

インターネットをつなぐ基盤から計算する社会基盤へ



研究室紹介

小 泉 佑 揮*

Transforming the Internet from Communication Infrastructure
to Computing-Enabled Social Infrastructure

Key Words: In-Network Computing, Networked Computing Infrastructure,
AI Data Centers, Security and Privacy

はじめに

当初は、専門家の技術であったインターネットは、メールやWebなどのキラーアプリケーションにより、誰もが日常的に利用する技術として社会に浸透しました。さらに、現在では、遠隔会議、金融取引、医療・教育・行政サービス、そして急速に発展しているAIまで、多様な社会・産業活動を支える重要なインフラになっています。

これまでのインターネット技術開発の根底には、可能な限り単純な仕組みでパケットを目的地まで届けるという設計思想がありました。この単純さこそが、インターネットが世界規模の巨大な人工システムへと拡張できた大きな理由です。しかし現在、ネットワークに求められる役割は大きな転換点を迎えています。ネットワークには、データを運ぶだけでなく、AIやクラウドの膨大な計算を支えること、5G/6Gのような高度なモバイル通信を実現すること、通信の安全性とプライバシーを保護すること、さらに技術や社会の変化に合わせて柔軟に進化することが求められています。このような背景のもと、我々の研究グループでは、次世代のインターネットのあり方を模索し、さまざまな研究に取り組んでいます。

本記事では、その中でも特に、近年普及が進むプログラマブルなネットワーク機器に焦点を当てた研究を紹介します。このような機器の代表的な例として、プログラマブルスイッチやスマートNICがあり

ます。プログラマブルスイッチとは、従来は固定的だったパケット処理の一部を、プログラムして変更できるネットワーク機器です。スマートNICは、計算機に取り付けるネットワークカードであり、計算機のCPUから通信や計算処理の一部をオフロードできます。当研究室では、こうした機器の出現もふまえ、ネットワークを単なる通信路ではなく、計算を支え、あるいは計算の一部を自ら担う通信と計算が一体となった基盤として捉え直し、インターネットの変革を目指しています。

プログラマブルデータプレーン

研究の紹介に先立って、プログラマブルデータプレーン技術の概要を説明します。

ネットワーク機器の内部で、パケットを受信し、宛先に基づいて転送先を決定し、必要な処理をした上で次のノードへ送り出す部分をデータプレーンと呼びます。従来の機器では、データプレーンの動作は機器内部のASICに固定的に組み込まれており、導入後に変更することは容易ではありませんでした。これに対し、プログラマブルデータプレーンは、データプレーンの動作を目的に応じてプログラム可能にする技術です。

類似する考え方として、Software-Defined Networking (SDN) があります。SDNは、経路制御やポリシー管理などのコントロールプレーン機能をソフトウェア制御する技術です。一方、プログラマブルデータプレーンは、高速に流れるパケットに対する処理そのものを、ハードウェアの速度で制御する点に特徴があり、CPU上のソフトウェア処理を中心とするSDNとは一線を画しています。現在のネットワークには、異なる性能要求を持つ多様なプロトコルやサービスが収容されています。プログラマブルデータプレーンは、こうした多様な要求に対



* Yuki KOIZUMI

1981年4月生まれ
大阪大学大学院 情報科学研究科 博士後期
課程 修了(博士(情報科学)、2009年)
現在、大阪大学大学院 情報科学研究科 情報
ネットワーク学専攻 教授
TEL : 06-6879-4540
E-mail: koizumi.yuki.ist@osaka-u.ac.jp

