

# エッジにおける測定からの基幹ネットワーク構成の モデリング方法の検討

## Investigation of the Modeling Method of the Backbone Network Configuration of the Measurement at the Edge

星野 柗平\* 佐藤 宏輝\* 福士 雅弘\*\* 佐藤 碧\*\* 松田 勝敬\*\*\*  
Shuhei HOSHINO \*, Hiroki SATO \*, Masahiro FUKUSHI \*\*,  
Aoi SATO \*\* and Masahiro MATSUDA \*\*\*

### 概要

Recently, with the increase in traffic due to the spread of IoT (Internet of Things) devices and cloud technology, research has been conducted to find optimal routing paths in multi-hop networks. Optimal multi-hop routing paths can be estimated by inspecting routing policies that predict delays between links and measuring actual network delays. However, while previous research has estimated the optimal route between routers on the upstream side of the network, there has been no end-to-end estimation, such as between a user's terminal and a server. In this paper, we examine whether it is possible to estimate the congestion status of the backbone network and network delay by measuring the backbone network from terminals such as PCs, tablets, and smartphones used by users at Tohoku Institute of Technology. By measuring the traffic and round trip time between each site on the Tohoku Institute of Technology campus and the servers installed on the campus, we will derive the estimated congestion status and network delay of the Tohoku Institute of Technology backbone network. As a result, by formulating an end-to-end network between user terminals and servers, we were able to estimate the congestion status and network delay of the Tohoku Institute of Technology backbone network using only measurements from the edge. Using this method, it is possible to estimate network congestion and network delay between arbitrary links in an Internet network.

## 1. はじめに

### 1.1 背景

近年、スマートフォンやタブレット端末などのモバイル端末が普及しており、日本では個人保有状況が 85%を超えている [1]。また、企業のクラウドの利用や昨今のコロナ禍による在宅勤務の拡大に伴って、テレワークの導入企業も 50%を超えている [1]。このような背景もあり、

インターネット上を流れるトラフィックの量も増加しており [2]、今後もトラフィックの増加が見込まれている。トラフィックの増加に伴って情報システムに対する負荷が増加している。テレワークの促進によって企業では **Virtual Private Network** 接続を用いた社外から社内のシステムにアクセスする仕組みを使用している。このようなネットワーク複雑化から、負荷が集中してボトルネックになっている所や、不具合が発生している箇所の特定が難しくなっている。また、セキュリティ向上のためにネットワーク監視機器の導入やシステムが継続して稼働できる能力を確保するための冗長化などによってネットワークが複雑化し、クライアント端末からサーバまでのネットワーク経路が複数存在してい

---

2023 年 10 月 2 日受理

\* 通信工学専攻 博士 (前期) 過程 2 年生

\*\* 情報通信工学科 学部 4 年生

\*\*\* 情報通信工学科 教授

る場合もある。ネットワークの経路はルーティングや物理的な配線、ネットワーク機器の設定、トラフィックなどによって変化するためネットワークの不具合発生時に不具合箇所を特定することを難しくしている。

我々は、ネットワークを「ネットワーク区間」という単位に分けてネットワークの構成を解析し、ネットワークをネットワーク区間ごとの状態により監視する手法を検討している。ネットワーク区間は、ユーザが使用する PC やモバイル端末などのクライアントからサーバ間に存在するネットワーク機器の連続した接続における、特定の機器間の接続を示す。ネットワーク区間に分けることによってネットワークが混雑している箇所やネットワーク機器の故障を細かく推測できる。ネットワーク区間を継続的に監視することによって、LAN・WAN のおおよそのトラフィックの通常状態を把握しておく。通常時のネットワーク状況を把握した上で通常時と異なる状態のネットワーク区間が見つかった場合、そのネットワーク区間周辺に不具合が発生したことが推測できる。

本研究では、LAN と WAN においてネットワーク区間の同定とネットワーク区間ごとの特徴量としてラウンドトリップタイム(RTT)とスループットについて検討した。

