

2.6 通信・ネットワーク

通信・ネットワークについての技術動向を俯瞰する。通信技術・ネットワーク技術は、科学技術や産業の発展を支えるコア技術であり、人類が社会経済活動を継続する上で不可欠な社会基盤である。本節では、近年の国内外の研究開発動向、技術課題についての潮流・動向を俯瞰し、今後の課題について述べる。

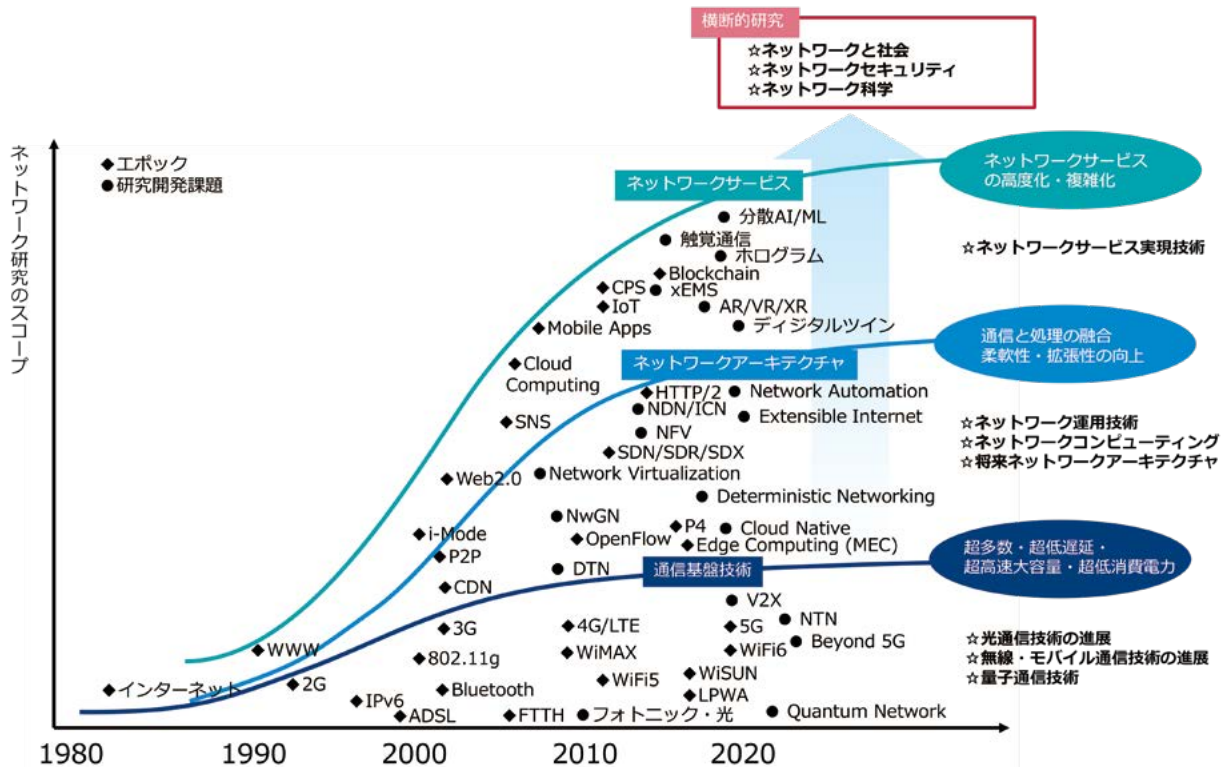


図2-6-1 通信・ネットワークの俯瞰図（時系列）

本区分の時系列の俯瞰図を図 2-6-1 に示す。横軸は年代、縦軸はネットワーク研究のスコープを表している。縦軸は、「通信基盤技術」「ネットワークアーキテクチャ」「ネットワークサービス」に分類し、より応用に近い技術やエポックを上位にプロットしている。おおむねOSI参照モデル¹⁾の7階層における低階層（物理層・データリンク層）に分類される技術を「通信基盤技術」、ネットワーク層・トランスポート層に相当するネットワーク関連技術を「ネットワークアーキテクチャ」、それらより上位に位置づけられるネットワーク応用を「ネットワークサービス」に分類した。通信・ネットワークの時系列は、1970年代の専用線や企業ネットワークを用いたデータ通信、さらには、電信・電話の時代までさかのぼることも可能であるが、ここでは主にInternet Protocol (IP) 技術を用いて構築されたデジタルネットワークとしてのインターネットの登場以降を対象とした時系列を示している。

