

## 走行中の自動車に及ぼす横風の影響に関する一考察(第1報)

A study on an automotive vehicle in crosswind, 1st Report

—空気力学的外力の単純化と横風評価曲線—

—Simplification of aerodynamic forces and calculation of characteristic curves—

小林 敏雄\*・鬼頭 幸三\*\*・佐賀 徹雄\*・蛭川 雅彦\*

Toshio KOBAYASHI, Kozo KITOH, Tetsuo SAGA and Masahiko HIRUKAWA

## 1. ま え が き

本州と四国を結ぶ重要な交通施設として本州四国連絡道路の本格的な調査が開始されてから20年以上の歳月が経過した。昭和50年度には1ルート3橋の建設方針が確認され、すでに大三島橋、大鳴門橋、因島大橋の3橋の工事が始まっている。この本四連絡道路は、その多くの部分が海峡部しかも海面上、数十メートルの高所にかかる吊橋から成っており、強風や濃霧などの厳しい気象現象を受けやすい状況にある。架橋予定地域の気象調査の結果からも、瀬戸内海における幾つかの海峡部では内陸部に比べて強風の発生頻度が極めて高いことが報告されている。鳴門大橋のかかる門崎の海拔110m地点での風の観測結果によれば風速20m/s以上の強風が、連続して30分以上出現する時間は年間103時間を超えている。したがって連絡道路上、特に海峡部吊橋上を通過する自動車は強風の影響を受ける機会が多く、その安全走行を確保する立場からも、また交通の常時性を維持する立場からも横風の強さと自動車の走行安全性との関係を示す基準を明確にする必要がある。

走行中の自動車が横風を受けたときの挙動を理論解析によってシミュレートするためには、自動車が遭遇する横風の性質の解明、横風による外乱空気力の評価および外乱空気力を受けたときの自動車の挙動を示す運動方程式の確立が必要である。もちろん、自動車は運転者である人間によって操作されるものであるから、最終的には運転者個々の特性をも考慮しなければならない。しかし、現在のところ人間の特性を含んだシミュレーションは極めて困難である。人間の特性を考慮しない場合について、横風による空気力学的外乱が加わったときの乗用車の走行安定性に関して幾つかの理論的研究が報告されている。それらは自動車の運動を重心の運動として捉えたもの<sup>1),2)</sup>および前輪・後輪の2軸の運動として捉えたもの<sup>3)</sup>に大別される。これらの理論計算結果は多くの場合、横風送風装置を利用した実車実験によって検証され

ている。これは一定風速をもつ送風帯の前を一定車速・舵固定で走行する自動車の運動特性値、すなわち走行軌跡、進路角、ヨー角速度、横方向加速度などに関して実測値と理論計算値とを比較するもので、乗用車の通常の走行範囲においては自動車の諸元や外乱空気力を正しく与えることができれば、両者は良く一致することが確かめられている。しかし、このうち外乱空気力を正しく与えることは現在のところ難しいことのように思われる。

本研究は自動車の車種、積載重量、前後軸重量配分、ヨー慣性モーメント係数、タイヤのコーナリングパワー、ステアリング系の剛性係数および車体の空力諸係数を因子として、横風の速度、自動車の速度と舵固定の自動車の挙動を示す特性値との関係を数値(計算機)シミュレーションによって系統的に明らかにし、横風下における制限速度設定のための一つの目安を与えることを目的としている。本報では従来乗用車の通常走行範囲において用いられている自動車挙動を表す運動方程式を基にして空気力学的外力を単純化することの妥当性を検討するとともに、横風評価の一つの目安として横変位置に着目し、横風の強さと自動車の車速との関係を表す横風評価曲線を求めている。