## 1.2 関連研究

ネットワークの構成を解析する研究は、最適経路選択に関する既存研究があり、この分野では様々な経路探索方法が用いられている。

Babangida Isyaku らの研究[3]では、マルチホップネットワーク上の最短経路についてネットワーク経路を決定する場所と決定時に利用する情報をポリシーとして定義し、クライアントとサーバ間で発生する遅延の累積を最小限に抑えるルーティングポリシーの探索を行っている。各リンク間の遅延は時間と共に常に変化するため、どのような通信状況であってもポリシーが満たされる必要がある。また、多くの場合各リンクに設置された機器やリンク間の帯域幅などの情報は未知である。よって、パケットを送信し結果を観察することによって最適経路を推定する必要やネットワークを探索し、新しいリンクまたはあまり知られていないリンクにパケットをルーティングすることで、最終的に最適なパスが見つかるとしている。

Mohammad Sadegh Talebi らの研究[4]では、Software Defined Networking(SDN)において、インターネット需要の急速な増加によるトラフィック増加に対応するため、最適経路の決定に必要な新しい経路の計算と対応する機器の最適経路情報の更新に必要な時間の点でコストが発生するとしている。また、従来の SDN では各ネットワーク機器の運用管理に重点を置き、経路決定時にリンクの品質やネットワーク機器の性能は考慮されていなかったため、最適経路の決定時に各リンクの品質とネットワーク機器の性能を考慮したジョイントパラメータを導入することによって、サーバとクライアント間の Quality of Service が向上するとしている。

これらの研究では、最適経路決定の際に各リンク間の通信品質やネットワーク機器の性能をポリシーやパラメータなどで表し、最適経路の決定に利用している。これらの研究では特定のリンク間の最適経路決定に着目しており、クライアントとサーバ間などのエンドツーエンドでの最適経路の考察は行われていない。

我々は、最適化ではなく不具合箇所の特定を目的としている。また、ネットワーク管理者ではなく普段ネットワークを利用するユーザとして実行できる手法を提案する。

## 2. 基幹ネットワーク構成の推測の概要

### 2.1 概要

学内 LAN などの環境はネットワーク機器の入れ替えや設定変更などの更新が行われな限り、ネットワーク経路は変わらないことが多いと考えられる。一方、インターネットなどの WAN 環境ではネットワーク経路が混雑状況による負荷分散などで変化することが考えられる。そこで LAN 内と WAN 内についてそれぞれネットワーク状態の推測を行った。

図1に東北工業大学学内ネットワークの構成概要図を示す。図2に測定用サーバ設置概要図を示す。東北工業大学学内ネットワークに接続された測定用サーバを用意した。測定用サーバは ipv4 アドレス 150.54.72.86 が割り振られている。表1に測定用クライアント設置場所を示す。測定用クライアントから測定用サーバに対して、「ping」「traceroute」「iperf」コマンドを実行可能な環境を用意した。学内の無線 LAN アクセスポイントが設置されている各箇所において、測定用クライアントを設置する。LAN 内の測定

