 形状抵抗係数, ρ : 空気密度 [kg/m^3] S : 前面投影面積 [m^2], V_0 : 初速 [m/s] である。

惰行試験より得られる走行抵抗 : R - 初速 : V_0 の関係を基に初速を二乗し線図を直線化する (図2)。線図より直線が得られると、 $V_0 = 0$ における直線の R 軸上の切片 a は転がり抵抗となる。ここで、車体質量 : m とすると、

$$a = \mu_r mg \quad \text{より} \quad \mu_r = \frac{a}{mg} \quad (4)$$

として求められる。

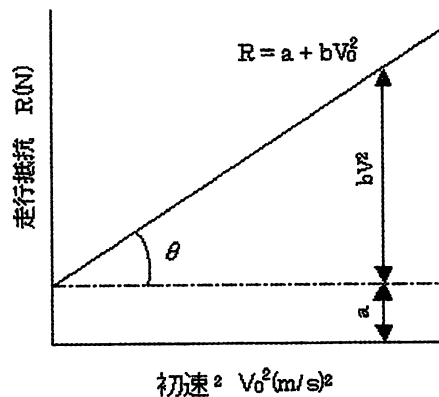


図2 走行抵抗と走行抵抗の内訳

傾き b は $\frac{1}{2} C_d \rho S$ にあたり、これより形状抵抗係数

$$C_d \text{ は } C_d = \frac{2b}{\rho S} \quad (5)$$

以上の解析方法より転がり抵抗係数、形状抵抗係数を求めるものとして惰行試験を行う。

2.3 予備試験車両

予備試験に使用した車両の仕様は以下の通りである。

- ・普通自動車 (SUBARU レガシー E-BD5)
- ・車両質量 $m = 1330$ [kg]
- ・形状抵抗係数 $C_d = 0.32$
- ・前面投影面積 $S = 1.9$ [m^2]
- ・使用したタイヤ ToYo TIRE 185/65 R15
空気圧 0.2 [MPa]

3. 試験結果

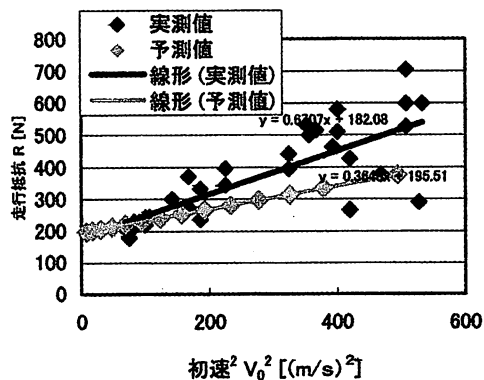


図3 大潟村での試験結果 ($l_1 = l_2 = 100\text{m}$)

- ・大潟村ソーラースポーツラインでの結果より
 $\mu_r = 0.014$ $C_d = 0.58$
- ・予測値 $\mu_r = 0.015^{1)}$ $C_d = 0.32$ (メーカー公表値)

以上の結果より、予測値とはかけ離れた結果となり、惰行試験では初速を正確に捉えるだけでは必ずしも信頼できる走行抵抗を得ることはできず測定距離を長く取ることより予測値に近づくことが分かった。しかし、初速に比例して誤差が大きくなり信頼できる値は得られていない。

4. 惰行運動の解析と時間測定誤差について

4.1 目的

本研究室では惰行試験によりソーラーカーの走行抵抗を把握のため予備的な試験を行ったが予測値とは、大きな差異を生じた。その原因は初速測定をスピードメータに頼った事により誤差を含んでいたためと考え、初速を正確に測定し、惰行試験を実施した。しかし惰行試験の精度は目立って改善はされず、予測値とはかけ離れた結果となった。従って惰行運動を解析し、惰行距離、惰行時間、初速がどのような関係にあり、どの程度それぞれが走行抵抗の誤差に關与しているかを解析し（主として惰行時間精度）、惰行試験の改善を試みた。改善により惰行試験の精度が上がり走行抵抗を捉え得るならばソーラーカーの性能把握につながり、走行性能の向上が期待される。

