

〔論 文〕

# 高速小型車の燃費に及ぼす自然風の影響 (風燃影響のまとめ)

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 highway small vehicles  
(WIF summary)

Yasuo IDE (Ex Kurume I.T.)

Kinji NAKAMURA, Daisuke AZUMA and Shigeru IKEDA(K.I.T.)

## Abstract

Natural wind influence on fuel consumption (WIF),  $\beta_f$ , for a highway light van (100km/h) is studied for summarization since it seems the biggest body among the small vehicles of cars and light trucks. The quartered mean wind directions in the real wind model which was previously proposed for passenger cars by us is here similarly applied to light vans in a straight trip to obtain the short-term WIF,  $\beta_{fi}$ , for mean head wind ( $i=1, |\theta| < 45^\circ$ ), mean side wind ( $i=2$  and  $4, 45^\circ < |\theta| < 135^\circ$ ) and mean tail wind ( $i=3, |\theta| > 135^\circ$ ) where  $\theta$  denotes wind direction. The WIF ( $\beta_{ft}$ ) for a turning trip is obtained after weighted averaging the WIF ( $\beta_{fi}$  ( $i=1\sim 4$ )) for straight trips in each mean winds.

The light van WIF is shown to be a little larger than cars in spite of vehicle body size difference. The short-term WIF for small vehicles is shown to be large while the existing long-term WIF estimated with the extended application of SAE J1252(1981) is small.

**Key Words:** Natural wind influence, Fuel consumption, Aerodynamic drag, Road vehicle, WIF

## 要 旨

L. Vanは乗用車や小型トラックなどの小型車中で最大級ボディに相当するので、小型車の風燃影響まとめとして、高速L. Van(100km/h)の燃費に及ぼす自然風の影響（風燃影響WIF）を調べる。先に乗用車向けに提案した、4風向分割の実風モデルをL. Vanの直進走行に同様に適用して、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（ $i=3, |\theta| > 135^\circ$ ）の短期WIF（ $\beta_{fi}$ （ $i=1\sim 4$ ））を求める。風向別の直進走行のWIFを加重平均して曲進走行のWIF（ $\beta_{ft}$ ）は求められる。ボディサイズの差の割にはL. VanのWIFは乗用車のよりもやや大きい。SAE J1252(1981)を小型車に拡大適用した、従来の長期WIF（ $\beta_{ft1}$ ）は小さいが、短期のWIFは大きいことが示される。

\*1(元)交通機械工学科  
平成21年6月16日受理

\*2 交通機械工学科

## 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, W I F』, 生じる燃費損を『風燃損失』と呼ぶ）。この風燃影響についての研究は、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<sup>1, 2)</sup>。このため従来、高速車の風燃影響は“低速車と同様に小さい”と見なされて来た（表1.1参照）（専門家の関心も薄くなって、米国EPAの行政図書（1995）の「向い風9m/sで風燃影響2.6%（最大6%）」<sup>3)</sup>（これは約1/10の過小評価）でさえ、罷り通っていた<sup>4, 5)</sup>）。

一方、運輸部門の温暖化対策として、最近、風燃影響への関心（エコドライブ）がかなり高くなっている<sup>6, 7)</sup>。そこでこの風燃影響について、著者らは先に最も基本的な向い風 ( $\theta=0^\circ$ ) と追い風 ( $\theta=180^\circ$ ) の研究（その1. (2006), 実風モデル）をしたところ、小型車も大型車も風燃影響は“結構大きい”ことが分かった<sup>8, 9)</sup>。引き続き他の風向について、乗用車 (100km/h) を対象として、“4風向の実風モデル”を提案研究（その2. (2007)）したところ、乗用車の風燃影響は“相当大きい”ことが改めて分かった<sup>10, 11)</sup>。そこで今回（その3. (2008)）は小型車の中でボディ最大級のLight Van (100km/h) を対象として、“4風向分割の実風モデル”を適用し、風燃影響の最大限界を明らかにし<sup>12)</sup>、小型車の風燃影響を総括的に纏める。自然風の風向変動は、平均時間（観測時間）とともに拡大することを考慮して、瞬時、短期（直進走行と曲進走行）、およ

び長期の風燃影響に大別する。

これまでと同様に自然風が無い場合（無風 $U=0$ ）を①, 「①に自然風 $U$ が吹いた場合」を②とし、「 $U$ と $\beta_{\text{H}}$ の関係」を4風向（向い風, 横風, 追い風）について見出すことを研究目的とした。なお自然風の風速 $U$ については、道路面上に乱流境界層が形成されている筈であるが、道路面より鉛直方向に一定（地面よりトラック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 ( $\alpha_A$ )

### 2.1 風向と空気抵抗の増減

自然風は時間的に常に変動（乱流）しているので、気象学では、ある時間内の平均値として、風向 $\theta$ , 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（この平均時間を観測時間 $T$ と呼ぶ）が長くなる程、偏差は拡大する気象の特徴がある。 $T$ 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 $\sigma$ ）として求め、風向変動 ( $\sigma_\theta$ ), 風速変動 ( $\sigma_U$ ) と呼んでいる。従って、平均風向 $\theta$ 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。長期観測の風向分布を表わすために、通常、風配図 (wind rose) が用いられており、これより風向出現頻度 ( $P(\theta)$ ) を求めることが出来る<sup>13)</sup>。

