

教室でのオンライン講義受講のための無線接続環境評価

石原 知洋¹ 四本 裕子¹ 角野 浩史¹ 玉造 潤史² 中村 遼³ 小川 剛史³ 相田 仁⁴ 工藤 知宏³

概要：

2020年初頭から発生したCOVID-19により、多くの大学で4月からオンラインによる講義の配信を行っている。オンライン講義のメリットが明らかになる一方で、様々な要因から対面での講義の実施も求められている。そこで東京大学では、COVID-19対応のためオンラインと、感染症対策を実施した上での対面講義の双方を実施するハイブリッド方式の講義を検討している。このハイブリッド方式では、対面講義のためキャンパスに来た学生が、対面講義の他にもその日のオンライン講義をキャンパスのネットワークを用いて受講することになる。このように多数の学生がキャンパスネットワークを用いてオンライン講義を受講するにあたって、どの程度のネットワーク設備があればそのような講義形態が可能であるかは自明ではない。そこで我々は、最もボトルネックになると想定されるユーザ端末の無線接続について、実際の教室を用いて大人数での同時オンライン講義の受講が可能であるかの評価実験をおこなった。本実験では、いくつかのオンラインの講義シナリオを設定し、ネットワーク状況やオンライン講義の音声・映像の品質を計測、確認した。本論文ではその実験結果および得られた知見について述べる。

キーワード：オンライン講義、キャンパスネットワーク、無線LAN、WiFi、ストリーミング配信

Report on the survey of Wireless Connectivity for Classroom for Online Lectures

Abstract: We plan to start "hybrid" lectures, which both online and face-to-face classes are given to live with COVID-19. However, it is not clear how much network bandwidth is required to make such type of lecture possible. In this study, we set up a classroom to evaluate whether or not a large number of students can attend an online lecture in a classroom. We observed the network condition and the quality of the audio and video of the online lecture. In this paper, we present the results of the experiments and the findings.

Keywords: Online Lecture, Campus Network, Wireless Network, WiFi, Live Streaming

1. はじめに

東京大学ではCOVID-19対応として2020年度当初からほぼ全面的にオンライン講義を実施したが、状況に一定の落ち着きがみられる中、秋学期は、履修者数の多くない講義を中心に、教室に入室できる人数を制限し密を避けつつ行

うキャンパスでの講義と、オンラインでの講義を併用するハイブリッド方式で講義を行うこととなった。また、2020年度の開始から約4か月にわたるオンライン講義の実施を通じて、直接の会話によるコミュニケーションが取れないことへの不満が数多く寄せられる一方、特に大人数講義ではむしろオンライン講義の方が良いとの意見もある。そこで来年度以降COVID-19が収束した場合でも、大人数講義を中心に一定程度オンライン講義を行うハイブリッド方式を残すことも検討されている。

こうしたオンラインと対面講義を同時に実施するハイブリッド方式を実現するために課題となるもののひとつが、キャンパス内のネットワーク環境、特に無線接続環境である。大学における学生の講義履修のパターンは多様であり、

¹ 東京大学総合文化研究科
Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo

² 東京大学理学系研究科
School of Science, The University of Tokyo

³ 東京大学情報基盤センター
Information Technology Center, The University of Tokyo

⁴ 東京大学工学系研究科
School of Engineering, The University of Tokyo

ある時限にキャンパスで対面講義に出席した学生が次の時限にはオンライン講義を受講するといった事態が多く発生することになり、大学構内にオンライン講義を受講するためのネットワークや電源環境を用意する必要がある。本学のキャンパスでは多くの教室に WiFi による無線接続環境が整備されているが、これらは主に教員が講義で使う、ないしは学生が単発的に調べもの等に利用することを想定しており、キャンパスにいる多数の学生が同時にリアルタイムのストリーミング講義を受講するような使い方を想定してはいない。

秋学期では、感染症対策のため教室定員をかなり減らして運用を行うものの、各教室で複数の学生が同時にオンライン講義を受講することが予測されている。このような状況で、WiFi がどの程度リアルタイムの音声や動画ストリーミングに耐えられるかは、教室の電波状態や端末数、ストリームされるコンテンツなどさまざまな要因に依存し、自明ではない。教室などの無線 LAN 環境において、同時に接続した複数端末での帯域測定は浜元ら [1] および福田ら [2] の研究によって報告されている。しかし、これらの報告では帯域測定を行うツールを用いての計測をおこなっており、実際に遠隔講義に使用するテレビ会議アプリケーションを用いた性能測定や、本番に近い環境でユーザーが講義を受けた際に問題のないクオリティで受講できるかといった部分については別途調査が必要と考えた。

そこで我々は、秋学期から始まるハイブリッド方式の講義の円滑な実施のため、実際にオンライン講義受講のために提供する予定の教室において、多人数での同時オンライン講義受講が可能であるかについて、いくつかの講義シナリオを設定し、ネットワークの状況や音声・画像の品質について確認する評価実験をおこなった。本論文では、この実験の内容と結果、そして得られた知見について報告する。

2. 実験環境

本評価実験では、秋以降、対面講義を受講するためにキャンパスに登校した学生が対面講義以外のオンライン講義を受講するための教室で、80 台のノート PC を用意して実際にオンライン講義を受講し、様々な計測をおこなった。なおオンライン講義の配信には、Zoom を用いた。本節ではこの実験環境および計測方法について述べる。

