

# デンソーにおける半導体開発の歴史と意義

## The history and significance of Semiconductor Development in DENSO

藤本 裕

Hiroshi FUJIMOTO

In order to realize a carbon-neutral society, it is expected that electrification and autonomous driving will become widespread from the viewpoint of vehicles. There are also high expectations for autonomous driving from the perspective of eliminating traffic accidents. In both cases, the evolution of semiconductor technology is essential, and semiconductors are no longer just electronic components but play an important role in determining the future and value of automobiles. DENSO established its Semiconductor laboratory in-house over 50 years ago and has been engaged in the research and development of automotive semiconductors. In this paper, the history of the in-house semiconductors is introduced, and the significance of DENSO which is the automobile components manufacturer which tackles the advanced semiconductor for the automobile is described.

Key words :

*Automotive semiconductors, Electrification, Autonomous driving*

歴史を知る

### 1. はじめに

今から 100 年以上前に自動車の普及が始まって以来半世紀の間エンジン制御は機械式であった。その後 60 年代ごろから機械式接点の摩耗寿命対策、排出ガス規制対応などのためにエンジンの電子制御が進み車載半導体の採用が始まった。Table 1 にトヨタ自動車の初代クラウン（1955 年）と 2021 年の比較を示す。70 個の ECU（Electronic Control Unit）、125 個のセンサが搭載され、エンジン出力は 10 倍に増大しながら排出ガスはクリーンに、燃費は大幅に向上し、かつ最新の安全機能も搭載されており、ここには様々な半導体技術が貢献している。今後 CASE（Connected, Autonomous, Shared & service, Electric）への対応、カーボンニュートラルな社会の実現に向けて半導体にはなおいっそうの技術革新が求められている。たとえば自動運転車においては歩行者・障害物などの認識、走行経路の導出、走る・曲がる・止まるの制御などのす

Table 1 Evolution of car electronics

	1955	2021
Engine Power	48ps	479ps (299ps+180ps)
Emission gases at 10/15 Mode	CO >18.4g/km HC >2.94g/km NOx >2.18g/km	CO <1.15g/km HC <0.013g/km NOx <0.013g/km
Safety Equipment	None	Airbags, ABS, VDIM, VSC, TRC, EBD, EPS, LKA, Rader Cruise, PCS, etc.
ECU	0	70
Sensor	0	125
Motor	3	70

According to DENSO research

べてを半導体が処理することになり、もはや半導体は単なる電子部品ではなくクルマの未来と価値を決める中心的な役割を担っている。今後ますます技術の多様化が進む中で軍事分野、IT 分野などで進化した技術が車載用途に応用されるケースも多く、先鋭的なスタートアップ企業、研究機関の活動も活発になっている。一方で車載用途では広範囲の温度対応、低消費電力、リアルタイム制御、小型化、高信頼性など独自の対応

が依然として必要である。

デンソーでは半世紀前 1968 年に IC 研究室 Fig. 1 を立ち上げて生産研究に着手した。これは当時購入半導体に多数の不良が発生していたことをきっかけに「エレクトロニクスをなりわいとするなら半導体から」との思いでの大きな決断であった。内製半導体は自動車の電子制御化とともに大きく成長し燃費向上、安心安全の実現に貢献してきた。今日では高品質の車載半導体を供給するメーカーが多数あるが、それでもなお半導体を自ら手掛ける重要性は薄れていない。本稿ではパワー半導体、制御 IC、半導体センサなど内製半導体の歴史を振り返り、最新の状況もふまえて半導体開発を手掛ける意義について述べる。

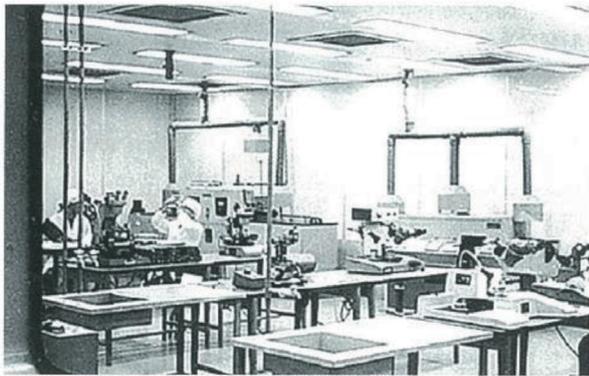
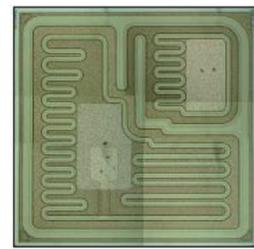


