

フレッツ光クロスと IPv6 ダイナミック DNS による拠点間 IP-VPN

志村 俊也

横浜国立大学 情報戦略推進機構 情報基盤センター

shimura-toshiya-sv@ynu.ac.jp

Site to Site IP-VPN Using FLET'S HIKARI CROSS and IPv6 Dynamic DNS

Toshiya Shimura

Information Technology Service Center, Organization for Information Strategy and Promotion, Yokohama National University

概要

横浜国立大学と附属学校間の拠点間 IP-VPN を、NTT 東日本の「フレッツ光ネクストとフレッツ VPN プライオ」による運用から、「フレッツ光クロスと IPv6 ダイナミック DNS サービス」による運用に変更し、高速化を実施した。本稿では、この IPv6 ダイナミック DNS による IP-VPN の安定運用の評価、及び、変更後のスループットの改善について報告する。

1 はじめに

横浜国立大学（横浜市保土ヶ谷区常盤台；以後、本学）は、本学キャンパス以外に3箇所の学外拠点：附属横浜小学校（横浜市中区立野；以後、立野地区）、附属横浜中学校・特別支援学校（横浜市南区大岡；以後、大岡地区）、附属鎌倉小学校・中学校（鎌倉市雪ノ下、以後、鎌倉地区）を有している。本学キャンパスと各地区は、NTT 東日本のベストエフォート型 1Gbps 回線「フレッツ光ネクスト；以後、ネクスト回線」と IP-VPN サービス「フレッツ VPN プライオ」を利用して、IPsec による IP-VPN 接続を行っており、各地区は本学、及び SINET を経由してインターネットに接続している。

各地区では、2019 年度から始まった文部科学省の「GIGA スクール構想の実現」[1]により 1 人 1 台端末環境が整備され、クラウドを活用した学習活動が行われている。クラウドサービスの安定的な利用には、各地区のインターネット接続の高速化が必要不可欠であり、本学のネットワーク整備における重要課題の 1 つとなっている。そして、この事は、多くの初等中等学校共通の課題であり、様々な取り組みがなされている[2-5]。

各地区のインターネット接続を高速化するには、地区内（附属学校内）ネットワーク⇔SINET 間

の全経路を高速化する必要があるが、この経路の中で、高速化が完了していない箇所が地区内ネットワーク ⇔ 本学内ネットワーク間の接続（以後、拠点間接続）である。拠点間接続を高速化するには、帯域確保型光ファイバー専用線接続サービスを利用するのが理想であるが、専用線サービスは高額であるため、3 つの地区を有する本学は、費用面の問題から導入は不可能である。このため、本学では、NTT 東日本のベストエフォート型 10Gbps 共有回線「フレッツ光クロス；以後、クロス回線」と「NTT 東日本の「IPv6 ダイナミック DNS サービス；以後、IPv6DDNS」[6]による IP-VPN へ変更することで拠点間の高速化を実現することとした。ネクスト回線からクロス回線への変更作業は、2024 年 9 月実施の学内基幹ネットワーク機器全更新に合わせて実施する。

クロス回線を利用した IP-VPN の場合、評価が必要とされる点が 2 つある。1 つ目は安定運用の評価である。クロス回線では、IP-VPN 用ルータ（以後、VPNRT）に割り当てられる IPv6 アドレスが動的であり、その IPv6 アドレスの変更頻度が不明であるため、たとえ IPv6DDNS を利用したとしても、IP-VPN の安定運用が実現できるかどうかは明らかではない。2 つ目はスループットの評価である。IP-VPN は、「10Gbps の回線速度」と「NTT 東日本の NGN 網内 IPv6 折り返し通信」の組み合わせで構築するため、インターネット上で発生する通信

混雑や障害発生の影響を受けることがなく高スループットが期待できるが、一方で「ベストエフォート型共有回線」と「IPsec によるトンネル通信」という環境下であるため、1Gbps を超えるスループットが得られるかどうかは未確認である。

このため、3つの地区の1つである鎌倉地区を、2024年9月に実施する学内基幹ネットワーク機器全更新の1年前である2023年9月に先行してクロス回線とIPv6DDNSによるIP-VPNに切り替え、上記の2点について実環境での評価を実施することとした。本稿では、この先行切り替えを行った鎌倉地区のIP-VPN接続についての評価結果を報告する。

2 ネットワーク構成

2023年9月時点でのSINET6⇄本学キャンパス⇄鎌倉地区間のネットワーク構成を図1に示す。SINET6⇄本学間は100Gbpsで接続している。本学側VPNRTは、集約レイヤ2スイッチ(以後、L2SW)を経由してキャンパスネットワークのコアスイッチに接続している。ただし、2024年9月実施のネットワーク機器更新後は、集約L2SWを経由せず、

