

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な有効な 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 中心型サイバースペースによる解決

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	
▶ 交通状況の把握	
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	
▶ 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

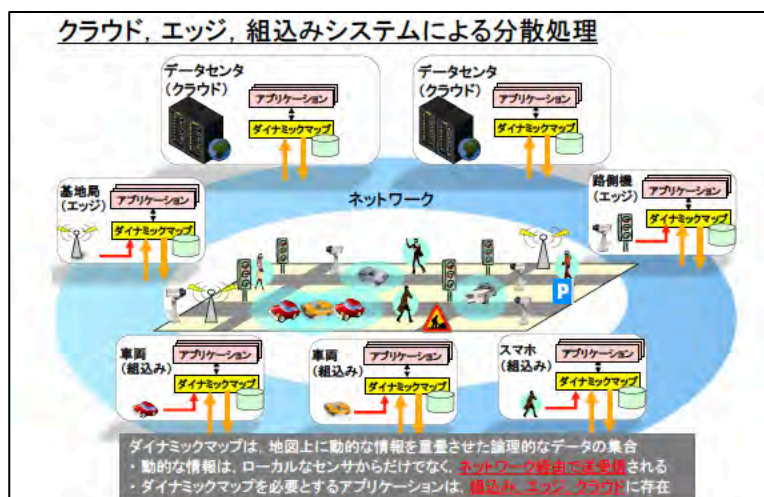
もう少し明確にダイナミックマップを定義すると、右表のとおりである。共有データベース (DB) であるが、集めるデータ自体が、時間的耐性にしたがって“動的データ”(1秒未満)から、地図情報のような“静的データ”(日～週単位)まで、「階層」構造を採るのが一般的である。動的データまで重ねるので“ダイナミック”(動態的)マップと称している。

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



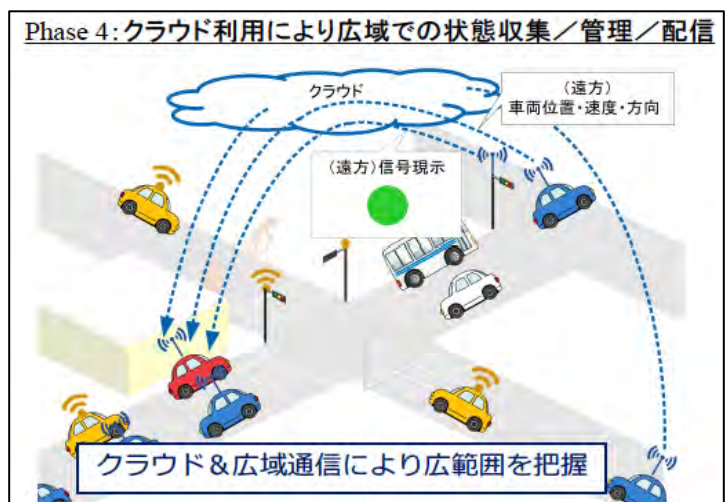
段階2として、自車状態だけでなく、自車が「集めた周辺情報」もシェアすると、右のとおり、たとえば通信端末を持参していない自転車や歩行者などの情報も、シェア出来る。



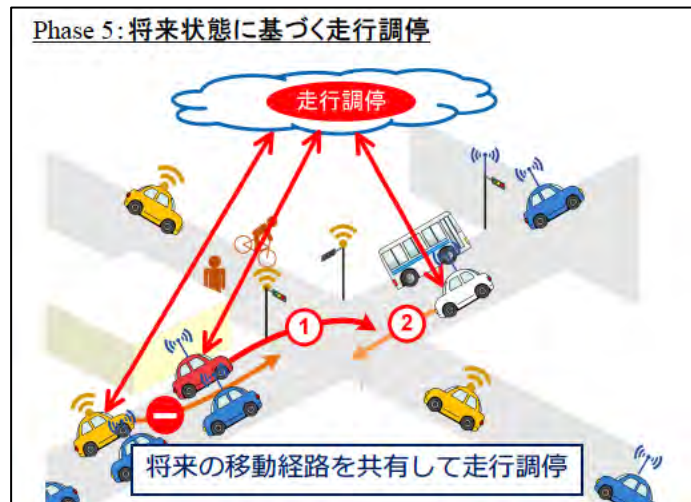
段階3は現時点情報にプラスして、近い将来に関する情報までシェアした場合である。



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）。

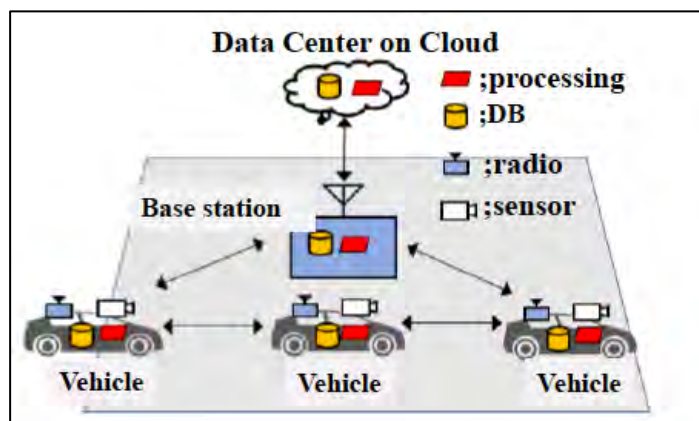
しかし ADAS 等のためには、一般の用途のような応答速度では間に合わない部分が多々

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

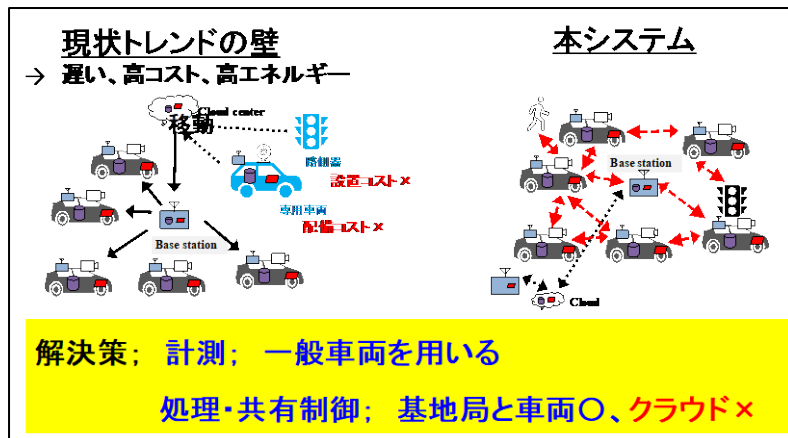
間通信の 2 層が想定されてきた歴史的経緯だが、その中間に、エッジ (fog) コンピューティング DB を置き、3 階層それぞれでの「折返し」処理を、機能ごとに使い分ける案が、近年では主流になりつつある。

