

車載パワートレインとパワーエレクトロニクス機器 を取り巻く技術環境の変化と対応

小笠 正道*

Changes and Dealing with the Technical Environment surrounding
On-vehicle Powertrain and Power Electronics Equipment

Masamichi OGASA

CASE (Connected, Autonomous, Shared & Service, and Electric) must be recognized as a comprehensive technology from the speed of progress of automobiles in terms of development and introduction of the newest technologies. It is also a fact that the individual technologies have been originally embodied in railway vehicle sector from a relatively earlier stage. In the very recent automotive industry, the key to realizing CASE that is new value is to be EV (Electric Vehicle). First, the technologies corresponding to the CASE items that have been introduced to railway vehicles originally will be sort out. Next, compared the above technologies with the latest being developed in automobiles with the EV adoption, the changes surrounding the on-vehicle powertrain and power electronics equipment should be captured. Finally, the technical items to deal with the changes will be outlined.

キーワード：パワートレイン、パワーエレクトロニクス、CASE、MaaS、EV、鉄道車両、モジュール化

1. はじめに

鉄道車両において比較的早い時期から個別技術の具現化がなされながらも、ここ数年の最新技術の開発および導入の面で自動車の進展と変革の早さに学ぶべき包括的技術がCASE (Connected 接続, Autonomous 自動運転, Shared & Service 共有とサービス, Electric 電動化) である。そして自動車業界の新たな価値であるCASEの実現の要は電動車 (Electric Vehicle) 化とされている¹⁾。

本稿ではまず、CASE各項目の技術を概括した後、その源流に相当する、これまで鉄道車両に導入されてきた技術を整理する。次に、自動車での進展中の最新技術を比較することで、車載パワートレインとパワーエレクトロニクス機器を取り巻く技術環境の変化を捉える。最後に、これら変化を踏まえて対応すべき技術項目について概説する。

2. 鉄道車両で行われて来たCASE対応項目

2.1 自動車におけるCASE各項目の技術要諦

CASEは2016年9月29日にパリモーターショーにおいてダイムラー(Daimler)CEOのディーター・ツェツェ(Dr. Dieter Zetsche)が提唱したのが最初とされている。

「CASE革命=IoT化×知能化(AI)×電動化²⁾とされるCASE各頭文字の概念は以下のように整理され、複合的に繋ぎ目無くパッケージ化されることが重要となる。

2.1.1 コネクテッド(C:接続)

テレマティクス(Telematics)は「電気通信(Telecommunication)と情報科学(Informatics)の合成造語で、VICS(Vehicle Information and Communication System 交通情報通信サービス)やETC(Electronic Toll Collection System 自動料金収受システム)を含むITS(Intelligent Transport System 高度道路交通システム)、運転行動データ(走行距離、最高速度、急発進停止頻度など)に連動して保険料率が決まるテレマティクス保険が代表例。」²⁾である。つまり、スマートフォン連携、一部センサ情報や音声認識を用いて車載マルチメディアと車外(Out Car)領域の情報との接続による効率化や娯楽拡大を行う。車両自体の制御には介入しない。

これに対してコネクテッドは、当初「インターネットITS(IITS)」として提言³⁾された「クルマ自体がIoT端末としてネットワークに繋がることで有機的プラットフォーム全体を網羅する概念。OTA(Over the Air 無線通信)を用いたファームウェアの更新、自動運転車の遠隔操作、ビッグデータと繋がった新サービス展開を含む。テレマティクスの上位概念。」²⁾である。つまり、マルチメディア情報接続だけでなく車両の制御と車外を繋げて一体のシステムを構成することを意味し、車両OSや車両制御API(Application Program Interface)など車両ソフトウェアのアップデート、走行時の地図情報や渋滞情報の取込みと経路設定への反映、制御結果としての走行データの収集・分析による遠隔保守といった車内(In Car)領域への応用を含む。

