第11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、澤田 開杜、伊藤 広記、梅澤 侑平、伊藤 吉彦、鈴木 健吾

第１章　vSIX WGについて

IPv6 Single-stack Infrastracture 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，IPv6移行に向けて，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た．vSIXWGは活動内容の多様化や研究の複雑化に伴い，テーマ・タスクごとにいくつかの分科会を形成し，日々の運用・開発を行っている．個々の研究トピックについては，分科会とは別に並行して活動を行っている．

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からの 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[71]の提供に利用するIPv4アドレスを有している．

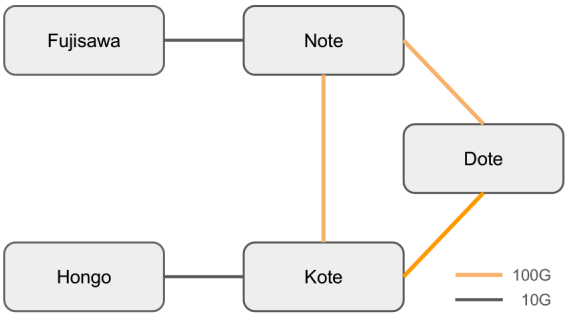

図1　vSIXネットワークのトポロジー概要

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．本年度はDote・本郷の2拠点の構築とバックボーン全体の刷新を行った．

大手町の3拠点（Kote，Note，Dote）間は100Gbpsの高速な回線を用いて接続し，その他の拠点（藤沢，本郷）とは10Gbps以上の回線を用いて接続している．対外ASへの送出に伴うBGP非対応ルータを跨ぐ拠点間の転送はSRv6を用いたL3VPNによって実現した．これによってコンテンツ提供サーバーがSRv6に対応するだけで，後述するEgress Peer Engineering（EPE）を行うことを可能にした．

第３章　SDN開発

vSIXでは，Kubernetes CRDを利用して宣言的に仮想ルータ群を管理するためのフレームワークであるKloudNFVを取り入れて，SDN基盤を開発している．

本年度は各拠点のFirewallを中央管理するSDNコントローラの開発を行った．第2節でも取り上げたように，vSIX NWの大幅な刷新が行われ，拠点の数が大きく増加した．そこで各拠点に設置するFirewallの設定を一元管理するSDNコントローラを開発した．我々 vSIX WGはネットワークをセキュリティレベルや機能に基づいて異なる区分に分割し，その間の通信を制御している．各区分に含まれるプレフィックスやルールをKloudNFVによって

管理する．来年度，実環境へ展開し，運用を開始する．

さらに現在，IPv6データセンター環境におけるIPアドレス変換アルゴリズムであるSIIT-DC[72]のエントリ管理手法の刷新に取り組んでいる．これまでリソース管理アプリケーションのWebhook機能とBGPを組み合わせたシステムによって管理していたものをKloudNFVを用いるものに置き換える．また，独自実装によって提供していたVPNサービスを廃止し，新たなVPN管理基盤を構築するプロジェクトも開始した．KloudNFVのフレームワークを利用することで，プロジェクトの一元化を行い，メンテナンス性の向上を図る．これらのプロジェクトは既に設計及び開発が進められており，次年度での実運用を目標としている．

第４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[73]．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）*1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 ASを利用してこれらの技術の実証実験を実施している．

本年度は，コンテンツプロバイダが冗長パスを用いることで得られるコンテンツサービスの品質向上を定量的に分析する機構“Performance Aware Egress Path Discovery”を開発した．本機構はSRv6[74]を利用したEPE制御手法（SRv6-EPE）によりトラフィックを冗長パスに制御し，実際のコンテンツサービスのQoSメトリクスをコンテンツサーバで収集（Passive End-to-End Measurement）することで，各BGPパスの品質差異を定量化する．図2はSRv6-EPEでのコンテンツトラフィックの流れを簡易的に表したものである．SRv6-EPEでは，コンテンツサービスを行うコンテンツサーバーがASの対外接続ルーター（Autonomous System Border Router: ASBR）が発行したSRv6 SID（Segment Identifier）をパケットに付与することにより，BGPベストパスに依らずにトラフィックを自由に制御することが可能になる．vSIX WGではこの分析機構を利用して約10万人のサービス利用者を対象とした計測実験を実施し，vSIX AS がEPEによる品質向上の余地が大きく有していることを明らかにした．[75]．

第５章　Linux netfilerのSRv6への統合

昨今のネットワークにはセキュリティ機能やQoS機能が求められる．[76]ルータそのものに複数のネットワーク機能をもたせるアーキテクチャに対して，近年ではそれらの機能をネットワークファンクション（NF）として分離する手法も一般的である．NFを効率的に利用する手法としてService Function Chaining（SFC）[77]というアーキテ

