

前輪駆動車の走行安定性について

林 守 雄

Directional stability of Front Wheel Drive Car

Morio HAYASHI

In this paper, the directional stability of the FWD car was analysed by using general equations of vehicle motion, in which the effect of tracting force, namely the difference in driving method between FWD and RWD, was considered.

The equations were also numerically calculated by using specification data in actual small passenger cars.

As the results of this investigation, the directional stability of the FWD car was ascertained to be better than that of the RWD car.

I ま え が き

平坦直線路を定常走行中の自動車に突風や横風が吹きつけたとき、運転者が操舵せずにそのまま走行を続けたとすれば、その後自動車はどんな運動をするであろうか。

筆者は以前に¹⁾「突風に対する自動車の応答」について報告したことがある。その時は主として突風の性質や自動車の応答などを周波数応答による解析によって調べたものである。今回は、最近の市販車によく見られるようになった前輪駆動車（FF車）の突風や横風に対する走行安定性について、ごく普通の運動方程式の一般解法によって、これを調べると同時に、実用の数値計算を行って、ほぼ同形の市販車（FF車とFR車）の外部かく乱（突風や連続して吹きつける横風）に対する走行安定性を比較して示すものである。

注 FF：前輪駆動、FWDとも書く

FR：後輪駆動、RWDとも書く

II 仮定と記号

II-1 仮定

- 車の諸元にくらべて車両運動の曲率半径は非常に大きい。
- 前後車輪の横すべり角 β_f 、 β_r は左右とも同じである。また、これらは車両重心点の横すべり角 β とともに極めて小さく、 $\cos\beta \doteq 1$ 、 $\sin\beta \doteq \beta$ とみなしうる。

- c. 車両の運動による荷重移動はない。
- d. 前後車輪のタイヤのコーナリングパワ k_f , k_r は各車輪荷重に対して直線的に変化する。
- e. 車両が遠心力や空気力学的外力を受けても車体のロールはない。

II-2 記号

- $W=mg$: 車両重量 kgf
- m : 車両質量 $kgf m^{-1} s$
- I : 垂直軸まわりの慣性モーメント $kgf m s^2$
- l : ホールベース m
- l_f : 車両重心点と前車軸との距離 m
- l_r : 車両重心点と後車軸との距離 m
- k_f : 前輪タイヤのコーナリングパワ $kgf deg^{-1}$
- k_r : 後輪タイヤのコーナリングパワ $kgf deg^{-1}$
- A : 車両の前面投影面積 m^2
- v : 車両の走行速度 ms^{-1}
- c_s : 車両の空力的横力係数
- c_n : 車両の空力的ヨーイングモーメント係数
- c_r : 車両の空気抵抗係数
- l_w : 車両の空力的中心点(AC)と重心点(P)との距離 m
- Y_w : 車両のAC点に働らく空気力 kgf
- l_N : 前後輪のコーナリングフォースの着力点(NSP)と重心点との距離 m
- β : 車両重心点の横すべり角 deg
- θ : 車両のヨー角(姿勢角) deg
- μ : 車輪のころがり抵抗係数
- ρ : 空気密度。標準状態で $0.125 kgf m^{-4} s^2$

III 運動方程式

自動車は水平面内で定常走行を続けているとき、前記の仮定に従って車両の運動を考えれば、剛体としての車両の横方向の並進運動と鉛直軸まわりの回転すなわちヨーイング運動とに注目すればよい。

図-1に示すように、車両の前後軸とx軸のなす角を θ 、重心点Pのx軸からの横変位を y とし、 $d\theta/dt$ を車両のヨーイング角速度とする。

運動方程式は車両の慣性力と外力の釣合、およびこ

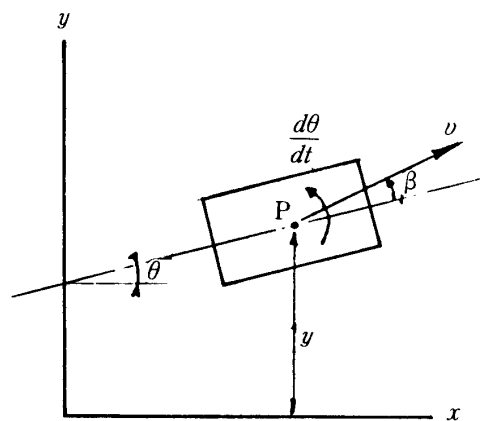


図-1

れらによるモーメントの釣合として記せばよい。外力およびそのモーメントとしては以下の3種類が考えられる。

まず第一に、前後輪タイヤに働くコーナリングフォース ($k_f\beta$, $k_r\beta$) およびこれらによるヨーイングモーメント ($k_r\ell_r - k_f\ell_f$) $\cdot\beta$ である。

次に、空気力学的横力 $c_s\rho/2\cdot Av^2$ およびこれによるヨーイングモーメント $c_n\rho/2\cdot Av^2\ell$ がある。係数 c_s , c_n はごく小さい値であるから一般にこれら外力は無視されることが多い。しかし今回は、風速10 m/s程度の突風や横風などの外乱を考えているので、車速 v m/s との相対合成風速として取上げている。相対合成風速 V を

$$V=(v^2+v_w^2)^{\frac{1}{2}}$$

として、これに対応する空気力学的横力 Y_w とヨーイングモーメント N_w とを下記のごとく設定する：

$$Y_w=c_s\frac{\rho}{2}A(v^2+v_w^2) \quad (1)$$

$$N_w=c_n\frac{\rho}{2}A(v^2+v_w^2)\ell=-\ell_w Y_w \quad (2)$$

ここに v_w は突風や横風の風速を示す。

係数 c_s , c_n は合成風速 V の入射角 (対気横すべり角 β_w) によって大きく変化することが知られており、このたびの計算に用いた値は表-1に示す通りである。

突風の自動車に対する働き方としては次のように考える。突風は一般的には1秒前後の持続時間を持ち、その拡がり範囲は風向方向で 風速 \times 持続時間、これに直角方向で 風速 \times 持続時間

表-1

| 風速 v_w m/s | 車速 v m/s | 合成風速 V m/s | 対気横すべり角 β_w deg | 横力係数 c_s | ヨーイングモーメント係数 | |
|-----------------|---------------|-----------------|--------------------------|---------------|--------------|------------|
| | | | | | c_n (FF) | c_n (FR) |
| 10 | 10 | 14.14 | 45 | 2.0 | 0.586 | 0.710 |
| | 15 | 18.03 | 33.7 | 1.5 | 0.440 | 0.532 |
| | 20 | 22.36 | 26.6 | 1.1 | 0.322 | 0.390 |
| | 25 | 26.93 | 21.8 | 1.0 | 0.293 | 0.355 |
| | 30 | 31.62 | 18.4 | 0.9 | 0.264 | 0.319 |
| | 35 | 36.40 | 16.0 | 0.75 | 0.220 | 0.266 |
| | 40 | 41.23 | 14.0 | 0.6 | 0.176 | 0.213 |
| 20 | 10 | 22.36 | 84.3 | 3.3 | 0.967 | 1.171 |
| | 15 | 25.00 | 53.1 | 2.4 | 0.703 | 0.852 |
| | 20 | 28.28 | 45 | 2.0 | 0.586 | 0.710 |
| | 25 | 32.02 | 38.7 | 1.8 | 0.528 | 0.639 |
| | 30 | 36.06 | 33.7 | 1.5 | 0.440 | 0.532 |
| | 35 | 40.31 | 30 | 1.35 | 0.396 | 0.479 |
| | 40 | 44.72 | 26.6 | 1.1 | 0.322 | 0.390 |