## 2. 運動方程式と空気力学的外力の単純化

舵固定でロールの影響を無視した場合の重心に関する運動方程式は次式で与えられる<sup>4)</sup>。(記号は表1および図1参照)

$$\frac{WV}{g} \frac{d\phi}{dt} = 2K_f \beta_f + 2K_r \beta_r + F_s \quad (1)$$

$$J_z \frac{d^2\theta}{dt^2} = 2K_f \beta_f l_f - 2K_r \beta_r l_r + M_y \quad (2)$$

$$\beta_f = \kappa \left( \alpha + \beta - \frac{l_f}{V} \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (3)$$

$$\beta_r = \beta + \frac{l_r}{V} \frac{d\theta}{dt} \quad (4)$$

$$\phi = \theta - \beta \quad (5)$$

この方程式中の空気力学的外力  $F_s$ 、および  $M_y$  は図2に

\* 東京大学生産技術研究所 第2部

\*\* 日本自動車研究所

表1 記号

$F_s$ 横風による横力	$l$ 軸間距離, $l_f+l_r$
$M_y$ 横風によるヨーイングモーメント	$K_0$ ステアリング系の合成ばね定数(キングピンまわり換算値)
$J_z$ ヨー慣性モーメント, $iWl_f l_r/g$	$K_1$ 前輪タイヤ(2輪あたり)のキングピンまわりのばね定数
$V$ 車速	$\kappa$ ステアリング系の剛性係数, $K_0/(K_0+K_1)$
$W$ 車両重量	$\alpha$ ハンドル角(通常 $\alpha=0$ に舵固定)
$g$ 重力加速度	$\beta$ 重心のすべり角
$i$ ヨー慣性モーメント係数	$\beta_f$ 前輪のすべり角
$K_f$ 前輪タイヤ(1輪あたり)のコーナリングパワ	$\beta_r$ 後輪のすべり角
$K_r$ 後輪タイヤ(1輪あたり)のコーナリングパワ	$\phi$ 重心の進路角
$l_f$ 重心と前軸中心との間の距離	$\theta$ 重心の姿勢角
$l_r$ 重心と後軸中心との間の距離	

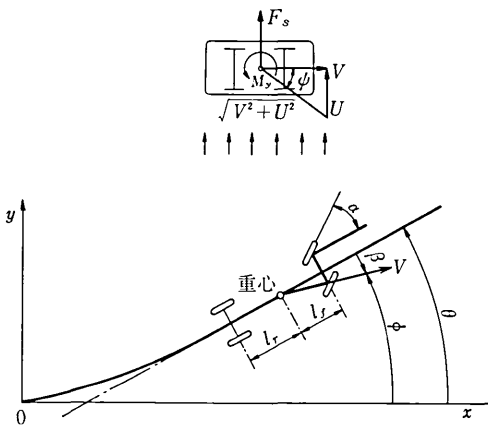


図1 座標系

破線で示すように<sup>2)</sup> 一般には時間的および空間的に変化する。しかし、ここでは問題を単純化するために次の仮定をおく。

(1) 自動車遭遇する横風は図2に示すように、ある区間において進行方向と直角な方向に等しい速度分布をもつ。(同一方向かつ等速度分布である)

(2) そのとき自動車を受ける横力およびヨーイングモーメントは図2実線に示すように、重心がその区間に存在する間一定値をとる。

(3) 横力およびヨーイングモーメントの値は静止時の値に等しい。すなわち

$$F_s = (1/2)\rho(U^2+V^2)SC_s(\psi) \quad (6)$$

$$M_y = (1/2)\rho(U^2+V^2)SIC_y(\psi) \quad (7)$$

ここに、 $\rho$ : 空気密度,  $U$ : 横風風速,  $S$ : 車体前面投影面積,  $C_s$ : 横力係数,  $C_y$ : ヨーイングモーメント係数,  $\psi = \tan^{-1}(U/V)$ : 偏揺角。

