

情報指向ネットワークがもたらす可能性と研究課題

朝枝 仁

「情報指向(またはコンテンツ指向)ネットワーク: Information/Content-Centric Networking (ICN/CCN)」は、コンテンツ名を通信の識別子として利用することで所望のコンテンツを近隣ルーターや近隣ノードから直接取得し、迅速かつ効率的な情報提供を可能とする新世代ネットワーク技術の1つである。本稿では、ICNがもたらす可能性と、我々が行っているICN研究内容を紹介する。

1 まえがき

音楽や動画などの大容量コンテンツの流通が大半を占める現在のインターネットにおいて、タブレットやスマートフォンなどの高性能な移動体端末やSNS(ソーシャルネットワーキングサービス)などのユーザー主体の情報発信サービスの普及は、インターネット通信量の増加に拍車をかけている。ところがこのような新しいタイプの端末やサービスにおいても、通信手段は従来からのファイル転送(FTP)やメール送受信などと同じ手順、つまり、まず名前解決サーバー(DNS)を用いて通信相手となるサーバーの場所(IPアドレス)を検索し、そのIPアドレスを持つサーバーにアクセスし、そこからコンテンツを取得するという一連の作業が行われる。しかし、コンテンツを取得することが目的であるサービスにおいて、ユーザーが常に(遠方にあるかもしれない)サーバーへのアクセスを要求されることは本質的ではない。もし近くにあるルーターなどの通信機器が当該コンテンツを持っており、そこからコンテンツを取得することができるならば、それはより効率的で、そして将来の通信量の増大にも対応できる通信技術になると考えられる。

このような発想から生まれた新世代ネットワーク技術が「情報指向(またはコンテンツ指向)ネットワーク: Information/Content-Centric Networking (ICN/CCN) (以下、ICN)^{[1][3]}」と呼ばれる技術である。ICNでは、ユーザーはサーバーのIPアドレスではなくコンテンツ名を指定してコンテンツ取得を行う。この際、受信者の近隣にあるルーターなどのノードが当該コンテンツもしくはキャッシュを保持していた場合、それらのノードは受信者に直接コンテンツの転送を行う。これにより、サーバーの状態などに依存せず、ユーザーに対して迅速な情報提供が可能となり、サーバーやネットワーク資源の有効活用も可能となる。しかし送受信者のIPアドレスに依存しないICNという新しい

通信アーキテクチャーの実現には、これまでのIPアドレスベースの通信技術とは異なる様々な研究開発が要求される。

ICNは新世代ネットワーク技術として注目を浴びている通信アーキテクチャーであり、海外だけでなく、国内でも学会活動^[4]を含め、その研究活動が盛んに行われている。本稿では、ICNがもたらす可能性と、ICNの実現に不可欠なくつかの研究課題^[5]、そしてNICTが取り組む研究テーマについて述べる。

2 コンテンツ名と通信識別子

IPアドレスを宛先として通信を行うIP通信とは異なり、ICNでは「コンテンツ名」を宛先とした「コンテンツ要求パケット」を通信に用いる。コンテンツ要求パケットを受け取ったルーターは、もし自身がそのコンテンツを保持(キャッシュ)しているならばそれを受信者に返送し、キャッシュしていなければ、更に通信経路の上流ルーター、あるいはキャッシュしているであろう近隣のルーターにコンテンツ要求パケットを転送する。その結果、従来のIPアドレスベースの通信よりも応答時間を短縮できるようになる。また、通信量の削減によるネットワーク使用効率の向上やサーバー資源の節約も期待できる(図1)。

ここで、コンテンツ名を用いた通信を行うためには、受信者が指定するコンテンツ名と、送信者もしくはデータを転送するルーターなどのネットワーク機器が識別するコンテンツ名は同一のものを示さなければならない。つまり、ICNの実現においてコンテンツ名はネットワーク内で唯一の識別子となることが保証されなければならない。インターネット上のIP通信では、端末間の通信はIANA(ICANN)^[6]が管理する双方のグローバルユニークなIPアドレス(もしくはNetwork Address Translation(NAT)^[7]を行うゲートウェイのグローバルユニークなIPアドレス)を用い