×1/3といわれている³⁾。従って、以上のことから全長4m前後の小型乗用車では自動車全体に一樣に突風が当たるとして差支えないと思われる。

最後に、外力としては車輪のころがり抵抗と車両の空気抵抗とに釣合って自動車を走らせている駆動力Tと、この駆動力と車輪のころがり抵抗とによるヨーイングモーメント M_{ft} を取上げればよい。

すなわち

$$T = \mu W + c_r \frac{\rho}{2} A v^2$$

$$M_{ft} = -\left(\mu W + c_r \frac{\rho}{2} A v^2\right) l_r \quad \dots\dots \text{FR 車}$$

$$= \left(\mu W + c_r \frac{\rho}{2} A v^2\right) l_f \quad \dots\dots \text{FF 車}$$

以上の関係を用いて運動方程式をつくれれば次の通りになる：

$$\left\{ m \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{2(k_f + k_r)}{v} \frac{dy}{dt} + \frac{2(k_f l_f - k_r l_r)}{v} \frac{d\theta}{dt} - 2(k_f + k_r)\theta = Y_w \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \frac{1}{v} \left\{ 2(k_f l_f - k_r l_r) + \left(\mu W + c_r \frac{\rho}{2} A v^2\right) l_r \right\} \frac{dy}{dt} + I \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{2(k_f l_f^2 + k_r l_r^2)}{v} \frac{d\theta}{dt} - 2(k_f l_f - k_r l_r)\theta = -l_w Y_w \right. \quad (4)$$

ただし、上式は後輪駆動車に対するものであり、前輪駆動車の場合には式(4)の{ }内が

$\left\{ 2(k_f l_f - k_r l_r) - \left(\mu W + c_r \frac{\rho}{2} A v^2\right) l_f \right\}$ のごとく変る。

一般の運動方程式では駆動力によるヨーイングモーメントの影響を考えないことが多いけれど、今回は前輪駆動と後輪駆動の対比を問題にしているので省略するわけにはいかないのである。

IV 方向安定性

図-2に示すように、平坦路を直進中の車が外部からかく乱を受けてその姿勢角(車両の前後軸が元の進路となす角)を変えたときにも車両の重心点Pは元の進路を直進し続けるものとする。

この姿勢角を零に復原するような方向にヨーイングモーメントが生ずれば、この車両の静的な方向安定性は正、この姿勢角変化をさらに増大するような方向にヨーイングモーメントが生ずれば、静的方向安定性は負であると判定する⁴⁾。

車両が姿勢角を β だけ変化しても、重心点Pが直進を続け

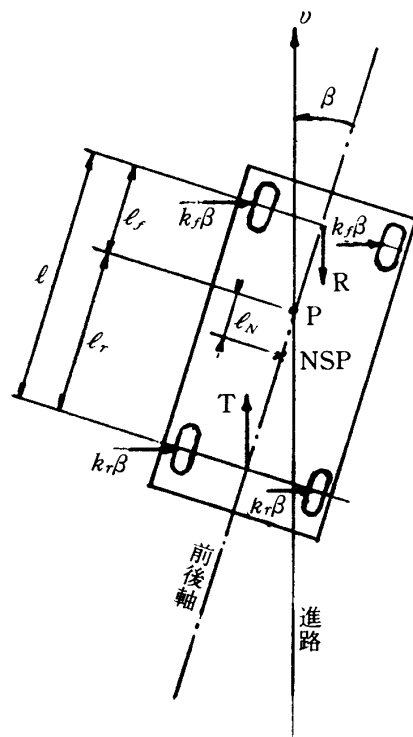


図-2

るとすれば、P点は横すべり角 β で運動することになるから、前後輪には1輪あたりそれぞれ $k_f\beta$ 、 $k_r\beta$ のコーナリングフォースが発生し、これらの合力 $2(k_f+k_r)\beta$ は点NSPに作用するものと考えられる。この着点NSPをニュートラルステアポイントと呼び、この点と重心点Pとの位置関係が車両のステア特性、ひいては方向安定性をみる一つの指標となっている。

PとNSPとの距離を l_N とし、次式のごとくSMを定義する：

$$SM = \frac{l_N}{l} = -\frac{k_f l_f - k_r l_r}{l(k_f + k_r)} \quad (5)$$

このSMをスタティックマージンといい、SMが正であればアンダステア(US)、負であればオーバステア(OS)、零であればニュートラルステア(NS)の特性をもつことが一般によく知られている。

NSPがPの後方にあるとき l_N は正と定めてあるので、コーナリングフォースの合力の着点重心より後方であれば、コーナリングフォースによるモーメントは姿勢角 β を零に復原する方向に作用する、すなわちSMが正であれば車両は方向安定性をもつと考えられ、逆に負であれば車両は方向不安定な状態にあるといえる。

次に、空気力によるヨーイングモーメントも大きな風速の横風を受けたり高速走行などの場合には、安定性に大きく影響する。この際特に空気力の着点、すなわち空力中心点(アエロダイナミックセンタ)ACの位置とNSP点との関係位置が問題になるといわれる。⁵⁾

一般の自動車では空力中心ACは重心点Pより前方にあり、車両全長の(1/3~1/4)程度前端より後方にあるとみられている。従って突風や横風のような外部かく乱を受けなくても、なんらかの原因で重心点の横すべり角を生ずると空力的ヨーイングモーメントによって頭部が流され、姿勢角の変位をさらに増加するようになる。つまり、方向不安定の要因になるとされている。一般の乗用車では車体の後部に特別に縦ひれなどを設けない限り、空力的ヨーイングモーメント N_w は負であるといえる。

実際の走行状態、特に大きな駆動力を発揮する様な条件の走行の場合には、前項でものべたように、自動車の駆動力などの前後方向力によるヨーイングモーメントも安定性には深い関係をもつことになる。

以上をまとめて方向安定性を表現すれば、復原モーメントMは

$$\begin{aligned} M &= -\left\{ 2(k_f l_f - k_r l_r) + c_n \frac{\rho}{2} A v^2 l + \left(\mu W + c_r \frac{\rho}{2} A v^2 \right) l_r \right\} \cdot \beta \cdots \cdots \text{FR車} \\ &= -\left\{ 2(k_f l_f - k_r l_r) + c_n \frac{\rho}{2} A v^2 l - \left(\mu W + c_r \frac{\rho}{2} A v^2 \right) l_f \right\} \cdot \beta \cdots \cdots \text{FF車} \end{aligned}$$

となる。両辺の微分をとり $dM/d\beta$ を求めれば、はじめの説明によって次のように方向安定性を表示することができる：

$$\begin{aligned} \frac{dM}{d\beta} &> 0 \quad \text{安定性は正 (安定)} \\ \frac{dM}{d\beta} &< 0 \quad \text{安定性は負 (不安定)} \end{aligned}$$

