

〔論文〕

高速乗用車の燃費に及ぼす自然風の影響 (風燃影響)

井手 靖雄*¹・中村 金次*²・東 大輔*²・池田 秀*²

Natural wind influence on fuel consumption for high speed passenger cars

Yasuo IDE (Ex-Kurume Inst. of Tech.), Kinji NAKAMURA, Daisuke AZUMA
and Shigeru IKEDA (Kurume Inst. of Tech.)

Abstract

Natural wind influence on fuel consumption, f_c , (WIF) for high speed passenger cars is studied and the aerodynamic drag to yaw angles is linearly approximated. It is shown that a head wind has maximum influence, β_{fMax} , and a tail wind has minimum, β_{fMin} . Quartered mean wind directions (θ_i) in the real wind model is proposed to obtain the short-term WIF, β_{fi} , for the mean head wind ($i = 1, |\theta| < 45^\circ$), the mean side wind ($i = 2$ and $4, 45^\circ < |\theta| < 135^\circ$), and the mean tail wind ($i = 3, |\theta| > 135^\circ$). The head wind and strong side wind are shown to influence badly on fuel consumption. The weighted mean of the short-term WIF, β_{fi} ($i = 1$ to 4), yields the long-term WIF, β_{fL} , for the nonuniform wind.

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

要 旨

高速乗用車 (偏揺角に対する空気抵抗を線形近似) の燃費に及ぼす自然風の影響 (風燃影響WIF) が明らかにされる。向い風で最大の影響があり、追い風で最小の影響となる。短期の風燃影響 β_{fi} を求めるために、平均向い風 ($i = 1, |\theta| < 45^\circ$)、平均横風 ($i = 2, 4, 45^\circ < |\theta| < 135^\circ$)、それに平均追い風 ($i = 3, |\theta| > 135^\circ$) の 4 分割方位 (風向 θ_i) の実風モデルが提案される。向い風と強い横風では必ず燃費悪化 (損失) が生じる。一様風想定 of 長期の風燃影響 β_{fL} は短期風燃影響 β_{fi} ($i = 1 \sim 4$) の加重平均となる。

1. はじめに

高速車になると空気抵抗が大きくなるので、自然風は燃費に悪影響を及ぼす (これを簡単に『風燃影響』、生じる燃費損を『風燃損失』と呼ぶ)。この風燃影響 (Wind Influence on Fuel Consumption, WIF) についての研究は、変りやすい自然 (風) が相手であり気象と燃費の実測が非常に困難 (再現性、精度不足) であるために、十分解決されないままである^{1, 2)}。このため従来、高速車の風燃損失は低速車と同様に“小さい”と見なす向きが大勢であっ

た (専門家の関心は薄く、米国 E P A の行政図書 (1995) の「向い風 9 m/s で風燃影響 2.6% (最大 6%)」³⁾ (これは技術的には約 1/10 の過小評価) でさえ、一時罷り通っていた (その後「向い風 9 m/s」は削除修正) が、一部では今なおそのまま引用されている)。

一方、運輸部門の温暖化対策 (省燃費運転のエコドライブ) として、最近、風燃損失への関心がかなり高く (エコドライブでは、瞬時燃費と平均燃費が表示される燃費計が多く利用されている) なってい

*¹元交通機械工学科
平成20年5月20日受理

*²交通機械工学科

る。そこで風燃影響について、最も基本的な向い風 ($\theta = 0$ 度) と追い風 ($\theta = 180$ 度) に限定して先に研究 (実風モデル) したところ、風燃影響はかなり大きいことが分かった^{4, 5)}。そこで、他の風向についても引き続き実風モデルを今回研究することとした。この場合、空気抵抗の偏揺角特性 (r_{cd}) が必要となるので、偏揺角特性が小さい小型乗用車 ($r_{cd} \doteq 1$) をまず対象として、4 風向分割法を提案 (4 風向の実風モデル) し⁶⁾、風燃影響は予想通り “相当大きくなる” ことを示す。著者らが調査した範囲では、この種の風燃影響の研究は国内外皆無である。

前報同様に、燃費表示はCO2 排出量に比例する燃費 (量) fuel consumption f_c (L/km) を用いて、自然風が無い場合 (無風 $U = 0$) を①、「①に自然風 U が吹いた場合」を②とし、「 U と β_r の関係」を見出すことが研究目的である。なお自然風の風速 U については、道路面より鉛直方向に一定 (地面より車高までの平均風速を U とする) と近似した。

