

リンクレスステアバイワイヤシステム (Syncusteer™) の開発技術

The Technologies for Developing the Linkless Steer-by-Wire System (Syncusteer™)

高橋俊博 T. TAKAHASHI 竹内太規 T. TAKEUCHI 梶澤祐太 Y. KAJISAWA
池田康佑 K. IKEDA 三宅純也 J. MIYAKE 宇佐見太毅 T. USAMI

A linkless steer-by-wire (SbW) system is expected to represent the next generation of automotive steering systems. It connects a handwheel unit and a roadwheel unit through electronic communication without a mechanical linkage, allowing various functions to be implemented flexibly. One of its key features is a speed-dependent variable gear ratio, which improves maneuverability at low speeds and stability at high speeds while reducing the required steering wheel rotation, thereby enabling the use of non-circular steering wheels. Drawing on decades of steering expertise, JTEKT put its linkless SbW system, Syncusteer, into mass production in 2025. This paper presents the core technologies that enabled the realization of the SbW system and support its continued evolution.

Key Words: steer-by-wire (SbW), electric power steering (EPS), electronically controlled variable gear ratio (E-VGR), Syncusteer

1. はじめに

ステアリングシステムは、自動車にとって不可欠な構成要素であり、これまで複数の技術革新が実現されてきた。代表的な革新は二つあり、一つ目はパワーステアリングの開発である。これにより操舵力が低減し、運転者の負担が軽減された。さらに、パワーステアリングを前提とした車両設計が可能となり、直進安定性をはじめとする車両性能の向上にも寄与した。二つ目は電動パワーステアリング (Electric Power Steering : EPS) の開発である。EPS は油圧ポンプを必要としないため、燃費性能の向上に寄与するとともにソフトウェアにより、操舵特性の調整が可能であることから多くの自動車に採用されるようになった。近年では、電動車両および先進運転支援システム (Advanced Driver Assistance Systems : ADAS) の発展に伴い、EPS は自動車に不可欠な技術となっている¹⁾。

当社は、1988 年にコラムタイプ電動パワーステアリング (Column type Electric Power Steering : C-EPS) の量産化を世界に先駆けて実現した。その後、デュアルピニオンタイプ電動パワーステアリング (Dual Pinion type Electric Power Steering : DP-EPS)、ラックパラレルタイプ電動パワーステアリング (Rack

Parallel type Electric Power Steering : RP-EPS) を開発し、コラムアシストタイプ EPS とラックアシストタイプ EPS の双方を量産してきた (図 1)。こうした豊富な製品実績と技術を基盤として、1995 年頃に次世代ステアリング技術であるリンクレスステアバイワイヤ (Steer-by-Wire : SbW) システム (以下、SbW システム) の開発を開始した^{2), 3)}。2000 年には、当社固有技術の電子制御タイプギヤ比可変ステアリング (Electronically controlled Variable Gear Ratio : E-VGR) と、EPS を組み合わせた簡易 SbW システムを実現した。その後、SbW システムに関する基盤技術開発と特許出願を進め、2025 年に SbW システムの量

