

車載電子装置の信頼性評価手法の開発

伊藤 紳一郎* 田中 信壽* 松村 英樹* 児島 亨* 廣瀬 敏也**

Evaluation of Reliability for Automotive Electronics

by

Shinichiro Itoh* Nobuhisa Tanaka* Hideki Matsumura* Tooru Kojima* Toshiya Hirose**

Abstract

自動運転も視野に入れた安全運転支援システムの実用化時代を迎え、自動車に搭載される電子制御装置もさらに高度化・複雑化するとともに各装置が相互に連携し合って作動するようになってきている。また、自動車の電子装置に占めるソフトウェアの比率も高くなってきており、かつ、ブラックボックス化の傾向がさらに強まってきている。

このため、コンピュータプログラムのミスが発生する可能性も必然的に高まることとなり、自動車の出荷までにそれを検知して修正する必要があるが、膨大で複雑な制御を行うプログラムにおいては、プログラムミスを十分に排除できないまま出荷されている事例も多いと考えられ、制御プログラムの不適切が原因とされたりコール事例が増加傾向にある。

そこで、第三者的立場から車両挙動を客観的に把握する手法を構築することにより、プログラムミスを含めて車載電子装置の信頼性を評価する方法について検討を実施した。

評価手法の開発にあたっては、自動車メーカー等において車載電子装置の開発時に一般的に使用されているHILS (Hardware-In-the-Loop Simulation) 等のように個別の詳細な制御内容や入出力インターフェースの詳細情報が必要となるものではなくて、車載電子装置をブラックボックスのまま取り扱い、車両全体として評価できるものをめざすこととした。

1. まえがき

自動運転も視野に入れた安全運転支援システムの実用化時代を迎え、自動車に搭載される電子制御装置もさらに高度化・複雑化するとともに各装置が相互に連携し合って作動するようになってきている。また、自動車の電子装置に占めるソフトウェアの比率も高くなってきており、かつ、ブラックボックス化の傾向がさらに強まってきている。

このため、コンピュータプログラムのミスが発生する可能性も必然的に高まることとなり、自動車の出荷までにそれを検知して修正する必要があるが、膨大で複雑な制御を行うプログラムにおいては、プログラムミスを十分に排除できないまま出荷されている事例も多いと考えられ、制御プログラムの不適切が原因とされたリコール事例が増加傾向にある。

そこで、第三者的立場から車両挙動を客観的に把握する手法を構築することにより、プログラムミスを含めて車載電子装置の信頼性を評価する方法について検討を実施した。

評価手法の開発にあたっては、自動車メーカー等において車載電子装置の開発時に一般的に使用されている HILS (Hardware-In-the-Loop Simulation) 等のように個別の詳細な制御内容や入出力インターフェースの詳細情報が必要となるものではなくて、車載電子装置をブラックボックスのまま取り扱い、車両全体として評価できるものをめざすこととした。

以下、その評価手法について記載する。

2. 自動車の電子制御に関する課題整理

自動車の電子制御が進展することにより危惧されるリスクについて、一般的にまとめてみると次のような点をあげることができる。

まず、ハードウェア的には、制御内容が非常に複雑となってきたことから、複雑な論理回路設計が求められ、論理回路設計における間違いの混入があげられる。また、環境耐久性や電磁耐久性の不足等が原因となる誤作動、劣化、故障による機能の喪失の可能性も考えられる。

次に、ソフトウェア的には、当初の想定外の事象であったために機能が組み込まれていない場合や想定はされていたが対処方法を間違えたなどの論理的な間違いの可能性が考えられる。また、論理設計図からコンピュータが作動する機械語への変換過程におけるコーディングミス等も考えられる。

これらリスクの特徴としては、まず、常時或いは

頻繁に発生する事象は開発時の検証で容易に検出することが可能であると考えられ、特殊な条件の組合せのときのみ発生することが多いと考えられる。

次に、システムがブラックボックス化した上に大規模化していることにより外観では動作状況がわからず、市場において問題が発生したとしても再現が非常に困難な場合も多く、現象の特定、原因の究明に時間がかかると考えられる。