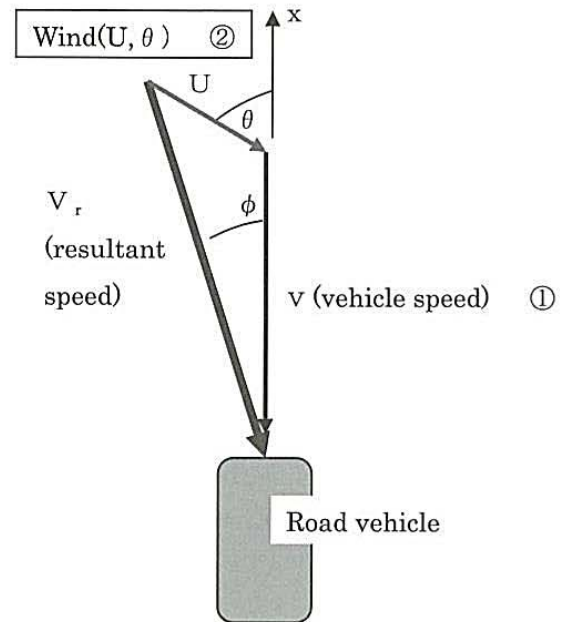
2. 自然風と空気抵抗の増減

自然風は時間的に常に変動しているので、気象学では、ある時間内 (評価時間 T) の平均値として、風向 θ 、風速 U は求められている。日本では、ある時刻の風向風速はその時刻前の $T = 10$ 分間の平均値である。平均値からのずれが偏差であり、平均時間 T が長くなる程、偏差は拡大する気象的特徴がある。 T 時間内の風向、風速の偏差を標準偏差 (偏差の自乗平均の平方根 σ) として求め、風向変動 (σ_θ)、風速変動 (σ_U) と呼んでいる。従って、平均風向 θ は、 $\theta \pm \sigma_\theta$ の間に、平均風速 U は、 $U \pm \sigma_U$ の間にそれぞれ統計的に存在する。

気象での風向は北を基準軸として、16 方位 (風向角 22.5 度の刻み)、もしくは 32 方位で表わされるが、ここでは車の進行方向 (走行速度 v) を基準軸 (x 軸) にした角度 θ ($|\theta| \leq 180$ 度) を用いる。この時、自然風を風速 U ($< v$) と風向 θ で表示した場合 (②、Fig. 2. 1) の、車に対する相対 (合成) 風速 V_r (θ) と偏揺角 ϕ (最大値を ϕ_{max1}) の速度三角形関係 (速度比 $u = U/v < 1$) はそれぞれ次式となる。

$$V_r(\theta)^2 = v^2(1 + u^2 + 2u \cos \theta) \quad (2. 1)$$

Fig. 2. 1 Velocity triangle for vehicle speed, v , wind speed, U and resultant relative speed, V_r where wind direction and yaw angle are denoted by θ and ϕ respectively.



$$\tan \phi = \sin \theta / (1 / u + \cos \theta) \quad (2. 2)$$

$$\phi_{max1} = \sin^{-1}(u) \quad (2. 3)$$

U ($= 2.5, 5, 7.5, 10$ m/s) を変えて、(2. 2) 式で求めた風向 θ と偏揺角 ϕ の関係を Fig. 2. 2 に示す。これより風向は $\pm 180^\circ$ 変化しても、偏揺角は ϕ_{max1} 以下であり、余り大きく変化しないことが分かる。今の場合 ($v = 100$ km/h)、日常での最大級の $U = 10$ m/s とすると、 $\phi_{max1} = 21^\circ$ ($u = 0.36$) となるので、以下、 $\phi \leq 20^\circ$ を対象 (この範囲で後述の r_{cd} の近似をする) とする。なお偏揺角については、 ϕ_{max1} が発生する風向 θ_{max1} 、および $\theta = 90^\circ$ での ϕ_n はそれぞれ次式で与えられる。

$$\theta_{max1} = 90^\circ + \phi_{max1} = 90^\circ + \sin^{-1}(u) \quad (2. 4)$$

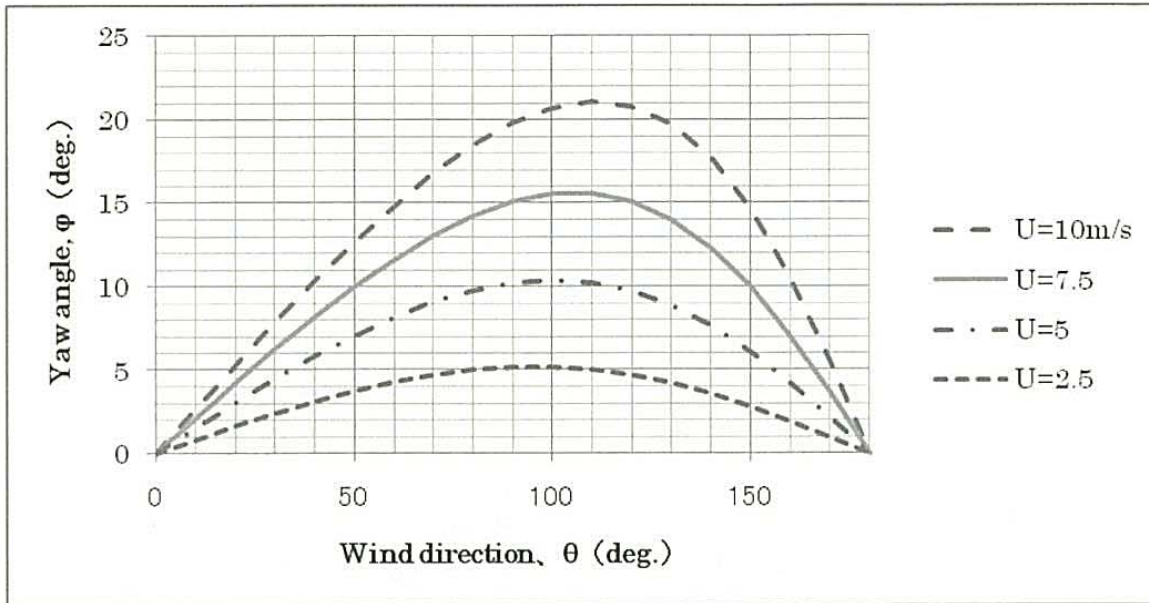
$$\phi_n = \tan^{-1}(u) = \sin^{-1}(u / (1 + u^2)^{0.5}) \quad (2. 5)$$