FF車, FR車の $dM/d\beta$ を比較すれば

$$\left(\frac{dM}{d\beta}\right)_{FF} > \left(\frac{dM}{d\beta}\right)_{FR}$$

が常に成立し, FF車がFR車よりも方向安定性が良いことがわかる。⁶⁾

V 横風および突風によるかく乱

自動車がステップ状の横風を受けたり, 短時間突風に吹かれたりした時の運動を考え図-3のごとき $x-y$ 座標でこれを示すことにする。

横風の場合は, ある瞬間からステップ状の強さ Y_{w_0} の横風を連続的に車体を受けて, 重心点は姿勢角 θ を保ちつつ, 横すべり角 β で速度 v をもって進行する。

突風の場合は, 短時間 Δt の間強さ Y_{w_0} のインパルス入力を受けて, 同様な進行をするものとする。(図-4参照)

運動方程式はさきに示した式(3), (4)を用いるが, 簡単化のため次の略符号を採用する:

$$\left. \begin{aligned} a_{12} &= \frac{2}{v}(k_f + k_r) \\ a_{21} &= \frac{1}{v} \left\{ 2(k_f l_f - k_r l_r) + \left(\mu W + c_r \frac{\rho}{2} A v^2 \right) l_r \right\} \cdots \cdots \text{FR車} \\ a_{21} &= \frac{1}{v} \left\{ 2(k_f l_f - k_r l_r) - \left(\mu W + c_r \frac{\rho}{2} A v^2 \right) l_f \right\} \cdots \cdots \text{FF車} \\ b_{11} &= \frac{2}{v}(k_f l_f - k_r l_r), \quad b_{12} = 2(k_f + k_r) \\ b_{21} &= \frac{2}{v}(k_f l_f^2 + k_r l_r^2), \quad b_{22} = 2(k_f l_f - k_r l_r) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

これによって方程式は次のように書ける:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + a_{12} \frac{dy}{dt} + b_{11} \frac{d\theta}{dt} - b_{12} \theta = Y_w \quad (7)$$

$$a_{21} \frac{dy}{dt} + I \frac{d^2 \theta}{dt^2} + b_{21} \frac{d\theta}{dt} - b_{22} \theta = -l_w Y_w \quad (8)$$

ここで式(7), (8)にラプラス変換を行って式を書直せば, ステップ状の横風に対して:

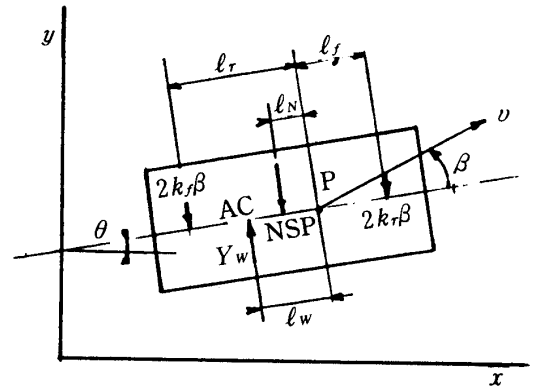


図-3

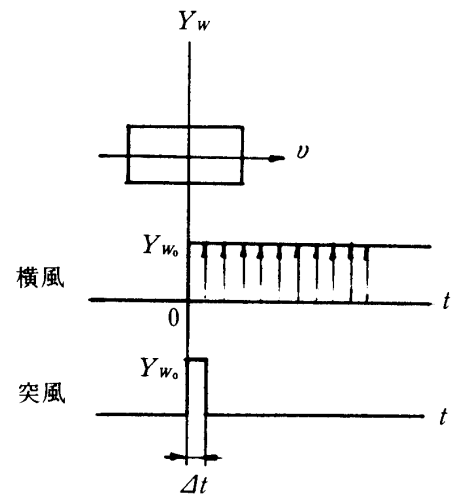


図-4

$$\begin{bmatrix} m s^2 + a_{12} s & b_{11} s - b_{12} \\ a_{21} s & I s^2 + b_{21} s - b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(s) \\ \theta(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Y_{w_0}}{s} \\ -\frac{\ell_w Y_{w_0}}{s} \end{bmatrix} \quad (9)$$

となる。ここに、ステップ状横風 Y_w およびこれによるヨーイングモーメント $-\ell_w Y_w$ のラプラス変換は Y_{w_0}/s , $-\ell_w Y_{w_0}/s$ である。

短時間 Δt の突風に対して：

$$\begin{bmatrix} m s^2 + a_{12} s & b_{11} s - b_{12} \\ a_{21} s & I s^2 + b_{21} s - b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(s) \\ \theta(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{w_0} \cdot \Delta t \\ -\ell_w Y_{w_0} \cdot \Delta t \end{bmatrix} \quad (10)$$

となる。ここで、 $Y_{w_0} \Delta t$, $-\ell_w Y_{w_0} \Delta t$ は短時間 Δt だけ車面に働く突風力 Y_w およびこれによるヨーイングモーメントのラプラス変換である。

式(9), (10)よりそれぞれのケースについて、 $y(s)$, $\theta(s)$ を求めれば下記のようになる：

横風の場合

$$y(s) = \frac{Y_{w_0}}{mI} \frac{\{I s^2 + (b_{21} + \ell_w b_{11}) s - (b_{22} + \ell_w b_{12})\}}{s^2 (s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3)} \quad (11)$$

$$\theta(s) = -\frac{Y_{w_0}}{mI} \frac{\{\ell_w (m s + a_{12}) - a_{21}\}}{s (s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3)} = -\frac{Y_{w_0}}{mI} \frac{\{m \ell_w s + (\ell_w a_{12} - a_{21})\}}{s (s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3)} \quad (12)$$

突風の場合

$$y(s) = \frac{Y_{w_0} \Delta t}{mI} \frac{\{I s^2 + (b_{21} + \ell_w b_{11}) s - (b_{22} + \ell_w b_{12})\}}{s (s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3)} \quad (13)$$

$$\theta(s) = -\frac{Y_{w_0} \Delta t}{mI} \frac{\{m \ell_w s + (\ell_w a_{12} - a_{21})\}}{(s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3)} \quad (14)$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{2}{mIv} \{m(k_f \ell_f^2 + k_r \ell_r^2) + I(k_f + k_r)\} \\ a_2 &= \frac{4k_f k_r \ell^2}{mIv^2} - \frac{2}{I} (k_f \ell_f - k_r \ell_r) - \frac{2}{mIv^2} (k_f \ell_f - k_r \ell_r) \left(\mu W + c_r \frac{\rho}{2} A v^2 \right) \ell_f \cdots \cdots \text{FR} \\ &= \frac{4k_f k_r \ell^2}{mIv^2} - \frac{2}{I} (k_f \ell_f - k_r \ell_r) + \frac{2}{mIv^2} (k_f \ell_f - k_r \ell_r) \left(\mu W + c_r \frac{\rho}{2} A v^2 \right) \ell_f \cdots \cdots \text{FF} \\ a_3 &= \frac{2}{mIv} (k_f + k_r) \left(\mu W + c_r \frac{\rho}{2} A v^2 \right) \ell_r \cdots \cdots \text{FR} \\ &= -\frac{2}{mIv} (k_f + k_r) \left(\mu W + c_r \frac{\rho}{2} A v^2 \right) \ell_f \cdots \cdots \text{FF} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

である。

以上の式(11)～(14)をすこし整理し書き直すと

$$y(s) = \frac{Y_{w_0}}{m} \frac{s^2 + Bs + C}{s^2 (s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3)} \quad (11)'$$

$$\theta(s) = -\frac{\ell_w Y_{w_0}}{I} \frac{S + D}{s (s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3)} \quad (12)'$$

