

2.6.6 将来ネットワークアーキテクチャー

(1) 研究開発領域の定義

本領域は、多様化かつ高度化する将来の通信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する新しい通信技術確立する領域である。本領域では、IPプロトコルを完全に置き換えるクリーンスレートアプローチに固執することなく、現在のさまざまな通信技術と融合して問題解決を行う次世代のネットワークアーキテクチャ技術を俯瞰する。

(2) キーワード

情報指向ネットワーク (ICN)、コンテンツ指向ネットワーク (CCN)、NDN、ネットワークコンピューティング、分散型台帳技術 (DLT)、ブロックチェーン、New IP、Extensible Internet (EI)

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

Beyond 5Gの到来に向け、大容量のデータを迅速にヒトやモノへ提供するだけでなく、人工知能 (AI) や機械学習機能を用いて解析したデータを最適な情報として人間やロボット、センサーなどへ情報提供するとともに、それらの自動制御や通知を可能とする高度なネットワークの実現が要求されている。

現在のインターネットサービスはクラウドコンピューティングを中心に構成されており、ユーザー環境 (デバイスや場所) に依存せず、クラウド上にあるデータを一元的に扱うサービスの提供を行う。しかし、従来のインターネットでは、クラウド経由で行われるデータ転送の遅延 (レイテンシー) や、エネルギー効率の悪さなどの問題が顕著となってきた。これに対し、データをエンドユーザー近隣に配置したサーバーにて処理し、そのサーバー経由で情報提供を行うエッジコンピューティングに注目が集まった (2.6.5 参照)。エッジコンピューティングに代表されるネットワークコンピューティングは、処理の分散化に伴い通信サービスの質を向上させるメリットがあり、通信と計算処理の融合が、将来のネットワークサービスに対して効果を発揮することが期待されている。

エッジコンピューティングを含むネットワークコンピューティングは、世代ごとに進化する無線・モバイル通信の基盤に組み込まれつつあるが、こうしたネットワークに求められる進化を、全て従来のインターネットアーキテクチャに組み込み、取り入れることは難しい。さまざまな通信の制約から解放しつつ柔軟にネットワーク機能を拡張可能とする新たなネットワークアーキテクチャを実現していくことは極めて重要な研究領域である。

[研究開発の動向]

新たなネットワークアーキテクチャとして研究開発が進められている技術の一つに「情報指向ネットワーク技術 (Information-Centric Networking (ICN))」が挙げられる。2010年代以降、ネットワークアーキテクチャの研究として進められてきたICNの概念を簡潔に言うならば、ユーザーが欲するコンテンツがネットワーク上にあるとき、最も近いネットワーク機器からコンテンツを取得することで、従来のIPアドレスベースの通信に対する効率化を図り、エンドユーザーに対する通信パフォーマンスやサーバー資源の利用効率を向上させ、それに伴う通信の省エネルギー化を実現することである。この概念をネットワークアーキテクチャ (もしくはプロトコル) として実現するため、コンテンツを受信したいユーザーは「コンテンツ名」が書かれた要求パケットをネットワークに送出し、これを受信したルーターは、自身が持つキャッシュ領域を調べ、当該コンテンツを保有していればそれを返す。もし保有していなければ、コンテンツ所有者に向けて上流のルーターに要求パケットを転送する。これを繰り返すことで、ネットワーク内の近隣ルーターからコンテンツ取得が可能となる。

