

特集

ドライバの緊急操作挙動に基づく車両の予防安全性能解析

土居俊一，名切末晴，天野也寸志

Analysis of Active Safety Performances of Automobile Based on Driving Maneuvers in Emergent Situations

Shun'ichi Doi, Sueharu Nagiri, Yasushi Amano

要 旨

車両の安全性の確保は、現代交通社会の大きな課題の一つである。特に、予防安全性能の向上には、車両の操縦性や安定性等の基本運動性能はもとより、一般のドライバの操作能力に見合った運転のし易さが重要となる。ここでは、ドライバの操作挙動を含めた、いわゆる人間自動車系としての操作状態推定や運動性能評価が必要となる。そこで本研究では、運転環境模擬装置を用いて一般路走行時の障害物の飛び出しや路面環境の急変状況を想定し、一般ドライバの緊急時操作挙動を調査した。そして、操作データの解析よりドライバの操作挙動データベースを構築し、これらの挙動特性に基づきドライバの緊急操作を数学的に表現

するモデルを構築した。次いで、そのモデルと車両運動モデルを基にドライバ操作を含めた車両全体の予防安全性能評価を試みた。すなわち、緊急時の操作に個人差がどのように発生するかを検討し、ドライバの操作のタイミング遅れや操作量の過不足が車両の運動安定化を遅らせることが明らかとなった。さらに、旋回走行時の路面環境急変時を例に車両制御によるドライバへの操舵補助制御を想定し、計算機シミュレーションによりその車両運動安定化性能を試算した。また、その予測性能を緊急時を模擬する運転環境下でのシミュレータ実験により検証し、その効果を確認した。

Abstract

Vehicle safety is an urgent problem for decreasing traffic accidents. Almost all the causes of the accidents are related with human factors in driver's maneuvers; recognition, judgement and operation. Improving the active safety performance of vehicles as well as basic motion stability and controllability becomes more important for ordinary drivers. It is indispensable to discuss from the viewpoints of the vehicle performance and driver's behavior.

In this study, taking the driver-vehicle closed loop system into account, the active safety performances in emergent situations were analyzed, and evaluation methods were proposed. Under such a critical condition, ordinary driver's driving performances were

examined using a motion-type driving simulator. According to the driver's maneuvers, a database of driving operations under various emergent conditions was constructed, and a mathematical model of driver's operation was also derived from the database. The performance of the driver-vehicle system was predicted by computer simulations. The agreements between the maneuver predicted by the simulation and the experimental result obtained using the driving simulator were verified from the results in emergent situations. Supposing the sudden change of the road surface to a slippery situation, the effect of assistant control of steering was also estimated from both of the model simulation and experiment using a driving simulator.

キーワード

予防安全，人間自動車系，車両運動性能，ドライバモデル，状態推定，運転環境模擬装置

1. まえがき

近年の交通安全意識の高揚とともに、車両の予防安全性が強く求められている。予防安全性能の向上には、走る、曲がる、止るなどの基本運動性能はもとより、一般のドライバの操作能力に見合った運転のし易さが重要となる。ここでは、ドライバの操作挙動を含めた、いわゆる人間自動車系としての操作状態推定や運動性能評価が必要となる^{1~3)}。これらの課題については、従来より運転環境模擬装置（ドライビングシミュレータ）によるドライバの運転行動解析や、それらの結果を基にした運転操作の数学モデルによる検討が進められてきている^{4~12)}。

本研究では、まず様々な運転環境を設定したシミュレータを用いて一般のドライバについて種々の緊急時における運転操作挙動を調査した¹³⁾。次いでそれらのデータより、代表的な走行状況において操作挙動を記述し得るモデルを構築し¹⁴⁾そのモデルと車両運動モデルを基にドライバ操作を含めた車両全体の予防安全性能評価を試みた。すなわち、緊急時の操作に個人差がどのように発生するかを検討し、さらに車両制御によるドライバへの操作補助効果を試算、推定した。また、その予測性能を緊急時を模擬する運転環境下での実験より検証した。

