

降雪地におけるミリ波拠点間通信を用いたキャンパス LAN の実効性評価

原田 寛之¹⁾, 後藤 英昭²⁾, 漆谷 重雄³⁾

1) 札幌学院大学 情報処理課

2) 東北大学 サイバーサイエンスセンター

3) 国立情報学研究所

se-harada@e.sgu.ac.jp

Evaluation of the Effectiveness of Campus LAN Using Millimeter-wave Inter-site Communications in Snowy Areas

Hiroyuki Harada¹⁾, Hideaki Goto²⁾, Shigeo Urushidani³⁾

1) Information Processing Division, Sapporo Gakuin University

2) Cyberscience Center, Tohoku University

3) National Institute of Informatics

概要

有線での直接接続が難しい拠点間の通信においては、無線通信にて拠点間接続を行うことが可能であるが、降雪地の冬季では悪天候時の伝送遅延や安定性が懸念される。一方、ミリ波を使用する機器では伝送速度・遅延共に有線 LAN に匹敵する性能で接続可能な比較的安価な製品が出てきている。教育研究活動においては、より高速広帯域の無線 LAN を利用できる環境が求められてきていることから、実際にキャンパス内の有線での直接接続が難しい施設をミリ波の中でも届出・免許不要で運用できる 60GHz 帯無線設備で接続し、利用者にキャンパス無線 LAN 接続環境を試験的に提供しながら、その実効性を検証し、降雪地の冬季においてもミリ波による拠点間通信をバックボーンに用いたキャンパス無線 LAN 環境の構築が可能であることを示した。

1 はじめに

教育研究活動において、これまでキャンパス無線 LAN が整備されていなかった体育系施設の利用者からも、無線 LAN を提供してほしいとの要望が出されるようになってきた。それらの施設は LAN が既設されている拠点とは離れている上に敷地内に施設が点在しており、全てにケーブルを敷設した上で無線 LAN 基地局を設置することが難しい。このように有線での直接接続が難しい拠点間を接続する通信方式として、伝送速度や遅延共に有線 LAN に匹敵する性能を持つミリ波無線を用いた製品がある。しかしながら、北海道のような降雪地の冬季の運用については、悪天候時の伝送遅延や安定性が懸念される。

札幌学院大学ではキャンパス無線 LAN を学内の利用者・学外利用者共に教育・研究機関向けの無線 LAN ローミング基盤である eduroam [1]

を認証 VLAN でサービス提供している。また eduroam の加入機関以外の一般市民向けには Passpoint [2] を用いた市民向けの安全で利便性の高い公衆無線 LAN 接続サービスである OpenRoaming [3] を合わせて提供しており、eduroam と OpenRoaming ではどちらも認証に WPA2 Enterprise (IEEE 802.1X) が使用される。このため、エンドユーザーがクライアントの接続を完了するためには IEEE 802.1X による認証を完了させる必要があるが、特に本学が世界に先行して大学キャンパス全域で整備している OpenRoaming においては、降雪地で拠点間通信を組み合わせた構成での構築事例がまだなく、その実効性が明確ではなかった。

これを検証するため、本学の 700m 離れた 2 つのキャンパス間をミリ波の中でも届出・免許不要で運用できる 60GHz 帯ミリ波で拠点間接続し、キャンパス無線 LAN 接続環境を試験的に提供し

ながら、その実効性を検証した。

本稿では、第 2 章で遠隔拠点における通信環境整備のニーズと、拠点間接続するにあたり検討した各接続方式の比較検討、冬季降雪地で 60GHz 帯ミリ波無線設備を用いて拠点間接続した際の実効性評価について述べる。第 3 章では、実際に遠隔拠点に eduroam と OpenRoaming の基地局を設置して行ったキャンパス無線 LAN 基地局の構築と実用性の検証について述べる。第 4 章は本稿のまとめである。