ICN研究は、2009年に発表された論文¹⁾と、そこで参照されたランニングコード (動く実装) の公開をき

かけとし、それ以降、国際的に大規模な研究プロジェクトが複数立ち上がった。米国 NSF ファンドによる Named-Data Networking (NDN) プロジェクト²⁾ は、世界最大の ICN アーキテクチャの研究開発を行っているプロジェクトであり、2010 年以降、現在も活発に研究開発を行っている。NDN プロジェクトの中で、米国 PARC Inc. が主導した Content-Centric Networking (CCNx) と、UCLA が主導した NDN の異なる実装提案がされた。現在、前者は PARC の保有していた CCN 関連の知的所有権を買収した Cisco Systems, Inc. により Linux Foundation 配下の FD.IO プロジェクトの中で Community ICN (CICN)³⁾ と呼ばれる実装に併合され、後者は NDN プロジェクトにて継続的に開発が行われている。欧州では、2010 年以降、欧州委員会 (European Commission (EC)) FP7 のプロジェクトの中で、SAIL/NetInf⁴⁾、PURSUIT などの ICN アーキテクチャが提案された。しかしこれらはプロジェクトの終了と共に開発も終了し、現在は欧州においても CCNx もしくは NDN をベースとした研究活動が中心となっている。わが国においては、EC Horizon2020 と共同で、GreenICN プロジェクト⁵⁾ (2013 年—2016 年)、ICN2020 プロジェクト⁶⁾ (2016 年—2019 年) が立ち上がり、それぞれ ICN の特長を生かした CCNx/NDN ベースのアプリケーション開発や、広域テストベッドでの評価などが行われた。また 2015 年には、電子情報通信学会において、情報指向ネットワーク技術時限研究専門委員会 (現在は特別研究専門委員会)⁷⁾ が設立され、国内の産学官による ICN 研究が推進されることとなった。

ICN の社会実装を進めるに当たり、2012 年には、国際標準化団体 IETF の姉妹組織である IRTF 配下に ICN リサーチグループ⁸⁾ が設置され、2019 年に CCNx バージョン 1 のメッセージフォーマットが RFC (プロトコル仕様)^{9), 10)} として規定された。また、Cisco Systems は、IP ネットワークにおける ICN 技術のシームレスな技術連携を目的として、Segment Routing for IPv6 (SRv6)¹¹⁾ との融合を想定した Hybrid ICN (hICN) と呼ばれる提案¹²⁾ を行い、現在、開発の主体を CICN から hICN へと移行している。

インターネット関連技術の研究の促進と研究成果を社会展開するためには、理論だけでなく、参照実装などを用いた研究と現実環境における評価が求められる。ICN 研究では、現在は米国 UCLA を中心として開発が行われている NDN が参照実装として広く使われており、多くの ICN 研究が NDN を用いて評価を行っている。また、CICN では、Cisco System が製品化を想定した開発を継続しており、将来のホワイトボックスルーターなどの柔軟性ある基幹ルーターへの導入が期待されている。これらに加え、日本国内では、情報通信研究機構によって設計と開発が進められている日本発の ICN 概念実装「Cefore^{13), 14)}」が公開されている。Cefore は CCNx バージョン 1 の RFC 仕様に準拠したオープンソースのネットワークソフトウェアプラットフォームであり、軽量のセンサーノードから PC ルーターまで、さまざまな環境や用途での利用を想定している¹⁵⁾。電子情報通信学会⁷⁾ や国際学会¹⁶⁾ において Cefore に関するチュートリアルやワークショップも開催されており、技術普及に向けた取り組みも行われている。拡張性を考慮したソースコードは改変も自由に行え、商用においても利用可能な BSD3-clause ライセンスとなっている。

(4) 注目動向

New IP

ICN とは異なる次世代のインターネットアーキテクチャとして、中国は標準化団体の ITU-T に New IP¹⁷⁾ を提案した。New IP は、IoT や衛星通信のようなさまざまな通信環境における多様な通信サービスに対応するため、IP パケットに「コントラクト」のような情報を指定できる特殊なヘッダを挿入し、通信サービスの優先度を制御し、必要に応じてより高速な通信サービスを提供可能とすることを目的としている。New IP は IP アドレスを可変長とし、拡張可能とする仕様を含んでおり、現在のインターネットの上位互換性を目指している。New IP の提案自体は、現在のインターネットサービスを分断する可能性や、インターネットの自由度を阻害すると言った多くの反対意見が提出され、標準化には至っていない。しかし、現在も国際学会でのワークショップ開催などを行いながらロビー活動を実施しており、技術提案に向けた活動を継続している。