* 車両制御技術研究部 主管研究員

特集：車両技術

必然的にモビリティサービス・プラットフォームなる IoT (Internet of Things) 情報ネットワークが前提となり、通信インフラ、クラウド基盤、データセンター、ソフトウェア開発がセットで必要となる。しかしこの投資規模に対応できる自動車メーカーは世界で数社とされ、他の自動車メーカーは上記自動車メーカーか IT 企業等をプラットフォーム⁴⁾として選定して連携する必要がある。

注意すべきは、車両 OS など車内領域の要素をも IT 企業が握り、クルマをコモディティ化して IoT アーキテクチャー上での単なる動くハコの地位に転落させる動きが存在することである。自動車メーカー側は対抗策として、オープン化された車載コネクテッド OS や、対スマートフォン連携のクローズドなゲートウェイを設置するなど、車両制御の根幹までは IT 企業に握らせないオープン／クローズ戦略が必要で、実際に対策⁵⁾がなされている。

2.1.2 自動運転 (Autonomous)

公的利用を前提とするサービスカー (MaaS 車両: Mobility as a Service) と個人所有のオーナーカー (POV: Personally Owned Vehicle) では求められる自動運転レベル⁶⁾が異なる。そのため、将来の導入比率も異なると予想されている。

MaaS は狭義には「公共および民間の交通手段を組み合わせたマルチモーダルでの移動」を、広義には「ソサエティ 5.0 で指摘される環境問題、少子化高齢化、過疎化などの社会課題を解決⁷⁾するモビリティ・ソリューション」である。現行のタクシー、バス、ライドシェア／カーシェアに加え、無人運転路線バス⁸⁾やラストワンマイル手段ともなり得る自動運転タクシー (ロボットタクシー)、荷貨物の自動宅配ドローンが開発途上にある。

日本では、ドライバーレス前提の MaaS 車両で SAE (Society of Automotive Engineers: 米国自動車技術会) 定義⁶⁾の自動運転レベル 4 (特定条件下でシステムが全ての運転タスクを実施し、システムが責任を負う: brain free) を 2020 年に、オーナーカーでは高速道路でレベル 3 (システムが運転操作を行うが運転者が責任を負う: eyes free) を 2020 年に、一般道でレベル 2 (駆動制動右左折をシステムが行い、運転者が監視とそれ以外の操作および責任を負う: hands free) を 2025 年に、各々実現することを目指している⁹⁾。サービスカーとオーナーカーとの違いである、「オーナーカーでは利用用途が多様かつ地理的な移動範囲に制限がなく、完全自動運転の実装には相応の時間を要する。他方、バスや物流等のサービスカー (MaaS 車両) は用途や利用範囲が限定的なため、オーナーカーに比して自動運転の実装は早期に実現される。」⁹⁾との理由による。

現在の世界の自動車総移動距離 (約 1.6×10^9 km) に占める MaaS 車両の移動距離の比率は約 2%²⁾である。一方オーナーカーの年間車両平均稼働率 (2013 年) は

4.8% で残り 95.2% は駐車状態である¹⁰⁾。以上の状況から自動運転 MaaS 車両の走行距離拡大が見込まれている。

2.1.3 シェアリングとサービス (Shared and Service)

コネクテッドとの組み合わせでライドシェアが進展し、配車サービスではタクシーからの移行に加えオーナーカーやレンタカーからの代替も始まっている。

現在はドライバーが介在するが、今後自動運転と結びついたマルチモーダル MaaS の形成が見込まれる。

日本国内で、ライドシェア専用ハイブリッド車がロボットタクシーとして 2021 年に配車サービス事業者により投入される¹¹⁾ことや、2018 年に開発された人以外に貨物も運べる MaaS 専用多目的自動運転 EV⁵⁾が 2023 年以降に事業展開される予定などが公表されている。

2.1.4 電動化 (Electric)