また

$$V_r(\theta) = v \quad (2. 6)$$

となる風向とその偏揺角をそれぞれ θ_0 、 ϕ_0 とすると、次式となる。

Fig. 2. 2 Relationship between wind direction, θ and yaw angle, ϕ .



$$\theta_0 = 90^\circ + \phi_0 / 2 = 90^\circ + \sin^{-1}(u/2) \quad (2.7)$$

$$\phi_0 = 2 \sin^{-1}(u/2) \quad (2.8)$$

また u が小さい時は近似的に

$$\phi_{\max 1} \doteq \phi_0 \doteq \phi_n$$

となる。ちなみに $U=10\text{m/s}$ ($u=0.36$) の場合は $\phi_{\max 1}=21.1^\circ$ 、 $\phi_0=20.7^\circ$ 、 $\phi_n=19.8^\circ$ である。

なおここでは u が小さい場合を対象としているが、有風時の楕行試験 (coast-down testの低速走行時) を扱う時は逆に u が大きくなり、

$$u = 1 \text{ では、 } \phi = \theta / 2 \text{ ,}$$

$$u \gg 1 \text{ では、 } \phi = \theta \text{ ,}$$

となり、 ϕ が大きくなるので取扱に注意する必要がある。

さて、今の場合の空気力で進行方向成分の空気抵抗 R_{A2} (瞬時値) は次式で与えられる。

$$R_{A2}(\theta) = (\rho/2) Cd(\phi) A V_r(\theta)^2 \quad (2.9)$$

ここに、 ρ : 空気密度、 $Cd(\phi)$: 偏揺角 ϕ での空気抵抗係数、 A : 車の前面投影面積、

一方、①での空気抵抗 R_{A1} は次式である。

$$R_{A1}(0) = (\rho/2) Cd(0) A v^2 \quad (2.10)$$

従って①から②への空気抵抗の増率 α_A は次式となる。

$$\alpha_A(\theta) = (R_{A2} - R_{A1}) / R_{A1} = r_{cd}(\phi) (V_r(\theta)/v)^2 - 1 \quad (2.11)$$

$$\text{ここに } r_{cd}(\phi) = Cd(\phi) / Cd(0) \quad (2.12)$$

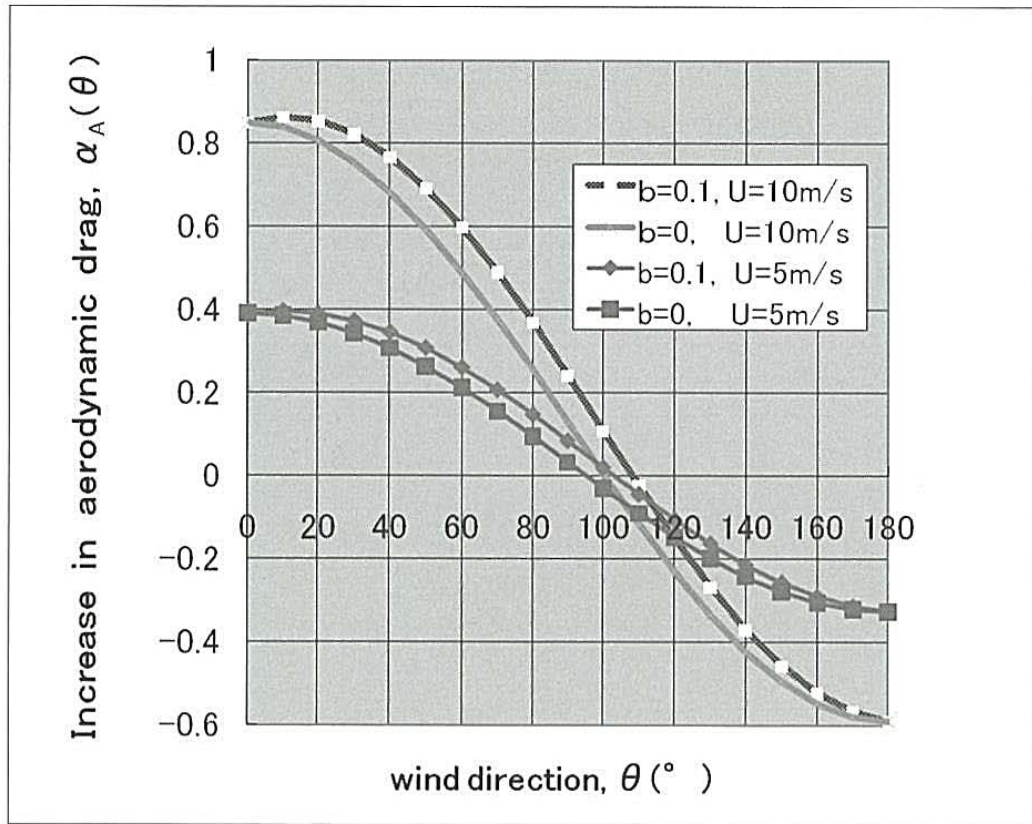
$r_{cd}(\phi)$ は ϕ と Cd の関係で、すなわち空気抵抗の偏揺角特性 (yawヨー特性) である。一般に $r_{cd}(\phi)$ は ϕ の増加につれて、1より比例的に増大し、約 40° 近くで最大となって、以降は減少する。ここでは $\phi \leq 20^\circ$ を対象としているので次の1次式で近似する。