2. 実験および解析方法

2.1 ドライバの運転操作挙動の計測解析法

実験に用いた運転環境模擬装置はFig. 1に示すような並進用のレールに沿った横方向の運動と運転席コックピットの下部に回転軸を持つロール運動を有する動揺付加型ドライビングシミュレータである。実験では、被験者の運転操作を信号として捉え、計算機内の車両運動モデルを計算し、キャビン後方に備えたプロジェクタにより計算機製作画像を前方視野として投影する。Fig. 2に走行画面の一例を示す。ここで、横方向の動きは、演算された車両運動の横方向変位に、またロール運動は、車両の速度と道路曲率から算定される横加速度に比例して制御した。

実験においてシミュレータ上に設定した運転環

境および走行タスクは、一般路走行時の緊急時の運転状況であり、設置障害物や飛び出し障害物を回避する場合のほか、種々の曲率からなるカーブ路旋回中において路面環境が急変し路面摩擦係数が低下するような状況を設定した。

Fig. 3(a), (b)にこれらの実験条件設定の様子を示す。障害物回避実験に用いたコースは、直線部とカーブからなる片側一車線の道路脇に図のような側壁を設け、その壁の蔭から車両を模擬した障害物が飛び出すように設定されており、ドライバの咄嗟の運転操作行動を計測する。また、カーブ路タスクは旋回中の車両不安定が顕著に発生する場合を想定し半径100mの右カーブ旋回路に約30mの弧状の低摩擦路面を設定した。いずれの場合も一般道路走行を想定し、被験者への指示車速

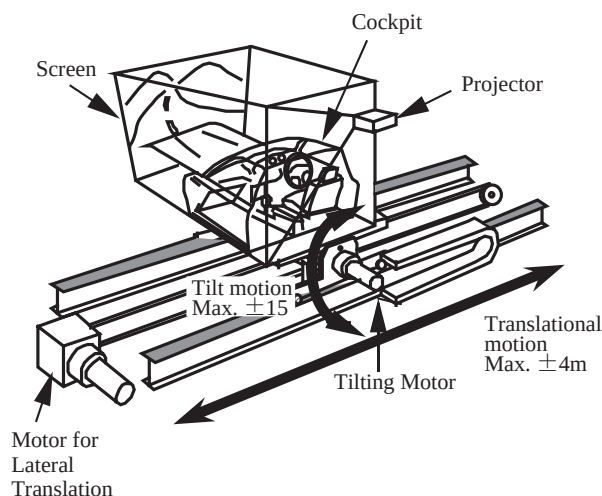


Fig. 1 Driving Simulator.



Fig. 2 Example of front view image for driver.

は60km/hとした。なお、被験者は、一般ドライバー101人で20代の若年層から50代の壮年層とからなりその20%は女性である。

2.2 ドライバの運転操作モデルの構成法

一般ドライバーの運転操作行動を与えられた走路形状に追従して運転する状況を基本として、次のようにモデルを構築した。すなわち、道路に沿った走行を普通に継続する状況はコース追従モデルとし、基本となる制御則として予測制御手法を用いた。ドライバーは将来の車の位置と運動挙動を予測して目標コースとの偏差を最小とするように操縦すると考え、予測偏差に対する積分制御を構成する。ここで、制御の評価関数は、目標コースに対する予測偏差と操舵修正量を最小にすることとなる。

次に、走行コース上に突然障害物が現われ、それを回避する操作行動を考える。突然の飛び出し等に対する緊急時の操作には制動操作が多く関与するので、車両の前後方向制御として緊急ブレーキ操作を含め、また横方向制御の操舵モデル側は障害物と自車の位置関係から予測時間を調整して回避行動を決定するモデルを構築した。すなわち、障害物に近いほど予測時間を短くすることになる。

更に、カーブ路を旋回走行する場合、特に旋回中に路面の摩擦係数の急変等の環境変化に遭遇する場合を考える。このような状況では、車両挙動の急変により車両が走行コースの外側に路外逸脱しそうになり、ドライバーはそれを防止しようと操舵するものの十分に修正ができずに車両が運動不

