

〔論文〕

# 走行系と空力デバイスの統合制御を適用した自動車の 高速走行時における操縦性安定性

森 和典\*<sup>1</sup>

Improvement in Vehicle Maneuverability and Stability at High Speeds Using  
Integrated Control Method of Chassis System and Aerodynamic Device

Kazunori MORI\*<sup>1</sup>

## Abstract

This study proposes a new integrated control method, which adds the front/rear aerodynamic rudder and wing to the chassis system that cooperatively controls the working force in three directions of each tire and force in the vertical direction of suspension to concurrently improve the maneuverability/stability and ride comfort for automobiles at high speeds. Using the LQ control theory, an integrity control rule is obtained, according to which both the yaw center position and yaw rate characteristics to the steering input are made to not only follow the target characteristic, but also control the swing of the body. This control adjusts the yaw center position to the vehicle center of gravity and achieves the first-order delay form yaw rate characteristics to the steering input, together with adjusting the roll angle, pitch angle and bounce of the body to zero. Computer simulation confirms that when the vehicle applies this control method integrated into the chassis system and aerodynamic devices, the effects of control for improving vehicle performance are greater than those in the case with chassis integrated control alone. Particularly, the proposed control vehicle is excellent in both response and stability when the step input is added to the steering from a regular circle turn with braking at super-high speeds.

**Key Words** : Automobile, Vehicle Dynamics, Motion Control, Aerodynamics, Integrated Control, Maneuverability, Stability, Aerodynamic Rudder, Wing

## 1. 緒 言

自動車は、予防安全性と乗り心地など快適性の向上が求められており、操縦性安定性と乗り心地との相反する性能を高次元で両立させる必要がある。これまでに、車両運動性能に直接関与するタイヤに働く3方向力（前後、左右および上下力）または懸架系への入力を個々に制御して、操縦性安定性や乗り心地の改善を図った走行制御装置が数多く実用化されてきた。代表的な装置として後輪または前後輪タイヤを補助操舵してタイヤの左右力を制御する4WS<sup>(1)</sup>、4輪に働く制動力または駆動力配分を制御して直接ヨーモーメントを発生させるVSC、ETS<sup>(2)~(3)</sup>、4輪の懸架系各々に油圧式アクチュエータを設けて車体の上下動、姿勢変化およびタイヤ接地荷重を制御するアクティブサスペンション<sup>(4)</sup>などが挙げられる。

さらに、4輪タイヤに働く前後、左右力または懸架系上下力のうち2方向力を協調させて制御する手法など走行系に関する様々な協調制御方法が公表されている<sup>(5)</sup>。また、協調制御化の発展型として著者らはタイヤに働く3方向の力を統合化制御する方法を提案し、このシステムを搭載した車両は操縦性安定性と乗り心地性能の向上が可能であることを解析計算により明らかにした<sup>(6)</sup>。

しかし、高速から超高速域に至る走行の際は、車体周囲の空気流が車両運動性能に大きな影響を与えるため、空気力の作用を考慮する必要がある。上述の様々な走行系の制御では空気力の影響は直接考慮されていない。4WSが車両の自律安定性を確保できるため横風安定性にも効果があることが立証されている程度である。そこで、空気力を車両運動

\*<sup>1</sup> 交通機械工学科  
令和元年7月31日受理

性能の向上に積極的に活用するため、これまでに空気力を用いた横力を発生させる空力ラダー<sup>(7)</sup>を車体後部に設けて4WSと協調制御する方法<sup>(7)</sup>、車体前部と後部に設けた空力ラダーと前後アクティブ操舵装置を協調制御する方法<sup>(8)</sup>、および車体前部または後部に設けた空力ウイングによる逆揚力により車体に作用する揚力を抑えて車体のピッチ角やバウンス量を目標値に近づける制御方法を検討している。

本報では、高速域から超高速領域において操縦性安定性と乗り心地の高次元の両立を図るために、個々のタイヤに働く3方向力と懸架系への入力を統合化制御する走行装置に空力ラダーと空力ウイングを付加した新たな統合制御系に関する制御方法を提案する。この統合制御系は2つの部分から成り立ち、まず走行系と空力ラダーを組み合わせた制御系において、車両運動の目標特性をハンドル操舵に対するヨーレイト特性を一次遅れ系とし、ヨー中心位置を車両重心位置に置き、さらに車体のロール角、ピッチ角およびバウンス量を0にする制御則を状態方程式に最適制御理論を適用して導出する。次に、空力ウイングは本来の目的である車体揚力を抑えてタイヤ接地荷重の増大を図ることに特化させて車体のピッチ角とバウンス量を0に近づける制御則とする。この走行系と空力デバイスを統合的に制御するシステムを搭載した車両は、超高速走行時の制動を伴う定常円旋回からのステップ操舵において応答性安定性に優れた走行が可能であることをシミュレーション計算により明らかにする。

## 2. 記号の説明

本文の中で使用する主な記号を示す。

|  |  |
|--|--|
| $A_i$ : 空力ラダーの翼面積                                | $A_i^w$ : 空力ウイングの翼面積                     |
| $C_j$ : タイヤのコーナリングパワー                            | $C_{Ri}$ : サスペンションのロールステア係数              |
| $C_y^{ai}$ : 空力ラダーの揚力係数 (車両に対しては横力係数)            |  |
| $C_x^{ai}$ : 空力ラダーの抗力係数                          |  |
| $C_{az}^{wi}$ : 空力ウイングの揚力係数                      | $C_{ax}^{wi}$ : 空力ウイングの抗力係数              |
| $C_{zi}$ : 前後輪位置に換算した車体の揚力係数                     | $C_x$ : 車体の抗力係数                          |
| $F_{jx}, F_{jy}, F_{jz}$ : タイヤに働く $x, y, z$ 方向の力 | $F'_{jz}$ : タイヤから、ばね下質量に作用する力            |
| $F_{aj}$ : アクティブサスペンションのアクチュエータが発生する油圧力          |  |
| $F_{ay}^v$ : 空力ラダーが発生する横力                        | $F_{ax}^i$ : 空力ラダーに生じる抗力                 |
| $F_{az}^{wi}$ : 空力ウイングが発生する逆揚力                   | $F_{ax}^{wi}$ : 空力ウイングに生じる抗力             |
| $F_{az}^{bi}$ : 前後輪位置に換算した車体の揚力                  | $F_{ax}^b$ : 車体に生じる抗力                    |
| $G_{r0}$ : 前輪実舵角に対する目標ヨーレイト定常ゲイン                 |  |
| $H$ : 車両重心高 (対地)                                 |  |
| $H_{ai}$ : 空力ラダーの空力中心高さ (対地)                     | $H_{ai}^w$ : 空力ウイングの空力中心高さ (対地)          |
| $I_i$ : 車輪回転軸回りの慣性モーメント                          | $I_x, I_y, I_z$ : 車体のロール, ピッチ, ヨー慣性モーメント |
| $K_{cj}, K_{ci}$ : キャンバ剛性                        | $K_{st}$ : ステアリング剛性                      |
| $M$ : 制駆動力の左右差による直接ヨーモーメント                       | $M_{\phi i}$ : ロール抵抗モーメント                |
| $N$ : ステアリング全ギヤ比                                 | $R$ : タイヤ有効半径                            |
| $S$ : 車両の前面投影面積                                  | $S_{ki}$ : スタビライザによるロール剛性成分              |
| $T_j$ : タイヤに働く制動, 駆動トルク                          | $W_j$ : タイヤ上下荷重                          |
| $a, b$ : 前・後車軸～車両重心間距離                           |  |
| $c_i$ : サスペンションの上下方向減衰係数 (ホイール端換算)               | $c_{ii}$ : タイヤの縦方向減衰係数                   |
| $d_{ai}$ : 空力ラダーの空力中心～車両重心間距離                    | $d_{ai}^w$ : 空力ウイングの空力中心～車両重心間距離         |
| $e$ : ヨー中心～車両重心間距離 (車体後方を+, 前方を-とする)             |  |
| $g$ : 重力加速度                                      |  |
| $h$ : 車両重心位置におけるロールセンタ高さ                         | $h_i$ : 前・後ロールセンタ高さ                      |
| $h_{ai}$ : 空力ラダーの空力中心位置におけるロールセンタ高さ              |  |
| $h_{ai}^w$ : 空力ウイングの空力中心位置におけるロールセンタ高さ           |  |
| $h_s$ : 車両重心～ロール軸間のロールモーメントアーム長                  |  |
| $h_{sa}^i$ : 空力ラダーの空力中心～ロール軸間のロールモーメントアーム長       |  |
| $h_{sa}^w$ : 空力ウイングの空力中心～ロール軸間のロールモーメントアーム長      |  |

- $k_{ai}$  : 前・後空力ラダーの方向舵角ゲイン定数  
 $k_i$  : サスペンションの上下方向ばね定数 (ホイール端換算)     $k_{ti}$  : タイヤ縦ばね係数  
 $l$  : ホイールベース     $m, m_s, m_i$  : 車両質量, ばね上質量, ばね下質量  
 $\Delta m$  : 回転部分相当質量     $r, r_m$  : ヨーレイト, 目標ヨーレイト  
 $s, s_j$  : ラプラス記号, タイヤのスリップ率  
 $t, t_c$  : 時間, 前輪キヤスタトレール     $t_i$  : 前・後輪トレッド  
 $t_{pi}$  : タイヤのニューマチックトレール  
 $u_j, u_{0j}$  : 各輪位置での車体変位, 路面変位     $u'_j$  : ばね下変位  
 $v, v_j, v_{j0}$  : 車速, 各輪のタイヤ中心位置における車体速度, タイヤ中心線方向の速度成分  
 $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$  : 車両重心位置における前後, 横, 上下加速度  
 $\beta$  : 車両重心位置における車体スリップ角     $\beta_j, \beta_m$  : タイヤスリップ角, 目標車体スリップ角  
 $\beta_{ai}$  : 空力ラダーの迎角     $\beta_{ai}^w$  : 空力ウイングの仰角  
 $\delta_{ci}, \delta_{ci}$  : タイヤ前後力と横力によるサスペンションのコンプライアンスステア  
 $\delta_f$  : ハンドル操舵による前輪実舵角     $\delta_{Rj}, \delta_{Ri}$  : サスペンションのロールステア  
 $\delta_j, \delta_{j0}$  : タイヤ実舵角, 初期トー角     $\delta_{ra}$  : アクティブ制御 (4WS) による後輪実舵角  
 $\delta_{ai}^s$  : 空力ラダーの方向舵角 (制御舵角)     $\delta_{ai}^w$  : 空力ウイングの方向舵角 (制御舵角)  
 $\epsilon_j, \epsilon'_j$  : ホイールストローク, タイヤ上下変位  
 $\theta$  : ハンドル操舵角 …  $\delta_j = \theta/N$      $\theta_R$  : ロール軸の傾斜角  
 $\lambda$  : ピッチ角, ラグランジュの未定乗数     $\mu_s, \mu_d$  : 路面静摩擦係数, 動摩擦係数  
 $\rho$  : 空気密度     $\rho_i$  : サスペンションのリンク・レバー比  
 $\phi$  : ロール角  
 $\tau_r$  : 目標ヨーレイト特性の1次遅れ時定数     $\omega_j$  : タイヤの回転角速度  
 $o-xyz$  : 車両固定座標系,  $O-XYZ$  : 路面固定座標系  
 添字  $i$  :  $f$  - 前輪または車体前部,  $r$  - 後輪または車体後部  
 添字  $j$  : 位置の場合は 1 - 右前輪, 2 - 右後輪, 3 - 左前輪, 4 - 左後輪  
 添字 0 : 初期値

