

〔論文〕

## クルマの空気力学と省エネ

井手 靖雄・藤井 修・龍 英夫・池田 秀\*

## Vehicle Aerodynamics for Energy Conservation

Yasuo IDE, Osamu FUJII, Hideo RYUU and Shigeru IKEDA

## Abstract:

Automobile aerodynamics at highway speeds plays an important role in fuel conservation and indirectly influences global warming. The introduction of a new aerodynamic velocity term,  $V_A$  for aerodynamic drag, which is equal to the rolling resistant force of a vehicle (with a running speed  $v$ ) makes it possible to express aerodynamic drag contribution,  $F_A$  as a function of  $v/V_A$  and obtain the simple approximate relation of the variation in road running energy of resistant force  $\alpha_1 = \alpha_A F_A$  for energy savings where  $\alpha_A$  is the variation in aerodynamic drag. A head wind of meteorological natural wind against the running vehicle is shown to be a more unfavorable example of energy savings for a driver.

**Key words:** automobile, energy conservation, aerodynamics, head wind, fuel consumption,

## 1. はじめに

エネルギー資源の乏しい日本にとっては省資源、省エネは最重要課題の1つである。特に近年の運輸部門のエネルギー消費は右肩上がり、省エネ志向のクルマの設計製作、省エネ運転が必要とされている。高速道路網の整備につれて高速走行の機会が多くなっている、平坦道路での高速走行(定速の走行速度  $v$ )の省エネについて考える。

この場合のクルマの走行抵抗  $R$  は転がり抵抗  $R_r$  と空力抵抗  $R_A$  の和である。クルマのエンジンは燃料を消費してトランスミッション経由でタイヤの駆動力  $D (> R)$  を発生させており、定速走行時では、 $D=R$  である(図1)。クルマの設計製作には、より少ない燃料でより大きい  $D$  (燃料の省エネ) を発生させ、より小さい  $R$  (抵抗は道路走行エネルギーに等しくなるので、抵抗の省エネ) とすることが要求される。従って空力屋とドライバーの視点より、空気力学の役割としての  $R_A$  の増減と燃料消費(燃費  $f_c$ ) との関係 ( $R_A - R - f_c$ ) を見出すことが研究目

標(寄与率モデル構築)となる。

今回は中間報告として、 $R_A$  の増減と  $R$  の関係(抵抗の省エネ)、および  $R$  と  $f_c$  の近似関係(燃料の省エネ)について、下記の①②③を報告する。

- ① 走行抵抗  $R$  の中での  $R_A$  の割合(空力寄与率  $F_A$ ) をまず明確にする。このためにドライバーの走行目安速度として提案した「空力速度  $V_A$ 」を用いて、 $F_A$  は速度比 ( $v/V_A$ ) のみの関数となることを示す。
- ② 次に  $R_A$  の増減 ( $\alpha_A$ ) と  $R$  (省エネ率  $\alpha_1$ ) を関係付ける、簡単な関係式『 $\alpha_1 = \alpha_A F_A$ 』を導く。同様に  $R$  (省エネ率  $\alpha_1$ ) と  $f_c$  (省燃費率  $\alpha_r$ ) を関係付ける近似式(燃費寄与率  $K_r$ ) を得て、新たな空力(感度)係数  $K_A (= K_r F_A)$  を導入する。
- ③ 本研究の応用例として逆風時(クルマに向い風  $U$  (気象の自然風) が吹く時)の運転を、省エネ運転の『悪例』として示す。この場合の  $\alpha_1$  は、「2つの速度比 ( $U/v$  と  $v/V_A$ ) のみの関数」となること、および逆風時のクルマ運転がいかに省エネの精神に反するかを示す。また、空力抵抗係数  $C_d$  も前面投影面積 ( $A$ ) も大きい

\* 交通機械

平成17年3月30日受理

大型車が、小型車 ( $C_d$  も  $A$  も小さい) と、逆風時の燃費悪化の割合 ( $\alpha_f$ ) では、予想に反して大差ないこと (燃費悪化の絶対値は当然異なる) も示す。