$$r_{cd}(\phi) = 1 + b(\phi/\phi_1) \quad (2.13)$$

比例係数 b は、 $\phi_1=20^\circ$ として、EPA (Station Wagon、 $r_{cd}(20^\circ)=1.11$) より、 $b=0.1$ とする⁷⁾。同資料で、Pick-Up Truck は日本では少ないのでこれを除いて、他の車 (3種) について平均すると、 $r_{cd}(20^\circ) = 1 + (\text{Station Wagon}(0.110) + \text{Family Sedan}(0.125) + \text{Sports Car}(0.070)) / 3 = 1.102$

となる。これよりも $b=0.1$ は乗用車を代表していると思なせる。

Fig. 2. 3 Increase in aerodynamic drag, $\alpha_A(\theta)$ vs. wind direction, θ according to wind speed, U and proportional index, b.



U = 5、10m/sの場合の $\alpha_A(\theta)$ を、 $b = 0$ と $b = 0.1$ について Fig. 2. 3 に示す。これより空気抵抗増率と風向の関係が分かる ($\theta = 0^\circ$ と 180° で、最大と最小となる)。

特例として、風向 θ の自然風 U の中を、車が往復走行 (round trip) する場合は、空気抵抗増率は、往と復の平均となるので次式となる。

$$\bar{\alpha}_{Ar}(\theta) = (\alpha_A(\theta) + \alpha_A(\pi - \theta)) / 2 \quad (2. 14)$$

これは θ について常に正 (損失) で、 $\theta = 90^\circ$ で最大となり、次の最大値 $\bar{\alpha}_{Armax}$ となるが、(2. 11) 式での $\theta = 90^\circ$ に他ならない。

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_{Armax} &= \alpha_A(90^\circ) = u^2 + b(1 + u^2) \\ &\quad \tan^{-1}(u) / \phi_1 \\ &= u^2 + (1 + u^2) \tan^{-1}(u) / 200^\circ \end{aligned} \quad (2. 15)$$

これより往復走行しても U = 5 m/s では 8.5% の空気抵抗増大 (損失) であるが、10m/s では 24% の増大

となる。

次に (2. 16) 式の、 $\alpha_A(\theta)$ の全風向平均 (α_{ALI}) を考える。

$$\alpha_{ALI} = (1/\pi) \int_0^\pi \alpha_A(\theta) d\theta \quad (2. 16)$$

米国では偏揺角特性を入れた空気抵抗の比較評価には、風平均抵抗係数 (wind averaged drag coefficient) \bar{C}_d (トラックなどの大型車の場合の風洞実験基準 SAE J1252 (1981)) が用いられており、代表風速 U、一様風向 (等風向頻度) の場合は

$$\bar{C}_d = (1/\pi) \int_0^\pi C_d(\phi) (1 + u^2 + 2u \cos \theta) d\theta \quad (2. 17)$$

である⁸⁾。これを (2. 11)、(2. 12)、(2. 16) 式を用いて変形すると

$$\begin{aligned} \bar{C}_d &= (C_d(0)/\pi) \int_0^\pi (1 + r_{cd}(\phi) \\ &\quad (Vr(\theta)/v)^2 - 1) d\theta \\ &= C_d(0) (1 + \alpha_{ALI}) \end{aligned} \quad (2. 18)$$