「AI (Artificial Intelligence 人工知能、および Augmented Intelligence 拡張知能) が移動の自由をもたらす技術革新なら、電動化はその自由を真の意味で持続可能とする (自動車産業にとっては至高の) 技術革新。」²⁾である一方、電動化は相当の技術的ブレークスルーがない限り容易には拓がらないことも理解されている。特にエネルギー源としての蓄電池や燃料電池の課題が存在する。そのため、電動化の進展には急進的予測と漸進的予測が混在する。

オランダでは 2030 年以降のエンジン搭載車の販売禁止を首都乗入れ禁止と合せて政府や市が承認¹²⁾、ドイツでも連邦議会が決議した¹³⁾。しかし 2017 年の世界の乗用車販売に占める EV の割合は 1.4%³⁾と現況は厳しい。

ディーゼル不正で戦略転換を余儀なくされた VW (Volkswagen) は、2025 年におけるグループ全体での EV 販売比率 25% (HEV と PHEV を含むと 45%) や蓄電池購入量 150GWh / 年を打ち出した¹⁴⁾。一方でダイムラーなどは、当面の蓄電池価格が漸進的にしか低下しないことや、急激な電動化による蓄電池材料の入手難発生や価格高騰をリスクと捉え、1つの動力源だけに依存し過ぎない戦略を取っている¹⁵⁾。

いわゆるパワートレーンミックス¹⁶⁾戦略である。

具体的には、ディーゼルを含むエンジン車、ハイブリッド車 (HV)、プラグインハイブリッド車 (PHEV)、純電気自動車 (EV)、燃料電池車 (FCV) の比率を地域ごとに変えて生産・販売し、カリフォルニア州 ZEV (Zero Emission Vehicle)、中国 NEV (New Energy Vehicle)、欧州等 CAFE (Corporate Average Fuel Efficiency: 企業別平均燃費基準) 等の規制をミニマムでクリアする。その地域の発電時排出原単位が発電方式の構成比率すなわちエネルギーミックスに依存することから、電動車の生産・販売の構成比率もそれに合せて最適化するのである。

また最近ではインバーター、電動機・発電機、減速機をユニット化した「e アクスル (e-axle)」などの機電一体型ターンキー製品が登場¹⁷⁾している。搭載空間効率、

性能の向上と軽量化，特に異なるパワートレーンへの汎用展開が容易となり開発生産性向上が期待されている。

2.2 鉄道車両における CASE 各項目相当の先行技術

鉄道車両では，CASE 各項目に対応する源流となる技術アイテムが比較的早い時期から開発されてきたといえる。上述した自動車の CASE 技術に対応する鉄道の技術と今後の展開を表 1 に示す。

3. パワートレーンを取り巻く環境の変化

3.1 擦り合わせ（インテグラル）設計から組み合わせ（モジュラー）設計へのアーキテクチャー移行

多くの製造業で組み立て部分の付加価値が低減し，素材・デバイスといった川上か，事業・サービスといった川下に付加価値が移行する「スマイルカーブ²⁰⁾」構造になりつつある。今後 MaaS 進展により自動車業界では

ドライバーレスのサービスカー需要が増すとともに，鉄道においても 2 次交通との連携がうまく行くようになると，列車の高頻度運行が要求される可能性がある。その場合短編成化された列車による運行となる公算が高く，鉄道車両製造は従前にも増して多品種少量生産を，安価かつ短期に行うことが求められる。すなわち最も工数を要する“設計”の生産性向上が必須となり，これまで日本が得意としてきた擦り合わせ設計では無く，組み合わせ設計への移行が求められる。そして組み合わせ設計への兆候は既に顕在化している²¹⁾。