以上のような研究は「クルマの空気力学」の最も基礎に近いことなので、クルマメーカーでは既に研究は完了済と考えられるが、企業秘密に類するノウハウが含まれるためか、著者らが知る限りこれまで公表はされていないようである<sup>1-7)</sup>。地球温暖化が顕在化し、省エネが新課題となっているので公表が強く望まれる。かような背景があるので、本研究内容は高速走行が中心であるが、あえて低速走行 (この場合は現実には加減速走行が多く定速走行は少ない) まで含めてまとめた。

なお燃料消費の表し方については、「燃料 1 l の消費で走行できる距離 (km)」を表す燃費 (距離)  $f_E$  (km/l) と「1 km 走行に消費する燃料 (l)」を表す燃費 (量)  $f_c$  (l/km) があり、両者は逆数の関係 ( $f_E = 1/f_c$ ) にある。エンジン性能を示すのに「燃料消費率  $sf_c$  (g/kWh)」もあり、いずれも分野別に慣用的に使用されておりやや紛らわしいが、「燃費が良い」、「燃費向上」、「好燃費」もしくは「低燃費」とは、大きい燃費 (距離)、小さい燃費 (量) のことであり、これは燃料節約になるので、ここでは省燃費と総称している。したがって燃費 (量) (l/km) の減少割合 (無次元) が省燃費率  $\alpha_f$  である。

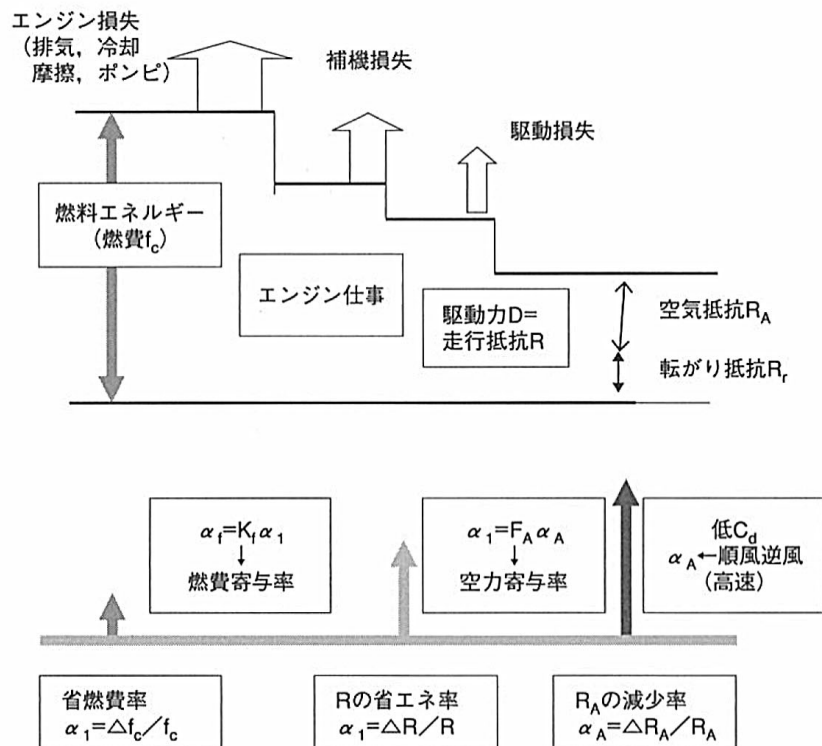


図1 クルマ省エネの寄与率モデル (定速) の説明図 (通常  $\alpha_f < \alpha_1 < \alpha_A$  となる)

## 2. クルマの空気力学と省エネ

### 2.1 クルマの空気力学

クルマの走行抵抗  $R$  は通常次式で与えられる<sup>1)</sup>。

$$R = R_r + R_A \quad (2.1)$$

$$\text{転がり抵抗 } R_r = \mu_r mg \quad (2.2)$$

$$\text{空気抵抗 } R_A = (\rho/2) v^2 (C_d A) \quad (2.3)$$

ここに、 $\mu_r$ : 転がり抵抗係数,  $m$ : クルマの全質量,  $g$ : 重力加速度,  $\rho$ : 空気密度,  $v$ : クルマの走行速度,

