

車の電子化を支えるデンソーの半導体・センサ技術

DENSO Semiconductor Technologies Supporting the Vehicle Electrification

磯部 良彦

Yoshihiko ISOBE

DENSO established its semiconductor research laboratory in 1967, and has engaged in rigorous R&D and product development for the automotive field. Monolithic IC, power modules, and sensors have grown to become the 3 main pillars of the Semiconductor business unit, and contribute to the competitiveness of DENSO products and systems. With rising trends in electrification, autonomy, and connectivity, the amount of semiconductors used in vehicles will undoubtedly continue to grow. To expand the playing field of high reliability devices beyond the automotive field, DENSO will need to embrace a shift in R&D that includes strong collaboration with other industry leaders.

Key words :

Semiconductor, In-vehicle, Reliability, Dielectric Isolation IC, Double-sided Cooling

1. デンソー半導体の歴史

トランジスタの発明（1947年）からエレクトロニクス時代の幕が開き、当初、米国の後追いだっただ日本でも1955年には、SONYからトランジスタラジオが発売されエレクトロニクス社会への歩みが始まった。デンソーでは、1962年にシリコンダイオードを採用した国内初のオルタネータを製品化したが、車載環境を踏まえたノウハウが無く、立ち上げに支障をきたす状況であった。このような状況下、デンソーでは、1967年に車載用半導体の生産を目指したIC研究室を設立した（Fig. 1）。米国のインテルと同時期であり、自動車部品メーカーとしては、誰も踏み出していない決断であった。当時の会議報告書には、「他社から買ってきた部品をプリント板の穴に挿入してはんだ付けしていることのどこがエレクトロニクスか？俺は情けな

い。あの挿し込んでいるトランジスタやICを作るのがエレクトロニクスではないか」との岩月社長（当時）のコメントも記載されており、「ICを他社で作ってもらうには、デンソーが汗と金をつぎ込んで積み上げてきたノウハウをすべて教えないといけない。力のあるデバイスメーカーに知恵をつけさせることになり、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かねない。デンソーをICを製造できる会社になりたい」との想いは今も受け継がれている。

1968年には、現在のLSIの主流デバイスになるCMOS技術がRCA（Radio Corporation of America）によって発明された。当時、将来の高集積時代には、低消費電力化に優れるCMOS技術が必須になることが予想されており、世界中のデバイスメーカーがRCAと技術提携、CMOS技術を吸収する中、デンソーもエンジニアを派遣、CMOS技術を持ち帰った。他社

が各工程毎に数名のエンジニアを派遣する中、デンソーは、一人ですべての工程を担当した。当時を振り返った派遣者から、「求めていた技術が目前にあった。楽しくて必死になってすべてを吸収した。」とのコメントがあったように真摯に、貪欲に技術を吸収することで、少数精鋭部隊が生まれ、1977年の車載用CMOS時計（世界初）へと繋がることになる。半導体技術の他分野への応用も模索する中、1981年には、豊田中央研究所から半導体式圧力センサの技術移転を受け、半導体式吸気圧センサ（世界初）を製品化、パワーモジュール（イグナイター）、モノリシックIC（デュアルコンパレータ、時計）、センサ（圧力）のデバイス事業の3本柱の製品が出揃うことになった（Fig. 2）。



Fig. 1 IC Laboratory (1968)



Fig. 2 Early Products

2. モノリシック IC

1974年にデンソー初のバイポーラICであるSE001（デュアルコンパレータ）を製品化。当初、他社実績のあるPN接合分離工程にて自動車用の高耐圧ニーズに対応し集積化を進めていたが、1990年頃には、耐圧を維持したままの集積化が限界になることが予測されていた。高集積化することで、素子間の距離が短

くなりPN接合部での空乏層の広がりを無視できなくなっていた。また、PN接合分離では、分離素子間の寄生トランジスタ形成を避けることが出来ず、ガードリング構造等で、寄生トランジスタの動作を抑制していたが、シミュレーションによる予測が困難であり、複数回の設計変更を行い、特性保証していた。絶縁膜による素子分離が理想であるが、当時、素子周辺を絶縁膜（酸化膜）で囲む構造は、電話交換機用ICとして他社が少量生産していたが、Si基板をメサエッチした後に素子部を酸化し、酸化膜を形成後、段差をポリシリコンで埋め込み、裏面から基板を研削することでSi素子分離部を形成する工程が必要で、ウエハ製造コストが高く、高集積化もできないものであった。一方、研究開発分野では、ウエハ張り合わせと垂直トレンチ構造による絶縁分離構造が提案されおり、高集積、低コストのポテンシャルはあったが、トランジスタ動作は確認されていなかった。将来の高集積時代を見据え、理想に近い構造で、車載用ICとしてのポテンシャルが高い張り合わせ絶縁ウエハを採用することにした。張り合わせボイド、結晶欠陥、トレンチ埋め込み不良等多くの課題を克服する必要があった。特に、Bipデバイスの縦方向の耐圧確保のためには、 $10\mu\text{m}$ 以上の深いトレンチを形成する必要があるが、当時のデバイス装置メーカーの技術では不可能であったが、デンソー独自技術を付加することで、車載ICとして世界初の絶縁分離ICを製品化することが出来た。Fig. 3に断面構造の比較、Fig. 4に素子耐圧と集積度の関係を示す。絶縁分離ICでは、耐圧を維持した集積度向上が可能であることが分かる。

1985年の1ビットマイコンから始まった車載に特化したマイコンの開発では、車載信頼性の取り組みとしてウォッチドッグ機能の内蔵に取り組んだ。一般的にマイコンでは内蔵されたプログラムに分岐命令を持たせる。しかし、分岐命令のあるプログラムは種々の要因でプログラム異常に至る可能性がある。車載システムでプログラム異常が発生した場合、モーター制御等のシステム制御が破綻してしまう。そのため、通常は、外部にウォッチドッグタイマ(WDT)と呼ばれる動作監視用の機能を構成している。しかし、コスト、搭載面積の点で課題になっていた。1993年に開発し

たND8では、WDTとしての機能を分岐の無い固定ループをハードウェアとして内蔵することで実現している(Lタスク)。このLタスクで、異常の可能性があるが高性能なAタスクを監視することを、ウォッチドッグ機能内蔵で実現し、自動車用マイコンとしての信頼性と性能を大きく高めた。1990年代からは、32bitマイコンが自動車用として登場し、現在でも主流となっている。デンソーでは、1995年に車載制御命令に特化した32bit RISCマイコン(NDR)を開発している。近年の処理データ量の増加、高速演算のニーズにこたえるべく、自動車用マイコンでは、プロセスノードが40nmや28nmの高集積最先端微細化技術が採用されるようになってきおり、カスタムマイコンでは、採算確保が難しくなっている。内製ICと他社マイコンの組み合わせで自動車用のカスタムニーズに対応するソリューションビジネスへの取り組みを進めており、現在の主流ビジネスになっている(Fig. 5)。