2 冬季降雪地における 60GHz 帯ミリ波無線設備での拠点間接続

2.1 遠隔拠点における通信環境整備のニーズ

札幌学院大学は北海道江別市に教室や研究室を有する第一キャンパスと、体育施設を有する第二キャンパスがあり、うち第二キャンパスではキャンパス LAN は一部の建屋のみに整備されている。第二キャンパス内には弓道場・野球場・室内練習場など複数の小規模な建屋が点在しているが、学生からコロナ禍を契機にキャンパス無線 LAN 環境の整備について要望が上げられるようになってきた。コロナ禍においては、体育会系の部活動においても感染防止のため活動には制限がかけられており、また他大学と実際に競技場で行う練習試合等の実施も難しい状況にあったが、学生達は例えば弓道部においては射場と的場にそれぞれ設置した Web カメラと PC を携帯電話キャリアによるポケット Wi-Fi を用いて他大学と相互接続し、実際に同じ弓道場に集まらずとも練習試合が行える環境を整え活動を継続していた。このような通信環境のニーズはそれまで大学当局が想定していなかったものであるが、コロナ禍のような状況だけでなくとも北海道のような地方に立地する本学の学生にとっては、通信環境が整備されることでより活動の幅を広げることができると考えられ、従来キャンパス LAN を整備していなかった建屋等についてもエリア化する手法の検討を開始する契機となった。

2.2 各接続方式の比較検討

遠隔拠点をキャンパス LAN に収容する方法としてはまず、光ファイバーを敷設して有線 LAN 接続する方法が考えられる。電力用に設置されている自営柱に共架して光ファイバーを敷設することは不可能ではないが、キャンパス LAN が既設されている建屋と接続を検討する建屋の間は総延長でおよそ 1km の距離がある。総務省のデジタル・ディバイド解消戦略会議の 2008 年の報告資料 [4] によれば、光ファイバーの敷設コストは 1km で架空配線の場合およそ 430 万円が示されており、費用が高額となるため候補から外した。

電波を用いた拠点間の接続方法としては、2019 年 12 月に制度開始したローカル 5G がある。ローカル 5G では面でエリアを構成できるため、接続したい建屋が複数近距離にある場合は 1 対多で高速な接続が可能であるメリットがあるが、その運用には免許が必要であり、構築運用費用の高額さに加えて運用の属人化が懸念される。また利用者の持ち込み端末を自由にローカル 5G に接続させることもできないため、各建屋にはそれぞれ無線 LAN 基地局を設置する必要性が生じる。今回の規模では光ファイバー敷設と同等以上の費用が想定されたため、本学での導入は難しいと判断した。

屋外型の無線 LAN 基地局を既設キャンパス LAN がある建屋付近に設置し、直接遠隔拠点をキャンパス無線 LAN のエリア化する方法については、学生のニーズが映像と音声を用いた相互通信であり、数 Mbps～数十 Mbps の帯域では十分なサービスを提供できない懸念があった。また、本学のように冬季降雪地の屋外体育施設の構造は、対積雪や防寒のために頑丈な構造となっており、屋外からの電波を直接利用者端末が利用することは困難である。

また、2022 年 10 月からは米国 SpaceX が運用する低軌道衛星 Starlink [5] による衛星ブロードバンドインターネットサービスが国内でも提供開始されている。このサービスにより従来インターネット接続環境の整備が困難であった地域にも高

速インターネット回線を整備することが可能となったが、キャンパス LAN との接続のためには別途 VPN を構築するなどの必要があり、また商用サービスであるため拠点数分の月額ランニングコストが発生することなどから、検討対象から外した。

これらの検討から、今回の環境構築については以下の要件を満たすものについて導入の検討を行うこととした。

- 構築運用費用が比較的安価であること
- 構築運用にあたり免許を必要としないこと
- 学生の持込端末が自由に接続可能なこと
- 高速な帯域が利用できること
- キャンパス LAN に収容できること