直接コアスイッチに接続する構成となる。鎌倉地区の校内ネットワークは、鎌倉地区側RTX1300→鎌倉地区側集約L2SW→フロアスイッチ→各部屋であり、利用者機器まで1000BASE-Tでの接続を提供している。

本学と3つの地区を接続しているVPNRTはアラカサネットワークス社製AX620R-2215(以後、AX620R)で統一していたが、AX620Rは10Gbpsポートを搭載していないので、2024年9月までの限定利用VPNRTとして、YAMAHA社製RTX1300(以後、RTX1300)を用意した。RTX1300は10Gbpsポートを2ポート搭載しており、ONUとは10GBASE-Tで接続し、集約L2SWとは10GBASE-SFP+CUで接続する。IP-VPNは、IPsecによるIPv4 over IPv6トンネルで構成し、本学が使用しているクラスBのグローバルIPv4アドレス(133.34.0.0/16)の中の5個のクラスCのサブネット(133.34.XXX.0/24)を鎌倉地区側で利用できるようにする。

本学側・鎌倉地区側のRTX1300の回線側ポートに設定するIPv6アドレスは、クロス回線側からDHCPv6-PD方式で動的に割り当てられる。

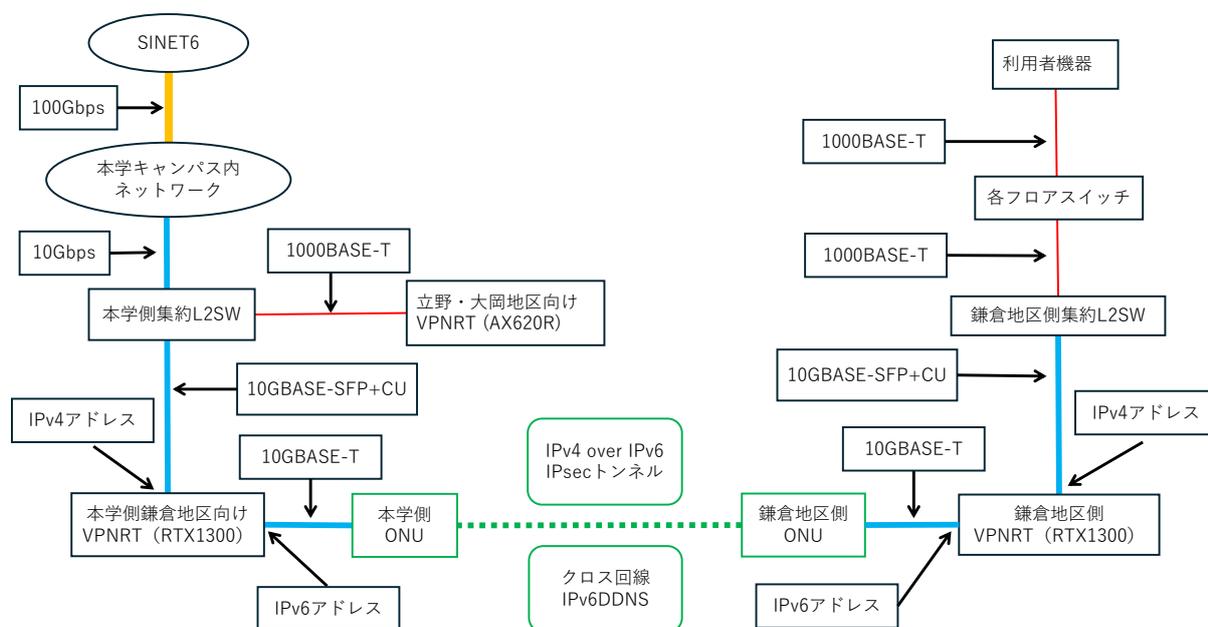


図1 SINET6⇄鎌倉地区間のネットワーク

DHCPv6-PD 方式であるため、128bit の IPv6 アドレスが割り当てられるのではなく、56bit の IPv6 Prefix が割り当てられ、RTX1300 が IPv6 Prefix と自身の回線側ポートの MAC アドレスから DUID-LL 方式で 128bit の IPv6 アドレスを生成する。IPv6 アドレスが動的生成であるため、この IPv6 アドレスを接続元・接続先に指定して IPsec による IPv4 over IPv6 トンネルを構成することは IP-VPN の安定運用の観点からは実施できない。このため、IPv6DDNS に登録した DDNS ホスト名に、この動的に割り当てられる IPv6 アドレスを紐づけ、DDNS ホスト名を接続先に指定して IPsec トンネルを構成する。