安定に到る状況が想定される。このような状況を模擬するため、走行コース逸脱予測地点と自車の位置関係から予測時間を調整することによりモデルを構成した。

上述のドライバーモデルと車両モデルにより、ドライバー操作特性を含めた車両の運動性能を解析した。ここで構成した人間自動車系としての運動性能評価の流れは、**Fig. 4**のようなブロック線図で表わされる。すなわち、対象とするタスクおよびドライバーと車両特性を想定し、次にタスクに関連する操作挙動データベースから設定パラメータを選定し計算機シミュレーションを実施する。なお、この計算に用いた車両モデルはドライビングシミュレータの車両運動計算に用いたものと同様なもので、車両のヨー、前後、横方向の運動と前後輪の回転からなる5自由度の簡易モデルである。

3. 実験解析結果

3.1 ドライバの運転特性

ドライビングシミュレータによる障害物飛び出し実験およびカーブ路旋回走行中に路面摩擦係数が急変する状況を想定する実験により一般ドライバーの運転挙動を計測し、ドライバーの咄嗟の運転操作の行動特性を解析した。

まず、ドライバーの反応特性等を整理し運転挙動のデータベースを構築した。**Fig. 5(a)**から**(f)**に、これらのデータベースの例として、a)操舵応答時間（障害物が飛び出してから操舵し始めるまでの

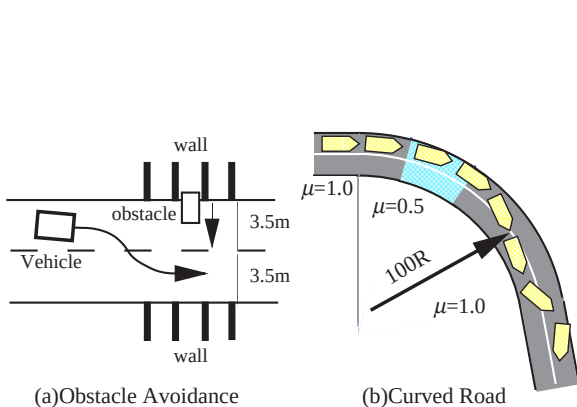


Fig. 3 Experimental situations for emergency avoidance.

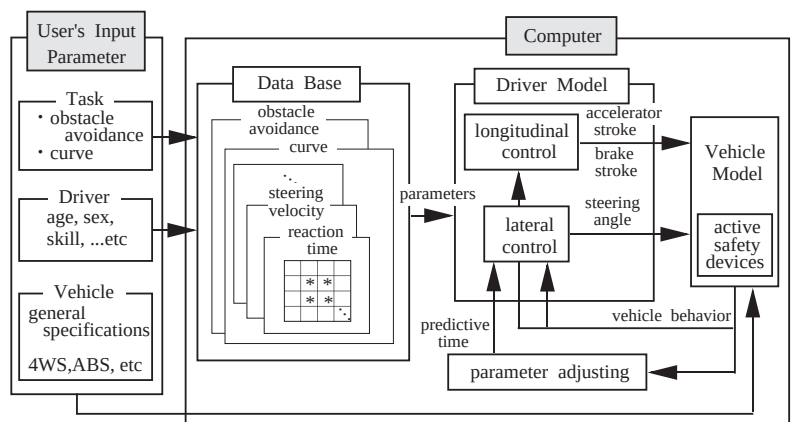


Fig. 4 Schematic diagram of driver-vehicle performance evaluation system.

