

## 〔論文〕

## クルマの空気力学と省エネ(2)

井手 靖雄・藤井 修・龍 英夫・池田 秀\*

## Vehicle Aerodynamics for Energy Conservation (2)

Yasuo IDE, Osamu FUJII, Hideo RYUU and Shigeru IKEDA

## Abstract:

Energy conservation and fuel savings in automobiles needs to be emphasized in order to reduce global warming. The relationship between aerodynamic resistance,  $R_A$ , and fuel consumption,  $f_c$ , is required to study fuel savings. Due to the reduction in  $R_A$ , our distribution model has produced the approximation,  $\alpha_f = K_A \alpha_A$ . The key parameter,  $K_A$ , is reviewed in this paper, and  $K_f$  and  $K_A$  are estimated and compared for the assumed car specifications and engine fuel map so that our model might be of practical use.

**Keywords:** automobile, energy conservation, fuel savings, aerodynamic resistance.

## 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つであり、運輸部門では省エネのクルマの設計製作、省エネ整備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ため、平坦道路での高速走行(定速の走行速度  $v$ )の省エネ、省燃費について考える。

このため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空力抵抗  $R_A$  の増減と燃料消費(燃費  $f_c$ )との関係( $R_A - R - f_c$ )を見出すことを研究目標(寄与率モデル構築)として、先に中間報告を行い、次の結果を得ている<sup>1)</sup>(4. むすびより引用)。

- 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、近似出来るのである。
- ③ 応用例として逆風時の運転(空力速度は小型車60

km/h, 大型車76km/h)を、省エネ運転の『悪例』(和風で20%以上、疾風で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  $K_f$ 」の詳細調査が必要である。

上記の結果中、特に②の寄与率モデルの構築は本研究目標であり、改めてまとめると次の関係式となる。

$$\alpha_f = K_A \alpha_A \quad (1.1)$$

$$K_A = K_f F_A \quad (1.2)$$

ここに

$$\alpha_f = \Delta f_c / f_c \text{ (省燃費率)}$$

$$\alpha_A = \Delta R_A / R_A \text{ (空力抵抗減率)}$$

$$K_f = \alpha_f / \alpha_A \text{ (燃費寄与率)}$$

$$F_A = R_A / R \text{ (空力寄与率)}$$

$$\alpha_A = \Delta R_A / R \text{ (省エネ率)} \quad (1.3)$$

そこで、今回は寄与率モデルのキーパラメーターである  $K_A$  の現状調査を2にて、今後の課題とした  $K_f$  ( $\sigma_A$  を30%変化の第1次近似)と  $K_A$  の推定の結果を3にて報告する。なお前回は、 $K_A$  を空力(感度)係数と呼んだが、 $K_A$

\* 交通機械工学科  
平成18年4月26日受理

は、空力抵抗の減率  $\alpha_A$  が省燃費率  $\alpha_f$  に及ぼす感度を示しているので、「空力燃費係数」に変更する。

この種の寄与率モデルに関する研究報告は、著者らが調査した限りでは国内外どこにも見当たらない<sup>2-6)</sup>。

## 2. 空力抵抗低減と省燃費率の関係

$K_A$  に関する既往の研究報告はそれほど多くなく、 $\alpha_A$  に対する  $\alpha_f$  を求めて  $K_A$  は算出されるので、少しでも  $\alpha_f$  に関係する報告を集めて、車種別に表1に年代順にまとめた。

- (1) 日本自動車研究所 (JARI), 細井 (1980) の報告：この分野の先駆けの研究であり、距離燃費  $f_E$  の感度係数  $S_A (=f_E \text{ の変化率} / \alpha_A)$  を図4.2 (100km/h) より読み取り (本人へ依頼),  $K_A = -S_A$  (小さい  $\alpha_A$ ) とした<sup>7)</sup>。最多の12車種の乗用車Gの結果である。
- (2) Hucho ら (1998) より：それぞれの省燃費の引用図 ( $\alpha_f$  と  $\alpha_A$  の線形関係図) より、傾きを読み取り  $K_A$  を算出した<sup>8)</sup>。
- (3) トヨタ, 炭谷ら (2004) より：論文中の記述「空気抵抗10%改善により燃費は4%~5%改善される」より算出した<sup>9)</sup>。
- (4) ホンダ, 今安 (2004) より：今安は並々ならぬ努力