ネクスト回線からクロス回線への変更は、表 1 に示す 5 つの手順で実施した。ここで、2023 年 9 月 12 日（手順-3）のクロス回線への変更後から 2024 年 1 月 10 日（手順-4）、1 月 17 日（手順-5）までの間、集約 L2SW との接続を 1000BASE-T の状態に維持した理由を説明する。ネクスト回線はベストエフォート型であるため、常時 1Gbps の帯域が利用できるわけではない。クロス回線もベストエフォート型であるため常時 10Gbps の帯域が利用できるわけではないが、実効帯域はネクスト回線よりも大きいため、本学側、鎌倉地区側の 2 台の RTX1300 と集約 L2SW 間の接続が 1000BASE-T の状態でも、クロス回線へ変更することで、IP-VPN のスループットが改善するのではないかと推測し、このことを評価したかったためである。この評価結果については 4 章で説明する。

3 IPv6 Prefix の変更頻度評価

VPNRT の回線側ポートに設定する IPv6 アドレスが 2 章で説明した仕組みで行われるため、VPNRT の機器更新を行わない限り、IPv6 アドレスの変更は、IPv6 Prefix の変更によって発生する。IPv6 Prefix の変更頻度に関しては、多くの ISP のウェブサイト上では「半固定」と記載されているが、具体的な情報は提供されていない。一方で、NTT 東日本が公開している技術参考資料[7]には「サービスの利用状況等により IP 通信網から送信される IPv6 Prefix の値は変更される場合がある」と記載されており、半固定という表記はなく、IPv6 Prefix の変更頻度は不明である。IPv6 Prefix が変更されると、IPsec による IPv4 over IPv6 トンネルは切断される。IPv6DDNS によりトンネルが復旧するのに数分かかるため、数分間の IP-VPN 接続断が発生することになる。つまり、IPv6 Prefix の変更頻度は、IP-VPN 接続断の発生頻度と等価であり、IP-VPN の安定運用を行う上で、欠かすことのできない評価指標となる。IPv6 Prefix の変更頻度評価を行うのはこのためである。

クロス回線から DHCPv6-PD で割り当てられた IPv6 Prefix のリース時間を VPNRT 上で確認すると 4 時間であった。このことは、仕様上は 4 時間で IPv6 Prefix が変更する可能性があることを示している。しかし、実際の運用では、本学側クロス回線は手順-1 の 2023 年 8 月 24 日以降、鎌倉地区側クロス回線は手順-2 の 2023 年 8 月 29 日以降、

表 1 クロス回線への変更実施手順

	実施日	実施内容
手順 -1	2023年 8月24日	① 本学側RTX1300の10GBASE-Tポートを本学側クロス回線のONUに接続。 ② RTX1300がDHCPv6-PDでIPv6 Prefixを取得し、IPv6アドレスが生成されていることを確認。
手順 -2	2023年 8月29日	① 鎌倉地区側RTX1300の10GBASE-Tポートを鎌倉地区側クロス回線のONUに接続。 ② RTX1300がDHCPv6-PDでIPv6 Prefixを取得し、IPv6アドレスが生成されていることを確認。 ③ 本学側RTX1300⇄鎌倉地区側RTX1300の間でIPsecによるIPv4 over IPv6トンネル接続が完了していることを確認。
手順 -3	2023年 9月12日	① 本学側・鎌倉地区側集約L2SWからネクスト回線接続用VPNRTを切り離す。 ② RTX1300を本学側・鎌倉地区側集約L2SWに接続し、クロス回線によるIP-VPNに変更。 ③ 集約L2SWとRTX1300の接続は、10GBASE-SFP+CUではなく1000BASE-Tを維持。
手順 -4	2024年 1月10日	本学側RTX1300と集約L2SWの接続を、1000BASE-Tから10GBASE-SFP+CUへ変更。
手順 -5	2024年 1月17日	鎌倉地区側RTX1300と集約L2SWの接続を、1000BASE-Tから10GBASE-SFP+CUへ変更。

本稿執筆時の2024年10月12日までの約13カ月に渡って、IPv6 Prefix が変更されていないことが確認できている。なお、この13カ月の間に、本学側と鎌倉地区側の両方で、VPNRT の再起動、計画停電による1日以上の上の停止、機種更新といった多くのイベントが発生したが、IPv6 Prefix は変更されなかった。このことから、利用者側機器の再起動・停止・機種更新がIPv6 Prefix の変更要因にはならないことも確認できた。

ここで重要となるのは、IPv6 Prefix が13カ月間変更されていないことがどの程度一般的なのかという点である。この点に関しては、IPv6 Prefix の変更頻度に関するNTT 東日本の公式説明が見当たらないので断定はできないが、本学側クロス回線と鎌倉地区側の2つのクロス回線は全く独立した回線であり、この独立した2つのクロス回線の両方でIPv6 Prefix が13カ月間以上変更されていないということから、この結果が特定の条件

