

トレンド

モビリティ社会の変革を支える半導体技術

Semiconductor Technologies Bringing Innovation to Mobility Society




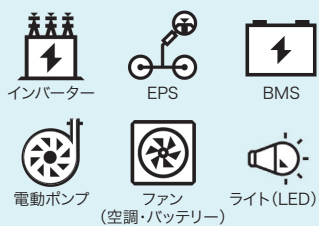
川口 雄介 KAWAGUCHI Yusuke 来島 正一郎 KURUSHIMA Shoichiro 子井野 誠治 KOINO Seiji

自動車業界は、CASE (Connected, Automated, Shared & Service, Electric) と呼ばれる四つのトレンドによって、電動化や、E/E (Electrical/Electronic) アーキテクチャーの進化、通信の高速化、車載サイバーセキュリティ強化など、技術的に大きな変革期を迎えている。

東芝デバイス&ストレージ(株)は、これらの変革のキーデバイスである車載用半導体製品を幅広く開発・提供しており、その機能と性能を継続的に向上させることで、CASEの実現及び将来のモビリティ社会の発展に貢献する。

Innovation activities related to CASE (connected, automated, shared and service, electric) mobility are bringing about technological transformations such as electric automobiles, advances in electrical/electronic (E/E) architectures, and enhancement of automotive cybersecurity to the automobile industry.

Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation is endeavoring to develop and offer a wide range of semiconductor products as key devices of in-vehicle systems aimed at achieving CASE vehicles through continuous functional and performance improvements to support the development of a mobility society in the future.

	Connected	Automated	Shared & Service	Electric
技術動向	<ul style="list-style-type: none"> 通信の高速化 E/E アーキテクチャーの進化 	<ul style="list-style-type: none"> 通信の高速化 車載サイバーセキュリティ強化 	<ul style="list-style-type: none"> 通信の高速化 車載サイバーセキュリティ強化 	<ul style="list-style-type: none"> 電動化 E/E アーキテクチャーの進化
関連車載システム	 <p>インフォテインメントシステム 車載Ethernetシステム</p>	 <p>自動運転・ADAS</p>	 <p>車載Ethernet</p>	 <p>インバーター EPS BMS 電動ポンプ ファン (空調・バッテリー) ライト(LED)</p>
半導体製品	車載Ethernet・ブリッジIC 小信号デバイス (レベルシフター, TVS, MOSFET)	小信号デバイス (レベルシフター, TVS)	車載Ethernet・ブリッジIC 小信号デバイス (レベルシフター, TVS)	モータードライバーIC (MCD, SmartMCD™) パワーMOSFET, IPD, IGBT, SiC MOSFET カプラー, デジタルアイソレーター, 小信号デバイス (MOSFET, ロジックIC)

ADAS: 先進運転支援システム
 BMS: 電池監視システム
 TVS: Transient Voltage Suppression
 MCD: モーターコントロールドライバー
 IGBT: 絶縁ゲート型バイポーラトランジスター

EPS: 電動パワーステアリング
 LED: 発光ダイオード
 MOSFET: 金属酸化膜半導体型電界効果トランジスター
 IPD: Intelligent Power Device
 SiC: 炭化ケイ素

特集の概要図。CASEに貢献する技術と東芝デバイス&ストレージ(株)の半導体製品

Technologies for CASE vehicles and in-vehicle semiconductor products developed by Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

1. はじめに

近年、自動車業界ではCASEと呼ばれる四つのトレンドによって、20世紀初頭に起こった自動車の大衆化以来の変革期を迎えている。特集の概要図は、CASEを実現するための技術動向、関連する車載システム、及びそれらに用いられる東芝デバイス&ストレージ(株)の半導体製品を分類したものである。

ここでは、上記技術動向の詳細と、車載半導体に求められる技術、更に当社の取り組みについて述べる。

2. CASE 実現に向けた技術動向と車載半導体製品に求められる技術

特集の概要図に示したとおり、CASEを実現するための技術動向として、電動化、E/Eアーキテクチャーの進化、通信の高速化、及び車載サイバーセキュリティ強化が挙げられ、これらの技術革新がCASEの実現に向けた各関連車載システムの進化を支えている。この章では、上記技術動向の詳細と、キーデバイスである車載半導体製品に求められる技術について述べる。