および

$$y(s) = \frac{Y_{w_0} \Delta t}{m} \cdot \frac{s^2 + Bs + C}{s(s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3)} \quad (13)'$$

$$\theta(s) = -\frac{\ell_w Y_{w_0} \Delta t}{I} \cdot \frac{S + D}{(s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3)} \quad (14)'$$

をうる。ただし

$$\left. \begin{aligned} B &= \frac{2}{Iv} \left\{ (k_f \ell_f^2 + k_r \ell_r^2) - \ell_N \ell_w (k_f + k_r) \right\} \\ C &= -\frac{2}{I} (\ell_w - \ell_N) (k_f + k_r) \\ D &= \frac{2(\ell_w - \ell_N)(k_f + k_r)}{m \ell_w v} + \frac{\left(\mu W + c_r \frac{\rho}{2} \cdot Av^2 \right) \ell_r}{m \ell_w v} \dots\dots \text{FR} \\ &= \frac{2(\ell_w - \ell_N)(k_f + k_r)}{m \ell_w v} - \frac{\left(\mu W + c_r \frac{\rho}{2} Av^2 \right) \ell_f}{m \ell_w v} \dots\dots \text{FF} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

である。

式(11)～(14)の分母にある $(s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3)$ を利用し、これを運動系の特性方程式とし、これを解くことによって車両の運動の安定条件を検討することができる。

$$s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3 = 0$$

なる車両運動の特性方程式について、そのすべての根の実数部が負になれば、この運動系は安定である。

また、この3次式を直接解かなくても条件として、フルビッツあるいはラウスの判定式によって

- i) 係数 a_1, a_2, a_3 がすべて正であること
- ii) 次の行列式が正であること

$$D = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ 1 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_3 > 0$$

が満たされれば、この運動系は安定といえる。これについては車両条件や走行速度に対して具体的な検討が必要である。

VI 数値計算による検討

これまでの解析的な調べでは、外部から横風や突風などの外乱を受けた場合、FF車とFR車で明確な優劣を表わすものはなにも見出せなかった。

そこで、外部からのかく乱条件を具体的に導入し、これを受けて走行する車両にも実際に市販されている型式について諸元を与えて数値計算を行うことにした。

計算結果は外乱を受けた瞬間からの経過時間に対して車両重心点の横変位と車両の姿勢角とで与えられるので、これらを総合的に見れば車両運動の特性を判断することが可能となる。

さきに説明したように、方向安定性に及ぼす影響の大きなヨーイングモーメントは空気力によるものであるが、特に注目すべき要素としては空気力の着点 AC の位置（重心点 P からの距離

l_w) である。

本論文の狙いである前輪駆動車の走行安定性を明確に見定めるため、計算の対象としてほぼ同形の後輪駆動車も取上げてある。しかし、実際の車両条件では空気力によるヨーイングモーメントの影響が大きいので、前・後輪駆動方法の差がはっきり浮び上がってこないおそれもある。

そこで、実車そのままの車両条件と別に、車体後部に縦びれなどを設けて空気力の着力点を極力後方へ移動させた車両条件を仮定して計算を行ってある。つまり、実際の値の数分の一に相当する $l_w = -0.100m$ を想定してある。

数値計算法としては式(3)、(4)に対してルンゲクッタギル法を使用した⁷⁾。

横風に対しては基本運動方程式(3)、(4)をそのまま用いた。

突風に対しては、 $\Delta t = 1^s$ ととり、横風に対して行った計算結果の $t = 1^s$ に対する横変位 y と θ とを、突風の働く瞬間の初期条件として設定してある。これは横風でも突風でも1秒後の状態は同一であろうと考えたからである。

運動方程式の方は式(3)、(4)の右辺を零として使用すればよい。すなわち

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{2(k_f + k_r)}{v} \frac{dy}{dt} + \frac{2(k_f l_f - k_r l_r)}{v} \frac{d\theta}{dt} - 2(k_f + k_r)\theta = 0 \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{1}{v} \left\{ 2(k_f l_f - k_r l_r) + \left(\mu W + C_r \frac{\rho}{2} A v^2 \right) l_f \right\} \frac{dy}{dt} + I \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{2(k_f l_f^2 + k_r l_r^2)}{v} \frac{d\theta}{dt} \\ & - 2(k_f l_f - k_r l_r) \theta = 0 \quad \dots \dots \text{FR} \\ & \frac{1}{v} \left\{ 2(k_f l_f - k_r l_r) - \left(\mu W + C_r \frac{\rho}{2} A v^2 \right) l_f \right\} \frac{dy}{dt} + I \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{2(k_f l_f^2 + k_r l_r^2)}{v} \frac{d\theta}{dt} \\ & - 2(k_f l_f - k_r l_r) \theta = 0 \quad \dots \dots \text{FF} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

である。

なお特別な場合として、空力中心 AC が重心点 P と一致したときには $l_w = 0$ であり、式(3)と(19)とを使えばよい。また、ころがり抵抗力や駆動力などの前後方向力を無視する場合には、両車種とも $\left(\mu W + C_r \frac{\rho}{2} A v^2 \right)$ が零となり、式(4)は

$$\begin{aligned} & \frac{2}{v} (k_f l_f - k_r l_r) \frac{dy}{dt} + I \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{2(k_f l_f^2 + k_r l_r^2)}{v} \frac{d\theta}{dt} - 2(k_f l_f - k_r l_r) \theta \\ & = -l_w Y_w \end{aligned} \quad (20)$$

と車種に関係なく同一となる。

数値計算を電算機によって行う場合、筆者のやり方は次の通りである。

y と θ の2変数連立方程式を、まず $y = y_1$, $\theta = z_1$ のごとく置いて2階の連立微分方程式を1階の4つの連立微分方程式に変形することから始める。すなわち

$$\begin{aligned} y = y_1, \quad \frac{dy}{dt} = \frac{dy_1}{dt} = y_2, \quad \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{dy_2}{dt} = y_3 \\ \theta = z_1, \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{dz_1}{dt} = z_2, \quad \frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{dz_2}{dt} = z_3 \end{aligned}$$

とにおいて

表-2

| 諸元 | トヨタカムリ F F (1982年) | トヨタカムリ F R (1981年) |
|--|---------------------------|--------------------------|
| L × B × H | 4400 × 1690 × 1395 | 4380 × 1645 × 1395 |
| A | 1.77 | 1.72 |
| ℓ | 2,600 | 2,500 |
| ℓ _f | 1,144 | 1,273 |
| ℓ _r | 1,456 | 1,227 |
| W | 1,295 | 1,335 |
| W _f | 725 | 655 |
| W _r | 570 | 680 |
| m | 132 | 136 |
| I | 190 | 196 |
| μ | 0.015 | 0.015 |
| c _r | 0.3 | 0.3 |
| タイヤ | 165 SR 13 | 165 SR 14 |
| k _f | 64.5 | 58.3 |
| k _r | 50.7 | 60.6 |
| (k _f ℓ _f - k _r ℓ _r) | -0.0312 | -0.1403 |
| SM = - $\frac{(k_f \ell_f - k_r \ell_r)}{\ell(k_f + k_r)}$ | 1.0417 × 10 ⁻⁴ | 4.720 × 10 ⁻⁴ |
| ℓ _N = SM · ℓ | 0.2708 | 1.18 |
| ℓ _w | -762 | -887 |
| ステア特性 | ほぼ NS | ごく軽い US |