下で発生するものではなく、どのクロス回線でも状況は同じであると考えられる。

以上より、独立した2つのクロス回線において、IPv6 Prefix の変更が13か月間発生しなかったことから、クロス回線で動的に割り当てられるIPv6 Prefix の頻繁な変更は発生しないと評価できる。そして、変更された場合に備えて、自動でIP-VPNを復旧する仕組みとしてIPv6DDNSを利用すれば、IP-VPNの安定運用を実現できることが確認できた。

4 IP-VPN スループットの分析と評価

鎌倉地区のクロス回線への切り替え後のIP-VPNスループット評価を、トラフィック分析、及び、立野・大岡地区との比較を基に行う。スループット分析・評価は、MRTG とRRDtoolを利用して、本学側集約L2SWのVPNRT接続ポートの送受信

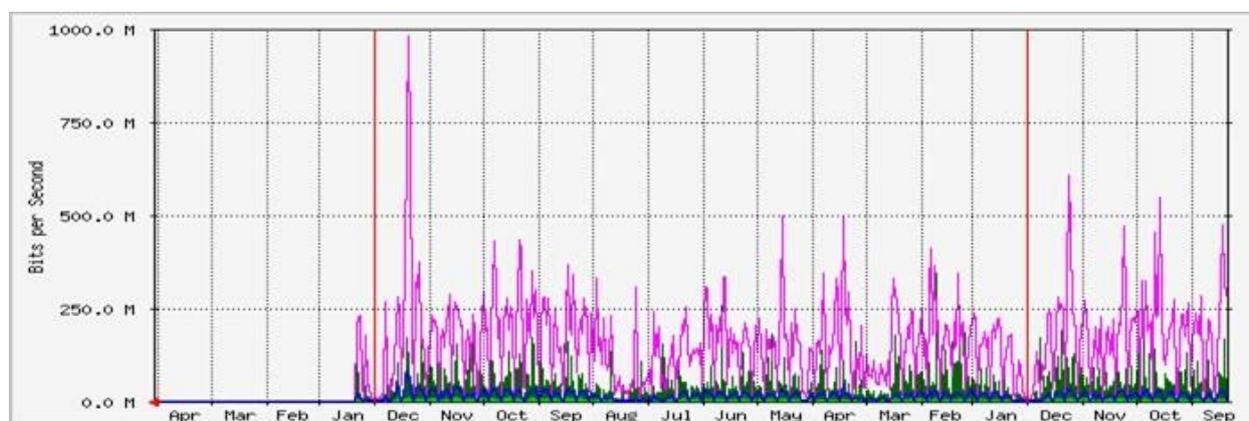


図2 鎌倉地区向け最大5分平均ダウンロードトラフィック (1000BASE-T 接続)

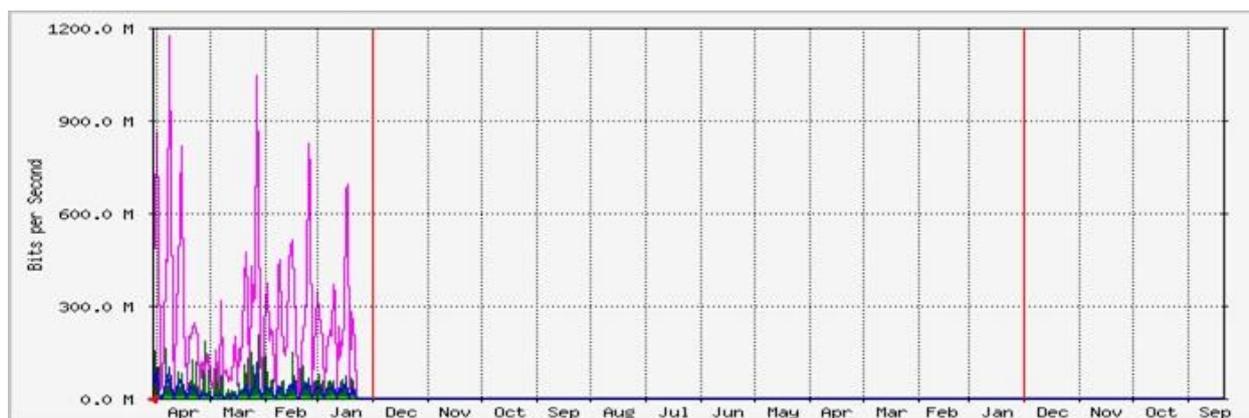


図3 鎌倉地区向け最大5分平均ダウンロードトラフィック (10GBASE-SFP+CU 接続)

