

CASE 変革期に問われる
異能チーム・異分野技術へのアプローチ調査
2020 年度

－ミリ波 5G 普及時代の V-to-「X」に有望な IT 事例－

令和 3 年 3 月

一般財団法人 機械振興協会 経済研究所

趣旨

機械産業の筆頭格とも言われる自動車産業は、内燃機関ベースの 20 世紀的大量生産・販売方式からの転換期に突入しつつあり、デジタル革命ともあいまって、いわゆる CASE(Connected, Autonomous, Sharing, Electric)に全方位・同時進行で取り組まねばならない状況にある。米国では Tesla、Google、Apple 等が、あるいは日本ではソニー等が、伝統的な完成車メーカー (OEM) を向こうに回して精力的に活動するなど、非連続的革新の芽が見え隠れしている。また日米欧だけでなく中国勢の動きも活発である。

本調査では CASE 変革のうち、情報通信技術 (IT) が強い牽引力となる“CA”の部分 (Connected, Autonomous: ADAS や情報系)と、蓄電池ほか電力関係の影響が強い“E”(Electric: 主に EV 化)の 2 方向に注目し、初年度に前者を、第 2 年度に後者を、第 3 年度に全体統合と海外対比等を調査する。ただしいずれの点も広汎な 이슈を含み、調査も広汎に行われていることから、弊所調査はその中でも論点を絞込み、初年度 (情報通信系) では主に「V-to-X」(V2X)と呼ばれるところの、クルマ (V: vehicle) が“外界環境” (X: いろいろな場所) とやり取りする際の、「X」 (外界環境側) について、情報通信技術の視点から、日本として有望なポイント等を見ていく。

先回りになるが第 2 年度 (EV 化) や第 3 年度調査までを展望すれば、次のような点に触れることになろう。すなわち自動車産業が、OEM の階層、Tier-1 階層、Tier-2 階層など、それぞれの階層で、在来の技術技能・人材・経営に、かなり異質な技術・人材・発想を取込み、統合していく必要が明白であること。とりわけ自動車産業が、情報通信や電気電力系の技術や製品を、単に購買調達するのではなく、むしろそれらの“開発からリードせねばならなくなった”事情は、OEM や Tier-1 企業にとっての一大挑戦事項となろう。3 カ年全体を通じて、そうした新事態に対する各国・各層企業のアプローチのあり方を捉えることが、本調査の目的となる。むろん調査を通じて、日本における問題の提起や政策的提言等も狙いたい。

本書は初年度分の成果をとりまとめたものである。(詳細な技術資料等は略した)

CASE 変革期に問われる異能チーム・異分野技術へのアプローチ調査
2020 年度

調査研究委員会・委員名簿（順不同、敬称略）

委員（所属等は委嘱時点）

宮田 博司	岡山県立大学
飯田 実	ヤマハ発動機 先進技術本部 研究開発統括部長
高田 広章	名古屋大学
古川 浩	PicoCELA 代表取締役 CEO
天野 英晴	慶應義塾大学
松澤 昭	テックイデア 代表取締役 CEO
中島 盛義	ポトスセミコンダクタ 代表取締役 CEO
岩田 悟志	経済研究所特任研究員

オブザーバー（所属等は委嘱時点）

遠山 毅	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課 課長
佐藤 正健	同省 同局 同課 産業技術総括調査官
小島 晋之	同省 同局 同課 課長補佐
植木 健司	同省 製造産業局 自動車課 ITS 自動走行推進室長
勝野 真輝	同省 商務情報産業局 情報産業課 課長補佐
齋藤 尚史	同省 同局 同課 課長補佐
安田哲二、森雅彦	産業技術総合研究所（産総研）エレクトロニクス・製造領域
林 喜宏	産総研 TIA-SCR、兼 IRDS-SDRJ 委員長
内山 邦男	産総研=東京大学 AI チップデザインセンター(AIDC)
山本 達夫	デジタルメディアプロフェッショナル(DMP)会長
岡村 淳一	Trigence Semiconductor 会長
金山 敏彦	産総研顧問

経済研究所

井上 弘基	機械振興協会 経済研究所 首席研究員（PL）
太田 志乃	同 特任研究員（名城大学）
國分 圭介	同 研究副主幹
井高 章子	同 リサーチアシスタント

目 次

1章 ADAS ダイナミックマップ進化に必要有効な V2X 分散データベース	4
2章 ミリ波 5G (ポスト 5G) 通信環境の普及に立ちはだかる困難	14
3章 ミリ波 5G (ポスト 5G) 時代のエッジコンピューティングと半導体	20
4章 ハードウェアは半導体に依拠しながら低コスト化して普及を導く基軸となる . .	55

*著作権は人格権を除き経済研究所に所属する。報告書は委員会合意ではなく、経済研究所(PL)にてとりまとめた。ただし委員作成の資料を各章で、経済研究所として編集のうえ活用した。とくに第3章は岡村委員、第4章は中島委員から多大な協力を得た。記して感謝したい。しかし文責は経済研究所にある。

第1章

ADAS ダイナミックマップ進化に必要有効な V2X 分散データベース ——DB 中心型サイバースプレインプロセッサによる解決

冒頭「趣旨」で触れたとおり、自動車関連産業は大転換期を迎え、「CASE」= Connected（情報系）、Autonomous（自動運転）、Sharing（シェアリング～サービス）、Electric（電動化）に全方位で取組まねばならない状況にある。なかでも注目を集めているのは自動運転と電動車（EV）であり、以下、自動運転を ADAS=Advanced Driver-Assistance Systems（先進運転支援システム）の視点から観察したい。

*ADAS は SAE 米国自動車技術会による自動運転レベル分けでは、レベル 2「部分運転自動化」相当とも言われるが、それが充実していけばレベル 3 以降の自動化に部分的に（まだらに）内包されていくとみられ、レベル 2 “だけ”に相当する等の意味ではない。

ADAS は各種技術のとり揃え～組合せであり、たとえばクルーズコントロール ACC（Adaptive Cruise Control System：車間距離・速度制御）、前方衝突警告、衝突被害軽減ブレーキ制御、ナイトビジョン/歩行者検知、交通標識認識、死角モニタリングほか諸々から成る。これらの多くを支える縁の下の基盤として“ダイナミックマップ”を活用しようとする流れとなっており、これはいわゆる情報系(Connected)とも結びついている。ダイナミックマップが注目されるゆえんは、たとえば以下のような事情からである。

一口で、1 台のクルマ（自車）だけでは、搭載するセンサー類や、認識・判断 AI などを充実・進化させても限界が大きい。よって「ほかのクルマ」が集めた情報（後述）も、互いに活用し合おう、という発想である（後述）。

自動運転における通信情報（つながるクルマ）の活用	
自律センサーの補助	
▶ 周辺車両や歩行者の情報	
▶ 信号情報	
▶ どの信号を見るべきかの認識は簡単ではない	
▶ 画像認識による信号現示の認識の信頼性は十分か？	
▶ 交通状況の把握	
▶ 前方に停止している車両は、渋滞の末尾か？故障して止まっているのか？	
車から見えない範囲（遠くの状況）を見せる	
▶ 片方の車線が渋滞しているのであれば、もう片方の車線を走行する	
▶ 高速道路で、左車線が出口から詰まっている	
▶ 右車線が右折車で詰まっている	
▶ 前方に停止車両があれば、早めに車線変更してよける	

高田委員発表資料より（以下同じ）

次頁に続く

ダイナミックマップ（自車、他車含めた情報共有データベース）があると、右表のような機能が実現できる～しやすくなる。

車から見えない範囲(死角)を見せる

- ▶ 死角に歩行者がいるかどうか(さらに、死角が見えていない場合)で、走行経路を変える
- ▶ 高速道路にスムーズに合流する

出発地から目的地までの走行経路を決める

- ▶ 渋滞している道路を避ける
 - ▶ 現在の技術では、すべての車が回避し、別の道路が渋滞してしまう

車の動きの協調・調停

- ▶ 隊列走行
- ▶ 合流調停, 車線変更調停, 追い越し調停
- ▶ 緊急自動車

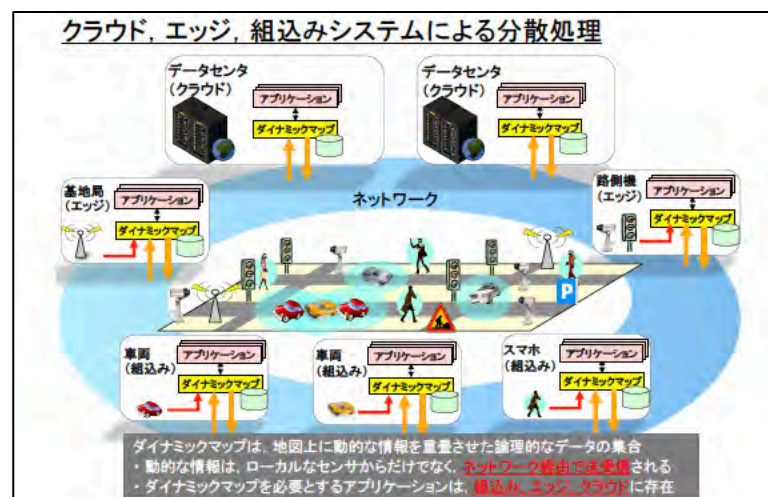
もう少し明確にダイナミックマップを定義すると、右表のとおりである。共有データベース（DB）であるが、集めるデータ自体が、時間的耐性にしたがって“動的データ”（1秒未満）から、地図情報のような“静的データ”（日～週単位）まで、「階層」構造を採るのが一般的である。動的データまで重ねるので“ダイナミック”（動態的）マップと称している。

ダイナミックマップ

ダイナミックマップとは？

- ▶ いわゆる高精度3次元地図の上に、動的な情報を重畳させた論理的なデータの集合体(仮想的なデータベース)
- ▶ 次のような情報をリアルタイムに管理する
 - ▶ 車両や歩行者の現在位置と移動状況
 - ▶ 交通状況(信号の現示, 渋滞, 事故など)
- ▶ 高度な自動運転を実現するための重要技術の1つと考えられており、国内外で研究開発が進む
- ▶ 「つながるクルマ」の情報プラットフォーム

それは「自車～クラウド」の2層から成るといふよりは、右図のように、遅延（レイテンシ）対策などを考慮して、「自車～エッジ～クラウド」といった3層以上の分散協調ネットワークから成るようになっていくと考えられている。



ダイナミックマップが無い段階から、そこへ情報共有・活用を進めると、どういう機能変化が見込めるか、分かり易い例を示す。

先回りすると右図のような段階が想定されている。

まずダイナミックマップが無い状態＝段階ゼロ、すなわち自転車搭載センシングのみならば、右図のような限界がある（一例）。

段階1として、クルマがそれぞれ自転車の状態情報をシェアし合うと、右のとおり、自転車搭載センサだけの限界を超えることができる。

つながるクルマの発展形態

つながるクルマの発展フェーズ

- ▶ Phase 0: 直接センシング(通信なし)
- ▶ Phase 1: 狭域通信による現在状態を直接配信
- ▶ Phase 2: 現在の周辺状態配信
- ▶ Phase 3: 将来状態配信
- ▶ Phase 4: 広域における状態収集/管理/配信
- ▶ Phase 5: 将来状態に基づく走行調停
- ▶ Phase 6: 広域交通流制御

検討の経緯

- ▶ 「つながるクルマ」の執筆時に、C2C-CCによる協調システ

Phase 0: 直接センシング(通信なし)



Phase 1: 狭域通信による現在状態を直接配信



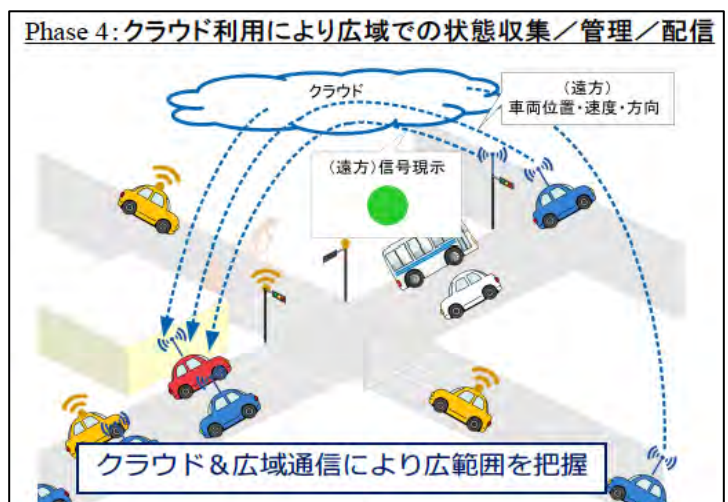
段階2として、自車状態だけでなく、自車が「集めた周辺情報」もシェアすると、右のとおり、たとえば通信端末を持参していない自転車や歩行者などの情報も、シェア出来る。



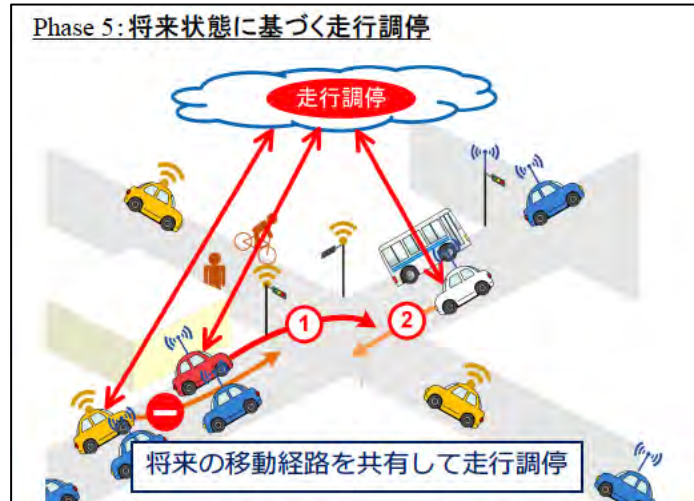
段階3は現時点情報にプラスして、近い将来に関する情報までシェアした場合である。



段階4は、各車からの情報シェアを、クラウドを介して、広域的にシェア～活用していく状態(右図)。



段階5は、広域的情報シェアを拡充活用して、一定範囲における「走行調停」などを、何らかのやり方で行う段階（右図）。



以上のダイナミックマップは階層構造を持った仮想的データベースそのものであるから、以後、DB と表記し、DB としてのあり方を検討した。

はじめにその構成が問題となる。これまでの主流は、クラウドコンピューティングにつないで、クルマとクラウドがやり取りするモデルであった（大きいDBはクラウドが持つ）。

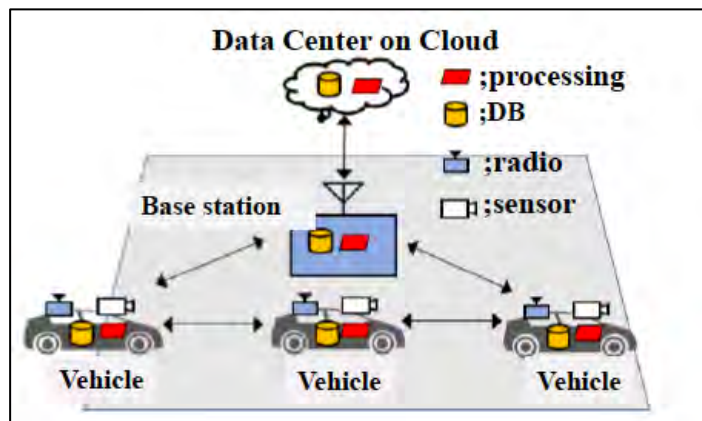
しかし ADAS 等のためには、一般の用途のような応答速度では間に合わない部分が多々

あり、“遅延”（レイテンシ）が問題となる。クラウドを往復している猶予はない。

レイテンシ問題のほかにも、たとえば通信の量としても、逐一クラウドと往復しているのでは、全世界で膨大なものになりかねず、節約の必要がある。むしろ経済コストの問題もある。

それら理由によって、車載サーバーに格納される見込の車載 DB がやり取りする先は、毎回クラウドではなく、機能ケースに応じて：

- ・V2V（ないし C2C）とも言われるクルマ（V or C）とクルマが直接に情報通信し合う車車間通信～情報処理



宮田博司委員資料より

・V2 基地局（ないし Fog 処理ターミナル）：クルマと基地局がやり取りし、すべてをクラウドには上げない
 といった、クラウドを介さない処理が適するシーンもある。

これらを総称して、「V2X」(X はさまざまな相手先) のように表記することがあり、要はクルマが 自動車以外の“外界”(X) とやり取りする情報ネットワークのあり方を示す。

今回調査では本件につき、宮田委員が中心になって検討した結果、たとえば右図のような情報処理のあり方を想定するのが賢明かも知れないという仮説を得た。

一般に、ダイナミックマップ活用は、クルマ＝クラウドか、V2V 車車

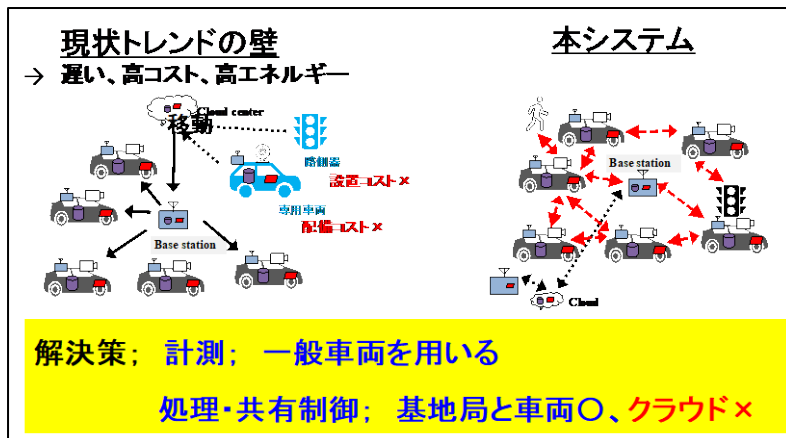
間通信の 2 層が想定されてきた歴史的経緯だが、その中間に、エッジ (fog) コンピューティング DB を置き、3 階層それぞれでの「折返し」処理を、機能ごとに使い分ける案が、近年では主流になりつつある。

今回検討の大胆な仮説は、したがって 3 階層処理の点ではなく、中間となるエッジコンピューター (MEC) をめぐる“現実解”を突き詰めようとした点にある。

すなわち今回、MEC は電柱や信号機や路側に置くことを想定せず、ほぼ基地局でいどに置く想定とした。最大の理由は、基地局以外の外界に MEC を設置する投資を誰が、どのように負担するか?、という問題 (疑問) が解けないからである。たとえば国費を投じて全国の交差点にそれを整備する案などは、財政的に可能性が低そうである。そうであるならば、MEC は基地局でいどに DB を置き、レイテンシや通信容量等の制約内での解を、追究せねばならない。

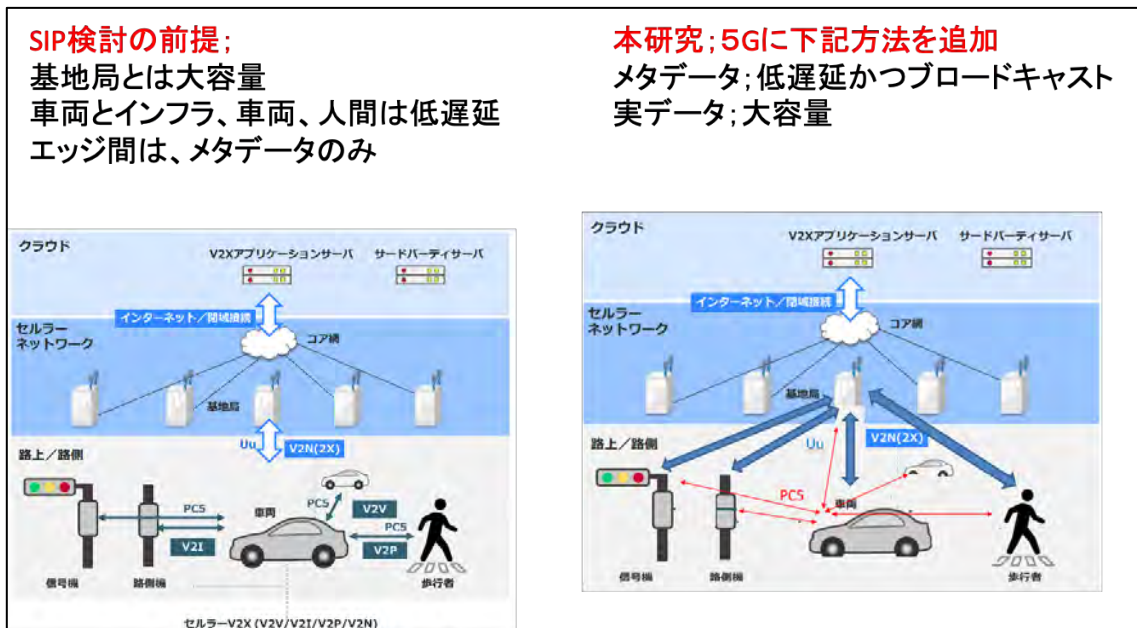
もっとも、内閣府総合科学技術イノベーション会議の「戦略的イノベーション創造プログラム」(SIP) の第 2 期では、第 1 期取組みを発展させた「自動運転 (システムとサービスの実用化)」がスタートして、近年の動向にも対応が図られている。

<https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/iinkai2/jidosoko.html>

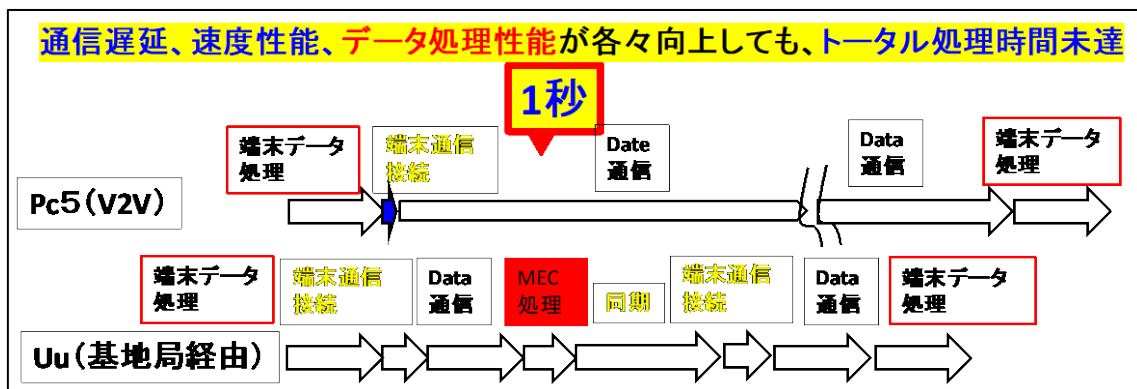


宮田博司委員資料より (以下、同じ)

今回調査検討の結果、それでも SIP に対して、次のような一層の補完的改善を図るべきではないかという仮説的結論を得た（下図）。



背景にはこれまで「ITS」等の始発点から今日に至るまで、連綿と研究開発や提言が出されたにもかかわらず、コストやレイテンシ等の壁にはばまれて、ダイナミックマップの「動的情報の層」（おおよそ1秒以内）が、なかなか充実しない問題がある。ちなみに下図はその事情を示している。現状の想定では、V2V も、V2 基地局 MEC も、そのままでは1秒の中で情報処理がやりきれない。

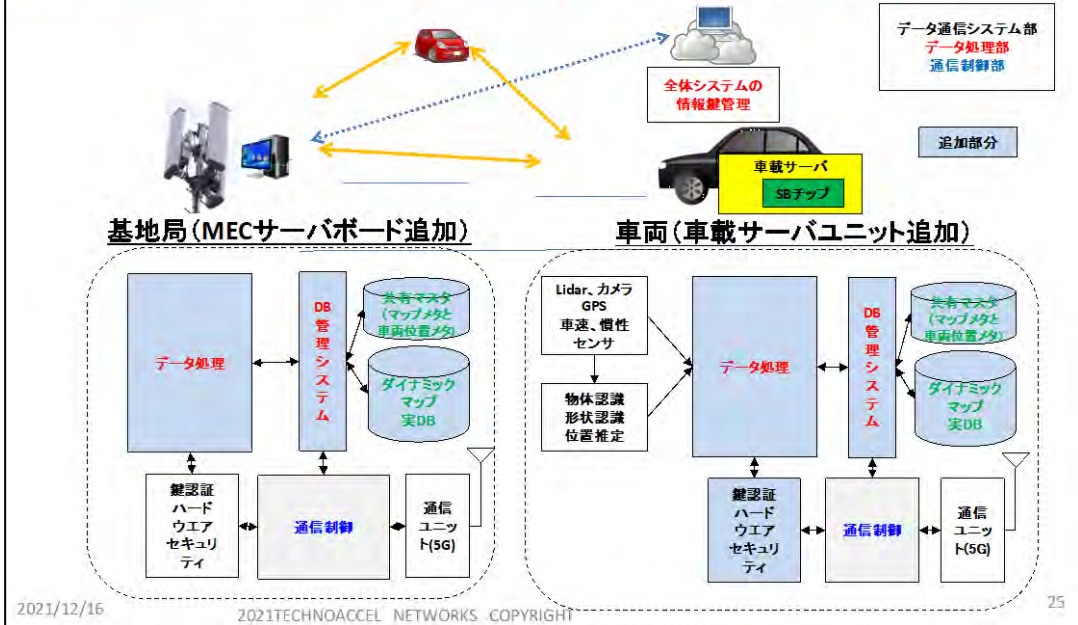


原因を分析すると、次図のように考えられた：

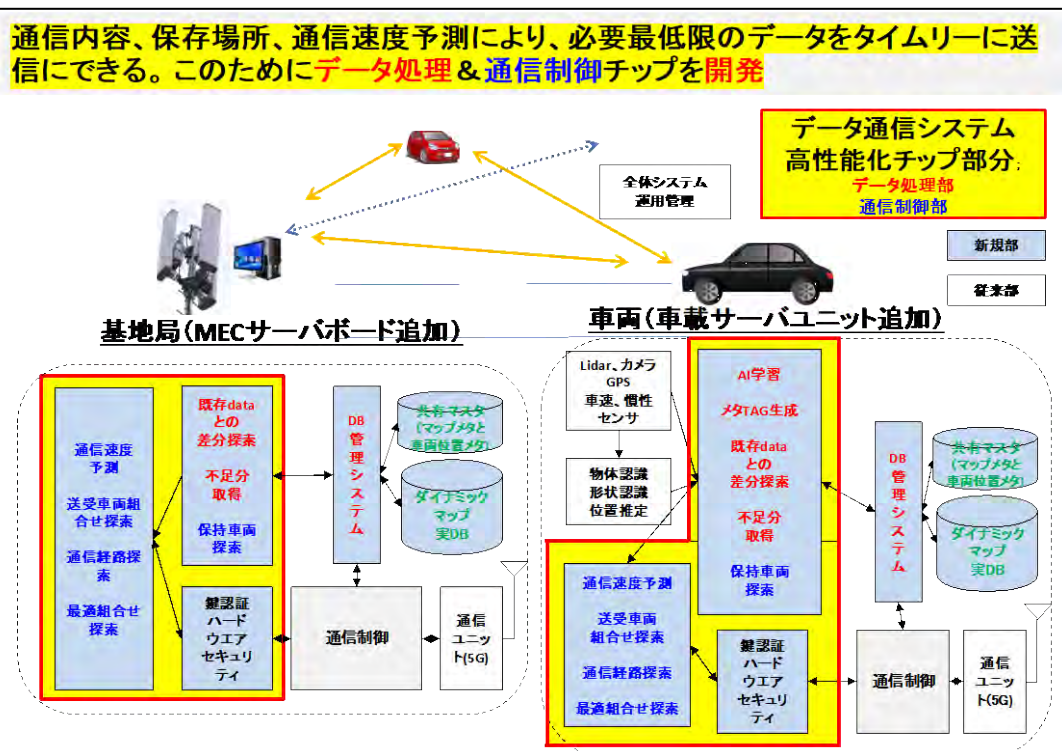
従来の方法(Pc5、Uu)で実現するとしたら;

MECサーバにデータを集め、データ送受信制御を行うが、

データ処理が遅く、通信速度の予測もないので、通信時間を長く想定することになる。その分、広い範囲の多くのデータ通信が必要で、さらに通信時間が伸びる



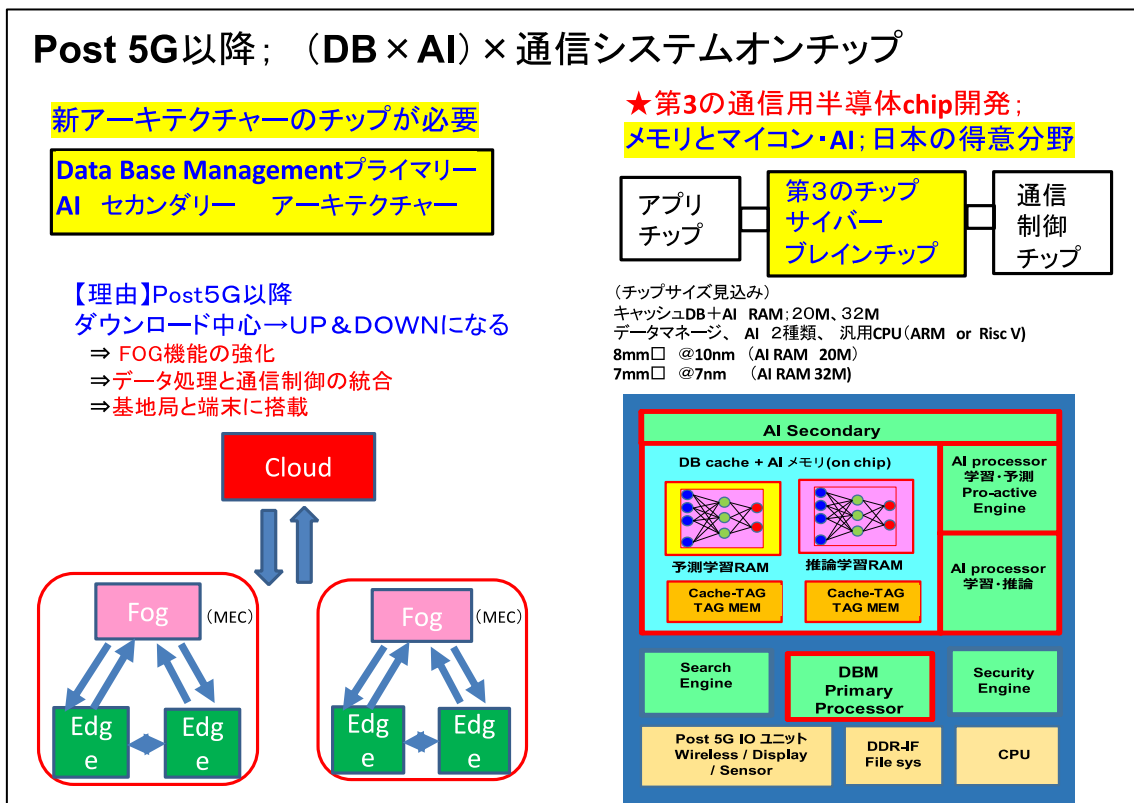
それに対して、以下のような工夫（新機構＝薄青ブロック）で問題解決ができるのではと考えられた。