4.2 惰行運動の解析

水平平坦な走路において定常の速度 v_0 より惰行を開始するものとする（試験時は v_0 を初速とする）。惰行運動中に働く諸抵抗は、速度におよそ無関係に一定なもの D （車輪の転がり抵抗）と速度の自乗に比例するもの kv^2 （空気抵抗）とから構成されるものと仮定する。これより、惰行運動の基礎方程式²⁾は

$$m \frac{dv}{dt} = -(D + Kv^2) \\ = -(\mu_r mg + Kv^2) \quad (6)$$

となる。ただし

v : 任意の瞬間の速度 [m/s]

m : 車両質量 [kg]

μ_r : 転がり抵抗係数

g : 重力加速度 [m/s²]

である。さらに K は空気抵抗なので

$$K = \frac{1}{2} C_d \rho S \quad (7)$$

C_d : 形状抵抗係数

ρ : 空気密度 [kg/m³]

S : 前面投影面積 [m²]

となる。

式 (6) を書改めて

$$\frac{dv}{dt} = -(a + bv^2) \quad (8)$$

ここに、 $a = \mu_r g$, $b = K/m$

$$\therefore \frac{dv}{a + bv^2} = -dt$$

積分して

$$\frac{1}{\sqrt{ab}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{a}} v = -t + C$$

積分定数 C は初期条件 ($t=0$ のとき $v=v_0$) より

$$C = \frac{1}{\sqrt{ab}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{a}} v_0$$

よって

$$t = \frac{1}{\sqrt{ab}} \left\{ \tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{a}} v_0 - \tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{a}} v \right\} \quad (9)$$

または

$$v = \sqrt{\frac{a}{b}} \tan \left\{ \tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{a}} v_0 - \sqrt{ab} t \right\} \quad (10)$$

式 (9), (10) は惰行中の速度 v と時間 t との相互関係を表わす式である。

惰行の距離を求めるためには式 (10) をもう一度積分して

$$x = \int v dt + C_1 \\ = \frac{1}{b} \ln \left| \cos \left\{ \tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{a}} v_0 - \sqrt{ab} t \right\} \right| + C_1$$

積分定数 C_1 は初期条件 ($t=0$ のとき $x=0$) より

$$C_1 = -\frac{1}{b} \ln \left| \cos \left\{ \tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{a}} v_0 \right\} \right|$$

$$\therefore x = -\frac{1}{b} \ln \left| \frac{\cos \left\{ \tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{a}} v_0 - \sqrt{ab} t \right\}}{\cos \left\{ \tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{a}} v_0 \right\}} \right| \quad (11)$$

または

$$t = \frac{\tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{a}} v_0 - \cos^{-1} \left\{ e^{bx} \cos \left(\tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{a}} v_0 \right) \right\}}{\sqrt{ab}} \quad (12)$$

式 (11), (12) は惰行の距離 x と時間 t との関係を与える式である。この式に試験車両のデータ (転がり抵抗係数, 形状抵抗係数, 前面投影面積, 車両質量) を入れ, B 地点, C 地点の通過時間の予測値を求める。このように理論的に惰行運動を解析し惰行距離と時間がどのように走行抵抗の誤差に影響するか考察した。

4.3 時間測定誤差が惰行運動の解析結果に及ぼす影響

再度述べるが試験では図 1 に示す B 地点と C 地点に人が立ちストップウォッチを用いて時間を測定した事から, 誤差を含む可能性が非常に高いと思われる。手旗を見てストップウォッチをスタートさせ, 自分の前を車が通過したと思ったときにストップウォッチを止めたとしても正確な車の通過時間との誤差は避けられない。ここで測定時間の予測値より誤差が ± 0.1 [s] と仮定した場合, その誤差がどの程度になるかを解析してみることにし, 車の初速は 30~80 [km/h] まで 10 [km/h] きざみで解析を行った。比較検討するために, 同様の解析を ± 0.01 [s] でも行った。

まず, B 地点と C 地点の時間測定誤差を別々に考え, どちらか片方は誤差が無いものとする。今回は B 地点の時間 (t_1) の誤差を考える。式 (12) を用い, 初速 v_0 の時の 100 [m] と 200 [m] を通過する予測値を求め, その予測値より誤差が含まれた場合の t_1 を出し, $l_1=l_2=100$ [m] として式 (1)