### 3. 運動方程式

#### 3・1 車両および走行系の解析モデル

車両の前部および後部に空力ラダーを設けた車両の一例を図1に示す。この図では車両の車体前後部に設けられたウイングの支柱を大型化して方向舵とする構成にしている。

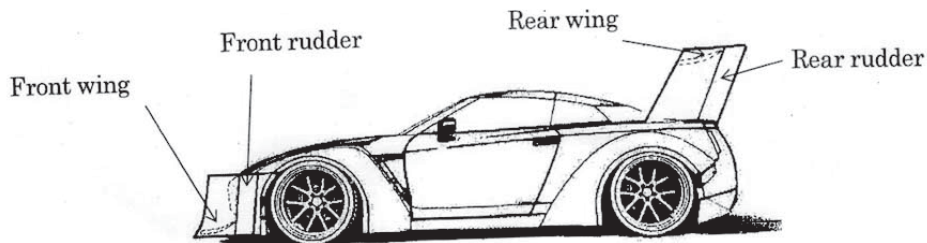


Fig. 1 Race car equipped front and rear aerodynamic rudders

図2～図4は計算に用いる車両運動解析モデルである。図2は車両諸元寸法, 車体の運動, タイヤ実舵角, タイヤの発生力などを記した車両運動解析モデルを示す。図3はサスペンションとタイヤ特性を考慮したバネ上質量とバネ下質量の運動を表す2自由度モデル, および車輪の回転運動とタイヤ～路面間に発生する制駆動力の関係を示した図である。

また, 図4は空力デバイスの配置および車体のロール運動に関する諸元寸法等を示す。図において四角の括弧で囲んだA, B, C, Dはそれぞれ前部空力ラダー, 後部空力ラダー, 前部空力ウイング, 後部空力ウイングの空力中心位

置を表している。

この車両運動解析モデルは、車体の3軸回りの回転運動と並進運動に加えて、ばね下質量の上下運動および車輪の回転運動とを考慮した14自由度である。

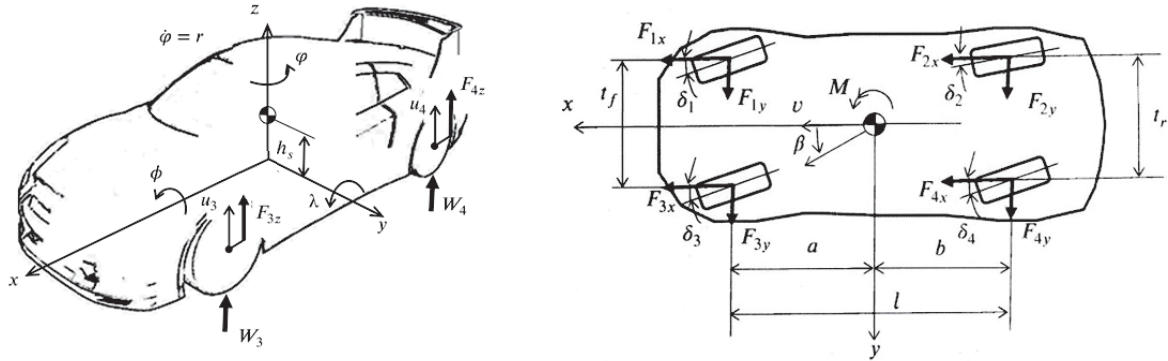


Fig. 2 Analysis model of vehicle dynamics

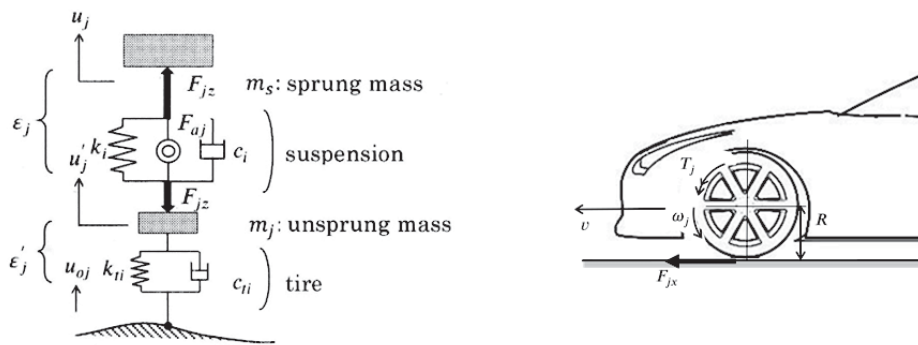


Fig. 3 Vertical movement model with suspension and tire, and analysis model of rotary motion of tire and wheel

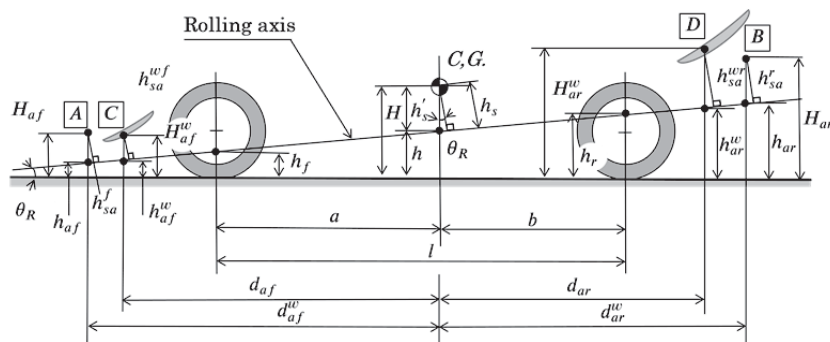


Fig. 4 Arrangement of aerodynamic device, and parameter size that relates to the roll motion of body

運動方程式は、計算を出来るだけ容易にして解析の見通しを良くするためモデル式の簡略化を図っている。次の内容を前提としている。①車体固定座標回りの慣性相乗モーメントは全て零とする。②ロールセンタは左右輪を結ぶ線の中点を含み、路面に対して垂直な平面上に位置して車体に固定されている。また、空気力に関しては、③空気力を発生する空力デバイスは図1に示すような空力ラダーと空力ウィングのみとする。これらの空力デバイスが発生する空気流は車体や他の空力デバイスの影響は受けない。車体のロール等によるラダー翼面上の空気力分布の変化も無い<sup>(9)(10)</sup>。④自然風は無く、車体に対する空気流の相対速度は車速に等しい。

車体固定座標系を用いて車両の運動方程式を導くと、並進運動は次のように表される。

$$(m + \Delta m) a_x = \sum_{j=1}^4 F_{jx} - (F_{ax}^b + F_{ax}^f + F_{ax}^r + F_{ax}^{wf} + F_{ax}^{wr}) \quad (1)$$

$$m a_y = \sum_{j=1}^4 F_{jy} + F_{ay}^f + F_{ay}^r + (F_{az}^{wf} + F_{az}^{wr}) \phi \quad (2)$$

$$m_s a_z = \sum_{j=1}^4 F_{jz} + F_{az}^{bf} + F_{az}^{br} - F_{az}^{wf} - F_{az}^{wr} \quad (3)$$

ただし、各加速度は次式で与えられる。

$$\alpha_x = \ddot{x} - \dot{y}r + z\dot{\lambda}, \quad \alpha_y = \ddot{y} + \dot{x}r - z\dot{\phi}, \quad \alpha_z = \ddot{z} - \dot{x}\dot{\lambda} + \dot{y}\dot{\phi} \quad (4)$$

ロール、ピッチ、ヨー軸回りのモーメントのつりあい式は、それぞれ次のように表される。

$$I_x \ddot{\phi} - m_s h_s \alpha_y - m_s h_g \phi = M_{\phi f} + M_{\phi r} + M_{\phi a} \quad (5)$$

$$I_y \ddot{\lambda} + m_s h_s \alpha_x = -a(F_{1z} + F_{3z}) + b(F_{2z} + F_{4z}) + M_{ay}^b + d_{af}^w F_{af}^w - d_{ar}^w F_{ar}^w + (H - H^w) F_{af}^{wx} - (H - H^w) F_{ar}^{wx} \quad (6)$$

$$I_z \dot{r} = a(F_{1y} + F_{3y}) - b(F_{2y} + F_{4y}) + M + d_{af}^r F_{ay}^f - d_{ar}^r F_{ay}^r + (d_{af}^w F_{az}^{wf} - d_{ar}^w F_{az}^{wr}) \phi \quad (7)$$

制駆動力の左右差による直接ヨーモーメントは、

$$M = t_f(F_{1x} - F_{3x})/2 + t_r(F_{2x} - F_{4x})/2 \quad (8)$$

となる。なお、式(5)(6)におけるロール、ピッチに関する諸式は、末尾の付録に記す。

前後輪のステア角は、

$$\begin{cases} \delta_1 = \delta_f - (t_c + t_{pf})(F_{1y} + F_{3y})/K_{st} + \delta_{R1} + \delta_{c1} + \delta_{f0} \\ \delta_2 = \delta_{R2} + \delta_{c2} + \delta_{ra} + \delta_{r0} \\ \delta_3 = \delta_f - (t_c + t_{pf})(F_{1y} + F_{3y})/K_{st} - \delta_{R3} + \delta_{c3} - \delta_{f0} \\ \delta_4 = -\delta_{R4} + \delta_{c4} + \delta_{ra} - \delta_{r0} \end{cases} \quad (9)$$