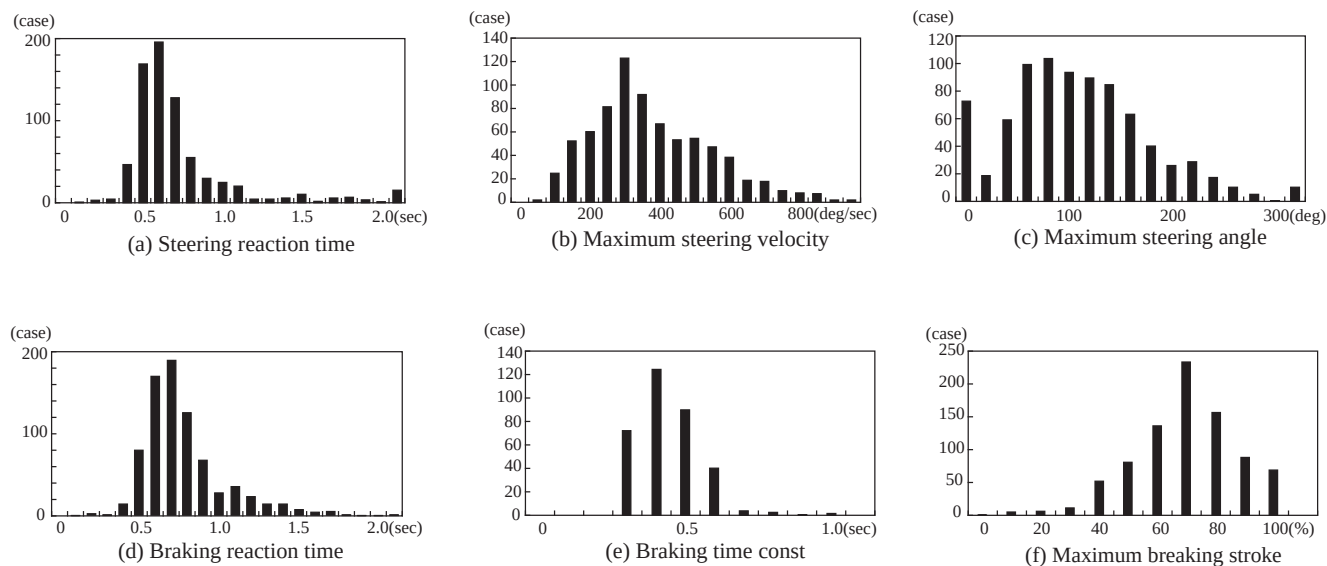


Fig. 5 Examples of driver's maneuvers.

時間), b)回避行動中の最大操舵速度, c)最大操舵角度およびd)制動反応時間(障害物が飛び出してから制動行動を始めるまでの時間), e)制動操作の時定数およびf)最大制動ストロークの頻度分布を示した。また, **Table 1**にこれらのデータから求めた一般ドライバの操作特性のパラメータの平均値の一例を示す。表中の左右欄に操作形態別に整理して, 被験者の操作行動を操舵行動と制動行動に分けて示した。また, 行動パターンを操舵と制動の複合操作とそれぞれの単独操作に分け, さらに回避成功と非成功に分けて示した。これらの例に示すように, 回避行動の分析により飛び出し障害物の回避あるいは回避不成功でのドライバの反応時間の差, 回避行動の差, 例えば操舵と制動および複合操作での反応時間, さらにここでは割愛したが被験者の年齢層別の操作行動の特性差等が明らかとなった。

3.2 ドライバの緊急操作の特徴

ドライバの緊急操作行動の計測を通じてその特徴を観察した。**Fig. 6**に, カーブ路旋回中の路面 μ 変化後の操舵開始までの操舵反応時間とそのときの最大操舵速度の分布を示した。図より, カーブ進入速度が被験者によって一定でないこともあり, 反応時間は0.7秒を操舵速度は400度/秒を中心に分布している。この例のように一般ドライバの操作挙動にはかなり個人差が大きいことがわか

Table 1 Characteristics values of driver's maneuvers.

modes of maneuver	success /fail	steering maneuvers			braking maneuvers		
		τ sec	δ max	δ max	τ b	Tb sec	Bs %
total panel's operations	all	0.72	355	104	0.74	0.39	65
	s	0.73	372	121	0.69	0.36	67
	f	0.70	333	85	0.78	0.41	63
case of associated operation	s	0.70	369	132	0.70	0.37	64
	f	0.72	316	101	0.76	0.40	62
case of single operation	s	0.55	378	102	0.63	0.36	80
	f	0.59	421	111	0.80	0.42	65

τ : Steering reaction time (sec) τ b : Braking reaction time (sec)
 δ max : Maximum steering velocity (degree/sec) Tb : Braking time const.(sec)
 δ max : Maximum steering angle(degree) Bs : Braking stroke(%)

