

横風突風を受ける自動車の 走行安定について

北大工学部 正員 加来 照俊
北大大学院 学生員 本多 満

1. まえがき

近年、自動車の各種性能の向上と高速道路の延伸によって、自動車の高速度化が進んできている。

走行中の自動車に作用する空気力学的な力、およびモーメントは、ほぼ速度の自乗に比例して大きくなるのでこれらが高速走行中の自動車にあよばす影響は、かなり大きなものとなる。

また、良く管理された高速道路を走行する自動車のかく乱、あるいは障害の原因としては、降雨、特に積雪寒冷地においては、降雪、氷結などの路面に起因するもの、そして空気力学的な力としての横風突風などが考えられる。

このため、自動車の高速度化が進むにつれて横風突風を受ける自動車の走行安定性の問題が交通安全の立場から重要な問題となってくるように思われる。

本論文は、このようなことに鑑み、高速走行中に横風突風を受けた場合の自動車の走行安定性について研究を行なったものである。

2. 運動の概要と理論

平坦路をハンドルを中正に保持して直線走行中、左から横風突風を受けることによって自動車の定常直線運動が右横方向に乱されたとする。かく乱を受ければドライバーは、直ちに適切な操舵を加えるのが常態であるが、仮に操舵を加えずにハンドルは中正に固持したままと考える。

重心は、元の進路より右へ移動し、車体の中心線は元の進路に対し $\Delta\theta$ （姿勢角、右回頭を正とする）だけ左へ向いていく。重心の速度 V は元の進路に対し $\Delta\phi$ （進路角、右向きを正とする）だけ右向きであるので、自動車は重心点において $\Delta\theta$ （横すべり角、右横すべりを正とする）の対地右横すべり運動をすることになる。

2-1 各車輪、および重心に働く力、モーメント（図1）

(1) 前輪のコーナリングアークスよりのモーメント

K を前輪のコーナリングパワーとすれば、前輪片方より生ずるコーナリングアークスは $-K\Delta\theta$ （右向きを正とする）。よって左右前輪より生ずるコーナリングアークスは $-2K\Delta\theta$ 故に、左右前輪のコーナリングアークスの重心まわりのモーメントは $-2K\Delta\theta l_f$ （右回頭を正とする）。ただし、 l_f は重心と前軸間の距離 また、前左輪のコーナリングアークスを C_L 、前右輪のコーナリングアークスを C_R とする。

(2) 後輪のコーナリングアークスよりのモーメント

K を後輪のコーナリングパワーとすれば、後輪片方より生ずるコーナリングアークスは $-K\Delta\theta$ 。よって左右後輪より生ずるコーナリングアークスは $-2K\Delta\theta$ 故に、左右後輪のコーナリングアークスの重心まわりのモーメントは $2K\Delta\theta l_r$ ただし、 l_r は重心と後軸間との距離 また、後左輪のコーナリングアークスを C_L 、後右輪のコーナリングアークスを C_R とする。

(3) 空気力学的横向力 C_y

重心点には、 V に直角な空気力学的横向力

$$C_y = dC_d / \Delta\theta \cdot \Delta\theta \cdot \frac{1}{2} \rho V^2$$

ただし、 C_d =横力係数 $\Delta\theta$ が30°程度までは $\Delta\theta$ に比例する

(4) 空気力学的モーメント M_a

進行速度を V m/s とすると、自動車には $\Delta\theta$ なる角度をもって斜めに気流が吹くから、空気力学的モーメント

$$M_a = dC_m / d\beta \cdot \Delta\beta \cdot \frac{\rho}{2} S V^2 l \quad \text{が重心まわりに作用する。}$$

ただし ρ = 空気の密度 = 1.25 kg/m^3 (標準状態)

S = 自動車の前面投影面積 m^2

l = 軸間距離 m

C_m = ヨーイング・モーメント係数 ($\Delta\beta$ が 10° 程度までは $\Delta\beta$ に比例する)

(5) 前輪のころがり抵抗, および後輪の駆動力より

生ずるモーメント M_{gr}

両前輪のころがり抵抗は、 $M_r W l_2 / l$ であるから、それによるモーメントは、 $-M_r W l_2 / l \cdot l_1 \Delta\theta$ である。ただし、 M_r = ころがり抵抗係数

W = 自動車の重量 (kg)

両後輪に作用する駆動力 T が、両前輪のころがり抵抗と車体の空気抵抗、 $C_r \rho / 2 \cdot S V^2$ が釣り合うと考えれば

$$T = M_r W l_2 / l + C_r \rho / 2 \cdot S V^2 \quad \text{ただし、} C_r \text{ = 空気抵抗係数}$$

