

# Hardware-In-The-Loop (HIL) シミュレータを用いた 操舵装置の定量分析に関する基礎的研究

## Preliminary Study on Quantitative Analysis of Steering System Using Hardware-In-The-Loop (HIL) Simulator

瀬川雅也 M. SEGAWA 東 真康 M. HIGASHI

One of the objectives in developing simulation methods is the efficient development of steering systems. In this study, simulation methods have been developed with the objective of providing efficient evaluation phases. For further efficiency, design accuracy at the planning stage of system development is essential. It is necessary to quantify the influences of component mechanical and electrical performance on system performance and thereafter to distribute performance. Qualitative evaluation of these influences has been made with the objective of incorporating results into the design of system performance. This report outlines basic research carried out using the developed HIL simulator.

**Key Words:** simulator, electric power steering, system architecture, dynamics

### 1. はじめに

ステアリングシステムの評価は、操舵感をはじめとして実車試験で評価しないと明確にならない部分が多い。しかし、実車試験の前に実施される台上試験の段階で、より実車試験に近いステアリングシステムの評価を行うことにより、問題点の抽出、設計への迅速なフィードバックを行うことが可能となる。

そのため、シミュレーション技術を導入した台上試験の精度向上の取組みが行われているが、ステアリングシステムの機械的・電気的特性のすべてをモデル化することは困難である。すなわち、一般に車両運動系で用いられている計算機シミュレーションのみでは実車試験レベルまでの評価精度の向上が困難である。また、これらの特性は操舵感の評価においても非常に重要である。

このため、本研究ではステアリング実機を導入し、モデル化が困難なステアリングシステムの機械的・電気的特性を模擬可能にした Hardware-In-The-Loop (HIL) シミュレータを構築した<sup>1)</sup>。

開発した HIL シミュレータは、車両運動に起因したステアリングラックへの負荷動特性の再現とステアリング実機特性により、走行中の操舵特性の屋内での評価を可能としている。

シミュレーション技術の開発目的の一つとしてステアリングシステムの開発効率化が挙げられる。本研究では、評価フェーズの効率化を目的としたシミュレータの開発を行ってきた。今後更なる効率化には、開発システムの企画段階におけるシステム性能設計の精度向上が必要不可欠となる。性能企画段階における設計精度の向上のためには、車両性能を考慮したステアリングシステム性能の要素性能レベルへの展開、すなわち、ステアリング構成要素の機械的・電気的性能がシステム性能に与える影響を定量化した性能配分が必要となる。

このため、本研究ではステアリングシステムのもつ機械的・電気的特性がシステム性能に与える影響をシミュレーション技術により定量的に評価し、システム性能の設計に反映させることを目標としている。

本報では開発した HIL シミュレータを用いて実施した基礎的研究結果について述べる。

### 2. HILシミュレータの構成

車両走行中に運転者がステアリングホイールから感じるトルクは、主としてセルフライニングトルクによるものであり、前輪の横すべり角に比例して発生する。このときのトルクが、ステアリングラックに力として付加

され、操舵系を介して運転者に伝わる（以下、操舵反力とする）。模擬する操舵反力は、ステアリングホイールの回転力を再現する<sup>2)</sup>ことが考えられるが、本研究ではステアリングギヤも実機としてシミュレータへ搭載するため、ステアリングタイロッドにかかる力（以下、軸力とする）の再現を図った。図1に作製したステアリング HIL シミュレータの概要を示す。

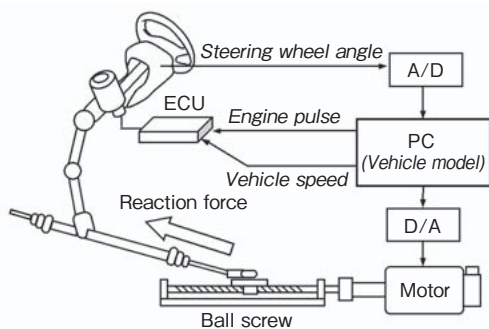


図1 HILシミュレータ構成  
Structure of HIL simulator

運転者が走行中にステアリングホイールを通じて感じる軸力を付加するため、PC内に車両モデルを有し、リアルタイムで前輪の横すべり角からセルフライニングトルクと軸力を算出する。ACサーボモータに軸力の指令を行うことにより、ボールねじを介して、実車走行時と同様の軸力が得られる。また、電動パワーステアリングのアシスト特性も車両モデル内の車体速度情報を入力することで模擬可能である。