2.1 使用した教室

実験は学生に対してオンライン講義受講用に開放する教室の一つを利用して実施した(図 1)。当該教室には机および座席が教卓に向かって左右に 5 席ずつ、前後に 8 列ずつ配置されており、通常定員 160 名のところ、感染症対策のための定員として 80 名を設定している。学生が相互に一定の距離を置いて着席できるように着席場所は市松模様設定されている。本実験では、学生の着席場所に PC・タ

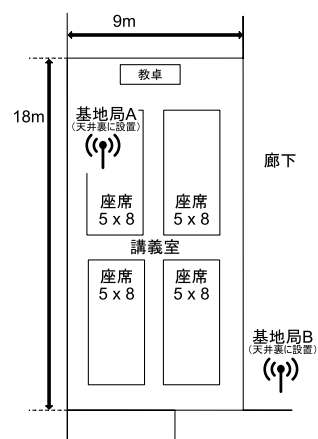


図 1: 教室の寸法および基地局設置位置
Fig. 1 Room dimensions and WiFi station location

表 1: 無線 LAN 設定

Table 1 Configuration of the WiFi Access points

無線 LAN 方式:
シナリオ 1~5, 13:802.11ac
シナリオ 6~11:802.11n
5GHz 優先接続
チャンネルボンディング:
5GHz 帯:40MHz
2.4GHz 帯:なし
ビーコン周波数:
5GHz:6Mbps
2.4GHz:1Mbps
DTIM 周期: 1ms
使用チャンネル:
基地局 A 5GHz:52ch 2.4GHz:6ch
基地局 B 5GHz:100ch 2.4GHz:11ch

レット等を配置し、Zoom によるオンライン講義受講をおこなった。教室は前後に 2 か所にドアがついており、実験者の感染症対策のため、窓およびドアは開放した状態で実験をおこなった。

2.2 無線 LAN の機材および設定

無線基地局は Aruba 社製 AP-515 を使用しており、同社製の無線 LAN コントローラ 7240XM によって制御されている。コントローラと基地局は暗号化トンネルにより接続され、基地局によって送信・受信されるトラフィックはすべてこのトンネルを通り無線 LAN コントローラを経由して外部と通信をおこなう。

無線基地局の設定を表 1 に示す。また 2 台の無線基地局は、図 1 に示すように、教卓よりの天井裏に 1 台、廊下の天井裏に 1 台が設置されている。

2.3 クライアント機材

クライアント端末としては表 2 の機材を使用した。学生

表 2: クライアント機材
Table 2 Hosts used

No.	機材名	無線インターフェース仕様
1	Acer 製 Chrome Book	802.11a/b/g/n 1x1 ストリーム 2.4GHz / 5GHz W52/53/56
2	HP 製 Chrome Book	802.11a/b/g/n/ac MIMO 2x2 ストリーム 2.4GHz / 5GHz W52/53/56
3	LENOVO 製 PC Windows10	802.11a/b/g/n/ac MIMO 2x2 ストリーム 2.4GHz / 5GHz W52/53/56
4	MSI 製ノート PC Windows 10	802.11a/b/g/n/ac MIMO 2x2 ストリーム 2.4GHz / 5GHz W52/53/56
5	Apple Mac book	802.11a/b/g/n/ac MIMO 2x2 ストリーム 2.4GHz / 5GHz W52/53/56
6	東芝製ノート PC Windows10	802.11a/b/g/n/ac 1x1 ストリーム 2.4GHz / 5GHz W52/53/56
7	Apple iPad Air 2	802.11a/b/g/n/ac MIMO 2x2 ストリーム 2.4GHz / 5GHz W52/53/56

表 3: 実験シナリオ
Table 3 Experiment Scenarios

No.	WiFi 環境	端末の接続先
1	11ac, 11n	全台同一講義
2	11ac, 11n	全台同一講義 講義に YouTube の動画を使用
3	11ac, 11n	全台同一講義 途中から半分の端末が 並行して YouTube 動画にアクセス
4	11ac, 11n	半数ずつ別々の講義に参加
5	11ac, 11n	半数ずつ別々の講義に参加 途中から半分の端末が 並行して YouTube 動画にアクセス
6	11n	全台同一講義
7	11n	全台同一講義 途中から半分の端末が 並行して YouTube 動画にアクセス
8	11n	半数ずつ別々の講義に参加 途中から半分の端末が 並行して YouTube 動画にアクセス
9	11n	全台同一講義 途中からモバイル WiFi ルータを起動 別端末によりモバイル WiFi で動画受信
10	11ac, 11n AP1 台のみ	全台同一講義

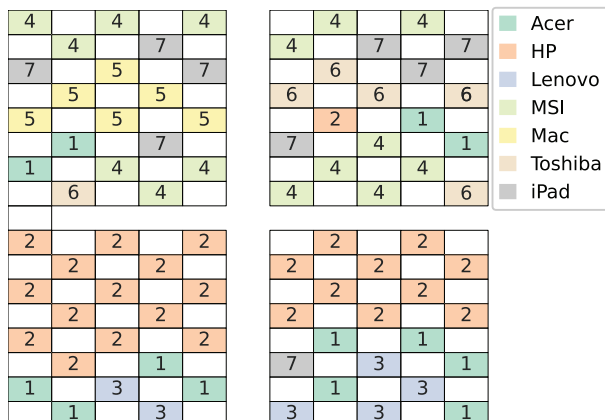


図 2: 機材配置場所
Fig. 2 Hosts placing

は自分で持ち込んだ機材によりオンライン講義を受講するため、本実験に使用する端末は複数の種類の PC を用意し、それぞれが同時に通信を行う想定で実験をおこなった。教室における各クライアントの配置は図 2 の通りである。