2.3 ミリ波による拠点間通信の検討

拠点間を無線で高速接続する製品として、ミリ波 (30GHz~300GHz) と呼ばれる周波数帯域を用いる製品が実用化されており、国内では 60GHz 帯 (57-66GHz) を使用する V-Band の製品と、70/80GHz 帯 (71-76, 81-86GHz) を使用する E-Band の製品がある。うち、70/80GHz 帯の製品については、2011 年の省令改正により国内でも利用できるようになってきているが、無線局の開局にあたっては陸上移動局の免許を受ける必要があり、また運用者も第三級陸上特殊無線技士の資格が必要となるため、今回の候補からは除外した。

一方 60GHz 帯を用いる製品については 2015 年に電波法施行規則が改正され、証明規則第 2 条第 1 項第 19 号の 4 の 3 として、60GHz 帯小電力データ通信システムの無線局 (空中線電力 10mW 以下) が設けられ、アンライセンズバンドとして免許不要での運用が可能となった。この周波数帯域では IEEE 802.11ad (2012 年に標準化完了) の後継規格として、チャンネルボンディングや MIMO を加えた IEEE 802.11ay が 2019 年に標準化を完了している。IEEE802.11ay ではチャンネルあたりの占有帯域幅は 2.16GHz であり、4 チャンネルの約 9GHz 幅の帯域をチャンネルボンディングで使用す

ることができるため、高速大容量での通信が可能である。

しかし、ミリ波は直進性が強く、空気や障害物による減衰が起きやすいことから、本学が立地する降雪地においては、冬季の雪による通信品質への影響が懸念される。

ミリ波による拠点間通信の降雪の影響については、2010 年にミリ波帯高速無線伝送システムに関する調査検討会 (総務省信越総合通信局) が 80GHz 帯の通信装置を用いて行った調査報告 [6] が公表されており、アンテナ着雪対策を施さない場合には距離 1.39km で降雪・着雪による減衰が 30dB 程度発生することが示されている。また、2001 年には 60GHz 帯のミリ波無線伝送システムを用いて東京都で早稲田大学を中心とするグループが高速無線キャンパスネットワークの構成法に関する検討 [7] を行っており、370m 程度の距離までは空気や降雨の減衰が許容できるものとして示されている。いずれも免許不要で利用できる IEEE802.11ay による 60GHz 帯ミリ波拠点間通信にそのまま適用できるものではないが、冬季降雪地の拠点間通信方式として運用できる可能性があると考えられた。IEEE802.11ay による 60GHz 帯ミリ波拠点間通信装置について情報収集を行ったところ、該当する製品を取り扱う株式会社ビーマップより冬季降雪地における検証について協力の申し出があり、2022 年 11 月より 2023 年 3 月末まで共同で長期試験を実施することとなった。

2.4 IEEE802.11ay による 60GHz 帯ミリ波拠点間通信の検証環境の構築

検証環境の構築にあたっては、まずそれぞれの拠点に電源が確保できることが必要である。既設のキャンパス LAN が整備されている建屋であれば PoE による給電も可能であるが、遠隔拠点側の建屋にはキャンパス LAN が未整備であるため、商用電源の確保が必要となる。またミリ波による接続はその電波の直進性から経路の見通しの確保が必要となるが、本学の第二キャンパスに設置されている弓道場は他の建物や森林が障害となって

キャンパス LAN が既設されている建屋を直接視認することができない。このため、キャンパス LAN が既設されており唯一第二キャンパス側から視認できる第一キャンパスの G 館屋上と、電源が確保できる第二キャンパス体育センターの屋上をミリ波で接続し、体育センター屋上からさらにミリ波で延伸する計画とした。第一キャンパス G 館と第二キャンパス体育センターの間には公道や住宅地、他大学のキャンパス等が存在し、距離はおよそ 700m である (図 1)。2022 年度の検証においては、まずこの 700m の距離を冬季降雪時に安定して接続できるか確認することとした。



図 1 検証環境の位置関係。 [8]

検証では、台湾の Accton Technology 製の MLTG-CN LR を両拠点に配置し、P2P モードで稼働させることとした。本製品の最大通信距離は 1km (対向にも MLTG-CN LR を用いて IEEE802.11ay の MCS9 で運用する場合) である。有線 LAN インターフェースとしては 2.5GBASE-T を備えており、最大伝送速度は 1.8Gbps となっている。