要するに捉え方を転換して、DBを中心に、それが分散配置された状態で、動的にそれらがどのように協調し、通信し合うべきか、次世代のコンピューティング・ネットワークとして再構成すべき、ということである。

それらをさらに計数的に、制約条件環境を仮定しながら、分析していったところ（計算詳細は略）、ネットワークやソフトウェアは組直せば実現可能だが、最終的に遅延や“処理”の応答時間を制約しているのは、半導体チップ＝主にプロセッサ部分であるとの結論を得た。これはプログラムを書換えれば済むような問題ではなく、既存の世界のプロセッサでは問題解決は不能とみられた（含コストパフォーマンスの点）。

したがって日本の半導体ファブレス・ベンチャー等が、独自のプロセッサ ASSP(Application-Specific Standard Product: 特定用途標準チップ)を構想し得るはずだという仮説的結論を得た。（下図）



解説は略すが、ポイントとなるのは、プロセッサのあり方を大胆に変えて、DBマネジメント・プロセッサを（一般的な制御 CPU のほかに）中心に置き、AI 処理部は Slave として、その内部も RAM メモリー中心型に転換できるし、それによって低レイテンシの、いわば「サイバーブレイン」プロセッサを見込むことができると思われた。

以上、ADAS ダイナミックマップ進化に必須・有効な V2X 分散データベースの問題原因を分析して対策を考えた結果、究極的には DB を中心にすえたタイプの新しい半導体「サイバースレイン」プロセッサ (ASSP) が、必要・有効ではないか、という調査結果を得た。

本章ではクルマの ADAS を軸において、そのためのダイナミックマップを実現するのに必要有効なデータベースのあり方を探った結果、DB プロセッサの可能性が浮上したが、以下の各章では、その「通信」のあり方を考え、さらに全体を総合してポスト 5G 時代のエッジ系コンピューティングについて検討していきたい。

* 以上を半導体の側から捉え返すと、システム LSI というのは、半導体の設計専門部隊が考案するというよりは、上記のような、サービス／システムの要求から、チップは かくあるべし、という着想 (要求仕様) に落ちてくるコースが有効そうである、ということの示唆にもなっている。

(世界初のインテル・マイクロプロセッサが、日本の電卓メーカーによるシステム視点からの要求によって、仕様が発案されていった点も、世界に知られた顕著な例である)

また、システムにおける“決定的な (頑固な)” ボトルネックは、単にソフトウェアを書直せば済む等で突破できないことが多々あり、結局、半導体に期待する例が多々あるだろう点をも示唆していると考えられる (ソフトは半導体とペアになるかたちで死活的であるが)。

第2章

ミリ波 5G (ポスト 5G) 通信環境の普及に立ちはだかる困難

——本格 5G は動的ミリ波固定無線メッシュによる基地局間通信の活用から

ADAS を含むクルマの Connectivity(C)や Autonomous(A)が進むには、前章のようにデータベース等の側の工夫と同時に、通信環境自体においても能力向上が、面的に広がってくるのが期待されている。通信の能力向上として、有力な切口～契機は、いわゆる「5G」と言われている。5G とは、移動体無線通信事業者の世界的団体（欧州主導）である 3GPP グループが定義している移動体無線（携帯通信）の世代名称であるが、下掲のような特長を持つとされる。

一見、素晴らしいが、3つの優れた特性は、現状 5G と呼称されている 5G は、4G—LTE 側に制御を依存するタイプ（NSA）が殆どで、全体が 5G 基地

局依存になっておらず、いわば LTE とのミックス通信になっている。またその際に 5G 側を使うユーザーコンテンツ通信についても、無線周波数帯は Sub-6GHz(FR1)クラスであり、比較的 low capacity なレベルから実用化されている。3GPP 定義の「5G—NR(New Radio)」は、サブ 6 GHz 帯での通信も含むものだが、5G がはっきりと 5G 的特性を示すのは、高周波数帯、すなわち 24~52GHz 帯（日本では 28GHz 帯）で通信した場合(FR2)で、これこそが New Radio の本命とされている。電波の一般的定義から、およそ 30GHz 前後から、「ミリ波」と呼ぶので、28GHz 帯 5G は、おおまかにミリ波 5G と呼ぶことができる。つまり上掲の特性が非常にはっきりしてくるのは、ミリ波 5G (ポスト 5G と呼ぶ場合もある)において、である。

クルマの自動運転化も段階を追って、一步一步進んでいるのと同様に、移動体無線も、かけ声（宣伝）はすぐにも 5G が普及するかのようだが、現実には一步一步しか進まない。前章 ADAS でみたとおり、ADAS 用ダイナミックマップですら、まだま

5Gが「5Gたる」基本3要件

- 高速性
 - eMBB (enhanced Mobile Broadband)
- 多数接続性
 - mMTC (massive Machine Type Communication)
- 低遅延性
 - URLLC (Ultra-Reliable and Low Latency Communications)

これらの要件を満たすべく、
ミリ波帯New Radio
の利用が初めて定義された

Confidential, ©PicoCELA Inc., 2021 13

だ進化途上であるように、「5G」も同じである。逆に、どちらもまだ技術開発要素や、新規ビジネスの、可能性余地が残されている、ということでもある。

5G へ、さらにミリ波 5G へと技術が進むにつれて、困難な問題も山積してくる。ミリ波 5G が普及するには、右図のような点を解決していかなければならない。

- ミリ波では電波が全く飛ばない
- →その結果として：
 - 極端なスモールセル化（極端なセルオーバーラップ）
- →そうなる問題になるのは：
 - 設置柔軟性
 - xHaul問題の解決

高周波化（高帯域化）こそが、5G の優れ

古川委員資料より（以下、同じ）


た特性を実現してくれるのだが、同じ点が、通信網全体の実現・普及を困難にする。上掲でスモールセルとあるのは、通信網の末端局（装置）がカバーするエリア＝「セル」の面積が小さくなることを意味する。イコール、基地局／末端装置が、無数といえるほど増えねば、“つながらない”無線になってしまう。

基地局設置は携帯通信事業者の基本的責務であり、各社は顧客獲得のためにも自前で設備投資競争を行ってきたが、5G の「サービス展開」は実際は遅々としている。最大の問題は基地局設置問題以上に、5G 通信をフルに活かした圧倒的・画期的な“サービス”（課金）が、いまだに登場しておらず、4G-LTE 時代と、さして変わらないままにとどまっている点である＝つまりニーズが充分に掘り起されてない。それはミリ波 5G に、影を投げる。今の 5G より、はるかに多数の基地局を設置せねばならないが、挙句にそれをフル活用する圧倒的なサービスは登場するのか？、、という問題である。需要が見通せない状態ならば、基地局への設備投資も遅々とするだろう。そして基地局整備が遅れれば、需要喚起も遅れるだろうから、悪循環側の、タマゴ～ニワトリ問題となりかねない。

その問題を突破してくれるように期待されている一つの契機が、クルマの「C」（Connectivity）や、「A」自動運転などの進展である。しかしそれとて、悪循環のニワトリ＝タマゴはあり得る。クルマ系からすれば、通信業界が、先行的に通信環境向上を図ってくれないと、「C」や「A」の進展・普及も図れないからである。

他方、通信オペレータ側は、5G については、「ローカル 5G」によって個別の大手～中堅業者が使ってくれることで、ユースケースを増やしなが、市場を一挙に拡大

ローカル 5G は？



- QoS 保証が容易な点で Wi-Fi にはない付加価値を提供可能
 - リアルタイム制御分野など
- しかしながら、Wi-Fi と比較すると、CAPEX・OPEX とともにけた違いに高い
 - 最も安価とされる某社の 5G クラウドサービスですら、**初期費用 100 万～、月額利用料 40 万～**
 - これとは別に、PoC 運用、技術検証、免許申請、電波測定、エリア調査、ネットワーク設計、機器設定、試験、運用管理、保守などの付帯費用がかかる
- ローカル 5G と Wi-Fi とで、ユースケースの棲み分けが進むであろう
 - ローカル 5G は「何でもこなせる」わけではない！

(c)PicoCELA Inc., 2021 6

してくれる成功例に辿り着けることに期待する向きもあった模様である。(ローカル 5G = 一定の小区画だけに限定して 5G を展開すること)。

しかし上掲のとおり、一部の“煽り的な”報道にもかかわらず、ローカル 5G は、WiFi 等の固定無線系に対して、圧倒的に高コスト・高価格であり、体力ある会社が、余力でお試しするていどしか、使いづらい状況にあるせいか、多数のユースケースが産まれているとは言い難い。

* そういった点につき、そもそも 3GPP グループ (通信会社たち) にも自覚があり、5G 以降は、使われ方が、4G までと異なり、オペレータが主導するというよりは、需要家のほうが主導して、好みの通信特性をチョイスしていくタイプへ変化する旨、見ている。しかし、では実際、どうやって需要家を引きつけるかについて、オペレータの側に やり口があるかと言えば、はっきりしない。

こういう状況にあって、ミリ波 5G への展望を拓くのは、こういった可能性からであろうか。ADAS 等の需要家側からの視点のほかに、通信のサプライサイドからも可能性を探索した。

その結果、以下のように「動的ミリ波無線メッシュ」で基地局間を結ぶ技術的可能性などが注目された。通信オペレータ側が、極めて多数に上る基地局をすべて光ファイバーで結線していくという、膨大な投資～労力を抑制できそうだからである。

動的ミリ波無線メッシュ

5Gミリ波NR基地局とカバーエリア
カバーエリアは不規則かつ扇形状の形状となるだろう

ミリ波無線による動的無線メッシュ

各5Gミリ波NR基地局のxHaul回線 (ミッドホール回線)をミリ波無線メッシュでリンク

マイクロ波のメッシュに比べて大容量
電波の直進性によりメッシュ網内電波干渉が抑制できる

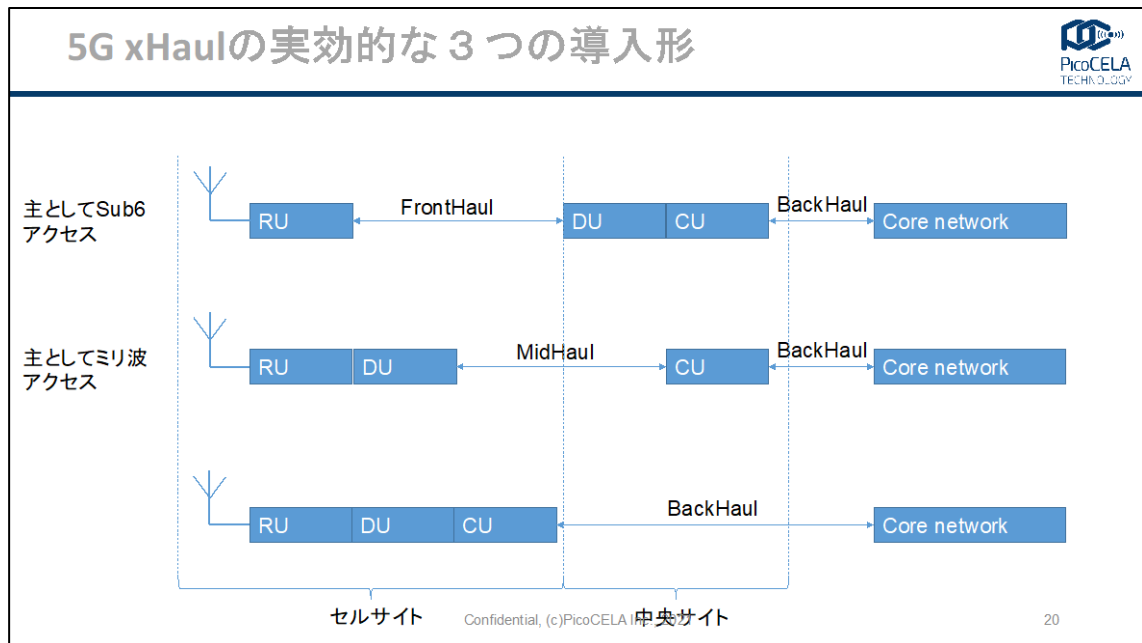
→障害物などの影響を受けやすいため、「動的」な適応性を持たせる必要がある

「動的ミリ波無線メッシュ」

(c)PicoCELA Inc., 2021
23

なお、5Gにおける通信「網」は、4Gまでとは、機能分割のあり方が変わると見込まれていて、基地局の名称・イメージにも注意を要するようになる。一般的には下図の「CU:Centralized Unit」が、基地局の中でも「親局」に該当し、ここからゲートウェイ等を介してコアネットワーク (CN) = インターネットにつながっていく。「DU: Distributed Unit」は、Baseband 処理と言われる、無線高周波扱いを除いた、各種“処理” (変復調、符号化、MAC 処理等) を担う機能部分であり、「RU: Radio Unit」は「子局」とも呼ばれるが、単に高周波無線を受発信する端末に近い。5G の、とくにミリ波帯では、中間の DU を、どこに、どう配置するかが、さまざまであり得る。最も一般的なタイプは、CU 側に DU も一体化設置するタイプと言われるが、これは主にサブ 6 GHz 帯の場合であって、ミリ波帯になるおり、必ずしもそれが普及するとは限らない (オペレータによる)。その構成のしかたによって、親局や子局に求められる性能等が変わってくる。それぞれを結ぶ通信路が、フロントホール、ミドルホール、バックホールなどのような、「××ホール」である。この、××ホールの結び方が問題となる。ミリ波では、末端子局の RU (無線取扱部) のほうへ、ベースバンド処理部 (DU) を近づけるのが一般的で、その子局を無数に置くことになるので、親局と子局をすべて光ファイバーで結ぶのは得策とは思われない。親局⇄子局間通信を、無線で

行う余地がある。それが「先」の絵であり、親局は光ファイバーでコアネットワークと結ばれる傾向にあるが、その他の結線が問題である。



光ファイバーで結ばない箇所を、たとえば下記のような、無線といっても、ミリ波帯の固定無線系（WiFi 将来世代版に近似）で結べば、軽便化が図れそうである。ミリ波と言っても、ここではミリ波 5G（つまり移動体通信）ではなく、WiFi 的な固定無線をミリ波帯で高速大容量で結ぶイメージである。

動的ミリ波無線メッシュモジュール

モジュールにIPを凝縮

- ミリ波ではアンテナと無線チップの一体設計が必須
- 汎用化することで、スケールメリットを最大化
- 他のデバイスと組み合わせやすい

方向制御

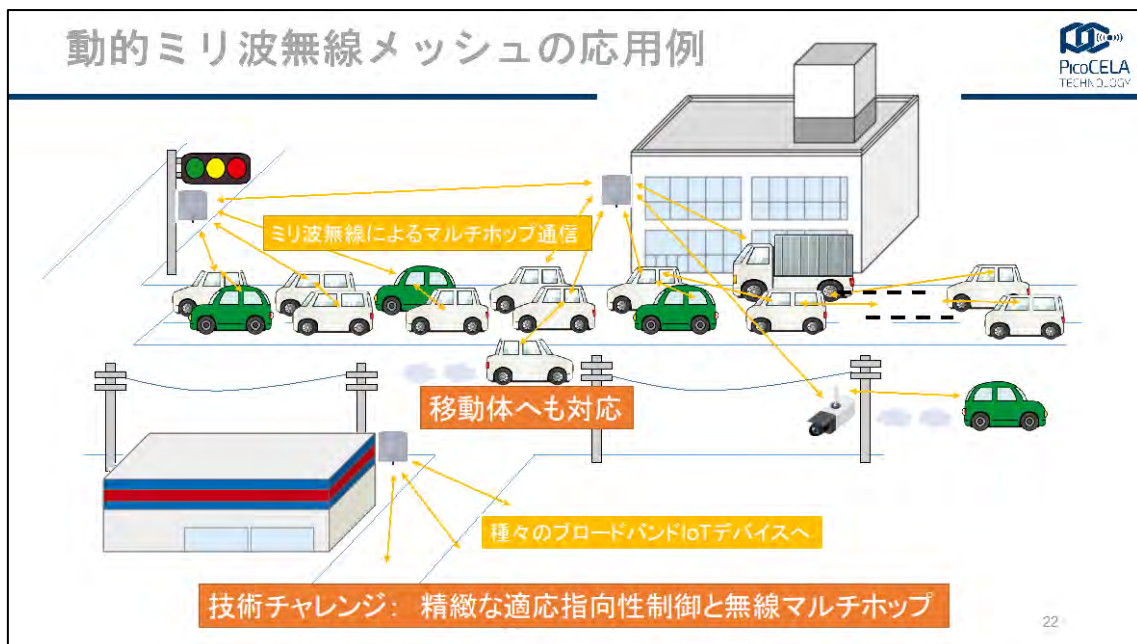
スペックの青写真

- 6セクタ
- 各セクタは1024アンテナアレイ、最大30dBのゲイン
- 適応ビームフォーミング
- 適応セクタ選択
- 数10Gbpsのペアラート

(c)PicoCELA Inc., 2021

ミリ波固定無線メッシュは、「子局」側にも付帯設置されねばならない。子局は、基地局と言っても、“端末装置”に近い軽量の基地局で、ミリ波 5G の特性からして、あちこちに無数に設置されねばならない。そこにやはり軽便な「MEC」=エッジ系サーバーが付帯設置されることになるのではなかろうか。

第1章では、エッジ系コンピューティング（MEC）を、基地局だと仮定したが、その基地局というのは、必ずしも親局ではなく、端末系の子局に付帯される可能性もあろう。



* * * * *

以上、第2章では、一転、ADAS等を支える通信環境側を吟味した。自動運転等がフルに開花するには、ミリ波5Gが広く普及していることが期待されるが、それは容易ではないことが見込まれる。ユースケースが増えて、各種機器の低コスト化も進み、子局など基地局も無数に設置されていかなねばならない。

投資回収に向けた課金のあり方などが問題だが、同時に、今まで以上に、エッジコンピューティング（MEC、データベースも含む）の側も、小型化、低消費電力化、メンテフリー化、そして低価格化・低コスト化にまい進しなければならない。

低価格化・低コスト化は、ソフトウェアにはさほど期待できない事項であって、主に半導体等の、ハードウェアへの期待（負荷）が高まろう。

第3章 ミリ波 5G (ポスト 5G) 時代のエッジコンピューティングと半導体 ——クルマの Connectivity, Autonomy 進展とも相携えて

1. 本章のテーマ

本章では「ポスト 5G」技術を実現するためのコンピューティングと半導体技術」と題して、5G 通信が描くところのユースケースとユースケースを支える為に必要なコンピューティング・インフラ及びコンピューティング・インフラの基盤としての半導体デバイスに対する技術課題を俯瞰することを目的にしている。そこで、本稿では半導体デバイスの個別技術課題を深掘りするのではなく、ポスト 5G における次世代コンピューティングというユースケースを支えるシステムやサービスを想定することで、そのシステムを構成する為に必要な半導体デバイスの方向性を探ることに重きをおいて議論をすすめていく。しかしながら、個別の議論には技術的な想定範囲や時間軸が必要であることと、ユースケースや想定システムが広がり過ぎないように、本題目にある「ポスト 5G」「次世代コンピューティング」「半導体の技術課題」に関して以下の簡単に定義した上で議論を始めることとする。

1-1. ポスト 5G とは？

2020 年から 5G サービスが始まるが、当面は LTE の周波数帯を使う、通称「なんちゃって 5G」のサービスの開始であり、本格的な 5G のサービスは 3.4 ~ 5 GHz 帯である Mid-Band が担うことになるだろう、その後、5G として本命のミリ波帯 28 GHz の High-Band のサービスに移行していくと想定される。このような漸進的な移行は 4G (LTE) でも技術的・商業的な事情により行われており、それによりエンドユーザー側での混乱が生じるわけではない。

以上のように、5G と一言でくられる次世代通信であるが、中身は「なんちゃって 5G」から「本格 5G」そして「ミリ波 5G」とキャリア周波数の異なる仕様を含むことを理解する必要がある。一般に 5G の特徴と言われる「高速・大容量 (20Gbps)」「多数端末との接続 (1M 台)」「無線区間の低レイテンシー (1ms)」は、「ミリ波 5G」になって本格的に実現可能な特徴である。

日本のキャリア三社が 4G サービスを開始したのが 2012 年、ドコモの PREMIUM 4G と呼ばれる本格 4G サービスの投入が 2015 年であったことを参考にすれば、今年から開始される「なんちゃって 5G」のサービスから「本格 5G」世代を経て「ミリ波 5G」の本格サービスが開始されるのは、2025 年以降になると想定される。また「ミリ波 5G」は、28 GHz のミリ波帯を使うこともあり、サービスの開始までには解決すべき技術的な課題も多岐にわたる。

本章では、スマートフォンサービス中心の「なんちゃって 5G」から進んだ次のステップを取り扱う。通信技術的には 5G のメリットが最大化される「ミリ波 5G」まで含め、更に IoT や自動運転、インターネットのエッジ領域での活用拡大などの社会的・複合的展開をより現実化する 5G 通信の深化とそれを求める社会システムの変革を「ポスト 5G」と定義することにする。

1-2. 次世代コンピューティングとは？

5G にかかり「次世代コンピューティング」や「エッジ・コンピューティング」等の「コンピューテーション」に改めて注目があたるのは、5G 通信を使うことで、既存の「クラウド・コンピューティング」という「コンピューティング・サービス」の事業体やサービス構造の変革をもたらすからであるが、現代社会が「コンピューティング・サービス」に深く依存しているが故に、そのような「コンピューティング・サービス」の変革が社会システム全体への大きな影響をもたらすからである。

光ケーブル通信で結ばれたインターネット網と 4G 通信サービスが、スマホとクラウドを繋いだことで生まれた「クラウド・コンピューティング」という仕組みは、多くの事務的なパソコン作業を、クラウド上に立ち上げた WEB ベースのアプリケーションへ移行させると共に、スマホを入出力端末化することを加速した。PC に変わってタブレットという商品が市場で地位を得たのも「クラウド・コンピューティング」と無縁ではない。

例えば、携帯電話を買い換えた時や PC を買い換えた時に必要だった、データやアプリケーションの引っ越し作業は「クラウド・コンピューティング」により消えた。ローカルなストレージの不足を意識することがなくなり、ユーザー端末を手軽に交換したり、更新したりできるようになったばかりか、携帯電話で撮った写真を、手元の PC で瞬時に加工することも可能である。ユーザー端末間でのデータの移動を、記憶媒体（古くはフロッピーディスクや USB メモリ）に頼らずに「クラウド・コンピューティング」と「4G 通信」によりやりとりすることが可能になった。

また、4G での象徴的なアプリは、Facebook や LINE に代表される SNS での情報発信と拡散であり、既存の TV 放送を使った一方方向の情報伝達の仕組みへのライバルを出現させた。同じく PayPay や SUICA に代表されるスマホ決済アプリは、既存の現金やクレジットカードでの決済のしくみへのライバルを出現させている。このように通信サービスは、社会システムにも大きな変革をもたらす力を持っている。

「クラウド・コンピューティング」と「4G 通信」が進化した最大のドライブ力が動画配信というアプリケーションであることは明らかである。日本中のどこでも数分間の動画を数十秒の遅延でダウンロードして視聴できることが、YouTube や TikTok というキラアプリを産み、TV 放送や TV コンテンツを陳腐化させると同時に「YouTuber」や「生中継アイドル」という職業さえも産んでいる。もはや 3G 時代に人類はもどれない。同じように 5G 通信に移行することで、新たなキラアプリが生まれ、既存ビジネスを陳腐化させると同時に、新たな産業や職業を産むことは明らかだろう。

ポスト 5G では、5G の謳い文句である端末と基地局との間で「高速・大容量（20Gbps）」「多数端末との接続（1M 台/km²）」「無線区間の低レイテンシー（1msec 以下）」が利用可能¹となる。しかしながら、基地局とクラウドの間を結ぶ通信技術に大きな変革がなければ、スマホを入出力端末としてクラウド上でアプリケーションを実行する 4G モデルからの大きな変革はない、つまり「コンピューテーション」

¹ https://www.soumu.go.jp/main_content/000549664.pdf

がクラウドにある限りは、5 G通信による社会システムの大きな変革は生まれないのである。

例えば、VR 端末を使ったゲームを例に考える。人間が感応できる反射スピードは 10msec 程度と言われているが、自分のアバターが手を差し出したことにより地面に生じる影（レイトレーシング計算される）は、割安な海外クラウドで計算するとデータの行き帰りだけでも 200msec 以上はかかってしまい不自然な時間差が生じてしまうことになる。基地局に設置される「エッジ・コンピューティング」で仮想世界を計算処理できないと、VR 空間に没入できず VR 酔を引き起こす。

5 Gにかかる「次世代コンピューティング」や「エッジ・コンピューティング」とは、クラウド・コンピューティングに対抗する、新たな「コンピューテーション階層」の提案であり、5 G通信のメリットを享受するために必要となる仕組みである。

本稿では、「次世代コンピューティング」をポスト 5 Gの通信に必要な「コンピューテーション階層」と定義する。

1 - 3. 半導体の技術課題とは？

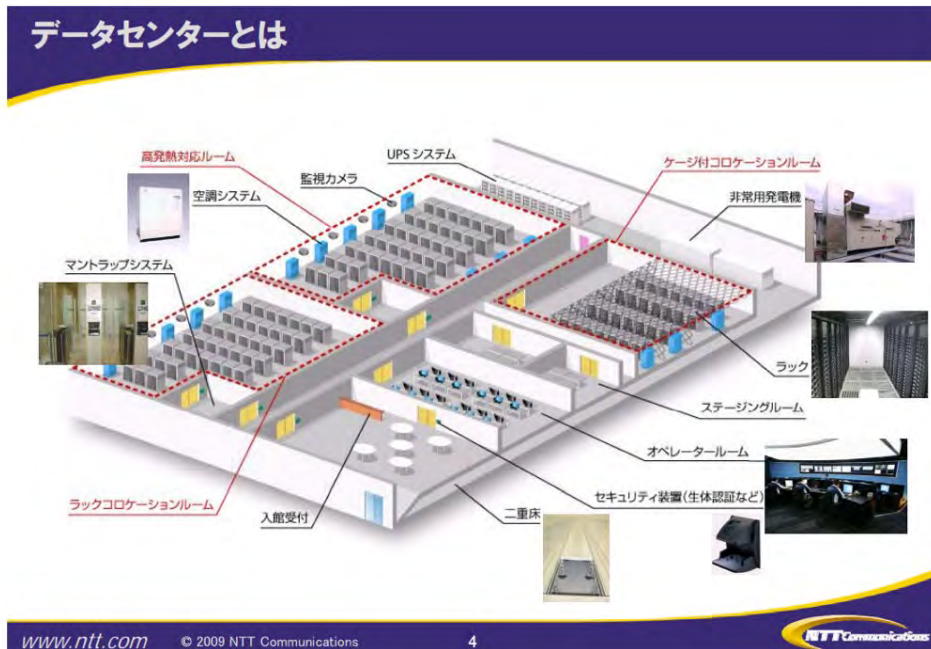
「ポスト 5 G」および「次世代コンピューティング」を支える根幹技術は半導体である。ポスト 5 Gの流れの中で半導体の市場がどのように拡大するか、あるいは発展の原動力が何であるかを半導体技術発展の質的転換である“ムーア則の限界”の観点から読み解く。一方、通信とコンピューテーションにとって半導体はその根幹を握っていることは議論の余地がなく、“ムーア則の限界”が生じてても今後も半導体技術への投資と市場は拡大しつづける。

現行のコンピューテーションにとって「スイッチ」である半導体素子（トランジスタ）の微細化は本質的で死活的な技術開発項目であるが、我が国が先端半導体開発競争から脱落した現状では、本稿が想定する 5 ～ 10 年のレンジで、最先端半導体技術や最先端半導体製造インフラを立ち上げることは、本稿の議論の対象とはしない。同様に、量子コンピューターや光コンピューターのような、既存の半導体技術を基盤としない、新たなコンピューテーションの提案も本稿では議論しない。

本章では「ポスト 5 G」という通信を活用することで新たに生まれるかもしれない「次世代コンピューティング」にかかり、先端半導体技術に頼らないが、ポスト 5 G世代の「コンピューテーション」に必要になりそうな半導体技術の可能性とその市場及び技術課題に関してまとめてみたい。

1-4. 冷蔵庫大の携帯電話？

「ポスト5 Gにおける次世代コンピューティングと半導体の技術課題」の各論に移る前に、本稿で想定する「コンピューテーション階層」のイメージを共有することが必要である。4 G世代における「コンピューテーション階層」が「クラウド・データセンター」であるとするとビジュアル的には以下のようなものであろう²。



それでは、ポスト5 G世代の「コンピューテーション階層」のイメージとはどのようなものであろうか？ハードウェアとして必要な機能は、

1. 5 Gの無線通信機能
2. リアルタイム処理が可能なコンピューテーション能力
3. 5 Gの基地局（もしくは近傍）に設置可能な体積
4. 無停電（UPS）装置

平たくいえば、ポスト5 G世代の「コンピューテーション階層」＝「小型データセンター」＋「5 G基地局」＝「冷蔵庫大の携帯電話」のイメージではないだろうか？大きさの妥当性は各論で議論するとしても、少なくとも基地局と同じように、ビルの屋上等に設置されることから、「冷蔵庫大」以上の大きさは論外であるし、5 Gのユースケースの一つである、交差点での衝突回避ナビゲーションの想定では、基地局と共に信号機用の鉄柱や電信柱に設置されなければならないことを考えると「冷蔵庫大」以下の大きさ（＝小型スーツケース程度）でなければ現実的ではないだろう。

本章では、「冷蔵庫大の携帯電話」をポスト5 G世代の「コンピューテーション階層」の初期イメージと仮定して、「冷蔵庫大の携帯電話」に必要とされる機能やユースケースを具体的に議論することで、「冷蔵

² 総務省： https://www.soumu.go.jp/main_content/000022428.pdf

「冷蔵庫大の携帯電話」を構成する為に必要な半導体デバイスの方向性を多面的に理解することと並行して、「冷蔵庫大」の体積を「小型スーツケース大」に圧縮する為に必要な半導体デバイスの課題を、以下のよう各論に分けて抽出していく。

「冷蔵庫大の携帯電話」に求められる機能

「冷蔵庫大の携帯電話」を特徴づける機能

ポスト 5 G 世代に挑戦すべきデバイス開発提案

2. 「冷蔵庫大の携帯電話」に求められる機能

ポスト 5 G 通信にかかる技術の関連資料には必ず、ポスト 5 G 通信とペアでポスト 5 G に必要な「コンピューテーション機能」= MEC (Mobile Edge Computing や Multi-access Edge Computing の略) が描かれる³。