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。

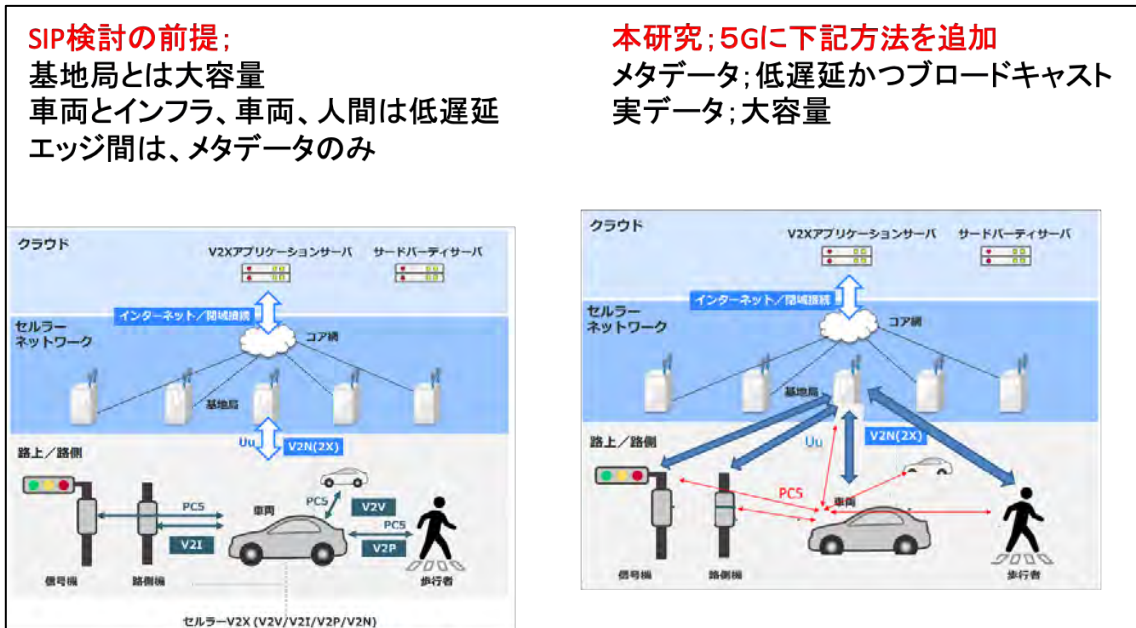
もっとも、内閣府総合科学技術イノベーション会議の「戦略的イノベーション創造プログラム」(SIP) の第 2 期では、第 1 期取組みを発展させた「自動運転 (システムとサービスの実用化)」がスタートして、近年の動向にも対応が図られている。

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

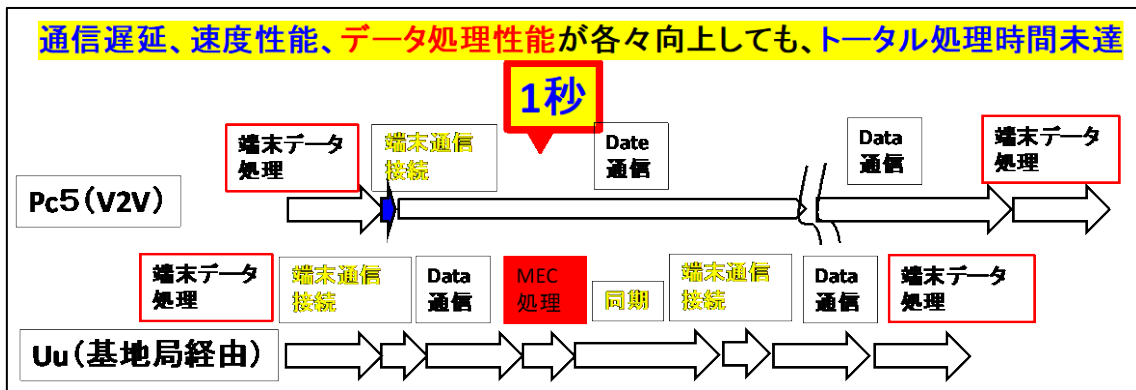


宮田博司委員資料より (以下、同じ)

