

限界走行時における車両挙動の台上再現

Vehicle Dynamics Simulation in Extreme Driving Conditions

豊島 貴行*
Takayuki TOYOSHIMA

James CUNNANE**

Mike KENLEY**

要 旨

ABSTRACT

サーキット走行テストなどに代表されるような車両の限界性能を引き出す実走テストでは、計測機器の搭載による重量増や、計測機器の搭載場所の制限などから、走行中のさまざまな特性値を実測することが難しい。そこで停止状態から限界走行に至る広い範囲で、走行中の姿勢変化や発生する力などさまざまな走行状態を台上に再現することができれば、これまでは計測できなかった物理量の実測が可能となり、走行中の車両特性をより詳しく分析することができるようになる。Dynamic Vehicle Simulator(以下 DVS)は停止状態から限界走行に至る広い範囲でさまざまな車両挙動を台上に再現できる能力をもった多軸試験機として導入された設備である。このDVSを使い、停止状態から限界走行に至る広い範囲で走行状態を台上に効率よく再現させる手法を開発した。この手法によりこれまで実走行テストでは困難とされていた限界領域の走行状態におけるさまざまな特性を台上試験から分析できるようになった。

The increased weight produced by measuring instruments and the limited space available for such instruments make it a challenge to measure vehicle characteristics in extreme driving conditions such as circuit driving that take the vehicle to its performance limits. The ability to conduct bench simulations of vehicle behavior, that consider a variety of factors such as changes in the form of the vehicle and the forces acting on it, across a wide range of driving conditions, from standstill to extreme driving, would enable the measurement of physical characteristics which has been unlikely to be measured to date. Additionally, this would contribute to more precise analysis of vehicle characteristics during driving. Honda's Dynamic Vehicle Simulator (DVS) was developed as a multi-axis test system with the capacity to enable simulation of vehicle behavior from standstill to extreme driving on the bench. A method of efficiently reproducing this wide range of driving conditions on the bench using the DVS has been developed. This method has enabled vehicle characteristics in the extreme driving range, which has previously been challenging to study in vehicle tests, to be analyzed on the bench.

1. まえがき

車両の限界性能を分析する実走行テストを実施する場合、ドライバーへの負担が大きく、エンジンやタイヤの消耗も大きくなるため繰り返しテストの実施が通常の走行テストに比べて難しくなる。また、計測するための機器自体による重量増がもたらす走行性能の変化や、計測機器の取り付け箇所の制約条件などの理由から、事実上計測できない物理量も多い。

そこで、車体姿勢や発生する力など実走行におけるさまざまな状態を、台上試験機で再現することができれば、テス

トドライバーの必要がなくなりタイヤやエンジンの消耗も軽減されるため、繰り返しテストが容易になるなどの利点生まれ、実走テストでは計測できない物理量の計測も可能となり、より多くの視点から詳細な分析が進められるようになるなど、その意義は大きい。

しかし、停止状態から限界走行に至るさまざまな走行状態を台上試験機で再現させるためには、車体やタイヤの挙動を自由自在に制御できる多自由度の多軸試験機が必要となる。また、限界領域を使った走行では、タイヤと路面間の“滑り”や“浮き”といった状態が頻発するため試験機の制御が難しく、制御手法の構築が課題となっていた。

* 四輪R&Dセンター

** Instron Structural Testing Systems GMBH

DVSは停止状態から限界走行までの広い領域を含むさまざまな車両挙動を、台上に再現することを目的として開発された多自由度の多軸試験機である。基本的にはタイヤと接する四つのホイールパンと車体と結合されるセンタテーブルとから構成され、地面に相当する四つのホイールパンとセンタテーブルをそれぞれ同時に動作させることによって、実走行時のさまざまな車両挙動を台上に再現させる (Fig. 1)。今回DVSを使い限界領域までの実走行状態を台上に再現させるため Body Centered Mode Simulation という手法を開発した。これによりサーキット走行のような激しいステアリング操作をともしない限界走行状態についても台上テストによる計測や特性分析が可能となった。