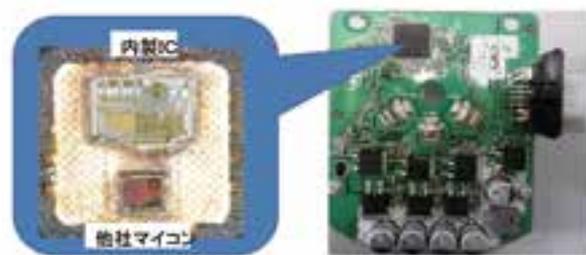


Fig. 5 Multi-chip Structure Combining Another Manufacturer's Microcomputer and Our Composite IC (Motor Controller)

3. パワーモジュール

1970年代にハイブリッドICを採用したICイグナイターを製品化し、徐々に採用車両を増やす中、1980年代、自動車はハイパワー競争に入り、ガソリンを送るフューエルポンプはより大容量、大電流タイプが採用されるようになった。大容量、大電流タイプでは、低速時には少ないガソリンに絞る必要があり、仕方なく大きなセメント抵抗をリレーで切り替え余分な電流を熱に変えて捨てていた。同年代には、GTO (Gate Turn Off サイリスタ) を使ったPWM (Pulse Width Modulation) 制御技術が鉄道車両のモータコントロールに採用され始めていた。フューエルポンプのモータをPWM制御でスイッチングすれば省電力、燃費向上に貢献できると考え高放熱、高信頼性ハイブリッドIC技術での実現を目指し開発をスタートさせた。80年代後半の北米エバポ・OBD規制も製品化を後押しし、91年に世界初のPWM制御フューエルポンプコントローラ(FPC)が採用された。この後のバブル崩壊と共に燃費向上のニーズが高まり、他社もPWM方式へと切り替わっていくことになる。PWM制御では、大電流スイッチングによるラジオノイズ対策のためノイズフィルタを実装する必要があり搭載性を悪化させていた。高速スイッチングによりフィルタサイズを小さくすることは可能であるが、高速スイッチング時に新たにFM帯ノイズが発生、これまで経験したことのない周波数帯域でのノイズ対策が必要となった。ノイズの見える化等の高精度伝導エミッション解析技術を開発することにより、フィルタだけでなくEPC全体のEMC最適設計を行い小型化を犠牲にすることなく

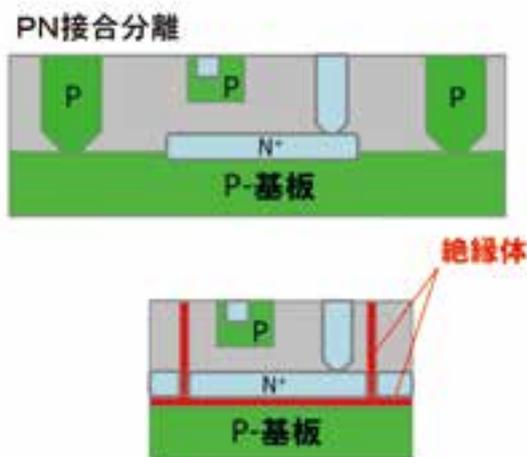


Fig. 3 Trench dielectric & SOI isolation Structure

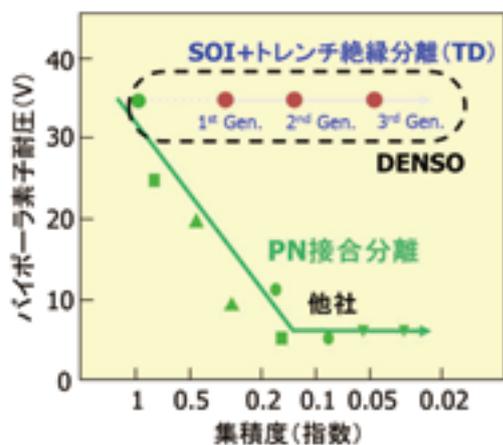


Fig. 4 Relations of breakdown voltage and integration level

低ノイズ FPC を製品化することができた (Fig. 6).



Fig. 6 Evolution of FPC (Fuel Pump Controller)

2000年代には、HV（ハイブリッドカー）の普及が始まりPCU（パワーコントロールユニット）の小型化のニーズが大きくなってきた。ハイブリッドカーでは、30家庭分の電力ブレーカーに相当する750V×400Aのスイッチングが行われており、高効率な放熱技術が小型化のキー技術であった。半導体チップは、ワイヤボンディング等でリードフレームとの電気接続をとる面が必要であり、放熱は、反対側のチップ裏面を利用した放熱経路で行うのが一般的であった。チップの発熱は、チップ内部で発生するためチップ表面からの放熱経路を確保することにより小型、高放熱のPCUを実現することが可能である。ワイヤボンディングのスペースを確保しながら、チップ両面に放熱板を配置したモジュール設計 (Fig. 7) とダイヤフラム機構を採用した冷却器によりチップ両面からの放熱経路を確保 (Fig. 8) することにより、パワー部の体格を1/3にすることに成功した。小型・高効率PCUは、HV（ハイブリッドカー）用インバータに採用され、HVの普及に貢献した。