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 $\theta$  ( $|\theta| \leq 180$ 度) を用いる。

表1.1 「高速車の燃費に及ぼす自然風の影響」の研究経緯（その1. その2. と今回のその3.）

	実風モデル	対象車	風燃影響 (W I F)
従来 (既存の研究)	(一様風モデル, $\bar{C}_d$ の 拡大適用。 SAE J1252 (1981) )	大型車 (小型車)	これまで「W I Fは小さい」と見なされて来た。 c f . EPA (1995)
その1. <sup>8, 9)</sup> 高速車(2006)	向い風 ( $0^\circ$ ) と追い 風 ( $180^\circ$ ) の2風向	小型車 大型車	逆に「W I Fはかなり大きい」ことが分かった。
その2. <sup>10, 11)</sup> 乗用車(2007)	全風向を 4風向分割 ( $i=4$ )	小型車 (乗用車)	やはり、かなり大きい ことが再確認出来た。
今回のその3. <sup>12)</sup> (ボディ最大級)	同上および実風モデル でのW I Fまとめ	小型車での最大級 ボディ (L. Van)	*乗用車よりも大きい *従来は一様風モデル

この時、自然風を風速  $U$  ( $< v$ ) と風向  $\theta$  で表示した場合(②, Fig. 2.1)の、車に対する相対(合成)風速  $V_r(\theta)$  と偏揺角  $\phi$  (最大値を  $\phi_{max1}$ ) の速度三角形の関係(速度比  $u = U/v < 0.5$ ) はそれぞれ次式となる。

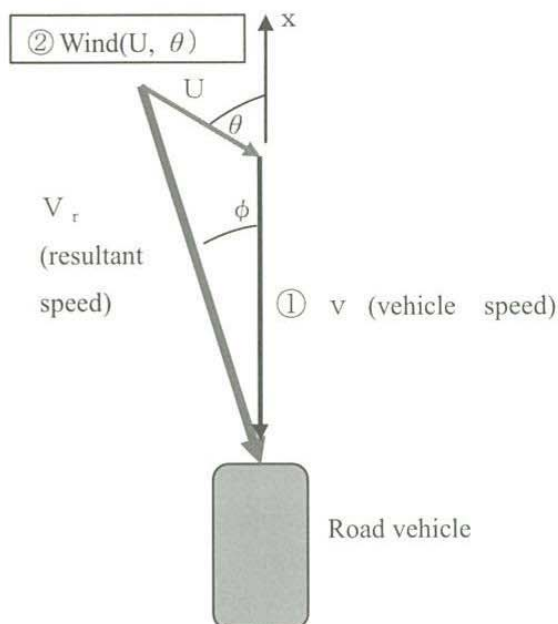


Fig. 2.1 Velocity triangle for vehicle speed,  $v$ , wind speed,  $U$  and resultant relative speed,  $V_r$  where wind direction and yaw angle are denoted by  $\theta$  and  $\phi$ , respectively

$$V_r(\theta)^2 = v^2(1 + u^2 + 2u \cos\theta) \quad (2.1)$$

$$\tan\phi = \sin\theta / (1 + u \cos\theta) \quad (2.2)$$

$$\phi_{max1} = \sin^{-1}(u) \quad (2.3)$$

$U$  ( $= 3, 6, 8 \text{ m/s}$ ) を変えて、(2.2)式で求めた風向  $\theta$  と偏揺角  $\phi$  の関係をFig. 2.2に示す。これよ

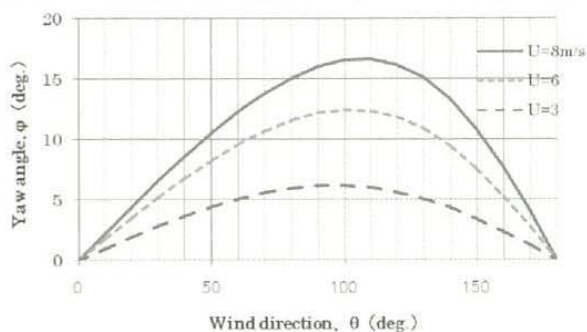


Fig. 2.2 Relationship between wind direction,  $\theta$  and yaw angle,  $\phi$  for different wind speeds.

り風向は  $\pm 180^\circ$  変化しても、偏揺角は  $\phi_{max1}$  以下であり、余り大きく変化しない特徴がある。日常での高頻度での最大級の  $U = 8 \text{ m/s}$  程度とすると、最大  $\phi_{max1} = 17^\circ$  ( $u = 0.29$ ) となるので、以下、 $\phi \leq 20^\circ$  を対象とする。なお、 $\phi_{max1}$  が発生する風向  $\theta_{max1}$ 、および  $\theta = 90^\circ$  での  $\phi_N$  はそれぞれ次式で与えられる。

