

ICNが切り開く次世代ネットワークアーキテクチャー

Next-generation Network Architecture Led by Information-Centric Networking

● 伊藤 章 ● 福田健一

あらまし

インターネットは設計当初、ホスト間でのデータ送受に焦点が当てられていたが、近年では、次第に動画や音楽など情報の配信・流通システムへと変化してきている。このような流れを受けて、インターネットの新しい利用形態に適した情報中心のネットワーク技術であるICN(Information-Centric Networking)の研究が盛んになってきた。その基本思想は、場所(サーバ)ではなくコンテンツ名によりネットワーク機能が動作し、ユーザーに情報を届けることである。特徴としては、ネットワーク内キャッシングによるデータ取得の効率化、コンテンツの移動に対する呼び出しの簡略化、コンテンツごとのセキュリティ機能の提供などが挙げられる。このアーキテクチャーに従い、プロトコル仕様やオープンソフトウェア開発、プロトタイプシステム開発が大学や企業から発表されている。これらの現状は研究段階であるものの、今後様々な成果が見込まれる。

本稿では、ICNの基本的な考え方、各種ICNアーキテクチャーの特徴、現在の研究動向や各種団体の活動、および米国富士通研究所で実施した研究の概要を紹介する。

Abstract

The Internet was originally aimed at sending and receiving data between host computers. However, developments in recent years have been focusing on using the Internet as a distribution system for information such as video and music data. Given this as a background, there is a growing interest in research on the Information-Centric Networking (ICN), a new networking architecture that caters to the new ways of information-centric Internet usage. The core notion is that the network architecture does not depend on locations (servers), but on the named data, making them directly accessible to users. The notable characteristics include more efficient data access through in-network caching, simplified content request messages for mobility support, and content-specific security functions. Many universities and corporations are utilizing this architecture and reporting their development projects on protocol specifications, open software, prototype systems and so on. Although these are still in the research phase, so much could be achieved in the future. This paper outlines the basic paradigm of ICN and characteristics of various types of ICN architecture. It also describes the current trends in the research and initiatives taken by various organizations, together with descriptions of the research conducted by Fujitsu Laboratories of America.

まえがき

インターネットは、1960年代にアメリカの大学や研究機関の間でパケット通信の実験として開始したARPANETに端を発している。その後徐々に接続ホスト数が増え、現在の大規模システムにまで発展した。本格的に普及したのは1990年代であり、2000年以降も技術的発展、利用シーンの拡大が続いている。近年は、動画や音楽などのコンテンツの流通にもインターネットが幅広く利用されるようになってきている。また、高機能カメラや通信機能の備わったスマートモバイルデバイス、およびユーザーコンテンツの管理・流通を容易にするSNSの登場により、一般ユーザーのコンテンツ配信の機会が増えてきた。

更に近い将来、人口をはるかに超える数のデバイスがインターネットに接続される、いわゆるIoT (Internet of Things) 時代が到来し、各デバイスが生み出す大量のデータがインターネット上を流れることが予想される。このような環境の中で、インターネットは、設計当初のホスト間通信から情報の配信・流通システムへと役割が変わってきている。近年、このインターネットの利用形態の変化に適した情報中心のネットワーク技術であるICN (Information-Centric Networking) の研究が盛んになってきた。

本稿では、ICNの基本的な考え方、各種アーキテクチャーの特徴、現在の研究動向や各種団体の活動、および富士通研究所による取組みを紹介する。

ICNの特徴と狙い

インターネットの質的・量的変化を受け、研究者の間では、新しいネットワークアーキテクチャーをインターネット上に構築し直すべきという議論が始まった。10年ほど前から、Future Internet Architectureの名称で欧米の国家プロジェクトを中心に研究が進められてきた。その中でも代表的なものが、DONA, NetInf, PURSUIT, NDN, CCNなどのプロジェクトである。いずれも、ホスト間通信主体ではなく、情報配信・流通を中心にアーキテクチャーを構築しており、ICNはその総称となっている^{(1),(2)}