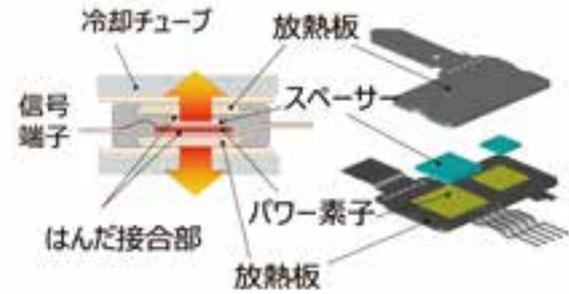


Fig. 7 Double-sided cooling module

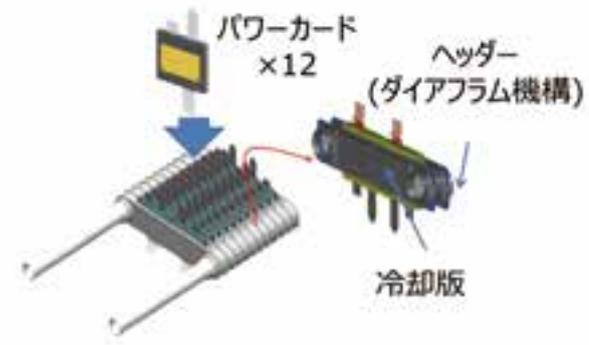


Fig. 8 Multi-layered type cooler

HVは、燃費向上手段として優れた技術であったが、さらなる燃費向上のためにトランスミッションの効率化も大きな課題であった。トランスミッションの効率化技術の1つとしてロックアップ領域の拡大があるが、ソレノイド、コントローラのばらつきがネックとなる現行技術での限界にまで拡大されていた。ソレノイド、コントローラは、別部品であり、個別に調整を行っており、これ以上のばらつき低減を行うには、機電一体構造として、一体調整により相互のばらつきを補完させる必要があった (Fig. 9)。トランスミッションの機電一体構造を実現するためには、コントローラをトランスミッションオイルの中に搭載する必要があり、小型化 (1/20)、高温対応 (140℃)、耐腐食 (高濃度硫酸イオン) を満足できるモールド実装技術の実現がキーであった。他社技術であるカンPKGやフルモールド構造では、小型・高放熱と低コストの両立は不可能であり、耐環境性能に優れたハーフモールド構造のみ実現可能と思われた。しかし、従来材料によるヒートシンクを内蔵したハーフモールド構造では、材料の線膨張係数の違いから冷熱サイクル試験での樹脂

剥離を解決することが出来なかった。放熱性に優れた Al と SiC を自在に調合することで線膨張係数を調整することが出来る AlSiC をヒートシンクに採用することで、冷熱サイクル試験での樹脂剥離の発生を抑えることができ、耐環境性に優れた大型ハーフモールドを実現した (Fig. 10)。これにより、油圧ばらつきを 1/4 に低減することが可能となり、ロックアップ領域を拡大、ダイレクト感のあるシフトフィールと燃費向上を両立することができた。

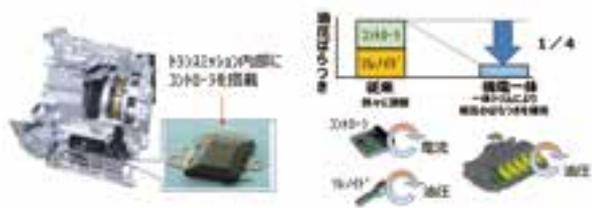


Fig. 9 Mechanically and Electrically Integrated Control Unit



Fig. 10 Core Technology for Mechanical and Electronic Integration

4. センサ

IC 研究室の設立後、PN 接合ダイオード、バイポーラトランジスタ、MOS トランジスタ、ハイブリッド IC を開発、製品化を進めていたが、既存半導体分野ではない新規分野へ半導体技術が使えないか模索していた。豊田中央研究所の KOH による Si 異方性エッチング技術とピエゾ抵抗素子による圧力検出手法は、これまでにない高精度圧力検出が可能となる技術として注目されていた。時を同じくして排ガス規制の強化により精密なエンジン制御が可能な電子制御エンジンのニーズが高くなっており高精度で安価なエンジン吸気量センサが求められていた。吸気マニホールドの圧力変化を高精度にセンシングすることにより、吸気量を推定することは可能であった。このような状況認識の中、半導体圧力センサの製品化を決断。豊田中央研究

所からの技術移管と温度特性を補償できるアナログ回路の採用により半導体技術を活用した MAP センサ (マニホールド絶対圧センサ) を 1981 年に世界で初めて製品化した。半導体圧力センサは、エンジン制御の高度化を支える製品となり、世代ごとに高精度、小型、低コスト化を進め、多種多様な搭載環境で使われるようになっていた。そんな中、1994 年に開発した 3 代目の製品では、車載環境の非常に稀な環境下でセンサが壊れる不具合を経験した。それまでは、「顧客仕様を満足するセンサを提供すれば良い」との考えで開発を進めてきたが、この不具合により自動車ユーザの使い方まで考慮した製品開発が必須であるとの風土が定着することになる。「環境は正しく把握されていますか?」は、基本設計 5 訓の最初に登場する言葉として引き継がれている。このことが最も反映された製品が排気ガスセンサであった。3 代目の教訓以降、車載環境を徹底分析し、エンジンの煤付着や排気の中に含まれる酸性物質等、市場環境を調べ上げ、顧客仕様には無い独自の試験を設定し、品質を確保するしくみを確立していた。MAP センサより過酷な環境で使用される排気圧センサの開発では、独自環境下での試験により予測された不具合の定量化と対策を短期間で実施し、過酷な環境化における高精度センシングを実現、圧力センサの検出範囲を広げ、エンジン制御の高度化に貢献している。

高精度制御のため、機械式センサから半導体式センサへの切り替えのニーズは半導体圧力センサの製品化でより強くなっていった。回転、位置検出の分野でも非接触回転検出センサとして磁気センサのニーズが高くなったことから、他社製の AMR (異方性磁気抵抗) 素子を購入し開発を進めていた。他社製素子は、車載環境を考慮した信頼性試験で、素子破壊の不良が発生、他の半導体メーカーも含めて対策を求めたが、民生品の開発に注力し、車載品質を満足させるための専用工程開発を行ってくれるメーカーは無く、内製化の決断をすることになった。不具合品を分析することにより弱点は見えていたが、対策には、材料、構造変更が必要であった。配線材料を Au から Al へ材料変更することで、磁性薄膜/配線の密着性を改善することが出来るが、Al 配線除去工程で、磁性薄膜にダメージを与え

る課題があったため、Al配線形成後に磁性薄膜を形成する工程を採用し、磁性薄膜の断線防止のため接続部のAl配線を滑らかな傾斜をもつ構造とした(Fig. 11)。Al配線を滑らかな傾斜をもつように加工するのは職人技であり、当初は低歩留りであったが、生産技術の向上により量産レベルまで引き上げ、1984年に車速検出センサとして製品化されている。この後、AMRを使った磁気センサは、カム・クランクセンサへ展開され、逆転検出等の高機能化も実現、エンジン制御、トランスミッション制御の高度化に貢献している。さらに、市販のホールICを使った電流センサは、既存車の鉛バッテリー、EHVのLiイオンバッテリーの効率的な充放電制御に貢献している。