2.1 電動化

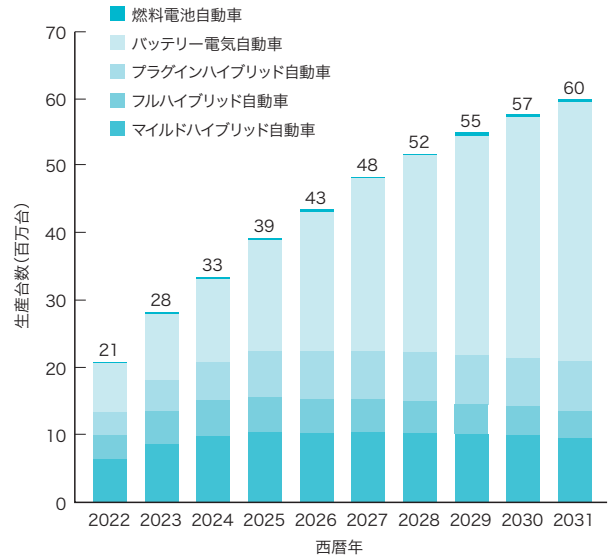
CASEの中でも電動化は特に、社会のメガトレンドであるカーボンニュートラルの実現に大きく関わる重要な項目である⁽¹⁾。ここでは、電動化に関し、電動車(xEV)の走行駆動系と、駆動系以外の足回りに関連するシャーシ系補器に分けて解説する。

2.1.1 走行駆動系の電動化

図1⁽²⁾に示すように、約1億台の全車両生産台数のうち、xEVは、2022年の約2,100万台から、2031年の約6,000万台にまで伸長していくと予想されている。

xEVには、電気だけで駆動するバッテリー電気自動車(BEV)や、ガソリンと電気の両方を使うハイブリッド自動車(HEV)、プラグインハイブリッド自動車(PHEV)などがある。いずれのタイプも、バッテリー容量当たりの走行距離(電費)向上が、更に、BEVとPHEVには充電時間の短縮が、求められている。

まず、電費向上のためには、走行駆動系のインバーターに用いられるパワー半導体の損失低減が必要である。パワー半導体で生じる損失は、素子がオン状態のときの導通損失と、オン状態からオフ状態あるいはオフ状態からオン状態に遷移するときのスイッチング損失に分類でき、一般に両者はトレードオフの関係にある。導通損失低減とスイッチング損失低減の両立、すなわちトレードオフの改善が求められている。スイッチング損失を低減すると、スイッチング回数



* TechInsights, 「Main Data Tables - Automotive Electronics System Demand Forecast 2022 to 2031」⁽²⁾を基に作成

図1. xEVの生産台数推移

2022年から2031年までのxEVの生産台数トレンドは、年平均成長率12%で伸長している。

Trend in total number of electrified vehicles (xEVs) in global market by year

が増加しても損失を抑えられるので、スイッチング周波数を高くして、インバーター装置の体積の多くを占める出力フィルター(コンデンサー及びコイル)を小型化できるという効果も期待できる。

次に、充電時間の短縮の要求に応えるために、バッテリー電圧を現在主流の400Vから800Vに変更する動きがある。電圧を高くすることで、充電電荷を少なくとも同等のエネルギーを蓄えられるため、充電時間を短くでき、更にはモーターの小型化を含むシステム全体の小型・軽量化も期待できる。バッテリーの高電圧化のためには、走行駆動系のインバーターに用いられるパワー半導体の高耐圧化だけでなく、絶縁デバイスの高耐圧化も必要である。

2.1.2 シャーシ系補器の電動化

先に述べた走行駆動系の電動化に伴い、シャーシ系補器では、油圧の機械式に比べて小型・軽量で電費が向上する、電気結合方式のバイワイヤ化が進んでいる。また、シャーシ系補器のバイワイヤ化により、走行駆動系のシステムと、電動パワーステアリング(EPS)・ブレーキなどの車両制御システムとの間での高度な協調制御が可能になるため、先進運転支援システム(ADAS)レベルを高めることができる。更に、EPSシステムのステアバイワイヤ化は機械的なリンクを不要にするため、車両の居住空間の拡大も実現する。

