

FEATURE

自ら考え、進化する、 ネットワークアーキテクチャ

Interview

インターネットの限界を超える ネットワークアーキテクチャ研究の最前線



FEATURE

自ら考え、進化する、 ネットワークアーキテクチャ



表紙写真：

左上：(左半分) 情報指向ネットワーク技術 (ICN) を実現するオープンソースソフトウェア Cefore のホームページとソースコード、(右半分) 地上系／非地上系ネットワーク (TN／NTN) シミュレーター画面

右下：ネットワークアーキテクチャ研究室にてソフトウェア開発・検証実験に利用されているサーバー及びワークステーション

左上写真：

Ceforeを導入したネットワークを経由した4Kビデオリアルタイムマルチキャストストリーミング実験。高精細ビデオかつ広帯域なストリーミングでありながらも、複数台のタブレットが同期してビデオ再生していることが確認できる。

- 1 インターネットの限界を超える
ネットワークアーキテクチャ研究の最前線
朝枝 仁
- 4 インテントベース・ネットワーキング
Pedro Martinez-Julia／平山 孝弘／地引 昌弘
- 6 情報特性に基づくネットワーク内コンピューティング
速水 祐作／松園 和久
- 8 遅延保証を可能とするプログラマブルルーター
大岡 睦／宮澤 高也
- 10 分散台帳を用いたトラスタブルネットワーク
寺西 裕一

TOPICS

- 12 ITU 及び IETF での国際標準化活動
Ved P. Kafle／朝枝 仁
- 13 NICT のチャレンジャー File 30 Htet Htet Hlaing
ネットワークセキュリティ・バイ・デザイン：
信頼できるネットワークサービスの実現に向けて

INFORMATION

- 14 沖縄電磁波技術センター オープンハウス2024
- 14 ジェンダーギャップ会議に NICT の研究者が登壇

FEATURE

自ら考え、進化する、ネットワークアーキテクチャ
Network Architecture, that Thinks and Evolves Itself



Interview

インターネットの限界を超える ネットワークアーキテクチャ研究の最前線

5Gから6G、そしてその先へ向けて、ネットワークはますます進化していく。4Kストリーミング・VR・生成AIなどネットワークを流れる情報量も増えるばかりだ。一方で、情報の抜け落ちや遅延はサービスの質を低下させる。現行のインターネットサービスの抱える課題を克服すべく、日夜研究開発を続けているのが、ネットワークアーキテクチャ研究室だ。そこにはインターネットの限界を超えるような未来技術がたくさん詰まっている。

今回はネットワークアーキテクチャ技術の最前線についてネットワークアーキテクチャ研究室長の朝枝 仁に話を聞いた。

——そもそも、ネットワークアーキテクチャとは何でしょうか。

朝枝 ネットワークアーキテクチャは、通信サービスをより良く提供するために欠かせない技術で、とても身近な技術でもあります。ネットワークやインターネットといえば、光ファイバーケーブルやWi-Fiなどの有線・無線技術、SNSや動画配信などのサービスを想像される方も多

いと思います。それら回線とサービスを上手に『つなぐ』技術がネットワークアーキテクチャといえます。

例えるなら、ケーブルは道路、サービスを提供するサーバーやクラウドはお店ということになります。通信パケットである車は目的地に向かい、データを載せて元の場所に戻ってくる。出発地と目的地の間には複数の経路（道路）があり、その中からデータを運ぶための最適な経

朝枝 仁（あさえだひとし）

ネットワーク研究所
ネットワークアーキテクチャ研究室
室長

日本アイ・ビー・エム株式会社、INRIA（フランス国立情報学自動制御研究所）、慶應義塾大学大学院特任准教授を経て、2012年にNICT入所。ネットワークプロトコル等の研究開発やIETF標準化活動に従事。2021年から現職。電気通信大学大学院連携教授。電子情報通信学会フェロー。博士（政策・メディア）。

路を選び、データを確実に運ぶ技術がネットワークアーキテクチャです。

ただ、最適経路を選ぶといってもカーナビとは違い、ネットワークアーキテクチャの仕事はデータを目的地に運ぶことだけではありません。通信の途中で、データの一部が欠落したり遅延したりすることがありますが、このような現象をできるだけ起こさないようにしたり、通信の問題を発見して回避するのも、ネット

インターネットの限界を超える
ネットワークアーキテクチャ研究の最前線

ワークアーキテクチャの仕事です。私たちはインターネットのサービスを使用しているとき、知らず知らずのうちにネットワークアーキテクチャのお世話になっているのです。

——近年、特にインターネットアーキテクチャの重要性が求められるようになりましたが、その理由は何でしょうか。

朝枝 ネットワークに接続されるデバイスは年々増加し高性能になっています。4Kレベルのリアルタイムストリーミングや生成AIの普及など、ネットワークを流れるデータ量は年々増え、これまで以上に厳しい応答性能・広帯域性・低遅延性が求められています。進化し続けるサービスを支えるためには、効率の良いデータ処理と転送を行うネットワークアーキテクチャが必要になります。

例えばネットワークの基幹システムとしてよく知られているものにクラウドシステムがあります。クラウドでは主に都市部に近いデータセンターに巨大なサーバー群を置き、そこで大量のデータを保存・処理します。クラウドはネットワークにつながっていればどこからでもアクセスできる便利な技術ですが、負荷が集中し、通信遅延が生じることがあります。また大量の電力を消費するという課題もあります。クラウドの一部の機能をユーザーの近くに配置するエッジコンピューティングと呼ばれる技術がありますが、これらを連携させて通信の遅延を少なくするのもネットワークアーキテクチャの仕事になります。

■何を研究しているのか

——ネットワークアーキテクチャ研究室

では、具体的にどのような研究に取り組んでいるのでしょうか。

朝枝 一つは、AIを活用したネットワーク制御自動化技術の研究です。一言でAIと言っても様々なAIがあり、それぞれ特徴があるため、複数の異なるAIを連携させてネットワークの状態をなるべく正確に把握します。その結果を元に、サーバーの資源調停を行って負荷を均一にしたり、ネットワーク機器の障害の予兆を検知してサービスへの影響を回避したりします。AIを利用した大規模ネットワーク制御は、近年の深刻な人手不足の観点から喫緊の課題です。私たちと共同研究を行った国内の通信キャリアでも、昨年からAIを利用した大規模ネットワーク制御の運用を開始したと伺っています。

次に、遅延保証型ルーターの研究開発があります。私たちは、先ほど述べたエッジコンピューティングをより発展させたネットワーク内コンピューティングの研究をしています。通信品質の向上にはデータ転送の揺らぎを無くすることが非常に効果的です。そこで、ネットワーク内で用いられるルーターに関し、ルーター内部の処理機能を柔軟にプログラムできるようにしつつ、データ転送時の遅延と揺らぎを一定の幅に抑えるための研究を行っています。

またネットワーク内コンピューティングの研究として、将来の遠隔会議や遠隔授業を意識した高品質マルチキャストストリーミングの研究を行っています。この成果として、今年のオープンハウスでは、スマホやタブレットを使った4Kビデオストリーミングのデモを行いました。ここでは情報指向ネットワーク技術(ICN：Information-Centric Networking)

という技術を用いており、論理的には、端末の台数が増えても全端末が4K品質のビデオを同期して受信し再生することを可能にします。

もう一つは、分散台帳技術、わかりやすく言えば、ブロックチェーンに関する研究も行っています。ご存知のとおり、ブロックチェーンは仮想通貨で使われている技術で、管理者を必要とせずに情報の信頼性を担保する技術です。非中央集権型の分散技術でありながら、情報を扱う人の属性によってアクセス権を制御するといった仕組みの研究を行っています。