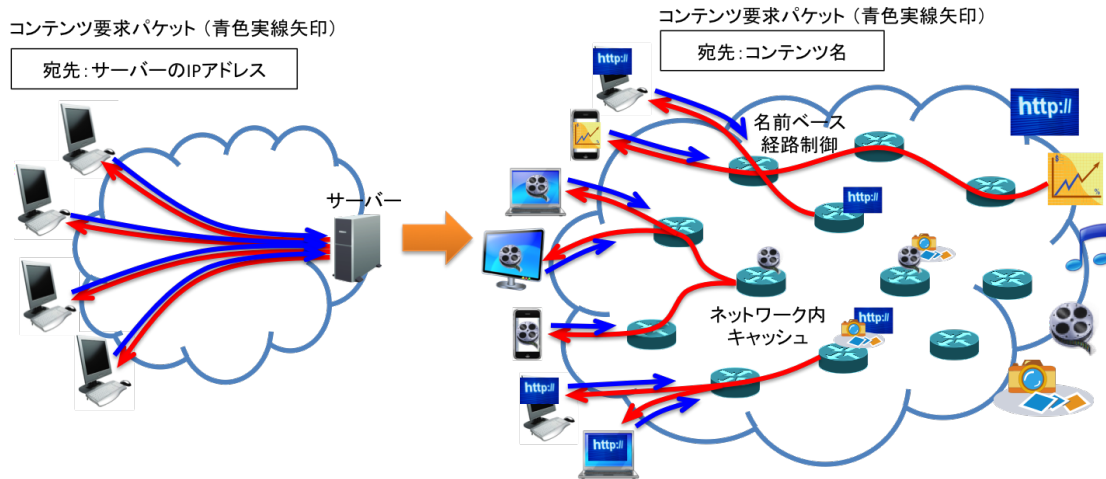


図1 IPアドレスベースの通信からコンテンツ名ベースの情報指向ネットワーク通信へ

ることでこれが保証されたが、現在のインターネットではコンテンツの名前は任意で決められるため、通信の識別子としてコンテンツ名を用いるためにはコンテンツ名を決定する方法(以下、Naming と呼ぶ)をネットワーク内で統一することが必要となる。このような背景において、ICN 研究における Naming に対する議論は大きく以下の2通りの考えに沿って行われている。

まず1つは、現在のインターネットで流通している識別子、例えばウェブなどが用いる URL もしくはそれに類似する識別子をコンテンツ名に代用するという考えである。例えば CCN^[1] / NDN^[2] などが提案するコンテンツの名前は /example.com/news/today/video.mpg/_v<timestamp>/_segnum のように表現され、“/” で区切られたプレフィックスに対する経路を各ルーターが持つことで、コンテンツを保持(キャッシュ)する経路上のルーターなどからコンテンツ取得が可能となる。このプレフィックスでは、URL に似た名前構造、つまり現在のインターネットで用いられているドメイン名などを含むことで、コンテンツの一意性(ユニークネス)を定義しやすいというメリットがある。逆に、ドメイン名を含むことで引き起こされる問題、例えば移動体通信環境において、コンテンツオーナーが移動することで、コンテンツを送信するネットワーク、つまりコンテンツオーナーのドメイン名が変わるとコンテンツ名も変わってしまうため、受信者はコンテンツ名を変更して再度受信要求しなければならないといった問題が生じる。また、ドメイン名以下の名前においては、その正当性を保証することが困難であるため、例えば、/example.com/alice/sport/video.mpg というコンテンツ名だけでは、それがどの Alice のコンテンツなのか、本当に Alice のコンテンツなのか、誰が生成したビデオコンテンツなの