### 3. HILシミュレータ搭載モデル

本研究ではステアリング用シミュレータという点から、PC内でのシミュレーションが複雑とならないよう低自由度の車両モデルを採用した。このため、図2に示すような、横方向、ヨー方向、ロール方向の3自由度を考慮した等価二輪モデルを用いた<sup>3), 4)</sup>。ただし、x, z方向に関する慣性乗積を0とする。

タイヤに発生する横力は、タイヤの横すべり角からタイヤの横力が発生するまでのタイヤ横変位の動特性を考慮した<sup>5)</sup>。さらに、車体のロールに伴うロールステア角も考慮した。ロールステア角は、ロール角に対して線形的に変化すると仮定した値である。

運転者が操舵反力として感じるセルフライニングトルクは、タイヤの接地面での回転中心と、タイヤに発生する横力の力点位置の差によって生じる。次に、ステア

リングタイロッドにかかる力を算出するため、セルフライニングトルクをナックルアーム長で除した値をモデル上の軸力とした。

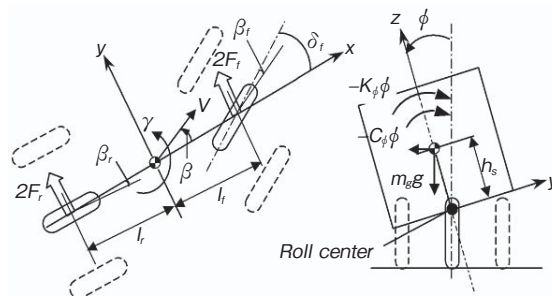
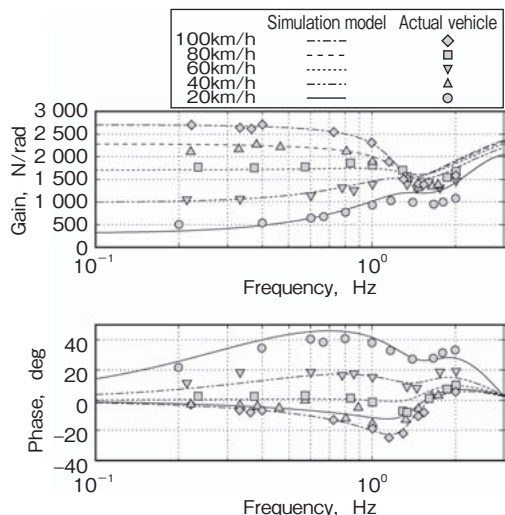


図2 車両モデル  
Vehicle model

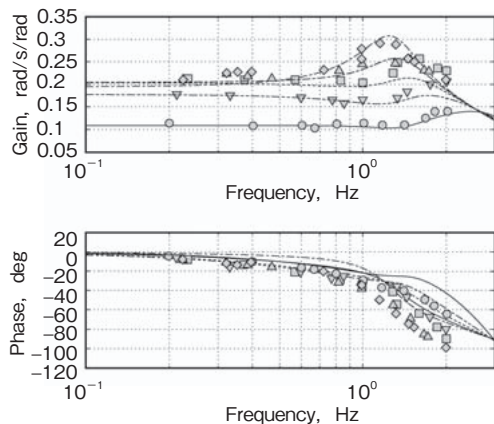
### 4. 実車試験による車両モデルの検証

本章では前章におけるモデルの有効性を検討する。シミュレータと同様のステアリングシステムを搭載した実車実験により得られた、操舵角に対する軸力とヨーレイトの周波数応答を比較する。

実車における軸力は、左右のステアリングタイロッドに設置したロードセルによって計測したものの和をとり、その値を軸力とした。実験条件は、乾燥アスファルト路面を20km/h, 40km/h, 60km/h, 80km/h, 100km/hで走行中、運転者が正弦波状の操舵を行い、各状態量を計測した。この実験結果から、操舵角に対する各状態量のゲイン、および位相をFFT解析により求めた。図3に実車実験とシミュレーションによる操舵角に対する軸力(a)と、ヨーレイト(b)の周波数応答を示す。これらの結果から、ヨーレイトに関して、位相が若干進んでいるものの、操舵入力に対する車両挙動がほぼ再現できている。軸力に関しては車体速度100km/h以下では操舵角に対する軸力のゲイン、位相はほぼ一致している。操舵周波数の高い急操舵時のステアリングシステムを評価するには、更なるモデル精度の向上が必要であるが、今後の技術課題としたい。



