

2.6.5 ネットワークコンピューティング

（1）研究開発領域の定義

カスタム化可能なハードウェアや汎用ハードウェア上のソフトウェアで通信機能・サービス機能を実現する「ソフトウェア化」により、社会基盤としてのネットワークを迅速かつ柔軟に提供すると共に、ネットワーク層で計算処理を実行する、あるいは、サービスに拡張性を持たせることを可能とする情報通信と情報科学の融合技術である。

（2）キーワード

Edge Computing、Softwarization、Open RAN、vRAN、Privatization、Local 5G、Beyond5G

（3）研究開発領域の概要

〔本領域の意義〕

近年、パンデミック（新型コロナウイルス感染症のまん延により人の物理的移動に制約）、自然災害（わが国は地震・津波・台風などの自然災害が多く人流や物流に制約が生じやすい）、国際紛争（紛争の勃発により安全・安心な社会生活に支障）などの新たな社会課題の発生に伴い、人間の行動が大きく制約を受ける状況が起きている。これらの制約のもと、人々の社会活動が、情報通信により辛うじて継続が可能となる状況が生じており、強靱な情報通信インフラ整備の必要性が再認識されつつある。

わが国では5Gの次の世代の通信基盤技術確立するBeyond 5Gと呼ばれる新たな情報通信インフラの実現を目指す研究開発推進事業が進められ、エッジコンピューティング技術などの通信と計算処理の融合によりネットワーク機能を高度化・強靱化する方向性の研究開発が進められている。また、国際連携や経済安全保障の観点で、サプライチェーンのセキュリティ確保やネットワーク機能の高度化を目指して、モバイルインフラの構成要素をオープンインターフェースによりモジュール化する動向がグローバルで急速に拡大している。さらに、複数の要素技術によって構成されるネットワークを柔軟かつ迅速に進化させることを可能とするソフトウェア化と呼ばれる技術が台頭している。本報告ではこれらの技術を包括して「ネットワークコンピューティング」と呼んでいる。

ネットワークコンピューティング技術は情報通信インフラを柔軟かつ継続的に進化させ、強靱化させていく上で必要不可欠となる技術であり、高度化するネットワークの新たな機能・性能・安全性・強靱性に対する要求に応える上で、早期確立が急務となっている。ネットワークコンピューティング分野の覇権争いは激化しており、世界中で同時多発的に社会情勢がさまざまに急展開し、課題が生じている中、本技術分野を俯瞰し戦略を定め、研究開発に注力することは極めて重要である。

〔研究開発の動向〕

ネットワークコンピューティングは、2020年にスタートした第5世代移動通信（5G）の次世代の情報通信技術であるBeyond5G/6Gを目指した研究開発において急速に進展している。総務省・NICTでは、Beyond 5G 研究開発促進事業¹⁾、経産省では、ポスト5G情報通信システム基盤強化研究開発事業²⁾などの研究開発投資が進んでいる。

Beyond5G/6Gの技術目標は、大容量、低遅延、多数接続の向上に加え、低消費電力、安心安全、自律性、拡張性などの実現が目標として設定されている。これらの実現に付随して、エッジコンピューティング、ソフトウェア化など、情報通信工学と計算機科学を活用する技術の研究開発が進んでおり、通信と計算処理の融合、さらには、そうした情報通信技術を出口とする半導体の開発・利活用が急速に進むと見られている。企業ではNTTがIOWNグローバルコンソーシアム³⁾を組織し、オール光ネットワークや低消費電力のインフラに向けたネットワークアーキテクチャーの議論を始めており、グローバル企業や大学などのメンバー参加が急速に

増加している。

Beyond 5Gに向けた研究開発は、世界各国でも着実に進められている。ITUでは、2030年頃の次世代通信6Gの実現に向けて、ITU-R WP5Dにてビジョン勧告を2023年6月に予定しており、各国からインプットがなされている。また、ITU-Tでは、5Gにおける機械学習やAIの利活用をコンテスト形式で技術開発を進めるためのML5G Challenge AI for Goodの活動⁴⁾が2022年で3年目を迎え多くの国から参加がある。欧州では、フィンランドのOulu大学が主導する6G Flagshipにおいて、複数の国で進めるHexa-X⁵⁾が第2期の研究開発が始まり、また、フランスを中心とするSLICES-RIなどの新たなテストベッドプロジェクト⁶⁾が進んでいる。英国では、Surrey大学における6Gの研究開発を目指すキャンパステストベッドによる産学連携⁷⁾が進められている。米国では、ATISを中心にNEXTGアライアンス⁸⁾が組織され主要な企業が次世代通信に向けたパートナー形成を始めている。PAWRプロジェクト⁹⁾では当初の予定通り、四つの地域（ニューヨーク、ユタ、リサーチトライアングル、アイオワ）の多様性に富んだ地域まるごとテストベッドによる研究開発が進んでいる。