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。

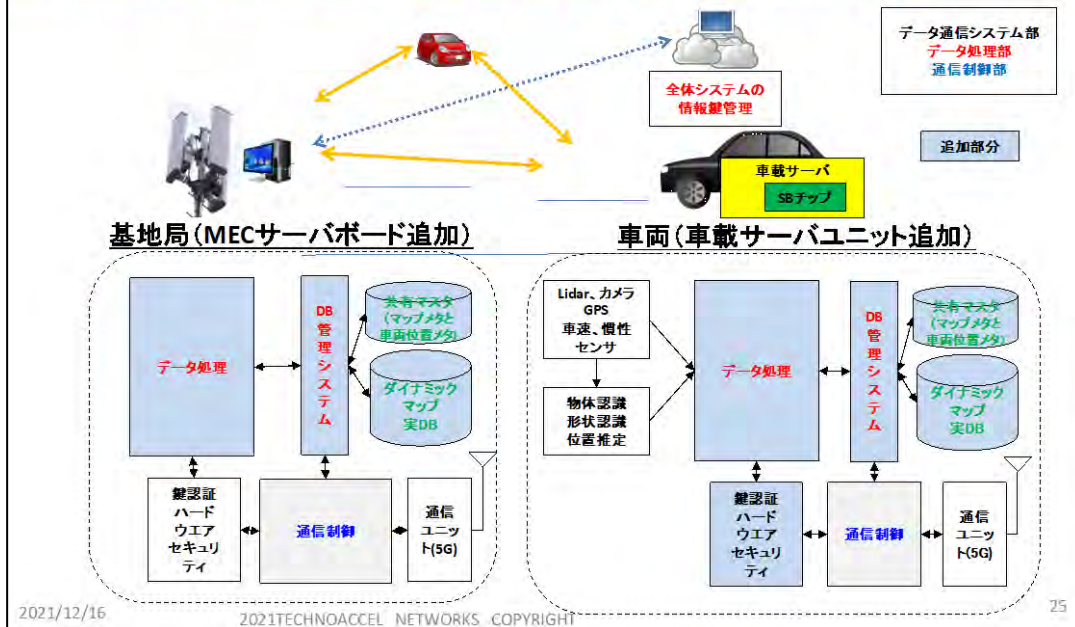


原因を分析すると、次図のように考えられた：

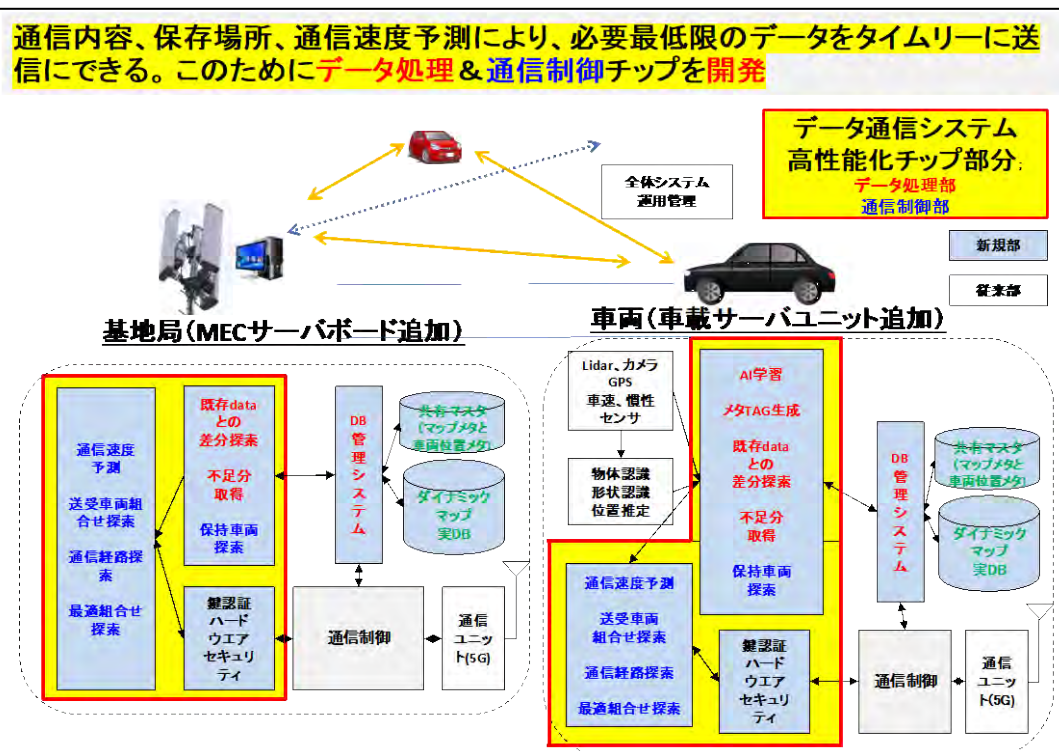
従来の方法(Pc5、Uu)で実現するとしたら;

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



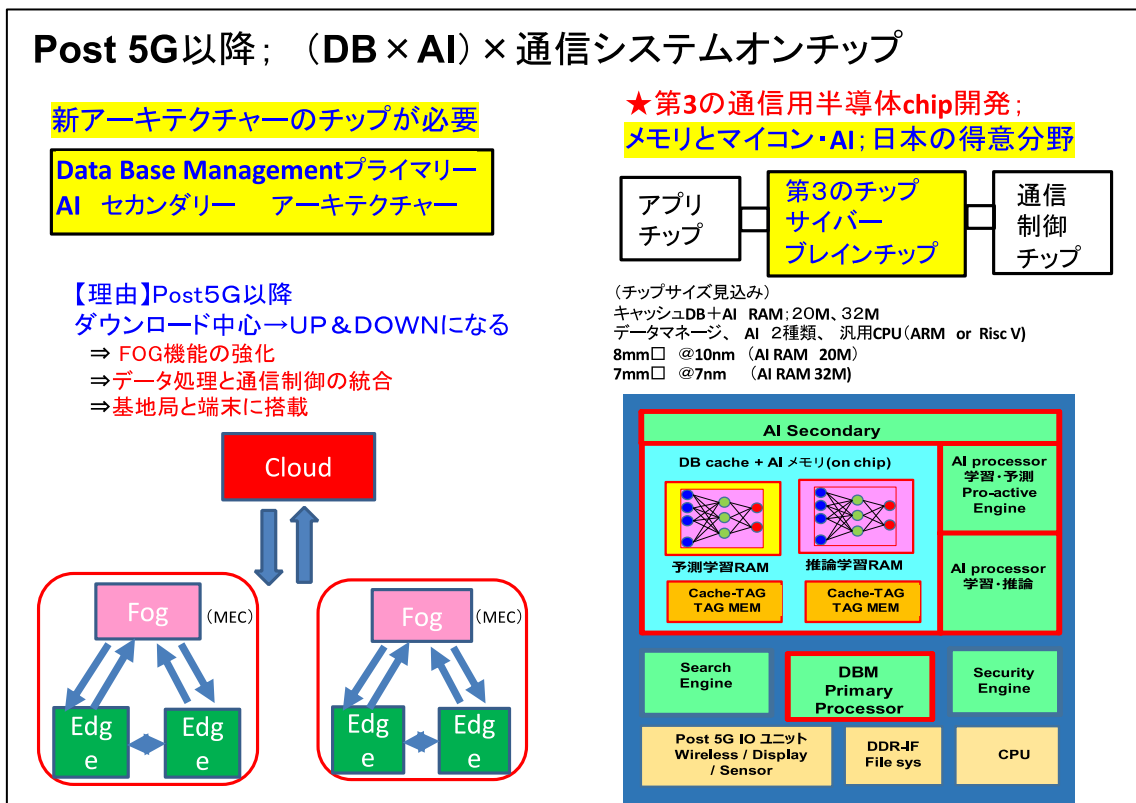
それに対して、以下のような工夫（新機構＝薄青ブロック）で問題解決ができるのではと考えられた。



