

〔論文〕

高速車の燃費に及ぼす自然風（向い風と追い風）の影響研究

井手 靖雄*・中村 金次*・池田 秀*・梶山項羽市*

Natural wind influence on fuel consumption for high speed vehicles

Yasuo IDE, Kinji NAKAMURA, Shigeru IKEDA
and Kouichi KAJIYAMA

Abstract

Natural wind influence on fuel consumption, f_c , for high speed vehicles is studied. The increase in fuel consumption, β_f , is related to wind speed, U , through the influence coefficient of aerodynamic drag on f_c , K_A . Figures, β_f vs. U are presented for a small passenger car and a large truck, respectively. A head wind of $U=10$ m/s results in a 30-60% increase in f_c for a small car and about 40% for a truck.

Keywords: Head wind, Fuel consumption, Aerodynamic drag, Road vehicle, Fuel savings

高速車の燃費 f_c に及ぼす自然風の影響について調査する。 f_c への空力抵抗の影響係数 K_A を用いて、燃費増加 β_f は風速 U と関係付けられる。小型乗用車と大型トラックについて、それぞれの関係図 (β_f と U) を求める。10m/s の向い風では、小型車は30-60%、トラックでは約40%の燃費増となる。

1. はじめに

平坦道路を定速走行するクルマの走行抵抗は転がり抵抗と空気抵抗の和である。低速車を受ける空気抵抗（走行速度の自乗に比例する）は小さいので、低速車の燃費は自然風の影響を受けても小さい。そこで、これまでの燃費計測は自然風無し「無風①」を前提に実施されてきた。しかし高速車になると空気抵抗が大きくなるので、燃費に自然風は影響を及ぼすこと（これを以下簡単に『風影響』と呼ぶ）になるはずである。この風影響についての調査研究はクルマの高速化とともに開始されたが、自然（風）が相手であり、燃費と気象の実測が非常に困難（再現性、精度）であるために定量的なデータが取れず、十分に解決されないままである^{1,2)}。このため高速車になっても低速車と同様に風影響は小さいと、従来見られてきた背景もある。

一方、運輸部門の温暖化対策として、クルマの低燃費

化が国の方針として推進されており、最近、風影響への関心（省燃費運転のエコドライブ）がかなり高くなってきている^{3,4)}。そこで、この風影響について、すなわち平坦な高速道路を定速（小型車100km/h、大型車80km/h）で走行する場合の風影響について調査研究することにした。なお自然風（風速 U 、風向 θ ）としては、今回は最も基本的な向い風 ($\theta=0$) と追い風 ($\theta=180$ 度) の実風（実風モデル）に限定した⁵⁾。

クルマの燃費の表示には、燃費（量） f_c (L/km) と（距離）燃費 f_E (km/L) があり、両者は逆数の関係にある。ここではクルマの燃料消費量に比例する、前者の燃費（量） f_c を用いる。

2. クルマ走行と風影響のモデル化（研究目的）

燃費を含めクルマ（走行速度 v ）の性能評価は自然風が無い場合（①無風 $U=0$ ）を前提として評価されているので、この場合を出発点①とする。①での空力抵抗、燃費

* 交通機械工学科
平成19年4月20日受理

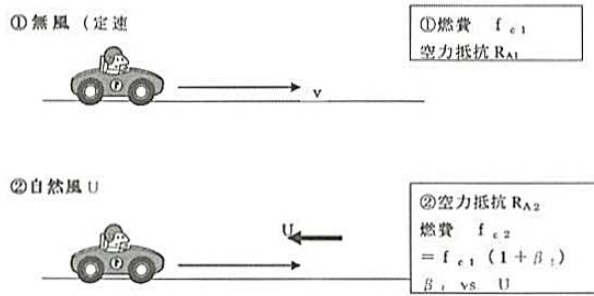


図 2.1 クルマ走行 (①と②) と風影響のモデル化 (研究目的)

(量) を, それぞれ R_{A1} , f_{c1} とする。「①に自然風 U が吹いた場合」を②とすると, 空力抵抗は R_{A2} に変化 (向い風の場合は増加, 追い風では減少) し, 定速走行するために燃費は f_{c2} へ変化 (増加) する。「 U と f_{c2} の関係」を見出すことが研究目的である (図 2.1)。①から②への変化の過程は, 準静的に変化するものと仮定し対象外とする。