Extensible Internet

米国では、既存のIPネットワークと融合しつつ、新しいサービスを実現するExtensible Internet (EI)^{18), 19)} が提案され、研究開発が進められている。2.6.5で述べた通り、近年のインターネットのPrivatizationによって、自営網（プライベートネットワーク）に洗練された機能が実装されつつあり、パブリックインターネットとプライベートネットワークの間に機能格差が生じている。EIは、このPrivatizationの動向に対応し、単純なベストエフォート型のパケット配送を超えるネットワーク機能をサポートする拡張可能な（Extensibleな）インターネットの実現を目指している。EIでは、OSI参照モデルにおける、いわゆる「3.5層」として「サービスレイヤ」をレイヤ3（ネットワークレイヤ）上に追加し、これを理解できるエッジネットワーク上のサーバーである「サービスノード」を経由することで、クラウドへの直接の依存性を軽減し、新たな機能をネットワークに容易に追加可能とする。EIは、ICNとの親和性も高く、EI論文¹⁸⁾の中では、将来的なICN連携に関して示唆されている。現時点でEIの成否に関して判断するのは時期尚早であるが、米国の著名な大学や研究者がこの概念に対する研究を先導しており、またNSFのサポートに加え、ベンチャーなどが育つ環境が整っている米国の提案であることから、その動向を注視していく必要がある。2022年現在、EIは研究者が構築するプロトタイプとその早期適用が計画されている段階にある。

DLT (Distributed Ledger Technology)

ブロックチェーンに代表されるDLT (Distributed Ledger Technology) は既に仮想通貨基盤として普及しているが、仮想通貨基盤のみならず、サーバーやクラウドなどの中央管理システムやプロバイダーなどの中央管理機関に依存しないコンセンサスアルゴリズムによる情報管理基盤として、次世代ネットワークアーキテクチャの一部に活用されることが期待されている¹⁾。DLTは中央集権型の信頼できる第三者（オーソリティー）へ依存することなく、分散システムが合意形成することを可能とする。このDLTの特長を生かすことで、特定の企業が、通信基盤からエンドユーザー個人の行動履歴や検索履歴を収集し、その情報を基にインターネット市場をコントロールするといった「ガバナンス（情報統治）」の問題から解放され、現行のインターネットが抱えるプライバシー侵害や勝者総取りのリスクを低減させることが期待されている。ブロックチェーン/DLTの研究分野では、新しいアルゴリズムの基礎研究のフェーズから、応用研究や開発フェーズへの移行が進んでおり、企業やオープンソースコミュニティが複数の実装展開を行うと共に、企業や投資家からのファンディングも積極的に行われている。国家レベルのユニークな試みとして、欧州委員会（EC）において、ブロックチェーン/DLT応用研究を大型研究プロジェクト²⁰⁾として推進する動きや、ブロックチェーンネットワーク基盤（European Blockchain Services Infrastructure (EBSI)）構築に向けた動きもある。関連して、IETF姉妹組織のIRTF Decentralized Internet Infrastructure Research Group (DINRG)²¹⁾が国際標準化活動を進めている。

Trusted Web

ブロックチェーン等の関連技術を用いたプラットフォームに関する国内の活動として、内閣官房を中心に、信頼できる自由なデータ流通（DFFT：Data Free Flow with Trust）を確保する枠組みを構築すべく、特定のサービスに依存せずに、個人・法人によるデータのコントロールを強化する仕組み、やり取りするデータや相手方を検証できる仕組みなどの新たな信頼の枠組みを付加することを目指す「Trusted Web」構想²²⁾が提言されている。Trusted Webは、その名前に「Web」とあるが、現行のウェブシステムを継承することを

1 DLTに加え、非中央集権型のシステムとしてWeb 3.0と呼ばれる言葉を目にする機会が増えた。しかし、現時点でWeb 3.0の正確な定義は曖昧である上に、明確な技術を指すものではないため、本報告書では「DLTと協調・連携する次世代のネットワークアーキテクチャ」と「Web 3.0」の比較や差異については議論せず、前者に関してのみ述べる。

目的としておらず、通信基盤としてグローバルかつ技術中立的に機能が提供されるフレームワークとなることを目指している。Trusted Webでは、中央集権化したWebを再分散することを目的に、特にGoogle (chrome)、Apple (safari) といった企業によるWebブラウザの寡占を是正し、Webシステムの問題をHTTPに依存しない形で解決していくことを目標としている。アプリケーションのガバナンスは各国ないしは各事業者（アプリケーション提供者）の構造を尊重するとしている。