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

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。

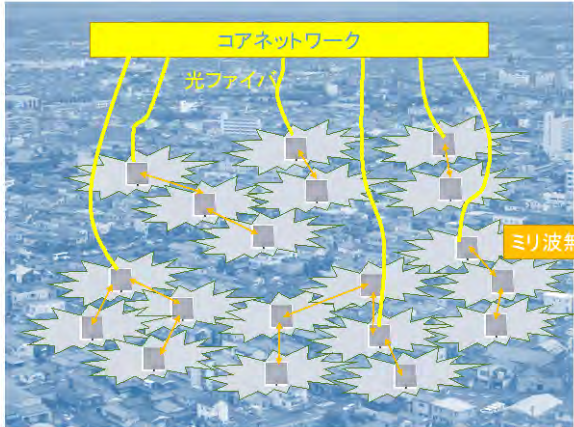
* そういった点につき、そもそも 3GPP グループ (通信会社たち) にも自覚があり、5G 以降は、使われ方が、4G までと異なり、オペレータが主導するというよりは、需要家のほうが主導して、好みの通信特性をチョイスしていくタイプへ変化する旨、見ている。しかし、では実際、どうやって需要家を引きつけるかについて、オペレータの側に やり口があるかと言えば、はっきりしない。


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

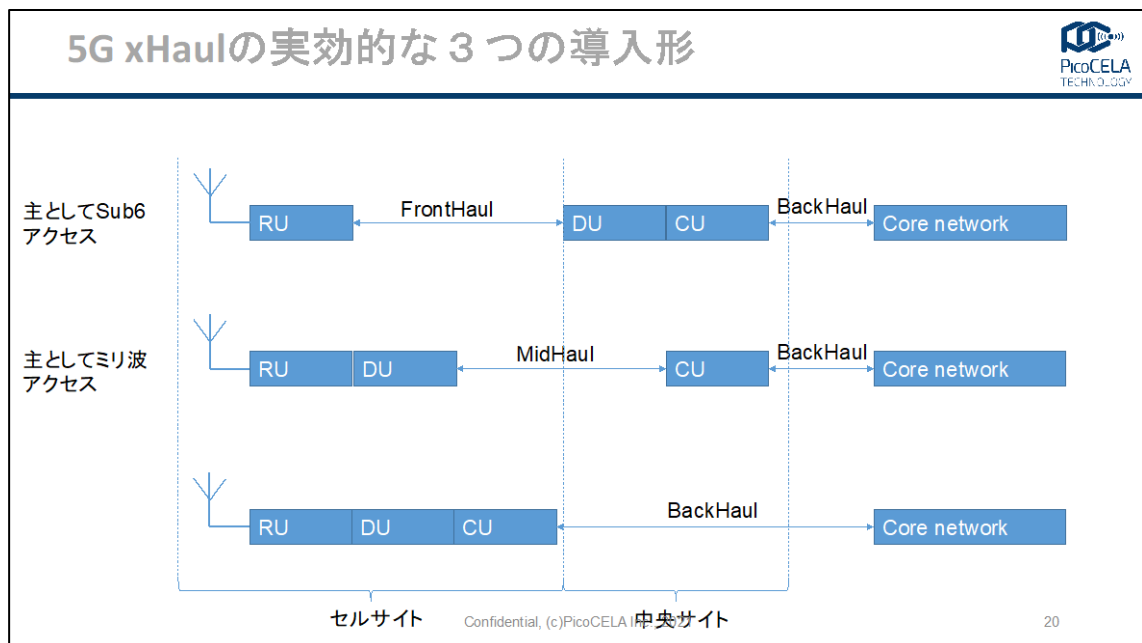
→障害物などの影響を受けやすいため、「動的」な適応性を持たせる必要がある

「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

方向制御

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

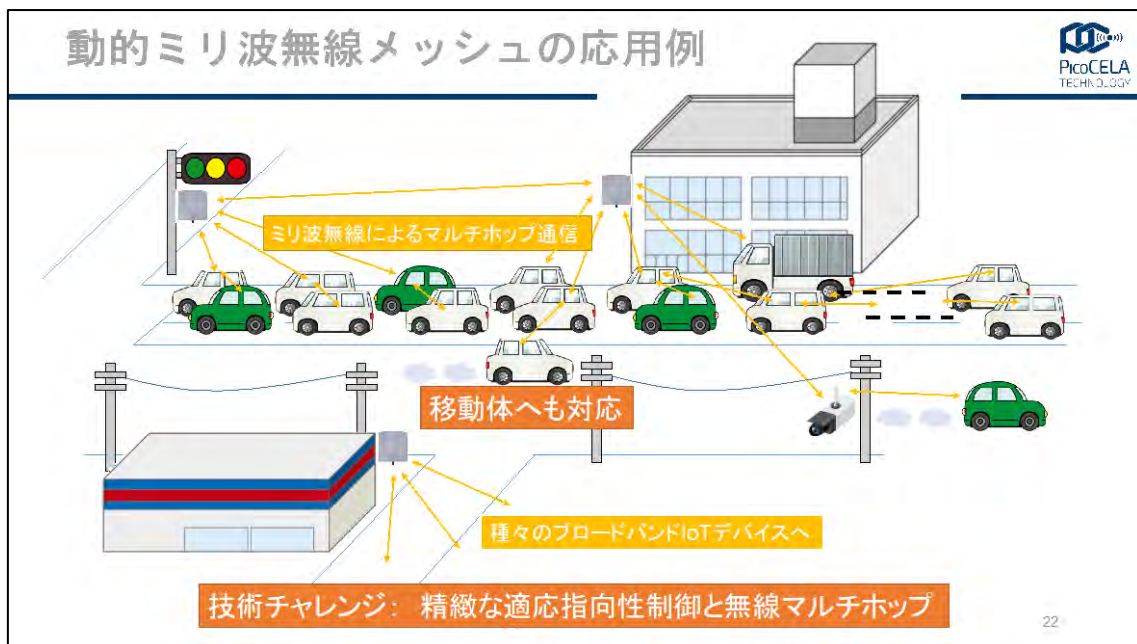
スペックの青写真

- 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”に近い軽量級の基地局で、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？

5 G 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、5 G 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 4 G 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「4 G 通信」によりやりとりすることが可能になった。

また、4 G 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「4 G 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 というキラーアプリを産み、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 3 G 時代に人類はもどれない。同じように 5 G 通信に移行することで、新たなキラーアプリが生まれ、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 5 G では、5 G 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 4 G 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？