——ICNとはどのような仕組みなのか簡単に教えてください。

朝枝 現在のインターネット通信は、IPアドレスを用いた1対1の通信を行いますが、ICNはパケットの中にかかれてあるコンテンツの名前を見て通信を行います。コンテンツの名前は、URLのようなものと思っただければ結構です。データを転送するルーターは、コンテンツの名前を見て自分がどういう名前のコンテンツを転送しているかを知ることができます。これにより、同じコンテンツが欲しいというリクエストが複数あれば、ルーターは流れてくるコンテンツを自分自身でコピーしてユーザーに送ります。上流のサーバーに同じデータを転送してもらう必要はありません。こうして自然に、かつ無駄のない効率的なマルチキャストストリーミングが実現できます。サーバーの負荷やネットワークの使用帯域を減らすことができる上、ユーザーに対して同期したコンテンツ配信を可能とする優れた技術です。

——従来の通信方式にとらわれない斬新な発想ですね。

朝枝 実はTCP/IPに代わる新しいインターネットプロトコルの開発が世界中で模索された時期があり、ICNもその有力候補として注目を浴びました。しかし、これだけ広く普及したTCP/IPを別の方式に置き換えるというのは無理があり、むしろTCP/IPを用いながら、従来のIP通信の限界を補完してくれる技術を考える方が現実的です。そこで私たちは、IPの上で動くICNを活用したネットワークアーキテクチャの研究を行っています。先の4Kストリーミングのようなものから、例えば、将来の仮想現実(VR)やメタバースなどの空間コンピューティングにも応用できると考えています。VRは今後、様々な分野での活用が期待されていますが、通信のわずかな遅延や揺らぎがズレを生じさせる「VR酔い」などの問題も指摘されています。そこで、ICNのマルチキャスト機能を用いた端末間の同期によって揺らぎを一定にすれば問題も軽減できると考えています。

ICNを実際に動かして評価するため、私たちはICNを実装したCefore(セフォール)というソフトウェア基盤をオープンソースとして公開しており、学術機関や大学の研究室などで利用されています。「Interface」という技術雑誌の令和6年2月号に40ページを超えるICNとCeforeに関する特集が組まれ、一般の方々にも知られるようになってきました。

——新しい通信技術を社会実装していくためには、国際的な標準化も必要ですね。

朝枝 そうですね。私たちは、電気通信



図 サービスを「つなぐ」ネットワークアーキテクチャ

の国際的な標準化機関であるITU-TやIETF/IRTFでの活動も積極的に行っています。前者ではネットワークアーキテクチャを実現するシステム構成などを、後者ではネットワークアーキテクチャで用いられる通信メッセージのフォーマットや処理手順などを定義する仕様策定に携わっています。

■新しいネットワークサービスには新しいアーキテクチャが必要

——今後の研究活動の展望をお聞かせください。

朝枝 ネットワークアーキテクチャは、「人」と「情報」をつなぐ要となるものです。クラウドやエッジといったコンピューティング技術や、通信を安定化させる技術、セキュリティ及びプライバシー保護技術まで幅広いです。社会実装に近い技術から、10年・20年先を見据えた技術もあります。

対象となるネットワークのカバレッジも、衛星や空に浮くHAPS (Hi Altitude Platform Station) と呼ばれる基地局を利用する非地上系ネットワーク(NTN：Non-Terrestrial Network)へと広

がっています。また、近年急速に研究が進み、すでに実験も始まっている量子鍵配送 (QKD：Quantum Key Distribution) ネットワークに関しても研究しています。そのほか、ムーンショット型研究開発事業*による、人間中心のサイバネティック・アバター基盤の研究も行っています。ここでは、人がアバターやロボットなどと共存し、人間が時間的・空間的、そして身体的な制約から解放された新しい社会の実現を目指しています。ここにも新たなネットワークアーキテクチャが必要になります。

私たちは、社会的需要をしっかりと見極めながら、今実証すべき研究、そして未来を見据えた先進的研究の両面から、社会貢献をしていきたいと考えています。

*ムーンショット型研究開発事業
内閣府などが中心となって進めている、破壊的イノベーションの創出を目的とした研究開発プロジェクト。

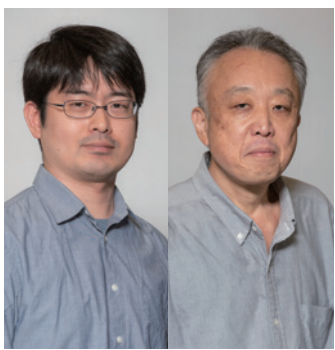
インテントベース・ネットワーキング



Pedro Martinez-Julia

(ペドロ マルティネス・フリア)
ネットワーク研究所 ネットワークアーキ
テクチャ研究室 研究員

大学院修了後、2016年にNICT入所。
2009年以来、EUによる研究プロジェクトに
参加し、各種のタスク／活動を主
導。ネットワークアーキテクチャ及び
AIによる管理制御を研究テーマとし、
IETF/IRTFにて国際標準化活動に従事。
Ph.D.(コンピューター・サイエンス)。



平山 孝弘(ひらやま たかひろ) (左)

ネットワーク研究所 ネットワークアーキ
テクチャ研究室 主任研究員

大学院修了後、2013年にNICT入所。光パ
ケットスイッチ、ネットワーク機能仮想化
技術(NFV)及び管理制御の自動化技術な
どに関する研究に従事。博士(情報科学)。

地引 昌弘(じびき まさひろ) (右)

ネットワーク研究所 ネットワークアーキ
テクチャ研究室 主任研究員

NEC中央研究所を経て、2016年にNICT
入所。ネットワークやソフトウェアの数
理モデルに関連する研究に従事。
博士(システムズ・マネジメント)。

ネットワーク・サービスやこれを支
えるネットワーク基盤は常に変化
／発展しており、それに伴う仕組みや制
御の複雑さも絶えず増えています。これ
までは、ネットワークやサービスの運用
管理者がその負担を担ってきましたが、
増大する負担を解消すべく将来的な問題
も問われています。そこで最近は、ネッ
トワークやサービスの運用省力化／自動
化の技術が注目を集めています。本稿で
は、運用管理者がネットワークに求める
漠然とした要求(以後の文章ではこれを
「意図：ネットワーク・インテント」と呼
びます)を、該当するネットワークの設
定に自動変換するインテントベース・
ネットワーキング (IBN: Intent-Based
Networking) 技術について紹介します。

■ IBN とは

一般的に、ネットワーク・サービスの
品質を担保して機能を実現するには、そ
れを提供する機器の命令を作成して設定
する必要があります。これまでは、例え
ばネットワークを構成する機器の選択や

機器間の接続方法、あるいはサービスの
動作を規定するポリシーなど、運用管理
者が作成／設定してきました。しかし、
ネットワーク・サービスやネットワーク
基盤の変化／発展に伴い、これらの作成
／設定を誤りなく行うことが難しくなっ
てきました。

そこで、運用管理者が機器の命令を作
成するのではなく、ネットワーク・サー
ビスやネットワーク基盤として実現した
い品質や機能、つまりこれらが満たすべ
き要件を高レベル(自然言語レベル)で
定義するだけで、後はこの定義から自動
的に実際の命令を作成する技術が検討さ
れています。IBNは、このような仕組み
を実現したネットワーク制御技術です。
運用管理者が要求する高レベルな要件が
ネットワーク・インテント(意図)に該
当します。少し難しい言葉で定義すると、
運用管理を従来の環境で使用されて来た
命令型パラダイムから、個々の機器や命
令を直接扱わない(=抽象的な)宣言型パ
ラダイムに移行したというわけです(図1)。
高レベルなネットワーク・インテント
から実際の命令に変換するには、人工知