かなどを保証もしくは判断することは不可能である。

一方、[3] のように、通信アーキテクチャーの一部に独自の Naming 技術を含んだ ICN 研究も存在する。[3] では、部分的に意味のある名前の結合、例えば、「A 会社」「B 課」「2015.10.1」「会議資料 .pdf」のような複数の情報とコンテンツオーナーの公開鍵ハッシュ値を結合させ、その文字列をコンテンツオーナーの秘密鍵で署名(この手法を「自己署名証明 (Self-signed certificate)」と呼ぶ)したものをコンテンツの名前として扱う。この例の場合、「A 会社」が「A 会社本部」のように異なったり、あるいは「B 課」と「2015.10.1」の順番が変わった場合、異なるコンテンツ名が生成される。また「自己署名証明」により、コンテンツ名にコンテンツオーナーの署名が行われるため、コンテンツ名からその正当性を判断することが可能となる。しかしこの Naming では、URL のような階層的な構造とは異なるフラットな名前空間により決定されるコンテンツ名と、通信経路もしくはネットワークトポロジーとの間にあるべき依存性が失われてしまう。このため、[3] で定義されている「トポロジーマネージャー」などの新たな仕組み(コンテンツ送受信者が属するネットワークトポロジーを構成・管理し、コンテンツ名とネットワークトポロジーを結び付ける機能)を実装する必要があり、この複雑な機能要件は技術展開の障壁になる。また、「自己署名証明」により生成されたバイナリデータとしてのコンテンツ名は可読性(Human readable)が無いため、ユーザーにとって馴染みにくいという一面もある。

これらの研究同様、ICN 研究における Naming に関して様々な研究^{[8][9]}などが行われてきたが、我々はコンテンツ名の一意性を保証するネットワークやサービスの範囲、つまり通信の対象となる「スコープ」を決定することが Naming の重要な鍵になると考えてい

る。例えば、ある倉庫にあるセンサーが発生する情報や、家族内で共有するビデオコンテンツなど、インターネットとは異なる、あるいはインターネットから分離されているネットワークに存在する情報／コンテンツ、もしくは特定のアプリケーションやサービスで扱われるコンテンツにおいては、そのネットワークやアプリケーション内で一意性が保たれれば良い。逆に、インターネット上で扱われるコンテンツはグローバルな情報として一意性を保証する識別子を用いる必要があり、この場合、膨大な量のコンテンツに対する Naming は、上記にある URL に似た名前構造も利用しながら上記にあるような既知の問題を解決していくことが現実的である。

このような視点により、我々は ANBR (Aggregatable Name-Based Routing)^[10] という ICN アーキテクチャーを設計した (図 2 参照)。ANBR ではコンテンツを扱うネットワークを Information Island (IOI) と呼ぶネットワーク、つまり比較的小規模なスコープとして分割し、そのスコープ単位でコンテンツを管理し経路制御する。各 IOI には Forwarding Cachable Node (FCN) と呼ばれるルーターと Aggregate Management Node (AMN) と呼ばれるノードが存在する。IOI 内の全てのコンテンツ名が AMN に登録されることで IOI 内のコンテンツ名の一意性は保証されるため、IOI 内のコンテンツへの経路制御は IOI 内にある FCN で行われる。また全ての AMN は Management Plane と呼ばれるオーバーレイ網により接続される。これにより、別の IOI にあるコンテンツ、つまり IOI をまたぐ広域ネットワークに対する通信においては、ユーザーは AMBR で割り当てられた IOI 名を加えたコンテンツ名を指定することで、コンテンツ要求が自身の IOI にある AMN を経由して当該 IOI に転送され、通信経路が形成される。

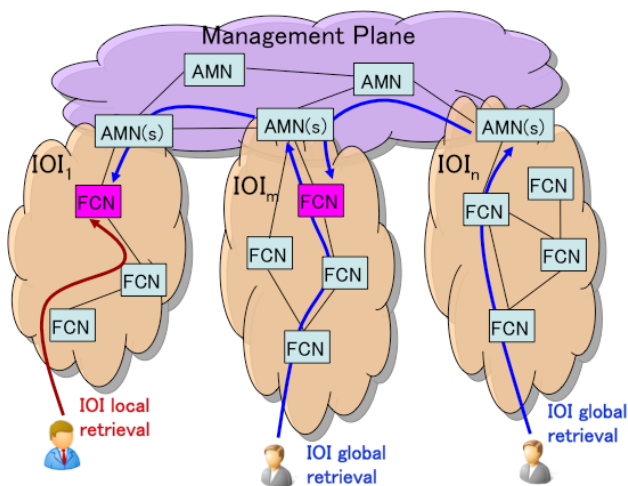


図 2 ANBR (Aggregatable Name-Based Routing) の概念

上記の研究に加え、特にグローバルなコンテンツ名情報の管理も可能とする名前解決システム (Name Resolution System (NRS)) の研究も行っている。NRS はインターネットにおける Domain Name System (DNS) に類似する実装であり、我々が提案する ICN における NRS の実装モデルは分散ハッシュテーブル (Distributed Hash Table (DHT)) の概念をベースとして設計を行っている。ここで得られる成果は ANBR の Management Plane の実装にも応用が可能になると考えている。NRS 研究に関しての詳細は 6-2 をご参照いただきたい。

