

第2部

特集2 Internet Re-Architecting

浅井 大史

第1章 はじめに

インターネットにおける基本プロトコルであるTCP/IPの仕様が1980年代前半に発行されて以来、インターネットの発展とともに様々な技術が研究開発されてきた。その結果、インターネットは現代社会および産業において必要不可欠な基盤となり、様々なアプリケーションやサービスがインターネット上に展開されている。

インターネットの普及に伴い、産業界においてもインターネット技術の研究開発が活発に行われている。仮想化技術を基礎としたクラウドコンピューティングや移动通信システムの発展により、計算機資源やデータ、通信端末が動的に移動するようになっている。また、通信への要求も多様化している。これに伴い、ネットワークもより動的かつ柔軟に制御する必要が生じ、結果としてソフトウェアによるネットワーク制御技術が発展してきた。しかし、多くのソフトウェア制御技術は、インターネット上にオーバーレイネットワークとして実装されるか、単一の管理ドメインで適用されることが前提となっており、インターネットの特徴である自律分散システム上において管理ドメインをまたいで実装・適用することは依然として困難である。そのため、管理ドメイン間のインターネット基盤の運用技術は柔軟性に欠き、BGPSecやBGP Flowspecなどの一部の拡張を除き、大きく進展していない。例えば、通信品質要求に対する動的な資源制御や運用の自動化など、単一管理ドメインでは導入されつつある機能が管理ドメイン間では実現できず、オーバーレイネットワークなどにより代替されることが多い。また、管理ドメイン境界の運用は、ドメイン間で異なる運用ポリシーに対して柔軟に対応するために属人化しがちであり、宣言的なネットワーク設計や運用自動化な

どの技術も導入が困難であるという課題もある。

本稿では、2021年3月のWIDE Project春の研究会BoF、8月のボード合宿(研究会)、9月の秋の研究会BoFにて次世代自律分散システムとしてのインターネットアーキテクチャについて議論したRe-Archの活動について報告する。

第2章 Re-Arch

WIDE Projectでは、2014年度に新たな地球規模の分散環境としてWIDE DESiGN (WIDE Design of Environment for Services for Innovation of the Global Network)の議論を行った。この活動の延長線で、オペレーティングシステム(OS: Operating System)やデータフローコンピューティングのアーキテクチャの研究活動および議論を継続して行ってきた。Re-Arch(Internet Re-Architecting)では、この議論を踏襲しながら、データリンク層が多様化し、仮想化・ソフトウェア制御時代のインターネットアーキテクチャを再考している。以下に、Re-Archの前提としているデータリンク層の多様化およびネットワーク仮想化とソフトウェア制御技術、エッジコンピューティングとトランスポート層の高機能化についてまとめる。

2.1 データリンク層の多様化

Wi-Fi 6や第5世代移动通信システム(5G)など、高速大容量な無線通信システムが普及しつつある。これらの無線通信システム上でInternet Protocol (IP)による通信を実現するために、様々な技術が用いられている。例えば、移动通信システムでは、移動に伴う基地局間のハンドオーバーなど、必要なモビリティ機能を実現するためにGPRS Tunnelling Protocol (GTP)と呼ばれるトンネルプロトコルによりオーバーレイネットワークを構築している。IP

層での経路制御技術であるSegment Routingの採用も検討されている。

また、低軌道(LEO: Low Earth Orbit)衛星通信などのNon-Terrestrial Network (NTN)技術にも再び注目が集まっている。NTN技術を活用したネットワークの特徴としては、空気中の水分等の影響を受けにくい衛星間通信リンクを利用した高速通信を実現する研究がある[5]。また、動的に従来の地上通信を切り替え、併用するようなネットワーク制御を行うことで高速に移動する衛星局との通信を効率化する研究[6]などもある。

このように物理層やデータリンク層の通信技術は多様化しており、IPを支える技術はますますヘテロになってきている。そのヘテロな通信ネットワークを効率的に制御するために、柔軟かつ動的に通信を制御する技術が研究されている。また、データリンク層の多様化に伴い、IPとのレイヤ間協調技術の重要性が増している。

2.2 ネットワーク仮想化とソフトウェア制御技術

仮想化技術の発展により、Software Defined Networking (SDN) や ネットワーク機能仮想化(NFV: Network Function Virtualization)などソフトウェアによるネットワーク制御が実ネットワークに広く展開されている。例えば、SDNの一方式であるOpenFlow[7]はコントロールプレーンとデータプレーンの分離を提案し、パケットヘッダの値により分類されるフローに対し動作(パケットへの操作)を定義することで、パケットの転送処理をソフトウェアにより柔軟に制御できるようにした。これにより、ネットワーク資源に対して柔軟かつ動的な制御が可能となった。