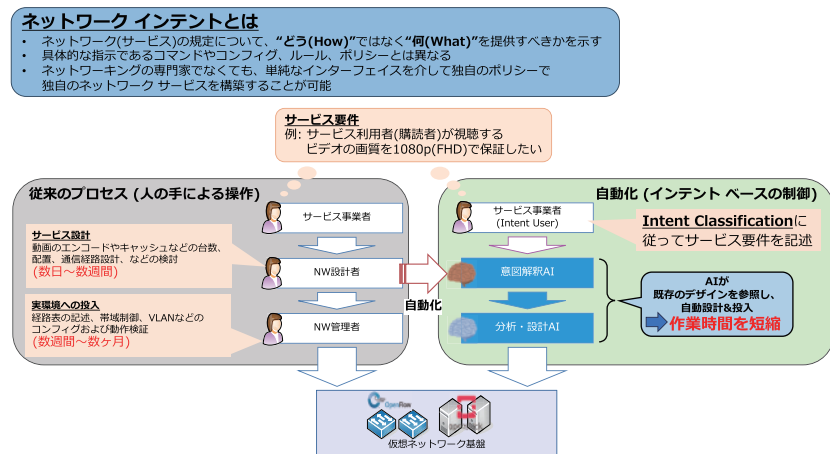


図1 インテントベース・ネットワーキング

「サービス・レベル(遅延／損失
など)が過去の平均値から 20%
以上低下しない範囲で、可能な
限りネットワーク利用率を最大
化する。」

図2 ネットワーク・インテントの例

Intent Solution (対象)	Intent User (発行者)	Intent Type (目的)	Intent Scope (適用範囲)	Network Scope (NW適用範囲)	Life Cycle (利用期間)
Carrier (C) Data center (D)	C: Network Operator D: Cloud Administrator	C: Network-Customer Service D: Cloud Management	Connectivity, Security, Privacy, QoS, ...	C: Virtualized Network Functions D: Cloud Core + Edge	Transient, Persistent

図3 Intent Classification (一部抜粋)

能(AI^{*1})や機械学習(ML^{*2})の適用が
試みられており、IBNにはAI/MLが必要
不可欠な技術となっています。

■ IBN の機能

IBNを実現するには、主に以下の機能
が必要となります。
・ネットワーク・インテントの記述モデル
・この記述から解釈を生成するAI/ML
・既存の管理機能(SDN/NFV^{*3})とIBN
を統合するシステム

通常、ネットワーク・インテントは自然
言語で表現します。IBNはこの文章を解
釈して、対象となるネットワーク・サー
ビスやネットワーク基盤の要素やポリ
シーを抽出します。この処理は2段階に
分けて行われます。

例えば、図2のような文章で表現されたネッ
トワーク・インテントについて考えます。
この文章を入力されたIBNは、まず最初
に次のような中間コードを出力します。

```
f_do_while(  
  target(get_network_usage, maximized),  
  f_not(  
    f_deteriorated(  
      get_service_levels,  
      f_n_ge("20 / 100")(f_prod(get_service_levels_  
        historical_mean))  
    )  
  )  
)
```

このコードは、get_network_usage (ネッ
トワーク利用率を取得)、get_service_
levels (サービス・レベルを取得)、get_
service_levels_historical_mean (過去の
サービス・レベルを取得)の3機能を利用
することを意味しています。また、
f_n_ge(A)(B)はA×Bを計算する関数です。
続いてIBNは、この中間コードから対
象となるネットワーク・サービスやネッ

トワーク基盤で利用可能な機器に応じた
命令を出力します。下記はその一部です
(今回の例ではこのような設定が数十行
必要となります)。

```
nsd:  
df:  
- id: default-df  
  vnf-profile:  
- id: AUTO  
  vnf-parameter-metric: bandwidth  
  vnf-parameter-goal: max  
  vnf-parameter-constraint-function: mean  
  vnf-parameter-constraint-bounary: 20 / 100
```

■ NICTにおける取組

ネットワーク・インテントの記述では自
然言語を利用しますが、ネットワーク・サー
ビスやネットワーク基盤の作成／設定に必
要な情報が明確に表現されていなければ、
うまく自動変換することができません。そ
こで私たちは、ネットワーク・インテントを分
類するための仕様IRTF RFC9316^[1]の策
定に参加し、その公開に貢献しました。
RFC9316では、ネットワーク・インテント
として識別する必要がある項目と、その識
別方法が定義されています。

図3に例を示します。図3では、運用管
理の対象となるネットワークをIntent
Solutionという名称で識別しています。こ
こでは、通信事業者のネットワーク(Carrier)
とデータセンター内のネットワーク(Data
Center)を例示しています。ネットワーク・
インテントとして表記すべき項目は各Intent
Solutionで共通ですが、具体的な記述はネッ
トワークの種類に応じて異なります。例えば
ネットワーク・インテント発行者(User
Types)は、Carrierではネットワーク運用者
(Network Operator)として記述しますが、
Data Centerではクラウド管理者(Cloud

Administrator)として記述します。

私たちはまた、IBNを利用するための
インターフェイスの標準化にも取り組ん
でいます。これにより、様々な事業者が、
自身の運用管理体系にIBNを拡張して組
み込めるようになります。例えば、ネッ
トワーク・インテントとして参照できる
ポリシーの拡張や、ネットワーク・イン
テントから構築されたネットワーク・サー
ビスの正確性を評価する機能などです。
さらに、IBNの普及促進に向け、ネッ
トワーク自動化システムであるOSDM^{*4}へ
IBN機能を追加する開発も行っています。

■ 今後に向けて

ポリシーの異なるネットワーク・サー
ビスやネットワーク基盤が混在するよう
な環境を対象に運用管理をする場合、
ネットワーク・インテントをどのように
記述／解釈するかは、まだ研究開発の途
上にあります。一つの解として、ポリシー
ごとに個別のAIを用意し、これら様々
なAIを協調させる分散協調型AIの検討
が進んでいます。分散協調型AIをOSDM
と連携させることで、IBNを用いた運用
管理の対象が広がり、将来的な運用管理
の自動化が期待できるようになります。

- *1 Artificial Intelligence
- *2 Machine Learning
- *3 Software Defined Networking/Network
Function Virtualization
- *4 Open Source "Distributed" NFV
Management and Orchestration. オープ
ンソースのNFV運用システムOSMを分散協調
型へ拡張するシステム。

参考文献

- [1] C. Li, O. Havel, A. Olariu, P. Martinez-Julia, J.
Nobre, and D. Lopez, "Intent Classification",
IRTF RFC 9316, Oct. 2022, [https://
datacenter.ietf.org/doc/rfc9316/](https://datacenter.ietf.org/doc/rfc9316/)

情報特性に基づくネットワーク内コンピューティング



速水 祐作

(はやみず ゆうさく)

ネットワーク研究所
ネットワークアーキテクチャ研究室
研究員

大学院博士課程修了後、2019年 NICT 入所。以来、コンピュータネットワーク、情報指向ネットワーク、トラフィック制御、ネットワーク仮想化に関する研究開発に従事。博士(工学)。



松園 和久

(まつぞの かずひさ)

ネットワーク研究所
ネットワークアーキテクチャ研究室
主任研究員

大学院博士課程修了後、INRIA(フランス国立情報学自動制御研究所)ポスドクフェローを経て、2013年 NICT 入所。以来、情報指向ネットワーク、量子鍵配送ネットワークアーキテクチャ、ネットワーク内コンピューティングに関する研究開発に従事。博士(政策・メディア)。