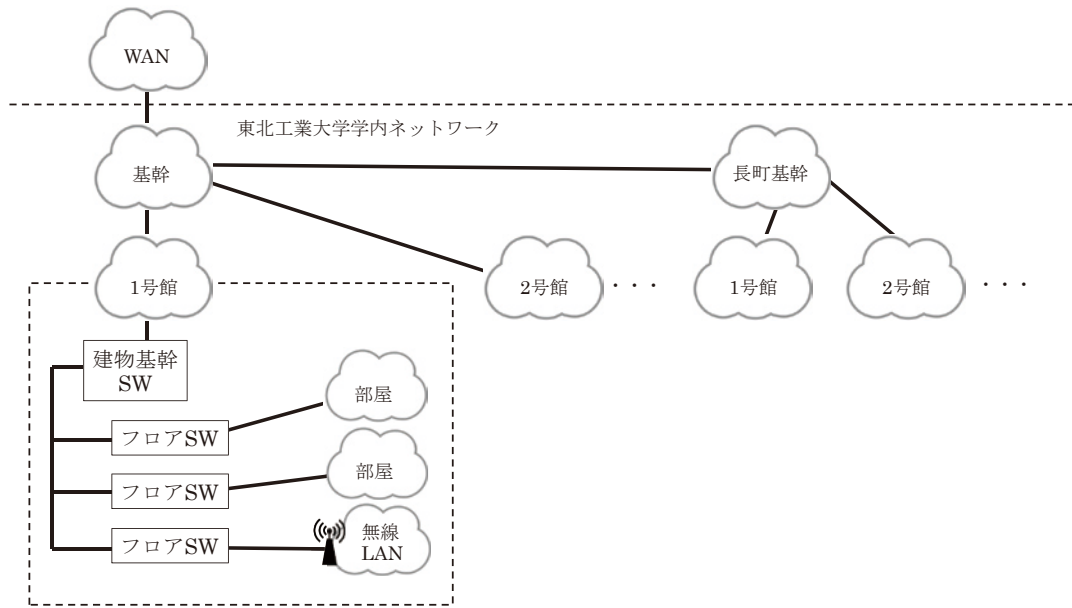


図1：東北工業大学学内ネットワークの構成概要

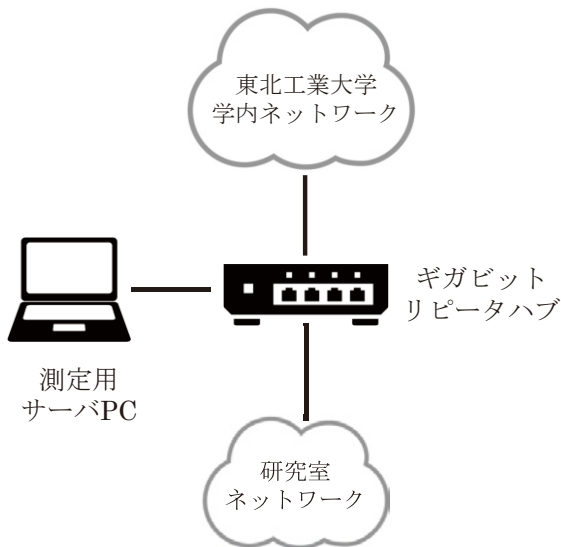


図2：測定用サーバ設置概要

は測定用クライアントから測定用サーバに対して「ping」「traceroute」「iperf」コマンドを実行した。WAN 内の測定は測定用クライアントから Google 社が提供するパブリック DNS サーバ（ip アドレス：8.8.8.8）に対して「ping」「traceroute」コマンドを実行した。WAN 内のスループットの測定はパブリック DNS サーバが「iperf」コマンドに対応していないため測定は行わない。

「traceroute」コマンドはクライアントからサーバ間の経路情報を取得し経路上のルータの ip

表1：ネットワーク測定時の測定場所

測定場所	
八木山キャンパス	1号館学生ラウンジ
	9号館916教室
	ITシステムラボラトリー
	3号館5階共通ゼミ室
	長町キャンパス
長町キャンパス	2号館R232教室
	4号館学生ラウンジ

アドレスを表示する。「traceroute」コマンド実行結果から東北工業大学ネットワークの構成の調査を行う。「ping」コマンドはクライアントからサーバに対してパケットを送信し、RTT 測定を行う。「iperf」コマンドはクライアントとサーバ間のスループット（ネットワーク帯域幅と実行速度）を測定する。測定結果をもとに、東北工業大学基幹ネットワークのネットワーク区間構成、ネットワーク区間の状態測定を行う。