Fig. 11 Cross-sectional Structure of Thin-film Magnetic Sensor

圧力センサ（油圧制御）、磁気センサ（車輪回転制御）によりABS（アンチロックブレーキシステム）が普及すると、次世代技術として慣性センサを使った車両制御（Fig. 12）のニーズが高まってきた。1991年に、セラミック音叉を使ったジャイロセンサを製品化、車両制御センサとしての地位を築きつつあった。このころには、ナビゲーションシステムやスマートフォンへもジャイロセンサが搭載され始めており、民生メーカーが低価格を武器に参入してきていた。1997年には、価格競争で他社に敗れ、OEMが他社製センサを採用することになる。ところが、車載信頼性の知見が乏しいことが要因で不具合を起こすことになる。しかし、当時は、低コストで提供できるセンサが社内外に無かった。不具合を起こした他社センサの面倒をデンソーが100%見ることでOEMを説得。他社とイナーシャセンサの共同開発を始めることになった。立場は違うが、センサ開発の難しさを知るもの同士、良いものを作る思い一心で取り組み2003年には、車両ハーネス削減も狙ったCAN通信機能内蔵イナーシャセン

サ（Fig. 13）として立ち上げた。

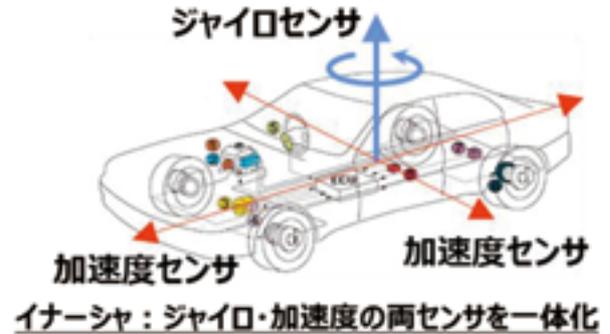


Fig. 12 Vehicle Movement Detection Sensor



Fig. 13 Inertia Sensor

5. 製造技術

IC研究室で1つのダイオード素子からスタートした内製半導体は、現在では、100万素子からなる回路チップに拡大。圧力センサ、慣性センサ、磁気センサ等のMEMSセンサも量産中である。これらの成長を実現したのが、微細加工の進化とデンソーの強みであるシリコン加工の進化である。

<シリコンダイヤフラム加工>

1981年に製造開始した圧力センサのキー技術であるダイヤフラム加工は、ウエハ裏面からシリコンをアルカリ液（KOH）でエッチングするもので、ワックスでマスクングする作業に熟練技術が要求され、開発当初は不良に悩まされたが、現場改善で乗り切っていた。将来の生産数量増への対応を見据え、1994年にポットエッチング装置による自動機を機能部と連携し

て開発、1995年には、ポットエッチングを用いた電気化学エッチングにより世界一薄いダイヤフラム（7 μ m）を実現した（Fig. 14）。 ϕ 4インチからスタートし、 ϕ 5インチ、 ϕ 8インチと技術を進化させながら受け継がれている。

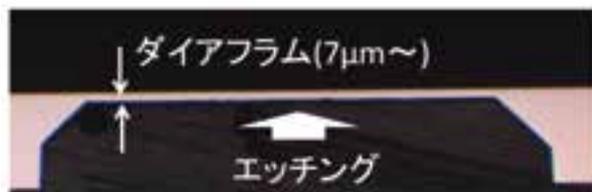


Fig. 14 Cross-Sectional view of pressure sensor-Diaphragm by Electro-chemical Etching

<シリコン深掘加工>

1994年様々な素子を1チップに集積した複合IC（TD1）が量産開始した。SOIウエハをエッチングして深い溝を形成するトレンチ工法により、素子相互間の影響をキャンセルし、素子集積を可能にした（Fig. 15）。現在、9代目の180TDが流動中である。

センサ分野では圧力センサのダイヤフラム加工を応用したピエゾ式Gセンサを量産していたが、世の中は自己診断機能を有する容量式Gセンサに流れを変えており、事業存続の危機に陥っていた。圧力センサのダイヤフラム構造と複合ICのSOIウエハ、Si深掘エッチングを組み合わせる工程を開発したが、当時の高精度Si深掘エッチングは、処理を続けるとエッチング速度が低下する課題があった。当時、研究レベルの設備しかなく、設備メーカーや計測器メーカーを巻き込んで設備を改善、世界初の量産設備を完成させ、2000年に量産開始した。Fig. 16にピエゾGセンサと容量式GセンサのSi加工表面のSEM像を示す。

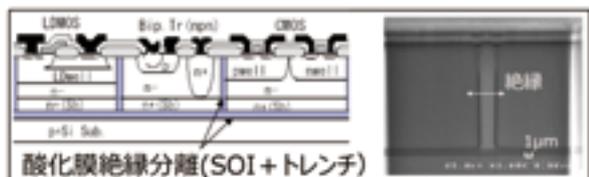


Fig. 15 Cross-sectional Structure of Composite IC

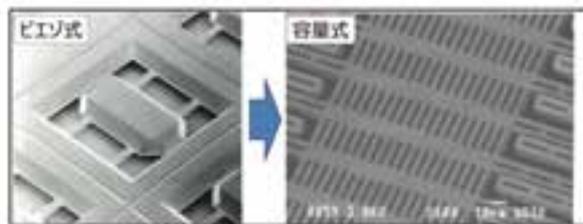


Fig. 16 SEM image of G-sensor

<ウエハ工場の進化>

半導体製造は、異物との戦いである。異物は、微細加工形成不良や配線間短絡を引き起こし、歩留り悪化や、納入先での不良発生といったお客様に迷惑をかける品質問題を起こす。そのため半導体工場では、異物を極限まで減らす取り組みがなされている。クリーンルームでの最大の発塵源は人である。毛髪や皮膚はもとより、化粧粉、汗なども致命的である。1993年に竣工した705工場では、作業者が介在しない無人化に取り組んだ。ウエハをロボットが設備まで搬送し、設備は、ホストコンピュータから指示されたレシピで処理を行うもので、当時の世界最先端の自動搬送システムであった。他社が軌道上を走るロボットを検討したのに対して、デンソーは、内製ロボット部隊と連携し、将来の設備増強へのフレキシブルに追従でき、更に設備故障時の部分運転が可能になる無軌道式のロボットを選択した。

スーパークリーンルームの維持には、膨大なエネルギーが必要である。2006年に竣工した706工場では、SMIFポッドによる局所クリーン化でウエハを収納するポッド内をクラス1に、その周りのクリーンルーム環境はクラス10,000まで下げエネルギー費を削減、SMIFポッドを天井搬送（OHT）システムで設備間を高速かつダイレクトに搬送することで、搬送スピードをアップした。また、706工場では、お客様への供給責任を全うするため免震構造を採用。地震の揺れを建物に伝えにくくする「積層ゴム」と、揺れの大小に関わらず高い振動エネルギー吸収性能を持つ「粘性体ダンパー」・「オイルダンパー」の3つの免震装置を組み合わせることで、震度3～5の中程度の地震での免震性能を高めている（Fig. 17）国内で2番目の半導体免震工場であった。揺れる前にアラーム発報やガス・薬品の供給を遮断、特殊危険性ガスや薬品の漏洩や腐食、