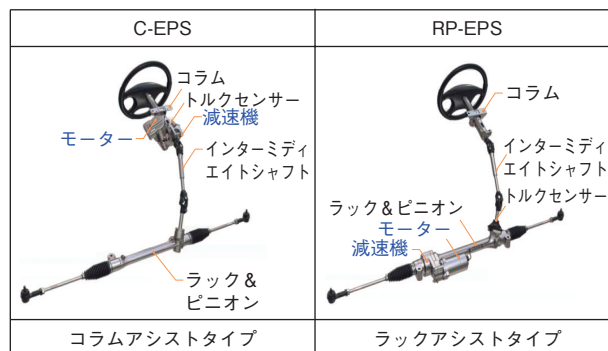


図 1 C-EPS と RP-EPS の構成比較
Configuration of C-EPS and RP-EPS

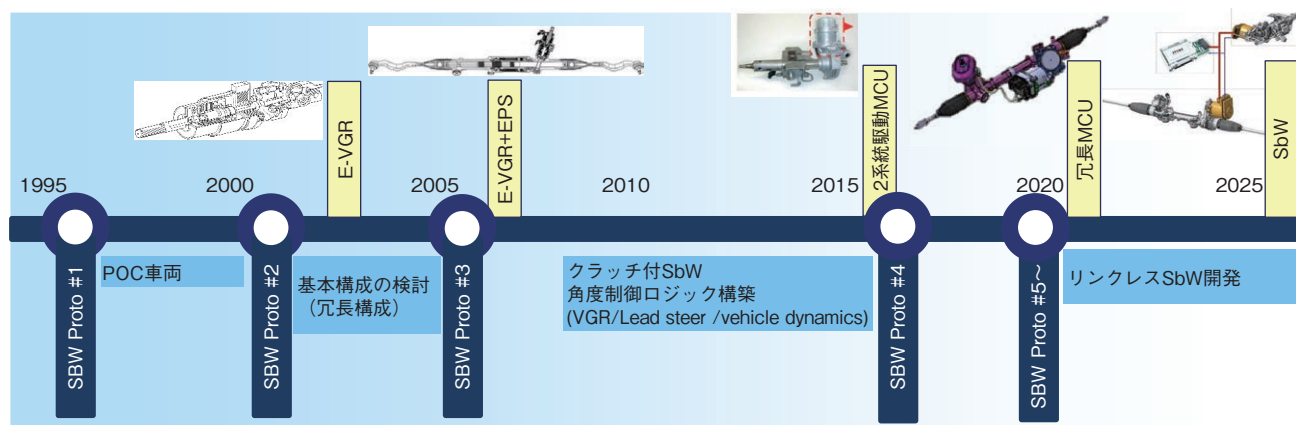


図2 JTEKT SbW 開発ストーリー
History of JTEKT's SbW system development

産化を実現した（図2）⁴⁾。本システムは、SYNC（シンクロ／同調・協調）、US（お客様／ジェイテクト製の）、STEER（操舵）を組み合わせ、「Syncusteer（シンカステア）」と命名した。また、「シンカ」には進化・深化・真価の意味も込めている。

本報では、SbW システムの進化を支えるコアコンピタンスを紹介する。

2. SbW システムの概要

2.1 SbW システムの構成

SbW システムの概要を図3に示す。本システムは操舵ユニットと転舵ユニットで構成され、両ユニットはローカルCAN（Controller Area Network）で接続されている。また、電源失陥時に備えてバックアップ電源（Backup Power Supply : BPS）が設けられている⁵⁾。

SbW では、操舵ユニットと転舵ユニットの双方にモーターと減速機で構成されるアクチュエーターが必要である。操舵ユニットは、運転者のハンドル操作量を検出して転舵ユニットへ送信するとともに運転者へ操舵反力を付与する。このため、操舵反力を生成するアクチュエーターがコラム側に配置されるコラムアシストタイプEPSを基に開発した。一方、転舵ユニットは、受信した操舵角に基づいてラックを駆動するとともに路面反力などの車両情報を操舵ユニットへ送信する。このため、転舵力を生成するアクチュエーターがラック側に配置されるラックアシストタイプEPSを基に開発した。