一方、機械的なリンクがなく電気結合だけのバイワイヤシ

システムは、電氣的断線や誤作動によるシステム障害によって、甚大な被害を発生させるリスクがある。自動車分野の機能安全規格 ISO 26262 (国際標準化機構規格 26262) における安全要求レベル (ASIL: Automotive Safety Integrity Level) の定義によると、EPSは、過酷度がS3 (生命を脅かす障害)、発生頻度がE4 (可能性が高い)、回避可能性がC3 (回避困難、又は回避不可) と評価されており、ASILの最大ランクDに設定されている。

このリスク回避のため、EPSでは1系統のエラー発生時にもう1系統が作動し、最低限の制御や動作を実現できるように、制御システムを複数化する冗長化システムが採用されている。また、リンクレス制御にはハンドル側のアクチュエーター用BLDC (ブラシレス直流) モーターも必要であり、EPSには四つの制御回路と最大四つのBLDCモーターが必要になる見込みである。更に、ブレーキでもADAS性能を引き上げるための電動油圧ブレーキに、ブレーキパイワイヤと電動油圧ブレーキの併用が見込まれ、通常三つのBLDCモーターが搭載される可能性がある。

このように、xEV化やADASの進化は、制御の高度化と安全性確保のための冗長化につながり、BLDCモーターとECU (電子制御ユニット) の数は増大するため、電力密度が高く、小型で実装耐久性が高いパワー半導体が必要とされる。

一方、シャーシ系補器の電動化の進展により消費電力す

なわち電流量が増大し、これに対応してハーネスの質量も増加している。このため、現在12Vの電源を48Vに高電圧化して電流量を減少させることで、この問題に対処する動きが進められている。現在主に使用されている40～60V定格のパワー半導体に加え、80～150V定格の製品の需要が増加すると予想される。

2.2 E/Eアーキテクチャーの進化

2.2.1 ゾーンアーキテクチャーへの移行

E/Eアーキテクチャーは、車両ニーズの急速な市場変化に対応するため、開発のアジャイル化・効率化が可能なゾーンアーキテクチャーに移行しようとしている (図2)。

従来は、機能に基づいてECUごとに管理するフラット構造であり、50～100程度のハードウェアとソフトウェアを一体開発していた。現在は、機能 (ドメイン) ごとにECUをまとめて管理するドメインアーキテクチャーが主流であり、配線の最適化やECU開発の効率化を図っている。将来は、セントラルECUで統合制御を行い、場所ごとにゾーンECUでセンサー・アクチュエーターを制御するゾーンアーキテクチャーに変化する。その中で、車載アプリケーション (ソフトウェア) の更新・追加と、センサー・アクチュエーター (モーターなどのハードウェア) の更新を分離して扱えるようになることが検討されている。