Beyond 5G時代では、多様なネットワークサービスが共存するだけでなく、ニューノーマルによる社会変革にも対応すべく、各々のサービス及びアプリケーションが求める通信品質（低遅延、広帯域、信頼性など）や安全性を確保する必要があります。しかし既存のインターネットでは、そのような処理機能はユーザーから離れた場所にあるサーバーやクラウド内で実行されることが多く、通信サービスの品質維持に限界が生じます。このため、様々な処理機能（例えば、リアルタイム映像処理やAIを用いた通信予測、データの一時保存（キャッシュ）機能や暗号化機能、等）をネットワーク内に分散させる「ネットワーク内コンピューティング」が注目を浴びています。本稿では、情報指向ネットワーク技術（ICN^{*1}）^[1]を実現するオープンソース・ソフトウェア「Cefore（セフォール）」を拡張したネットワーク内コンピューティングの研究を紹介します。

■ICNを用いたネットワーク内コンピューティング

テレワーク／遠隔授業などの需要の高まりからVR（仮想現実）／MR（複合現実）技術の進化とともに、広帯域を要する通信の安定性・低遅延性・規模性など、これまで以上にネットワークに求められる要件が厳しくなっています。この課題を解決するため、ネットワーク内でデータ転送と処理を同時に行いながら品質要求を柔軟に満たすネットワーク内コンピューティングは重要な鍵となります。例えば、通信状況やユーザー環境に応じてビデオ品質の変換を行うトランスコーディング

や、アクセス頻度の高いコンテンツをネットワーク内に一時保存しておき、それをユーザーに直接転送するネットワーク内キャッシュなど、急増するデータ通信量の削減に寄与しつつ通信性能を向上させる技術が必要となります。

一方、限られた資源を有効活用しサービスの安定稼働を行うには、複数のネットワーク機器を柔軟に活用し、状況に応じてデータを適切な機器へ配送しデータ処理を行わせる必要があります。私達は端末のIPアドレスではなく、URLのような情報やコンテンツそのものを示す識別子を用いて通信を行うICNに着目し、効率的かつ効果的にネットワーク内コンピューティングを行うためのネットワークアーキテクチャの研究を行っています。

■エラスティック（柔軟）なサービス・ファンクション・チェイニング技術

ネットワークソフトウェア化技術であるSDN^{*2}／NFV^{*3}は現在のインターネットに欠かせない技術です。近年、これらの技術を利用し、ネットワーク機器により提供される機能を柔軟に連携可能なサービス・ファンクション・チェイニング技術（SFC^{*4}）も広く研究されています。ソフトウェアを用いてネットワークを構築することにより通信キャリア等におけるネットワーク構築・運用の低コスト化が期待されていますが、実現に向けた課題がいまだ残ります。私達は、通信量やサービス要件に応じてネットワーク機器に実装された機能を柔軟にオフロード（移行）する機構（FON^{*5}）を新たに提案・設計・開発し、NICT内部の実験ネットワークにて実証実験を行いました（図1参照）。オフローディング先のネットワークは、

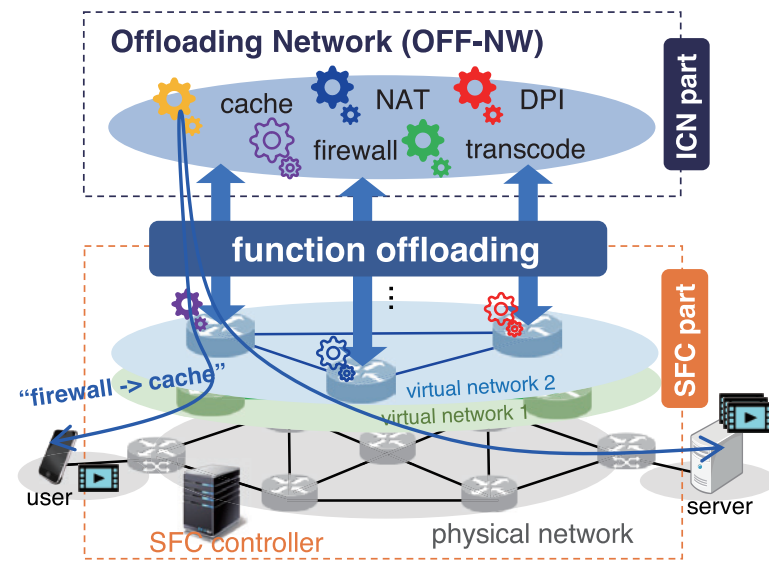


図1 FON（Function Offloading Network）を含めたネットワーク構成（[2]より引用）

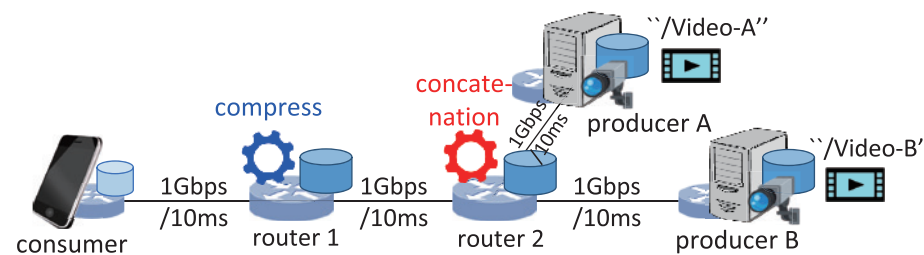


図3 ビデオコンテンツの結合と圧縮処理を分担して実行するルーター（[3]より引用）

Ceforeを用いることでサービスの性質・優先度などの条件に応じた柔軟なトラフィック制御ができるように設計されています。当該システムの性能を汎用の動画配信アプリケーションを用いた評価を行い、ネットワーク内コンピューティング機能である「ネットワーク内キャッシュ」や「マルチキャスト」を活用することで、サーバー負荷を低く抑えつつ、高画質の動画再生によりユーザーの体感品質（QoE^{*6}）が大きく向上することを示しました^[2]（図2参照）。

■ネットワーク内コンピューティングによる高速データトランスポート技術

QoEを更に向上させるためには、データ伝送やコンピューティングに要する時間を短縮する必要があります。私達は、先のFONに加え、ネットワーク内における高速なパケットロスのリカバリによりサービス特性に応じてデータ伝送・処理時間を低減する高速データトランスポート技術の研究開発も行っています。経路

上のルーターが転送されるパケットの中身を見て、そのパケットに記された名前を識別することで情報特性を判別します。例えば、動画伝送などでは通信途絶が許容されづらい優先度の高い情報（音声データやキーフレームなど）に対して優先的にロス検知・リカバリを行うことができ、QoEを大きく損なうことなく高品質のサービス提供を維持できるため、遠隔医療やテレプレゼンスなどの将来のサービスへの応用が期待できます。

実機実験では、ビデオの結合と圧縮という複数の機能から成るサービスを想定し（図3参照）、既存手法がパケットロス率の増加に応じてデータ取得・処理完了時間が増加するのに対して、提案手法はネットワーク内において高速なロスリカバリを行うことで短い時間で処理を完了できることを明らかにしました^[3]（図4参照）。

■今後の展望

今後は、メタバース時代の超低遅延・高信頼なネットワーク内コンピューティング

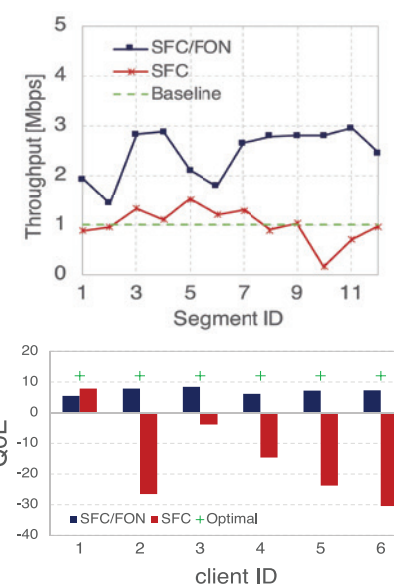


図2 既存方式（SFC）と提案（SFC/FON）のスループット・QoEの比較（[2]より引用）

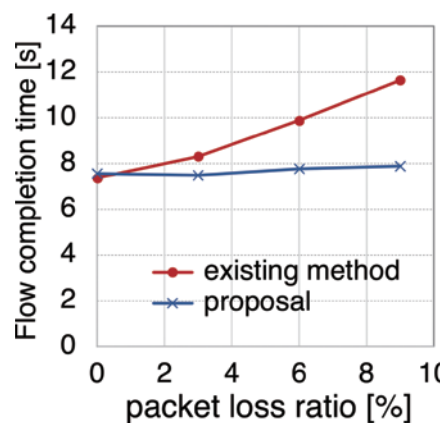


図4 ネットワーク内でのパケットロスに対する高速リカバリの効果（[3]より引用）

技術の実現、そして大量のセンサやロボット制御、XR（クロスリアリティ）などを視野に入れた効率的なネットワークアーキテクチャの研究開発を進めていきます。

- *1 Information-Centric Networking
- *2 Software-Defined Networking
- *3 Network-Function Virtualization
- *4 Service Function Chaining
- *5 Function Offloading Network
- *6 Quality of Experience