の末、インサイトの開発段階で33%の空力低減を達成しており、論文中の記述「 $C_D$  の33%低減で、燃費への効果は約13%である」より算出した<sup>10)</sup>。

- (5) ダイハツ, 内田・坂口 (2004) より：論文中の記述「空気抵抗を10%低減しただけで、燃費を5~7%前後も改善できる」より算出した<sup>11)</sup>。
- (6) 本報告の最終に示すべき本研究結果 (表6) を予め記す。

表1より、 $K_A$  は車種などによって結構分散はしているものの、 $K_A = 0.3 \sim 1.0$  の範囲にあることが分かる。 $K_A > 0.7$  は、(1) JARI だけであり、走行負荷低減 (過濃混合気から通常混合気への変化) の当時のクルマが含まれているからである。この範囲を除くと、 $K_A = 0.3 \sim 0.7$  であり、クルマの多様性 (多種多メーカー) の割には、その変化幅は少ないと言える。

一方、定速走行ではないが加速・減速・アイドリングのモードを含んだ走行サイクル (driving cycle) 決めて、類似の  $K_A$  を求める研究報告 (この場合の  $K_A$  は、記号  $\varepsilon$  で表示されており、effectiveness (燃費効果) とか influence coefficient (影響係数) とか呼ばれている) がある。この中より本目的に最も近い高速走行サイクル (始

表1 空力燃費係数  $K_A$  (定速モード) の調査結果

車 種	空力燃費係数 $K_A$	走行速度 km/h	原論文の引用図	備 考
(1) 小型車の12車種G	0.33~1.03 平均0.55	100	図4.2	JARI細井 (1980) より感度係数 $S_A$ を読み取り、 $K_A = -S_A$ (小さい $\alpha_A$ ) とした。
(2-1) セミトレーラ	0.34	80	Fig. 9.6	(2) は全て Hucho ら (1998) より算出。 40 t / 280kW
(2-2) バス	0.30 0.43	80 100	Fig. 9.7	
(2-3) ライトバン	0.48	100	Fig. 9.8	2.8 t / 58kW
(2-4) 軽トラック	G 0.6 D 0.7	100 100	Fig. 3.25	最大質量2600kg, 60kW G : 2 l, D : 2.4 l
(3) 小型車 平均的乗用車な	0.4~0.5	100		トヨタ炭谷ら (2004) より算出。 $V_A = 60 \text{ km/h}$
(4) 小型車 インサイト	0.39	70~80		ホンダ今安 (2004) より算出, 高速巡航走行
(5) 軽自動車 UFE-II	0.5~0.7	100		ダイハツ内田・坂口 (2004) より算出。 $V_A = 50 \text{ km/h}$
(6) 本研究 小型車 (G) 大型車 (D)	0.44 0.42	100 80		( $K_A = K_f F_A$ ) $K_f = 0.599, F_A = 0.732$ $K_f = 0.806, F_A = 0.525$

注) G : ガソリン, D : 軽油ディーゼル,  $V_A$  : 空力速度 (転がり抵抗と空力抵抗が等しくなる車速)



表2 高速走行の drive cycle の effectiveness ( $\epsilon_H$ )

車 種	Effectiveness $\epsilon_H$	走行速度 km/h	原論文の 引 用 図	備 考
(1) 小型車	0.45~0.63	約88	Fig. 3.17	Sovran (1983) の推定法。 EPA-Highway モード
(2) 小型車 29車種、(一部ディー ゼル車)	0.41(平均) 0.29~0.59	約77	表 1	米 国 HFET モード, JARI 細 井 ら (1984), 計測データより感度係数として計 算
(3) 重量ディーゼル車	0.34~0.4	約75	図 1	JARI 高速モード。赤井ら (1998), 台上試 験結果
(4) 重量ディーゼル車	0.35~0.39	約75	Fig. 5	JARI 高速モード, 鈴木ら (2003), シミュ レーション
(5) 4 t 貨物車	0.42	約70	図14	交安環研 HW1 モード, 野田ら (2004) シ ミュレーション