2.2 SbW システムの特長

SbW システムは、操舵ユニットと転舵ユニットが機

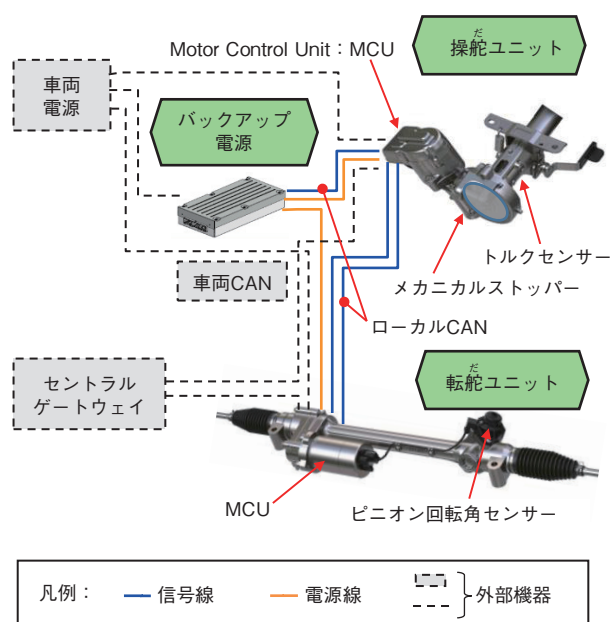


図3 SbW システム構成例
SbW system architecture

械的なシャフトで接続されていないため、制御ソフトウェアによって多様な機能を柔軟に実装できる。代表例が車速依存可変ギヤ比である。車速に応じたステアリングギヤ比の変更により、低車速域での操作性と高車速域での安定性を両立できる。また、操舵入力に対する転舵応答を最適化する制御により、ハンドル操作に対する車両の応答性を向上できる。さらに、転舵系と操舵系が独立していることから自動緊急操舵などの車両運動制御との親和性が高い。操舵反力は、転舵軸力に基づいて生成され、不快な振動成分を抑制することで良好な操舵感を実現する。

また、車速依存可変ギヤ比により、ハンドルの最大操舵角を小さく設定できるため、持ち替えを必要としない操舵が可能となる。これにより、ヨーク型（非円形）などの異形ハンドルを採用でき、メーター類の視認性向上やコックピット設計の自由度が向上する（図4）。



図4 ヨーク型ハンドルを使用したコックピット例
Cockpit with a yoke steering wheel

3. SbW システムのコア技術

3.1 製品安全設計技術

SbW システムでは、機能失陥時の安全性確保が最も重要である。前述のとおり、当社は約 30 年前から SbW システムの開発に取り組み、初期から冗長構成を構想してきた。長年にわたる技術開発と検証を経て、必要な構成要素を二系統化し、一系統が故障しても所定の機能を継続できるシステムを実現した（図5）。

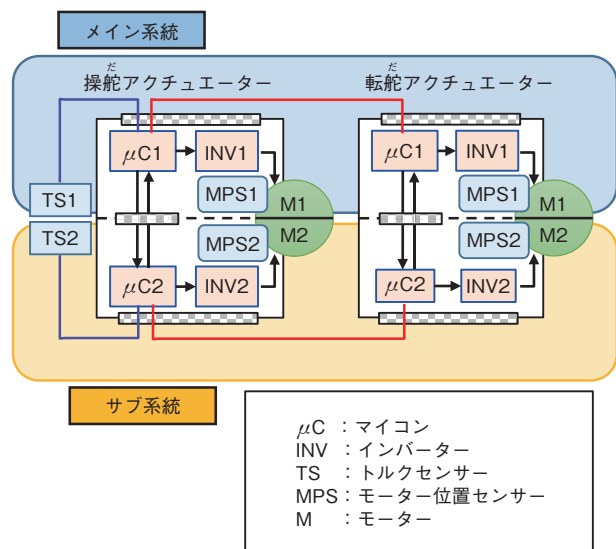


図5 SbW システムにおける冗長構成
Redundant architecture of the SbW system

EPS システムにおいてもインバーターや制御回路などを二系統化し、一系統が故障した場合でも運転を継続可能な設計としている。当社は EPS の量産開発で培った制御技術および安全設計技術を有しており、これらは市場での量産適用実績により検証されている。その知見を SbW システムへ展開することで信頼性の高い製品安全設計を実現している。