参考文献

- [1] H. Asaeda, K. Matsuzono, Y. Hayamizu, H. H. Hlaing, and A. Ooka, "A Survey of Information-Centric Networking: The Quest for Innovation," IEICE Trans. Commun., v. ol. E107-B, No.1, Jan. 2024.
- [2] Y. Hayamizu, K. Matsuzono, T. Hirayama, and H. Asaeda, "Design and Implementation of ICN-Based Elastic Function Offloading Network for SFC," Proc. IEEE NetSoft, Tokyo, Japan, Jun. 2021.
- [3] Y. Hayamizu, K. Matsuzono, K. Kenji, and H. Asaeda, "Enabling Efficient Data Transport for ICN-based In-Network Computing," Proc. IEEE CCNC, Las Vegas, NV, USA, Jan. 2023.

遅延保証を可能とするプログラマブルルーター



大岡 睦

(おおおか あつし)

ネットワーク研究所
ネットワークアーキテクチャ研究室
研究員

大学院修了後、2017年にNICT入所。情報指向ネットワーク用のルーターを含むプログラマブルルーターのハードウェア実装に関する研究開発に従事。博士(情報科学)。



宮澤 高也

(みやざわ たかや)

ネットワーク研究所
ネットワークアーキテクチャ研究室
研究マネージャー

大学院博士課程修了後、カリフォルニア大学デービス校訪問研究員を経て、2007年、NICTに入所。主にネットワーク制御管理技術に関わる研究に従事。博士(工学)。

Beyond 5G 時代には、超高速・大容量、超低遅延（5Gの10分の1の低遅延）などの通信品質や、多数ノードの同時接続を要求するアプリケーション・サービスの提供が期待されています。本稿では、超低遅延、特に転送揺らぎの性能を保証するため、FPGA（Field Programmable Gate Array）上にコンピューティング機能を実装した遅延保証型プログラマブルルーターに関して紹介します。

■遅延保証型のプログラマブルハードウェアルーター

多様化・高度化するアプリケーション及びサービスに対し、ネットワーク中で適切なデータ処理を行い、エンド・ツー・エンドの通信品質を向上させる「ネットワーク内コンピューティング」の活用が期待されています。一方、ネットワーク内コンピューティングにおける課題として、ネットワーク中にあるルーターの処理遅延、とりわけデータ転送における「揺らぎ（ジッター）」が大きくなる可能性が指摘されています。特にパケット転送機能と処理機能の間に乱れが生じた場合、パケットがルーターの入口から出口に出るまでの転送時間に大きな時間差が生じ、サービス及びアプリケーションが求める通信品質や遅延性能を満たすことができなくなります。それによって、ライブコンテンツの再生が乱れたり、クラウドサービスの遅延が増大するなどの問題がおきます。この問題を解決するため、私たちは、FPGA（Field Programmable Gate Array）を用いた遅延保証型プログラマブルルーターの研究を行っています。

FPGAはプログラマブルハードウェアデバイス的一种であり、ソフトウェアのように何度も機能をプログラムすることが可能でありながら、ハードウェア処理による高速性・低遅延性を提供します。このため、CPUの割り込み等によって生じる不規則な処理遅延が発生せず、安定的で高信頼な通信を可能とします。しかし、FPGAはハードウェア資源の制約が厳しく、専用の回路によって機能が実行されるため、ソフトウェアプログラムほどの柔軟性はありません。そこで、ネットワーク内コンピューティングとして利用頻度の高い機能を選別し、効率的にFPGAプログラマブルルーターに実装することで、多くの転送パケットに対するハードウェア処理を可能とし（図1）、遅延及びジッター性能を保証することで、多様なサービスやアプリケーションの実現を目指す必要があります。

■現在開発中の実装

私たちは、情報指向ネットワーク技術（ICN：Information Centric Networking）により実現されるネットワーク内キャッシュやマルチキャスト、セキュリティ機能等をFPGA上に実装し、ネットワーク内コンピューティングの安定化を目指した遅延保証型プログラマブルルーターの研究開発に取り組んでいます。

今回、NetFPGA-SUMEというFPGAボードを用い、遅延保証のためのデータ転送処理性能を設計・開発しました（図2）。ハードウェア資源の制約が厳しいFPGA上に高機能なICN機能を実装するためには、大量のコンテンツ名を記憶し情報更新するコンテンツ管理テーブルの実装と、大容量のコンテンツを格納するキャッ