$C_d$ : 空気抵抗係数,  $A$ : クルマの前面投影面積

現実の  $\mu_r$  は  $v$  とともに僅か増加する傾向にあるが、以下では簡単化のため一定とする。この時  $R_r = R_A$  となる走行速度を新たな空力速度  $V_A$  としており、次式となる<sup>8)</sup>。

$$V_A = (\mu_r mg / (\rho/2) (C_d A))^{1/2} \quad (2.4)$$

これはクルマの走行性能で決まる速度であり、 $2V_A$  を空損速度、 $3V_A$  を空壁速度と呼んでいる。

$R_A$  の  $R$  への寄与を明確にするために空力寄与率  $F_A$  を導入すると、 $(1 - F_A)$  は  $R_r$  の  $R$  への寄与となるのでそ

れぞれ次式の関係となる。

$$R_A = R F_A \quad (2.5)$$

$$R_r = R (1 - F_A) \quad (2.6)$$

(2.1) ~ (2.5) より  $F_A$  を求めると

$$F_A = R_A / R = R_A / (R_r + R_A) = 1 / (1 + (V_A/v)^2) \quad (2.7)$$

これより  $F_A$  は速度比 ( $v/V_A$ ) のみの関数となり、しかも  $F_A$  は走行速度とともに増加するので、空力屋にとっては理解が楽で覚えやすい。表1に代表的な  $F_A$  を示す。

表1 走行速度  $v$  と空力寄与率  $F_A$

走行速度 $v$	$V_A/2$	$V_A$	$2V_A$	$3V_A$
略称		空力速度	空損速度	空壁速度
空力寄与率 $F_A$	0.2	0.5	0.8	0.9
転がり寄与率 $F_r$	0.8	0.5	0.2	0.1
$v$ (km/h) @ $V_A=60$ km/h	30	60 (例：小型車)	120	180

空力技術によってクルマの空力抵抗  $R_A$  が  $\Delta R_A$  だけ減少 (後の省エネ運転の悪例で示すように増大の場合もある) が生じると、空力減率  $\alpha_A$  は

$$\alpha_A = \Delta R_A / R_A \quad (2.8)$$

である。この  $\Delta R_A$  の  $R$  への寄与が抵抗減率  $\alpha_1$  であり、(2.7) を用いると

$$\alpha_1 = \Delta R_A / R = (\Delta R_A / R_A) (R_A / R) = \alpha_A F_A \quad (2.9)$$

となる。

$\alpha_1$  は2個の変数 ( $\alpha_A$  と  $v/V_A$ ) の関数となり、簡単な関係で便利である。

また走行抵抗  $R$  の単位は力  $N$  であり、走行方向の力なので、走行距離  $km$  とすると

$$N = Nkm/km = kJ/km$$

となるので、 $R$  は「1 km 走行に消費する仕事 (kJ)」, すなわち「道路走行エネルギー」である<sup>9)</sup>。したがって  $R$  の減少を「抵抗の省エネ」と呼び、抵抗減率  $\alpha_1$  は抵抗の省エネ率に等しい。

## 2.2 抵抗の省エネと省燃費

定速走行中のクルマは、「走行抵抗  $R=$  駆動力  $D$ 」を満たすようにエンジンは燃料を消費している (図1)。 $R$  は既述したように「1 km 走行に消費する仕事 (kJ)」であり、理想的には燃費 (量)  $f_c$  (1/km) に比例するはずである。したがって燃料の発熱量を  $H$  (MJ/1) とし、発熱仕事の内で行仕事  $R$  に有効に寄与する割合を走行効率  $\eta$  (エンジンの正味熱効率とトランスミッションの

伝達効率の積) とすると

$$f_c H \eta = R \quad (2.10)$$

となる。走行速度  $v$  (エンジンの回転数に比例) が一定で、 $R$  の変化が小さい場合 ( $\alpha_1$  は小さい) に限定すると、 $\eta$  はほぼ一定 (第1次近似) と見なすことが出来る。発熱量は、ガソリン  $H=34.6$  MJ/1, 軽油  $H=38.2$  MJ/1 であり一定である。

このとき抵抗減少  $\Delta R$  による燃費 (量) の減少を  $\Delta f_c$  とすると (2.10) より

$$\Delta f_c / f_c = \alpha_r = K_r \Delta R / R = K_r \alpha_1 \quad (2.11)$$

$$K_r = 1 \text{ (燃費寄与率)}$$

となり、 $\alpha_r$  は燃費 (量) の減少割合、すなわち省燃費率 (燃料の省エネ) である。

以上の近似の限界として、一般に  $K_r < 1$  (車種、エンジン、トランスミッションなどの性能と運転次第で変化) となるが、 $K_r$  の詳細は今後の研究課題である。