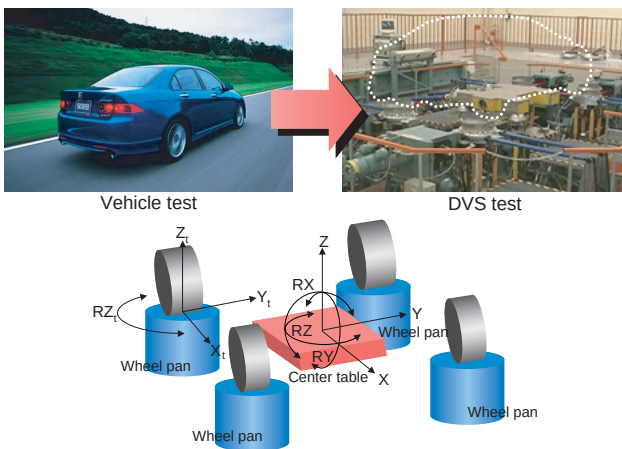


Fig. 1 Outline of DVS

2. ロードシミュレーション

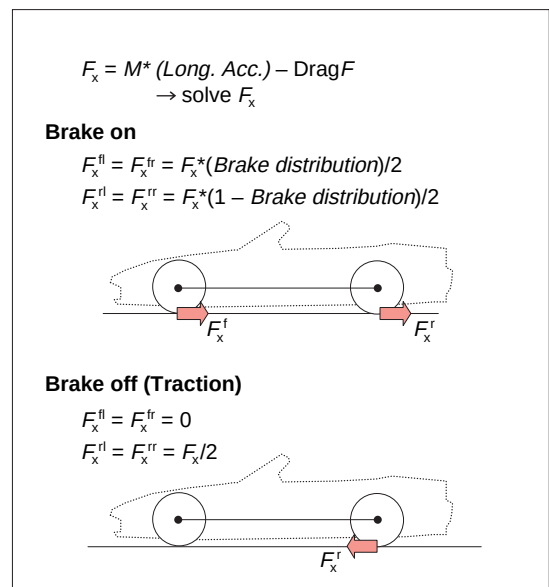
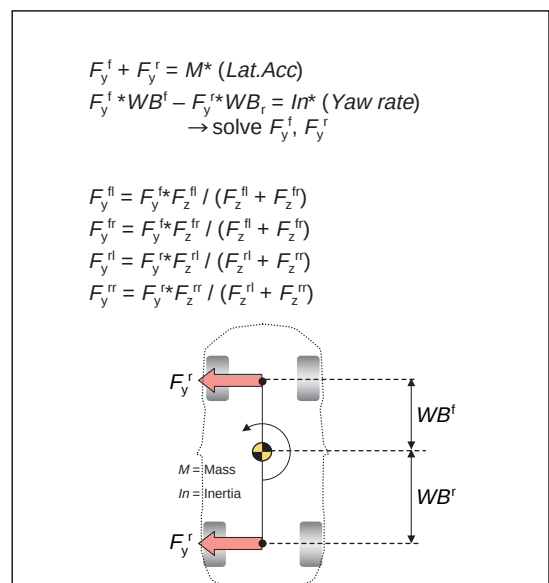
ここでいうロードシミュレーションとは実走行状態をDVS上に再現させるシミュレーション技術の総称である。ロードシミュレーションの基本は、実走行時に車両に生じている力や変位量等からあらかじめ制御目標となる物理量を同定しておき、その目標値に合うようにDVSの各アクチュエータを制御することで実走行時のさまざまな状態変化を再現させることによって成る。