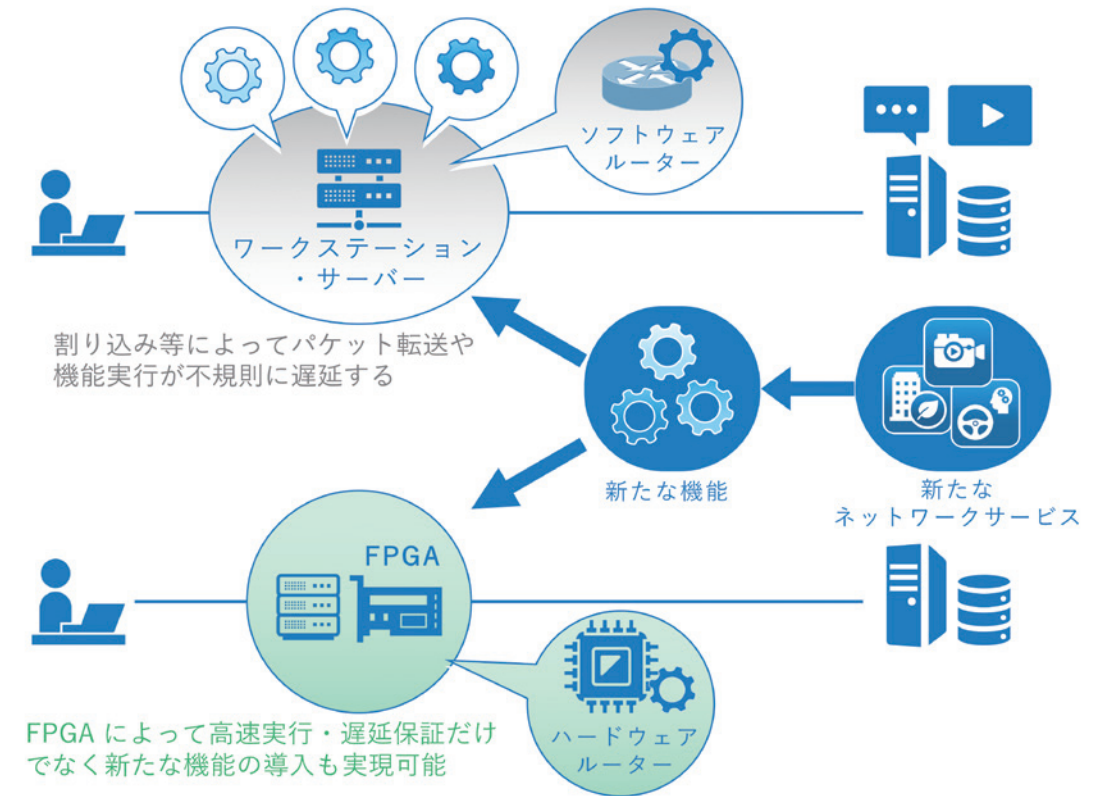


図1 FPGAを用いた遅延保証型プログラマブルルーターの概略図

シュの実装が必要となります。従来のIPルーターならば、内部処理の高速化を実現するCAM（Content Addressable Memory：連想メモリ）を用いれば良いのですが、一般的なCAMは容量が限られており、コンテンツ管理テーブルやキャッシュ実装には適しません。そこで私たちは、高速なデータ検索及び更新が可能なハッシュテーブルとキャッシュ領域を安価かつ大容量のDRAM上に実装しました。この際、アクセス速度が遅いDRAMに対し、メモリマッピングを工夫することで複数のバンクに分割されているDRAMバンク間の並列アクセスが可能となる方式を実装し、高速なデータ転送処理を実現しました。私たちが開発したFPGAルーター実装を評価した結果、10 Gbps性能をもつインターフェースに対し、2.8 Mパケット毎秒のスループットと、最大遅延4.6μs、遅延ジッター270 nsを達成できることを示しました^{*}。遅延やジッターを最小限にすることで、通信品質が安定化し、様々なサービスの性能向上が見込ま



図2 ICN機能を実装したNetFPGA-SUME

れます。

■今後の展望

Beyond 5G 時代では、高度なネットワーク内コンピューティングの実現が必要不可欠です。今後は、これまでの研究成果に加え、より複雑な処理要求に対して、ソフトウェアルーターと連携して稼働するプログラマブルルーターを研究開発していく必要があります。具体的には、AI社会の実現を例に取ると、AIを搭載するルーターの計算コスト増大や、

AIの普及に伴うトラフィック増加による帯域の逼迫といった課題があります。引き続き、未知の要求への応答技術や動的な要求のルーティング技術などの、遅延保証型プログラマブルルーターを実現するための要素技術の研究開発に取り組んでいきます。

^{*} A. Ooka and H. Asaeda, "CCNx Router on FPGA Accelerator Achieving Predictable Performance", Proc. ACM ICN 2023, Oct. 2023, Reykjavik, Iceland.

分散台帳を用いたトラスタブルネットワーク



寺西 裕一

(てらにし ゆういち)

ネットワーク研究所
ネットワークアーキテクチャ研究室
研究マネージャー

1995 年博士前期課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。2005 年大阪大学サイバーメディアセンター講師。2007 年同大学院情報科学研究科准教授。2011 年より現職。分散システム及びその応用システムに関する研究開発に従事。IEEE、情報処理学会、電子情報通信学会各会員。博士(工学)。

サ イバー空間とフィジカル空間を高度に融合させるシステムにより、社会的課題をデジタル技術で解決する「Society5.0」のビジョンの下、いわゆるデータ駆動型社会への変革を目指す取組が進んでいる。

■データ駆動社会におけるデータ流通

データ駆動型社会では、多種多様なアプリケーションが膨大なデータを効率良く活用できるように、データ所有者（組織や個人）が自らのポリシーに従って安全にデータを提供もしくは活用する仕組みが必要となる。しかし、全てのデータを従来のようにクラウド等にネットワークを介してアップロードすることは、ネットワークトラヒックの面でも、機密・プライバシー保護の面でも問題が指摘されている。このため、データの保持・管理を自らが管理するサーバ等を用いて自律的にを行い、それらの連携によりデータを流通させる「自律分散型」のデータ流通アーキテクチャの実現を目指した研究開発が盛んに進められている。このデータ流通の形態においては、偽のデータを流通させる等の悪意ある攻撃を避け、データの真正性・可用性をいかに保つかが大きな課題となる。

■従来技術とその課題

複数のデータ所有者が対等な立場で、データの真正性と高い可用性を保ち、また、ある1か所が働かないとシステム全体が障害となるような状況に陥る（単一障害点と呼ばれる）ことなくデータの共用・流通を可能とする技術として、ブロックチェーンに代表される分散台帳技

術（DLT）が注目されている。DLTは、分散ネットワーク内のノード（計算機・サーバ）上で同期されたデータを認証し、権限の透明性や責任追跡性をサポート可能なシステムであり、仮想通貨の実装等にも用いられている。ブロックチェーンでは、保存するデータを全てのノードに同期する必要がある、大容量のデータを扱う場合に通信コスト・ストレージコストが大きくなる。このため、ブロックチェーンへはデータのハッシュ値のみを保存し、データそのものを保存する外部のストレージ（オフチェーンストレージ）をブロックチェーンと連携させて利用することで、通信コスト・ストレージコストを抑える形態が一般的となっている。

しかし、企業間連携や医療応用等を考えた場合、機密・プライバシーを保護するため、データ所有者がデータ開示相手を明示的に制御可能とする機能が要求される。また一般にデータを保管する地理的位置が他国や他地域の場合、その位置に依存して法令等の制約の影響を受けるため、データ流通の地理的範囲を制限する機能も必要となる。ブロックチェーン上のトランザクションデータは公開が前提となるため、こうしたデータ流通の機能はオフチェーンストレージによって実現する必要がある。しかし、オフチェーンストレージとして広く用いられている InterPlanetary File System (IPFS) ^[1] はこれらの機能を十分に有していない。また、データ取得において通信トラフィックが大量に発生するため、データ取得にかかる遅延が大きくなってしまおうといった課題がある。