火災発生の防止、加工設備の破損や損傷、社員の負傷を予防する目的で、緊急地震速報とP波地震計を組み合わせた「高精度」で「直下型対応」の地震防災システムを採用している。

組み付け工場の異物対策では、異物対策の発想を転換。これまでのクリーンブースでは、ブース内が暑く作業動線にも制限があり、壁の両側に余分なスペースが発生していた。これらの課題を解決するため、気流の検証を繰り返し、作業領域のみをクリーンに保つクリーンユニットを内製で開発し、壁レスでのクリーン空間を実現した。これらの活動により、脱クリーンルーム化が可能となり、①電子工場と大部屋一体化（レイアウトフリー）、②クリーン専用空調見直し（電力費低減）、③白衣レスでの作業ストレス低減の効果を創出している。

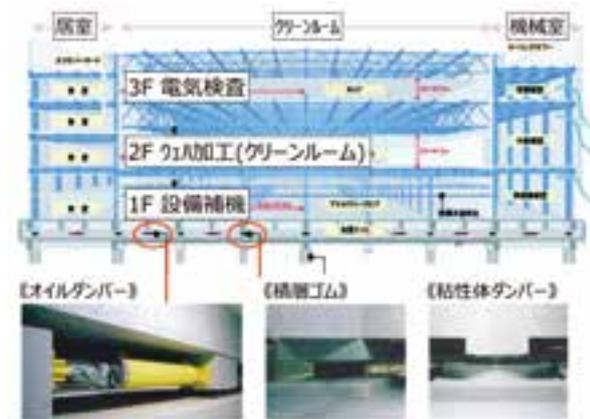


Fig. 17 Earthquake-resistant Structure of Wafer Manufacturing Plant (Kota 706 Plant)

6. 品質向上

長期大量不良の絶対防止、市場品質（0.1ppm）の作り込みには、環境把握と余裕度設計が重要であり、製品機能、半導体物性、樹脂粘弾性、回路・CAEのモデル構築によるマルチスケールCAEと微小領域分解、観察、元素特性技術等のマイクロ解析技術を組み合わせることによりストレスによるチップ上のマイクロな挙動と特性を紐付け、影響パラメータを抽出し、余裕度設計に反映する必要がある。半導体デバイスは、年々微細化が進行しており、微細な領域での解析技術力が品質向上に直結する。1 μm 以下のパターンで形成され

るデバイス製品は、10nmの大きさの異物で不具合になることがあるが、1 cm^2 のチップ中に発生した10nm程の異物を見つけるのは、野球場で米粒を見つけるのに等しい。チップを動作させ不具合箇所のみ現れる現象（発光や発熱）でその場所を特定してから、原因となる異物や欠陥を見つけるが、検出できないことも多く、ミクロの世界で発掘を行うようなものである。解析プロセスに沿ってマクロからミクロまで解析装置を順次整備している（Fig. 18）。解析結果を上流の開発・設計・製造工程に反映させる活動により、継続した品質向上を実現している。



Fig. 18 Overview of Fault Analysis Tools

7. 100年に一度の自動車産業の変革期を迎えて

自動車への半導体の採用は、1960年代のオルタネータ（交流発電機）への整流用ダイオードから始まり、1970年代の自動車排ガス規制強化への対応のためのエンジンの電子制御普及に伴い、多くの車載用半導体が採用されてきた¹⁾（Fig. 19）。1980年代から急速に成長してきた車載用半導体市場は、今後も電動化、自動運転、コネクテッドの進化により大きな成長が期待されている（Fig. 20）。当初の車の電子化は、動力源等の主要コンポーネントの変更はなく、半導体を用いた電子制御技術導入による改善（高性能化）であった。これから起きる、既に始まっている変革は、自動車の主要コンポーネント、概念を変えるものである。変革の主役である電動化（内燃機関から電気モータへ）、自動運転（人間主体の運転から電子頭脳の運転へ）、コネクテッド（自動車単独の存在から社会と一体となった存在へ）は、いずれも半導体技術によって大きく進化しようとしている。このような車の進化に

は、半導体技術の進化が不可欠である。半導体技術はムーアの法則に従って着実な進歩を遂げてきた。

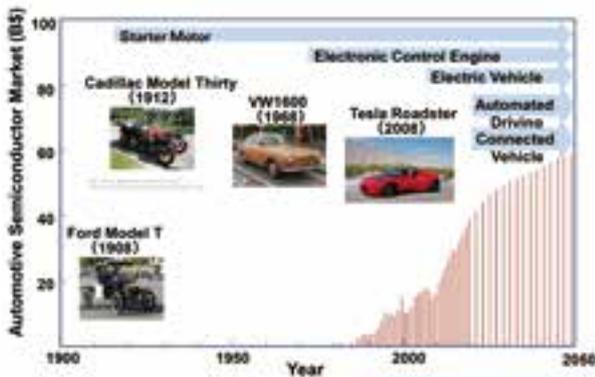


Fig. 19 Evolution of Electronic Control Technology and Trends of Automotive Semiconductor Market



Fig. 20 Core Technology of Future Vehicles

デジタル集積回路はこれに沿って集積度を上げ、消費電力の低い高速の処理が可能となった。またアナログ回路においても高周波性能の観点からデバイス特性の改善が回路性能を向上させ、数々の有線、無線システムが実現されてきた。車載半導体では、信頼性、市場実績を重要視し、最先端から数世代遅れの技術を採用することが多かったが、今後は、必要とされるパフォーマンス実現のために最先端半導体技術が採用されるようになると思われる。

残念ながら、鉄道、電力分野のような限られた市場向けで半導体産業が大きな注意を払ってこなかったかったパワーデバイスも、車載用という新規市場が見

えることで、新しい技術が育ち、自動車の動力源のためのシステムの普及が始まっている。

このような新しい半導体技術が自動車の中に広がり、自動運転が普及した将来、車はもはやステータスとして持つモノではなく、移動というコンセプトの中に運転する楽しみや人と人が出会う喜び、新しい世界への扉などを含んだ社会システムの中でとらえられるようになる。従来、車は、単純な移動サービスとして捉えられていたが、未来のモビリティ社会では、移動中の時間、空間を活用するサービスに変わっていく。車を取り巻く未来社会を、都市や地域の将来像と一体でデザインすることになる。スマートフォンで車から電車、飛行機までの乗継を一括予約できるような利便性と社会課題である温暖化、大気汚染、高齢化、交通事故拡大、交通渋滞の解決を両立させる必要がある。クリーンな燃料である電気、水素が活用され、これまでの車自身の各種センサによる周辺情報だけでなく、ブラインドコーナへの車、歩行者の侵入、渋滞状況、天候等の社会情報も踏まえた判断を車が行うようになると思われる。また同時に、ドライバ、同乗者の健康状態、覚醒度等もセンシングできるようになり、人と車が調和する社会が実現する。