ICN 関連の注目動向

ICN 研究が始まった当初は、既存のインターネットプロトコルを置き換えるためのクリーンスレート・アプローチを前提とした研究が多かったが、近年は、IP通信と協調してICNをオーバーレイネットワーク上で用いる（CCNxもしくはNDNメッセージをTCP/IPペイロードに入れて送受信する）研究が主流となり、超低遅延・超高品質な通信サービスを実現するためのネットワークアーキテクチャ、もしくはアンカーレスのモバイル通信や遅延耐性ネットワークのためのネットワークアーキテクチャ²³⁾などの研究がトレンドとなっている。ICNはネットワーク内キャッシュとデータ転送を融合した効率的かつ汎用的なネットワークアーキテクチャであるため、多様なアプリケーションに対し、またIoTやセンサーネットワーク、エッジコンピューティングなどさまざまなネットワーク技術と融合して効果を発揮する。このため、現在のICN研究は、世界中で研究競争が始まった全盛期（2010年代後半）に行われたネットワーク内キャッシュや帯域制御などのアルゴリズム研究などの基礎研究は一段落し（継続的に大型ファンドの支援がある米国NDNプロジェクトを除く）、ICNを用いたネットワークコンピューティング²⁴⁾などの研究領域、分散台帳技術やSDN/NFVとのアーキテクチャ融合^{25)、26)}、コネクテッドカーやスマートシティ、メタバースなどの新しいサービス/アプリケーションに適用する応用研究、さらには、量子鍵配送ネットワーク（QKDN）などの未来ネットワークとの融合など、新たな方向性に対する研究や開発が盛んになっている。

(5) 科学技術的課題

ICN 応用研究

ICN については、これまでにさまざまな優れた研究成果が発表されているが、ルーターのスケラビリティ、コンテンツキャッシュなど、今後の応用研究の中で実装と共に検証が求められる課題は数多い。また、複数のユーザーにコンテンツを同時転送するマルチキャストを容易に実現可能なICNの特長を生かすことで、高品質なマルチキャストストリーミング等の従来のネットワークアーキテクチャでは困難な通信制御技術を提供できる可能性があり、今後の新たな研究成果が期待される。

名前管理

ICN 等では「情報識別子」もしくは「コンテンツ名」を宛先とすることができるが、人が理解できる（覚えやすい）識別子をどのようにしてグローバル・ユニークに（世界でただひとつとなるよう）定義するかが課題となる。分散環境で安全に人が理解できる識別子を利用可能とするシステムの実現は、最適な実現が困難な技術課題である。この課題を回避する一つの方法は、ネットワークサービスとしての適用範囲（スコープあるいは名前空間と呼ばれる）を決め、その範囲内で一意な識別子を用いることとし、識別子自体はグローバル・ユニークなくとも運用可能とする方法である。一方、グローバル・ユニークな名前を中央集権的なサーバーに依存せずに決定する方法として、ブロックチェーンを用いる方法が近年いくつか提案されている^{27)、28)}。ただし、既存の方法は、トランザクションの確定に時間がかかるため、識別子の決定に遅延が生じる課題がある。効率的かつ安全な識別子管理（名前管理）システムの構成方法については、今後も引き続き議論や研究が行なわれていくべきものと考えられる。

セキュリティ・プライバシー機能のネットワークアーキテクチャへの組み込み

従来のインターネットで個別に行なわれてきたセキュリティやプライバシーの対策を、次世代のネットワークアーキテクチャにいかに関通機能として組み込むかも今後の技術課題の一つである。オープン環境においてネットワークコンピューティングによって処理が実行される場合、攻撃者が管理するサーバー等によって不正な処理が行われないことを保証する仕組みも必要となる。前述のEIでは、オープン環境でサービスノードが正しく処理を実行したかどうかを検証できるよう、セキュアエンクレープ (Intel社のSGX等) を用いたサービスノードの設計が検討されている²⁹⁾。また、EIを用いて、DNSの通信パターンを特定の事業者等が収集できないようにするプライバシー保護機能の研究も進んでいる³⁰⁾。こうしたセキュリティ・プライバシー制御は通信性能とトレードオフがあり、ネットワークアーキテクチャとしての効率的な実現方法の研究開発は今後も進められるべきであろう。