(2.9) (2.11) より

$$\alpha_r = K_r F_A \alpha_A = K_A \alpha_A \quad (2.12)$$

$$K_A = K_r F_A \text{ (空力 (感度) 係数)} \quad (2.13)$$

となり、これを「寄与率モデル」と呼ぶ。以下では暫定的に  $K_r=0.7$  とした。このときの  $K_A$  ( $V_A$  は表2の値を使用) を図2に示す。同図に参考として JARI (1998)<sup>9)</sup> の測定データ (報文の図1より、測定された感度係数を読み取り、逆符号として記載) を併記した。

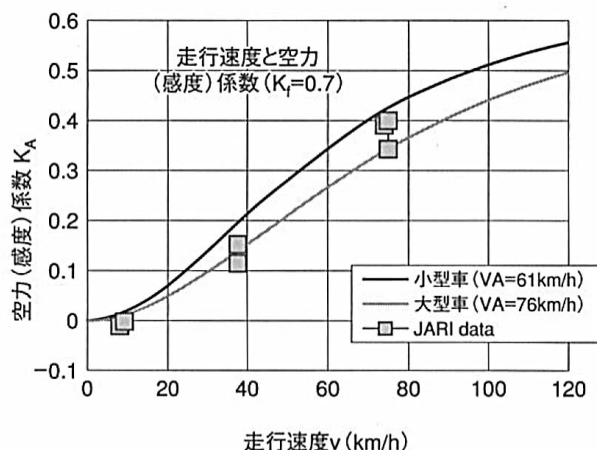


図2 走行速度と空力 (感度) 係数の関係

### 3. 省エネ運転の悪例

#### 3.1 空力速度と飾り物による燃費悪化

小型車と大型車の一般的と考えられる仕様と空力速度

$V_A$ を表2に示す。クルマの仕様はメーカーの設計コンセプト、クルマの運転（ドライバーほかの質量）、整備（タイヤほか）等で当然変化するものであるが、以下では、小型車  $V_A=60\text{km/h}$ 、大型車  $V_A=76\text{km/h}$  と設定した。

表2 採用した小型車と大型車の仕様と空力速度

	クルマ分類 k		備 考
	小型 s	大型 t	
質量 m (kg)	1400	17000	
空力抵抗係数 $C_d$	0.35	0.7	
前面投影面積 A ( $\text{m}^2$ )	2.31	7.11	土木研究所
転がり抵抗係数 $\mu_r$	0.01	0.008	JARI (1998)
空力速度 $V_A$ (km/h)	60.5	76.1	(2.4) 式

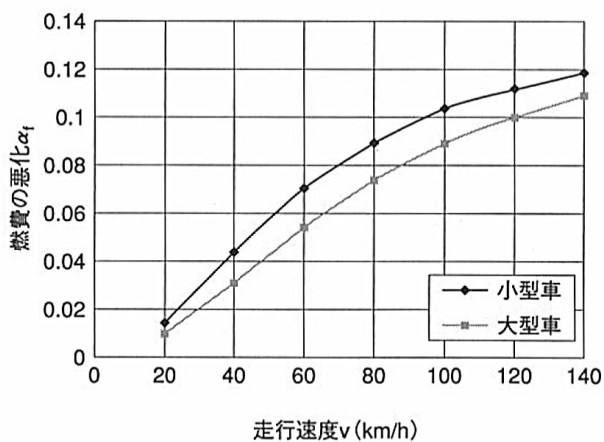


図3 走行速度とお洒落クルマの燃費の悪化の関係 ( $\alpha_A=0.2$ )

まず飾り物による燃費悪化を検討する。クルマのお洒落としてドライバーがクルマの外側に飾り物をつけたお洒落クルマが一部流行しているが、これにより20%空力抵抗が増加した場合を考える。 $\alpha_A=0.2$ として(2.12)より求めた燃費の悪化 $\alpha_f$ (省燃費率の逆)を図3に示す。

