

〔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耐外乱安定性

森 和典*¹

Turbulent Road and Autonomous Stability of Automobile Using Integrated Control Method of Chassis System and Aero Device

Kazunori MORI*¹

Abstract

Using computer simulation, this study evaluates the road turbulence stability and autonomous stability of the vehicle. It employs a new integrated control method that adds aerodynamic devices to the chassis system that cooperatively controls the force working in three directions of each tire and the force in the vertical direction of suspension. The obtained data suggest that this system enables good control effects under bad conditions such as various rugged roads and turbulent roads with the coefficient of friction μ . Because this system can considerably decrease the amount of steering work required from the driver, a reduction in physical and mental load can also be expected. Additionally, a stability test that separates both hands from steering wheel is used to evaluate the free response stability of the vehicle, whereby the steering wheel is steered from the state of straight advancement, is released immediately, and the subsequent convergence is examined. The result confirms that the control vehicle improves the autonomous stability evaluation of this method in a high-speed range. A series of calculated results verify that the control of the chassis system and the aerodynamic system are controlled cooperatively without interfering each other.

Key Words : Vehicle Dynamics, Maneuverability, Stability, Integrated Control System, Aerodynamic Device, Road Turbulence Stability, Autonomous Stability

1. 緒 言

著者らは、走行系の統合制御により自動車の四輪に働く左右力（横力）、前後力（制駆動力）及び上下力（車体姿勢）を同時に制御する方法を既に報告した⁽¹⁾。さらに、走行系統合制御に空力デバイスのアクティブ制御を加えた新たな制御方法を検討しており、この制御方法を適用した自動車は、空力デバイスの効果により240 [km/h] の超高速走行時において操舵応答安定性と乗り心地の双方を同時に向上させることを明らかにしている⁽²⁾。

本報告は続報として、この走行系と空力デバイスの統合制御方法を適用した自動車に関して、路面の凹凸や路面摩擦係数の変化など路面側から外乱を受けた際の操舵応答安定性および自律安定性をシミュレーション計算により解析する。また、様々な走行条件下で走行系と空力系が協調して制御されることを確認する。

車両運動性能に影響する主な外乱には路面状況によるものと横風に代表される空気流によるものがあるが、ここでは路面外乱に対する車両安定性について論じる。路面外乱に関しては、轍路への車線変更、うねり路における旋回走行試験および左右両側で路面摩擦係数が異なる路面を跨いで制動走行するスプリット μ 試験を実施する。

次に、車両の自律安定性に関して解析する。一般的に自律安定性の評価は通常実車を用いた横風外乱または舵手放しによる安定性評価法が用いられる。車両運動制御の制御効果などの性能を予測し把握するために、シミュレーション計算や実車走行試験により横風安定性評価を行った研究報告は数多く公表されている^{(3)~(5)}。しかし、直進状態からハンドルを操舵し、直ぐに手を放してその後の収束性を調べる舵手放し安定性評価を行った例は数少ない⁽⁶⁾⁽⁷⁾。舵手放し状態での安定性は、日常走行においても必須の走行性能であり、車両開発段階では横風発生装置のような大規模装置を必要

*¹ 交通機械工学科
令和元年7月30日受理

とせずに、実車を用いて比較的容易に確認できる。

以上の評価をシミュレーション計算を用いて行った結果、空力デバイスを含む走行系統合制御車両は、凹凸路面上の旋回走行等における操舵応答安定性、および路面摩擦係数変化が大きい路面における制動安定性が共に優れていることが明らかになった。また、舵手放し安定性も向上することが判明した。さらに、一連の結果から走行系と空力系の制御は干渉することなく協調的に制御されることが確認できた。

2. 解析モデルと制御則

本報告で使用した解析方法、記号、計算に用いた数値および統合制御則は、全て文献(2)を引用しているため、これらの詳細な説明は省略する。以下は、特に関係する項目のみを記す。参考として図1は前後部に空力デバイスを装備した車両のイメージ図である。走行系の解析モデル等は誌面の都合上割愛する。

2.1 解析モデル

図2はステアリング系の計算モデルを示す。図の中で直線Lはキングピン軸を表し、Lと路面の接点をAとする。前後力と横力によるキングピン軸回りモーメントを左右それぞれ、 M_R 、 M_L とおくと、ステアリングホイール回転軸回り換算のモーメントのつりあい式は次式で表される。

$$I_h \ddot{\theta} + C_h \dot{\theta} + (M_R + M_L) / N = T_h + T_p \tag{1}$$

ここで、キングピン軸回りのモーメントは、

$$M_R = -\xi F_{1x} + (t_c + t_{pf}) F_{1y}, \quad M_L = \xi F_{3x} + (t_c + t_{pf}) F_{3y} \tag{2}$$

となる。ただし、 T_p はパワーステアリング装置のアシスト出力トルクである。 T_p が作用するときの前輪横力とステアリング操舵トルク T_h との関係は実機のような非線形特性となるように設定している。