(a) Frequency response by axial force in relation to steering angle



(b) Frequency response by yaw rate in relation to steering angle

図3 操舵角に対する軸力，ヨーレイトの周波数応答  
Frequency response by axial force and yaw rate in relation to steering angle

## 5. 反力模擬システム

### 5.1 反力制御

シミュレータでステアリングタイロッドに軸力を付加するため、反力発生装置として制御のしやすさと効率の良さから、AC サーボモータとボールねじを組み合わせた装置を製作した。操舵角から車両モデルにより算出される目標軸力に応じて、AC サーボモータにトルクの指令を行う。しかしながら、目標軸力が小さいときには動力伝達系がもつ摩擦の影響などにより、軸力測定値と目標軸力に誤差が生じる。そこで、これらの摩擦を補償するために、実際にステアリングタイロッドに付加されている軸力を計測した軸力フィードバックによる比例・積分制御と、安定して目標値追従を行うためのフィードフォワードによる制御を組み合わせた制御器を用いた。

次に運転者が実際に感じた反カトルクについて検討を行った。HIL シミュレータで計測された操舵角に対する軸力の周波数特性を HIL シミュレータに導入した車両モデルから計算された目標軸力と比較した。車体速度は 40km/h, 60km/h, 100km/h で HIL シミュレータ上のステアリングホイールを操作し、操舵情報、ラック軸力の計測を行った。図4に反力発生装置により再現されたラック軸力の周波数応答を、図5に操舵角-軸力のリサージュ波形を示す。入力操舵周波数は通常の運転者が操舵可能な操舵角速度までとした。

この結果から、操舵角周波数 2Hz 付近までモデル出力に対する位相，ゲインが反力模擬システムにより再現されていることを確認するとともに、軸力も反力模擬システムの機械的・電気的特性に起因した脈動なども見られず、走行中にステアリングラックが受ける軸力をシミュレーションできていることを確認した。

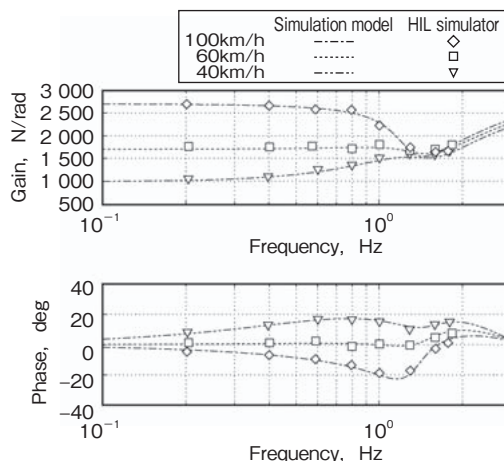


図4 シミュレータでの操舵角に対する軸力の周波数応答

Frequency response by axial force in relation to steering angle by simulator

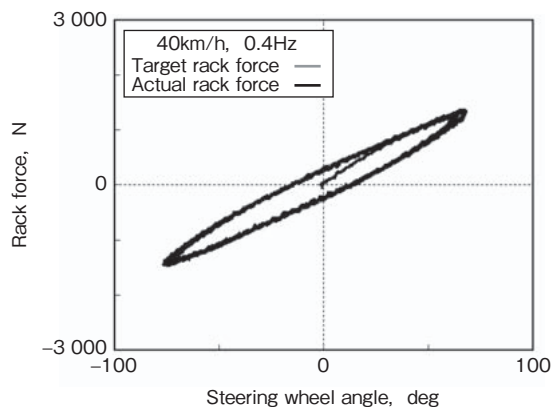


図5 操舵角に対する軸力のリサージュ波形

Lissajous waveform of axial force in relation to steering angle

## 5.2 操舵感の再現

軸力に加えて、運転者の感じるステアリングホイール上のトルクを評価した。操舵角に対する操舵トルクのリサージュ波形は運転者が感じる操舵トルクを評価するのに有効である。評価は実車試験と HIL シミュレータの結果を比較することによって実施した。それぞれの試験では、車体速度 40km/h とし、正弦波状の操舵角入力とした。試験結果を図 6 に示す。この結果から、ステアリングホイール中立位置付近の操舵トルクのはステリシスは HIL シミュレータを用いることで、再現可能であることが分かる。そのステリシスは操舵感の一つである手応え感を表しているとされる<sup>6)</sup>。