機器の設置については、大学の施設管理部門の安全確認のもと、単管パイプによる架台をそれぞれの屋上に設置して取り付けた。

MLTG-CN LR はフェーズドアレイアンテナを搭載しており、対向機器の中心から 3 度のずれまでは許容されるため、700m の距離ではおよそ 36m のずれまでは接続可能である。しかし、伝送速度はずれが無い場合において最大となることから、設置にあたっては専用のターゲットスコープ (図 2) を使用した。



図 2 ターゲットスコープ。

通信品質と機器の状況を継続的に確認するため、映像配信用のカメラと監視機器を両拠点に配置し、次のような構成とした (図 3)。

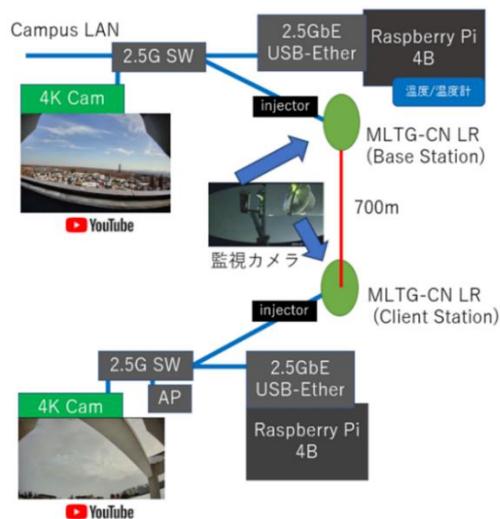


図 3 機器配置図。

両拠点には 2.5GbE の USB-Ethernet にて Raspberry Pi 4 Model B をそれぞれ設置した。Raspberry Pi 間を直接接続した際のスループットを iperf3 にて測定したところ、およそ 1.9Gbps で通信可能であった。合わせて G 館側の Raspberry Pi には湿温度スマートセンサーを接続し、検証環境の天候を簡易的に記録することとした。

キャンパス LAN 自体の安定性を拠点間通信の安定性と混同しないよう、電子計算機センターのサーバ室に設置した計測用サーバにて、両拠点の MLTG-CN LR に対し SmokePing で ping の応答状況によりネットワークの遅延状況を視覚化した。

また、より実際の利用に近い検証として、両拠点に RTMP (Real-Time Messaging Protocol) にてライブ配信可能な 4K カメラを設置し、映像を YouTube Live で公開配信した。YouTube Live は

カメラからの映像送信が途絶えると配信を自動ストップする機能があり、通信の継続性を確認することが可能である。

2.5 IEEE802.11ay による 60GHz 帯ミリ波拠点間通信の検証結果

設置した本環境において、Raspberry Pi 間で iperf3 によりスループットを測定したところ、1.3Gbps に達し、既設キャンパス LAN と遜色ない性能が得られることを確認した (図 4)。検証は設置期間中繰り返し実施し、常時概ね 1Gbps 以上のスループットが得られたことから、遠隔拠点にキャンパス無線 LAN を設置する際のバックホール回線として十分な性能を有していることが確認できた。

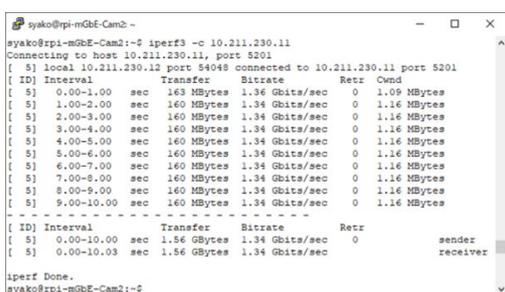


図 4 iperf3 によるスループット測定。

また計測用サーバにて両拠点の MLTG-CN LR に対し SmokePing でネットワークの遅延状況を継続的に計測した (図 5)。



図 5 SmokePing による応答時間計測。

応答時間の平均値は計測用サーバとキャンパス LAN で直接接続されている親機が平均 1.1ms であるのに対し、IEEE802.11ay により 700m の距離を接続している子機が平均 1.6ms となり、0.5ms 程度の遅延が確認できた。