U と f_{c2} の関係を知る方法として 2 つが考えられる。すなわち, U を与えて f_{c2} を直接求める方法 (A 直接法) と, f_{c2} を既知 f_{c1} からの変化分 (差分 Δf_c) として求める方法 (B 差分法) である。A の方法を実行するには詳細なクルマデータが必要であり, 当該のクルマを生産したクルマメーカー自身で無ければ通常無理である。そこでここでは B の方法を採用することにした。燃費と燃費の変化分 (差分) は次式となる。

$$\Delta f_c = f_{c2} - f_{c1} \quad (2.1)$$

$$f_{c2} = f_{c1}(1 + \beta_r) \quad (2.2)$$

$$\beta_r = \Delta f_c / f_{c1} \text{ (燃費変化率)} \quad (2.3)$$

これより風影響は, U と β_r の関係を知ることによって帰着する。

なお自然風 U については, 道路面より鉛直方向に, また時間的に一定とした。よく知られているように自然風はスケールが大きい乱流であり, 風向風速は時間とともに変動している。この変動をどのように細かく扱うかは今後の課題として, ここでは定常値の平均風向, 平均風速で代表できるものとした。また自然風は道路上に乱流境界層 (道路面での流速ゼロから高度が高くなるにつれ流速が増加する) を形成しているはずであるが, 鉛直方向に一定の風速 U (どの高度での風速で代表させるかの課題が残るが, ここでは概ね車高の高さの風速としておく) で近似する。

3. 燃費に及ぼす自然風の影響

3.1 自然風と空力抵抗の増減

クルマの進行方向を基準軸 (x 軸) として, 自然風を U と風向角 θ で表示した場合 (②) の, クルマに相対的な合成風速 V_r (resultant air velocity) と偏揺角 ϕ の関係を図 3.1 に示す。これより, 次の速度三角形の関係式が得られる。

$$V_r(\theta)^2 = v^2 + U^2 + 2vU\cos\theta \quad (3.1)$$

$$\tan\phi = U\sin\theta / (v + U\cos\theta) \quad (3.2)$$

この場合の空気力で進行方向成分の空力抵抗 $R_{A2}(\theta)$ は次式で与えられる。

$$R_{A2}(\theta) = (\rho/2)Cd(\phi)AV_r(\theta)^2 \quad (3.3)$$

ここに, ρ : 空気密度, A : 車の前面投影面積, $Cd(\phi)$: 偏揺角 ϕ の空力抵抗係数, V_r : 相対速度 (wind relative to a vehicle) $= (v \pm U)$, 向かい風 ($\theta=0$), 追い風 ($\theta=180^\circ$) では, $\phi=0$ となる。

一方, 出発点①の空力抵抗 R_{A1} は次式となる。

$$R_{A1}(0) = (\rho/2)Cd(0)Av^2 \quad (3.4)$$

①から②への空力抵抗の増減率 α_A は

$$\alpha_A(\theta) = (R_{A2} - R_{A1}) / R_{A1} = (V_r(\theta)/v)^2 - 1 = (\pm U/v)^2 - 1 = \pm (U/v)(2 \pm U/v) \quad (3.5)$$

記号 $+$ は向かい風 ($\theta=0$) で, $\alpha_A > 0$ となり, 記号 $-$ は追い風 ($\theta=180^\circ$) で, $\alpha_A < 0$ となる。

往復走行の場合は 2 風向の平均となり次式となる。

$$\overline{\alpha_A} = (U/v)^2 \quad (3.6)$$

これより往復走行では, 必ず空気抵抗増 (エネルギーの消費) になることが分かる。

小型車 ($v=100\text{km/h}$) と大型車 ($v=80\text{km/h}$) の場合の空気抵抗の増減率 α_A を図 3.2, 図 3.3 に示す。これより僅かな風速 ($U=2\text{ m/s}$) でも, 空気抵抗は 15% 増加

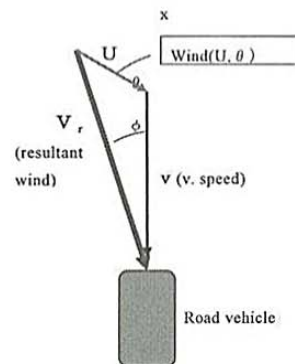


図 3.1 クルマの走行速度 v , 風速 U , 合成風速 V_r の速度三角形

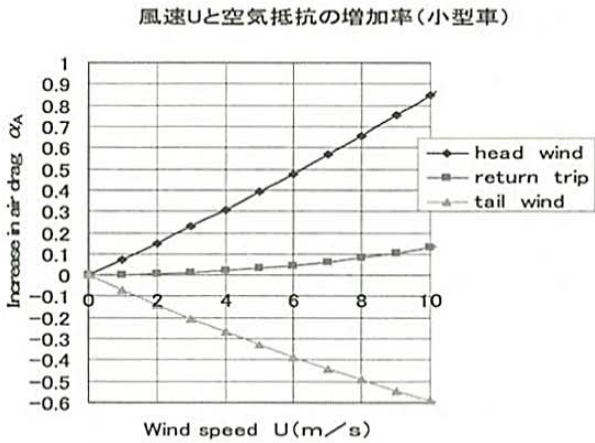


図 3.2 風速 U と空気抵抗の増加率 (小型車)