となる。これより任意の偏揺角特性に対して次の関係が成立する。

$$\alpha_{ALI} = (\overline{C_d} - C_d(0)) / C_d(0) \quad (2.19)$$

これより α_{ALI} は風平均抵抗係数 $\overline{C_d}$ の偏揺角に対する増率に対応していることが分かる。

既述したように乗用車は近似的に $r_{cd}(\phi) \doteq 1$ と見なせるし、また今後、車の空力技術の向上によって理想的な車 ($r_{cd}(\phi) = 1$) に近づくことが期待されるので、この理想の場合（偏揺角特性が無い理想的な車 ($r_{cd} = 1$)）の風燃影響を付録にまとめた。

3. 風向分割（4方位）の提案と風燃影響（瞬時、短期と長期の影響）

燃費寄与率モデルによると、空気抵抗の増率分 (α_A) だけ車の走行エネルギーが増大 ($\alpha_E = F_A \alpha_A$, F_A は空力寄与率) し、燃費増大 ($\beta_f = K_f \alpha_E$, K_f は燃費寄与率) するので、風燃影響（増率 β_f ）は次式で与えられる^{5, 9)}。

$$\beta_f(\theta) = \Delta f_c / f_{c1} = K_f F_A \alpha_A = K_A \alpha_A(\theta) \quad (3.1)$$

ここに、 $K_A (=K_f F_A)$ は車によって異なる空力燃費係数であり、現状（小型車）では暫定値（低位0.3 (low)、中位0.5 (mid.)、高位0.7 (high)）である。

また風向 θ を決めても、瞬時の風向 θ は時間とともに常に変動しており（平均風向 θ は、 $\theta \pm \sigma_\theta$ の間に統計的に存在する）、いたずらに細かい風向の情報（瞬時値）が入手出来ても運転者等からは風向の計測判定は難しく（偏揺角は 20° 以下）、応用に困る。そこで、 θ について平均化（短期平均）することにより、より少ない風向（方位分割）で風向特性をできるだけ表現出来るような簡略化を以下提案する⁶⁾。

まず瞬時の最大値 (β_{fMax}) と最小値 (β_{fMin}) を含む2方位分割では、粗すぎ風向特性を失くしてしまう恐れがある。どうしても4方位以上の分割が望ましい。通常の気象観測では16方位、もしくは簡略型の8方位としている。8方位以上となると、前後の斜風等が加わり運転者にとっては多少複雑すぎる。道路走行では道路進行方向 ($i = 1$) と逆方向 ($i = 3$)、それに横方向（左右の $i = 2, 4$ ）の90

度間隔の4分割が単純で分りやすい。そこで実用性を考えて、風向特性を失くさず最小数の4方位分割 (Fig. 3. 1、向い風 ($i = 1, |\theta| < 45^\circ$)、横風 ($i = 2, 4, 45^\circ < |\theta| < 135^\circ$)、追い風 ($i = 3, |\theta| > 135^\circ$)) の実風をここに提案（4風向 ($i = 1 \sim 4$) の実風モデル) する。（必要とあれば8方位分割以上への拡大は困難ではない）この場合の燃費影響（短期平均値）を (3. 2) ~ (3. 4) 式に示す。なお風向特性を皆無にしたい場合（風向に独立の扱い方）は、 $\theta = 0 \sim 180^\circ$ 間の風向について平均（全風向平均）すれば良く、(3. 5) 式となる (β_{fLI})。

$$\text{向い風 } (i = 1 = H), \beta_{fH} = (4 K_A / \pi) \int_0^{\pi/4} \alpha_A(\theta) d\theta \quad (3.2)$$

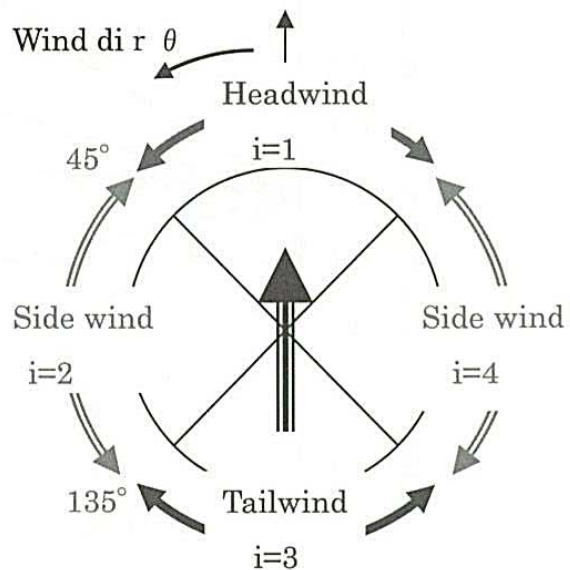
$$\text{横風 } (i = 2 = 4 = S), \beta_{fS} = (2 K_A / \pi) \int_{\pi/4}^{3\pi/4} \alpha_A(\theta) d\theta \quad (3.3)$$

$$\text{追い風 } (i = 3 = T), \beta_{fT} = (4 K_A / \pi) \int_0^\pi \alpha_A(\theta) d\theta \quad (3.4)$$

$$\text{全風向平均 } \beta_{fLI} = (K_A / \pi) \int_0^\pi \alpha_A(\theta) d\theta \quad (3.5)$$