一方、GAFAM（Google, Apple, Facebook, Amazon, Microsoft）に代表されるいわゆるHyper Giantsと呼ばれる巨大IT事業者が、インターネットの構造に影響を与え始めており、「Privatization」（プライベートネットワーク化）が加速している。Hyper Giantsは2009年頃からTier 1通信事業者に替わる存在としてインターネット上で台頭してきており、大規模なコンテンツプロバイダー、クラウドプロバイダー、CDN（Content Delivery Network）がこれに該当する。今後、Hyper Giantsを中心として、エッジコンピューティングをはじめとした、通信と計算処理を融合するネットワークコンピューティングの技術競争が激化することが予測される。

わが国では、5Gを自営網として活用するローカル5Gが大きな注目を浴びている。2019年12月に制度化された一般事業者に免許制で情報通信の基本サービスを提供可能とする施策は、「情報通信の民主化」とも言われ、研究開発に携わるステークホルダーを飛躍的に拡大し、革新を加速する重要な施策である。3年間の総務省実証事業の投資が結実し始めており、多くの成果が報告されている¹⁰⁾。ローカル5Gでもソフトウェア化された基地局が多用され、また、基地局の近傍に計算リソースを自営で配置できることからエッジコンピューティングのプラットフォームとしての展開が可能であり、ネットワークコンピューティングの発展が期待される。

〔論文や特許の動向〕

本領域では、論文数・特許数共に大きく増加しており、活発に研究開発が進められている。論文動向に関しては、日本の論文数が微増、欧州・米国が順調に増加する中、中国が各国を引き離して大幅に増加。特に2018年以降、急激に増加しており、論文数シェアも50%を超えている（欧州・米国は20%前後）。論文執筆者数およびTop1%論文数・Top10%論文数も中国が他を大きく引き離して1位である。企業共著の割合は、ドイツ・フランスが高く、共に20%を超えている。特許動向に関しては、全体の特許ファミリー件数が大きく増加している中、中国がシェア50%を超えた一方、米国は2015年時点の50%超から2021年には30%にまで低下。Patent Asset Indexシェアにおいても同様の傾向が見られる。

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

Privatization（プライベート化）

Hyper Giants は、エンドユーザーに迅速にコンテンツを提供するために Off-net を拡大している。Off-netとは、他通信事業者のネットワーク内に自社サーバーを配置することで、トラフィックを削減してサーバーやネットワークの負荷を軽減し、遅延や混雑、コストに関する問題を改善するものである。Off-netを行う事業者の上位4社として、Google、Netflix、Facebook、Akamaiがある。Off-netは2013年から2021年

2.6

俯瞰区分と研究開発領域
通信・ネットワーク

にかけて約3倍に伸長し、約4,500のAS (Autonomous System) にてOff-netを確認できる。Off-netを実施しているほとんどのAS (96.0%のAS) は、Google, Facebook, Netflix, Akamaiの4つの事業者のうち少なくとも1以上ホストしており、さらにこの内70%以上がこれら4つの事業者のうち複数の事業者をホストしている。地理的には、ヨーロッパ、アジア、ラテンアメリカにて急速に展開が進んでいる。Off-netの恩恵を受けるユーザーの割合は年々増加しており、例えばGoogleでは2021年において全世界ユーザーの68.2%がOff-netの恩恵を受けている¹¹⁾。こうした傾向は、5GやBeyond5Gにおいて低遅延通信を活用するサービスがHyper Giantsによって急速に進展する可能性を示唆する。Off-net内にはHyper Giantsのサーバーが設置されるが、Amazon wavelengthのように利用者の組織内に設置されたサーバーを用いるエッジコンピューティングのサービスが提供されれば、Hyper Giants以外の事業者も低遅延通信を利用するサービスを実装可能である。事業者の要求に応じてカスタマイズされたエッジコンピューティングを提供可能とする上で、Off-netによるモバイルネットワークインフラのソフトウェア化はますます重要となる。この動向はネットワークコンピューティング領域として注視しておく必要がある。

2.6

俯瞰区分と研究開発領域 通信・ネットワーク

Softwarizaion (ソフトウェア化)

新たな課題に対応するための柔軟性を確保する目的や、エッジコンピューティングとモバイル通信の機能を融合させてコストを低減するため、汎用プロセッサ上にソフトウェアで通信機能を実現するソフトウェア化がさらに進展している。従来は、制御プレーンをソフトウェア化するSoftware Defined Networking (SDN)、データプレーンのネットワーク機能を仮想化するNetwork Functions Virtualization (NFV) などが、有線ネットワーク (クラウドネットワークやトランスポート) で盛んに研究開発されてきた。2010年代以降、データプレーンの転送機能をソフトウェア化するデータプレーンプログラマビリティが注目されてきた。この動向は、米国ではGENI¹²⁾と呼ばれるプロジェクト、わが国ではNICTを中心とする仮想化ノードプロジェクト¹³⁾に端を発する。