ICNでは、10種類程度のアーキテクチャーが提案されている。いずれも、場所（サーバ）ではなくコンテンツ名によりネットワーク機能が動作し、ユーザーに情報を届けるという基本思想を実現しようとするものである。これらのアーキテクチャーでは、ユーザーがデータを要求した時点では、データをどこから取得するかを確定させず、ネットワークシステム内の複数のサーバにコンテンツを複製しておく。こうすることで、例えば近くにある一番効率の良いサーバからコンテンツを取得でき、大きなメリットの一つになっている。これは、いわゆるネットワーク内キャッシング機能であり、データトラフィック量削減や応答速度向上が見込まれる。別のメリットとして、モビリティ対応が容易になることが挙げられる。すなわち、コンテンツ名はサーバとは切り離されているため、コンテンツを持っているノードが移動した場合も、移動前と同様にコンテンツ名で要求することによりその取得が可能となる。

このように、ICNではサーバを意識することなくコンテンツ取得を可能にするため、今までサーバに頼っていたセキュリティ機能をデータそのものに組み込むことが考慮されている。具体的には、受信データがユーザーから要求された本物のデータかを確認する認証機能が各ICNアーキテクチャーに含まれている。これにより、第三者が勝手に同じ名前を付けたコンテンツを、ユーザーが誤って取り込んでしまうことを避けることができる。加えて、特定のユーザーのみに向けたコンテンツ公開ができるように、コンテンツ暗号化の仕組みも検討されている。認証・暗号化で用いられる鍵管理は、各ICNアーキテクチャーで定義されており、その多くはコンテンツ名と絡めた管理になっている。

最近、ICNに対して更に期待されているのが、サービスまで考慮したシステム効率向上や、ネットワークを利用するアプリケーションソフトの設計効率向上である。ICNでは、コンテンツという従来のネットワークが扱っているビット列を超えたものを対象としており、アプリケーションソフトとの距離が狭まる。この性質を利用して、アプリケーション、ネットワークの双方にとって最適なシステム設計が期待される。ここで重要な視点

として注目されているのが、コンテンツ名の付け方である。アプリケーションソフトの構造を意識した上で、識別・検索のしやすさに配慮し、構造化されたコンテンツ名が求められる。実際、具体的なユースケースを想定したコンテンツ名設計の実績を積み上げていく議論が、ICN関連会合でなされている。^{(3),(4)}

また、既に広く普及しているクラウドコンピューティングの発展形として、特にIoTを視野に入れた分散サービス基盤⁽⁵⁾やエッジコンピューティング⁽⁶⁾という概念が提唱されている。データの保管や処理を中央で集中実行するのではなく、ネットワーク全体に分散して配置する考え方である。ICNは、もともとコンテンツ配置の分散化を進めようとしている。また、最近ではデータ処理に関してもNFN (Named Function Networking) が提案されており、コンテンツ名のみならず、処理についてもネットワーク全体に分散されたものを呼び出すことがICN関連会合で議論されている。⁽⁷⁾このように、ICNは別の枠組みで議論されているデータ保管・実行の分散化の流れにも沿っていると言える。

ICNの研究は、ここ数年更に盛んになってきており、新規団体や会合の立上げが相次いでいる。2011年からネットワーキング技術の主要国際学会でICNワークショップが開催され、2014年にはACMでICN専門の学会が立ち上げられた。⁽⁸⁾また、各プロジェクトが開催しているNDN community meeting,⁽⁴⁾ CCNx conference⁽⁹⁾では、プロトコル、オープンソフトウェアのチュートリアル、デモンストラの展示、および普及への道筋のための議論が行われている。日本では、2014年にICNコンソーシアムが設立され、ワークショップなどの活動を開始した。⁽¹⁰⁾

標準化活動としては、IETF (Internet Engineering Task Force) の姉妹団体であるIRTF (Internet Research Task Force) における研究グループICNRG (Information-Centric Networking Research Group) が2012年に設立され、⁽³⁾ 現在もパケットフォーマットの議論などが行われている。また、ITU-T SG13では、DAN (Data Aware Networking) のユースケースなどを議論している。