る。ここでは, 旋回実験で明らかとなった一般ドライバの陥りやすい操作状況について述べる。大別すると2つのケースで, 車両が走行コースの外側にふくらむ状態と前後輪の路面 μ の変動が生じ, 極端な場合に走行不安定に陥る状態である。前者の状態では, 一般にハンドルを切り込み過ぎ, 低 μ 部分を通過後車両挙動が大きく変動するのでその変動に対応できずに発散する傾向が著しい。また, 後者の状態では, 走行コース内側に巻き込むような操舵をする場合とそれを押さえるように操作し走行コース外側にコース逸脱する場合, さ

らに切り返して発散する場合の3パターンに分けることができた。

4. 解析結果の考察と検証

4. 1 ドライバ操作の個人差の解析

ドライバの操作の個人差は、データで見るように緊急時であってもかなりばらつくことが分かった。そこで、上記のデータを基にドライバモデルと車両モデルによりドライバ操作特性を含めた車両の運動性能を解析した。以下にその例を示す。

まず、障害物回避の状況を想定した操舵と制動の複合操作による緊急回避の例を考える。走行車速60km/h、障害物までの距離を40mと仮定し、さらにドライバは平均以下の操作能力の人を仮定する。すなわち、操舵応答は普通以下とし、最大操舵速度が200度/秒と想定し、操舵応答時間と制動応答時間をパラメータとして制動操作量として制動ペダルの最大ストロークを40、70、90%の3種類について障害物回避性能を調べた。Fig. 7(a), (b)および(c)にそれぞれの条件下でのシミュレーション結果を示した。これより、操舵反応時間が大きく遅い操舵では、車両の横移動量が少なく障害物を回避することができない。また、操舵反応時間が小さく速い操舵であっても制動反応時間が大きく操作が遅れると、車両の横移動量が大きくなり過ぎて路外に逸脱することが分かる。そして、次に制動操作について比較すると、制動ペダルを強く踏み込むことができるほど障害物回避が容易となることが分かる。これらの結果からドライバへの制動操作補助により車両の制動性能を充分に引き出す効果があることが予測される。

次に対象とした緊急時想定タスクは、進入速度70km/hで半径100mの右カーブ路旋回走行中において路面環境

が急変し路面 μ が1.0から0.5に低下する場合である。Fig. 8(a), (b)に、カーブ路旋回中の操舵角の時間変化と車両走行軌跡を示した。低 μ 路進入速度が大きいので車両がコース外側にふくらむ状態を図中Aに示す。ここで、ドライバのコース追従性を高めるために予測時間を短く設定すると、図中Bに示すように追従性は高くなる反面、安定余裕が劣化し人間自動車系として発散することがわかる。

次に、後輪の路面 μ が急変し0.5程度になった場合を想定し、 μ が変化後ドライバが操舵を開始するまでの時間を変えてドライバの操作の個人差を比較した。Fig. 9(a), (b)にその結果を示した。図中a, bおよびcの各パターンに応じて人間自動車系としての車両不安定が生じることが表現できる。この結果は、前述の実験結果とも対応してい

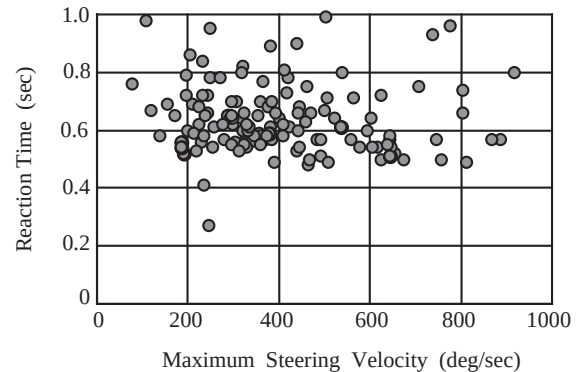


Fig. 6 Reaction time and steering velocity on curved road management.

