

ドリフトコーナリング時のドライバのコーナリング操作と そのモデル化に関する一考察

野崎 博路 *

About the Cornering Control Model of the Driver at the Drift Cornering

Hiromichi NOZAKI*

In this research, the running experiment of a driver which comparatively became accustomed to the drift cornering and an inexperienced driver was done, and the difference of the vehicle behavior was understood by using driving simulator in J turn course. Next, the drift cornering control model was examined by the simulation.

And, the steer model and vehicle velocity control model of the driver of the drift running to maintain an intentional drift angle at the time of cornering was examined.

It is found that the driver is steered by feed back the body slip angle and the body slip angle velocity at the drift cornering. And, it is found that the driver does not only the control by which the drift angle is maintained at the time of the drift cornering but also control of turn radius by changing vehicle velocity. Moreover, at the return from the drift cornering to the straightaway, it is found feed back not only the body slip angle but also the body slip angle velocity which is differentiated steer by the phase is advanced.

Key Words : Maneuverability, Human engineering, Automobile, Vehicle dynamics, Driver models, Drift control, Simulation

1. まえがき

雪の多い地方では、一般ドライバも頻繁にカウンターステアを当て、“ドリフト走行”を行っているのを見かける。すなわち、ドリフトも、うまくあやつると、前輪がグリップ限界を越えてハンドル操作では車両の向きをコントロールできないコーナリング状態でも、後輪を滑らし、テールスライドさせることにより、車両の向きを変えることができ、狙いのコースどりができるのである。

また、ドライバは、意図的では無くても、緊急回避状態では、後輪がスキッドしてしまい、スピンを回避するため、カウンターステアを必要とするケースが生じることがある。

緊急時における運転動作モデルの研究については、天野等¹⁾によって行なわれ、さらに、スピン時のカウンターステア操作のドライバモデルの研究については、菅沢²⁾によって行なわれた。一方、ドリフト走行時のドライバ操作モデルについては明らかになっていないが、そのモデルを明らかにし、性能向上手法について考察した³⁾。更に、本論文ではコース規定され、ハンドル操作と速度コントロールの両方のコントロールを強いられるようなシミュレーションにおけるドリフトコーナリングモデル

について明らかにした。具体的には、最初に、ドライビングシミュレータを用い、Jターンコースにおいて、ドリフトコーナリングに比較的慣れたドライバと、不慣れたドライバの走行実験を行ない、その車両挙動の違いを把握した。次に、シミュレーションにより、ドリフトコーナリング操縦モデルについて検討を行った。

ここで、本論文では、ドリフト領域は、後輪が最大コーナリングフォースを越えた領域を示す。また、ドリフトコーナリングは、後輪が最大コーナリングフォースを越えた領域で行なわれたコーナリングを示す。また、ドリフトアングルは、ドリフトコーナリング中における、車体スリップ角を示す。

2. 記号の説明

本論文の車両モデルで用いる記号と、計算に使用するおもな車両諸元、特性値を以下に示す。

F_f, F_r : 前後輪コーナリングフォース

F_t : タイヤコーナリングフォース

I : ヨー慣性モーメント {240kgm²}

K_t : タイヤコーナリングパワ

l : ホイールベース {2.62 m}

l_f, l_r : 重心～前・後軸間距離 {1.18, 1.44 m}

m : 車両質量 {1500kg}

N : ステアリングオーバーオールギヤ比 {15.4}

平成17年5月27日受理

*機械工学科

R_0 : 目標旋回コースの半径 (75m)
 ψ : ヨー角
 r : ヨー角速度 (ヨーレート)
 \dot{r} : ヨー角加速度
 V : 車速
 W_f, W_r : 前後輪荷重
 $W_{f-in}, W_{f-out}, W_{r-in}, W_{r-out}$: 前後輪の内外輪荷重
 $\Delta w_f, \Delta w_r$: 前後輪の内外輪の荷重移動量
 X, Y : 車両の重心位置の X, Y 方向の座標
 δ_H : 操舵角
 δ_f : 前輪実舵角
 β : 車体スリップ角
 β_f, β_r : 前後輪スリップ角
 β_t : タイヤスリップ角
 μ : 路面の摩擦係数