$$\theta_{max1} = 90^\circ + \phi_{max1} = 90^\circ + \sin^{-1}(u) \quad (2.4)$$

$$\phi_N = \tan^{-1}(u) = \sin^{-1}(u / (1 + u^2)^{0.5}) \quad (2.5)$$

一方、①での空気抵抗  $R_{A1}$  (瞬時値)、および②でのそれ  $R_{A2}$  (瞬時値) は次式となる。

$$R_{A1}(0) = (\rho / 2) C_d(0) A v^2 \quad (2.6)$$

$$R_{A2}(\theta) = (\rho / 2) C_d(\phi) A V_r(\theta)^2 \quad (2.7)$$

ここに、 $\rho$ : 空気密度、 $C_d(\phi)$ : 偏揺角  $\phi$  での空気抵抗係数、 $A$ : 車の前面投影面積、従って①から②への空気抵抗の増減率  $\alpha_A$  は次式となる。

$$\alpha_A(\theta) = (R_{A2} - R_{A1}) / R_{A1} = r_{cd}(\phi) (V_r(\theta) / v)^2 - 1 \quad (2.8)$$

$$\text{ここに } r_{cd}(\phi) = C_d(\phi) / C_d(0) \quad (2.9)$$

$r_{cd}(\phi)$  は  $\phi$  と  $C_d$  の関係であり、空気抵抗の偏揺角特性 (yaw  $\gamma$  特性) である。

①の空気抵抗は  $C_d(0)$  で支配されているが、空気抵抗の増減率  $\alpha_A(\theta)$  は、 $r_{cd}(\phi)$  と  $u$  ( $= U/v$ ) の相対値のみで決まり、見かけ上  $C_d(0)$  そのものに独立となることを以下の計算に利用する。

また一般的に  $r_{cd}(\phi)$  は  $\phi$  の増加につれて、1 よりほぼ比例的に増大し、約  $30^\circ \sim 40^\circ$  近くで最大となって、以降は減少すると考えられている。ここでは  $\phi \leq 20^\circ$  を対象としているので乗用車と同様に次式で近似する。

$$r_{cd}(\phi) = 1 + b(\phi / \phi_1) \quad (2.10)$$

前報の乗用車の比例係数  $b$  は、EPA (Station Wagon,  $r_{cd}(20^\circ) = 1.11$ ) より、 $b = 0.1$  ( $\phi_1 = 20^\circ$ ) とした<sup>14)</sup>。また同資料で、Pick-Up Truckは小型車ではあるが大きいボディで日本では少ないのでこれを除外して、他の車(3種)について単純平均

し ( $r_{cd}(20^\circ) = 1.102$ よりも,  $b = 0.1$ ), この結果は乗用車を代表していると見なした。今回は L. Van が対象なので  $\phi_i = 10^\circ$  として Hucho (Fig. 9.13<sup>15)</sup> の L. Van ( $r_{cd}(10^\circ) = 1.11$ ) より,  $b = 0.11$  とする。これは Fig. 2.3 に示すように,

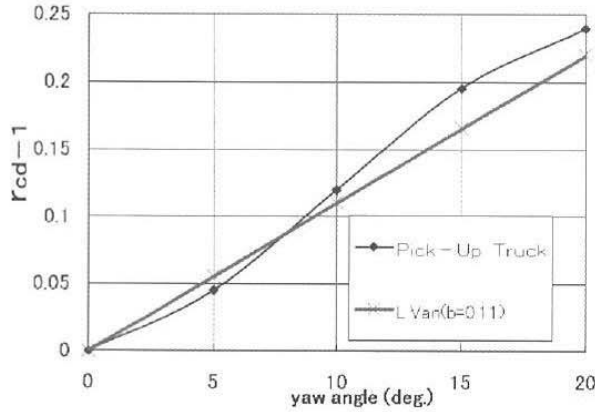


Fig. 2.3 Yaw characteristics of air resistance,  $r_{cd}$  versus yaw angle,  $\phi$  for a L. Van.

前報で大きいボディとして除外した Pick-Up Truck とほぼ整合する<sup>14)</sup>。この場合の  $\alpha_A(\theta)$  を Fig. 2.4

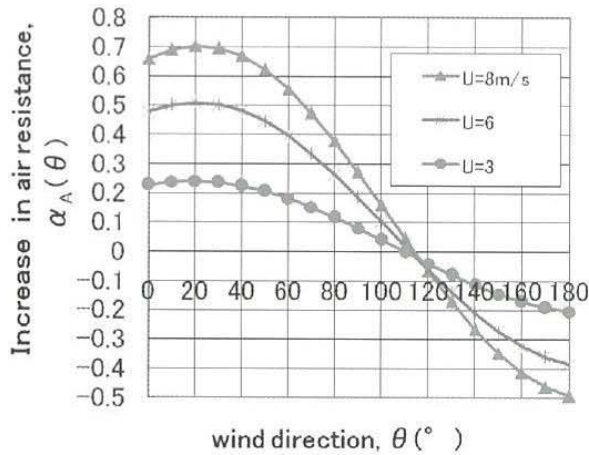


Fig. 2.4 Increase in air resistance,  $\alpha_A(\theta)$  vs. wind direction,  $\theta$  according to wind speed,  $U$  for a L. Van ( $b = 0.11$ ).

