

ハイパーコネクテッド・クラウドを牽引する先端デバイス，実装技術，材料技術

Devices, Materials, and Packaging Technologies for Hyper-Connected Clouds

● 青木重憲

あらまし

来るIoT(Internet of Things)社会を支えていくハイパーコネクテッド・クラウド(以下、HyCC)の進展には、実世界における高度なデータ収集と、それらを限られたスペースと電力で高速に処理するための新しいハードウェア要素技術が不可欠である。富士通研究所では、これまで入手できなかったデータを収集しHyCCのカバー領域を広げるため、化合物半導体の特殊な物性を活用した非シリコン系デバイスの開発を進め、高周波無線技術やミリ波レーダー、匂いセンサーの実用化を推進している。また、ハードウェアにとって不変の課題である小型・高速・省電力化に向け、半導体の微細化による性能向上が期待できなくなってきた昨今、チップ間の配線距離を極限まで短縮できる3次元集積や、広帯域で伝送損の小さい集積光トランシーバなどの新しい実装技術の開発を進めている。更に、将来に向けた基礎研究として、シリコン半導体を置換しその限界を突破する可能性のあるナノカーボン材料について、マテリアルズ・インフォマティクスと先端プロセス技術を融合した取り組みも進めている。

本稿では、富士通研究所で開発を進めている先端デバイス、実装技術、および材料技術を紹介する。

Abstract

The progress of hyper-connected clouds (HyCC) sustaining the coming Internet of Things (IoT) era means that novel hardware technologies are needed for collecting data from the real world and for high-speed data processing with limited space and energy consumption. To collect novel data and enhance HyCC coverage, several kinds of compound semiconductor devices have been developed for wireless telecommunication equipment, millimeter-wave radars, and odor sensors. Advanced packaging technologies such as 3D device integration for minimal chip-to-chip distance and compact optical transceivers with maximum bandwidth are developed, for compact, high-speed and cost-effective products. New materials breaking through the limitations of information and communications technology (ICT) are under development including nano-carbon, by combining a novel build-up synthesizing process with a materials informatics approach. This paper presents the devices, materials, and packaging technologies developed in Fujitsu Laboratories.

ま え が き

ICTの急速な進展や、IoT（Internet of Things）、ビッグデータなどの先端技術の融合により、実世界における人・モノ・コトが仮想空間を介して縦横無尽につながり、デジタル化された情報が高速に処理され新たな価値を生み出していく時代が到来している。このトレンドをリードし、加速していくために富士通研究所が掲げるプラットフォームが、ハイパーコネクテッド・クラウド（以下、HyCC）である⁽¹⁾

HyCCの概念を図-1に示す。⁽²⁾ 半円状に描かれた仮想空間の外周に配された実世界の事象（人、モノ、情報、サービス）が、クラウドなどのデジタル機器を介し、ICTインフラを中心とする仮想空間を通じてつながる構造となっている。

HyCCの発展には、ソフトウェアの進化とともに、これを支える物理実体であるハードウェアの継続的な性能向上が不可欠である。デバイス関連技術はそのための切り札であり、特にHyCC外周部における実世界からの情報収集機能の拡充と、システム全体の小型・高速・省電力化を実現していくための鍵となる技術である。

実世界からの情報収集機能の拡充に向けては、多数のセンサーを設置し、得られた大量のデータから隠れた法則性を見出そうとするビッグデータ解析が近年注目を集めている。HyCCの世界を拡張するためには、宇宙や深海、体内など新たなフロンティアの開拓も同じく重要であり、今まで感知できなかった情報を収集できる超高感度センサーの開発がその鍵を握る。

一方、IoTの進展により爆発的なデータの増大が予想される。今後の持続的な発展のためには、装置設置面積や消費電力などのハードウェアリソースを、マクロな観点で現状レベルに抑えていく必要がある。HyCCは、データセンターから分散エッジサーバ、車載コンピュータに至る種々の階層の装置で構成されるが、高速化、小型化、省電力化は共通要素技術の開発で実現できる部分が多い。

本稿ではまず、超高感度センサーの開発に向け、富士通研究所の有する世界トップクラスの化合物半導体の技術を活かした取り組みを紹介する。次に、富士通研究所が長い伝統を持つ高密度実装技術によりこれらを解決する取り組みについて述べる。そして最後に、将来に向けた基礎研究として、シリコン半導体を置換しその限界を突破する可能