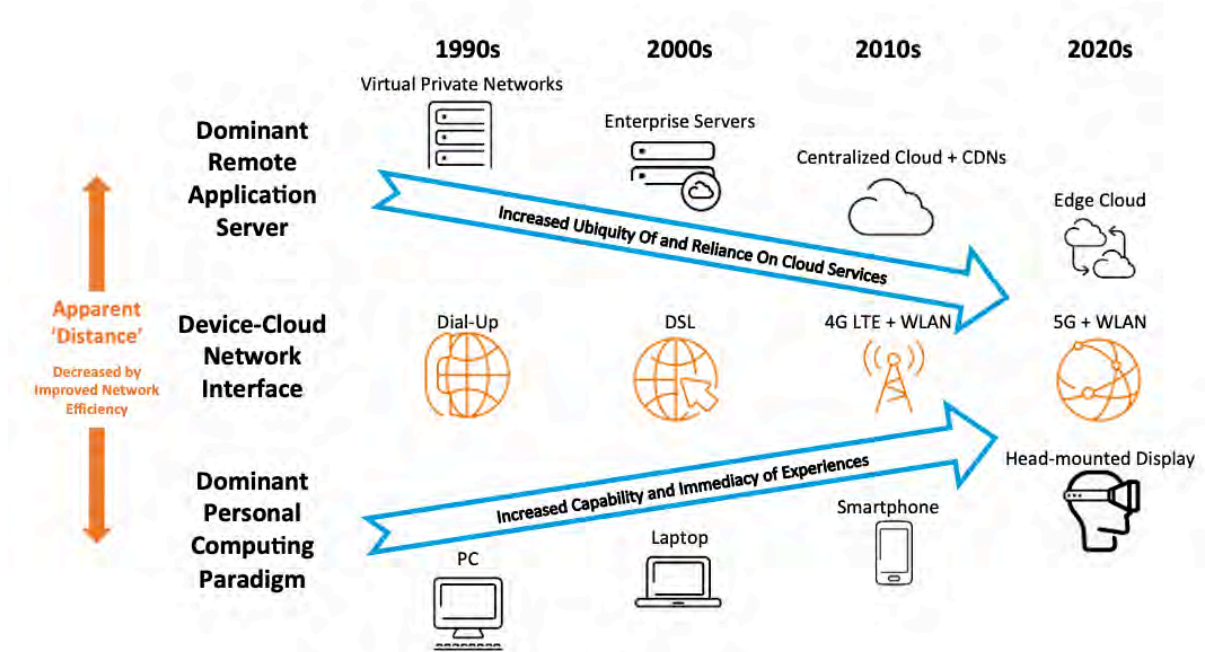


Figure 2: History and future projections of the IT-Networking convergence

本項では、ポスト 5 G 世代の「コンピューテーション階層」と定義した「冷蔵庫大の携帯電話」のイメージに求められる機能をユースケース毎にまとめることで、なぜ MEC が必要なのか？ 4 G 通信世代が築き上げた「クラウド・コンピューティング」が提供する「クライアント・サーバー」モデルでは対応できないのか？ なぜ MEC が新たなコンピューテーション階層階層になるのか？ を具体的なイメージとして理解していく。

なお、本項では、ポスト 5 G 世代のもう一つのキーワードである「リアルタイム処理」を「人間が反応できる

³ https://about.att.com/ecms/dam/innovationdocs/Edge_Compute_White_Paper%20FINAL2.pdf

時間よりも短い時間で処理が完了すること（つまり人間には処理が行われていることが感知できないコンピュータ処理）」であると定義することで、MECに必要な機能や課題を抽出していくことにする。

リアルタイム処理と無意識と VR 酔い

人間の神経刺激の伝達スピードは約 $50m/sec$ であるので、指先から脳までを約 $1m$ とすれば、指先から脳まで刺激が伝わるのに $20msec$ の時間がかかる、一方、指先で鼻先を触った時に、鼻先から脳までの距離は、指先より脳までの距離に比べて大幅に短いので、指先からの刺激と鼻先からの刺激には本来 $20msec$ 程度の時間差があるはずだが、人間は、それぞれの刺激に時間差があるとは感じず、同時に起こった刺激として感じている。つまり、人間には数十 $msec$ 以内の時間差を感知することができない。もしくは、刺激から脳が現実世界で起こっている事象を再構築する際に、刺激間の時間差を吸収するようなメカニズムが働いているとも解釈できる。

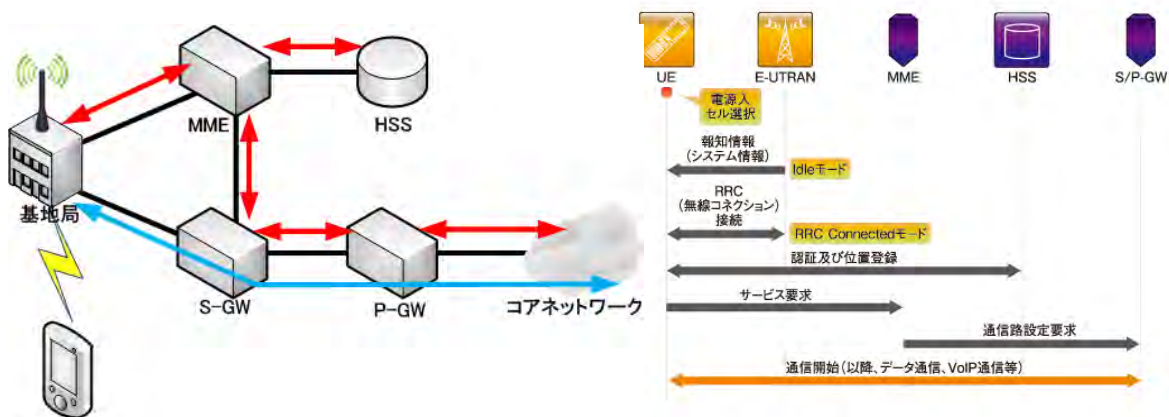
また「VR 酔い」は、脳と身体の同期ズレが原因で起こると考えられている。例えば VR ゲーム内で首を回して視点を移動した動作に対して、仮想空間にある動画の視点が移動するまでの遅延が、脳内で調整可能なズレ時間を超えると酔ってしまう。VR アプリで仮想世界をリアルに感じるには、画像の精細さに加えて、仮想からの刺激と身体の動きとの同期ズレを数十 $msec$ 以内に収めることが必要になる。

以下、リアルタイム処理が「4 G 通信 + クラウド・コンピューティング」モデルでは解決できないユースケースを具体的にまとめる。

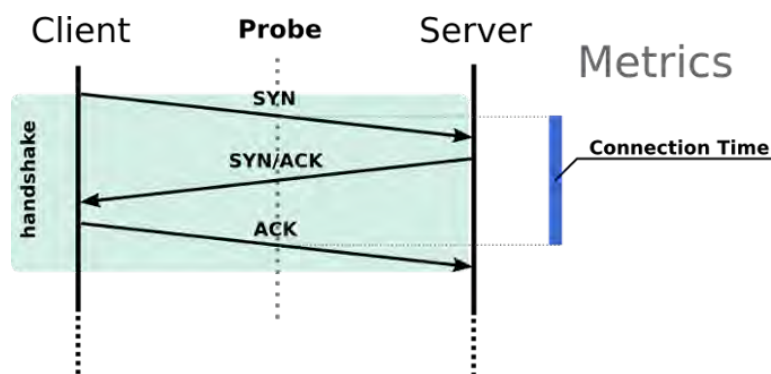
2-1. 低通信遅延

4 G の無線通信遅延は、基地局との無線伝送遅延が $10msec$ 。基地局からクラウドサーバーまでは光ケーブルで接続するが、光ファイバーを通ると光の速さが真空中の約 30 万キロメートル/秒から約 20 万キロメートル/秒まで落ちる。東京—大阪間は直線距離で $500km$ だが現実のケーブル敷設長は約 2 倍の $1,000km$ だとすれば $5msec$ 程度の有線伝送遅延が必要になる。

実際には、LET が基地局とのコネクションを確立するには、複数回のハンドシェイク通信を、基地局を介して、管理ノード (MME) やデータベース (HSS) さらに中継 GW (S/P-GW) との間でやりとりする。つまり、端末がクラウドサーバーとの通信を始める前に、基地局とのコネクションを確立するだけで $100msec$ 程度の時間を必要としている。ポスト 5 G では、基地局内に端末の認証等に必要 MME/HSS/SP-GW 等のインフラを集約して、端末と基地局とのコネクション時間を短縮することが必須である。



また、基地局とのコネクションに加えて、TCP/IPを使ったクラウドサーバーとのコネクションに三回のハンドシェイクが必要になるので、通信開始までに基地局とクラウドサーバー間の片道の通信遅延の三倍の時間のオーバーヘッドが必要である。



当然、海外のデータセンターへ繋いだ場合の通信遅延は 100msec 以上かかってしまうので、4 G 通信 + クラウドコンピューティングでは、リアルタイム（人間の感応時間以下の数十 msec 以内のスピード）にコンピューテーション処理を完了することができない。

また、4 G 通信 + クラウドコンピューティングでは「クラウドサーバーにコンピューテーション処理を命令して、クラウドでの処理結果を待つ」というユースケースであり、人間とコンピューターの間には、「命令」と「結果」という「明示的なプロトコル」が常に存在する。ポスト 5 G + MEC が目指すリアルタイムなユースケースでは、コンピューテーション処理が人間の感応時間以下のスピードで行われることが特徴であるが故に、アプリケーションのユースケースの特性として、人間とコンピューターの間でのやりとりは「無意識なプロトコル」になると考えられる。

「無意識なプロトコル」とは、VR アプリ内で、首を回して視点を移動した動作に対して、仮想空間にある動画の視点が移動することである。VR アプリのユーザーが、コンピューターに対して、動画の視点を移動する命令を明示的に依頼をしていない。VR 装置がユーザーの視点が移動したことを感知して、命令をうけずに、ユーザーには無意識

に視点が移動した動画を計算して表示する。結果として、人間はコンピューターの存在、もしくは介在を感じる事がなくなる。英語では「Context Aware Services」と言う。

ポスト5Gの応用例と言われる没入型VRやARでは、リアルな世界と仮想空間の違いを意識できないことが理想であるが、このようなリアルタイム処理を実現する為には、端末と基地局間の通信遅延をポスト5Gにするだけでなく、基地局にリアルタイム処理を担当するMECを配置して、基地局を「冷蔵庫大の携帯電話」にしなければ、現実と仮想空間の同期ズレを解決できない

2-2. 高い帯域幅

ポスト5Gの応用例として、よく交差点での障害物検知と走っている車への前方注意情報通知システムのような想定があるが、このユースケースをもう少し具体化して検証してみる。

交差点に設置したカメラからの4K画像は非圧縮だと6.4Gbpsの帯域⁴が必要になるが、東京都の信号機の本数が約15,000機⁵として、信号機毎に4Kカメラが設置されると仮定すると、光ファイバーでクラウドサーバーに4K画像を送信する為に必要な帯域幅は、6.4Gbps×15,000機 = 96,000Gbps、一方で2020年の日本全体の固定系ブロードバンドの総トラフィック量が約19,000Gbps⁶なので、4G通信+クラウドコンピューティングによる「クライアント・サーバー」モデルでは、対自動車へのリアルタイムな運転サポート向けコンピューテーション・サービスは到底実現することは出来ない。交差点カメラからの4K画像をカメラ側に画像圧縮エンジンを内蔵して圧縮伝送したとしても、今度は圧縮・伸長⁷で約100msec遅延が発生し、クラウドサーバーへの往復伝送で更に200msec遅延するのに加えて、4G通信で車に緊急ブレーキ信号を送信して、コネクションが確立するまでに100msec、車内のコンピューターの割り込み処理からブレーキアクチュエーターが応答する遅延が更に100msecかかるとして、合計500msecと仮定すると、その間に時速50kmで交差点に近づいてくる車は、およそ7m移動する。時速50kmでの車のブレーキの制動距離が約13m程度⁸なので、制動距離の半分程度の空走距離が生まれてしまう。これでは、人間が判断してブレーキを踏むのと比べて大幅な改善とは言えず、人との安全確保に大きな改善を目指すべき、リアルタイムな運転サポート向けコンピューテーション・サービスは到底実現することは出来ない。

⁴ $4096 \times 2160 \times \text{RGB} \times 8\text{bit} \times 30\text{frame}/\text{sec} \approx 6.37\text{Gbps}$

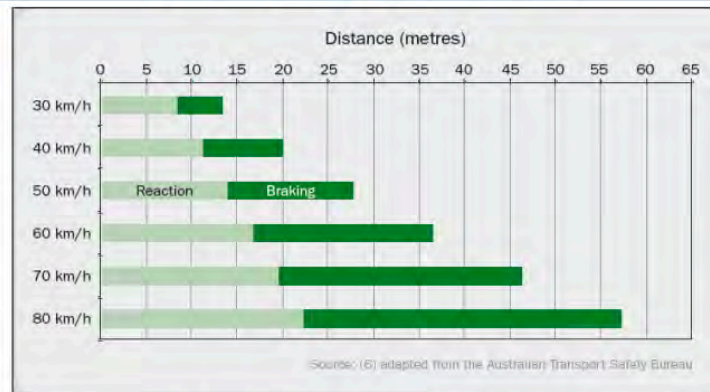
⁵ <https://www.npa.go.jp/bureau/traffic/seibi2/annzen-shisetu/hyoushiki-shingouki/pdf/H30kazu.pdf>

⁶ https://www.soumu.go.jp/main_content/000699741.pdf

⁷ <https://www.socionext.com/jp/products/assp/h264h265/X500E/>

⁸ http://www.npa.go.jp/koutsuu/kikaku/regulation_wg/teigen/siryou2.pdf

速度による停止距離



※ Speed management - A road safety manual for decision-makers and practitioners - より

停止距離 = 空走距離 + 制動距離

速度の2乗に
比例して大きく



衝突回避の
可能性は小さく

車の停止距離は、空走距離と制動距離の足し算である。空走距離は人間が目で危険を感知してから、ブレーキを踏むまでにかかる時間（目から脳までの神経刺激の伝達時間 + 脳の画像認識時間 + 脳から足先までにかかる神経刺激の伝達時間）である。リアルタイムな運転サポート向けコンピューテーション・サービスによる交通事故を減らす為には、人間による処理にかかっている時間 = 空走時間（0.9～1秒）よりも、ポスト5G + MECによる、リアルタイム処理のスピードが十分に早くなければならない。

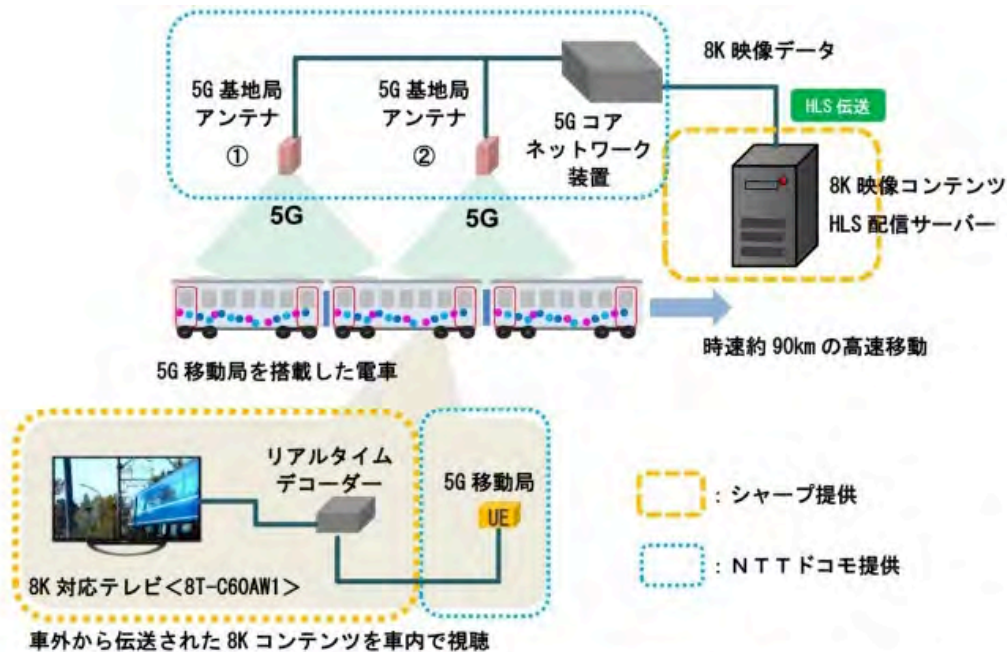
信号機に配置された4Kカメラからの画像から障害物を認識して、その結果を交差点に近づいてくる車にポスト5G通信でリアルタイムに処理結果を通知するようなユースケースに必要な膨大な量の画像データのコンピューテーション処理を数十 msec の遅延で実現する為には、各交差点の鉄柱に基地局とMECを配置して、交差点の基地局を「冷蔵庫大の携帯電話」にして、必要な画像解析処理を基地局内で計算しなければ解決できない。

2-3. 高速移動体への対応

ポスト5Gの別の応用例として、新幹線等の（高速移動体）への4K画像のバースト転送が想定されている。このユースケースをもう少し具体化してみる。

地上波4K程度に圧縮（H.264）した4K画像伝送に必要な伝送速度は39Mbpsなので4Gでも線路沿いに隙間なく4G基地局を配置すれば数字的には可能だが、画像伝送以外の4G通信が使えなくなるので現実的ではない。他方、ポスト5G通信をつかい、8Gbpsで転送出来たとすれば120分の4K映画の情報量（6GB）を6秒で転送できる。見通し100mの基地局エリアを時速300kmの移動体が通過する時間は約1秒なので、線路沿いに600mほどのポスト5G基地局区間を設ければ4K映画のバースト転送が可能になる。

他方、基地局へ 6GB の 4K 映画を光ファイバーで転送するには、1Gbps の光回線を使ったとして 48 秒もかかってしまい基地局から高速移動体への 6 秒のバースト転送に対応できない。つまり新幹線がポスト 5 G の基地局エリアを通過する前に、基地局側のストレージ装置に 4K 映画を一時保存しておく必要がある⁹。



このような、ポスト 5 G 通信を使って高速移動体へ大規模データのバースト転送をするようなユースケースを実現する為には、ポスト 5 G 基地局区間に配置された基地局内に転送する大規模データを一時保存（キャッシング）する大容量 MEC ストレージを配置して区間基地局を「冷蔵庫大の携帯電話」にしなければ解決できない。

2-4. 多数同時接続の可能性

ポスト 5 G の別の応用例として提案されるユースケースとして、IoT デバイスとの多数同時接続が可能になると謳われている。このユースケースに関しても、もう少し具体化してみる。

例えば、105×68m の野外競技場で行われるサッカーの試合でのユースケースを想定してみる。国際 A マッチではベンチ 23 人が認められているので敵味方で 46 名。選手一人一人に 4K カメラを装着してもらい、選手視線からの動画放送を可能にする為には、地上波 4K 程度に圧縮（H.264）した 4K 画像伝送に必要な伝送速度が 39Mbps、フィールド上の選手が 22 名とすれば、39Mbps×22 名 = 858Mbps の伝送帯域が必要になるので 4 G 基地局では対応できない。さらに、選手からのカメラ動画をリアルタイムに競技場の観客にストリーミング配信する AR サービスでは、リアルな動作に対して、配信される画像情報との遅延を極力抑えないと AR 酔いになる。

このような、見通し 105×68m の野外競技場であれば、ポスト 5 G の基地局が一台あれば賄えるが、IoT + AR サービスのようなユースケースを実現する為には、ポスト 5 G の基地局近くに大容量データの

⁹ <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000290.000012900.html>

一時保存と加工やストリーミング配信をおこなう MEC を配置して、野外競技場の基地局を「冷蔵庫大の携帯電話」にしなければ解決できない。

IoT デバイスとの「多数同時接続」のユースケースだが、IoT デバイスからのデータ量は基本的に少ないはずであり、また更新頻度も少ないことが想定されることから、上記のようなサッカー選手の視線から動画伝送というユースケースを取り上げた。ポスト 5 G が見通し 100 平方メートル程度の伝送エリアしかないので、エリア内に配置する IoT デバイスの総数が増える + データ更新頻度高くデータ量が大きい分かり易いユースケース（例えば、1 平方メートル毎に IoT デバイスを配置するようなユースケースを想定して、養豚場の豚に IoT デバイスをつけてバイタルモニターするユースケースも考えられるが、体温や心拍数データを体調管理に利用するにしても、費用対効果を念頭にするとポスト 5 G が必須なのか？正直納得感がない。）が思いつかなかった

2 - 5. ミリ派通信と MEC はペア

本項で検証してきたように、ポスト 5 G に採用されるミリ波通信で可能になると謳われている、低通信遅延、大帯域幅、移動体対応、多数同時接続、いずれのユースケースにおいても、端末と基地局間の通信仕様をミリ波に変更しただけでは実現は不可能であり、基地局もしくは基地局近傍には必ずペアで MEC が必須であり、基地局は「冷蔵庫大の携帯電話」にならざるを得ないことを説明した。つまりポスト 5 G 世代では必然的に、通信としてのミリ波利用とコンピューション・インフラとしての MEC をペアで考えなければ、想定しているアプリケーションでのミリ波通信のメリットを最大化することができない。

本項では、以上のような具体的なユースケースから、ミリ派通信と MEC がペアであることを検証したので、次項からは、「冷蔵庫大の携帯電話」になる基地局のイメージを具体化していくことで、「冷蔵庫大の携帯電話」に必要な機能の理解を深めていく。

2-6. MEC 基地局数

ポスト5Gでは、見通し100m毎に基地局が必要だとされている¹⁰。

(参考) CH幅とセルサイズとの関係について

- 5G候補帯域では、最大で400MHz幅という大きなCH幅が規定されており、既存バンドと同様のセルサイズを確保しようとすると、送信装置サイズが非常に大きくなってしまいう課題がある。
- 現時点での見込みでは、従来と同様の装置サイズを前提とすると、最大でも半径100m程度のセルサイズが限界と想定される。**

従来と同等の装置サイズを前提にした場合のCH幅とセルサイズの関係

	既存バンド	5G候補バンド (Sub6GHz帯、28GHz帯)
CH幅	20MHz	~400MHz
セル半径	2~3km	~約100m
(参考)基地局数 (既存バンドの基地局数で正規化)	1	~×100

© 2018 NTT DOCOMO, INC. All Rights Reserved.

7

現行電信柱の間隔が約30メートル、日本の電信柱の数が約3,500万本だとする。電信柱が二次元的に配置されていると仮定すれば、ポスト5Gの基地局はその1/9の約400万局になる。別の視点で、日本の国土面積が約37万8000平方kmで可住地はその30%なので約12万平方km、可住地域を半径100mのセルで分割すると約380万局になる。現在4Gの基地局がDocomoだけでも20万局¹¹、5Gではその100倍と言われていることから決して大袈裟な数字ではない。

2-7. MECの計算能力

仮に、MECにはデータセンターにある1ラックのコンピューテーション能力が必要だと仮定してみよう。必要な基地局数を400万局だとすれば、合計で400万ラックのコンピューテーション能力が生まれることになる。リファレンスとして、2019年の国内データセンターのラック数が約4万ラック¹²、今後1万ラック/年で増加すると想定されている¹³ので、ポスト5G世代(=2025年)でもデータセンターの総ラック数は漸く10万ラックに届く程度なのに対して、基地局毎に1ラックの想定で生まれるMECのコンピューテーション能

¹⁰ https://www.soumu.go.jp/main_content/000549664.pdf

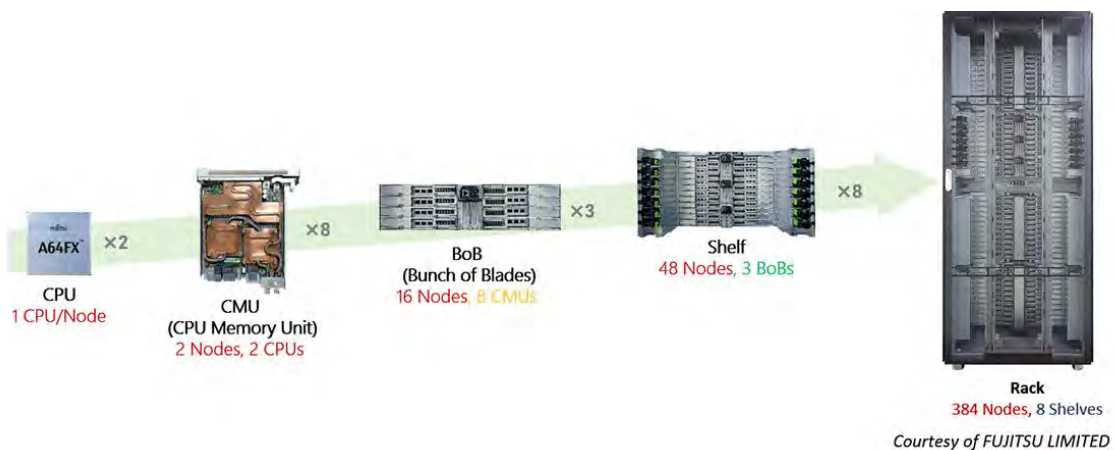
¹¹ https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/csr/about/pdf/csr2019w_007.pdf

¹² <https://www.ntt-f.co.jp/column/0137.html>

¹³ https://www.fuji-keizai.co.jp/press/detail.html?cid=19036&view_type=1

力はその40倍にも達する。仮に、MECのコンピューテーション能力を1/4に削減したとしても100万ラックになるので、データセンターから提供されるコンピューテーション能力の10倍のコンピューテーション能力が生まれるのである。ポスト5G+MECが、いかに既存のコンピューテーション能力やコンピューテーション階層に大きなインパクトをもたらす変革であることがわかる。

富岳の構成で考えてみよう、A64FXは13コア×4の52コア構成で1CPU（1ノード）、2CPUが載ったCMUを8枚重ねて1BoB、BoBが三つで1Shelf、1Shelfを8つで1ラック（384ノード）である¹⁴。



富岳の構成は158,976ノード=414ラック相当であるが、富岳のCPUノードをポスト5GのMECに割り振ったとすると、MECあたり1/4ラックとしても、基地局+MECが400万局とすれば100万ラック相当なので、国内に約2,500台分の富岳のコンピューテーション能力がポスト5G+MECで生まれることになる。

2-8. MECに必要な電力

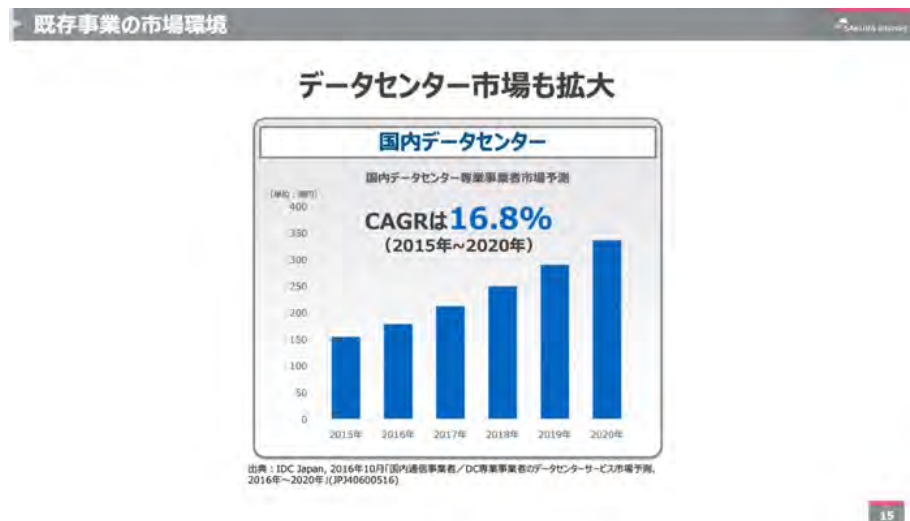
データセンターの1ラック想定電源供給能力は平均6KWであるので、MECに必要な想定電源供給能力も6KW。ポスト5Gの想定基地局数を掛け算すれば400万局×6KW=24百万KWになる。現在の日本の電力量使用量が100~200百万kWになるので、ポスト5G+MECのために新たに12~24%ほど電力使用量が増える。

これも、富岳の構成で考えてみよう、ピーク性能537PFLOPS、消費電力30~40MWだから、富岳が600台あると24,000MW=24百万KWになる。データセンターの1ラック想定電源供給能力の平均6KWで稼働可能な富岳相当のCPUをポスト5Gの基地局に配備したとしても、国内に約600台分の富岳のコンピ

¹⁴ <https://www.fujitsu.com/jp/about/businesspolicy/tech/fugaku/index.html>

ユーション能力がポスト 5 G + MEC で生まれることになる。全国の市の数が 792¹⁵だから、日本国中の市役所に富岳を配備するようなもの。

さらに、5 Gの基地局に必要とされる電力は4 G基地局（約 1KW）の3～4倍¹⁶とされているので、基地局全体では 10KW ほどを消費することになる。想定基地局を掛け算すると 400 万局×10KW=40 百万 KW になり、現在の日本の電力量使用量の 20～40%を新たに消費する。日本での現行クラウドの消費電力量でも 1%（米国で 5%）を占め¹⁷ていることを元に、データセンター市場の CAGR である 16.7%¹⁸と同じ割合で消費電力が増加したとしても、5 年後の 2025 年でも二倍強、つまり電力消費量が 2%程度まで伸長する予測に比較して、ポスト 5 Gと MEC 基地局による電力消費の増大のインパクトが、いかに大きいかかわかる。ポスト 5 Gにかかり、基地局の MEC の低消費電力化は必須の条件である。



2-9. MEC コンピューティングの汎用性

一般に現行クラウドに展開されている画像配信等を MEC に一部分担させるユースケースにおいては、現行クラウドに展開されている、既存 CPU アーキテクチャと既存 OS の採用は自然な流れになるだろう、クラウドでのコンピューション処理の一部が MEC に一部移動したことで、利用者側に何か新たな負担を強いることになるような提案は一般的には受け入れられないと考える¹⁹。

¹⁵<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%97%A5%E6%9C%AC%E3%81%AE%E5%9C%B0%E6%96%B9%E5%85%AC%E5%85%B1%E5%9B%A3%E4%BD%93%E4%B8%80%E8%A6%A7>

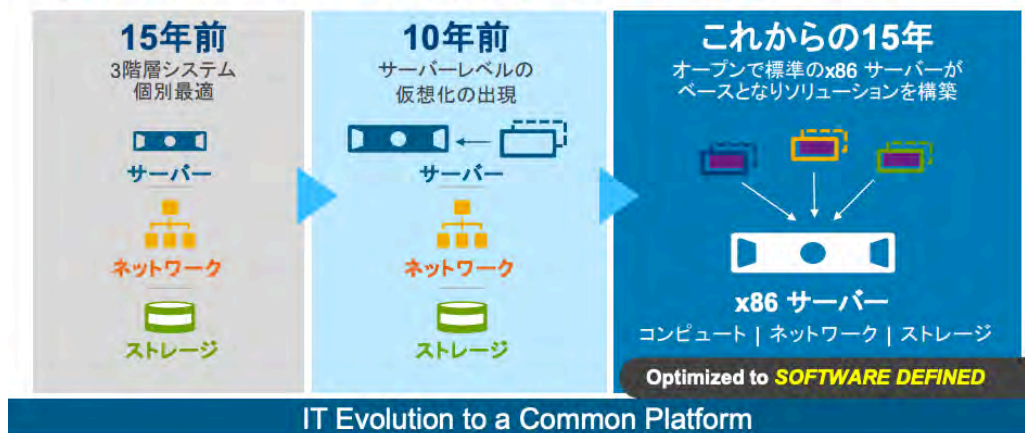
¹⁶ <https://5g.sfc.keio.ac.jp/?p=670>

¹⁷ <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2018-pp-15.pdf>

¹⁸ http://opencomputejapan.org/wp-content/uploads/2017/10/8_SAKURA-internet-20171012_Cloud-Computing-Day-Tokyo.pdf