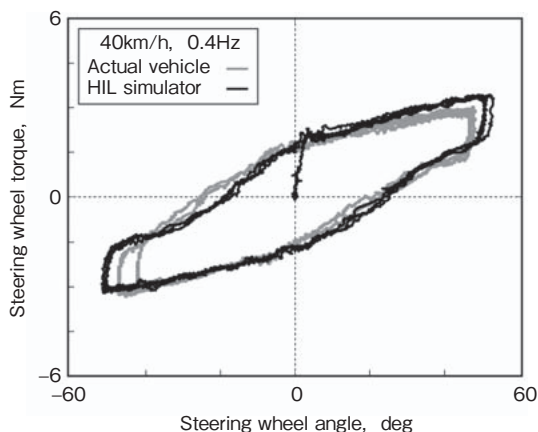


図6 操舵角に対する操舵トルクのリサージュ波形  
Lissajous waveform of steering torque in relation to steering angle

## 6. HILシミュレータによる操舵特性の 定量化に関する検討

前章にて、開発した HIL シミュレータにより走行中の操舵に対するステアリングへの負荷および、ステアリングホイール上の操舵トルク特性が再現できることを確認した。本章では、HIL シミュレータを用いた操舵特性定量化の一つとして操舵角に対するラック軸力の動特性がシステム性能に与える影響について検討した。

試験は HIL シミュレータ上で、ステアリングへの負荷装置として前章で述べた反力発生装置と操舵入力に対して位相進み、遅れの少ない比例ばね負荷との比較により試験を実施した。本章では走行条件変化に伴うラック軸力のゲイン変化を再現するために、操舵角に対する軸力のゲインであるばね定数を比較的可変しやすい、板ばね負荷を採用した。試験条件は前章と同様の車速 40km/h

で、操舵入力周波数 0.4Hz とした。ばね負荷を用いた場合の操舵角に対する軸力のピーク値の一致、および操舵角一軸力に位相差を持たないことを予備試験にて確認している。このときの操舵角と操舵トルクのリサージュ波形を図 7 に示す。実車と板ばね負荷のリサージュ波形を比較すると切返し付近の操舵トルクの大きさはほぼ同じとなっているが、ステアリングホイール中立位置付近の操舵トルクは板ばね負荷による試験結果の方が小さくなっている。

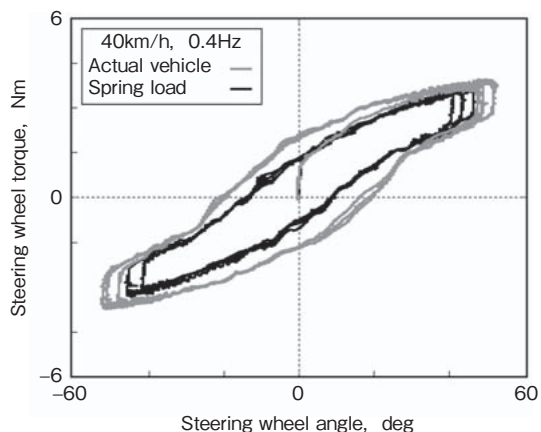


図7 操舵角に対する操舵トルクのリサージュ波形  
Lissajous waveform of steering torque in relation to steering angle

この結果より、板ばね負荷などの従来の台上試験装置では、ステアリングラックに加える力の位相特性まで考慮していないことが実車試験と台上試験の結果に差が生じる原因の一つであると言える。つまり、目標とする操舵特性を実現しようとする際には操舵系の機械的・電気的特性、および制御アルゴリズムの他に、車両側の負荷状態も考慮しなければ達成できないことを示している。本章では基礎的研究としてシステムレベルでの影響を検討し、HIL シミュレータによりステアリングシステム性能のみを抽出した評価が可能であることが分かった。

## 7. ステアリングシミュレーションシステム

前章で述べた操舵特性の定量化手法を用いたステアリングシステム性能シミュレーションは、今後のステアリング開発を効率化させるために必要と考えられる。これまでのさまざまな取組みによりステアリングの持つ機械的ダイナミクスは車両転舵性能を含むさまざまな性能に影響を与えることが分かっている。しかしながら、ステアリング系のダイナミクスと、車両側の転舵特性とを関