で示される。ここで、ロールステア  $\delta_{Rj}$  は、 $\epsilon_j$  の関数であり、コンプライアンスステア  $\delta_{cj}$  は  $F_{jx}$  と  $F_{jy}$  の関数である。ロールステアに関する式の説明は末尾の付録に記す。同様に、キャンバ角  $\gamma_j$  も  $\epsilon_j$  および  $F_{jx}$  と  $F_{jy}$  の関数として表わすことができる。各車輪のタイヤスリップ角は、次式で与えられる。

$$\begin{cases} \beta_1 = \delta_1 - \tan^{-1}((\dot{y} + ar)/v), \quad \beta_2 = \delta_2 - \tan^{-1}((\dot{y} - br)/v) \\ \beta_3 = \delta_3 - \tan^{-1}((\dot{y} + ar)/v), \quad \beta_4 = \delta_4 - \tan^{-1}((\dot{y} - br)/v) \end{cases} \quad (10)$$

車輪の回転運動は、次式で表される。タイヤのスリップ比に関する式は付録に記す。

$$I_j \dot{\omega}_j = T_j - F_{jx} R \quad (1 \leq j \leq 4) \quad (11)$$

ばね上質量の変位とばね下質量の変位は、それぞれ式(12)と式(13)となる。

$$\begin{cases} u_1 = z - a\lambda - t_f \phi / 2, \quad u_2 = z + b\lambda - t_r \phi / 2 \\ u_3 = z - a\lambda + t_f \phi / 2, \quad u_4 = z + b\lambda + t_r \phi / 2 \end{cases} \quad (12)$$

$$\epsilon_j = u_j - u'_j, \quad \epsilon'_j = u'_j - u_{0j} \quad (13)$$

ばね上質量およびばね下質量に関する力のつりあい式は、それぞれ式(14)と式(15)で与えられる。

$$\begin{cases} F_{1z} = -k_f \epsilon_1 - c_f \dot{\epsilon}_1 + F_{a1} - S_{bf}(\epsilon_1 - \epsilon_3)/t_f^2 \\ F_{2z} = -k_r \epsilon_2 - c_r \dot{\epsilon}_2 + F_{a2} - S_{br}(\epsilon_2 - \epsilon_4)/t_r^2 \\ F_{3z} = -k_f \epsilon_3 - c_f \dot{\epsilon}_3 + F_{a3} - S_{bf}(\epsilon_3 - \epsilon_1)/t_f^2 \\ F_{4z} = -k_r \epsilon_4 - c_r \dot{\epsilon}_4 + F_{a4} - S_{br}(\epsilon_4 - \epsilon_2)/t_r^2 \end{cases} \quad (14)$$



$$m\ddot{u}'_j = -F_{jz} + F'_{jz} \tag{15}$$

ただし、タイヤに加わる力とタイヤ上下荷重は、それぞれ式(16)と式(17)となる。

$$F'_{jz} = -k_n \epsilon'_j - c_{ti} \dot{\epsilon}'_j \tag{16}$$

$$W_j = bmg / (2l) + F'_{jz} \tag{17}$$

タイヤ前後力と横力の関係を表す式には、スリップ比を考慮した酒井の式を用いる。計算実行上、タイヤ力はスリップ角に関して奇関数でなければならないため、酒井の式に一部変更を加えている<sup>(6)</sup>。

また、ステアリング系は、パワーステアリング装置のアシスト出力を考慮した1自由度系のモデルを使用する<sup>(11)</sup>。

### 3・2 空力デバイスと車体に作用する空気力

解析モデルで用いた空力関係の式を説明する。車体固定座標  $o-xy$  平面において、 $x$  軸に対する前部および後部の空力ラダーの方向舵角を  $\delta_{ai}^R$ 、空気流の相対流れの方向角を  $\gamma_{ai}$  とすると、翼の仰角は  $\beta_{ai} = \delta_{ai}^R - \gamma_{ai}$  である。

前部空力ラダー位置における  $x, y$  軸方向の空気流の速度成分はそれぞれ  $v$  と  $\dot{y} + d_{af}r$  だから、 $\gamma_{af} = (\dot{y} + d_{af}r) / v$  となる。同様に、後部空力ラダー位置における  $x, y$  方向の空気流の速度成分はそれぞれ  $v$  と  $\dot{y} - d_{ar}r$  だから、 $\gamma_{ar} = (\dot{y} - d_{ar}r) / v$  となる。さらに、車体スリップ角  $\beta = \dot{y} / v$  の関係を用いれば、空力ラダーの仰角は次式で与えられる。

$$\beta_{af} = \delta_{af}^R - \frac{\dot{y} + d_{af}r}{v} = \delta_{af}^R - \beta - \frac{d_{af}}{v} r, \quad \beta_{ar} = \delta_{ar}^R - \frac{\dot{y} - d_{ar}r}{v} = \delta_{ar}^R - \beta + \frac{d_{ar}}{v} r \tag{18}$$

したがって、発生する横力と抗力はそれぞれ次式で表される。

$$\begin{cases} F_{ay}^i = \frac{\rho}{2} C_{y^{ai}} A_i v^2 = \frac{\rho}{2} \left( \frac{\partial C_{y^{ai}}}{\partial \beta_{ai}} \right)_0 \beta_{ai} A_i v^2 = C_{aiy} \beta_{ai} \\ F_{ax}^i = \frac{\rho}{2} C_{x^{ai}} A_i v^2 = \frac{\rho}{2} \left( \frac{\partial C_{x^{ai}}}{\partial \beta_{ai}} \right)_0 \beta_{ai} A_i v^2 = C_{aix} \beta_{ai} \end{cases} \tag{19}$$

次に、空力ウイングは一般に逆揚力を得る目的のため、車体固定座標  $o-xz$  平面において、 $x$  軸に対する前部および後部の空力ウイングの方向舵角は車体下向きに  $\delta_{ai}^w$  とする。空気流の相対流れの方向角を  $\gamma_{ai}^w$  として、車体ピッチ角  $\lambda$  を考慮すると、翼の仰角は  $\beta_{ai}^w = \delta_{ai}^w + \lambda + \gamma_{ai}^w$  である。

前部空力ラダー位置における  $x, z$  軸方向の空気流の速度成分はそれぞれ  $v$  と  $\dot{z} - d_{af}^w \dot{\lambda}$  だから、 $\gamma_{af}^w = (\dot{z} - d_{af}^w \dot{\lambda}) / v$  となる。同様に、後部空力ラダー位置における  $x, z$  方向の空気流の速度成分はそれぞれ  $v$  と  $\dot{z} + d_{ar}^w \dot{\lambda}$  だから、 $\gamma_{ar}^w = (\dot{z} + d_{ar}^w \dot{\lambda}) / v$  となる。したがって、空力ウイングの仰角  $\beta_{ai}^w$  は次式で与えられる。

$$\beta_{af}^w = \delta_{af}^w + \lambda + \frac{\dot{z} - d_{af}^w \dot{\lambda}}{v}, \quad \beta_{ar}^w = \delta_{ar}^w + \lambda + \frac{\dot{z} + d_{ar}^w \dot{\lambda}}{v} \tag{21}$$

発生する逆揚力と抗力はそれぞれ次式で表される。

$$\begin{cases} F_{az}^w = \frac{\rho}{2} C_{az^{wi}} A_i^w v^2 = \frac{\rho}{2} \left( \frac{\partial C_{az^{wi}}}{\partial \beta_{ai}^w} \right)_0 \beta_{ai}^w A_i^w v^2 = C_{aiz}^w \beta_{ai}^w \\ F_{ax}^w = \frac{\rho}{2} C_{ax^{wi}} A_i^w v^2 = \frac{\rho}{2} \left( \frac{\partial C_{ax^{wi}}}{\partial \beta_{ai}^w} \right)_0 \beta_{ai}^w A_i^w v^2 = C_{aix}^w \beta_{ai}^w \end{cases} \tag{22}$$

した車体に発生する前後輪位置に換算の揚力および空気抵抗は、それぞれ次のように表される。

$$F_{az}^{bi} = \frac{\rho}{2} C_{zi} S v^2, \quad F_{ax}^b = \frac{\rho}{2} C_{xi} S v^2 \tag{23}$$

## 4. 制御則

### 4・1 車両の目標特性と制御方法

空力デバイスを付加しない走行系統合制御の場合と比較し易いように文献(16)の制御の目的に合わせる。目標特性は、ヨーレート  $r$  を目標値  $r_m$  に近づけるとともに、動的な車体スリップ角が零になる位置（ヨー中心）を所定位置  $e_m$  にすること、車体の揺動と上下動を小さくするために、ロール角  $\phi$ 、ピッチ角  $\lambda$  およびバウンス  $z$  を零に近づけることとする。この目標特性を達成するために走行系の後輪舵角  $\delta_m$ 、制駆動力配分による直接モーメント  $M$ 、アクティブサ

スペンションの4輪アクチュエータ力  $F_{aj}$  および前後空力ラダーの制御舵角  $\delta_a^R$  を制御量とする。

前後空力ウィングは上記とは別に車速フィードフォワードにより方向舵角  $\delta_w^R$  を制御して、車体揚力を抑えまたは接地荷重の増加を図る目的に特化する。車体揚力による前後輪のホールストローク変化の低減を図り、主にアクティブサスペンションの負荷を軽減する補助的な役割を担わせる。