外部と通信で情報収集を実施するためには、コネクティビティとして遅延の許されない通信をセキュリティが保証された状態で提供することが重要になる。このようなシステムが高い信頼性の元を実現されるためには、環境温度や故障率だけではなく、予防安全の考え方が重要であり、国際基準が整備されつつある。未来の車社会の一例を Fig. 21 に示す。電動化、自動運転、コネクテッドが実現された将来のモビリティ社会では、サイバーモビリティセンタが中心になり、地域の中で必要な情報の見える化、データ解析による予測、最新情報へのアップデートにより、マルチモーダル移動、バレーパーキング、サプライチェーンとのコラボ等、移動手段のコーディネート/最適化が可能となる。情報と移動の融合により効率化された自動輸送システムにより低コストで環境にやさしいモノの移動、人の移動が実現し、ADAS とその延長である自動運転環境により交通事故は削減される。高齢者の移動もスムーズとなり、高度に制御された交通システムで

は渋滞に苦しむこともなくなるだろう。住居から移動中までシームレスに情報が共有されることにより安心安全な医療環境も実現すると期待できる。我々はこのような健やかな未来を子孫に残すために、まだ沢山の技術的チャレンジに向かわなければならない。



Fig. 21 Future Urban Transport Network

<電動化>

将来の Mobility Society の中で、多くの車の駆動機構は電動化される。燃料エンジンも発電／補助動力源として用いられるが、社会エネルギーの効率的な使用のためには電動化技術は欠かせないものとなるだろう。また、車両が電動化していくためには、個々の部品がコンパクトに実現され、十分な航続距離を持つことも要求される。電動化車両の構成を Fig. 22 に示す。主要な構成部品は、従来ガソリン車の燃料タンクは電池に置き換わり、エンジンは、PCU（パワーコントロールユニット）とモータに置き換わっている。最も重要な課題は PCU の小型、高効率化である。Fig. 23 に各種インバータに採用されているパワーデバイスを示す。十分な動力性能を発揮するために自動車 1 台分に必要な電力は鉄道で用いられるモータ 1 個分（100～150KW）にも達する。このような大電力を扱うユニットを 1m³ に満たない狭い車載空間に実装するために小型の PCU を実現する必要がある。さらに自動車の空間では鉄道と異なり、搭乗者を含め周辺の間所を熱排出などのために制限できないことから、より効率化が求められる。高効率化においては、鉄道分野では、GTO から IGBT へ素子が進化することにより、より

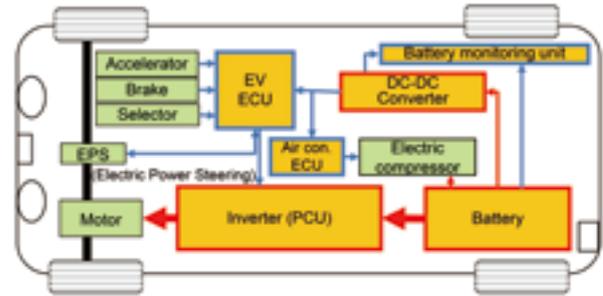


Fig. 22 Electric-Vehicle System Configuration

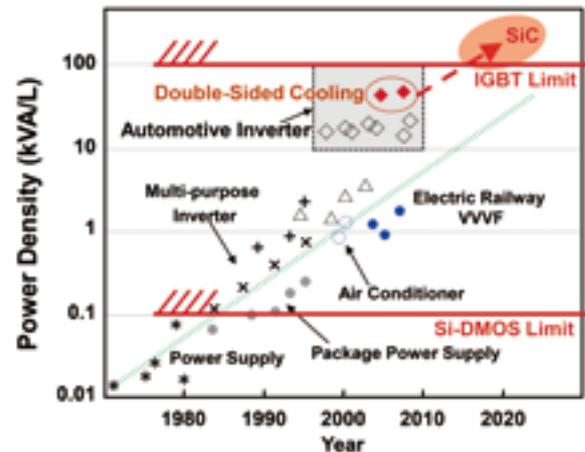


Fig. 23 Power Device for Inverter

高周波での制御を可能とすることで効率改善を行ってきた。電動化車両においては、IGBT を車用に最適設計²⁾、エンジン冷却で培った水冷技術を応用した両面放熱構造を採用³⁾ することで、車に搭載できる高効率な PCU を製品化してきた。さらに IGBT に変わるデバイス技術として今後の技術発展のオプションのひとつは明らかに、MOS 構造による高効率、広バンドギャップによる高温動作が特徴である SiCMOSFET⁴⁾ である。ワイドギャップ半導体である SiC では絶縁破壊電圧（3MV/cm）が Si と比較して一桁以上高く、ドリフト層を薄膜化できるため Si-IGBT のような導電率変調を用いなくても MOSFET で高耐圧と低抵抗を両立できる。また、Si の 2 倍近い、高い飽和ドリフト速度（2km/s）により高速スイッチングが可能となり、IGBT では不可能であった高周波駆動による損失低減と受動部品の小型化を実現できる。このような SiC の特徴を生かすことで、空冷 PCU の実現も可能になり冷却系も削減できることから大幅な小型化が期待される。さらに、この技術を実線給電に適用し、

さらに将来の走行中給電に応用すると高周波電源の大幅な小型化と効率化が可能となる。これを実現し、SiCMOSFETを有効に活用するための半導体分野の技術課題としては、デバイス表面の欠陥密度の低減があげられる。我々はこのためRAF法採用による低欠陥SiC単結晶ウエハ⁵⁾の形成と低欠陥高速エピ技術を採用することで、従来より低い欠陥密度を実現することを可能(Fig. 24)とした。この技術を用いることで量産対応できる6インチウエハの試作も成功しており、高信頼のデバイスを供給することが可能となる。電力増幅用に期待されるGaN FETもパワーデバイスの候補である。車載の観点から効率化とコストの点で今後さらなる改良が必要と思われる。