¹⁹ <https://www.dropbox.com/s/7mnm4d4q3m9iz69/Screen%20Shot%202020-10-12%20at%2012.49.12.png?dl=0>

時代はサーバーセントリックなSDDCに進む



2

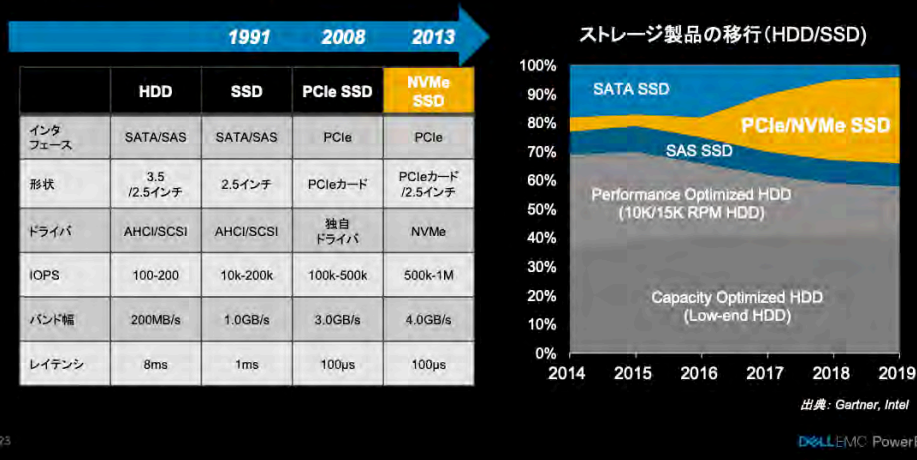
DELL EMC PowerEdge

DELLのサーバー営業資料から抜粋。OSレベルでの仮想化技術の進化により、サーバーのハードウェアはオープン化が進んでいる。この流れはMECにも同様に受け継がれることから、MECサーバーでもオープン化されると考えるのが自然。また、富岳がARMとRedhat LINUXを採用したこともオープン化の象徴的な事象だと考える。

また、車への運転サポート情報サービスや、野外競技場でのIoT+ARサービスのよう、特定のユーザー向けのクローズドなコンピューテーションサービスを提供するユースケースでも、汎用MECのインフラを使わずに、独自にMECインフラを構築するコスト増を考えると、その方向性を論じることは現実的とは思えない。クローズドなコンピューテーションサービスにも展開可能な、汎用性のあるMECのコンピューテーションを構築することを第一に考えるべきである。

また、インターネットを介したサイバー攻撃に対処するためには、OSやファームウェア等の脆弱性のあるソフトウェアは、常に最新のバージョンへ更新する必要があることや、DoS攻撃等でMECがダウンした際の他のMECインフラへの移動や代替等、MECには本質的に汎用性と冗長性が必要であることから、非汎用型でユーザー限定的なMECインフラは、それ自体がサイバー攻撃に対して脆弱になる可能性が高く、非汎用的なMECインフラを整える利点はセキュリティ面からも無いと考える。

NVMeはメインストリームへ



DELLのサーバー営業資料から抜粋。ストレージとの間のI/F遅延を解消するためにSSDとのI/FがSATAからPCIeへ変わっていることを示している。

25Gbでのサーバー接続

なぜいま 25GbE なのか？

- スイッチ間のインターコネクトが100GbEへの移行を加速している
- 25GbEはGbあたりのコストがもっとも低い
 - 2.5倍の速度向上に対しプレミアムは30%
- **25GbEは10GbE SFP+に対する下位互換性を有する**
- データセンターのデータ急増に対し、より太いパイプが求められている
- 10GbE x 2ポートではSDSIにおいて不十分
 - デュアルポートの25GbEは4ポートの10GbEよりも低コスト

最新のネットワーク構成

100Gb } スイッチ間は100Gbが主流に

25Gb } 100Gbを4分割して取り出せる25Gbがサーバー接続の主流に

- 25GbEではSFP28トランシーバが利用される
 - SFP28は10GE SFP+と下位互換性あり(物理サイズは同じ)
 - ただし25GbEから10GbEへの接続は速度固定が必要
 - ※ 注意: 10GE SFP+はオートネゴシエーションをサポートしていない

DELL EMC PowerEdge

DELLのサーバー営業資料から抜粋。サーバーとネットワークスイッチの遅延の高速化のために10GbEから25GbEへ移行していることを示している。

クラウドサーバー内の装置（CPU/ネットワークスイッチ/SSD）間遅延がクラウドサーバーでの課題であることがDELLの資料から覗き見える。

以上、「冷蔵庫大の携帯電話」のイメージとして、基地局数から消費電力やコンピューション能力へ社会的なインパクトがあること、クラウドとのコンピューション処理の分担要請から汎用性や冗長性等が必要になることが抽出された。

3. 「冷蔵庫大の携帯電話」を特徴づける機能

前項では、ポスト 5 G 世代には、基地局が「冷蔵庫大の携帯電話」になること、また「冷蔵庫大の携帯電話」に求められる機能を、ユースケースを想定しながら抽出し、「冷蔵庫大の携帯電話」のイメージを具体化してきた。

ここからは、いままで検証してきた「冷蔵庫大の携帯電話」に要請される機能や特徴を元に、「冷蔵庫大の携帯電話」を特徴づける機能に注目して議論を進める。クラウドコンピューターでも無い、携帯電話でも無い、新たなコンピューテーション階層としての「冷蔵庫大の携帯電話」を特徴づける機能を仮説・検証していくことで、ポスト 5 G 世代に新たに立ち上がるはずの、次世代コンピューティングに必須になるデバイス特徴や特性を明らかにすることを目標とする。

もちろん、「冷蔵庫大の携帯電話」を「小型スイツケース」に小型化する為に必要な技術やデバイス、「冷蔵庫大の携帯電話」の低消費電力化に必要な技術やデバイスにも議論を広げていく。小型化と低消費電力化は、半導体デバイスの微細化による集積化と切り離せないが、はじめに述べたように、コンピューテーションの本幹である半導体デバイスの微細化と集積化が今後も進むことに関しては議論の余地がなく、改めて最先端半導体技術の将来動向や最先端半導体製造装置の動向等は、ここでの議論の対象とはしない。

3-1. アプリケーションから見た必須要求

ポスト 5 G 世代の基地局が「冷蔵庫大の携帯電話」のイメージになることを仮説・検証してきた。また「冷蔵庫大の携帯電話」が提供するサービスは「リアルタイム処理」であり、ポスト 5 G 通信を使ったアプリケーションは、ユーザーにとって「無意識なプロトコル」で処理が行われるという特徴をもつことも仮説・検証してきた。それでは「冷蔵庫大の携帯電話」でサービスされるアプリケーションに本質的に必要になる必須要求とはなんだろうか？

ESTI から 2019 年にリリースされた White Paper (Developing Software for Multi-Access Edge Computing)²⁰ では代表的なアプリケーションとして以下を挙げている。

1. Video content delivery optimization
2. Video stream analytics and video surveillance
3. Augmented Reality and Virtual Reality (AR/VR)
4. Enterprise applications enablement and local breakout
5. Applications with critical communication needs such as traffic safety and control, autonomous cars, Industrial IoT and Healthcare
6. Connected Cars
7. IoT applications and Gateway
8. Location and Context aware Services

²⁰https://www.etsi.org/images/files/ETSIWhitePapers/etsi_wp20ed2_MEC_SoftwareDevelopment.pdf

9. Smart City applications

それっぽい言葉が並ぶ中には具体的なイメージがわからないモノも多いが、ここでは（２）Video stream analysis、（５）Traffic safety and control、（８）Location and Context aware、に注目したい。

（２）Video stream analysis は文字通りカメラ監視と画像認識のアプリケーションと解釈した。ユースケースとしては、コンビニエンス店に入店する際の顧客の個人同定（＝自動決済とのリンク）、店内で顧客が手に取った商品の同定（ショッピングカートの決済）、購買済商品の補充や在庫管理等が考えられる。これらの実現する為には、常時カメラ監視して、画像認識の処理をし続けなければならないという特徴があるだろう。一方で、本来は顧客がコンビニエンス店に近づかない、もしくは入店しない限りは動作する必要がないオンデマンド型の処理である。

購入した商品のバーコードやRFタグからスキャンして決済や棚卸しをすることは、将来なくなるだろう。画像認識とデータベースが連動すれば、わざわざスキャンする必要はなく、認識した商品の支払いを顧客に確認できれば決済が完了し、在庫管理や発注管理に人が介在することは無くなるだろう。

（５）Traffic safety and control もカメラ監視と画像認識のアプリケーションの範疇に入るだろう。ユースケースとしては、交差点での危険検知と交差点に近づいてくる車への情報送信になる。このユースケースの実現でも、交差点近傍を常時カメラ監視して、画像認識の処理をし続けなければならないという特徴がある一方で、本来は車が交差点に近づかない、交差点周囲に人や障害物がいない限りは動作する必要がないオンデマンド型の処理である。

交差点から車両用の信号機は将来無くなるだろう。信号機とは特定のルールと時間パラメーターで決められた道路の安全情報だと定義できる。またガードレールも物理的な構造物で決められた道路の安全情報だと定義可能だ。これらの道路の安全情報は、ポスト5G通信により代替されると考える。自動車はポスト5G通信を介して周囲の状況に応じたスピードしか出せなくなり、ブレーキもアクセルもハンドルもポスト5G通信からの安全情報を遵守して自動運転される。人間もポスト5Gからの安全情報を受け取ってARで表示された仮想横断歩道を渡るようになるだろう。

（８）Location and Context aware は、周囲状況に応じて無意識にサービス処理を最適化するアプリケーションになる、分かり易い例としては、携帯電話を縦から横にした時に、自然に表示が横広がりに変化するアプリであり、周囲の明るさにしたがって画面表示の明るさを調整するスマートウォッチの画面表示アプリである。ポスト5G世代のユースケースとしては、ショッピングモール内のサインエージに近づいてくる顧客の興味に応じた商品情報の掲示とか、年齢、性別、服装等の顧客の外見情報だけを頼りに商品情報を提供するサービスなどが想定される。

顧客 ID を介してデータベースに保存された個人情報にアクセスする為には、顧客 ID が必要になる。ポスト 5 G が目指す世界では、顧客が明示的に自らの ID を入力するユースケースは、限りなく少なくなるだろう。顧客には意識させずに、顧客の外見や素振りから必要なサービスをリアルタイムに提供することがアプリケーションの目標になるだろう。高級レストランのウェ이터が、1 年に一度しか食事をしないゲストの顔やワインの好みを瞬時に思い出せるような、顧客が特別だと感じるサービスが差別化技術になり利益を生み出すことになるだろう。

ESTI がまとめたユースケースやアプリケーションからみた、ポスト 5 G 通信を使ったアプリケーションの必須要求とはなんだろう？「オンデマンドなサービスなのに、ユーザーが意識してサービスを起動するのではない」ことが特徴ではないだろうか？つまり、ユーザーにとって「無意識なプロトコル」で処理が起動するコンピューション。本稿では、それを「自立したコンピューション」と定義したい。

つまり、自立したコンピューションは、ユーザーからの「命令」を要求せずに、自立的にアプリケーションが立ち上がり、コンピューションの「結果」であるサービスだけをユーザーに提供することが今までのコンピューションには無い特徴だと考える。

自立したコンピューションでは、アプリケーションを起動する主体がユーザーから「冷蔵庫大の携帯電話」側に移動する。一方で結果を受け取るのはユーザーであるので、結果がユーザーにとって好ましいものでない場合は、アプリケーションを起動したコストをユーザーは払いたくない（決済に同意しない）。ユーザーに好まれる結果を生まない（もしくは感じにくい）ユースモデルでは、税金のようにユーザーに一律に支払ってもらう必要があることも発生するはず。

例えば、車や交通安全に関わるものであれば、税金のようにユーザーに一律に支払ってもらうことも可能であろう、もちろん既存の道路の安全情報システムである信号機やガードレールよりもコストは安くあるべきではあるが。

ショッピングモールのユースケースでは、税金や入園料のように回収する訳にはいかないだろうから、ユーザーとサービス側間の合意の上でのサブスクリプションモデルでの回収が可能性的には高い、キャリア屋さんが MEC のインフラを整備して（不動産業）、アプリケーション屋さんがユーザーからの課金で（サービス業）キャリアに家賃を払うモデルになる。サブスク契約してないユーザーはショッピングモールに入っても何も商品案内をされない。アマゾンプライム入会してないと、無料映画を紹介してくれないのと同じようになる世界が至る所に発生する。

3 - 2. 自立したコンピューションとは？

ポスト 5 G 世代の基地局が、1) 「冷蔵庫大の携帯電話」のイメージになること。「冷蔵庫大の携帯電

話」が提供するサービスは、2)「リアルタイム処理」であること。「冷蔵庫大の携帯電話」がリアルタイムに提供するアプリケーションは、3)「無意識なプロトコル」で処理が行われること。結果、「冷蔵庫大の携帯電話」は、4)「自立したコンピューテーション」でなければならないことを仮説・検証してきた。

それでは、自立するコンピューテーションに必要な機能とはなんだろう。サービスの結果を出すコンピューテーション能力自体は、MEC に内蔵されている。またサービスの結果を出すコンピューテーションに必要なデータベースや知識ベースは、クラウドサーバーから事前にダウンロード可能だとする。

自立したコンピューテーションでは、アプリケーションを起動する主体がユーザーから「冷蔵庫大の携帯電話」側に移動することは既に説明したが、「起動」と「終了」というコンピューテーションの実行の前後のプロトコルからの切り口でも、主体の移動を理解できる。

例えば、携帯電話で電話をかける場合は、まず、ユーザーが携帯電話の電源ボタンを押して携帯電話をスリープからアクティブ状態に移行させた後に、通話アプリケーションを起動して電話をかける。通話が終わったら、通話アプリケーションを閉じて、携帯電話の電源ボタンを押して携帯電話をスリープ状態に移行させる。

基地局の場合は、近づいてくるユーザーを常に監視して、ターゲット客層のユーザーと認識したら、ユーザーが気づく前に、ユーザーの購買情報をクラウドからダウンロードして、ユーザーの近傍のサイネージにおすすめ商品情報を掲示する。アプリケーションの起動には、ユーザーは直接関知しない。

「冷蔵庫大の携帯電話」に足りない機能とは、コンピューテーションの実行の前後のプロトコル、つまりコンピューテーション「起動」と「終了」の判断に必要な機能ではないだろうか？

3-3. コンピューターと周辺機器

半導体ベースのコンピューターが生まれて以来（1971年 Intel4004）、コンピューターの進化によるケースの拡大に伴って、過去50年の間に多様な周辺機器が生まれきた。電卓用の4004には、入力用のテンキーと出力用の印字プリンターが必要であったように、パソコンには、キーボードとディスプレイ、タブレットや携帯電話には、タッチパネルとディスプレイが必須の周辺機器である。



4004 が搭載された電子計算機

もちろん、コンピューターの基本構成要素であるメモリやストレージデバイス、通信機能も時代毎に進化しているが、本質的に要求される機能が大きく変わったわけではなく、CPU が計算能力を時代毎に進化させると同じように、メモリやストレージが記憶容量を、通信機能が通信速度を進化させてきた。今も昔もコンピューターの基本構成要素は、CPU とメモリと通信である。一方、周辺機器には、コンピューターの進化がもたらすユースケースの変化に応じて、全く新しく生まれる機器も多くある。

例えば、クラウドサーバーには、コンピューターの基本構成要素である CPU とメモリと通信機能しかない。キーボードやディスプレイは、メンテナンス作業時にリモート端末として一時的に接続されるだけである。その代わりに UPS（無停電電源装置）が必須になった。

パソコンではアプリケーションがグラフィカルな処理を要求することで、マウスという新たな入力デバイスが生まれ、初期の携帯電話からスマートフォンへの進化によってテンキーボタン以外の入力の為に、タッチパネルというデバイスが生まれた。

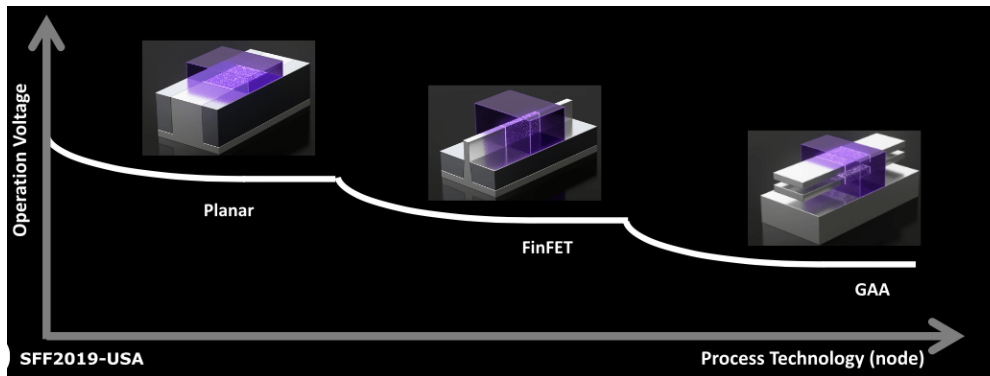
ポスト 5 G + MEC が、ここまで検証してきたように、クラウドでもなく、携帯電話でもない、「冷蔵庫大の携帯電話」という、新たなコンピューテーション階層を担うデバイスだとすれば、過去の歴史が物語るように、「冷蔵庫大の携帯電話」に必須の「新たな周辺機器」が生まれる可能性は十分にある。また、過去に学べば「冷蔵庫大の携帯電話」に必須の周辺機器は、「冷蔵庫大の携帯電話」に必須のアプリケーションから生まれるはず、つまり「自立したコンピューテーション」の実現に鍵があると考えられる。

「冷蔵庫大の携帯電話」は、クラウドでのコンピューテーションの一部の機能を代替するが、同じように「冷蔵庫大の携帯電話」が、携帯電話のコンピューテーションの一部の機能を代替するかもしれない、それにより携帯電話に必要な周辺機器が改めて進化す

る可能性も十分ある。「クライアント・サーバー」モデルが加速したことで、クラウドサーバーの周辺機器からキーボードやディスプレイが消える進化が起こったように、「冷蔵庫大の携帯電話」が加速することで、タッチパネルやディスプレイが携帯電話から消えるという退化（＝進化でもある）が起こる可能性は十分ある

3-4. 低消費電力化は可能か？

現在 2020 年の段階でも、半導体の微細化によって漸近的に低電圧化・低消費電力化は、まだまだ進むと考えられている²¹。



一方、前項では、ポスト5 G + MEC により、現状想定されているクラウドサーバーに必要とされる消費電力の 10 倍の電力が「冷蔵庫大の携帯電話」に必要になるという仮説と検証をしたが、このような、数年の間に一挙に 10 倍に増える消費電力需要を、デバイスの微細化だけで画期的に削減することは困難である。

低消費電力化の検証をするにあたり、もう一度ユースケースに戻って、ポスト5 G + MEC で提供されるコンピューテーションサービスの特徴を抽出してみよう。

例えば、新幹線（高速移動体）へのバースト伝送のユースケースでは、新幹線が基地局区間を通り過ぎる 6 秒間だけ、「冷蔵庫大の携帯電話」は 100%の機能を発揮しなければならないが、それ以外の時間はスリープしていても支障がない。東海道新幹線は、朝 6 時から夜 10 時までの間に上下で約 600 本が東京駅に発着すると想定すると、平均すれば 144 秒に 6 秒だけ 100%の機能を発揮すれば良いので、デューティー比が 4%の 100%稼働で必要なコンピューテーションを提供できることになる。「冷蔵庫大の携帯電話」を必要に応じて ON/OFF 制御することで、消費電力を 20 分の一に抑えることが可能になる。

別の例にある、交差点からの安全情報の自動車への配信のユースケースでは、時速 50Km で交差点へ進入する車両へ、死角になる左右の 4K 動画を配信するとす

²¹ <https://www.extremetech.com/computing/291507-samsung-unveils-3nm-gate-all-around-design-tools>

る。一度に基地局から 100m の区間にいる車両には同時配信可能なので、車両が 100m を通り過ぎる間の時間 $100m/50Km=7.2sec$ に一度配信すれば良い。移動体へのポスト 5 G を使った伝送速度を 8Gbps とすれば、動画伝送量は 4K (H.264) で 350MB/分なので、0.35sec あれば 1 分ほどの動画が伝送できる。つまり「冷蔵庫大の携帯電話」を必要に応じて ON/OFF 制御することで、消費電力を 20 分の一に抑えることが可能になる。

ポスト 5 G + MEC で提供されるコンピューテーションサービスに必要なアプリケーションの特徴は、間欠動作が可能なことであり、アプリケーションと連動して「冷蔵庫大の携帯電話」を必要に応じて ON/OFF 制御することで、消費電力を大幅に抑えることが可能になるだろう。

つまり、「冷蔵庫大の携帯電話」は、アプリケーションを「自立したコンピューテーション」サービスとして提供する一方で、アプリケーションと同期して自立的に自らを ON/OFF 制御することが出来ることが要請される。間欠動作と自立的な ON/OFF 制御は、他のコンピューテーション階層には無い「冷蔵庫大の携帯電話」の最大の特徴となると考える。

3 – 5. MEC に新たなアーキテクチャのデバイスは必要か？

現在の携帯電話には、イメージセンサー素子やタッチパネル機能や高精細グラフィックスが備わっているが、それらのデバイス部品は、初期の携帯電話には備わっていたものでは無かったし、現在必要になっている機能を提供できていたわけでもない。携帯電話が進化して 4 G 通信 + クラウドコンピューティングが提供するユースモデルを拡張していく中で、新たに必要になってきたり、進化を求められたりしてきたデバイスである。

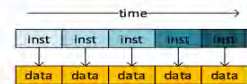
同様に、クラウドサーバーでも、はじめから Nvidia の GPU が 4 G 通信 + クラウドコンピューティングで一定の地位を確保していた訳ではない。クラウドサーバーが進化して、4 G 通信 + クラウドコンピューティングが提供するユースモデルを拡張していく中で、新たに必要になってきたり、進化を求められたりしてきたデバイスである。

CPU / GPU / FPGA の比較

CPU: SIMD

任意のプログラミング環境および言語に適用可能
非ベクトル化整数アプリケーション

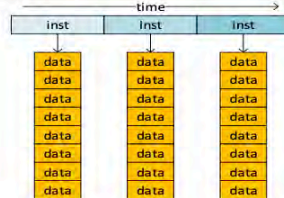
依然としてコンピューティングのコアセンター



GPU: SIMD

ベクトル化された浮動小数点に最適
有効利用には大規模データが必要
分岐または例外 (if文) は不得意

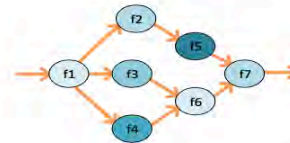
依然としてハイパフォーマンスの問題のサブセットに重点
なくなることはないが、範囲は限定的



FPGA: MIMD

データ量の大小にかかわらず、多数の独立した命令の並列動作が可能
IOデバイスによるストリーミングに最適

GPUよりも広範囲
時間の経過とともに、エンタープライズアプリケーション向けにGPUよりも広範囲な普及が期待できる



DELL EMC PowerEdge

31

DELL のサーバー営業資料から抜粋。必要なアプリケーションの種類に合わせて必要なコンピューション HW をあてがっていく。

基地局が「冷蔵庫大の携帯電話」だとすれば、「冷蔵庫大の携帯電話」が、そのユースケースを拡張していく中で、本質的に必要になってくるデバイス部品や機能があるはずで、既存のデバイスが要求される機能に十分到達できていなければ、そこに新たなアーキテクチャのデバイス開発をする余地が生まれるし、既存の素子をより進化させる力が生まれるはずである。「冷蔵庫大の携帯電話」のユースケースにおいて、新たなアーキテクチャのデバイスが支えるコンピューション能力が、目標するアプリケーション上のサービスにとって大幅なメリットがあれば、携帯電話の撮像素子や、Nvidia の GPU のように、新たなアーキテクチャのデバイスが既存の汎用 CPU デバイスと MEC 装置内で共存する可能性は十分にある。

つまり、MEC 装置向けの新たなアーキテクチャのデバイス開発を深掘りするのであれば、「冷蔵庫大の携帯電話」に本質的に必要になってくるサービスや機能は何か？「冷蔵庫大の携帯電話」の目標アプリケーションである「リアルタイム処理」を「無意識」に使っている時にメリットとして感じるコンピューション・サービスとは何か？を具体的にイメージしていくことが重要であると考えます。

3-6. 5G 関連ベンチャーの目指す技術フロンティア

5G にかかる世界のスタートアップを Google での検索 (5G/mmWave/RF/compound semiconductor 等をキーワード) に引っかかったものを以下のページにまとめた。調査からは、アンテナ (Beam forming) と RF Front-End IC (GaN 系) が多いことがわかった。なお 5G 関連ではないが、日本の化合物半導体系ベンチャー 2 社 (FLOSFIA と Novel Crystal Technology) も表に追加している。どちらもパワー半導体応用に向けた GaN 系化合物半導体の製造会社である。

リストから、ポスト 5G に必要なミリ波向けのアンテナ技術とアンテナと一体化される RF Front-End IC には、スタートアップが挑戦できる、技術的に成熟していない技術フロンティアが残されていることがわかる。

一方で、ポスト 5G をターゲットにした、CPU デバイスやメモリデバイスのような、コンピューションの一丁目

一番地的なスタートアップは見受けられない。インテルが Altera (FPGA) を買収し、Nvidia が ARM を買収、AMD が Xilinx (FPGA) を買収するというように、コンピューテーションの主戦場は、CPU 大手の寡占化がすすむばかりで、スタートアップが生まれるフロンティアの余裕はない少ないのかも知れない。

ロジック半導体の性能アップが、半導体の微細化に深く依存していることから、巨額の開発投資が可能で、かつ、巨額の開発投資を回収するに見合う規模のビジネスを展開している会社以外は、最先端半導体技術をベースにしたロジック半導体デバイスの開発には手をつけられない。逆説的ではあるが、半導体の微細化に深く依存せず、開発投資が十分回収できる規模の半導体技術で開発可能なデバイスであれば、スタートアップが挑戦可能なフロンティアが生まれる。しかしながら、半導体の微細化に深く依存しないだけでは、差別化のカードとしては弱い。多分、準微細化 + 特殊プロセスがキーワード、例えばソニーの CIS とか NAND 等のメモリも特殊プロセスの範疇だろう。

我が国の半導体デバイスが辛うじて生き残っている領域、その特徴を持つことが、ポスト 5 G 世代の新たなデバイス開発にも求められていると考える。

AIRCISION	Laser for backhaul	https://www.aircision.com	Netherlands
Airgain	Anntena	https://www.airgain.com/	USA
Akash Systems	GaN RF frontend IC	https://akashsystems.com/	USA
Alacan system	Basestation + Antenna	https://www.alcansystems.com/	Germany
Altum RF	mmWave Front IC	https://www.altumrf.com/	Netherlands
Anokiwave	mmWave Si RF chip	https://www.anokiwave.com/5g/index.html	USA
Arralis	mmWave Satellite system	https://arralis.com/	UK
Blue Danube Systems	Beamforming Antenna + basestation	https://www.bluedanube.com/	USA
Cambridge Communication Systems	Wireless Backhaul	https://www.ccs1.com/	UK
FLOSFIA	GaO epi (For power)	https://flosfia.com/	Japan
Fractal Antennas System	Antenna	https://www.fractenna.com/	USA
GaN RF frontend IC	GaN RF frontend IC	https://www.iconicrf.com/	UK
Gapwaves	Waveguide + Anntena	https://www.gapwaves.com/	Finland
Isotropic	Array Antenna	https://www.isotropicsystems.com/	UK
Jetcool	Chip Cooling technology	https://www.jetcool.com/	USA
Kumu Networks	5G backhaul	https://kumunetworks.com/	USA
Maja Systems	mmWave(60GHz) Tx/Rx chip	https://www.majasystems.com/ics	USA
Maven wireless	RF basestation equip. (POI/DAS)	https://mavenwireless.com/	Sweden
Metawave	Beamforming Antenna and Reflector	https://www.metawave.co/	USA
Movandi	RF IC + Beamforming Anntena	https://movandi.com/	USA
Myriota	Satelite RF communication	https://myriota.com/	Australia

Nalu Scientific	RF measurement equip	https://www.naluscientific.com/	USA
Novel Crystal Technology	GaO epi (For power)	https://www.novelcrystal.co.jp/	Japan
Pivotal Commware	Beamforming Antenna + basestation	https://pivotalcommware.com/	USA
Satixfy	RF IC (Front + DownConverter)	https://www.satixfy.com/	ISRAL
Semi Block	High precision Xtal OSC	https://semiblocks.com/	Netherlands
SweGaN	GaN RF frontend IC	https://swegan.se/	Sweden
VSORA	ADAS/Communication IP for 5G LSI	https://www.vsora.com/	France
Zinewave	Antenna + RF system for building	https://www.zinwave.com/	UK

5G/mmWave/RF device 関連 Startup

3-7. 次世代コンピューティングとデバイス

はじめに「次世代コンピューティング」をポスト5Gの通信に必要な「コンピューテーション階層」と定義したが、ここまでの仮説・検証でポスト5Gの基地局は MEC とペアになった「冷蔵庫大の携帯電話」のようなイメージのコンピューテーション装置である一方、クラウドでも携帯電話でもない、新しい「コンピューテーション階層」を担うインフラであり、主にリアルタイム処理（無意識のプロトコルで起動・終了）をサービスの主体として、自立的に自らのコンピューテーション能力を ON/OFF することが出来ることを最大の特徴とするという議論を進めてきた。

最後に、前述したような「自立的に自らのコンピューテーション能力を ON/OFF する」次世代コンピューティングを構成する為に必要となる、ポスト5G世代に挑戦すべきデバイス開発の私案を提案としてまとめる。

4. ポスト5G世代に挑戦すべきデバイス開発提案

はじめに「我が国が先端半導体開発競争から脱落した現状では、本稿が想定する5～10年のレンジで、最先端半導体技術や最先端半導体製造インフラを立ち上げることは議論の対象とはしないと」断りを入れている。それでは、先端半導体技術に頼りせず、ポスト5G世代の「次世代コンピューティング」に必要な半導体デバイス開発の余地はあるのだろうか？