また、SbW システムでは、冗長化された構成要素を適切に機能させるため、ソフトウェア設計も重要である。そのため、故障発生時には、故障検知・診断、制御系の切り替え、安全状態への遷移および運転者への通知を確実に実行できる制御構成としている。さらに、故障モード影響解析（FMEA）および機能安全規格に基づき、多様な故障シナリオを想定することで単一故障だけでなく、多重故障にも対応できる。このように、当社は EPS で培った安全設計技術を基盤として、ハードウェアおよびソフトウェアの両面から安全性を確保した SbW システムを実現している。

3.2 制御技術（路面情報伝達）

車両の転舵時には、タイヤと路面との接触により路面反力が発生する。横方向の路面反力は、直進安定感や限界挙動の把握に重要な情報である。EPS システムでは、路面反力がラック軸力を介して操舵反力となり、運転者へ伝達される（図6）。一方、SbW システムでは操舵ユニットと転舵ユニットが機械的なシャフトで接続されていないため、ラック軸力を推定して操舵反力を生成する必要がある。

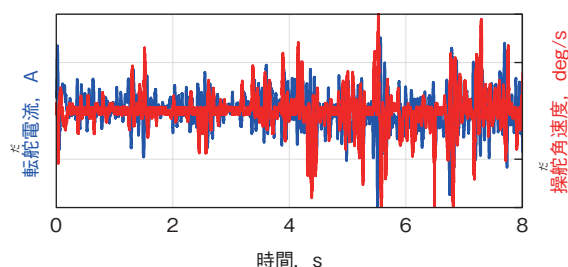
SbW の開発では、ラック軸力の推定手段として「角度軸力」と「電流軸力」を定義した。角度軸力は車両の運動方程式に基づく推定方法であり、操舵快適性に優れるが、路面状態の変化を運転者へ伝えにくい。一方、電



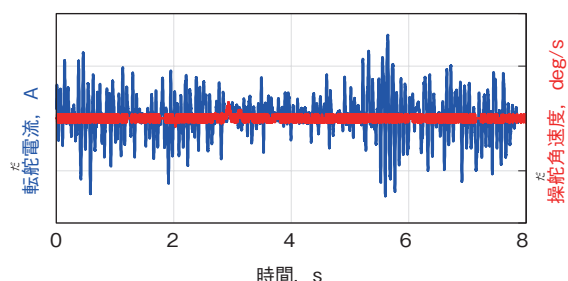
図6 EPS システムと SbW システムの力伝達
Force transmission in EPS and SbW systems

流軸力は転舵ユニットの電流に基づく推定方法であり、路面反力の変化を操舵反力へ反映しやすいが、外乱の影響を受けやすい。そこで、両者の特長を活用するため、走行状況に応じて両軸力の配分を切り替える制御を導入した。すなわち、直進時は角度軸力を主体として操舵反力を安定化し、グリップ変化時は電流軸力の寄与を高めることで路面反力の変化を運転者へ伝達する。

本手法の有効性を検証するため、砕石路面での運転者の操舵角変動を評価した（図7）。その結果、(a)の電流軸力を主体とした場合は外乱に起因する操舵角変動が生じるのに対し、(b)の角度軸力を主体とした場合は操舵角変動が抑制された。