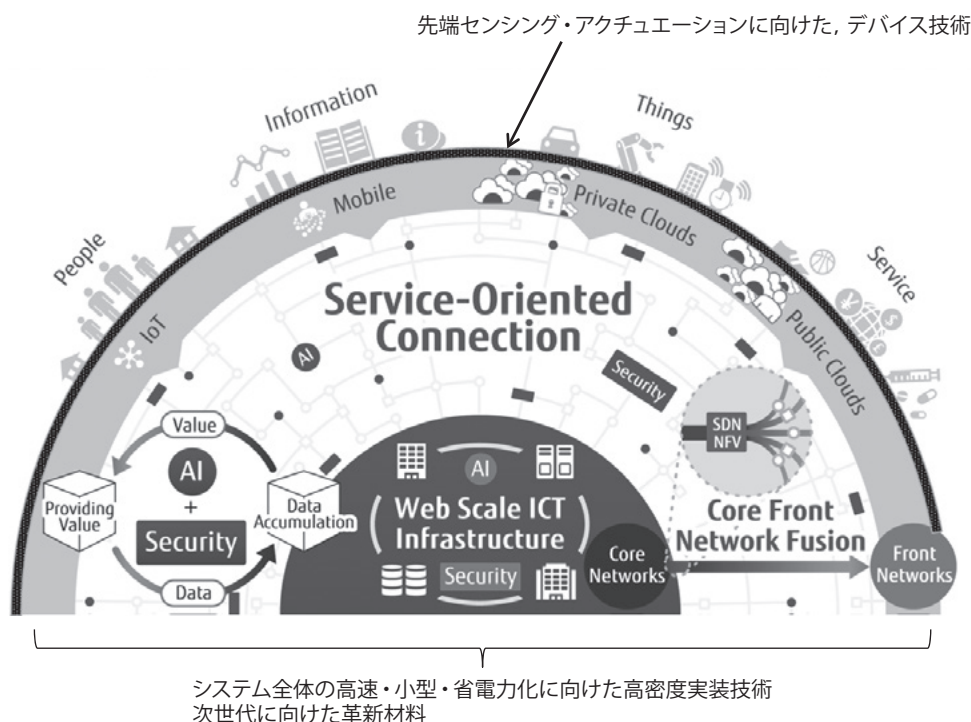


図-1 ハイパーコネクテッド・クラウドのコアテクノロジーとなる先端要素技術

性のあるナノカーボン材料について、マテリアルズ・インフォマティクス^(注1)と先端プロセス技術を融合した取り組みの一端を紹介する。

デバイス技術 ～先端センシングに向けて

現在、世の中にある半導体デバイスの約9割はシリコンを主材料とする単元素半導体である。それ以外の、2種類以上の元素からなる半導体を化合物半導体と総称する。デバイスの集積度が重要なデジタル信号処理用途では、製造性に優れるシリコンの独壇場であるが、高周波、高耐圧など、素材の物性がデバイス性能に直結する一部のアナログ用途では化合物半導体が主流となっている。すなわち、実世界のアナログ情報を扱う超高感度センサーの分野では、化合物半導体の使いこなしが鍵となる。

富士通研究所は、1979年の三村高志研究員による高電子移動度トランジスタ（HEMT：High Electron Mobility Transistor）の発明以来、この分野で世界をリードしてきた。HEMTは2種類の化合物半導体を直接接合した電子デバイスであり、内部に電子が高速移動できる経路を有する構造で

(注1) 材料の構造・物性などのデータベースを計算機解析することで新材料の設計指針を得る技術。

あるため、原理的に高周波特性に優れている。また、構成元素を変えることで様々な性質を付与することができる。そのようにして新たな応用分野を開拓してきた歴史を図-2に示す。

最初に実用化されたHEMTは、GaAs（ガリウムヒ素）基板上にAlGaAs（アルミニウムガリウムヒ素）とGaAsを成長させたもので、マイクロ波からミリ波帯域の信号増幅に優れた性能を示した。これは、丁度サービスが開始されたばかりの衛星放送の受信用パラボラアンテナに採用され、小型化によってサービス普及に大きく貢献した。その後、初期の自動車レーダーに適用され、ミリ波センシングの民生応用への道を切り開いた。