註 タイヤのコーナリング係数 f = コーナリングパワ/荷重を0.178と取る⁸⁾

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dy_2}{dt} &= -\frac{a_{12}}{m} y_2 - \frac{b_{11}}{m} z_2 + \frac{b_{12}}{m} z_1 + \frac{Y_w}{m} \\
 \frac{dy_1}{dt} &= y_2 \\
 \frac{dz_2}{dt} &= -\frac{b_{21}}{I} z_2 + \frac{b_{22}}{I} z_1 + \frac{a_{21}}{I} y_2 - \frac{\ell_w Y_w}{I} \\
 \frac{dz_1}{dt} &= z_2
 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

を解くことになる。

計算に用いた資料は表-2の通りである。

計算結果の一部を表3~7および図5~9に示す。

表3~4はステップ状の連続する横風による車両の横変位と姿勢角の変化を示すが、それぞれ ℓ_w の変化によって結果がかなり違ってくる。

表5~6はインパルス状の突風によるものである。やはり ℓ_w の変化によって結果が大きく変

表-3 連続する横風

風速 $v_w = 10\text{m/s}$

| 車速 $v\text{m/s}$ | 時間 t^s | FF車 $\ell_w = -0.762^m$ | | FR車 $\ell_w = -0.887^m$ | |
|---------------------|-------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|
| | | 横変位 y^m | 角変位 θ^{rad} | 横変位 y^m | 角変位 θ^{rad} |
| 10 | 1 | 0.16733 | 0.08093 | 0.15980 | 0.09059 |
| | 2 | 0.76198 | 0.30042 | 0.75041 | 0.34443 |
| | 3 | 2.06556 | 0.62610 | 2.11069 | 0.74073 |
| | 4 | 4.48411 | 1.02711 | 4.75449 | 1.26781 |
| | 5 | 8.47859 | 1.47277 | 9.32409 | 1.92346 |
| | 6 | 14.50683 | 1.93220 | 16.56630 | 2.71487 |
| | 7 | 22.97471 | 2.37479 | 27.32734 | 3.65827 |
| | 8 | 34.19557 | 2.77103 | 42.56311 | 4.77870 |
| | 9 | 48.35792 | 3.09370 | 63.36202 | 6.11010 |
| | 10 | 65.50213 | 3.31917 | 90.97835 | 7.69561 |
| 20 | 1 | 0.24766 | 0.12050 | 0.23642 | 0.13401 |
| | 2 | 1.16348 | 0.46270 | 1.14410 | 0.52339 |
| | 3 | 3.26196 | 0.99671 | 3.31979 | 1.15374 |
| | 4 | 7.33436 | 1.68928 | 7.71484 | 2.01927 |
| | 5 | 14.36960 | 2.50184 | 15.59629 | 3.12527 |
| | 6 | 25.47314 | 3.38962 | 28.52968 | 4.49007 |
| | 7 | 41.78226 | 4.30152 | 48.38525 | 6.14682 |
| | 8 | 64.37806 | 5.18089 | 77.36831 | 8.14513 |
| | 9 | 94.19561 | 5.96703 | 118.07476 | 10.55311 |
| | 10 | 131.93495 | 6.59735 | 173.57304 | 13.45978 |
| 30 | 1 | 0.39146 | 0.19072 | 0.37372 | 0.21197 |
| | 2 | 1.85851 | 0.74014 | 1.82753 | 0.83632 |
| | 3 | 5.26966 | 1.61067 | 5.36252 | 1.86205 |
| | 4 | 11.98734 | 2.75625 | 12.60661 | 3.29133 |
| | 5 | 23.76139 | 4.11870 | 25.78370 | 5.14468 |
| | 6 | 42.60803 | 5.62541 | 47.71554 | 7.46572 |
| | 7 | 70.67148 | 7.18839 | 81.86283 | 10.32573 |
| | 8 | 110.06743 | 8.70480 | 132.41108 | 13.82858 |
| | 9 | 162.71050 | 10.05907 | 204.40704 | 18.11638 |
| | 10 | 230.12999 | 11.12659 | 303.95262 | 23.37634 |

表-4 連続する横風

風速 $v_w = 10\text{m/s}$

| 車速 $v^{m/s}$ | 時間 t^s | FF車 $\ell_w = -0.100^m$ | | FR車 $\ell_w = -0.100^m$ | |
|-----------------|-------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|
| | | 横変位 y^m | 角変位 θ^{rad} | 横変位 y^m | 角変位 θ^{rad} |
| 10 | 1 | 0.15709 | 0.01002 | 0.14829 | 0.01083 |
| | 2 | 0.60993 | 0.03507 | 0.57881 | 0.04332 |
| | 3 | 1.35068 | 0.06878 | 1.29888 | 0.09741 |
| | 4 | 2.38665 | 0.10595 | 2.24936 | 0.17333 |
| | 5 | 3.72952 | 0.14219 | 3.79964 | 0.27200 |
| | 6 | 5.38759 | 0.17377 | 5.74467 | 0.39522 |
| | 7 | 7.36041 | 0.19762 | 8.30371 | 0.54588 |
| | 8 | 9.63519 | 0.21130 | 11.62113 | 0.72804 |
| | 9 | 12.18498 | 0.21306 | 15.86899 | 0.94711 |
| | 10 | 14.96812 | 0.20193 | 21.25128 | 1.21000 |
| 20 | 1 | 0.23239 | 0.01516 | 0.21927 | 0.01575 |
| | 2 | 0.92830 | 0.05577 | 0.87932 | 0.06395 |
| | 3 | 2.11615 | 0.11492 | 2.02456 | 0.14607 |
| | 4 | 3.85296 | 0.18593 | 3.75259 | 0.26413 |
| | 5 | 6.21071 | 0.26217 | 6.21318 | 0.42111 |
| | 6 | 9.26400 | 0.33693 | 9.60895 | 0.62139 |
| | 7 | 13.07865 | 0.40347 | 14.19839 | 0.87116 |
| | 8 | 17.70117 | 0.45518 | 20.30162 | 1.17881 |
| | 9 | 23.14936 | 0.48579 | 28.30932 | 1.55534 |
| | 10 | 29.40429 | 0.48963 | 38.69544 | 2.01490 |
| 30 | 1 | 0.36727 | 0.02398 | 0.34655 | 0.02490 |
| | 2 | 1.48114 | 0.08910 | 1.40301 | 0.10216 |
| | 3 | 3.40875 | 0.18521 | 3.26142 | 0.23586 |
| | 4 | 6.26590 | 0.30193 | 6.10468 | 0.43111 |
| | 5 | 10.19665 | 0.42831 | 10.21015 | 0.69490 |
| | 6 | 15.35307 | 0.55264 | 15.95640 | 1.03693 |
| | 7 | 21.87499 | 0.66257 | 23.83399 | 1.47048 |
| | 8 | 29.86980 | 0.74537 | 34.46198 | 2.01337 |
| | 9 | 39.39269 | 0.78834 | 48.61099 | 2.68900 |
| | 10 | 50.42818 | 0.77943 | 67.23470 | 3.52767 |