3. ドライビングシミュレータによる走行実験

図1に示す、定置式のドライビングシミュレータを用い、走行確認実験を行なった。



Fig. 1 Driving simulator

図2～図7は、試験結果を示す。被験者は、ドリフトコーナリングに不慣れた被験者Aと、比較的慣れた被験者Bの2名で行なった。試験方法は、進入車速 80 km/h, 90 km/h, 100 km/h の3段階にて、直進から、半径 75 m のコーナーに入り、コーナー通過後、直進走行に戻る走行を行なった。コーナーはグリップ走行でも、ドリフト走行でも良いとした。ドリフト走行の場合、コーナー直前では、ややアクセルを緩め、タックインをきっかけとした、ドリフト走行を行なうことを義務づけ、なるべく車速は、進入車速を維持することを義務づけた。両被験者共、各3回の試行を行なった。

その結果、進入車速 80 km/h では、両被験者共に、グリップ走行にて比較的、狙ったラインに沿ったコーナリングができていた。図2は、その時の車両の軌跡を示す。

図3は、その時の両被験者の車体のスリップ角の時系列変化を示す。車体スリップ角が小さく、グリップコーナリングであることがわかる。(A1～A3, B1～B3は、被験者A, Bの1～3回目のデータを示す。)

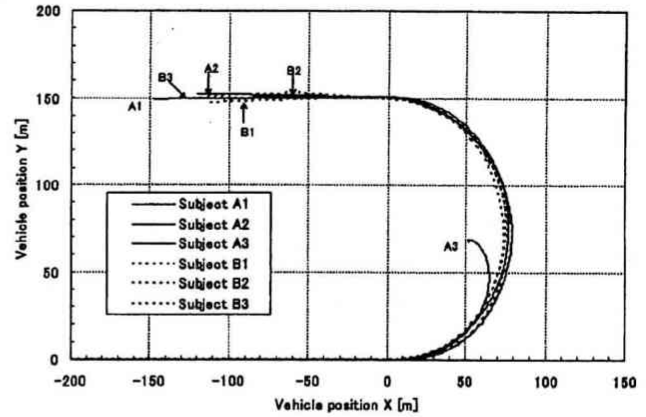


Fig. 2 Experiment result of running trajectory with driving simulator ($V=80\text{km/h}$)

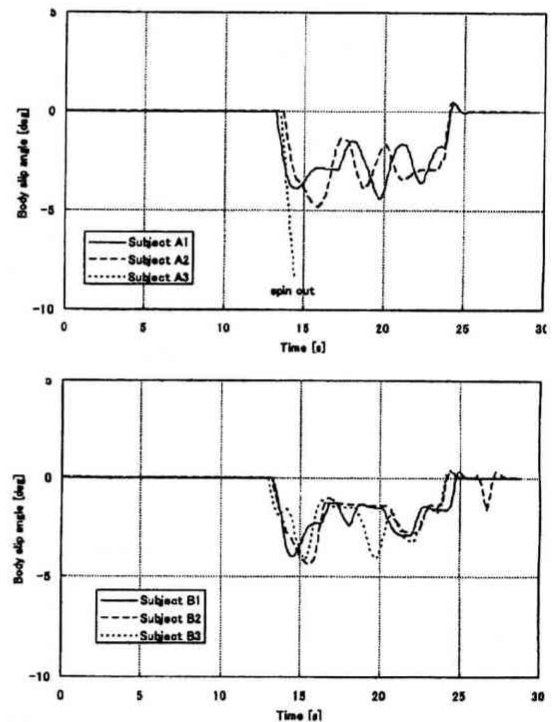


Fig. 3 Experiment result of body slip angle with driving simulator ($V=80\text{km/h}$)

進入車速 90 km/h では、比較的慣れた被験者Bは、グリップコーナリングではコースアウトしてしまうので、ドリフトコーナリングを行い、狙ったラインに沿ったコーナリングができていた。一方、ドリフトコーナリングの不慣れた被験者Aは、グリップ走行のまま、コースアウトしてしまったり、ドリフトコーナリングに持ち込んでも、コントロールしきれずスピンに至って、大きくコー

スアウトしてしまう傾向となった(図4)。また、図5より、進入車速 90 km/h では、車体スリップ角は、10 度を越えており、ドリフト走行が行なわれていることがわかる。