また、近年では、OpenFlowのような専用プロトコルを扱うネットワークプロセッサではなく、EthernetやIPを処理する汎用ネットワークプロセッサを搭載したネットワーク機器をLinuxオペレーティングシステム(OS: Operating System)から管理・制御するCumulus Linux Network[8]などのNetwork Operating System (NOS)が開発されている。このような汎用ネットワークプロセッサを搭載したネットワーク機器はホワイトボックススイッチと呼ばれており、LinuxベースのNOSを用いることで

Linux OSを搭載したサーバと同様の管理手法・ツールが使えることから大規模なデータセンタネットワークなどで利用されている。

さらに、P4[9]に代表されるような汎用プログラマブルネットワークプロセッサや、ネットワークインターフェイス(NIC: Network InterfaceCard)にFPGAを搭載し多機能なパケット処理を実現するSmart NICも登場している。このように、ネットワークの制御やパケットの処理を柔軟かつ動的に変更できる(プログラムできる)ようになりつつある。しかし、このような仮想化技術によりネットワーク資源や計算資源が抽象化され、実ネットワークに展開されているが、特に複数の管理ドメイン間において、その制御技術については確立していない。

コンピュータシステムにおいて、ハードウェアの抽象化と資源管理はOSが担ってきた。ネットワーク機器におけるOSとしては、ホワイトボックススイッチで用いられるNOSがあるが、NOSは汎用ネットワークプロセッサの抽象化によりハードウェアの制御を実現しているが、資源管理はオーケストレータのような外部の調停機構として実装されている。インターネット全体を大きな分散コンピュータシステムとして考えると、計算機資源とネットワーク資源を協調して制御する技術、つまりOSにあたる機能が必要であると考えられる。

2.3 エッジコンピューティングとトランスポート層の高機能化

AR/VR (Augmented Reality/Virtual Reality) やクラウドゲーミングなどの高精細度映像に対してインタラクティブに操作するアプリケーションの登場や移動通信システムの低遅延化に伴い、通信の伝搬遅延削減を目的として端末に近い場所に計算機資源を配置するエッジコンピューティングも注目されている。エッジコンピューティングについては移動通信などの地上通信のみに限らず、通信用人工衛星に計算資源を搭載することでデータセンタの建設が困難な地域のエッジコンピューティングも提案されている[10]。また、ネットワーク内で計算を行うin-network computingという研究分野もあり、Internet Engineering Task Force (IETF)においてもInternet Research Task Force (IRTF)のCOINRG

(Computing in the Network Research Group)にて議論が進んでいる。

Active Network[11]のように計算とネットワークを一体で考える研究は長く行われてきた。一方で、インターネットはエンドツーエンド原則を採用しており、“Dumb network with smart end-hosts”という言葉に代表されるように、ネットワークには単純な機能のみを実装し、高度な機能は端末(エンドホスト)に実装することで規模対応性のある通信アーキテクチャを実現してきた。この原則は現在のインターネットにおいても継承されている。しかし、実際には、TCP最適化装置やFirewall、透過プロキシによるマルチメディアファイルの動的変換(Transcoding)など、様々なミドルボックスと呼ばれる中間装置が導入されている。これらのミドルボックスはエンドホストからは透過的に見えるように導入されてきたが、エッジコンピューティングやin-network computingではエッジの計算機資源となるエンドホストの選択や適切な機能にルーティングするための通信路の制御が必要となる。また、IRTF COINRGにおいて、in-network computingに適用可能なトランスポート層プロトコルが存在しないことが課題として挙げられている。

なお、トランスポート層プロトコルも変革期を迎えており、IP層におけるActive Queue Management (AQM)やExplicit Congestion Notification (ECN)を活用したLow Latency, Low Loss, Scalable Throughput (L4S)[12]のような輻輳制御の高度化が起こっている。また、QUIC[13]のようなエンドツーエンドでの暗号化によりセキュリティ・プライバシー保護へ対応し、TCPにおけるHead-of-Line Blockingを防ぐ機能を備えた新しいプロトコルも標準化されている。一方で、トランスポート層プロトコルヘッダも暗号化されるようになり、従来のネットワーク運用で用いてきた手法が適用できなくなることも指摘されている[14]。