2.4 実験シナリオ

本実験のシナリオは表 3 の通りである。各シナリオは、下記のパラメータを念頭に、講義中に発生しうる組み合わせをピックアップして設定をおこなった。

- WiFi 規格 (11ac または 11n)
- Zoom 講義の接続先 (単一講義ないし 2 つの講義)
- 講義参加端末の他のビデオ配信サイトへの接続の有無

- 教室 WiFi 以外の WiFi の有無
- 接続対象となる基地局の数 (1 台ないし複数台)

シナリオ 1 から 5 は基地局から出す WiFi を 802.11ac と 802.11n の二種類、シナリオ 6 から 9 では 802.11n のみとした。またシナリオ 2 では、ストリームされる講義の動画に YouTube の動画を用いた。これは、一般的な講義では静止画の連続であるスライドショーがメインであり、映像に圧縮が効き所要帯域が小さいことに対して、圧縮が効きづらいコンテンツを用いた場合の影響を確認するためである。またシナリオ 10 では、WiFi は 802.11ac と 11n の両方ながら、基地局を 1 台のみとすることで、1 台の基地局に接続端末が偏る場合の検証をおこなった。

2.5 測定方法

本実験では、特定の SSID に対してクライアント端末を全無線 LAN により接続し、シナリオに従って全クライアント端末で Zoom の講義を同時に受講した。配信する講義については、本学が前期において実際にオンライン配信をおこなったものの録画を利用し、その動画再生画面を画面および音声共有することで配信した。録画は 2 種類を用意し、シナリオ 1, 2, 3, 6, 7, 9, 10 においてはそのうちの 1 つの動画を、シナリオ 4, 5, 8 においては 2 つの動画をそれぞれ異なる Zoom のセッションで配信をおこなった。シナリオ 3, 5, 7, 8 においては講義を受信する端末のうち

半分の端末で YouTube 動画の再生をおこなったが、ネットワークに対する影響のみを確認するため、実験協力者による講義の視聴は YouTube 動画の再生をおこなっていない端末を使用した。

使用した講義の録画は、本学の前期講義において一般的に行われた、講師のパワーポイントによるスライド画像を画面共有し、講師がマイクで講義を行うタイプのものである。配信は、測定をおこなった教室とは異なるキャンパス内の場所からおこない、配信側の PC は Gigabit Ethernet による有線 LAN によって大学ネットワークに接続をおこなった。この Zoom による講義視聴中に、下記の情報について取得した。

無線 LAN コントローラの統計情報

無線 LAN コントローラにおいて、それぞれの端末について接続チャンネル、信号強度、無線プロトコル、無線 LAN の MCS、フレーム再送レートなどの情報を 2 分間隔で取得した。

Zoom サーバによる計測値

各端末へ送信した映像・音声のビットレート、パケットジッタ、遅延、ロス率については Zoom のサーバ側で記録されており、その計測値を取得した。

実験協力者によるスコアリング

Zoom によるオンライン講義について、本学の学生 8 名からなる実験協力者により、それぞれ特定の端末でオンライン講義を視聴し、講義の品質について映像と音声それぞれ別に 5 段階評価でスコア付けをおこなった。

3. 実験結果

3.1 無線接続の情報

実験期間中、無線 LAN コントローラから取得した、各クライアントが接続していた WiFi チャンネル番号の最頻値と、各クライアントからの WiFi 信号強度 (RSSI) の中央値を、各端末の設置場所にプロットしたヒートマップをそれぞれ図 3 と図 4 に示す。図の上側が教卓側となる。無線基地局は図 1 で示すように、基地局 A が教卓に向かって中央より左寄り、やや前寄りの天井裏に、基地局 B が教卓に向かって右の教室外の廊下に設置されている。

図 1 にあるように、基地局 A が 2.4GHz/5GHz でそれぞれ 6ch/52ch、基地局 B が 11ch/100ch で接続を提供しており、基地局はできる限り 5GHz の接続を端末側に推奨する設定になっている。図 3 において、6ch/52ch で接続している端末は基地局 A に、100ch に接続している端末は基地局 B に接続している。

図 5 は各端末の無線リンクの接続速度の全実験期間中を通じての最頻値である。端末・基地局ともに 802.11ac および 802.11n に対応しているが、少なくとも一部の端末が 5GHz 帯の最低転送レートである 6Mbps で接続されている。

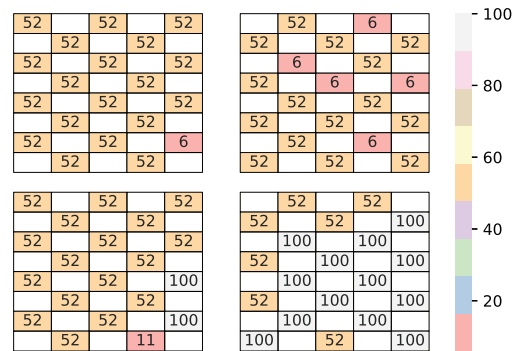


図 3: クライアント端末の接続チャンネル番号 (最頻値)