Fig. 1 IC laboratory

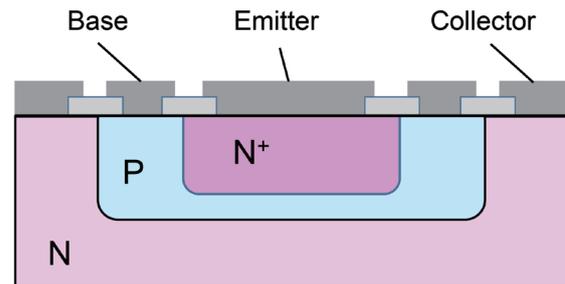
## 2. パワー半導体

60 年前後からオルタネータ（交流発電機）、エンジン点火系などでダイオード、トランジスタの採用が始まった。当初デンソーではこれらの半導体を他社からの購入に頼っていたが、前述のように内製する体制を立ち上げ切り替えを進めた。Fig. 2 に代表的なバイポーラ型パワー transistor を示す。その後たとえばイグニッションコイルを駆動するイグナイタでは制御回路をセラミックの回路基板上に構成しパワー transistor とともに金属筐体に実装するハイブリッド IC へと進化した。バイポーラ型は工程数が少なく低コストである反面、高温部への電流集中を起こしやすく熱暴走に至るリスクを抱える欠点もあった。これに対して 80 年頃から高温での動作が安定な MOS 型に注目が集まりデンソーでもパワー MOS の開発に着手した。パ

ワー MOS は若干の工程追加で回路構成用にトランジスタ、ダイオード、抵抗などの素子を内蔵できることから、過電流保護・温度保護・ダイアグ信号出力機能を内蔵するインテリジェントパワー MOS にねらいを定めて開発を進め、87 年に車載用として世界で初めて量産に成功した<sup>1)</sup>。Fig. 3 にチップ写真と断面図を示す。これは高信頼性を求められる車載用途に適したデバイスであり、その後国内外の多くの半導体メーカーが



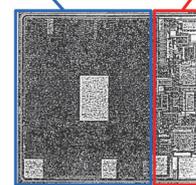
a) Die



b) Cross sectional view

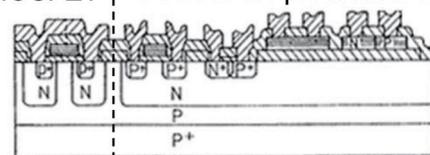
Fig. 2 Power Transistor

Power MOSFET Protection circuit



a) Die

Power MOSFET Devices for protection circuit



b) Cross sectional view

Fig. 3 Intelligent Power MOSFET

類似のデバイスを量産し普及が進んだ。内製することでそれまで他社を含めて知見のなかったゲート酸化膜の信頼性確保についていち早くノウハウを獲得、蓄積し、今日に至るまで大きな不具合を発生することなく高い信頼性を維持している。

さらにパワー MOS の高速スイッチング特性を活かして単なるスイッチとしてリレーを置き換えるだけでなく、PWM (Pulse Width Modulation) 制御によりラジエータファン、ブローファンなどのモータ回転数を最適にコントロールすることが可能になった。それまではモータに直列に挿入する抵抗を適宜選択して回転数を切り替えておりエネルギーを熱として捨てていたが、PWM 制御により低消費電力化が進み燃費向上に大きく貢献した。また同時に数 100V の耐圧を必要とするイグナイタ、HID ランプ (High-Intensity Discharge Lamp) などの用途に向けて高耐圧低損失ニーズに適する IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) を開発、量産した。こうして電動化の兆しをとらえて車載メーカ、部品メーカ、半導体メーカなどに先駆けてパワーデバイスの開発を進めたことが、次に述べる電動化の本丸：ハイブリッドカー向けインバータの高出力小型化において大きく花開いた。

