

3.3 通信とネットワーク

ネットワークは情報通信分野の発展の基盤をなすとともに、近年では特に、さまざまな社会課題を解決するために、関連分野からの要請に応えながらさらなる発展を遂げつつある。その結果、ネットワークは情報通信産業の発展に寄与するのみならず、新たな社会価値を創出するコア技術として我が国の科学技術や関連する産業の発展においてますます重要になっている。そのために、情報流通の基盤技術が重要になるが、これまで発展してきたクラウドサービスとは異なる視点に基づいた情報流通基盤も近年、検討が開始されている。また、ネットワーク分野において今後の研究開発の新たな方向性を示す、いくつかの重要な基礎的研究が最近開始されつつある。

本報告書においては、これら4つの視点に基づき、7つの科学技術領域について俯瞰する。

(1) ネットワーク通信基盤技術

我が国が得意とする光通信技術、無線通信技術についてまず俯瞰する。トラフィック需要は、新しいサービスが繰り返し登場することによって、依然として爆発的な増大を見せている。光通信技術、無線通信技術はトラフィック需要の増大に対応すべく、今後もそれらの大容量化・高速化が必要である。しかし、このようないわば直線的な研究開発だけではなく、多様な発展を見せるさまざまな要素技術を組み合わせることによって、より柔軟な通信形態をエンドユーザーに提供しようという試みがすでに始められている。例えば、光通信技術を用いたエラスティックネットワーク、無線通信技術において、複数の通信メディアを状況に応じて使い分けるコグニティブネットワークやマルチホップ通信も含めた D2D (Device-to-Device) ネットワークなどである。移動体無線技術については第5世代の実現に向けた検討もすでに始められたが、そこでもこれまでの延長線上にない新たな技術開発が視野に入れられている。すなわち、光通信技術、無線通信技術においても、大容量化や高速化だけでなく、それらの新しい機能やサービスが重要な研究開発課題になっている。また、ユーザー端末の無線化は大きな流れであり、アクセスの無線化に伴う無線通信技術と光通信技術の融合をなお一層進め、無線アクセスユーザーに対するエンド間の帯域保証などが今後の課題として挙げられる。

(2) 新たな社会価値を創出するネットワーク技術

ネットワーク技術はさまざまな社会問題の解決や新たな社会価値の創出に貢献するものである。そのようなポテンシャルを有する領域をすべて網羅することは紙面の制限上、困難なため、ここでは特にエネルギーマネジメントを対象を絞る。情報通信分野における消費電力の問題は喫緊に解決すべき課題であるが、ネットワーク技術は社会のさまざまな活動における消費電力を低減するための基盤技術としても必須であり、その重要性はますます高まりつつある。これまで、デバイスやルータ・スイッチなどの単独機器の省電力化に関する研究開発が精力的に行われてきた結果、現在、家庭や街、オフィスなどシステム全体の省電力化にネットワーク技術をいかに活用するかに焦点が移りつつある。また、クラウドサービスを提供するデータセンターについても、大量の消費電力を伴う故、その省電力化技術は重要な課題であり、クラウドサービスの広がりによって地球規模の取り組みが必要になっている。

また、ネットワーク仮想化技術は最近、急速な展開を見せつつある。SDN (Software-Defined Network) 技術だけでなく、それを活用した NFV (Network Functions Virtualization) 技術は最近急速に研究開発が進んでおり、ネットワークの運用管理コストの低減が期待されるだけでなく、ユーザーに対するネットワークサービスの提供形態を大きく変化させる可能性がある。その結果、光通信技術、無線通信技術においても、それらを用いたネットワーク仮想化に関する研究開発が積極的に行われている。また、仮想化技術の導入はハードウェア機器のコモディティ化を促すことを意味するため、今後、ネットワークビジネスを大きく変革させ、ひいては産業社会の構造にも影響を与える可能性を有している。技術的側面から見ると、ネットワークの仮想化技術は計算資源の仮想化技術と不可分のものであり、ネットワーク資源と計算資源を含めたシステム全体の最適化が必要になるものであって、新たな研究開発の必要性を示すものである。

(3) 新たな情報流通基盤技術

ポストインターネットの取り組みとして重要なものに、将来の情報流通基盤としてのネットワークに関する課題がある。特に、今後、IoT (Internet of Things) や M2M (Machine-to-Machine Communication) など、人ではなく、数多くのデバイスがネットワークに接続される結果、これらを支えるネットワーク技術が必要になる。これまでもセンサーネットワークやモバイルアドホックネットワークに関する研究開発は積極的に行われてきた。しかし、今後、ネットワークに接続される端末数は、スマートフォンの普及やセンサー等のネットワークへの接続によって 2020 年には数百億台に達し、その後、兆を超えると予測されている。これらの数値は、現在に比して1桁から2桁超の端末数の増大が見込まれるものであり、そのような端末数の増大に対応しながら、センサーネットワークやモバイルアドホックネットワークを収容するネットワークシステム全体のアーキテクチャーが今後必要になる。従来技術の延長線上には分散サーバー技術による CDN (Contents Delivery Network) があるが、ネットワーク内部のルータ（またはそれに付随するサーバー）で情報処理まで行うアーキテクチャーとしてフォグコンピューティングやエッジコンピューティングなどの概念がすでに提唱されている。さらに、ポストインターネットアーキテクチャーとして、ネットワークアドレスではなく、コンテンツの名前あるいは情報の名前に基づいたアクセスを可能とする CCN (Content-Centric Network)/ICN (Information-Centric Network) に関する研究開発が活発化しつつある。これらも、ネットワーク内での情報のキャッシュや処理まで含んだ、コンテンツを主体としたネットワークへの転換を図る概念であり、今後、情報流通基盤としてのネットワークの大きな変革を促すことが期待される。

(4) ネットワーク分野において重要な萌芽的研究開発項目

ネットワーク分野において今後の研究開発の方向性を示唆する取り組みは多くあるが、ここでは特に重要と考えられる以下の二つについて俯瞰する。

ユーザーに対する通信サービス品質 (QoS: Quality of Service) 保証はこれまでもネットワーク分野の重要な課題であった。そのために、パケットレベルの指標（パケット遅延や棄却率）の保証がネットワークに与えられた課題となっていた。しかしながら、メディアやサービスの多様化によって、最近 QoE (Quality of Experience) と呼ばれるように、エンドユ

ユーザーが経験する品質の保証に対する議論が活発になっている。もちろん、言葉の置き換えでは意味がない。ユーザーの立場に基づいて認知科学や心理学などの観点からの取り組み、ユーザーインターフェース技術との融合、集団も含めたユーザー行動やソーシャルサービスとの関わりなど、今後取り組むべき課題は多い。

最後に、上述の新しい基盤技術を含むネットワークにおいて、その設計や運用の規範となる基盤科学の創出は重要な課題である。待ち行列理論／トラフィック理論や最適化アルゴリズムなどネットワーク分野における伝統的な学術的基礎が有効となる領域は今や極めて限られており、ネットワークの設計・運用現場では経験的手法に基づいた管理が依然として行われている。その結果、ネットワークサービスの利便性は高まってはいるものの、例えば、ネットワーク自体の信頼性は他の社会生活を支えるシステムに比して低いレベルにとどまっている。これまでは、光ファイバ通信技術、無線通信技術の大容量化、高速化の発展に支えられ、いわば物量作戦による対策が講じられてきたが、それも限界に近づきつつあり、今後、上述のような学術的基礎との乖離はネットワークの大規模化・複雑化によってますます大きくなるのが容易に想像される。大規模複雑なネットワークの設計・運用を支える新たな学術基盤の創出は極めて重要な課題である。上に述べたユーザー行動と QoE の関係解明も含めて、新たな情報ネットワーク学術基盤の創出には、物理学や生命科学も含めた他の学術分野との融合が有望と考えられ、ネットワーク分野のイノベーション創出におけるブースターとなることが期待される。

なお、ネットワーク分野においてもセキュリティーに関する課題は重要であり、喫緊の解決を必要とするものも数多いが、3.13 セキュリティーにまとめられているため、ここでは割愛する。

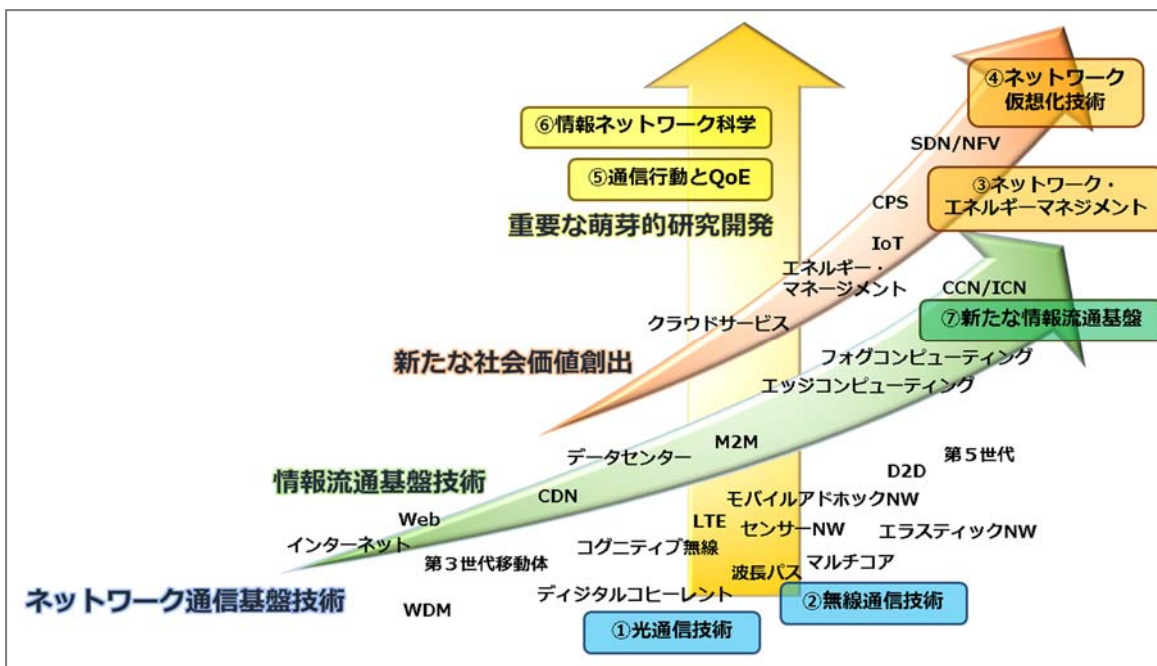


図 3.3.1 通信とネットワークの俯瞰図

3.3.1 光通信技術

(1) 研究開発領域名

光通信技術

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

光ファイバや光スイッチの広帯域性を活かした大容量で長距離の通信をエネルギー効率良くするための基本技術。全国幹線から家庭まで広範囲な領域に普及する技術であり、近年では、サービス要求にあわせ通信の速度と距離を調整する弾力性にも期待が高まっている。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

光通信技術は「通信速度」「通信容量」「通信距離」を指標として進展が示される分野である。それは、光ファイバの広帯域・低損失性により、電気通信より飛躍的に多くの量の信号を相手に送ることができることによる。通信速度は 2000 年頃の光通信の一つの指標であった 10 Gbit/s をはるかに超え、0、1 の強度変調・検波の方式から位相や偏波を用いた変調、デジタル信号処理により 100 Gbit/s 超を志向する時代になった。光ファイバ通信は敷設済みのシングルモードファイバや分散シフトファイバにいかにも大容量の信号を流すか、だけではなく、新しいファイバを開発し 1 Pbit/s の大容量通信の時代に入っている。一方、エンドユーザーやサービス提供者の視点にたつとこのような高速・大容量通信はオーバースペックとなり、インフラサービス提供者は、それらに合った速度での通信を提供するという観点も必要となる。以上の観点から、ここでは、デジタルコヒーレント通信、マルチコア光ファイバ通信、エラスティック光ネットワークに関する動向を述べる。

・デジタルコヒーレント通信：

従来、光通信は、1 または 0 で表されるデジタル信号を光信号の ON、OFF に関連づけて変調し、強度を検波する方法で行われる。すると、一般に、伝送速度が増加するほど光信号の歪み補償は難しくなり伝送距離が制限される。デジタルコヒーレント技術ではデジタル信号処理回路により、位相や偏波を用いた 4 値位相変調の信号を処理できるようになってきた。NTT らは、総務省や NEDO の研究開発を通じて 100 Gbit/s 回路技術を開発し、2012 年以降 100 Gbit/s LSI の製品の市場が開かれた^{1),2)}。現在、総務省プロジェクト「超高速・低消費電力光ネットワーク技術の研究開発」では、NTT、NEC、富士通により、1 波長あたり最大で 400 Gbit/s 級の光伝送速度を実現する技術の研究開発が、デジタルコヒーレント技術をキー技術の一つとして実施されている。2014 年 9 月には、位相と振幅を用いて信号を変復調する 8 値 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) と 16 値 QAM 等の成熟により 400 Gbit/s の伝送に成功し、かつ、光伝送路の特性に応じて適切な変調方式を選択できるようになっている³⁾。

・マルチコア光ファイバ通信：

従来の波長多重技術や多値変調技術の進展とともに、1 本の光ファイバで通信できる容量は増加してきた。一般に、光通信において通信量を増加させる際には光信号の強度増加が伴うが、近年、光信号の歪みやファイバの熱破壊の可能性が指摘されていた。1 本の光フ

ファイバに複数の芯を備えるマルチコア光ファイバはそれらの問題を解決する技術として期待されている。2011年に100 Tbit/sの壁を初めて超える109 Tbit/s・16.8 kmの伝送実験にNICTが成功し⁴⁾、その後大容量化、長距離化の研究が進み、2012年9月にNTTらにより、デジタルコヒーレント技術も含めた1.01 Pbit/s・52.9 kmの伝送⁵⁾、2013年9月にKDDI研らにより、大陸横断可能な7,300 km・140 Tbit/sの伝送に成功した⁶⁾。現在は、マルチコア光ファイバの一括増幅技術、融着技術などを含めたネットワーク構築に向けた諸技術の研究開発に広がっている。海外では、米国アルカテルルーセントや米国OFS等でマルチコア光ファイバ通信の研究がなされている。欧州では、マルチモードファイバを用いたMIMO通信による大容量通信の研究が、サザンプトン大らによるFP7プロジェクトMODE-GAP等で実施されている。マルチコア、マルチモードなどの多重技術は空間分割多重（SDM）に分類され、それらの組み合わせによる伝送の研究開発も行われている。