また、CASEに加えてMaaS (Mobility as a Service) が推進されており、自動車のアーキテクチャーは、ハードウェ

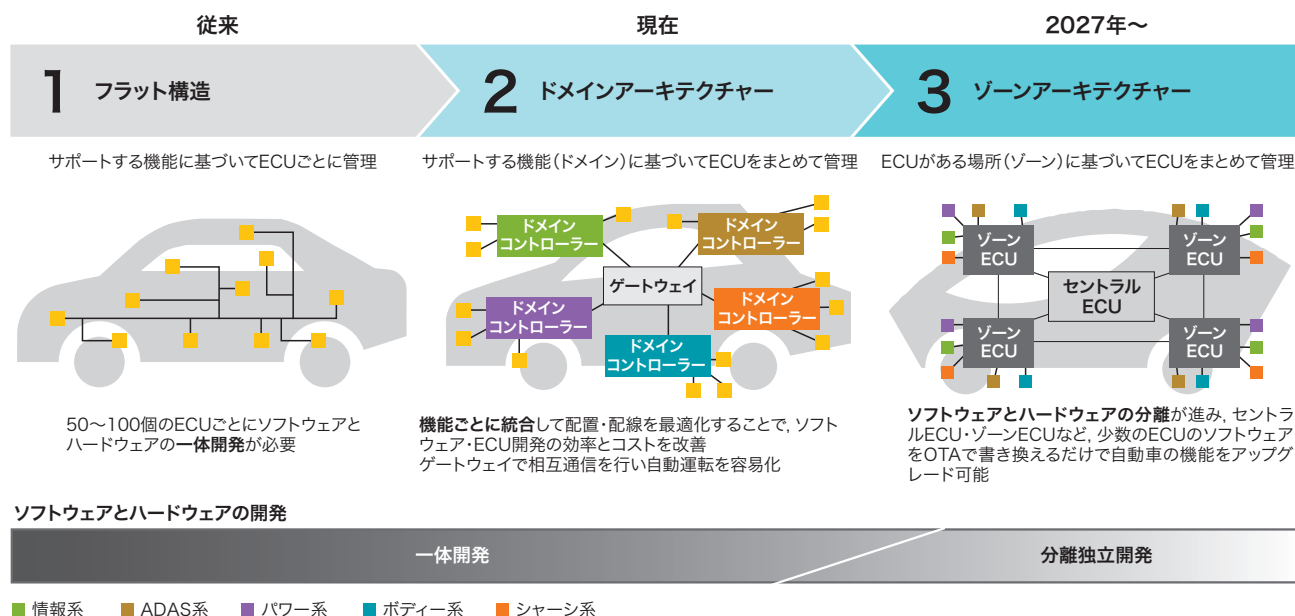


図2. E/Eアーキテクチャーの変遷

自動車のE/Eアーキテクチャーは、従来のフラット構造からドメインアーキテクチャーへ、そしてゾーンアーキテクチャーへと変わっていく。

Changes in E/E architectures

ア依存からSDV（ソフトウェアデファインドビークル）へと進化していく。SDVとは、ソフトウェアを更新し、フィールドで機能や性能を高めていく自動車であり、これを実現させるために、中央で各ゾーンの全機能を制御及び管理するゾーンアーキテクチャーに変革することによって、ソフトウェアのアップデートと管理を容易にすることが検討されている。

2.2.2 ECUの末端デジタル化

センサー・アクチュエーターの更新を、車載アプリケーションから分離して扱う手段として、ECUの末端デジタル化が、CXPI（Clock Extension Peripheral Interface）で進められようとしている。

末端デジタル化は、主にECUとモーターの機電一体となるユニットなどに適用されるので、小型化と、コストを抑えながらBLDCモーターのベクトル制御を行う必要がある。加えて、従来用いられている通信プロトコルLIN（Local Interconnect Network）、及びLINよりCPU負荷が高いCXPIのプロトコルの両方を制御できることが求められる。

これは、今後、ボディー系のローエンドの車内通信に、CXPIの使用が増える可能性があるためである。CXPIはLINと比較して、扱えるデータ長が長いこと、CRC（Cyclic Redundancy Check）によるエラー検出での通信の信頼性が高いこと、即時リトライ（再送信）が可能で通信遅延時間を短くできること、プラグアンドプレーでのECUの増減で車両の改変に容易に対応可能なことなどの、多くのメリットがある。

また、これまで進められてきた車載基幹ネットワークのEthernet化に加え、ゾーン化によるソフトウェアの中央集権管理に移行するため、自動車業界とテクノロジープロバイダーの非営利分科会OPEN Alliance SIGは、Ethernet規格10BASE-T1Sの車載適用で末端ノードをEthernet化してプロトコル変換を不要にすることを検討しており、当社もメンバーとして参画している。

2.3 通信の高速化

従来の車載インフォテインメントや車載テレマティクスでは、カーオーディオやカーナビゲーションなどが主な通信アプリケーションであった。近年は、車両ソフトウェアのアップデートを通信経路で行うOTA（Over the Air）や、車外と接続したスマートフォン連携サービスなどの拡充で、ネットワーク接続は必須要件となっている。