近年、特にモバイルネットワークの無線アクセスネットワーク (Radio Access Networks, RAN) をソフトウェア化する動向が顕著である。また単なるRANのソフトウェア化だけではなく、仮想化の動向も重要である。vRAN (virtual Radio Access Network) とは、RANにおける無線処理をソフトウェアで実装・仮想化可能とする動向であり、特に近年の進展が顕著である。後述のOpen RANとも親和性が高い。

フランスのEurecom大学が進めるOpen Air Interface (OAI)¹⁴⁾ や米国Northeastern大学が進めるOAX¹⁵⁾ などはオープンソースにて5G基地局を構成する技術を推進しておりグローバルにソフトウェア化を進めている。このプロジェクトは産業界からも注目を集め、多くの企業がソースコードを活用し、スタートアップが生まれている。

米国インテルが進めるFlexRAN¹⁶⁾ は、汎用プロセッサ (インテルアーキテクチャー) を活用したDU (Distributed Unit) のソフトウェアを企業向けに公開しており多くの企業が採用している。このソフトウェアはDPDK (Data Plane Development Kit)¹⁷⁾ と呼ばれるオープンソースを活用しており、これまで計算が主体であった汎用プロセッサの用途が、ネットワーク機能の実装に使われるようになる契機となった。現在ではDPDKのプラットフォーム上に5Gの機能開発に多大な投資が行われ、インテル汎用プロセッサの販売に大きく貢献をしている実態がある。上記のインテル汎用プロセッサを利活用する情報通信インフラのソフトウェア化は急速に進展しているが、これは、並列計算命令 (AVX2, AVX512) などが汎用プロセッサに採用され、ベースバンドの並列処理が効率的にできるようになったことが理由である。しかしながら高周波無線ベースバンド処理ではさらなる並列処理が必要であり、FPGA (Field Programmable Gate Array) やSmart NIC (Network Interface Card) などへのオフロードが必要となりつつある。FPGAのマーケットでは、AMDが買収したXilinx、インテル、の2強の企業が寡占的であり、特にXilinxは、プログラマブルロジックだけではなく、無線機能やベクトルプロセッサ、汎用プロセッサに組み合わせてワンチップに収容するMPSoC (Multi-Processor System-on-Chip)、RFSoc (Radio Frequency System-on-Chip)、ACAP

（Adaptive Compute Acceleration Platform）などの先進アーキテクチャーの製品を市場投入している。これらは、エッジコンピューティングにおけるAI・機械学習エンジンや無線通信基地局のオフロードエンジンとしての利用が進んでいる。

一方で、ASICによるプログラマブルネットワークの分野は主に有線ネットワークやモバイルコアネットワークで進んでいる。インテルに買収されたBigFootが投入したTofino¹⁸⁾はネットワーク専用のプログラマブルASICとして、P4という言葉と共に学术界に浸透しつつある。ネットワークテレメトリ（INTO）やクラウドネットワークにおけるミドルボックスでの輻輳制御処理などの応用例があり、モバイルコアへの利用が提唱されている。

ソフトウェア化における汎用ハードウェアの利用は、コンピューティングの市場がネットワークプロセッサの市場よりも巨大であることを利用するコスト低廉化に裏付けされているが、一方、低消費電力の観点では、汎用プロセッサを補完する専用半導体の開発が重要であり、ソフトとハードの両輪で研究開発戦略を立てる必要がある。汎用ハードウェアと専用チップによるアクセラレーションの利用という構図はしばらく続くと思われる。

上記の通り、汎用ハードウェアや専用チップの半導体設計・製造では、国外企業における寡占化が進み、限定された企業の開発状況で情報通信の進化が律速している状況があり、国産の通信モジュール半導体研究開発の強化が必要である。

ネットワーク仮想化

前述のvRANでも触れたが、クラウドのようなネットワーク機能の仮想化の進展がエッジクラウドやRANにまで進展している。また、エッジコンピューティングのために、ネットワーク機能とデータ処理の計算処理が仮想化され、VNF（Virtual Network Function）として実装されクラウド化されている。今後重要となるモバイルネットワークにおけるネットワーク仮想化は、既に研究開発段階から標準化を経て、ネットワークスライシングとして実装されつつある。また、無線ネットワークの仮想化を組み合わせ、キャリアのネットワークがクラウド事業者、Hyper Giantsによりホスティングされており、総務省でも、仮想化されたモバイルネットワーク機能に関する技術基準と、障害発生時を見越した責任分解点の議論が開始されている。

Open RAN

Open RANは、ステークホルダーが構成要素間の接続をオープンインターフェースで明確に定義し、サプライチェーンリスクの軽減と機能開発上の合意形成・新エコシステムを促進する活動の総称である。現在、具体的な活動母体として、通信事業者が中心となって進めるO-RAN Alliance¹⁹⁾と呼ばれる業界団体があり、同団体で策定された仕様が公開されている。