### 3. ハイブリッドカー向けパワーカード

90 年代に入ってハイブリッドカーの議論が高まる中、従来とは桁違いに大きな電力を扱うことからパワーデバイスおよびインバータの高耐圧低損失 & 絶縁 & 高放熱がキー技術になるとの予測を立てた。従来この分野では Fig. 4 に示すような IPM (Intelligent Power Module) と呼ばれる実装構造が主流で裏面から放熱する片面放熱構造であった。そこでインバータの高出力小型化には放熱性能の向上が必須と考え IGBT チップの両面に厚い銅製ヒートスプレッドをはんだ付けした放熱と電流取り出しを兼ねる構造を考案した。Fig. 5 に示すように IGBT とダイオードを樹脂封止するカード形態であることからこれをパワーカードと呼び、内部に圧縮応力をかけることで繰り返しの温度サイクルに強く、パワーカードの枚数を選択することでインバータ出力のバリエーションにも対応した。さ

らに Fig. 6 に示すようにエンジン冷却のラジエータ技術を応用した積層冷却器でパワーカードを挟む構造として、片面放熱構造と比較して出力密度を約 60% 向上することに成功した<sup>2)</sup>。Fig. 7 に IPM とパワーカードの断面構造比較を示す。Fig. 8 は大橋ら<sup>3) 4)</sup>の視点をもとに一般的なパワーユニットの出力密度を年次ごとにプロットしたものである。これまでのトレンドを大幅に改善する高出力小型インバータであり 07 年にレクサス LS600h に搭載されて以降広く車種展開が進み、その後も IGBT とともにパワーカード自体も進化を続けている。このようなパワーカードを開発できたのは社内にインバータを開発する部署があり将来ニ-