送受信トラフィックデータを取得して行う。MRTG は 5 分平均のトラフィックデータ，RRDtool は 5 秒平均の瞬間トラフィックデータ取得に使用する。

図 2, 3 に示すのは，MRTG による鎌倉地区向け VPNRT 接続ポートが送受信したトラフィックである。計測期間は，2022 年 9 月 12 日（右端）～2024 年 5 月 3 日（左端）の 600 日間であり，グラフの縦軸の単位は Mbps である。図 2 は，1000BASE-T で接続しているときの送受信トラフィックであり，期間は，2022 年 9 月 12 日～2024 年 1 月 10 日（手順-4）である。図 3 は，10GBASE-SFTP+CU での接続開始以降の送受信トラフィックであり，期間は，2024 年 1 月 10 日～5 月 3 日である。マゼンタ色のグラフは『5 分平均で計測された本学→鎌倉地区方向のトラフィック（鎌倉地区側から見た場合のダウンロードトラフィック）の内，その日に計測された中の最大値を 1 ピクセル

で表し，600 日分を表示したもの』である。以後，このマゼンタ色のグラフを『最大 5 分平均ダウンロードトラフィック』と呼ぶ。他の色については本稿では取り扱わないので説明は省略する。

本学側集約 L2SW には，立野地区・大岡地区向けの AX620R も接続している（図 1）。以降の議論に必要となるため，図 4 に立野地区向け AX620R，図 5 に大岡地区向け AX620R の接続ポートが送受信したトラフィックを示す。計測期間とグラフの色の意味は，図 2, 3 と同じである。

トラフィック分析には，600 日分のトラフィックデータの内，授業実施日のみを使用する。これは，土日祝日，生徒の春・夏・冬季休業期間は，トラフィックが少なく，これらの期間のトラフィックを含めて分析を行った場合，通常利用時の状況を正しく把握できないためである。分析は，600 日間のデータを表 2 に示す 5 つの期間に分けて行ってい