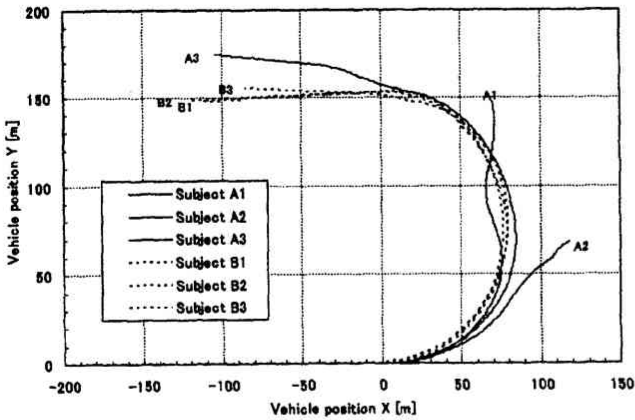


Fig. 4 Experiment result of running trajectory with driving simulator (V=90km/h)

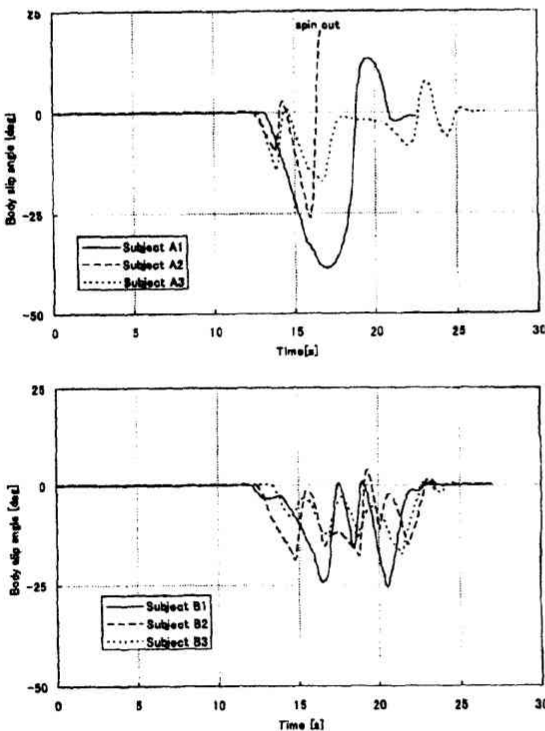


Fig. 5 Experiment result of body slip angle with driving simulator (V=90km/h)

進入車速 100 km/h では、両者共にドリフトコーナリングを行ない、両者のドリフトコントロールの差がよりはっきりと表れた(図6)。図7の車体スリップ角の時系列変化で明らかなように、被験者Bは、ドリフトコントロールがうまくいっているが、被験者Aは、コントロール不能となり、スピンに至っていることがわかる。

従って、ドリフトコントロールもうまくあやつと、比較的高い進入車速でコーナーに入っても、たくみに、車両姿勢をコントロールして、狙ったコースどりを、たどれるということが確認できた。そこで、このように規定されたコースを、たくみなドリフトコントロールを行なうドライバモデルについてシミュレーションにて検討を行った。

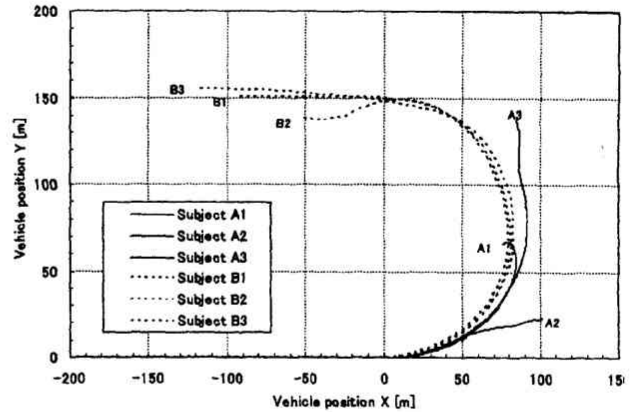


Fig. 6 Experiment result of running trajectory with driving simulator (V=100km/h)

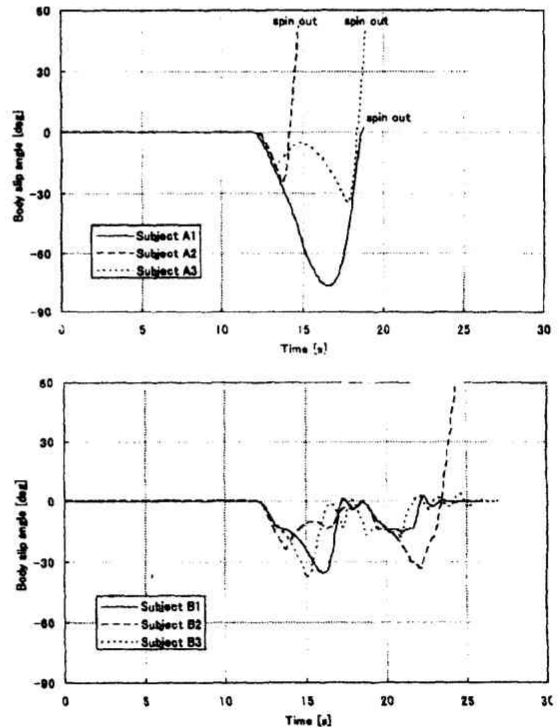


Fig. 7 Experiment result of body slip angle with driving simulator (V=100km/h)