(6) その他の課題

ソフトウェア開発の人材育成

日本は家電や特定のデバイスなどのハードウェア技術開発に強みを持った技術大国であった。しかし、米国がICT (情報通信技術) 革命によってその存在感を増したのに対し、わが国はICT分野においては大きく乗り遅れてしまった。特に近年、ネットワークアーキテクチャの進化が、仮想化によるネットワーク機能のソフトウェア化と同調し、新しい機能やサービスをソフトウェアにて柔軟かつ迅速に実装する環境にわが国は適応できず、次世代のネットワークアーキテクチャ研究に対する存在感もますます低下している。一方、ICTのさらなる進化においてソフトウェア化の流れを止めることはできず、むしろ増長していくと考えられる。また、旧来のハードウェア技術においても、新興国が高品質の製品を低コストで提供できるようになった現在、ハードウェア中心の開発でICTをけん引できるほどの優位性は無く、現状を打破することは困難である。次世代のネットワークアーキテクチャを先導するため、活発な研究開発に向けた機会の創設と投資の促進を行い、特にソフトウェア開発を促進するため、人材育成や人材確保を強く推進していくことが喫緊の課題である。

分散型・非集中型のネットワークアーキテクチャ

現在、Hyper-Giantsが勢力拡大をし続けている中央管理型のシステムに対し、技術的、および、ガバナンスなどの懸念が生じている。これに対し、ICNやDLTといった分散型・非集中型のネットワークアーキテクチャは、技術的、ガバナンス、双方に対して問題解決に結び付く可能性があり、当該技術に対する研究開発はICT革命の後塵を拝した日本にとって、起死回生のチャンスになるかもしれない。もちろん、GoogleやAmazon、Microsoftなどは、クラウドと連携するエッジコンピューティングの開発やクラウドネイティブな仮想化技術の研究開発において既に世界のトップを走っており、彼ら次第で新しいネットワークアーキテクチャが作り上げられていくといった今の潮流を変えることは困難であろう。しかし、情報統制の危険性を排除し、情報の分散配信を可能にしながら、情報の真正性や信頼性を確保していく仕組みとして、ICNやDLTが稼働するオーバーレイネットワーク基盤を用いた次世代のネットワークアーキテクチャを研究開発し、これによって、ユーザーアプリケーションの通信品質やセキュリティ/プライバシー/ポリシーを統治するガバナンスの問題解決ができれば、新しい技術やビジネス展開に向けたきっかけを与えることになる。