続いて、InP（インジウムリン）基板を用いたHEMTが開発された。GaAs系HEMTと比べて電子移動度、電子飽和速度、電子濃度がいずれも高く、現時点ではミリ波からテラヘルツ領域に及ぶ最も高周波での動作が可能なHEMTである。まだ製品化実績は少ないが、今後超大容量無線データ伝送はもちろん、宇宙探索、物質内部の非破壊分析、食品の成分分析など広範なセンシングへの応用が見込まれている⁽³⁾。

現在最もホットなHEMTは、GaN（窒化ガリウム）系である。これは青色LEDで注目された材料であ

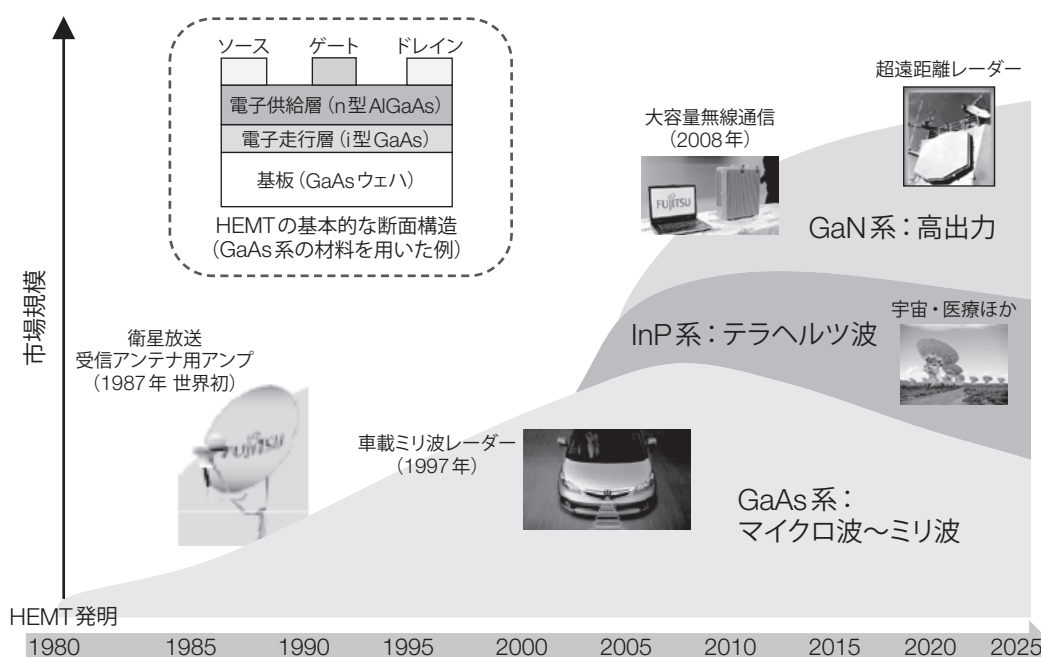


図-2 高周波デバイスHEMTの発展の歴史

るが、絶縁耐圧が高いため、HEMTに適用することでマイクロ波からミリ波に至る周波数帯域での高電圧動作が期待できる。これは、既に携帯電話の無線基地局でハイパワーアンプとして実用化されている。更に今後は、電子の目として超遠距離レーダーやマイクロ波加熱、高効率電源回路など、様々な分野への応用が期待されている。

以上、HEMTを中心に化合物半導体の高周波特性を活かした「視覚」の拡充について述べてきたが、そのほかのセンシング技術についても検討を進めている。人間の五感のうち、最もセンシングの研究開発が遅れているのは「嗅覚」と言われており、食品の鮮度や産地の判定、病気の初期診断などの開拓で広大なビジネス領域が期待されている。富士通研究所では、化合物半導体のノウハウを活かした超高感度ガスセンサーの研究も進めており、外部研究機関との連携も模索しつつ、匂いセンシングシステムの確立に取り組んでいる。

実装技術 ～小型・高速・省電力に向けて

今後本格化するIoTの進展に伴い、ネットワークのデータトラフィックは年率23%で増大すると言われている⁽⁴⁾。前述のように、ICTの持続可能な発展のためには、これまでと同等の装置サイズ、同等の消費電力を維持した上で高い性能が要求されることになる。