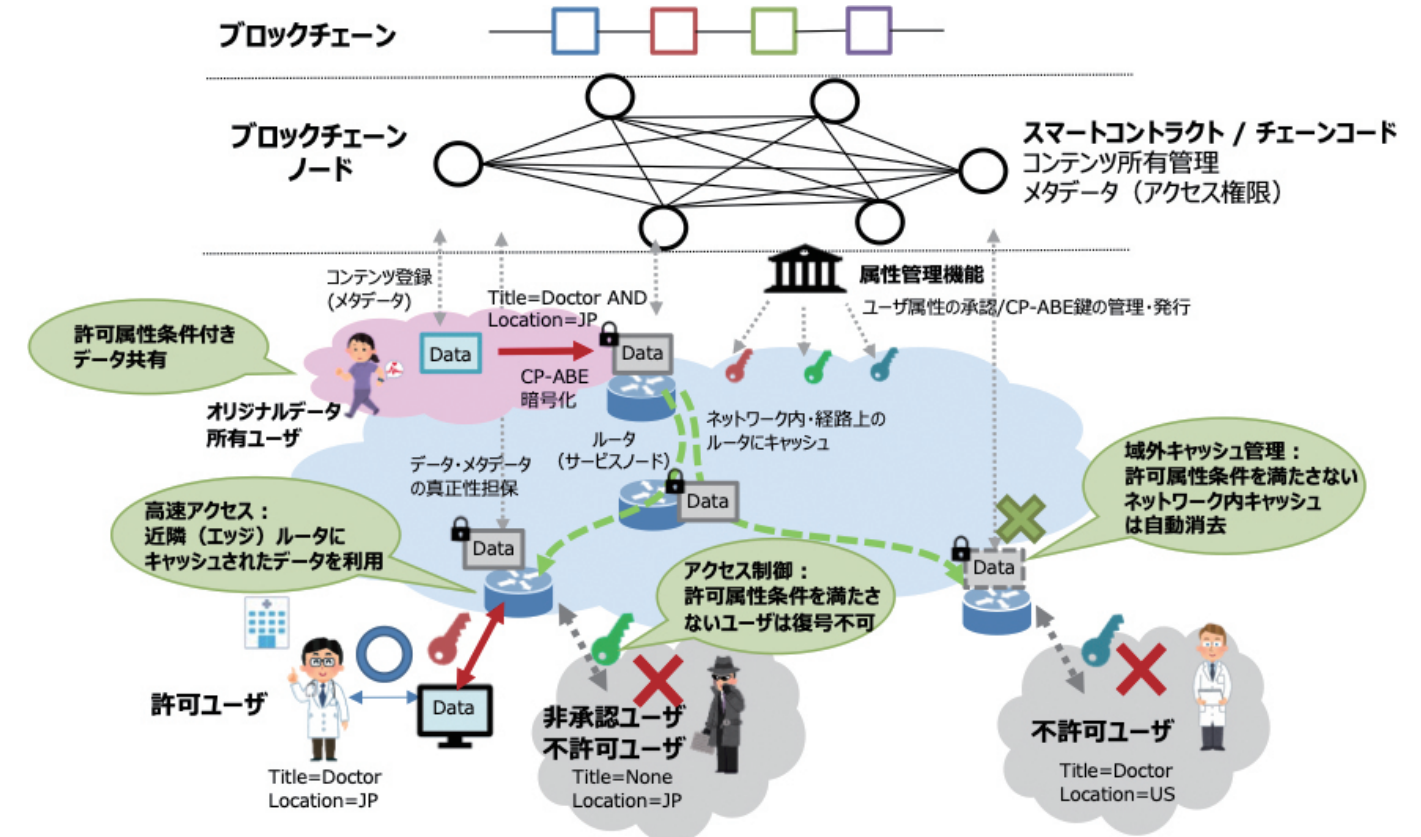


図 UCINCによるデータ流通動作例

■UCINC

我々は、上記課題に対し、属性に基づく暗号処理とネットワーク内コンピューティングを組み合わせることで、流通範囲の制御を可能としつつデータアクセスの効率を高めることが可能なネットワーク内ストレージ構成方式 UCINC ^[2] の設計と実装を進めている。UCINCでは、ネットワーク内に設置されたルータがコンテンツデータをキャッシュとして保存する機能を持ち、データ送信元の配信負荷削減と応答遅延の向上が可能である。また、Ciphertext-Policy Attribute-Based Encryption (CP-ABE) と呼ばれる属性暗号を用いて、ユーザの属性に基づくアクセス権限に応じたデータの開示・非開示の設定を可能としている。さらに、許可されたネットワーク外ではキャッシュを

保持しない域外キャッシュ管理機能を有し、データ流通範囲の制御が可能である。

図は、Location=JP（日本国内在住）かつ、Title=Doctor（医者）の属性を持つユーザのみがアクセスできる権限を持つデータの UCINC による流通動作例である。許可属性条件を満たすユーザがアクセスすると、近隣のルータのキャッシュ領域に一時的にデータが保存され、高速アクセスが可能となるが、同ルータ配下でアクセスする属性条件を満たさないユーザはルータ上のキャッシュデータを復号できず、表示できない。また、配下に許可属性を持つユーザが存在しないルータ上のキャッシュは自動消去され、データ流通範囲の地理的な制限を満たす動作となる。これにより、セキュリティ観点のメリットだけでなく、アクセス出来るデータだけが近隣ネットワーク内に

保存されるため、ネットワーク資源の無駄を無くすことも可能になる。

■今後の展望

本機能は NICT 総合テストベッド上で実装を進めており、高速アクセス可能なブロックチェーンのオフチェーンストレージとして提供予定である。

参考文献

- [1] D. Trautwein, A. Raman, G. Tyson, I. Castro, W. Scott, M. Schubotz, B. Gipp, and Y. Psaras, "Design and Evaluation of IPFS: A Storage Layer for the Decentralized Web," Proc. ACM SIGCOMM, Aug. 2022.
- [2] H. Yamanaka, Y. Teranishi, Y. Hayamizu, A. Ooka, K. Matsuzono, R. Li, and H. Asaeda, "User-centric In-network Caching Mechanism for Off-chain Storage with Blockchain," Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC), Jun. 2022.

ITU 及び IETF での国際標準化活動

ネットワーク研究所 ネットワークアーキテクチャ研究室
研究マネージャー Ved P. Kafle
室長 朝枝 仁

「電池は世界共通なのに、電源コンセントはどうして異なるんだろう？」そんなことを思ったことはありませんか？ どのメーカーのものでも接続できる、これが「互換性」と呼ばれるもので、互換性を保つために必要なものが「標準規格」です。グローバルなマーケットを考えた場合、国際的に認められた標準規格（以降、「国際標準」）に則った製品を製造もしくは利用することは、メーカーやユーザーにとって大きなメリットがあります。私たちの研究も同様であり、研究成果を広く社会に展開するためには、提案した技術に関する仕様や方式を国際標準に結び付けることが鍵になります。

ネットワークアーキテクチャ研究室では、国際電気通信連合（ITU）や Internet Engineering Task Force（IETF）などの国際標準化団体にて標準化活動を行っています。ここでは、ITUとIETFの役割や標準化作業の相違点、それぞれの特徴などを紹介していこうと思います。

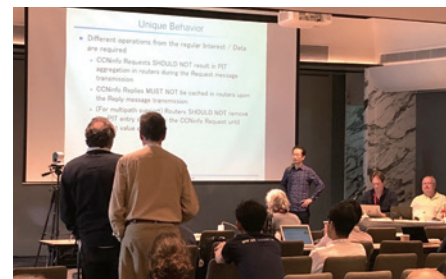
ITUの活動範囲は広く、ICT全般のアーキテクチャに関する標準化を行います。私たちが主に活動するITU電気通信標準化部門（ITU-T）では、ITU-T勧告と呼ばれる標準化文書作成を行います。テーマとしては、（1）電気通信ネットワーク（固定通信、移動通信、衛星通信）とサービス、（2）マルチメディアシステム、サイバーセキュリティ、プライバシー保護、（3）モノのインターネット（IoT）に関するデバイスやサービス、（4）ネットワーク制御・管理のための電気通信における人工知能（AI）と機械学習アプリケーションなどが挙げられます。ITUは、周波数管理や国際電気通信規則など、技術標準以外の問題にも取り組んでおり、加盟国や各種政府機関を含む枠組みの中で運営されています。ITUにおける標準化プロセスはフォーマルなものであり、標準化提案（寄書）の提出と正式な承認メカニズムにて構成されています。

私たちは、先進ネットワークアーキテクチャ、Beyond 5Gシステム、AI及び機械学習ベースのネットワークアーキテクチャ、IoTディレクトリサービス、地上系／非地上系ネットワーク（TN/NTN）の統合制御に関して、ITU-T勧告の策定に貢献してきました。

一方、IETFの活動範囲は主にインターネットとネットワーク運用の技術的側面のみを扱い、特にIP、TCP/UDP、QUICなどの通信プロトコル、パケットフォーマット、インターフェイスの詳細仕様に重点を置いています。IETFはボトムアップ方式のため、よりオープンであり、誰でもインターネットドラフト（以降、I-D）と呼ばれる仕様書提案をすることができます。I-Dは該当するワーキンググループのメーリングリストで周知・議論され、更なる議論が必要と判断されたものは、年3回開催されるIETF会議の中で議



ITU-T Study Group 13でのプレナリーセッション



IETF会議での標準化議論

論されます。議論を基に仕様改善が繰り返し行われ、ワーキンググループ及びエリアディレクタ間での合意形成の後、Request for Comments（RFC）として標準化承認されます。IETFの合意形成は、投票などを通じて標準化の賛否を問うものではなく、「Rough consensus and Running code（大まかな同意と実際に動作するソフトウェアプログラム）」というモットーに基づいて標準化すべきか判断されます（ただし、メーリングリストや会議での議論は激しく、「大まかな同意」を得るのは簡単ではありません）。