・エラスティック光ネットワーク：

波長帯域幅を自在に変更できる弾力性、および、微小時間でデータ転送（パケット）を軸にした弾力性研究開発。光ファイバの帯域は広く、現在、10 Tbit/sの大容量通信が商用ネットワークで利用されている。今後も容量は増えるが一方、そこにサービスプロバイダーが要求する通信速度の回線や、エンドユーザーのパケットを効率よく收容するために、網内パスの提供では波長帯域幅を変更できる光技術や、パケットごとに交換するための光技術が期待されている。NTTにより提唱された波長帯域幅を変更するアーキテクチャー⁷⁾は爆発的に研究開発の裾野が広がり、世界の通信事業者において研究開発が進んでいる。中心波長単位6.25 GHz、帯域幅単位12.5 GHzのITU-T勧告が誕生した2012年頃は波長割り当てに関する研究開発が多く志向されていた。近年のデジタルコヒーレント技術や部品の共通化などの方向性ととも、現在は100 Gbit/sを越す通信の技術開発とそれを支えるネットワーク設計が中心になっている⁸⁾。時間方向の弾力性となる光パケット交換技術に関して、2014年9月にNICTは、伝送路あたり12.8 Tbit/s・50 km・光バッファ付きの光パケット交換実験に成功している⁹⁾。これらのエラスティック光ネットワークを一元管理するSoftware-Defined Networkingの光ネットワーク適用の研究開発も進んでいる。KDDI研、英国ブリストル大、スペインCTTC、アルカテルルーセントなどが早くから光ネットワークのSDN/OpenFlow対応化技術に着手し、経路計算、障害復旧、波長幅制御などの実証を行っている。また、KDDI研らは、100 Gbit/s光伝送装置、100 Gbit/s光パケット交換装置、光アクセス装置等を一元管理する光トランスポートSDNの実験に成功している¹⁰⁾。

（4）科学技術的・政策的課題

光通信・ネットワーク技術は、世界ナンバーワンの技術を継続的に創出している。例えば光伝送装置における近年の標準的な速度である100 Gbit/s光通信については、総務省プロジェクト「超高速光伝送システム技術の研究開発（デジタルコヒーレント光送受信技術）」等の成果が社会実装されたものである。本分野では、米国、欧州、中国らが継続的に研究開発に投資をしており、本分野における国力を維持・増強するためにも継続した政策重点化が必

要である。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・総務省プロジェクト「超高速・低消費電力光ネットワーク技術の研究開発」により、1 波長あたり最大で 400 Gbit/s 級の光伝送速度を実現する技術の研究開発が、デジタルコヒーレント技術をキー技術の一つとして実施されている。
- ・総務省戦略的情報通信研究開発推進事業における日欧共同公募にて、「スライサブルな超 100 G イーサネットシステムを実現するための大規模プログラマブル光ネットワークの研究開発（STRAUSS）」が実施中¹¹⁾。
- ・欧州 FP7 では、光空間多重通信に関して MODE-GAP、エラスティックネットワークに関して IDEALIST, LIGHTNESS などのプロジェクトが実施されている。
- ・ONF (Open Networking Foundation) における Optical Transport Working Group にて、光トランスポートネットワークにおける、SDN/OpenFlow 標準ベースの制御適用検討を実施。ユースケースの作成、OpenFlow を用いた制御参照モデルの定義、OpenFlow プロトコルの拡張仕様の定義等を実施している¹²⁾。

（6）キーワード

デジタルコヒーレント、多値変復調、DSP (Digital Signal Processing)、マルチコアファイバ、SDM (Space Division Multiplexing)、エラスティック光ネットワーク、光パケット交換、OpenFlow、光トランスポート SDN (Software-Defined Networking)

（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	◎	↑	NICTらによるマルチコアファイバ300 Tbit/s伝送および一括増幅技術、12.8 Tbit/s光パケット交換技術など。
	応用研究・開発	◎	↑	NTTらによる1Pbit/s、KDDI研らによる7000 km、マルチコアファイバ通信世界記録達成、NTTらによる1波長400 Gbit/s伝送技術成功など。光ファイバメーカーがマルチコアファイバを製造。NICTがIP over 光パケット交換装置開発。
	産業化	◎	↑	100 Gbit/s デジタルコヒーレントLSIが世界トップシェア（2012年12月のNTTプレス）。富士通、NEC、三菱等で上記デジタルコヒーレントを持つ光伝送装置製造。
米国	基礎研究	◎	→	UCSB, UCD等でテラビット志向通信、エラスティック、SDN等の研究開発が精力的に実施されている。
	応用研究・開発	◎	→	CIENAがプログラマブルなデジタルコヒーレント通信技術を開発。ALU・OFS・米NEC等でマルチコアファイバ通信の研究。ALU等でエラスティック網研究開発。全米にまたがった100 Gbit/s級研究開発ネットワークが展開済み。
	産業化	◎	→	CIENAやInfineraによるデジタルコヒーレント通信を用いた光伝送装置は安定したシェアを持っている。
欧州	基礎研究	◎	→	英ブリストル大にてマルチコアファイバ通信、エラスティック等総合的な優位性を持つ。西CTTCや伊サンタナ大にて標準化にも絡みつつSDN、エラスティックネットワーク制御等の研究開発を推進。
	応用研究・開発	◎	→	英ブリティッシュテレコム、西テレフォニカ等でエラスティックネットワーク、SDN等の研究開発、標準化が進んでいる。各国で全国規模の100 Gbit/s級研究開発ネットワークが敷設中。仏ALU、独ADVAなどの光伝送装置が欧州FP7プロジェクトの検証で用いられ、ネットワークシステム安定性が増している。
	産業化	◎	→	ALU、ADVA などがシェアを持つ。
中国	基礎研究	○	↑	ECOC、OFC 等欧米の先端国際会議への成果投稿が増加している。
	応用研究・開発	○	↑	H25情報通信白書によると、Huawei、ZTE等の研究開発額は、アップルや日本の企業の開発額を上まわっている。今後の成果創出が見込まれる。
	産業化	◎	↑	Huawei 社の伝送装置の市場占有率（世界）が高くなっている。
韓国	基礎研究	△	→	ECOC 2013、2014の配布プログラム上の一般講演は7件、1件。
	応用研究・開発	△	→	
	産業化	○	→	平成26年情報通信白書によるとFTTH比率が34.8%であり、依然高い水準。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
 応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
 産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
 ◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、
 △：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

（8）引用資料

- 1) NTT エレクトロニクスが低消費電力 100G 用デジタルコヒーレント DSP-LSI を製造・販売開始 2012年2月29日 http://www.ntt-electronics.com/new/information/2012_02_29.html
- 2) NTT エレクトロニクス社、20nm 低電力コヒーレント DSP を世界初出荷 2014年9月22日 <http://www.ntt-electronics.com/new/information/2014/9/20nm-low-power-coherent-dsp.html>
- 3) NTT, NEC, 富士通, 世界最高水準の 400 ギガビット級光伝送技術の実用化に目処, 2014年9月4日 <http://www.ntt.co.jp/news2014/1409/140904a.html>
- 4) NICT, 光ファイバ1本の伝送容量 109 テラビットの世界記録を樹立, 2011年3月10日. <http://www.nict.go.jp/press/2011/03/10-1.html>
- 5) NTT, フジクラ, 北大, DTU 毎秒1ペタビット、50kmの世界最大容量光伝送に成功 2012年9月20日 <http://www.ntt.co.jp/news2012/1209/120920a.html>
- 6) KDDI 研, 古河電工, NICT, 世界最大容量の大洋横断級光ファイバ伝送実験に成功～毎秒1エクサ(百京、10の18乗)ビット×キロメートルの容量距離積で世界記録達成～ 2013年09月25日 <http://www.kddilabs.jp/press/2013/0925.html>
- 7) M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone, and S. Matsuoka, “Spec-trum-efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling Technologies,” IEEE Communications Magazine, Vol. 47, pp. 66—73, 2009.
- 8) O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, S. J. B. Yoo, “Elastic Optical Networking: A New Dawn for the optical Layer?” IEEE Communications Magazine, Vol. 50. No. 2, pp. s12—s20, Feb 2012.
- 9) S. Shinada, J. D. Mendinueta, R. Luís, and N. Wada, “Operation of a 12.8 Tbit/s DWDM Polarization Division Multiplexing 16-QAM Optical Packet Switching Node after 50-km of Fiber Transmission,” ECOC 2014 Technical Digest (We.3.5.4), September 2014.
- 10) KDDI 研, 三菱電機, NICT, 慶応大, イクシア, 東陽テクニカ, 100 ギガビット級コア・メトロ・アクセス光ネットワークの Software Defined Transport Network 技術による相互接続に成功, 2014年5月21日 <http://www.kddilabs.jp/press/2014/0521.html>
- 11) STRAUSS: Scalable and efficient orchestration of Ethernet services using software-defined and flexible optical networks, <http://www.ict-strauss.eu/en/>
- 12) Open Networking Foundation, <https://www.opennetworking.org/>

3.3.2 無線通信技術

(1) 研究開発領域名

無線通信技術

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

飛躍的にトラフィックが増大している携帯電話・スマートフォンを収容するだけでなく、今後の IoT や M2M などの効率的なサービスを可能とするための低コストで柔軟な特性も兼ね備えた無線通信技術である。将来の社会生活を支える通信基盤として高速・大容量・低遅延・低コストを目標に世界各国で急速に研究開発が立ち上がりつつある。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

携帯電話として発展した移動体無線通信サービスは、音声通話サービスにとどまらずむしろ近年はインターネットへのアクセス手段としてその存在価値が高まり急激に通信トラフィックが増大している。今後は、人が意識的に通信を行う用途だけでなく M2M(Machine-to-Machine)通信や Internet of Things (IoT) と呼ばれる機械制御やセンシング、モニタリング用途、没入型バーチャル・リアリティーなどに本格的に対応することが考えられており¹⁾、その通信トラフィックの増大は今後 10 年で 1000 倍が想定されている。この多様な需要増に対応するための新たなシステムについて、2020 年の初期サービス開始を目標として極めて活発な議論が世界各地で展開されており、急速に技術開発が行われている。この新システムは、現在の携帯電話システムである LTE(Long Term Evolution)やその発展形である LTE-A(Long Term Evolution-Advance)の次の世代として、第 5 世代(5G)と呼ばれている。

世界中の各団体において 5G に関して議論が開始された段階であり、その明確な定義はまだ存在しないが、代表的には、これまでの 1000 倍のトラフィックの収容、100 倍のユーザースループット、100 倍の端末数、ミリ秒程度の伝送遅延、M2M や IoT に向けた省エネルギー性、高速鉄道など高速移動のサポート、が特徴として挙げられる²⁻⁴⁾。

今までの携帯電話システムはおおむね 2.5 GHz 以下の周波数帯が利用されてきたが、これらの目標を達成するために 5G では 6 GHz 以上やセンチ波、ミリ波帯の利用が考えられている。減衰の大きいこれら高周波数帯を屋内のみならず屋外等でも利用するための技術開発が活発化している⁵⁾。例えば、基地局側に 100 を超えるアンテナを実装する Massive MIMO 等が盛んに研究されている。Massive MIMO では、アンテナビームパターンを適応的に狭域化することによりアンテナゲインを得る手法であり、端末の移動等の伴う伝搬環境変化への追従技術が重要となる。

また、高周波数帯の利用シナリオと関連して、基地局がカバーする範囲を縮小することによって周波数帯域を空間的に高密度に利用し、また、通信距離が短い高周波数帯の利用をも可能とする「スモールセル」が有力なアプローチとされている。この場合、端末の移動に伴う接続先基地局の切り替え処理（ハンドオーバー・ハンドオフ）が増大してしまうため、対策として制御信号とユーザーデータの通信路を分離し、比較的低い周波数で安定して制御信号を伝送して接続を維持しつつ、高周波数帯などが利用可能な場所においては高速にユーザーデータを伝送する技術(コントロールプレーン・ユーザープレーン分離、C/U 分離)が必須技術となる。

さらに、2020年サービス開始を目標にLTE-Aをベースとしつつ順次発展させるアプローチと平行して、新しい無線通信方式の研究開発も世界各地において研究が活発化している。これまで広く利用されてきた直交周波数分割多重（Orthogonal Frequency Division Multiplexing：OFDM）方式を基本としつつ、その単位波形を変更する例⁶⁾や、LOS（Line of Sight）環境を前提としたSC（シングルキャリア）方式を基本とした例が検討されている。この他、ネットワーク制御のバーチャル化や周波数帯域利用の柔軟化、各種の周波数利用効率改善技術が検討されている。特に、これまでの無線通信では送信と受信を同じ周波数で行うことはできず、必ず周波数や時間がそれぞれに割り当てられてきたが、5Gではこの送受信を同一周波数で同時に行うことも検討されている。その成否と実用的な利点が得られるかが注目される⁷⁾。

世界的な動向

日本では一般社団法人電波産業会 ARIB 高度無線通信研究委員会において 2020 and Beyond Ad Hoc グループが 2013 年 9 月に設置された。このグループでは 2020 年以降の地上系移動通信についてサービスおよびシステムコンセプトならびに技術トレンドの調査・検討が行われ、ホワイトペーパーが発行された¹⁾。引き続き第 5 世代モバイル推進フォーラム（The Fifth Generation Mobile Communications Promotion Forum：5GMF）が 2014 年 9 月に発足しており、技術、アプリケーション、ネットワークに関して広く検討している。

米国では 4G Americas が活動しており、2014 年 10 月に 5G の要求条件等に関する文書が公開された⁷⁾。その他、マサチューセッツ工科大学における Wireless@MIT（MIT Center for Wireless Networks and Mobile Computing）などが知られる。また、ニューヨーク大学科学技術専門学校 NYU-Poly が年に 1 度 Brooklyn 5G Summit を主催しており、5G に向けた伝搬モデルを中心に検討している⁸⁾。

欧州では EU の欧州プロジェクトとして METIS（Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty（20 20）Information Society）が 2012 年 11 月世界に先駆けて設立され⁹⁾、この他にも 5GNOW（5th Generation Non-Orthogonal Waveforms for Asynchronous Signalling）が活動しており全般に欧州の活動が目立つ。2015 年からは METIS II が活動を開始する予定である。特に METIS は強力に活動を推進しており、欧州が通信分野における主導権を確保する狙いが見てとれる。この他、英国サリー大学にも 5G イノベーションセンターが設立され研究開発を実施している¹⁰⁾。また、産業界としては、2013 年 12 月に欧州の主要オペレーター、ベンダーにより構成される 5G PPP（5G Infrastructure Public-Private Partnership）が組織され、また、世界の多くの携帯電話事業者が参加する業界団体「NGMN」（Next Generation Mobile Networks）も 2014 年末を目標に 5G 要求条件を定義している。

中国では IMT-2020（5G）Promotion Group が 2013 年 2 月に設立され、韓国でも未来創造科学部が 2013 年 5 月に 5G Forum を設立し活動を開始している。

（4）科学技術的・政策的課題

5G では信号が広帯域化するため、携帯デバイスに搭載可能な低コストかつ低消費電力の高周波部品やアナログ・デジタル変換器類、低位相雑音局部発振器、信号処理プロセッサが

重要となる。デバイス開発自身はこれまでも広く行われてきたが、消費者向け製品に搭載できるかが重要である。

高速通信に必要となる周波数帯域幅を確保するため、障害物での減衰が大きく直進性が強いミリ波帯を用いた通信が考えられているが、携帯デバイスで本格的に利用されたことはこれまでなく、利用者の移動や姿勢の変化によって通信の途絶が多く発生することが危惧される。移動体環境におけるミリ波帯等の利用は未知のことが多く、この通信チャネルを活かしつつ、利用者に良好な体験を実現する制御技術が重要である。