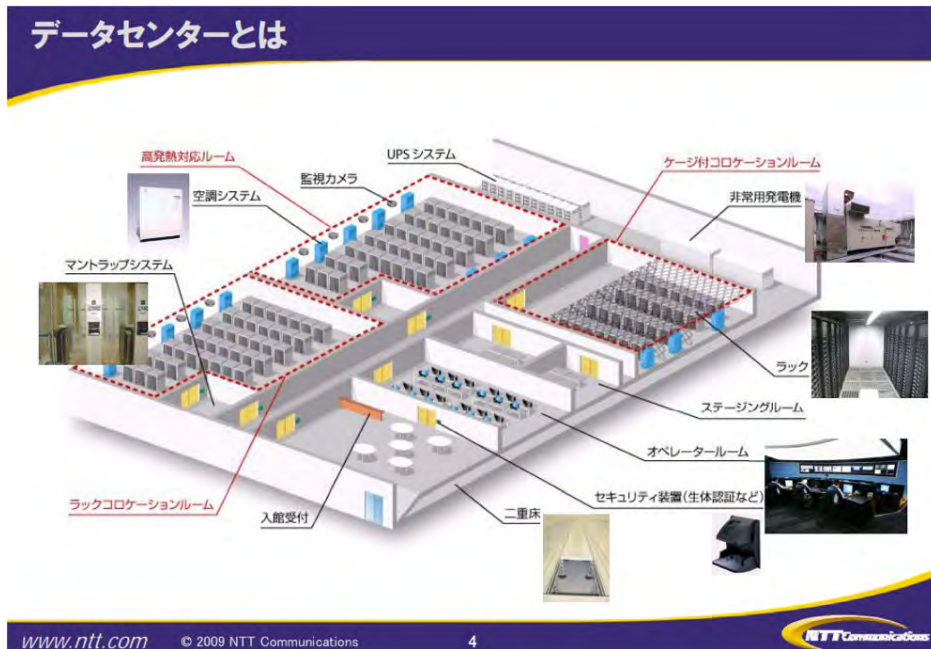
「ポスト 5 G」および「次世代コンピューティング」を支える根幹技術は半導体である。ポスト 5 Gの流れの中で半導体の市場がどのように拡大するか、あるいは発展の原動力が何であるかを半導体技術発展の質的転換である“ムーア則の限界”の観点から読み解く。一方、通信とコンピューテーションにとって半導体はその根幹を握っていることは議論の余地がなく、“ムーア則の限界”が生じてても今後も半導体技術への投資と市場は拡大しつづける。

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。

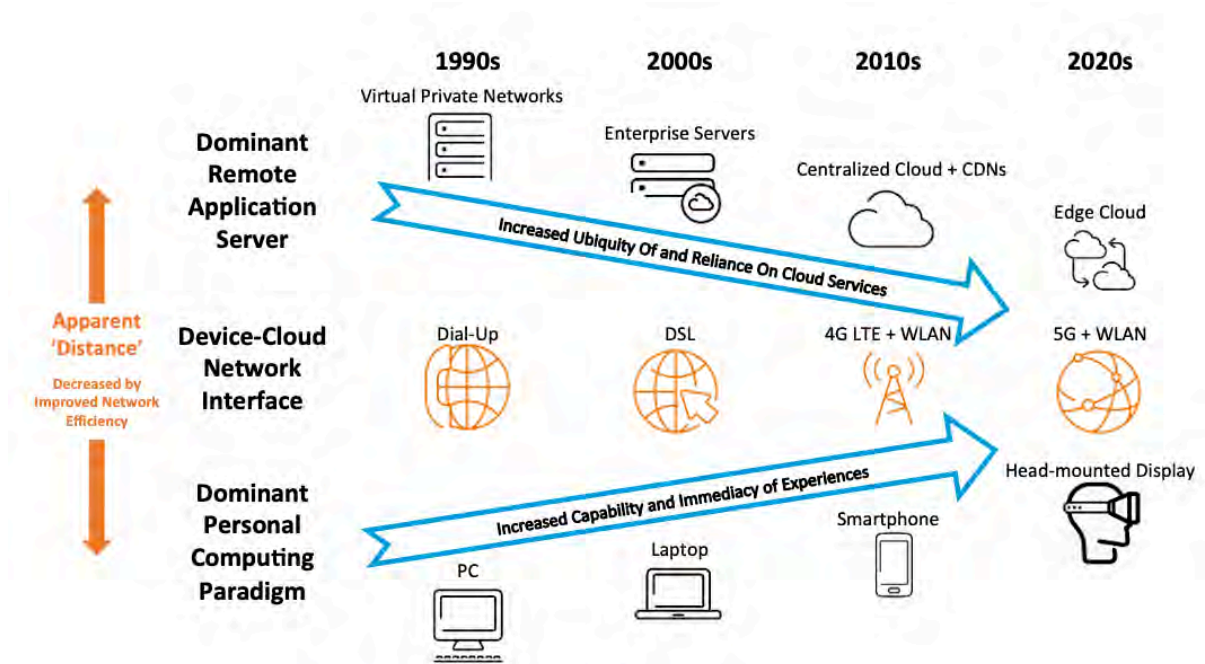


Figure 2: History and future projections of the IT-Networking convergence

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。

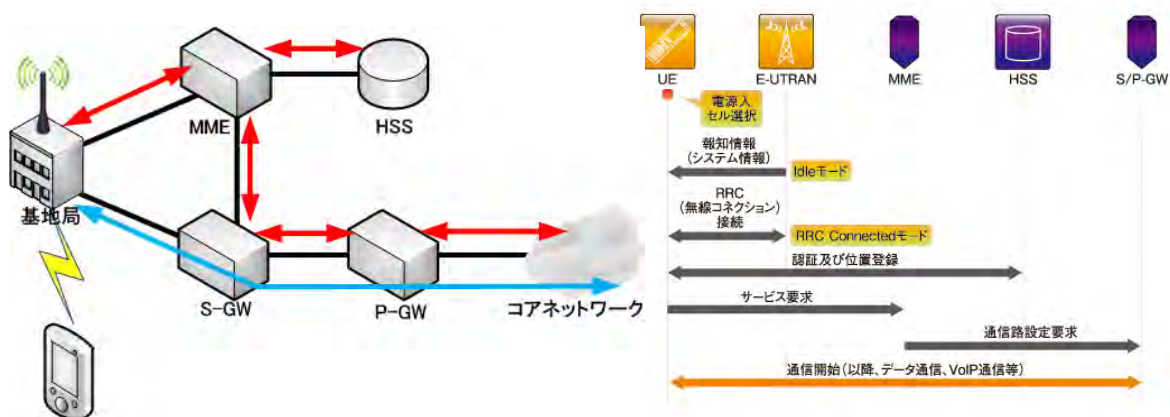
また「VR 酔い」は、脳と身体の同期ズレが原因で起こると考えられている。例えば VR ゲーム内で首を回して視点を移動した動作に対して、仮想空間にある動画の視点が移動するまでの遅延が、脳内で調整可能なズレ時間を超えると酔ってしまう。VR アプリで仮想世界をリアルに感じるには、画像の精細さに加えて、仮想からの刺激と身体の動きとの同期ズレを数十 $msec$ 以内に収めることが必要になる。