制御器を設計する際は、計算を容易にするために、前章の車両モデルを極力単純化した運動モデルを作成して行う。

ばね下質量の運動および車輪の回転運動は考慮せず、さらにステアリングおよびサスペンション特性のコンプライアンスステア成分、タイヤのスリップ比の影響も無視したうえで、運動方程式を整理してまとめると、

$$\begin{cases} \dot{\beta} = a_{\beta\beta}\beta + a_{\beta r}r + a_{\beta\phi}\phi + a_{\beta\lambda}\lambda + a_{\beta z}z + b_{\beta\delta}^R\delta_{ra} + b_{\beta a}^{Rr}\delta_{af}^R + b_{\beta a}^{Rr}\delta_{ar}^R + e_{\beta}\delta_f + w_{\beta} \\ \dot{r} = a_{r\beta}\beta + a_{rr}r + a_{r\phi}\phi + a_{r\lambda}\lambda + a_{rz}z + b_{r\delta}^R\delta_{ra} + b_{rM}M + b_{r\phi}^{Rf}\delta_{af}^R + b_{ra}^{Rr}\delta_{ar}^R + e_r\delta_f + w_r \\ \ddot{\phi} = a_{\phi\beta}\beta + a_{\phi r}r + a_{\phi\phi}\dot{\phi} + a_{\phi\lambda}\lambda + a_{\phi z}z + b_{\phi\delta}^R\delta_{ra} + b_{\phi F}^{a1}F_{a1} + b_{\phi F}^{a2}F_{a2} + b_{\phi F}^{a3}F_{a3} + b_{\phi F}^{a4}F_{a4} + b_{\phi a}^{Rr}\delta_{af}^R + b_{\phi a}^{Rr}\delta_{ar}^R + e_{\phi}\delta_f + w_{\phi} \\ \ddot{\lambda} = a_{\lambda\lambda}\dot{\lambda} + a_{\lambda\lambda}\lambda + a_{\lambda z}\dot{z} + a_{\lambda z}z + b_{\lambda F}^{a1}F_{a1} + b_{\lambda F}^{a2}F_{a2} + b_{\lambda F}^{a3}F_{a3} + b_{\lambda F}^{a4}F_{a4} + w_{\lambda} \\ \ddot{z} = a_{z\lambda}\dot{\lambda} + a_{z\lambda}\lambda + a_{zz}\dot{z} + a_{zz}z + b_{zF}^{a1}F_{a1} + b_{zF}^{a2}F_{a2} + b_{zF}^{a3}F_{a3} + b_{zF}^{a4}F_{a4} + w_z \end{cases} \quad (24)$$

を得る。ただし、右辺における各変数の係数はまとめて付録に記す。

なお、空力ウィングは別制御とするため、式(24)において空力ウィングと車体揚力の成分は省略している。

また、タイヤにおけるタイヤスリップ角とコーナリングフォース、翼における仰角と揚力はアナロジー的な関係がある。そこで、空力ラダーは前後輪舵角と協調させて次式で示される制御を行う<sup>(8)</sup>。

$$\delta_a^R = \begin{bmatrix} k_{af} & 0 \\ 0 & k_{ar} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_f \\ \delta_{ra} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{af}^R \\ \delta_{ar}^R \end{bmatrix} \quad (25)$$

ただし、 $k_{af}$  と  $k_{ar}$  は任意に設定可能な制御ゲインである。

#### 4・2 最適制御法を用いた制御則

式(24)と式(25)を用いると状態方程式は、

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} + \mathbf{E}\delta_f + \mathbf{w} \quad (26)$$

として与えられる。ただし、 $\mathbf{x} = [\beta \quad r \quad \phi \quad \lambda \quad z \quad \phi \quad \lambda \quad z]^T$   $\mathbf{u} = [\delta_{ra} \quad M \quad F_{a1} \quad F_{a2} \quad F_{a3} \quad F_{a4}]^T$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{\beta\beta} & a_{\beta r} & 0 & 0 & 0 & a_{\beta\phi} & a_{\beta\lambda} & a_{\beta z} \\ a_{r\beta} & a_{rr} & 0 & 0 & 0 & a_{r\phi} & a_{r\lambda} & a_{rz} \\ a_{\phi\beta} & a_{\phi r} & a_{\phi\phi} & 0 & 0 & a_{\phi\phi} & a_{\phi\lambda} & a_{\phi z} \\ 0 & 0 & 0 & a_{\lambda\lambda} & a_{\lambda z} & 0 & a_{\lambda\lambda} & a_{\lambda z} \\ 0 & 0 & 0 & a_{z\lambda} & a_{zz} & 0 & a_{z\lambda} & a_{zz} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{\beta\delta}^R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{r\delta}^R & b_{rM} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{\phi\delta}^R & 0 & b_{\phi F}^{a1} & b_{\phi F}^{a2} & b_{\phi F}^{a3} & b_{\phi F}^{a4} \\ 0 & 0 & b_{\lambda F}^{a1} & b_{\lambda F}^{a2} & b_{\lambda F}^{a3} & b_{\lambda F}^{a4} \\ 0 & 0 & b_{zF}^{a1} & b_{zF}^{a2} & b_{zF}^{a3} & b_{zF}^{a4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} e_{\beta}^R \\ e_r^R \\ e_{\phi}^R \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_{\beta} \\ w_r \\ w_{\phi} \\ w_{\lambda} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{E}$  は、車両、タイヤ特性および車速により決定される各々  $(8 \times 8)$ ,  $(8 \times 6)$ ,  $(8 \times 1)$  の行列である。また、 $\mathbf{x}$  と  $\mathbf{w}$  は全て検出可能とする。 $\mathbf{B}$  と  $\mathbf{E}$  の要素において、次式は操舵角の項と空力ラダーの制御舵角の項をまとめたものである。

$$\begin{cases} b'_{\beta\delta} = b_{\beta\delta} + k_{ar}L_{\beta a}^{Rr} & b'_{r\delta} = b_{r\delta} + k_{ar}L_{ra}^{Rr} & b'_{\phi\delta} = b_{\phi\delta} + k_{ar}L_{\phi a}^{Rr} \\ e'_\beta = e_\beta + k_{aj}L_{\beta a}^{Rf} & e'_r = e_r + k_{aj}L_{ra}^{Rf} & e'_\phi = e_\phi + k_{aj}L_{\phi a}^{Rf} \end{cases} \quad (27)$$

制御量を  $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1 \quad \mathbf{x}_2]^T$ ,  $\mathbf{x}_1 = [\beta \quad r \quad \dot{\phi} \quad \dot{\lambda} \quad \dot{z}]^T$ ,  $\mathbf{x}_2 = [\phi \quad \lambda \quad z]^T$  として式(26)を展開すれば,

$$\dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{A}_{11}\mathbf{x}_1 + \mathbf{A}_{12}\mathbf{x}_2 + \mathbf{B}_1\mathbf{u} + \mathbf{E}_1\delta_f + \mathbf{w}_1 \quad (28)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{A}_{21}\mathbf{x}_1 \quad (29)$$

と記述できる。ただし,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad \mathbf{w} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

次に, 目標特性を状態方程式で表現する. ヨー中心位置を  $e$  とすると,  $\beta = er/v$  の関係がある. これを用いて, 車体スリップ角とヨーレート特性の目標値を次の伝達関数で与える.

$$\beta_m(s) = er_m(s)/v \quad (30)$$

$$\frac{r_m(s)}{\delta_f(s)} = \frac{G_{r0}}{1 + \tau_r s} \quad (31)$$

ロール角, ピッチ角およびバウンスは0を目標値とするため,  $\dot{\phi}_m, \dot{\lambda}_m, \dot{z}_m, \phi_m, \lambda_m, z_m$  は全て0である. しかし, 後述する式の変形上都合が良いように,  $\dot{\phi}_m, \dot{\lambda}_m, \dot{z}_m$  の目標特性は式(33)と同じ形の一次遅れ系の伝達関数として取り扱う. そして, 計算時にこれらを0とする.

以上より, 目標特性は,

$$\dot{\mathbf{x}}_m = \mathbf{A}_m\mathbf{x}_m + \mathbf{E}_m\delta_f \quad (32)$$

として与えられる. ただし,  $\mathbf{x}_m = [\beta_m \quad r_m \quad \dot{\phi}_m \quad \dot{\lambda}_m \quad \dot{z}_m \quad \phi_m \quad \lambda_m \quad z_m]^T$

$$\mathbf{A}_m = \begin{bmatrix} -1/\tau_\beta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/\tau_r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/\tau_\phi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/\tau_\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/\tau_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{E}_m = \begin{bmatrix} G_{\beta 0}/\tau_\beta \\ G_{r 0}/\tau_r \\ G_{\phi 0}/\tau_\phi \\ G_{\lambda 0}/\tau_\lambda \\ G_{z 0}/\tau_z \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

目標の制御量を  $\mathbf{x}_m = [\mathbf{x}_{1m} \quad \mathbf{x}_{2m}]^T$ ,  $\mathbf{x}_{1m} = [\beta_m \quad r_m \quad \dot{\phi}_m \quad \dot{\lambda}_m \quad \dot{z}_m]^T$ ,  $\mathbf{x}_{2m} = [\phi_m \quad \lambda_m \quad z_m]^T$  として式(32)を展開すれば,

$$\dot{\mathbf{x}}_{1m} = \mathbf{A}_{11m}\mathbf{x}_{1m} + \mathbf{E}_{1m}\delta_f \quad (33)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{2m} = \mathbf{A}_{21m}\mathbf{x}_{1m} \quad (34)$$

と記述できる。ただし,

$$\mathbf{A}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11m} & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_{21m} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad \mathbf{E}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{1m} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

式(26)と式(32)を用いて誤差方程式を導くために,  $\mathbf{e}_1 = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_{1m}$  および  $\mathbf{e}_2 = \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_{2m}$  とおく.

$\mathbf{A}_{21} = \mathbf{A}_{21m}$  だから, 式(29)と式(34)より

$$\dot{\mathbf{e}}_2 = \dot{\mathbf{x}}_2 - \dot{\mathbf{x}}_{2m} = \mathbf{A}_{21}\mathbf{x}_1 - \mathbf{A}_{21m}\mathbf{x}_{1m} = \mathbf{A}_{21}(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_{1m}) = \mathbf{A}_{21}\mathbf{e}_1 \quad (35)$$

が導出される.

ここで,  $\mathbf{x}_{2m} = [\phi_m \quad \lambda_m \quad z_m]^T$  の目標値は0だから,  $\mathbf{x}_{2m} = \mathbf{0}$  として差し支えない. したがって,



$e_2 = x_2 - x_{2m} = x_2$ である.

$e_1$ を求めるために式(28)と式(33)を用いて式を変形する.