(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	△	↘	研究費、人材の減少が響き、最難関学会での採録数も低い。現在普及しているクラウドやインターネットアーキテクチャの基礎研究に対する存在感は低く、それは次世代のネットワークアーキテクチャの基礎研究においても同様。
	応用研究・開発	○	→	ICN 研究においては、オープンソース開発や国内外学会での普及活動、国際標準化活動を行っているが、社会実装には至っていない。データの信頼性に主眼を置いた新しいネットワークアーキテクチャ(TrustedWeb)の設計を行っているが、現時点では実現性は不明。
米国	基礎研究	○	→	ICN、Extensible Internetを含め、多岐に亘り優位性を保っている。難関国際学会への採録も多い。NSFからの大型ファンドも継続して行われている。しかし、ネットワークアーキテクチャに関する研究は、Extensible Internetを除けば、現在のデータセンターが抱える課題やデータプレーンに関する直近のテーマが多い。
	応用研究・開発	○	→	Cisco SystemsやGAFに加え、ベンチャーも参入する環境が整っており、世界をけん引している。ただし、次世代ネットワークアーキテクチャに関しては、製品化が進むほどの勢いは見えない。
欧州	基礎研究	△	→	ドイツ、スイス、イギリスを中心にICN 研究は継続して行われているが下降傾向。次世代インターネット技術研究も顕著な成果は出ていない(基礎研究に関しては、量子ネットワークなど、数十年先の将来ネットワーク研究が盛ん。そちらへシフトしつつあるか?)
	応用研究・開発	○	→	HorizonなどのECプロジェクトにより、産学連合による次世代ネットワークアーキテクチャを設計・開発する動きはあるが、まだ成果は出ていない。ブロックチェーン/DLT 応用研究は欧州大型プロジェクトとして推進する動きあり。
中国	基礎研究	○	↗	大学が中心となって基礎研究において多く成果を挙げている。難関国際会議への採録も米国に次いで多い。BaiduやAlibabaなどの中国企業に加え、Microsoft Research Asiaなど、GAFに対抗した研究ができる唯一の国。
	応用研究・開発	○	→	ICNの製品化等の動きは見られない。ブロックチェーン/DLT 研究は盛んであるが、New IPの標準化提案が失敗に終わり、海外の中国系コミュニティを中心に、関連技術に関する国際学会ワークショップを開催するなどして次の動きを模索していると考えられる。
韓国	基礎研究	△	↘	研究機関を中心に論文や国際標準化などを行っているが、顕著な成果は見られない。ICN 基礎研究は下降気味。ブロックチェーン研究は継続されているようであるが、フラッグシップカンファレンスなどの採択は少ない。
	応用研究・開発	△	↘	ブロックチェーン/DLT 技術に対する注目度は高いが、ファイナンスへの適用としてのブロックチェーン/DLT 普及が議論の主となっており、次世代ネットワークアーキテクチャとしての活用などの議論は進んでいないように見える。

2.6
俯瞰区分と研究開発領域
通信・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範囲

応用研究・開発フェーズ：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) Van Jacobson, et al., “Networking named content,” in *Proceedings of the 5th international conference on Emerging networking experiments and technologies (CoNEXT)* (New York: Association for Computing Machinery, 2009), 1-12., <https://doi.org/10.1145/1658939.1658941>.
- 2) Named-Data Networking, <https://named-data.net>, (2023年2月27日アクセス) .
- 3) FD.io, “Community Information-centric networking (CICN),” <https://wiki.fd.io/view/Cicn>, (2023年2月27日アクセス) .
- 4) Scalable and Adaptive Internet Solutions (SAIL), <https://www.sail-project.eu>, (2023年2月27日アクセス) .
- 5) GreenICN, <http://www.greenicn.org>, (2023年2月27日アクセス) .
- 6) ICN2020, <http://www.icn2020.org>, (2023年2月27日アクセス) .
- 7) 電子情報通信学会情報指向ネットワーク技術特別研究専門委員会 (ICN研究会) , <https://www.ieice.org/cs/icn/>, (2023年2月27日アクセス) .
- 8) Internet Research Task Force (IRTF), “Information-Centric Networking Research Group,” <https://irtf.org/icnrg>, (2023年2月27日アクセス) .
- 9) Marc Mosko, Ignacio Solis and Christopher A. Wood, “Content-Centric Networking (CCNx) Messages in TLV Format,” Internet Research Task Force (IRTF), RFC 8609, <https://www.ietf.org/rfc/rfc8609.html> (2023年2月27日アクセス) .
- 10) Marc Mosko, Ignacio Solis and Christopher A. Wood, “Content-Centric Networking (CCNx) Semantics,” Internet Research Task Force (IRTF), RFC 8569, <https://www.ietf.org/rfc/rfc8569.html>, (2023年2月27日アクセス) .
- 11) Clarence Filsfils, et al., “Segment Routing Architecture,” Internet Engineering Task Force (IETF), : RFC 8402, <https://www.ietf.org/rfc/rfc8402.html>, (2023年2月27日アクセス) .
- 12) Miya Kohno 「Data Intensive Architectureへ : hICN (9 November 2020) 」 MPLS Japan 2022, https://mpls.jp/2020/presentations/MK_Data-intensive_hicn.pdf, (2023年2月27日アクセス) .
- 13) Cefore, <https://cefore.net/>, (2023年2月27日アクセス) .
- 14) Hitoshi Asaeda, et al., “Cefore: Software Platform Enabling Content-Centric Networking and Beyond,” *IEICE Transaction on Communications* E102-B, no. 9 (2019) : 1792-1803., <https://doi.org/10.1587/transcom.2018E110001>.
- 15) 朝枝仁「情報指向ネットワークの最新動向(2):オープンソースCeforeがもたらす新しいネットワークサービスの可能性」『電子情報通信学会誌』104巻4号(2021):346-353.
- 16) Yusaku Hayamizu, et al. “Half-day Tutorial: CCNx-based Cloud-Native Function: Networking and Applications,” 9th ACM Conference on Information-Centric Networking (ICN 2022), 19-21 September 2022, <https://conferences2.sigcomm.org/acm-icn/2022/tutorial-cefore.html>, (2023年2月27日アクセス) .
- 17) Future Networks Team, Huawei Technologies, “Internet 2030: Towards a New Internet for the Year 2030 and Beyond,” International Telecommunication Union (ITU), https://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/2017-2020/13/Documents/Internet_2030%20.pdf, (2023年2月27日アクセス) .
- 18) Hari Balakrishnan, et al., “Revitalizing the public internet by making it extensible,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 51, no. 2 (2021) : 18-24., <https://doi.org/10.1145/3464994.3464998>.

