カーエレクトロニクスの歴史俯瞰と今後の展望

加藤 光治*

Historical Overview of Automotive Electronics and Future Trends

Mitsuharu KATO*

* 有限会社 MTEC (元・株式会社デンソー) (〒480-1304 愛知県長久手市郷前 2776 番地)

* MTEC Corporation (Denso corporation retired) (2276 Goumae, Nagakute, Aichi 480-1304)

1. はじめに

車は 1885 年にベンツにより発明された。10 年間に進化し、現代の車に一層近いものとなった。産業革命以来の技術を活かし、工夫を重ね、当時の技術の粋を集めたものであった。しかしこれらは言うてみれば工芸品、手作りであった。代わって本格的な工業製品として量産モデルとなったのが 1908 年発表となったフォード・モデル T (THE MODEL T) であった。1.5 km ともいわれた流れ作業ラインによる本格的なモノづくりの開始であった¹⁾。図 1 において歴史俯瞰図を示す。当時の日本は、日露戦争直後で明治維新後 40 年を経たとはいえ近代工業のまだまだ黎明期であった。その時代に 20 年間で 1,500 万台にも及ぶ量産車を実用化したのであるから米国の技術力はすごかったのである。日本の大衆向けの本格量産車が 1961 年のトヨタ・パブ

リカに代表されると位置づけると、その 53 年前に米国において量産が始まったことになる。米国においては半世紀以上先行していた産業であった。

米国の自動車産業の先行性を、逆にいえば日本の自動車産業の遅れを一気に取り戻すチャンスは 1970 年代にマスキー法とオイルショックへの対応という新しいニーズの発生によりもたらされた。マスキー法による排出ガス低減が喫緊の課題となり、さらにオイル危機による原油の高騰に対処するため燃費の向上が重要な開発課題となった。このためのエンジン制御の開発競争が始まった。CO, HC, NOx をその時期の実態より 1/10 にするという当時からみればとんでもない高いレベルのクリーン化の目標であった。法律を作った米国自体においてもその実現性は危ぶまれた。エンジンを単に回していた従前とは比較できないぐらいの新規技術、すなわち予混合の希薄燃焼技術、排出ガス低減の

図 1. 日本の自動車産業の歴史的俯瞰

浄化技術、空燃比制御技術、空気量計測技術、排気酸素量の計測技術などの技術開発を要したのである。米国自動車産業に必死に追従してきた日本の自動車産業は、これらの新燃焼技術、センサ技術、セラミック浄化装置、電子技術などの各分野の技術の結集により世界に先行して排出ガス低減と燃費向上に成功したのであった。そして1975年のマスキー法施行にも世界に先駆けて対応することができた。半導体と電子産業が丁度この時期に芽生え、遅滞なく車制御にも適用することができ、習得していた車作りの既存技術と相まって、日本の自動車産業が環境に配慮した車の新時代を牽引することとなった。

2. 半導体の車応用黎明期

半導体の実用化は1947年のショックレーのトランジスタ発明に端を発する。車業界にも速やかに適用検討が進められた。図2に示すように、ダイオードは交流発電機の効率

図2. ダイオード、トランジスタ時代の幕開け

的な整流にいち早く着目された。トランジスタはイグニッションコイル電流の遮断を接点無しで行うことを可能にし、点火電圧を飛躍的に高めた。1958年にはキルビーによりICの発明となり、1971年のインテルによるマイコンの発明と続き半導体の車への応用は遅滞なく進展した。日本の自動車業界は、半導体、電子技術の採用による自動車技術の競争力向上を千載一遇のチャンスとしたのである。排出ガス低減と燃費向上を同時にクリアするためのエンジン周辺の構成を示したのが図3である。排出ガスの酸素濃度を O_2 センサで検出し、フィードバック制御により触媒浄化装置の効率が一番良くなるように空燃比と点火時期を制御した。必要な空燃比とするために空気量に応じて噴射量を制御するエンジン制御システムのはじまりであった。1960年代までに古典的な自動車技術を手の内にした日本の自動車業界が、1980年のマスキー法適合車の実用化に向けて、その関連の産業界の支援と知恵を受けて世界に先行して完成させたのが電子制御システムであった。