広い帯域幅が利用できる高周波数帯の活用は 5G の特徴となるが、具体的な周波数帯域は定まっていない。現状では各国、研究開発機関ごとに異なる周波数帯域において研究開発が進められている。ITU-R (International Telecommunication Union Radiocommunications Sector) の WRC (World Radiocommunication Conference) などで国際的な調整が行われるものの 4 年に一度の開催であり、需要の急激な増大を背景に進展する 5G に向けタイムリーに世界共通帯域を見いだすことが極めて重要となっている。2015 年に開催される WRC-15 にて 6 GHz 以下の周波数帯、2019 年に開催される WRC-19 にて 6 GHz を超える周波数が定義される。これに向け、ITU-R Working Party 5D (WP5D) でも各国より積極的な提案、議論が実施されている。

(5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

この研究開発領域では、今後の急激なトラフィック増加を支えるために現時点で考えられる限りの技術が投入されると言える。代表的なものとして、これまで移動体通信では利用されなかったミリ波やセンチ波などの高周波数帯の利用と、それを可能とする大規模アレイアンテナ技術(Massive MIMO)がある。街の至る所に 100 素子を超えるアレイアンテナが設置され、移動する利用者に向けて電波のビームの方向を維持するものであり、無線通信技術の大きな飛躍といえる。このような技術が実用化され、利用者に安定した通信を提供できるのかは学術的にも興味深い。

この分野における大規模プロジェクトとしては特に欧州に注目する必要がある。5G の研究プロジェクト METIS が 2012 年 11 月に世界に先駆けて設立されたのみならず、5GNOW など、それぞれ性格が異なる多数のプロジェクトが推進されている。欧州委員会では、2020 年の 5G の実用化に向け大規模な予算を投じて技術開発などを支援している。その予算は年々増加しており、5G 関連の研究に対し 2020 年までに合計 14 億ユーロを投じる。このように、将来の無線通信において主導権獲得を目指す欧州の動きは特筆に値する。

韓国においては 2013 年 5 月に産官学連携による 5G Forum が設立されたが、韓国政府は Creative 5G Mobile Strategy と題した計画において、今後 7 年間で合計 15 億米ドルを投入して 5G の研究開発を進める。韓国は世界で最も早期の 5G 実用化を考えており、2020 年よりも早く試験サービス等を実施する方針である。

日本においては 2014 年 9 月に 5G の産学官の推進体制である第 5 世代モバイル推進フォーラムが設立されたところであり、平成 27 年度予算概算要求における 5G 関連の研究開発には総額 28 億円を要求している。制度が異なるため一概に比較できないが、欧州や韓国に比べてその予算額は 2 桁程度少ないものである。

（6）キーワード

第5世代移動通信システム、5G、スモールセル、Massive MIMO、Very Large MIMO、C/U分離、ファントムセル、ミリ波、センチ波、高周波数帯

（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	△	→	全般に弱い。一部携帯電話オペレーター企業の取り組みが目立つ。
	応用研究・開発	○	↗	産業界や行政の取り組みが本格化しつつあるが、若干の出遅れは認められる。
	産業化	○	→	2020年を目標とした取り組みが本格化しつつある。
米国	基礎研究	△	→	一部の大学で活発な活動があるが、その他の成果は見えにくい。
	応用研究・開発	△	→	欧州等に比べての出遅れが認められる。
	産業化	△	→	欧州等に比べての出遅れが認められる。
欧州	基礎研究	◎	→	大学や企業による強力な活動が行われている。
	応用研究・開発	◎	→	多くの取り組みがあり、大変活発である。
	産業化	○	→	産業化については他国同様特に顕著なものは見られない。
中国	基礎研究	○	→	特に目立ったものは感じられない。
	応用研究・開発	◎	↗	各種会合でも活発に活動しており、今後も伸びていくと思われる。
	産業化	○	→	産業化については他国同様特に顕著なものは見られない。
韓国	基礎研究	○	→	特に目立ったものは感じられない。
	応用研究・開発	◎	→	サムスンがミリ波帯アダプティブ・アレイ・トランシーバーを開発した他、伝送実験も行っており活発である。
	産業化	◎	↗	2018年に世界最初の実用化を目指す方針であり活発である。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
 応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
 産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
 ◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、
 △：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) ARIB 2020 and Beyond Ad Hoc Group White Paper, Mobile Communications Systems for 2020 and beyond
<http://www.arib.or.jp/english/20bah-wp-100.pdf>
- 2) Thompson, J.; Ge, X.; Wu, H.-C.; Irmer, R.; Jiang, H.; Fettweis, G.; Alamouti, S., "5G wireless communication systems: prospects and challenges [Guest Editorial]", IEEE Communications Magazine, Volume 52, Issue 2, Feb. 2014.
- 3) Thompson, J.; Ge, X.; Wu, H.-C.; Irmer, R.; Jiang, H.; Fettweis, G.; Alamouti, S., "5G wireless communication systems: prospects and challenges part 2 [Guest Editorial]", IEEE Communications Magazine, Volume 52, Issue 5, May 2014.

- 4) Andrews, J.G. ; Buzzi, S. ; Wan Choi ; Hanly, S.V. ; Lozano, A. ; Soong, A.C.K. ; Zhang, J.C., “What Will 5G Be?”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Volume: 32, Issue: 6, June 2014.
- 5) ドコモ 5G ホワイトペーパー
https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_5g/DO-COMO_5G_White_PaperJP_20141006.pdf
- 6) Banelli, P. ; Buzzi, S. ; Colavolpe, G. ; Modenini, A. ; Rusek, F. ; Ugolini, A., “Modulation Formats and Waveforms for 5G Networks: Who Will Be the Heir of OFDM?: An overview of alternative modulation schemes for improved spectral efficiency”, IEEE Signal Processing Magazine, Volume: 31, Issue: 6, Nov. 2014.
- 7) 4G アメリカ ホワイトペーパー
http://www.4gamericas.org/documents/4G%20Americas%20Recommendations%20on%205G%20Requirements%20and%20Solutions_10%2014%202014-FINALx.pdf
- 8) Summary of Brooklyn 5G Summit
<http://brooklyn5gsummit.com/wp-content/uploads/2013/10/Brooklyn-5G-Summit-Summary.pdf>
- 9) METIS Web サイト
<https://www.metis2020.com>
- 10) The 5G Innovation Centre
<http://www.surrey.ac.uk/5gic/>

3.3.3 ネットワーク・エネルギーマネジメント

(1) 研究開発領域名

ネットワーク・エネルギーマネジメント

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

ネットワークを利活用して社会の種々のエネルギーを制御する ICT システム（xEMS：Energy Management System）は、スマートコミュニティを実現する重要な技術である。

相互接続性（Interoperability）、QoS(Quality of Service)制御技術、サイバーセキュリティ技術、M2M(Machine to Machine)通信技術、IoT(Internet of Things)技術、エネルギー最適化（ポートフォリオ）技術など、ネットワーク技術に関する多様な研究開発課題がある。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

[背景と意義]

高信頼性サービス提供（事業継続性/BCP：Business Continuity Planning）の観点での一極集中の電力供給からの脱却、CO₂排出削減、および経済性を同時に満足するエネルギーマネジメントシステム（EMS）が注目されている¹⁾。

中でも、民生部門でエネルギー消費が増大している家庭（HEMS: Home EMS）、ビル（BEMS: Building EMS）、コミュニティ（CEMS: Community EMS）、あるいは近年消費電力が急増しているデータセンター（DEMS: Data center EMS）で消費される電力を、ネットワーク技術を活用して削減する技術の研究開発（xEMS）が活発化している²⁾。

そのうち、HEMS、BEMS、CEMS については、総使用電力が時間帯によって大きく変化し、系統電力網（グリッド）への負担が大きい利用シーンに対して、ピーク電力を抑えるために、需要をシフトさせる DR（Demand Response）などのピークシフト策として適用が検討されてきた。そのために、地域に大量に分散配置された電力メータとの通信を行うための研究開発や標準化が進んでいる。ビルにおける空調機器の最適制御に関する研究開発なども進んでいる³⁾。

加えて、各家庭、商業ビル、あるいは地域においては、太陽電池、風力発電などの再生可能エネルギー機器や燃料電池などの代替エネルギー機器に加え、蓄電池や電気自動車などのエネルギーを蓄積する機器の大規模な普及に備えて、系統電力への逆潮も含めた電力バランスを最適化するグリッド制御技術（スマートグリッドやマイクログリッドなど）等のエネルギーポートフォリオに関する研究開発が進められている⁴⁾。

また、エネルギーマネジメントを支えるネットワーク技術の研究開発として、多種多様なデバイスとの通信を可能にするため、通信制御プロトコルの観点での相互接続性（Interoperability）を保持しつつ、セキュリティの向上、普及した際のネットワークシステムと情報処理基盤のスケラビリティの向上、および QoS 制御技術等がある⁵⁾。

一方、データセンターにおいては、そのエネルギー消費のうち、サーバーなどの ICT 機器（50%）、空調（30%）や電源のロス（15%）がほとんどを占めており、ICT 機器以外で最も大きな電力を消費する空調の電力を削減する目安として PUE（Power Usage Effectiveness：ICT 機器電力の占める割合／総電力と ICT 機器の電力が等しい時に 1 となる）が提案され、その指標を下げる試みがなされてきた。しかしながら、PUE は必ずしもデータセ

ンターの総電力を反映していない事が課題となっている。加えて、ICT 機器や空調などの個別構成要素の電力を下げたとしても全体の消費電力を下げることにはならない事が課題となっている。データセンターの制御については、従来の温度制御でなく、総電力の直接制御を行う技術の開発が強く求められている⁶⁾。

このように、エネルギー制御技術（xEMS）は、個別エネルギー機器の制御のみならず、社会システムとして、需要と供給のバランスを制御するエネルギーポートフォリオ技術、スケラブルでセキュアな情報通信技術、リアルタイム通信技術、など多種多様なネットワーク関連技術の研究開発を伴っており、日本の産業の競争力強化につながる事が期待される。

〔これまでの取り組み〕

xEMS に関しては、特に系統電力を対象としたスマートグリッドにおいて、通信の相互接続性の観点で通信プロトコルの開発と標準化が進められてきた。特に、米国では、老朽化した電力網（グリッド）の改善をモチベーションとして、NIST(National Institute of Standards and Technology)による標準化が強力に推進されてきた⁷⁾。このため、研究開発だけでなく、実用化においても米国が先行しており、ヨーロッパ、日本、中国、韓国がキャッチアップする構造になっている。例えば、エネルギー機器制御プロトコルとして、米国では SEP(Smart Energy Profile)、欧州では、インテリジェントビルのための OSI(Open Systems Interconnection)ベースのネットワーク通信プロトコル KNX(管理母体：Konnex Association)、日本では経済産業省を中心として通信ミドルウェアとしての Echonet Lite などに取り上げられ、積極的に標準化されてきた⁸⁾。また電力逼迫時の電力調整プロトコルとして OpenADR(Automated Demand Response)等が提案され、標準化が進んでいる⁹⁾。

同時に、IEEE で Transactions on Smart Grid が新たに発刊されるなど、標準化と並行して研究開発に関する取り組みも活発化している¹⁰⁾。このように、世界的に xEMS に関する研究開発や標準化が活発化している。

また、家、ビル、コミュニティにおいては、太陽電池、風力発電などの再生可能エネルギー機器や燃料電池などの代替エネルギー機器に加え、蓄電池が急速に普及してきた事もあり、商用系統電力とのバランスや系統電力の消費ピークをシフトする研究開発も行われている。種々のエネルギー供給と電力需要のバランスを考慮しつつ、全体のコストやCO₂の排出を最小化する柔軟な体系的ポートフォリオ技術の基礎的な研究開発が活発化している。一方、日本では、実証実験などの種々の取り組みがされてはいるものの、依然として政府資金による実証実験にとどまっている。

一方、民間部門の中で最も消費電力の増大が顕著なデータセンターでは、2006 年に米国環境庁(EPA)がその消費電力の上昇に関して警告を発し、目標 PUE を明示した後も、依然として総電力は年々増大し続けており、抜本的な消費電力の抑制が望まれている¹¹⁾。その原因の一つは、Mid Tear や Enterprise と呼ばれる大型のデータセンターについては、それぞれ個別の省エネ策を講じているが、大型データセンターの4倍の市場規模となっているプライベートクラウドなど中小規模のデータセンターの効率向上策が大きく遅れている事とされている⁶⁾。

これまで、サーバーやルータなどの ICT 機器、空調システム、電源のロスなど、それぞれの構成要素の消費電力を削減する技術革新がなされてきたところであるが、それぞれの要

素の消費電力が最小となる条件が必ずしも全体の電力を最小化する事にはならない事も指摘されており、連携制御による全体最適化の必要性が認識されはじめた⁶⁾。

さらに、クラウド研究における多くの学会において、“省エネルギー:Green”をセッション名にするなど、エネルギーマネジメントが世界的に研究開発の重要なポイントになっている¹²⁾。

[今後必要となる取り組み]

エネルギー情報は、社会のインフラ情報であるだけでなく、重要な個人情報でもあることから、ハッキングなどへの対策が重要である。そのため、物理的なセキュリティーだけでなく、サイバーセキュリティーに対して頑強なネットワーク技術の構築が不可欠となっている。

さらに、災害時には、震災情報や重要制御信号の優先配信を実現するための優先制御技術や帯域制御技術、遅延やジッターを抑制する技術、あるいは QoS (CoS: Class of Service) 制御技術の開発と標準化が不可欠である。

多種多様なプロトコルやデバイスを収容するための相互接続性を確保する研究開発も継続的に必要となる。通信制御用のプロトコルの標準化が進んではいるものの、依然として課題は多い。

xEMS は、スマートシティー実現のための中核技術として位置づけられているため、各種センサーや、エアコン、照明、分散エネルギー機器などのアクチュエーターなど、多種多様で大量の端末が接続される。しかしながら、現時点では、それら大量の機器を接続して同時に通信制御するだけの十分なスケラビリティが検証されてはいない。例えば、高精細映像配信などのリッチコンテンツを送受信する場合と異なり、M2M 通信の特徴である、小さくて大量のパケットの処理が、ネットワーク処理に負担をかけてしまう。その結果、ネットワーク遅延の原因になる。

電力メータの値など、情報を一方的に送信・収集する場合は別として、センサー情報を基にアクチュエーターをリアルタイムに制御する双方向のリアルタイム通信が要求される場合も多い。すなわち、大量で高頻度のトラフィック制御技術、シグナリング技術の開発が急務である。あるいは、そうした大容量・高頻度の通信に対するセキュリティーについても取り組む必要があり、新たなプロトコルの開発や、ネットワーク構成やその仕組みの研究開発が必要である。

さらに、通信システムにとどまらず、小さくて大量な情報を処理するための情報処理基盤にも工夫が必要となる。リアルタイム分析・処理技術、認証やログ管理技術の研究開発である。

上記の様に、xEMS の大規模な普及のためには、ネットワーク負担を解消し、情報処理負担を解消する低コストな技術の研究開発が不可欠となっている。

さらに、今後のスマートコミュニティにおいては、モビリティ (EV など) も含めてあらゆる機器がネットワークに接続され、エネルギーマネジメントの対象となる。その結果、エネルギーの側面でモビリティネットワークを統合させた社会インフラが構築されることになり、環境クラウド (制御基盤) によって統合制御されるようになる。上記のように、xEMS は IoT や WoT (Web over Things)、あるいは Cyber-Physical Systems (CPS) と言われる、大規模 M2M 技術分野の典型的な利用シーンであり、そのためのネットワークや情報処理基盤