3.2 パワートレーン上コンポーネントのユニット化

今後も展開に時間がかかると認識されているのが電動化で，特に車載主電源と充電や充填の課題が大きい。

また，パワーやエネルギーの効率，省空間と軽量化の観点から車載電機品自体にも変革が求められている。

表 1 鉄道車両における CASE 各項目相当の先行技術

技術項目	鉄道車両において先行した技術	自動車業界で高進展の技術	今後鉄道で可能性のある新規技術
Connect	<ul style="list-style-type: none"> 【列車内】・重連総括化 ・メタル指令線列車内引通し（パイワイヤ） ・モニター伝送（故障/監視データ自動収集） ・沿線（一部無線）LAN によるモニターデータの地上拠点へのデータ自動収集 ・制御伝送（駆動・制動指令）イーサバス 【対列車外】・列車無線（⇒デジタル化） 【地上連携】 ・車軸検知装置による温度検知 ・入庫カメラによる異常摩耗診断 	<ul style="list-style-type: none"> 【車両内】・ ECU 統括制御 ・ CAN-FD バス 【対車両外】 ・テレマティクス（ITS） 音声認識，スマホ連携の車載マルチメディア ・ OTA（走行データ自動収集）（ファームウェア更新）（遠隔自動運転） ・車車間通信，路車間通信 	<ul style="list-style-type: none"> 【列車内】 ・ビッグデータ分析と保守への展開 ⇒【セルフメンテナンス】¹⁸⁾ 【接客系】¹⁹⁾ ・空調，トイレなど接客設備の快/不快（温度，臭い）制御 ・末端駅折り返し清掃業務の一部ロボット化 ・ワゴンサービスロボットを用いた車内販売タイミング制御
Autonomous	<ul style="list-style-type: none"> 【運行系】・連結運転 ・自動加速（ACR）抵抗進段⇒トルク制御 ・ ATS, ATS-P, ATC, TASC（運転保安系） ・ ATO（パターン走行） ・自動運転（パターン走行） ・非常時 TE（緊急列車防護装置） ・無線列車制御 	<ul style="list-style-type: none"> 【運行系】・隊列走行 ・経路探索：A* アルゴリズム ・レーン追従，障害物回避走行（レーザー画像検出，ミリ波レーダー援用） ・自動運転（自律走行） ・車両群走行データに基づく地図自動修正 	<ul style="list-style-type: none"> 【運行系】 ・制御用 IoT プラットフォーム ・迂回運転，ルート変更（車上分岐，車上 CTC/PRC）¹⁹⁾ ⇒【セルフステアリング】，【セルフルーティング】¹⁸⁾ ・動的信号制御・車上自動化 ・移動閉塞
Shared & Service	<ul style="list-style-type: none"> 【旅客】 ・乗合い（当初よりライドシェア） 【運行事業者】 ・相互直通運転 ・車両共有（リース） 	<ul style="list-style-type: none"> 【旅客】 ・乗合いバス 【シェア/運行サービス事業】 ・ファースト/ラストワンマイル ・乗用車のライド/カーシェア ・配車タクシー ・デマンドのスマホアプリ連携 【車両製造（自動車業界）】 ・MaaS 対応自動運転 EV 	<ul style="list-style-type: none"> 【旅客】・一部デマンド運行 【サービス事業者】・MaaS：2 次交通（他交通モード）との連携 ・スマートシティ：最小料金，最小時間，最小エネルギーのトレードオフ解消型交通モード群選定¹⁹⁾ ・乗車時自動運賃収受 ⇒【セルフチェック】¹⁸⁾
Electric	<ul style="list-style-type: none"> 【車両パワートレーン】 ・電動機駆動：直流⇒交流，リニアモーター ・電力変成/変換器：変圧器，チョッパー，各種整流器，インバーター（含：液冷） ・電力用半導体（材料：シリコン，SiC）（構造：ダイオード，GTO，IGBT，FET） ・蓄電池走行（鉛/リチウムイオン蓄電池） 【列車外物理インターフェース】 ・集電（架空/剛体電車線），接触充電 ・誘導障害対策，軌道短絡（通信線，踏切制御子，軌道回路） 	<ul style="list-style-type: none"> 【車両パワートレーン】 ・ HEV, EV, FCEV ・レンジエクステンダー PHEV ・永久磁石式/リラクタンス同期主電動機 ・ PCU（パワー制御パック） ・機電一体型モーター（インバーター一体型） 【車外物理インターフェース】 ・一般道交差点での非接触集電，高速道での接触集電，高速 SA/PA での非接触充電 	<ul style="list-style-type: none"> 【車両パワートレーン】 ・擦り合わせ設計から組み合わせ設計へ（新アーキテクチャー）例：モジュラーパワーバック ⇒【セルフパワー】¹⁸⁾ 【機能統合ユニット】 ・インバーター一体型モーター ・歯車レス・アキシヤルギャップ（横方向磁束型）モーター ・トランスレス整流装置 ・充放電機能一体型インバーター ・非接触給電