議論を進める前に、いくつかの仮定を想定したい。

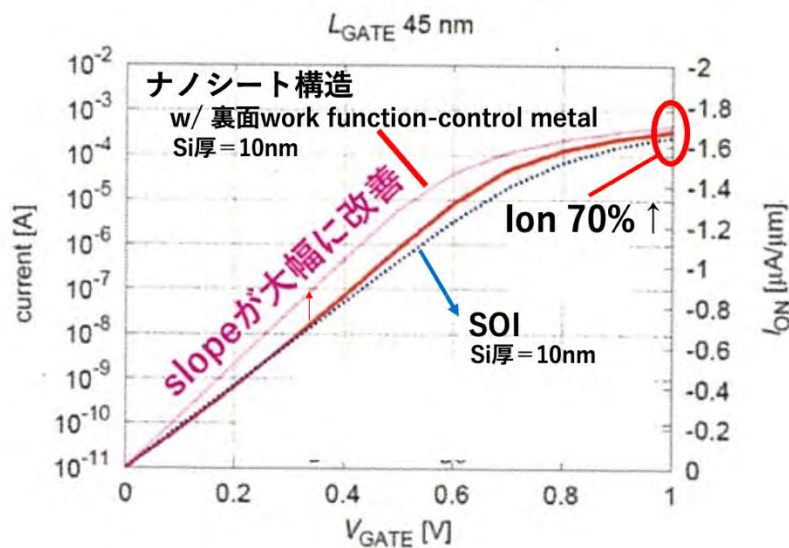
1. 微細半導体の開発競争は続き、引き続き現行のロジック半導体＝CPUは進化を続ける。基本的なコンピューティングでは、現行のCPUのアーキテクチャを使い続ける。
2. 特定のアプリに向けたロジック半導体も微細半導体技術を追いかける形で進化を続ける、GPUやFPGAに向けたアプリケーションでは、現行CPUを使わずにコンピューティングのアクセラレーターとして進化する（オプションとしてシステムに内蔵される）。
3. リアルタイム処理にかかり通信遅延に関わるハードウェアは「冷蔵庫大の携帯電話」である基地局にシステムとして統合され、リアルタイム処理とクライアント・サーバー処理は切り分けられる。
4. インターネットのルーティング制御に、ホストコンピューターが存在しないように、「冷蔵庫大の携帯電話」の基地局のON/OFF制御に、ホストコンピューターは存在せず、基地局毎に自立的に制御が行われることで、セキュリティと冗長性を担保することが可能だろう。（Big Brotherはいらないが、Big Brotherモデルも否定できない）
5. 我が国は、大規模投資が必要な微細化技術開発を放棄するが、半導体技術開発と製造能力を完全に放棄することせず、微細化には頼らない特徴のあるデバイス開発を目指す。現行国際競争力のある、CIS素子やメモリ（NAND）等もその範疇の半導体デバイスであり、今後そのようなデバイスのポートフォリオを増やすべきである。
6. リアルタイム処理のサービスが広がると、携帯電話（端末側）に要求される仕様も大きく変わっていくと予想される。特に周辺機器は、リアルタイム処理で大きくかわるだろう。スマートメガネのような出力デバイスが再注目されたり、音声入力の更なる進化が起きたりするだろう。端末側の周辺機器に必須のデバイスも議論すべきである。

以上の様な想定のもとで、デバイス開発にかかる議論を進めていくことにする。

4-1. 3Dトランジスタ (林さん@産総研との議論)

10nm->7nm->5nm->3nm と進む、最先端の微細トランジスタ開発では、Planer 構造から FinFET に進化し、更に GAA(Gate All-Around)への大きく構造的な変化を遂げようとしている。GAA では、構造的な 3Dへの飛躍があると同時に、設計的に見ても魅力的なメリットである、基盤バイアスやカットオフ特性等の向上という、従来のトランジスタでは実現できなかった特性がある (以下、トランジスタ特性シミュレーション by 林さま)。

Si-FET characteristics simulated (under development)



産総研の林さんとのプレストにて、以下のポイントを議論した。

1. 3Dトランジスタ構造は、微細化とは独立の技術である。リソグラフィーを緩くしてもプロセス的には作ることができる。
2. 特徴としては、カットオフ特性 (Off 電流の削減) の向上と飽和特性 (GIDL の抑制) 向上であり、定電圧動作と待機時の低消費化に向いている。
3. 素子ばらつきは、閾値制御をチャンネルドーパせずに HKMG のワークファンクションにて制御することで、抑えられる。
4. S/D を基板から分離することが可能なので、負荷容量が小さくなるので、スイッチングロスの低減と高速動作が期待できる。
5. SOI で問題になったチャンネルの温度上昇は、HKMG にて排熱可能なはず。

6. 現在は、戦車や戦艦といった二次元の自由度しかない武器で戦っていた時代から、飛行機で三次元の自由度で戦う時代への大きな過渡期にあると言って良い。

産総研のプランでは 2 X nm にて、3 D トランジスターのプロセスとパイロット製造を可能にする拠点を整備することを目指しているため、本項以降の議論においては、2 X nm + 3 D トランジスターをキーデバイス技術として仮定して議論を進める。

林さんの私見では、すでにファブリーサービスで実績を積んでいる、2 X nm の主要なファブリーメーカー（TSMC/UCM/SMIC/GF 等）が、2 X nm に使われている Planer 構造のトランジスターを 3 D に変更することは、ビジネス的に考えられないようだ。

まず、2 X nm + 3 D トランジスターのパイロット製造拠点が立ち上がる仮定の元に、そこでのデバイス開発の課題を改めて抽出してみる。

1. ロジックデバイスを設計する為に必要な、設計インフラ（PDK や SC/各種 IP 等）を最初から揃えるのは事実上不可能。
2. 配線層は 2 層だけ？ 多層の BEOL が必要な場合は外部ファブの協力が必須。
3. 本来の 3 D トランジスタのメリットである、多層化 3 D トランジスタは作れないので、Planer トランジスタと同じく W は二次元的に確保しなければならず、既存 2 X nm が達成できる以上の集積化は望めない。

以上の条件から、2 X nm + 3 D トランジスターのパイロット製造拠点でのデバイス開発の提案として、

1. 拠点の立ち上げ時点で、ロジックデバイスを目的デバイスにするのはハードルが高い、極端にいえば設計インフラとしては SPICE モデルだけで設計できるデバイスであるアナログデバイスを初期の目的デバイスとすることを提案する。
2. ロジックデバイスの設計インフラを整備する為には、インセンティブ付きの開発プランを提案する。フリーシャトルと基本 IP（SC 等）の利用許諾等の工夫が必要。
3. 将来的に本格的にファンドリのビジネスを展開する為に必要な潜在ユーザーの洗い出し、国内外のアカデミアとベンチャーへのシャトルサービスの提供。国内グループには、設計ツールを VDEC と AIDL にてサポート。特定のデバイス仕様に対する設計コンペの開催。

4. シャトルの費用は、配線層を 2 層と仮定すると他 2 X n m のファンドリーのシャトル費用に比べて半分程度には安くなるはず。

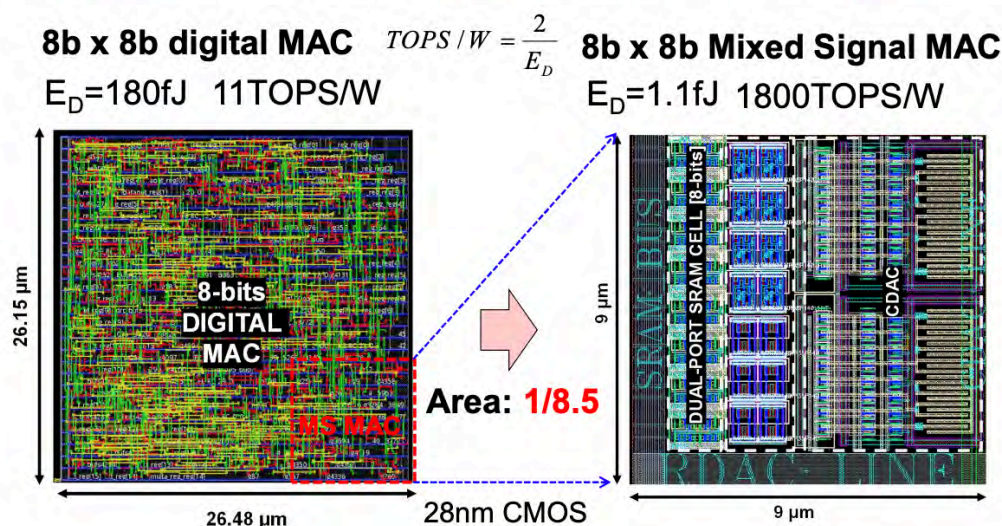
4-2. アナログ CNN デバイス (松澤さん@チップイデアとの議論)

元東工大の松澤先生 (チップイデア) とのプレストにて、ポスト 5 G に絡んだアナログデバイスの提案として、アナログ CNN デバイスを念頭に以下のポイントを議論した。

1. 基地局である「冷蔵庫大の携帯電話」のユースモデルでは、画像認識が大きな比重を占めるので、CNN 演算 (学習はしない想定) に特化したプロセッシングが重要だろう。
2. 基地局の消費電力の削減は必須であるが、画像認識機能は 24/7 で連続稼働する必要があるため、消費電力を下げる目的で間欠動作をする余地がすくない。
3. VT ばらつきが少なく、低電圧で動作する一方でカットオフ特性の良い 3 D トランジスタは、アナログ CNN 向けの MAC ブロックの設計に向いている。
4. CNN デバイスは、MAC ブロックのアレー構造であるので、大規模設計する際の設計・検証リソースが少くない。また少ない配線層でも実現可能。
5. SRAM 等の最低限必要な IP が少なく、IP を自前で設計可能。

Comparison of digital and mixed signal MAC 21

Mixed signal MAC (without ADC) can reduce occupied area by **1/8.5**, operating energy by **1/160**, and increase TOPS/W by **160x**.



28 nm デザインルールでロジック設計した 8 ビット MAC ブロックで、必要面積で 1/8.5、消費電力で 1/160 を実現可能である (by 松澤先生のシミュレーション)

4-3. オペレーションコストからの議論

クラウドサーバーに見るコンピューテーションシステムの進化の原動力はオペレーションコスト=電力コスト²²である。

米国・ソフトウェアサービスベンダーのデータセンター選定基準

米国・ソフトウェアサービスベンダーにおけるDC設置場所の選定基準は、プライオリティーの高い順に、電力コスト、クオリティーの高いNWの利用可否、設置/運用スキルの高い人材の有無、廉価なアクセスNWの利用可否。

米国・ソフトウェアサービスベンダーのデータセンターの選定*1

➤ 米国・ソフトウェアサービスベンダーにおけるDC設置場所の選定基準は、約80項目存在するが、そのうちの1位~4位は以下

- ① 電力コスト
- ② 広帯域・QOSを担保した基幹NWの利用可否
- ③ 設置/運用スキルの高い人材の有無
- ④ 廉価なデータファイバ等のアクセスNWの利用可否

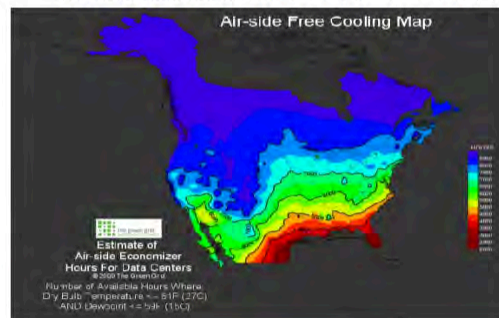
➤ 最も重要な選定基準は電力コスト

- ・背景には、DCの運用コストの50%を電力コストが占めているという現状がある

➤ 故に、米国・ソフトウェアサービスベンダーは様々な方法で電力コストの削減を模索

- ・ ヒートマップを活用して冷却装置不要のエリアを探す
- ・ 電力コストが低いエリアを探す
 - ⇒ 電気代が低い、または助成制度のあるエリアなど
- ・ 電力コストを自力で下げる
 - ⇒ 自社発電を行う
- ・ 電力効率向上の技術の採用
 - ⇒ 直流給電を行う

(例) The Green Gridが公表しているクーリングマップ*2



*1: アクセンチュア社ヒアリングより *2出典: <http://www.thegreengrid.org/>

出典: 総務省「データセンター利用に関する国内外の動向に係る調査研究」

17

クラウドサーバーでは、CPU（汎用計算）に加えて、GPU（AI 学習）や、FPGA（ストリーミング）等の専用デバイスがアクセラレーターとして既に内蔵されてきているが、その理由はコンピューティングに必要な特性に合わせてデバイスを使い分けることで、消費電力を下げるのが目的である。

次世代コンピューテーション装置である「冷蔵庫大の携帯電話」の最大の課題も、消費電力の削減にあり、サービスを起動していない（=お金の取れない）スリープ状態に必要な電力を出来る限り削減する必要が本質的にあるとすれば、ロジックデバイスに対して圧倒的に消費電力が少ないアナログ CNN（画像認識）デバイスが、CPU（汎用計算）に加えて、GPU（AI 学習）や、FPGA（ストリーミング）デバイスと並列に、基地局むけの次世代コンピューテーション装置に内蔵される可能性もあるのではないかと？

ここまで検証してきたように、「冷蔵庫大の携帯電話」が提供するアプリケーションは、リアルタイム処理であり、自立的に間欠的なコンピューテーション・サービスの提供になる。また、消費電力を下げる為に「冷蔵庫大の携帯電話」が、アプリケーションと同期して自立的に自らを ON/OFF 制御する為には、

²² https://www.soumu.go.jp/main_content/000067990.pdf

CPU/GPU/FPGA を使わずに周囲の状況を 24/7 で常時監視できる、低消費電力の「新たなアーキテクチャのデバイス」が不可欠になると考える。

4-4. 私案まとめ

Nvidia の GPU がクラウドサーバーで一定の地位を確保したきっかけは、ビットコインのマイニング計算が汎用 CPU よりも圧倒的に早かったからである。きっかけは、「早い=ビットコインで儲けられる」から始まっているが、繰り返し計算というアプリケーションでの消費電力あたりの計算能力が高く、電気代をコストとした時のコストパフォーマンスが良いことが真の理由だろう。同じように INTEL や AMD が FPGA 会社を買収したことも、FPGA がストリーミング等のクラウド上での動画配信アプリケーションにおいて、圧倒的に汎用 CPU よりコストパフォーマンスが良いことが理由だと考える。

特定のコンピューテーション能力が既存のデバイス（CPU/GPU/FPGA）よりも圧倒的にコストパフォーマンスが良いデバイスならば、コンピューテーションインフラで一定の地位を確立することが可能である。また、特定のコンピューテーション能力をドライブするのはデバイスではなくてアプリケーションである事にも注目すべきである。ビットコインや動画配信の例からも明らかなように、アプリケーションがデバイスの分化をドライブするのである。

ポスト 5 G 世代の初期には、次世代コンピューティング装置である「冷蔵庫大の携帯電話」で実行されるコンピューテーションの殆どは、既存のクラウドで提供されているサービスになるはずで、主には汎用 CPU で計算が行われるだろう。一方、本格的な 5 G 世代でのユースケースで見てきたような、ユーザーの認識や商品の認識等のコンピューテーションは、お金を回収できるサービスを開始するためのキッカケであり、無作為にかつ常時計算しなければならない。サービスを提供する側からすると「お金を一番かけたくない」計算である、お金は、回収対象がはっきりして、コストが回収できる可能性が高い計算に使いたい。例えば「商品として提供する VR の仮想画像の生成」に必要な計算であり、電力パフォーマンスの悪い、汎用 CPU を画像認識の為に使いたくは無いはずだ。GPU は当然、FPGA も電力パフォーマンス的には不十分な可能性が高い。

ポスト 5 G 世代の次世代コンピューティングが、クラウドでも無い、携帯電話でも無い、「冷蔵庫大の携帯電話」と言う新たなコンピューテーション階層を必要とし、そこで「リアルタイム処理」という新たなアプリケーションが実行されることは、必ずデバイスの分化をドライブするはずである。

我が国が、注目すべきデバイス開発として、例えば、無作為でかつ常時計算しなければならないコンピューテーション用の専用デバイスに対象を絞ってはどうか、松澤先生の提案する画像認識専用の CNN プロ

セッサが一例ではあるが、画像以外にもビームフォーミングで常時スキャンしているアンテナからの信号で端末の状態感知（信号を解析せずに）とか、汎用 CPU での認識計算に対して、圧倒的に有意（コスト＝性能/電力）であることを評価軸にして対象を絞るのはどうだろう。

5 G 関連ベンチャーが注目している、ビームフォーミングや RF フロントエンドデバイスを含むアンテナ関連技術は、フロンティアとしてまだまだ開拓の余地がある、ビームフォーミングでの指向性の制御や複数アンテナの最適化等々、CNN プロセッサと指向性制御を組み合わせ、アンテナ（含む RF パワー素子）の消費電力を最適化する余地はあるのではないか？アンテナの制御は、無作為でかつ常時計算しなければならないので、CNN プロセッサの優位性のある応用だと考える。

専用 CNN プロセッサは、「冷蔵庫大の携帯電話」と言う新たなコンピューテーション階層以外での利用も可能である。応用範囲は、無作為でかつ常時計算が必要な応用分野に注目すれば、センシングとの組み合わせ＋やらないよりやった方が効果として上がるもの（人数を基準とするインフラサービスの最適化：空調や照明）等のインフラ向け IoT デバイスとの融合も考えられるが、本稿のターゲットからは外れるので、これ以上の紙面を割かない。

結局、得をする人（ユーザー）を説得できるだけのコストパフォーマンスがあるのか？はデバイス側が頭を捻る課題であるが、キーデバイス開発や拠点や基地局整備等に対して、誰が「冷蔵庫大の携帯電話の初期コストを負担する（国/キャリア/データセンター/GAFA）のだろう？と、どうやって投資回収するのだろうか？というところが未だ未だ具体的に見えないことが、ポスト 5 G と半導体デバイス開発を語る際に全体を俯瞰して考えることが難しい原因だと感じている。

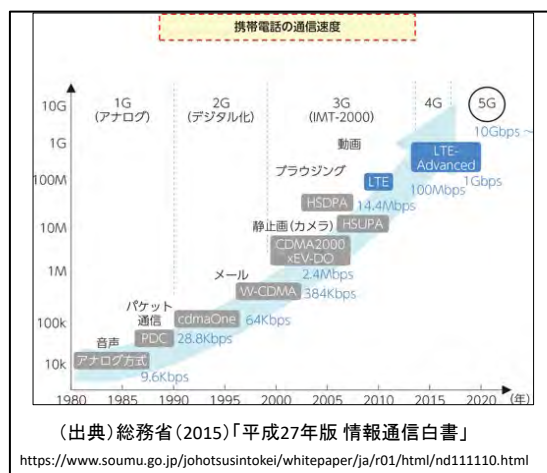
第4章

ハードウェアは半導体に依拠しながら低コスト化して普及を導く基軸となる ——半導体メモリーからの事例分析とこれから

1. 無線通信技術の進歩による半導体産業へのインパクト

1-1. 無線技術の進歩

今、現代社会と呼ぶときに高度に電子化された社会の姿を当たり前のもとして頭に描く。その裏には、サービスの使い手には意識されない半導体技術の劇的な進歩が隠されている。PC産業に比べて進歩的な変化の激しい無線通信の作りだす市場製品（携帯電話、スマホ）では、全世界の一般消費者が単一市場になるため、PCのような技術トレンドに従った産業の発展とは異なる動きが作り出されてきた。無論、無線通信技術のトレンドはその分野で描かれ、そのトレンドに従った産業投資が行われてきたのではあるが、そのサービスを市場に届ける



る端末である携帯電話やスマホは世界規模で行われるコンシューマー市場のゆへの製品競争と機能競争にさらされてきた。その規模と発展のスピードは、それまでの半導体産業が見てきた市場とは全く異なるものであった。

その競争は、手のひらに乗るサイズという制約の中で行われてきたため機能の進歩の多くは半導体技術そのものの開発に委ねられた。それまでのPCとそれを支えるインフラ向けに発展してきた半導体産業の進み方とは異なった。半導体の進歩指標であるムーアの法則がPC産業発展の根本原理であったが、携帯電話とスマホはそのムーア則のトレンドを超える微細化と高性能化、大容量化を要求したためムーア則以外でその要求にこたえる道を作らなくてはならない。その道が、半導体 Package による高集積化であった。今の言葉でいうところの“Heterogeneous Integration” Package (以降、HIP とよぶ)である。

この Package による高集積化は 2010 年代では携帯電話とスマホだけで見られた半導体のトレンドであったが、今やこの市場だけで全半導体市場の 2 割程度を占めている。2010 年代の後半に入り、ムーア則そのものの限界が見え始め、携帯電話・スマホ以外の市場で HIP が注目され始めている。事の起ころはムーア則を超える市場の要求をいち早く理解し HIP で対策を講じた無線通信市場であり、携帯電話・スマホであった。

5G に至る無線通信の技術発展とそれをサービスにした携帯電話・スマホの市場変化を半導体産業の観点から考察するのは、今後の 5G の市場検討だけでなく、ムーア則以降の半導体産業全体の発展方向を俯瞰するのも役立つはずである。

1 - 2. 2Gのキラーアプリである携帯電話がもたらした社会生活の変化

1980年代に「もしもし、ハイハイ」の手持ちできる（肩掛けも含め）電話機として「携帯電話」が登場した。これがアナログ方式で「携帯電話」の第1世代（1G）と呼ばれた。「携帯電話」とはいえ今では想像できないほど大きく重いものであった。一部の国では「携帯電話は殺人用の道具だ」などと人々に言われた。「携帯電話」で人を殴るとひどいことになるほどの重さと大きさだということである。電話が人と一緒に移動できるというエポック・メイキングな技術ではあったが、端末費用、通信費用ともに高く、この1Gでは利用者は極めて限定的で、1G「携帯電話」の登場が人々の生活や文化に大きな影響を与えるようなことはなかった。しかし、技術としては大きな一歩を踏み出したのである。



1990年代に入ってから通話用無線通信はデジタル化された。2Gである。2Gにより携帯できる電話を小さく軽くすることができ、「携帯電話」が真の携帯電話に変わったのである。2G技術は先進国で携帯電話を広く普及させ、電話機が家庭単位から個人単位の所有に変わった。少々不便ながらも（今から見れば）簡易なメールも可能となった。端末も「100g、100cc 戦争」と言われるほどの小型化競争に突入し、2Gの効果である小型軽量化そして通信料金の低価格化により携帯電話が一般の社会生活に大きな影響を与え、人々のコミュニケーション様態が大きく変わった。通信技術の進化がポケットに入る携帯電話を作り出しその携帯電話が社会を変えたのである。また、同時に2Gの効果による真の携帯電話が産業の形態も大きく変えた。便利さ安さゆえに日本国内だけで1991年からの9年間で0から出発し5千万台/年に近い携帯電話機の市場が立ち上がったのである。1台2万円としても年間で1兆円の新市場が9年で形成されたのである。国内電気メーカーはこぞって携帯端末事業を開始し、半導体もPCに続く大きな市場を得たように感じた。2Gはテレビや自動車、PCの普及のような革命的な社会進歩を生み出したが、これは2Gそのものご利益（りやく）ではなく2Gのキラーアプリケーションたる携帯電話が作り出したものであり、通信というインフラ技術はその効果を具現化できるアプリケーションが必要なのである。しかし、2Gがなければ小型軽量格安のポケットに入る携帯電話は実現できなかったので社会生活に与えた無線通信技術としての2Gの役割は極めて大きかったといえる。

1 - 3. 社会生活に革命をもたらしたスマホの登場

2Gが作り出したポケットに入る携帯電話が作り出した社会変革の波は次に来る大波の序章にしか過ぎなかった。本当の大波は3Gの時代にやってきた。2Gの最後のタイミングでi-modeが発明され、掌の上でインターネットが動き始めた。これは3Gにも引き継がれた。しかし、この掌上の小型ディスプレイ上のインターネットだけでは社会生活に革命的な変化は生じない。本当の社会生活の革命的な変化は3Gそのものから来たわけではなくカーナビのタッチパネル技術とi-modeの携帯無線インターネット技術を3Gの高速通信技術で融合させた新しいタイプの携帯電話からもたらされた。iPhoneの登場である。

正しくは2007年1月に2G通信の上でアップル社がiPhoneを発売したが、タイミングよくその1年後に3G高速通信が始まり、それに呼応して発売された次のiPhoneで生活の電子化革命ともいべき「スマホ」による生活の重大変化が始まり、それまでビジネス場面や家庭での固定的環境に縛られていた本格インターネット接続が解放され、文字通り「いつでも、どこでも、どんな情報にでも」アクセスできる環境が作り上げられた。勿論、2007年のiPhone以前にも日本ではi-modeでインターネットに接続できたし、米国を中心にBlackBerryを持つことでよりPCに近いインターネット環境が携帯電話で得られて

いたが、それは iPhone によるスマホ革命の露払いの役割を果たすものであり、あまねく広く世界の人々の生活様式を変えるようなものではなかった。「スマホ革命」は iPhone から始まった。3G が社会生活の革命を起こしたのではなく 3G の高速通信でより利便性の上昇したスマホが社会生活と提供されるサービスに革命を起こしたのである。もし、携帯電話の画面がスマホ以前のものであり操作がタッチパネル方式になっていなければこれほどのインパクトを社会に与えただろうか。また、3G がなくとも社会に張り巡らされた WiFi 網でスマホを使えば縦横無尽な掌インターネットは実現できる。無線通信技術の進歩である 3G がもたらした社会的インパクトは無線通信技術のキラーアプリであるスマホそのものより小さく、2G の果たした役割に比べると見劣りしてしまうように見える。

この傾向は LTE や 4G といった 3G 後の無線通信技術の進歩でより顕著になる。LTE、4G では社会生活に大きなインパクトを作り出す携帯電話、スマホに続くキラーアプリを創出できなかった。無線通信技術の進歩は、単にスマホの作り出す社会生活の変化、掌上のインターネットで次から次へと生み出されるサービスを量的に拡大しただけであった。通信速度が速くなれば人々は喜び、静止画が YouTube や TikTok のような動画に変わることによって時間の使い方が変わる。しかし、社会生活に革命的といえるほどの変化は生じないし、その速度の向上と情報の量的拡大を使ってスマホ以上のキラーアプリは生まれてこなかった。明らかに無線通信技術の進歩は単なる技術トレンドの推移としてしか扱われなくなった。スマホおそるべし。

ここに“5G”や“ポスト5G”の社会的効果を占う市場原理を見ることができる。

1-4. 無線通信技術は黒子

iPhone とその後の Android スマホによる社会生活の変革は無線通信技術の進歩により支えられてきた。iPhone は GSM(2G)からスタートしたが、iPhone の考案者（当時の供給元の CEO）が「電話を再発明する」と述べたように「携帯」電話の進歩系の改良ではなく、それまで「電話」で使っていた通信技術を用いながら「電話」の使い方を全く変えてしまった。質の変化といってよい。その後、通信技術は、3G → 3.5G → LTE → 4G と進歩してきたが、その効果はいわば通信速度という物理量の量的変化を作ったといえる。確かにスマホでインターネットが簡易で身近になり、その利便性を活用した様々な新しい生活文化が生まれ GAFAM や BATX と呼ばれるような巨大な新興企業群が人々の生活に深く入り込むようになってきたが、それらは掌にある「スマホ」なる端末の上でインターネットによる情報処理の速度と通信量を増加させることで作り上げた生活の利便性の量的拡大であった。

3G そして 4G の通信技術に支えられたスマホが、インターネットというインフラを通して人と人、人とサーバー、人と企業を密接につなぎ、世界中の博物館、図書館、大学を集めても及ばないほどの必要十分な情報に、即座に手軽にそして思いついたその場で、それがたとえ路上であっても個人がアクセスできる社会文化を作り上げた。更に、その情報網に接続する形でありあらゆる情報を武器にしたサービスと企業が登場した。人を、住んでいる地域や使う言語、世代そして生きている時代を超えた新しい居場所にいざなうのがスマホの力であり社会生活革命の根源となった。3G や 4G の通信技術はそのために必要であったが、無線通信技術そのものが社会を変えた原動力であったとはいえない。

2G が、携帯電話機（肩掛けや殺人の道具ではない）を生み出しその携帯電話機が人と人のコミュニケーションを家庭や地域から解き放った。3G, 4G は、スマホの登場を後押しし、スマホの活躍場面をより拡大した。そのスマホが人の持つ情報や情報の活用方法を変えることで次の社会生活の革命を起こし

た。通信技術の進歩発展はいわば黒子であって、その黒子に支えられた役者が社会生活革命の舞台をつつたのである。人々は役者に注目し喝采するが、黒子には何も感動しない。スマホという役者が躍動する舞台では無線通信技術なる黒子は地道に技術トレンドの進歩予測をトレースするだけでしかない。

1 - 5. 無線通信技術の活躍場所は個人市場だった

1 G の重くて大きな「携帯電話」から 3 G, 4 G のスマホまで無線通信技術はその時々々の役者を支える黒子であり続けたが、役者が活躍する舞台すなわち市場という点からみるといつの時代（高々 40 年ほどだが）も同じ舞台であり続けた。その舞台の上で演じる役者こそ代われど、同じ舞台、同じ市場で演じられる劇物語であった。すなわち、「個人の遠隔コミュニケーション手段」という設定は全く変わっていない。

殺人道具にもなるほど大きくて重い「携帯電話」は、限られた人々に対してではあるが誰であろうとコミュニケーションする相手と場所を気にすることなく交流する手段を一般に提供した。それまでは、法人の通信手段か趣味人の通信手段であった無線通信を一般の人々に提供したのである。市場対象は費用やサービスの点で恩恵に浴する人は実際には限られていたが、全世界の何十億人という人々の、「個人の遠隔コミュニケーション手段」の市場に打って出たのである。

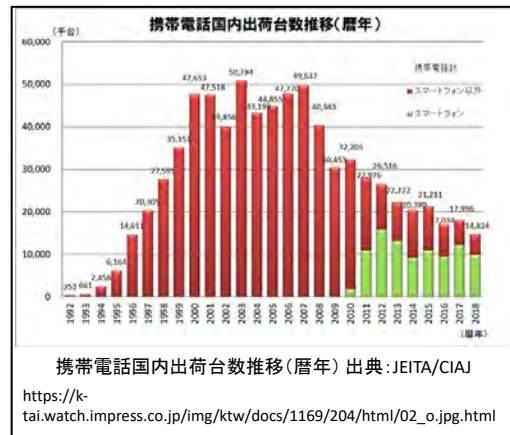
次の段階であるポケットに入る携帯電話は、その新しい「個人の遠隔コミュニケーション手段」を実際に世界中に広げた。潜在的には数十億台の市場キャパがあり、実際に先進国では半数以上の人々が個人の遠隔コミュニケーション手段として携帯電話を手に入れた。日本国内でも年間 5 千万台もの携帯電話が売れることになった。購入者すなわち市場は世界中の個人である。