の研究開発が急務となっている。

一方、xEMSの普及は、ネットワークの“向こう側”で制御するクラウドとしてのデータセンターに与えるインパクトも大きい。大量で小さなパケットを処理するためには、これまでの一極集中型のデータセンター構成は必ずしもふさわしいとは言えない。一極集中したデータセンターでは、大量の情報を送受信し、処理できないばかりか、データセンターが消費するエネルギーの側面でも、限界がある。

このため、処理単位（Workload）を段階的に分けて処理する新しいアーキテクチャーと、新しい分散処理手法を開発せざるを得ない。そのために、すでに Fog(Edge) Computing などの、これまでの一極集中型の処理基盤ではない新たな構成やデータセンター間の連携が提案されており¹³⁾、さらに本格的な取り組みが必要である。また、通信の相互接続性と同じ意味で、処理データの相互接続性を担保するためには、処理データのフォーマットを共通化する必要がある。

このように、xEMSは日本の産業競争力の源泉になる可能性を秘めており、その普及には、個別課題ごとのプロジェクトではなく、xEMSに焦点を絞った省庁横断、産官学連携の体系的な国家プロジェクトが必要である。

一方、データセンター自体の消費電力を削減する DEMS については、各省庁による委託や補助事業の例はあるものの、大型のデータセンターに焦点をあてたものが主体で、そのほとんどが、全体の80%を占める中小規模のデータセンターを対象としておらず、日本全体のCO₂排出削減に貢献できるまでには至っていない。また、個別構成要素の省エネ策は進んでいるものの、データセンターの全体最適化（CO₂最小化、電力最小化）がなされていない。先に記載した通り、個別要素の消費電力を抑制するだけでなく、それら全体で消費電力が最小になるように、統合最適化技術が強く望まれている。空調システムや ICT 機器の消費電力特性は多次元のパラメータに対する非線形特性を示すため、それらを統合制御する事は容易ではない。

そこで、近年、データセンターをソフトウェアで管理するシステム（SDDC: Software Defined Data Center）として DCIM(Data Center Infrastructure Management System)が、商用化され始めた¹⁴⁾。ネットワークシステムの構成手法として注目されている SDN(Software Defined Network)と連携したシステムとの整合性が良いシステムとして提案がなされている。

さらに、一部の国家プロジェクト（環境省、CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業）では、市場の80%を占める中小規模のデータセンターに焦点を当て、総エネルギーの最適化のためのプロジェクトを発足させた。機械学習によって各要素の動作条件を最適化し、結果として総電力を最適化する動作条件でデータセンターを運用するという新しい試みが開始されている。そのアルゴリズムを拡張 DCIM (A-DCIM: Augmented DCIM)として実装し効果を得ている¹⁵⁾。このように、データセンターの規模によらずデータセンターの抜本的な省エネを実現する試みも始められた事で、日本の産業力向上が期待できる。

さらに、データセンターにおいても、再生可能エネルギーを利用するシーンが確実に拡大し、BCP (Business Continuity Planning)の観点や省エネの観点でも、エネルギーポートフォリオの技術が必要となっている。実際、データセンターで消費される電力を、スマートグリッドやマイクログリッドとの連携で制御する取り組みも始まっており、今後データセンタ

一単体でなく、コミュニティ全体として取り組む施策が必要である。

また、データセンターにおける制御インターフェースの標準化は極めて遅れている。ICT機器、空調機器、電源機器、それぞれの分野で独自の取り組みがなされてきたため、統一的な通信制御プロトコルの開発ができていない。特に、空調や電源などのセキュア通信プロトコルの開発や標準化が遅れており、セキュリティ上も脆弱性が指摘されている。セキュアでリアルタイム制御が可能な、スケーラビリティに富んだ通信制御プロトコルの開発と標準化が急務である。産官学の、業界を超えたオープンイノベーションがこれほどふさわしく、また必要とされるフィールドはない。

（４）科学技術的・政策的課題

xEMS (x: H, B, C) ではすでに経済産業省、総務省、環境省など多くの省庁が種々の側面に取り組んできたところである。特区の形成などで、制度障壁の撤廃や制度上の課題も明確になりつつある。国際標準化についても、日本として貢献するところが大きい。電力メータなどの通信プロトコルの標準化も進みつつある。一方で、日本では、欧米に比較して、先に記述した通り、業界を超えた連携が進んでいるとは言い難く、産官学の業界を超えたオープンイノベーションを推進する政策的な取り組みが強く望まれる。

EV や燃料電池車の普及により、充電システムがコミュニティに配置されることになれば、電力ネットワークのアーキテクチャーに対する考え方や運用手法が刷新されるばかりでなく、搭載した蓄電池がコミュニティやホームのエネルギー蓄積デバイスとして位置付けられるようになる。そのため、モビリティが、ホーム、ビルあるいはコミュニティの xEMS の対象機器として位置付けられるようになる。その結果、地理ネットワーク（道路網）、電力ネットワーク（電力網）、モビリティネットワーク（車）、情報通信ネットワークなど、すべての社会インフラとしてのネットワークが相互に連携しながらスマートコミュニティが構成されていく事になる。情報通信ネットワーク一つの側面でさえも、現在想定されるよりもさらに大規模な M2M を包含するシステムが必要になるなど、これまで以上に省庁の垣根、業界の垣根を越えて、種々の技術的課題を解決する研究開発が強く求められる。

データセンターもこれまでの構成とは違ったイノベーションが必要である。クラウド技術がますます進歩する事は疑いようがないが、前項で記載した Fog Computing など、日本としても強力に推進するべきである。

他の EMS と一見異なる DEMS についても、コミュニティに配置した分散発電機器の利用や、余剰電力をコミュニティに還元する事も想定する必要がある。他の EMS との連携も加速されていく必要がある。その際、法的、制度的が問題となる。省庁のファンディングにおいても、縦割りではなく、体系的な取り組みが重要となる。

欧米においては、老朽化した電力グリッドの更新策として位置付けられたという経緯はあるものの、NIST を中心として発展したスマートグリッドに関する標準化活動（SGIP: Smart Grid Interoperability Panel）が、すでに NPO に移行されるなど、確実に民間主導の取り組みとして根付き始めている。日本でも、引き続き国家的で業界を超えた連携や研究開発が期待される。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

〔新たな技術動向〕

xEMS に関しては、NIST が Smart Grid における相互接続性に関するフレームワークとロードマップを更新した（NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 3.0）。特にサイバーセキュリティの Guideline を示し今後の方向性を現実に即して示唆した事が注目される¹⁶⁾。さらに、前項で記載した通り、2009 年に NIST を中心に設立された SGIP が 2013 年には Non-profit private-public partnership organization として SGIP 2.0 Inc. として再構成され、着実に民間主導に移行しつつある¹⁷⁾。

標準化の側面では、種々の通信制御プロトコルが ITU-T の SG5 での議論が加速されつつあるが、日本でも標準化活動と並行してプロトコルを実証する地域実証プロジェクトが開始されるなど、多方面の活動が行われている。

DEMS では、すでに記載の通り、通常、Mid Tier や Enterprise などと分類される大手のデータセンターが自社独自の省エネの取り組みを行ってきたところであるが、Facebook が主導した標準化活動（Open Compute Project）を精力的に推進し続けるなど、省エネに対する取り組みが活発化している。

これに対して、日本でも、大手のデータセンターに限らず、中小規模のデータセンターにも利用でき抜本的な省エネが実現できる統合エネルギー制御技術への取り組み（オープンイノベーションコンソーシアム形式の業界連携事業）が始まるなど、注目すべき動きも始まっている¹⁵⁾。

〔注目すべきプロジェクト〕

- ・ EU の FP7/HORIZON2020 には種々のスマートコミュニティプロジェクトが含まれる
- ・ Facebook によるデータセンターの省エネプロジェクトの拡大（Open Compute Project）
- ・ 環境省による「CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業」における業界連携のオープンイノベーションコンソーシアムによる抜本的省エネ技術の開発と普及活動など。

（6）キーワード

xEMS（Energy Management System）、スマートグリッド、相互接続性（Interoperability）、通信プロトコル、エネルギーポートフォリオ、M2M、IoT、WoT、サイバーセキュリティ、データセンター、SDDC（Software Defined Data Center）、DCIM（Data Center Infrastructure Management）、A-DCIM（拡張 DCIM）

(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	○ ◎	→ ↑	○：xEMSは、米国NIST主導によるInteroperability確保のための通信制御プロトコルの標準化をキャッチアップする形で、総務省を中心に積極的に活動されてきたが、一部の標準化を提案したのち、国際標準化の場での新たな基礎的な取り組みの動きが見えにくい。 ◎：DEMSは、機械学習を取り入れた消費エネルギー全体最適化の取り組みが開始されるなど、新たな提案がなされている。
	応用研究・開発	○ ◎	→ ↑	○：xEMSは、機器制御プロトコルとして、米国のSEP2、欧州のKNX等に対して、日本独自のミドルウェアであるEchonet Liteの策定と標準化が一段落し、地域実証のフェーズに入っている。 IoTサービスへの対応を見越して、セキュアで双方向のリアルタイムウェブサービス化の取り組みが開始され、IEEE1888を活用した双方向でセキュアな通信プロトコル開発など、新たな動きが出てきている。 ◎：DEMSは、インテル等による米国主導のSDDC(Software Defined Date Center)の発想に基づくDCIM(Data Center Infrastructure Management)をキャッチアップしてきたが、エネルギーマネジメント(DEMS)を組み合わせた拡張DCIMを提唱し、日本独自の提案もなされ始めた。 空調や電源などの通信制御インターフェースが、セキュリティ上最も遅れた（あるいは対応していない）インターフェースであるとの認識から、共通インターフェースへの対応や標準化の動きが開始された。
	産業化	○ ◎	→ ↑	○：xEMSは、政府資金による実証実験にとどまっており、市場原理に基づいた取組が十分とは言い難い。日本発の通信制御ミドルウェアEchonet Liteについては、国際市場への普及が課題である。 電力メータのインターフェースの一部がオープンになってはいるものの、種々の技術（電力ポートフォリオ技術やデマンドレスポンスなど）が十分に生かせる環境（適用の場）が構築できているとは言い難い。 ◎：DEMSは、大手データセンターに偏重していた取り組みが、中小規模のデータセンターにも適用できる技術の取り組みが開始されたところ。今後の商用展開が期待できる。データセンターでのリアルタイム双方向インターフェースプロトコルの開発など、標準化技術の投入によって、普及の可能性がある。
米国	基礎研究	○	↑	xEMSは、メータネットワークの開発と標準化が一段落し、Fog Computingなどの大規模化対応技術の研究開発やセキュリティ対策技術の研究開発に移行している。 DEMSは、基礎研究のフェーズではなく、大手のデータセンター事業者が自らの消費電力を削減するために取り組むという状況。
	応用研究・開発	◎	↑	xEMSは、NISTの発表によるロードマップに反映されるように、通信制御プロトコルの標準化の活動が一段落し、サイバーセキュリティ対策のフェーズに入った。 DEMSは、大手のデータセンターの自社の取り組みが活発化している。ネットワークセキュリティの脆弱性が指摘されており、標準化の観点で日本との連携があり得る。
	産業化	◎	↑	xEMSは、すでに商用化のフェーズに入った。これから各都市に水平展開される段階。 スマートメータは電気、ガスなど広範囲で市場導入されている。電力逼迫時のDemand Responseを支えるプロトコルOpenADRが実用化されているなど、確実に市場へ反映されている。 通信制御プロトコルSEP2.0については対応デバイスも含め、今後の発展が期待される。 DEMSは、インテル等による米国主導のSDDC(Software Defined Date Center)の発想に基づくDCIM(Data Center Infrastructure Management)の商用化が進んでいる。エネルギー最適化も含めた拡張DCIMは日本先行。 新しい空調制御システムが発表されるなど、ベンチャー企業の動きが活発化。

研究開発領域
通信とネットワーク

欧州	基礎研究	◎	↑	xEMSは、米国主導によるスマートグリッドに加え、風力や太陽電池などの再生可能エネルギーとの連携制御に極めて積極的である。FP7/Horizon2020などによるスマートコミュニティ関連の多くのプロジェクトが動いている。DEMSは、空調方式で新しい提案がなされてはいるが、EMSの観点で継続的な動きとして表面化していない。
	応用研究・開発	◎	↑	xEMSは、米国主導のスマートグリッドや再生可能エネルギーの利活用、あるいはそれらのネットワーク制御技術の開発に積極的である。EU主導(FP7/Horizon 2020)の大規模な実証が行われている。通信制御プロトコルも、欧州独自のKNXを策定して欧州内のデファクトとするなど、政策的にもアクティブである。標準化についても積極的。日本との連携によるスマートコミュニティ関連要素技術の研究やテストベッド連携が期待される。DEMSについては、米国や日本に比べて大きな成果が表面化していない。
	産業化	◎	↑	xEMSは、EU主導で進んでおり、産官学の連携が強い。DEMSは、米国や日本に比べて大きな成果が表面化していない。
中国	基礎研究	△	→	xEMSは、テレコム企業を中心に標準化にも力を入れている。DEMSは、ネットワークのアーキテクチャーについては積極的な提案がなされているものの、エネルギーを制御する取り組みについてはほとんど明らかにされていない。
	応用研究・開発	○	↑	xEMSは、標準化の観点で、テレコムを中心に積極的な取り組みを行っている。スマートグリッドに関して活発化。DEMSは、ほとんど明らかにされていない。
	産業化	○	↑	xEMSは、テレコムを中心に積極的な取り組みを行っている。スマートグリッドの採用について活発な動き。DEMSは、ほとんど明らかにされていない。
韓国	基礎研究	△	→	xEMSは、応用研究中心。DEMSは、ほとんど活動が表面化していない。
	応用研究・開発	△	→	xEMSは、政府、電力、テレコム系による実証実験が先行。DEMSは、ほとんど活動が表面化していない。
	産業化	△	→	xEMSは大規模な産業化には至っていない印象。DEMSは、ほとんど活動が表面化していない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 引用資料

1) 経済産業省資源エネルギー庁

http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/iso50001/など

2) 経済産業省商務情報政策局平成26年度情報処理振興課概算要求概要：

http://www.meti.go.jp/main/yosangaisan/fy2014/pr/pdf/ene_syojyo_01.pdfなど

3) 経済産業省デマンドレスポンス (Demand Response) について：

http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/sougou/denryoku_sys-tem_kaikaku/002_s01_01_05.pdfなど