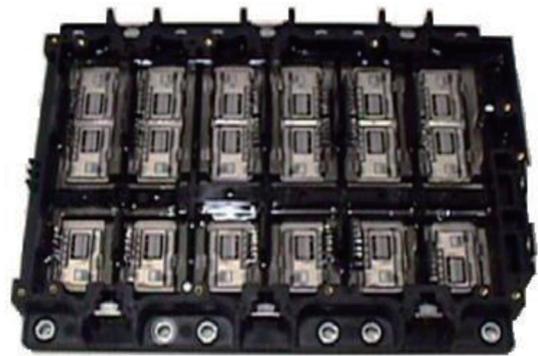


Fig. 4 Intelligent Power Module

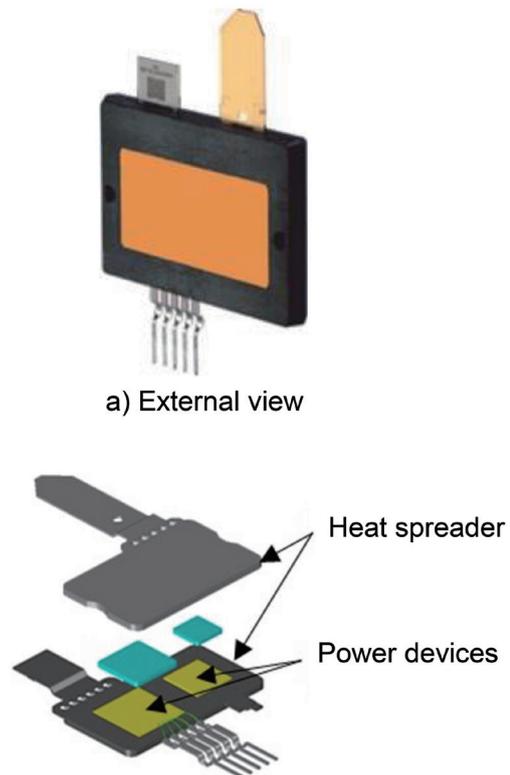


Fig. 5 Power card

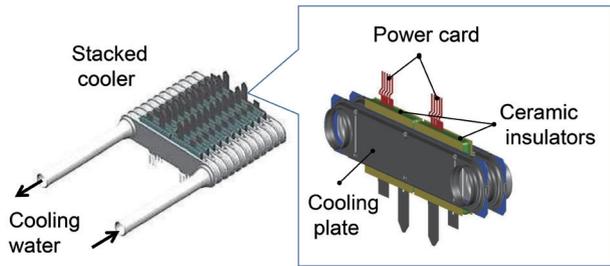
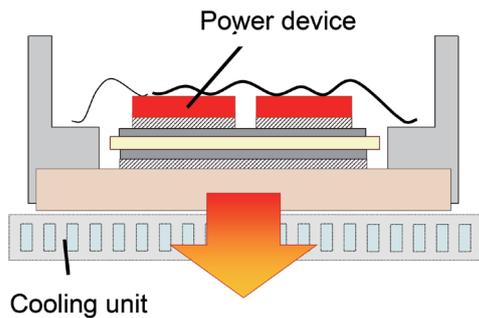
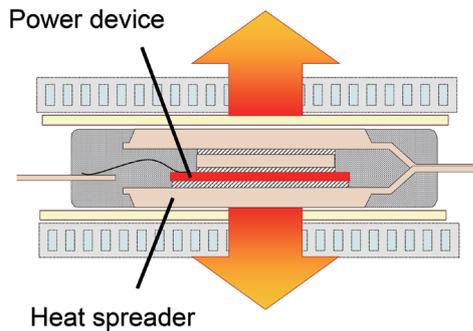


Fig. 6 Structural schematic of double-sided cooling system



a) Conventional



b) Double-sided cooling

Fig. 7 Cross sectional view of a conventional power module and a double-sided power module

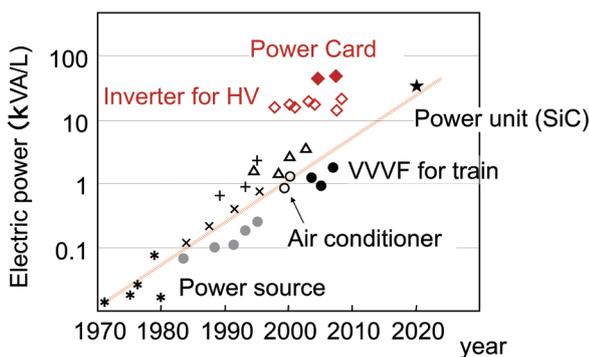


Fig. 8 Trend in output power of electric apparatus

ズを見通せたことおよびラジエータという熱交換器技術があったことが大きいですが、たとえば IGBT の電極構造とはんだ材料の組み合わせを最適化して高品質を確保する技術など IGBT を内製していたことが非常に大きい。半導体メーカーからの購入に頼っていたのは電極構造は購入先の言いなりでパワーカードのような飛び抜けた構造を発想し開発を推進することは不可能であったと考えられる。「独自技術があるからこそ内製化でき、内製化することでより新たな独自技術が生まれる」の代表例である。

#### 4. SiC (Silicon Carbide) デバイス

現在も Si デバイスの性能向上は進んでいるものの限界も見えてきており、Si デバイスの 1/100 以下の電力損失、数 kV の高耐圧性、高い熱伝導度など優れた性能をもつ SiC デバイスによるインバータのさらなる高出力小型化が期待されている。一方で SiC はシリコンと炭素からなる化合物半導体でありウェハ内に結晶欠陥が生じやすく大口径高品質のウェハを作りにくい欠点がある。この欠陥は SiC デバイスの品質に直結し特に大電流を駆動するチップサイズが大きいデバイスの歩留まり低下に顕著に現れる。このため Si デバイスを高性能 SiC デバイスに置き換えてインバータの小型化を実現するには大口径高品質ウェハの実現が必須であった。課題解決に向けて研究機関などの取り組みはあったものの満足のいくレベルではなく、また車載用として一段と高い品質が求められることからデンソーでは 20 年以上前から高品質ウェハの実現に向けて研究開発を進めてきた。現在では RAF 法 (Repeated A-Face method) と呼ばれる独自技術で高品質な結晶を作製し他社を圧倒する低欠陥ウェハを実現している<sup>5)</sup>。またさらなる高信頼性・低コスト化を目指してガス法による SiC ウェハの高速成長・大口径開発も進んでいる。Si ウェハは複数の専門メーカーが高品質低価格のウェハを供給しているため社内で手掛ける対象とはならないが、SiC においては満足のいくウェハが存在しなかったことからここにも独自技術開発の意義があると考え挑戦を続けてきた。