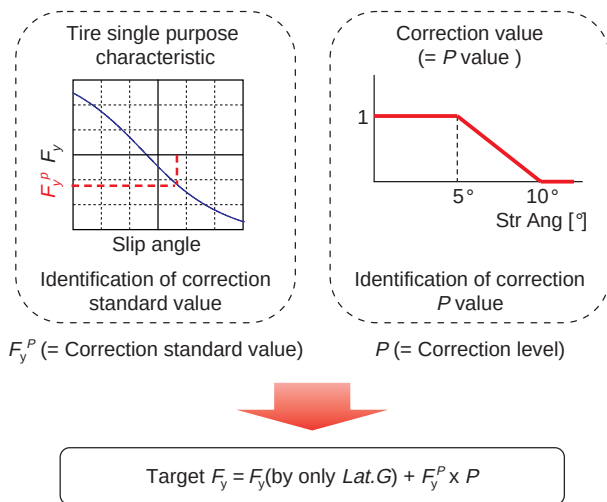
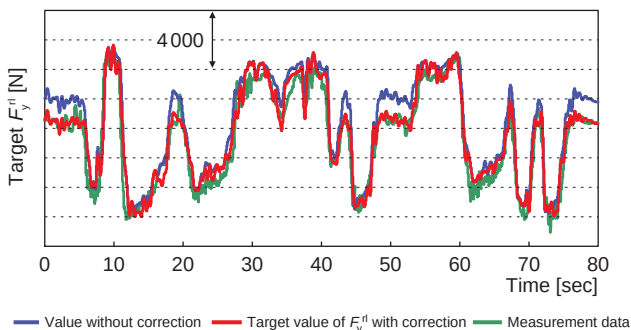
限界領域の実走テストでは計測できる物理量が制限されるため、計測可能な物理量から制御目標となる物理量を同定する必要がある。本取り組みではサスペンション周りの各種コンプライアンス特性の分析に焦点をあてていることから、制御目標はタイヤ接地面に生じる力とステアリング角とし、タイヤ接地面に生じる力は実走テストで計測可能な物理量から推定している。

Fig. 2, Fig. 3はタイヤ接地面に発生する前後方向の力 F_x と、横方向の力 F_y を推定する基本原理を示す。 F_x は前後加速度、空気抵抗、ブレーキ配分などから算出し、 F_y はヨー

角速度、横向き加速度、輪荷重変化、重心位置などから算出した値に、直進時に定常的に発生している対抗向きの力分を補正することによって算出される。具体的には直進時近傍で発生する対抗向きの力を F_y^p とし、 F_y^p の値に対してステアリング角に応じた重み付けを P とすると、 $F_y^p * P$ を補正值として加えることで最終的な制御目標 F_y を得ることとした (Fig. 4)。

Fig. 5は実際に6分力計をタイヤに装着して計測した F_y の値と、上述の手法により推定した補正有りの場合と補正無しの場合の F_y の値を比較したグラフである。この補正手法により実走時に発生している F_y をより高精度で推定できていることが確認できる。

Fig. 2 Identification of F_x generated in tireFig. 3 Identification of F_y generated in tire


 Fig. 4 Method of correction of F_y

 Fig. 5 Target data for F_y

3. ポジションコントロールとロードコントロール

DVSで車体や車輪の動作を制御していく場合、目標とする物理量により主に二つの制御手法に分けられる。そのひとつは位置や変位情報を目標として制御するポジションコントロール、もうひとつは力の情報を目標として制御するロードコントロールである。ポジションコントロールは変位量を正確に再現する反面、目標との微妙なズレから過剰な力が加わってしまった場合でも変位のズレを無くす方向

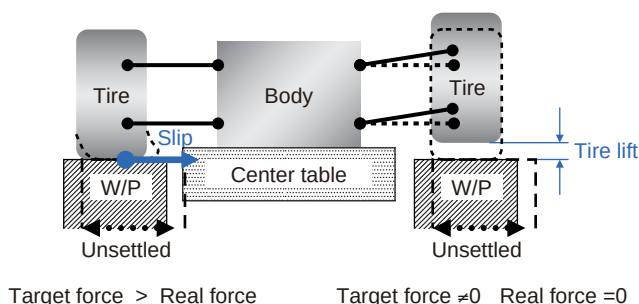


Fig. 6 "Slipping" and "floatage"