検証期間中、湿温度計のデータは、2023 年 1 月 25 日早朝に -13.5°C を記録した (図 6)。

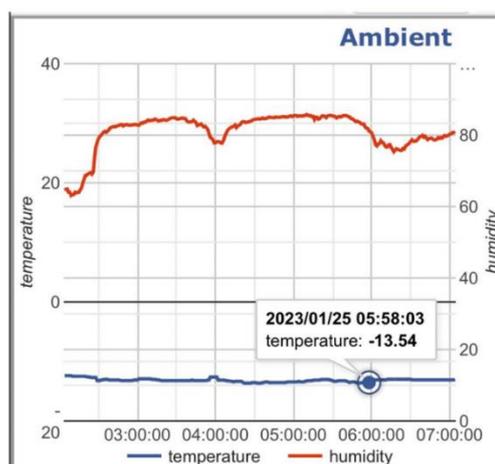


図 6 スマートセンサーによる湿温度計測。

気象庁の観測によれば、江別 (石狩地方) の過去最低気温は 2023 年 1 月 30 日の -26.6°C [9], また江別市の統計によれば近年の日最大降雪量は 2023 年 1 月 4 日の 35cm [10] であった。いずれも検証期間中に記録されたものであるが、YouTube Live のライブ配信は、2022 年 11 月 26 日の配信開始から江別キャンパスの電気設備法定点検に伴う停電を実施した 2023 年 8 月 26 日までの 6,526 時間 (271 日間)、停止することなく配信を継続できた (図 7)。



60GHz 帯長距離無線 LAN 製品「MLTG-CN LR」の寒冷地における長距離通信試験

札幌学院大学 電子計算機センター・924 回視聴・4 週間前に配信済み

図 7 YouTube Live によるライブ配信。

MLTG-CN LR には着雪対策として、アンテナ部に底が設けられており、この有効性と機器の稼働状況を確認するため監視カメラで映像を記録した (図 8)。降雪時には底上への着雪や、機器下部への氷柱の発生があるものの、アンテナ部への着雪は発生しなかった。しかしながら、監視

カメラの設置に際して建屋の屋根からの雪庇を考慮しておらず、最も積雪が深い時期には機器の状態を確認できない状況が生じた。冬季の屋上での作業は危険で行うことができないため、監視の方法については今後検討が必要である。



図 8 機器の着雪状況（上：2022/12/23、中：2023/1/19、下：2023/1/27）。

検証を通じて、着雪対策が施された MLTG-CN LR による IEEE802.11ay での拠点間接続は、バックホール回線として冬季降雪時を含め十分な品質を有することが確認できた。

これらの長期試験環境は、現在も継続して札幌学院大学 Project60GHz のウェブサイト (<https://project60ghz.sgu.ac.jp/>) で公開している。

3 バックホール回線として 60GHz 帯ミリ波拠点間通信を用いた eduroam / OpenRoaming 基地局の実用性評価

3.1 利用者に提供するサービスの構築

バックホール回線としての IEEE802.11ay による 60GHz 帯ミリ波拠点間通信の評価と並行して、利用者が実際に端末を接続する弓道場に向け、拠点間接続の延伸を試みた。具体的には、MLTG-CN LR を設置した第二キャンパス体育センター屋上を中継拠点とし、新たにラトビアの MikroTik 製の Wireless Wire を体育センター屋上と、野球場に隣接するトイレ屋上に設置することで、キャン

パス LAN を野球場付近まで延伸した。Wireless Wire は、IEEE802.11ad を使用する 60GHz 帯ミリ波通信装置であり、対向に Wireless Wire を使用する場合の最大通信距離は 200m、最大伝送速度は 1Gbps であるが、安価に入手可能である。野球場付近には合わせて MikroTik 製の屋外型基地局、mANTBox 52 15s を設置し、eduroam と OpenRoaming をそれぞれ利用できるような設定した。mANTBox 52 15s は Wi-Fi の 2.4/5GHz 帯が利用可能である。