ICNのアーキテクチャーは、大きく2種類に分類できる。一つは、NetInfに代表される、中央名前

解決装置 (Name Resolution System : NRS) を用いるタイプであり、コンテンツのフラット名を特徴とする。もう一つは、NDN (Named Data Networking) に代表される、名前ベースルーティング、ルータ内キャッシング、およびコンテンツの階層化名を特徴とするタイプである。なお、これら二つのタイプのアーキテクチャーは、当初は独立に検討されていたが、最近ではお互いの良い所を採用していく動きも見られる。

NetInfアーキテクチャー

NetInfアーキテクチャーでは、NRSによりコンテンツ名をコンテンツの場所に変換する装置を配置する。⁽¹¹⁾例えば、IPレイヤーの上にもう1階層設け、このレイヤーにNRSを配置し、コンテンツ名をIPアドレスに変換する実装方法がある。コンテンツが新たに発行された、あるいはノードに新たにコンテンツがキャッシュされた場合は、NRSにコンテンツ名を登録する。システム中のNRS配置は階層構造になっており、ローカルNRSとグローバルNRSが存在する。新規発行、あるいはノードに新規キャッシュされたコンテンツは、まずローカルNRSに登録される。同じローカルエリア内からのデータ取得要求に対しては、このNRSからコンテンツ場所を提供する。ローカルNRSに登録された情報は、更にグローバルNRSにも登録される (ここで、ある種のフィルターを使ってグローバルNRSに登録する情報量を制限する手法もある)。異なるローカルエリアで発生したデータ要求に対しては、そのエリアのローカルエリアNRSには情報がないため、グローバルNRSからの情報により、コンテンツ位置を取得する。

NetInf型では、ルータは既存のものが流用できるため、現在のIPシステムからのハードウェアの変更は少なく済む。一方、本格的なインターネットスケールでのよりダイナミックなコンテンツ配置に対応するためには、グローバルNRSのスケラビリティが大きな課題となる。このような問題が存在することもあり、現在のICN研究は、次章で説明するNDNタイプが主流となっている。

NDN/CCNアーキテクチャー

本章では、現在ICN研究の中でも最も活発に議論

されているNDN, およびCCN (Content Centric Networking) について説明する^{(4),(9),(12)} NDNは, UCLAを中心とした米国の複数の大学にまたがる研究プロジェクトであり, 主に米国国家予算に基づいたNSF (National Science Foundation) からの資金で運営されている。CCNは, 米国の民間研究機関であるPARC (Palo Alto Research Center) により進められているプロジェクトである。この二つのプロジェクトは, 現在別々にプロトコル実装, ライブラリ開発などを行っているが, もともと一つのアーキテクチャーから発展しており, 以下に説明するアーキテクチャーは両者に共通である。

NDN/CCNでは, InterestとDataの2種類のパケットフォーマットが用意されている。Interestはコンテンツ要求のために用いられ, コンテンツ名が入っている。Dataはコンテンツを運ぶために用いられ, コンテンツそのものが入っている。Interestは, NDNノード内にあるテーブルを用いて, 指定した名前前のコンテンツを持っているノードまでルーティングされる。Dataは, Interestが通った経路を逆にたどり, クライアントに届けられる。このとき中継する各NDNノードは, 別ユーザーからの

同一コンテンツ要求に備えて, Dataをキャッシュできる (図-1)。

NDNノードには, ルーティングおよびキャッシュデータ取得のために, FIB (Forwarding Information Base), PIT (Pending Interest Table), CS (Content Store) の三つのテーブルが存在している。FIBは, 上記のInterestルーティングのためのコンテンツ名, あるいはプリフィックスと呼ばれるコンテンツ名の一部を, 後述するInterfaceの拡張であるFaceに対応付ける。PITは, 上記DataがInterestの逆経路をたどれるように, NDNノードがInterestを転送してからDataが返ってくるまでの間, そのInterestがどこから来たかを, 要求されたコンテンツ名とFaceを対応付ける形で記憶するテーブルである。CSには, NDNノードでキャッシュされたデータ, およびそのデータに対応するコンテンツ名が格納されている (図-2)。