( $U = 3, 6, 8 \text{ m/s}$  の場合) に示す。これより抵抗増減率と風向の瞬時的な関係 ( $\theta = 20^\circ$  と  $180^\circ$  で, それぞれ最大と最小) にあることが分かる。

## 2.2 風向平均と観測時間

$\alpha_A(\theta)$  は向い風では正 (抵抗増) であるが追い風で負 (抵抗減) となるので, 全風向の平均ではど

うなるか (正か負か) を知るために,  $\alpha_A(\theta)$  の全風向平均を取り上げ, 同時に観測時間の相異効果を考える。風向平均を可能とするためには  $\alpha_A(\theta)$  が,  $0$  から  $2\pi$  までの広範囲の  $\theta$  で与えられる必要がある。 $\theta$  の変化には, i) 車の直進走行を前提とした時の気象による風向変化 (長期観測) の場合と ii) 車の進路変更 (曲進走行) に伴う相対風の風向変化 (短期観測) の場合がある。

まず ii) の風向一定の風の中を車が円周走行 (定速の circle trip) 考えると, 相対風の風向は広範囲 ( $0$  から  $2\pi$  まで) に変化し, 次の風向平均が可能となる。

$$\alpha_{AC} = (1/2\pi) \int_0^{2\pi} \alpha_A(\theta) d\theta \quad (2.11)$$

例えば時速  $100 \text{ km/h}$  で直径  $5 \text{ km}$  の円周走行には約  $10$  分の時間が必要で, 計測を繰り返しても  $1$  時間以下の短期観測で  $\alpha_{AC}$  の平均積分は可能である。(この場合の遠心加速度  $a = 0.31 \text{ m/s}^2 = 0.032 \text{ g}$  と小さい)

$r_{cd}(\phi) > 1$  を利用すると式 (2.11) は

$$\alpha_{AC} = (1/2\pi) \int_0^{2\pi} \alpha_A(\theta) d\theta > u^2 > 0 \quad (2.12)$$

となる。これより円周走行では必ず自然風による空気抵抗の増加 (風燃損失) が生じることが分かる。

これに対して i) の気象による風向変化には, 実現現象として風向が広範囲 ( $0$  から  $2\pi$  まで) に変化するので, 観測時間は少なくとも  $1$  時間以上で  $1$  日から  $1$  週間, 場合によっては  $1$  月から年間までの長期に渡り, 通常, 季節別や年間を対象とする。長期の風向出現頻度,  $P(\theta)$  は, 風配図 (wind rose) で整理されているので, 長期の風向平均は  $P(\theta)$  で重み付けした次式となる。

$$\alpha_{AL} = \int_0^{2\pi} \alpha_A(\theta) P(\theta) d\theta \quad (2.13)$$

$$1 = \int_0^{2\pi} P(\theta) d\theta \quad (2.14)$$

これより向い風が高頻度であれば,  $\alpha_{AL}$  は正となるが, 逆に追い風が高頻度であれば負となるので, 具体的な  $P(\theta)$  の気象情報なしではこれ以上の展開は出来ないことが分かる。

そこで米国の風洞実験基準 (SAE J1252 (1981)<sup>16)</sup>,

以下SAE風洞基準と呼ぶ)で採用されている“一様風モデル”をここでも採用する。これは $P(\theta) = \text{定数} = (1/2\pi)$ 、すなわち、いずれの風向の出現頻度も同じ(一様風向)と仮定する(これを“一様風モデル”と呼ぶ)と(2.13)式は

$$\alpha_{ALI} = (1/2\pi) \int_0^{2\pi} \alpha_A(\theta) d\theta \quad (2.15)$$

となり、式(2.12)より次式となる。

$$\alpha_{ALI} = \alpha_{AC} > u^2 (> 0) \quad (2.16)$$

これにより一様風モデルでは $\alpha_{ALI}$ は常に正(抵抗増)であり、しかも $\alpha_{AC}$ に見かけ上(数式上)一致することになり便利である。しかし、それぞれの観測時間は短期と長期(一様風モデルの採用)で異なる点に注意する必要がある。それほどに“一様風モデル”は特別なモデルと云える。

現実の気象観測では“一様風モデル”はまず起こり得ないが、これを採用すると気象の取り扱いが極めて簡便(風向に独立となる他)になるので便利な特別モデルとして利用する場合がある。

その例として“一様風モデル”を最初に採用した風平均抵抗係数(wind averaged drag coefficient,  $\overline{C_d}$ )の経緯を以下、簡単にまとめる。

1) 第1次オイルショックの後、特に大型車(特にトレーラ車)の燃費改善要求が高まり、各種の空気抵抗低減装置(Aerodynamic Drag Reducing Device, ADRD)が工夫・提案された。このADRDの性能比較(effectivenessの評価)のためにBuckley&Sekscienski(1976, SAE750704)により提案されたのが、風平均抵抗係数( $\overline{C_d}$ )である<sup>17)</sup>。ADRD有無の大型車模型を用いてヨー角を変えた風洞実験を行い( $C_d(\phi)$ を計測)、“一様風モデル”を採用した次式で算出されている。

$$\overline{C_d} = (1/\pi) \int_0^{2\pi} C_d(\phi) (1 + (U/v)^2 + 2(U/v)\cos\theta) d\theta \quad (2.17)$$

2) その後、これはトラック、バス等の大型車向けの風洞実験結果の抵抗係数の評価法として米国の風洞実験基準(SAE J1252(1981)<sup>16)</sup>、以下SAE風洞基準と呼ぶ)とされた。 $\overline{C_d}$ の算出条件は、“一様風モデル”を採用して、米国の年平均風速