Open RANの重要性は、無線ネットワークにおける構成要素技術が明確にオープンインターフェースで定義されるため、通信事業者の視点ではベンダーロックインを避け、サプライチェーンリスクを軽減する点、通信機器ベンダーの視点では、グローバルにマーケットが広がる点、国家の観点では、特定地域のブラックボックス化された技術への依存性を排除するなど経済安全性に貢献するなどのメリットがある。一方で、パフォーマンスの最適化、相互接続性検証の必要性など課題もある。

協調領域は、技術開発において競合企業間で共有して利活用可能な技術分野を互いに協調して仕様策定し、開発することで、コスト低減や業界全体の進化を加速することが可能な技術領域、競争領域は、技術開発において競合企業間で、新規性や独創性を追求して他社を上回る市場割合や利益を獲得するため、競争を行うべき技術領域である。

Open RANの狙いは、経済安全保障やサプライチェーンリスク、マーケット拡大の観点だけではなく、協調領域と競争領域を明確にオープンインターフェースで切り分けることで、機能開発上の合意形成や迅速な開発を促すことが可能となり、さらには、新たなステークホルダーの参入も可能とする点が重要である。Open

RANの台頭と共に、RANの機能をソフトウェア化し、仮想化するvRANも相乗効果を生みつつある。

エッジコンピューティング

エッジコンピューティング^{20), 21)}は、大容量・低遅延通信を効率的に利活用するために利用者端末の近傍に計算資源を配置しデータを迅速に処理しその結果を用いた制御を行う仕組みである。便益として（１）データ処理の結果を低遅延でフィードバックすること（２）データの計算処理を分散化すること（３）データを「地産地消」することでデータの保護を実現可能なこと、などがある。

ETSIでは、オープンかつマルチベンダーで共通のエッジコンピューティング環境を実現するためのエッジコンピューティングの標準としてMEC（Multi-access Edge Computing）²⁰⁾が定められている。IEEEでは、エッジコンピューティングのシステム管理に関するP1935、エッジコンピューティングノード管理、データ取得、機械学習に関するP2805などの標準化の検討が進んでいる。

一方、機械学習によるデータ処理を行う際、クラウドにすべてのデータを集約して計算処理をするのではなく、データが生成される場所付近に配置された計算処理リソースを用いてセキュアに蓄積した上で、必要な機械学習を分割統治的に実行するFederated Learning（FL）²²⁾の研究が活発化している。エッジコンピューティングとFLは相性が良く、今後相互に影響を与えながら進化していくものと考えられる。

Democratization

わが国におけるローカル5Gの制度は、通信事業者だけではなく、一般事業者（大学・自治体を含む）による自営網の周波数利用を認可する「情報通信の民主化」の先行事例である。ネットワークコンピューティングの観点では、通信事業者・通信機器ベンダー以外のステークホルダーを広く包摂的に取り込み、オープンソースソフトウェアを用いた自営網基地局の構築、エッジコンピューティングの自営、通信機能のカスタム化などが便益として期待される。公衆網の通信が、大多数の利用者に対する最大公約数の仕様で提供されるのに対し、自営網では、現場発の仕様にカスタム化が可能であることが最大の特長であり、ソフトウェア化されたRANやエッジコンピューティング機能との親和性が非常に高い。ローカル5Gが個々のユースケースでカスタム化され、「ローカル6G」の要素技術へと進化し、共通仕様が6Gへと統合されることが期待されている。

超知性ネットワーキング

ソフトウェア化によって柔軟に複雑な機能をネットワークに実装可能となることで、「進化の早い」「複雑な計算処理を要求する」機械学習・人工知能（AI）の情報通信における利活用が促進されると考えられる。実際に、ネットワーク運用におけるオペレーションの自動化、機器障害の予測、電力消費の削減などを、人間の英知や経験を超える機械学習により最適化することが可能になりつつある。機械学習・人工知能の活用（超知性ネットワーキング）は、通信と計算処理の融合、ネットワークコンピューティング領域においてさらに発展が期待される。

実際、Open RANにおけるO-RANのRIC（RAN Intelligent Controller）のWGでは、現在ネットワーク制御機能のインテリジェント化が盛んに議論されつつある。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

国内

・Beyond 5G 研究開発促進事業（総務省・情報通信研究機構）

Beyond 5G 研究開発促進事業では、ネットワークコンピューティングを含むBeyond 5Gの実現に必要な要素技術について、民間企業や大学等への公募型研究開発を実施し、事業化を目的とした要素技術の確立や、国際標準への反映等を通じて、Beyond 5Gにおけるわが国の国際競争力強化等を図る。

• ポスト5G情報通信システム基盤強化研究開発事業（経産省）

超低遅延や多数同時接続といった機能が強化された5G情報通信システムや当該システムで用いられる半導体等の関連技術、5Gの次の通信世代（いわゆる6G）にかけて有望と考えられるネットワークコンピューティング関連技術の研究開発が進められている。

• 地域課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証（総務省）

ローカル5Gのより柔軟な運用の実現および低廉かつ安心安全なローカル5Gの利活用の実現に向け、令和2年度から引き続き、現実のさまざまな利用場面を想定した多種多様な利用環境下において、電波伝搬等に関する技術的検討を実施すると共に、ローカル5G等を活用したソリューションを創出する「課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証」においてネットワークコンピューティングに関連する各種実証が進められている。