Faceとは, 従来のルータで隣接ノード接続に使用されているInterfaceの拡張である。同一ノード内の各アプリケーションにデータを転送することも想定しているため, NDN/CCNではFaceという名称で呼んでいる。FIBやPITには, 一つのコンテンツ名に複数のFaceを対応させることがで

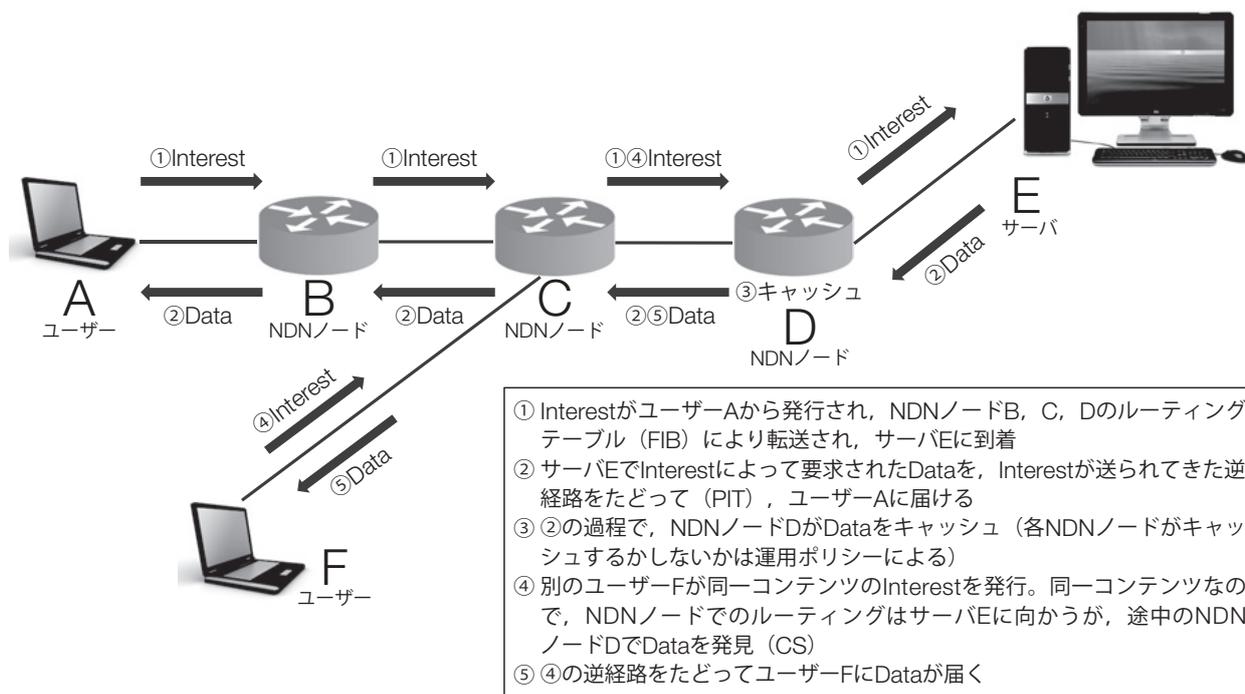


図-1 NDNシステム

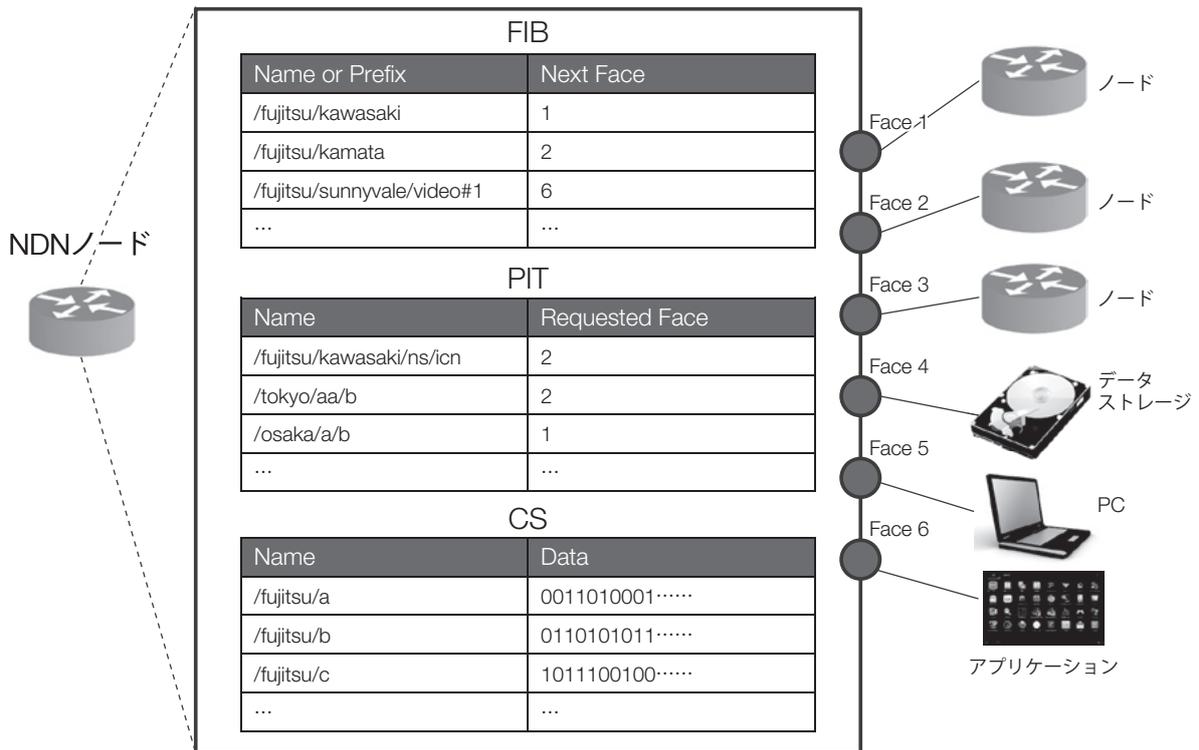


図-2 NDNノード内部テーブル

き、Multi Faceと呼ばれる。Multi Faceは、より効率的なコンテンツ探索やマルチキャスト機能に使用できる。Multi Faceの中から実際にどのFaceを選んで転送するか、あるいは同時に複数のFaceに転送するのを選択する機能を実現する層をStrategy layerと呼び、NDN/CCNの効率的な運用のための鍵となる。

Interestが届けられた各NDNルータは、以下の手順で処理を行う。

- (1) CSに要求コンテンツがある場合は、そのコンテンツをInterest送り元に届け、それ以上のInterestの転送は行わない。
- (2) PITに要求コンテンツが格納されている場合は、重複データ転送を避けるため、転送済みの同一コンテンツに対するDataが送られてくるのを待つ。
- (3) CSにもPITにも登録がない場合は、FIBに従ってInterestを転送する。

これら三つのテーブルから構成されるNDNノードであるが、更にRepositoryというデータストレージが用意されており、ここにコンテンツ名をつけたデータを格納できる。Repositoryは、Faceによ

りNDNノードとつながっている。コンテンツ配置として、Repositoryを主として、CSは補助的に用いた方が良いという議論もある。複数のRepositoryに同一コンテンツを配置する場合は、Interest転送の最終目的地として複数のノードが存在することになり、上記Multi Faceによる実装を適用できる。

ICN研究の動向

前章まで、各種ICNアーキテクチャーについて説明してきたが、最近行われているICNの研究としては、主に以下の四つの方向性がある。

(1) キャッシュ配置やルーティングの最適化

学会での発表件数が非常に多い領域である。ICNにおいて現状主要なメリットとされるキャッシングの効果に関して、効果をより大きく出すためのアルゴリズムや効果の大きさに関する定量的な評価が多数示されている。⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾

(2) 膨大なコンテンツ数への対応 (スケーラビリティ)

現在のインターネットのWebサイト数の1000倍から100万倍程度多いとされるコンテンツ数に対し、どのようにして効率的にルーティング、ある

いは名前解決システムを提供するかという課題である。

(3) NDNに存在していない機能の追加

NDNはIPに比べると歴史が浅く、補完的な機能を提供する各種プロトコルが揃っていないため、これを整備する取組みが行われている。これは、前述の標準化団体の研究グループであるICNRGでも議論されている。