過去数十年にわたり、機器の高性能化・小型化・低コスト化によりICTの進展を牽引してきたのは、半導体デバイスを中心とするハードウェア技術であった。一昔前のスーパーコンピュータの性能を手のひらサイズのスマートフォンで実現できるようになったのは、シリコン半導体の微細加工技術とそれを製品に仕立てる実装技術の飛躍的な進歩によるところが大きい。

ところが、ムーアの法則を支えてきた半導体微細加工技術の進展が、特に2010年代以降鈍化してきている。微細加工技術の物理的な限界が見えてきたことに加え、膨大な設備投資が必要になってコスト的に成り立たなくなってきたことが原因である。またその過程で、プロセッサやメモリなど主要なデジタルデバイスのベンダーが淘汰され、寡占化が進んだ。

したがって、今後のICT機器の性能向上・性能

差異化は、プロダクトベンダー独自の実装技術が鍵を握ることになる。具体的には、以下に挙げる三つの技術である。

(1) 高密度実装技術

デバイス間の配線引き回しを短くできるため、小型化とともに配線による遅延や伝送損失の低減に有効である。一方で、デバイスを搭載するプリント基板に対し、半導体に迫る微細な配線を要求することになるため高価なものとなり、導入はスーパーコンピュータなど一部のハイエンド用途に限られてきた。

しかし今後のHyCCにおいては、自動運転などデータ処理にリアルタイム性を必要とする用途が増え、ユーザーの近くに分散配置する小規模データセンター（エッジサーバ）や、車載サーバへの需要が高まると考えられる。⁽⁵⁾これらに対応するためには、現在のラック搭載型のサーバ並みの性能を1/10～1/100程度にコンパクト化する必要があると言われているが、前述のとおり半導体自体の大幅な微細化・高密度化は望めない。富士通研究所では、その解として半導体チップを縦に積む3次元集積が本命と考えている。

サーバへの適用を想定した集積搭載技術のロードマップを図-3に示す。現行のプリント基板配線の一部に半導体プロセスで製造したシリコン配線板（インターポーザ）を導入することで、1桁程度配線密度が向上し、それに伴い装置の小型化が可能となる（2.5次元実装）。また、このインターポーザも使わずに半導体チップ同士を直接縦に積み上げる3次元実装技術を実用化できれば、更に1桁以上の高密度実装が可能になる。前述した次世代のエッジサーバや車載サーバには、これらの新しい高密度実装技術の導入が不可欠になると考えている。

その先に来るニューロコンピュータや脳コンピュータについては、具体的な用途やスペックは明確にはなっていないが、プロセッサコア（ニューロン）同士の接続数を飛躍的に増やす必要があると言われている。⁽⁶⁾すなわち、3次元集積技術が必須の共通技術になるのは間違いなく、現時点で先行開発を進めておくことは極めて重要である。