私たちは、IETFの姉妹組織であるInternet Research Task Force（IRTF）での活動も含め、マルチキャスト、モバイル通信、ネットワーク管理、情報指向ネットワーク技術（ICN）などのプロトコルに関する標準化仕様（RFC）策定を行ってきました。

これからもITUやIETFへの貢献を通じて、多様なネットワークや機器間の相互接続性・運用性を確保する国際標準化を推進し、高度なネットワーク技術やサービスのグローバルな展開に貢献してまいります。



Ved P. Kafle

（ベド・カフレ）

ネットワーク研究所
ネットワークアーキテクチャ研究室
研究マネージャー

大学院修了後、2006年NICTに入所。2018年3月から現職。次世代ネットワークアーキテクチャ研究及びITU-Tにて国際標準化活動に従事。2023年度情報通信技術賞（TTC会長表彰）。博士（情報学）。

ネットワークセキュリティ・バイ・デザイン： 信頼できるネットワークサービスの実現に向けて



Htet Htet Hlaing

（ラインティティ）

ネットワーク研究所
ネットワークアーキテクチャ研究室
研究員
博士（工学）

●経歴

1991年 ミャンマーにて誕生
2016年 ヤンゴン工科大学大学院修士課程修了
2021年 金沢大学 大学院博士課程修了
2022年 NICT 入所

●受賞歴等

2024年 第19回電子情報通信学会通信ソサイエティ論文賞（Best Tutorial Paper Award）（共著）

一問一答

Q 研究者になってよかったことは？

A 研究者であることの醍醐味は、絶え間なく革新的なことにチャレンジできることです。新しい視点でアイデアを出すことは、常に刺激的です。論文が採択され、自分の研究が認められたときは、本当に感激します。

Q 研究者志望の学生さんにひとこと

A 自分の研究に情熱を持って打ち込み、その上で、ご自身の研究をサポートしてくれる、そして知識を分かち合える先輩や同僚を見つけてください。

Q 最近はまっていること

A 生け花が趣味です。生け花教室に通い始めたのは5年前ですが、常に伝統と新しさの両面に触れることができます。自分の創造性を表現できる素晴らしい芸術です。



大量のセンサーやコンピューターから生成される膨大なデータを利活用するネットワークサービスは、様々なモノがつながるIoE（Internet of Everything）から将来のスマートシティに至るまで、日々の生活の原動力となります。しかし、膨大なデータを扱うサービスには、常に情報の機密性と信頼性に対する懸念が付きまとうため、より効率的で強固なセキュリティ機能を満たすネットワークアーキテクチャが不可欠となります。

現在の多くの通信サービスは、通信を開始する度を送受信者間で通信路を暗号化させ、その上を流れるパケットの中身（データ）を守るという手法が取られています。しかし、益々増加するデータ転送において、この手法は効率的ではなく、サービス全体の応答性能を低下させる要因となります。そこで、私たちは「ネットワークセキュリティ・バイ・デザイン」、すなわち、セキュリティやプライバシー機能がネットワーク設計時に最初から組み込まれた

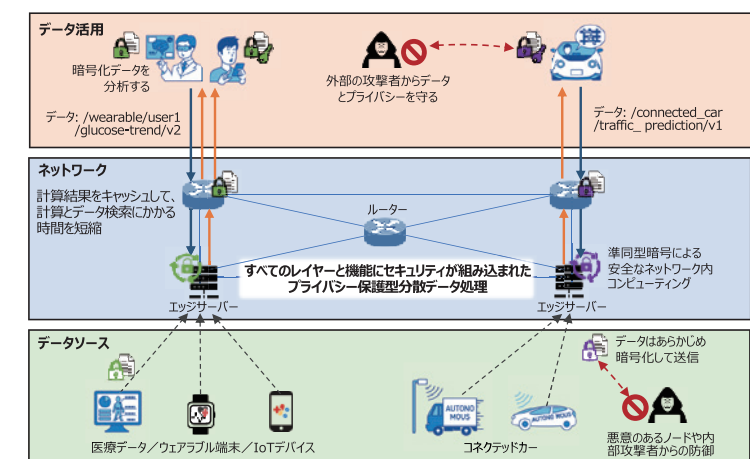


図 セキュリティとプライバシー保護が組み込まれたネットワークサービス

ネットワークアーキテクチャに関する研究をしています。提案技術では、情報セキュリティ機能をこれまでの「通信チャンネル」単位に行うのではなく、「コンテンツ」に直接関連付けることで、スケーラブルな暗号化や、きめ細かなアクセス制御を可能にし、プライバシーを意識した信頼できるネットワークサービスを実現します。

私は現在、暗号化したデータを復号化することなくデータ処理・活用が可能とな

る準同型暗号技術に関する研究を行っています。この技術は、ネットワーク内コンピューティングとキャッシュ（データ一時保存機能）をサポートする情報指向ネットワーク技術（ICN）を利用することで相乗的な効果が得られます。ここで得られたトータルソリューションは、プライバシーを保護する分散型データ処理の実現とともに、ネットワーク資源の効率化を図ります。

沖縄電磁波技術センター OKINAWA ELECTROMAGNETIC TECHNOLOGY CENTER

オープンハウス 2024

11.23 10:00-16:30
※ 入場無料・雨天決行
※ 屋外イベントは天候により中止することがあります

科学を身近に感じられるイベントを開催！

研究者も登場！

新世代の気象レーダーを見てみよう

レーダー鉄塔見学ツアー
Tour of Radar Tower

時間 ①11:00 ②13:00
③14:00 ④15:30
対象 小学生（保護者同伴）以上

ライダーってなんだろう？
ライダーのおはなし
Talk about Ladar

時間 14:30

宇宙とつながる光通信
空間光通信施設公開
Space Optical Communication Facility Tour

時間 ①12:00 ②13:30 ③15:00

光通信のおはなし
Talk about Optical Communication

時間 11:30

わくわくワークショップ

電波の伝わり方をラジコンカーで実感

ラジコンカー 事前申込
Learn Radio Wave with RC car

時間 ①10:30 ②12:30
③14:00 ④16:00

しくみが分かったとおもしろい！

おもしろ電波教室
Radio Handcraft Workshop
※協力：沖縄総合通信事務所、沖縄県電波適正利用推進員協議会

ラジオ作り 事前申込 時間 ①10:30 ②13:30
Let's make a radio! 対象 小学4年生以上

電子ブロック製作 時間 10:00 ~ 16:00
Electronic Blocks

事前申込

受付開始
10/25（金）
13:00

事前申し込み・詳細はこちらから！
For details and pre-registration,
please visit our website!
Pre-registration starts from
13:00 on 25th October.

まだまだあるよ

- 不法無線局探索車 & 電波発射源可視化装置の展示 ※協力：総務省沖縄総合通信事務
- アマチュア無線局の体験運用 ※協力：日本アマチュア無線連盟沖縄県支部

ジェンダーギャップ会議

主催：日本経済新聞社 日経 BP

NICTは、日経ウーマンエンパワーメントコンソーシアム会員組織として、ジェンダーギャップ会議に協賛しています。

先進企業による講演やパネルディスカッションを通じて、女性活躍やダイバーシティ経営の課題・解決策を徹底討論します。

パネルディスカッションに、ネットワーク研究所ワイヤレスネットワーク研究センターワイヤレスシステム研究室板谷 聡子 研究マネージャーが登壇します。

開催日 2024年 12月 6日（金）

開催形式 ハイブリッド開催（会場聴講 + オンライン聴講）

会場 室町三井ホール & カンファレンス

参加費 無料（事前登録制）

ジェンダーギャップ会議 2024年 12月

検索