このように計算機資源の局所性を考慮したネットワーク制御やIP層の高機能化により、トランスポート層の考え方も従来のエンドツーエンド原則に従う部分と拡張が必要な部分が存在している。その中で、ネットワーク資源と計算資源やデータをひとつのコンピュータシステムと

考えた場合、ミドルボックスなどを含めたレイヤー構造を再検討し、将来のトランスポート層プロトコルの設計をすることが重要であると考えられる。

第3章 トランスポート層の分析と再設計

Re-Archの課題は多岐に渡るが、今年度はトランスポート層に着目し、その分析と再設計に取り組んだ。この取り組みはIETFにて標準化活動を行っている[15]。

トランスポート層を分析・再設計する上で、インターネットにおけるエンド・ツー・エンド原則のパラダイムとは異なるものの、既に広く普及しているまたは今後展開が検討されているミドルボックスやエッジコンピューティング、in-network computingのような計算・通信パラダイムについて検討する必要がある。これらの計算・通信パラダイムの実装は、既存のインターネットアーキテクチャを拡張するか、オーバーレイネットワークとして構築されていることが多い。そのため、同一の機能が異なるレイヤーに実装されることや複数のレイヤーに冗長に実装されることが少なくない。

我々は、これらの計算・通信パラダイムにおけるトランスポート層の担う機能について分析・整理し、ミドルボックスやエッジコンピューティング、in-network computingなどを含めた現在のインターネットサービスにおけるトランスポート層の機能を図1のように整理し、データパス層とデータフロー層に分離するアーキテクチャを提案した[11]。

データパス層は、通信経路に関する機能である経路のモニタリング(in-band trajectory monitoring)、中継点管理(waypoint management)、双方向通信接続(bidirectional connection)、通信品質モニタリング(quality monitoring)、輻輳制御(congestion control)、データフロー多重化(data flow multiplexing)、パケット冗長化(duplication)などの機能を提供するものとして定義した。

データフロー層は、データパス層の上位レイヤーであり、

再送制御(retransmission)、フロー制御(flow control)、優先度制御(flow prioritization)、エンド・ツー・エンドセキュリティ (end-to-end security)、多重化されたフローの分離(inverse multiplexing over multiple data paths)など、トランスポート層の機能のうち経路に依存しない機能を提供するものとして定義した。

今後はこの提案を元に、既存のトランスポート層のプロトコルを分析し、トランスポート層のアーキテクチャについての標準化に取り組む予定である。

第4章 まとめと今後の予定

本稿では、多様化するデータリンク層および仮想化・ソフトウェア制御を前提としたインターネットアーキテクチャの再考を行っているRe-Archの活動について報告した。現在はトランスポート層についての分析および再設計についての提案が中心であるが、トランスポート層と同様に、IP層や多様化したデータリンク層についても調査・考察し、現在のインターネットアーキテクチャにおける各レイヤーの機能を整理する予定である。また、移動通信システムにおけるトンネルやオーバーレイネットワークの抽象化とアーキテクチャも検討したい。既存のインターネットアーキテクチャを見直し、新たなアーキテクチャとして設計することで、将来のプロトコル設計・実装およびソフトウェア開発、運用技術の研究開発の方向性を明らかにできると考える。

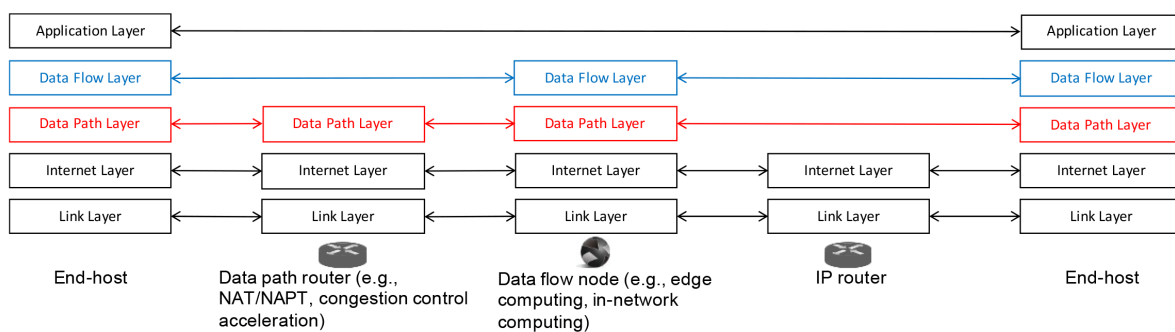


図1 データパス層とデータフロー層の分離提案