(4) プラットフォーム・プロトタイプシステム開発, キラーアプリケーション探索

より具体的なNDNシステムの実現と、実際どのような場面でメリットがより大きくなるのか、あるいはインターネットスケールに適用する前段階として、どのような環境にまず適用するのが良いかが検討されている。NDNの普及に向けて非常に大事な取組みと言える。

上記四つの分野は、お互い絡み合いながら今後も発展していくと考えられる。次章では、米国富士通研究所で実施した上記(1)に分類されるキャッシュ配置最適化に関する研究内容を紹介する。

**米国富士通研究所での研究
—キャッシュ配置問題—**

ネットワーク内キャッシングによるデータトラフィック削減や応答時間の向上は、ICNにおける主要なメリットの一つである。ICNのアーキテクチャー自体は具体的なキャッシュアルゴリズムを規定しておらず、個々のネットワーク運用におい

て具体的なポリシーが適用される。このとき重要になるキャッシュ最適配置問題については、多くの研究結果が発表されている。本章では、この分野において、米国富士通研究所で実施した研究の概要について説明する。詳細は参考文献(16)を参照されたい。本検討では、ICNのアーキテクチャーとしてNDN/CCNを想定している。

NDN/CCNでは、ネットワーク中にストレージを従来よりも大量に配置することにより、システムの効率化を図ろうとしている。ストレージの大量配置にはコストがかかるため、限られたリソースをいかに効率良く使うかという観点が必要になる。そこで筆者らは、トータルストレージ容量を一定にしたときに、ダウンロードコストが最小になるネットワーク中のストレージ容量の分配と、そのときのコンテンツの配置に関して検討した。

システムモデルを図-3に示す。一つのコアルータに多数のエッジルータが接続されており、各エッジルータは多数のクライアントと接続されている。このモデルにおいて、各リンクのコスト、およびコンテンツのアクセス確率(コンテンツの人気度)を仮定したときのトータルコスト関数を定式化した。この関数が最小になるときの、各ルータに配置されるストレージ容量、およびそのとき配置されるコンテンツを求めた。本問題は、数学的に線形計画問題となり、シンプレックス法や内点法など、よく知られた手法で数値的に解くことができる。