更に次に登場したスマホは、実際一気に世界中の個人に普及した。携帯電話とは違いスマホは「個人の遠隔コミュニケーション手段」にとどまらず個人、個人の独立した情報コミュニケーション手段となったが、あくまでも購入者・消費者は個人である。目で見ると、耳で聞く、そしてスマホで目にも耳にも聞こえないビット情報を捉える機能を実現し残りの五感で解釈するようになった。第六感とは別に空中に飛び交うビット情報を感じる第七感を得たのである。個人が購入者・消費者であり、市場はあくまでも全世界の個人個人である。

殺人道具と揶揄された「携帯電話」からスマホまで、これらを支えてきた「X」G と呼ばれる無線通信技術は全て個人消費者を市場対象としてきた。今では全世界の 80 億人の個人に対して毎年 10 億台以上のスマホが販売されている状況である。人間は、性別の違い、肌の色の違い、使う言語の違い、年齢などの違いがあっても基本的には他の個人とコミュニケーションしたい、知らない情報を知りたい、面白いものを見てみたいなど行動の指向はさほど大きくは変わらない。従って個人の生活を豊かにするものであればその中で最も新しいものを人は欲する。故に、世界中で同じような機能を持った先端の携帯端末を購買力に見合った価格帯でそれぞれが購入することになる。今やスマホは、高額耐久消費財としては最大市場数量規模を持っており、携帯電話として 1990 年代から市場を作りはじめてから無線通信規格の変遷に合わせて機能と市場を拡大してきている。

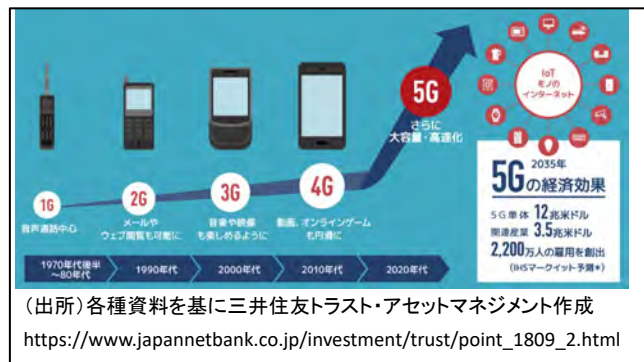
見方を変えると、世界規模の巨大単一機能市場が存在しており無線通信技術の進歩に伴い世界規模で同時に機能が移り変わり、時として iPhone のような想定もしない急激な市場変化が発生したりする。これは供給側にとって大きな魅力を持つ市場である一方で、極めてリスクの高いビジネスとなる。

例えば、年間 5 千万台の市場を狙ってこぞって参入した国内大手電気メーカーの携帯電話事業は iPhone の登場で一気に沈んでしまった（とはいえ 2000 年からの 10 年間だけでも 20 兆円を超えるビジネスは実行できた）。また、2 G 携帯電話の最盛期に世界市場の 70% のシェアを有していたフィンランド・ノキア社は iPhone と Android の席卷、すなわちスマホとの覇権争いに敗れて携帯電話事業を 2016 年に売却してしまった。ことほど左様に巨大規模の単一機能製品市場は技術や機能の変化で一気に様変わりする。個人消費市場は移ろいやすい。

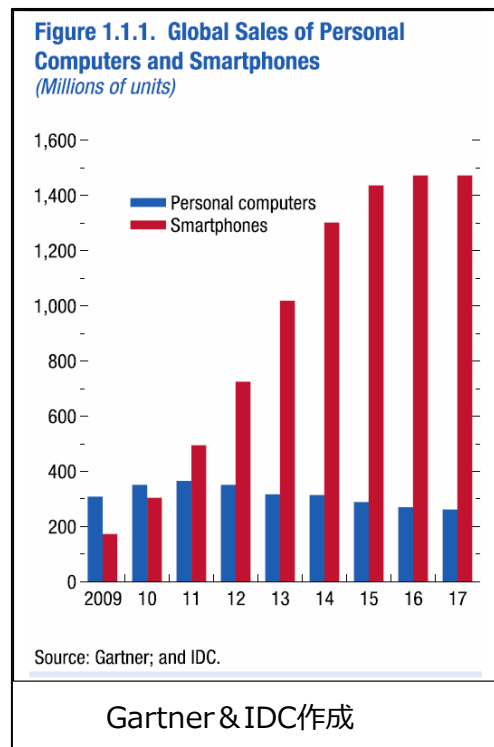


1-6. 5G はスマホにインパクトを与えられるか

さて、この観点から今のスマホを見ると無線通信技術の進歩に伴う今後の市場変化はどのように占うことができるだろうか。つまり 4 G の次の無線通信技術の進歩が携帯端末市場、とりわけスマホ市場にどの



ようなインパクトを与えるかを考える。4 G の次の 5 G, ポスト 5 G では高速大容量、低遅延、多数同時接続が謳い文句になる。これはきっと今のスマホをより便利に使いやすくするだろう。利便性というものが定量化されるのであれば量的変化として必ず向上する。しかしその量的変化が質を変えるところまで来るだろうか。高速大容量の利点として 4 K, 8K 画像の転送が高速になり高画質ビデオプログラムが簡易にスマホで見られるようになる、というのがあがるが果たして手のひらサイズのスマホでじっと座って何時間も番組を見るだろうか。そもそも小さな画面では 4 K, 8K のすごさは伝わりにくい。ほかの用途はどうだろう。スマホゲームのレスポンスが上がりリアリティが向上する、スマホベースの仮想現実 (VR) が低レイテンシでよりリアルになる、などは期待できる。しかしこれらがかつて 2 G の携帯電話が人と人のコミュニケーションに革命をもたらしたように、あるいはかつて iPhone が掌でインターネットを縦横無尽に使いこなせるようにしたように、次世代通信のスマホが生活に革命といえるほどのインパクトを与えることができるかどうかと言えばあまり肯定的には答えられない。すなわち、年間 15 億台近いスマ



ホ市場に次世代通信技術が劇的な変化を持ち込むとは考えにくい。

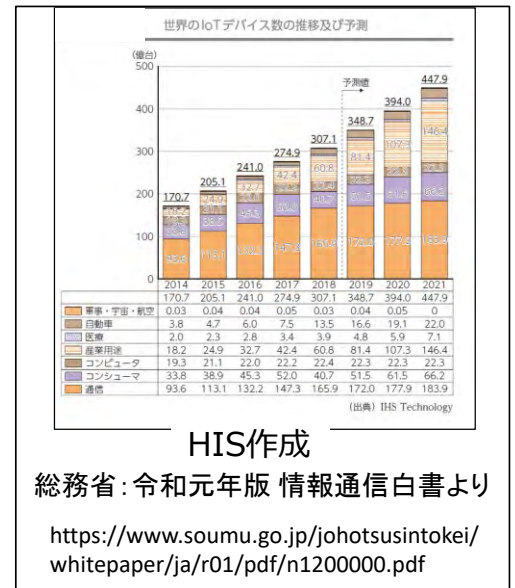
LTE や 4 G が人々の生活にびっくりするような変化を持ち込まなかったように 5 G も個人の携帯端末に革命を起こすような機能を持ち込むのは難しいだろう。勿論、年間 15 億台近いスマホ市場は新興国を中心に益々拡大はする。その上、5 G 技術により様々なサービスが付加されるようになるだろう。しかし、その変化は連続的であり既存の事業者が容易に準備できるものでありそれゆえに新興プレーヤーや Destructive な技術が突如として登場することはない。そして端末事業者は淘汰され益々寡占化が進む。5 G 技術を受けて連続的に進歩するスマホは、半導体デバイスにも大きな革新を要求しない。基本的にはより高速に、より大容量に、そして機能の進歩がムーア則の限界でサイズのまたはコスト的に難しくなった分は HIP が受け持つ。これらはこれまでのムーア則の延長であったり、その限界に備えて準備されている技術の展開で賄われる。

1-7. 5G は森羅万象との作用で革新を興す

当然のことながら 5 G は個人消費者が属する端末市場の規模拡大と掌の中に提供されるインターネットサービスの拡大に寄与する。しかしこの分野で新しい産業の萌芽を作り出すことはないのではないか。むしろ、最新の無線通信技術である 5G は個人消費市場ではなく社会インフラや大きな社会システムの構築へ対象市場を移す。そういう意味でこれまで 1 G から無線技術が作り出してきたキラーアプリケーションの対象が、初めて個人市場から離れ社会システムに移る。

5 G のスマホ以外で明確に見えている用途は自動運転自動車である。そして自動運転自動車も含めて IoT が 5 G のキラーアプリケーションといってよいだろう。これまでも IoT なる市場や技術は存在してきた。しかし、5 G 技術が後押しすることでその効果と期待値は飛躍的に向上する。対象となる Things は狭い世界のものに限られない。宇宙以外の森羅万象(Everything)が IoT の対象となる。IoE (Internet of Everything)である。IoT の対象は実に広い。現在でも 400 億個の IoT デバイスが存在しているということだが、2021 年の予測値は 448 億個でスマホなどの通信機器を除いても 264 億個の IoT デバイスがインターネットを介して接続されることになる。果たしてこれを多いとみるか少ないとみるかと考えると、IoT なるものの本質が把握できる。

世間で IoT の期待が喧伝されればされるほど IoT の対象分野は広がる。一方で、統計予測は現時点で見えるところしか計上できない。図「世界の IoT デバイス数の推移および予測」で示されている IoT 応用分野のカテゴリーは、自動車や医療、産業用 IoT など既存の市場から延長して推測できる範囲にとどまっている。当然である。未だ見えていない分野は計上しようがない。ところが、人工的、自然的にかかわらず地上での森羅万象においてその事物なり事象なりの物理量を経時的に把握、分析しその情報に対して能動的に反応することにより社会的に価値が増えたり、逆に価値の減少を食い止めたりすることができる分野は山ほどある。天気予報は宇宙から地上での天候に関わる森羅万象を把握し、そして通信で受けた情報を地上で分析しこれから起こる未来の気象の変化を予測、予報することで災害という社会



的価値の減少を少しでも防ぐことができる。宇宙からの気象情報把握は5GにもIoTにもかかわりはないが、森羅万象から情報を取り出し、集約し分析する過程は同じことである。人間が生活するところには常に地震、大雨、洪水、強風、地滑りなどの自然の驚異が存在する。また、橋や道路、高架、トンネル、斜面擁壁、水道、ガス電気など社会インフラの経年劣化による災害対策もますます重要になってきている。こうした物事事象のもつ物理量をIoT (IoE) を通して経時的に把握し、分析することで近未来の危険を予知し災害対策に役立てることができる。第2章で論究するが5Gの基地局は国土中に張り巡らされた各電柱に設置される。国土強靱化IoEデバイスが、そばの電柱の5G基地局に接続されエッジ又はセンターでAIにより常時監視され防災に役立てられる。このような分野のデータはIoT市場統計には入っていない。災害大国日本であれば、国内人口の10倍や100倍はこうしたIoTデバイスが必要になる可能性がある。勿論世界でも同じ市場の形成が予想される。

つまり、IoTの市場は今のところどのように発展するかは見通しづらい状況であるが、5G技術のキラーアプリの一つとして、掌インターネットから分離独立して新しい市場を形成し、社会生活の次なる革新を興す役割を果たす。

この無線通信技術が革新を興す対象市場の移行は、そのキラーアプリケーションに必要となる半導体デバイスのビジネスの仕組みをも一変させてしまうと考えられる。この考察は後述する。

“5G”は、3G→4Gの進歩の次の必然であるが、掌の周りで生活を更に便利で興奮に満ちたものに塗り替えてくれる速度とビット情報という物理量の単なる拡大技術ではない。“5G IoT”は4Gの通信技術的延長上にあるだけでなくiPhoneが生活に革命をもたらしたと同様に、不連続で新しい社会文化を生み出す革命的な変化のシンボルである。“iPhone”が単なる一企業の商品名にとどまらず「掌の上からの社会生活革命」の始まりを表現するシンボルとなったのと同様に、“5G IoT”という言葉が次世代の“これまでにない”社会の質的变化を作り出すシンボルとなる。

2. 2Gと半導体ビジネス

2-1. 半導体産業の礎；ムーアの法則がトレンドオリエンテッドな産業を築き上げた

半導体産業は近代社会の発展とともに成長してきた。黎明期から1990年に至るまではデジタル半導体は主にコンピュータの進歩と歩調を合わせてきた。大型固定コンピュータからPCへの変遷は半導体の微細化、高性能化、大容量化した歴史とリンクしている。むしろ相互作用を及ぼしながら、コンピュータが微細化、高性能化を要求し、その要求にこたえた半導体技術がコンピュータの進化を促進するという循環が発生した。特にPC/AT規格が業界標準になり、用いられるプロセッサがintel社によってx86として事実業界標準化されるとintelのMPUの進歩に合わせた半導体業界の進歩がトレンドとして描けるようになった。微細化の方向性はまさに直接の利害関係者であるintel社の幹部により提唱された「ムーアの法則」、すなわち「半導体の集積度は18か月で2倍になる」(別の表現もある)の経験則で、これが提唱されてから50年間半導体の進歩をドライブし、またその法則で半導体業界全体が協力して進歩のトレンドを作った。

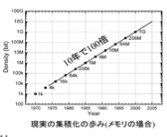
6 ムーアの法則 Mooreの法則 Intelの経営者であったGordon Mooreの言葉 (1980年)

「半導体産業のニーズとそれに答える工場生産においては、1.5年から2年で、集積回路の機能(トランジスタ数等)が倍になる。」

「マイクロプロセッサの性能(クロック周波数×命令数/クロック/秒)は、1.5年から2年で、倍になる。」

○ 1.5年で倍なら: $N = N_0 10^{0.2 \text{ year}} \quad (∵ 10^{0.2 \times 2} \approx 2)$
→ 3年で4倍・10年で100倍

○ 2年で倍なら: $N = N_0 10^{0.15 \text{ year}}$
→ 4年で4倍・10年で30倍



※ Mooreの集積度の推計は、1961年時点であり、
[G. Moore, Electronics, vol. 38 no. 8, (Apr. 19, 1965) 215-19] 主要の半導体メーカーの集積度の推移を示している。

AIST作成 <https://staff.aist.go.jp/shirohara/lecture/moore.html>

コンピュータ、PC のみならずあらゆるデジタル電子機器はこの法則の作り出すトレンドで開発計画を立て、製品設計、コスト企画を実行することができた。今考えてみればある意味、牧歌的な産業であったといえる。トレンドオリエンテッドに投資をし、開発し、生産販売すればよかった。MPU は intel という「ムーア則」の本家本元であるのでムーア則を実行するのは当然であるが、特にこの法則に完全に乗って市場を拡大したのが DRAM である。コンピュータや PC にとって DRAM は不可欠の部品であり、デジタル機器の性能を向上させればさせるほどより大容量なものが必要となるが、一方でムーア則に則った微細化低コスト化で製品価格は引き上げられなかったので DRAM では作り手も使い手も「ムーアの法則」様々であった。その効果もあり、またどの時代でも DRAM をコンピュータ、PC が必ず必要とするためこの法則は経験則ではあったが、期待則、指導則ともなった。これを電子産業の道標とするために米国の DARPA は研究機関や装置業界、半導体製造業などに国としての意図をもってムーア則が維持できるよう継続して働きかけを行ってきた。その効果もあって DRAM は製品が登場して以来、1 容量 1 トランジスタというセル構造は 50 年間変わっていない。材料や工法は進歩し、製造業者の変遷も起きたがムーア則を上手に使いこなし製品開発と製造投資を最も効果的に行った会社だけが生き残っており、今ではそうした企業が寡占化産業のうまみを謳歌している。

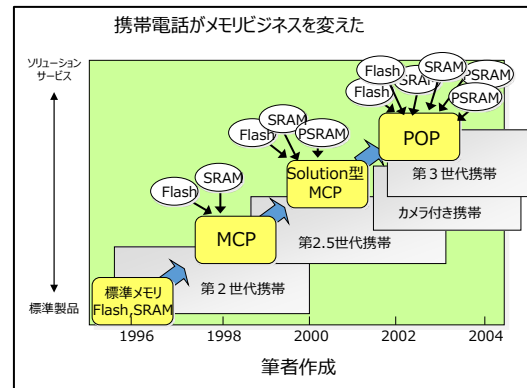
一方、ムーア則で最も恩恵を受けた半導体ユーザー側産業は、PC 業界であった。intel の自社製品消費市場開拓のための独特のビジネスモデルにより、PC 産業育成策とメモリ産業をドライブするムーア則で、PC 産業は台湾の EMS を中心に確実に進歩を続け今では年間 2 億台を超える生産を行う大規模な産業分野になった。現在はこの流れはサーバー業界につながっている。因みにサーバーの出荷数は年間で 300 万台程度であり 1 台当たりの CPU、メモリの使用量と製品の販売金額は大きい数量的には世界的にも大きな数量の産業とは言えない。これらは、基本的には法人ユースが主力である。

半導体産業は、80 年台、90 年代はほぼコンピュータ、PC 産業にドライブされ、MPU と DRAM がデジタル半導体産業のドライバでありムーア則に従った性能とメモリ容量を維持してきた。こうして半導体産業の主力デバイス事業もそれを使う半導体消費ドライバたる電子機器もトレンドオリエンテッドな産業ユースに支えられて伸びてきた。規模は最大でも年間 3 億台（PC）を超えることはない。半導体産業としてはシリコンサイクルの波があるにせよある意味産業用市場として極端な変動の生じない安定した市場であった。

2-2. 2Gの携帯電話が半導体産業のビジネス・プラットフォームを変えた

上述のようにこれまで PC を含む産業用市場で順調に伸びてきた半導体市場に 2000 年以降に新たな市場が加わった。2G の無線通信技術のキラーアプリである携帯電話が登場したのである。携帯電話は半導体の集合体である。半導体の携帯電話市場にはこれまでの電子機器にはない大きな特徴がいくつかあった。それは、①すべての部品が究極の小型化を目指さなくてはならないこと、②数量がこれまでの最大規模の PC をはるかに超えること、そして③市場が個人消費者で機能に対する嗜好が移ろいやすく製品寿命サイクルが極めて短いこと、などである。

このうち特に①究極の小型化については、半導体の産業プラットフォームに大きな革新を求めた。これまでの半導体パッケージは特にメモリについて、PC を始めとするセット側の要求と産業界としての生産融通性を担保するために業界標準団体 JEDEC で規格化したものしか生産できなかった。これがポケットサイズとして 100g, 100cc を狙う携帯電話には全く合わない。また、Flash と SRAM の異種メモリを別々に配置する



ほどのスペースが得られない。そこで、JEDEC 規格にない製品に応じた小型パッケージに異種メモリを複数搭載した。MCP (Multi Chip Package) の登場である。20 年以上たった今、業界で注目されている HIP の始まりである。更に携帯電話の機能が高度化すると、単品のメモリダイでは容量が足りず複数種類のメモリをそれぞれ複数個、1 Package 内に搭載する必要が生じる。チップの設計も汎用品の設計から携帯電話用に変更するだけでなく、Package に搭載しやすい構成に変更されたりもした。これまで Package 技術は半導体開発の下流に属していて、決まりきった JEDEC 標準規格にあわせて設計されたシリコンダイをコスト安く詰め込むだけの仕事であったものが、顧客の組み合わせ要求に対応して顧客に提案する立場にもなった。今では大小含めてすべてのメモリメーカーが唱える「メモリ・ソリューション」なる言葉が業界で初めて登場した。

携帯電話によって半導体の産業プラットフォームが変わったので、事業者間の下克上也起こった。これらの要求にいち早く対応した半導体メーカーが 0% のシェアから 70% のシェアを一気に勝ち取る事例も出てきた。時代が変わるときには新旧のプレーヤーの間で入れ替わりにまつわるエピソードが生じる。あるメーカーでは携帯電話向けメモリ・ソリューションで SRAM では容量が足りないためリフレッシュ電流を極限まで下げた DRAM 技術を開発することになった。世界で初めての DRAM 技術によるモバイル向け疑似 SRAM である。この時、このメーカーでは DRAM の事業責任者は「DRAM はコモディティであって、訳のわからない『ソリューション』などには開発できない」と断った。この DRAM 事業はほどなくして他社に売却された。一方、三星電子はそのメーカーのブランド製品向けに疑似 SRAM を開発し、しかも MCP Package まで専用に開発し同業他社ブランド向けに生産出荷した。今では三星電子は、スマホ用モバイル DRAM の雄となっている。さほど規模の変わらなかつた 2 社の DRAM 事業が片や売却、もう一方は何兆円ものモバイル用 DRAM メーカーになっているのは事業判断の難しさと醍醐味を示している。

これらの事象は、三星電子の例だけ除いてすべて日本メーカーで起こったことである。世界初の HIP、非 JEDEC 展開、携帯電話に特化した Flash と SRAM の素早い開発、DRAM をモバイル用に変更 (因みに上記例では三星より早くモバイル用疑似 SRAM が日本の非 DRAM 事業部で量産化され

た)、など携帯電話という半導体の新市場が登場したタイミングで一時的はその後の世界をリードするチャンスをも日本の半導体産業が持っていたということである。因みに 2G の携帯電話では世界市場に対し大なり小なりソリューションを提供し、メモリ・ソリューションはほぼ日本メーカーが独占した。

半導体の携帯電話市場におけるもう他の特徴である②これまでの半導体市場にはない数量規模であること、③個人消費市場で製品寿命サイクルが短いこと、はムーア則に従って技術トレンドをフォローして産業系市場を相手にしてきた半導体にとっては扱いが極めて難しいものであった。Package 内で複合化されソリューションを構成している製品である一方で、携帯電話はコンシューマー製品であり市場競争での勝ち負けでその個別製品の数量が大きく変動する事業である。ましてや、複合化されたチップには、ファンダリで作ったものや他社から裸のダイで供給を受けたものもある。産業系ビジネスでは考えられないようなサプライチェーンマネジメントとダイナミックな生産管理、加えてコンシューマー系市場は価格の変動も大きく原価管理も厳しくなる。

市場が変化するという事は、チャンスは増えるが同時にこれまでにないリスクも伴っている。しかし、こういうリスクを乗り越えて事業拡大に挑戦しない限りは没落するのみだろう。半導体が動きの速い事業になってくるとことは勝つか負けるかの二つしかない産業になってきたということである。以前は「半導体は投資タイミングが勝負」と言われていたが、今では様変わりしている。半導体は、全ゆる事業判断で Agile でなければ生き残れない産業になっている。もう国内には一定規模の半導体メーカーとしてキオクシア、ルネサス、ロームしか存在しないが更に小規模な事業者であればなおさら俊敏さで勝負しなければ生き残れない。

2-3. 半導体メモリ・ソリューションがなぜ日本で起こったか

2G の携帯電話向けメモリ市場では国内および世界市場に対し日本メーカーが大なり小なりソリューションを提供し、メモリ・ソリューション (MCP) はほぼ日本メーカーが独占した。一瞬とはいえ、なぜ日本がこうしたポジションを得ることができたか。ここに 5G 向けの半導体ソリューション (メモリに限らず) ビジネスへの教訓を見ることができる。

2G 携帯電話では件の 100g, 100cc 戦争において日本メーカーが世界で圧倒的に強みを発揮していた。その成果をもって欧州では三菱が GSM で気を吐いていたし、松下通工は台湾で大人気になっていた。携帯電話の小型化勝負で日本のものづくりが強力な武器になっていた。通信方式こそ違え、日本の携帯電話端末のものづくり技術は世界のトップを走っており、それゆえに半導体に対する要求も世界で最も先端を行くものであった。

また、日本の半導体産業には長年培ってきた Package の技術があった。前述のとおり、半導体 Package 技術は JEDEC という世界基準がありその範囲でしか技術の展開ができなかったが製造コストの削減や JEDEC 新規格の提案など技術力は積み上げていた。日本は当時、半導体産業は IDM (垂直統合開発生産会社) の形態をとっており技術者のレベルも設計、前工程、後工程 (組立およびテスト) で人材的には格差はなかった。

一方、欧米の半導体メーカーは組立技術と生産にほとんど興味がなく、ほぼすべてを台湾と他のアジア地域での外部委託または子会社での下請け開発と生産に任せており Package で付加価値が付くとは考えていなかった。海外からの大規模な下請け生産を一手に引き受けていた台湾の受託産業は前工程 (ウエハプロセス) に力が入っており、Package 技術者の給与待遇には大きな格差があり開発ができ

ような人材は確保できず、更に、薄利多売の組み立て生産であるため JEDEC 標準規格に無い新規案件を引き受けられるような産業形態ではなかった。

こうした状況で、半導体業界での Package の新規技術テーマは一部を除きほぼ日本から出てきており、Package 技術の蓄積は日本に最も豊富にあった。今、ムーア則の限界に直面し、これまでシリコンダイ上で集積していた機能を Package 内での異種チップ統合で実現しようとする技術 = HIP に対する日本の半導体技術への海外から期待の根拠はここから始まっている。

日本の半導体後工程の 2G 携帯電話世代での強みは組立だけではなかった。そもそも JEDEC 標準が存在し、Package の形状が規格化されてきた背景には、高価な Package 金型を共通化してコストを下げるという目的だけでなく Package 後のテスト問題が大きくかかっている。Package 後のテストは機能テストに加え品質テストも含まれる。品質テストは高温（85℃から 125℃）で長時間動作（数時間から 24 時間）確認する Burn-In という工程が含まれるが、これを行うには高温に耐える Package 個片用のソケットとそれを試験装置に配置するための Burn-In ボードが（製品種類）×（Package 種類）×（生産ピーク数量）だけ必要になる。新規 Package を起こせばその都度にこのソケット、ボードの開発工期と開発費が必要になる。携帯電話の短い製品サイクルに間に合わせたメモリ・ソリューションを実現するにはこの問題を軽減する技術対策が必要となる。こうした技術対策に対応できる技術者を日本の半導体メーカーが自社内に有していたことが強みとして発揮された。

2 - 4. 2G 携帯電話向け半導体ビジネスによる 5G 向けへの教訓 ; その 1

2G の携帯電話向けメモリ市場で世界で初めてメモリ・ソリューションを提案し、一時にせよ市場を制覇できた成功に 5G 向け半導体ビジネスへの教訓が、見て取れる。

先ず第 1 の教訓は、市場の大きな転換を素早く見て取り過去の呪縛から逃れて新しい領域飛び込むことである。大きな変化の時には、周りがどう動くかをしっかり観察してから失敗しないように動き始め後追いつめるのか、勿論よく考えることは必要だが Agile に状況に対応して他社に先行して新しい領域を作ってしまうかでその後の市場でのポジションは大きく異なる。巷間言われる「イノベーションのジレンマ」はどこにでも存在する。基本的には既存プレイヤーは動きが遅い。大きな市場を持っていて技術、人材、装置、工場などのアセットが重い。それだけでなく、今あるもの、持っているものを続けたいという保守的心理が強く働く。それ故に大きな市場の変化の時は大チャンスである。GAFA は、2G の時代に誰も市場に登場していないか小さな存在であった。敵がアセットを持っていない領域に市場を引きずりこめれば勝てる。しかし Agile でなければならぬ。新興プレイヤーの俊敏な動きで旧来アセットを多く持っている敵は焦る。5G では、既存のスマホベースの市場や過去のアセットの延長上でもうすでに勝敗の決している市場にリソースを投入しても勝ち目はない。新しいサービスを狙い次の“GAFA”たろうするプレイヤーのいる領域をよく分析し日本の半導体が強みを発揮できる新しい市場にリソースを集中するのが良いだろう。具体的提案は別項で論ずる。

2 - 5. 2G 携帯電話向け半導体ビジネスによる 5G 向けへの教訓 ; その 2

第 2 の教訓は、対象とする市場の最先端プレイヤーの間近に近接することである。間近に近接することで変化の動きを体感し提案が可能となる。頻りに接触することで提案のレベルをどんどん上げることができる。できれば対象市場内で最も競争が激しいところで活動を行う。複数のユーザーで新提案の検証が行われる。

この市場で勝つことができればその他のすべてのユーザーを獲得するチャンスが生まれる。2Gの携帯電話では日本が世界の端末機開発の中心地であったので、これまでにないメモリ・ソリューションの検証に最適で半導体産業の新ビジネス・プラットフォームを作ることができた。この意味では、5Gによる新しい半導体ビジネス機会の創出のためにこれまでにない新しいサービスが日本で始まることを強く期待したい。世界のほかの地域で5Gによるサービスのイノベーションが起こりそれが普遍化しそうであればその地域にどっぷり浸ることが重要であろう。5Gへの教訓は、まずは誰でも考えそうだが自動車工業の日本の強さに密着することだろう。

しかし半導体の顧客は、電子制御機器開発者であるので必ずしもトヨタやホンダではない。また自動運転の電子制御開発はあまりに参入者が多く、勝算は読めない。むしろ、Woven Cityなどで試験される自動運転ベースのスマートシティのインフラの半導体市場を攻めることではなかろうか。これならすぐそばにありインフラに関わる電子産業は多い。自動運転のスマートシティ社会実験は既に中国各地で雨後の筍のごとくプロジェクトが進められつつある。しかし、電子産業総がかりのスマートシティは世界中にも稀である。是非、トヨタを軸とする新プロジェクトではこの分野で新しい市場を作り出してもらいそれに密着して成長する日本の半導体産業に期待したい。特に注目すべきは各種センサーを有したIoT (IoE) であろう。スマートシティが実運用されればその中には無数のセンサーが必要となる。視覚だけではない。触覚、非接触、温感、モーション、ありとあらゆるセンサーが5Gで連携する。ソニーのCMOSセンサーは世界市場を制覇しているが、スマホ、自動車だけでも手一杯と思われる。視覚センサー市場はますます拡大するが、同様に他の4感に関するセンサーも爆発的な需要を持つことになるだろう。センサーの信号をデジタル変換するアナログチップも山ほど必要になる。アナログ技術者は世界的にはまだまだ日本が強い（もうほとんどリタイアしているが）。工場も、何兆円もの投資は必要なく、今の日本の半導体工場をリニューアルするだけで大規模な市場を創出できるかもしれない。センサーとアナログデバイス、そしてそれをIoT化するエッジデバイス。それを集約するMEC（スマホや自動車向けとは異なるかもしれない）。5Gとスマート社会には山ほど半導体ビジネスのチャンスがありそうだ。

2-6. 2G携帯電話向け半導体ビジネスによる5G向けへの教訓 ; その3

第3の教訓は、新しい提案には必ず自らのコアコンピタンスを活かすことである。2G携帯電話メモリビジネスでは日本の持つ後工程（Package、テスト）の技術蓄積を活かしたことで強力なポジションを得た。ビジネス規模や生産力では圧倒的に強い台湾のOSAT（Outsourced Semiconductor Assembly and Test）でも勝てない世界を作れたのは高い技術力を“有効”に活用したからである。JEDECの呪縛に縛られて衰退の一途であった日本の後工程がその瞬間だけにしても世界をリードできたのはPackageを技術者の手による技術オリエンテッドな動きにしなかったためである。市場オリエンテッド、ニーズオリエンテッドな力で技術を制御することで埋没していた技術が光り始めたのだ。コアコンピタンスは使いどころが重要である。技術力の高さばかりを喧伝して潰えていった事業のなんと多いことか。日本の弱さでもあろう。5Gへの教訓については、第2の教訓で述べた日本の技術力アセットの活用である。5G関連市場にはセンサーとアナログ技術者の活躍余地が巨大に存在していると考えられる。アナログ半導体では経験と勘による技術力が最も重要である。OBも含めた日本のアナログ技術者を活性化する道があれば5G産業に大いに貢献できる。