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= \dot{x}_1 - \dot{x}_{1m} = A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + B_1u + E_1\delta_f + w_1 - (A_{11m}x_{1m} + E_{1m}\delta_f) \\ &= A_{11}(x_1 - x_{1m}) + (A_{11} - A_{11m})x_{1m} + A_{12}x_2 + B_1u + (E_1 - E_{1m})\delta_f + w_1 \\ &= A_{11}e_1 + (A_{11} - A_{11m})x_{1m} + A_{12}e_2 + B_1u + (E_1 - E_{1m})\delta_f + w_1 \end{aligned} \quad (36)$$

制御入力  $u$  は、フィードフォワード項  $u_f$  とフィードバック項  $u_b$  の和とすると

$$u = u_f + u_b \quad (37)$$

で表される. そこで, 式(36)の右辺の第2, 4, 5項の和を  $B_1u_b$  とすれば,

$$B_1u_b = (A_{11} - A_{11m})x_{1m} + B_1(u_f + u_b) + (E_1 - E_{1m})\delta_f \quad (38)$$

となる. 上式により

$$B_1u_f = -\{(A_{11} - A_{11m})x_{1m} + (E_1 - E_{1m})\delta_f\} \quad (39)$$

を得る. 左辺の  $B_1$  は  $(5 \times 6)$  行列であり正則ではないため逆行列は存在しない. そこで, Moore Penrose の疑似逆行列  $B_1^+$  を用いれば, 式(39)より

$$u_f = -B_1^+ \{(A_{11} - A_{11m})x_{1m} + (E_1 - E_{1m})\delta_f\} \quad (40)$$

を導くことができる. ただし,  $B_1^+ = B_1^T(B_1B_1^T)^{-1}$  である.

式(37)と式(38)を式(36)に代入すると, 次のように変形できる.

$$\dot{e}_1 = A_{11}e_1 + A_{12}e_2 + B_1u_b + w_1 \quad (41)$$

したがって, 式(41)と式(35)をまとめると, 誤差方程式は次式で与えられる.

$$\dot{e} = Ae + Bu_b + w \quad (42)$$

ただし,  $e = [e_1 \ e_2]^T$

式(42)を最適レギュレータ問題として取り扱い, 評価関数  $J$  を最小化する  $u_b$  を求める<sup>(12)</sup>.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (e^T Q e + u_b^T R u_b) dt \quad (43)$$

ただし,  $Q, R$  は任意の重み付け定数行列である.

・  $u_b$  を求める手順を示す.

いま, Hamiltonian  $H$  を次式で定義する.

$$H = L + \lambda^T f \quad (44)$$

ただし,  $L = e^T Q e + u_b^T R u_b$ ,  $f = Ae + Bu_b + w$ ,  $\lambda$  は Lagrange の未定乗数ベクトルを示す.

Euler 方程式により,  $J$  を最小にする必要条件是次式となる.

$$\begin{cases} \dot{\lambda} = -\left(\frac{\partial H}{\partial e}\right)^T = -(Qe + A^T \lambda) \\ \frac{\partial H}{\partial u_b} = Ru_b + B^T \lambda = 0 \\ \dot{e} = \left(\frac{\partial H}{\partial \lambda}\right)^T = Ae + Bu_b + w \end{cases} \quad (45)$$

ここで,

$$\lambda = Pe + P_1 w \quad (46)$$

とおくと, 式(45)の第2式より  $u_b = -R^{-1}B^T \lambda$  となるから,

$$u_b = -R^{-1}B^T(Pe + P_1 w) \quad (47)$$

を得る.

$w$  は前後輪の初期トー角と前後加速度  $\alpha_x$  の関数である. 初期トー角は一定であり,  $\alpha_x$  は徐変として  $\dot{w} = \mathbf{0}$  とする. そこで,  $P_1$  と  $w$  は一定として, 式(46)の両辺を時間微分した式と, 式(45), 式(47)により次の関係が得られる.

$$(\dot{P} + PA - PBR^{-1}B^T P + Q + A^T P)e + (P + A^T P_1 - PBR^{-1}B^T P_1)w = \mathbf{0}$$

$e$  と  $w$  は任意の値をとるから, 次式(48)と式(49)が成立する.

$$\dot{P} + PA - PBR^{-1}B^T P + Q + A^T P = \mathbf{0} \quad (48)$$

$$P_1 = (PBR^{-1}B^T - A^T)^{-1}P \quad (49)$$

式(50)は, よく知られた  $P$  に関する Riccati 方程式である. 式(50)を解くことにより  $P$  を得る. この  $P$  を式(49)に代入すると  $P_1$  は計算できる. したがって, 式(47)により  $u_b$  は確定する.

以上から, 式(40)の  $u_f$  と式(47)の  $u_b$  を式(37)に代入して  $u$  は導出される.

$$u = -B_1^+ \{ (A_{11} - A_{11m})x_{1m} + (E_1 - E_{1m})\delta_f \} - R^{-1}B^T (Pe + P_1 w) \quad (50)$$

$\delta_f$  と  $u$  の要素である  $\delta_{ra}$  が得られたので, 式(25)により空力ラダーの制御舵角  $\delta_a^R = [\delta_{af}^R \ \delta_{ar}^R]^T$  が計算できる. そこで, 走行系と空力ラダーによる制御入力  $u_{fb1}$  は  $u_{fb1} = [u \ \delta_a^R]^T$  として表すことができる.

なお, 直接ヨーモーメント  $M$  を各輪の前後力として配分する方法は, 次式を採用する<sup>(11)</sup>.

$$\begin{cases} F_{1x} = m\alpha_x x/2 + Mx_1/t_f \\ F_{2x} = m\alpha_x(1-x)/2 + M(1-x_1)/t_f \\ F_{3x} = m\alpha_x x/2 - Mx_1/t_f \\ F_{4x} = m\alpha_x(1-x)/2 - M(1-x_1)/t_f \end{cases} \quad (51)$$

ただし,  $0 \leq x, x_1 \leq 1$  である. これらの配分比は任意に指定できる. ここでは計算を簡単にするため,  $x$  と  $x_1$  は前後輪の初期タイヤ荷重の配分比と等しくする. 一定車速で旋回する場合  $M > 0$  ならば, 式(51)において  $\alpha_x = 0$  だから左輪と右輪にそれぞれ同じ大きさの制動力と駆動力が作用することになる.

#### 4・3 空力ウィングの制御

前・後部に取り付けた空力ウィングは車体揚力の抑制または接地荷重の増加を図るという本来の目的に特化する. 前後空力ウィングは, 車速  $v$  により方向舵角  $\delta_{ai}^w$  を制御する単純な開ループ制御系として, 常に目標値に近づけられるような能動制御とする. ここでは, 車体揚力による前後輪のホールストローク変化の低減を図り, 主にアクティブサスペンションの負荷を軽減する補助的な役割を担わせる. 前・後輪のホイールストローク変化をそれぞれ  $\Delta z_f, \Delta z_r$  とするとき, 目標値を  $\Delta z_f = \Delta z_r = 0$  とする制御を行う. 方向舵角  $\delta_{ai}^w$  の制御則は次式で示される<sup>(13)</sup>.

$$\delta_{af}^w = \frac{2d_x \alpha_x l C_{arz}^w + a_{22} (-2k_f \Delta z_f^0 + F_{az}^{bf} + H/l \cdot F_{ax}^b) - a_{12} (-2k_r \Delta z_r^0 + F_{az}^{br} - H/l \cdot F_{ax}^b)}{(d_{af}^w + d_{ar}^w) C_{afz}^w C_{arz}^w + H_{ar}^w C_{afz}^w C_{arx}^w - H_{af}^w C_{arz}^w C_{afx}^w} \quad (52)$$

$$\delta_{ar}^w = \frac{-2d_x \alpha_x l C_{arz}^w - a_{21} (-2k_f \Delta z_f^0 + F_{az}^{bf} + H/l \cdot F_{ax}^b) + a_{11} (-2k_r \Delta z_r^0 + F_{az}^{br} - H/l \cdot F_{ax}^b)}{(d_{af}^w + d_{ar}^w) C_{afz}^w C_{arz}^w + H_{ar}^w C_{afz}^w C_{arx}^w - H_{af}^w C_{arz}^w C_{afx}^w} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} \text{ただし,} \quad a_{11} &= (b + d_{af}^w) C_{afz}^w - H_{af}^w C_{afx}^w & a_{12} &= (b - d_{ar}^w) C_{arz}^w - H_{ar}^w C_{arx}^w \\ a_{21} &= (a - d_{af}^w) C_{afz}^w + H_{af}^w C_{afx}^w & a_{22} &= (a + d_{ar}^w) C_{arz}^w + H_{ar}^w C_{arx}^w & d_x &= mH/2l \end{aligned}$$

空力ラダーの制御舵角  $\delta_a^R$  は,  $\delta_a^R = [\delta_{af}^R \ \delta_{ar}^R]^T$  とまとめてベクトルの形で記す. 車速が一定の場合, 車速の大きさに関係なく  $\delta_{af}^w$  および  $\delta_{ar}^w$  は共に一定値である. しかし, 車速が変動して前後加速度  $\alpha_x$  を生じると接地荷重が変化するため空力ウィングの制御舵角は変化する.

#### 4・4 走行系と空力デバイスの統合制御則

走行系統合制御に空力デバイスを付加した制御系の制御入力を  $u_{fb}$  とすると,

$$u_{fb} = [u_{fb1} \ \delta_a^R]^T = [u \ \delta_a^R \ \delta_a^w]^T \quad (54)$$

の形にまとめることができる. 図5は, この制御系のブロック線図を示す.