設置にあたっては、野球場隣接のトイレ屋上では電源ができなかったため、100W の太陽光パネルにパススルー充電が可能な 320Wh のリン酸鉄リチウムイオンバッテリー (LiFePO4) を用いたポータブル電源を設置し、Wireless Wire と mANTBox 52 15s に給電する構成とした (図 9)。

LiFePO4 バッテリーは -20°C の低温環境でも使用 (放電) が可能であるものの、氷点下での充電が行えない特性がある。このため、ポータブル電源を格納するボックスには断熱材で保温措置を施すなどの対策を行った。バッテリー容量が小さいため、特に冬季の日照時間が短い時期には夜間に停止してしまう。停止したポータブル電源はその後充電されても自動的に給電を再開しないため、電源出力にタイマースイッチを設置し、学生の利用がない深夜帯には運用を停止し、翌朝給電を再開する構成とした。しかしながら、給電の停止によりシステムが停止してしまう事象を完全に無くすことは難しく、2023 年度はより大容量のポータブル電源への入れ替えと、将来的には商用電源の設置を計画している。



図 9 太陽光パネルによる基地局の設置。

この屋外型基地局では弓道場の内部までキャンパス無線 LAN のエリア化することが難しいため、株式会社ウェルソックが岩手県矢巾町で提供している屋外型基地局を加入者宅 CPE (Customer Premises Equipment) と組み合わせて行っているサービス事例 [11] を参考に、弓道場に CPE を設置してエリア化することを検討している。

3.2 Passpoint を用いる OpenRoaming 基地局のバックホール回線としての 60GHz 帯ミリ波拠点間通信の実用性検証

OpenRoaming 基地局においては、eduroam でも使用されている IEEE 802.1X 認証の前段として、基地局が発信するローミング情報をクライアント端末が受信し、自らが接続可能な場合にクライアントが自律的に接続試行を開始する Passpoint が使用されている。Passpoint におけるクライアントの接続試行の開始までは単に基地局とのやり取りで完結するが、IEEE 802.1X の認証はバックホール回線の品質が悪いと安定したサービスを提供することができない場合がある。

バックホール回線として 60GHz 帯ミリ波拠点間通信を用いた eduroam / OpenRoaming 基地局の実用性を検証するため、商用電源により安定して稼働できている体育センター屋上の MLTG-CN LR 付近に、別の OpenRoaming 基地局を設置し、検証用のクライアントで定期的に接続を繰り返して認証ログを解析することで、その実用性を評価することとした。

後藤ら (2022) が開発 [12] した Passpoint Provisioning Tools [13] を元に、RADIUS データベースから取得した認証情報を埋め込んだ OpenRoaming 接続プロファイルを発行できる環境を Passpoint Provisioning WebApp として開発した (図 10) [14]。本システムは、Python の Web アプリケーションサーバー Gunicorn で動作するため、セットアップが容易な利点がある。



図 10 開発した Passpoint Provisioning WebApp.

本システムで発行した OpenRoaming プロファイルを Windows11 で動作するスティック PC にインストールし、検証用クライアントとして用いた (図 11)。PC は起動時に自動ログインする設定とし、タスクで 5 分毎に自動的に再起動することで、約 5 分間隔で OpenRoaming に接続を繰り返す。



図 11 OpenRoaming 接続検証端末。

基地局が接続されている RADIUS Proxy で検証用クライアントの認証ログを確認したところ、24 時間で 328 回の認証成功が記録されていることが確認できた。5 分毎の認証が発生したとすれば 288 回となり、再認証を含めて安定して接続できていることが確認できた (図 12)。

0時台	12	12時台	17
1時台	12	13時台	13
2時台	13	14時台	17
3時台	12	15時台	14
4時台	16	16時台	13
5時台	12	17時台	14
6時台	12	18時台	13
7時台	12	19時台	12
8時台	13	20時台	16
9時台	13	21時台	16
10時台	13	22時台	13
11時台	15	23時台	15

図 12 接続成功回数 (2023/9/23 計測).