- 19) International Computer Science Institute (ICSI), “Extensible Internet,” <https://www.icsi.berkeley.edu/icsi/groups/extensible-internet/>, (2023年2月27日アクセス) .
- 20) European Commission, “EU-Funded Projects in Blockchain Technology,” <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/eu-funded-projects-blockchain-technology/>, (2023年2月27日アクセス) .
- 21) Internet Engineering Task Force (IETF), “Decentralized Internet Infrastructure (dinrg),” <https://datatracker.ietf.org/rg/dinrg/about/>, (2023年2月27日アクセス) .
- 22) 首相官邸「デジタル市場競争本部：Trusted Web 推進協議会」 https://www.kantei.go.jp/jp/singi/digitalmarket/trusted_web/index.html, (2023年2月27日アクセス) .
- 23) Muktadir Chowdhury, Junaid Ahmed Khan and Lan Wang “Leveraging Content Connectivity and Location Awareness for Adaptive Forwarding in NDN-based Mobile Ad Hoc Networks,” in *Proceedings of the 7th ACM Conference on Information-Centric Networking (ICN)* (New York: Association for Computing Machinery, 2020), 59-69., <https://doi.org/10.1145/3405656.3418713>.
- 24) Uthra Ambalavanan, et al., “DICer: distributed coordination for in-network computations,” in *Proceedings of the 9th ACM Conference on Information-Centric Networking (ICN)* (New York: Association for Computing Machinery, 2022), 45-55., <https://doi.org/10.1145/3517212.3558084>.
- 25) Ruidong Li and Hitoshi Asaeda, “A Blockchain-Based Data Life Cycle Protection Framework for Information-Centric Network,” *IEEE Communications Magazine* 57, no. 6 (2019) : 20-25., <https://doi.org/10.1109/MCOM.2019.1800718>.
- 26) Hiroaki Yamanaka, et al., “User-centric In-network Caching Mechanism for Off-chain Storage with Blockchain,” in *Proceedings of ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications* (IEEE, 2022), 1076-1081., <https://doi.org/10.1109/ICC45855.2022.9838289>.
- 27) Nick Johnson, “ERC-137: Ethereum Domain Name Service - Specification,” Ethereum Improvement Proposals, <https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-137>, (2023年2月27日アクセス).
- 28) Muneeb Ali, et al., “Blockstack: A Global Naming and Storage System Secured by Blockchains,” in *Proceedings of the 2016 USENIX Annual Technical Conference (USENIX ATC '16)* (USENIX Association, 2016), 181-194.
- 29) Scott Shenker, “Creating an Extensible Internet,” APNIC, <https://blog.apnic.net/2022/04/14/creating-an-extensible-internet/>, (2023年2月27日アクセス) .
- 30) William Lin, “Enhancing Privacy and Security on the Extensible Internet, May 12, 2022,” Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California, Berkeley, <http://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2022/EECS-2022-75.pdf>, (2023年2月27日アクセス).