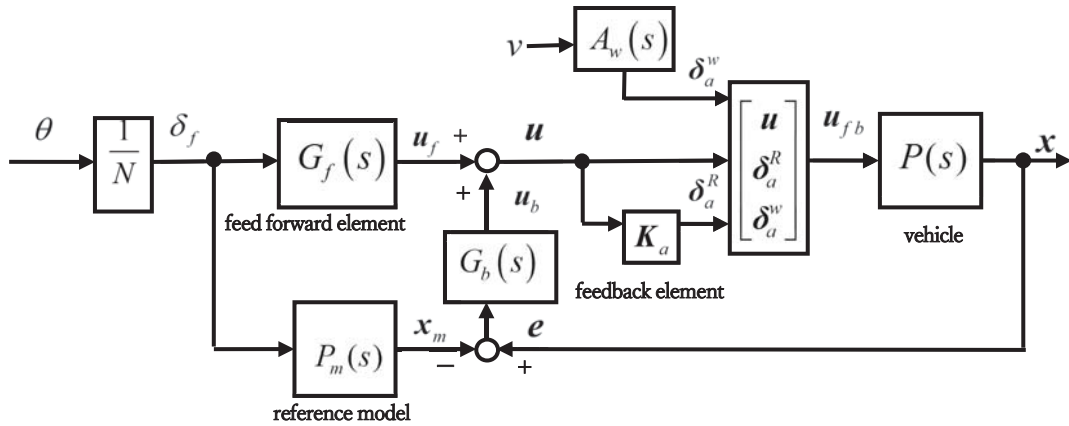


Fig. 5 Block diagram of integrated control system

### 5. 計算と考察

走行系と空力系デバイスの協調制御を適用してタイヤの3方向力を統合制御する車両（本稿ではXYZa制御とする）と走行系の統合制御のみを適用する車両（XYZ制御とする），および制御無し車両に関して，シミュレーション計算により操舵応答安定性能の比較をする。

目標の車体スリップ角とヨーレート特性は，式(30)，(31)においてヨー中心を車両重心位置（ $e = 0$ ）とし，定常ヨーレートゲイン  $G_{r0}$ を  $\alpha_r = 0$  時の制御無し車両の0.87倍，1次遅れ時定数を  $\tau_r = 0.035$  [sec] とする。

また，車体のロール角，ピッチ角およびバウンス量の目標値はすべて0とする。

式(45)の重み付け定数行列は， $Q = \text{diag} (700, 35, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$ ， $R = \text{diag} (200, 1.0 \times 10^{-8}, 1.0 \times 10^{-8}, 1.0 \times 10^{-8}, 1.0 \times 10^{-8}, 1.0 \times 10^{-8}, 1.0 \times 10^{-8}, 1.0 \times 10^{-8})$  とおき，車速や路面状態が変化しても一定に設定する。

シミュレーション計算では，一般的な四輪駆動の小型自動車の車両諸元値と特性値を用い，第3章の車両運動モデルを直接数値積分することにより近似解を求める。なお，後輪制御舵角  $\delta_{ra}$  および空力デバイスの制御舵角  $\delta_{aw}^R$ ， $\delta_{aw}^W$  は機構上現実的な限界値を設け， $|\delta_{ra}| \leq 5$  [deg]， $|\delta_{aw}^R| \leq 15$  [deg]，および  $-5 \leq \delta_{aw}^W \leq 20$  [deg] としている。

ステアリング操舵角が30 [deg] (0.524 [rad])，初期車速120 [km/h]，減速度0.3 [G] の制動を伴う円旋回の状態から，切り増し操舵角10 [deg] (0.175 [rad]) のステップ操舵を行う場合のXYZa制御，XYZ制御および制御無し車両の安定性と応答性を比較する。計算条件は，前後方向の加減速による速度変化が無視できるほど短い時間を前提にした準定常状態とする。

図6はその計算結果を示す。XYZa制御とXYZ制御は制御無し車両よりも，ヨーレート，横加速度は立ち上がりが

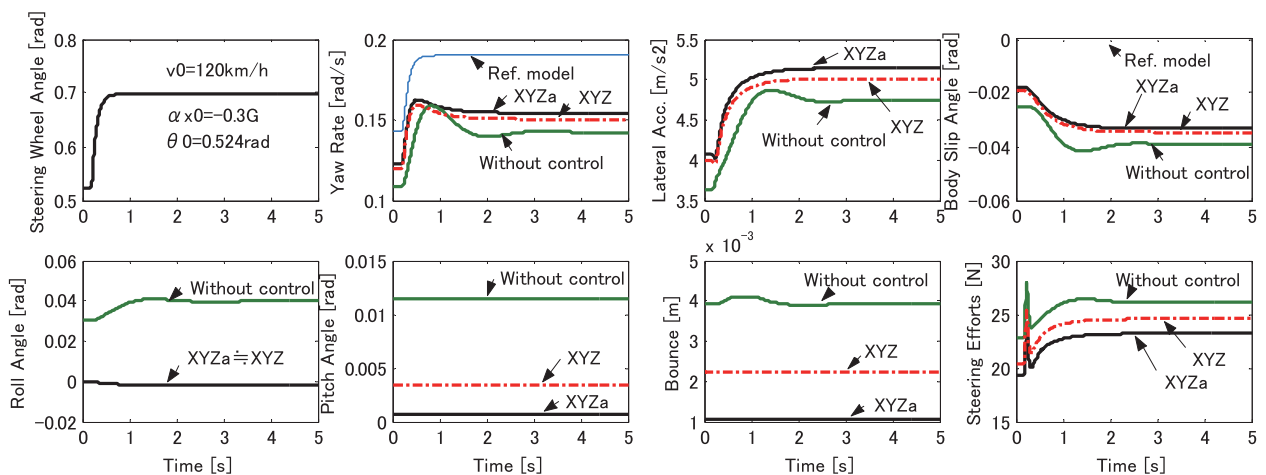


Fig. 6 Response characteristics by step input of steering wheel from circular turn with deceleration at 120 km/h in quasi steady state

早く、オーバーシュートも小さい。減速度を伴う影響でXYZa, XYZ制御共に初期定常値は小さくなるが、ヨーレートは目標特性によく追従しており、車体スリップ角もオーバーシュートが無く安定している。また、操舵力のゲインも適度に大きく、いわゆる舵が効くという性能は確保されている。

車体の揺動は、XYZa, XYZ制御共に目標値の零にほぼ近く、極めて良好な結果である。特にXYZa制御はXYZ制御よりもピッチ角とバウンス量が小さい。これは空力ウィングの効果と考えられる。

図7は、ステアリング操舵角が15 [deg] (0.262 [rad])、初期車速240 [km/h]、減速度0.3 [G]の制動を伴った円旋回の状態から、切り増し操舵角6.7 [deg] (0.116 [rad])のステップ操舵を実施した場合の応答性を示す。車速240 [km/h]は、160 [km/h]以上の超高速状態であり、単純換算で空気力は120 [km/h]時の4倍となる。制御無し車両は操舵応答安定性が明らかに低下するにも関わらずXYZa制御とXYZ制御は依然として良好な運動性能を示す。ただし、XYZa制御は空力デバイスの効果でXYZ制御よりも優れた運動性能を発揮し、その性能差が顕著となる。

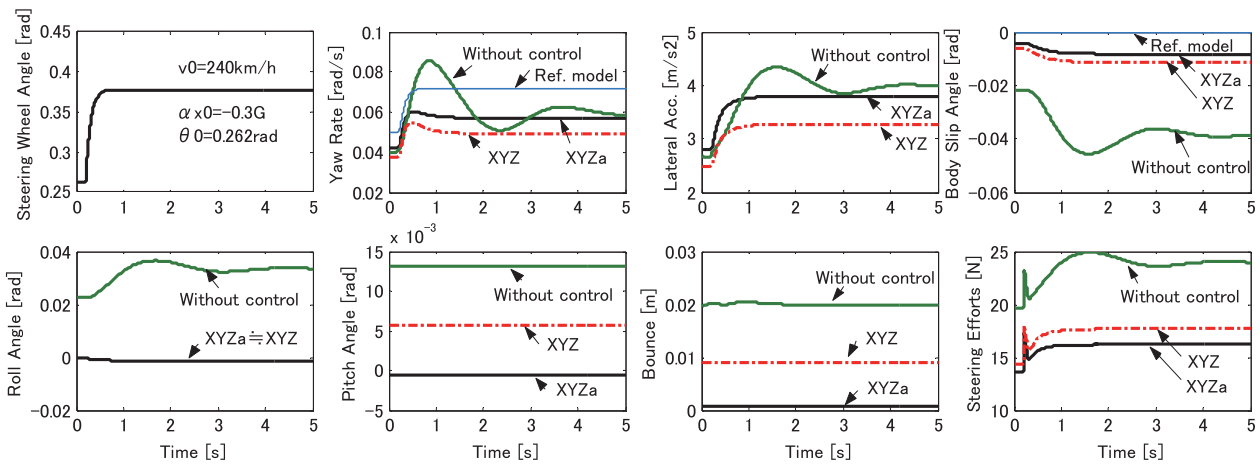


Fig. 7 Response characteristics of step input of steering wheel from circular turn with deceleration at 240 km/h in quasi steady state

図8は上記走行状態における走行系の制御入力の時間的変化を示す。図の上段がXYZa制御、下段がXYZ制御である。また、図9はXYZa制御における前・後空力ラダーと前・後空力ウィングの制御角の時間的変化を示す。XYZ制御は直接ヨーモーメントの制御入力が小さい分を4WSとアクティブサスペンションの制御入力で補う結果となった。XYZa制御は空力デバイスの効果により走行系の制御入力である後輪舵角、直接ヨーモーメントおよびアクティブサスペンション制御入力のバランスが良く3者とも適切な値となる。アクティブサスペンションのアクチュエータ制御入力を比較すると、XYZa制御はXYZ制御よりも4輪のバランスが良い。また、XYZa制御の空力デバイスは車体に加わる左右力と上下力を補うため、後輪舵角量とアクチュエータ制御入力量が小さくなる。

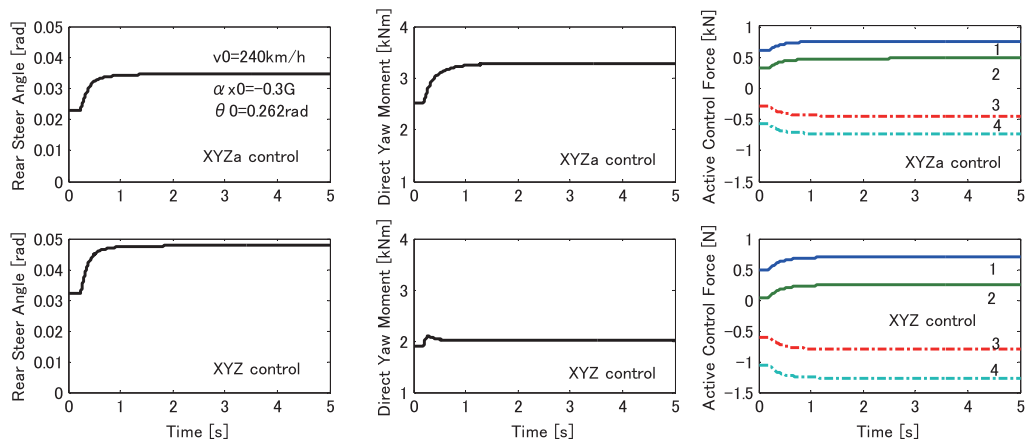


Fig. 8 Control input in step response from circular turn with deceleration

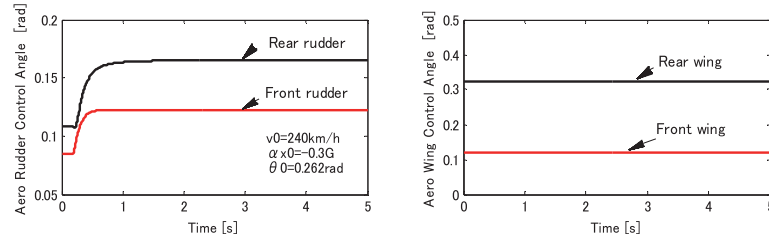


Fig. 9 Control input of aero device in step response from circular turn with deceleration