2-7. 2G 携帯電話向け半導体ビジネスによる 5G 向けへの教訓 ; その 4

そして、最後第 4 の教訓は、勝ちたいサービスは複合化することである。確実に他社より効率的、効果的に運用できるのであればサービスは複雑化させた方が良い。なぜなら、よく制御された複雑さ(Well controlled complexity とでもいうか) は敵を混乱させる。2G 携帯電話用半導体メモリは、半導体 Package の中にソリューションを作り出した。単なるメモリ詰め合わせではない。顧客の要求に合わせてコストをさほど変えずに種類の組み合わせや容量の変更が容易にできるようにした。加えてファンダリ生産委託、他社からのダイ購入、組立の外部委託など管理運営を上手にこなせないとコストがとたんに跳ね上がる仕組みの中で最適解を実現するメーカーが存在した。SCM ですら戦いの武器になる。無用の複雑さは自分の首を絞めるだけであるが武器になるビジネスの仕組みが作れば強い。3G 携帯電話用半導体ビジネスではこの点の真逆の事象が起こった。これは後述する。5G で複合化の対象は将に IoT (IoE) そのものではないか。前述の通りセンサー、アナログ制御、通信、メモリ、デジタル制御、究極の低消費電力制御、そして FW。更には個別分野の IoT を統合する MEC。ありとあらゆる電子デバイス技術の統合が必要になる。その上、種類は無数に出てくるだろう。しかし IoT がそのまま社会の需要にこたえようとすると確実に技術が発散し数多の小規模なビジネスばかりが発生することになる。これでは産業は発展しない。こういう時には必ず次の時代の巨人になる象徴的プレーヤーが登場する。PC の intel と Microsoft、無線通信の Qualcomm、携帯電子機器の Arm、スマホの Apple、コンシューマーベースのインターネットの GAFA、それぞれの時代のキープレーヤーが花形産業の主役となった。無数の種類の IoT で統合されるスマート社会 (スマートシティだけでなく、IoT で高齢化を乗り越えるスマート田舎もあるかもしれない) の花形キープレーヤーは、IoT 技術の統合、サービスの統合をプラットフォームに仕立て上げられる事業者であろう。そしてそのプレーヤーは決して上記のこれまでの新興巨人ではないだろう。

3. 3G、4G と半導体ビジネス

3-1. 3G の高速大容量通信が半導体メモリの更なる大容量化を要求

2G の最大メモリは NOR 型 Flash 2 ダイ + SRAM 2 台の 4 段重ね(1Package 内に 4 個のメモリを重ねる)であった。2 ダイから始まって、3 ダイ、4 ダイ 1Package まですべて日本の 2G 携帯電話向けに日本半導体メーカーが開発したものである。「ガラパゴスの日本携帯だからだ」など知った風な意見もあるが、現実には米国モトローラや欧州エリクソン、そして携帯電話の雄ノキアもこぞって日本の携帯電話機向けメモリを欲しがった。モトローラは携帯電話向けメモリの開発を日本半導体メーカーと提携した。“Mobile Flash”はモトローラと三菱電機の間共同開発品のロゴである。また、欧州最大の半導体メーカーである ST マイクロエレクトロニクスも同じく三菱電機から Flash の OEM 供給を受けている。更に、三星電子、LG など日本を追いかけて携帯電話の高性能化、小型化に必死で取り組んでいた韓国メーカーは日本製 MCP を確保しようとし、三星電子の半導体事業部は日本から MCP 技術を導入までした。2G では携帯電話市場が求めるメモリと Package 技術の世界の中心地であった。Package についてはそれまで営々と総合半導体メーカーの中で前工程や設計と違わぬ優秀な技術者が縁の下の力持ち的な仕事を進めてきた技術の蓄積があった。これまで PC 半導体市場向けには光の当たってこなかった部隊であったが、携帯電話の半導体市場が沸き起こった時点でその蓄積したものが花開くことになったのである。

今でいう HIP の礎は明らかに日本で作られた。因みに日本半導体メーカーにとっては最先端製品で対

応できる生産量に自ずと限りがあり、しかも日本携帯電話が世界の最先端であったため、もともとノキアとの強力な関係があったシャープ以外は海外への供給はほとんどできなかった。

そうしたなか 2000 年に世界で初めて本格的な 3G 携帯電話が日本で登場した。それまでの 2G は日本では独自の PDC 規格であった（KDDI は CDMA）が、3G の無線通信規格は国際統一規格の WCDMA に切り替わり、通信速度が速くなり通信トラフィックが増大した。この処理をするために携帯電話機プロセッサのプログラムが複雑になった。同時にカメラの解像度も上がり画像も含め記憶するデータ量も増えメモリに対する要求は、ムーア則によるメモリの大容量化スピードを超えて一気に数倍になった。

3-2. 世界初 POP(Package On Package)の登場

3G 端末では当時のメモリの最大容量をもってしても容量不足で 8 ダイを 1Package に入れる必要が出てきた。当時でも 3 段、4 段の積み重ねは技術的難易度が高く、日本国内でしか生産できなかったがここにきて携帯電話機メーカーは、日本の半導体メーカーの「要求すれば何とかやってしまう」という体質を知っていて 8 段の積み重ねを要求してきたのである。これに対応した技術は 2 種類あった。

あくまでも力業で 8 段を 1Package に積み上げる方式と、4 段重ね Package 2 個を 2 段重ねする方式である。前者は、2G で創出された MCP で、後者は世界初の POP(package On Package)である。何故この 2 種類が生まれたかといえば、最終コストまで含めた事業マネージメントを行ったかどうかの違いである。前者はシェアが低いメーカーが携帯電話端末メーカーから打診されて一発逆転を狙って開発を急いだことで実現したものである。後者は、世界で初めて MCP の生産を始め圧倒的なシェアを持っていた半導体メーカーから提案されたものだ。

携帯端末メーカーでは、1Package の方が少し背が低くなるのでセットの機構上低背を望んだ会社を選択した。前者の 8 段積みを提供した会社はそのことが原因でメモリ事業を分離し他社と統合させることになった。後者は、3G の初期でますますシェアを伸ばした。

当時の MCP に搭載するダイは、システムメモリであったので全て良品ダイでなくてははいけなかった（今の MCP は基本的にはストレージメモリで NAND のほぼ良品ダイ『Mostly Good Memory』で事足りる。）。Package 完成後に Final Test 問われる完成品動作試験と Burn-In などの品質確認試験が行われるが高温長時間の試験ではウエハ状態の試験ではどうしても落とせなかった不良品がはじかれてしまう。当然完成品のコストはその最終試験の歩留まりに大きく左右される。8 ダイの積層 Package 品は 1 ダイごとの最終歩留まりの 8 乗になる。1 ダイでも不良になれば残りの 7 個の良品ダイも連動して不良品の仲間になる。一方、4 ダイ積み上げ Package の 2 段積み品は仮に 1 ダイが不良になっても残りの 3 ダイを連れ子にするだけで、他の良品 4 ダイには影響しない。8 個も複合化すれば全体は当然大きなコストになる。

3G の初期には、端末コストの中でメモリコストが最も高く 4,000 円を超えていた。8 ダイ 1 Package 積み上げ品はその 4,000 円を売るために 1,500 円以上の不良品を出していた。一方の POP 方式は



同じ 8 ダイを基板上に積層しても 800 円ほどのロスで済む。これまで述べた通り携帯電話の生産 Volume はコンシューマー市場故に大きい。月産 100 万個の 8 ダイ搭載製品を作れば単純 MCP 方式は POP 方式に比べて年間で 84 億円のコスト差が生じる。実際のところ単純 MCP 方式を選んだメーカーは大赤字となり他社との合併により本体から外された。

ここに、今の HIP への教訓がある。8 ダイの 1Package 化は今でこそ NAND 製品では当たり前だが（尤も NAND でしか行われていない。）、当時の組み立て技術からすれば極めて難しい課題であった。一方、多段ダイを内蔵したパッケージを更に積み上げる発想はどこにもなかった。しかし岡目八目で、必ずしも Package 技術ではなくコストも含めたマーケティング分野から POP の発想が生まれた。

いったん方向が定まれば後は Package 技術者が何とかする。日本の技術にはそういう力があるとの確信がマーケティングサイドにあり、既に MCP によるメモリ・ソリューションで自分たちの役割と可能性に気づかされた Package 技術者との融合が功を奏いたのである。それまで技術者の立場からは表舞台で光の当たったことのなかった Package 技術がマーケティングの力で覚醒した。

一方の 8 段積み上げ技術は技術的には果敢なチャレンジで、それに成功はしたがビジネスは没落した。何が奏功し、何が没落の道を開くか。同じ程度の技術があってもドライブのされ方で全く違う結果になる。HIP が技術の立場だけでドライブされたり、マーケティングからの方向付けが海外の「使う側」から示されるものだけで動く残念な結果に陥ったり、単なる下請け開発屋になってしまうのではないだろうか。HIP を必要とするマーケティングの力がなくてはますます技術は部品化し衰退していこう。

3 - 3. POP がロジックとメモリのインテグレーションを実現

3G 携帯電話も進化すると、携帯電話のメインのロジックチップが無線通信を制御する BBIC Base Band Integrated Circuit)とデータの加工と表示をつかさどる AP(Application Processor)に分かれる。特に AP は、データの加工のために大容量の RAM を必要とするようになりこれまでの SRAM や疑似 SRAM の容量では足りなくなってきた。技術力のある DRAM メーカーは PC 用 DRAM とは別に性能を落として消費電力を下げる携帯電話用 DRAM = Mobile DRAM を開発し始めた。問題は、小さな携帯電話の中のどこにこれを配置するかである。

NEC BASEBAND/APPLICATIONS + SAMSUNG MEMORY PoP

- Bottom package: single die baseband/application processor – NEC Medity M2
 - 629 balls at 0.5mm pitch (five rows)
 - ~ 1100 bumps (SnAg) at 225µm pitch
 - 70µm standoff height
 - 8.5 x 8.5mm die is 100µm thick
 - Die is underfilled and overmolded
 - 1+2+1 substrate with 25µm L/S and 75µm vias; 360µm thick
- Top package: Samsung two-die memory stack (SDRAM, One NAND)
 - 152 balls at 0.65mm pitch
 - Top die 70µm thick, bottom die 130µm
 - Preapplied die attach 15 – 20µm thick
 - Two-layer substrate is 130µm
- Total mounted height of PoP 1.55mm, and is underfilled

3/2009 IC PACKAGING: Global Trends, Technologies and Next Generation 3D Solutions 19

NEC/Samsung POP AP+DRAM+NAND
:Prismark Partners資料
<https://www.testconx.org/archive/archive2009/2009prior.pdf>

Mobile DRAM は低消費電力とはいえリフレッシュ動作をするため発熱する。Flash は熱がかかるとデータが消えるので一つの Package の中に入れるわけには行かない。しかし、いかに Package を Mobile DRAM 向けに小さくしてもそれなりに基板上の面積を取る。更に、AP の側は DRAM の信号遅延を極限まで抑えたい。そこで考えられたのが AP と Mobile DRAM を 1 Package に入れる SiP 方式である。

携帯電話用に MCP で始まった複合ダイ Package は携帯電話以外でロジックチップとメモリチップの 1Package 化で SiP と呼ばれる領域を切り開こうとした。System in Package である。しかし、実際にはなかなか成功事例ができない。Package 業界では Package のロードマップに単純複数ダイ詰め込みの SiP を入れるが、実際に製品を作るとなると、両ダイの歩留干渉が起こる。メモリと 1Package にしたいほ

どのロジックチップは高性能品であるのでダイコストも高い。そのロジックダイが、メモリの不良で Package 化されてから不良の道連れになるのでコスト的な問題になる。メモリメーカー側は責任を取りたくない。そういったことで一般には SiP の波は広がらなかった。

3G 携帯電話のコアチップの一つである AP のコストは高い。DRAM を携帯に搭載するのは 3G が一番最初であり不安もある。そこで、POP 用下部パッケージで最終試験を終えたロジックチップと同じく POP の上部パッケージで最終試験を終えた DRAM をパッケージの積み上げ POP 方式で積み上げたことにしたのである。主導したのは TI などの AP メーカーであったがこの動きを最も喜んだのは DRAM メーカーの三星電子であった。

三星電子は携帯電話用メモリとして SRAM と疑似 SRAM を MCP 用途向けに Flash メーカーへ出荷していたものの、主導権は全て Flash メーカー、特に日本メーカーに握られていて自社製品では携帯電話機に採用される道がなかったのである。そこに POP 方式ながらメモリ製品については、製造→Package 化→最終試験という流れを自らの製品として実行できる道ができた。ようやく、ダイレクトに携帯電話メーカーへのマーケティングができるようになる（MCP 用部品ビジネスではできなかった）。それだけでなく、ほとんどつながりがなかったロジックチップメーカー（最初は DSP 製品 OMAP の TI 社）と直接会話ができるようになったのである。ここから三星電子の携帯電話向け（スマホ含む）メモリ事業の快進撃が始まるのである。

この時の POP の下パッケージは TI 社が委託した Amkor 社（米国）から供給された。上部は三星電子自ら作った DRAM であり Package は三星電子から供給された。最初の製品は FOMA と言われる三菱電機など日本製の 3G 携帯電話であった。当時は、1 フットプリント（PCB 基板上の 1 個のチップをはんだ付けする領域）の上に POP 用の別々の Package を携帯電話メーカーが個別に購入し、携帯電話アセンブリ工場で POP として接合する方式であった。

既に 3G のメモリでは POP が主流になっており、3G の初期の 70% の機種が POP メモリを搭載していたため POP 方式のそのものの導入バリアは低かったが、構造的には新構造開発が必要であり、日本の携帯電話メーカーがロジック+DRAM の POP 方式の商業化を推進した。一方、POP に搭載される半導体メーカーとしては独自に Package 品を作り最終試験まで完了した完全なチップを提供すればよく、POP に統合した後の不良で相手のチップを殺すことを気にせず済むため SiP としては喜ぶべき方向であった。特に、Mobile DRAM は温度でリフレッシュ特性が変わるため自身の Package で最終試験までできた利点は大きい。

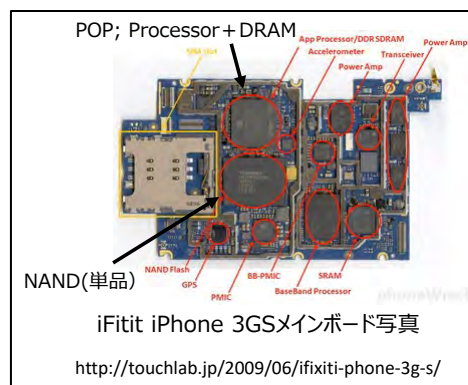
3-4. POP が iPhone に採用され本格市場形成へ

このように POP 方式には、ロジックチップメーカーと DRAM メーカーがそれぞれ自社の製品として独自に最終試験まで含めて製品化したものを組み合わせれば 1Package 製品と同じ効果を発揮できるということで低コスト化と高品質化が同時に追求でき加えて総合的に SCM がより効率的になるなどの利点があった。

POP 方式は、広義の SiP パッケージであり本格的な HIP の始まりであった。3G 携帯電話が端末として高性能化と小型化を求められ、その結果システムの機能、異種チップ実装要求を半導体 Package(1 フットプリント)の中に実現した。これ以前には DRAM とプロセッサを統合する場合、SoC の中に前工程プロセスで組み込み DRAM を搭載するしかなく、非常に高コストになりまた搭載できる DRAM 容量も極めて限られていた。POP によって携帯機器におけるプロセッサと DRAM の組み合わせ方に大きな広がり新しい産業の方向性ができた。

この高性能プロセッサと DRAM の SiP 内組み合わせとして POP 方式が業界に完全に定着する大きな動きが 2007 年にあった。6 月に発売が開始された初代 iPhone(2G) からプロセッサと DRAM が POP で統合されて製品化されたのである。それまでの POP 方式の推進者は、プロセッサ側の TI 社であったが必ずしも携帯電話業界の主導権を握るプロセッサプレーヤーではなかった。また、当時の携帯電話業界のプロセッサの雄、Qualcomm 社は SiP として別方式を選択していた(後述)。

iPhone がスマートフォンという革命的な携帯端末を提案し、特に 2 機種目の iPhone3G で爆発的な世界市場シェアを獲得すると携帯電話機メーカー各社はスマホに舵を切った。大人気の機種として巨大なビジネスを始めた端末で最も重要な部品であるメインプロセッサとメインメモリの位置を築いた Mobile DRAM の組み合わせ方として POP 方式が選択された。これが業界の流れを決定づけた。1990 年代後半からメモリの複合パッケージである MCP が始まって 10 年たち、その時点では数多の SiP 方式が提案されていた。3G の従来型携帯電話では使われ始めていた POP であったが、他にも Qualcomm が選択していた PiP(Package in Package)など新型 SiP パッケージの提案は百花繚乱であった。しかし、巨大ビジネスを作り出した iPhone が選択した SiP 技術が世界のお手本となった。



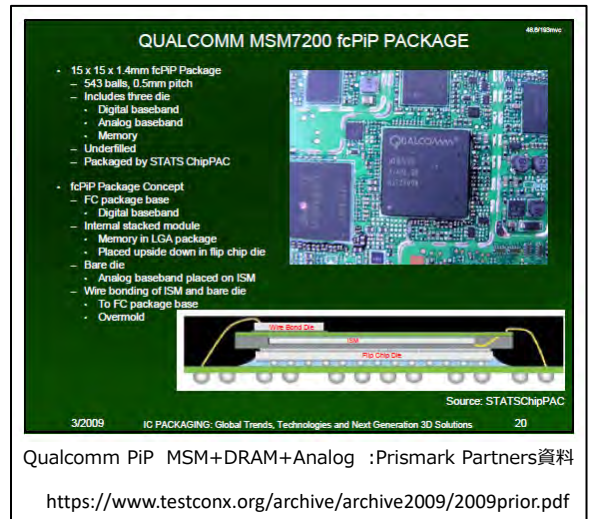
現在の iPhone においても、InFO(Integrated Fan-Out) という FOWLP(Fan-Out Wafer Level Package)技術による改良はあるにせよ、基本的には POP 構造を継続している。日本の 3G 携帯電話でメモリ POP が始まって以来 20 年、ロジックとメモリの合体型 POP が日本の 3G で始まってから 16 年、そして iPhone が採用して以来 13 年間、SiP の王道は POP 技術によって確立された。

SiP のメインストリームとなる技術の選択は、結局その技術を使う完成品市場を制覇したものが使っているものが生き残るということである。技術的な高さやコンセプトが良くても部品に使われる技術である以上、完成品製品市場の要求と指定によって動かざるを得ない。



3-5. POP 以外のメモリとロジックの SiP 技術

iPhone の登場とそれに採用された POP 技術は 2010 年の現在 SiP の代表選手であるが、POP が出た当時別の SiP 方式が市場の別の流れを作りかけた。PiP (Package in Package)である。3G 開始時の最初の POP は TI 社の OMAP が主導した。その OMAP と携帯電話プロセッサの主導権争いを行っていたのが Qualcomm である。Qualcomm は 2008 年に Snapdragon シリーズをリリースするまで 3G のプロセッサとして MSM7000 シリーズを出していた。3G 向けの高性能化と占有フットプリント縮小のため OMAP と同様に SiP で DRAM と MSM7000 を 1Package (1 フットプリント化) しようとしたが、選択した技術は POP ではなかった。



DRAM などのメモリをサブパッケージとして通常のシングルパッケージないしはメモリ MCP 工法で最薄化し、それをサブパッケージとしてメインパッケージの中に重ねて入れ込む方式の PiP(Package in Package)である。上下パッケージは通常パッケージ組立で用いられる 0.2 mm 程度のピッチで接続されるため上下の信号接続に自由度が高い方式である。POP 技術では Package の外周部に上下 Package の接続のため接続ボールの配置が必要となり、接続端子間のピッチはせいぜい 0.65um 程度となるため上下サブチップをワイヤボンドで接続する PiP の方が上下間の接続自由度が大きい。また、最終パッケージ全体の高さも PiP の方が低くできる。

PiP では、サブパッケージとなるメモリパッケージを通常のパッケージと同様にメモリ状態で最終高温試験まで実行できるため POP と同様に高信頼性製品が歩留よく提供できる。しかし、POP には PiP に対する決定的な優位点が二つあった。一つは、POP ではメモリ Package についてメモリーメーカーで POP 設計基準に従って自ら製造し直接機器メーカーに納めればよかった。一方、PiP の場合にはサブ Package として製造したものを DRAM メーカーから一度プロセッサメーカー (この場合は Qualcomm) に納入し

ロセッサ・メーカーが製品として統合する責任を持つことになる。つまり SCM が複雑化する。

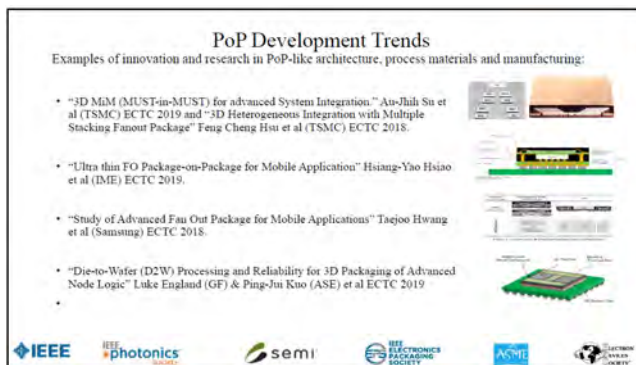
もう一つは、POP の場合は最終完成品のセットメーカーが方式を選択し、PIP の場合は最終完成品の部品を届ける半導体メーカー（Qualcomm）が方式を選択した。最終完成品のセット市場で常に激しい競争が行われていれば技術は優劣で淘汰されたかもしれない。しかし、この POP を選んだ完成セットメーカー（Apple）が市場を寡占したため後を追う他のメーカーは同じ POP 技術を模倣するしかなかった。因みに Apple は世界最大のスマホ・プロセッサ・チップメーカーでもある。

結局、スマホ市場における HIP は現在の 5G の初期端末に至るまでに POP 技術に収斂した。Qualcomm もこの流れに沿って、2010 年からは POP に軌道修正を行っている。POP が今後も HIP の中心であり続けるのは間違いないだろう。その、POP としてどのように上下を接続するか、どれだけの複合 Package を接続するか、そしてどうやって全体を薄く小さくするかに関し

て様々な技術が試され、適用されるであろう。Infineon から出発し TSMC により生産供給されている InFO 技術（Apple が選択）や新光電気工業株式会社が提供し Qualcomm が POP 向けに用いている MCEP (Molded Core embedded Package)などは、POP 技術をさらに強化するものであり今後もこうした改良、革新が POP ベースで進んでくと考えられる。

POP は DRAM 産業にも影響を及ぼしている。DRAM を必要とする 3G 携帯電話が登場するまで三星電子の携帯電話用半導体ビジネスは SRAM ダイを Flash メーカーに MCP 供給するだけであった。2G の後半 2000 年を超えてから DRAM を改良した疑似 SRAM が必要になり、疑似 SRAM の供給とバーターで MCP 技術を日本から導入した。この後、3G が始まるようになり POP 上の Mobile DRAM の供給を TI などの POP 方式プロセッサ・メーカーから要求され直接携帯電話メーカーと取引する関係ができ、携帯電話産業を自社携帯事業以外から学び始めた。そして iPhone の POP ビジネスで Apple と直接の取引をはじめ早く PC 用 DRAM に加え Mobile DRAM を事業の大きな柱に育てた。

日本では、エルピーダメモリが 3G の開始時に Qualcomm から要求を受け PiP 用の Mobile DRAM を開発したが、Package 技術は自社では全く保有せず Qualcomm に納める薄型の単体 DRAM Package 品を委託開発・生産し Qualcomm に供給した。Qualcomm とは密接な関係があったが完成品メーカーとは間接的な関係しかできず、Mobile DRAM に対するマーケティングも十分には展開できなかった。この三星電子との Mobile DRAM に対する差が、後々の業界でのポジションの違いを作り更にはエルピーダの他社に売却される遠因となったのではないだろうか。



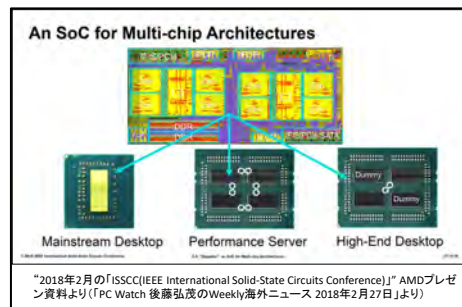
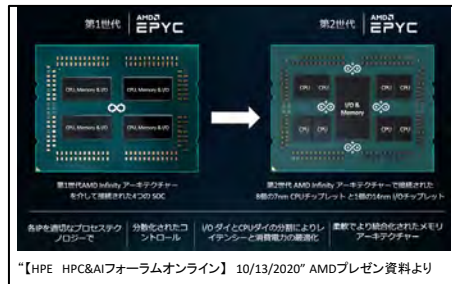
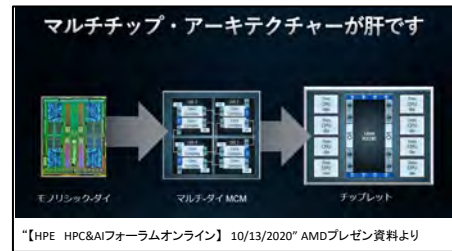
3 – 6. POP 方式と Heterogeneous Integration Package (HIP)

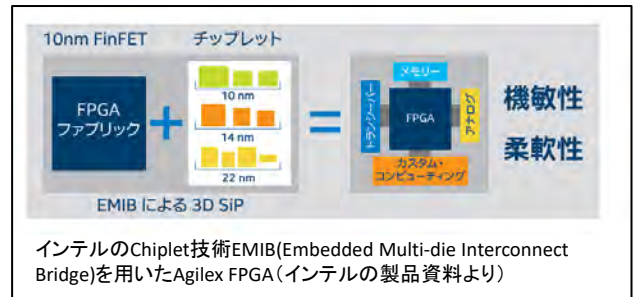
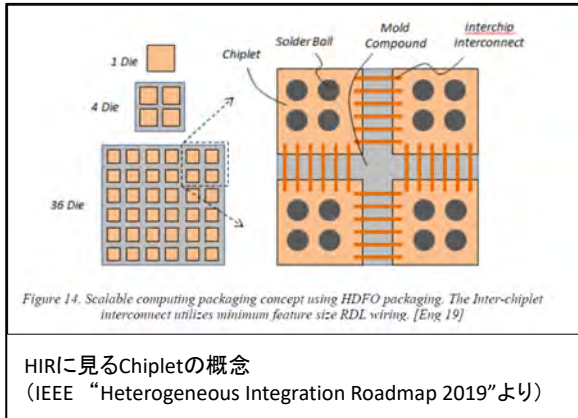
現在のところ、Apple 社が全世界の大規模 HIP の最大の供給者であり、最も多く使うユーザーの内の 1 社である。そして、POP 以外の HIP の種類も殆どが携帯電話・スマホで使われてきた。しかし、5 G が登場するタイミングと軌を一にして HIP 技術がほかのメジャーな用途で実用化され始めている。先ず先行したのが AMD の Chiplet である。Chiplet は本来的には MCM(Multi Chip Module)と言われるカテゴリーの技術であり、モールド封止され完成した複数のチップをモジュール基板の上で統合するものである。MCMはMCP以前より随分前に存在し市場で使われてきた。では Chiplet はこれまでの MCM と何が違うのか。

従来の MCM は別の機能を持ったチップを一塊にして一つのモジュール基板上で統合したものであるが、今回の AMD の Chiplet は本来一つのシリコン上で実現されていた機能を、コストを下げるためにあえてダイの機能ごとに分離チップを興し、7nm のプロセスで作る大面積部のコア部複数チップと 14nm で十分に機能を実現できる制御部分チップを別々に製造し、MCM として再統合する技術である。新世代 MCM といえるが、特にモジュール基板上のチップ間通信に工夫を凝らしあたかも一つのシリコンで形成したような性能を発揮できるようにしている。加えてコア部の個数と制御部の組合せをフレキシブルにすることで異なる製品展開ができるようにしている。設計技術は同じだが製品展開する

際にコア部チップと制御チップの組合せを変更することで製品のシリーズ展開が可能となる。AMD は、この技術で製品の出荷を行っている。小さくしたいところはムーア則に則り微細化し、微細化効果の薄いところは旧技術で作って統合するというムーア則を超えた半導体の作り方になる。この技術により製造コストを下げだけでなく、製品展開のための設計及びマスク費用、試作費用を削減することができる。

今後インテルもこうした Chiplet 技術を使おうとしており、コンピュータ技術の最高峰 HPC で HIP の応用が広がると考えられる。しかし、この場合の HIP の目的は開発及び生産コストの削減が目的であり基板上フットプリントの削減ではない。むしろ Chiplet ではダイを分離するため基板上の面積は増える。同じ Heterogeneous Integration でも目的や用途、発展の方向も変わってくる。5 G の端末技術である POP と HPC やデータセンターの HIP と 5 G の基地局や MEC(Mobile Edge Computing)で連動することになる。





4. Heterogeneous Integration Package を用いた機能モジュール

4-1. eMMC が半導体の大市場を作った

3G、4G 市場で高速大容量データ処理のため DRAM が必要なり Mobile DRAM の巨大な市場が POP を通して形成された。そして同時に NAND メモリ市場が急拡大した。3G 携帯電話では通信が高速化されたため無線通信でやり取りするデータが増え、また 2G の後半で搭載された携帯電話内蔵カメラが“写メ”と言われる撮影した写真をメールで送受信する文化を創り出した。今でいう、Instagram や TikTok の流れはこの写メから始まったといえる。この内蔵カメラの解像度が 3G の機種展開が進む中で次から次へと大容量化した。3G の初期までは携帯電話に搭載される不揮発性メモリは NOR 型でありムーアの限界よりはるか手前でセルのスケーリングが 100nm で止まっていたため大容量化できず写した写真の保存に困る状況が起こった。

そこで既にデジカメで一般化し始めていた SD カードの小型化が 2003 年に miniSD カードとして実現し 3G 携帯電話の外付けメモリとして利用されるようになってきた。デジカメより携帯電話の台数ははるかに多く、miniSD カードとその後の microSD カードを通して携帯電話が NAND のキラーアプリになった。また 3G の進化に伴いプログラムの容量が増え、内蔵の NOR Flash では容量が不足するようになり NAND Flash がプログラム保存用に MCP として搭載され始めた。3G 時代には、NAND ダイを直接内部プロセッサで制御していたが、NAND は信頼性が低く、データが消えやすいため信頼性不良補正動作も内蔵プログラムで処理しなくてはいけなくなりプロセッサのソフトウェア開発負荷が増えた。その上、NAND は世代交代が激しく新機種開発ごとにチップの仕様が変わってしまうためますます開発に手間取るようになり、携帯電話のソフトウェア開発が膨大になりリソースが不足してきた。日本国内の携帯電話メーカー各社はこの搭載 NAND 制御を含め複雑化した携帯電話のソフトウェア開発費に経営が圧迫されるようになり携帯電話から撤退するメーカーが出始めた。