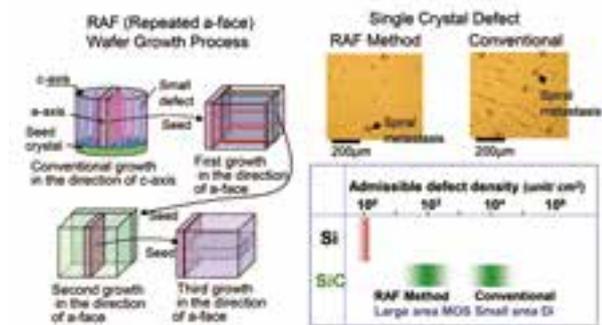


Fig. 24 High Quality SiC Wafer

<自動運転>

現在、将来の自動運転に向けた技術開発が盛んである。既にいくつかのメーカからは高速道路や一般道路での実走実験や限られた領域での無人走行実験の結果が報告されている。走行環境へのセンシングの観点からはFig. 25に示すように自動運転では、同時に複数のターゲットを高精度に認識する必要がある。人間の目の代わりになるカメラ(画像センサ)と暗闇、霧のような悪条件下でもターゲット検出が可能なミリ波レーダが基本構成になる。これに短距離検出用の超音波センサ、地図情報に近い高精度検出をするためのLidarが追加⁵⁾される。これらのセンサはコストダウンされることで車の各方向に複数個が装着されるようになってきた。画像センサの主要構成部品は、光情報を電気情報に変換するイメージャーと電気情報を処理して物体認識を行う画像処理と警報や運転支援、自動運転用の

信号を出力するための演算を行うマイコンを内蔵した画像演算プロセッサである。ここでは、いかに早く、低消費電力で物体を認識する技術が重要となる。一般的に認識精度は、リソースである電力消費量とのトレードオフ関係にあるため、性能を維持しながら低消費電力化を行うことが製品の競争力になる。従来の信号処理で行われていた個別の物体認識のほかにDNN(ディープニューラルネットワーク)と人工知能を用いた機械学習による認識が進んでいるが、汎用GPUによるDNNでは車載プロセッサとして現実的な消費電力を得ることはまだ難しい。低消費電力化の手法としては、DNNのネットワークそのものをソフトウェアで削減する方法と要求時間に対してスケラブルなDNN専用ハードを採用する方法⁷⁾がある。機械学習では如何に学習させるかが装置性能のポイントとなるが、製品出荷の観点からは学習前の装置は意味を持たず、全ての学習は製造までに終了しておく必要がある。我々はこれにより、Fig. 26に示すようにヒトと同レベルの認識処理を実現している。従来の信号処理では難しかった、ターゲットの移動方向や運転上意味を持たないスペースの判別など、必要な処理を高速に行うことができる。

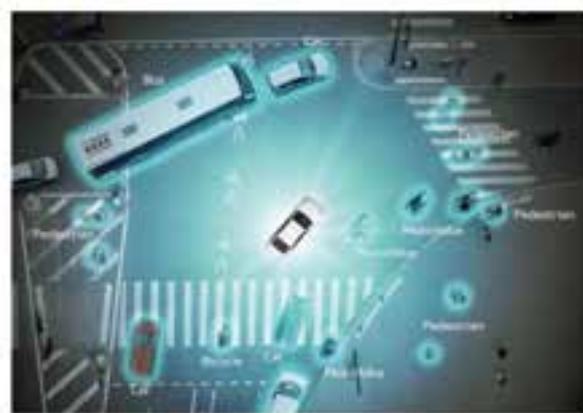


Fig. 25 Sensing for Automated Driving



Fig. 26 DNN-IP Processing Result

ミリ波レーダは、チャンネル（アンテナ）数の増加による角度分解能の向上⁸⁾と Fig. 27 に示すような位相制御による電子スキャン方式の採用により遠距離から近距離まで高精度なターゲット検知を可能としてきた。24GHz、76GHz 用の高周波デバイスは、当初は GaAsHEMT が採用されていたが、ミリ波レーダの普及に伴う生産数量増と低コスト要求により SiGeBiP 素子採用が進んでいる。今後は、制御の複雑化に伴うデジタル素子増加への対応のための CMOS 化が進む⁹⁾と考えられる。特に CMOS の微細化に伴い、55nm でも f_{max} が 300GHz を超える報告もあることから、コストの観点からも CMOS 化には拍車がかかるだろう (Fig. 28)。マルチアンテナ化による集積度の増大やフェイズドアレイ技術は 5G 世代の携帯通信でも議論が進められており、半導体技術の一層の発展が期待できる。

上記取り組みのセンシング情報をもとに経路計算まで行う高精度周辺監視システムの構築のためには、①徹底した市場走行、②シミュレーションでの定量評価、③テストコースでの定量評価が不可欠である。3つの取り組みを融合させることが、高品質周辺監視システムでは重要になる。自動運転に対する信頼性の要求は単に個々のデバイスの寿命や故障を低減するという観点だけでなく、機能安全として定義されるシステム全体の安全性が求められる。AECQ100 で定義される信頼性は無論であるが、ASIL で規定される機能安全への対応が車載半導体では必須の要件となるだろう。さらに製造技術の観点からは、DNN やミリ波レーダなどの試験技術、実装技術を確立していくことが欠かせない。センサや信号処理プロセッサを含めた自動運転

のためのデバイスの市場は車載装置としても大きく進展していくと予想されているほか、今後の安心安全社会の中でインフラや個々の家庭でも市場を拡大していくことが予想されており、半導体市場の中でも注目すべき分野である。

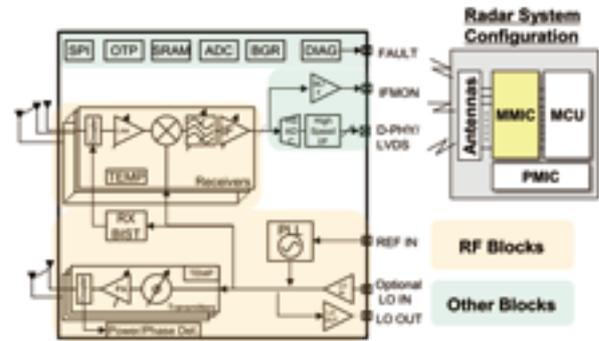


Fig. 27 Block Diagram of MMIC

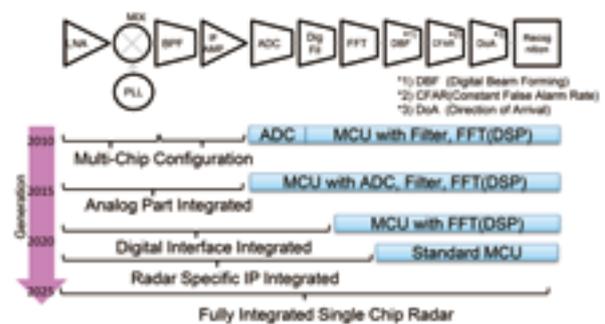


Fig. 28 Typical Radar Receiver System

<コネクティッドカー>

車と社会が繋がることにより ADAS、自動運転分野のみならず、ホームセキュリティや宅配サービスとの連携のような利便性向上を狙った新しいビジネスを生み出すことが可能¹⁰⁾となる (Fig. 29)。これを実現するためには、スマートフォンのようなプラグ & プレイを可能にする必要がある。現状は、アプリケーション毎に専用 I/F で車載用のベーシックファンクションと繋がっており、自由度が不足している。SOA (サービスオリエンテッドアーキテクチャ)、共通 I/F を採用することによりプラグ & プレイが可能となり、多種多様なサービスを活用することが可能となる。