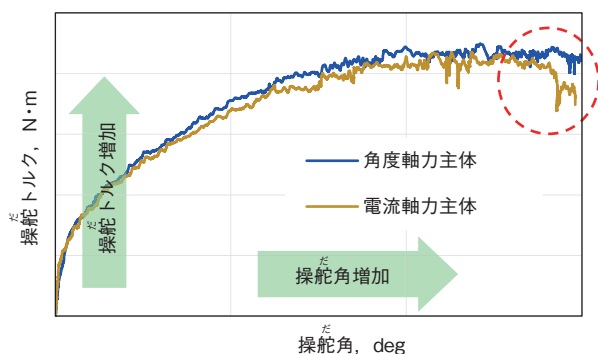
(a) 電流軸力主体



(b) 角度軸力主体

図7 直進保舵時の操舵角変動

Steering angular velocity fluctuations during straight-ahead driving


図8 グリップロス時の操舵力変動
Steering torque change upon grip loss

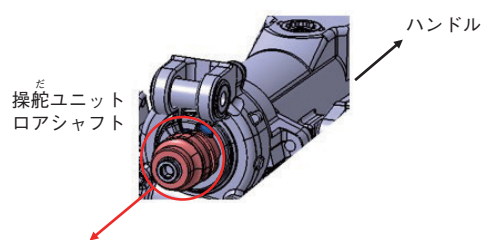
また、グリップロス発生時の路面反力検出に関する操舵力変動比較を図8に示す。角度軸力では路面反力の変化が操舵反力（操舵トルク）に現れなかったのに対し、電流軸力では操舵反力の低下が検出できた（図中の赤点線部）。図7および図8の結果から各種の路面条件を再現した車両評価を制御設計へ組み込むことにより、操舵快適性と路面情報の伝達性の両立を実現した。

3.3 機構設計技術（メカニカルストッパー）

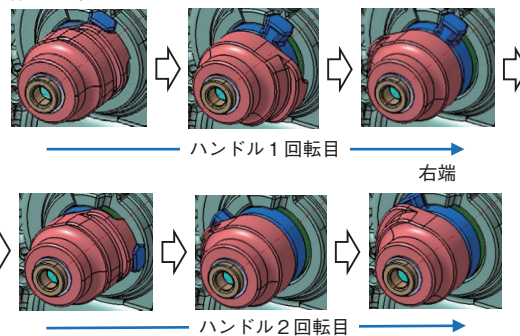
EPSでは、転舵端における操舵反力制御（以下、端当て制御）により、運転者へ操舵限界を提示するとともにメカニカルストッパーへの過大な衝突を抑制している。SbWシステムにおいても、この端当て制御技術を基盤として、転舵ユニットがラックエンドに到達する前に操舵反力を増大させることで仮想のラックエンド機能を実現した。

また、当社のSbWシステムでは、ハンドルの過回転によるスパイラルケーブルなど周辺部品の損傷を防止するため、仮想ラックエンド機能に加え、機械的に操舵回転を制限するメカニカルストッパーを開発した（図9）。本構成では、ハンドル回転角度を左右それぞれ30°に制限している。

このように、当社は量産実績のあるEPS技術を基盤として、機械要素、電気回路、制御ソフトを総合的に設計している。



ハンドル回転：左端


図9 メカニカルストッパーの一例
Mechanical stopper

3.4 蓄電材料技術（リチウムイオンキャパシタ）

リチウムイオンキャパシタは、2000年代初頭に実用化され、高エネルギー密度と高出力特性を両立する蓄電デバイスとして産業分野での利用が進んできた。負極に黒鉛系材料であるグラファイト、正極に活性炭を用いており、リチウムイオン二次電池と電気二重層キャパシタの特性を兼ね備えている（図10）^{6) 7)}。高い入出力特性と優れた充放電耐性を有し、自動車用補助電源に適している。当社では、2009年からEPSの補助電源としてリチウムイオンキャパシタの開発に着手し、約10年をかけて高耐熱化技術を確認した。

車載用途では、 $-40 \sim 85^{\circ}\text{C}$ の広い温度範囲において安定的な性能が求められる。そのため、高温環境下では界面反応および電解液劣化を抑制し、低温環境下では電