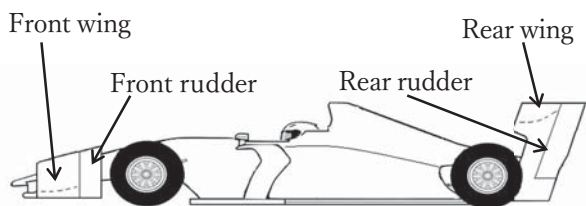


Fig. 1 Vehicle equipped with aerodynamic device

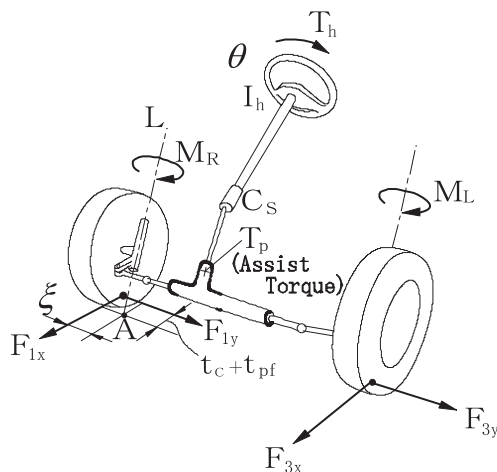


Fig. 2 Analysis model of steering system

2.2 制御則

走行系と空力デバイスの統合制御則の概要を記す。タイヤのコーナリング特性を線形と仮定すると、車両運動を表す状態方程式は次式で与えられる。

$$\dot{x} = Ax + Bu + E\delta_f + w \tag{3}$$

ただし、 $x = [\beta \quad r \quad \dot{\phi} \quad \dot{\lambda} \quad z \quad \phi \quad \lambda \quad z]^T$ $u = [\delta_{ra} \quad M \quad F_{a1} \quad F_{a2} \quad F_{a3} \quad F_{a4}]^T$

$$w = [w_\beta \quad w_r \quad w_\phi \quad w_\lambda \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

ここで、空力ラダーの制御舵角 δ_a^R は前後輪の実舵角 δ_f , δ_m と次の関係があるとして、式(3)に取り込む。

$$\delta_a^R = \begin{bmatrix} k_{af} & 0 \\ 0 & k_{ar} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_f \\ \delta_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{af}^R \\ \delta_{ar}^R \end{bmatrix} \quad (4)$$

\mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{E} は車両, 空力ラダー, タイヤ特性および車速により決定される各々 (8×8) , (8×6) , (8×1) の行列として与えられる。また, \mathbf{w} は前後加速度および前後輪の初期トー角等により決定される。なお, \mathbf{x} と \mathbf{w} はすべて検出可能とする。

制御量を $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2]^T$, $\mathbf{x}_1 = [\beta \ r \ \dot{\phi} \ \dot{\lambda} \ \dot{z}]^T$, $\mathbf{x}_2 = [\phi \ \lambda \ z]^T$ として式(3)を展開すれば,

$$\dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{A}_{11}\mathbf{x}_1 + \mathbf{A}_{12}\mathbf{x}_2 + \mathbf{B}_1\mathbf{u} + \mathbf{E}_1\delta_f + \mathbf{w}_1 \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{A}_{21}\mathbf{x}_1 \quad (6)$$

の2式で表される。ただし, $\mathbf{A} = [\mathbf{A}_{11} \ \mathbf{A}_{12}; \mathbf{A}_{21} \ \mathbf{0}]$ $\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1 \ \mathbf{0}]^T$ $\mathbf{E} = [\mathbf{E}_1 \ \mathbf{0}]^T$ $\mathbf{w} = [\mathbf{w}_1 \ \mathbf{0}]^T$

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イト特性の目標値をそれぞれ次の伝達関数で与える。

$$\beta_m(s) = er_m(s)/v \quad (7)$$

$$\frac{r_m(s)}{\delta_f(s)} = \frac{G_{r0}}{1 + \tau_r s} \quad (8)$$

ロール角, ピッチ角およびバウンシングは0を目標値とするため, $\dot{\phi}_m$, $\dot{\lambda}_m$, \dot{z}_m , ϕ_m , λ_m , z_m は全て0となる。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(8)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,

$$\dot{\mathbf{x}}_m = \mathbf{A}_m\mathbf{x}_m + \mathbf{E}_m\delta_f \quad (9)$$

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

目標の制御量を $\mathbf{x}_m = [\mathbf{x}_{1m} \ \mathbf{x}_{2m}]^T$, $\mathbf{x}_{1m} = [\beta_m \ r_m \ \dot{\phi}_m \ \dot{\lambda}_m \ \dot{z}_m]^T$, $\mathbf{x}_{2m} = [\phi_m \ \lambda_m \ z_m]^T$ として式(9)を展開すれば,

$$\dot{\mathbf{x}}_{1m} = \mathbf{A}_{11m}\mathbf{x}_{1m} + \mathbf{E}_{1m}\delta_f \quad (10)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{2m} = \mathbf{A}_{21m}\mathbf{x}_{1m} \quad (11)$$

の2式で表される。ただし, $\mathbf{A}_m = [\mathbf{A}_{11m} \ \mathbf{0}; \mathbf{A}_{21m} \ \mathbf{0}]$ $\mathbf{E}_m = [\mathbf{E}_{1m} \ \mathbf{0}]^T$

制御入力 \mathbf{u} は, 式(3)と式(8)を用いて導出されるハンドル操舵角フィードフォワード成分と, 実車両と制御目標の偏差 $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_m$ に関する方程式を最適レギュレータ問題として解いたフィードバック成分との和で表される。

$$\mathbf{u} = -\mathbf{B}_1^+ \{ (\mathbf{A}_{11} - \mathbf{A}_{11m})\mathbf{x}_{1m} + (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_{1m})\delta_f \} - \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T(\mathbf{P}\mathbf{e} + \mathbf{P}_1\mathbf{w}) \quad (12)$$

ただし, \mathbf{B}_1^+ は \mathbf{B}_1 の Moore-Penrose の疑似逆行列, \mathbf{P} は最適レギュレータ問題における Riccati 方程式の解, \mathbf{R} は評価関数の重み付け関数, および \mathbf{P}_1 は \mathbf{P} , \mathbf{R} 等により決定される行列である。