さらに、故障等が発生した場合においても危険な状態とならないようにするフェールセーフ機能が搭載されていることが多く、市場における問題が顕在化せずに対応が遅れる可能性も考えられる。

3. 実車走行模擬装置の開発

実車ベースでの様々な走行性能を検証するためには、通常は完成車を使用してテストコース上で様々な走行条件を設定してテスト走行を繰り返すことになる。ただし、テストコース上の走行では、設定できる走行条件が限定されてしまう上に危険を伴う可能性がある。

そこで、台上走行において路上走行を模擬するための実車走行模擬装置を開発することとした。

一般的に台上走行を行うにあたっては、シャシダイナモメータを使用するが、シャシダイナモメータは車両の前軸、後軸毎或いは4輪毎に設定したローラの上に車両を乗せ、ローラには車両の慣性質量と等価な慣性質量を機械的或いは電氣的に設定するために、定常路面上の走行は比較的簡単に再現できるものの走行途中でスリップ率が変化するような路面や左右でスリップ率が異なるような路面での走行などを再現するのは難しい。

これの解決方法としては、極限まで慣性質量を低下させたローラを低慣性かつ高速応答可能な電動機で制御する方法が考えられるが、現状の技術ではそこまで対応させることは難しい。

そこで、4本の車輪の車軸と電動機を直結することにより、ローラ及び車輪の慣性質量をなくすことにより全体の慣性質量を極限まで低下させることとした。

開発した実車模擬装置の構成を図3-1に、タイヤ型軸受の外観を図3-2に示す。

図3-1に示すように、各車軸に電動機及びトルク計を直結し、車軸に発生するトルクを計測しつつ電動機で駆動することとした。車輪部分では車両の重量を支える必要があることから、図3-2に示すよ

うなタイヤ型軸受を開発し、車軸と電動機は一体となって回転し、車輪は静止したままで車両の重量を支える構造とした。

この構造により、各輪ごとに路面摩擦係数、スリップ率等を任意のタイミングで設定することが可能となっており、タイヤの性能評価はできないものの、車軸までの車両挙動を模擬することができるものと考えられる。

4. 実車走行模擬装置による台上走行実験

開発した実車走行模擬装置の性能を評価するために、実車走行模擬装置による台上走行実験とテストコースにおける走行実験を実施し、両者の結果を比較することとした。

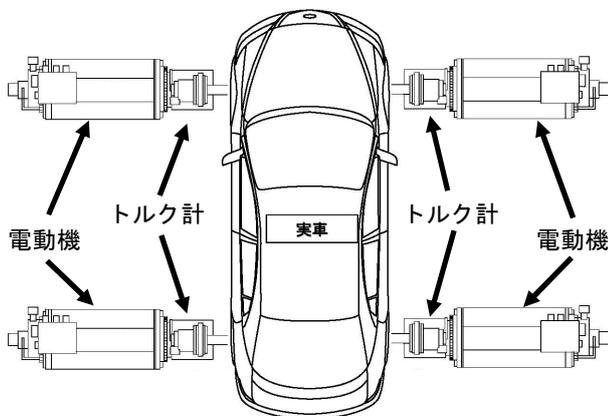


図3-1 実車走行模擬装置の構成



図3-2 タイヤ型軸受

表4-1 試験車両の主な諸元

項目	諸元値
全長×全幅×全高	4460mm×1745mm×1490mm
ホイールベース	2700mm
質量	1350kg
エンジン排気量	1.8ℓ
エンジン最大出力	73kW
モータ最大出力	60kW
駆動用蓄電池	ニッケル・水素電池

実験に使用した車両は、表4-1に示すような諸元を持つ電気式ハイブリッド自動車である。

4.1 測定条件

測定項目としては、エンジン回転数、駆動用蓄電池の充放電電流、2つの発電機兼用電動機の電流、ブレーキ踏力、4輪のブレーキ液圧とした。

ブレーキ液圧は、各車輪に近い部分のブレーキ配管に液圧センサを取り付けて測定し、ブレーキ踏力は、ブレーキペダルに踏力計を取り付けて測定した。また、蓄電池や電動機の電流は、クランプ式電流計により測定した。