めと終わりに加速モードと減速モードがある)の $\epsilon$ (この場合 $\epsilon_H$ で表示する。一般に $\epsilon < \epsilon_H$ )を参考として表2にまとめた。

- (1) Highway Cycle (米国EPAの高速モードで平均走行速度は約90km/h)についてのSovranの $\epsilon_H$ 推定法の結果<sup>12)</sup>(表3の小型車の性能を使用)。
- (2) 細井ら(1984)はモード運転時の燃料消費率の推定法を開発し、高速モードHFET(82.8km/h)の感度係数(表1)を29車種について、平均0.408(最大0.591, 最小0.285)と求めており、これを $\epsilon_H$ とした。
- (3) JARI高速モードでの赤井ら(1998)の計測データ<sup>14)</sup>(JARI論文の図1より、「燃費に対する走行抵抗の感度係数」を読み取り、逆符号の $\epsilon_H$ とした)。
- (4) 鈴木ら(2003)のシミュレーション結果<sup>15)</sup>(Fig. 5より読み取る)より $\epsilon_H$ を求めた。
- (5) 交通安全環境研究所HW1モード(首都高速 約70 km/h)での燃費シミュレーション(野田ら(2004)のFig. 27 ( $C_d$ と $f_E$ の関係))より $\epsilon_H$ 推定した結果<sup>16)</sup>

$\epsilon_H$ は0.29~0.63の範囲に分散しており、ほぼ $K_A$ の範囲( $K_A=0.3\sim0.7$ )に等しいことが分かる。高速走行のdrive cycleでは定速モードが支配的なので、 $\epsilon_H \approx K_A$ となる由縁である。

以上の表1, 2より、 $K_A$ については、 $K_A=0.3\sim0.7$ の範囲であり、暫定的には、小型車約0.5, 大型車は約0.4程度と見なせることが分かる。しかし目安であり今後ともに更なるデータ収集と詳細検討が必要である。

### 3. 燃費寄与率 $K_f$ と $K_A$ の推定

次にクルマの駆動力Dの発生側より、変速機の変速条件(伝達効率 $\eta$ , 変速比 $i$ )は一定として、燃費マップより $K_f$ を求める。公表された燃費マップは極めて少なく、ここでは塩路の報告<sup>17)</sup>(論文中の図2)を総排気量1.8 l(ガソリン機関), 13 l(ディーゼル機関)として適用(燃費マップを図1に再掲)する。走行抵抗R(単位N=kJ/km)を平均有効圧力 $p_e$ に読み替えても、比である $\alpha_1 (= \Delta R_A/R = \Delta p_e/p_e)$ は同じである。走行速度 $v$ での走行抵抗 $R (= \text{転がり抵抗} + R_A)$ と $p_e$ およびエンジン回転数 $N_e$ の関係は次式(記号は表3参照)で与えられる<sup>2,4)</sup>。

$$p_e = 4\pi R r_i / V_e i \eta \quad (3.1)$$

$$N_e = (30/\pi) v i i_r / r_i \quad (3.2)$$

表3に今回想定した小型車(ガソリン)と大型車(ディーゼル)の仕様を示す。本仕様による $K_f$ および $K_A$ の推定結果を表6にまとめた。なお今回(第1次近似)の $K_f$ は、 $\alpha_1=0.3$ (①抵抗減少前, ②減少後)を与値の時のbsfc(①と②)を燃費マップより読み取り、 $\alpha_f$ を出して求めた(表4, 表5)。この場合の $\alpha_f$ は $f_c$ に比例するbsfc $\times p_e$ の①と②より算出している。

小型車と大型車の走行速度は異なるものの、 $p_e$ はほぼ等しく(大型車がやや大きい)、 $K_f$ は大型車の方が大きくなっている(熱効率が良いディーゼル機関)。しかし $K_A$ では $F_A$ の影響によりほぼ等しくなっていることが分かる。これより $K_A$ の数値だけでなく、その中味についての知見を得ることの必要性が分かる。本結果を表1の最下段(6)に併記した。