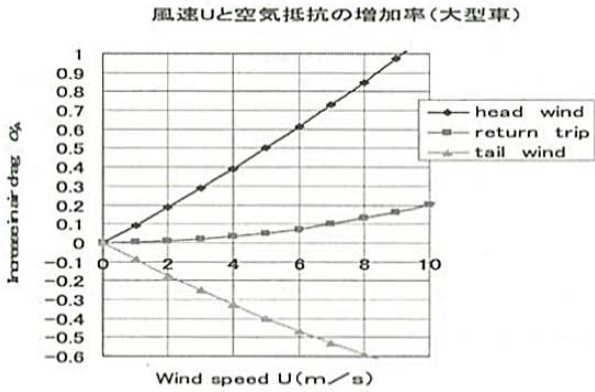


図 3.3 風速 U と空気抵抗の増加率 (大型車)

し、また往復走行しても強風時 ($U > 8 \text{ m/s}$) では10%以上の抵抗増加となることが分かる。ただし、この空気抵抗の増加はそのまま燃費増加とはならない。この両者の関係を次に求める。

3.2 空力抵抗の増減と燃費変化率

定速走行時の走行抵抗 R は転がり抵抗 R_r と空力抵抗 R_A の和なので、①での走行抵抗を R_1 、②での走行抵抗を R_2 とし、 R_r は一定とすると、それぞれ

$$R_1 = R_r + R_{A1} \tag{3.7}$$

$$R_2 = R_r + R_{A2} \tag{3.8}$$

となる。

この時の燃費変化率(2,3)は次式で与えられる (寄与率モデル)^{6,7)}。

$$\beta_t = \frac{R_1(f_{c2} - f_{c1})}{f_{c1}(R_2 - R_1)} \cdot \frac{R_{A1}(R_2 - R_1)}{R_1(R_{A2} - R_{A1})} \cdot \frac{(R_{A2} - R_{A1})}{R_{A1}} = K_t F_A \alpha_A = K_A \alpha_A \tag{3.9}$$

$$\text{ここに、空力燃費係数 } K_A = K_t F_A \tag{3.10}$$

$$\text{燃費寄与率 } K_t = \frac{R_1(f_{c2} - f_{c1})}{f_{c1}(R_2 - R_1)} (< 1.0) \tag{3.11}$$

$$\text{空力寄与率 } F_A = \frac{R_{A1}(R_2 - R_1)}{R_1(R_{A2} - R_{A1})} = \frac{R_{A1}}{R_1} (< 1.0) \tag{3.12}$$

クルマデータが完備 (Aの直接法に同じ) しておれば、燃費マップなど利用して(3.11)より燃費寄与率 K_t を、空力速度などを利用して(3.12)より空力寄与率 F_A を求め、(3.10)より K_A を決定出来る (B1の方法)。

通常クルマデータは当該車を生産したメーカー以外では完備していないので、ここでは代わって K_A に関する情報をまず調査収集し、これ (K_A データ) より K_A の値を

表 1 クルマの空力抵抗, 走行抵抗, 燃費と寄与率モデルの関係

	燃費 (量) f_c	走行抵抗 R (走行エネルギー)	空力抵抗 R_A	備考
①無風	f_{c1}	R_1	R_{A1}	定速モード (v)
①→②				準静的に遷移
②自然風 U	f_{c2} (A直接法) = $f_{c1} + \Delta f_c$ (B差分法)	R_2	R_{A2}	転がり抵抗一定 $f_{c2} = f_{c1}(1 + \beta_t)$
差分Δ (増減率)	$\beta_t = \Delta f_c / f_{c1} = K_t \alpha_t$	$\alpha_t = \Delta R / R_1 = F_A \alpha_A$	$\alpha_A = \Delta R_A / R_{A1}$	$\beta_t < \alpha_t < \alpha_A$
B1法: 寄与率モデル	燃費寄与率 $K_t = \frac{R_1 \Delta f_c}{f_{c1} \Delta R}$	空力寄与率 $F_A = R_{A1} / R_1$		空力燃費係数 $K_A = K_t F_A$
燃費と空力	$\beta_t = K_t K_A \alpha_A = K_A \alpha_A$			B2: データ収集 $K_A = 0.3 \sim 0.7$