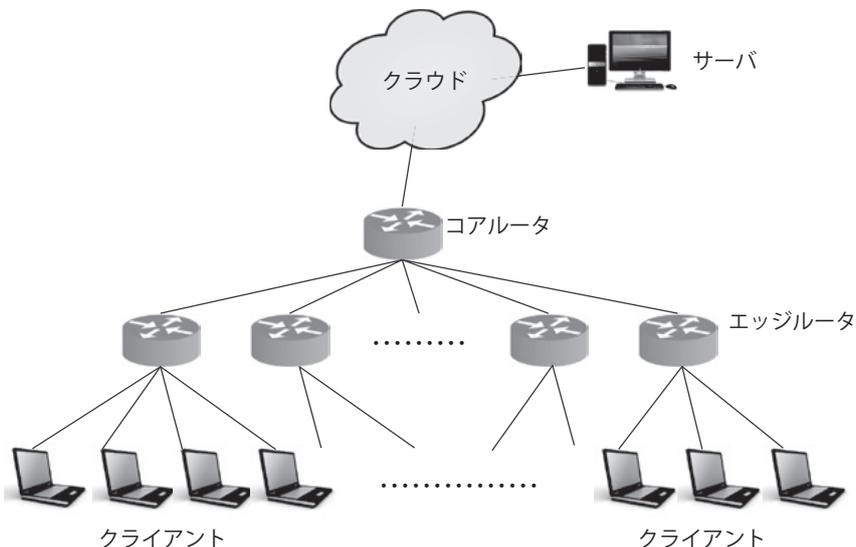


図-3 キャッシュ配置問題のシステム構成

本検討では、まず各エッジルータ配下のクライアントから要求される人気コンテンツが同一の場合、すなわち各コンテンツのリクエスト回数がエッジルータ間で同一の場合について、最適解を調べた。エッジルータが非常に多くのユーザーを収容する場合は、このケースに当てはまる。このときのコンテンツ配置は、一番人気の高いコンテンツ群をエッジルータに配置し、次に人気の高いコンテンツ群をコアルータに配置する方法が最適解となることが分かった。トータルストレージ容量は一定という条件であるため、システム内で、同じコンテンツを重複して持つほど、キャッシュできるコンテンツの種類は減る。したがって、この場合は、各エッジルータに同一のコンテンツを配置するため、エッジルータへのストレージ容量割当てを増やすほど、システム内コンテンツの種類は減ることになる。システム内でどのノードにもキャッシュされないコンテンツに対しては、サーバにアクセスする必要があるため、これはコスト関数の増加要因となる。逆に、クライアントとエッジルータ間において最小限のコストでコンテンツ取得ができる回数は、エッジルータの容量の増加に伴って増加するため、コスト関数の減少要因となる。この2点のバランス点がストレージ配置の最適解となり、エッジルータ、あるいはコアルータのどちらか一方にのみストレージを配置すればよいということにはならない。

次に、コンテンツ人気度が各エッジルータにより異なる場合について、データリクエスト類似性の相関値に応じた最適ストレージ割当てについて

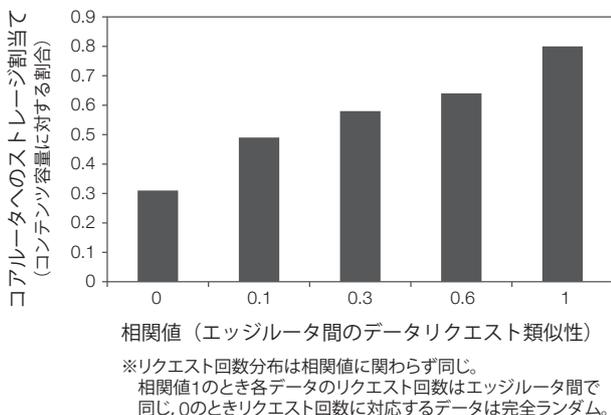


図-4 ストレージ配置のシミュレーション結果

調査した。数値的に解いた最適解の結果を図-4に示す。相関値が低いほど、すなわち人気コンテンツが各エッジルータで相違するほど、コアルータよりもエッジルータに多くのストレージおよびコンテンツを配置する結果となった。相関値が低い場合、各エッジルータでリクエストされるデータの共通性が低くなり、共通データをコアルータに配置する手法の効率が悪くなる。このため、エッジルータのストレージ割当てを増やし、より多くの種類の人気コンテンツを各エッジルータに配置するのが有効になると考えられる。いずれの場合も、エッジルータ、あるいはコアルータに偏ってストレージを持つのではなく、全てのネットワークノードにストレージを配置するのがよいという解になっている。以上の結果は、直感的な理解と一致するが、実際にモデル化、定式化し、最適解を導いたことの意義は大きいと考える。

更に、コンテンツの具体的な配置方法を考案した。一つは、事前に各コンテンツの人気順と、人気順が何番目のコンテンツをどのルータに配置すべきかを中央制御サーバで演算し、結果を各ルータに知らせることを前提とした中央制御アルゴリズムである。もう一つは、各ルータにおけるリクエスト回数からルータが自律分散的に人気コンテンツを推測する分散制御アルゴリズムである。これらのアルゴリズムと、キャッシュ配置/入れ替えアルゴリズムとして従来広く用いられているLCE (Leave Copy Everywhere) /LRU (Least Recently Used) について、NDN projectで開発されているNDN simulatorを用いたシミュレーション