• IOWN 構想（NTT）

IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想とは、あらゆる情報をもとに個と全体との最適化を図り、多様性を受容できる豊かな社会を創るため、光を中心とした革新的技術を活用し、これまでのインフラの限界を超えた高速大容量通信ならびに膨大な計算リソース等を提供可能な、端末を含むネットワーク・情報処理基盤の構想である。IOWN構想のもと、プロセッサチップ内の信号処理部に光と電子を導入する「光電融合」デバイスや物理サーバーに依存せず演算リソース等の追加を柔軟に行うディスアグリゲートドコンピューティングの研究開発が進められている。2020年には、NTT、Intel、ソニーが新規技術、フレームワーク、技術仕様、レファレンスデザインの開発を通じてIOWNの実現を促進するIOWN Global Forumを設置した。2022年現在、欧米、アジアを含む100社以上の組織・団体が参画している。

海外

• Hexa-X

欧州の6GプロジェクトであるHexa-Xは2021年1月に開始され、ホワイトペーパーでは6Gの社会実装で想定されるさまざまなユースケースで創造される価値をKVI（Key Value Indicators）として定義している。フィンランドの6GFlagshipと同様に、実装がもたらすSDGs達成への寄与など社会的価値に関わるメトリクスが導入されている。他の概念的なホワイトペーパーに比して、Hexa-Xのホワイトペーパーでは具体的な記述が多くあり、研究開発の方向性がより明確に定義されている。23のユースケースを「Telepresence」、「Massive Twinning」、「Robot to Cobot（Collaborative Robot）」、「Local Trust Zones」、「Sustainable Development」の五つのグループに分類し、ネットワークコンピューティング関連の技術課題の抽出と解決に向けたアプローチを議論している。2023年6月の終了に向けて技術成果物（デリバラブル）のリリースが予定されている。プロジェクトリーダーはNokia、テクニカルマネージャーはEricssonから輩出。Oulu大学、Aalto大学も参画している。欧州キャリア（Orange、Telefonica）、Siemens、欧州諸国大学などが参画している。

• PAWR

米国ではPAWR（Platforms for Advanced Wireless Research）（110億円規模）、欧州ではEMPOWER（The European Platform to Promote Wellbeing and Health in the workplace）（2.5億円規模）と呼ばれる産学官連携R&DプロジェクトがBeyond5Gの研究を推進している。PAWRでは四つの地域において、（小さな）都市規模のテストベッドネットワーク構築と、その上での先端無線通信技術の開発を2017年3月より推進しており、それぞれネットワークコンピューティング関連の実証が進められている。

• OAI, OAX

フランスのEurecom大学が主導するOAI（OpenAirInterface）では、オープンソースソフトウェアとして4G・5Gの標準に準拠したソフトウェア基地局システムの実装を提供している。OAX（OpenAirX-Labs）

は米国ノースウエスタン大学にて同ソフトウェアを共同で開発するための拠点を構築しており、PAWRとの連携も推進している。

• Next-G

Next-Gは、北米において、ATIS（Alliance for Telecommunications Industry Solutions）の呼びかけより2020年10月に発足した。6Gに向けた研究開発、標準化で国際的にリーダーとなるため、多くの主要企業と共に積極的な活動をしている。政府、大学、企業の産学官連携を提唱しており、多くのステークホルダーを巻き込み、北米での統括的なアクティビティとなる可能性がある。アライアンスの参加資格は制限されており経済安全保障の意図が観測される。Beyond 5G推進コンソーシアムと2022年5月にMoUを締結した。

• 6GIA²³⁾

6G Smart Networks and Services Industry Association（6G-IA）と呼ばれる組織である。欧州における国家プロジェクトの推奨する方向性を提言し、産業界・アカデミアにも大きな影響を与えている。Beyond 5G推進コンソーシアムとも2022年5月にMoUを締結した。これはわが国と欧州のBeyond 5G/6G関係機関の間で署名されたものとしては初である。

• 6G Flagship²⁴⁾

6G Flagshipは、フィンランドにおける国家プロジェクトに指定された6Gの研究開発プログラムであり、2019年から2026年までの8年間で€250M（約317億円）の投資が予定されている。5Gの実装と6G標準化規格の検討のため、5GTNと呼ばれるテストネットワークを用いた大規模なキャンパステストベッドを構築し、ネットワークコンピューティングを含む5Gの商用化や推進のための産業界に対する支援を実施している。

（5）科学技術的課題

第6期科学技術・イノベーション基本計画（令和3年3月26日閣議決定）では、国民の安全と安心を確保する持続可能で強靱な社会への変革を第一の目標として掲げており、そのためにはBeyond 5G、スパコン、宇宙システム、量子技術、半導体等の次世代インフラ・技術の整備・開発が必要としている。Beyond 5Gで追求すべき情報通信の価値は以下の5つであると考えられる。