前・後部に取り付けた空力ウイ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して, 車速 v により方向舵角 δ_{ai}^w を制御する単純な開ループ制御系とする。前・後輪のホイールストローク変化をそれぞれ Δz_r , Δz_f とするとき, 空力ウイングは目標値を $\Delta z_f = \Delta z_r = 0$ とする制御則を用いる⁽⁸⁾。この前後空力ウイングの制御舵角を $\delta_a^w = [\delta_{af}^w \ \delta_{ar}^w]^T$ として表す。式(4)と式(12)および δ_a^w を用いて走行系と空力デバイスの統合制御則の制御入力 \mathbf{u}_{fb} は次式により与えられる。

$$\mathbf{u}_{fb} = [\mathbf{u} \ \delta_a^R \ \delta_a^w]^T \quad (13)$$

3. 計算および考察

計算条件および目標特性は全て文献(2)と同じである。例えば, 目標の車体スリップ角とヨーレイト特性は, 式(7)と式(8)においてヨー中心を車両重心位置 ($e = 0$) とし, 定常ヨーレイトゲイン G_{r0} を $\alpha_x = 0$ 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。

以後、走行系と空力デバイスの統合制御を適用した車両は「XYZa 制御」、走行系のみ統合制御車両は「XYZ 制御」、制御無し車両は「Without control」および制御目標特性は「Ref. model」と記す。

3・1 軌路への車線変更

路面の横断方向凹凸による外乱の影響を調べるために、車速120 [km/h]、減速度0.3 [G] で車線変更して、轍（わだち）路へ進入する走行場面を考える。ドライバモデルは1次予測モデルを用いる。ここではXYZa 制御と制御無し車両について計算を行い性能比較する。図3は軌路の走行経路と路面横断面図を示す。計算では、轍堀深さ d を0.04 [m]、轍堀の幅 W を0.9 [m]、両側轍堀の中心間距離 D を1.49 [m] とする。

図4は車両重心の軌跡の計算結果と車速の変化を示す。XYZa 制御は制御無し車両のような車線変更直後の横移動のオーバーシュートが無い。

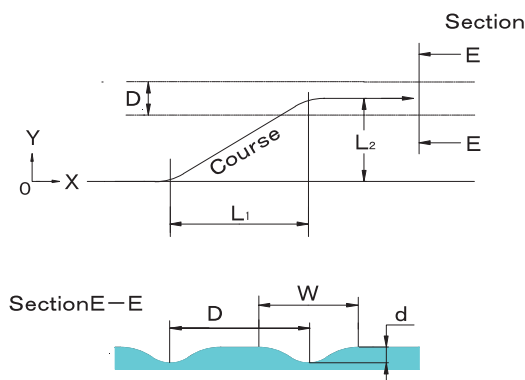


Fig. 3 Rut surface road

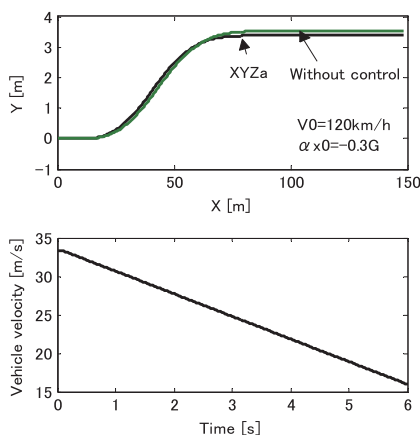


Fig. 4 Tracks of vehicle and vehicle velocity in lane change to the rut road

図5は車両運動性能に関する諸特性の計算結果である。XYZa 制御を適用した車両は上下、横方向の路面不整による対地キャンバ角やタイヤ荷重の変化による横力外乱の影響を小さくできて、軌路でも平坦路の場合とほぼ同様に安定した車線変更を達成する。XYZa 制御をおこなうと、軌路でも車体の揺動が少なくなるために、ドライバの視線が定まりやすく運転負荷が減少すると考えられる。図6は走行系の制御入力を示す。

図7はヨーレートと車体スリップ角の関係を表したリサージュ図形である。XYZa 制御は制御無し車両に比べてヨーレートと車体スリップ角の変動が小さく、無駄な動きが少ないことを分かり易く示した図である。明らかにXYZa 制御は目標特性に近い。