に制御されるため、場合によっては車両を破壊してしまうという欠点がある。対してロードコントロールでは発生している力を正確に再現するため、過度な力で破壊される恐れは無いが、実際には出せない力が目標値になっていると制御不能に陥る場合がある。たとえばタイヤに接地荷重が生じていない状況では、わずかな横力が目標値となっただけでも制御不能となる。限界領域も含むロードシミュレーションでは部分的に大きな力が発生し変位量も大きく、Fig. 6に示すように接地面に“滑り”や“浮き”という状態も発生するため、どちらか一方の制御手法だけに頼ってでは再現することはできない。車両のどの部位をどちらの制御手法で動作させるかがロードシミュレーションの重要な要素となる。この二つの制御を使い分けることにより、後記のBody Centered Mode Simulationでは限界領域も含む走行状態の再現が可能となった。

4. Body Centered Mode Simulation (BCMS)

ロードシミュレーションは車体姿勢変化の再現のさせ方により幾つかの方法に分類することができる。大きくは車体を地面に対して固定させ4輪のタイヤのみを動作させることによって実走行時の挙動を再現させる方法(Body fixed simulation)とタイヤと車体を同時に動作させて再現させる方法(Body moved simulation)との二つに分類できる。

Body fixed simulation は車体をポジションコントロール(不動)とし、車輪をロードコントロールすることによって制御目標を再現する。この方法はホイールパンのみを動かせば良いのでアクチュエータの数を減らすことができるメリットがある反面、ロール角やピッチ角変化による重力の方向がずれることや、タイヤの接地角が実走行時と異なるなど誤差要因が多く本取り組みでは採用しない。

一方Body moved simulationはさらに二つに分類でき、車体のある特定の一点を空間上のある一点に固定し、X軸、Y軸、Z軸周りの回転運動のみを再現させる方法(Pin fix simulation)^{(1), (2)}と、回転運動以外にも並進運動も加えて車体を6自由度全ての方向に動作させる方法に分けられる。Body centered mode simulation(以下 BCMS)は後者の一つ

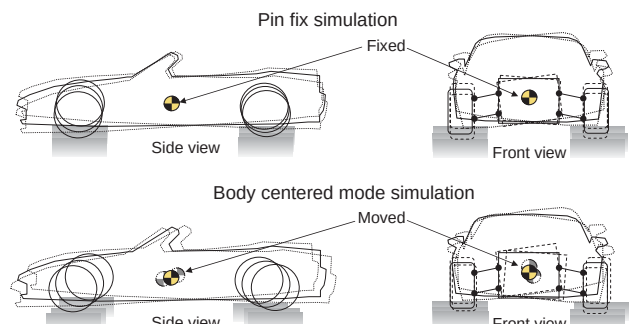


Fig. 7 Difference from pin fix simulation with BCMS

である (Fig. 7)。Pin Fix Simulation では重心点を不動にするため車体基準の座標系とを地面基準の座標系と重心位置で一致させられることから、外部からの計測が容易となり車体姿勢変化を捉えやすいという利点がある。しかし、ホイールパンがロードコントロールになるため Fig. 6 にしめすような“滑り”や“浮き”という状態が1輪でも発生するとたちまち制御不能に陥ってしまう。したがって“滑り”や“浮き”という状態が頻発する限界領域の走行では Pin Fix Simulation は不適である。

BCMSは車体を6自由度全ての方向に対して動作させる手法の一つである。タイヤの“滑り”や“浮き”に対しタフネスが高く、かつ十分な精度で台上シミュレーションを実現させることを目的として開発されたロードシミュレーションである。その基本概念を Fig. 8 に示す。BCMS では制御目標を周波数帯により高周波成分の信号と低周波成分の信号に分け、ホイールパンはロードコントロールにより高周波成分を再現し、低周波成分はセンタテーブルのロードコントロールとホイールパンのポジションコントロールにより制御される。低周波成分ではホイールパンは前後あるいは左右のホイールパンの中心が初期状態で設定される基準点と一致するようにポジションコントロールされるため、基準点に対する車体の位置は常に特定することができる。BCMS では、限界付近でタイヤ1輪に“滑り”や“浮き”が生じたとしても、ホイールパンはポジションコントロールされているため制御目標を見失うことは無い。BCMS はホイールパンとセンタテーブルの両方に多くの動作自由度を有する DVS によって初めて実現されたロードシミュレーションである。以下に BCMS の精度の検証結果を記す。