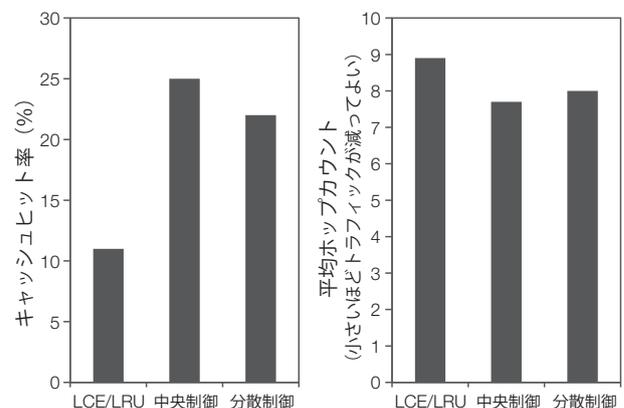


図-5 各キャッシュ制御方式のシミュレーション結果

ンにより特性を評価した。キャッシュヒット率およびホップカウントのシミュレーション結果を図-5に示す。いずれも筆者らのアルゴリズムでは、優れた効果が得られた。

以上述べたように、トータルダウンロードコストを減らすためには、ネットワーク内キャッシュが有効であり、多くのノードにストレージを持たせ、コンテンツの人気度に応じてキャッシュすべきノードを決める方法が優れていることが明らかになった。これは、各ネットワークノードがストレージを持ち、自律的かつダイナミックなキャッシングが可能なNDN/CCNが有利であることを示す結果であると考えられる。また、具体的なコンテンツ配置のアルゴリズムを提示し、より効率の良いICNネットワーク運用への道筋を示した。

む す び

ICNは、近年注目度が増している次世代ネットワークアーキテクチャーであり、ホスト間の通信に焦点を当てた従来のシステムから、情報中心のグローバルスケールなトータルサービスシステムへの適応を目指している。本稿では、このICNの研究動向、および米国富士通研究所で実施した研究成果について紹介した。ここ数年、ICNの関連団体・会合が数多く立ち上がってきており、今後もその普及に向けた様々な成果が発表されるものと考えられる。ICNはまだ研究段階であり、本格普及を果たすためには解決すべき課題が多数残されている。筆者らも、その研究の一翼を担い、普及に向けた貢献をしていきたい。

参考文献

- (1) B. Ahlgren et al. : A Survey of Information-Centric Networking. IEEE Communications Magazine, p.26-36, July 2012.
- (2) G. Xylomenos et al. : A Survey of Information-Centric Networking Research. IEEE Communications

- Survey and Tutorials, Vol.16, No.2, p.1024-1049, 2014.
- (3) IRTF Information-Centric Networking Research Group.
<http://trac.tools.ietf.org/group/irtf/trac/wiki/icnrg>
- (4) Named Data Networking.
<http://named-data.net>
- (5) 富士通研究所：クラウド環境を広域ネットワーク上で最適化する分散サービス基盤技術を開発。
<http://pr.fujitsu.com/jp/news/2014/03/14.html>
- (6) NTT：エッジコンピューティング構想。
<http://www.ntt.co.jp/news/2014/1401/140123a.html>
- (7) Named Function Networking.
<http://www.named-function.net>
- (8) ACM ICN 2014.
<http://conferences2.sigcomm.org/acm-icn/2014/>
- (9) CCNx.
<http://www.ccnx.org>
- (10) 津田俊隆：ICNコンソーシアムの設立について。ITUジャーナル, Vol.45, No.3, p.3 (2015).
- (11) NetInf.
<http://www.netinf.org>
- (12) V. Jacobson et al. : Networking Named Content. ACM CoNEXT, p.1-12, December 2009.
- (13) Y. Wanget et al. : Optimal cache allocation for content-centric networking. ICNP, 2013.
- (14) S. Fayazbakhsh et al. : Less pain, most of the gain : Incrementally deployable ICN. ACM SIGCOMM, p.147-158, 2013.
- (15) A. Dabirmoghaddam et al. : Understanding optimal caching and opportunistic caching at the edge of information-centric networks. ACM ICN 2014, p.47-56, 2014.
- (16) B. Azimdoost et al. : Optimal In-network Cache Allocation and Content Placement. IEEE INFOCOM workshop CNTCV, April 2015.

著者紹介



伊藤 章 (いとう あきら)
米国富士通研究所
Cloud-based Solution Innovation
Group 所属
現在、次世代ネットワーク関連の業務
に従事。



福田健一 (ふくだ けんいち)
ネットワークシステム研究所
次世代ネットワークアーキテクチャブ
ロジェクト 所属
現在、次世代ネットワーク関連の業務
に従事。