図8はタイヤ負担率を比較した図である。XYZa 制御は制御無し車両よりも4輪のタイヤ力が有効に利用されている。

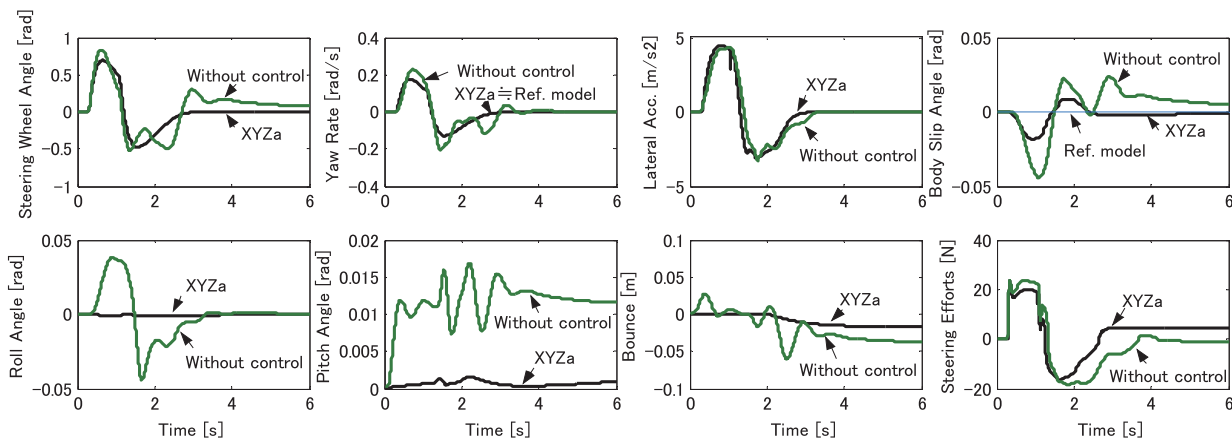


Fig. 5 Vehicle motion in lane change to the rut road

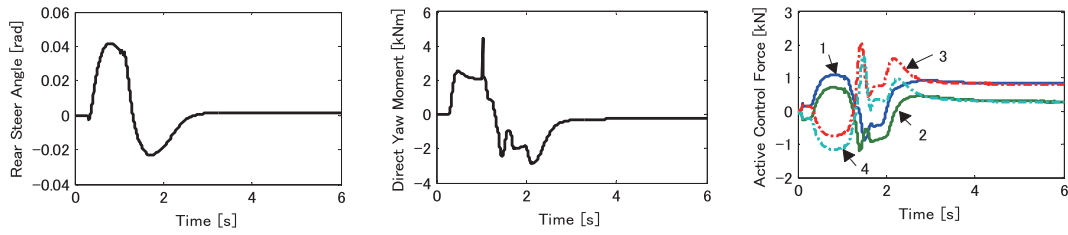


Fig. 6 Control input in lane change to the rut road

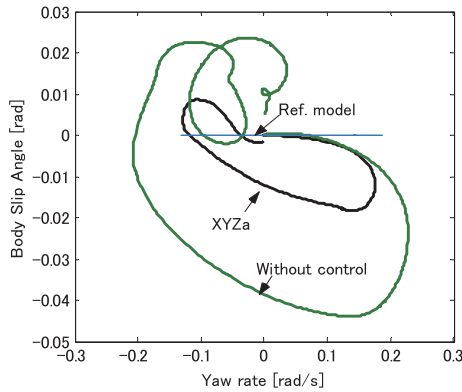


Fig. 7 Lissajous curve showing relation between yaw rate and body slip angle

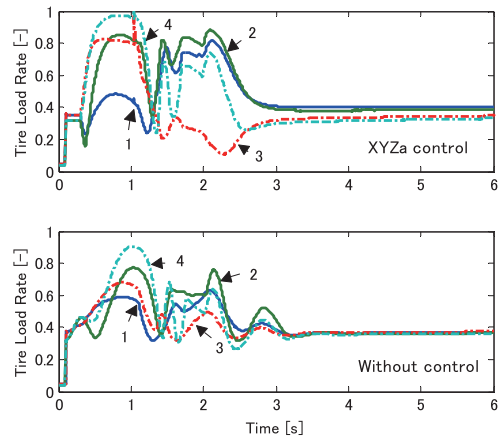


Fig. 8 Tire load rate in lane change to the rut road

3・2 路面凹凸外乱の影響

ステアリング操舵角 0.524 [rad] (30 [deg]), 車速 100 [km/h] で平坦路を円旋回をしている状態から、うねり路に進入し操舵および制動をおこなう場合を考える。計算開始 2 秒後に切り増しのステップ操舵を、 3 秒後に 0.3 [G]の減速度を加える。

うねり路は、凹凸振幅を 0.015 [m] とする。路面凹凸周期は、上下揺動に関して悪条件となるように、ばね上固有振動数と路面の時間周波数を一致させて 22.3 [m] とする。また、左右輪間の路面入力は同位相とする。図9はうねり路旋回走行の実験条件をグラフ化したものである。左側の図よりハンドル操舵角、前後加速度および路面の凹凸変位の時間的变化を表している。

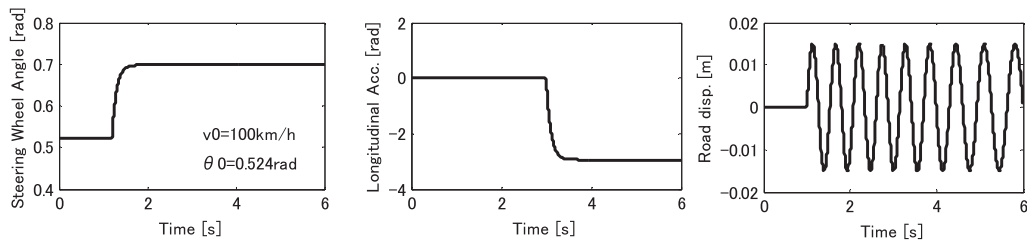


Fig. 9 Operating angle of steering wheel, lateral acceleration and displacement of undulation road surface

図10は制動を伴ううねり路旋回走行時の車両運動状態の計算結果を示す。XYZa 制御と制御無し車両を比較しており、参考のためにヨーレートと車体スリップ角の図は制御目標特性を付記している。進行方向の路面凹凸外乱がある場合、XYZa 制御の効果は大きい。ヨーレート、横加速度、車体スリップ角およびロール角など車両の旋回運動に関わる特性は路面凹凸の影響がほとんどなく制御の効果大きい。また、車体の揺動やバウンスが小さいため、ドライバーの視線が定まりやすく運転負荷が減少する。