- 4) 経済産業省スマートグリッド・スマートコミュニティ：
http://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/smart_community/など
- 5) 総務省報道資料：http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/02tsushin04_000017.html などの国家プロジェクト以降、多くの研究開発および標準化事業が発足している。
- 6) インプレス社 Smart Grid ニューズレター, Vol.3, No.2, pp. 24-33, 2月号, 2014.など
- 7) National Institute of Standards and Technology(NIST), <http://www.nist.gov/>
- 8) Consortium for SEP 2 Interoperability, <http://www.csep.org/>など
- 9) open ADR, <http://www.openadr.org/>
- 10) IEEE Transaction on Smart Grid, <http://www.ieee-pes.org/ieee-transactions-on-smart-grid>
- 11) 経済産業省：<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g100701a03jc.pdf> など
- 12) IEEE CloudNet, <http://www.ieee-cloudnet.org/>など
- 13) Cisco Fog Computing with IOx, <http://www.cisco.com/web/solutions/trends/iot/cisco-fog-computing-with-iox.pdf> など
- 14) Intel Exploring DCIM for Intel's Data Centers, <http://www.intel.com/content/www/us/en/it-management/intel-it-best-practices/exploring-dcim-for-intels-data-centers.html> など
- 15) 環境省”平成25年度CO2排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業”
http://www.env.go.jp/earth/ondanka/biz_local/25_01/
- 16) NIST, “NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 3.0”,
http://www.nist.gov/smartgrid/upload/NISTDraftFrameworkOct_2013.pdf
- 17) Smart Grid Interoperability Panel, <http://www.sgip.org>

3.3.4 ネットワーク仮想化技術

(1) 研究開発領域名

ネットワーク仮想化技術

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

ネットワークサービスやネットワーク構成の制御を抽象化・モデル化することにより、データ処理量やトラフィック量の変化・変動にあわせて、通信処理能力を柔軟に融通・制御可能とするネットワークアーキテクチャーやネットワーク制御技術

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

[背景と意義]

人口の増大をベースにした経済成長が期待される一方で、環境（エネルギー）、資源、都市化、交通等のさまざまな社会課題が顕在化しつつある。このような背景のもと、ICT技術の利活用により、安全・安心な暮らしや、効率的な資源活用を可能とする新しい社会インフラの実現が強く期待されている。また、総務省 ICT 成長戦略会議¹⁾（2013年6月）では、データの利活用範囲の拡大やネットワークにつながるモノの拡大を考慮し、従来型のビジネスモデルを、利用者視点で付加価値の高いサービスと技術製品とを一体で提供するモデルに変革する「ICT コトづくり」を、新しい価値創造産業の創出による成長戦略の1つとして提言している。

一方、技術トレンドに関しては、クラウドやモバイルインターネットの普及により、ネットワークに接続されるデバイスが増加の一途をたどり、2020年には500億のデバイスやモノがネットワークに接続されることが予測されている。多種多様なセンサーデータから取り込まれる実世界情報をサイバー空間において活用し、スマートグリッド、ITS、スマートシティ等のさまざまな社会システムを構築するための基盤として、ネットワークは変革を求められている。この新しいネットワークでは、従来のブロードバンドネットワークが実現してきたような情報通信の高速・広帯域化という価値のみならず、ビッグデータ分析技術との融合を図りながら社会課題の解決に直結する高度化・高機能化により新しい社会価値を創出することが望まれている。

ネットワーク仮想化技術²⁾は、要求の異なる様々な社会システムを実現するために、通信処理能力を柔軟に融通・制御可能とするネットワークの新しいアーキテクチャー、および制御方式である。本技術により、通信資源の利活用最適化の観点からは通信事業者のコスト削減による収益拡大を、様々な通信サービス創造の観点からは業務プロセス改革によるサービス事業者の経営資源効率化を、利用者にはアプリケーション機能の連携による新サービス構築の容易化を、価値として提供可能となる。総合科学技術・イノベーション会議では、ICTで新たな価値を創造するための視点として、基盤・ネットワークに関しては、バーチャルコミュニケーションや実世界シミュレーション等の、これまでにはない要求仕様のアプリケーションやサービスを実現するネットワークおよびネットワーク制御が期待されており、ネットワーク仮想化技術はまさに、これを実現するための基盤技術であり、さらなる研究開発の強化が、国際競争力強化の観点からも重要である。

【これまでの取り組み】

ネットワーク接続の柔軟性を向上させるため、新しいヘッダ構造の導入により LAN セグメントや IP ドメインを論理的に拡張するトンネリング方式やオーバーレイ方式が、ネットワーク仮想化を既存ネットワークの拡張として実現する技術として発展してきた。一方で、既存ネットワークの制約に縛られることなく、新しいアーキテクチャーを再設計する技術革新の潮流が、SDN（Software Defined Network）である。技術標準化を推進する ONF（Open Networking Foundation）において SDN は、ネットワーク制御メカニズムを、転送処理機能から分離し、ソフトウェアにより直接プログラム可能とするネットワークアーキテクチャーと定義されている。SDN によるネットワーク仮想化技術では、ネットワークの構成やサービス機能の制御を、抽象化・モデル化することが重要であり、抽象化・モデル化されたネットワークへのソフトウェア制御を、実ネットワークの制御と連携させる方式の研究開発が行われてきた^{3), 4)}。

データセンター、企業ネットワーク、モバイルコアにおいては、SDN を実現する 1 つの方式である OpenFlow が、実用段階にきており一部商用化もされている。さらには、OpenFlow の光トランスポートやモバイルネットワークへの適用に向けた仕様拡張⁵⁾の検討が始まっており、大規模な実証実験が予定されている。無線アクセスへのネットワーク仮想化技術の適用に関しては、セル間干渉制御等を含む無線ネットワークの統合管理・制御や、Wi-Fi オフロードに代表されるモバイルトラヒックの運用管理に関する研究開発の成果が、論文として多数報告されている。

上述した、ネットワーク構成や制御の仮想化に加え、NFV（Network Functions Virtualization）と呼ばれる通信サービス機能の仮想化を実現する取り組みが、欧州の標準化団体である ETSI（European Telecommunications Standards Institute）を中心に始められている。具体的には、宅内装置やセットトップボックスにおける認証や品質制御機能の仮想化、映像配信のキャッシュやトラヒック制御を行う CDN（Contents Delivery Network）サービスの仮想化、等のユースケースを想定した研究開発が進められている。

モバイル・無線ネットワークにおいてもアーキテクチャーの変革が起こりつつある。例えば、欧州が主導する 3GPP（Third Generation Partnership Project）等で検討が進められており、基地局の運用パラメータの設定や最適化を自動化する SON(Self Organizing Network)や、3G と LTE（4G）、Wi-Fi（無線 LAN）が混在する異種無線ネットワーク間をシームレスにハンドオフする方式、等の研究開発が進められている。更に、基地局をアンテナ部とデジタル信号処理を行うベースバンド部に分離した上で、ベースバンド部をクラウド化し、これを複数セルや周波数間で共有するクラウド RAN（Radio Access Network）と呼ばれる無線アクセス方式のアーキテクチャー検討が、チャイナモバイル（中国移動通信）を中心に進められている。

【今後必要となる取り組み】

ネットワーク仮想化技術のさらなる進展に向けては、ソフトウェアによるトラヒックオフロード・平滑化等のネットワーク機能の高度化から、新しいサービス・アプリケーションの導入・運用プロセスを変革するサービス開発の効率化や、社会インフラサービスへの適応に向けたレジリエンス（信頼性、耐故障性、耐障害性）を実現するための新しい技術開発が必

須となる。特に、今後の成長市場として注目される、IoT、エッジコンピューティング、Crowd ソーシング、パーソナルデータ・オープンデータ、CCN（Content Centric Network）等の新しい情報流通基盤サービスを支える通信インフラ基盤として、ネットワーク仮想化技術の高度化・実用化を進め、サービス提供形態やビジネスモデルの変革、さらには ICT を利活用する様々な社会インフラ産業の構造変革をけん引・加速化することが期待されている。

これらを実現するために、ネットワーク仮想化技術は、様々な通信環境に適用可能とするためのヘテロジニアスなネットワーク環境への対応、ネットワーク資源と計算資源を含めたシステムやサービス全体の性能や資源利用効率の最適化、仮想ネットワークを用いたサービス設計・構築・運用方式の確立、システム状態の変化・変動が激しい環境下においても信頼性やサービス品質を維持するための制御の自律化、安心・安全な情報通信環境を維持するためのセキュリティー機能のビルトイン、等に関する研究開発が必須となる。

（４）科学技術的・政策的課題

今後必要となる取り組みで述べたネットワーク仮想化技術の高度化を実現するためには、様々な特性を有するヘテロジニアスなネットワークに跨る仮想ネットワークの構築・検証方式や性能モデル化方式、仮想ネットワークを利活用するサービス設計・構築・運用方式、利用状況の変化や変動をネットワークに関するビッグデータを活用して解析する予知・予測方式、予知・予測結果に基づきプロアクティブかつリアルタイムな最適化を実現するフィードバック制御方式などの基盤技術確立が科学技術的な課題となる。

更に、これらの新しい研究開発ならびに早期の社会実装を実現するためには、研究開発成果の技術検証や実用性実証を、想定されるサービス提供時の環境で実施可能なテストベッド環境を整備し、社会課題を解決するサービスやアプリケーションのテストベッド環境を活用した研究開発を促進し、様々なステークホルダを巻き込んだ大規模実証実験を加速化するフレームワーク（競争的資金によるビジネス創出を加速化する支援体制）を整備することが重要である。

国際競争力の強化、オープンイノベーションを通じた波及効果の拡大に向けては、国際連携を研究開発を早い段階から推進し、標準化活動や社会実装に向けた様々なノウハウを共有するための施策が重要である。例えば、研究成果のソフトウェアを誰もが利用可能とするためのオープンソースソフトウェア（OSS）開発やコミュニティ活動を活性化する支援などが考えられる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

〔新たな技術動向〕

ネットワーク仮想化技術の高度化、高機能化に向け大きな影響を与える注目すべき技術動向として、第5世代移動体通信システム（5G）とサイバーセキュリティーへの対策技術を挙げる。

2020年までに大きく成長すると注目されるIoT時代への変革を、加速化するのがモバイルネットワーク（移動体通信）技術の進展であり、第5世代移動体通信システム（5G）の議論が活発になっている⁶⁾。今後10年で、1000倍の通信容量、最大10Gレベルの通信速度、1msecの通信遅延が、様々な周波数帯・無線メディアを融合して実現されていくことが

予測されている。5Gに向けた要求を実現するためには、無線通信技術の大変革のみならず、無線アクセスからコアネットワークまでの統合運用管理や統合制御をも考慮したモバイルインフラ全体の大変革が必須であり、ネットワーク仮想化技術の中核であるSDNやNFVの果たす役割が大きくなる。

一方で通信インフラの安心・安全を脅かす存在としてサイバー攻撃リスクが近年深刻化してきている。サイバー攻撃手法は、この10年で複雑化・巧妙化しており、DDoS（Distributed denial of Service）攻撃によるオンラインサービスの停止、マルウェアによる情報漏えいやシステム破壊から、ソーシャルエンジニアリングの活用やゼロデイ脆弱性を組み合わせた標的型攻撃による情報漏えいが深刻化している。これを検知・防御・対策を行うためには、広域かつ動的なアプリケーションレベルでのトラフィック監視や未知プロトコルの検出、膨大量の監視情報に基づく攻撃プログラムの挙動や侵入経路・感染経路の分析、状況に応じた適応型の攻撃対策自動化などの技術確立と実用化が重要な課題である。ネットワーク仮想化技術を応用した新しい攻撃防御方式の確立が求められている。

ネットワーク仮想化技術によるネットワークの新しい価値創造に向けては、欧州のFuture Internet PPPや北米のUS Igniteが、アプリケーション指向の社会実装を目指す取り組みとして注目されている。特にUS Igniteは、Gigabit to end user、SDN/Virtualization、Local Racks（GENI Racks）環境で構築される、将来ネットワークの利活用アプリケーションの研究開発を推進するホワイトハウス主導の研究開発プロジェクトであり、5年計画で、遠隔医療、ヘルスケア、教育を主対象とする60の先進アプリケーション、200の実証実験を目標としている。

また、社会課題を解決するインフラ構築という視点からは、GEが提唱するインダストリアル・インターネット構想が注目されている⁷⁾。インダストリアル・インターネットでは、インテリジェント機器、高度な分析、働く人をつなぐことにより、従来の社会インフラを構成する業務用機器のサービスとメンテナンスの在り方を変革することを目指すものである。人、プロセス、データ、モノを組み合わせ、ビッグデータの利活用により新しい価値を創造する取り組みの一つであり、インダストリアル・インターネットの実現においても、ネットワーク仮想化技術の担う役割が大きい。

[注目すべきプロジェクト]

ネットワーク仮想化に関連する研究開発は、北米NSFや欧州委員会（EC）が、FIA（Future Internet Architecture）やFP7等のフレームワークを運用しており、様々な研究開発プロジェクトが推進されている。どちらも、基礎研究から実用化研究のフェーズに入っており、欧州ではFP7に続くフレームワークとしてHorizon2020を開始しており、ネットワーク仮想技術の基盤に加え、IoTや5Gとの連携を視野にいれた標準化や応用研究プロジェクトの推進に力を入れている。

一方で、エコシステムの構築により産業界に大きなインパクトを与えつつあるオープンソース開発活動にも注目しなければならない。広域ネットワークにおけるSDNの実用化加速を行うODL（OpenDayLight）、ネットワークサービス機能仮想化であるNFVの標準化や実証評価を加速化するOPNFV⁸⁾（Open Platform for NNF）、クラウド環境におけるIT環境とNW環境の統合仮想化の実用化を推進するOpenStack等、世界各国の通信事業者、ベ

ンダー、大学が参画する大きな潮流となっている。

国内においても、欧米に匹敵する精力的な取り組みが行われており、世界の動きをけん引あるいは貢献する技術開発成果があがりつつある。例えば、総務省が委託研究として推進する「新世代ネットワーク基盤技術に関する研究開発」では、ネットワーク仮想化を実現する仮想化ノード開発と実証実験のプロジェクトが2010年より進められている。また、2013年からは「ネットワーク仮想化技術の研究開発」に基づき、オープンイノベーションのためのネットワークプラットフォームを構築・実証・展開するO3プロジェクト（3つのOは、「Open：オープン」「Organic：有機的」「Optimum：最適化」を意味する）が活動している。更に、社会課題の解決、産業競争力の強化に向けては、科学技術イノベーション総合戦略2014にある様々な施策が実施されている。

（6）キーワード

ソフトウェア定義ネットワーク（SDN）、ネットワーク機能仮想化（NFV）、インタークラウドネットワーク、自己組織化ネットワーク（SON）、クラウド RAN（Radio Access Network）