また SiC の優れたスイッチング特性はスイッチング

損失の低減につながるが単なる Si デバイスの置き換えではスイッチング時に発生するサージ電圧が増大するなどデメリットもある。このようなデメリットを抑えつつデバイスの特長を生かすためにはパワーデバイスを駆動する前段回路、低インダクタンスの実装構造などの工夫も重要である。このように SiC デバイス自体の開発だけでなく回路技術・実装技術など、さらには前述のウェハ製造まで社外に不足する技術を手掛け最適に組み合わせることで意味のある独自技術が生まれ競争力となる。

## 5. 制御 IC

内製では車載向けに ASIC (Application Specific Integrated Circuit, 特定用途向け集積回路) と呼ばれる IC を開発、量産してきた。Fig. 9 に 74 年にバイポーラ IC として初めて量産したデュアルコンパレータを示す。その後時計用のロジック IC、エンジン制御向けの高精度 ADC (Analog to Digital Converter)、車載マイコンなどを手掛けてきた。

90 年代に入るとバイポーラトランジスタ、CMOS、さらに数アンペアの電流を駆動する複数のパワー MOS を集積するウェハプロセスが登場し、車載用途でも制御・電源・通信・出力回路などを 1 チップに内蔵する高機能 IC により ECU 上の電子部品点数を削減し小型化するニーズが高まった。

民生向け製品を主力とする半導体メーカーは従来からアナログデジタル混在 IC を工程が簡略な接合分離 (JI: Junction Isolation) と呼ばれるプロセスで生産していたことから、ここにパワー MOS をアドオンする方針で開発を進めていた。ウェハプロセスはバイポーラトランジスタ、CMOS、DMOS (Double-diffused MOSFET: パワー MOS) を内蔵することから BiCDMOS プロセスと呼ばれる。Fig. 10 のその断面図を示す。しかしこの方式は原理的に外乱ノイズに弱く特に高温において誤動作を起こしやすいため回路設計での対策に苦慮していた。一方デンソーでは車載特有の高温環境、電源電圧、電源ノイズなどへの対応を考慮して当初コスト面で不利と考えられた酸化膜分離 (SOI: Silicon on Isolation) を選択した。これは各

デバイスが酸化膜で分離され電氣的に絶縁されることから圧倒的なノイズ耐量を確保した。その断面構造を Fig. 11 に示す。また車載用途ではバイポーラトランジスタに 35V 以上の耐圧が必要となり、この領域では素子サイズは JI より SOI の方が小さくなること、ターゲットとする製品群ではバイポーラトランジスタによるアナログ回路の割合が大きいことから製品コストは JI と遜色ないレベルとなった。

内製ではこのプロセスを TD プロセス (Trench Dielectric Isolation) と呼び 94 年に量産を開始した。このプロセスは高温環境、ノイズに強いことから ECU に搭載する IC だけでなくモータなどの機械部品にコントローラを内蔵する機電一体製品にも適している。機械部品はエンジンルームなど高温環境に搭載されるケースが多く外部ノイズの対策もほとんどないため TD プロセスの特長が生かせる領域である。

開発のモーター製品としてエンジンのアイドル回転を制御する ISCV (Idle Speed Control Valve) を選定した。これはエンジン吸気系に搭載されエンジン ECU