Fig. 3 Wifi channel using clients(mode)

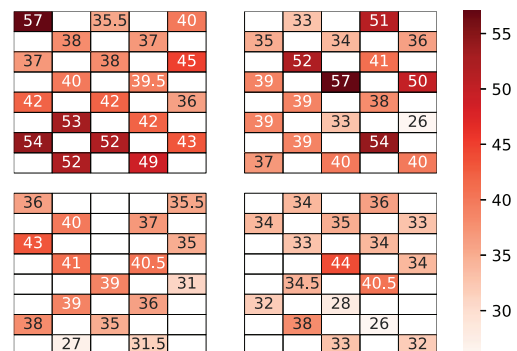


図 4: クライアント端末からの信号の S/N 比 [db](中央値)

Fig. 4 Signal to Noise ratio for client hosts[db](median)

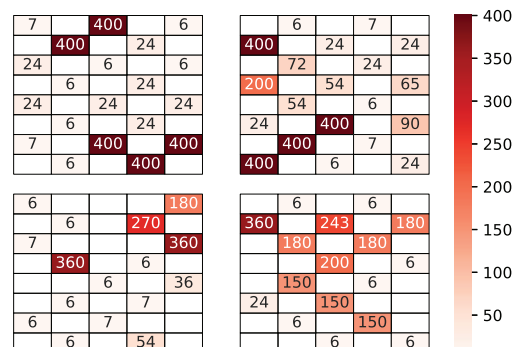


図 5: クライアント端末の WiFi 接続速度 [Mbps](最頻値)

Fig. 5 WiFi transmit rate on clients[Mbps](mode)

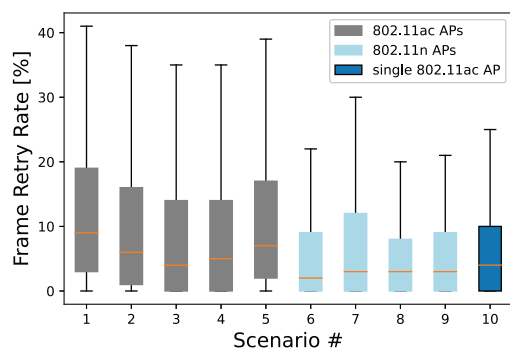


図 6: シナリオごとの無線リンクのフレーム再送レート

Fig. 6 802.11 frame retry rate in each scenarios

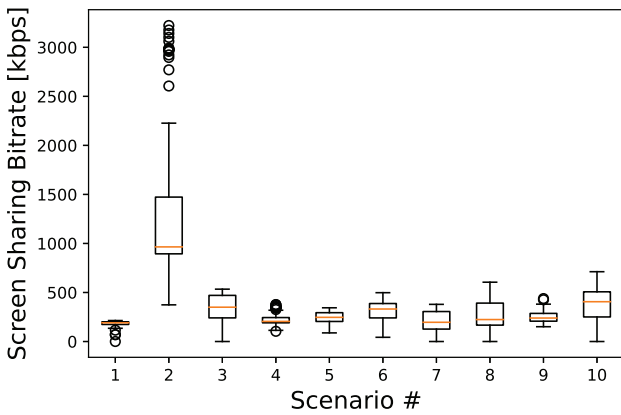


図 7: シナリオごとの画面共有トラフィックのビットレート

Fig. 7 Screen Sharing bitrate[kbps] in each scenarios

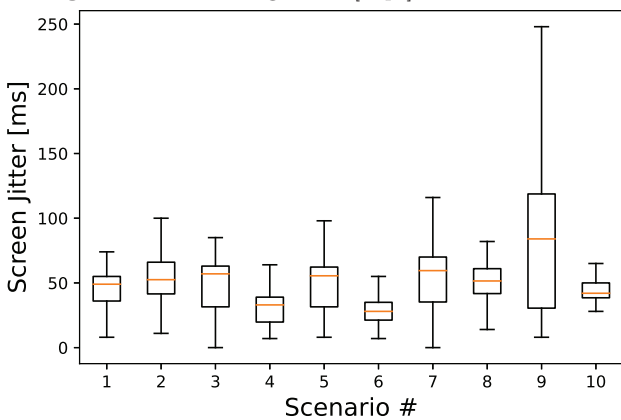


図 9: シナリオごとの画像共有ジッタの分布

Fig. 9 Distribution of Screen Sharing Jitter(ms)

図 4 からわかるように、RSSI は基地局 A に近い場所ほど信号強度が強いが、図 5 を見る限り、WiFi の転送レート (MCS) については、基地局からの距離および RSSI との強い関連性は見られない。

本データは無線 LAN コントローラから SNMP 経由で取得したものであるが、一部端末で、接続チャンネル番号は取得できるものの、クライアントの S/N 比および WiFi 接続速度が取得できず欠損しているものが存在している。(図 4 の図 5 空欄になっている部分) こちらについては無線 LAN コントローラの動作上の問題であると思われるが、現在のところ詳しい原因は不明である。