通信基盤技術としての光通信技術は2000年代に目覚ましい進化と普及を遂げてきた。インターネットの登場以降、いわゆるブロードバンドのアクセスネットワークとして、ISDN (Integrated Services Digital Network), ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) を経て、家庭用の光ファイバー回線 (FTTH: Fiber To The Home) が2000年代中頃から本格的に普及した。現在、光ファイバーによる通信ネットワークは、インターネットを支える基幹通信網 (コアネットワーク) から、家庭用回線、無線モバイル通信の基地

局網を支えるアクセスネットワークまで導入されている。通信量の飛躍的増加、それに伴うエネルギー増大の抑制といった観点で光通信技術に対する社会的な要請・要求特性は高く、継続的な技術革新が期待されている。

無線・モバイル通信技術については、携帯電話がデジタル方式となった第2世代移動通信システム(2G)に続き、国際電気通信連合(ITU: International Telecommunication Union)の無線通信部門(ITU-R: ITU Radiocommunication Sector)により2000年に第3世代(3G)、2010年に第4世代(4G)が標準化された。これらの標準の進化と並行してApple社のiPhoneやGoogle社のAndroid OSを搭載した携帯電話端末、いわゆるスマートフォンが普及し、無線・モバイル通信によるインターネットが広く利用されるようになった。2020年に承認された第5世代(5G)に関しても国際的に商用化が進み、大容量・低遅延・多接続といった特長を生かした新しいネットワークサービスの登場が期待されている。5Gの次の新しい世代(6G)の検討も始まっており、わが国においては、「Beyond 5G」の実現に向け、総務省・情報通信研究機構(NICT)によって推進戦略が示されるなど、新たな技術革新を目指した研究開発が活発化している²⁾。

ネットワークアーキテクチャの時系列における大きなエポックとして、インターネットの登場がある。インターネットを支えてきたTCP/IP^{3), 4)}は、IETF(Internet Engineering Task Force)において標準化され、1981年に公開された。TCP/IPを標準でサポートしたOSであるMicrosoft社のWindows 95の発売・普及を契機として広く社会に浸透した。TCP/IP上で動作するアプリケーションプロトコルとして今日標準的に用いられているWorld Wide Web(WWWまたはWebと表記)の通信を行うプロトコルHypertext Transfer Protocol(HTTP)は、HTTP/1.0⁵⁾(1996年)とHTTP/1.1⁶⁾(1997年)に標準化がなされた。その後、IPに関してはIPv6^{7), 8)}(1998年)、HTTPに関してはHTTP/2⁹⁾(2015年)、HTTP/3¹⁰⁾(2022年)へと進化を遂げ、技術革新が進んでいる。

これらのプロトコルの進化に合わせ、新たなネットワークサービスや応用技術が次々に登場した。Webが成熟期を迎えた2000年代にはリッチなユーザー体験・ロングテール・集合知といった方向性を示すWeb2.0と呼ばれる概念が提唱され、現在に続く発展を遂げた。また、データやソフトウェアをネットワーク経由で、サービスとして利用者に提供するクラウドコンピューティング・クラウドサービスが広く利用・提供されるようになった。クラウドコンピューティングを中心とするネットワークサービスの進化の傾向は2010年代以降も続き、IoT(Internet of Things)、CPS(Cyber-Physical System)といった現実世界と仮想世界を結びつける新たな概念モデルやサービスが注目を集め、さまざまな関連技術の研究開発・事業化が進められた。IoTやCPSで要求される低遅延性、データ処理の局所性などを実現するため、2010年代に入って計算処理の実行場所をクラウドから物理的にネットワークの末端(エッジ)にある基地局やゲートウェイ装置等へ移動させるエッジコンピューティングの検討も始まった。この動向は、2020年代に注目を集めるようになったメタバース(AR/VR/XR)やデジタルツインといった新たな技術の潮流へとつながっている。

上記ネットワークサービスの動向と合わせ、注目すべき時系列の流れとして、GAFAM(Google, Apple, Facebook, Amazon, Microsoft)に代表されるHyper Giantsと呼ばれる巨大IT企業の影響力の増大がある。Hyper Giantsやグローバルにサービスを展開するCDN事業者がTier 1(インターネット上の全ての経路情報(フル・ルート)を保持する通信プロバイダー事業者の集合)に替わる存在となり、「Privatization」(プライベート化)と呼ばれる動きが進むなど、インターネットの構造にまで影響を及ぼすようになってきている。一方、Hyper Giantsによるプライベート化を軽減するネットワークアーキテクチャの方向性として、ネットワーク内キャッシュ・ネットワーク内コンピューティングの基盤となる情報指向ネットワークや「拡張可能な」インターネットの、分散台帳(DLT, Distributed Ledger Technology)による非集中型のアーキテクチャなどの検討が進んでいる。