- 1.安全・安心な社会を実現できること（ミッションクリティカル）
- 2.簡単に使えること
- 3.どこでも使えること
- 4.すばやく実装展開できること
- 5.環境にやさしいこと

これらに呼応して、情報通信が備えるべき特徴は以下の通りである。

- ・ 堅牢性・安定性（低ジッタ）・予測可能性
- ・ 自律性・予測可能性（AI活用）
- ・ 大容量・多接続・拡張カバレッジ
- ・ ソフトウェア化
- ・ 超低消費電力化

これまでも情報通信の研究開発分野において関連した研究開発は数多く行われてきたが、上記特徴を生かし、将来サービスに有効活用する上では、情報処理・計算処理に関する知見が必須であり、情報通信と情報科学の融合領域として注力する必要がある。ネットワークコンピューティングは社会インフラとして自立が不可欠であり、上記特徴を備える、あるいは、活用可能とする基盤技術の確立は重点的に取り組むべき課題である。

ネットワークコンピューティング領域において、今後特に重要となる課題は、ミッションクリティカル、つま

り、業務遂行（mission）に必要不可欠（critical）であること、人間の生命維持、事業や組織などの存続に影響を与える障害や誤作動などが許されないことの追求であろう。こうしたネットワークコンピューティングを根底で支える技術は半導体技術である。「半導体チップ」とはトランジスタ・電気回路を半導体ウェハ上に多数形成して集積回路としたものであるが、以下のような種類が挙げられる。

- ・汎用プロセッサ（Instruction Set Processor（ISP）、インテルアーキテクチャーなど）
- ・ネットワークプロセッサ 通信機能に最適化された汎用プロセッサ
- ・FPGA（Field Programmable Gate Array）
- ・FPGAと汎用プロセッサ融合・通信融合・ベクトルプロセッサ融合がなされてきている
- ・SoC（System on Chip）（ハードウェアとソフトウェアで構成される）一つの統合されたシステムを組み込んだチップ
- ・ASIC（Application Specific Integrated Circuit）（特定用途向けIC）
- ・TPU テンソル処理ユニット、Data Plane Programmable Chip、GPU グラフィックス処理ユニット

研究開発が必要となる半導体技術の構成要素として、以下が挙げられる。

- ・光電融合・光通信半導体
- ・AIアクセラレーター
- ・高周波半導体（6G NTN）
- ・ハードソフト協調設計
- ・チップレットと3D集積

これらの技術群は一例であるが、情報通信の進化を出口とする半導体開発戦略：情報通信半導体研究開発戦略を進める必要がある。そのためには、

- ・情報通信システム全体設計技術（機能の回路設計とシステム実装）
- ・高周波・低消費電力半導体製造技術（高周波無線機能実現）
- ・出口までの設計・製造サイクルの迅速化（アジャイル開発）

が必要となる。特に、今後は最後のポイントである社会実装に向けて設計製造サイクルを迅速化する「迅速社会実装性」が大きな価値を創造する。これは前述のHyper Giantsが徹底的に一般消費者のデマンドに向き合い迅速にサービスを展開することに注力し利潤を得てさらに競争力を加速していることからわかる。

（6）その他の課題

技術の研究開発は言うまでもなく重要であるが、学術分野を支える若手人材育成も急務である。近年、若年の研究者が情報通信の応用技術に集中する傾向が加速しており、基礎技術の研究者の不足が懸念される。ローカル5Gやインフラのオープンソース化、オープンインターフェース化により、民主化/オープン化（参入障壁の除去）を推進し、若手人材が重要社会基盤技術としての情報通信分野・半導体分野に取り組み、中堅として次世代に活躍する際に重要となる（若手）国際連携プロジェクトを推進するべきであろう。

海外では、大学・企業が連携して、大学キャンパスや都市をリビングラボテストベッドとして利活用し、社会の縮図とも言える環境下で、技術開発のみならず、技術の社会受容性の検証や、高度な倫理に基づく合意形成を試みる、総合的なアプローチによる産学連携研究開発が進んでいる。前述のように、米国のPAWR、フィンランドのOulu大学の5GTN、英国のSurrey大学のキャンパステストベッドはその先駆例である。わが国でも、海外と連携して大学キャンパスや都市の一部を周波数特区とし、自営網技術を推進するための周波数割り当て（ローカル5G等）を進める等の実験周波数免許の取得規制緩和を行い、学生・若い研究者を中心に自由闊達に産学連携を加速する場を提供すべきであろう。国際産学連携の推進は、同様の社会的通念に基づく未来社会の価値を共有して追求し、国際標準化の推進や共通ビジョンを形成するために有益である。若い人材を早くから国際連携に携わらせ未来社会におけるグローバル・リーダーを育成することが重要である。

