

## 第13部

## vSIX WG: IPv6前提インターネットの運用実験基盤

豊田 安信、深川 祐太

## 第1章 vSIX WGについて

IPv6 Single-stack Infrastructure eXperimental network Working Group (以下vSIX-WG)は、将来のインターネットを支える運用技術及びアプリケーションの開発・IPv6-Readyな高度人材の育成・次世代サービスを支えるネットワークのオペレーションを目的としたIPv6技術のためのワーキンググループ(以下WG)である。本WGは2021年5月12日にWIDEプロジェクトのワーキンググループとして発足し、テーマやタスクごとにいくつかの分科会に分かれて活動している。各分科会は担当するサービスの開発や、様々な研究トピックを追求する活動を行っている。

## 第2章 vSIXネットワークについて

vSIX WGでは、WIDEインターネットとは独立した独自のネットワーク(以後vSIXネットワーク)を保有しており、AS4690としてインターネット自律システム(以後vSIX AS)を運用している。vSIXネットワークはすべてIPv6のみで構成されており、IPv6 Single-Stack運用技術をはじめとした、様々なネットワーク関連技術の実証実験網として活用されている。

AS4690として独自のインターネット自律システム(以下vSIX AS)の運用を通して、IPv6 Single-Stackネットワークを構築・運営し、IPv6に関連する技術開発や実証実験を行っている。vSIX ASではWIDE ProjectからIPアドレス資源の移譲を受けており、IPv6アドレスのみならず、各種IPv4aaS[55]の提供に利用するIPv4アドレスを有している。

vSIXネットワークのトポロジーを図1に示す。現在vSIXネットワークはWIDE Projectが有する5つのNOC (KDDI 大手町(Kote), NTT大手町(Note), NTTデータ大手町(Dote), 藤沢, 本郷)から構成されている。

大手町の3拠点(Kote, Note, Dote)間は100Gbpsの高速な専用回線\*1を用いて接続されており、その他の拠点(藤沢, 本郷)とはWIDEインターネットの回線の一部を借用し、10Gbps以上の回線を用いて接続している。本年度は藤沢・Kote間を新たに接続するなど、ネットワークの冗長性向上を目的とした改善を行った。

各拠点内のネットワークを簡易に表した図を2に示す。vSIXネットワークには大きく分けて3種類のルータが存在している。一つ目は各拠点間を接続するバックボーンルータ、二つ目は各拠点内のホストのゲートウェイとなるエッジルータ、そして隣接する組織との対外接続を担当するエクスターナルルータである。

バックボーンルータはハードウェアによるパケット転送が行える従来型のネットワーク機器が担っており、vSIXネットワークへの経路情報のみを保持している。これに

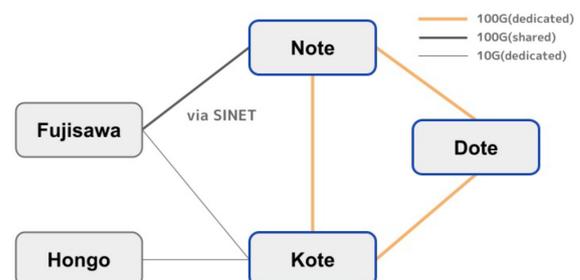


図1 vSIXネットワークのトポロジー概要

\*1 IXPOPSワーキンググループが運用するWavelength Division Multiplexing(WDM)回線から、一部の波長の提供を受けている。

より、vSIXネットワーク内のホスト間は、高速な通信が可能になっている。

エッジルータは内外へのサービスをホストとの間でブロードキャストドメインを共有しており、これらのサービスへのインターネット疎通性を提供している。エッジルータの多くは本WGにより内製されたSoftware Defined Network (SDN)コントローラによって制御されたソフトウェアルータである。通信の状態を参照した高度なアクセス制御や、遠隔地のホストへのVirtual Private Network (VPN)サービス、IPv6 Single-stack内のホストへプロトコル変換を通じてIPv4インターネットへの疎通性を提供するサービスなど、バックボーンルータでサポートするのが困難な高度なネットワーク機能を提供している。

エクスターナルルータは隣接する対外接続組織とのピアリングを担当するソフトウェアルータである。各ルータはSegment Routing over IPv6[56]およびSRv6 L3VPN[57]によって、経路情報の交換・カプセル化によるトラフィック転送を行っている。各エクスターナルルータはIPv6インターネット全体への経路情報を保持しており、エニキャストでデフォルトルートを広告することで、vSIXネットワーク内からvSIXネットワーク外へのすべての通信を転送している。また、vSIXネットワーク内のホストがSRv6によるパケットのカプセル化を行うこ

とで、任意の対外接続点にパケットを転送(Egress Peer Engineering, EPE)を行うことができる。EPEに関しては題3章で詳しく述べる。

### 第3章 Egress Peer Engineeringに関する取り組み

Egress Peer Engineering (EPE)とは、BGPによるベストパスセレクションのルールに基づかず、ネットワーク外部へのトラフィックを任意のパスから送出する技術の総称である[58, 59]。vSIX ASはWIDE Project (AS2500)とBBTower Cloud&SDN研究所(AS7530)、NTTコミュニケーションズ株式会社(AS38639)<sup>\*2</sup>の2つの組織からインターネットトランジットの提供を受けている。vSIX WGでは特にインターネットを介して提供される様々なコンテンツの配送品質の向上を目指して要素技術の開発や、vSIXネットワークを利用してこれらの技術の実証実験を実施している。本章ではこれらの取り組みを代表して、豊田の博士論文[60]の概要を簡単に述べる。

インターネット上でコンテンツサービスを提供する事業者にとって、利用者が体感するサービス品質の向上が競争力や収益に直結する重要課題であることに着目したものである。従来の組織間接続環境では、配信品質に基づいた対外接続経路の選択と利用が困難であったため、本研