表-5 短時間の突風

風速 $v_w = 10m/s$

| 車速 $v^{m/s}$ | 時間 t^s | FF車 $\ell_w = -0.762^m$ | | FR車 $\ell_w = -0.887^m$ | |
|-----------------|-------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|
| | | 横変位 y^m | 角変位 θ^{rad} | 横変位 y^m | 角変位 θ^{rad} |
| 10 | 1 | 0.16733 | 0.08093 | 0.15980 | 0.09059 |
| | 2 | 0.59463 | 0.21947 | 0.59060 | 0.25383 |
| | 3 | 1.30353 | 0.32566 | 1.36025 | 0.39629 |
| | 4 | 2.41845 | 0.40099 | 2.64376 | 0.52706 |
| | 5 | 3.99436 | 0.44563 | 4.56954 | 0.65564 |
| | 6 | 6.02799 | 0.45941 | 7.24211 | 0.79140 |
| | 7 | 8.46754 | 0.44257 | 10.76089 | 0.94338 |
| | 8 | 11.22040 | 0.39622 | 15.23557 | 1.12042 |
| | 9 | 14.16178 | 0.32265 | 20.79864 | 1.33137 |
| | 10 | 17.14354 | 0.22546 | 27.61599 | 1.58548 |
| 20 | 1 | 0.24766 | 0.12050 | 0.23642 | 0.13401 |
| | 2 | 0.91580 | 0.34219 | 0.90766 | 0.38937 |
| | 3 | 2.09845 | 0.53400 | 2.17565 | 0.63034 |
| | 4 | 4.07232 | 0.69255 | 4.39498 | 0.86551 |
| | 5 | 7.03511 | 0.81254 | 7.88130 | 1.10597 |
| | 6 | 11.10334 | 0.88776 | 12.93315 | 1.36477 |
| | 7 | 16.30883 | 0.91188 | 19.85519 | 1.65670 |
| | 8 | 22.59540 | 0.87936 | 28.98248 | 1.99826 |
| | 9 | 29.81703 | 0.78612 | 40.70564 | 2.40793 |
| | 10 | 37.73868 | 0.63030 | 55.49718 | 2.90661 |
| 30 | 1 | 0.39146 | 0.19072 | 0.37372 | 0.21197 |
| | 2 | 1.46703 | 0.54942 | 1.45379 | 0.62433 |
| | 3 | 3.41110 | 0.87051 | 3.53491 | 1.02570 |
| | 4 | 6.71761 | 1.14556 | 7.24395 | 1.42924 |
| | 5 | 11.77391 | 1.36243 | 13.17681 | 1.85330 |
| | 6 | 18.84643 | 1.50669 | 21.93136 | 2.32098 |
| | 7 | 28.06313 | 1.56295 | 34.14653 | 2.85994 |
| | 8 | 39.39552 | 1.51639 | 50.54711 | 3.50277 |
| | 9 | 52.64249 | 1.35426 | 71.99433 | 4.28769 |
| | 10 | 67.41876 | 1.06750 | 99.54332 | 5.25983 |

表-6 短時間の突風

風速 $v_w = 10\text{m/s}$

| 車速 $v^{m/s}$ | 時間 t^s | FF車 $\ell_w = -0.100^m$ | | FR車 $\ell_w = -0.100^m$ | |
|-----------------|-------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|
| | | 横変位 y^m | 角変位 θ^{rad} | 横変位 y^m | 角変位 θ^{rad} |
| 10 | 1 | 0.15709 | 0.01002 | 0.14829 | 0.01083 |
| | 2 | 0.45281 | 0.02503 | 0.43050 | 0.03248 |
| | 3 | 0.74070 | 0.03369 | 0.72002 | 0.05406 |
| | 4 | 1.03588 | 0.03714 | 1.05036 | 0.07589 |
| | 5 | 1.34271 | 0.03621 | 1.45009 | 0.09863 |
| | 6 | 1.65782 | 0.03156 | 1.94471 | 0.12318 |
| | 7 | 1.97244 | 0.02382 | 2.55855 | 0.15060 |
| | 8 | 2.27428 | 0.01365 | 3.31673 | 0.18210 |
| | 9 | 2.54915 | 0.00174 | 4.24690 | 0.21901 |
| | 10 | 2.78236 | -0.01114 | 5.38101 | 0.26281 |
| 20 | 1 | 0.23239 | 0.01516 | 0.21927 | 0.01575 |
| | 2 | 0.69589 | 0.04060 | 0.66003 | 0.04818 |
| | 3 | 1.18782 | 0.05913 | 1.14520 | 0.08211 |
| | 4 | 1.73672 | 0.07100 | 1.72795 | 0.11803 |
| | 5 | 2.35760 | 0.07622 | 2.46043 | 0.15695 |
| | 6 | 3.05306 | 0.07473 | 3.39550 | 0.20025 |
| | 7 | 3.81430 | 0.06651 | 4.58902 | 0.24973 |
| | 8 | 4.62203 | 0.05169 | 6.10260 | 0.30759 |
| | 9 | 5.44754 | 0.03059 | 8.00682 | 0.37647 |
| | 10 | 6.25408 | 0.00382 | 10.38490 | 0.45949 |
| 30 | 1 | 0.36727 | 0.02398 | 0.34655 | 0.02490 |
| | 2 | 1.11385 | 0.06510 | 1.05644 | 0.07725 |
| | 3 | 1.92757 | 0.09609 | 1.85837 | 0.13368 |
| | 4 | 2.85707 | 0.11671 | 2.84315 | 0.19523 |
| | 5 | 3.93059 | 0.12635 | 4.10529 | 0.26376 |
| | 6 | 5.15617 | 0.12431 | 5.74594 | 0.34199 |
| | 7 | 6.52156 | 0.10991 | 7.87712 | 0.43351 |
| | 8 | 7.99430 | 0.08278 | 10.62729 | 0.54283 |
| | 9 | 9.52221 | 0.04295 | 14.14802 | 0.67557 |
| | 10 | 11.03465 | -0.00891 | 18.62232 | 0.83859 |

表-7 駆動力を考えないとき (FF車)