$U = 7 \text{ mph} (= 3.13 \text{ m/s})$ で、走行速度は低速 $v = 30 \text{ mph} (= 48.3 \text{ km/h})$ と高速 $v = 55 \text{ mph} (= 88.5 \text{ km/h})$ とされている。

以上より1) ADRDの性能比較や2) 風洞実験結果の抵抗比較、すなわち相対値としての相互比較に限定すると“一様風モデル”であっても有用であり、従って $\overline{C_d}$ は実用に供され重宝されて来た。逆に言う“一様風モデル”の $\overline{C_d}$ の“絶対値利用は出来ない”ことを意味しており、要注意である。

なお(2.15)式を用いると(2.17)式は次式となる。

$$\overline{C_d} = (C_d(0)/\pi) \int_0^{2\pi} \{1 + [r_{cd}(\phi)(V_r(\theta)/v)^2 - 1]\} d\theta = (1 + \alpha_{ALI}) C_d(0) \quad (2.18)$$

$$\alpha_{ALI} = (\overline{C_d} - C_d(0))/C_d(0) = \overline{C_d}/C_d(0) - 1 \quad (2.19)$$

上記の関係は任意の偏揺角特性に対して“一様風モデル”の場合に成立する。

### 3. 実風モデルと一様風モデルによる風燃影響( $\beta_f$ )

#### 3.1 実風モデル(4風向)と短期風燃影響( $\beta_{fi}$ )

燃費寄与率モデルによると、空気抵抗の増率分( $\alpha_A$ )だけ車の走行エネルギーが増大( $\alpha_E = F_{AA}$ ,  $F_A$ は空力寄与率)し、燃費も増大( $\beta_f = K_f \alpha_A$ ,  $K_f$ は燃費寄与率)するので、風燃増減率 $\beta_f$ (瞬時)は次式で与えられる<sup>9,18)</sup>。

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

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。

Fig. 2.4から分かるように、L. Vanの特徴として向い風( $\theta = 0^\circ$ )ではなく、 $\theta \approx 20^\circ$ で $\beta_f(\theta)$ は最大となり、追い風( $\theta = 180^\circ$ )で最少となる。

また風向 $\theta$ を決めても、瞬時の風向 $\theta$ は時間とともに常に変動しており(平均風向 $\theta$ 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)が入手出来ても応用に困る。そこで、 $\theta$ について平均化(短期風向平均)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に、向い風H（ $i = 1, |\theta| < 45^\circ$ ）、横風S（ $i = 2, 4, 45^\circ < |\theta| < 135^\circ$ ）、追い風T（ $i = 3, |\theta| > 135^\circ$ ）の4風向分割（4風向の実風）を乗用車と同様に採用する<sup>10,11)</sup>。

これにより風向変動も近似的に考慮したことになる（風向変動考慮の近似）。

まず風向一定の実風中を直進走行（straight trip）の場合を考えると、短期平均風燃影響 $\beta_{fi}$ は(3.2)～(3.4)式となる。

向い風 ( $i = 1 = H$ )

$$\beta_{fH} = (4 K_A / \pi) \int_0^{\pi/4} \alpha_A(\theta) d\theta \quad (3.2)$$

横風 ( $i = 2 = 4 = S$ )

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

追い風 ( $i = 3 = T$ )

$$\beta_{fT} = (4 K_A / \pi) \int_{3\pi/4}^{\pi} \alpha_A(\theta) d\theta \quad (3.4)$$

次に風向一定の実風の中を曲進走行（turning trip）の場合を考える。

車の短距離走行では直進走行（風向  $i$  は一定の 1 trip とする）であっても、長距離走行になると、道路の都合で風向が  $90^\circ$  以上変化する曲進走行（2 風向以上に変化するので、2 trip とする）となる。風向  $i$  の trip の発生頻度（累積時間）を  $T_i$  とすると、曲進走行の場合の風燃影響  $\beta_{fT}$  は  $T_i$  で加重平均した次式となる。

$$\beta_{fT} = \sum T_i \beta_{fi} / \sum T_i \quad (3.5)$$

これが一般化した曲進走行時の風燃影響である。 $T_i$  の調査のために曲進走行の trip 毎の経過時間が必要となる。

曲進走行の特別な場合としてイ) 往復走行 (return trip) と、ロ) 円周走行 (circle trip) を以下、想定する。

イ) 往復走行の場合は向い風と横風の 2 つの場合がある。向い風の往復走行（往は向い風で、復は追い風）の風燃影響  $\beta_{fcr1}$  を求めると

$$\beta_{fcr1} = (\beta_{fH} + \beta_{fT}) / 2 \quad (3.6)$$

横風の往復走行（往復共横風）の  $\beta_{fcr2}$  は

$$\beta_{fcr2} = (\beta_{fS} + \beta_{fS}) / 2 = \beta_{fS} \quad (3.7)$$

ロ) 風向一定の風の中を車が円周走行（定速の circle trip）すれば、相対風の風向は広範囲（0 から  $2\pi$  まで）に変化し、 $T_i = 1$  ( $i = 1 \sim 4$ ) なので

$$\beta_{fT} = \beta_{fC} = \sum T_i \beta_{fi} / \sum T_i = (\beta_{fH} + \beta_{fT} + 2 \beta_{fS}) / 4 \quad (3.8)$$