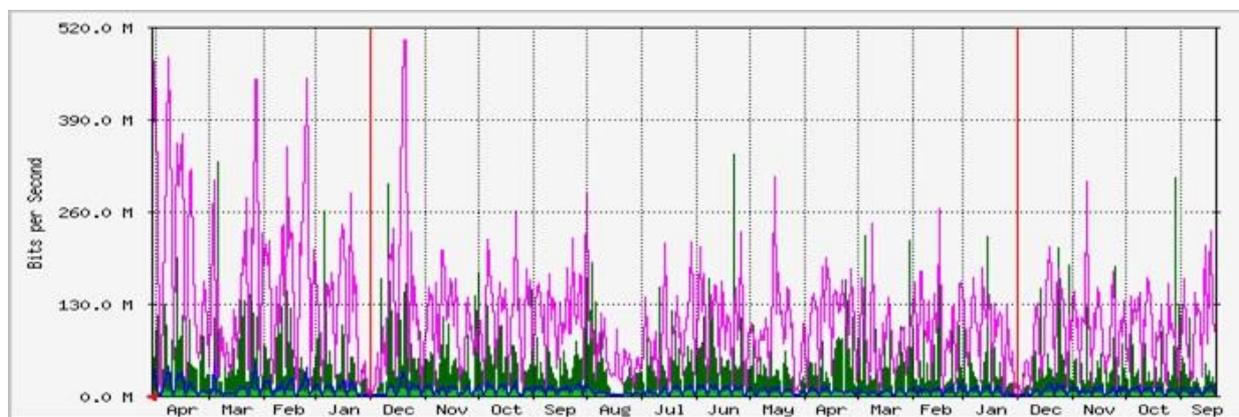


図 4 立野地区向け最大 5 分平均ダウンロードトラフィック

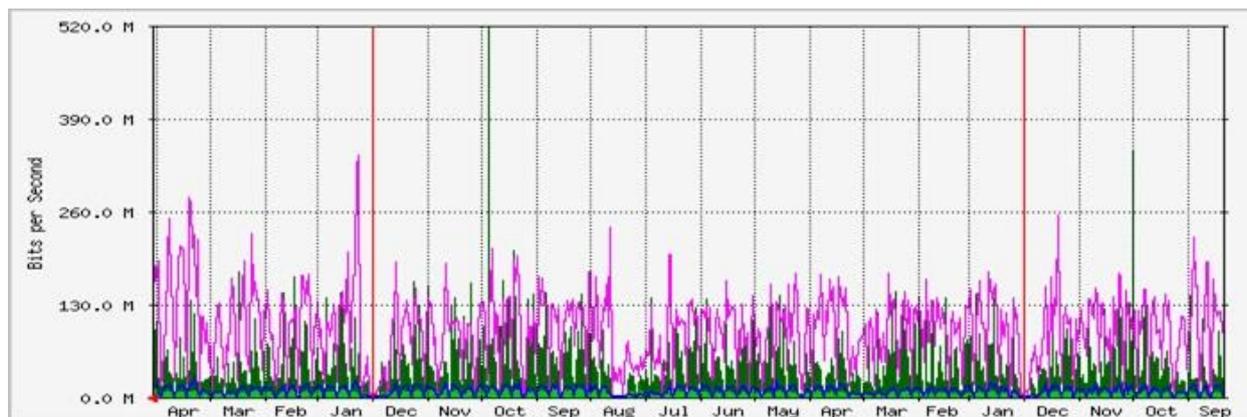


図 5 大岡地区向け最大 5 分平均ダウンロードトラフィック

表 2 トラフィック分析に使用する期間の種類

期間 -1	2022年9月12日 ~ 2023年9月11日	鎌倉地区がネクスト回線であった過去1年間
期間 -2	2023年9月13日 ~ 2024年1月9日	クロス回線への変更後も, RTX1300⇔L2SW間を1000BASE-Tで接続していた期間
期間 -3	2024年1月18日 ~ 2024年5月3日	RTX1300⇔L2SW間の接続を10GBASE-SFP+CUへ変更した後の期間
期間 -4	2022年9月13日 ~ 2023年1月9日	期間-2の1年前の同期間
期間 -5	2023年1月18日 ~ 2023年5月3日	期間-3の1年前の同期間

る. ここで, 表 1 の手順-3 の実施日である 2023 年 9 月 12 日, 及び, 手順-4 と手順-5 の間の期間(2024 年 1 月 10 日~17 日) は分析対象日に含まれていない.

表 3 に示すのは, 各地区における期間-1~期間-5 の分析対象日数, 最大 5 分平均ダウンロードトラフィックの平均値, 標準偏差, 中央値, 最大値である.

4.1 期間 2 のスループットの分析と評価

表 3 より, 鎌倉地区の期間-2 の最大 5 分平均ダウンロードトラフィックは平均値=253Mbps, 中央値=221Mbps, 標準偏差=140Mbps である. [平均値, 中央値]の増加率は, 期間-1 と比較した場合は [253/210=1.20, 221/200=1.11], 1 年前の同一期間である期間-4 と比較した場合は [253/239=1.06, 221/219=1.01]である.

立野地区の期間-2 の[平均値, 中央値]の増加率は, 表 3 より, 期間-1 と比較した場合は [145/117=1.24, 129/109=1.18], 期間-4 と比較した場合は [145/112=1.29, 129/106=1.22]である. 大岡地区の期間-2 の[平均値, 中央値]の増加率は, 図 7 と表 3 より, 期間-1 と比較した場合は [116/113=1.03, 112/111=1.01], 期間-4 と比較した場合は [116/114=1.02, 112/110=1.02]である.

期間-2 の立野地区のトラフィック増加は自然増加であり, その増加率は期間-1, 4 の平均値, 中央値のいずれの場合も, 鎌倉地区のそれらを上回っている. このため, 鎌倉地区の自然増加率を統計分析から推定することが困難であり, 期間-2 のトラフィック増加におけるクロス回線への変更の影響がどの程度なのかについて, 統計分析から評価することはできなかった. しかしながら, 図 2 に

おいて, クロス回線への変更によるスループットの改善と評価できるところが 1 箇所見られる. それは, RTX1300 と集約 L2SW の接続速度である 1Gbps と同等の 979Mbps というトラフィックが記録されている 2023 年 12 月 13 日の箇所である. 期間-1 における鎌倉地区の最大 5 分平均ダウンロードトラフィックの最大値は 603Mbps, 立野地区は

表 3 各地区の期間-1~期間-5 におけるトラフィック分析結果

		鎌倉地区	立野地区	大岡地区
期間 -1 2022/9/12 ~ 2023/9/11	分析対象日数	198	194	209
	平均値 (Mbps)	210	117	113
	標準偏差 (Mbps)	80.8	42.1	32.3
	中央値 (Mbps)	200	109	111
	最大値 (Mbps)	603	308	253
期間-2 2023/9/13 ~ 2024/1/9	分析対象日数	69	70	72
	平均値 (Mbps)	253	145	116
	標準偏差 (Mbps)	140	85.6	42.3
	中央値 (Mbps)	221	129	112
	最大値 (Mbps)	979	500	337
期間-3 2024/1/18 ~ 2024/5/3	分析対象日数	60	58	61
	平均値 (Mbps)	352	225	142
	標準偏差 (Mbps)	219	103	52.6
	中央値 (Mbps)	271	211	133
	最大値 (Mbps)	1170	476	279
期間-4 2022/9/13 ~ 2023/1/9	分析対象日数	67	68	72
	平均値 (Mbps)	239	112	114
	標準偏差 (Mbps)	88.8	43.5	36.9
	中央値 (Mbps)	219	106	110
	最大値 (Mbps)	603	231	253
期間-5 2023/1/18 ~ 2023/5/3	分析対象日数	60	58	62
	平均値 (Mbps)	206	117	113
	標準偏差 (Mbps)	76.4	39.5	29.2
	中央値 (Mbps)	196	116	117
	最大値 (Mbps)	494	263	171

全期間を通じて最大 500Mbps, 大岡地区は, 337Mbps であり, 1Gbps 近くのトラフィックは一度も計測されていない. 従って, 5 分平均で 979Mbps というトラフィックが計測されたことに関しては, 拠点間接続の実効速度増加によるスループット改善と評価できる.