60GHz 帯ミリ波拠点間通信をバックホール回線として用いた OpenRoaming 基地局は実用的であるといえ、2023 年冬季に向けて、継続して安定性を確認していくこととしている。

4 まとめ

本稿では、札幌学院大学における遠隔拠点で 60GHz 帯拠点間通信を用いて、冬季降雪地であっても着雪対策が施された製品であればキャンパス LAN を遠隔地に安定して提供することが可能であることを示した。今後、冬季の遠隔拠点における OpenRoaming 基地局での接続検証を進めるとともに、学生からの要望に応じて従来キャンパス LAN を整備できていなかった拠点において整備を進めていきたい。

本研究の遂行にあたり、協力頂いた株式会社ビーマップに深謝する。本研究の一部は、JSPS 科研費 23H05391 の助成を受けた。Passpoint Provisioning WebApp の開発の部分については、令和 5 年度国立情報学研究所公募型共同研究の助成を受けた。

参考文献

- [1] eduroam JP: <https://www.eduroam.jp/> (2023 年 9 月 24 日参照)
- [2] Wi-Fi Alliance, “Passpoint - Wi-Fi ホットスポットネットワークへのシームレスでセキュアな接続を実現,” <https://www.wi-fi.org/ja/discover-wi-fi/passpoint/> (2023 年 9 月 24 日参照)
- [3] WBA OpenRoaming: <https://wballiance.com/openroaming/> (2023 年 9 月 24 日参照)

- [4] 八嶋弘幸, “ブロードバンドの全国整備に向けた有線・無線技術によるシステム構築モデルと導入コストについて,” デジタル・ディバイド解消戦略会議 第 4 回資料 4-7, : https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/chousa/ddcon/080326_2.html (2023 年 9 月 23 日参照)
- [5] Starlink: <https://www.starlink.com/> (2023 年 9 月 24 日参照)
- [6] 総務省信越総合通信局 ミリ波帯高速無線伝送システムに関する調査検討会, “ミリ波帯高速無線伝送システムに関する調査検討報告書,” : <https://www.soumu.go.jp/soutsu/shinetsu/sbt/kenkyu/kenkyu1.html> (2023 年 9 月 23 日参照)
- [7] 若原俊彦, 大和哲二, カムギシャカザウラ, 松本充司, 清水隆雄, “高速無線キャンパスネットワークの構成法に関する検討,” 情報処理学会研究報告知能と複雑系 (ICS) 73(2001-ICS-125), 2001 (2023 年 9 月 23 日参照)
- [8] 国土地理院 地図・空中写真閲覧サービス.: <https://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do?specificationId=1806420> (2023 年 9 月 23 日参照)
- [9] 気象庁 江別 (石狩地方) 観測史上 1~10 位の値 (年間を通じての値) .: https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/ra_ra_a.php?prec_no=14&block_no=1507 (2023 年 9 月 24 日参照)
- [10] 江別市 年間総降雪量・再深積雪量年度別順位.: <https://www.city.ebetsu.hokkaido.jp/soshiki/yukitaisaku/2292.html> (2023 年 9 月 24 日参照)
- [11] やはば WELSOC Wi-Fi: <https://iwate.welsoc-service.com/device/> (2023 年 9 月 24 日参照)
- [12] 後藤英昭, 原田寛之, 漆谷重雄, “Wi-Fi プロファイルを用いた eduroam/OpenRoaming のパスワードレス設定,” 大学 ICT 推進協議会 2022 年度年次大会 論文集 13PM1C-4, 2022. (2023 年 9 月 24 日参照)
- [13] Passpoint Provisioning Tools: <https://github.com/hgot07/PasspointProvisioningTools/> (2023 年 9 月 24 日参照)
- [14] Passpoint Provisioning WebApp: <https://github.com/pirosap/PasspointProvisioningWebApp/> (2023 年 9 月 25 日参照)