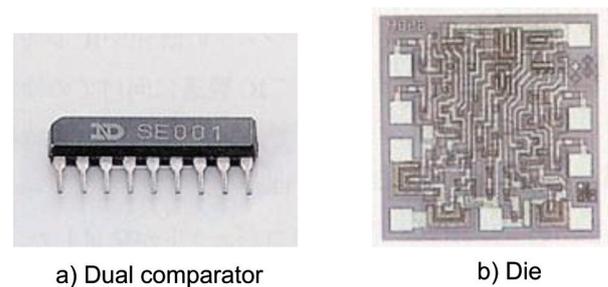


Fig. 9 Bipolar IC

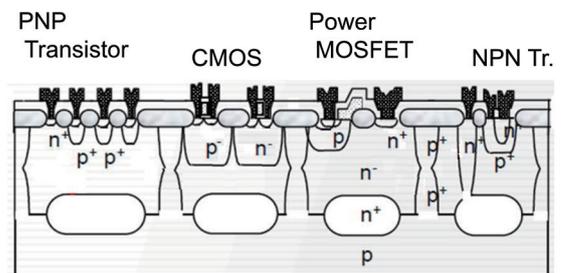


Fig. 10 Cross sectional view of Junction Isolation

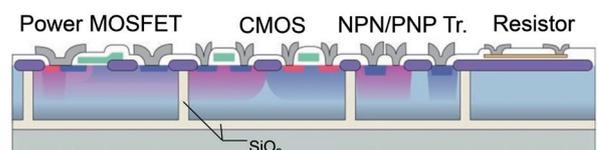
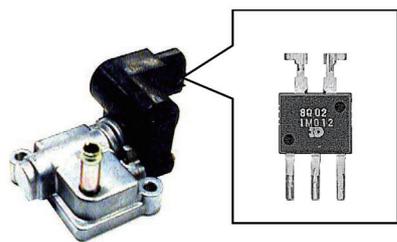
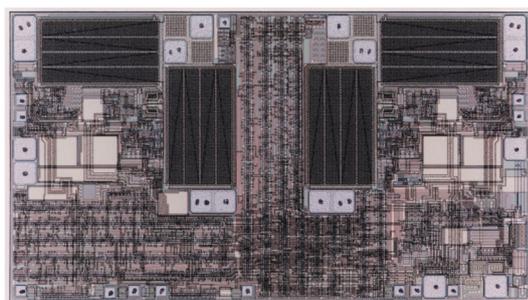


Fig. 11 Cross sectional view of Silicon on Isolation



a) ISCV and IC package



b) Die

Fig. 12 Integrated mechanical and electrical structure

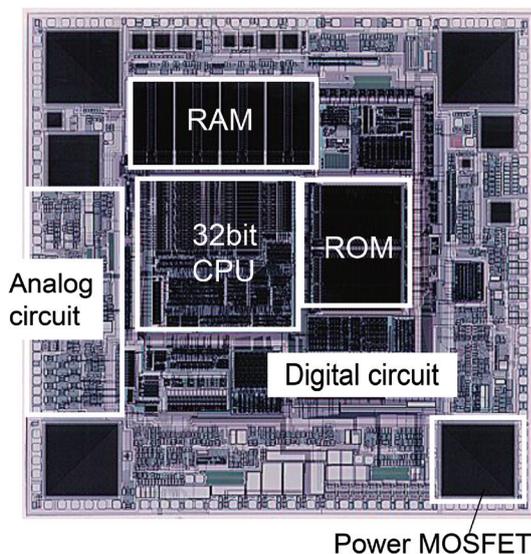


Fig. 13 Single chip LSI for airbag ECU

との通信でバルブを適正な開度にコントロールしアイドル回転を制御する IC である。Fig. 12 に外観およびチップ写真を示す。ECU との通信、バルブ駆動ソレノイドコイルの駆動回路、故障診断機能などを 1 チップにまとめ従来のバルブと変わらない体格で機電一体を実現した。ISCV をもつ機能品事業部（当時）との連携で多くの課題を解決し世界拡販に大きく貢献した。またのちのイグナイタ、オルタネータ用レギュレ

ータなど多くの機電一体製品の量産につながった。

また並行して次期プロセスの開発にも着手した。車載 ECU の動向、搭載する IC の将来ニーズを見通してプロセスは当時の BiCDMOS プロセスでは最先端の 0.8 $\mu$ m ルールを選択し、モチーフ製品として 1 チップ ECU の企画を立てた。