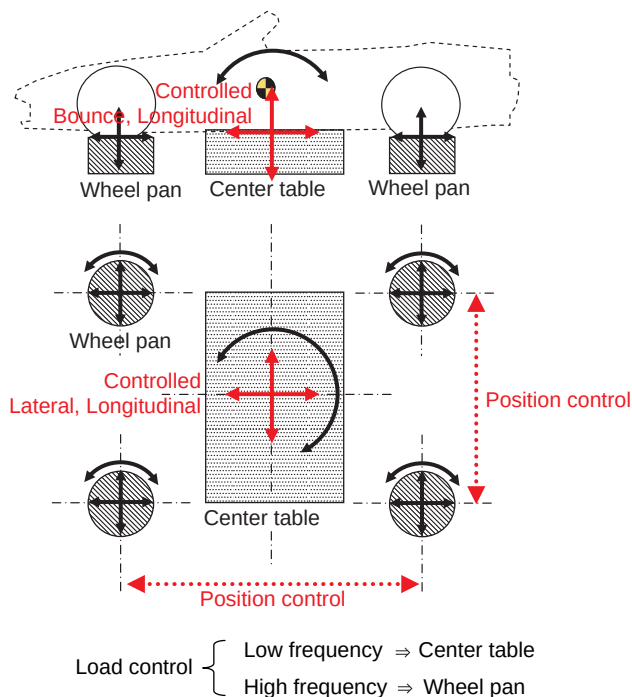


Fig. 8 Theory of BCMS

5. シミュレーションの検証

Fig. 9 は制御目標となるタイヤ接地面の力と、BCMS によってDVSに再現された実走行状態から観測された接地面で発生している力を比較したグラフの一例である。両者は互いによく一致しており、BCMS により限界領域の走行状態を台上で再現できることが検証できた。

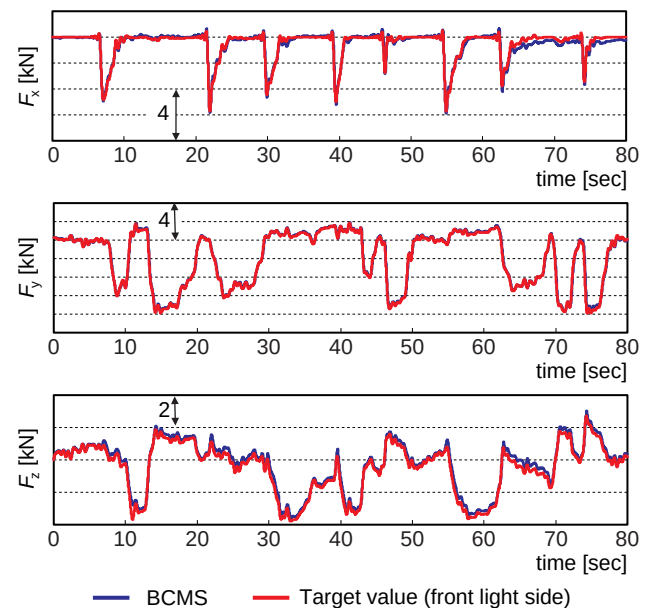
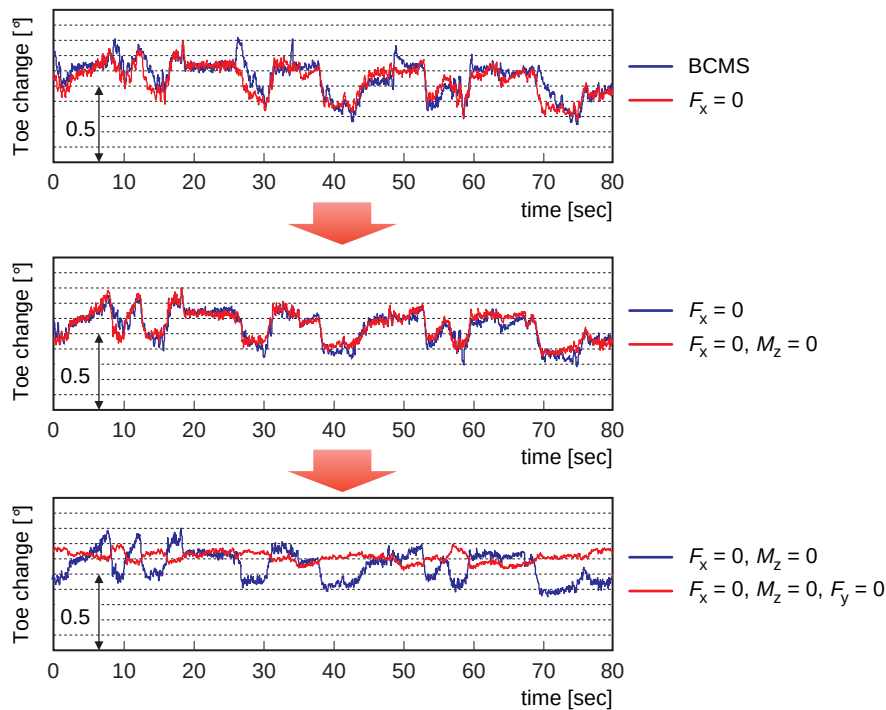