また、あらゆるものをつなぐ、いわゆる「土管」としてのネットワークから、通信と計算処理を融合する「計算基盤」としてのネットワークへと向かう研究開発の方向性が、近年の5G・Beyond 5Gの研究開発の進展やクラウドコンピューティングの成熟・エッジコンピューティングの台頭にもとない、大きな潮流となりつつあ

る。エッジコンピューティングをはじめとする通信と計算処理を融合する研究開発・技術開発の競争は今後激化して行くことが予測され、革新的な技術の登場が期待される。

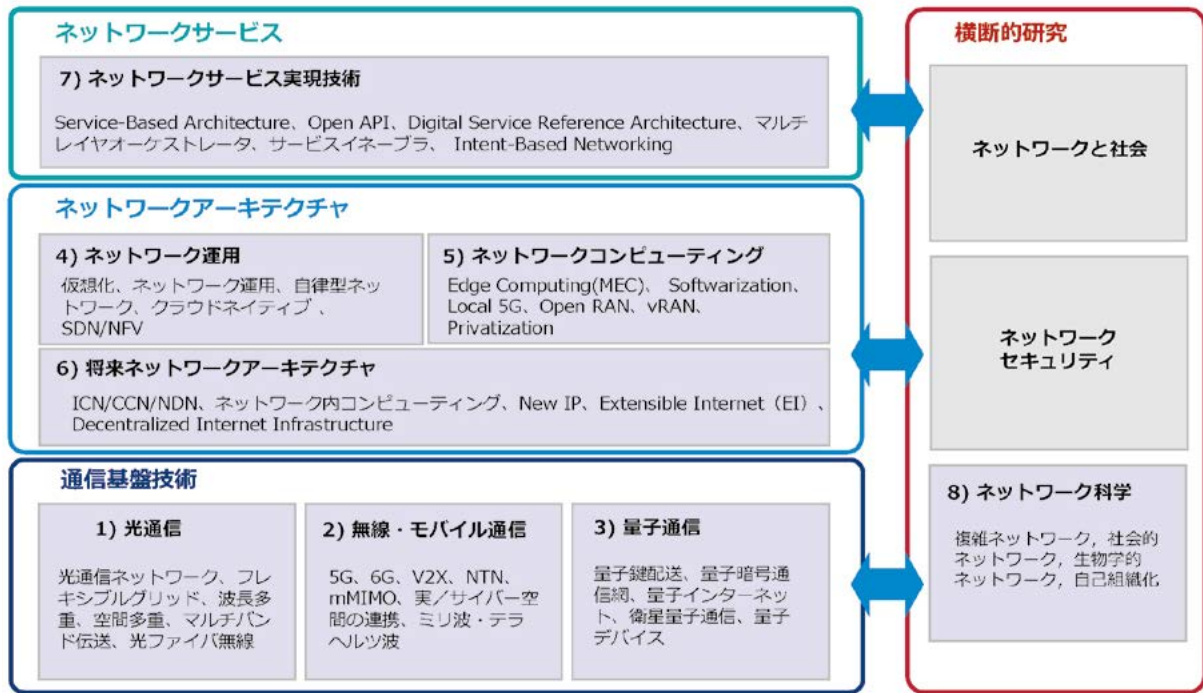


図2-6-2 通信・ネットワークの俯瞰図（構造）

こうした潮流に鑑み、本節では次の三つの階層による構造で「通信・ネットワーク」区分を俯瞰する（図2-6-2）。

1) 通信基盤技術

通信・ネットワークにおける必要不可欠な構成技術となる「光通信」、「無線・モバイル通信」について、それぞれ最新の研究開発動向の進展を俯瞰する。また、将来の通信・ネットワークを支える新たな潮流として、「Beyond 5G」推進戦略にも含まれ、さまざまな研究開発が進みつつある「量子通信」を俯瞰する。