これより本結果は既存の $K_A$ と概ね整合しており、提

案した寄与率モデルの有用性が伺える<sup>18)</sup>。

なお今回の結果は表3の仕様と塩路の燃費マップ図1に基づくものであり、汎用性については今後の課題であ

る。また前報告にて暫定的に  $K_f=0.7$  を採用したが、今回の小型車 ( $K_f=0.6$ ) と大型車 ( $K_f=0.81$ ) の中間値に相当していたことが今回分かった。

表3 採用した小型車と大型車の仕様〔想定値〕

	クルマ分類 k		備 考
	小型 s	大型 t	
質量 $m$ (kg)	1400	17000	空気密度 (1.2kg/m <sup>3</sup> ) 土木研究所報告 自動車研究所報告
空力抵抗係数 $C_d$	0.35	0.7	
前面投影面積 $A$ (m <sup>2</sup> )	2.31	7.11	
転がり抵抗係数 $\mu_r$	0.01	0.008	
空力速度 (km/h)	60.5	76.1	
総排気量 $V_e$ (l)	1.8	13.0	以下想定値
タイヤ有効半径 $r_t$ (m)	0.3	0.5	
変速機 top 変速比 $i_n$	0.77	1.0	
終減速比 $i_f$	4.0	3.78	
伝達効率 $\eta$	0.95	0.95	

表4 小型車（ガソリン機関）の  $K_f$  算出 ( $N_e=2700\text{rpm}$ )

	平均有効圧力 $p_e$ (MPa)	bsfc (g/kWh)	bsfc $\times$ $p_e$ (gMPa/kWh)
①空力減少前	0.367	350	128.5
②減少後	0.257	410	105.4
①→②の変化率	$\alpha_1=0.3$		$\alpha_f=0.180$
$K_f=\alpha_f/\alpha_1$			$K_f=0.599$

表5 大型車（ディーゼル機関）の  $K_f$  算出 ( $N_e=1600\text{rpm}$ )

	平均有効圧力 $p_e$ (MPa)	bsfc (g/kWh)	bsfc $\times$ $p_e$ (gMPa/kWh)
①空力減少前	0.378	245	92.6
②減少後	0.265	265	70.2
①→②の変化率	$\alpha_1=0.3$		$\alpha_f=0.242$
$K_f=\alpha_f/\alpha_1$			$K_f=0.805$

表6 走行条件と空力燃費係数ほか

	クルマ分類 k		備 考
	小型 s	大型 t	
走行速度 $v$ (km/h)	100	80	
エンジン回転数 $N_e$ (RPM)	2723	1604	(3.1) 式
走行抵抗 $R$ (N)	511.5	2808	= 転がり抵抗 + $R_A$
平均有効圧力 $p_e$ (MPa)	0.367	0.378	(3.2) 式
燃費寄与率 $K_f$	0.60	0.81	表4, 表5 より
空力寄与率 $F_A$	0.732	0.525	前報告の (2.7) 式
空力燃費係数 $K_A$	0.44	0.42	(1.2) 式



#### 4. むすび

平坦な高速道路を定速走行するクルマの省燃費の寄与率モデルを吟味するために、小型車、大型車の仕様および塩路の燃費マップ(図1)を想定し、空力燃費係数 $K_A$ を求め、下記の結果を得た。

- 1) 省燃費検討に必要となる $K_A$ を求める寄与率モデル(第1次近似)の有用性を見通しを得た。
- 2) 今回想定したクルマ仕様(燃費マップ)では、小型車大型車はほぼ同じ $K_A$ (=約0.4)となったが、その中味(燃費寄与率 $K_i$ , 空力寄与率 $F_A$ )は異なる。
- 3)  $K_A$ の暫定値としては、小型車約0.5, 大型車は約0.4程度である。

引き続き燃費マップの汎用性ほかの吟味と $K_A$ 知見情報の調査(メーカーおよび関係機関)進めたく、ご指導ご支援賜れば幸いです。

#### 謝 辞

クルマの燃費他について有益なご助言、情報を賜った日本自動車研究所の細井賢三先生、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。また資料調査に協力してくれた井手研究室卒業研究生一同(17年度)に改めて御礼申し上げます。