以上より次の関係が得られる。

Fig. 3. 1 Proposed quartered mean wind directions for the real winds of the mean head wind ($i = 1, |\theta| < 45^\circ$), the mean side wind ($i = 2$ and $4, 45^\circ < |\theta| < 135^\circ$) and the mean tail wind ($i = 3, |\theta| > 135^\circ$).



$$\beta_{fL1} = (\beta_{fH} + 2\beta_{fS} + \beta_{fT}) / 4 = \sum \beta_{fi} / 4 \quad (3.6)$$

これより、全風向平均 β_{fL1} は、短期平均値 β_{fi} の4個 ($i = 1 \sim 4$) の平均 (いずれの重みも1の1様) となっているので、短期より、より長い平均時間の平均に対応しており、 β_{fL1} は長期平均値 (重み1様) であることが分かる。そこで β_{fL1} を長期影響 (重み1様)、実風の β_{fi} を短期影響 ($i = 1 \sim 4$) と呼ぶことにする。(α_A についても同様の添え字を付けて区別する)

自然風の風向 θ は平均時間 (評価時間 T) とともに変動拡大するので、 θ の短時間平均、および長時間平均 (但し定速走行で v は一定) にそれぞれ対応した短期影響 (β_{fi})、および長期影響 (β_{fL1}) に相当する。現実の気象観測で、風向4分割 ($i = 1 \sim 4$) で観測整理された風向 i の発生 (出現) 頻度を P_i とすれば、一般化された加重風の長期風燃影響 (但し U 一定であるが、統計的には、 $U \pm \sigma_U$ の間にある) は、短期影響 β_{fi} ($i = 1 \sim 4$) を加重平均した次式で与えられる。

$$\beta_{fL} = \sum P_i \beta_{fi} / \sum P_i \quad (3.7)$$

特別の1様頻度の場合には $P_i = 1$ (重み1様) なので

$$\beta_{fL} = \sum \beta_{fi} / 4 = \beta_{fL1} \quad (3.8)$$

となる。

現実の気象では1様発生頻度 ($P_i = 1$) は減多に起こり得ないが、1様発生頻度を想定すると気象的取扱いが極めて簡便 (風向に独立となる) になるので、 β_{fL1} は非常に便利なパラメータである。しかし、あくまでも1様発生頻度 (仮想モデル) の結果 (特別パラメータ) であることを留意しておく必要がある。

(3.2) ~ (3.4) 式による短期風燃影響 (β_{fi}) の計算結果 ($i = 1, 2, 3$) を Fig. 3. 2 (short-term WIF) に、(3.5) 式による長期風燃の結果 (特別パラメータ β_{fL1} と付録の基礎風燃損失 β_{f0}) を Fig. 3. 3 (long-term WIF) にそれぞれ示す。これより、特徴として向い風では当然風燃損失は生じるが、横風 ($i = 2, 4$) でも 5 m/s 以上になる

Fig. 3. 2 Short-term WIF, β_{fi} , for the real winds vs. wind speed, U .