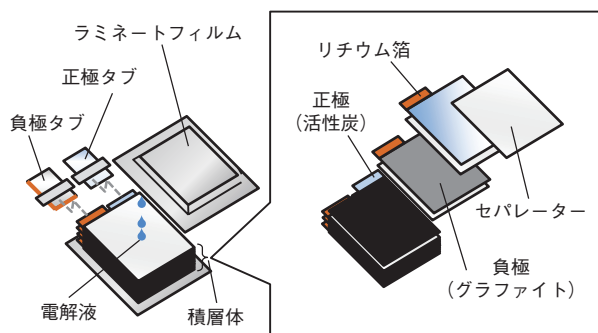


図10 リチウムイオンキャパシタの一般的な構造
General structure of a lithium-ion capacitor

解液の物性を最適化することが重要である。当社は、界面反応の安定化と電解液設計を組み合わせることにより、広範囲の温度で安定的に動作する世界初の技術を構築した。

高温域での電解液劣化対策として、耐熱性の高いリチウム化合物を採用するとともに溶媒配合比を最適化した。これにより、電解液は -40°C でも凍結せず、 100°C でも沸騰しない。さらに、電極材料と電解液の相互作用に着目した材料設計により、高温環境下での性能劣化を抑制した。これらの技術は、材料設計からセル試作、製造条件を含む実証評価までを一貫して実施できる当社の開発基盤によって実現した。当社のリチウムイオンキャパシタは、SbWシステムにおいてもバックアップ電源として重要な構成要素となっている。今後は、車載用途に限らず、産業機器や社会インフラ分野への応用が期待される。

4. おわりに

SbWシステムは、操舵ユニットと転舵ユニットを機械的に分離し、電気信号により転舵を制御する革新的な技術である。本システムは、冗長化による高度な安全設計、自然な操舵感を実現する制御技術、高信頼性の機構設計、さらにはバックアップ電源を支える蓄電材料技術など、当社が培ってきた多様なコアコンピタンスの融合によって実現した。