タイヤが発生し得る力の利用率の観点からタイヤの負荷を調べる。そこで、タイヤ上下荷重に対するタイヤ横力と前後力の和との比を「タイヤ負担率」とする。図10は4輪のタイヤ負担率の時間的変化を示す。XYZa制御はXYZ制御に比べて4輪の負荷の大きさおよびバランスの面で優れている。XYZ制御は後内輪が既に飽和状態に近い。制御無し車両は操舵開始2秒から3秒後の間に後内輪から順次4輪のタイヤ負担率が飽和する。

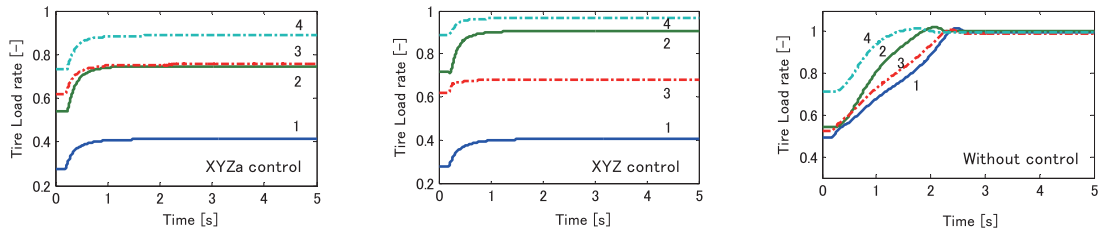


Fig. 10 Tire load rate in step response from circular turn with deceleration at 240 km/h

## 6. 結 語

四輪操舵（左右力制御）、制駆動力四輪配分制御（前後力制御）およびアクティブサスペンション（上下力制御）装置の走行系統合制御に空力ラダーとウイングを付加した装置を用いて、車両に加わる上下、前後、左右の3方向力と3軸周りのモーメントを統合的に制御する新しい方法を検討した。空力デバイスを付加した走行系統合化制御装置を適用した車両について、シミュレーション計算により制御成績を確認した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 各輪タイヤに作用する3方向の力を統合制御する走行系装置にさらに空力デバイスを付加した統合化制御装置において、空気力を考慮した新しい走行系統合制御則を得た。
- (2) 提案の走行系統合制御則は次の2つの部分から構成される。①走行系装置と空力ラダーを組み合わせた制御系の状態方程式に最適制御理論を適用して、車両運動の目標特性をハンドル操舵に対するヨーレイト特性は一次遅れ系とし、ヨー中心位置は車両重心に置き、さらに車体のロール角、ピッチ角およびバウニング量は0となるように導出された制御則。②空力ウイングは、車体揚力を抑えることに注力させて車体のピッチ角とバウニング量が0となるように翼の取り付け角をコントロールする制御則。
- (3) (2)の制御系を適用した車両は、車両運動性能向上への効果は大きく、操舵応答安定性と乗り心地を高次元で両立できる。
- (4) 車速が大きくなるほど空気力が増大するため、車速240km/hのような超高速域では空力デバイス制御が無い走行系統合制御車両に比べて操舵応答安定性が向上する。また、空力デバイスの制御によりタイヤの負担が減少する。

本研究は、車両運動性能上の技術的な可能性を理論的に検討することに主眼を置いている。特に空力デバイスに関しては計算データを得るために現実的な翼面積となるように検討したが装置全体の搭載性に関しては十分な配慮を行っていない。例えば、レーシングカーは前後に空力デバイスを取り付けられるために搭載の実現性が高いが前部空力デバイスの取り付けに関しては車両の最低地上高の問題があり、凹凸路面の走行に難がある。スポーツカーは一般車両と同じように後部のみの搭載となり空気力の利用による性能向上は半減する。なお、今回は空力デバイスとしてラダーとウイングについて記したが、代替できる新たな空力デバイスや車体構造が考案された場合、本報が参考になれば幸いである。



また、制御系に関しては、制御装置の遅れは無く、状態変数はすべて検出可能として計算を実施した。提案の制御装置の実現に向けては、制御系の遅れや装置類の非線形要素を考慮した場合の制御効果の確認、オブザーバを適用した制御系設計の検討なども必要になる。

## 7. 謝 辞

本論文を執筆するにあたり、本学交通機械工学科の梶山項羽市助教には図の作成で協力をいただいた。ここに感謝の意を表する。

## 文 献

- (1) 森和典・江口孝彰・金子敏志・川越健次・入江南海雄, “サスペンション特性も考慮した後輪操舵の過渡制御による操安性向上”, 自動車技術会論文集, No. 45 (1990), pp. 31-36.
- (2) 井上秀明・山口博嗣・松本真次・安野芳樹, “制動力配分制御による車両運動性能向上”, 自動車技術会学術講演会前刷集, 921035, Vol. 921 (1992-5), pp. 139-142.
- (3) 内藤原平・矢口英一・尾崎清孝, “左右駆動力配分制御システムによる車両運動性能の向上”, 自動車技術, 46-12 (1992), pp. 25-31.
- (4) 福島直人・赤津洋介・藤村至・佐藤正晴・福山研輔, “アクティブサスペンションによる高速時の安定性・接地性の向上”, 自動車技術, 44-3 (1990), pp. 29-35.
- (5) 平野豊・原田宏・小野英一・高浪薫, “H<sup>∞</sup>制御理論による4WS・4WD統合制御システムの開発”, 自動車技術会論文集, 9304509, 24-3 (1993-7), pp. 100-105.
- (6) 森和典, “走行系の統合制御を適用した車両の運動性能”, 日本機械学会論文集, 68-671, C (2002-7), pp. 172-179.
- (7) 森和典, “空力ラダーと四輪操舵の協調制御を適用した自動車の操縦性安定性に関する研究”, 久留米工業大学研究報告, No. 40 (2017), pp. 33-49.
- (8) 森和典, “前後輪アクティブ操舵と空力ラダーの協調制御による車両運動性能向上”, 久留米工業大学研究報告, No. 41 (2018), pp. 26-42.
- (9) 加藤寛一郎・大屋昭男・柄沢研治, 航空機力学入門 (1985), pp. 89-103, 東京大学出版会.
- (10) 嶋田有三・佐々修一, 飛行力学 (2017), pp. 119-136, 森北出版
- (11) 森和典, “スライディングモード制御法を用いた制動力配分と4WSの協調制御による車両の操縦性安定性向上”, 日本機械学会論文集, 68-671, C (2002-7), pp. 68-74.
- (12) 加藤寛一郎, 工学的最適制御 (非線形へのアプローチ), 東京大学出版会, (1988), pp. 77-102.
- (13) 森和典・梶山項羽市, “空力ウィングによるタイヤの接地荷重制御を適用した自動車の操縦性安定性”, 久留米工業大学研究報告, No. 42 (2019), pp. 39-50.

## 付 録

式の説明:

■ 式(5)と式(6)において,

・ロールモーメント:

$$M_{\delta_f} = -t_f(F_{1z} - F_{3z})\rho_f/2 \quad M_{\delta_r} = -t_r(F_{2z} - F_{4z})\rho_r/2 \quad M_{\phi_a} = -(h_{sa}^f F_{\delta_y}^f + h_{sa}^r F_{\delta_y}^r)$$

・ピッチモーメント:  $M_{\delta_y}^b = -aF_{\delta_z}^{bf} + bF_{\delta_z}^{br}$

・ロール軸関連:  $h = (bh_f + ah_r)/l$   $h'_s = H - h$   $h_s = h'_s \cos \theta_R$   $\tan \theta_R = (h_r - h_f)/l$  の関係から,  
 $h_s = \{H - (bh_f + ah_r)/l\} \cos \theta_R$  を得る.

・バウンス量  $z$  との関係:  $H = H_0 + z$   $h_f = h_{f0} + z$   $h_r = h_{r0} + z$

・ロール軸と空力デバイス:

$$h_{sa}^f = [H_{af} - \{(b + d_{af})h_f + (a - d_{af})h_r\}/l] \cos \theta_R, \quad h_{sa}^r = [H_{ar} - \{(b - d_{ar})h_f + (a + d_{ar})h_r\}/l] \cos \theta_R$$

$$h_{sa}^{wf} = [H_{af}^w - \{(b + d_{af}^w)h_f + (a - d_{af}^w)h_r\}/l] \cos \theta_R, \quad h_{sa}^{wr} = [H_{ar}^w - \{(b - d_{ar}^w)h_f + (a + d_{ar}^w)h_r\}/l] \cos \theta_R$$

■ 式(9)のロールステアとコンプライアンスステアについて

ロールステア角  $\delta_{Rj}$  をホイールストローク  $\epsilon_j$  で表すと次式で与えられる。ただし、 $\epsilon_j$  はリバウンド側を+に、バウンド側を-として表すために、 $\bar{\epsilon}_j = -\epsilon_j$  とおいて符号を逆にする場合がある。



$$\begin{cases} \delta_{R1} = C_{Rf}(\bar{\epsilon}_1) = C_{Rf}(-\epsilon_1) & \delta_{R2} = C_{Rr}(\bar{\epsilon}_2) = C_{Rr}(-\epsilon_2) \\ -\delta_{R3} = -C_{Rf}(\bar{\epsilon}_3) = -C_{Rf}(-\epsilon_3) & -\delta_{R4} = -C_{Rf}(\bar{\epsilon}_4) = -C_{Rf}(-\epsilon_4) \end{cases}$$

簡単化のためにロールステアとコンプライアンスステアの特徴が左右輪間で同じとすると次式で与えられる。

$$\delta_{R1} = \delta_{R3} = \delta_{Rf}, \quad \delta_{R2} = \delta_{R4} = \delta_{Rr}, \quad \delta_{c1} = \delta_{c3} = \delta_{cf}, \quad \delta_{c2} = \delta_{c4} = \delta_{cr}$$