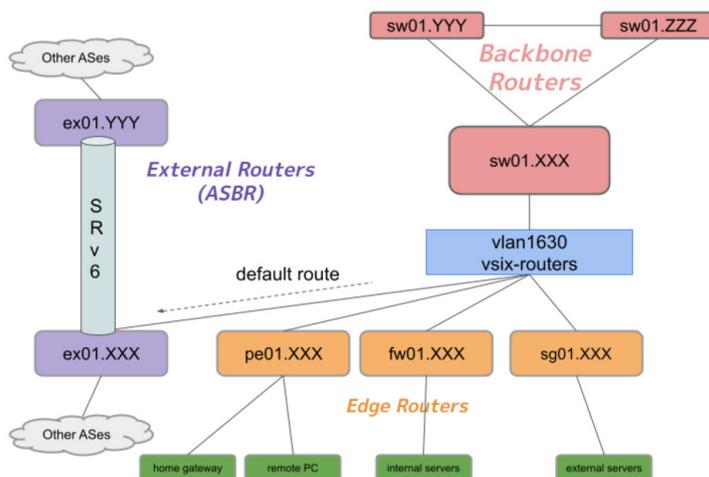


図2 各拠点のネットワーク

\*2 NTTコミュニケーションズ株式会社イノベーションセンターが運営するTestbedネットワーク

究では、事業者が保有する冗長経路に焦点を当て、コンテンツサーバが対外接続経路を主体的に選択・利用することで、配信品質を最大化する運用モデル「Performance Aware Egress Traffic Engineering (PAE-TE)」を提案した。PAE-TE実現に際しての技術的障壁を整理し、解決策を論じるとともに、事前評価手法として「Performance Aware Egress Path Discovery (PAE-PD)」を提案した。PAE-PDは、冗長経路の利用によって見込まれる配信品質向上効果を定量的に計測するための手法であり、大規模な計測実験の結果、最大で15%のユーザにおいて30Mbpsのスループット向上、また最大で13.7%のユーザにおいて10msのRound Trip Time (RTT)改善が確認された。さらに、PAE-TEに基づくメカニズムとして、「Multipath Transport SRv6-EPE (MP-EPE)」を提案した。MP-EPEは、コンテンツサーバが任意の対外接続経路を利用可能にする「SRv6-EPE」、各サーバ間で利用可能な対外接続経路を共有するSRv6 L3VPN、さらにサービスに適した経路ヘトラフィックを動的に制御するMultipath Transportから構成される。仮想環境下での評価実験においては、本手法がネットワーク環境の変化に柔軟に対応し、対外接続経路を選択的に利用することで配信品質の向上を実現することが明らかとなった。また、実際のインターネット環境での配信試験においても、ほとんどの利用者に対してスループット向上が確認され、本手法の有効性が実証された。

これらの取り組みは、アプリケーション中心のトラフィックエンジニアリングの可能性を切り拓くとともに、幅広いコンテンツサービスにおける高品質な配信実現に寄与することが期待される。

---

## 第4章 論文・対外発表等

---

下記に本WGの取り組みに関連する対外発表等を列挙する。

### 4.1 査読付き国内論文誌

- Yasunobu TOYOTA, Wataru MISHIMA, Koichiro KANAYA, and Osamu NAKAMURA. Performance aware egress path discovery for content provider with srv6 egress peer engineering. IEICE Transactions on

Information and Systems, Vol. E106.D, No. 5, pp. 927–939, 2023. [61]

### 4.2 学位論文

- 豊田安信. Egress peer engineering による高品質なコンテンツ配信技術(本文). Diss. 慶應義塾大学, 2024.[60]

### 4.3 その他発表

- K. Sawada, R. Nakamura and K. Uehara, "Integrating Netfilter into SRv6 Routing Infrastructure of Linux as an SR-Aware Network" 2024 International Conference on Information Networking (ICOIN), Ho Chi Minh City, Vietnam, 2024, pp. 251-256[62]

---

## 第5章 今後の活動

---

本稿ではvSIX WGが2024年度に取り組んできた活動の概要について報告した。本WGは、WIDEプロジェクトのワーキンググループとして設立して以来、IPv6移行を見据え、IPv6 Single-Stackを前提としたASの構築・運用を通じて、技術的な課題の解決および次世代を担うインフラエンジニアの育成に取り組んできた。発足当初は学生主体で活動を開始した同WGは、この4年間でインターネットの次世代を担うに足る有能な人材を数多く輩出しており、本年度はその中から博士号取得者も誕生した。さらに、創設時のメンバーの大半がすでに社会で活躍していることは、持続的な活動基盤が確立され、今後の発展に向けた重要な転換点に達していることを示している。

また、この4年間でIPv6の普及も着実に進展している。来年度は、IPv6 Single-Stack ASの運用に留まらず、将来のインターネットを形作る運用技術の開発と実践、さらに活動主体の円滑な引き継ぎや、継続的な若手の酸化促進にも注力する予定である。加えて、若い技術者・学生が気軽にvSIXネットワークの拠点として参画・追従できるよう、よりシンプルなアーキテクチャへのリファクタリングも計画している。

技術的側面では、IPv6への移行技術は成熟し、主要な開発環境やクラウド基盤もIPv6 Single-Stackでの運用が可

能となってきた。一方、各企業の社内ネットワークやISP等のマネジメントネットワークにおいては、以前としてIPv4が根強く利用されている現状がある。今後は、こうした現状を踏まえた上で、IPv6のさらなる普及と移行支援に加え、vSIX-WGが輩出した人材が、各々の所属組織において継続的なIPv6移行を主体的に行なっていくことに期待したい。