図 6 にシナリオ別の無線リンクにおいて、基地局がフレーム再送を実施した各端末ごとの割合の分布を示す。シナリオ 1~5 と 10 では基地局を 802.11ac および 802.11n 対応にして、シナリオ 6~9 では基地局を 802.11n のみ対応にして各端末の接続をおこなった。シナリオ 10 のみ、全端末を基地局 A 1 台に接続して配信をおこなった。

一般的に、802.11ac 接続を有効にしたシナリオより、802.11n 接続のみを有効にしたシナリオの方が基地局からのフレーム再送は減少している。詳細な原因は不明である

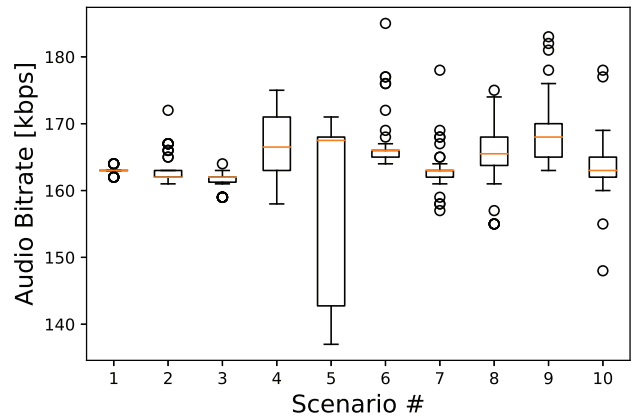


図 8: シナリオごとの音声トラフィックのビットレート

Fig. 8 Audio bitrate[kbps] in each scenarios

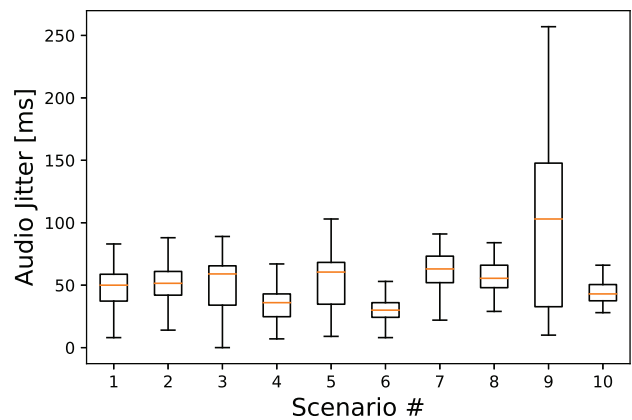


図 10: シナリオごとの音声ジッタの分布

Fig. 10 Distribution of Audio Jitter(ms)

が、MIMO および wave-forming により、無線信号を空間に多重に送ることにより再送が増加している可能性がある。また、シナリオ 10 についてはその他の 802.11ac 接続より低いフレーム再送レートになっているが、これは各端末に送信を行う基地局が 1 台になることにより、結果としてフレームの衝突を誘発させる他基地局からの近接・ないし同一チャンネルでのフレームが送信されないことが原因であると予測される。

3.2 Zoom による統計情報

図 7, 図 8 はシナリオ別の Zoom の画面共有の映像トラフィックおよび音声トラフィックのビットレートである。画面共有のビットレートについては講師側の端末で再生している高画質の YouTube 映像を、画面共有により送信しているシナリオ 2 が全体的にビットレートが高くなっている。そのうえで、3Mbps 前後の高いビットレートで受信している端末と、500kbps 程度で受信している端末が混在しており、元の映像トラフィックのビットレートが高い場合には同じ教室で同じ Zoom のオンライン講義を受講していた場合でも、クライアント端末によってかなり映像品質

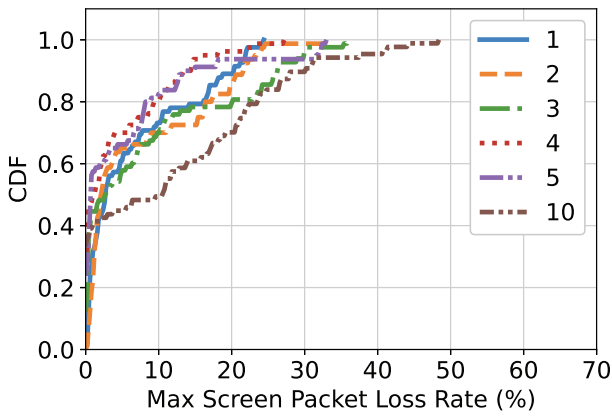


図 11: 802.11ac での画面共有のペケットロス率 (最大値)

Fig. 11 Max packet loss rate for screen sharing on 802.11ac

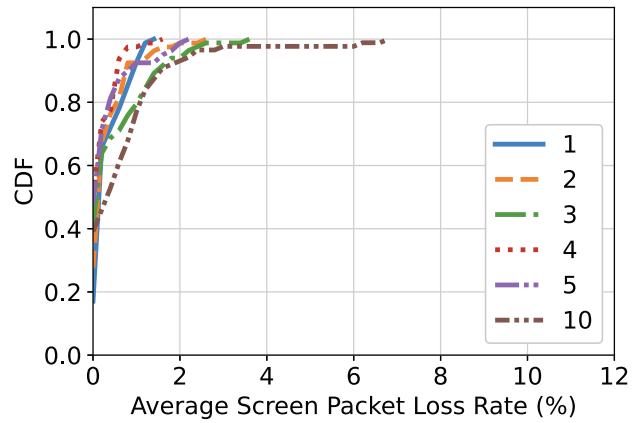


図 12: 802.11ac での画面共有のペケットロス率 (平均値)