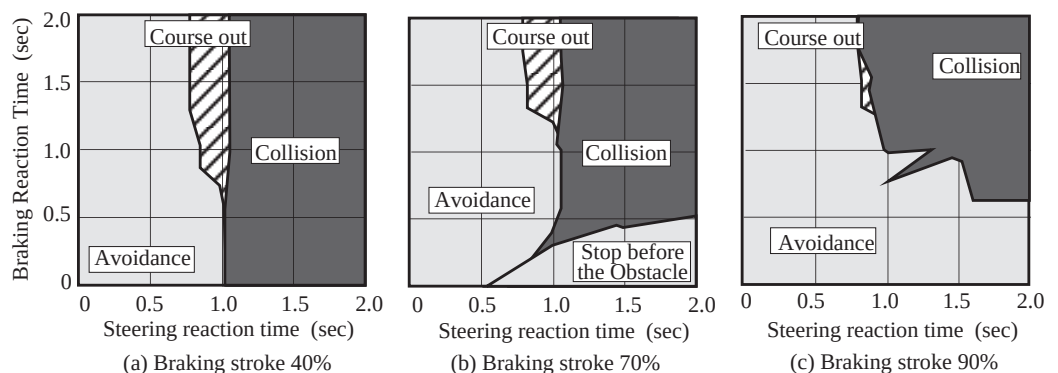


Fig. 7 Obstacle avoidance performances due to driver's maneuvers.

る。そこで、実験における車両の姿勢と操舵のタイミングの関係を検討した。路面が急変しそれに対応して操舵し始める反応時間とその時点での車両横すべり角を比較すると **Fig. 10** に示すようになった。ここで、操舵反応時間のばらつきは少なく、車両のすべり角が少ない場合には車両を安定化できるが、すべり角が増すに連れ、車両の不安定が

発生し上記の a, b, c のパターンの順に図中のばらつき範囲が大きくなっていることが分かる。

4.2 ドライバへの操作補助効果の推定

前節のドライバの操作を含めた車両の予防安全性能の評価解析を基にドライバへの支援の方策を考えると走行環境の変動に対して安定な対応を促し、かつ適切な時期に素早い対応を促すことが重

要となる。カーブ路旋回中の環境変動時操作においては、カーブへの進入を含めた早期のドライバへの注意喚起とドライバへの操作支援としての操舵補助制御が考えられる。

ここで、操舵制御による補助特性を車両に付与した場合を想定してその効果の推定を試みた。**Fig. 11(a), (b)** に、制御の無い場合 X、微分操舵、すなわち操舵速度項の付加制御 Y および車両のヨーレートフィードバック制御 Z を付与した場合のドライバ操舵角と前輪操舵角、およびその時の車

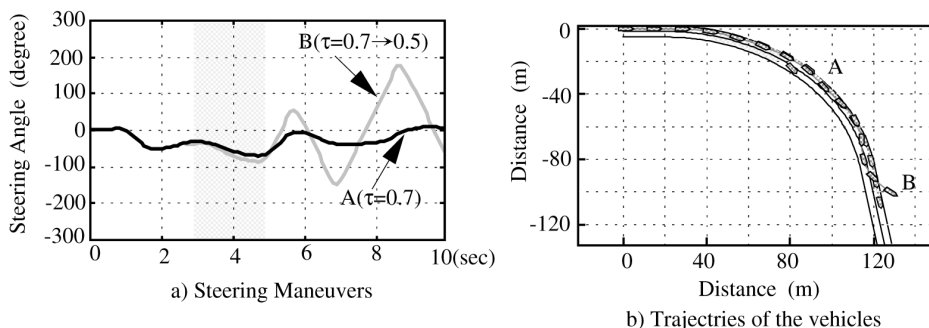


Fig. 8 Simulation results for predict time change.

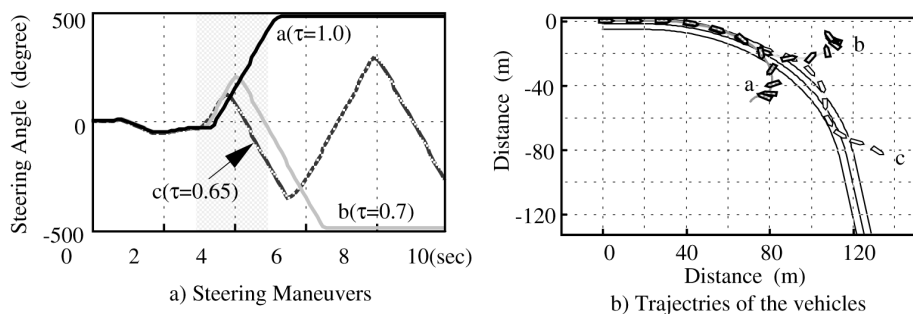


Fig. 9 Simulation results for different predict time.