特集：車両技術

4. 新たに対応すべきパワートレーンアイテム

4.1 パワートレーンのモジュラー化

設計生産性向上とはアーキテクチャーの見直しに他ならない。欧州の鉄道では早くからモジュラー概念が提唱されて来た。最近の多様なエネルギー源に対応可能なモジュラーパワーパック化の実現例が存在する²²⁾(図1)。運行事業者からの要望に応じて、列車の基本構成を変えずにエネルギー源の選択と脱着を容易にした結果、多様な要望に短期間で対応可能になっている。

4.2 一体型コンポーネント(ユニット化)

装置の部品点数減を目的に機能を集約しユニット化するものである。機電一体型モーター(インバーター一体型モーター、歯車レスモーターなど)、充放電機能一体型インバーター(チョッパー付きインバーターなど)、トランスレス整流装置、放熱機能一体化蓄電モジュールなど、複数機能を一体化することで、装置を小型化軽量化し、部品点数を減らすことができる。なお、「一体型」は単なる「合体」では無く、冗長な部品や機能の省略など、設計面におけるスリム化を伴うことが前提となる。

5. まとめ

自動車におけるCASE概念の各項目に対応する、鉄道車両で先行した技術を整理し比較した。パワートレーンを取り巻く環境変化への対応として、設計時のモジュラー化が重要となることが分かった。今後指向すべき技術としてパワーパックやコンポーネントの一体化がある。

文献

- 1) 島津：クルマを一変させる「CASE」、日経ビジネス、2016.10.19 (参照日：2019.08/19th), <https://business.nikkei.com/atcl/opinion/15/221102/101800328/>
- 2) 中西：CASE革命、日経新聞社、pp.34, 113, 221, 2018.11
- 3) 大聖：自動車の電動化に関する将来展望、自動車技術、Vol.73, No.7, pp.20-27, 2019.07