図11はそれぞれ走行系の制御入力である後輪制御舵角，直接ヨーモーメントおよびアクティブサスペンションのアクチュエータ出力の時間的变化を示す。アクチュエータ出力の図の中の番号は4輪の位置を表す。番号1は右前輪，2は右後輪，3は左前輪，4は左後輪である。図12は空力デバイスの制御舵角を示す。減速による前後荷重移動で前輪荷重が大きくなるが，車両姿勢を保つために前部空力ウイングが揚力を発生させる方向に作動しているのが特徴的である。また，車両姿勢を0近傍に保つためにアクティブサスペンションの効果が大きいことがわかる。さらに，旋回運動に際しては4WS，制動力4輪配分および空力ラダーが協調しながら貢献している。

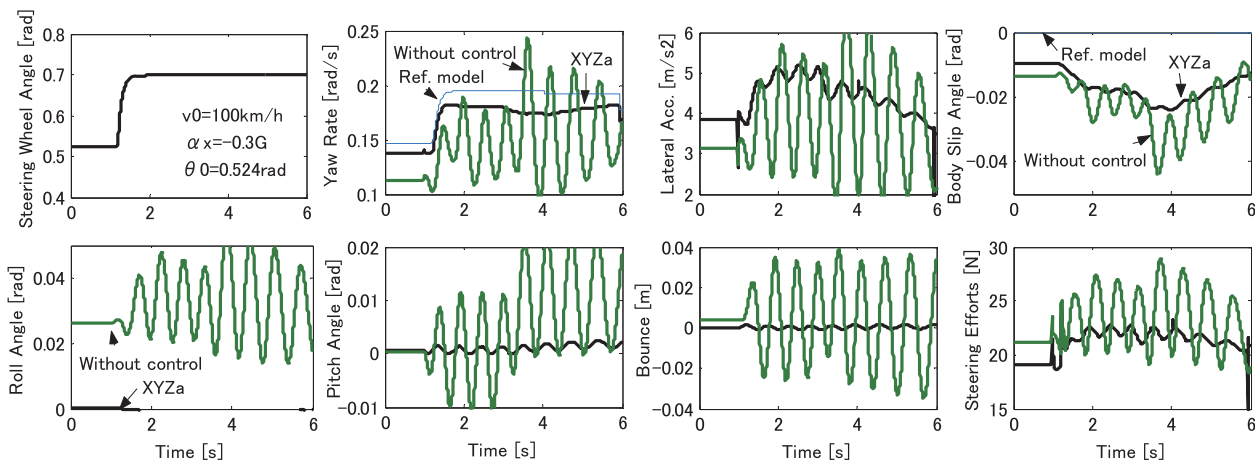


Fig. 10 Step response characteristics from circular turn with deceleration on undulation road

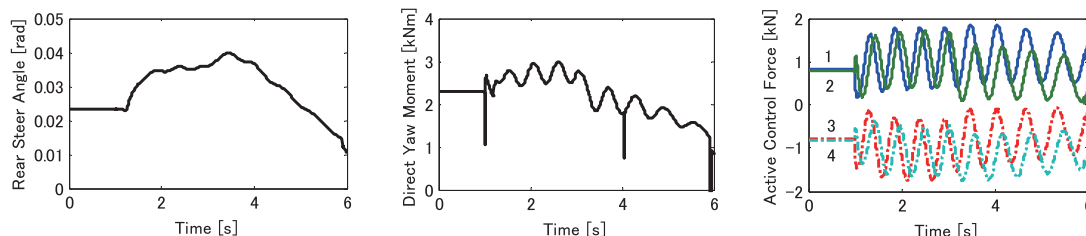


Fig. 11 Control input in step response from circular turn with deceleration on undulation road

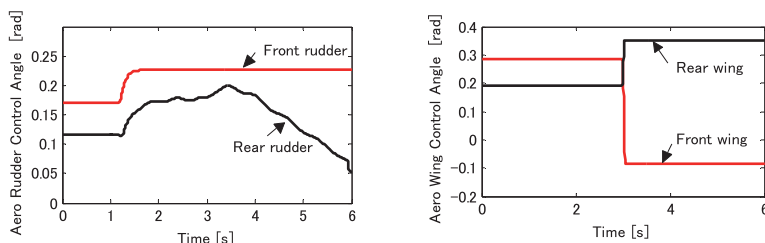


Fig. 12 Control input of aero device in step response from circular turn with deceleration on undulation road

3・3 路面摩擦係数変化の影響

制動安定性の評価などに用いられるスプリット μ 路面走行をシミュレーションする。高 μ 路面および低 μ 路面の動摩擦係数 μ_d は，それぞれ0.8と0.14とする。また，静止摩擦係数 μ_s は，それぞれ1.0と0.8とする。スプリット μ 路面の外観を図13に示す。

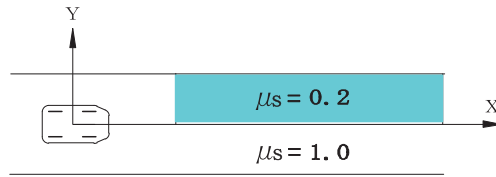


Fig. 13 Sprit μ road

初速を120 [km/h], 30 [m] 直進してから減速度0.3 [G] で制動をかけて左輪が低 μ 路面上となるようにスプリット μ 路面に進入し, 直進を保つようにステアリングを操舵するようにする. ドライバモデルは1次予測モデルを用いる. 図14と図15に計算結果を示す. ここではXYZa 制御, XYZ 制御および制御無し車両を比較する. 図15のヨーレートと車体スリップ角には制御目標特性を付記している. XYZa 制御と XYZ 制御の性能差はほとんど無い. 両者とも車両のふらつきと横移動が無く, わずかな修正操舵量で直進することが可能である. 制御無し車両は大きくふらつき横移動も大きく不安定である. XYZa 制御は XYZ 制御に比べてわずかではあるが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16と図17はそれぞれ走行系と空力デバイスの制御入力を示す. 空力デバイスの効果でXYZa 制御は XYZ 制御に比べて後輪制御舵角が小さい. また, アクティブサスペンションのアクチュエータ出力に関しては, 左右輪間のバランスは若干良いが出力自体に有意差は無い.