3. カーエレクトロニクス発展期

この世界に先行した電子制御システム技術がカーエレクトロニクス時代の始まりとなった。半導体の発明により急進展した電子技術も黎明期ではあったが、その電子制御を自動車へ遅滞なく応用した。その後電子業界の最新技術を車用に適用し、さらに進化させることにより、図4に示すようにエンジン制御、ボデー制御、シャシー制御、さらには情報系にも展開が進んだ。今やエレクトロニクス無くして車は成立しないという時代となった。このように複雑化する車両制御により、一台の車両に搭載されるECU (Electronic Control Unit) の個数は増加し、ハーネス数も増加した。そのためにECUデータの相互利用、各種信号の相互

図3. 燃料噴射システム構成図（例）

各種ECUへの適用

DSRC: Dedicated Short Range Communication
CRM: Customer Relationship management

図 4. エレクトロニクス発展期

図 5. ECU 増加と階層化

利用をする多重通信技術は、一層重要になった。また、図5に示すように各種ECUの連携と品質確保のために、階層化された開発手法が必須となった。ソフトウェアの品質向上、再利用が開発費低減のために重要な課題となった。これらの話題やシステム個々の車両制御に触れると膨大な資料になってしまうので、詳細は筆者編纂の書籍^{2),3)}などを参考にされたい。

4. 要素技術俯瞰

本稿ではそれらの制御を支えてきた半導体技術、電子技術、およびそれらの実装技術に絞ってまとめてみることにする。まずは、図6はエンジン制御ECUの進化の事例である。半導体の進化に合わせてECUの構成も進化している。当初はアナログICだけによる制御であったものが、マイコンの発明、その実用化とともに遅滞なくエンジン制御に採

パワートレーンECUの進化

ECU: Electronic Control Unit

75年代
燃料噴射
アナログIC

実装技術:
THD (Through Hole Device)
・3つのアナログICを採用

75年代
エンジン総合制御
12ビットカスタマイコン

実装技術:
多層プリント配線板
・初めてマイコンを採用

2000年代
エンジン総合制御
+クルーズ制御
32bitマイコン

実装技術:
SMD (Surface Mount Device)
・防水コネクタ
・外部からソフト書き換え可能

図6. ECUの進化の経緯

ハイブリッドICの事例

ICレギュレータ

オルタネータへの組込み(機電一体)

フリップチップ トランジスタ

アナログIC

図7. ペアチップ実装

用された。半導体のパッケージ技術はDIP (Dual in Line Package) 型でプリント配線板への実装はスルーホール技術の時代を経て、表面実装のパッケージ技術で多層のプリント配線板の時代となった。マイコンも32ビットフラッシュメモリの採用となり、ECU実装の後に、ソフトウェアのローディングが可能になった。このようにめまぐるしく進化した。これらの要素技術は半導体技術が民生分野、産業分野で採用された後、速やかに車業界でも応用された技術である。一方で、車ならではの要素技術に基づいた半導体技術も進化した。図7に示す様に、実装技術面ではフリップチップのセラミック基板上への搭載と、そのセラミック基板の機器への直接実装である。特にパワー素子を含む用途においては、Si素子での自己発熱、機電一体化に伴う使用環境の高温高湿度化により独自の実装技術が進化した。図8にモータ駆動の事例とサージに強い車載用素子を示す。素子開発面ではモータの逆起電力やコイル