4. 車両運動の記述

運動の解析では、図8に示される、操女性2自由度の車両モデルを用いる。

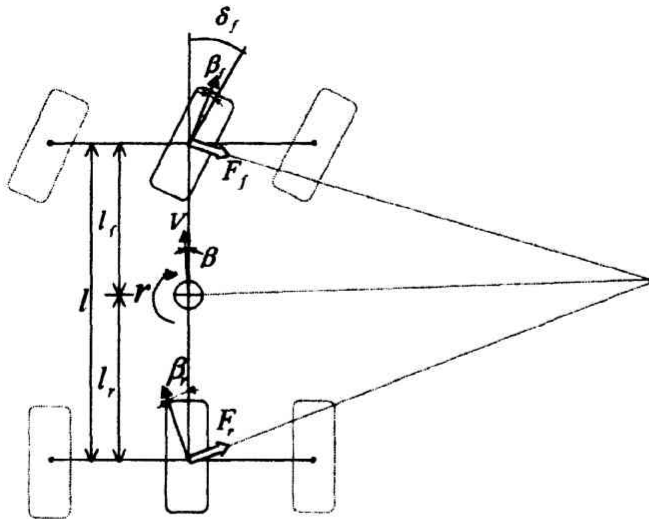


Fig. 8 Vehicle model (bicycle model)

運動方程式は、次のようになる。

$$mV(\dot{\beta} + r) = F_f + F_r \quad (1)$$

$$I\dot{r} = l_f F_f - l_r F_r \quad (2)$$

また、解析を容易にするために、左右輪のタイヤスリップ角を等しいと仮定すると、

$$\beta_f = \delta_f - \beta - l_f r / V \quad (3)$$

$$\beta_r = -\beta + l_r r / V \quad (4)$$

左右輪の上下荷重は、横加速度による荷重移動を考慮すると、

$$\left. \begin{aligned} W_{f-in} &= W_f / 2 - \Delta w_f \\ W_{f-out} &= W_f / 2 + \Delta w_f \\ W_{r-in} &= W_r / 2 - \Delta w_r \\ W_{r-out} &= W_r / 2 + \Delta w_r \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

前後輪のコーナリングフォース特性は、前後輪のスリップ角、及び、輪荷重の関数として求めている。タイヤのコーナリング特性は、Fialaの式を基本にした。

最大コーナリングフォースを越えた領域については、図9に示すような設定とした。

$$\left. \begin{aligned} F_i &= f(\varphi)(\mu W) \\ \text{ここで} \\ f(\varphi) &= \varphi - |\varphi| \varphi / 3 + \varphi^3 / 27 \quad (|\varphi| \leq 3) \\ \varphi &= K_i \tan \beta_i / \mu W \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

φ が、3以上においては、次のように設定した。

$$f(\varphi) = 1 - 1/87(|\varphi| - 3) \quad (|\varphi| > 3)$$

すなわち、図9に示すように、最大値を越えて、減少する特性と仮定した。

なお、 μ については、後輪の μ を前輪に比べ低下させ、後輪をドリフトし易い条件設定にしている。

そこでドライバの操舵モデルは、車体のスリップ角を、フィードバックするモデルとした。

旋回に入る時の、初期のステップ操舵角は、車体のスリップ角 β が10 deg以内の時点迄は、次式とした。

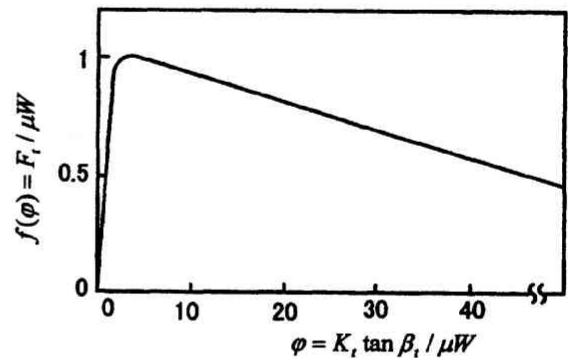


Fig. 9 Tire model

$$\delta_H = N \times k_0 \text{step}(t) \quad (|\beta| \leq 10) \quad (7)$$

車体スリップ角 β が、10 degを越えた、ドリフトコーナリング域に入った場合の、ドリフトアングルを維持する為に車両状態量をフィードバックする、ドリフトコントロール舵角は、下式とした。

$$\delta_H = N \times \{ (k_1 + \beta) \times k_2 + \dot{\beta} \times k_3 \} \quad (|\beta| > 10) \quad (8)$$