ECU の中では比較的小規模であったエアバッグを選び 32bit RISC マイコン、EEPROM、スクイブ点火用パワー MOS、時計、CAN 通信、などすべての機能を 1 チップに内蔵し外付け部品は大容量コンデンサなど必要最小限とする構想である。Fig. 13 にチップ写真を示す。今日の SoC (System on a Chip) を連想するような LSI であり仕様変更に対する柔軟な対応に難があったことから残念ながらビジネスとしての大きな発展はなかったが、この挑戦により開発したプロセス技術、回路技術、検証技術は、その後の内製半導体に多く採用され事業の発展に大きく貢献した。

これらは将来のニーズ予測を開発につなげ、また最高の技術に挑戦し独自の技術開発を進めることで差別化に貢献できたと考える<sup>6)</sup>。

## 6. 半導体センサ

70 年代に入って厳しくなった排出ガス規制に対応するためエンジンの電子制御が進展し半導体技術を利用した圧力センサの開発が進んだ。Fig. 14 にその構造を示す。Si ウェハにエッチング加工を施すことにより数 10 $\mu$ m 厚のダイヤフラムを作りこみ、圧力によるセンサの歪変形をブリッジ接続したゲージ抵抗で検出する。デンソーでは 81 年に吸気マニホールド圧を検出するセンサとして車載では世界で初めて量産を開始した。これは MEMS (Micro Electrical Mechanical Systems) と呼ばれる技術で吸気圧の他、排気圧センサ、大気圧センサ、タンク内圧センサ、加速度センサ、イナーシャセンサなど多数のセンサに応用され車両 1 台あたりの搭載数は飛躍的に拡大した。

これらはすべて前述のパワー半導体、制御 IC と同様に自動車メーカの動向、自動車ユーザのニーズを先取りして内製半導体技術と社内外との連携で差別化技術を生み出し量産に結び付けてきた事例である。このよ

うな取り組みが現在のミリ波レーダ、レーザーレーダなど新たな半導体センサの研究開発につながっている。

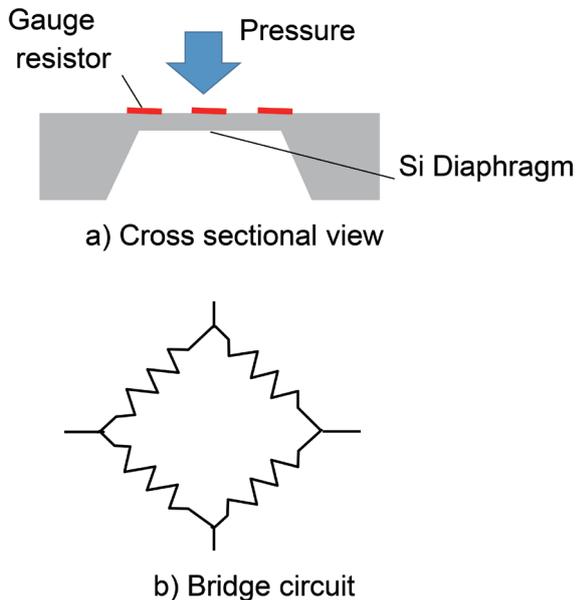


Fig. 14 Pressure sensor

## 7. ミライズテクノロジーズの設定

20年4月にトヨタ自動車およびデンソーの半導体研究開発を統合し両社出資の株式会社ミライズテクノロジーズが設立された。トヨタの持つモビリティ視点とデンソーが培ってきた車載システム・部品視点の知見を掛け合わせることでクルマ軸と部品軸の両輪で電動化や自動運転の鍵となる半導体の研究開発に取り組んでいる。具体的なテーマは以下の3分野である<sup>7)</sup>。

- ① パワー半導体：Si 限界を大きく上回る SiC, Ga 系化合物半導体のデバイス技術
- ② センサ：障害物、道路形状などの周辺環境を広範囲、高精度に認識する技術
- ③ SoC：高速で動くクルマが周辺環境を瞬時に認識し、次の行動を反射的に判断する技術

冒頭で述べたように将来の車載半導体は自動運転車に代表されるように最先端の高度な検知能力、処理能力をもつ半導体が人間に代わって認知・判断・制御を担うようになり、将来このような半導体の性能が車両やサービスの付加価値を決める場面が予想される。