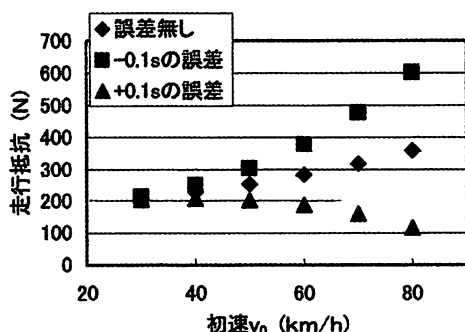


図 4 各初速での走行抵抗誤差 (誤差 ± 0.1 s)

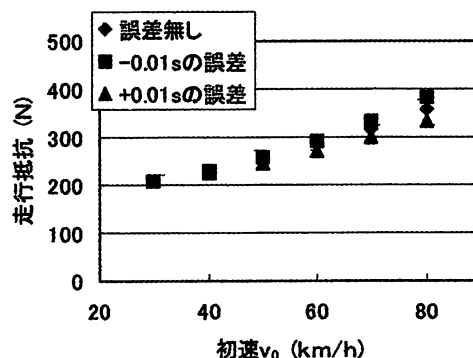


図 5 各初速での走行抵抗誤差 (誤差 ± 0.01 s)

を用いて平均減速度を求め, さらに式 (2) を用い走行抵抗を求めた。そして, 走行抵抗の予測値との誤差を求め図に示した。

図 4, 図 5 よりそれぞれの場合の空気抵抗係数及び転がり抵抗係数を算出すると以下の様になる。

表 1 各時間測定誤差における空気抵抗係数, 転がり抵抗係数

時間誤差	C_d	μ_r
0	0.32	0.015
0.1	-0.19	0.018
-0.1	0.83	0.010
0.01	0.27	0.015
-0.01	0.37	0.015

4.4 考察

図 4, 図 5 に示すように速度が上がるにつれ微少な時間誤差が走行抵抗増大を招く事が判明した。具体的には速度が上がるにつれ ± 0.1 [s] の誤差でも大きく走行抵抗の値に影響し, 誤差が大きくなってしまっている。より精度を高めるためには時間計測を正確に行い, 時間測定誤差を出来る限り抑え, 精度は 0.01 [s] 程度必要であると判明される。一つの方法として測定区間をさらに長く取り, 測定時間の誤差の割合を下げる方法が考えられるがこの場合では低速での測定が出来なくなるという問題が発生する。試験車が試験域内で停止する可能性があるからである。これより時間測定の精度を上げるには新しい測定方法を導入しなければならないと思われる。

また, 実際の惰行運動は理論通りには行われ難く (その原因は局所的な路面および風速の変化等と思われる), 多数の測定値を用意して, それに近似曲線を追加する方法に頼らなければならない, 試験結果は近似的傾向を帯びる場合が多いと思われる。

5 時間測定精度向上を狙った試験法

5.1 惰行試験法の改善点

- (1) ストップウォッチでの時間測定に代え、オシロスコップを用いることで時間測定精度を向上させる (図 6)。
- (2) スイッチが短くタイヤで踏むことが困難であったため、スイッチの長さをより長くし、より容易に車で踏むことを可能にする。

5.2 改善した測定装置のモデル図

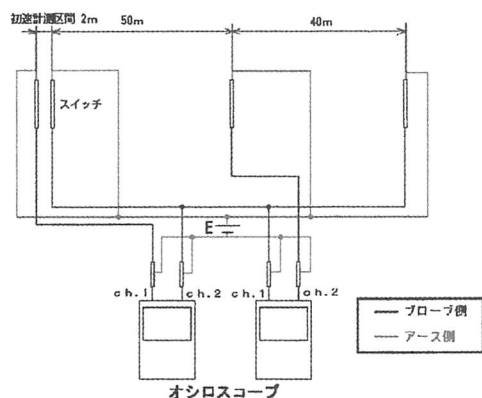


図 6 改善した測定装置のモデル図

5.3 予備試験車両－2 台目－

予備試験に使用した車両の仕様は以下の通りである。

- ・普通自動車 (日産パルサー E-FN15)
- ・車両質量 $m=1040$ [kg]
- ・形状抵抗係数 $C_d=0.32$
- ・前面投影面積 $S=1.7$ [m²]
- ・使用したタイヤ YoKoHaMa TIRE 175/70 R13 空気圧0.2 [MPa]