携帯電話メーカーからの強い不満を受けた NAND メーカーは 2007 年に SD カードの機能を半導体パッケージに入れ NAND とコントローラーを 1 Package の SiP にし、eMMC という製品を作った。SD カードと同様に NAND の世代や仕様が変わってもパッケージ端子の入出力は eMMC に規格に従う仕様になっており、NAND の内部で発生する使用中に発生するビット不良も自動で補正する機能を持つようになった。更には初期ビット欠陥がある完全良品でないチップでもコントローラーで補正できるため正規な製品として出荷できるようになった。コントローラー付きの NAND だけに許される Mostly Good

Memory(MGM)という奇妙な名前の製品が登場することとなり歩留が向上しコストは低減した。この eMMC 製品が iPhone をはじめとするスマホに搭載されるようになり NAND Flash の市場が、先行していた NOR Flash を携帯電話市場から駆逐し DRAM に並ぶ巨大な市場を形成するようになった。

eMMC は携帯電話・スマホ向け NAND の数兆円に及ぶ巨大な新規市場を創出しただけでなく、コントローラーと半導体デバイスを組み合わせることで SiP 技術による自立した機能を発揮できる機能モジュール Package の分野を作り出した。スマホ用プロセッサと DRAM の複合化を実現した POP 製品と eMMC は Heterogeneous Integration として双璧をなす大規模市場を作り、その両者の規模を合わせれば世界の半導体需要の 1 割を超えるところまで来ている。つまり HIP は既に市場の 1 割以上の市場を持っているということになる。

4 - 2. eMMC は機能モジュール Package

eMMC は、各メモリアイの機能と性能をコントローラーで制御し、NAND の世代、仕様、工場、メーカーが変わっても eMMC 規格に従った動作を行い、また初期不良のみならず長期間使用の信頼性不良も補正する機能を持つ。そのため eMMC とデータをやり取りするプロセッサは NAND の内部動作を気にすることなくコントローラーの動きさえ知っていればよいということになる。PC に対する HDD や SSD のような独立した機能モジュール・デバイスであり、eMMC はこれを半導体 1Package で実現している。HDD や SSD を PC に接続して使う場合 PC 側は装置内で記憶素子である磁気ディスクや NAND Flash がどのように動かは気にしない。PC 側から論理アドレスとデータ、そしてコマンドを発するだけであとは全て HDD コントローラー、SSD コントローラーがすべてを引き受けて命じられた処理を独自に実施する。

eMMC の場合も SSD と全く同じで、プロセッサから与えられたデータ保存のアドレス = 論理アドレスを勝手に自分で変更して、eMMC 内 NAND の劣化状況などを分析したうえで当該 eMMC の中の都合の良い物理アドレスに変換してしまう。この論理アドレスと物理アドレスの変換には特別の法則などなく、その時のコントローラーのみぞ知る変換となる。そうしたとしてもプロセッサ側には何の不都合も生じない。読み出したいときはそのデータの論理アドレスを eMMC コントローラーに伝えるだけであとはコントローラーが割り当てておいた物理アドレス部からデータを引っ張り出してくるだけである。機能モジュールとはこのように動き、外部からは窓口となっているコントローラーの動きだけが見えることになる。この仕組みを Heterogeneous Integration 技術である SiP を用いて 1 Package 内で実現している。eMMC はデジタル・データ保存の機能モジュール Package である。

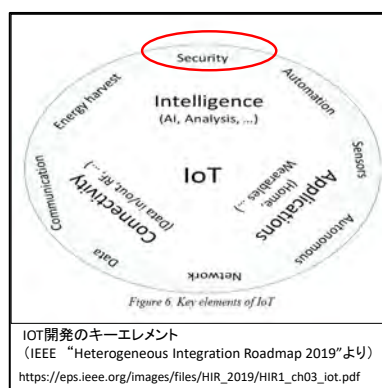
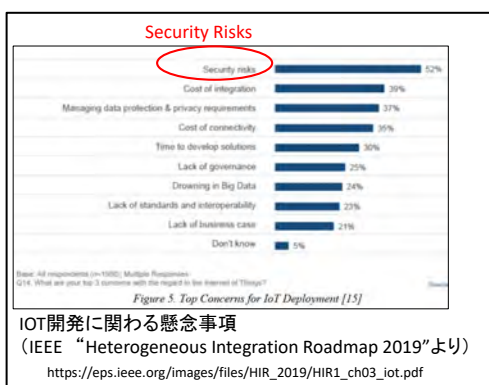
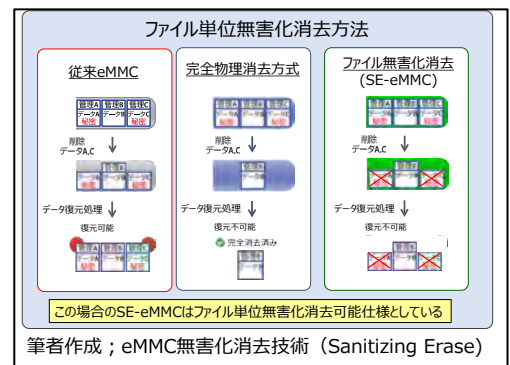
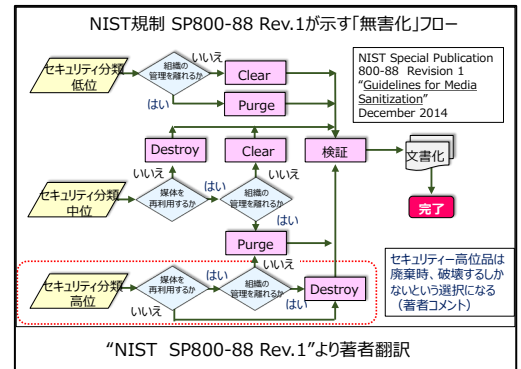
この HIP による機能モジュール Package の概念は、今後 5 G のスマホ以外のアプリケーションで活用できる。以下にいくつか 5 G にまつわる機能モジュール Package の実用化検討を行う。

4-3. SE-eMMC

デジタル情報のセキュリティ管理のために廃棄する電子機器の残存データ問題が深刻になり米国では「NIST 基準」として法制化された。5GでIoT機器が巷にあふれかえることになるが、現在のデジタル・データ処理ではデータの無害化（Sanitizing）は法規制のような人為で行うしか方策がない。規模は違うが神奈川県HDD流出事件はその脆弱性が露わになった事件である。IoTのストレージ（この場合は標準的なeMMCとなるが）にデータ無害化消去制御チップを追加搭載し、SE-eMMC（Sanitizing Erase eMMC）を実現することができる。セキュリティ機能メモリである。SE-eMMCについては、廃棄時の操作のみでSE(Sanitizing Erase)を行う場合と常時ファイル単位の無害化を消去行う仕様が個別に実現できる。自動運転自動車やMEC、IoT機器にeMMCを搭載する場合にはセキュリティを考慮してSE-eMMCの搭載を勧める。5G携帯に更に個人情報保存されたり、AIによる仮想家族が端末内に構成されたり、AIによる個人秘書機能などが搭載されるようになればSE-eMMCが必須になるかもしれない。既にプロトタイプはSE-USBメモリは実現されておりこの機能を現在のeMMCに付加する形でSEコントローラーを追加すればよい。

基本機能は実現できており、製品化は難しくない。最大の課題はマーケティングになる。果たして5G社会がそれほどセキュリティに敏感になるか。メモリ廃棄時の無害化を罰則付きで法制化している米国のNIST基準ですらあまり社会に定着しているようには見えない。市場密着型のマーケティングか、組込セキュリティが必須になるキラーアプリとしてのIoTデバイスとの連携が必要だろう。

IoTの開発者たちは開発にあたっての最大の懸念事項は“Security Risk”であるといっている。



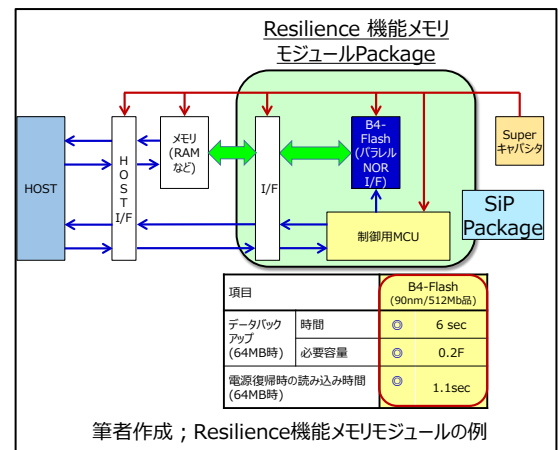
4-4. Resilience メモリ・モジュール Package

自動運転自動車や産業用ロボット、MEC など 5G で利便性を発揮する機器は全て電力で動く。Battery 駆動の瞬断、自然の電力瞬停やサイバー攻撃、各電磁波破壊攻撃などでの電源断対策として Resilience Computing が今後極めて重要になると考えられる。5G 社会にあっては全ゆる社会インフラがデジタル化される。2018 年に発生した北海道のブラックアウトが 5G 社会で起こったとするとその影響は当時の比にならない規模になろうし、東京や大阪で発生すれば甚大な国家的損失を発生させるレベルになることは想像に難くない。5G 社会はデジタルで利便性が向上するが、IoT 含めあらゆるデジタル機器に電源遮断時の自己復元性機能 = Resilience 機能が必要となろう。Resilience もセキュリティに関係している。

電源瞬断時 Resilience に必要なパラメーターをバックアップする。例えば安価なシステムにするために Super Capacitor 1 秒で 8 MB のデータをバックアップすると 8MB/sec の書き込み速度が必要になる。パラメーターは復帰時高速で読み出すことが必要で 100ns 級のレイテンシが要求される。これが実現できる不揮発性メモリは B4-Flash, MRAM, RRAM, FRAM などになるが 8MB=64Mbit を \$1 以下で実現できるメモリは B4-Flash しかない。他のメモリは 10 倍以上のコストになる。例えば MRAM は \$15 である。NAND は読み出しが遅すぎる(50usec)。NOR は書き込みが遅すぎる(1MB/sec)。

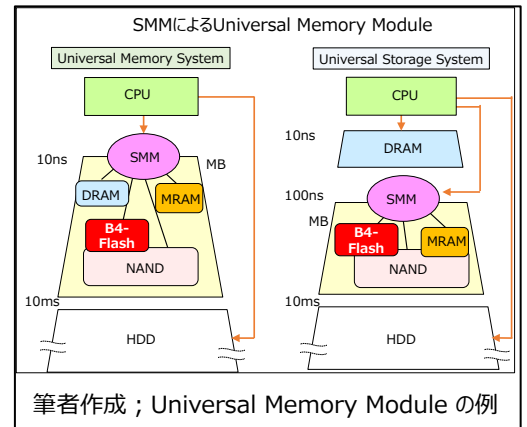
B4-Flash と Resilience コントローラーを 1 Package に入れて Super Capacitor は外付けとする。Resilience システムとして \$2 以下で実現するくらいでないあらゆる機器には搭載できない。このシステム概念は既に HDD の瞬断対策として検討されているが、瞬断データバックアップのデータバスと手順を業界標準化すれば多くの機器のブラックアウト対策ができる。瞬断対策 Resilience 機能メモリである。こうした用途向けの B4-Flash のような新型メモリが必要となる。自動車にも活用できる。

本機能モジュール Package ビジネスについては既に市場要求で技術実現性は確認している。Resilience そのものは社会的要求になるので、市場を作るためには①業界で標準仕様を定める、②HDD のようなキラーアプリと協業することで Defact Standard を確立する、ことなどが必要となる。



4-5. 超低レイテンシ Universal Memory モジュール Package

5G の特長である超低遅延データ処理機能をより高度に生かすために DRAM, NAND と MRAM や B4-Flash を SMM(Smart Memory Management)コントローラーで制御し 1 Package 化することで超低レイテンシ、安価、高速書き込みの理想的なストレージ Universal Memory Module を作る事ができる。1 Package では困難な場合には Chiplet 方式でもより。NVDIMM に似ているが NVDIMM に必要な Super Capacitor は必要ではなく、NVDIMM より安価にできる。現在の NAND ベースの eMMC に代わる eUM(embedded Universal Memory)として活用できる可能性がある。この場合、上述の Resilience 機能や無害化消去のセキュリティ機能の搭載も必要になるかもしれない。eUM は、小規模の IoT デバイスより MEC や自動運転自動車、5G で動く産業用ロボットなどで有効性を発揮できる。



4-6. 国土強靱化 IoT デバイス

上記は全てメモリに関連して提案したが、アナログ素子による 1Packeg 機能モジュールにも重要な市場がある。国土強靱化 IoT デバイスである。日本は世界でも群を抜く災害大国である。地震、噴火、洪水、土砂崩れなど災害監視対象区域の国土変異情報の常時監視が求められる。これまでは常時監視は困難で、加えて人里離れた地域や夜間の事象に対する危険予知情報の獲得は極めて限られてきた。

斜面の変位、水量の変化、土地の隆起など自然情報の常時検知を変位検出センサー機能 IoT モジュールのデジタル・データで常時監視することはできないか。また、日本は戦後、高度成長期や日本列島改造計画で高速道路やトンネル、橋、砂防ダムなどの公共事業投資を推進し世界でも有数の社会インフラを整備してきた。しかし、建設以降長い年月が経ち老朽化が進む中、設備の劣化が災害を起こさないか頻度高く監視しなくてはならない状況にある。近年はドローンによる監視手法が導入され始めているが有人でかつ間欠的である。ここに 5G を活用した変位検出センサー機能 IoT モジュールを導入できれば科学的な危険予知が低ランニングコストで可能になる。まさに 5G 技術の威力である。

これまでは国土強靱化のために土木投資、箱物投資をおこなってきたが、それに加えて災害対策投資の一部で 5G を活かすという実例を作ることで世界に先進例を提供できる。日本は国土強靱化 IoT デバイスの需要の高い世界有数の市場で社会実験の機会が山ほどあり、新技術市場投入の鉄則である「市場に密着していること」の条件に最適である。

一方、技術面では変位検出センサー機能モジュールにはアナログ技術が必要であるが、日本にはまだ優秀なアナログ技術経験者が存在している。既に土砂崩れ防止ロックボルト工の変位、あるいは高速道路や橋梁のボルトゆるみ変位は IoT センサーでの常時監視が可能な技術があるようだ。あるいは河川の水位変動などの検出技術などは日本にあるという。これを 5G で機能モジュール化できれば国土強靱化 IoT デバイスになる。加えてかつてのアナログ技術者はリタイヤするくらいの年齢になっているが、アナログ技術において精緻なトリミングなどは経験と勘に頼るところが大きい。リタイヤした優秀な技術者を活用できる



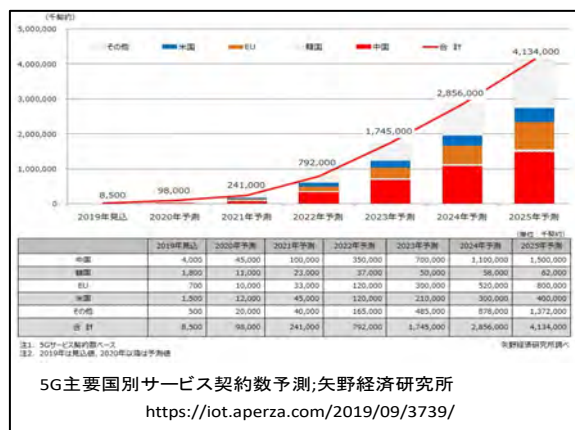
ような道ができれば国土強靱化 IoT デバイスの日本の技術コンピタンスは世界でもトップクラスになることができるのではなかろうか。

5. 5Gの半導体ビジネスチャンス

5-1. 5Gの端末ビジネスの行方

4G 以前の無線通信技術によるサービスは殆ど全てが携帯電話及びスマホを通して一般消費者に対して提供されるものであった。3G, 4G のサービスとしても IoT が期待されてはきたが一定の規模の市場に留まり、個人通信端末が作り出す市場とは比較にならなかった。5G でもこのスマホ一般ユーザー向けの市場は継続し発展もする。そういう点では5G スマホ自身の高性能化が進むためそれに付随する個人向けのサービスはさらに深化するであろう。例えば、スマホを通じて個人に AI 秘書が付く、高齢者向けにスマホの中に AI バーチャルファミリーができるなど、5G でなければできない AI ネタやアバター、AR, VR などを活用したサービスがあれこれ登場し、そのうちのどれかが現在の FaceBook, Twitter, Instagram, TikTok のようなキラー・サービスにつながるだろう。コンシューマーゆえに見通すのは難しいが、5G スマホ自体は5G 世代の新しい世界を作るだろう。それにつれて、iPhone か Galaxy,あるいは Xiami などの中華系か、今まだ認識されていない完全に新しい端末機器メーカーか、何れかが巨大な5G 端末市場を手にするだろう。

2030 年には 40 億台を超える5G 契約を予測しているところもある。キラーアプリか、特定の端末でいち早くキラーになるアプリを端末性能故に実現できたところが主役になる。今のプレイヤーが今後も続くかどうかはわからない。Apple や Samsung が没落する図絵は今では考えられないが、現実に 10 年前までは世界シェア 65%を持ち携帯電話端末トップだった Nokia があつという間に消え去った。OS 戦争で自前の Symbian にこだわりすぎ、またスマホの登場を甘く見すぎた。経営の教科書に書けるほどの「イノベーションのジレンマ」タイプの没落だろう。もう一社、一瞬世界トップに立った Huawei も先行きは極めて不透明である。技術やマーケティングではなく政治的要因であるが、巨大な市場であり、国力や国防に影響の大きい5G では今後、ビジネス遂行上の影響要因として政治が最も大きくなるかもしれない。単一巨大市場故に一つのつまずきが致命傷に十分になりうる。Apple が盤石だとは言いきれない。



5-2. スマホでの Samsung の強みはどこから来たか

Nokia の時代にその後ろを走っていた Samsung がその後の業界の大変動にも盤石のビジネスを実行し、常に上位のシェアを確保して今ではトップシェアの常連になっている。その要因を経営論研究者は研究すべきかもしれない。経営そのものの影響の大きさを示す例としては絶好の題材であろう。単なる企業文化や組織体による経営戦略の正しさ、あるいはそこに勤める技術者、従業員の優秀さ、それを引き出す会社の運営文化、などを考えても解は見つからない。ここで経営論を考究したいわけではない。5G ビジネスの戦略を考えるうえで極めて重要な素材と考えるからである。

世襲であるかどうか、あるいは父か子かというような属人的な議論は別にしてこの会社が特別で強力な経営力を持っていることは間違いない。その経営力で、①携帯電話・スマホの端末ハードビジネスでトップシェア、②スマホに必要な欠くべからざる Mobile DRAM と NAND でトップシェア、③他にもスマホに必須な Display やリチウムイオン電池などで高いシェアを確保、といった強さを強力な経営者が戦略的統合的に運営してきた。特に②と③は自社消費だけでなく競合大手の Apple や Huawei にも必須の SCM に取り込まれていることでスマホ産業の技術とマーケティングを世界で最も知ることのできる立場を持っている。これを三つの分野で相互作用させる経営ができる（経営者は一人）ので全てが盤石になるのは無理からぬことであろう。新しいことをしようとせずともライバルの SCM に組み込まれていることで常に移ろいやすいコンシューマー市場の危険な罠から逃れることができ、絶対に負けない道を歩むことができる。

Samsung は本稿の前半で見た通り、携帯電話の勃興期には半導体での携帯電話での存在感は薄かった。90年代から2000年台の前半、2Gから3Gの初期には自身の携帯電話端末ビジネスはマーケティングと販売力で韓国と発展途上国でシェアを稼いでいたが、携帯電話の先端技術からは離れた位置にいた。SRAM、DRAMは日本から技術導入したが当時Flashの主力であったNORは持っていなかった。2G、3Gの初期には携帯電話向けメモリビジネスとしてはSRAMをシャープや三菱のMCPビジネス向けに供給していただけであった。この当時はシャープ、三菱、富士通、intel、AMD（のちに富士通と統合してSpansion）のNORメーカーだけが携帯電話メーカー向けのブランドを持ったメモリビジネスを行うことができた。その当時の世界トップNokiaにすらシャープのMCPに搭載されたSRAMを供給しただけであった。因みにそれでも市場を寡占していたNokiaはSamsungのメモリビジネスに強い警戒感があった。

Samsungの携帯向けメモリが強くなったのはPOPが登場し、Mobile DRAMで直接市場参入できてからである。そして、携帯電話市場はNANDを使い始めた。SamsungはNANDを東芝から導入し、SanDisk、東芝と一緒に市場作りを始めていた。はじめは携帯電話には相手にされなかったNANDであったが3Gが定着し通信量が増え、同時にスマホが画面に映し出すピクセルも格段に増えた。NORの容量では不足する状況でNANDが携帯電話に採用され始め、スマホのトップランナーiPhoneには最初からNANDがPOPのDRAMと一緒に使われた。同様に、小さな画面の携帯電話から一気にスマホに市場が移るとDisplay市場とBattery市場が活況になった。

こうしてSamsungのスマホ事業は世界で最も早く、Appleや他のスマホメーカーの新製品情報を得ることができるようになり、メモリ、液晶ビジネスとともにスマホビジネスを軸としながら強い経営の環として相互作用させながら相乗的に大きくしてきたのである。

5 - 3. Samsung は5Gでも盤石か

Samsungの経営は盤石である。①スマホまたはその延長上の端末が無線通信技術のキラーアプリである、②使われるメモリはDRAMとNANDであり続ける、③表示デバイスに破壊的な新規デバイスが表れない、の三つの条件が続く限りは、である。③はそう本質的ではない。①と②が継続し、経営者の問題や地政学的位置の難しさに絡む政治上の問題が起きない限りは盤石であろう（それは本稿の扱うところではない）。もし①、②に変動が起こるとそこに「最も弱い環」が発生し、Samsungモデルは崩れるかもしれない。しかし、現在の5Gの情報から端末ビジネスとして①が大きく変わる要素はないし、②はスマホメモリとしてDRAM、NANDというのは揺るぎそうにない。あるとすればintel、Micronの3DXpoint

Memory が Mobile DRAM の置き換えになるか、本稿の 4 – 5「超低レイテンシ Universal Memory モジュール Package」が本格化した時であるが一朝一夕には変わらないだろう。

それ故に 5G スマホと関連のメモリビジネスに Samsung の「弱い鎖」は存在しないので、結果として 5G スマホで Samsung はますます盤石になるのではないか。ここに（つまり 5G のスマホおよびそのメモリで）勝負を挑めるようなチャンスはなさそうだ。

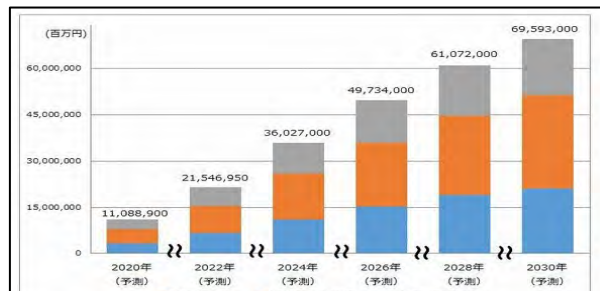
5 – 4. 5G のメイン市場にこそ勝負のチャンスがある

上で見たように、Samsung は今や世界最大のハイテク総合企業であり世界中どこにも類似企業は存在しない。どこにも死角がないように見える。しかし、栄枯盛衰は世の常である。5G という本題から見ると「最も弱い環論」で少し弱点が見えてくる。この弱点こそ、5G が作り出す新市場と考える。

5G で期待されているのはスマホから離れたところにある新しい幅広い市場領域である。「いつでも、どこでも、何とでも」インターネットにつながる機能で社会インフラやスマート・シティ、医療、災害予知、SDGs、環境、産業用ロボット、医療など個人ではなく社会に関わる新たな無線通信アプリケーションが期待されている。半導体を含むこれらの 5G 関連デバイスの市場規模は 2030 年に 70 兆円ほどになるという予想だが、5G が波及して作るサービスは 1000 兆円に近い規模と見込まれている。これを IoT という言葉でくるにはあまりにも範囲が広すぎるが、スマホは「人の掌でつながるインターネット」を提供するサービスだが（いわば IoH; Internet on Hands）5G で期待されているサービスは、全ゆる物と物をつなぐインターネットである。読んで字のごとし IoT=Internet of Things。無線通信技術として 4G の次の技術として 5G 時代が来るわけだが、この 5G が従来の人間ユース、コンシューマ・ユースの市場を離れて新しい市場を開く。新時代が作られるという意味で“エポック・メイキング”な変化がやってくる。Disruptive な変化が無線技術市場に起こる。但し、既存の延長上の市場 = 5G スマホ市場は、なくなりはない。むしろなくなるどころか、4G より大きな市場になる。

それでも 5G による IoT 市場が期待されるのは、スマホ周りの市場よりはるかに大きな市場を作る可能性があること、社会の諸問題を解決する有効な手段になる可能性があること、新産業が勃興するチャンスがあることなどによる。時代の変化に対する期待値である。

こうした時代には、プレイヤーの入れ替わりが起こる。①既存市場はなくなる。むしろまだ伸びしろがある。②既存市場で積み上げた有形無形の資産がある。工場は入れ替えられない、技術者人材も入れ替えられない。③新市場のビジネス上の直近の魅力が少ない（立ち上がるのに時間がかかる）。こう



した条件が整っている時は、既存市場での勝ち組は動きづらい。既存市場にリソースを集中した方がより多くの利益を確保できる。将に、「イノベーションのジレンマ」症候群が生まれる条件が整っている。

5 – 5. 5G IoT は新しいビジネス・ゲームを作り出す

4G までに敗者になった側は、舞台が替わるタイミングでここぞとばかりに新しいチャレンジができる。敗者復活ではない。ゲームのルールが変わるので勝者と同じスタートラインに並びなおすことができる。そしてこれまでのゲームでは役に立たなかった過去の資産、資産価値のなかった道具をもう一度見直せば、今の勝者より道具を沢山持っているかもしれない。

例えば、

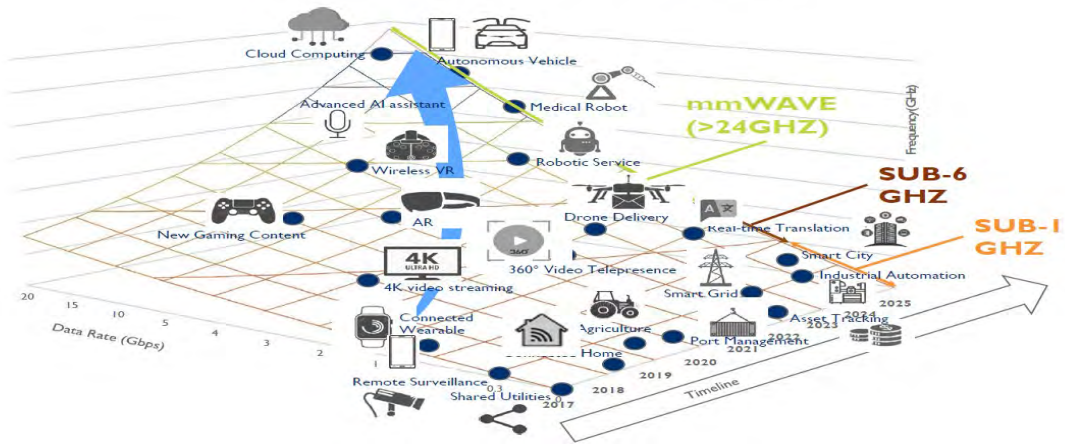
- (1) 5G IoT ビジネスではアナログ技術が役に立つ。日本にはアナログ技術の長い蓄積がある。既にリタイアした技術者が多いが役に立つかもしれない。
- (2) 少量多品種をビジネスハンドリングできる SCM がある。装置メーカー、材料メーカー、小規模デバイスメーカーなど棚卸が必要。
- (3) 多種の技術を融合させなくてはいけないので幅広い技術ネットワークが役に立つ。機械工業では東京蒲田や大阪東大阪の産業ネットワークが役に立っているが、半導体ビジネスでの近代的なビジネスネットワークが以前より作りやすくなっているか。
- (4) 既に日本の半導体は大手が廃業や縮小を進めてきたので人材の流動化が進んでいる。新産業の勃興にチャレンジする起業家精神がより強くないか。
- (5) IoT で半導体を機能モジュール化する場合、Heterogeneous Integration する組立技術が必要。未だ日本が強みを持っていると期待したい。
- (6) 一番重要なこととして IoT ビジネスでは、エッジ側は市場の要求が見えなければ形にできない。できれば

市場に密着したい。IoT のように社会システムや社会インフラに強く関連するビジネスは先進社会としての社会課題が見えれば見えるほどソリューションを IoT で提供できる機会は増える。日本国内の IoT 対象市場との“密”なつながりを大切にしたい。

などなど、新ゲームで使える武器は沢山あるのではなからうか。とりわけ、技術人材とネットワーク、そして市場、これらを重視することで新しいゲームたる 5G の IoT 市場に挑むことができるのではないか。

5G Applications

Source: Yole Advanced RF System-in-Package for Cell Phone 2019 p57



HIRに見る“5G Applications”

(IEEE “Heterogeneous Integration Roadmap 2019”より)

* * * * *

以上、第4章は、ADAS進化に必須のダイナミックマップを収納する基地「子局」のデータベースサーバーや、ミリ波5Gの普及を促す動的固定無線メッシュ端末などの技術が普及するために必須となる「低コスト・低価格化」に焦点を当てて、半導体が、いかに機器のコストパフォーマンス向上に寄与してきたかを、メモリーの事例で回顧的に分析・観察した。

半導体が日本で弱った一大要因は、顧客たるアプリケーション機器事業の側が弱ったためでもあったが、それにつれて半導体が弱ると、今度は機器システムの側が奮闘しようと反転攻勢に出ようとするおり、効率良く助けてくれる基盤を欠く結果となる。両者は互いに強め合い、また弱め合う関係にある。

CASEが進展する時代に入り、業種の壁を超えて、技術人材が補完し合わねばならないおり、クルマ業界にとっても、日本の半導体やITの業界が弱っていることは重大な弱みとなりかねないことを危惧するものである。(当然、グローバルな連携も進めるわけだが、コミュニケーションの深さや効率性は、“地理の経済性”を持っている)

(禁無断転載)

20-7

CASE 変革期に問われる異能チーム・異分野技術へのアプローチ調査

2020年度

—ミリ波 5G 普及時代の V-to-「X」に有望な IT 事例—

令和 3 年 3 月

一般財団法人 機械振興協会 経済研究所

〒105-0011 東京都港区芝公園 3 丁目 5 番 8 号

TEL:03-3434-8251

<http://www.jspmi.or.jp>