Fig. 12 Mean packet loss rate for screen sharing on 802.11ac

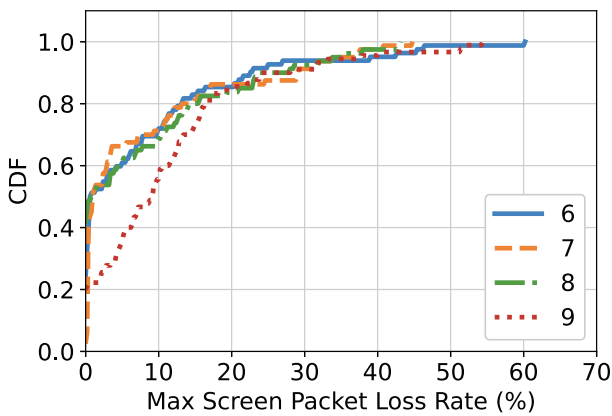


図 13: 802.11n での画面共有のペケットロス率 (最大値)

Fig. 13 Max packet loss rate for screen sharing on 802.11n

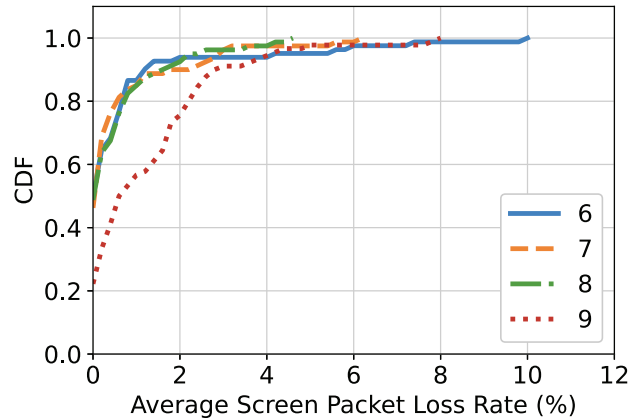


図 14: 802.11n での画面共有のペケットロス率 (平均値)

Fig. 14 Mean packet loss rate for screen sharing on 802.11n

にばらつきが発生することが見てとれる。音声トラフィックについては、映像ほどの顕著な差は端末間で現れていなかった。

図 9,10 にシナリオごとの映像・音声のジッタ分布を示す。シナリオ別では、シナリオ 9 においてモバイル WiFi を用いて別にトラフィックを流した場合に、映像・音声どちらのジッタも全体的に悪化していることがわかる。

Zoom の画面共有のトラフィックについて、図 11, 12 に 802.11ac で接続をおこなった際のアプリケーションレイヤでのペケットロス率のそれぞれ最大値と平均値を、図 13,14 に 802.11n で接続した際のペケットロス率の最大値と平均値を累積分布関数で示す。802.11ac 接続の場合、ペケットロスの最大値は端末が一つの Zoom 講義に接続する場合に比べて、複数の Zoom 講義に接続するほうがペケットロス率が低い傾向がみられた。これは、ストリーミングにおいて映像の転送は圧縮がかかるため、スライドの切り替え時など大きく画像が変化する場合に転送量が増えるが、学生が異なる講義を受ける場合はその転送量のピークが分散するためであると考えられる。また、80 台の端末すべてを一つの基地局に接続したシナリオ 10 では顕著にペケットロスが増加していることが確認できた。ペケットロスの平均

値で見た場合、シナリオ 10 のペケットロス率がやや高い傾向はあるものの、シナリオ間で顕著な差はみられなかった。

802.11n 接続の場合は、同時にモバイル WiFi で動画ストリーミングをおこなったシナリオ 9 において顕著なペケットロス率の最大値の悪化が見られた(図 13)。また、シナリオ 9 は同様にペケットロス率の平均値も悪化しており、講義中でのモバイル WiFi の利用が学内の無線インフラに顕著な影響を及ぼすことが確認できた。

3.3 実験協力者によるスコアリング

図 15 に各実験協力者ごとの各シナリオの映像・音声のスコアを示す。シナリオ別に見た場合、シナリオ 2 で講師側で YouTube の高画質動画を再生し、それを画面共有で送信した場合に一部の実験協力者が映像へのスコアを低く採点している傾向がみられる。これは、3.2 節で示したように、実験協力者の端末によって映像のビットレートが大きく異なるためこのような違いが発生していると考えられる。