車の重心が横風帯(半無限長)に突入してから時間  $t$  後の横変位量  $y$  は概略、次式で与えられる。

$$y = V \int_0^t \phi dt \quad (8)$$

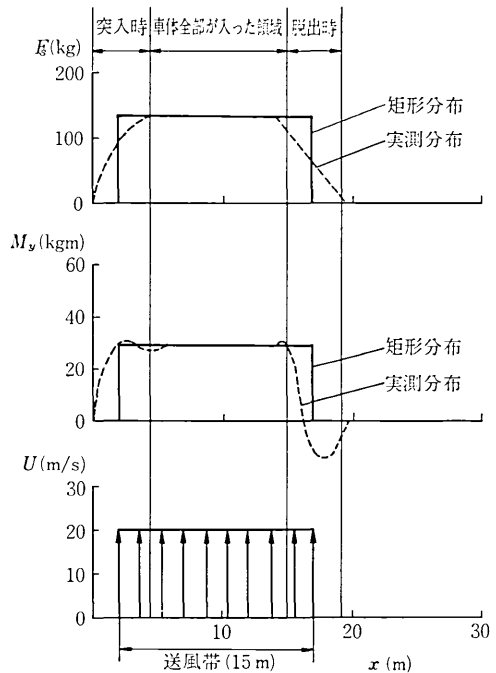


図2 空気力学的外力の単純化

空気力学的外力  $F_s, M_y$  に前記のような仮定をおくと  $y$  は解析的に解ける。式(1)~(5)および式(8)をラプラス変換し、初期値を0とおくと、

$$Y(s) = \frac{a_2 s^2 + b_2 s + c_2}{s^3 (a_1 s^2 + b_1 s + c_1)} V \quad (9)$$

ここに、 $s$ : ラプラス演算子,  $Y(s)$ :  $y(t)$  のラプラス変換値

$$a_1 = J_z W V / g$$

$$b_1 = 2W(\kappa K_f l_f^2 + K_r l_r^2) / g + 2J_z(\kappa K_f + K_r)$$

$$c_1 = 2WV(K_r l_r - \kappa K_f l_f) / g + 4\kappa K_f K_r (l_f + l_r)^2 / V$$

$$a_2 = J_z F_s$$

$$b_2 = 2F_s(\kappa K_f l_f^2 + K_r l_r^2) / V + 2M_y(K_r l_r - \kappa K_f l_f) / V$$

研究速報

$$c_2 = 2F_s(K_r l_r - \kappa K_f l_f) + 2M_y(\kappa K_f + K_r)$$

式(9)を逆ラプラス変換して  $y(t)$  を求めると、 $H = b_1^2$

$-4a_1 c_1$  の正負によって

$H > 0$  のとき

$$y(t) = (A/2)t^2 + Bt + C - [(C+D)e^{2t} + (C-D)e^{2t}]/2 \quad (10)$$

$H = 0$  のとき

$$y(t) = (A/2)t^2 + Bt + C - (C - Et)e^{2t} \quad (11)$$

$H < 0$  のとき

$$y(t) = (A/2)t^2 + Bt + C - [C \cos(Ft) - D \sin(Ft)]e^{2t} \quad (12)$$

ここに

$$A = Vc_2/c_1$$

$$B = V(b_2 c_1 - b_1 c_2)/c_1^2$$

$$C = V(a_2 c_1^2 - a_1 c_1 c_2 - b_1 b_2 c_1 + b_1^2 c_2)/c_1^3$$

$$D = V(3a_1 b_1 c_1 c_2 - 2a_1 b_2 c_1^2 - a_2 b_1 c_1^2 + b_1^2 b_2 c_1 - b_1^3 c_2)/(c_1^3 \sqrt{|H|})$$

$$E = V(3a_1 b_1 c_1 c_2 - 2a_1 b_2 c_1^2 - a_2 b_1 c_1^2 + b_1^2 b_2 c_1 - b_1^3 c_2)/(2a_1 c_1^3)$$

$$F = \sqrt{|H|}/(2a_1)$$

$$\lambda_1 = -b_1/(2a_1) - F$$

$$\lambda_2 = -b_1/(2a_1) + F$$

$$\lambda_3 = -b_1/(2a_1)$$

横風帯が半無限長でなく、図2のような矩形分布をしており、それに対応する  $F_s, M_y$  も矩形分布していると仮定した場合の横変位量  $y_*(t)$  は、 $H$  の正零負によってそれぞれ式(10), (11), (12)を用いることにより次式で与えられる。