車両の走行条件としては、ブレーキ踏力一定で減速中に濡れたマンホール等の滑りやすい路面（以下、「低 μ 路」という。）が出現したと想定して、1mの長さの低 μ 路を設定した。

パラメータとしては、前輪が低 μ 路に突入するときの速度を20、30、40、50、60km/h、前輪が低 μ 路に突入するときの減速度を1、2、3、4m/s²となることを目標とし、低 μ 路突入後はブレーキ踏力を一定に保つようにした。

記録した項目として、4輪に発生するトルク及び4輪の回転数については、実車走行模擬装置のセンサ出力を記録した。また、車体加速度、車体速度、走行距離については、実車走行模擬装置内のモデルで計算する仮想の値を記録するとともに四輪摩擦係数については、実車走行模擬装置で設定した値を記録した。

運転者の操作は、指示された減速度でブレーキ踏力一定で減速することのみとし、定められた速度になった時点から1mの長さの低 μ 路を通過することは実車走行模擬装置のプログラムにより自動的に設定した。低 μ 路の摩擦係数は0.1に設定した。

実車走行模擬装置による台上走行実験の実施状況を図4-1に示す。



図4-1 実車走行模擬装置による台上走行実験

4.2 測定結果

図4-2に実車走行模擬装置による台上走行実験により取得されたデータの1例を示す。

この例は、運転者が50km/hで定速走行の状態から減速度 2m/s^2 一定で減速操作を行い、車体速度が20km/hになった時点で実車走行模擬装置が摩擦係数0.1、長さ1mの低 μ 路を設定し、運転者が低 μ 路突入後も低 μ 路突入時と同じ踏力でブレーキを踏み続けたものである。全ての実験において、低 μ 路突入時の車体速度と減速度をパラメータとして変化させながら測定を実施した。

この図のデータ例からは、次のようなことが読み取ることができる。

- ・制動開始から低 μ 路突入まで(-4秒程度~0秒)は、制動開始とともに電動機2及び蓄電池に大きな電流が流れているものの4輪ともブレーキ液圧は発生していない。このことから、車両の運動エネルギーが電動機2により電気エネルギーに変換されて蓄電池に充電される回生ブレーキが作動していることがわかる。
- ・低 μ 路通過後も車両は引き続き減速しているものの電動機や蓄電池に大きな電流は流れず、4輪ともブレーキ液圧が発生している。このこと

から、機械式のブレーキが作動していることがわかる。

- ・低 μ 路突入後から停止までは、約7秒間走行し、その間の走行距離は約21mである。
- ・運転者は、低 μ 路突入時までは 2m/s^2 の減速度、低 μ 路突入後は低 μ 路突入時のブレーキ踏力40Nを維持し続けていることがわかる。