図18は左側よりタイヤ前後力, タイヤ横力, タイヤ負担率(タイヤ利用率)を示す. 上段がXYZa 制御で下段がXYZ 制御である. タイヤ力の関係でグラフを見ると空力ラダーの効果でXYZa 制御は横力がXYZ 制御よりも若干小さい. しかし, タイヤ負担率はほとんど有意差が認められない.

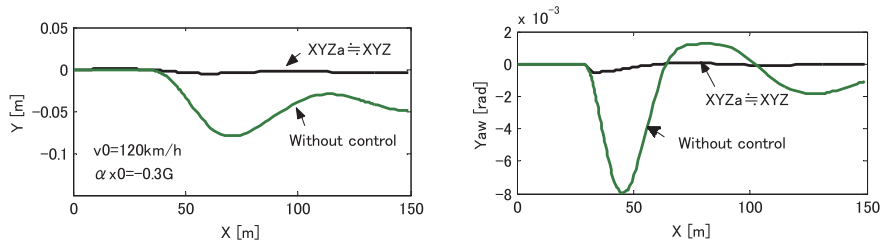


Fig. 14 Lateral displacement and yaw angle of vehicle in sprit μ road-running with deceleration

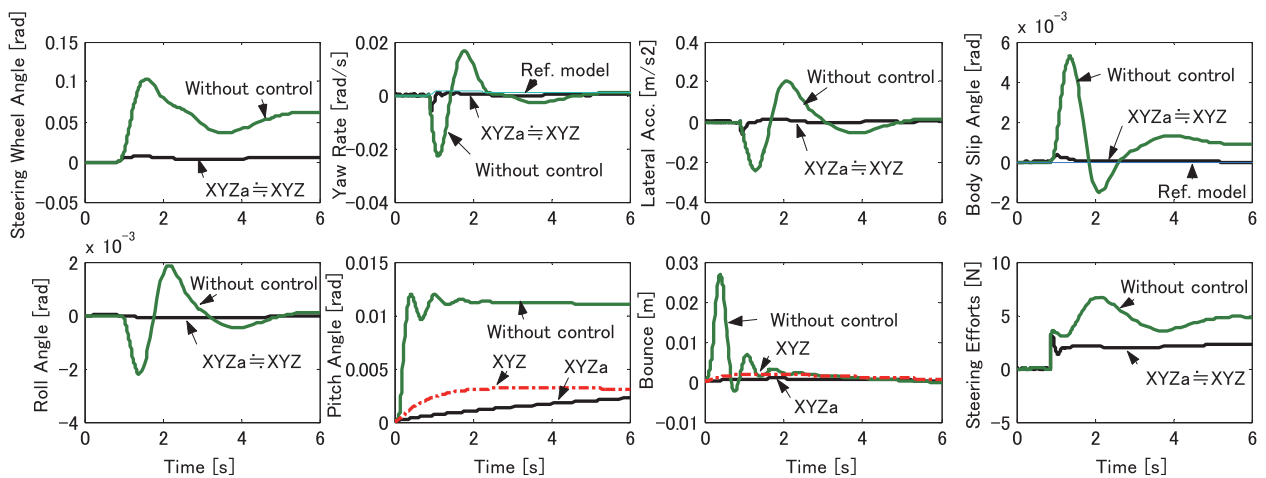


Fig. 15 Vehicle motion in sprit μ road-running with deceleration

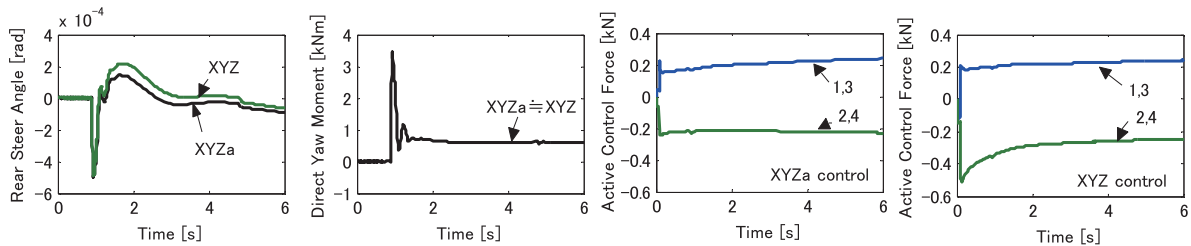


Fig. 16 Control input in sprit μ road-running with deceleration

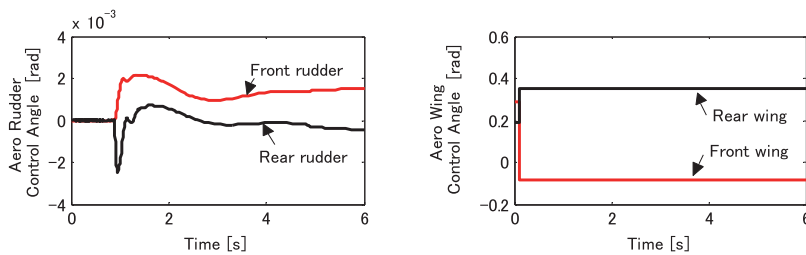


Fig. 17 Control input of aero device in sprit μ road-running with deceleration

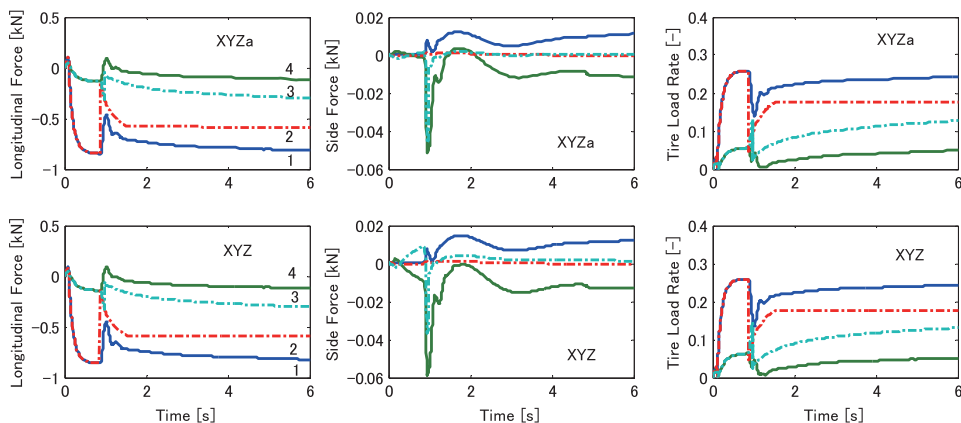


Fig. 18 Tire forces in sprit μ road-running with deceleration

3・4 車両の自律安定性

舵手放し安定性試験は、車両の自由応答安定性を評価する試験であり、ヨーレイトなどに初期値を持たせるために直進状態からハンドル操舵角入力を与え、約0.2秒でハンドルから手を放しその後の収束性を調べるものである。

本報告では操舵入力の計算を容易にするために、直進状態からハンドル操舵力をインパルス的に与え、約0.5秒後に最大値としてから直ぐに手を放す方法を採用。シミュレーション計算では、XYZa 制御と制御無し車両との比較を行い制御の効果を確認する。ヨーレイトと車体スリップ角の図には制御目標特性を付記する。なお、XYZa 制御と制御無し車両の操舵は、入力トルクはハンドル操舵角の最大値が同じとなるように調整する。

図19は车速が120 [km/h] 時の計算結果を示す。XYZa 制御は制御無し車両と比べて、明らかにハンドル舵角、ヨーレイト、車体スリップ角および横加速度の収束性が良く、車体姿勢を示すロール角、ピッチ角および車体上下動を示すバウンス量も制御目標通りとなる。