また、多くの実験協力者がシナリオ 9 においてモバイル WiFi で別にトラフィックを流した場合に顕著に音声・映像のスコアを低くつけていることがわかる。

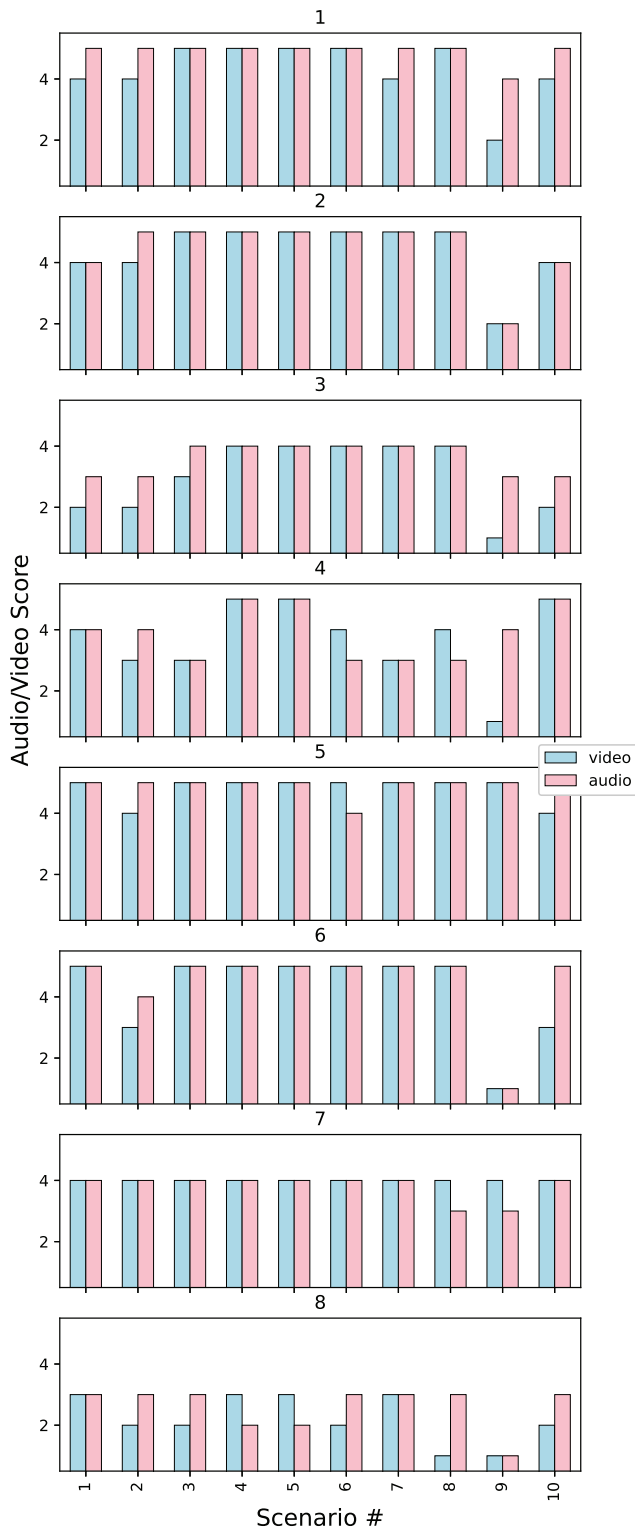


図 15: シナリオごとの実験協力者のスコア
Fig. 15 Subject's Scores per scenario

実験協力者別に見た場合、8番目の実験協力者が他の実験協力者に比べて平均的に低いスコアをつけているが、こちらについては、当該実験協力者が視聴していた端末について、実験を通じて計測された Zoom や無線 LAN の統計情報が他の端末に比べて著しく悪い数値が出ていたという事象があり、その個体の影響によるものと考えられる。

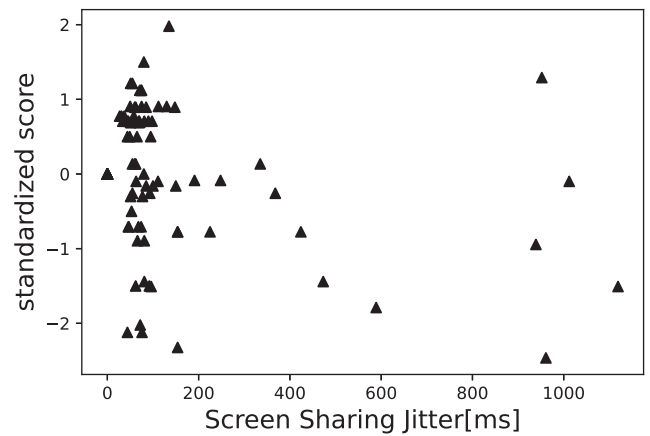


図 16: 標準化した実験協力者の映像へのスコアと画面共有ジッタの関係
Fig. 16 Standardized Score for a video vs Screen Sharing Jitter(ms)

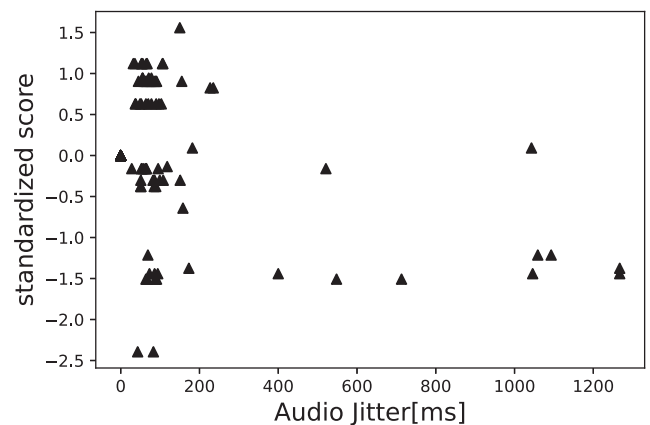


図 17: 標準化した実験協力者の音声へのスコアと音声ジッタの関係
Fig. 17 Standardized Score for a audio vs Audio Jitter(ms)