低 μ 路突入時の減速度(1、2、3、 4m/s^2)毎の低 μ 路突入時における速度と低 μ 路突入時からの停止距離との関係を集計したものを図4-3に示す。

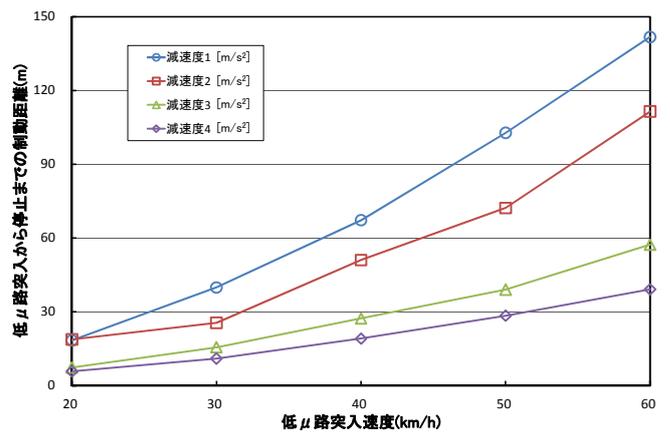


図4-3 低 μ 路突入時からの停止距離の集計結果

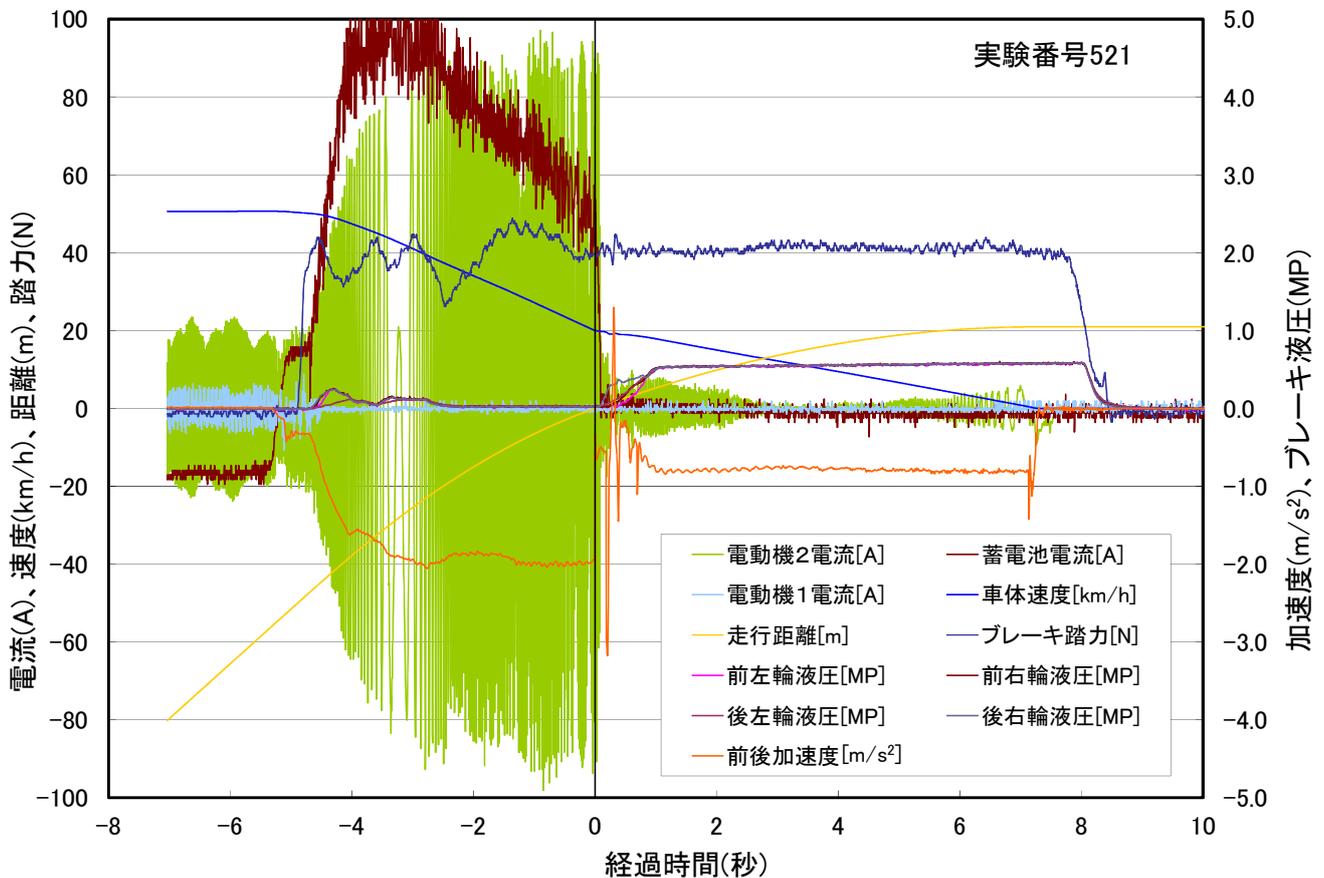


図4-2 台上走行実験結果の例

5. テストコースにおける走行実験

5.1 測定条件

測定項目としては、エンジン回転数、駆動用蓄電池の充放電電流、2つの発電機兼用電動機の電流、ブレーキ踏力、4輪のブレーキ液圧については、実車走行模擬装置による台上走行実験時と同じとした。