の突入電流などのサージに強い素子開発が進んだ。酸化膜分離の素子は集積度とサージに強い構造が両立した車載用素子である。また半導体センサは、カーエレクトロニクスの応用の多様化のためには必須の技術分野であった。半導体センサの車用途の草分けは圧力センサであった。図9に示すように、圧力に応じてピエゾ抵抗効果により半導体抵抗が変化する特性を、電子回路で補正し、マニホールド圧力を計測するものであった。これが吸入空気量のセンサの代替機能を果たし、空気量センサの飛躍的な小型化を図り、エンジン制御の進化に寄与した。さらには、同様なSiピエゾ抵抗の応用により半導体加速度センサの実用化へと繋がり、それが今日の容量式加速度センサへ進化し、角加速度センサへの道筋をつけた。それに伴う実装技術の進展が、自動車用の半導体センサとして新しい時代を創出し、さらにMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術育成のきっかけとなったと言える。さらに、半導体素子に磁気抵抗材料を成膜した磁気抵抗ICは、半導体式近接センサの実用化を促し、車用途には重要な役割を果たした。図10は、バイポーラICへNiFe薄膜の磁気抵抗素子を積層した事例である。バイポーラ素子のみならずCMOS素子の上に磁気抵抗素子を実装することにより、さらに図のように磁石と一体化することによりSi素子上で磁束の方向を検出できるようになった。これにより歯車などの近接を検出できるようになり、その用途は飛躍的に広がった。この分野においても特殊の素子構造と実装構造が車のエレクトロニクス化へ大きな貢献を果たしたと言える。この他にも、シリコンの光検出特性、ホール磁気電圧特性、PN接合部電圧の温度特性などを活かし、同一素子上に形成する半導体回路技術との連携およびその特殊実装技術により半導体センサが車両制御のセンサとして発展した。図11において、その拡がり事例を示す。近年ではi-ART (商品名) のように

パワーウィンドウモータコントローラの事例

モータ駆動ハイブリッドICの事例

電動ファン用

■ PN接合分離

■ SOI+トレンチ 酸化膜分離

SOI: Silicon on Insulator

図 8. モータ駆動の事例とサージに強い酸化膜分離素子

圧力センサ

マイクロマシンの原点

加速度センサ

初代の加速度センサ(オイルダンパ)

エアダンパ

マイクロマシンへ進化

図 9. 半導体センサ事例

図 10. 磁気抵抗素子の実装と磁気回路

図 11. 半導体センサの技術・製品開発の経緯

- ①耐環境
 - ・動作温度条件(−40〜+85, 125℃)
 - ・耐湿度条件(60〜90RH%)
 - ・耐振動条件
- ②トレーサビリティ
 - ・ECU製造ラインの先入れ先出し
 - ・ECU製造ラインのロット管理
 - ・部品のロット管理
 - ・部品のサプライチェーン管理
 - ・ECU不具合品の回収システム
 - ・ECU不具合品の解析システム
 - ・部品品質向上へのフィードバック
- ③100%良品・自工程完結
 - ・部品の100%良品保証
 - ・ECU製造の自工程完結化
(不良品は次工程へ送らない)

図 12. 半導体分野への貢献

高圧センサと高圧インジェクタとの一体化も図られている。

5. カーエレクトロニクスの中核技術・電子産業への貢献

カーエレクトロニクス分野と民生分野の半導体産業とは、後者から前者への一方的な技術移転のように思われるが、実際は相互に貢献しながら発展してきたものである。MEMS への貢献は前述したが、それだけにとどまらない。カーエレクトロニクスは、半導体、電子技術の信頼性向上に大きな貢献を果たした。車用途の電子製品の不良は日本市場においてほぼ 100% 回収され、不良の原因やその原理的な対策を求められてきた。この徹底したこだわりと原因

究明が半導体の素子、その実装技術の品質向上に大きな貢献を果たしてきた。その一つの事例がパッケージ技術進化への貢献であった。図 12 にあるように、ECU 市場回収品の半導体不良個所の分析によりパッケージ材料中の破碎フィラーが素子表面を傷つけ、それが長期的には配線層を断線に至らせしめることを見届けた。破碎フィラーはパッケージと素子の密着性のためには良いので採用されたが、このようなデメリットのために球状フィラーへの転換を加速した。このように、車用の半導体の市場不具合の解析により多くの改善がなされて、半導体産業の品質向上に貢献してきた意味は大きなものがある。

6. 今日のニーズと開発動向

20 世紀最後の四半世紀にカーエレクトロニクスの進展により走る、曲がる、止まる、の性能が格段に向上した。世界的な車の普及に伴い、もはや単に走る、曲がる、止まる、だけでは 21 世紀には適合できない。今日の話題は地球の温暖化対応と交通事故の撲滅への対応である。この二つのメガトレンドは 21 世紀の潮流ともいえる。車による利便性と引き換えの避けては通れない課題でもある。メガトレンドの背景のニーズは一つには CO₂ 排出量低減の問題である。地球温暖化の問題は、永遠の課題である。図 13 に示すように 130 g/km から 95 g/km への低減が直近の課題であり、内燃機関のさらなる向上とともに、電動化による効