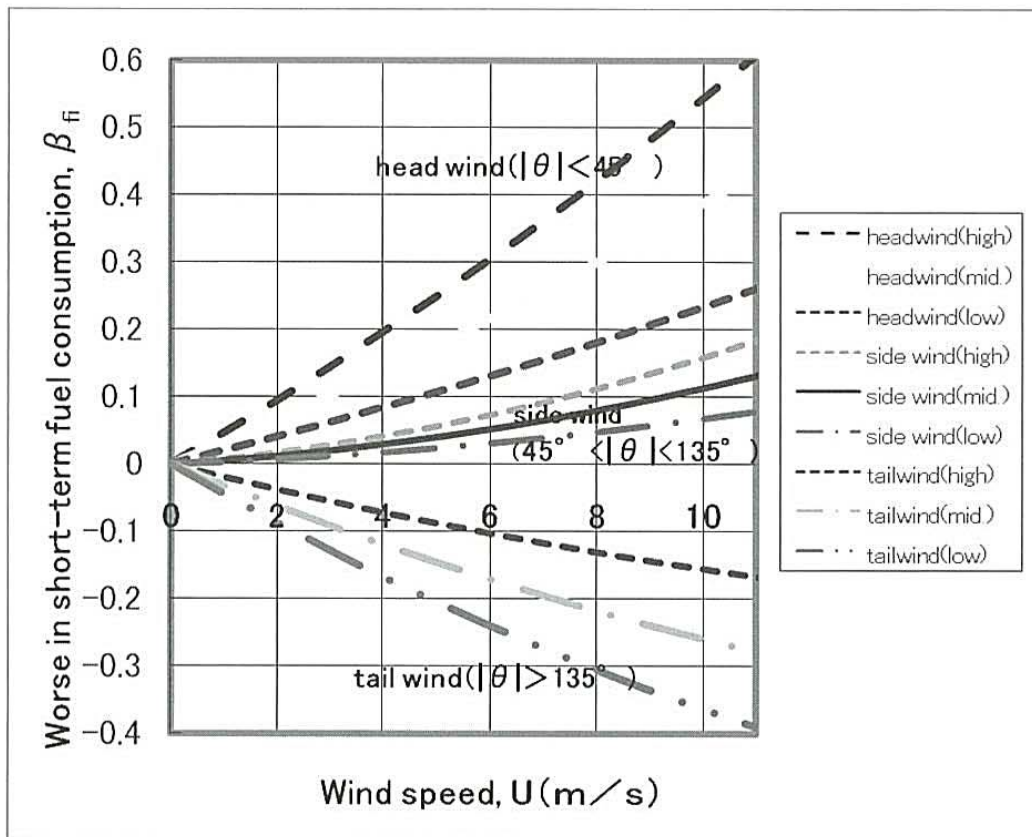
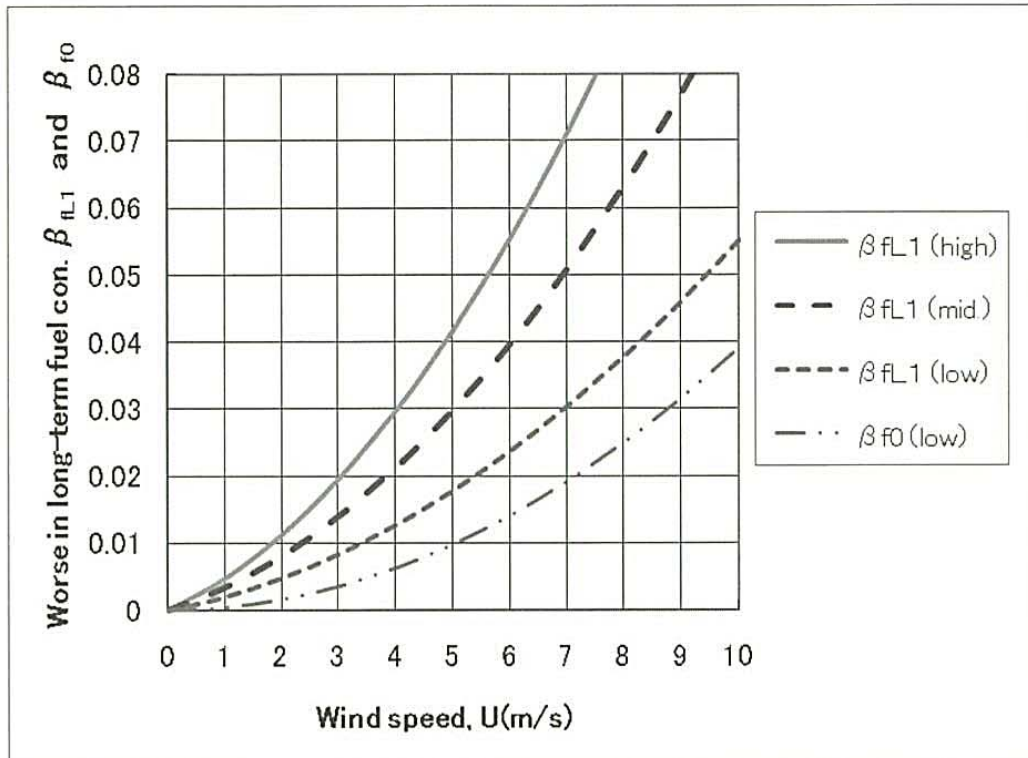


Fig. 3. 3 Long-term WIF, a special parameter, β_{fL1} , for the uniform wind, and basic fuel loss, β_{f0} , vs. wind speed, U.



と風燃損失が生じる。従来、乗用車の風燃影響は小さいと見なす向きが大勢であったが、逆に相当大きいことが分かる。また一様風の風燃損失 β_{fL1} および理想車の基礎風燃損失 β_{f0} はかなり小さい。車一台（一つの K_A ）について比較すると次の大小関係にある。

$$\begin{aligned} \text{瞬時 } \beta_{fMax} > \text{短期 } \beta_{fH} > \text{短期 } \beta_{fS} > \text{長期 } \beta_{fL1} > \\ \text{短期 } \beta_{fT} > \text{瞬時 } \beta_{fMin} \end{aligned}$$

なお付録（理想的な車、 $r_{cd} = 1$ ）の結果を参考として、短期（Fig. 3. 2）および長期（Fig. 3. 3）について下記の近似式を得た。

$$\beta_{fH} = K_{Au} (1.8 + u) \quad (3. 9)$$

$$\beta_{fS} = K_{Au} (0.3 + u) \quad (3. 10)$$

$$\beta_{fT} = -K_{Au} (1.8 - u) \quad (3. 11)$$

$$\beta_{fL1} = K_{Au} (0.15 + u) \quad (3. 12)$$

4. むすびと今後の課題

4 風向分割案（ $90^\circ \times 4$ 方位）の実風モデルを提案し、乗用車（100km/h）の燃費に及ぼす自然風（風速U、風向 θ ）の風燃影響WIF（短期および長