テストコースにおける走行実験においては、これらに加えて、車体速度及び走行距離は、光学式及びGPS式の非接触車速計を使用して測定した。また、加速度計で前後方向の加速度を測定した。さらに、ABS車輪速センサから分岐してパルス信号を取り出して車輪回転数を、六分力計を右側の前後輪に取り付けて車輪にかかる力及びトルクを測定した。

測定に先立って、低 μ 路として図5-1に示すよ

うな進行方向の長さ1mの鉄板を敷き、図5-2に示すように散水することによりABSが作動する摩擦係数を設定するとともにそれ以外の場所では散水してもABSが作動しないことを確認した。

低 μ 路の突入時の速度及び減速度を指示した値に設定する必要があることから、専門のテストドライバーに十分な練習走行をさせてから測定を実施した。

5.2 測定結果

図5-3にテストコースにおける走行実験により取得されたデータの1例を示す。

この例は、運転者が70km/hで定速走行の状態から減速度 3m/s^2 一定で減速操作を行い、低 μ 路突入時において走行速度が30km/hになるように走行し、運転



図5-1 低 μ 路の設定状況



図5-2 走行路の散水状況

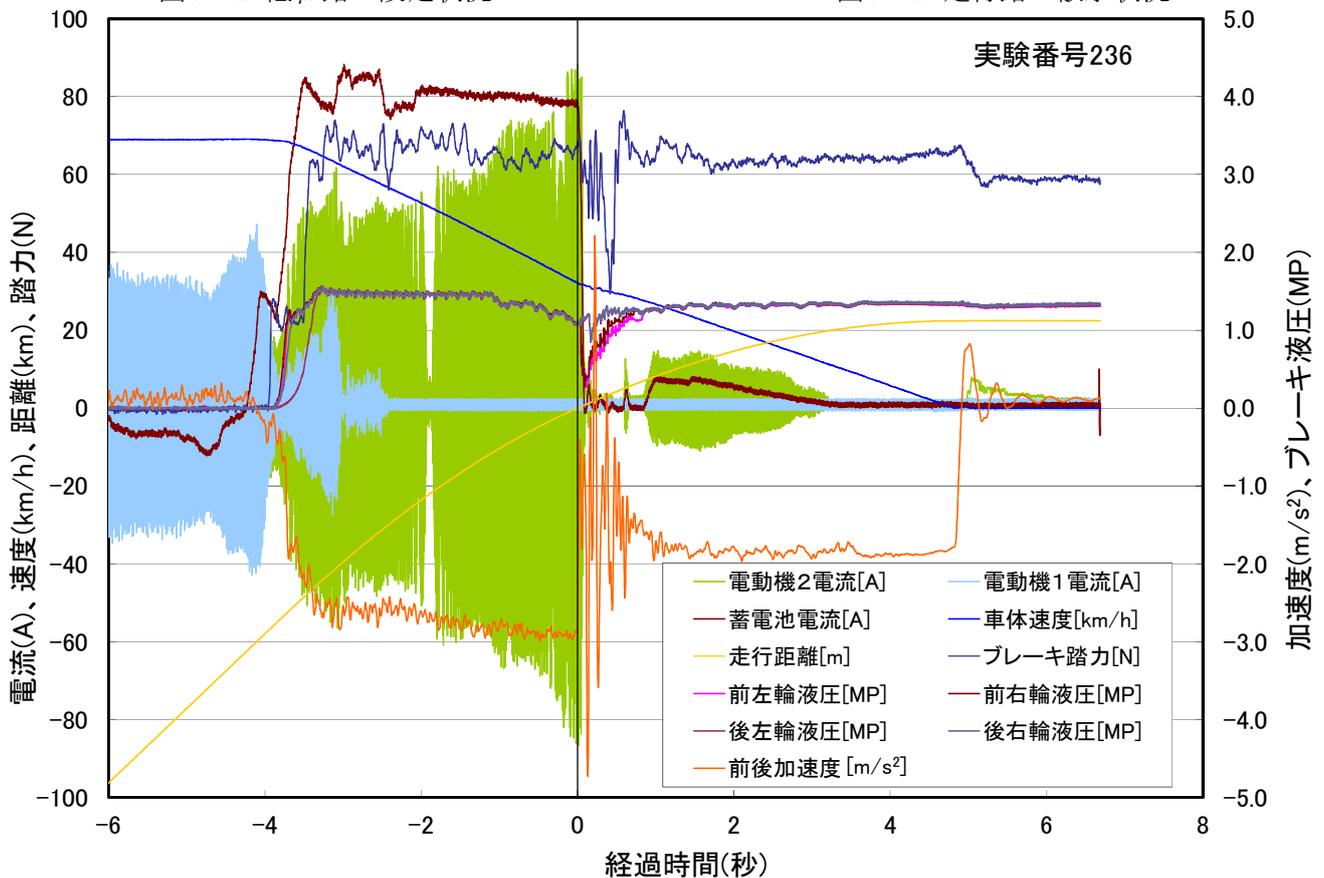


図5-3 テストコース走行実験結果の例

者が低 μ 路突入後も低 μ 路突入時と同じ踏力でブレーキを踏み続けたものである。全ての実験において、低 μ 路突入時の車体速度と減速度をパラメータとして変化させながら測定を実施した。

この図のデータ例からは、次のようなことが読み取ることができる。

- ・制動開始から低 μ 路突入まで（-4秒程度～0秒）は、制動開始とともに電動機2及び蓄電池に大きな電流が流れているとともに4輪とも1.5MP程度のブレーキ液圧が発生している。このことから、回生ブレーキの作動と同時に機械式ブレーキも作動していることがわかる。
- ・低 μ 路通過後も車両は引き続き減速しており、4輪とも引き続き1.5MP程度のブレーキ液圧が発生している。また、低 μ 路突入後1～3秒程度の間、電動機2及び蓄電池に回生方向の電流が流れている。このことから、主として機械式のブレーキが作動しているが一部回生ブレーキが作動したことがわかる。