連づけたステアリング側の性能企画と、それを実現する各要素の仕様展開が十分になされていない。

これを達成するために本 HIL シミュレータを発展させ、ステアリングシステムの機械的・電気的ダイナミクスについて車両側の転舵特性も考慮したステアリングシミュレーションシステムの構築を目指している。本報ではその第 1 ステップとして、ステアリングの機械的ダイナミクスがステアリング性能に与える影響について述べる。ここでは HIL シミュレータに搭載した電動パワーステアリングの要素レベルまでを表現したステアリングモデルを作成し、機械的ダイナミクスの大きさだけでなく、付加部位についてもシミュレーション可能とした。また、このステアリングモデルと HIL シミュレータに搭載した車両モデルとを組み合わせることにより、ステアリングの実車実装性能のシミュレーションを可能としている。本試験では構築したステアリングモデルが実機性能を表現できているかを確かめるため、ステアリングラックに接続する負荷は比例負荷とした。図 8 にステアリングの実機試験結果とシミュレーション結果を示す。

この結果より、構築したモデルは、ほぼステアリング実機性能を再現できていることが分かる。このモデルを用いて機械的ダイナミクスの中から、コラム軸上の摩擦成分の影響を検討した。図 9 に示すようにコラム軸上において、トーションバーを境にしてステアリングホイール側、ステアリングギヤ側の摩擦成分 (R1, R2) を変化させた。モデルに対する入力にはステアリングホイール側からの操舵角入力とステアリングギヤ側からの外乱トルク入力を与えた場合についてシミュレーションを行った。

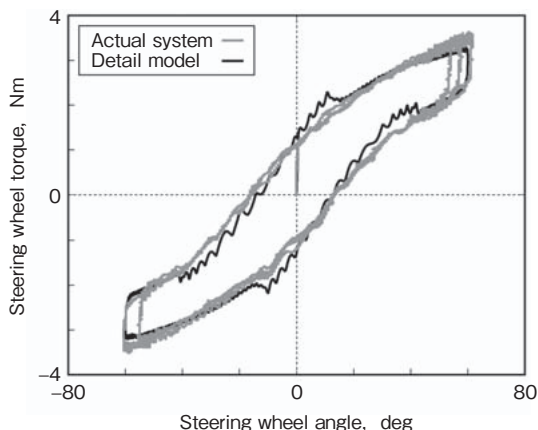


図 8 操舵角に対する操舵トルクのリサージュ波形  
Lissajous waveform of steering torque in relation to steering angle

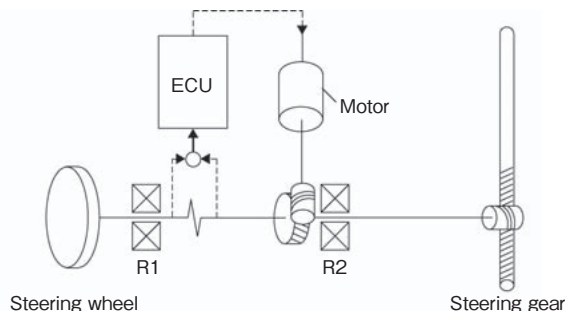


図 9 ステアリングシミュレーションモデル  
Steering simulation model

ステアリングホイール側から入力を与えたときのシミュレーション結果を図 10 に、外乱トルク入力を与えたときの結果を図 11、図 12 に示す。図 10 より摩擦成分を変化させても操舵角に対する操舵トルクのリサージュ波形に変化は見られなかった。図 11 に示すように外乱入力を与えた場合には摩擦成分の割付け位置によってラックストローク変化に差が見られる。さらに図 12 に示すヨーレイトを見ると、摩擦成分がその割付け位置によって、外乱に対してマスクとして働く場合と働かない場合があることが分かる。これらの結果から、運転者側から評価したステアリング性能は同等であってもダイナミクスを付加する部位により、車両転舵性能に差が出ることをシミュレーションにより確認した。今後は、機械的ダイナミクスに加え電気的特性の影響を検討するとともに、ステアリングシステム性能、車両転舵性能を考慮した各パラメータの最適設計手法について研究を進める。