更に、ADASのための車両制御に向けて、交通信号機・道路施設といったインフラや、歩行者、ほかの車両などの通信技術であるC-V2X（Cellular Vehicle-to-Everything）の導入も必要になる。CASEのS（Shared & Service（最近試行されているライドシェアリングなど））の実現にも外部

との通信が必要であり、通信速度、データ量ともに増加していく。

通信規格の高速化や、クラウドシステムとの接続によるサービス多様化に伴うデータ量増大などに対応するために、車内通信の高速性・リアルタイム性・同期性に優れた高速ネットワーク規格であるEthernet AVB（Audio Video Bridging）・Ethernet TSN（Time-Sensitive Networking）に準拠した1 Gビット/sの通信速度を可能にする車載情報通信システム向けEthernetが使用される。また、外部との通信規格がLTEから5Gに変わるだけでなく、自動車のE/Eアーキテクチャーがドメインからゾーンへ進化することに伴い、セントラルECUと各ゾーン間の通信速度を10 Gビット/sに高速化することが求められている。

2.4 車載サイバーセキュリティ強化

以前から、キーレスエントリーのリレーアタックなど、外部からの様々な手段による不正アクセスのリスクが社会問題となっている。更に、MaaSの広がりにより、車両に搭載される機能のソフトウェア化の対象範囲拡大、及び車外と接続したサービスの多様化が進んでおり、車両に対するサイバーセキュリティの強化が喫緊の課題となっている。

2021年に国連の車両向けサイバーセキュリティ法規が発効され、この法規への対応として半導体メーカーに対して、車載製品のライフサイクル全般で、車載サイバーセキュリティ規格ISO/SAE（米国自動車技術者協会規格）21434、及び車載ソフトウェア更新規格ISO 24089への準拠が求められている。

3. 当社の取り組み

当社は、電費の向上に寄与するパワー半導体をはじめとした、CASE実現に貢献する幅広い車載向け半導体製品を提供している。以下に、当社の車載半導体に関する技術開発、製品開発の取り組みについて述べる。

3.1 ディスクリート半導体

ディスクリート半導体は、CASEのE（Electric：電動化）のトレンドに大きく貢献する。電動化の中で、電費向上が大きな課題の一つであることを2章で述べたが、このためにはスイッチング素子として用いられるパワー半導体の損失低減が重要である。走行駆動系には750 Vと1,200 Vのパワー半導体が、シャーシ系には40 Vから150 V定格のパワー半導体が、スイッチングデバイスとして用いられ、当社はそれらの損失低減に向けた取り組みを絶え間なく続けている^{(1), (3)}。

走行駆動系には、従来Si（シリコン）IGBT（絶縁ゲート型バイポーラトランジスター）が用いられているが、損失低減のための改善とトレードオフがあり、その対策を進めて