風速 $v_w = 10\text{m/s}$, $\ell_w = 0$

| 車速 $v^{m/s}$ | 時間 t^s | 連続する横風 | | 短時間の突風 | |
|-----------------|-------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|
| | | 横変位 y^m | 角変位 θ^{rad} | 横変位 y^m | 角変位 θ^{rad} |
| 10 | 1 | 0.15561 | 0 | 0.15561 | 0 |
| | 2 | 0.58873 | 0.00001 | 0.43311 | 0 |
| | 3 | 1.25491 | 0.00003 | 0.66616 | 0.00001 |
| | 4 | 2.11685 | 0.00008 | 0.86190 | 0.00003 |
| | 5 | 3.14327 | 0.00014 | 1.02633 | 0.00004 |
| | 6 | 4.30791 | 0.00022 | 1.16450 | 0.00006 |
| | 7 | 5.58877 | 0.00033 | 1.28064 | 0.00008 |
| | 8 | 6.96740 | 0.00045 | 1.37831 | 0.00010 |
| | 9 | 8.42834 | 0.00060 | 1.46051 | 0.00012 |
| | 10 | 9.95862 | 0.00076 | 1.52974 | 0.00014 |
| 20 | 1 | 0.23015 | 0 | 0.23015 | 0 |
| | 2 | 0.89477 | 0.00001 | 0.66461 | 0 |
| | 3 | 1.95756 | 0.00003 | 1.06275 | 0.00001 |
| | 4 | 3.38527 | 0.00006 | 1.42764 | 0.00002 |
| | 5 | 5.14744 | 0.00012 | 1.76207 | 0.00004 |
| | 6 | 7.21623 | 0.00021 | 2.06862 | 0.00006 |
| | 7 | 9.56614 | 0.00032 | 2.34966 | 0.00009 |
| | 8 | 12.17386 | 0.00046 | 2.60736 | 0.00011 |
| | 9 | 15.01806 | 0.00062 | 2.84371 | 0.00014 |
| | 10 | 18.07926 | 0.00082 | 3.06055 | 0.00017 |
| 30 | 1 | 0.36372 | 0 | 0.36372 | 0 |
| | 2 | 1.42738 | 0.00001 | 1.06365 | 0 |
| | 3 | 3.15149 | 0.00003 | 1.72408 | 0.00001 |
| | 4 | 5.49882 | 0.00007 | 2.34726 | 0.00003 |
| | 5 | 8.43425 | 0.00014 | 2.93531 | 0.00005 |
| | 6 | 11.92471 | 0.00024 | 3.49027 | 0.00008 |
| | 7 | 15.93904 | 0.00037 | 4.01404 | 0.00011 |
| | 8 | 20.44789 | 0.00054 | 4.50843 | 0.00014 |
| | 9 | 25.42364 | 0.00074 | 4.97517 | 0.00018 |
| | 10 | 30.84028 | 0.00099 | 5.41587 | 0.00022 |