(注；車体スリップ角 β が、10 degを越えた時点以降は、(8)式による操舵を行うモデルとしている。)

ここで、 k_1 は、目標ドリフト角を左右する定数を示し、 k_2 は、車体スリップ角のフィードバック操舵のゲイン定数を示す。 k_3 は、車体スリップ角速度のフィードバック操舵のゲイン定数を示す。

すなわち、操舵モデルは、①目標ドリフト角、②車体スリップ角、そして、位相を進める微分的操舵を行なわせる項として、③車体スリップ角速度を、フィードバックするモデルとした。(このドライバの操舵モデルについての詳細は、参考文献(3)の既報を参照方)

ドリフトコーナリングから直進走行に移る時に、車両状態量をフィードバックして、ドリフト状態から直進に戻す、コントロール舵角は、次式とした。

$$\delta_H = N \times \{ \beta + (\dot{\beta} \times k_4) + \psi \} \quad (9)$$

ここで、 k_4 は、ドリフトコーナリングから直進走行に移る時における、車体スリップ角速度のフィードバック操舵の

ゲイン定数を示す。すなわち、直進走行に移る時の操舵モデルは、①車体スリップ角、②車体スリップ角速度、そして、直進方向の操舵項として

③ヨー角を、フィードバックするモデルとした。

また、5.3 項においては、旋回半径をコントロールするための車速コントロールもモデルとして加えた。

すなわち、ドライバがドリフト旋回軌跡を目標旋回コースに近づける為の、ドリフト旋回速度コントロールのモデルは、次式とした。

$$\left. \begin{aligned} \Delta V &= k_5 \times (R_0 - R) \\ \text{ここで、} R &= \sqrt{X^2 + (Y - 75)^2} \\ V &= V + \Delta V \end{aligned} \right\} (10)$$

ここで、操舵開始時の車両の重心位置の X, Y 座標は $X=0, Y=0$ とした (図10参照方)。目標旋回コースの旋回半径 R_0 は、75 m とした。 k_5 は、目標旋回コースに対する旋回半径方向の偏差 ($R_0 - R$) を車速変化 ΔV により補正する為のフィードバックゲイン定数を示す。すなわち、目標旋回コースに対する旋回半径方向の偏差を車速変化により修正ドリフトコントロールを行なうモデルとした。

5. ドリフトコーナリングシミュレーション結果

シミュレーションは直進状態より、ステップ状の操舵を加え、コーナーに進入し、旋回に入り、後輪がスキッドするので、カウンターステアを当て、そのまま、カウンターステアをコントロールして、ドリフトアングルを維持した旋回を行なわせ、コーナー脱出時に、直進に戻る操舵を行なわせている。5.1 項、5.2 項においては、旋回半径をコントロールする為の車速コントロールを行わず、操舵コントロールのみを行なわせた。5.3 項においては、目標旋回半径に対するズレを車速変化により修正ドリフトコントロールを行なう車速コントロールも加えた。

旋回コースの目標旋回半径は、75 m とした。

ドライバの操舵モデルの定数において、 $k_1=13$ 、 $k_2=1.5$ 、 $k_3=0.17$ 、 $k_4=0.2$ とし、5.3 項における旋回半径をコントロールする為の速度コントロールの定数は $k_5=0.4$ にて行った。

5.1 車速の違いによる、ドリフトコーナリング時の車両挙動の変化

図10は、車速 80, 85, 90 km/h 時のケースにおいて、ドリフトコーナリング中の旋回軌跡を示している (目標ドリフトアングル 20 deg 時)。図11は、上記3車速のドリフトコーナリング中の車両挙動の時系列変化 (操舵角、車体スリップ角、旋回横加速度、ヨー角) の状態を示している。図10は、ドリフトコーナリング時の車速 90 km/h 時は目標コース (旋回半径 75 m) より、外側に膨らみ、ドリフトコーナリング時の車速 80 km/h 時は目標コース (旋回半径