この T による重心まわりのモーメント $-T l_2 \Delta\theta$ より

$$M_{gr} = -(M_r W l_2 / l \cdot l_1 \Delta\theta + T l_2 \Delta\theta) \quad \text{また、} l_1 + l_2 = l \text{ より}$$

$$M_{gr} = -(M_r W + C_r \rho / 2 \cdot S V^2) l_2 \Delta\theta \text{ となる。}$$

ただし、前輪駆動の場合は、同様を考えよ

$M_{gr} = (M_r W + C_r \rho / 2 \cdot S V^2) l_1 \Delta\theta$ なるモーメントが重心まわり右回頭に働く。本論文においては後輪駆動の自動車を仮定した

(6) 減衰力 C_d , および減衰モーメント M_d (図2)

減衰力, および減衰モーメントは $d\Delta\theta / dt$ に比例し、反対向きに働く。 V の速度で直線走行中に重心まわりに右回頭の角速度 $\omega = d\Delta\theta / dt$ を持つとすると、前輪は右向き線速度 $V_r = l_1 \omega = l_1 d\Delta\theta / dt$ をもつ。

よって、対地横すべり角 $\alpha_r = l_1 d\Delta\theta / dt / V$ をもつから、左向きのコーナリング・フォース $-2k_r l_1 d\Delta\theta / dt / V$ が働く。故に、重心回り左回頭に $-2k_r l_1^2 d\Delta\theta / dt / V$ のモーメントが生ずる。

後輪は左向き線速度 $V_l = l_2 \omega = l_2 d\Delta\theta / dt$ をもつ。従って、対地横すべり角 $\alpha_l = -l_2 d\Delta\theta / dt / V$ をもつから、右向きのコーナリング・フォース $2k_r l_2 d\Delta\theta / dt / V$ が働く。故に、重心まわり左回頭に $-2k_r l_2^2 d\Delta\theta / dt / V$ のモーメントが生ずる。以上より

$$C_d = -2(k_r l_1 - k_r l_2) / V \cdot d\Delta\theta / dt$$

$$M_d = -2(k_r l_1^2 + k_r l_2^2) / V \cdot d\Delta\theta / dt$$

(7) 外乱力 (右向き横向力 $F(t)$, 右回頭のモーメント $M(t)$)

外乱力としての横風突風を表式するに、例えば、正弦波、二次曲線、指数曲線などが考えられるが本論文においては指数曲線をもって横風突風を表式するものとする。(図3)

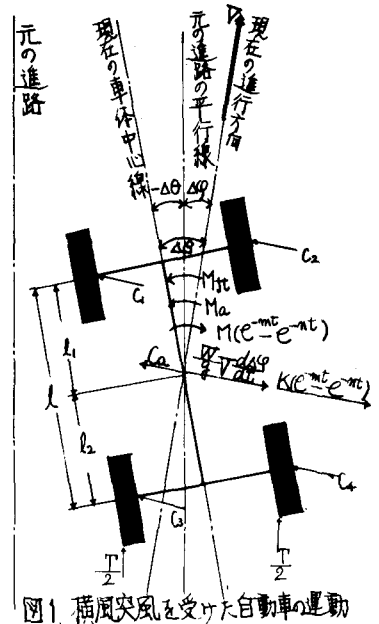


図1. 横風突風を受けた自動車の運動

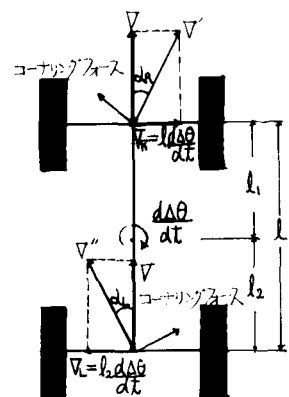


図2. 減衰力, 減衰モーメント

よって、外乱として次のように表す。

右向き横向力(□に直角) $F(t) = K(e^{mt} - e^{-nt})$

右回頭のモーメント $M(t) = M(e^{mt} - e^{-nt})$

$m = 0.5/s$, $n = 1.0/s$, $K = 500 \text{ kg}$, $M = 120 \text{ kg} \cdot \text{m}$ を代入すると, $t = 1.4$ 秒で最大値 $\text{Max } F(1.4) = 125 \text{ kg}$

$\text{Max } M(1.4) = 30 \text{ kg} \cdot \text{m}$

をとる。

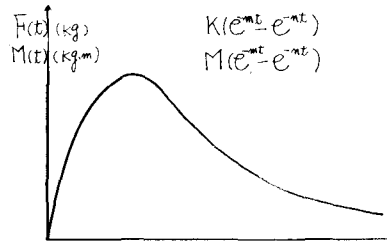


図3. 外乱力および外乱モーメントの時間的経過

2-2 運動方程式

重心の横運動方程式(遠心力と求心力のつりあい)

$$W/g \cdot V \cdot d\Delta\theta/dt = -(C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5) + (C_4 + F(t))$$

$$= -(2K_f \Delta\beta + 2K_r \Delta\beta + dC_g/d\beta \cdot g/2 \cdot S V^2) - 2(K_f l_1 - K_r l_2)/V \cdot d\theta/dt + K(e^{mt} - e^{-nt}) \quad (1)$$