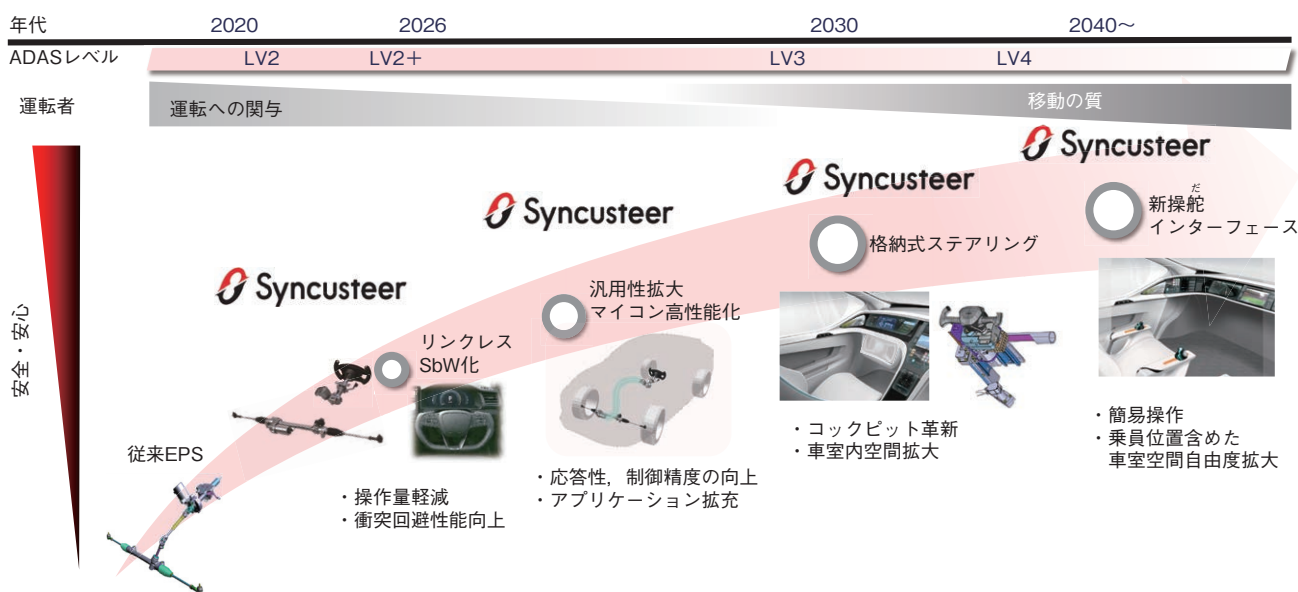


図11 SbWシステム (Syncusteer) 開発ロードマップ
SbW system (Syncusteer) development roadmap

100年に一度といわれる自動車産業の大変革期において、製品価値は単体機能だけでなく、ほかのシステムとの協調や拡張性によって高まっている。SbWシステムは車両運動制御、ブレーキ、サスペンションなどの周辺システムとの統合制御に適しており、自動運転やADASの高度化を支える基盤技術として期待される。さらに、将来的にはAI技術との融合により、運転者の特性や走行環境、車両状態を学習し、操舵特性の最適化も可能となる。また、SbWシステムはサイバーセキュリティ、ゾーンECU (Electronic Control Unit) 化、ソフトウェアアップデートを前提とした次世代車両アーキテクチャとの親和性が高く、将来的な機能拡張にも対応できる。

さらに、機械的接続がないため、ハンドルの格納や異形ハンドルの採用など、新たなコックピット設計も可能となる。これにより、居住性や開放感が向上するとともに手動運転時の操作性と快適性が両立できる。将来的には、ジョイスティック式など新しい操作端末への展開も期待され、車両の利用形態の多様化に寄与する。SbWシステムのロードマップを図11に示した。

このように、SbWシステムは単なるステアリング機構の置き換えにとどまらず、自動運転やADASとの親和性が高く、次世代コックピット設計など時代の要請に応えるコア技術となり得る。当社は今後もステアリング基盤技術の深化と拡張を進め、新たなモビリティ価値の創出に貢献していく。

* E-VGR, C-EPS, DP-EPS, RP-EPS, Syncusteer は、株式会社ジェイテクトの登録商標または商標です。

参考文献

- 1) 高橋俊博：機械的接続構造を排除したリンクレスステアバイワイヤシステムの開発，自動運転車に向けた電子機器部品の開発と制御技術，技術情報協会（2022）372.
- 2) 作田雅芳，外山祐一，川村尚史，塚原康介：快適性を向上したコラムタイプ電動パワーステアリング（C-EPS）の開発，JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1021(2024)55-59.
- 3) 阪田勝利：自動運転へ向けたステアリング技術の展望，JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1017(2019)9-15.
- 4) 内藤高宏：ステアリング技術の展望—モビリティの大変革期を迎えて—，JTEKT ENGINEERING

JOURNAL, No. 1021(2024)14-19.

- 5) 西村 興，並河 勲，安部健一，梶澤祐太，山崎 亮：リンクレスステアバイワイヤシステム J-EPICS の開発，JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1019(2022)37-43.
- 6) H. TANIZAKI, K. MATSUI, S. TASAKI, N. ANDO, Y. HATO, H. SHIBUYA : Development of Lithium-ion Capacitor, The 47th battery symposium in Japan proceedings(2006)3E04.
- 7) S. TASAKI, H. TANIZAKI, R. MIYAKAWA, A. SHIRAKAMI, H. TAGUCHI, K. MATSUI, N. ANDO, O. HATOZAKI, Y. HATO, H. SHIBUYA : Development of Lithium-ion Capacitor, The 47th battery symposium in Japan proceedings(2006)3E05.

筆者



高橋俊博*

T. TAKAHASHI



竹内太規*

T. TAKEUCHI



梶澤祐太*

Y. KAJISAWA



池田康佑*

K. IKEDA



三宅純也*

J. MIYAKE



宇佐見太毅**

T. USAMI

* 自動車事業本部 先行システム開発部

** イノベーション本部 BR エネルギーソリューション推進部