図 16,17 は平均 0, 分散 1 に標準化した各実験協力者の映像・音声のスコアと、Zoom の画面共有および音声のジッタの関係についてプロットしたものである。

映像・音声ともにジッタが 200ms を上回った場合には、実験協力者の相対的なスコアはほとんどが平均以下になっていることがわかる。ジッタが低い場合でも必ずしも高いスコアが付けられてはいないことから、ジッタのみが映像・音声の支配的なパラメータではないが、講義の映像・音声品質を担保する上での重要な指標の一つであるといえる。

4. 実験結果の考察

上記の実験の結果より、得られた知見は下記の通りである。

- 大学の教室などで多人数の学生がオンライン講義を同時に受講する場合には、静止画スライドを用いた標準的な Zoom 講義であれば、802.11n の接続であれば不

満のない品質でオンライン講義を実施することができる。

- 今回実験に利用した Aruba AP-515 では、1 台の基地局で 80 台の端末を収容した場合、基地局が 2 台の場合と比較してパケットロス率の増加は見られたが、少なくとも 80 人程度の Zoom によるオンライン講義の受信をまかなうことはできた。同様に、同じ程度の性能を持つエンタープライズ用途の無線基地局であれば、多人数の Zoom オンライン講義の受講が可能であると予想される。
- 静止画スライドを用いた場合と異なり、映像として高品質な動画を送る場合は、受講者の端末や環境、講義に参加したタイミング等により受信品質が異なる場合がある。
- 講義の体感的な品質において、音声および映像のジッタの悪化が強い影響を及ぼす。
- 同一の教室内でモバイル WiFi ルータなどの設備外の無線基地局を利用した場合、音声・映像トラフィックのジッタに強い悪影響を与え、結果として講義の体感的な品質も大きく低下する。

特にモバイル WiFi ルータを使用した場合の悪影響は顕著であり、今回想定したように複数の学生に対して教室でオンライン講義を受講させる場合、講義時間内における学生・教員の持ち込みモバイル WiFi ルータの使用は強く制限する必要があると考えられる。

また、今回の実験では、実験協力者自身によって各端末の WiFi 接続設定および Zoom の接続操作をおこなってもらったが、設定がわからない、うまく WiFi および Zoom に接続ができない、などの問い合わせが多く発生し、実験開始までかなりの時間を要した。実際の講義においてもこのような学生・講師に対する WiFi や Zoom の技術的な対応にはかなりの人手を要することが予測されたことも今回得られた重要な知見であった。

5. おわりに

本実験では、教室における多人数での同時オンライン講義受講について講義シナリオを想定し、実機を用いることでオンライン講義受講の検証をおこなった。本実験により、モバイル WiFi ルータの使用を禁ずるなどいくつかの条件を整えれば、本学が想定する無線接続を用いた大教室における同時オンライン講義の受講は十分に可能であることがわかった。

秋学期よりハイブリッド方式での講義が開始するが、さらに継続して測定をおこなうことにより、オンライン講義品質確保のための監視と、実際に発生する問題への対処をおこなっていく予定である。

謝辞

本実験を実施するにあたり、総合文化研究科教養教育高

度化機構の初年次教育部門、アクティブラーニング部門、FLY プログラムには接続端末の貸与など多大な協力をしていただきました。この場を借りてお礼をいたします。また、本学オンライン講義検討会においては本実験に対するたくさんのご助言等をいただきました。心より感謝いたします。

参考文献

- [1] 浜元信州, 井田寿朗, 齋藤貴英, 小田切貴志, 綿貫明広, 横山重俊, “無線 LAN 規格による端末同時接続性能差について”, 情報処理学会研究報告 Vol. 2020-IOT-50, No. 8, pp. 1-8, 2020.07.03.
- [2] 福田豊, 畑瀬卓司, 富重秀樹, 林豊洋, “BYOD 環境整備に向けた無線 LAN 通信実験”, 情報処理学会研究報告 Vol. 2018-IOT-40, No. 10, pp. 1-6, 2018.02.26.
- [3] TR-398 Wi-Fi In-Premises Performance Testing, Broadband Forum, <https://www.broadband-forum.org/download/TR-398.pdf> (2019 Oct)
- [4] Michael Zink, Kyoungwon Suh, Yu Gu, Jim Kurose, “Characteristics of YouTube network traffic at a campus network – Measurements, models, and implications”, Computer Networks, Volume 53, Issue 4, pp. 501-514 (2009 Mar)
- [5] Ashwin Rao, Arnaud Legout, Yeonsup Lim, Don Fred Towsley, Chadi Barakat, Walid S Dabbous, “Network characteristics of video streaming traffic”, CoNEXT '11: Proceedings of the Seventh Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies, Article No.25, p.1-12 (2011 Dec)
- [6] Te-Yuan Huang, Nikhil Handigol, Brandon Heller, Nick McKeown, Ramesh Johari, “Confused, timid, and unstable: picking a video streaming rate is hard”, IMC '12: Proceedings of the 2012 Internet Measurement Conference, pp. 225-238 (2012 Nov)
- [7] 新谷隆文, 前田香織, “無線 LAN の通信品質推定における MAC 層情報の有効性調査”, 情報処理学会論文誌, vol.58, no.3, pp.664-671, (2017 Mar)
- [8] School Administrator's Guide to Rolling Out Zoom, <https://zoom.us/docs/doc/School>