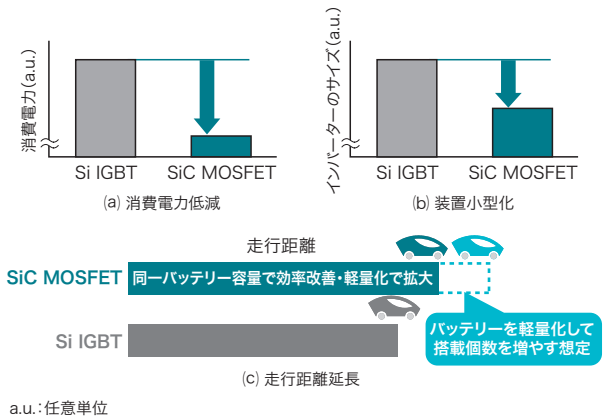


図3. SiC MOSFET導入による消費電力削減・装置小型化・走行距離延長

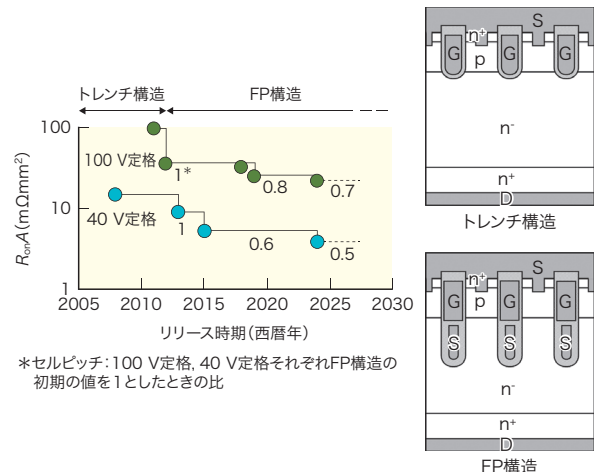
Si IGBTに代えてSiC MOSFETを導入して、消費電力削減、装置小型化、及び走行距離延長を図る。

Effects of application of silicon carbide (SiC) metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (MOSFETs) on xEVs

いる。例えば、素子厚の薄化に起因して、スイッチングの際に電流・電圧波形が振動するという問題があり、裏面構造の最適化により改善を図った。また、従来別チップであったIGBTとFWD (Free Wheeling Diode) を1チップに集積化するRC-IGBT (Reverse Conducting IGBT) では、ダイオード動作時にIGBTからも少数キャリアの注入があるために、ダイオードがオフになる際の逆回復電流が大きくなるという問題があり、表面レイアウトの工夫により改善した(この特集のp.8-12参照)。

2.1.1項で述べたとおり、システムの小型化のために導通損失の低減だけでなく、高速化(高周波化)が求められており、この要求に合致するSiC(炭化ケイ素)MOSFET(金属酸化膜半導体型電界効果トランジスター)の導入を進めている。ユニポーラーデバイスであるSiC MOSFETでも、バイポーラーデバイスであるSi IGBTと同等以下の $R_{on}A$ (単位面積当たりのオン抵抗)が実現できるようになり、導通損失とスイッチング損失の低減を両立可能にした。図3に示したように、今後損失の低減だけでなく機器の小型化にも寄与し、航続距離の延長が期待されている。SiCに関しては、現在も特性やSiC特有の信頼性に対する課題の改善を進めている^{(4), (5)}。

走行駆動系バッテリーの高電圧化に伴い、パワー半導体だけでなく電池監視システム(BMS)で用いられる絶縁デバイスの高耐圧化が必要である。バッテリーの充放電に用いられるメカニカルリレーの溶着検出や、BMS回路における高電圧ブロックの地絡検出などにフォトリレーが使用されるが、新開発の高耐圧MOSFETチップと入出力間の沿面距離(絶



S:ソース G:ゲート D:ドレイン
n':不純物濃度が低いn型半導体 n+:不純物濃度が高いn型半導体
p:p型半導体

図4. 40 V・100 V定格のSi MOSFETの構造変更による $R_{on}A$ の改善

Si MOSFETのセル構造をトレンチ構造からFP(フィールドプレート)構造に変更し、更に微細化によりセルピッチを小さくすることで、 $R_{on}A$ を継続的に低減している。

Changes in specific on-resistance ($R_{on}A$) depending on structures of 40 V and 100 V power MOSFETs

縁物質に沿った導体二つの間の最短距離)を延伸したパッケージの組み合わせにより、800 Vバッテリーにも対応した製品を開発した(同p.13-16参照)。

一方、シャーシ系補器で用いられる40 Vから150 VのSi MOSFETも、損失低減のために $R_{on}A$ の低減を続けている。図4は、40 V及び100 V定格のSi MOSFETについて $R_{on}A$ の推移を示したグラフである。構造の改善及び微細化により、大幅に $R_{on}A$ が低減されていることが分かる。

チップの性能の改善に加え、近年はパッケージの改善の重要性が増している。2章で述べたとおり、小型で実装耐久性が高い半導体が求められていることから、この要求に応えるために、小型フラットリードのDFN2020パッケージの、自動光学検査(AOI: Automated Optical Inspection)を可能としたウェットブルフランク構造のDFN2020(WF)の量産を始めた(同p.17-21参照)。

更に2チップのSi MOSFETを1パッケージに搭載して、インバーター回路のハイサイドとローサイドを内部接続することで、1チップを1パッケージに搭載した従来製品を2個使用する場合に比べ、実装面積を約41%小型化する新パッケージの開発を進めている(同p.22-25参照)。