## 2.2 ネットワーク区間

一般の利用者がネットワークを使用する際、通信時のデータは経路上のいくつかのネットワーク機器を通過する。ルータやスイッチなどのネットワーク機器同士をケーブルで接続することでネットワークが構成された環境においてネットワークのエッジ機器またはルータと、ルータ間の接続をネットワーク区間と定義する。

表2：LAN内ネットワーク区間同定結果

測定場所	八木山キャンパス				長町キャンパス	
	1号館 学生ラウンジ	9号館 916教室	ITシステム ラボラトリー	3号館5階 共通ゼミ室	2号館 R232教室	4号館 学生ラウンジ
ホップ数1	150.54.191.254	150.54.191.254	150.54.191.254	150.54.191.254	150.54.191.254	150.54.191.254
ホップ数2	150.54.6.6	150.54.6.6	150.54.6.6	150.54.6.6	150.54.6.6	150.54.6.6
ホップ数3	150.54.4.1	150.54.4.1	150.54.4.1	150.54.4.1	150.54.4.1	150.54.4.1
ホップ数4	150.54.72.86	150.54.72.86	150.54.72.86	150.54.72.86	150.54.72.86	150.54.72.86

表3：WAN内ネットワーク区間同定結果

測定場所	八木山キャンパス				長町キャンパス	
	1号館 学生ラウンジ	9号館 916教室	ITシステム ラボラトリー	3号館5階 共通ゼミ室	2号館 R232教室	4号館 学生ラウンジ
ホップ数1	150.54.191.254	150.54.191.254	150.54.191.254	150.54.191.254	150.54.191.254	150.54.191.254
ホップ数2	150.54.6.6	150.54.6.6	150.54.6.6	150.54.6.6	150.54.6.6	150.54.6.6
ホップ数3	150.99.198.149	150.99.198.149	150.99.198.149	150.99.198.149	150.99.198.149	150.99.198.149
ホップ数4	150.99.5.87	150.99.5.87	150.99.5.87	150.99.5.87	150.99.5.87	150.99.5.87
ホップ数5	101.203.88.173	101.203.88.173	101.203.88.173	101.203.88.173	101.203.88.173	101.203.88.173
ホップ数6	108.170.242.161	108.170.242.161	108.170.242.161	108.170.242.161	108.170.242.161	108.170.242.161
ホップ数7	216.239.58.205	216.239.58.205	216.239.58.205	216.239.58.205	216.239.58.205	216.239.58.205
ホップ数8	dns.google [8.8.8.8]	dns.google [8.8.8.8]	dns.google [8.8.8.8]	dns.google [8.8.8.8]	dns.google [8.8.8.8]	dns.google [8.8.8.8]

tracerouteにおけるルータとルータの接続がネットワーク区間に相当する。

### 2.3 ネットワーク区間の特徴量

本研究では、RTT とスループットの二つの特徴量を用いた。RTT は通信相手に信号やデータを発信してから、応答が返ってくるまでにかかる時間を示すものである。RTT は通信相手との物理的な距離や、経路上で中継・転送を行う装置などの数や装置の処理時間によって値が変化する。RTT の値が大きいとデータの送受信時に待ち時間が発生することになる。スループットは単位時間あたりのデータ転送量を指す指標で、コンピュータやネットワークの一定時間あたりに処理される情報量やデータ転送速度、通信速度を示す。

### 2.4 ネットワーク区間の同定

表 1 に測定場所を示す。測定用クライアントから測定用サーバに対して traceroute コマンドを実行した。

表 2 に LAN 内ネットワーク区間同定結果を示す。表 1 に示した場所に設置された測定用クライアントからパブリック DNS サーバに対して traceroute コマンドを実行した。表 3 に、WAN 内ネットワーク区間同定結果を示す。