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。

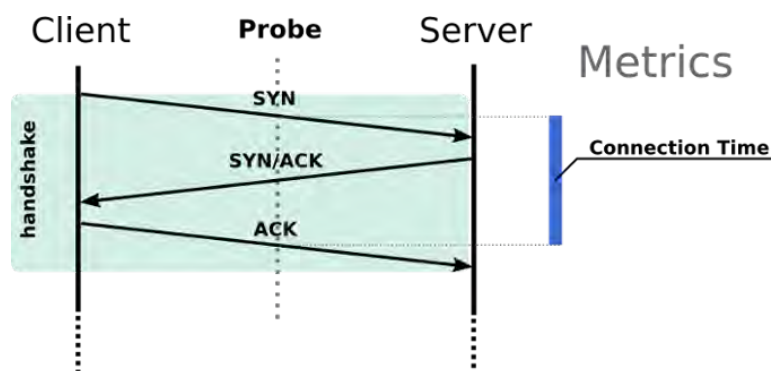
2 - 1. 低通信遅延

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見え、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ィング・サービスによる交通事故を減らすためには、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。

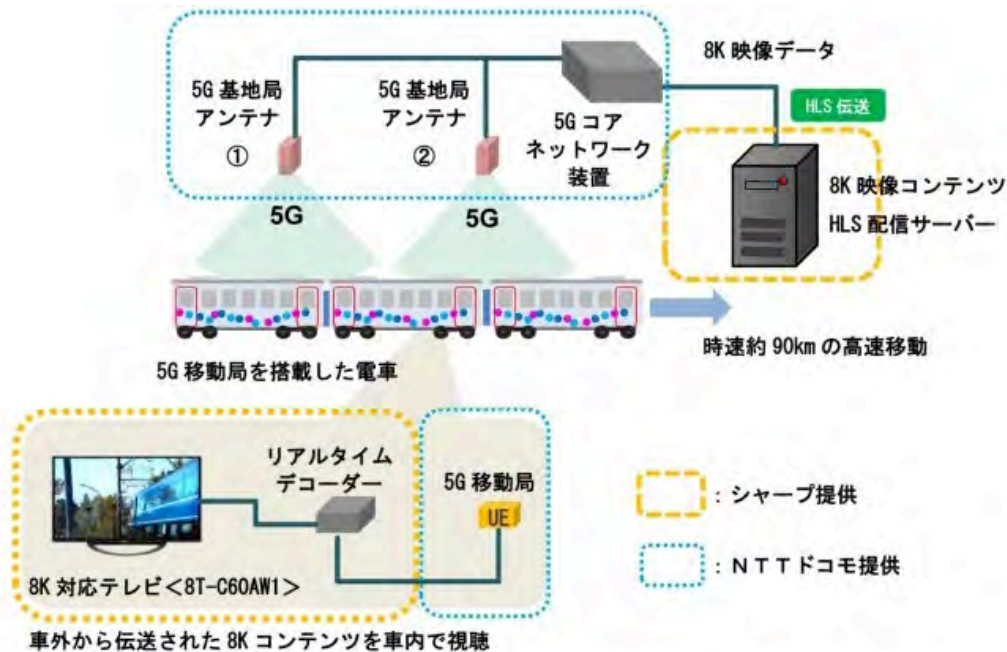
信号機に配置された4Kカメラからの画像から障害物を認識して、その結果を交差点に近づいてくる車にポスト5G通信でリアルタイムに処理結果を通知するようなユースケースに必要な膨大な量の画像データのコンピューティング処理を数十 msec の遅延で実現する際には、各交差点の鉄柱に基地局とMECを配置して、交差点の基地局を「冷蔵庫大の携帯電話」にして、必要な画像解析処理を基地局内で計算しなければ解決できない。

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ふという課題がある。
- 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

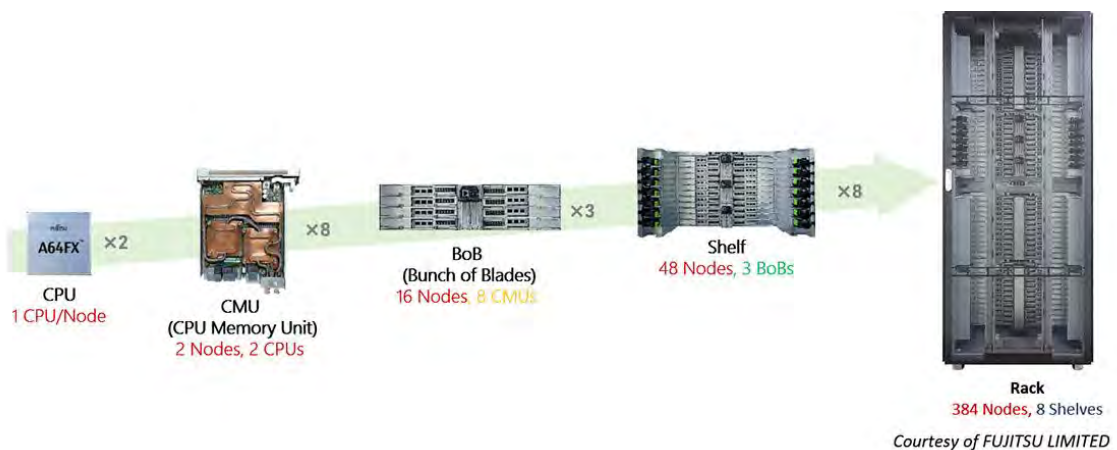
¹¹ https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/csr/about/pdf/csr2019w_007.pdf