図20と図21は120 [km/h] 時のそれぞれ走行系と空力デバイスの制御入力を示す。

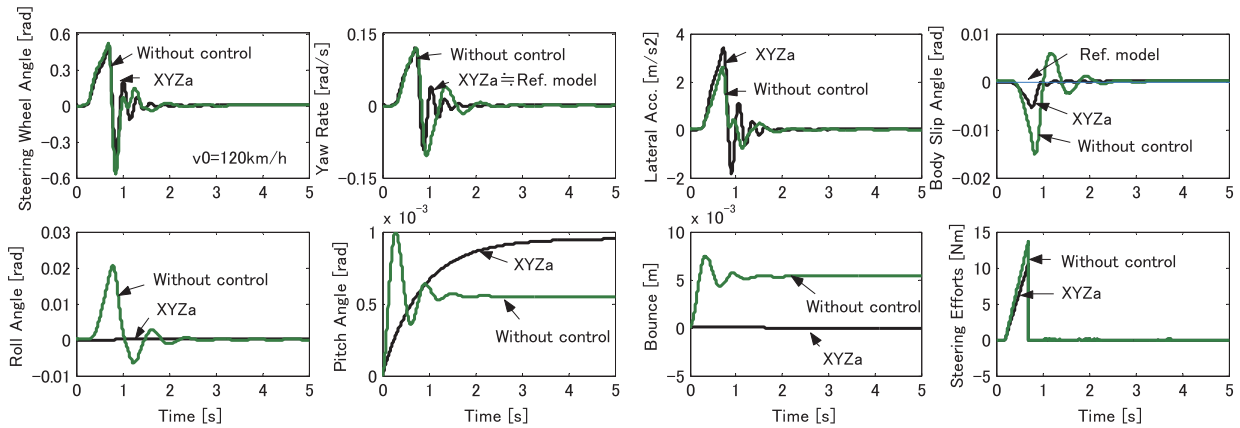


Fig. 19 Free control characteristics in steering wheel operation at 120 km/h

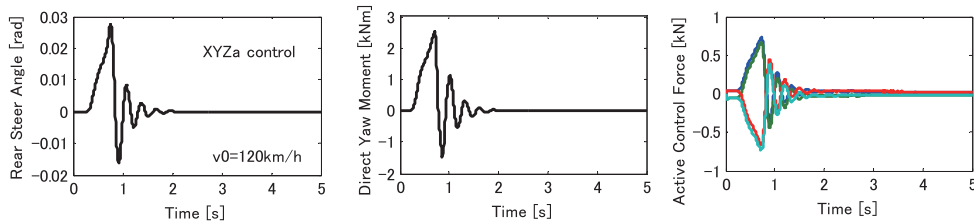


Fig. 20 Control input in free control examination at 120 km/h

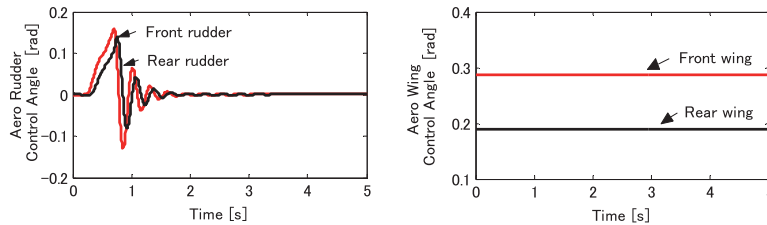


Fig. 21 Control input of aero device in free control examination at 120 km/h

図22は車速が60 [km/h] 時の計算結果を示す。XYZa 制御は車体姿勢や車体上下動は制御目標を満足するが、ハンドル舵角やヨーレイトの収束性に関しては制御無し車両と有意差は認められない。この車速では空気力が小さいため空力デバイスの効果は望めず、走行系に関しても文献(7)よりXYZ 制御と制御無し車両は有意差が無いことが明らかになっている。つまり、XYZa 車両も同様であり、中低速域では制御無し車両と同等の自律安定性である。

以上より、XYZa 制御は、高速時において自律安定性が向上する。しかし、中速域では自律安定性への効果は少なく制御無し車両と同程度の自律安定性である。

この走行速度が中低速領域では空気力の効果が望めないため、空力デバイスは制御する必要がない。

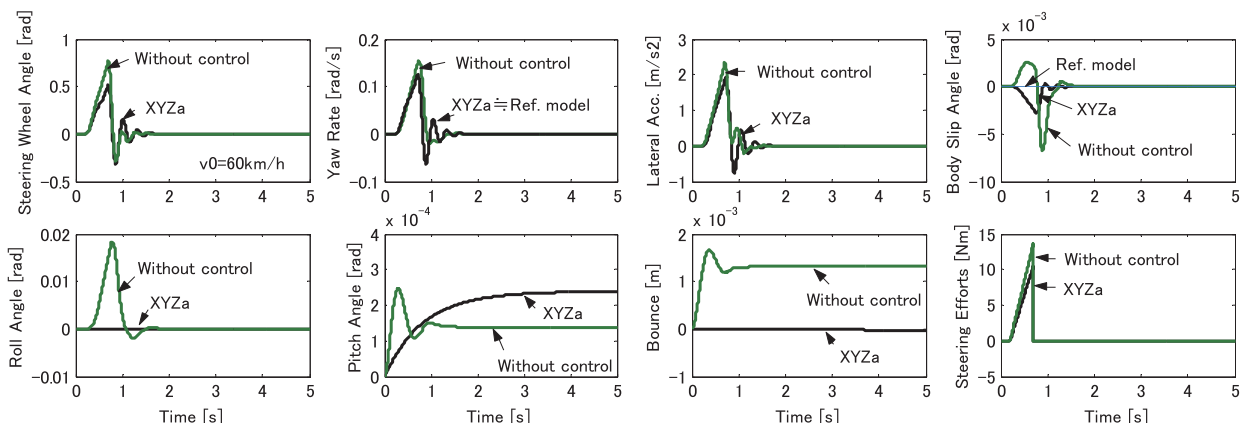


Fig. 22 Free control characteristics in steering wheel operation at 60 km/h

4. 結 言

シミュレーション計算により、走行系と空力デバイスの統合制御を適用した車両の耐外乱と自律安定性の評価を行い、以下のことが明らかになった。

- (1) 制御車両は、轍路への車線変更、うねり路旋回走行時における操舵応答安定性、およびスプリットμ路における制動安定性など悪条件下においても運動性能が向上する。特に、凹凸路面走行時に車体の揺れがほとんど無く、ドライバーは視線を上下させずに運転出来るため、肉体的負担だけでなく心理的負担も少ないと考えられる。
- (2) 高速走行時の制御車両は制御無し車両よりも、明らかに舵手放し安定性が向上する。しかし、中低速時には、制御無し車両との有意差は認められず制御効果が少ない。また、中低速では空気が非常に小さいため空力デバイスの効果は期待できない。
- (3) 走行系と空力デバイスは干渉することなく協調的に制御される。