## 3. ネットワーク区間の特徴量の測定

### 3.1 LAN 内の RTT 測定方法と結果

表 1 に示した場所に設置された測定用クライアントから、測定用サーバに対して ping コマンドを実行した。1 秒毎に 100 回要求パケットを送信し、100 回の平均 RTT を算出した。データ部のサイズは 32byte、TTL は 128 とした。表 4 に LAN 内の RTT 測定結果を示す。表 4 より、平均 RTT が最も大きかった長町キャンパス 4 号館学生ラウンジと平均 RTT が最も小さかった八木山キャンパス 9 号館 916 教室の差は約 2.8ms となった。

### 3.2 WAN 内の RTT 測定方法と結果

表 1 に示した場所に設置された測定用クライアントからパブリック DNS サーバに対して ping コマンドを実行した。100 回 ping コマンドを実行し、100 回の平均 RTT を算出した。表 5 に WAN 内の RTT 測定結果を示す。表 5 より、平均 RTT が最も大きかった長町キャンパス 2 号館 R232 教室と平均 RTT が最も小さかった八木山キャンパス 3 号館 5 階共通ゼミ室の差は 5.2ms となった。

### 3.3 LAN 内の スループット測定方法と結果

表 1 に示した測定場所に設置した測定用クライアントから測定用サーバに対して iperf コマンドを実行した。iperf コマンドの実行によって取得したスループット 10 秒間の平均値をその区間の

表4：LAN内RTT測定結果

測定場所	八木山キャンパス				長町キャンパス	
	1号館 学生ラウンジ	9号館 916教室	ITシステム ラボラトリー	3号館5階 共通ゼミ室	2号館 R232教室	4号館 学生ラウンジ
平均RTT(ms)	5.92	4.37	5.29	4.76	4.60	7.13

表5：WAN内RTT測定結果

測定場所	八木山キャンパス				長町キャンパス	
	1号館 学生ラウンジ	9号館 916教室	ITシステム ラボラトリー	3号館5階 共通ゼミ室	2号館 R232教室	4号館 学生ラウンジ
平均RTT(ms)	13.34	14.16	14.79	10.96	16.16	12.30

表6：LAN内スループット測定結果

測定場所	八木山キャンパス				長町キャンパス	
	1号館 学生ラウンジ	9号館 916教室	ITシステム ラボラトリー	3号館5階 共通ゼミ室	2号館 R232教室	4号館 学生ラウンジ
平均スループット(Mbits/sec)	87.9	54.9	60.6	55.8	33.4	71.0

表7：測定用クライアントの測定場所

測定用クライアントn	測定場所
n=1	八木山キャンパス 1号館学生ラウンジ
n=2	9号館916教室
n=3	ITシステムラボラトリー
n=4	3号館5階共通ゼミ室
n=5	長町キャンパス 2号館R232教室
n=6	4号館学生ラウンジ

スループットとした。表6に、スループットの測定結果を示す。八木山キャンパス1号館学生ラウンジにて測定したスループットが最も大きく87.9Mbits/secとなった。一方、長町キャンパス2号館R232教室にて測定したスループットが最も小さく、33.4Mbits/secとなった。

## 4. 考察

### 4.1 ネットワーク区間の特定

表2、表3より各測定場所によるtracerouteの結果はLAN内(表2)、WAN内(表3)それぞれ、場所に依らず同じ結果となった。また、LAN内(表2)、WAN内(表3)のホップ1とホップ2は同じであった。これらの結果より、「150.54.6.6」のipアドレスが割り当てられているルータがWANとLANへの経路の分岐となっていることがわかる。図3に推測される論理構成図を示す。図3より、「測定用サーバー分岐ルー

タ」「測定用クライアントー分岐ルータ」「分岐ルーターパブリックDNSサーバ」の三つのネットワーク区間に大まかにネットワークを分けることができる。

### 4.2 ネットワーク区間ごとのRTTの推定

各コマンドの測定結果からネットワーク区間の特徴量の各測定値を変数とし、クライアントからサーバまでの経路を方程式の形で表す。方程式を解くことで、コマンド実行による調査結果から、エッジからの測定によって東北工業大学基幹ネットワークの推定が可能か検討を行った。