(2) 光集積技術（シリコンフォトリクス）

電子機器などの装置間を相互接続するインター

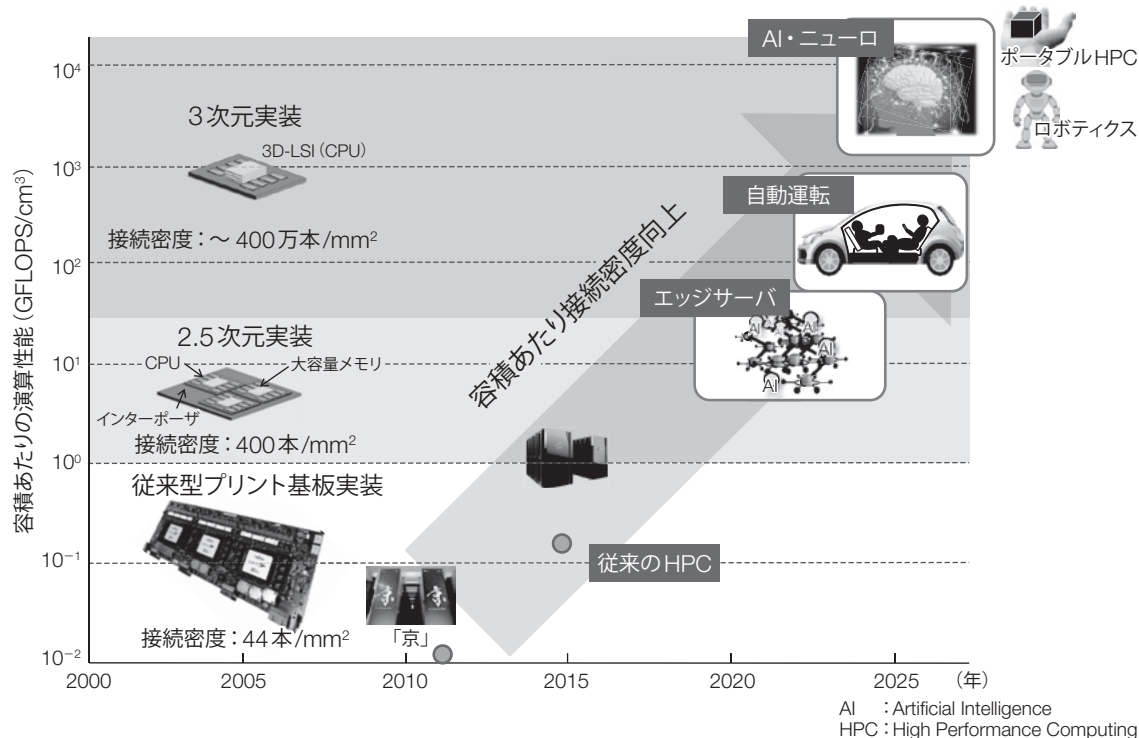


図-3 サーバの小型・高速・省電力に向けた高密度実装技術のロードマップ

コネクタに関しては、現行の剛直で伝送ロスの大きい同軸ケーブルが小型化・省電力化のネックとなる。このため、これを光ファイバーに置き換えるための小型光送受信機の開発が相次いでいる。しかし、上述の高密度実装デバイスの入出力にまで光配線を適用するためには、光送受信機そのものを半導体チップレベルまで小型化する必要がある。

シリコンフォトリソグラフィは、主要機能をシリコンチップ上に集積し狭小領域での光配線の引き回しを実現する技術である。シリコンを光導波路に用いると、従来のガラスに比べて光の閉じ込めが強くなるため、微細で曲げ半径の小さい配線路を形成できる。富士通研究所には化合物光半導体の豊富な開発ノウハウがあり、これを活かして、現行の小型光送受信機の次の世代の高速インターコネクタ技術としてシリコンフォトリソグラフィの研究開発を積極的に進めている。

(3) 冷却技術

装置の小型化に伴って問題となる放熱に対しては、1980年代に数ラック向けに実用化されていた水冷技術の信頼性を1,000ラック規模まで高めたシステム水冷技術を開発し、スーパーコンピュータ

「京」^(注2)で実用化した。今後、3次元実装などで更に集積が進むと、チップ内部のホットスポットと称される過熱部分から水冷システムまで熱を運ぶ技術が必要になる。

しかし、狭い領域に液体(冷媒)を循環させるのに必要となる微細流路の形成や流量確保が困難であり、またポンプを使用するとそのサイズや電力、寿命も問題となる。そこで、冷媒の蒸発を利用する2相流冷却技術の開発を進めている。冷媒を循環させる方式に比べ、冷媒流量を減らせるため微細配管を使用でき、また蒸気圧を利用することでヒートパイプと類似のポンプ不要の自律循環が実現できる可能性がある。モバイル機器などへの展開も含め、こうした特長を有する技術の開発を進めている。

次世代に向けた革新材料

HEMTやSAW(Surface Acoustic Wave) フィルター、量子ドットレーザーなどの新しいデバイスは、度々 ICTの限界を突破する原動力となって

(注2) 理化学研究所と富士通が共同開発したスーパーコンピュータ。「京」は理化学研究所の登録商標。

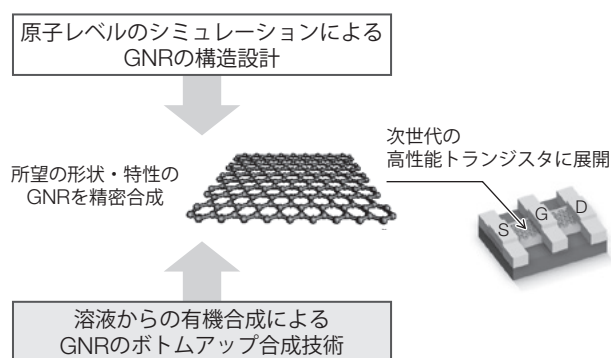


図-4 GNRのテーラーメイド合成

きたが、実用化までに長い時間がかかるという問題がある。富士通研究所では、ブレークスルーを引き起こし、次世代の核となり得る技術をいくつか選定し、先端基礎研究として開発を進めている。