文 献

- (1) 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.
- (2) 森和典, “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度走行時における操縦性安定性”, 久留米工業大学研究報告, No. 42 (2019), pp.51-66.
- (3) Maruyama,Y. and Yamazaki,F., Numerical Analysis and Driving Simulator Experiment on the Stability of a Vehicle under Strong Cross-wind, Journal of Environmental Systems and Engineering, No.766/I-68, 129-140, (2004-7), pp.1-12.
- (4) Harada,H., Harada,M., Araki,Y. and Ooya,M., Crosswind Handling Performance for Driver-Vehicle System, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.65, No.629 (1999), pp.222-228.
- (5) Mori,K., Dynamic behaviors of Front and Rear Steering System with Yaw Rate Feedback Control to Cross-wind, Bulletin of The Intelligence Engineering Laboratory in Kurume Institute of Technology, No.6 (1993), pp.21-29.
- (6) Ito,K., Fujishiro,T., Kawabe,T., Kanai,K. and Ochi,Y., A New Way of Controlling a Four Wheel Steering Vehicle – An Approach of Model Following Control –, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.23, No.8 (1987), pp.828-834.
- (7) 森和典, “走行系の統合制御を適用した車両の自律安定性”, 久留米工業大学研究報告, No. 32 (2010), pp. 55-59.
- (8) 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. 29-50.