（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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・新アイデアや時代をけん引するコンセプトに関しては、欧米に遅れがち ・脳や生物の自律性に学ぶロバストなネットワーク構築に関する基礎研究は、大阪大学などを中心に、海外連携も含めて行われている
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ITUにおけるネットワーク仮想化の要求条件の定義ドキュメントについては日本が中心にとりまとめ・勧告化 ・JGN-XにおいてOpenFlowを用いたネットワーク仮想化基盤（RISE）を全国展開、またAPAN/GENI/FIRE等と相互接続を運用 ・メジャーな国際学会での論文採択数が少ない
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・OpenFlowスイッチ・コントローラについてはNECが世界初の製品化 ・SDNの広域ネットワーク適用はNTT Communicationsが世界初の実用化
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・かなり幅広く行われており、人材が豊富 ・コンセプト発祥の地となる、OpenFlowやSDNはスタンフォードから、Big DataやCyber Physical System(CPS)、M2Mなども北米より創出。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・SDNに関しては、スタンフォード大学、カリフォルニア大学バークレイ校、プリンストン大学、ジョージア工科大学などが研究開発の中核 ・将来ネットワークに関しては、GENIによる北米テストベッド構築と実証がほぼ完了、ホワイトハウス主導で社会実装を推進するUS Igniteを開始
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・AT&TやVerizonが次期ネットワークでのSDN採用をアナウンス、実用化に向けた実証実験を開始 ・CiscoやJuniper等がSDN対応製品の開発を本格化
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・FP7やHorizon2020において様々な領域の研究開発を推進中 ・研究コミュニティの結束も強く、ICN/CCN等の萌芽的研究にも注力
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・日本に比べると研究者層はかなり強い ・テストベッドPjにも投資を行っており、北米と同等レベルの研究開発を実施 ・移動通信（3 GPP）における成功体験が強みであり、ネットワーク仮想化やNFVを含む5Gのプロジェクトを開始
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・社会実装やイノベーション創出については、FI-PPPと呼ばれるパートナーシッププログラムが整備されており、産業化・実用化に向けた活動も精力的 ・DT、Telefonica、FT、BT等の通信事業者がSDNを採用、NFV実用化をけん引
中国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・チャイナモバイルはクラウドRAN実用化に注力
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ITU等では将来ネットワーク等の標準化議論に積極的に参加 ・データセンター技術領域では、IBMやマイクロソフトの中国拠点の研究者が精力的に活動しており、プレゼンスを維持
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・Cloud-RANプロジェクトにおいてはZTEが機器を実用化する予定 ・Huaweiは、ONF/NFVの標準化活動に積極的に対応、欧州研究所を強化 ・スマートシティプロジェクトへの投資が活性化、国内技術のみならず、場合によっては国外技術もとりいれ最先端化を推進
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ETRI等が情報収集を行うも、学会レベルコミュニティでのプレゼンスは低下
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・AsiaFI等での活動を推進 ・GENIに対して運用管理技術（フェデレーション）に関する研究をETRIが推進、インディアナ大学等の連携
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・主たる活動は見られない

研究開発領域
通信とネットワーク

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) ICT 成長戦略会議、“ICT 成長戦略 ～ICT による経済成長と国際社会への貢献～”、2013年6月、http://www.soumu.go.jp/main_content/000236560.pdf
- 2) N. M. Mosharaf Kabir Chaowdhury and Raouf Boutaba, “A Survey of Network Virtualization”, University of Waterloo, Technical Report: CS-2008-25, October 2008
- 3) Raj Jain and Subharthi Paul, “Network Virtualization and Software Defined Networking for Cloud Computing: A Survey”, IEEE Communications Magazine, November 2013, pp24-31
- 4) Bruno Astuto A. Nunes, et. al., “A Survey of Software-Defined Networking: Past, Present, and Future of Programmable Networks”, IEEE Communications Surveys and Tutorial, Vol:16, Issue:3, http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/93/29/82/PDF/hal_final.pdf
- 5) ONF white paper, “OpenFlow-Enabled Mobile and Wireless Networks”, <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/solution-briefs/sb-wireless-mobile.pdf>
- 6) Horizon 2020 Advanced 5G Network Infrastructure for Future Internet PPP, <http://ec.europa.eu/digital-agenda/futurium/en/content/horizon-2020-advanced-5g-network-infrastructure-future-internet-ppp-creating-smart-network>
- 7) GE 解説レポート、“インダストリアル・インターネット”、2012年11月、http://www.ge.com/jp/docs/1389000498785_Japan_IndustrialInternetatWork_0106s.pdf
- 8) OPNFV white paper, “An Open Platform to accelerate NFV”, https://www.opnfv.org/sites/opnfv/files/pages/files/opnfv_whitepaper_092914.pdf

3.3.5 通信行動と QoE (Quality of Experience)

(1) 研究開発領域名

通信行動と QoE (Quality of Experience)

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

通信サービスの高度化は、その利用行動の多様化を引き起こしており、サービスの基盤である通信ネットワークシステムの効率的な設計や制御に大きな影響を与えている。本領域では、通信ネットワークを利用者の行動や心理を分析し、その特徴を理解することで、利用者を系に含めた新しいネットワークの設計・開発手法の創生を目指す。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

急速に進化を遂げる通信環境下において次々と創生される通信サービスは、人やモノのコミュニケーションのあり方を変えている。特に移动通信の高度化により、ユーザーは時間と場所の二つの束縛から解放され、自らの生活様式に適したコミュニケーションの形を選択して多様な行動を取るようになった。こうした複雑化する利用環境の中で、より効率的な通信ネットワークの設計・制御・運用を行うには、人がどのように通信サービスを利用し、何を体験し、どのように感じて行動をしているのかを分析して理解する必要がある。本研究開発領域は、こうした通信トラフィックを発生させる行動（通信行動）を理解して、その経験の質（Quality of Experience: QoE）を定性・定量的に評価し、通信ネットワークの改善や新しいネットワーク技術の創出に資する知識を提供することを目指している。使う人の立場や視点に立った、人間中心設計（Human-Centered Design: HCD）¹⁾の考え方によるネットワーク研究である。

通信サービス利用者の心理評価は、音声や映像を対象とした主観品質評価の分野で歴史が長い。国際機関である ITU（International Telecommunication Union）において評価手順の標準化が活発に行われている。QoE の評価についても、その定義が ITU でなされている²⁾。QoE に基づく品質評価では、実際に経験した状況をユーザーがどのように受け入れるかを主観的に評価することで、品質を規定することとしている。さらに QoE 評価においては、ユーザーが持つ期待や、ユーザーの置かれている状況の影響も考慮に入れることとされており、ユーザーを取り巻く環境や心理的状况をも考慮した品質評価基準へと拡張することが考えられている。

こうした主観品質評価の結果を利用したネットワーク設計手法についても検討が行われている³⁾。定量化された体感品質に基づきネットワークの設計を行う場合、まず QoE をネットワーク上で測定可能な遅延やパケット損失、スループットなどの QoS（Quality of Service）値に変換（マッピング）する。これにより得られた QoS 値を品質基準値として、ネットワークの容量設計や各機器の設計を行う。QoE は、設計に用いる品質基準値の精緻化に寄与し、より柔軟なネットワークの設計を可能にし、品質とコストの適切なバランスを取ることができる。更に、ネットワーク利用者の体感品質については、ユーザーインターフェースとの連携により不満を減少させる方法についても研究がなされている。人が感じる時間は、心理的時間と呼ばれ、認知的過程からの影響を受けて絶対時間に対して過大もしくは過小に時間を見積もる現象を引き起こす。こうした人の特徴を利用して、プログレスバーや文字・

音声・映像コンテンツなどの提示により待ち時間をより短く感じさせることで、不満を低減する手法についても研究⁴⁾が進められている。

通信行動の分析は、主として工学以外の分野で進められてきている。社会学や社会心理学の分野においては、CMC (Computer Mediated Communication) を利用するユーザーの動機や行動傾向・心理状態を、アンケート調査などによる内観指標を用いて評価して、ユーザーの社会的な行動にどのような影響を与えているかを検討する研究が行われている。認知科学・認知心理学の分野では、ICT 端末やソフトウェアのユーザーインターフェースに対する反応を、内観指標と行動指標の両面を用いて評価し、その認知的特性を分析している。近年では、ネットワーク利用のユーザビリティを認知的アプローチで分析する手法についての研究⁵⁾も始められている。また、文化人類学の研究手法であるエスノグラフィを用いて、通信行動を把握する研究⁶⁾も進められている。

こうした工学以外の分野で行われている通信行動の分析結果を工学的に応用することも可能である。例えば、トラフィック量の変化がユーザー群の価格弾性等に依存するならば、その特性を基に生成される通信トラフィック量を推定し、ネットワーク側の設備容量や要求されるサービス品質等を考慮して適切な料金設定を行う等の運用形態が考えられる。また、放送番組内でのアンケート回答やオンラインショッピング、災害情報等の放送を契機にユーザー群の集団行動が変化し、通信トラフィックの生成に影響を与える場合には、通信料金の設定情報や放送番組の内容に対するユーザー行動の反応を利用してトラフィック量を制御することも可能と考えられる。

通信に関連した品質を扱う国際会議としては、QoMEX⁷⁾やCQR⁸⁾などがあり、従来の通信サービスやコンテンツの主観品質評価に加えて、様々なコンテキストを考慮したQoEに関わる研究発表が多くなされている。また、工学以外の分野での知見を工学応用する研究も、近年増加傾向にある。例えばヒューマンコンピュータインタラクションに関連する国際会議(CHI⁹⁾、HCI International¹⁰⁾、MobileHCI¹¹⁾など)においては、新しいインターフェースに対する心理評価だけでなく、利用行動の分析に関する報告がなされている。また、エスノグラフィの産業応用について議論を行う国際会議(EPIC¹²⁾)においても、通信行動に関する調査について結果が報告されている。国内においては、電子情報通信学会のコミュニケーションクオリティ研究会¹³⁾やイメージ・メディア・クオリティ研究専門委員会¹⁴⁾で、通信やコンテンツに関する品質の研究が行われてきた。また最近では通信行動工学研究会¹⁵⁾が発足し、通信以外の様々な分野の研究者が分野横断的な活動を行っている。

(4) 科学技術的・政策的課題

通信ネットワークに関する研究は、長年にわたり工学分野で進められており、既に成熟した研究分野と言える。しかし、上記の通り、既存の研究の枠組みでは対応が難しい課題が顕在化してきており、ブレイクスルーが必要である。このためには、人の行動や心理に関わるデータ分析を軸にして、他の研究分野との連携に向けた共通の研究課題の設定が必要となる。

通信ネットワークは巨大なシステムであり、アーキテクチャー、プロトコル、容量設計、インターフェースなど扱っている対象が多岐に亘る。このため、他の研究分野だけでなく、通信ネットワークに関連する研究領域の境界においても、有機的な連携を行うための共通した活動の基盤が必要である。それぞれの研究領域で扱っている対象は、個々のインタラクシ

ョン（相互作用）から集団としての特性、ミリ秒オーダーから数日/年にわたる変動特性の分析など、レイヤにより様々なアプローチがなされる。このため、特にモデル化やシミュレーションの手法についての共通基盤の作成が連携においては重要な技術的課題である。

通信行動や QoE の評価・分析は、既に様々な分野において研究が進められているが、より効果的な活動とするためには、上記の通り分野横断的な取り組みが必要となるため、異分野との連携を前提としたプロジェクトの推進が必須である。人文科学系の研究は企業ではほとんど行われていないことから、大学と企業の連携を積極的に推し進める必要がある。また、ヒューマンファクターに関わる研究は市場の成熟と共に重要性が増すため、通信市場の継続的な発展のためには、分野連携の研究を推進可能な研究者の育成を大学で行うと共に、通信サービスに関わる企業での工学以外の研究・開発者の人材活用に対する政策的な後押しも有効である。

分野連携の研究を行う際には、データの取り扱いについて個人情報保護の観点から注意が必要である。既に商用化されているサービスから得られるデータを、研究に利用するための枠組みを整備し、利用者の不安を引き起こさずにデータを有効活用する仕組みが必要となる。また、誰でも利用可能なオープンデータを増加させることも必要である。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

QoE に関する標準化は、ITU-T SG12 が中心となって、ETSI、TIA、TTC、IETF、3GPP 等の世界各国の機関と調整しながら進められてきた¹⁶⁾。ITU-T SG12 において、新勧告 G.QoE-Web、P.STMWeb の作成に向けた活動などが進められており、QoE に関する標準化が継続的に進められている。また、映像コンテンツの QoE 評価については、VQEG (Video Quality Experts Group) においても継続的な活動が行われている。また欧州では、QoE 全般に関わる大型研究プロジェクト QUALINET が実施された。

スマートフォンの普及にともない、様々なアプリケーションにおいて行動データの取得が行われている。取得されたデータに基づきユーザーの行動を変容させる取り組みが進められており、通信行動に影響を与える可能性がある。また、M2M トラフィックの増加により、人が生み出すトラフィックとは異なる特徴を持つデータが増加しており、今後新たな対処が必要になる可能性がある。

（６）キーワード

QoE、QoS、通信行動、インタラクション、心理評価、行動分析

（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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・新たな研究会の発足¹⁵⁾など、分野連携に向けた活動が進められている。 ・高機能移動通信サービスの普及が他国に先駆けて行われたことから、通信行動の社会学的分析について先進的な研究成果が得られている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ネットワークのQoEを可視化する技術（富士通）や、QoEに基づくネットワークの制御を行うQoE-Centricオペレーション（NTT）など、QoE利用の高度化に向けた応用研究や開発が進められている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・通信品質を考慮したネットワークの構築・運用が、ネットワークベンダにより提供されている。（NEC、富士通など）
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・HCDなどユーザー視点でのサービス・システム開発について、先進的な研究が行われている。 ・エスノグラフィの産業応用に関する国際会議（EPIC）が2005年に発足するなど、産業化を意識した行動分析の方法論に関する研究が進められている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・通信サービスから収集されたログを活用したネットワークの設計手法など、QoE利用の高度化に向けた応用研究や開発が進められている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・通信品質を考慮したネットワークの構築・運用が、ネットワークベンダにより提供されている。（シスコシステムズなど）
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・QoE全般を対象とする大型研究プロジェクトが推進されていた。（QUALINETなど） ・北欧における携帯電話サービスの普及率が極めて高いことから、通信行動の社会学的分析について先進的な研究成果が得られている
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・通信サービスから収集されたログを活用したネットワークの設計手法など、QoE利用の高度化に向けた応用研究や開発が進められている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・通信品質を考慮したネットワークの構築技術が、ネットワークベンダにより提供されている。（アルカテルルーセント、エリクソンなど）
中国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・幾つかの研究機関内での個別の研究以外、目立つ研究成果は見られない。
	応用研究・開発	×	→	<ul style="list-style-type: none"> ・目立つ研究成果は見られない。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・通信品質を考慮したネットワークの構築・運用が、ネットワークベンダにより提供されている。（ファーウェイなど）
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・幾つかの研究機関内での個別の研究以外、目立つ研究成果は見られない。
	応用研究・開発	×	→	<ul style="list-style-type: none"> ・目立つ研究成果は見られない
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・通信キャリアや端末ベンダー通信設備の品質維持以外の目立った活動は見えていない。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
 応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
 産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
 ◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、
 △：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

（8）引用資料

- 1) ISO 9241-210, “Human-centred design for interactive systems”, ISO, 2010.
- 2) ITU-T Appendix I to P.10/G.100, “Definition of QoE,” 2007.
- 3) 福元 徳広、新井田 統、上村 郷志、中村 元、“バックボーンネットワーク設計のための Web 体感品質評価”、電子情報通信学会技術研究報告、109(221), 1-5, 2009
- 4) Harrison, C., Yeo, Z., and Hudson, S. E., “Faster Progress Bars: Manipulating Perceived Duration with Visual Augmentations,” Proc. CHI 2010, ACM Press (2010), 1545-1548.
- 5) 新井田統, 原田悦子. "高度情報化社会におけるコミュニケーションの分析と理解." 電子情報通信学会誌 94.3 (2011): 226-231.
- 6) Kimura, Tadamasa. "Keitai, Blog, and Kuuki - wo - yomu (Read the atmosphere): Communicative Ecology in Japanese Society." Ethnographic Praxis in Industry Conference Proceedings. Vol. 2010. No. 1. Blackwell Publishing Ltd, 2010.
- 7) International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX) 2014, <http://www.qomex2014.org/>
- 8) 2015 Annual IEEE CQR International Workshop, <http://www.ieee-cqr.org/>
- 9) SIGCHI, <http://www.sigchi.org/>
- 10) HCI International Conference, <http://www.hci.international/>
- 11) Mobile HCI, <https://personal.cis.strath.ac.uk/mark.dunlop/mobilehci/>
- 12) Ethnographic Praxis in Industry Conference, <http://epiconference.com/>
- 13) コミュニケーションクオリティ研究会、http://www.ieice.org/~cq_ac/jpn/
- 14) イメージ・メディア・クオリティ研究専門委員会、<http://imqa.jp/>
- 15) 通信行動工学研究会、<http://www.ieice.org/~cbe/>
- 16) 高橋玲、“ユーザ体感品質（QoE）関連技術の国際標準化動向～ITU-T SG12 の活動を中心に～”、ITU ジャーナル、Vol.44, No.9, 2014.