注力している技術の一つが、マテリアルズ・インフォマティクスを用いたナノカーボン材料の開発である。現在主力の半導体材料はシリコンであるが、既に述べたように微細加工技術の限界が近づいており、今後の大幅な性能向上は望めない状況にある。カーボンシリコンと同じIV属元素でありながら、導電率や電子移動度などの電子材料としてのポテンシャルが圧倒的に高い。カーボンを半導体デバイスの基幹材料にできれば、桁違いに高速で動作する超低消費電力トランジスタや超高感度ガスセンサーなどが実現でき、世の中を一変させる可能性がある⁽⁷⁾。

富士通研究所はこれまで、ナノカーボンを材料とするカーボンナノチューブやグラフェンの研究で世界トップクラスの成果を上げてきた。現在注力しているグラフェンナノリボン（GNR：Graphene Nano Ribbon）は、炭素原子を1枚の層にした材料であるグラフェンを数原子レベルの短冊状にしたもので、短冊の方向や幅により材料物性が大きく変化する。富士通研究所は図-4に示すように、スーパーコンピュータを用いたシミュレーションによる構造設計と、これを忠実に実現できるボトムアップ型の合成プロセスの開発を組み合わせ、所望の物性のGNRを合成する技術を研究している。

む す び

本稿では、富士通研究所におけるデバイス、ハードウェア実装、新材料の研究の現状とその方向性について述べた。

ソフトウェアとハードウェアはHyCCを推進していく両輪をなす。近年は、SDx（Software-Defined Anything）と称される仮想化技術により、専用ハードウェアでなければできなかった処理が汎用ハードウェア上でも実現できるようになってきている。しかし複雑なソフトウェア処理が必要になるため、処理速度や消費電力で同等の性能を出すには、デバイスや実装技術などのハードウェア要素により高い性能が要求されることになる。すなわち今後のソフトウェアの進歩を支え新しい時代を切り開いていくためにも、次のハードウェアのブレークスルーを生み出すための要素技術レベルでの取り組みは必須である。本稿で述べた研究の多くが数年後に花開き、HyCCおよびそれが実現する世の中を牽引していけるよう研究を推進していく。

参考文献

- (1) 飯田一郎：ICTのメガトレンドに向けたハイパーコネクテッド・クラウドへの取組み。FUJITSU, Vol.66, No.5, p.2-8 (2015).
<http://img.jp.fujitsu.com/downloads/jp/jmag/vol66-5/paper01.pdf>
- (2) 富士通研究所。
<http://www.fujitsu.com/jp/group/labs/business/index.html>
- (3) 中舎安宏ほか：超高速・超低雑音InP HEMT IC技術。FUJITSU, Vol.58, No.3, p.260-266 (2007).
<http://img.jp.fujitsu.com/downloads/jp/jmag/vol58-3/paper17.pdf>
- (4) 総務省：平成28年版情報通信白書。p.81 (2016).
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h28/pdf/28honpen.pdf>
- (5) 田中裕之ほか：IoT時代を拓くエッジコンピューティングの研究開発。NTT技術ジャーナル, Vol.27, No.8, p.59-63 (2015).
- (6) 堀部晃啓ほか：コグニティブ・コンピューティング時代を切り拓くコア・テクノロジー。エレクトロニクス実装学会誌, Vol.17, No.3, p.156-162 (2014).

- (7) A. K. ガイムほか：グラフェン鉛筆から生まれたナノ材料. 日経サイエンス, Vol.38, No.8, p.76-85(2008).

著者紹介



青木重憲 (あおき しげのり)

デバイス&マテリアル研究所
富士通研究所におけるデバイス，ハードウェア実装，新材料の研究・開発を統率。