5.4 試験結果及び考察

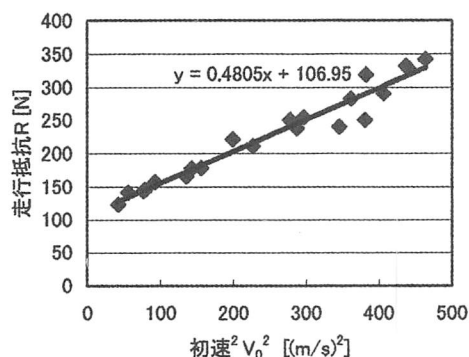


図 7 大湊村での時間測定を改善しての試験 ($l_1=50m$ $l_2=40m$)

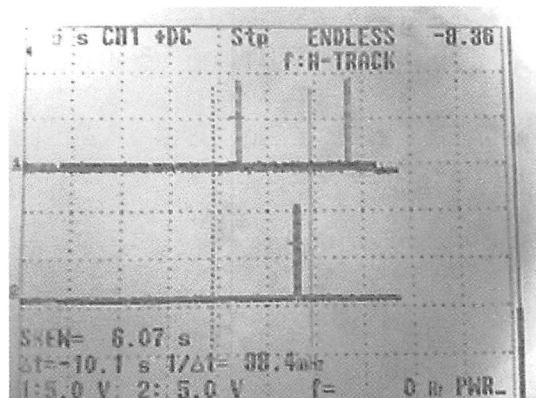


図 8 惰行時間測定結果

時間測定精度を改善し、惰行試験を行ったが、図 7, 図 8 のような結果が得られ。この結果より転がり抵抗係数 μ_r と形状抵抗係数 C_d を求めると

$$\mu_r=0.010 \quad C_d=0.45$$

各々が試験を基に算定された。予測値としては

$$\mu_r=0.015 \quad C_d=0.32$$

であったが、今までの試験結果の中では最も良い結果である。 μ_r に関してはタイヤ構造、新旧の程度、タイヤ圧によって影響されるのである程度の誤差はあると考えられる。 C_d に関しては試験日に多少の風があった。その影響等を考慮すればこの程度の誤差は妥当な領域と考える。以上の結果から風の影響が比較的少なければ、この方法でソーラーカーの走行抵抗を把握する事が可能と言える。

6. 結言

- ① ソーラーカーで惰行試験を行う前に試験法の信頼性を確かめるため、乗用車で予備試験を行った結果、測定値の信頼度は十分とは言えず、初速計測の曖昧さであると想定、試験方法を改善することにした。しかし、それによっても問題は十分な改善には到らず、惰行運動を解析し時間測定誤差の評価をした結果、時間測定の誤差がこの試験に大きく影響していることが分かった。以上の事から惰行時間を正確に捉えることを必要とする試験法であるという結論が得られた。
- ② 惰行時間を正確に捉える事が可能となる試験法を考案し実施した結果、多少の誤差はあったものの比較的前予測値に近い値が得られた。試験結果からも分かるように惰行試験では初速が大きくなるにつれ走行抵抗値のバラつきが大きくなってきている。逆に低速域では目立ったバラつきは出ず、データは比較的安定している。製作さ

れたソーラーカーへの適用を考えた場合、ソーラーカーの最高速度は30km/h～40km/hであり、ソーラーカーでの試験は低速域に当てはまる可能性が大きく、前述の理由から安定した測定結果の期待ができる。

7. 参考文献

- 1) 尾崎紀男：自動車工学，森北出版株式会社，(1972)，p.182-203
- 2) 近藤政市：基礎自動車工学－前期編－，株式会社養賢堂，(1969)，p.23-25，p.69-84.
- 3) 茄子川捷久，宮下義孝，汐川満則：自動車の走行性能と試験法，山海堂，(1999)，p.133-143，p.249
- 4) 山崎保輔，宮腰朝幸，中川健生，渡部竜也，ムハマド・アイディル：“ソーラーカーの設計製作～設計製作経過報告～”秋田工業高等専門学校研究紀要第37号（平成14年2月）
- 5) 山崎保輔，宮腰朝幸，渡部竜也，井上猛，後藤智，小松靖，高階拓：“ソーラーカーの設計製作～製作したソーラーカーの走行性能特性～”秋田工業高等専門学校研究紀要第38号（平成15年2月）
- 6) 山崎保輔，渡部竜也，今貴之，田中平祐，三浦順悦：“ソーラーカーの設計製作～製作されたソーラーカーの完成度に関する研究～”秋田工業高等専門学校研究紀要第39号（平成16年2月）