4.2 期間-3 のスループットの分析と評価

表 3 から, 鎌倉地区の期間-3 の最大 5 分平均ダウンロードトラフィックは, 平均値=352Mbps, 中央値=271Mbps, 標準偏差=219Mbps である. 平均値と中央値の増加率は, 期間-1 と比較した場合は $[352/210=1.68, 271/200=1.36]$, 1 年前の同一期間である期間-5 と比較した場合は $[352/206=1.71, 271/196=1.38]$ であり, 平均値は大きく増加した. このトラフィック増加の要因には, 本学側集約 L2SW⇔鎌倉地区側集約 L2SW 間の経路が全て 10Gbps 対応になったこと, 及び自然増加の影響の両方が含まれている. そこで, 自然増加の影響がどの程度寄与しているのかを評価するため, 期間-2 の場合と同様, 立野・大岡地区のトラフィックと比較する.

立野地区の期間-3 の最大 5 分平均ダウンロードトラフィックは, 表 3 から, 平均値=225Mbps, 中央値=211Mbps, 標準偏差=103Mbps であり, 平均値と中央値の増加率は, 期間-1 と比較した場合は $[225/117=1.92, 211/109=1.94]$, 期間-5 と比較した場合は $[225/117=1.92, 211/116=1.82]$ である. 大岡地区の期間-3 の平均値と中央値の増加率は, 表 3 から, 期間-1 と比較した場合は $[142/113=1.26, 133/111=1.20]$, 期間-5 と比較した場合は $[142/113=1.26, 133/117=1.14]$ である.

期間-2 同様, 期間-3 における立野地区のトラフィック増加は自然増加であり, その増加率は期間-1, 5 の平均値, 中央値のいずれの場合も, 鎌倉地区のそれらを上回っている. このため, 鎌倉地区の期間-3 の最大 5 分平均ダウンロードトラフィックの増加の要因に, 自然増加がどの程度寄与しているかについて, 統計分析から評価することはできなかった.

図 3 において, 最大 5 分平均ダウンロードトラフィックが 1Gbps を超えている箇所が, 2024 年 3 月 5 日 (1.04Gbps) と 2024 年 4 月 23 日 (1.17Gbps) の 2 箇所に見られる. この 2 つの値は, 本学側集約 L2SW⇔鎌倉地区側集約 L2SW 間の経路の速度が全て 10Gbps にならなければ計測されることはないため, スループットが改善されていることを明確に示すものであり, 高速 IP-VPN が実現されていると評価できる.

なお, 図 3 には, 最大 5 分平均ダウンロードトラフィックが 1Gbps に近いものの 1Gbps 未満の箇所が数箇所ある. これらの箇所については, 瞬間トラフィックを計測すると 1Gbps を超えている場合がある. 例えば, 2024 年 4 月 17 日のトラフィックにおいては, 最大 5 分平均ダウンロードトラフィックの値は 814Mbps である. しかし, 同日の 08 時 ~ 09 時の 5 秒平均トラフィックを RRDtool で計測すると図 6 のようになる. 縦軸の単位は MB/s である. 青色が本学→鎌倉地区方向のダウンロードトラフィック, 緑色が鎌倉地区 → 本学方向のアップロードトラフィックである. 08 時 29 分に 160MB/s (1.28Gbps), 08 時 39 分に 140MB/s (1.12Gbps) のダウンロードトラフィックが計測されており, 高速 IP-VPN が実現されていることが示されている.