また今後の48 Vシステムに対応するため、Si MOSFETやゲートドライバーは80~150 V製品ラインアップの拡大も行う予定である。

3.2 アナログ・ロジック半導体

3.1節で述べたディスクリート半導体が主にCASEのEに貢献するのに対し、アナログ・ロジック半導体は、CASE全ての進展に貢献する。E/Eアーキテクチャーの進化の中で、センサー・アクチュエーターを制御するECU末端部のデジタル化の流れがあり、これを実現するのがMCU (Micro Controller Unit)内蔵ゲートドライバー SmartMCD™シリーズである。従来のゲートドライバー ICの機能に加え、様々なアプリケーションに応じた細やかな制御を実現するために必要なソフトウェアを格納するメモリー、上位のECUとの通信回路などを内蔵したものであり、この製品を用いたシステムを効率よく開発するための手法であるMBD (モデルベース開発) 向けのモデルも開発している (同p.26-30参照)。

今後、CXPIのプロトコルが車内通信として使用される際、末端側ICの異常検出時の通信制御、及びバス通信で発生する電磁干渉 (EMI) の改善が、課題である。これに対し、異常を事前に検出する技術と、バス通信波形から高周波成分を除去する技術を開発して、この課題を解決した (同p.31-33参照)。EMIは、システム開発期間短縮の観点からも、設計段階での予測精度の向上が求められており、高品質なモデルを提供するために、半導体製品のEMC (電磁両立性) 特性を予測するエミッション及びイミュニティーモデルの作成環境の開発と検証を行っている (同p.34-37参照)。

一方、車載サイバーセキュリティの重要性の高まりに呼応し、既存の車載向け半導体製品開発プロセスを、国際標準 (ISO/SAE 21434, 及びISO 24089) に準拠させる半導体サイバーセキュリティエンジニアリング技術を確立した (同p.38-42参照)。

4. あとがき

自動車業界ではCASEと呼ばれる四つのトレンドによって、大変革期を迎えており、キーデバイスである車載半導体が重要な役割を担っている。この特集の各論文で述べるように、当社はCASEの要求に合致した技術開発・製品開発を推進し、将来のモビリティ社会の発展に貢献する。

文 献

- (1) 川口雄介, ほか. カーボンニュートラルに貢献するデバイス・材料の技術動向と東芝グループの取り組み. 東芝レビュー. 2023, **78**, 1, p.2-5. <<https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/jp/technology/corporate/review/2023/01/a02.pdf>>, (参照 2024-05-27).
- (2) TechInsights. "Main Data Tables - Automotive Electronics System Demand Forecast 2022 to 2031". <<https://www.techinsights.com/blog/main-data-tables-automotive-electronics-system-demand-forecast-2022-2031>>, (accessed 2024-05-27).
- (3) 西脇達也, ほか. ディスクリート半導体技術の最新動向と展望. 東芝レビュー. 2020, **75**, 6, p.2-8. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2020/06/75_06pdf/a02.pdf>, (参照 2024-05-27).
- (4) 古川 大, ほか. SBD内蔵で信頼性を向上させた1.2 kV SiC MOSFET. 東芝レビュー. 2020, **75**, 6, p.19-23. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2020/06/75_06pdf/a05.pdf>, (参照 2024-05-27).
- (5) 古川 大, ほか. 信頼性と低損失を両立させた第3世代SBD内蔵型SiC MOSFET. 東芝レビュー. 2023, **78**, 1, p.14-18. <<https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/jp/technology/corporate/review/2023/01/a05.pdf>>, (参照 2024-05-27).



川口 雄介 KAWAGUCHI Yusuke
東芝デバイス&ストレージ (株)
半導体事業部
電気学会会員
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.



来島 正一郎 KURUSHIMA Shoichiro
東芝デバイス&ストレージ (株)
半導体事業部 半導体応用技術センター
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.



子井野 誠治 KOINO Seiji
東芝デバイス&ストレージ (株)
半導体事業部 半導体応用技術センター
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.