率的な車の動力活用、運動エネルギー回生は必須のニーズである。また、機器の電動化に伴い機電一体化は従前にも増して加速すると考えられる。単に小型化、ハーネス低減のための一体化ではなく、機械公差を電子回路で補正することにより機械公差の影響を受けない機器とすることができ、それが電動機器の性能向上と省エネに繋がるからである。

もう一つのメガトレンドの背景のニーズは、交通事故の低減である。図 14 に示すように日本における交通事故死者数は画期的に低減したが下げ止まりの様相であり、世界的には 125 万人の交通死者が継続している現状にある。衝突安全のみならず予防安全への対応が急務である。

図 13. 乗用車の燃費規制 基準値の推移

図 14. 交通安全の課題と動向 (自動化の背景)

図 15. 電動化（ハイブリッド）

7. ハイブリッド車技術、電動化とエレクトロニクスとの関係

1997年にハイブリッド車が実用化されて以来、電動化による効率化は時の潮流となった。エンジン回転数とエンジン、モータの発生トルクの定性的な関係を図15に示す。モータのトルク特性は低回転では高く、高回転においてはロータによる発生する逆起電力のために効率が低下してしまう。逆に、エンジンのトルク特性は低回転では吸気損失などのために効率が悪く、高回転で効率がよい。このようにモータとエンジンでは相補完関係にある。また減速時には、モータが発電機の機能を果たすことにより、エネルギー回生することが可能であり、その回生電気エネルギーの再利用により省エネになる。ハイブリッド車の構成は図に示すように代表的な3種類に分類できるが、モータの大きさ、出力などにより方式を選択することができる。一方で内燃機関も進化している。図16にガソリン車の過給ダウンサイジングの事例を示す。ガソリン車は低回転数において吸気損失が大きく効率が悪い。そのため小型化による運転負荷の高負荷側へのシフトやEGR (Exhaust Gas Recirculation) により、酸素の無い排気ガスを吸気に戻すことで吸気損失を軽減する。高回転時にはターボにより吸入空気量を増加させることで小さなエンジンで大きなエンジン相当の性能を出すことができる。通常走行においては最適な排気量とすることにより総合的にエネルギー効率を上げている。これが21世紀初頭に普及した過給ダウンサイジングである。それを可能にしているのがVCT (Variable Cam Timing) のような電動機器である。一方クリーンディーゼルにおいては燃料圧の高圧化により、噴霧の微粒化を図り燃焼効率とトルク

図 16. ガソリン車 (過給ダウンサイジング)

向上を図っている⁴⁾。図 17 に示すように完全燃焼に近づけることにより燃費は向上し、PM などの残渣も少なくなる。高効率化を図るためにエンジンが高温度になり NOx が増加する。その対策として、触媒搭載や尿素噴射による排出ガス低減が乗用車においても採用されている。また、アイドルストップも車両の停止時にエンジン作動を止めるだけに留まらず、減速時にオルタネータでエネルギー回生をしたり、減速時エンジン停止をしたりして、マイルドハイブリッドの機能を有するものが主流となると予測される。

従来のディーゼルエンジンにおける課題 - NOx とPMとの関係

出展 7)

コモンレールシステムの仕組み

出展 8)

<コモンレールシステム>

- 高圧・高速で細かく燃料を噴射するため、完全燃焼しやすくPMが発生しにくい
- 微量の燃料を数回に分け噴射を行い、爆発の初期燃焼を緩和しNOx 及び騒音を低減

図 17. ディーゼル車 (クリーンディーゼル)

図 18. 自動化 (予防安全から自動運転へ)

8. 予防安全とエレクトロニクスとの関係

衝突後の安全装備に加えて、衝突前の予防安全システムが着目を浴びてきている。衝突前の減速機能だけではなく、完全停止機能が主流になりつつある。図 18 に示すように先行車検出、車線検出、前方距離計測、レーンチェンジの警告などさまざまなシステムが提案されている⁵⁾。一部車両で採用が始まっている。ミリ波 (レーダ)、LIDAR (Laser Imaging Detection and Ringing)、カメラの機能が用いられるが、それぞれに長所短所があり、長所を活かすため