- 4) 内閣府：未来投資戦略2018全体版－「Society 5.0」 「データ駆動型社会」への変革－、2018.06
- 5) トヨタ自動車：モビリティサービス専用EV “e-Palette Concept”をCESで発表、2018.01/09 (参照日2019.08/19th), <https://global.toyota.jp/album/videos/20508200/>
- 6) NHTSA：SAE Automation Levels, Automated Driving Systems 2.0 – A Vision or Safety – (U.S. Department of transportation, National Highway Traffic Safety Administration), p.4, 2016.09
- 7) 総務省：人口減少時代の課題とICTによる持続的成長、平成30年版通信白書、pp.2-5, 2018.07
- 8) SBドライブ：公道でハンドルがないバスの自律走行を実証(自動運転レベル2)、リリース、2019.06
- 9) 官民データ活用推進戦略会議：官民ITS構想・ロードマップ2019, 2019.06
- 10) 前川ほか：カーシェアリングの推進、名古屋産業科学研究所、p.3, 2015
- 11) トヨタ自動車：自動運転ライドシェアサービスの開発と展開へ向け協業を加速、2019.04.19 (参照日2019.08/19th), <https://global.toyota.jp/newsroom/corporate/27833045.html>
- 12) Government of Netherland：Dutch public transport switches to 100% emissions-free buses, 2016.04.15 (参照日2019.08/19), <https://www.government.nl/latest/news/2016/04/15/dutch-public-transport-switches-to-100-percent-emissions-free-buses>
- 13) Sven Böll：Ab 2030 Bundesländer wollen Benzin- und Dieselaautos verbieten, Spiegel 2016.10.08 (参照日2019.08/19th), <https://www.spiegel.de/auto/aktuell/bundeslaender-wollen-benzin-und-dieselaautos-ab-2030-verbieten-a-1115671.html>
- 14) Volkswagen：Roadmap E, 2018.07/02 (参照日2019.08/19)
- 15) Daimler：Innovative vehicle and powertrain technologies, Sustainability Report 2018, pp.16-24 (参照日2019.08/19), <https://www.daimler.com/documents/sustainability/other/daimler-nachhaltigkeitsbericht-2018-en.pdf>
- 16) 草鹿ほか：パワートレーンのベストミックス、スズキ財団ニュース第45号、2018.09.30 (参照日2019.08/19th), <http://www.suzukifound.jp/03public/public02.html>
- 17) 中村：電動車の注目技術「eアクスル」急展開…人とするまのテクノロジー2019.05.23 (参照日2019.08/19th), <https://response.jp/article/2019/05/23/322634.html>
- 18) 須田：サステナブルな交通システム、生産技シンポジウム2009.09/29 (参照日2019.08/19th), https://www.ir3s.u-tokyo.ac.jp/esf/images/activity/symposium_02_suda.pdf
- 19) 小笠：2030年に向けた鉄道車両技術アイテムのイメージ、車両News No.25, 2013.10 (参照日2019.08/19th), https://www.rtri.or.jp/rd/news/vehicle/vehicle_201310.html
- 20) 日高ほか：MaaSモビリティ革命の先にある全産業のゲームチェンジ、日経BP、pp.284～286, 2018.11
- 21) 令和元年技術士二次試験問題-機械部門-必須科目I, 2019.07 (参照日2019.08/19th), https://www.engineer.or.jp/c_topics/006/attached/attach_6640_1.pdf
- 22) Dave King, Flexible Power Systems for Rail Vehicles, National Oceanography Center, The Year of Autonomy, 2017.12 (参照日2019.08/19th), <https://conference.noc.ac.uk/sites/conference.noc.ac.uk/files/documents/2.%20Dave%20King%20-%20Viva%20Rail%202.pdf>

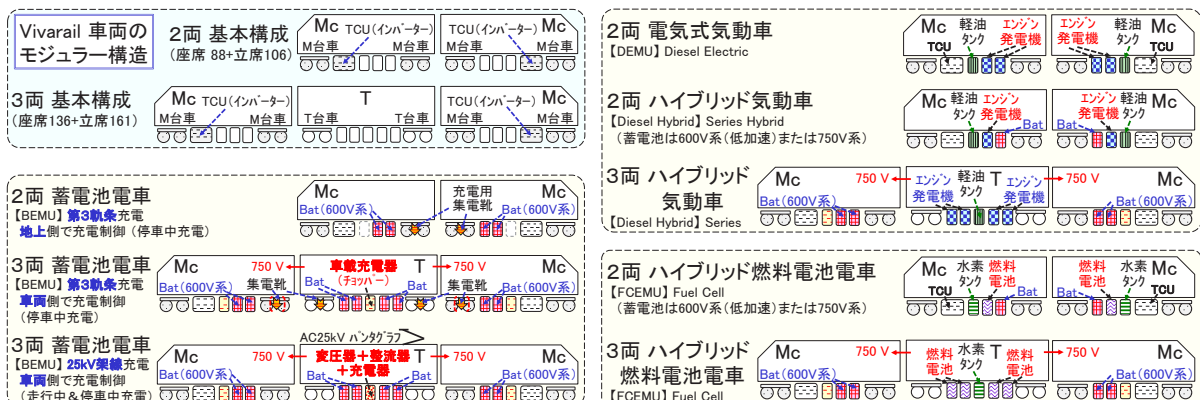


図1 Vivarail D-trainモジュラー化パワーパックによる動力源バリエーション (文献(22)を元に著者書き起こし)