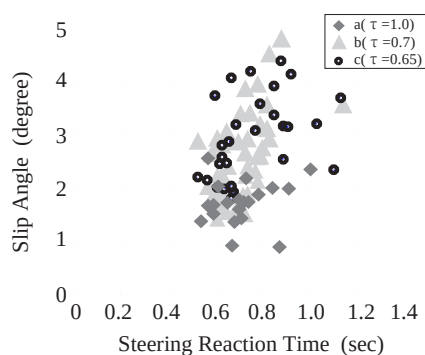


Fig. 10 Steering maneuver and slip angle of vehicle.

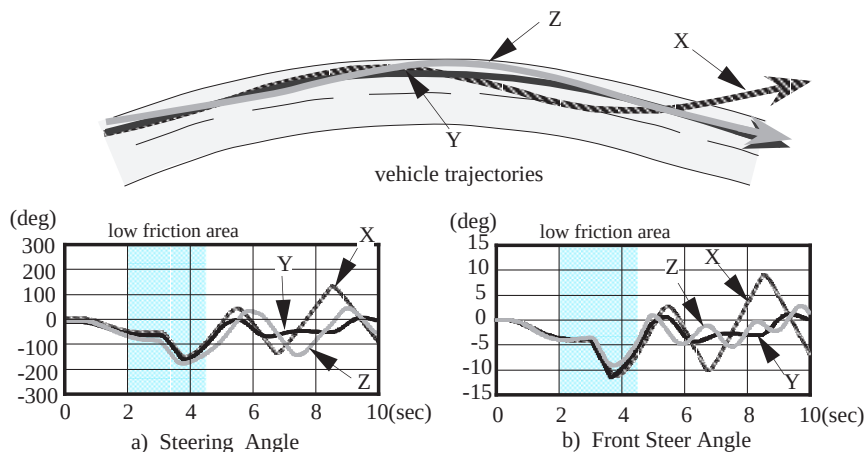


Fig. 11 Simulation results for steering control.

両走行軌跡を示した。いずれの制御においても低 μ 領域進入後の操舵のタイミング遅れが無く、制御の無い場合に生じる低 μ 領域通過後の操舵量が増大し発散するのを防止していることがわかる。それぞれの予測走行軌跡をみると走行コース内に留まる程度であることも明らかである。

次に、ほぼ同様な制御特性をドライビングシミュレータ内の車両モデルに組み込み、模擬環境でのドライバの操舵操作とその操作より演算にて求められる走行軌跡をFig. 12に示した。両者は予測結果とほぼ同様な傾向を示している。また、この実験の被験者の操作性に関する所見からもこれらの補助制御効果が期待できることが明らかとなった。

5. まとめ

ドライバの緊急時の操作挙動の計測を基に操作行動モデルを構築しそのモデルを用いた計算により、人間自動車系としての車両性能解析を試みた。以下に検討結果をまとめる。

1) 運転環境模擬装置を用いて、一般路走行時の緊急状態として障害物の飛び出しや路面環境の急変状況を想定し一般ドライバの操作挙動を調査した。そして、操作データの解析より一般ドライバの操作挙動データベースを構築した。また、これらの挙動特性に基づきドライバの緊急操作挙動を数学的に表現するモデルを構築した。

2) 構築したドライバ操作行動モデルと車両モデ

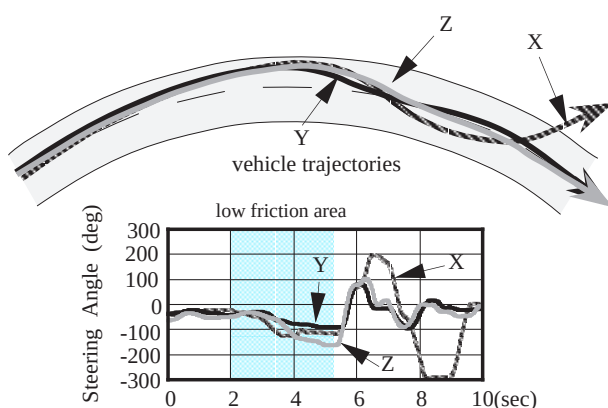


Fig. 12 Experimental results for steering control.