ネットワークコンピューティングをはじめ、ネットワーク運用、ネットワークサービス、ネットワークアーキ

テクチャーの領域も、特定重要技術 20 分野の一つ「高度情報通信・ネットワーク技術」に位置付けられており、経済安全保障の視点が重要になってきている。ネットワークを介したコンピューティング全般の基盤となる技術であり、現在主流となっているクラウドサービスも対象となる点で汎用性が高い。またネットワークを介したコンピューティング全般の基盤として浸透しており、公共性が高いということから利便性・持続性・安全性共に影響が大きい。さらに、直接的な攻撃力および治安維持能力を有するわけではないものの、軍事応用を含むネットワークサービスの基盤となり得ることから、取り扱いには注意を要する。サプライチェーンという観点では、コンピューティングに用いられる集積回路や記憶素子等の製造を海外に大きく依存している状況であり、日本国内での製造比率を高めるといった自律性の向上が望まれる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	Beyond 5G 推進コンソーシアムが2020年12月に設立され、大容量・低遅延・多数接続・低消費電力・安全安心・自律性・拡張性の方向性とKPIが提言。政府も大きな投資を行っている。ネットワークコンピューティングは低遅延、自律性、拡張性に大きく貢献する。
	応用研究・開発	○	↗	2025年における関西・大阪万博にて研究成果をショーケースとして展示する予定。基盤技術に加えて多くの応用研究がBeyond 5G 基金により採択され進行中だがまだ成果はこれからという状況
米国	基礎研究	◎	↗	産学官の強力な連携と政府の6G研究開発への積極的投資が必須との共通認識が醸成されており、実質的に、政府としての6G研究開発戦略に関する取り組みがすでに展開されている。NextGやFCCなどが中心となり産業を中心とした活動が活発化。もともとネットワークコンピューティング領域での北米の存在感は産学共に大きい。大企業やトップの大学が牽引する。
	応用研究・開発	◎	↗	PAWRなど都市まるごとテストベッドの活動においてソフトウェア化が多用されている。本文でも触れたが、GAFAMに代表されるHyper Giantsによりモバイルキャリアネットワークのホスティングが進展。AWSのWavelengthなどに見られるようにモバイルエッジコンピューティングのための無線機能を含めたクラウドホスティングが事業化され、急速に進んでいる。
欧州	基礎研究	◎	↗	5Gそして6Gに向けても欧州、特に北欧の通信機器企業の存在感が増しており、標準化にも大きな影響力を与えている。本文でも触れたように、さまざまなフラグシッププロジェクト6GFlagshipやHexa-X、また国家プロジェクトの方向性に大きな影響を与える6GIAなど存在感の大きい組織・プロジェクトが目立つ。ネットワークコンピューティング分野はエッジコンピューティングにおいては MEC の概念を標準化で扱う ETSI の存在が大きい。
	応用研究・開発	◎	→	SLICES-RI フランスのSorbonne大学を中心として欧州15カ国で進めるSLICES- RI (Scientific Large- scale Infrastructure for Computing/ Communication Experimental Studies) というテストベッドプロジェクトが進行中。ネットワークスライシングやソフトウェア化の応用研究が進む。後述のフィンランド6G Flagship等の6Gに向けたプロジェクトやEMPOWERなど米国PAWRと連携した都市まるごとテストベッドとする応用研究が進む。
中国	基礎研究	◎	↗	研究開発から標準化活動における国家的な取り組みの枠組みが形成されつつある。Beyond 5G (6G) の技術開発を2016年から推進。2018年の国家重点研究開発プログラムにおけるでは大容量通信、ミリ波/THz波通信、宇宙・地上統合ネット、ネットワークインテリジェンスの4つに注力することを表明。
	応用研究・開発	◎	↗	都市部での5Gの基地局整備やスマート指定のプロジェクトなど社会実装が急速に進んでいる。Beyond 5G (6G) に関する研究開発の推進が進む。

韓国	基礎研究	○	→	6Gの研究開発については発表があったもののネットワークコンピューティング領域で実質の活動のビジビリティは高いとは言えない。
	応用研究・開発	○	→	2019年LG電子が6G研究センターを設置、同年6Gコア技術の開発のための研究センターを設立
フィンランド	基礎研究	◎	↗	University of Ouluが6G Flagshipを推進中。5Gの市場シェアの大きい通信機器企業（Nokia）もあり世界の先頭を走る。
	応用研究・開発	◎	↗	5GTNと呼ばれるテストベッドをキャンパスに構築し、産学連携によりさまざまな応用研究を進めている。また、ICTを活用して医工連携を進める欧州最大のSmart Hospitalの建設を予定。（ https://oys2030.fi/en/future-hospital/ ）
フランス	基礎研究	◎	↗	Eurecom大学にてOpen Air Interface（OAI）と呼ばれるモバイルインフラのOpen Source Projectが進行中。グローバルから注目されている。
	応用研究・開発	○	→	OAIを活用したモバイルアプリケーション研究やインフラのスタートアップが多く存在しているが、まだこれから伸び白がある状況。
英国	基礎研究	◎	↗	University of Surrey大学が6Gに向けたセンターを設置し、積極的に活動。ネットワークコンピューティング分野でもモバイルネットワークのソフトウェア化の研究を進める。
	応用研究・開発	○	→	上記プロジェクトでユースケースの研究も盛んと思われる。キャンパステストベッドを構築。産学官連携を進めている。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