75 m) より、内側に巻き込むコース軌跡をたどっていることを示す。

すなわち、車速が異なっても、同一のドリフトアングル走行条件においてコーナリングの旋回横加速度は、同レベルとなるので (図11)、車速が高い場合は外に膨らむドリフトコーナリングとなることがわかった。

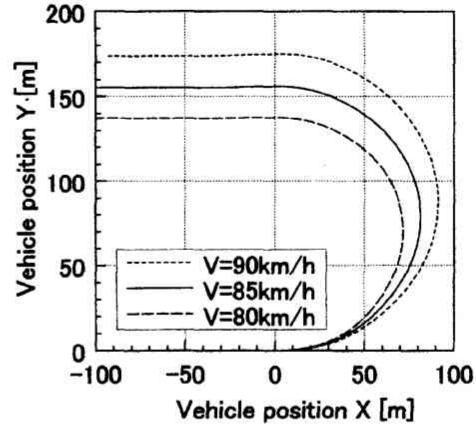


Fig. 10 Running trajectory

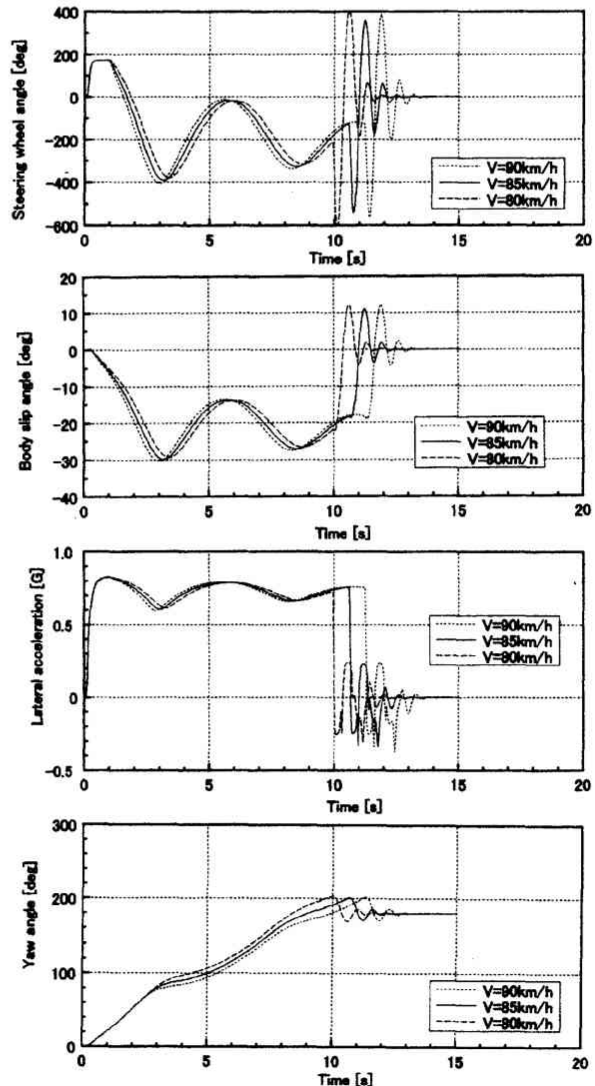


Fig. 11 Simulation results

5.2 ドリフトアングルの違いによる、ドリフトコーナリング時の車両挙動の変化

図12は、目標ドリフトアングル 20, 27, 33 deg 時のケースにおいて、ドリフトコーナリング中の旋回軌跡を示している(車速 85 km/h 時)。

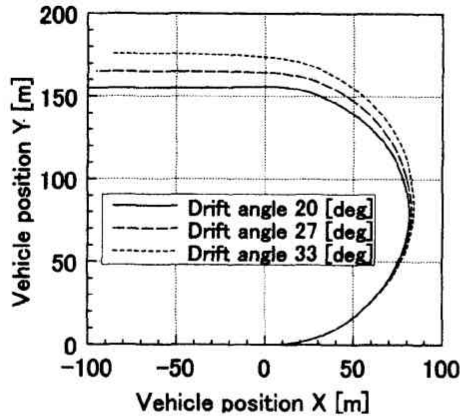


Fig. 12 Running trajectory

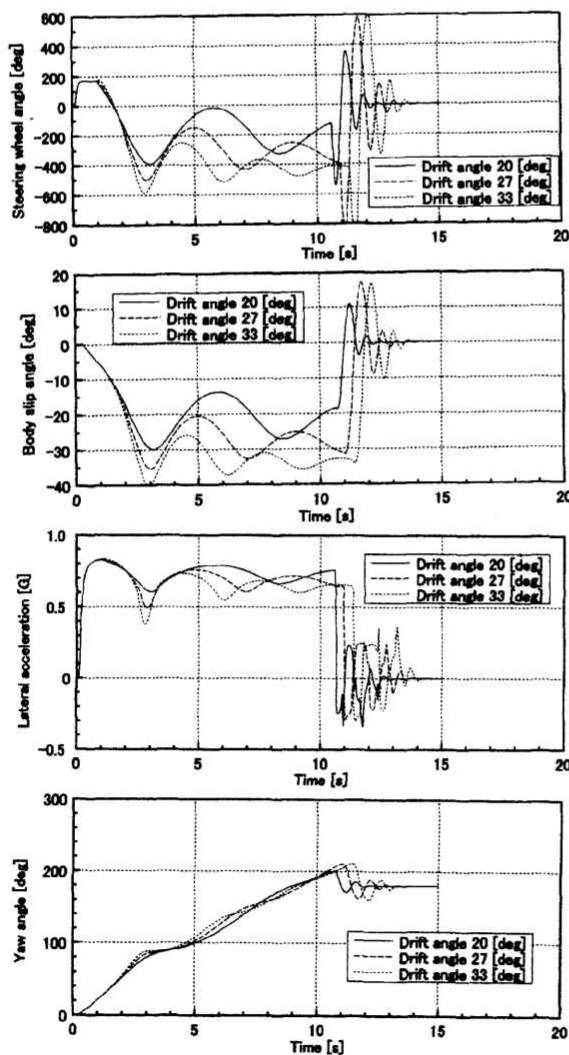


Fig. 13 Simulation results

図13は、上記3目標ドリフトアングルのドリフトコーナリング中の車両挙動の時系列変化(操舵角, 車体スリップ角, 旋回横加速度, ヨー角)の状態を示している。

図12は、ドリフトコーナリング時の目標ドリフトアングルが 20 deg より大きくなるにつれて (27, 33 deg 時), 目標コース(旋回半径 75m)より、外側に膨らむコース軌跡となることを示す。