期のWIF）を求めた（風速Uと風燃増率 β_{fi} の関係をFig. 3. 2、Fig. 3. 3に示す）。この結果、従来、乗用車の風燃影響は小さいと見なす向きが大勢であったが、逆に相当大きいことが明らかにされた。

- 1) 瞬時の向い風（ $\theta = 0^\circ$ ）で風燃影響は最大で、追い風（ $\theta = 180^\circ$ ）で最小となり、風が強くなると比例的に風燃影響は大きくなる。
- 2) 実風の風燃影響（4 風向分割の β_{fi} ）は、向い風（ $i = 1$ 、 $|\theta| < 45^\circ$ ）の $U = 5 \text{ m/s}$ では、10～25%で、 $U = 10 \text{ m/s}$ では25%～50%と相当大きい。
- 3) 5 m/s以上の横風（ $i = 2, 4$ 、 $45^\circ < |\theta| < 135^\circ$ ）になると風燃影響は悪化する。
- 4) 5 m/sの追い風（ $i = 3$ 、 $|\theta| > 135^\circ$ ）では風燃影響は10%以上良くなる。
- 5) 長期平均の風燃影響 β_{fL} は、実風の向い風（ $i = 1$ ）、横風（ $i = 2, 4$ ）、それに追い風（ $i = 3$ ）の風燃影響（ β_{fi} ）の加重平均（風向発生頻度 P_i を重み）で求められる。

今後、実測燃費との対比および大型車（ $r_{cd} \neq 1$ ）への適用拡大が必要であり、関係者のご協力、ご支

援を賜れば幸いである。

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。また資料調査研究に協力してくれた井手研空室の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) USA. EPA, *Fuel Economy Impact Analysis of REG*, (1995)
<http://www.epa.gov/otaq/rfgecon.htm>
- 4) 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）49-52.
- 5) 井手、中村、池田、梶山：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、久留米工大研報、30（2007）47-52.
- 6) 井手、中村、東：高速車の燃費に及ぼす自然風の影響（2：乗用車）、日本航空宇宙学会西部支部講演会（2007）81-84.
- 7) EPA, *Fuel Economy Labeling of Motor Vehicle Revisions to Improve Calculation of Fuel Economy Estimates*, EPA420-R-06-017（2006）86.
- 8) Wolf-Heinrich Hucho et. al., *Aerodynamics of Road Vehicles*, Fourth Edition, SAE, Warrendale, Pa. (SAE, 1998) 424.
- 9) 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.

付録：偏揺角特性が無い、理想的な車（ $r_{cd} = 1$ 、 $b = 0$ ）の場合

1) 自然風が空気抵抗に及ぼす瞬時影響（風抵影響）

車の空力形状は設計段階で出来るだけ小さい偏揺角特性（ $r_{cd}(\phi) \rightarrow 1$ ）に改善努力されているので、ここでは偏揺角特性が無い“理想的な車”（ $r_{cd} = 1$ 、 $b = 0$ ）の場合を考える。

$U = 5$ 、 10m/s の場合（ $b = 0$ ）の $\alpha_A(\theta)$ は Fig. 2. 3 に示されており、これより次のことが分かる。

$$\alpha_A(0) = \text{向い風の最大値} = u(2 + u) \tag{A-1}$$

$$\alpha_A(90^\circ) = \text{横風の風向平均値} = u^2 \tag{A-2}$$

$$\alpha_A(180^\circ) = \text{追い風の最小値} = -u(2 - u) \tag{A-3}$$

$$\text{往復走行 } \bar{\alpha}_{Ar} = (\alpha_A(0) + \alpha_A(180^\circ)) / 2 = u^2 \tag{A-4}$$

$$\text{全風向平均 } \alpha_{AL1} = u^2 \tag{A-5}$$

2) 短期および長期の風燃影響（ $b = 0$ ）

（2. 11）式を（3. 2）～（3. 5）式に代入して、それぞれ下記を得る。

$$\beta_{fH} = K_{Au} (4\sqrt{2} / \pi + u) = K_{Au} (1.8 + u) \tag{A-6}$$

$$\beta_{fS} = K_{Au}^2 \tag{A-7}$$

$$\beta_{fT} = -K_{Au} (4\sqrt{2} / \pi - u) = -K_{Au} (1.8 - u) \tag{A-8}$$

$$\beta_{fL1} = K_{Au}^2 \tag{A-9}$$

以上をまとめると次の関係が得られる。

$$\beta_{f0} = K_A \alpha_A(90^\circ) = K_A \bar{\alpha}_{Ar} = K_A \alpha_{AL1} = \beta_{fS} = \beta_{fL1} \tag{A-10}$$

β_{f0} は物理的意味が異なるそれぞれの風燃影響の共通パラメータ（Fig. 3. 2 に図示）となっており、また風が吹く時の風燃損失の最低限度（現実（ $b \neq 0$ ）ではこれ以上の風燃損失となる）を示すので、“基礎風燃損失”と呼ぶことにする。