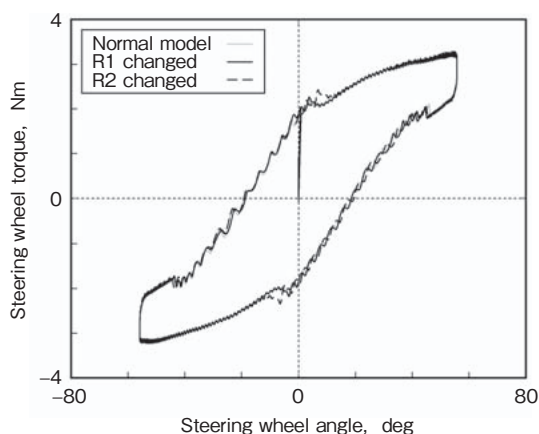


図 10 操舵角に対する操舵トルクのシミュレーションによるリサージュ波形

Lissajous waveform by steering torque simulation in relation to steering angle

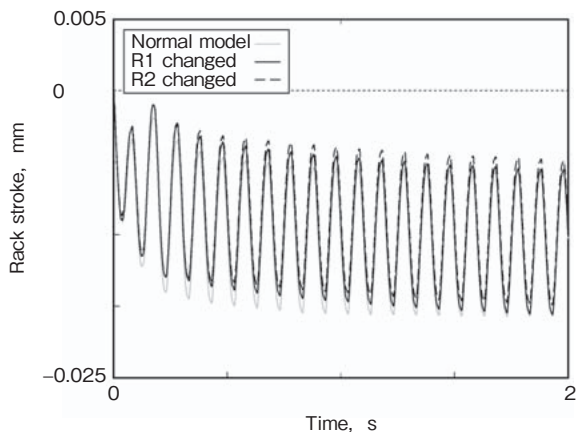


図11 外乱入力に対するステアリングラック変位  
Steering rack displacement in relation to disturbance input

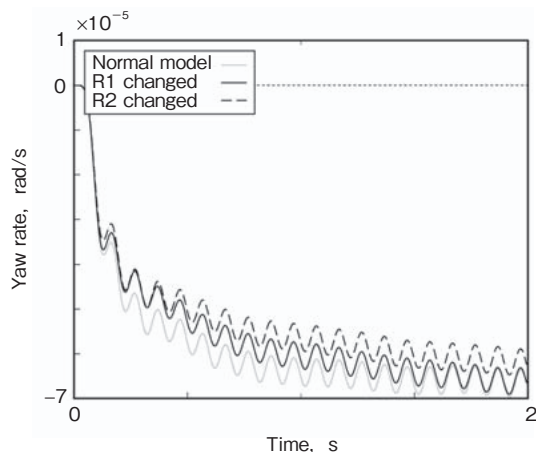


図12 外乱入力に対する車両ヨーレートの変化  
Change of vehicle yaw rate in relation to disturbance input

## 8. おわりに

本報ではステアリング操舵特性の定量化を目的としたシミュレーション技術の基礎的研究として、開発したHILシミュレータを用いてシステム性能評価を実施した。開発したHILシミュレータにより、実車走行中のステアリングラックへの負荷動特性が操舵角-操舵トルク特性に影響を与えていることを確認するとともに、ステアリングシステム単体の特性と車両運動がステアリング性能へ与える影響を切り分けることが可能であることが分かった。

さらに、システム性能のシミュレーション精度向上のための基礎研究として、構築した車両モデルとステアリングモデルを用いて機械的ダイナミクスの与える影響について検討した。その結果、機械的ダイナミクスの割付け位置がステアリング性能および、車両運動特性に影響を与えることを確認した。今後、本研究における技術課

題を改良し、ステアリングシステムの開発に貢献するシミュレーション技術を構築していきたい。

## 参考文献

- 1) 瀬川雅也, 碓井智彦, 中野史郎, 小竹元基, 永井正夫: 自動車技術会論文集, vol. 36, no. 2(2005)125.
- 2) 名切末晴, 土居俊一, 松島 悟, 浅野勝宏: 自動車技術会論文集, vol. 25, no. 2(1994)136.
- 3) 安部正人: 自動車の運動と制御, 山海堂(1992)148.
- 4) 酒井秀男: タイヤ工学, グランプリ出版(1987)234.
- 5) 高野修一, 永井正夫: 自動車技術会学術講演会前刷集, no. 38-02(2002)11.
- 6) 佐藤博文, 原口哲之理, 大沢 洋: 自動車技術, vol. 44, no. 3(1990)52.

## 筆者



瀬川雅也\*  
M. SEGAWA



東 真康\*\*  
M. HIGASHI

\* 研究開発センター 電子システム研究部  
工学博士  
\*\* 研究開発センター 電子システム研究部