パワー半導体、センサは前述のようにデンソー社内で車載半導体の黎明期から取り組んできた歴史がある

が、SoCは最先端の微細化プロセスを使った大規模な半導体であり開発に膨大なリソースを要することから研究開発は一部に留まってきた。しかしながら自動運転のキーとなる半導体を他社からの購入のみに頼るのではなく競争力を維持し続けるための最適な関わり方を探るべきと考え取り組みを進めている。

たとえば従来の自動車メーカーの常識を超えた手法でビジネスを展開している Tesla 社は Auto Pilot 機能を司る SoC を開発するにあたって社外から民生向け SoC のトップアーキテクトを招聘して自前で設計し搭載した。自前設計はキーとなる部分に限定し SoC 全体の設計および製造は外部に委託しているが、自社の競争力確保に重要な半導体は車両メーカーの枠を超えて半導体メーカーの領域まで踏み込んでいる。

現在ミライズテクノロジーズではこのような事例を参考にしつつ将来の独自技術、真の競争力確保について議論を進めている。日々進化を続ける半導体技術はもはや1社で開発できるものではなくミライズテクノロジーズが自動車メーカーや Tier1、モビリティサービス事業者、スタートアップ企業、半導体関連企業、大学・研究機関などとのグローバル連携の中心に立って、次世代の車載半導体の研究開発をリードしていきたい。

## 8. 最後に

これまでデンソー半導体は民生向けを主戦場とする他社ではやれないこと、考えつかないことで差別化し、ゼロから挑戦してアナログ・デジタル・パワーデバイスの集積化、パワーカード、センサ、機電一体製品などを生み出しそれとともに人と技術が大きく育ってきた。また社内に車載システムの開発部署があり早い段階から将来予測に基づく企画をたてられること、モータ、熱交換器、ソフトウェア、制御、生産技術、品質、解析力など様々な製品・技術があり総知総力を結集して作りこむことで数多くの世界初・世界一製品を世に送り出してきた。設計者・研究者も自分の専門分野に閉じこもることなくこの優位な環境を最大限に活用して取り組みを進める必要がある。

半世紀前を振り返ってみると「満足のいく IC を他社で作ってもらうには自動車部品のノウハウを洗いざ

らい教えねばならず、デンソーは他社のために苦勞したあげく社業の衰退を招くことになり兼ねないとの強い危機感を持ち、是非とも社内で半導体部門を立ち上げ手の内化する必要がある」という強い思いがあった。これからの時代も他社からの購入だけでは不足するもの、将来の競争力の武器になるものは取り組みのスタイルが変わったとしても自ら手掛けることを忘れてはならないと考える。この精神を忘れずに新しい技術に挑戦しながら自らの能力を伸ばしシステムの競争力に貢献し続けることが50年間社内に半導体部門を持ち続けてきた意義と考える。

## 参考文献

- 1) H. Kojima, et al., "Development of New Toyota Electronic Modulated Suspension - Two Concepts for Semi-Active Suspension Control", SAE Technical Paper 911900, 1991
- 2) 瀬高, 他: デンソーテクニカルレビュー Vol. 14, 2009
- 3) 大橋: 解説「最新のパワーデバイスの動向」, 電気学会誌, Vol.121 (2002), p168-171
- 4) 平野, 他: 「車載用パワーエレクトロニクス製品の紐解きと、両面放熱パワーモジュールの実装技術」, 溶接学会誌, Vol.80, No.4, (2011)
- 5) H. Kondo, et al., "Development of RAF quality 150mm 4H-SiC wafer", ICSCRM2013 Technical Digest p.3 (2013)
- 6) 飯田, 他: デンソーテクニカルレビュー Vol. 8, No.1, 2003
- 7) 株式会社ミライズテクノロジーズホームページ  
<https://www.mirise-techs.com/>

## 著者



### 藤本 裕

ふじもと ひろし

先端技術研究所  
認定プロフェッショナル・技師  
車載半導体の研究開発, 製品化に従事  
現在, 株式会社ミライズテクノロジーズに  
出向中