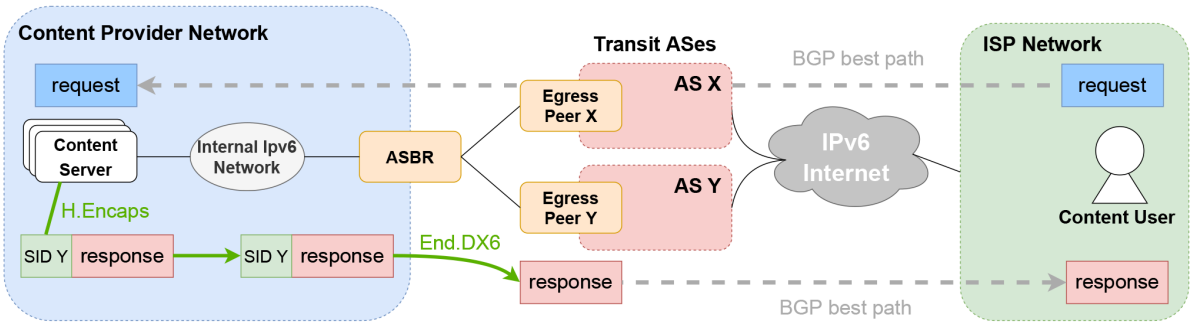

図2　SRv6-EPEのトラフィックの流れ

＊1　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

クチャがある．SFCの文脈では，NFはサービスファンクション(SF)と呼ばれる．SFCは指定したSFを指定した順番で適用するアーキテクチャであり，SFCを実現するためには一般的なショーテストパスによらない経路制御技術が必要である．SRv6はその要件を満たす技術の一つである[74]．更に，SRv6は経路制御だけではなく，転送するパケットに対して特定の操作を適用することができる．これらのSRv6におけるパケット操作をSRv6ビヘイビアという．このビヘイビアというパケット操作メカニズムはSRv6独自のものであり，SRv6は近年注目されている技術である．

Linuxカーネルにはnetfilterというパケット操作フレームワークが実装されている．netfilterはiptablesやnftablesの内部実装にも使われており，netfilterを利用することでパケットフィルタリングやNATなどのSFアプリケーションを開発することができる．これらのnetfilterを利用して作られるアプリケーションをnetfilter-based appと呼称することとする．しかし，SRv6パケットはトランジットするパケットをSRv6ヘッダでカプセル化しているため，その内部のパケットに対してnetfilterを適用することはできない．SRv6ヘッダをハンドル可能なアプリケーションを，一般にSR-aware appという．この問題を解決する最も簡単な手法はSFアプリケーションの実装を変更することである．先行研究では，iptablesを拡張したSERA[78]というアプリケーションが提案されている．SERAはiptables向けの実装であるため，他のnetfilter-based appをSR-awareにすることはできない．

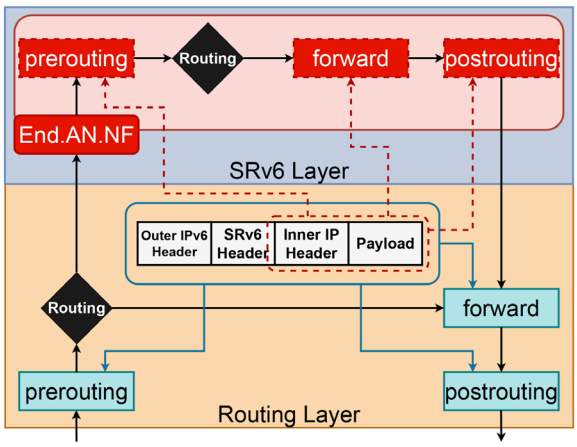

図3　SRv6-EPEのトラフィックの流れ

本年度は，netfilter-based appをSR-awareにするのではなくnetfilterそのものをSR-awareにする，というアイデアをキーとして，End.AN.NFという新たなSRv6ビヘイビアを提案した．End.AN.NFの動作の流れを図3に示す．図3において，prerouting，forward，postroutingはnetfilterフックポイントと呼ばれるもので，netfilterを利用すると任意のカーネルモジュールはLinuxネットワークスタック上に多数存在するnetfilterフックポイントへコールバック関数を適用できる．prerouting，forward，postroutingはLinuxがパケットをトランジットする際に通過するnetfilterフックポイントである．IPv6の処理レイヤで外側のIPv6ヘッダに対してそれら3つのフックポイントが適用され，End.AN.NFによって内部のパケットに対しても同様に3つのフックポイントが適用される．

提案手法をLinuxカーネルに実装し，その性能が実用的かどうかをLinuxの公式カーネルに実装されているパケット転送メカニズムと比較して評価した．結果，End.AN.NFはLinux公式カーネル既存の手法でSRv6の内部パケットにnetfilterを適用する方法に比べ，スループット及びレイテンシで常に優れたパフォーマンスであった．また，最も一般的なSRv6ビヘイビアであるEndビヘイビアと比較してもその性能の劣化は数%程度であり，十分実用的であることが示された．

本研究はICOIN2024に採択され，オーラルセッションにて発表を行った．

第６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．

6.1　査読付き国際論文誌

- 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. [75]

6.2　査読付き国際会議発表

- 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

第７章　今後の活動

本稿ではvSIX WGが2023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，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，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，技術的な課題とその解決・次世代を担うインフラエンジニアの育成を行ってきた．学生を主体としたWGとして発足して以降のこの3年間で，vSIX-WGでの活動を通じてインターネットの次世代を担うに足る人材を数多く輩出してきた．大学をはじめとする団体における3年は，活動の持続的な活動を続けることにおける大きな1つのターニングポイントに差し掛かっていることを指し示している．来年度は，IPv6 Single-Stack ASの運用，将来のインターネットを形作る運用技術の開発と実践のみならず，活動主体の引き継ぎや継続した若手の取り込み・活動への参加へも注力する．