ルからなる計算機シミュレーションにより、緊急障害物回避およびカーブ路旋回走行時において路面摩擦係数が急変するような緊急状態を想定し、人間自動車系としての車両運動特性を解析した。その結果、ドライバの操作のタイミング遅れや操作量の過不足は車両の運動安定化を遅らせることがわかり、人間自動車系からの検討が有効になることが明らかとなった。

3) 車両の予防安全のための方策としてドライバへの操作支援方法を検討した。すなわち、旋回走行時の路面環境急変時を例に、操舵補助制御を想定しその車両運動安定化性能を試算し、その効果が大きいことを示した。さらに、その予測効果をシミュレータ実験により再現し検証した。

本研究の今後の課題としての車両の更なる予防安全性能の向上には、本研究において実施したドライバの行動特性からのアプローチに加え、ドライバの認知判断特性、例えば前方視野における注意特性、体感に基づく咄嗟の判断行動特性などの運転時の人間特性の理解をさらに深める必要がある。

参考文献

- 1) 伊藤: "予見制御系における人間の追従機能について" 電気学会論文誌C, **95**-2(1975), 30
- 2) 原田: "人間-自動車系の操舵安定限界と操縦性安定性評価", 日本機械学会論文集C, **58**-546(1992), 102
- 3) Rompe, K., et al.: "Comparison of the Braking Performance Achieved by Average Drivers in Vehicles with Standard and Anti Wheel Lock Brake Systems", SAE Tech. Pap. Ser., No.870335, (1987)
- 4) 福井, 林: "ドライビングシミュレータを利用した人間-自動車系の解析", 自動車技術, **42**-3(1988), 342
- 5) 吉本: "予測を含む操舵モデルによる人間自動車系のシミュレーション", 日本機械学会誌, **71**-596(1968), 1181
- 6) Reid, L. D.: "A Survey of Recent Driver Steering Behavior Models Suited to Accident Studies", Accid. Anal. & Prev., **15**-1(1983), 23
- 7) 安部: "ドライバの制御動作モデルの動向", 自動車技術, **38**-3(1984), 293
- 8) 永井: "マン・マシン・システムの理論", 自動車技術, **39**-5(1985), 486
- 9) Allen, R. W., et al.: "Analysis and Computer Simulation of Driver/Vehicle Interaction", SAE Tech. Pap. Ser., No.871086, (1987)
- 10) Riedel, A., Gnadler, R.: "A Model of Real Driver for Use

in Vehicle Dynamics Simulation Models", Proc. FISITA 13, 905102, (1990)

- 11) 藤岡："神経回路網を利用した運転者モデルの研究", 自動車技術会論文集, **22-2**(1991), 69
- 12) 景山, 渡辺："ニューラルネットワークを用いた人間・自動車系のモデル化について", 日本機械学会論文集C, **59-563**(1993), 247
- 13) 名切ほか3名："緊急時における一般ドライバの回避挙動解析", 自動車技術会学術講演会前刷集**962**, 9633306, (1996), 161
- 14) 天野ほか2名："障害物回避時のドライバモデルの一構成法", 日本機械学会第4回交通物流部門大会講演論文集, No.95-36(1995), 160

著 者 紹 介



土居俊一 Shun'ichi Doi

生年：1947年。

所属：人間工学研究室。

分野：車両運動・予防安全および人間機械系解析分野の研究。

学会等：日本機械学会，計測自動制御学会，自動車技術会会員。

1985年 IR100選入賞。

1993年 計測自動制御学会技術賞武田賞受賞。

工学博士。



名切末晴 Sueharu Nagiri

生年：1956年。

所属：人間工学研究室。

分野：予防安全に関する研究。

学会等：自動車技術会会員。



天野也寸志 Yasushi Amano

生年：1957年。

所属：人間工学研究室。

分野：人間機械系及び車両制御に関する研究。

学会等：計測自動制御学会，日本機械学会，自動車技術会会員。

工学博士。