次世代の 5G 通信ではレイテンシを極力小さくし、車での使用にも有効な速度を確保しようとしている¹¹⁾。このほか IEEE (Institute of Electrical and

基調論文

Electronics Engineers) でもいくつかの無線標準が V2X と称される車と何かの通信を標準化する動きがある¹²⁾。車載通信は移動することが前提であるため無線が不可欠であるが、携帯電話ビジネスとは異なり、一度市場投入されたものは 10 年を超える寿命を持つものも少なくないため、標準化の流れと製品化のタイミングは慎重に考える必要がある。ベストエフォート通信の考え方と安心安全への要求は矛盾しており、通信のセキュリティについてもデバイスレベルから考える必要がある¹³⁻¹⁵⁾。



Fig. 29 Vision of Connected Service

<将来の車社会>

地球上の大きな課題である温暖化や大気汚染、現代社会の解決すべき課題である高齢化やセキュリティ問題に対応した将来のモビリティ社会構築は、車技術だけが対処できるものではない。情報やモノの流れを包括的に捉えて同時に安全性高く共有する社会システムの構築が不可欠である。電動化、自動運転、コネクティッドは、これらの課題解決の主役になる可能性を秘めている。将来のモビリティ社会では、サイバーモビリティセンターが中心になり、情報が見える化され、データ解析による予測が行われるようになるであろう。半導体技術はこれを実現するために更なる低電力化と高信頼化、そして高性能化が求められる。ソフトウェア技術も含めて高効率のデバイスが必須のものとなる。未来のモビリティ社会を早期に実現するためには、半導体、コンポーネント、システムなど産業の壁を越えたグローバルな協力が必要となるだろう。

8. 今後の展開

デンソーの半導体技術は、大気汚染、地球温暖化対応のための電子制御エンジンと共に発展してきた。機械式から電子制御への変化に伴い、多くの半導体センサ、情報処理チップ、駆動用パワーデバイスが採用され、進化し続けている。近年では、衝突安全、予防安全のための周辺監視、車両制御システムの普及に伴い、これまでにない新規半導体デバイスの採用も進んでいる。すでにいくつかの製品群は、安心安全システム、エンジン燃焼効率向上、電動化推進に貢献している。

今後は、自動運転、コネクティッドカーが新規半導体デバイスの市場として期待されている。これらの分野では、車載としての特殊性が薄れており、民生製品との垣根がなくなっているように見えることがある。しかし、高速で移動する自動車では、不具合発生が人命に直結するケースが多く、民生にはない信頼性、品質が求められる。民生市場で使われている製品を車載に採用した場合の信頼性、品質保証のためには、設計段階、製造工程にまで遡った対応が必要になる場合が多い。これまで、デンソーの半導体製品は、車載に特化しており、生産規模によりコストが左右される近年の半導体素子では、民生市場まで含めたキャパで製造コストを低減した他社製品にコストでは歯が立たない。量産に近い製品では、設計、製造の監査に、これまで培ってきた半導体設計、製造のノウハウを生かして、未然に市場不具合を防止する取り組みを行うとともに、将来の研究開発においては、民生で培われたベース技術に車載用の信頼性、品質を担保するための構造設計、プロセス設計を分担する取り組みが必要になっている。車載デバイスとしての使われ方も時代と共に変化しており、進化する車載環境変化をタイムリーにとらえ、信頼性試験条件や、デバイス構造、プロセス改善の指針を常に更新しながら持ち続けることが競争力の源泉になると思われる。このための、最先端の構造設計技術、プロセス技術の研究開発も継続して実施する必要がある。

参考文献

- 1) Strategy Analytics, Automotive Electronics System Demand Forecast 2017
- 2) Shouji Miura et al. "Development of Power Devices for Power Cards" DENSO Technical Review Vol16 p38 (2011)
- 3) Naohiko Hirano et al. "Structural Development of Double-sided Cooling Power Modules" DENSO Technical Review Vol16 p30(2011)
- 4) Hiroshi Kono et al. "1.2KV Vertical power SiC MOSFET with high temperature characteristic" Toshiba Review Vol.65 No.1 p23(2010)
- 5) Daisuke Nakamura et al. "Ultrahigh-quality silicon carbide single crystals" *Nature* 430, 1009-1012 (2004)
- 6) Kazuoki Matugatani et al. "Sensing Technologies for Realizing Automated Driving" DENSO Technical Review Vol.21 p13(2016)
- 7) Tomoyoshi Funazaki et al. "Deep Neural Networks Accelerator for Pixel Labeling" DS-01 MIRU2016
- 8) Masaru Ogawa et al. "Development Trend of Automotive Millimeter-Wave Radar" IEICE technical report:113(203), 17-20 (2013)
- 9) Yuu Watanabe "Semiconductor Technology and Its Challenges for Millimeter-Wave Applications" IEICE technical report 114(111), 51-54 (2014)
- 10) Ning Lu et al. "Connected Vehicles: Solutions and Challenges" IEEE Internet of Things Journal Volume: 1, Issue: 4 (2014)
- 11) S. Onoe, "Evolution of 5G Mobile Technology Toward 2020 and Beyond", ISSCC 2016
- 12) Marc Klaassen, "Wireless Transceivers for Car2Car & Car2X systems and Applications", Forum F4 Presentation: "mm-Wave Advances for Active Safety and Communication Systems", ISSCC 2014
- 13) IEEE 802.11p, IEEE Standard for Information technology Telecommunications and Information exchange between systems Local and metropolitan area networks Specific requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications
- 14) "Comprehensive Experimental Analyses of Automotive Attack Surfaces"; CAESS; August 2011.
<http://www.autosec.org/publications.html>.
- 15) "Tracking & Hacking: Security & Privacy Gaps Put American Drivers at Risk.", Ed Markey, United States Senator for Massachusetts; February 2015.
http://www.markey.senate.gov/imo/media/doc/2015-02-06_MarkeyReport

著者



磯部 良彦

いそべ よしひこ

デバイス研究部
半導体デバイス、プロセスの研究開発に従事