のセンサフュージョンが重要なものとなってきている。図 19 に示すように、各センサ技術がそれぞれに進化してくると予想される。ミリ波では化合物半導体に代わって CMOS により 77 GHz 帯が駆動可能な時代になってきている。LIDAR ではポリゴンミラーに代わっていずれは MEMS により駆動される時代になるであろう。画像センサでは裏面受光方式の採用により、CMOS センサの感度が向上しダイナミックレンジが飛躍的に伸びつつある。暗視野における検出能力の向上により、人間の認識能力を越えるようになってきている。また画像センサの秒あたりフレーム速度

(fps) は、従来の 30 fps から 960 fps という桁違いの高速化が可能になった。これにより人間の目の動体認識速度をはるかに超えるセンサの実用化が可能となり、画像センサの新しい応用の時代を迎えることとなる。実装技術の面ではそれぞれの進化に伴い小型化、搭載性の向上のための技術が必要となってくる。今後は認識アルゴリズム競争となるのであろう。またデジタル通信技術の進化に伴い帯域が広くなり一層ブロードバンド処理能力が向上しつつある。車車間通信、路車間通信の普及も始まりつつある。ドライバ

起因の交通事故が目立つ今日、これらの予防安全機器による事前回避、事前警告による事故低減は進化していくであろう。

9. CO₂ゼロ、自動運転へのかけ橋

二つのメガトレンドとともに永遠の課題である。

CO₂ 排出の低減は、地球環境の本質的な問題であり、ゼロを目指すのが究極的な目標である。130 g/km から 95 g/km はひとつのステップにすぎない。図 20 に示すように

MEMS: Micro Electro Mechanical Systems
LIDAR: Light Detection and Ranging, Laser Imaging Detection and Ranging

手段	ミリ波レーダ	レーザ(LIDAR)	カメラ(画像)
検出	++	++	-
計測	位置	++	+
	形状	+	++
認識	-	(+)	(++)
耐候性	++	(+)	-

《センサ進化》	ミリ波用素子	スキャニング機構	イメージャ
	化合物半導体	ポリゴンミラー	表面受光方式
	↓	↓	↓
	Si-CMOS (低コスト化)	MEMS (メカレス化)	裏面受光方式 (感度向上)

図 19. 各種センサの特徴と将来

図 20. Well to Wheel

Well-to-Wheel でみる CO₂ 排出量の低減が課題となる。電気自動車 (EV) や燃料電池車 (FCV) においても、どのエネルギー源により電気や水素を製造するかにより、CO₂ 低減の効果は大きく異なってくる。今後、人口爆発している新興国の車需要が現実化した時には、2020 年規制である 95 g/km はさらなる低減が急がれることになるであろう。このように車の効率化とエネルギー源は恒久的な話題となる。効率化のために電動化は必須であり、自然エネルギーによる発電と EV の普及、さらには自然エネルギーによる水素生成と水素 FCV への移行は人類の避けられない課題である。半導体技術、実装技術の観点からは、熱損失の少ないパワー半導体素子として SiC、GaN、酸化ガリウムなどのワイドバンドギャップ素子の実用化は喫緊の課題である。図 21 に示すよ

うに Si-IGBT 素子と比べて原理的に熱損失が少ないことが、省エネ時代には必須とされる理由である。それに最適な実装技術も求められる。さらに電動化によるノイズ低減や EMC (Electro-Magnetic Compatibility) 低減の技術はさらに進化を期待されるところであろう。

自動運転は人類の夢が現実になる時である。予防安全から一気に進展し自動運転に至る話題である。自動運転は図 22 に示すように近年 4 つのステップが定義された⁶⁾。まずはレベル 2、3 が実用化目標であるが、その適用が地域限定であっても社会インフラのひとつになりえて、大きな意味のあるものとなることであろう。その過程でいろいろなセンサ、人工知能、IoT (Internet of Things)、ビッグデータの活用により新しいカーエレクトロニクスの幕開けが予想さ