これより円周走行の風燃影響は 4 風向の平均と一致する。この平均は、既述したように時速 100km/h で直径 5 km の円周走行には約 10 分の時間が必要で、計測を繰り返しても 1 時間以下の短期平均である。また正方形走行（円周に代わって正方形に走行）でも同じ結果となる。(3.6), (3.7) 式より

$$\beta_{fC} = (\beta_{fH} + \beta_{fT} + 2 \beta_{fS}) / 4 = (\beta_{fcr1} + \beta_{fcr2}) / 2 \quad (3.9)$$

なので、円周走行（正方形走行も）の風燃影響は 2 つの往復走行の平均値となっている。以上より次式の関係を得る。

$$\beta_{fcr1} \leq \beta_{fC} \leq \beta_{fcr2} = \beta_{fS} \quad (3.10)$$

L. Van の  $\beta_{fi}$  ( $i = 1 \sim 3$ ) と  $\beta_{fC}$  の計算結果 ( $K_A = 0.5$ ) を Fig. 3.1 (風向別の風燃影響) に示す。これより下記の近似式 (L. Van) を得た。

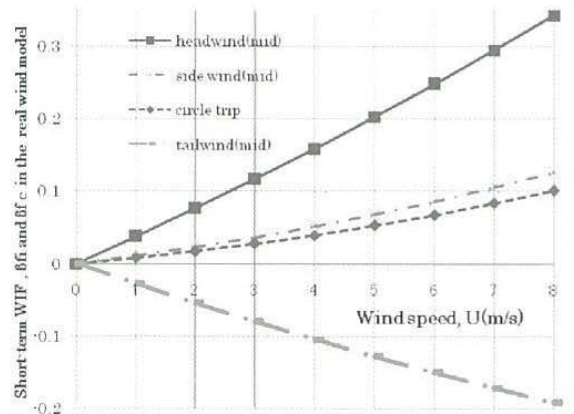


Fig. 3.1 Short-term WIF,  $\beta_{fi}$ , and  $\beta_{fC}$  in the real winds ( $K_A = 0.5$ ) versus wind speed, U.

$$\beta_{\text{H}} = K_A u (2.1 + u) \quad (3.11)$$

$$\beta_{\text{S}} = K_A u (0.6 + u) \quad (3.12)$$

$$\beta_{\text{T}} = -K_A u (1.6 - u) \quad (3.13)$$

$$\beta_{\text{TC}} = K_A u (0.43 + u) \quad (3.14)$$

### 3.2 一様風モデルと長期平均の風燃影響 ( $\beta_{\text{L}}$ )

長期の風向出現頻度、 $P(\theta)$ は通常的气象観測では風配図 (wind rose) で整理されており、長期平均の風燃影響は瞬時値の(3.1)式を $P(\theta)$ で重み付けした次式となる。

$$\beta_{\text{L}} = K_A \int_0^{2\pi} \alpha_A(\theta) P(\theta) d\theta \quad (3.15)$$

また4風向分割の場合は、風向  $i$  の発生累積時間を  $t_i$  とすると、長期平均の風燃影響 $\beta_{\text{L}}$ は加重平均した次式となる。

$$\beta_{\text{L}} = \sum t_i \beta_{\text{fi}} / \sum t_i \quad (3.16)$$

(3.15)、(3.16)式が一般化した長期平均の風燃影響である。

具体的な  $t_i$  の調査結果がなければこれ以上の進展はない。そこで“一様風モデル” ( $P(\theta) = 1/2\pi$ , すなわち、いずれの風向の出現頻度も同じ ( $t_i = 1$  ( $i = 1 \sim 4$ ))) を採用すると(3.15)、(3.16)式は次式となる

$$\begin{aligned} \beta_{\text{L1}} &= (K_A / 2\pi) \int_0^{2\pi} \alpha_A(\theta) d\theta = K_A \alpha_{\text{AL1}} \\ &= (\beta_{\text{H}} + \beta_{\text{T}} + 2\beta_{\text{S}}) / 4 = \sum \beta_{\text{fi}} / 4 = \beta_{\text{TC}} \quad (3.17) \end{aligned}$$

以上のように“一様風モデル”の採用で一挙に簡単化され、 $\beta_{\text{L1}}$ は $\beta_{\text{TC}}$ に見かけ上(数式上)一致するが、それぞれの平均時間は長期と短期で異なる。

既述したように現実の気象では“一様風モデル”は滅多に起こり得ない。これを採用すると気象の取り扱いが極めて簡便(風向に独立となり、直進走行も曲進走行も区別が不要となる)になるので便利な特別モデルとして利用されて来たが、あくまで現実味に欠けた仮想モデルなので注意を要する。

なお、 $\overline{C_d}$ を用いると

$$\beta_{\text{L1}} = K_A \alpha_{\text{AL1}} = K_A (\overline{C_d} - C_d(0)) / C_d(0) \quad (3.18)$$

これより $\overline{C_d}$ を長期の風燃影響を示すパラメータとして拡大適用するケースがあるが、あくまで仮想的な“一様風モデル”の採用の結果である。