×：活動・成果がほとんど見えていない

○：顕著な活動・成果が見えている

—：評価できない（公表する際には、表示しない）

△：顕著な活動・成果が見えていない

（註3）近年（ここ1～2年）の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向 →：現状維持 ↘：下降傾向

参考文献

- 1) 国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）「Beyond 5G研究開発促進事業」
<https://b5g-rd.nict.go.jp>, (2023年2月26日アクセス) .
- 2) 経済産業省「ポスト5G情報通信システム基盤強化研究開発事業」
https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/post5g/, (2023年2月26日アクセス) .
- 3) 日本電信電話株式会社（NTT）「NTT研究開発：IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）」
<https://www.rd.ntt/iown/>, (2023年2月26日アクセス) .
- 4) AI for Good, “ML5G Challenge,” International Telecommunication Union (ITU),
<https://aiforgood.itu.int/about-ai-for-good/aiml-in-5g-challenge/>, (2023年2月26日アクセス).
- 5) Hexa-X, <https://hexa-x.eu>, (2023年2月26日アクセス) .
- 6) Scientific LargeScale Infrastructure for Computing/Communication Experimental Studie (SLICES), <https://slices-ri.eu/>, (2023年2月26日アクセス) .
- 7) University of Surrey, “Campus Testbed,” <https://www.surrey.ac.uk/institute-communication-systems/facilities/campus-testbed/>, (2023年2月26日アクセス) .
- 8) Alliance for Telecommunications Industry Solutions (ATIS), “Next G Alliance,” <https://www.>

nextgalliance.org, (2023年2月26日アクセス) .

- 9) Platforms for Advanced Wireless Research (PAWR), <https://advancedwireless.org/>, (2023年2月26日アクセス) .
- 10) GO! 5G「ローカル5G開発実証成果報告書」総務省,
<https://go5g.go.jp/carrier/l5g/>, (2023年2月26日アクセス) .
- 11) Petros Gigis, et al., “Seven years in the life of Hypergiants’ off-nets,” in *Proceedings of the 2021 ACM SIGCOMM 2021 Conference* (New York: Association for Computing Machinery, 2021), 516-533., <https://doi.org/10.1145/3452296.3472928>.
- 12) Mark Berman, et al., “GENI: A federated testbed for innovative network experiments,” *Computer Networks* 61 (2014) : 5-23., <https://doi.org/10.1016/j.bjp.2013.12.037>.
- 13) 中尾彰宏「仮想化ノード・プロジェクト：新世代のネットワークをめざす仮想化技術」『NICT NEWS』393巻 (2010) : 1-6.
- 14) OpenAirInterface (OAI), <https://www.openairinterface.org>, (2023年2月26日アクセス) .
- 15) Platforms for Advanced Wireless Research (PAWR), “OpenAirX-Labs (OAX) : An End-to-End Open Source 5G Software Lab,” <https://advancedwireless.org/oax/>, (2023年2月26日アクセス).
- 16) Xenofon Foukas, et al., “FlexRAN: A Flexible and Programmable Platform for Software-Defined Radio Access Networks,” in *Proceedings of the 12th International on Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies* (New York: Association for Computing Machinery, 2016), 427-441., <https://doi.org/10.1145/2999572.2999599>.
- 17) Date Plane Development Kit (DPDK), <https://www.dpdk.org>, (2023年2月26日アクセス) .
- 18) Intel Corporation, “Intel® Tofino™,” <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/network-io/programmable-ethernet-switch/tofino-series/tofino.html>, (2023年2月26日アクセス) .
- 19) O-RAN Alliance, <https://www.o-ran.org>, (2023年2月26日アクセス) .
- 20) Sami Kekki, et al., “ETSI white paper no. 28, MEC in 5G networks, First edition - June 2018,” European Telecommunications Standards Institute (ETSI), https://www.etsi.org/images/files/ETSIWhitePapers/etsi_wp28_mec_in_5G_FINAL.pdf, (2023年2月26日アクセス) .
- 21) Weisong Shi, et al., “Edge Computing: Vision and Challenges,” *IEEE Internet of Things Journal* 3, no. 5 (2016) : 637-646., <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198>.
- 22) Tian Li, et al., “Federated Learning: Challenges, Methods, and Future Directions,” *IEEE Signal Processing Magazine* 37, no. 3 (2020) : 50-60., <https://doi.org/10.1109/MSP.2020.2975749>.
- 23) 6G Smart Networks and Services Industry Association (6G-IA), <https://6g-ia.eu>, (2023年2月26日アクセス) .
- 24) University of Oulu, “6G Flagship,” <https://www.6gflagship.com>, (2023年2月26日アクセス) .

2.6

俯瞰区分と研究開発領域 通信・ネットワーク