3 ネットワーク内キャッシュと名前ベース経路制御

ICN では、ネットワーク内にあるルーターが自律分散的にコンテンツを保持 (キャッシュ) し、コンテンツ要求に対してデータ送信を行う「ネットワーク内キャッシュ」をその基本機能として実装する (図 1 参照)。ネットワーク内キャッシュの仕組みとして、どのルーターがコンテンツをキャッシュすべきか、どのようなコンテンツをどれくらいの期間キャッシュすべきかなどを判断してその機能を最適化することが求められる。また、ICN ではコンテンツ名を用いた「名前ベース経路制御」を行うため、ルーターはコンテンツ要求パケットに指定されたコンテンツ名を判別し、それに応じて上流ルーターへ要求パケットを転送する。この際、ネットワーク内キャッシュ機能と連携して近隣のキャッシュルーターを探索し、コンテンツの要求パケットをそのキャッシュルーターに誘導し、コンテンツ転送効率を向上させる。アルゴリズムの研究なども盛んに行われている。

上記で説明した AMBR においては、コンテンツは適宜 FCN にキャッシュされ (図 2 における赤色の FCN)、そのキャッシュ情報は当該 IOI にある AMN に記録され、その情報に基づいて AMN はコンテンツ要求を最短経路に誘導するため、ネットワークの使用効率向上と通信遅延の軽減に貢献する。

その他、これまでに行ったネットワーク内キャッシュと経路誘導に関する研究の詳細に関しては 6-4 をご参照いただきたい。

4 ICN テストベッド

通信アーキテクチャーやプロトコルの研究において、設計したアルゴリズムや機能の評価を ns-3^[11] などのシミュレーターや Mini-CCNx^[12] などのエミュレーターを用いて行うことが多い。これらの評価ツ-

ル、特にシミュレーターは、評価環境の構築が容易であるため、プロトコル設計などの研究初期段階において高い効果を発揮する。しかし、インターネットのようなネットワーク資源を様々なユーザーと共有する通信環境では、競合トラフィックが突発的もしくは非定常的に発生するため、シミュレーター評価で得られたパフォーマンスや通信品質が得られないケースが多々存在する。また計算機資源の使用率なども含めて総合的な評価を行うことはシミュレーターやエミュレーターでは不十分である。このため、実稼働するプロトタイプ実装を用い、インターネット上に展開された「広域テストベッド」を構築し、その上でプロトタイプの実装検証と評価を行うことが実用化を目指す研究には欠かせない。

インターネットを用いた代表的な広域テストベッドとして PlanetLab^[13] が存在する。PlanetLab は世界中の 1,000 を超えるサイトにサーバーが分散配置されており、ユーザーはそれらのサーバー資源を共有利用して自らが開発したプログラムを稼働・検証することができる汎用性の高いテストベッドである。しかし PlanetLab を ICN の実装検証に用いるためには、いくつかの課題を克服しなければならない。例えば、現在の IP ネットワークが用いる IP アドレスベースの経路制御とは異なる名前ベースの経路制御を行うため、その検証にはネットワーク層も含めた実験環境の構築が必要となる。しかし、PlanetLab は IP ネットワークのトランスポート層よりも上位のプロトコル評価を前提としており、下位層やその経路制御も含めた評価を行うためには特別なツールや手法を用いて環境構築しなければならない。この環境構築には多大な作業コストがかかる。また、PlanetLab はサーバー資源を多くのユーザーで同時に共有するため、特定のユーザーが高負荷な実験をしていた場合などにパフォーマンス計測や実験に影響を受けてしまうことも多い。さらにネットワーク内キャッシュとしてメモリを用いる ICN 実装 (例えば ICN プロトタイプ実装の 1 つとして有名な CCNx 0.8.2^[14]) では、キャッシュ容量が大きくなるとサーバー資源としてのメモリ使用量が増加し、それがシステム全体のパフォーマンスにも悪影響を与えてしまい、正確な実装検証ができない。

