

## 推薦論文

# 教室における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<sup>1</sup> 四本 裕子<sup>1</sup> 角野 浩史<sup>5</sup> 玉造 潤史<sup>2</sup> 中村 遼<sup>3</sup> 小川 剛史<sup>3</sup> 相田 仁<sup>4</sup>  
工藤 知宏<sup>3</sup>

受付日 2021年11月22日, 再受付日 2022年2月17日,

採録日 2022年4月7日

**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うえ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行った. 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. 本稿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

TOMOHIRO ISHIHARA<sup>1</sup> YUKO YOTSUMOTO<sup>1</sup> HIROCHIKA SUMINO<sup>5</sup> JUNJI TAMATSUKURI<sup>2</sup> RYO NAKAMURA<sup>3</sup>  
TAKEFUMI OGAWA<sup>3</sup> HITOSHI AIDA<sup>4</sup> TOMOHIRO KUDOH<sup>3</sup>

Received: November 22, 2021, Revised: February 17, 2022,

Accepted: April 7, 2022

**Abstract:** Due to the COVID-19 pandemic, many universities have conducted lectures online. Although online lectures reveal various advantages, face-to-face classes are also demanded. Thus, at the University of Tokyo, we plan to start “hybrid” lectures in 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 a 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. Furthermore, 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なか, 2020 年度秋学期は, 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キャンパスで実施する講義と, 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ほうが良いとの意見もある [1]。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の課題の1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、ハイブリッド方式を採用した場合には、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が予想される。そのため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。

2020 年度秋学期では、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様々な要因に依存し、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 [2] および福田ら [3] 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行っており、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られる。

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行った。本稿では、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、2020 年度秋学期以降、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、様々なシナリオに基づいて計測を行った。なおオンライン講義の配信には、Zoom を用いた。本章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1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に設定されている。本実験では、学生の着席場所に PC・タブレット等を配置し、Zoom によるオンライン講義受講を行った。教室は前後 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行った。実験を行った建物は教室棟であり、他の教室についても同様に無線基地局が設置されているが、実験期間中にわたって同建物内の他の教室に使用者がいない状態に

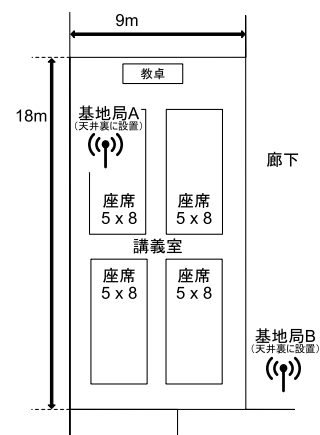


図 1 教室の寸法および基地局設置位置

Fig. 1 Room dimensions and WiFi station location.

- 1 東京大学総合文化研究科  
Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo, Meguro, Tokyo 153-8902, Japan
- 2 東京大学理学系研究科  
School of Science, The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan
- 3 東京大学情報基盤センター  
Information Technology Center, The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-0032, Japan
- 4 東京大学工学系研究科  
School of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-8656, Japan
- 5 東京大学先端科学技術研究センター  
Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo, Meguro, Tokyo 153-8904, Japan

2020 年 12 月 4 日のインターネットと運用技術シンポジウムにて報告され、IOT 研究会主査により論文誌トランザクションデジタルプラクティスへの掲載が推薦された論文である。

していた。

### 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行う。

AP-515 無線基地局はカタログスペック上は 2.4 GHz および 5 GHz の無線それぞれに 256 台、合計で 512 台の無線クライアントが接続可能となっている。推奨最大接続数はメーカーが提供している情報はないが、販売代理店が提供している情報<sup>\*1</sup>では 150 台が推奨最大接続数となっており、今回の実験で接続する 80 台に対して基地局の処理性能上は十分なキャパシティを持っていると考えられる。

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。それぞれの無線基地局は Gigabit Ethernet により PoE 対応のスイッチに収容されており、そこから無線 LAN コントローラまでのネットワーク接続は 1 Gbps 以上のリンクで構成されている。

### 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。学生が持ち込む端末は多様であり、Chromebook のような廉価な端末から、Mac Book のような十分な性能を持つ端末まで幅広い。それぞれの端末が単独で zoom によるオンライン会議を視聴できるとしても、それらの端末が一

部屋に同時に混在した状況では、zoom 講義を十分な品質で視聴できるかは不明である。そこで本実験に使用する機材はその無線インタフェースのスペックや、処理性能も含めて複数種類のクライアントを用意し、それらの混在による影響を検証した。教室における各クライアントの配置は図 2 のとおりである（図内の数字は表 2 の No. に対応する）。