以上より“一様風モデル”での $\overline{C_d}$ を、相対値としての相互比較(1) ADRDの性能比較や2) 風洞実験結果の抵抗比較)に用いることは出来ても、絶対値である風燃影響にまで拡大適用出来ないことが分かる。 $\beta_{\text{L1}}$ は長期風燃影響を示す近似的な目安(相対的な便利パラメータ)として限定利用すべきである。

### 3.3 風燃影響についての考察

乗車車との比較のために、向い風をイ) 往復走行する場合とロ) 円周走行の場合を加えてL. Vanの風燃影響( $K_A = 0.3 \sim 0.7$ )を表3.1にまとめた。風速は日本や米国でのほぼ年間平均風速の3 m/sと

表3.1 L. Vanと乗用車(100km/h)の短期(上段)および長期(下段)の風燃影響

風速U (m/s)	L. Van		乗用車	
	3	6	3	6
向い風, $\beta_{\text{fi}}$ ( $i = 1$ )	7~16%	15~35%	6~14%	13~30%
横風, $\beta_{\text{fi}}$ ( $i = 2, 4$ )	2~5%	5~12%	1~3%	3~8%
追い風, $\beta_{\text{fi}}$ ( $i = 3$ )	-(5~11%)	-(9~21%)	-(5~13%)	-(10~24%)
曲進走行, $\beta_{\text{T}} = 4$ 風向 ( $\beta_{\text{fi}}$ ) の加重平均 ( $T_i$ ) (3.5)式				
イ) 往復走行 $\beta_{\text{R1}}$	1~3%	3~7%	<0.5%	2~3%
ロ) 円周走行, $\beta_{\text{TC}}$	2~4%	4~9%	1~2%	2~6%
長期影響, $\beta_{\text{L}} = 4$ 風向 ( $\beta_{\text{fi}}$ ) の加重平均 ( $t_i$ ) (3.16)式				
一様風モデル, $\beta_{\text{L1}}$	2~4%	4~9%	1~2%	2~6%
SAE J1252適用 $\beta_{\text{L1}}$ *	2~5%	—	1~3%	—

\* SAE J1252(1981) (U = 7 mph = 3.13m/s, v = 55mph = 88.5km/h)の拡大適用に対応。

その倍の  $6 \text{ m/s}$  とした。また観測時間は異なるが比較のために、一様風モデル採用の長期風燃影響 ( $\beta_{NL1}$  と風洞実験基準 (SAE J1252 (1981)<sup>16)</sup> の  $\overline{C_d}$  より求めた  $\beta_{NL1}^*$ ) も併記した。

これより下記のことが分かる。

- (1) 実風  $3 \text{ m/s}$  の向い風では小型車の風燃損失 (6~14%) が生じる。 $3 \text{ m/s}$  の横風 ( $i = 2, 4$ ) では小さい (1~5%) もの、 $6 \text{ m/s}$  になると 3~12% の風燃損失となる。
  - (2) 向い風を往復走行、もしくは円周走行すれば風燃影響は小さいものの、 $6 \text{ m/s}$  では L. Van は乗用車の倍程度の風燃影響が生じる。
  - (3) 乗用車より L. Van の方が風燃影響は大きめであり、小型車の風燃影響の最大限界としては L. Van の場合を採用しておけば良い。
  - (4) 一様風モデル (長期平均) の結果はいずれも小さく (5%以下)、これより“高速車になっても、風燃影響は小さい”と従来見なされ、そう言われて来たと考えられる。
  - (5) 米国 EPA (2006) は自動車の燃費ラベル法の改正に当たって、小型車の風燃影響を、1984 年ルール時点では 2.3% (最大 6%) であったのを今回は 6% に変更 (低速車にも適用拡大他) したとの報告を出している<sup>19)</sup>。これより 2.3~6% の長期風燃影響と推定されるので、下記の条件にて今回結果との相互比較を行う。
- 米国では長期影響しか知られていないので、SAE J の拡大適用の長期 (一様モデル) が対応する。
  - 小型車の形状大きさ性能は大きな差はないものとし、走行速度 ( $100 \text{ km/h}$ , と  $55 \text{ mph} = 88 \text{ kmh}$ ) の差も考慮外とする。
- 今回の結果は表 3.1 より乗用車では 1~3% で、L. Van で 2~5% であり、総合した小型車としては 1~5% 程度であり、EPA の 2.3~6% と両者はほぼ整合している。これはいずれにも“一様風モデル”が採用されているが主因である。

更に表 3.1 より次の風エコ (高速道路での省燃費運転) が考えられ、既に提案している<sup>20)</sup>。

- (1) 追い風運転優先 (出来るだけ、追い風時に運転する)
- (2) 向い風運転回避 (向い風を避ける。無理ならば減速走行する)

- (3) 強い横風運転回避 (横風運転注意。安全走行のためにも強い横風時には無理に走行しない)

自然風は時間、場所とともに変化しやすく、1 時的な場合もあり捉え難い。しかし、その風を何らかの手段で予想できれば、風エコのテクニックをドライバーは学べることになる。高速道路に設置された吹き流しを利用した風エコをお勧めしたい。