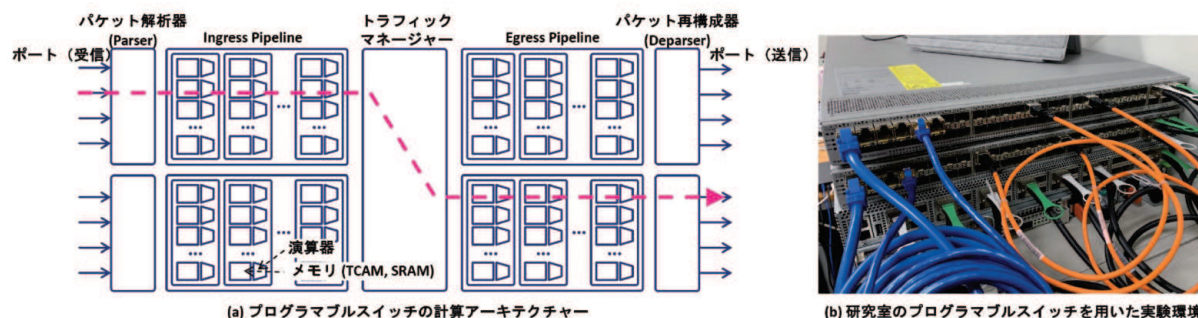


図1. プログラマブルスイッチ

し、ネットワーク機器のハードウェアレベルで適応する技術として期待されています。

また、プログラマブルデータプレーンは、従来はエッジサーバやクラウド上の計算機に送信しなければ実行できなかった計測、集約、フィルタリング、暗号処理、制御処理などの複雑な処理を、データが通過する場所で実行できる可能性を持っています。これにより、通信量の削減、遅延の短縮、異常の早期検出などの実現が期待されます。

このような期待の一方で、プログラマブルデータプレーン上での計算には厳しい制約があります。例えば、図1に示すように、プログラマブルスイッチは、演算器とメモリがパイプライン状に連結された計算アーキテクチャを持ちます。パケットはこのパイプラインを通過しながら、各段で必要な処理を受けます。この構造は、パケットを極めて高速に、かつ決められた時間で処理する上では有効ですが、一般的なCPUと同じように複雑な計算を自由に実行できるわけではありません。プログラマブルスイッチは、CPUに比べて単純な演算器しか持たず、利用できるメモリも数十MB程度に限られます。さらに、前段のパイプラインに配置されたメモリへ後段からアクセスできないことや、1段のパイプラインでメモリの読み書き回数が厳しく制限されることなど、処理の記述には多くの制約があります。そのため、これらのデバイスを用いてネットワーク内で計算を実行するには、既存のソフトウェアを単に移植するだけでは不十分であり、ネットワーク機器の構造、処理速度、メモリ制約をふまえた新しい設計が必要となります。

我々の研究グループでは、プログラマブルデータプレーンを次世代インターネットの重要な基盤技術

として捉え、どの処理をネットワーク内部で実行すべきか、どのように高速性と柔軟性を両立すべきか、そして社会基盤として信頼できる形にできるかを研究しています。

テラビット/秒級超高速匿名通信

現代的なネットワークセキュリティの実現には、一般に高度な暗号技術が必要です。しかし、高度な暗号処理は計算負荷が大きく、高速な通信を妨げます。つまり、通信の安全性と高速性の両立は、ネットワークセキュリティにおける本質的な課題の一つです。我々は、この課題を解決する手段として、プログラマブルスイッチを活用しており、その例としてテラビット/秒級の高速匿名通信を紹介します。

インターネット上の通信では、TLSなどの暗号化技術により通信内容そのものは保護されますが、通信の送信元や宛先を示すIPアドレスなどのネットワークレベルのメタデータは露出したままであり、通信内容を読めなくても、誰が誰と通信しているかという関係情報から、利用者の行動や関心が推測される脅威があります。

この問題に対処する技術として、Torに代表されるオニオンルーティングがあります。これは、複数のノードを中継した通信と各ホップにおけるペイロードの再暗号化処理により、任意の二地点でIPアドレスとペイロードの紐付けを防ぐことで匿名性を実現します。しかし、この中継ごとの暗号処理が遅く通信速度が遅いという課題があります。これに対して、送信元と宛先の関係を分離しつつ、ペイロードの暗号化を不要にする軽量匿名通信が提案されています。我々は、これをプログラマブルスイッチ上に実装可能なようにプロトコルおよび実装レベルで