$$y_*(t) = y(t) \quad 0 < t \leq l_w/V \quad (13)$$

$$y_*(t) = y(t) - y(t - l_w/V) \quad l_w/V < t \quad (14)$$

ここに、 $l_w$ : 横風帯の長さ

3. 計算結果の考察と横風評価曲線

本研究では  $F_s, M_y$  の分布として矩形分布を仮定している。しかし実際に自動車がある一定風速の横風帯に突入したときの  $F_s, M_y$  の分布は矩形ではない。この  $F_s, M_y$  の分布の差異が横変位量  $y_*(t)$  およびヨー角速度  $d\theta/dt$  に与える影響を図3に示す。図は表2に示す諸元をもつ1800 cc級の乗用車に対して、 $F_s, M_y$  が実測(非矩形分布)<sup>2)</sup>をもつ場合について Runge-Kutta 法を用いて数値計算した結果と矩形分布をもつ場合について解析解より計算した結果とを比較したものである。両者は比較的よく一致し、特に  $y_*(t)$  に与える  $F_s, M_y$  の分布の差の影響は大きくないことが確かめられる。

次に単純化された  $F_s, M_y$  の矩形分布を用いた  $y_*(t)$  の計算結果と舵固定の実車走行試験結果<sup>5)</sup>との比較を図4に示す。供試自動車は1800 cc級の乗用車で、その諸元を表2に示す。図より横変位量の計算値と実測値は乗用車の場合良く一致している。本研究のように横風風速と自動車車速との関係を広範囲の自動車にわたって調べるような場合には、空気力学的外力の単純化によって簡化された理論解を適用し得るものと考えられる。

横風の自動車に及ぼす影響を定量的に表現する方法と

表2 乗用車の諸元表 (JARIにおける実測値)

諸元	乗用車	諸元	乗用車
$S$ m <sup>2</sup>	1.92	$l$ m	2.69
$C_s$	1.96	$l_f$ m	1.314
$C_y$	0.243	$l_r$ m	1.376
$\psi$ deg	39	$W$ kg	1543
$J_z$ kgms <sup>2</sup>	265	$\kappa$	0.813
$K_f$ kg/rad	3840	$\rho$ kgs <sup>2</sup> /m <sup>4</sup>	0.122
$K_r$ kg/rad	3815		