また追い風運転が良いことが分かったが、追い風をピストン作用で人工的に発生させる省エネ道路 (一方通行の高速道路をスカイトンネルとした順風道路) を既に提案している<sup>21)</sup>。まずは車メーカーの省エネ車の開発努力が必要であるが、ドライバーのエコドライブの努力と道路インフラの省エネ努力の三位一体の対策で、昨今の温暖化と省エネ問題をより有効に解決すべきと考える。

#### 4. むすびと課題

乗用車で提案した実風モデル (4 風向分割) を、小型車の中でボディ最大級の L. Van ( $100 \text{ km/h}$ ) に適用して、燃費に及ぼす自然風 (風速  $U$ , 風向  $i$ ) の影響限界 (最大風燃影響) を求め (Fig. 3.1), 小型車の風燃影響について総括 (表 3.1) した。

この結果、風燃影響は平均時間 (観測時間) の長短によって、(i) 瞬時風燃影響、(ii) 短期風燃影響 (4 風向分割の実風モデル)、および (iii) 年間平均を対象とした長期風燃影響 (一様風モデル) 大別できることが分かった。

L. Van や乗用車の風燃影響は従来小さいとされ、そう言われて来たが、これは長期影響 (一様風モデル) の結果 (5%以下) であって、短時間の実風モデルでは、逆に大きくなることが分かった (表 3.1)。またボディ形状の差異の割には L. Van の方が乗用車よりも風燃影響はやや大きく (横風では特に大きい)、往復走行しても風燃損失は必ず生じる。小型車の風燃影響の最大限界 (L. Van) については下記となる。

- 1) 風が強くなると比例的に、向い風 ( $\theta = 0^\circ$ ) に近い風向 ( $\theta = 20^\circ$ ) で瞬時燃費は最も悪化し ( $\phi \leq 5^\circ$ )、追い風 ( $\theta = 180^\circ$ ) で最も良くなり、風燃影響 (瞬時) は相当大きい。
- 2) 短期の風燃影響 (4 方位分割) は、向い風 ( $|\theta| < 45^\circ$ ) の  $U = 3 \text{ m/s}$  では、7~16% の燃費悪化であるが、 $U = 6$  では 15~35% と大きい。



- 3) 3 m/s の横風 ( $45^\circ < |\theta| < 135^\circ$ ) になると 2～5% の燃費悪化である。
- 4) 3 m/s の追い風 ( $|\theta| > 135^\circ$ ) では、燃費は良く (5～11%) なる。
- 5) 円周走行 (短期) は 4 風向平均 ( $i = 1$  から 4 まで) であり、また一様風モデル (長期) の風燃影響に一致し (観測時間は異なる)、5% 以下と小さい。
- 6) 小型車 (乗用車, L. Van) の長期風燃影響 (1～5%) は米国 EPA の結果 (2～6%) とほぼ整合している。

今後、実測燃費・気象との対比 (実風モデルの検証) が必要であるが、これは予想以上に大変であること (燃費変動, 風速変動がある) が分かったので、今後の懸案課題とし、小型車の風燃影響の研究は今回でひとまず完了する。今後は高速物流の主役である大型車 (トラック) の風燃影響の研究に進む予定であり、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 (副学長)、森和典教授 (自動車システム専攻長) 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究室の院生、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) Chevron: Technical Bulletin: Fuel Economy of Gasoline Vehicles: Vehicle Fuel Economy 20 Aug 2007
- 5) Petro-Canada : 2008  
<http://www.petro-canada.ca/en/productsandservices/314.aspx>
- 6) エコドライブ普及推進協議会  
<http://www.ecodrive.jp/> (2008)
- 7) 井手ら : 自然風を利用した高速エコドライブ (風エコ) , 第48回大気環境学会講演要旨集, (2007) 398.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 井手, 中村, 池田, 梶山 : 高速乗用車の燃費に及ぼす自然風の影響 (風燃影響) , 久留米工大研報, 31 (2008) 7–14.
- 12) 井手, 中村, 東 : 高速車の燃費に及ぼす自然風の影響 (2 : Light Van) , 日本航空宇宙学会西部支部講演会 (2007) 189–192.
- 13) 竹内清秀 : 風の気候学, 風の気象学, 東京大学出版会, (1997), 144–154
- 14) EPA, Fuel Economy Labeling of Motor Vehicle Revisions to Improve Calculation of Fuel Economy Estimates, EPA420-R-06-017 (2006) 86.
- 15) Wolf-Heinrich Hucho et. al., *Aerodynamics of Road Vehicles*, Fourth Edition, SAE, Warrendale, Pa. (SAE, 1998) 422.
- 16) SAE : Wind Tunnel Test Procedure for Trucks and Buses, SAE J1252, (1981)
- 17) Buckley, F., Sekscienski, W. : Comparisons of Effectiveness of Commercially Available Devices for the Reduction of Aerodynamic Drag on Tractor-Trailers, SAE 750704, (1976)
- 18) 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.
- 19) EPA, Fuel Economy Labeling of Motor Vehicle Revisions to Improve Calculation of Fuel Economy Estimates, EPA420-R-06-017 (2006) 90.
- 20) 井手・堀内 : 温暖化と乗用車の高速エコドライブ (風エコ) , 第49回大気環境学会講演要旨集,

(2008) 553.

- 21) 井手・小林・堀内：省エネ道路による温暖化防止案の基礎研究，大気環境学会誌，43，2  
(2008) 92-99.