2) ネットワークアーキテクチャ

光通信技術、無線・モバイル通信技術に合わせ、通信ネットワークを「強靱」、「迅速」、かつ「柔軟」に提供可能とするため、ネットワークアーキテクチャの持続的な進化が必要となる。ここでは、高い通信品質を維持し障害等の問題に迅速に対処する「ネットワーク運用技術」、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もたせるための情報通信と情報科学の融合技術としての「ネットワークコンピューティング」、高度化する将来のネットワークサービスやアプリケーションに対し、現在のインターネット技術の問題点や限界を打破しネットワーク全体の大きな変革を促す技術としての「将来ネットワークアーキテクチャ」を取り上げる。

3) ネットワークサービス

メタバース、デジタルツイン、ホログラムなど次々に登場する新たなネットワークサービスやアプリケーション

ンからの通信ネットワークへの要求は高度化・複雑化していく。そうした要求に対応すべく、ハイレベルな要求やサービスシナリオを、ドメインや要素機能に分解し、状況や環境に合わせて「最適化」されたりソース量で「簡単 (シンプル)」に提供可能とするための研究開発が進められている。ここでは、そのようなネットワークサービスを実現するための技術・プラットフォームを「ネットワークサービス実現技術」として俯瞰する。

4) 横断的研究

上記の通信・ネットワークの階層構造にまたがった、あるいは、階層構造に依存しない横断的な研究領域もある。そのような研究領域の一つとして、本節では、「ネットワーク科学」を俯瞰する。ネットワーク科学は、現実のネットワークに関する普遍的な数理的性質の発見とその原理の解明という知識の創出に加え、それらを活用した現象予測やネットワークの制御・設計等につながる技術の確立を目指すものであり、今後の通信・ネットワーク区分の研究開発の方向性を示す基礎研究として重要な領域である。

なお、通信・ネットワークの分野における横断的研究として、ソーシャルメディアへの依存やフェイク情報の拡散等の「ネットワークと社会」の関わりに関する研究領域や、ネットワークの安全性を損ねるさまざまな脅威に対応するためのネットワークセキュリティーの研究領域もあるが、それぞれ、2.3「社会システム科学」2.3.5「計算社会科学」、2.4「セキュリティー・トラスト」2.4.2「サイバーセキュリティー」において扱う領域にあたるため、本節では割愛した。

2.6

俯瞰区分と研究開発領域 通信・ネットワーク

- 1) John D. Day and Hubert Zimmermann, “The OSI reference model,” in *Proceedings of the IEEE* 71, no. 12, (1983) : 1334-1340., <https://doi.org/10.1109/PROC.1983.12775>.
- 2) 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) .
- 3) Information Sciences Institute, University of Southern California, “INTERNET PROTOCOL: DARPA INTERNET PROGRAM PROTOCOL SPECIFICATION, September 1981,” Internet Engineering Task Force (IETF), <https://www.ietf.org/rfc/rfc791.txt>, (2023年2月26日アクセス).
- 4) Information Sciences Institute, University of Southern California, “TRANSMISSION CONTROL PROTOCOL: DARPA INTERNET PROGRAM PROTOCOL SPECIFICATION, September 1981,” Internet Engineering Task Force (IETF), <https://www.ietf.org/rfc/rfc793.txt>, (2023年2月26日アクセス) .
- 5) Tim Berners-Lee, R. Fielding and H. Frystyk, “Hypertext Transfer Protocol -- HTTP/1.0, May 1996,” Internet Engineering Task Force (IETF), <https://www.ietf.org/rfc/rfc1945.txt>, (2023年2月26日アクセス) .
- 6) Roy Fielding, et al., “Hypertext Transfer Protocol -- HTTP/1.1, January 1997,” Internet Engineering Task Force (IETF), <https://www.ietf.org/rfc/rfc2068.txt>, (2023年2月26日アクセス) .
- 7) Steve Deering and Robert Hinden, “Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification, December 1998,” Internet Engineering Task Force (IETF), <https://www.ietf.org/rfc/rfc2460.txt>, (2023年2月26日アクセス) .
- 8) Steve Deering and Robert Hinden, “Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification, July 2017,” Internet Engineering Task Force (IETF), <https://www.ietf.org/rfc/rfc8200.txt>, (2023年2月26日アクセス) .
- 9) Mike Belshe, Roberto Peon and Martin Thomson, “Hypertext Transfer Protocol Version 2 (HTTP/2), May 2015,” Internet Engineering Task Force (IETF), <https://www.ietf.org/rfc/rfc7540.txt>, (2023年2月26日アクセス) .
- 10) Mike Bishop, “HTTP/3, June 2022,” Internet Engineering Task Force (IETF), <https://www.ietf.org/rfc/rfc9114.txt>, (2023年2月26日アクセス) .