#### 引用文献

- 1) 井手, 藤井, 龍, 池田: クルマの空力力学と省エネ, 久留米工業大学研究報告, No.28 (2005) 7-13.
- 2) 交通工学研究会編, 交通工学ハンドブック, 博報堂, (1998).
- 3) 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).
- 4) 平尾, 自動車の高性能化, 山海堂, (2002).
- 5) 小林, 奥, 鬼頭, 自動車の空気力学, 日本流体力学会誌, ながれ, 21, (2002) 336-345.
- 6) Wolf-Heinrich Hucho et. al., *Aerodynamics of Road Vehicles*, Fourth Edition, SAE, Warrendale, Pa. (SAE, 1998).
- 7) 細井賢三: 車両諸元が燃料消費率に及ぼす影響についての一考察, 自動車研究, 2, 9 (昭55) 315-318.
- 8) Wolf-Heinrich Hucho et. al., *Aerodynamics of Road Vehicles*, SAE, Warrendale, Pa. (1998) 126-127, 418-420.
- 9) 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, 日本流体力学会誌「ながれ」, 23 (2004) 445-454.
- 10) 今安道治: 乗用車の空力技術—省燃費車における空気抵抗低減, 自動車技術, 57, 4 (2003) 14-18.
- 11) 内田勝也, 阪口庸介: コンセプトカー UFE-II の空力意匠開発, 自動車技術, 58, 6 (2004) 56-61.
- 12) Sovran G., Tractive-Energy-Based Formulae for the Impact of Aerodynamics on Fuel Economy Over the EPA Driving Schedules, SAE Tech. Pa. Series, 830304 (1983).
- 13) 細井, 古, 小池, 安田, 燃料消費率に対する車両諸元の感度係数, 自動車研究, 6, 7 (1984) 20-23.
- 14) 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 (1998) 11-14.
- 15) 鈴木, 平井, 細井, 重量ディーゼル車の燃費シミュレーション, 自動車研究, 25, 4 (2003) 9-12.
- 16) 野田, 佐藤, 山本, 塚本, 自動車燃料消費への影響要因分析に基づく消費抑制対策の効果予測法に関する研究, 交通安全環境研究所報告, 5, (2004) 9-23.
- 17) 塩路葛宏, 各種内燃機関における排ガス浄化技術, 自動車技術, 52, 9 (1998) 4-10.
- 18) 井手, 藤井, 龍, 池田: クルマの空力抵抗低減と省燃費, 日本航空宇宙学会西部支部講演集, (2005) 101-104.

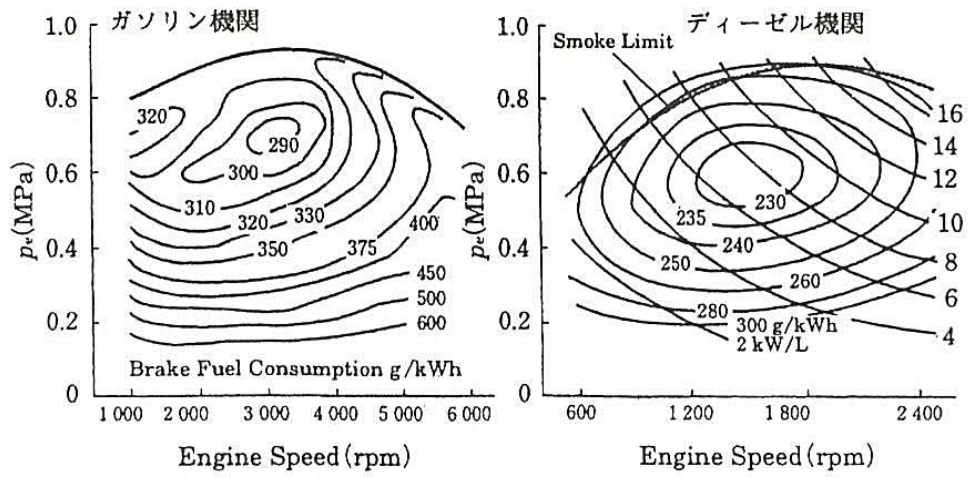


図1 ガソリン機関とディーゼル機関の性能特性 (塩路 (1998)<sup>17)</sup> より)