- ・低 μ 路突入後から停止までは、約5秒間走行し、その間の走行距離は約22mである。
- ・運転者は、低 μ 路突入直前において約 3m/s^2 の減速度を維持したまま約 30km/h の速度で低 μ 路に突入し、その後は低 μ 路突入時のブレーキ踏力約 60N を維持し続けていることがわかる。

低 μ 路突入時の減速度（1、2、3、 4m/s^2 ）毎の低 μ 路突入時における速度と低 μ 路突入時からの停止距離との関係を集計したものを図5-4に示す。

なお、低 μ 路突入時の速度は、実車走行模擬装置による台上走行では、実車走行模擬装置により設定できるため、常に任意の速度に設定可能であるが、テストコースにおける走行では、テストドライバーによる設定となるので、必ずしも意図した速度に設定できるとは限らない。そこで、低 μ 路突入後から停止するまでの中間付近の減速度がほぼ安定している区間を増減することにより、低 μ 路突入速度を補正することとした。図5-4の制動距離は、この補正後の減速度及び速度を使用して再計算した制動距離である。低 μ 路突入時における減速度についてもテストドライバーにより決められた値に設定することとしたが、これも必ずしも意図した値に設定できるとは限らず、制動距離計算の誤差要因となってしまう。図4-3の実車走行模擬装置を使用した台上走行の場合と比較して、図5-4のテストコースにおける走行の場合は、折れ線が滑らかでないのはこのためと考えられる。

このように、実車走行模擬装置を使用した台上走行試験を実施すれば、テストコースにおける走行では設定不可能あるいは設定が難しいような走行条件でも設定可能というメリットがあるといえる。

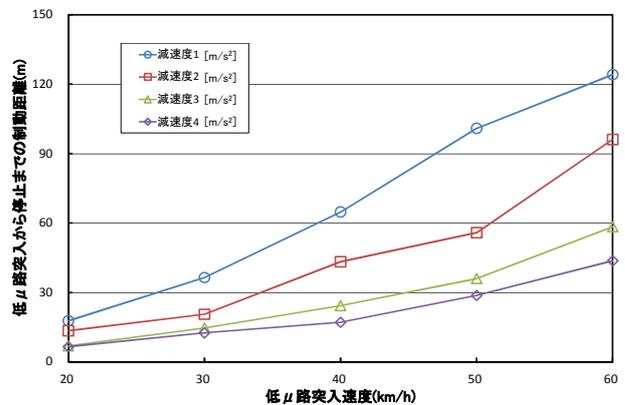


図5-4 低 μ 路突入時からの停止距離の集計結果

6. 台上とテストコースの相関性の検証

4章及び5章において、実車走行模擬装置を使用した台上走行実験及びテストコースにおける走行実験を実施して、それぞれにおいて初期の目的を達成する走行データを取得することができたことを示したが、ここでは、両者の走行実験における相関性について検討することとする。