これより一般道路(50km/h以下)での走行では燃費への影響は小さい(5%以下)が、高速道路(100km/h)では8%以上の燃費悪化(大型車より小型車の悪化が大きい)となることが分かる。お洒落車は50km/h以下での走行が省エネ的には望ましい。

### 3.2 逆風時のクルマ走行

走行中のクルマに逆風 $U$ が吹くときの燃費の悪化について考える。この場合の空力抵抗は(2.3)の $v$ を $(v+U)$ に置き換えれば得られるので空力増率 $\alpha_A$ は次式となる。

$$\alpha_A = (\text{逆風時の } R_A - R_A) / R_A = (U/v) (2 + U/v) \quad (3.1)$$

これより $\alpha_f$ は2つの速度比( $U/v$ と $v/V_A$ )のみの関数

となる。4種の $U$ を与えて小型車と大型車について求めた燃費の悪化を図4～図7に示す。なお $U$ は気象分野で国際的に用いられている表3のビューフォート風力階級より決めた。

これより軽風の逆風では燃費の悪化は小さい(約10%以下)が、軟風(4 m/s)の逆風では10%以上の燃費悪化になり、和風(7 m/s)になれば更に悪化(20%以上)し、疾風(10m/s)では約40%程度も悪くなることが分かる。予想に反し、いずれの場合も小型車の燃費の悪化が大である。(燃費の悪化の絶対値は大型車の方が当然大きい)。これより疾風での走行は出来るだけ避け、和風での走行も出来れば控える方が省エネ的には賢いことが分かる。

一方、逆風の反対の順風(追風)時については、いかなる場合も省エネ、省燃費の走行となるのは当然であり、次会に報告したい。なお順風が常にクルマに吹くように工夫された、省エネ型の道路がスカイトンネルを用いた順風道路<sup>10)</sup>である。

表3 ビューフォート風力階級と逆風の風速( $U$ )の設定

風力階級	風速, m/s	名称	自然状況(陸上)	$U$ , m/s
2	1.6~ 3.3	軽風	顔に感じはじめ, 木の葉が動く	2.5
3	3.4~ 5.4	軟風	木の葉や小枝が絶えず動く	4.0
4	5.5~ 7.9	和風	砂埃がたち落葉, 紙片が舞う	7.0
5	8.0~10.7	疾風	低木がゆれ, 湖沼が波立つ	10.0

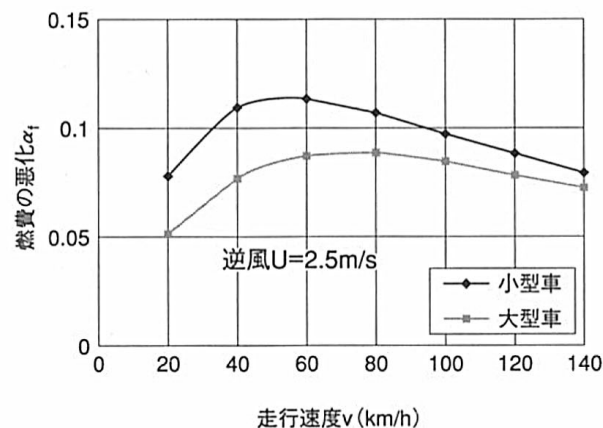


図4 逆風時の走行速度と燃費悪化の関係(軽風  $U=2.5$  m/s)

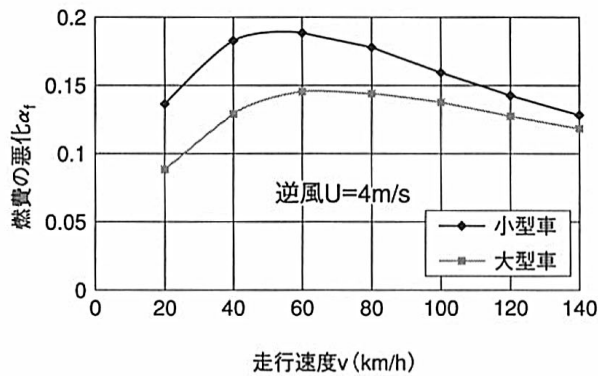


図5 逆風時の走行速度と燃費悪化の関係 (軟風 U=4.0m/s)