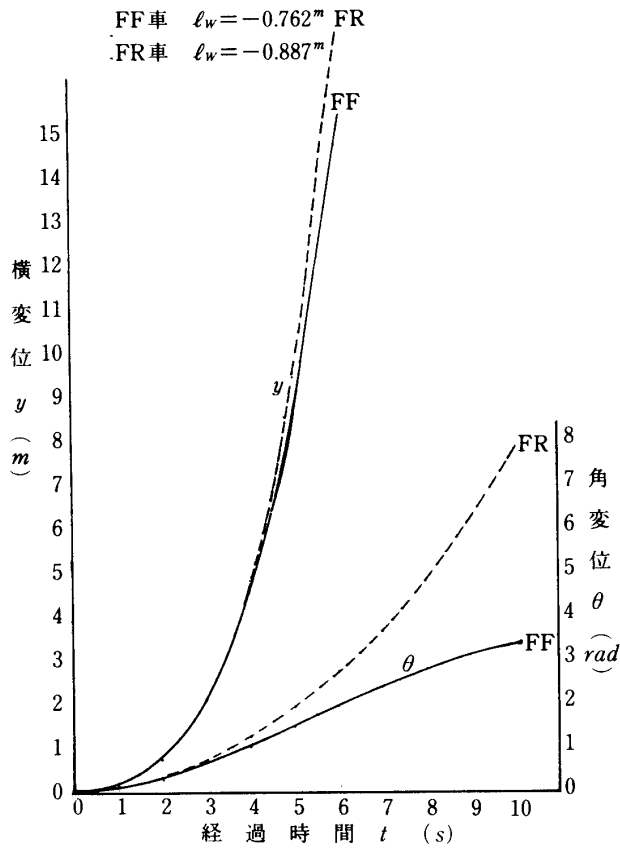


図-5 連続の横風
 $v_w = 10 m/s, v = 10 m/s$

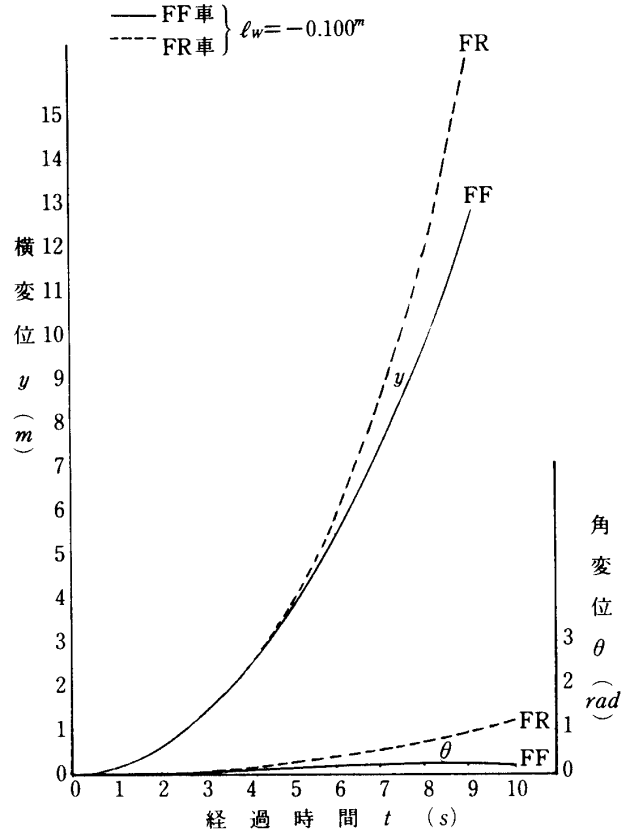


図-6 連続の横風
 $v_w = 10 m/s, v = 10 m/s$

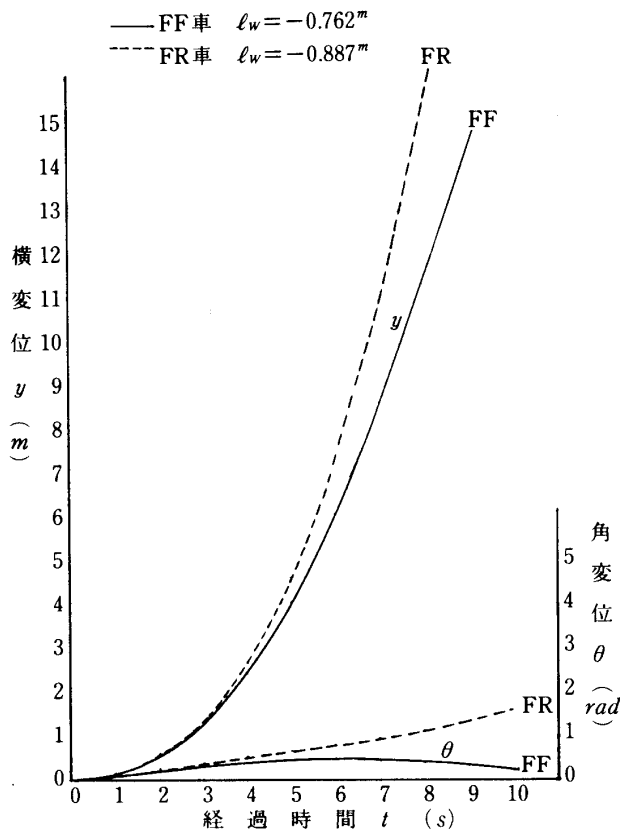


図-7 短時間の突風
 $v_w = 10 m/s, v = 10 m/s$

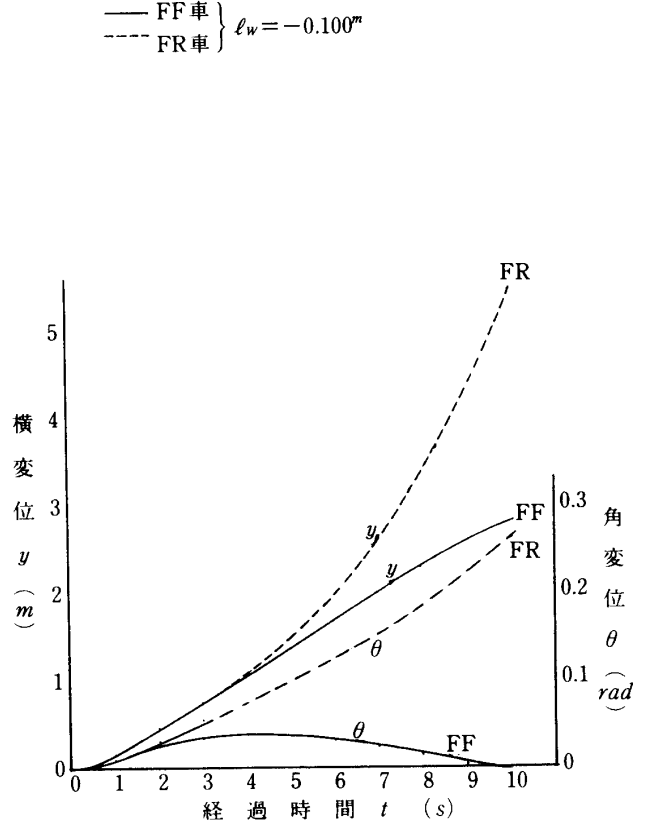


図-8 短時間の突風
 $v_w = 10 m/s, v = 10 m/s$

ってくる。特に姿勢角については、FR車は時間とともに増大しているが、FF車ではある程度のピークを過ぎて減少してくる。これらは明らかに前輪駆動の効果である。

表-7は特別な場合として駆動力を考えないものを示す。 l_w については特に $l_w=0$ の条件をとっている。駆動方法による相異は認められないのでFF車による結果だけを示す。

図5~8は上記表3~6に対応する結果を車速 $v=10\text{ m/s}$ についてのみプロットしたものである。

図-9は表-7に対応するもので、駆動力を考えないときの一般的傾向を表わしているものといえる。

以上の図・表からわかるように、すべての場合についてFF車の方がFR車より外乱に対する変位量が小さく、走行安定性が高いことを示しているものといえる。

Ⅶ 考 察

前輪駆動車には多くの利点が数え上げられており、そのため市販される小型車の多くがこれに移行する傾向にある。その操安性については従来の後輪駆動車に比べてかなり優れているといわれている。本文では特に横風や突風などの外乱に対する安定性について調べたものである。

解析的な検討結果では、前輪駆動車について特にきめてとなるような優位性を見いだすことはできなかった。これは、ころがり抵抗と空気抵抗とに釣合う車両の駆動力が、車両の方向安定性に関係するヨーイングモーメントに及ぼす影響が車速によって大きく変動するため、広範囲の車速に対して具体的な数値を求めなければ判断が不可能であることによる。従って一般的な関係式だけで無条件に優劣を判定することはできないのである。

数値計算では、外乱の始まる瞬間 $t=0$ に対して初期値を $y=0$ 、 $\theta=0$ のごとく設定し、経過時間1秒毎に $t=10^\circ$ ぐらいまでの結果を求めてある。

横風や突風の影響は意外に大きく表われているが、その最大の要因は外乱によるヨーイングモーメントである。そこで、これを減少させる目的で空気力の着点ACを実際の車両よりずっと重心点Pに近づけてみた。これは実物の場合なら車体後部に若干の縦びれなどを附加することで可能である。その結果、横変位 y 、角変位 θ ともに数分の一に減少し、前輪駆動車と後輪駆動車の走行安定性に対する特性の差を明らかにすることができた。

駆動力などの影響を考えない場合には、当然駆動方式の差はなくなり、安定性のきめてとなるのは l_w 、 l_N の関係である。

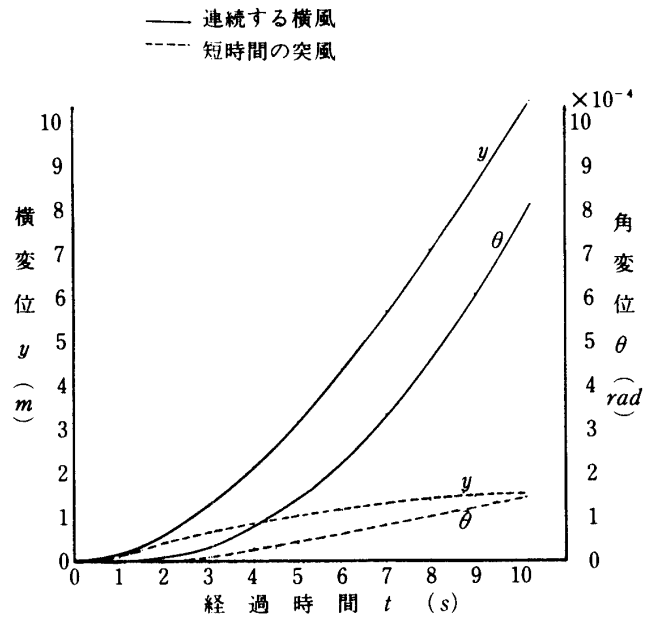


図-9 駆動力を考えない時 (FF車)

$$l_w = 0, v_w = 10\text{ m/s}, v = 10\text{ m/s}$$

公道や高速道路における実際の走行では、外乱を受けても操舵しないで走行を続けることは、ごく短時間しか考えられないので、数値計算の結果はせいぜい数秒間ぐらいしか参考にならないのではないか。

以上の考察をまとめてみると、一般の市販車については、駆動方法の差異による走行安定性の影響はそれほど大きなものではなく、むしろ車体の空力特性やステア特性の方が重要な要素であるようである。

走行実験とちがって数値計算では比較的簡単に空力特性やステア特性を変えることが可能であるから、これらについてさらに検討を続けたいと思う。

本文は多くの仮定の上になつ机上計算であり、実車による試験結果の裏づけはない。それゆえ、筆者の独断の誤解があるかもしれないので、その際はご寛容を願うとともに適切なお教示をたまわりたいと思う次第である。

なお、本文中に引用させて頂いた文献・参考書は別紙の通りであり、これらの著者に対して深く謝意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) 林, 古庄他: 突風による自動車の応答, 自動車技術, Vol.20, No.8, 1966.
- 2) 松下明文: 横風外力の測定と自動車挙動の解析, 自動車技術, Vol.32, No.4, 1978.
- 3) 磯崎, 光田: 強風時における突風の広がり突風率について, 京大防災研究所年報, 第5号A, 1962.
- 4) 近藤政市: 基礎自動車工学(前), 養賢堂
- 5) 安部正人: 車両の運動と制御, 共立出版社
- 6) 塚田, 伊賀: FF車の操安性の特徴, 自動車技術, Vol.32, No.4, 1978.
- 7) 小島, 町田: BASIC数値計算, 東海大学出版会
- 8) 築地原正人: タイヤから見た操縦性安定性について, 自動車技術, Vol.36, No.3, 1982.