Fig. 9 Comparison between BCMS and measurement values

6. 分析例

Fig. 10 は BCMS により再現された台上における実走行相当のサスアライメント変化(トー変化)特性を計測したものと、 F_x の制御目標を0、続いてアライニングトルク M_x の制御目標を0、最後に F_y の制御目標を0という順で順次力を無くしていったときに現れるトー変化特性の違いを比較したグラフである。上段のグラフでは、制駆動方向に対するトー変化特性を見ることができ、中段のグラフでは、アライニングトルクに対するトー変化を見ることができる。下段のグラフでは横力に対するトー変化の様子がわかり、トー変化に関する各種コンプライアンス特性を実走行に基づいて確認することができる。これにより、特定の場所で生じている特徴的な車両挙動について、各種コンプライアンス特性からの分析が可能となる。また車体姿勢の変化などから空力特性の影響などを分析したり、実走行では計測にくいピッチやロールについても定量的な分析を進めることが可能となった。


 Fig. 10 Compliance characteristics of toe by F_x & M_z & F_y

7. まとめ

本研究では、停止状態から限界領域に至るさまざまな走行状態をDVSを用いて再現させ、台上試験により走行状態における各種の車両特性を分析するための技術構築に取り組んだ。以下に得られた結果をまとめる。

- (1) 限界領域を含む走行状態の再現では、ロードコントロールとポジションコントロールの使い分けの重要性が確認された。BCMSでは低周波成分と高周波成分に制御目標を分け、それぞれについてホイールとセンタテーブルの動作を分担させることで、限界領域を含む走行状態の再現が可能となった。
- (2) BCMSの開発により、停止状態から限界走行までの広い範囲で走行状態が台上に再現されていることが検証された。
- (3) BCMSによるロードシミュレーションにより、繰り返しテストが容易になり、計測困難な物理量の計測も可能となった。また過渡的な各種のコンプライアンス特性を実走行状態に基づいて定量的に分析することが可能となった。

参考文献

- (1) 堀之内克年, 米川隆, 加納民夫, 内海聖舟: シャシー動特性解析技術の開発 第1報: シャシー動特性試験機の開発とその適用, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.964, p.113-116(1996)

- (2) 加納民夫, 堀之内克年, 米川隆, 長原尚: シャシー動特性解析技術の開発 第2報: 実機を用いたリアルタイムシミュレーションシステムの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.964, p.117-120(1996)

■ 著 者 ■



豊島 貴行



James CUNNANE



Mike KENLEY