このような背景から、我々は Linux コンテナ (LXC) をノード仮想化技術として用いた ICN 専用のテストベッドを開発した^[15]。テストベッドのノード構成としては、Linux が導入された仮想マシン (VM) を VMware Hypervisor (ESXi) や KVM 上、もしくは Linux で動く VMware Player 上で稼働させ、VM 上に設定された LXC の各コンテナをユーザーに割り当てる仕組みとなっている。この ICN テストベッドは

以下の特徴を持つ。(1) ユーザーはコンテナを仮想的に独立したサーバーマシンとして利用が可能、(2) 各コンテナには独立したローカル IP アドレスが割り当てられており、それぞれのコンテナは外部テストベッドノード上のコンテナとインターネット経由で通信できるように設定されているため、ユーザーは独自の経路制御プロトコルを稼働させることが可能、(3) ユーザーの環境設定に対するコスト軽減を目的とし、コンテナには ICN 実装検証用の共通ソフトウェアやライブラリー、そして独自に開発した Contrace 評価ツール^[16] (下記参照) があらかじめ導入されている、(4) 各コンテナが用いる CPU 資源、メモリ資源などの上限を設定できる資源管理機構の実装により、特定のユーザーが資源を枯渇させることがないだけでなく、計算機資源が空いている場合には、ユーザーが (早い者勝ちで) その上限を引き上げる仕組みも実装されている。

また、この ICN テストベッドでは、CCNx を利用するユーザーに対してメモリ上のキャッシュではなく、ファイルシステム上にキャッシュ領域を確保し、それを単一のユーザーが占有する、もしくは複数のユーザーと共有できる機能を実装している。ここでは、ファイルシステム上キャッシュの先読み機能やデータ転送の並列化処理により、メモリーキャッシュと遜色ないキャッシュ読み出し/書き込みパフォーマンスを実現 (詳細は論文[15]をご参照いただきたい) しており、多数のユーザーが同時に ICN テストベッドを利用できる環境を提供している。

さらに、我々は ICN のプロトコル検証に貢献するための Contrace と呼ぶネットワークツール^[16] も開発し、本 ICN テストベッドに導入している。テストベッドユーザーがコンテンツ名を引数として Contrace コマンドを実行すると、テストベッドノード (コンテナ) に導入されている Contrace デーモンが、当該コンテンツを転送するキャッシュルーターとその通信経路、コンテンツ (またはキャッシュ) 転送パフォーマンス、キャッシュ生存時間やヒット数などを発見・計測し、これらをユーザーに呈示する。Contrace を活用すれば、ユーザーが開発した ICN の経路制御アルゴリズムの評価に加え、最も近隣のキャッシュルーターの発見なども行えるため、他の研究者が開発した実装との比較や IP ネットワークを用いた通信との比較も可能となる。

図 3 にあるように、平成 27 年 6 月 1 日現在、テストベッドサイトは NICT を含む国内外の 14 機関に展開されており、今後の更なるサイト拡大により、ICN 実証実験をより広域で実現できる環境を構築していく計画である。