図6-1～図6-4に実車走行模擬装置を使用した台上走行実験及びテストコースにおける走行実験での走行距離と車体速度との関係を取りまとめたものを示す。横軸は低 μ 路突入後の走行距離で縦軸は車体速度である。図6-1は低 μ 路突入時の減速度が 1m/s^2 、図6-2は低 μ 路突入時の減速度が 2m/s^2 、図6-3は低 μ 路突入時の減速度が 3m/s^2 、図6-4は低 μ 路突入時の減速度が 4m/s^2 のときの結果である。各図には、低 μ 路突入時の速度が20、30、40、50、60 km/hの場合のデータについて、台上走行のもの（赤）とテストコース走行のもの（青）を記載してある。なお、テストコース走行の場合については、低 μ 路突入時の速度を補正した後のデータを使用している。

図6-1を見ると、低 μ 路突入時の減速度が 1m/s^2 のときは、低 μ 路を通過しても減速度が小さいため、スリップが発生したとは認識されず、ABSが作動しなかったため、何事もなかったかのように走行した。なお、低 μ 路突入時の速度が 60km/h の場合には、テストコース走行時の低 μ 路突入時の減速度が台上走行時に比べて大きかったために停止距離の差が発生しており、約 18m 短くなっている。低 μ 路突入時の速度がその他の場合は、低 μ 路突入時の減速度がほぼ同じであったために、停止距離の差も2

～3m程度であり、実車走行模擬装置を使用した台上走行においてもテストコース走行がよく再現できているといえる。

図6-2を見ると、低 μ 路突入時の減速度が $2m/s^2$ のときは、低 μ 路突入時において車輪のスリップが検出されてABSが作動したために低 μ 路突入直後に車体速度の現象の程度に変化がみられる。この条件では、実車走行模擬装置のチューニングがまだ不十分なようで、停止距離に5～15mの差が認められる。また、低 μ 路突入時の速度が20km/hの台上走行の場合には、速度1～2km/hまで低下したまま走行を続ける現象が認められた。極低速度の条件での再現性確保が必要な場合には更なるチューニングが必要となるかもしれない。

図6-3を見ると、低 μ 路突入時の減速度が $3m/s^2$ のときは、停止距離の差は最大でも3m程度であり、テストコース走行時の低 μ 路突入時の減速度の誤差を考慮すれば、実車走行模擬装置を使用した台上走行においてもテストコース走行がよく再現できているといえる。

図6-4を見ると、低 μ 路突入時の減速度が $4m/s^2$ のときは、低 μ 路突入時の速度が60km/hの場合に停止距離に5m近くの差が認められるが、その他の速度の場合は停止距離の差が約2m以内となっており、実車走行模擬装置を使用した台上走行においてもテストコース走行がよく再現できているといえる。

このように、極低速の場合等の一部の条件を除いて、実車走行模擬装置を使用した台上走行ではテストコース走行がよく再現できているといえる。今後、実車走行模擬装置の更なる再現性改良が必要であると考えられる。

7. まとめ

自動車の信頼性、耐久性等を評価するためのツールとして、実車走行模擬装置を試作するとともに、電気式ハイブリッド自動車のABSを対象として、実車走行模擬装置による走行状態とテストコースにおける走行状態との比較実験を実施したところ、今回の実験条件では、テストコースにおける走行状態を十分に再現できることが分かった。

この実車走行模擬装置を使用すれば、天候等にも左右されず、危険性も伴わないで、各種の条件を比較的容易に変えて走行実験を模擬することができることから、種々の信頼性評価等に有効活用できるものと考えられる。