図 21. SiC 応用のメリット

*レベルはNHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) の定義による

コンピュータの介在

- レベル0: 車の運転に関して介在しない状態
- レベル1: ブレーキやクルーズコントロールなどに部分的に介在する状態
- レベル2: 操舵 (ハンドル機能) が複合的に加わった状態
- レベル3: 半自動運転。条件次第ではドライバーは監視義務から開放可
- レベル4: 完全自動運転

自動化

- レベル0: 自動化なし
- レベル1: 特定機能の自動化
 - ・操舵、制動又は加速の支援を行うが全てはしない
- レベル2: 複合機能の自動化
 - ・ドライバーは安全運行の責任を持つが、操舵・制動・加速全ての運転支援を行う。
- レベル3: 半自動運転
 - ・機能限界になった場合のみ、運転者が自ら運転操作を行う。
- レベル4: 完全自動運転
 - ・操作、周辺監視を全てシステムに委ねるシステム。

図 22. 自動運転の定義

れる。

車全体の電子制御管理の面からは、図5において言及した各種ECUの連携のための階層化された開発手法が一層進化し、そのソフトウェア、アルゴリズム資産の再利用が開発費の低減とシステムの品質保証のために一層重要となると予測される。

実装技術の観点では、カメラ、レーザー光、ミリ波、それぞれの進化による小型化実装技術が一段と進化することであらうし、CPUの能力向上を支える半導体素子技術が進化し、実装技術も重要な役割を担うこととなろう。放熱性の向上により、電子回路がその最高性能を発揮するための実装技術も現実的に必要になるのであろう。コンピュータの性能を最大に引き出すためのマイコンの部分冷却や電動化に伴う電磁雑音の極小化技術、通信の安全性を高めるための処理技術などは、新たな実装技術によりソリューションが求められる時代となると予測する。

10. 最後に

20世紀初期に機械技術の粋を集めた車の大量生産が米国において始まり、20世紀後半にはそれが日本でも可能になった。そしてエレクトロニクスの普及により20世紀の最後の四半世紀には、性能、機能、コストにおいて大変革をもたらした。日本の自動車産業の飛躍を支えてきた。21世紀の始まりとともに、さらなる電動化とビッグデータ活用、自動運転の時代への助走が始まった。IoT活用を支える電子技術は一層多岐にわたり、複雑化してくると考える。電動化に伴い、アクチュエータ、モータと電子回路はさらに一体化してくる。センサ技術はセンサそのものの進化、LSIとの一体化により新たな実装構造が必要になるのであろう。エレクトロニクス実装学会が次世代のニーズに応えるのみならず、積極的にその性能向上に寄与することを祈念するものである。

(2016.5.6-受理)

文 献

- 1) R. Casey: THE MODEL T, THE JOHNS HOPKINS UNIVERSITY PRESS, 2008
- 2) 加藤光治 (編): 図解カーエレクトロニクス, 日経 BP 社, 2014 年改訂版
- 3) 加藤光治 (Part6 編): encyclopedia of automotive engineering, John Wiley & Sons, 2015
- 4) 安達美智雄: “巻頭言,” デンソーテクニカルレビュー, Vol. 19, pp. 1-2, 2014
- 5) 加藤良文, 他: “基調論文 1. デンソーの先進安全技術動向,” デンソーテクニカルレビュー, Vol. 18, pp. 12-22, 2013
- 6) 内閣府政策統括官: SIP (戦略イノベーション創造プログラム) 自動走行システム, 2015 年 5 月 21 日
- 7) <https://www.denso.co.jp/ja/aboutdenso/technology/environment/story/no2/1par.html>
- 8) <https://www.denso.co.jp/ja/aboutdenso/technology/environment/story/no2/3par.html>
- 9) 財団法人日本自動車研究所: 総合効率と CHG 排出の分析報告書, 平成 23 年 3 月
- 10) http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/suiso_nenryodenchi_wg/pdf/003_02_00.pdf

著者紹介

加藤光治 (かとう みつはる)
1969 年 3 月 東京工業大学理学部応用物理学卒業
同年 7 月 日本電装株式会社 (現株式会社デンソー) 入社
半導体, ECU の開発に従事
1998 年 ITS 事業部長・取締役就任
2010 年 専務取締役退任
2012 年 6 月 株式会社サイコックス創業
現在, 有限会社 MTEC 代表取締役社長