特定したネットワーク区間を図4に示す。測定用サーバから分岐ルータまでのRTTを $Y$ 、測定用クライアントから分岐ルータまでのRTTを $X_n$ 、分岐ルータからパブリックDNSサーバまでのRTTを $Z$ とする。測定用クライアントの測定場

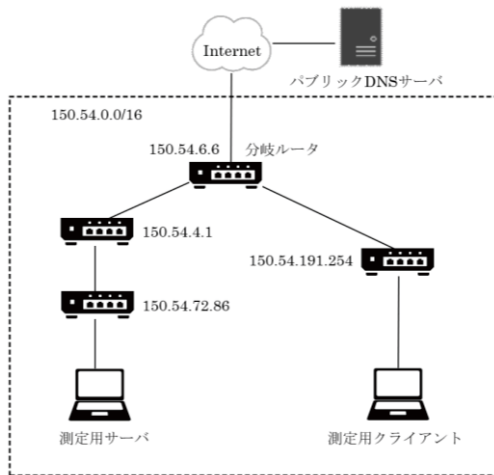


図3：推測される論理構成

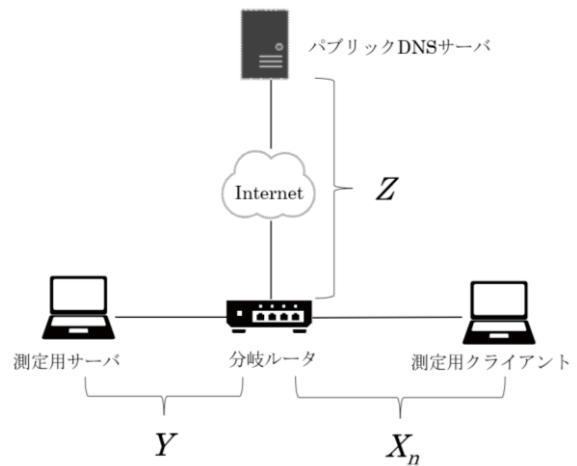


図4：特定したネットワーク区間

表8：RTT(Y+Z)測定結果

平均RTT(ms)	8.03
-----------	------

表9：変数の解

測定場所		$X_n$ (ms)	Y(ms)	Z(ms)
八木山キャンパス	1号館学生ラウンジ( $X_1$ )	5.62	0.31	7.73
	9号館916教室( $X_2$ )	5.25	-1.66	8.91
	ITシステムラボラトリー( $X_3$ )	6.03	-0.74	8.77
	3号館5階共通ゼミ室( $X_4$ )	3.85	0.92	7.12
長町キャンパス	2号館R232教室( $X_5$ )	4.44	0.17	7.87
	4号館学生ラウンジ( $X_6$ )	7.63	-0.50	8.47

所を表7に示す。測定用サーバから測定用クライアント間の平均RTTを $RTT(X_n+Y)$ 、パブリックDNSサーバから測定用クライアント間の平均RTTを $RTT(X_n+Z)$ 、測定用サーバとパブリックDNS間の平均RTTを $RTT(Y+Z)$ とした。それぞれの変数の解を求めることによって、エッジからの測定のみで基幹ネットワークに設定したネットワーク区間の特徴量を推定する。変数の解を求めるため、以下の三つの方程式を立てた。

$$X_n + Y = RTT(X_n + Y) \dots(1)$$

$$X_n + Z = RTT(X_n + Z) \dots(2)$$

$$Y + Z = RTT(Y + Z) \dots(3)$$

式(1)は測定用サーバから測定用クライアント間のRTTを表す。式(2)は、測定用クライアントからパブリックDNSサーバ間のRTTを表す。式(3)は測定用サーバからパブリックDNSサーバ間