すなわち、ドリフトアングルが異なると、同一の車速の走行条件でもコーナリングの旋回横加速度は、変化し、ドリフトアングルが大きくなるにつれて旋回横加速度はやや低下し(図13), 外に膨らむドリフトコーナリングとなる(図12)ことがわかった。

また、ドリフトアングルを大きくとるにつれて、コーナ脱出時に直進戻る際に車両挙動変化(車体スリップ角変動等)がやや大きくなる傾向にあることがわかった(図13)。

5.3 ドリフトアングルの違いによる、ドリフトコーナリング時の車両挙動の変化

図14は、車速 90km/h 時のケースと、車速 90 km/h でコーナーに進入し、速度をコントロールして目標旋回半径 75m に近づくようにコントロールした場合の、ドリフトコーナリング中の旋回軌跡を示している(目標ドリフトアングル 20deg 時)。図15は、上記2ケースのドリフトコーナリング中の車両挙動の時系列変化(車速, 旋回半径)の状態を示している。図14, 図15は、ドリフトコーナリング時の車速 90 km/h 時は目標コース(旋回半径 75 m)より、外側に膨らむが、車速 90 km/h でコーナーに進入しても、速度を少し落とすコントロール操作が行われると、目標コース(旋回半径 75 m)に近づくコース軌跡をたどれることを示す。すなわち、ドリフトコーナリング時は、ドリフトアングルを維持する為の操舵コントロールに加えて、車速をコントロールすることにより、目標コース(旋回半径 75 m)に沿うコントロールができることがわかった。