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

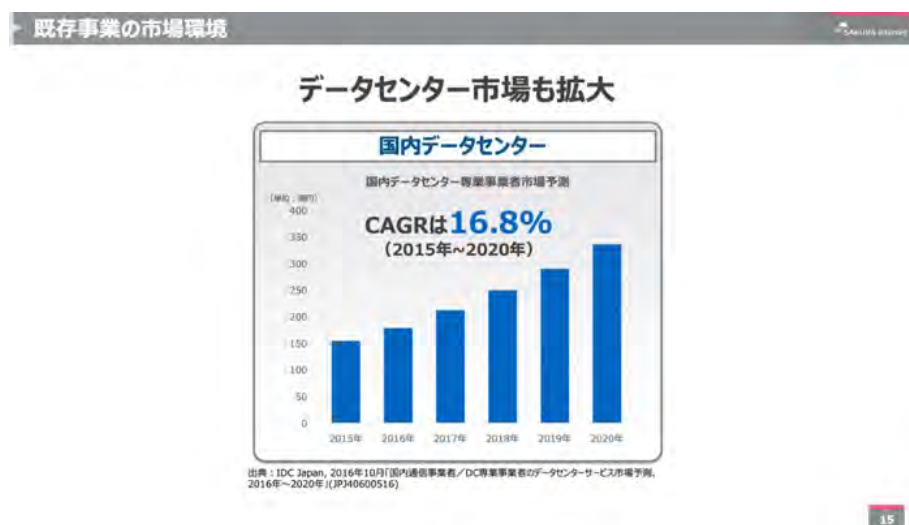
データセンターの1ラック想定電源供給能力は平均6KWであるので、MECに必要な想定電源供給能力も6KW。ポスト5Gの想定基地局数を掛け算すれば400万局×6KW=24百万KWになる。現在の日本の電力量使用量が100~200百万kWになるので、ポスト5G+MECのために新たに12~24%ほど電力使用量が増える。

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>

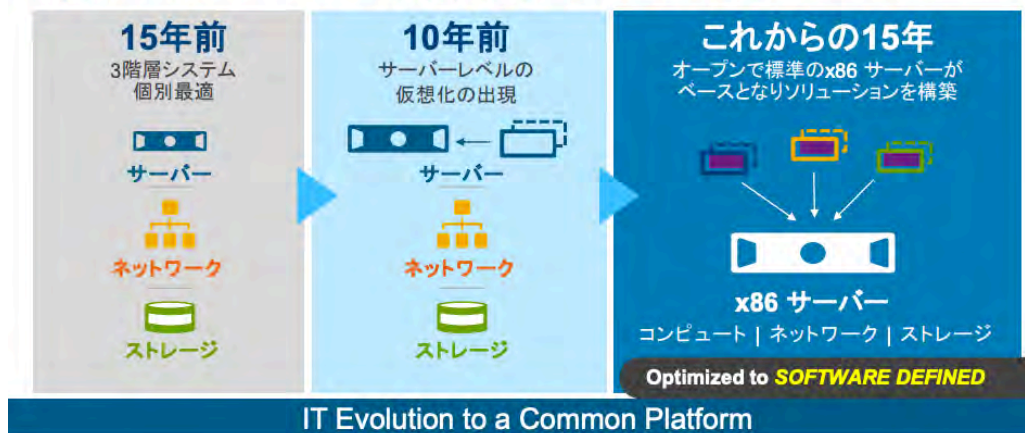
¹⁶ <https://5g.sfc.keio.ac.jp/?p=670>

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

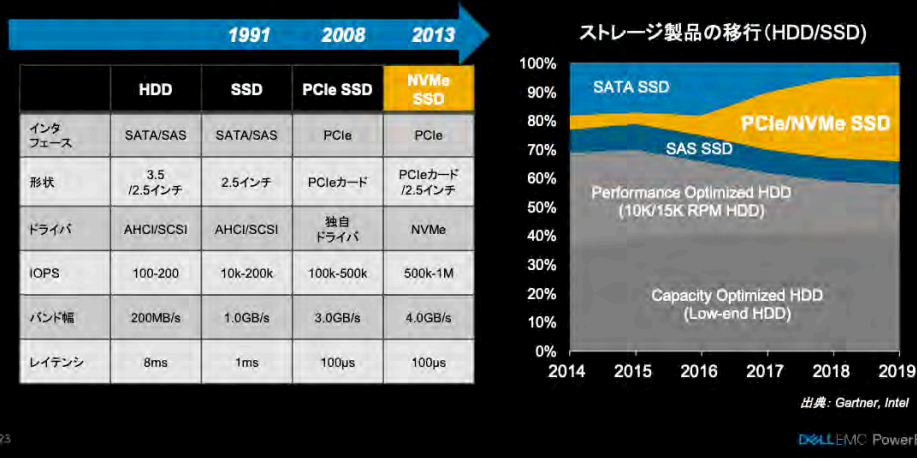
DELL EMC PowerEdge

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

- 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。

購買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ーターが、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。

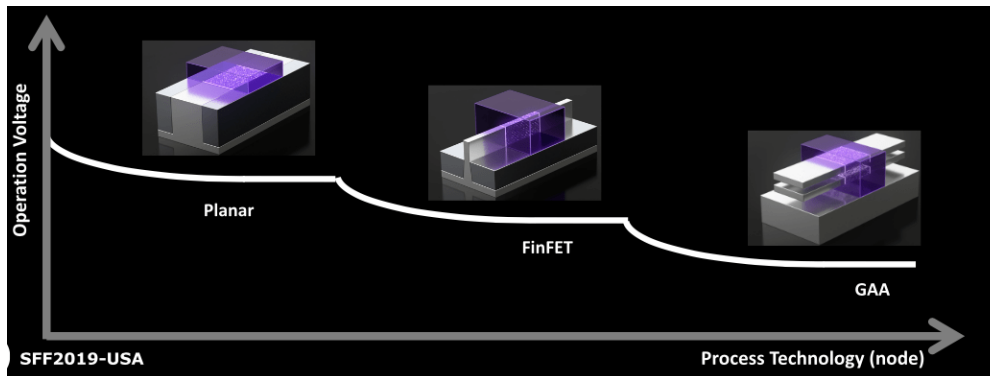
ポスト 5 G + MEC が、ここまで検証してきたように、クラウドでもなく、携帯電話でもない、「冷蔵庫大の携帯電話」という、新たなコンピューテーション階層を担うデバイスだとすれば、過去の歴史が物語るように、「冷蔵庫大の携帯電話」に必須の「新たな周辺機器」が生まれる可能性は十分にある。また、過去に学べば「冷蔵庫大の携帯電話」に必須の周辺機器は、「冷蔵庫大の携帯電話」に必須のアプリケーションから生まれるはず、つまり「自立したコンピューテーション」の実現に鍵があると考えられる。