3.3.6 情報ネットワーク科学

（1）研究開発領域名

情報ネットワーク科学

（2）研究開発領域の簡潔な説明

情報ネットワークの設計、制御、管理、運用のための学術基盤を確立する。情報ネットワークはますます大規模かつ複雑化しつつあり、さらに他の人工システムとは異なり、常に変化する多様なサービスの通信需要に応える必要のある動的開放系である。その結果、従来、当該分野の基礎科学とされてきた待ち行列理論やトラヒック理論の他、最適化理論等はもはや用をなさず、新たな学理を開拓し、そのデザインプリンシプルを確立する必要がある。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

【背景と意義】

情報ネットワークは社会のすみずみまで浸透しつつあり、電力、交通、物流、経済取引など他の重要な社会システムもネットワークに強く依存するようになってきている。すなわち、ネットワークは人類の生命や財産に関わる重要な社会活動にも強く影響を与えるクリティカルな社会基盤になりつつある。しかし、ネットワークそのものについてはその学術的基礎が十分に展開されないまま現在の興隆を招いているという現実があり、その信頼性は極めて低いレベルにとどまっている。例えば、平成 26 年 9 月に発表された総務省「電気通信サービスの事故発生状況」においても平成 25 年の「事故」（大部分は障害）の発生件数は、電気通信事業法の規程に基づいた報告義務のあるものに限っても約 45,000 件に上る。携帯電話網の機能不全は日常活動に大きな影響を与える故、マスコミ等でも大きく取り上げられるが、ネットワークの障害発生は携帯電話網だけでなく、もはや日常茶飯事である。その結果、ネットワークの障害が大きな社会的問題を引き起こすだけでなく、ネットワーク障害が他の社会システムに波及し、障害のさらなる拡大によって甚大な被害を各所にもたらすという事態も頻繁に起きている。

それにも関わらず根本的な対策が講じられていないのは、情報ネットワークがこれまでの工学的システムにみられなかった大規模複雑な、かつ、新しいサービスが常に付加的に開発されている動的開放系であるからに他ならず、既存の学術基盤による取り扱いがますます困難になっているためである。情報ネットワークに接続されるコンピュータ数は数億台に達し、端末数は移動体なども併せて数十億台、2020 年には 500 億台に達すると言われている¹⁾。また、モバイル利用など種々のサービス利用や用途に応じた制御が行われており、秒～日オーダーの短期的な情報流の変動が絶えず起きているシステムである。さらに、長期に亘る変動、すなわち、利用者の増加に伴って情報流は増大しながら、かつ、新しい利用法の創出によって劇的な変化も頻繁に発生している。これらの変化の中には設計時の想定を超えたものが多くあり、新たな価値と同時に特にネットワークの運用・管理において対応が困難な問題を生み出している。これまで情報ネットワークは、その基本技術である光通信技術や無線通信技術の絶えまない変革によって、情報流の量的拡大への対応がなされてきた。しかし、エネルギー効率やコスト、規模等を考慮すると、量的拡大による手法ももはや限界に近づきつつある。また、そもそも、これまでのネットワークは、利用端末（コンピュータやスマートフォ

ンなど）の仕様に基づいて機能を階層化・分割して全体を組み上げるという要素還元論的手法によるシステム設計が行われてきたが、そのような手法自体を見直す時期が来ていると言える。

情報ネットワークは、(1) さまざまな通信要求を処理する開放系であり、その要求は日々増大、多様化し、かつ、利用者の要求の変化に依存して大きく変動する動的システムであること、(2) ネットワーク自体、多くの構成要素から成り立ち、それらの相互依存性がますます高まっていること、(3) 電力制御等さまざまな社会システムが情報ネットワークに依存するようになり、ネットワークが制御フィードバックループの一部に組み込まれるようになりつつあること、などの特性を持つ。既存の学術基盤における根本的問題は、実世界や人・社会との調和を十分に考慮しないまま「情報ネットワークのみ」を対象として、その性能や通信品質に関する研究開発がなされてきたところにある。例えば、航空機はその部品数が数百万点に達する複雑なシステムであるにも関わらず、利用者が一定の信頼感を持つのは、長年に亘る信頼性理論や安定性理論など確固たる学術基盤の発展によって事故率が低く抑えられているからに他ならない。一方、ネットワークは航空機のような閉じたシステムとは異なり、情報流が絶えず変動しながら、成長を続ける動的開放系である。このような大規模複雑な、かつ、外的環境／内的環境が変動する動的な情報ネットワークの根底を成す科学の創成なくして利用者の安全・安心、さらには信頼の実感は有り得ない。そのためには、人と情報ネットワークの関わりも欠かせない視点であるが、それについては別項（「通信行動と QoE」）に譲る。

【国内外の動向】

近年、さまざまな自然および人工のネットワークに関する研究が盛んに行われるようになってきている。いわゆるネットワーク科学 (Network Science) として、現状では、電力ネットワーク (Power Grid) や生物の遺伝子ネットワーク、脳機能ネットワーク、さらにソーシャルネットワークなどを対象にそのモデル化、特性分析などが主たる目的になっている²⁾。しかし、情報ネットワークを対象に、その成果を活用した設計／制御までをも含めた研究は世界的に見ても極めて少ない。一方、複雑適応系における研究としては、システム設計の観点からマルチエージェントシステムが従来から研究されているが、特に生物の群知能³⁾ など要素間のインタラクションに着目した研究はソフトウェアシステムへの応用などを念頭に欧州を中心に取組まれてきた。これらの例からも明らかのように、新たな情報ネットワーク学術基盤の観点からは、物理学や生物学、社会学などとの融合が不可欠である。

国内においては、これまでその学術基盤的性格から、情報ネットワークの学術としての体系化、統合化を目指したものや、プロジェクトなど組織だったものは極めて少ない。例外的に、(独) 情報通信研究機構と大阪大学による脳情報通信融合研究センター⁴⁾ において、脳機能の解明とその情報通信への応用が融合研究として取組まれているのみである。緩やかな研究者連携として、平成 23 年に情報ネットワーク科学基盤の議論を行うために電子情報通信学会通信ソサイエティに「情報ネットワーク科学時限研究専門委員会 (NetSci 研究会)」⁵⁾ が設立され、ネットワーク分野を中心に他領域との融合も狙った議論がなされている。また、同時期に電子情報通信学会基礎境界ソサイエティに「複雑コミュニケーションサイエンス時限研究専門委員会 (CCS 研究会)」が設立されている。CCS 研究会は、非線形理論・複

雑系理論・生体システム分野とネットワーク分野との融合を進めることを目的としている。

【アプローチ】

これまでのネットワーク設計手法の多くは、全体として要求される機能を定義し、それを分割して個々の機能を設計し、その後それらを組み合わせて全体を完成させるという要素還元論的手法によるものであった。しかし、情報ネットワークを含めた大規模複雑系の本質は、要素間のインタラクションにより新たな構造や機能が創発されることにあり、要素還元論的手法によらない設計・制御手法が必要である。このような創発を促すシステムに関する研究は、応用数学や物理学において、また生物システムの理解を進めるために生物学を中心に、特に複雑システムを対象に進められてきている。大規模複雑システムの理解とモデル化を行う上での基本的な概念としてインタラクションが注目されている。近年、それらの知見に基づいて、故障耐性に優れたシステムとしての自律分散システムや自己組織化システムへの応用が活発に行われるようになり、情報ネットワークへの応用も精力的に進められるようになってきている。今後、情報ネットワークにおける階層内構成要素や階層間などを含めたインタラクション、ソーシャルネットワーク上でのインタラクション、人とのインタラクションなどの理解とモデル化、それらに基づいた工学応用が重要である。

（４）科学技術的・政策的課題

イノベーションの源泉として最先端科学技術の融合が言われて久しいが、情報ネットワーク科学の基盤創成においてもそのような取り組みは必須である。特に、物理学分野や生物学分野等、日本が強みを持つ科学領域との融合は、我が国の技術力を発展させる上でも重要である。情報ネットワークを含む情報科学の分野では、概念設計においてそのフィロソフィーを根幹としたデザインプリンシプルが重要で、特定の技術のチャンピオンデータ自体にさほどの意味はない。その結果、米国流のプラグマティズムに沿った概念設計に基づいた研究開発競争をすることは、我が国の研究者・技術者にとって、言語の壁や日本人の特性などから圧倒的に不利な状況になっている。そもそも人材育成の観点としてグローバル化は当然のことであるが、我が国の優秀な人材にとって不利な状況で競争を強いることは賢明でない。我が国の競争力強化のために、まず、比較的コミュニケーションが容易な共通言語としての理論基盤を確立し、それに基づいたデザインプリンシプルを用いて優れたシステムを設計していくことが重要で、それが世界に通用する人材の育成にもつながる。

もちろんこれは、ガラパゴス化につながりかねない「我が国の一人勝ち」を狙うものではあってはならない。米国流のプラグマティズムに沿ったシステム化と理論基盤にのっとったシステム化は相補的なものであり、その連携によって世界的な情報ネットワーク技術、ひいては情報ネットワークが支えるさまざまな社会システムのさらなる発展を促すことが可能になる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

【期待される効果】

多くの社会システムはその基盤としてネットワーク利用を前提としており、信頼性の高い情報ネットワークを実現することができれば、関連する技術分野に対する波及効果は大きい。

交通システムや物流システム、ロボットシステムなどへの直截的な貢献の他、今後、発展が期待される CPS (Cyber-Physical Systems) や IoT (Internet of Things) など新しい社会システムに対しての基盤となりうる。

【注目すべき大規模プロジェクト】

国外では、情報ネットワークの技術開発だけでなく、より挑戦的・先導的研究への積極的な投資が戦略的になされている。関連の深いプロジェクトとして、欧州の第7次枠組計画 (FP7) における ICT Work Program では技術とともに科学を重視した FET (Future and Emerging Technologies) プログラムが「Future Network」などの研究開発に重点をおいたプログラムと並行して大規模に推進されてきている (約3億ユーロ/年)。例えば、物理学者が主導する ICT を含んだ複雑系に関する研究が FET プロジェクトとして 2011 年から 4 年間プロジェクトとして推進され、次期計画に継続される予定である。一方、米国では、米国科学財団 (NSF) による FIA (Future Internet Architecture ; 今年から FIA-NP (Next Phase) として3プロジェクトに絞られて継続中) プロジェクトや GENI (Global Environment for Network Innovations) プロジェクトなど技術開発を中心としたものが進行中であるが、同時に基礎理論の重要性も強く認識されるようになってきている。特に、ネットワーク技術においても異分野融合の重要性は強く認識され、Cross-Cutting Programs として “Network Science and Engineering” が重視される状況になっている。これらから明らかなように、情報ネットワーク科学の基盤研究を統合的なシステム研究開発とともに推進することが、重要視される時代状況にある。残念ながら、国内では同種のプロジェクトは数少ない。

(6) キーワード

情報ネットワーク学術基盤、開放系、信頼性 (レジリエントシステム)、デザインプリンシプル、自己組織化、環境適応、

（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	○	↑	個々の研究者レベルではさまざまな取組が行われ、研究者連携のための学会活動も研究会レベルでは活発に行われるようになっている。
	応用研究・開発	○	↑	数少ないものの、実証実験レベルの取組みも産学連携によってなされている例がある。
	産業化	×	↑	実証実験レベルの取組みが今後、産業化として取組まれる可能性はある。
米国	基礎研究	○	↑	複雑系の研究においてはサンタフェ研究所が有名で、個々の研究者レベルではさまざまな取組が行われているが、情報ネットワークを対象とした研究は少ない。
	応用研究・開発	△	→	プラクティカルな研究開発は盛んに取り組まれているものの、ネットワークの科学基盤に関する取組みについてはその重要性が認識されつつある段階である。
	産業化	×	→	現状、産業化まで目指した取組みはない。
欧州	基礎研究	◎	↑	個々の研究者レベルでの取組みだけでなく、EUを中心とした大規模プロジェクトが進められている。
	応用研究・開発	◎	↑	情報ネットワークへの応用に関する取組みも積極的に行われている。
	産業化	×	↑	産業化には至っていないが、プロジェクトとしての取組みが結実する時期も遠くないものと考えられる。
中国	基礎研究	○	↑	一部の研究者によって取り組まれている。
	応用研究・開発	×	→	取組みはみられない。
	産業化	×	→	取組みはみられない。
韓国	基礎研究	△	→	少数の研究者による取組みがあり、日韓合同ワークショップ等も開催されている。
	応用研究・開発	×	→	取組みはみられない。
	産業化	×	→	取組みはみられない。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
 応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
 産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
 ◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、
 △：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

（8）引用資料

- 1) Dave Evans, "The Internet of Things - How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything -," CISCO Cisco Internet Business Solutions Group White Paper, April 2011.