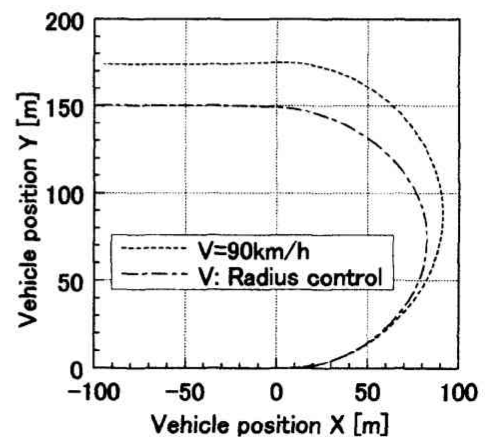


Fig. 14 Running trajectory

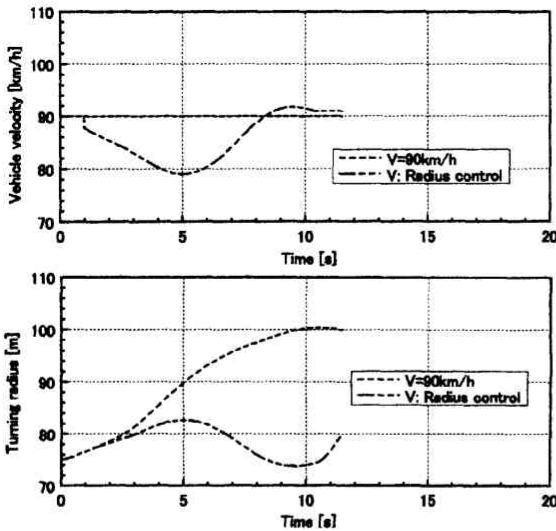


Fig. 15 Simulation results

5.4 コーナーを脱出して直進に戻る時の車両挙動変化

図16は、車速 85 km/h 時において、コーナーを脱出して直進に戻る時の、スリップ角速度のフィードバック操舵ゲイン定数 k_4 を 0 とした場合の、車両挙動の時系列変化（車体スリップ角）の状態を示す。直進に戻る時の、スリップ角速度のフィードバック操舵ゲイン定数 k_4 を 0 とした場合、車両挙動変化は、大きく、スピンの至っている。すなわち、ドリフトコーナリングから直進に戻る際は、フィードバック操舵では若干の遅れを伴うので、ドリフトコーナリング時と同様に、位相を進める、微分的操舵として、車体スリップ角速度も同時にフィードバック操舵していると判断できた。

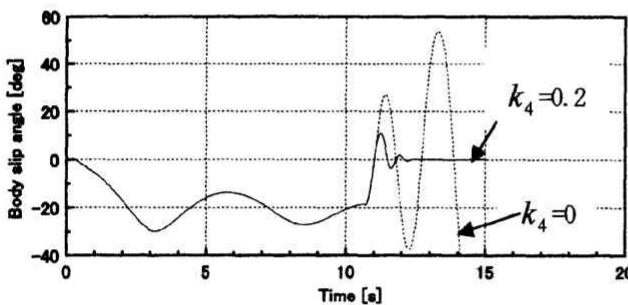


Fig. 16 Simulation results

6. 結 論

ドリフトコーナリング時のドライバーのコーナリング操作、

そして、そのモデル化について、一考察を行った。その結果、下記の結論が得られた。

(1) ドリフトコーナリング時のドライバーのコーナリング操作についてシミュレーション解析を行った結果、ドライバーは、ドリフトコーナリング時は、ドリフトアングルを維持するコントロールと、それに加え、車速をコントロールして旋回半径をコントロールしていることが把握できた。従って、ドリフト状態に入ってしまった時のドライバーアシストコントロールの制御の方向について、一方向性を見出すことができた。

(2) コーナーを脱出して、直進に戻るときの車両挙動のシミュレーション解析結果より、ドリフトコーナリング時から、直進状態に戻る際は、フィードバック操舵では若干の遅れを伴うので、ドライバーのフィードバックパラメータとして、車体スリップ角だけではなく、位相を進める微分的操舵として、車体スリップ角速度も同様にフィードバックしていると判断できた。

(3) ドライビングシミュレータを用いた走行実験により、Jターン走行実験時において、コースアウトせずに、狙った走行ラインをトレースするためには、車両姿勢コントロールできる、ドリフトコントロールが有効な手段であることが確認できた。

7. あとがき

本研究では、コース規定された、コーナリング条件下での、ドライバーのドリフトコーナリング操作について検討を行った。

今後は、これらの解析結果をもとに、より有効なドライバーアシストシステム等の検討に発展させたい。

参考文献

- 1) 天野也寸志, 名切末晴, 羽田昌敏, 土居俊一: 緊急時におけるドライバーの運転動作モデル, 日本機械学会論文集, C編, Vol.65, (1999), No.632, pp.3178-3185.
- 2) 菅沢 深, スピン時のカウンタステア操作のドライバーモデルの検討, 自動車技術会学術講演会前刷集, (2002), No.6-02, pp.7~10
- 3) 野崎博路, ドリフト走行時のドライバー操舵モデルと性能向上手法に関する一考察, 日本機械学会論文集, C編, Vol.68, (2002), No.675, pp.1586-1592.