ヨーイングの運動方程式(重心まわりのモーメントのつりあい)

$$J_z d^2\theta/dt^2 = (C_3 + C_4) l_2 - (C_1 + C_2) l_1 + M_0 + M_t + M_d + M(t)$$

$$= 2K_f \Delta\beta l_2 - 2K_r \Delta\beta l_1 + dC_m/d\beta \cdot g/2 \cdot S V^2 l - (M_f W + C_r \cdot g/2 \cdot S V^2) l_2 \Delta\beta - 2(K_f l_1^2 + K_r l_2^2)/V \cdot d\theta/dt + M(e^{mt} - e^{-nt}) \quad (2)$$

ただし, J_z = 重心を通る上下軸まわりの慣性モーメント ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

補助方程式

$$\Delta\theta = \Delta\varphi - \Delta\beta \quad (3)$$

未知変数として, $\Delta\varphi$, $\Delta\beta$ をとることにし, 上の3式より $\Delta\theta$ を消去すれば

$$a_{22} d\Delta\varphi/dt + b_{10} \Delta\beta - a_{10} d\Delta\beta/dt = K(e^{mt} - e^{-nt}) \quad (4)$$

$$a_{22} d^2\Delta\varphi/dt^2 - a_{21} d\Delta\varphi/dt - b_{22} d^2\Delta\beta/dt^2 + b_{21} d\Delta\beta/dt - b_{20} \Delta\beta = M(e^{mt} - e^{-nt}) \quad (5)$$

ただし

$a_{22} = W/g \cdot V + 2(K_f l_1 - K_r l_2)/V$ オー項はオー項に対して無視できるほど小さいので $a_{22} \approx W/g \cdot V = a_{11}$ とする。
 $b_{10} = \{2(K_f + K_r) + dC_g/d\beta \cdot g/2 \cdot S V^2\}$, $a_{10} = 2(K_f l_1 - K_r l_2)/V \approx 0$ であるので, (4)式のオー項は無視する

$$a_{22} = b_{22} = J_z, \quad a_{11} = b_{11} = -2(K_f l_1^2 + K_r l_2^2)/V$$

$$b_{20} = \{2(K_r l_2 - K_f l_1) + dC_m/d\beta \cdot g/2 \cdot S V^2 l - (M_f W + C_r \cdot g/2 \cdot S V^2) l_2\}$$

とすると (4)式は

$$a_{11} d\Delta\varphi/dt + b_{10} \Delta\beta = K(e^{mt} - e^{-nt}) \quad (6)$$

式(1), 式(2)は, 動的な安定を論ずる基礎方程式であるが, 近似式(6), および式(5)から $\Delta\beta$, $\Delta\varphi$ を求める

初期条件は, かく乱前の定常直線走行状態, すなわち $t=0$ において $\Delta\beta=0$, $\Delta\varphi=0$, $d\Delta\beta/dt=0$ である。

$$\Delta\beta = A_1 e^{\lambda_1 t} + A_2 e^{\lambda_2 t} + B_1 e^{mt} + B_2 e^{-nt}$$

$$\text{ここで, } \lambda_1, \lambda_2 \text{ は } \{- (a_{22} b_{10} - a_{11} b_{21}) \pm \sqrt{(a_{22} b_{10} - a_{11} b_{21})^2 - 4 a_{11} b_{22} (a_{10} b_{20} - a_{11} b_{10})}\} / 2 a_{11} b_{22}$$

$$B_1 = \begin{vmatrix} -a_{11} & K \\ m a_{22} + b_{21} & M \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_{11} & b_{10} \\ m a_{22} + a_{21} & m^2 b_{22} + m b_{21} + b_{20} \end{vmatrix}$$

$$B_2 = - \begin{vmatrix} -a_{11} & K \\ n a_{22} + a_{21} & M \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_{11} & b_{10} \\ n a_{22} + a_{21} & n^2 b_{22} + n b_{21} + b_{20} \end{vmatrix}$$

$$A_1 = - \{ B_1 (\lambda_2 + m) + B_2 (\lambda_2 + n) \} / (\lambda_2 - \lambda_1)$$

$$A_2 = \{ B_1 (\lambda_1 + m) + B_2 (\lambda_1 + n) \} / (\lambda_2 - \lambda_1)$$

$$\Delta y = \left\{ b_0 \{ A_1 (1 - e^{-\lambda_1 t}) / \lambda_1 + A_2 (1 - e^{-\lambda_2 t}) / \lambda_2 - B_1 (1 - e^{-\eta_1 t}) / \eta_1 - B_2 (1 - e^{-\eta_2 t}) / \eta_2 \} + K \{ (1 - e^{-\eta_1 t}) / \eta_1 - (1 - e^{-\eta_2 t}) / \eta_2 \} \right\} / a_{11}$$