・対地ロール・キャンバ角  $\gamma_{Rj}$  とキャンバスラスト  $F_{jyc}$  について

対車体キャンバ角を  $\gamma(\bar{\epsilon}_j)$ , コンプライアンスキャンバ角を  $\gamma_{ci}(F_{jy})$ , 初期キャンバ角を  $\gamma_{i0}$  とすると,  $\gamma_{Rj}$  は次式で表される。ただし,  $\gamma(\bar{\epsilon}_j)$  は  $\gamma$  が  $\bar{\epsilon}_j$  の関数であり,  $\gamma_{ci}(F_{jy})$  は  $\gamma_{ci}$  が  $F_{jy}$  の関数を意味する。

$$\begin{cases} \gamma_{R1} = \gamma_{i0} + \gamma(\bar{\epsilon}_1) + \phi + \gamma_{cf}(F_{1y}), & \gamma_{R2} = \gamma_{i0} + \gamma(\bar{\epsilon}_2) + \phi + \gamma_{cr}(F_{2y}) \\ \gamma_{R3} = \gamma_{i0} + \gamma(\bar{\epsilon}_3) - \phi - \gamma_{cf}(F_{3y}), & \gamma_{R4} = \gamma_{i0} + \gamma(\bar{\epsilon}_4) - \phi - \gamma_{cr}(F_{4y}) \end{cases}$$

したがって, キャンバスラストは次の通り。

$$\begin{cases} F_{1yc} = -K_{c1}\gamma_{R1} = -K_{cf}\gamma_{R1} & F_{2yc} = -K_{c2}\gamma_{R2} = -K_{cr}\gamma_{R2} \\ F_{3yc} = K_{c3}\gamma_{R3} = K_{cf}\gamma_{R3} & F_{4yc} = K_{c4}\gamma_{R4} = K_{cr}\gamma_{R4} \end{cases}$$

■ 式(11)において, タイヤのスリップ比を次のように定義する。

$$\text{制動時: } s_j = (v_{j0} - R\omega_j) / v_{j0} \quad \text{駆動時: } s_j = -(R\omega_j - v_{j0}) / R\omega_j$$

ただし,  $v_{j0} \approx v_j$  としている。ここで, 次の関係がある。

$$v_1 = \dot{x} + t_f r / 2 \quad v_2 = \dot{x} + t_r r / 2 \quad v_3 = \dot{x} - t_f r / 2 \quad v_4 = \dot{x} - t_r r / 2$$

・タイヤのコーナリング特性 (車両運動解析計算) :

$$\begin{aligned} F_{jx} &= -\text{sgn}(s_j) \mu_{dj} W_j & : |s_j| = 1 \\ &= -\{ C_j(1-q_j)^2 + \mu_{dj} W_j q_j^2 (3-2q_j) h_j \} s_j & : |s_j| < 1 \\ F_{jy} &= C_j(1-s_j)^2(1-q_j^2) \tan \beta_j + \mu_{dj} W_j q_j^2 (3-2q_j) h_j \tan \beta_j & : -1 \leq s_j \leq 0 \\ &= C_j(1-s_j)(1-q_j^2) \sin \beta_j + \mu_{dj} W_j q_j^2 (3-2q_j) h_j \tan \beta_j & : 0 < s_j \leq 1 \end{aligned}$$

コーナリングパワーはタイヤ荷重の関数とする。

$$C_j = \mu_{dj} K_{i0} \{ 4/3 \cdot (W_j / W_{i0}) - 1/3 \cdot (W_j / W_{i0})^2 \}$$

$K_{i0}$  は, タイヤ荷重が基準値  $W_{i0}$  のときのコーナリングパワーを  $\mu_d$  で除した一定値。

$$\text{上記タイヤ式において, } h_j = 1 / \sqrt{s_j^2 + \tan^2 \beta_j} \quad q_j = C_j \sqrt{s_j^2 + \tan^2 \beta_j} / (3\mu_{sj} W_j)$$

■ 式(26)の各係数

$$\begin{aligned} C_{\beta f} &= C_1 + C_3 & C_{\beta r} &= C_2 + C_4 & C_{\beta 13} &= C_1 - C_3 & C_{\beta 24} &= C_2 - C_4 & AL &= aC_{\beta f} - bC_{\beta r} \\ BE &= a^2 C_{\beta f} + b^2 C_{\beta r} & GA &= C_{\beta f} + C_{\beta r} & AL_a &= d_{af} C_{\beta f y} - d_{ar} C_{\beta r y} & BE_a &= d_{af}^2 C_{\beta f y} + d_{ar}^2 C_{\beta r y} & GA_a &= C_{\beta f y} + C_{\beta r y} \end{aligned}$$

とおく。

$$\begin{aligned} a_{\beta\beta} &= -\frac{GA + GA_a}{mv} & a_{\beta r} &= -\frac{AL + AL_a}{mv^2} - 1 & a_{\beta\phi} &= \frac{C_{Rf} t_f C_{\beta f} + C_{Rr} t_r C_{\beta r}}{2mv} & a_{\beta\lambda} &= \frac{aC_{Rf} C_{\beta 13} - bC_{Rr} C_{\beta 24}}{mv} \\ a_{\beta z} &= -\frac{C_{Rf} C_{\beta 13} + C_{Rr} C_{\beta 24}}{mv} & b_{\beta\beta}^a &= \frac{C_{\beta r}}{mv} & b_{\beta a}^{Rf} &= \frac{C_{\beta f y}}{mv} & b_{\beta a}^{Rr} &= \frac{C_{\beta r y}}{mv} & e_{\beta} &= \frac{C_{\beta f}}{mv} & w_{\beta} &= \frac{C_{\beta 13} \delta_{f0} + C_{\beta 24} \delta_{r0}}{mv} \\ a_{r\beta} &= -\frac{AL + AL_a}{I_z} & a_{rr} &= -\frac{BE + BE_a}{I_z v} & a_{r\phi} &= \frac{aC_{Rf} t_f C_{\beta f} - bC_{Rr} t_r C_{\beta r}}{2I_z} & a_{r\lambda} &= \frac{a^2 C_{Rf} C_{\beta 13} + b^2 C_{Rr} C_{\beta 24}}{I_z} \\ a_{rz} &= -\frac{aC_{Rf} C_{\beta 13} + bC_{Rr} C_{\beta 24}}{I_z} & b_{r\beta}^a &= -\frac{bC_{\beta r}}{I_z} & b_{rM} &= \frac{1}{I_z} & b_{ra}^{Rf} &= \frac{d_{af} C_{\beta f y}}{I_z} & b_{ra}^{Rr} &= -\frac{d_{ar} C_{\beta r y}}{I_z} & e_r &= \frac{aC_{\beta f}}{I_z} \\ w_r &= \frac{aC_{\beta 13} \delta_{f0} - bC_{\beta 24} \delta_{r0}}{I_z} & a_{\phi\beta} &= \frac{-m_s h_s (GA + GA_a) / m + h_{sa}^f C_{\beta f y} + h_{sa}^r C_{\beta r y}}{I_x} \\ a_{\phi r} &= \frac{-m_s h_s (AL + AL_a) / m + h_{sa}^f d_{af} C_{\beta f y} - h_{sa}^r d_{ar} C_{\beta r y}}{I_x v} & a_{\phi\phi d} &= -\frac{\rho_f t_f^2 C_f + \rho_r t_r^2 C_r}{2I_x} \\ a_{\phi\beta} &= \frac{-m_s h_s (C_{Rf} t_f C_{\beta f} + C_{Rr} t_r C_{\beta r}) / 2m + m_s h_s g - (\rho_f t_f^2 k_f' + \rho_r t_r^2 k_r') / 2}{I_x} & \text{ただし, } & k_f' = k_f + \frac{2S_{Mf}}{t_f^2} & k_r' &= k_r + \frac{2S_{Mr}}{t_r^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b_{\phi\delta}^{rs} &= \frac{m_s h_s C_{pr}}{m I_x} & b_{\phi\delta}^{a1} &= -\frac{\rho \dot{t}_f}{2 I_x} & b_{\phi\delta}^{a2} &= -\frac{\rho \dot{t}_r}{2 I_x} & b_{\phi\delta}^{a3} &= \frac{\rho \dot{t}_f}{2 I_x} & b_{\phi\delta}^{a4} &= \frac{\rho \dot{t}_r}{2 I_x} \\
b_{\phi\delta}^{Rf} &= -\frac{(h'_{sa} - m_s h_s / m) C_{afv}}{I_x} & b_{\phi\delta}^{Rr} &= -\frac{(h'_{sa} - m_s h_s / m) C_{arv}}{I_x} & e_{\phi} &= \frac{m_s h_s C_{bf}}{m I_x} & w_{\phi} &= \frac{m_s h_s (C_{\rho 13} \delta_{r0} + C_{\rho 24} \delta_{r0})}{m I_x} \\
a_{\lambda\lambda d} &= -\frac{2(a^2 c_f + b^2 c_r)}{I_y} & a_{\lambda\lambda} &= -\frac{2(a^2 k_f + b^2 k_r)}{I_y} & a_{\lambda z d} &= \frac{2(ac_f - bc_r)}{I_y} & a_{\lambda z} &= \frac{2(ak_f - bk_r)}{I_y} \\
b_{\lambda F}^{a1} &= b_{\lambda F}^{a3} = -\frac{a}{I_y} & b_{\lambda F}^{a2} &= b_{\lambda F}^{a4} = \frac{b}{I_y} & a_{z\lambda d} &= \frac{2(ac_f - bc_r)}{m_s} - v & a_{z\lambda} &= \frac{2(ak_f - bk_r)}{m_s} & a_{z z d} &= -\frac{2(c_f + c_r)}{m_s} & a_{z z} &= -\frac{2(k_f + k_r)}{m_s} \\
b_{zF}^{a1} &= b_{zF}^{a2} = b_{zF}^{a3} = b_{zF}^{a4} = \frac{1}{m_s} & w_{\lambda} &= -\frac{m_s H a_x}{I_y}
\end{aligned}$$

・タイヤのコーナリング特性（制御器計算）：

前述の車両運動解析に用いたタイヤモデルを次のように単純化して計算する。

$$C_j = \mu_{dj} K_{j0} \{ 4/3 \cdot (W_j / W_{i0}) - 1/3 \cdot (W_j / W_{j0})^2 \} \sqrt{1 - (\alpha_x / \mu_{dj} g)^2}$$

$$W_1 = b m g / 2l - m h_{s0} \alpha_x / 2l \quad W_2 = a m g / 2l + m h_{s0} \alpha_x / 2l \quad W_3 = W_1 \quad W_4 = W_2$$

なお、左右輪間の荷重移動は考慮しない。