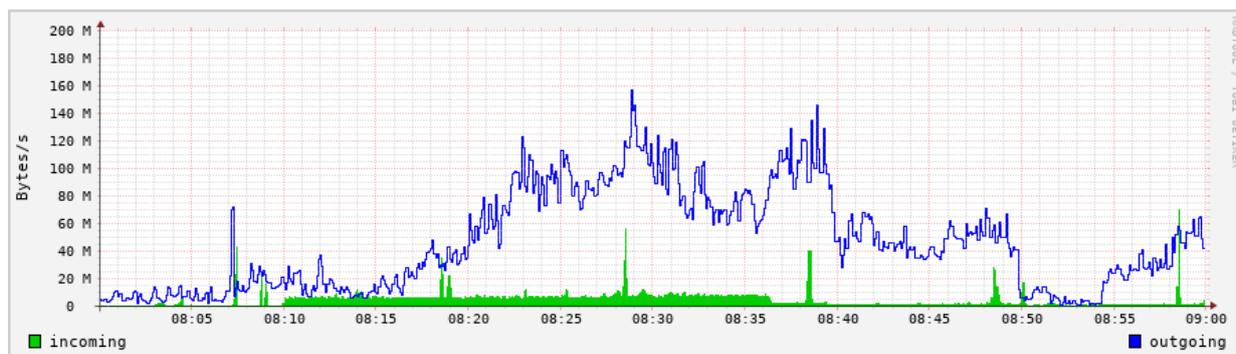


図 6 鎌倉地区向け 5 秒平均トラフィック (2024 年 4 月 17 日 08:00 - 09:00)

本論文では、高速 IP-VPN 実現の評価として、1Gbps を超えるスループットが計測されたかどうかを指標としている。この 1Gbps を超えるスループットは、生徒全員による動画教材等の容量の大きいコンテンツの一斉ダウンロードといったバースト的な高トラフィック発生時における低遅延維持対策、及び、同一の時間帯に、複数のクラスで数 100 人の生徒が同時にインターネットに接続しながら授業を受けるといった定常的な高トラフィック発生時における通信の安定性維持対策として有効に機能する。1Gbps を超えるスループットの必要性、すなわち、IP-VPN の高速化の意義はここにある。

5 おわりに

横浜国立大学と学外拠点である鎌倉地区の IP-VPN を「ネクスト回線+フレッツ VPN プライオ」から、「クロス回線+IPv6DNS」に変更することで高速化を実施した。本稿では、その安定運用、スループット改善に関する分析、評価結果を報告した。

安定運用の評価は、クロス回線から動的に割り当てられる IPv6 Prefix の変更頻度の評価で行ない、本学側、鎌倉地区側の 2 つの回線とも、IPv6 Prefix が 13 か月間以上変更されていないことを確認した。このことから、IPv6 Prefix を使用して VPNRT 自身が動的に生成する IPv6 アドレスの頻繁な変更は発生しないこと、そして、IPv6 Prefix が変更された場合に自動で IP-VPN を復旧するための仕組みである IPv6DDNS を利用すれば、IP-VPN の安定運用が実現できることが明らかとなった。

スループット改善に関する分析では、最大 5 分平均ダウンロードトラフィックにおいて 1Gbps を超えるスループットが計測され、ベストエフォート型の共有回線、かつ、IPsec による IPv4 over IPv6 トンネル通信という環境下でも、高速 IP-VPN が実現できていることが確認できた。

本稿は、AXIES が発行している論文誌「学術情報処理研究」の 28 巻（2024 年 11 月発行予定）への掲載が決定している論文[8]の一部を抜粋・追記したものである。この論文には、ページ数の制約から本稿で紹介しきれなかった内容も多数含まれ

ているので、ご参照頂ければ幸いである。

参考文献

- [1] 文部科学省：GIGA スクール構想の実現について、https://www.mext.go.jp/a_menu/other/index_00001.htm（2024 年 10 月 12 日参照）
- [2] 森下 孟, 鈴木 文彦, 永井 一弥, 東原 義訓：学術情報ネットワーク SINET を活用した初等中等教育機関の高速通信ネットワーク環境構築の課題, 学術情報処理研究, Vol. 24, pp. 1-9, 2020.
- [3] 山本 一幸, 大瀧 保広, 野口 宏, 西原 忠史, 羽濑 裕真, 外岡 秀行：児童・生徒向け情報セキュリティ対策を実施した附属学校ネットワークの構築, 学術情報処理研究, Vol. 25, pp. 46-54, 2021.
- [4] 文部科学省：学校のネットワークの現状について、https://www.mext.go.jp/content/20240426-mxt_jogai01-000035663_1.pdf（2024 年 10 月 12 日参照）
- [5] 文部科学省：学校のネットワーク改善ガイドブック, https://www.mext.go.jp/content/20240509-mxt_jogai01-000035663_001.pdf（2024 年 10 月 12 日参照）
- [6] NTT 東日本：IPv6 ダイナミック DNS, <https://ddns.e-ntt.jp/>（2024 年 10 月 12 日参照）
- [7] NTT 東日本：IP 通信網サービスのインターフェース 第三分冊 第 43 版, <https://www.ntt-east.co.jp/gisanshi/>（2024 年 10 月 12 日参照）
- [8] 志村俊也：フレッツ光クロスと IPv6 ダイナミック DNS を利用した高速 IP-VPN の評価, 学術情報処理研究, vol. 28, 2024（掲載決定）