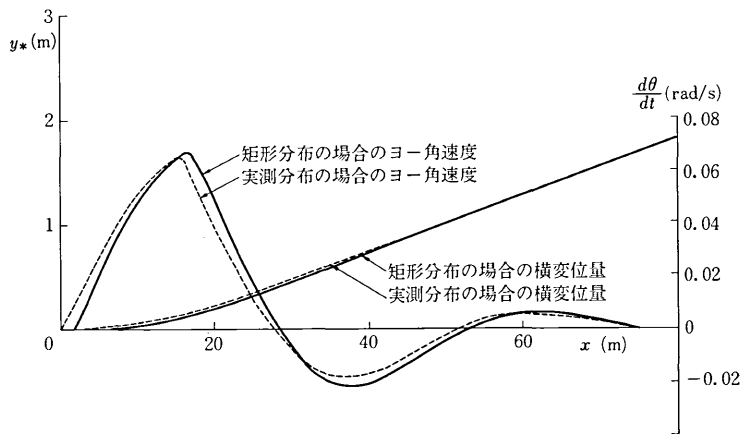


図3 空気力学的外力の分布が横変位量、ヨー角速度に及ぼす影響

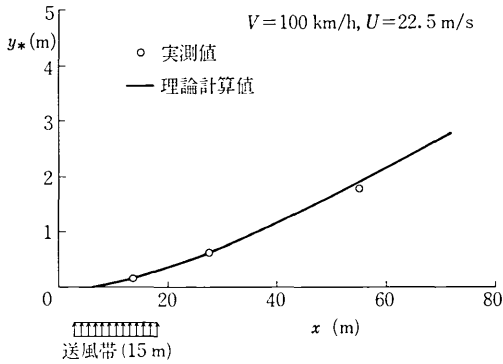


図4 横変位量の計算値(単純分布)と実測値の比較

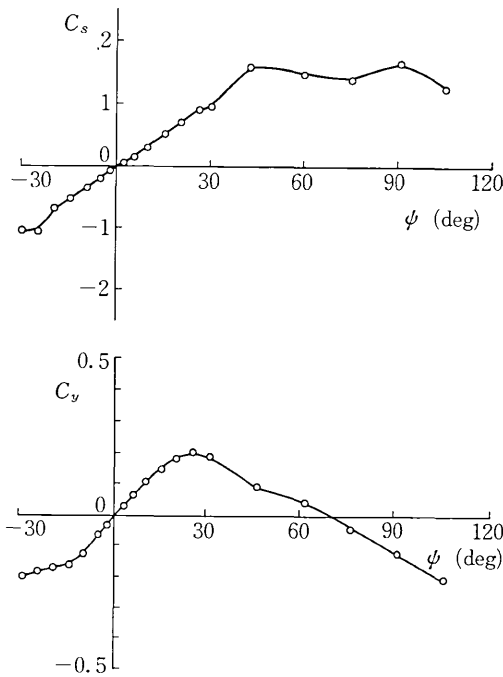


図5 横力係数とヨーイングモーメント係数

して幾つかの考え方が提案されているが<sup>6),7)</sup>、ここではたとえば実験安全車(ESV)計画で示されているように<sup>8)</sup>一定時間 $T$ 後の横変位量 $Y$ に着目する。空気力学的外力 $F_s, M_y$ の分布を単純化した場合には式(10)~(14)において $y_*, t$ の代わりに $Y, T$ を代入し整理することによつて

$$U = f(V, T, Y) \tag{15}$$

したがって $Y, T$ を決めると $U$ と $V$ の関係を示す曲線が得られる。これを横風評価曲線とよぶことにする。式(15)を用いて横風評価曲線を計算するためには $F_s, M_y$ の $\psi$ に対する変化をあらかじめ知る必要がある。前述の乗用車について、図5に示す $C_s(\psi), C_y(\psi)$ の静的データ<sup>9)</sup>

を用い、評価基準を $T = 2$ 秒、 $Y = 1$  mおよび $T = 1$ 秒、 $Y = 0.5$  mとした場合の横風評価曲線を計算した結果を図6に示す。この図は自動車横風送風帯に突入してたとえば2秒後の横変位量が1 m以下であるためには風速と車速との関係が評価曲線より左下に存在しなくてはならないことを示している。評価基準 $T, Y$ の適当な組合せについては、フィーリング試験や人間の操縦特性などと関係しており、今後の研究が必要である。

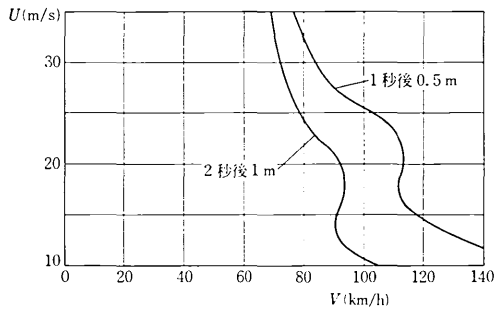


図6 横風評価曲線の1例

#### 4. ま と め

本報では走行中の乗用車が横風を受けたときの挙動について従来用いられている理論的取扱いを、空気力学的外力の分布を単純化することによって簡素化した。さらに、この単純化した空気力学的外力を用いて、同一の評価基準における車速と横風風速との関係を示す横風評価曲線が容易に求められることを示した。

なお、本研究は本州四国連絡橋公団・日本自動車研究所の横風に対する自動車の走行安全性に関する研究委員会の活動の一部として行われた。ご討論くださった委員および本四公団河島道路課長、実車走行試験結果をご提供くださった日本自動車研究所第5部の方々、ご意見とご教示を受けた本所石原智男教授に感謝します。

(1978年5月2日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) 井口・沢頭, 自動車技術, 21-9 (1967), 900
- 2) 高波ほか, 自動車技術会論文集, 6 (1973), 64
- 3) A. Watari, 東京大学生産技術研究所報告, 24-6 (1975)
- 4) 高波ほか, 自動車技術, 24-4 (1970), 375
- 5) 本四連絡橋公団, 横風に対する自動車の走行安全性に関する研究委員会報告 (未刊)
- 6) 土屋・岩瀬, 日本機械学会論文集, 39-324 (1973), 2372.
- 7) 杉本ほか, 自動車技術会論文集, 14 (1978), 46
- 8) 自動車工業会, 日本実験安全車仕様, (1971)
- 9) R. K. Heffley, SAE Paper 730235, (1973)