「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。

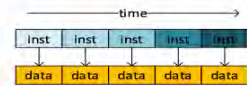
同様に、クラウドサーバーでも、はじめから Nvidia の GPU が 4 G 通信 + クラウドコンピューティングで一定の地位を確保していた訳ではない。クラウドサーバーが進化して、4 G 通信 + クラウドコンピューティングが提供するユースモデルを拡張していく中で、新たに必要になってきたり、進化を求められたりしてきたデバイスである。

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

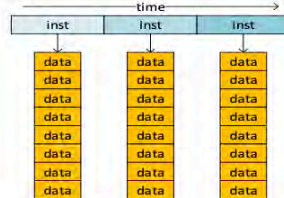
依然としてコンピューティングのコアセンター



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

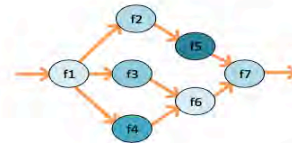
依然としてハイパフォーマンスの問題のサブセットに重点
なくなることはないが、範囲は限定的



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はずに、ポスト5G世代の「次世代コンピューション」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。

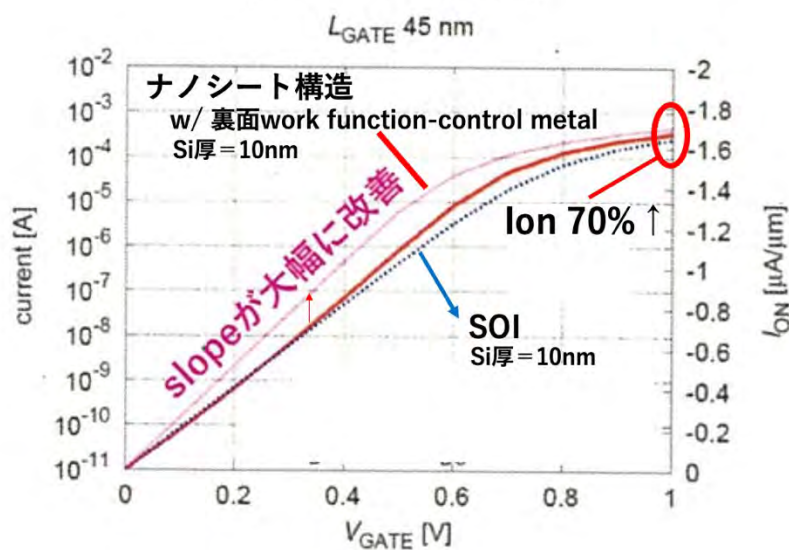
1. 微細半導体の開発競争は続き、引き続き現行のロジック半導体＝CPUは進化を続ける。基本的なコンピューションでは、現行のCPUのアーキテクチャを使い続ける。
2. 特定のアプリに向けたロジック半導体も微細半導体技術を追いかける形で進化を続ける、GPUやFPGAに向けたアプリケーションでは、現行CPUを使わずにコンピューションのアクセラレーターとして進化する（オプションとしてシステムに内蔵される）。
3. リアルタイム処理にかかり通信遅延に関わるハードウェアは「冷蔵庫大の携帯電話」である基地局にシステムとして統合され、リアルタイム処理とクライアント・サーバー処理は切り分けられる。
4. インタ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。

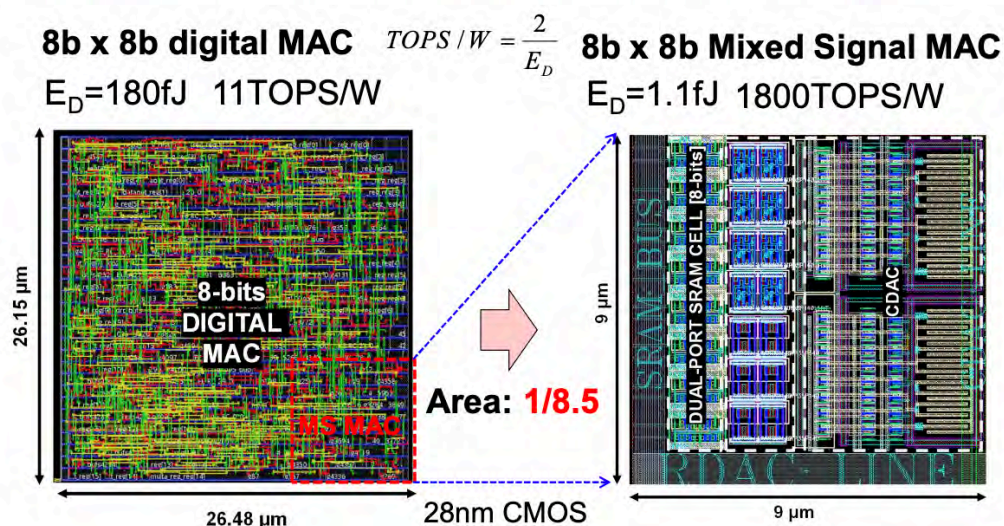
4-2. アナログ CNN デバイス (松澤さん@チップイデアとの議論)

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

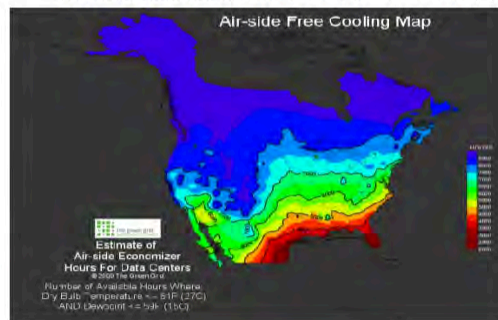
▶ 最も重要な選定基準は電力コスト

- ・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」

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。