間接的に推定する(B2の方法)。この方法では当該のクルマ固有の K_A そのものを求めることは出来ないが、類似のクルマより近似的に推定することになる(メーカー別の新旧の車種の多様性もあるし、推定の誤差もあるので、どうしても推定の幅(高, 中, 低位)が生じるのはやむをえない)ので、出来るだけ多くの K_A データが必要になる。調査結果は井手ら(2006)(表1の K_A と表2の ϵ_{H1})⁷⁾にまとめられているので、これを用いる。以上の内容の関係を表1にまとめた。

(3.10)より K_A は F_A (≈ 0.7)より小さくなければならないので、 $K_A < 0.7$ に限定する(古いクルマを使用した細井(1980)の結果だけが、 $K_A > 0.7$ の部分あり、これを除外する⁸⁾)。このとき K_A は車種ほかが違う分に相当して分散(0.3~0.7)はしているが、平均的には、小型車0.5, 大型車0.4となっていることが分かる。そこで小型車($v=100\text{km/h}$)については、推定幅(高, 中, 低位)の K_A を、大型車($v=80\text{km/h}$)については、中, 低位の K_A を、表2の暫定値とした。今後 K_A データを更に調査収集してこの暫定値を見直して行く必要がある。

表2 空力燃費係数 K_A の暫定値

推定の幅	小型車	大型車	備考
高位	0.7	—	大型車の $K_A < 0.43$
中位	0.5	0.4	$K_A = 0.3 \sim 0.7 < 0.7$
低位	0.3	0.3	高速走行の $\epsilon_{H1} = 0.29 \sim 0.63$

4. 燃費変化率の結果

(3.5)(3.9)より

$$\beta_f = \pm K_A(U/v)(2 \pm U/v) \quad (4.1)$$

表2の K_A を用いて計算した結果(風影響)を、小型車について図4.1, 大型車について図4.2に示す。なお往復(走行)の結果は2風向の平均に等しい。参考として図4.1にはNatural Resources Canadaの推定値(風速30km/hで30%)⁹⁾, 図4.2にCummins社の結果¹⁰⁾を併記した。

これまでの研究では、この種の定量的な β_f の報告例は無い。風が強くなると比例的に、向い風では燃費は悪化し、追い風では燃費は良くなり、風影響は結構大きいことが分かる。

僅か2 m/sの向い風でも小型車では約10%の燃費悪化(大型車では3 m/sの向い風が必要)となる。エコドライブ(風エコ)への活用が期待される¹¹⁾。

なお往復走行すれば当然ながら風影響は小さい(図4.1, 4.2で、 $U < 6 \text{ m/s}$ では燃費増は小さい)。しかし $U > 8 \text{ m/s}$ では往復走行しても燃費増となるので運転を避けた方が良いことが分かる。

現在、燃費の実測データを取得すべく計画中であるが、改めて実測の困難(①気象観測, ②燃費計測, ③平面の高速道路の選択)に直面している。

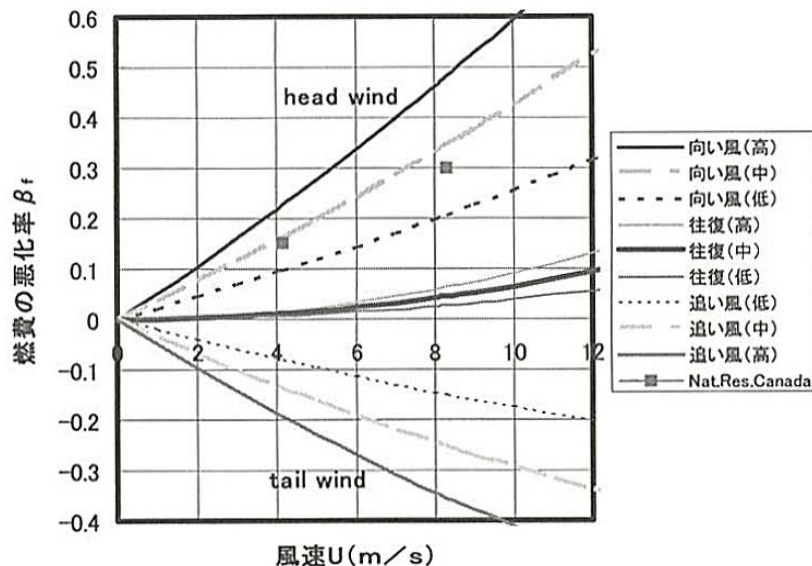


図4.1 自然風が変わった時の燃費の悪化率(小型車, 100km/h)