- 2) Albert-László Barabási, and Jennifer Frangos, *Linked: The New Science of Networks*, Perseus Publishing (2002)
 - 3) Eric Bonabeau, Marco Dorigo and Guy Theraulaz, *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*, Medicine & Health Science Books (1999)
 - 4) 脳情報通信融合研究センター, <http://www.cinet.jp/>
 - 5) 電子情報通信学会 情報ネットワーク科学時限研究専門委員会, <http://www.ieice.org/~netsci/>
- 注：文献2）、3）はパイオニア的著作。関連して、多くの著書、論文が出版されている。

3.3.7 新たな情報流通基盤

（1）研究開発領域名

新たな情報流通基盤

（2）研究開発領域の簡潔な説明

ポストインターネットにおいて、人とモノがシームレスに相互接続、協調動作し、新しいサービスの創出を実現する、情報流通ネットワーク基盤の確立を目標とする。桁違いのデバイスから構成されるネットワークにおいて効率的な情報探索および伝送を実現する新たなネットワークアーキテクチャーの研究開発を行う。

（3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

近年インターネットは人を中心としたコミュニケーションツールだけにとどまらず、モノと人、モノとモノ同士を相互的に接続し、協調動作させるための情報インフラとしての役割を担いつつある。IoT（Internet of Things）やM2M（Machine to Machine）ではさまざまな計測機器（センサー）がネットワークにより接続され、センサーデータを収集、集約、分析し、その結果を用いて機器の遠隔制御を行う。IoTやM2Mは特に工場の遠隔制御、物流、医療、スマートシティーへの応用が期待されている。IoTやM2Mの本格運用を考えた場合、あらゆるセンサーがネットワークを介して通信することが予想され、その接続数は人の所有にもとづく現在のインターネット接続端末数と比較して桁違いであることは想像に難くない。シスコは2020年までにM2Mデバイス数が約500億まで到達すると予想している¹⁾。また、IoTやM2Mでは個々のセンサーが生成する情報量はそれほど大きくないが、多量のセンサーが接続されたネットワークにおいてセンサーデータ取得の即時性、データの継続性、可用性を達成するためには、従来とは大きく異なる通信特性を実現する必要がある。特に、遠隔機器のセンシングおよび制御では、組み込みセンサー、無線ネットワークなど資源制約が大きい条件下での運用が想定される。

現在IoTおよびM2Mでは、通信プロトコルの策定と標準化について進められているものの、上記の膨大なデバイスが生成するセンサーデータを効率よく伝送する方法、スケーラビリティへの対応、データの即時性、継続性、可用性などの品質を確保するネットワーク制御等、これからの研究課題であるものも多い。

一方、インターネット誕生から約50年が経過し、当時では想定し得なかったほど大規模化している。その過程においてIPアドレス枯渇やセキュリティなどさまざまな問題が顕在化し、その解決のため抜本的なネットワークアーキテクチャー再構築の必要性が指摘されている。このため現在ポストインターネットアーキテクチャーに関する研究が活発に進められており、その一つとして大きく注目されているのが情報指向ネットワーク（ICN; Information-Centric Networking）あるいはコンテンツ指向ネットワーク（CCN; Content-Centric Networking）である。

インターネット通信は端末（ノード）識別子であるIPアドレスによって通信経路の決定とパケット伝送処理が行われており、ノード指向型通信ともいえる。一方現在のインターネット利用形態の多くは、利用者（ユーザ）がサービスあるいはコンテンツの利用を主目的としたコンテンツ指向型通信であり、一般的にどのノードがサービス・コンテンツを提供する

かはユーザー興味の範疇外である。このように現在のインターネットにおけるユーザーの利用形態と実際の通信形態には乖離があり、これを解消しコンテンツ指向型通信を実現することを目的とした ICN 研究が現在活発に推進されている。

コンテンツ指向型通信の実現は、2000 年代前半に CDN (Content Delivery Network) あるいは P2P などの研究により行われてきた。CDN は特に Web コンテンツを対象として、同一コンテンツを複数のサーバーに分散配置させ、DNS (Domain Name System) の負荷分散機能を用いて近隣サーバーからコンテンツの取得を行うことで、通信性能の向上とネットワーク資源の効率化を実現している。P2P では、ピア同士が接続されたオーバーレイネットワークを用い、ピアが保持するコンテンツを効率的に発見・取得するアルゴリズムが実装されている（例えば DHT (Distributed Hash Table) など）。ICN はこれらをネットワークレイヤで実現する技術であり、Web サーバーあるいは参加ピアに限定されていたコンテンツ指向型通信をネットワークの標準機能とすることで、広くその効果を楽しむだけでなく、信頼性・可用性の向上、管理者によるネットワーク運用ポリシーの適用などが実現可能となる。

ICN/CCN はいずれもコンテンツ指向型通信を実現するネットワークアーキテクチャーの総称であり、本質的には同一の理念に基づいている。CCN は米国を中心に、ICN は欧州を中心にその名称が用いられてきたが、ICN は広義の概念を表し、CCN は ICN を具現化する実装であるというのが世界的な共通認識となりつつある。

ICN では、一般的にコンテンツの名称（あるいはコンテンツごとに区別可能な数値）を識別子とし、コンテンツ指向型通信を実現する。経路制御は多くの場合コンテンツ識別子が直接用いられるが、経路集約やルーティングの効率化から別にロケーション識別子を持つ場合もある。ICN によるコンテンツ指向型通信の実現により次に挙げる効果が期待されている。

1. コンテンツ発見にかかるオーバーヘッドの分散化および効率化：現在コンテンツの取得は (1) 検索エンジンを用いたキーワードによるコンテンツの検索、(2) DNS によるホスト名解決、(3) IP アドレスによる通信、の手順が一般的である。これらの手順はいずれも処理オーバーヘッドがかかるだけでなく、検索エンジン、DNS がネットワーク全体の単一障害点になる、コンテンツへの誘導がネットワーク管理者ではなく検索エンジンのポリシーに左右されるなど、ネットワークアウェアネスではない、などの問題がある。ネットワークレイヤの標準機能としてコンテンツ指向型通信を実現する ICN は上記問題を抜本的に解決するものである。
2. 動的なコンテンツ情報更新への追従：上記の通りコンテンツ取得には多くの処理オーバーヘッドが発生するため、時間変化の少ない静的なコンテンツの取得に用いられるのが一般的である。一方で、IoT や M2M などにおけるセンサーデータに代表される動的コンテンツはリアルタイム性が非常に高く、また時系列で生成されるセンサーデータの情報それぞれを簡便に取得するためには、より軽量なコンテンツ取得機構が必要となる。ICN では動的コンテンツそれぞれについてもコンテンツ識別子を割り当て可能であり、さらにシーケンス番号についても対応しているため、時系列データの部分取得も可能など、情報取得におけるコンテンツ指定の柔軟性が高い。
3. ネットワーク内キャッシングの実現：ICN では、コンテンツによる経路制御が行われるため、コンテンツをどのノードが保持すべきかは問題とならない。すなわちコ

コンテンツをネットワーク内のルータが保持することも可能であるため、ICN では標準でネットワーク内キャッシュが導入されている。ネットワーク内キャッシュとは、ICN 内のルータが一度要求されたコンテンツのキャッシュを自身の記憶領域に格納時、将来の要求に対してルータのキャッシュコンテンツを返送することで、通信の短絡化と帯域消費の削減が可能となる。

4. ICN のコンテンツ指向通信とネットワーク内キャッシュによるコンテンツへの通信に対する空間的・時間的制約からの解放：従来のインターネットではコンテンツ取得を達成するためには (1) コンテンツを保持するノードがあらかじめ固定化されていること（空間的制約）、(2) コンテンツ取得時に保持ノードが通信可能であること（時間的制約）が共に満たされなければならないが、両制約がない ICN では、ネットワークの状況に応じたより柔軟なコンテンツ配置の戦略を考えることが可能であり、資源利用効率が高い。
5. 柔軟なコンテンツの取得：アプリケーション側から見た場合、より柔軟なコンテンツの取得がコンテンツ名を用いるだけで可能となる。例えば CCN アプリケーションである VoCCN では、SIP シグナリングに相当する通信をコンテンツ名の組み合わせにより実現している。また、ICN によるビデオ伝送の一手法である NDN Video ²⁾ ではビデオコーデック、解像度などもコンテンツ名として指定している。このようにコンテンツ名は単なるコンテンツの名称にとどまらず、付随する属性、パラメータなども指定することが可能であり、柔軟なコンテンツ指定が名前のみで実現可能である。特に IoT や M2M における計算資源の乏しい組み込み機器において複雑な制御プロトコルを実装することなく高度な情報取得が実現できる。

ICN の研究はこれまで米国および欧州が主体となって推進されてきた。2009年に CCN が V. Jacobson ³⁾ により発表されて以降、Xerox parc による CCN 実装である CCNx ⁴⁾、米国 NSF が FIA – Future Internet Architecture Project として、NDN (Named Data Networking) ⁵⁾、MobilityFirst ⁶⁾ を 2010 年から支援、欧州では第 7 次欧州研究開発フレームワーク (FP7) において、PURSUIT、SAIL、COMET、CONVERGENCE などが 2010 年から推進されている。これらの詳細についてはサーベイ論文 ⁷⁾ を参照されたい。

一方、中国および韓国では一部大学において（例えば北京大学が NDN プロジェクトに参加など）個別に参加しているのはあるが、国家プロジェクトとして現在推進されているものはない。

国際的な活動として、国際的権威の高い ACM sigcomm および IEEE Infocom において ICN を特集したワークショップが開催されている（sigcomm ICN Workshop が 2011 年から、Infocom NOMEN/MON が 2010 年から）。また、IEEE の代表的国際会議である ICC/GLOBECOM などでも毎回独立したセッションが組まれている。さらに、2014年9月には国際会議 ACM ICN が開催された。国際標準化活動については、IRTF (Internet Research Task Force) ICNrg (Information Centric Networking Research Group)、ITU-T SG13 Question 15/13 (Data-aware networking in future networks) が活動中である。

ICN の実用化によりコンテンツの柔軟な配置と効率的な伝送が期待されるが、コンテンツの範疇にとどまらず計算資源をも含めた柔軟な構成を実現する研究が登場しつつある。ここでは計算資源を包括したネットワーク全体を一つの大きなクラウドと見なし、要求に応じ

たコンテンツと計算資源の配置により、負荷の低減と QoE の向上の両立を目指している。2014年 NTT がエッジコンピューティング構想を発表、シスコも同様にフォグコンピューティングプラットフォームを発表している。ここでは、クラウドでの処理の一部をユーザーに近い計算資源で行うことで、体感速度を大幅に向上させることを目標としている。

（４）科学技術的・政策的課題

- ・インターネット接続端末数と比較して膨大になる IoT、M2M、ICN で取り扱うべき名前をどのように処理するか。例えば、1兆を超えるユニーク URL は (Google)、400億以上の Web ページ数 (<http://www.worldwidewebsite.com/>)、10億の FQDN 数 (<http://www.isc.org/services/survey/>)、500億を超えると予測される M2M デバイス数⁸⁾など。特に名前数の増加に対するスケーラビリティの確保が重要な課題となる。
- ・柔軟な名前アーキテクチャーをどのように決定するか。特に動的なコンテンツに対する命名規則は ICN における情報取得効率に影響する。また ICN の場合、マルチメディアサービスにおいてどのような情報取得および制御を実現するかは、命名規則と密に関わることになる⁹⁾。
- ・ルーティングおよびルータの性能向上。ICN は IP と比較してルータの処理が多く発生するため、ワイヤスピードで処理するためのハードウェアアーキテクチャーの再検討が求められる。
- ・ネットワーク内キャッシュの最適化。さまざまなアクセス要求パターンに対してコンテンツの有効なキャッシングとそれによるユーザー QoE の向上、ネットワーク資源の最適化をどのように行うかが重要課題である。
- ・コンテンツに対するセキュリティー・プライバシーの確保およびアクセス制限。特に秘匿性の高いコンテンツをどのように取り扱うかについては慎重な検討が必要である。
- ・広域テストベッドの構築と大規模検証。前述で述べた膨大なコンテンツ・名前数に対するスケーラビリティの検証には、大規模テストベッドによる広域実証実験が必要である。各国のテストベッドの連携による広域テストベッドの構築が重要となる。
- ・コミュニティの拡充。特に ICN 分野では、米国および欧州のコミュニティ交流が盛んになりつつあるが、我が国においても国際競争力強化の観点からコミュニティを早急に立ち上げる必要がある。単に ICN だけでなく応用としての IoT、M2M、エッジコンピューティングも含め、垂直統合的な連携が今後必要になる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

FIA については、2014年 から FIA-NP (Next Phase)として、NDN-NP、MobilityFirst-NP が引き続き進行中である。我が国においては、欧州 FP7 との共同研究プログラムとして、IoT および ICN の研究課題が 2013年 より開始されている。さらに欧州では、2014年 から FP7 の次フェーズとして HORIZON 2020 が開始し、そのうち ICT-5 において ICN/CCN に関する研究開発の公募が行われた。

実装が広く利用されている CCNx/NDN では、毎年 CCNx (NDN) Community Meeting が開催されており、ユースケースや最適化に関する議論、デモが行われている。

（６）キーワード

コンテンツ指向ネットワーク、センシング、ルーティング、情報検索、キャッシング

(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	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ITU-T SG13 Q15/13 Data-aware networking in future networks においてラポータを担当するなど、ITU-T標準化に主導的立場 総務省およびNICTがEU/Japan Collaborative ResearchにおいてICN/IoT研究を支援
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> NICTが中心となり、大規模スマートICTサービス基盤 テストベッド (JOSE) を構築、多くのプロジェクトが推進中 経済産業省が中心となりスマートシティ・スマートコミュニティ実証実験が推進中
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 家電メーカーが中心となりスマート家電の開発が増加 NTTがエッジコンピューティング構想を発表
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> FIA-NPにより、ICN/IoT 基礎研究を重点的にサポート CCN/NDN Community Meeting などを主催し、コミュニティの拡大に尽力
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> CCN 実装の一つであるCCNxは 1.0 となり着実に進捗 アジア、欧州を含む19機関が参画したNDNテストベッドにより実証研究が推進中
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> Ciscoがフォグコンピューティング構想を発表
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> FP7においてICN/IoT分野で数多くのプロジェクトを採択し、積極的に支援。HORIZON 2020 においても ICT-5 を中心に継続的に支援 IRTF ICN WGに積極的に関与しICN標準化の主導権を狙う 国際会議 ICN 2014 第一回開催を主催するなど、ICN 研究の主導的な役割
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ETSI (European Telecommunications Standards Institute) M2M TC が中心となり、標準化を推進。oneM2M設立に貢献
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 欧州主要キャリアが主体となりGMA (Global M2M Association) を設立、M2M基盤としての移動体通信網の拡充 M2M デバイスの市場シェアの多くが欧州企業
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ICNについては欧州および米国の個別プロジェクトへの参画にとどまる
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 国家プロジェクトとして物聯網を推進。ITU-TへのM2M標準化にも積極的に関与
	産業化	△	→	
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ICNについては欧州および米国の個別プロジェクトへの参画にとどまる
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> IoT/M2M について、未来創造科学部が中心となり「事物インターネット標準化協議会」を設立
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> サムソンを中心として、多くのスマートデバイスを開発

(註1) フェーズ
 基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) Cisco Connections Counter
<http://blogs.cisco.com/news/cisco-connections-counter/>
- 2) D. Kulinski, et al., “NDNVideo: Random-access Live and Pre-recorded Streaming using NDN,”
<http://www.named-data.net/techreport/TR007-streaming.pdf>
- 3) V. Jacobson, et al., “Networking Named Content,” ACM CoNEXT 2009.
- 4) CCNX ホームページ
<http://www.ccnx.org/>
- 5) L. Zhang, et al., “Named Data Networking,” ACM SIGCOMM CCR, July 2014.
- 6) D. Raychaudhuri, et al., “MobilityFirst: A Robust and Trustworthy MobilityCentric Architecture for the Future Internet,” ACM SIGMobile MC2R, October 2012.
- 7) G. Xylomenos, et al., “A Survey of Information-Centric Networking Research,” IEEE Communication Surveys and Tutorials, no. 99, 26 pages, July 2013. DOI: 10.1109/SURV.2013.070813.00063
- 8) D. Evans, “The Internet of Things: How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything,” Cisco White paper, available at:
http://www.cisco.com/web/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf
- 9) Giuseppe Piro, et al., “Information-centric networking and multimedia services: present and future challenges,” Trans. Emerging Tel. Tech., 2013.