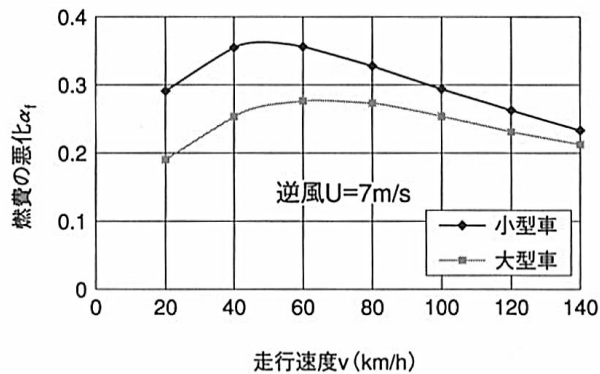


図6 逆風時の走行速度と燃費悪化の関係 (和風 U=7.0m/s)

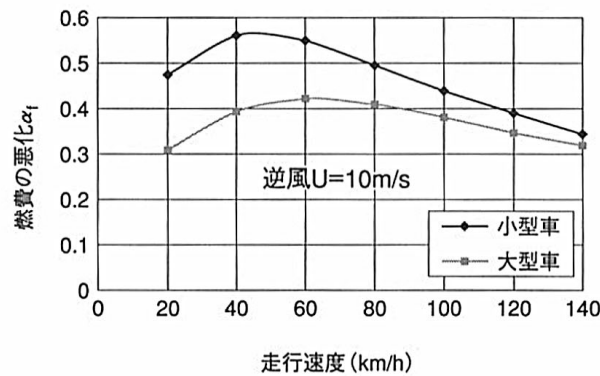


図7 逆風時の走行速度と燃費悪化の関係 (疾風 U=10m/s)

#### 4. むすび

クルマの省エネ設計、省エネ運転に資するために、平坦な高速道路を定速走行するクルマの空力抵抗  $R_A$  (増減率  $\alpha_A$ )、走行抵抗  $R$  (省エネ率  $\alpha_r$ ) および燃費 (量)  $f_c$  (省燃費率  $\alpha_f$ ) を空力屋とドライバーの視点より関係付け、下記の結果を得た。

- ① 走行抵抗  $R$  での  $R_A$  の割合 (空力寄与率  $F_A$ ) は速度比 ( $v/V_A$ ) のみの関数となる。
- ② 省エネ検討のための簡単な「寄与率モデル」の近似式 ( $\alpha_f = K_A \alpha_A$ ) を求めた。小型車、大型車の省エネ特性はそれぞれの空力速度  $V_A$  で代表、近似出来そうである (図2 参照)。
- ③ 応用例として逆風時の運転 (空力速度は小型車60km/

h, 大型車76km/h)を, 省エネ運転の『悪例』(和風(図6)で20%以上, 疾風(図7)で40%程度の燃費悪化)として示した。

今後の課題として省燃費率を支配する「燃費寄与率 $K_f$ 」の詳細調査(今回は暫定的に0.7とした)が必要である。

## 謝 辞

クルマの燃費について有益なご助言とご指導を賜った本学交通機械工学科の渡邊孝司学科長他の先生方に心より感謝申し上げます。

## 参考用文献

- 1) 交通工学研究会編, 交通工学ハンドブック, 博報堂, 1998
- 2) 小林・農沢, 自動車のデザインと空力技術, 自動車技術シリーズ, 10, 朝倉書店, 1998
- 3) 平尾, 自動車の高性能化, 山海堂, 2002
- 4) 石原, 自動車の空気力学, ながれ, 21, 2002
- 5) 今安, 乗用車の空力技術, 自動車技術, 57, 4, 2003
- 6) 松島・郡, トラックの空力技術, 自動車技術, 57, 4, 2003
- 7) 炭谷・前田・一之瀬, 自動車と流体力学: 車体周り流れと空力特性, ながれ, 23, 2004
- 8) 井手・吉岡・下村, クルマの超高速走行と道路走行エネルギーに関する研究, 久工大研究報告, No26, 2002
- 9) 赤井・平井・細井, 重量ディーゼル車の燃費推定法の検討, 自動車研究, 20, 11号, 1998
- 10) 井手・高橋, 順風道路の省エネ研究(2), 日本流体力学会年会講演論文集, A244, 2004