以上より、自動車の重心の動く経路は

$$\text{走行距離 (m)} \quad x = \int_0^t V \cos \Delta \varphi dt \doteq Vt$$

$$\text{横変位量 (m)} \quad y = \int_0^t V \sin \Delta \varphi dt \doteq V \int_0^t \Delta \varphi dt = \left\{ b_0 \{ A_1 (t - e^{-\lambda_1 t} / \lambda_1) / \lambda_1 + A_2 (t - e^{-\lambda_2 t} / \lambda_2) / \lambda_2 - B_1 (t + e^{-\eta_1 t} / \eta_1) / \eta_1 - B_2 (t + e^{-\eta_2 t} / \eta_2) / \eta_2 \} + K \{ (t + e^{-\eta_1 t} / \eta_1) / \eta_1 - (t + e^{-\eta_2 t} / \eta_2) / \eta_2 \} \right\} / a_{11}$$

2-3 実車計算

実車諸元

$$W = 1000 \text{ kg}, \quad l = 2.7 \text{ m}, \quad l_1 = 1.54 \text{ m}, \quad l_2 = 1.16 \text{ m}$$

$$K_b = 22 \text{ kg/deg}, \quad K_r = 33 \text{ kg/deg}, \quad dC_y/d\beta = 0.04/\text{deg}$$

$$dC_m/d\beta = -0.03/\text{deg}, \quad M_r = 0.012, \quad C_r = 0.3$$

$$J_z = 150 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \quad S = 0.125 \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$$

$$S = 2.0 \text{ m}^2, \quad K = 500 \text{ kg}, \quad M = 120 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$m = 0.5/\text{s}, \quad n = 1.0/\text{s}$$

図4は、 $V = 10 \text{ m/s}$, 15 m/s , 20 m/s , 25 m/s , 30 m/s で走行している自動車が横風突風を受けた場合のその重心経路を示したものである。

図4において、注目すべき点は、横風突風が走行中に作用した場合、一定走行距離での横変位量は、速度の増加とともに減少しているが、一定時間後の横変位量は速度の増加とともに、むしろ増加する傾向がみられることである。

3 あとがき

以上、横風突風を受ける自動車の走行安定について述べた。

自動車は、飛行機や船舶とは異なり、横変位に対し許容される道路巾はせいぜい3.5 m程度であり、路外逸脱は直ちに事故につながったり、交通の流れに対し支障をきたす。

切り土、盛土区間の境界部、あるいはトンネルから出る際などに横風突風を受けることが多いが、このような危険な場所に対しては横風による自動車への影響を軽減させるような向んからの対策が必要であろう。

本論文は、理論解析のみを行なったものであるが、今後の方針としては、実験により理論解析との比較検討を行なっていくつもりである。

4 参考文献

- 1 基礎自動車工学 前、後期編 (近藤 政市 著)。
- 2 積雪寒冷地における車両運動と道路線形の研究 (48年度卒論 本多 満)

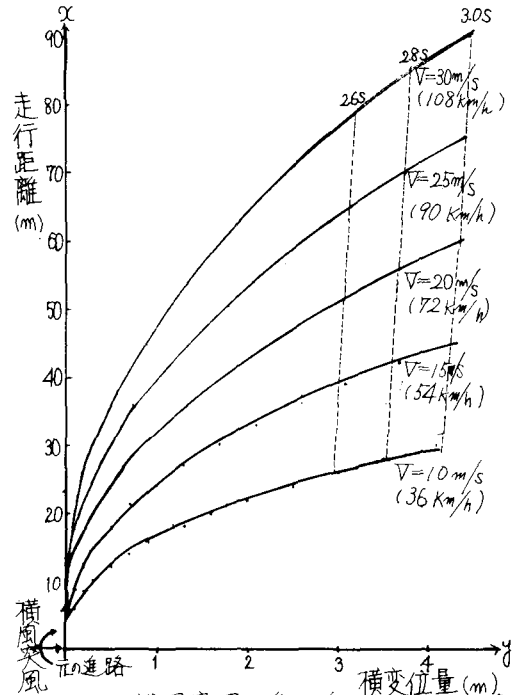


図4. 横風突風を受けた自動車の重心経路