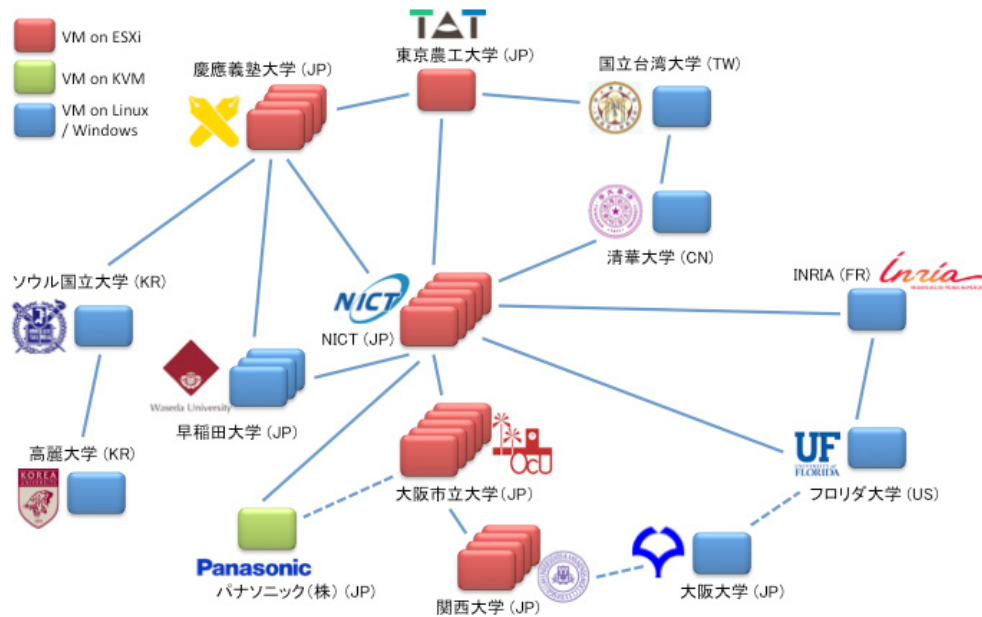
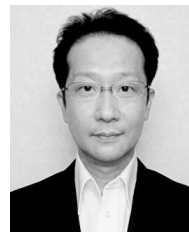


図3 ICN テストベッドの展開 (平成 27 年 6 月 1 日時点) と ICN トポロジーの一例

【参考文献】

- 1 V. Jacobson, D. K. Smetters, J. D. Thornton, M. F. Plass, N. H. Briggs, and R. L. Braynard, "Networking Named Content," Proc. ACM CoNEXT 2009, pp.1–12, Dec. 2009.
- 2 "Named Data Networking," available at: <http://named-data.net/>.
- 3 D. Trossen, M. Sarela, and K. Sollins, "Arguments for an information-centric internetworking architecture", SIGCOMM Comput. Commun. Rev., Vol.40, No.2, pp.26–33, April 2010.
- 4 "電子情報通信学会情報指向ネットワーク技術時限研究専門委員会," available at: <http://www.ieice.org/~icn/>.
- 5 朝枝, "情報指向ネットワーク技術 (ICN) の実現に向けて," 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会 (NS) 招待講演, 2015 年 5 月.
- 6 "IANA – Internet Assigned Numbers Authority", available at: <http://www.iana.org/>.
- 7 K. Egevang and P. Francis, "The IP Network Address Translator (NAT)," IETF RFC 1631, May 1994.
- 8 A. Ghodsi, T. Koponen, J. Rajahalme, S. Sarolahti, and S. Shenker, "Naming in Content-Oriented Architectures," Proc. ACM SIGCOMM ICN WS, Aug. 2011.
- 9 K. Sollins, "Pervasive Persistent Identification for Information Centric Networking," Proc. ACM SIGCOMM ICN Workshop, Aug. 2012.
- 10 R. Li, H. Harai, and H. Asaeda, "An Aggregatable Name-Based Routing for Energy-Efficient Data Sharing in Big Data Era", IEEE Access, Vol.3 2015.
- 11 "Ns-3 network simulator," available at: <https://www.nsnam.org/>.
- 12 C. Cabral, C. E. Rothenberg, and M. Magalhaes, "Mini-CCNx Fast Prototyping for Named Data Networking," Proc. ACM SIGCOMM ICN'13 Workshop, Hong Kong, Aug. 2013.
- 13 "PlanetLab", available at: <http://www.planet-lab.org/>.
- 14 "CCNx implementation", available at: <http://www.ccnx.org/>.
- 15 H. Asaeda, R. Li, and N. Choi, "Container-based Unified Testbed for Information-Centric Networking", IEEE Network, Vol.28, No.6, pp.60–66, Nov. 2014.
- 16 H. Asaeda, K. Matsuzono, and T. Turlitti, "Contrace: A Tool for Measuring and Tracing Content-Centric Networks," IEEE Commun. Mag., Vol.53, No.3, pp.182–188, March 2015.



朝枝 仁 (あさえだ ひとし)

ネットワーク研究本部ネットワークシステム
総合研究室プランニングマネージャー
博士 (政策・メディア)
情報指向ネットワーク