最後に、この実験を実施するにあたって、多大なるご協力をいただいた株式会社小野測器の関係者の皆様に感謝致します。

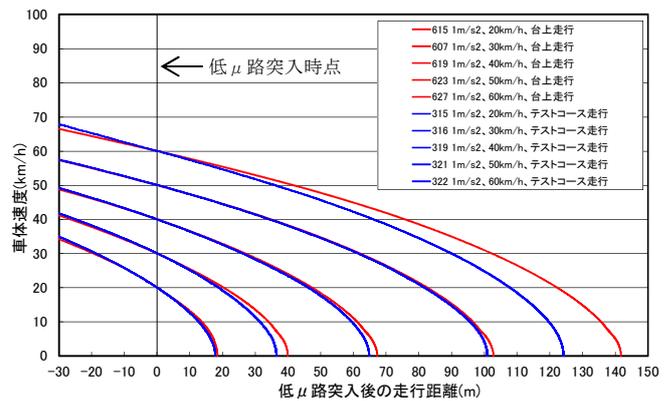


図6-1 台上走行とテストコース走行の比較 ($1m/s^2$)

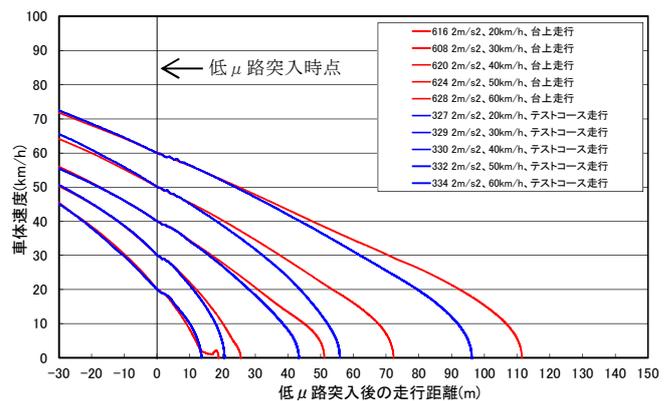


図6-2 台上走行とテストコース走行の比較 ($2m/s^2$)

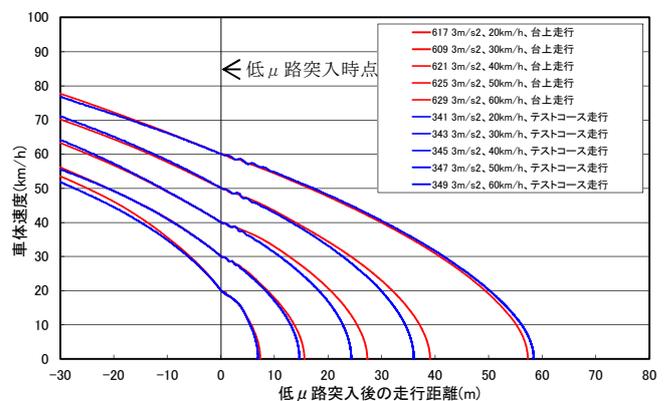


図6-3 台上走行とテストコース走行の比較 ($3m/s^2$)

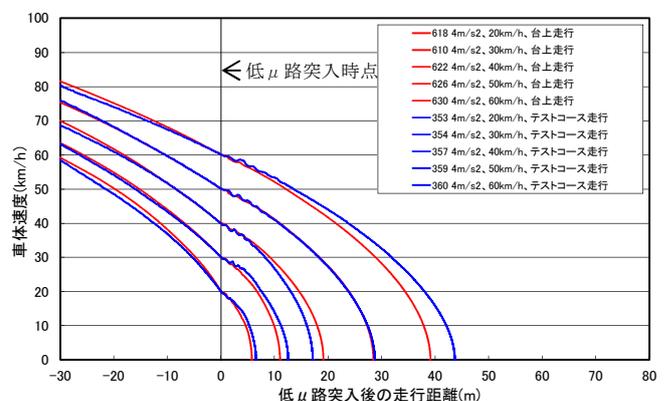


図6-4 台上走行とテストコース走行の比較 ($4m/s^2$)