のRTTを表す。

$RTT(X_n+Y)$ 、 $RTT(X_n+Z)$ のRTTは3節、4節で示した結果とする。 $RTT(Y+Z)$ の測定結果を表8に示す。 $RTT(Y+Z)$ の結果は8.03msとなった。この結果をもとにして、連立方程式を解くことで式(1)、式(2)、式(3)の変数を求める。表9に変数の解を示す。 $X_n$ の結果は、3.85msから7.63msとなり、3.78msの差があった。 $Y$ の結果は、-1.66msから0.92msとなり、2.59msの差があった。 $Z$ の結果は、7.12msから8.91msとなり、1.79msのばらつきがあった。 $Y$ の結果は-1.66msから0.92msとなり、値が負の結果となる測定場所も見られた。 $Z$ の結果は7.12msから8.91msとなり、1.79msの差があった。 $X_n$ 、 $Y$ の結果と比較して小さい結果が得られた。

表4と表5に示した平均RTTの結果は表2と表3の結果よりネットワーク経路が変わらないことから、測定用クライアントから測定用サーバ

間の経路は変わらないため、測定場所による差は発生しないと予想されるが、実際には差が生じていた。同様に、表 6 に示したスループットの値は測定場所によって差が生じていた。平均 RTT とスループットの値が測定場所によって変化した原因として、無線 LAN アクセスポイントと測定用クライアントとの無線 LAN の接続状況が考えられる。各測定場所に設置された無線 LAN アクセスポイントと測定用クライアントとの距離や、同時接続数などで無線 LAN 接続部分の通信が不安定であると考えられる。

今後は無線 LAN 接続を行わない測定を実施して、ネットワーク区間の特徴量の変化との関係を検討する。

また、分岐ルータの ip アドレスが判明すると  $Y$  と  $X_n$  の特徴量の値を測定することもできる。 $Y$  と  $X_n$  の特徴量について予測値と測定値を比較することにより、予測値の精度などについても検討できると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、東北工業大学学内ネットワークを使用しネットワークをネットワーク区間という単位に分けてネットワークの構成を特定し、ネットワーク区間ごとの状態を表す手法を検討した。東北工業大学学内ネットワーク(LAN)とインターネット(WAN)について `tracert` コマンドを使用することでネットワーク区間を特定できた。`ping` コマンドを使用してエッジからサーバ間の RTT を測定し、ネットワーク区間ごとの RTT を推測できた。`iperf` コマンドを用いてネットワーク区間ごとのスループットを測定することができた。

今後は無線 LAN を用いない接続による同様の測定を行い、ネットワーク区間の測定値の推定精度について検討する。また、ネットワーク機器の故障またはネットワークが混雑しているネットワーク区間を特定するため、故意にルータ設定の変更やネットワーク区間の帯域幅を減少させることによって障害が発生しているネットワーク区間が検出できるか検討を行う。

## 参考文献

- [1] 総務省 | 報道資料 | 我が国のインターネットにおけるトラヒックの集計・資産, 入手先, <[https://www.soumu.go.jp/menu\\_news/s-news/01\\_kiban04\\_02000226.html](https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01_kiban04_02000226.html)> (参照 2023-9-20).
- [2] 総務省 | 令和 4 年版 情報通信白書 | インターネットトラヒックの推移, 入手先, <<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r04/html/nd121150.html>> (参照 2023-9-20).
- [3] Babangida Isyaku, Kamalrulnizam Abu Bakar, Mohd So peri Mohd Zahid, Eman H. Alkhamash, Faisal Saeed and Fuad A. Ghaleb : Route Path Selection Optimization Scheme Based Link Quality Estimation and Critical Switch Awareness for Software Defined Networks, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Volume:11, issue:19, September 2021.
- [4] Mohammad Sadegh Talebi, Zhenhua Zou, Richard Combès, Alexandre Proutiere, and Mikael Johansson : Stochastic Online Shortest Path Routing : The Value of Feedback, IEEE Transactions on Automatic Control, Volume:63, Issue: 4, April 2018.