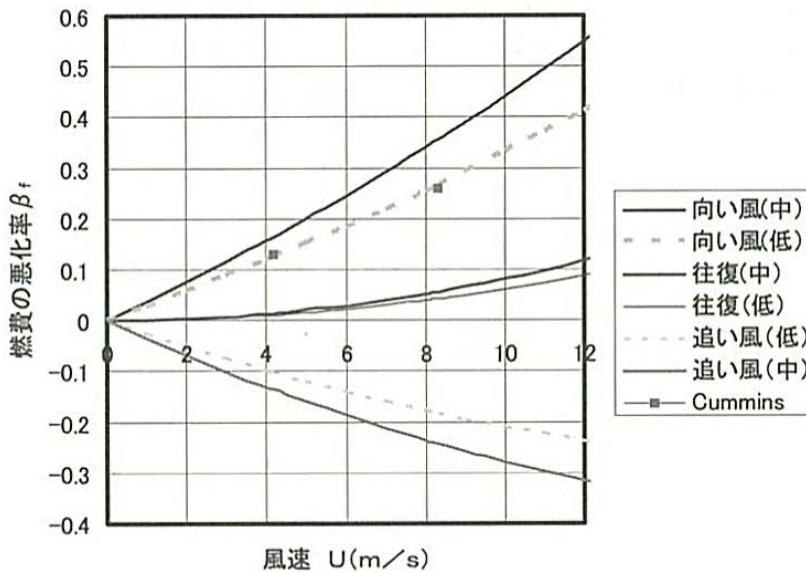


図4.2 自然風が変わった時の燃費の悪化率
(大型車, 80km/h)

5. むすびと今後の課題

高速車の燃費に及ぼす自然風（向い風と追い風の実風モデル, 風速 U ）の影響（風影響）調査し, 風速 U と燃費変化率 β_f の関係図（図4.1, 4.2）を初めて得た。これより下記のことになった。

- 1) 従来, 低速車と同様に高速車になっても風影響は小さいと考えられてきたが, 風が強くなると, 向い風では燃費は悪化し, 追い風では燃費は良くなり, 風影響は結構大きい。
- 2) 小型車の場合は, 向い風 $U=5\text{ m/s}$ では, 燃費悪化は10%~30%で, $U=10\text{ m/s}$ では30%~60%である。
- 3) 大型車の場合は, 向い風 $U=5\text{ m/s}$ では, 燃費悪化は約20%で, $U=10\text{ m/s}$ では約40%である。ほぼ小型車と同様の傾向にある。
- 4) 往復走行しても必ず燃費の悪化は生じるが, その程度は5%以下で小さい（ただし $U < 8\text{ m/s}$ ）。

今後実測燃費との対比および他の風向への拡大研究が必要であり, 関係者のご協力, ご支援を賜れば幸いです。

謝 辞

本研究を進めるに当たり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教授(大学参与), 森和典教授(交通機械工学科科長) 他の先生方に心より感謝申し上げます。また資料調査研究に協力してくれた井

手研空室の修士修了生, 古道哲八君, 及び卒業研究生一同に改めて御礼申し上げます。

引用文献

- 1) Wolf-Heinrich Hucho et. al., *Aerodynamics of Road Vehicles*, Fourth Edition, SAE, Warrendale, Pa. (SAE, 1998) 219-223, 423-425.
- 2) Gino Sovran, The Effect of Ambient Wind on a Road Vehicle's Aerodynamic Work Requirement and Fuel Consumption, SAE, 840298, (1984).
- 3) 坪田, 小林, 川嶋: ミクロ交通シミュレータを用いたエコドライブの環境負荷低減効果の推定, 第47回大気環境学会年会講演要旨集 (2006) 3D1112
- 4) 岡村, 横田, 折原: エコドライブの評価手法に関する研究, 第47回大気環境学会年会講演要旨集 (2006) 3D1124
- 5) 井手, 古道: 高速車の燃費に及ぼす自然風の影響(1), 日本航空宇宙学会西部支部講演会 (2006) 49-82.
- 6) 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会 (2005) 101-104.
- 7) 井手, 藤井, 龍, 池田: クルマの空気力学と省エネ (2), 久留米工大研報, 29 (2006) 29-34.
- 8) 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.
- 9) Natural Resources Canada, Fuel Consumption

- Guide, <http://oee.nrcon.g.ca>
- 10) Cummins Fuel Economy Guide, Secrets of Better Fuel Economy, p.30, Cummins Inc. (2006).
- 11) 井手, 古道: 高速エコドライブと自然風 (風エコ), 大気環境学会九州支部, 第7回研究発表会講演要旨集 (2007) 9-10.