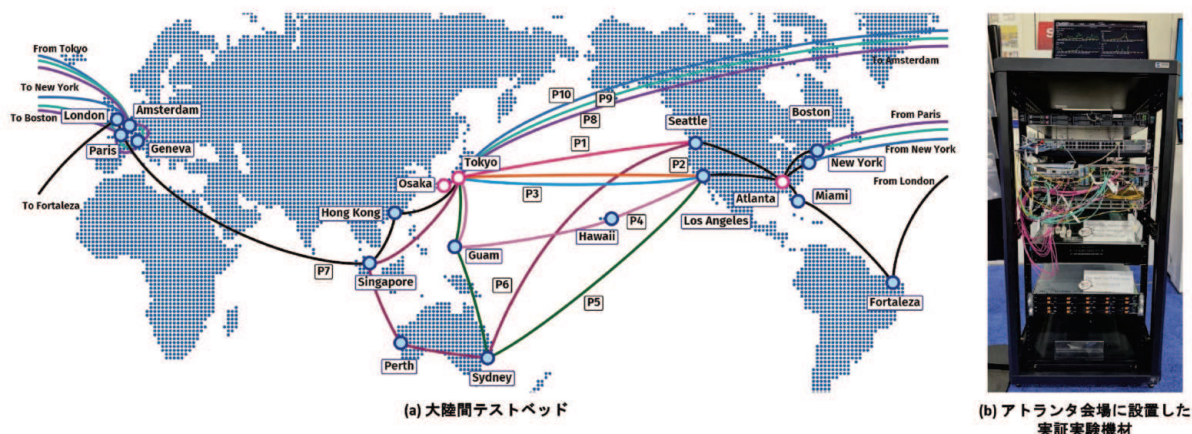


図 2. SC24 における高速匿名通信の大陸間実証実験

再設計しました。研究室内の実証実験では3.2Tbps、理論上は6.2Tbpsの匿名通信を実現しました。

さらに、本研究では、実験室内の性能評価にとどまらず、情報通信研究機構(NICT)の協力により、広域ネットワーク上での実証実験も実施しています。SC24において、JGN東京ノードと米国アトランタの会場との間に、図2に示す800Gbpsの回線容量を持つ大陸間テストベッドを構築し、開発した匿名通信を実証しました [1]。この実験では、日米間で588 Gbpsの匿名通信を達成しました。

さらに、この研究で得られた知見を発展させ、プログラマブルデータプレーンをオニオンルーティングへ応用する研究にも取り組みました。これにより、より強い匿名性を持つ通信方式に対しても、高速化の可能性を検討しています。この成果は、通信分野のトップ会議であるIEEE INFOCOMにおいて報告しました [2]。

通信と計算を融合するネットワーク内計算の汎用化

現在、プログラマブルデータプレーン技術のネットワーク応用を通じて得た知見を一般化し、ネットワーク内計算の汎用化に取り組んでいます。アプリケーションやストレージのクラウド化やAIの普及に見られるように、インターネットを介した計算資源の利用は社会に広く浸透しています。一方で、現在のネットワークは、依然としてデータを運ぶためのパイプとして捉えられることが一般的です。これに対し、私たちは、プログラマブルデータプレーンを活用してネットワーク自体を計算資源として利用し、コンピューティングとネットワーキングを一体

化した新しいインターネットの形を模索しています。このビジョンを具体化する取り組みとして、JSTの情報通信科学・イノベーション基盤創出プログラム(CRONOS)の支援のもと、ネットワーキングとコンピューティングを融合する基盤技術の研究開発を進めています。

この構想の第一歩として、計算能力やメモリ容量に厳しい制約を持つプログラマブルスイッチ上で、任意の計算を実行可能にする仮想計算機を設計・実装しました。これは、プログラマブルスイッチをチューリング完全な計算デバイスとして利用可能にする技術です。さらに、C言語のような汎用プログラミング言語で記述されたプログラムから、この仮想計算機上で実行するネットワーク内計算コードを生成するコンパイラ基盤も開発しました。これにより、スイッチ固有のハードウェア制約を利用者が直接意識することなく、ネットワーク内の任意のプログラマブルスイッチ上で任意の計算処理を実行するための基礎が整いました。これらの成果は、2026年のIEEE INFOCOMで発表しました。

おわりに

私たちは、研究室内でのプロトタイプ開発にとどまらず、社会実装を見据えた研究を進めています。本記事で紹介した技術についても、国内の通信事業者やコンテンツプロバイダと連携し、AIデータセンターにおける分散学習や推論基盤への応用に取り組んでいます。また、研究成果を国際会議で学術的に発表するだけでなく、国際的なインターネット研究コミュニティにも積極的に発信しています。

紙面の制約上、私たちの研究活動の一部しか紹介できませんでした。ご関心をお持ちいただけましたら、研究室のWebサイト[3]をご覧ください。

参考文献

- [1] Y. Yoshinaka, et al., “Toward Terabit-Scale Anonymous Communication Leveraging Programmable Switches,” SC24 NRE, 2024.
- [2] Y. Yoshinaka, et al., “Minimal and Fastest Anonymous Communication against Colluding Passive Adversaries,” IEEE INFOCOM, 2025.
- [3] 研究室のWebサイト, <https://icn.ist.osaka-u.ac.jp/>