### 2.4 実験シナリオ

本実験のシナリオは表 3 のとおりである。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行った。

表 2 クライアント機材  
Table 1 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 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
ピーコン周波数:
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

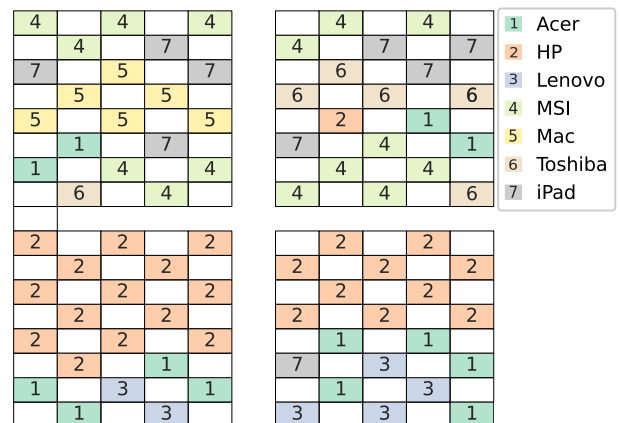


図 2 機材配置場所

Fig. 2 Hosts placing.

\*1 <https://www.scsk.jp/sp/hpe-aruba/wireless/ap.html>

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

- 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行った。

## 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台無線 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行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行った。シ

ナリオ 3, 5, 7, 8 においては半数の端末で講義を受信すると同時に YouTube 動画の再生を行ったが, これは無線ネットワークへの負荷が増加した際の様子を確認するために実施したものであり, 後述するオンライン講義のスコアリングについては YouTube 動画を再生していない端末でのスコアを用いた。シナリオ 9 で利用したモバイル WiFi は, 大学で学生に対して下宿などでのオンライン受講用に配布しているソフトバンク社の Pocket WiFi 801ZT である。対応している無線規格は 802.11b/g/n (2.4 GHz) であり, 本シナリオでは部屋内の無線基地局のチャンネルをモバイル WiFi で提供しているチャンネルと同じチャンネルに固定することで干渉の影響を検証した。モバイル WiFi へは Zoom への接続に使用したクライアントとは別に 1 台だけ接続し, シナリオ中に当該機器で Youtube 動画をモバイル WiFi 経由で受信した。

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。2 を除くシナリオで利用した動画は送信ビットレートの平均は 400 kbps であり, 4, 5, 8 で利用したもう 1 つの講義動画の送信ビットレートは平均で 470 kbps である。シナリオ 2 で利用した高画質の動画は送信ビットレートの平均は 3000 kbps であり, 配信は測定を行った教室とは異なるキャンパス内の場所から行った。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した。

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行った。

## 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





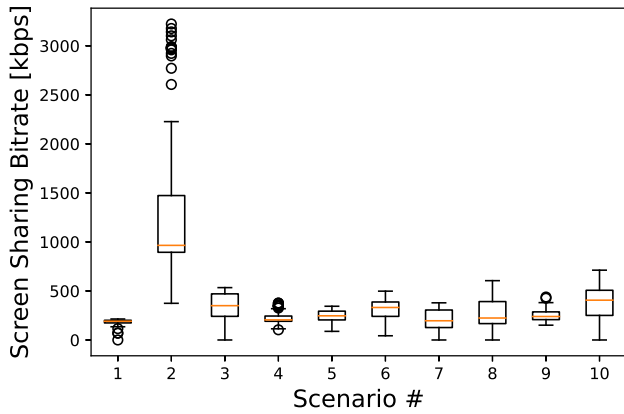


図7 シナリオごとの画面共有トラフィックのビットレート  
Fig. 7 Screen Sharing bitrate[kbps] in each scenarios.

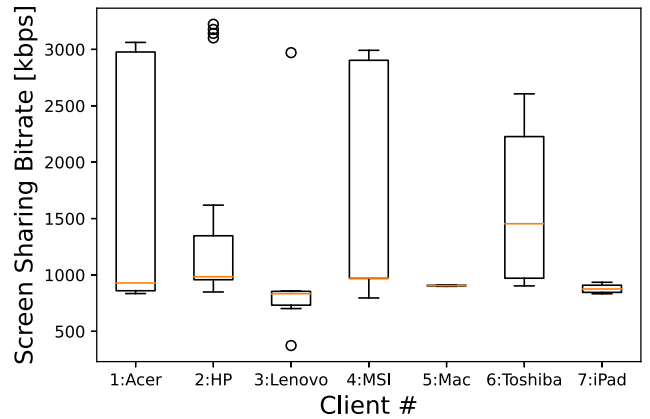


図9 シナリオ2における端末種別ごとの映像ビットレート  
Fig. 9 Video bit rate for each client type in Scenario 2.

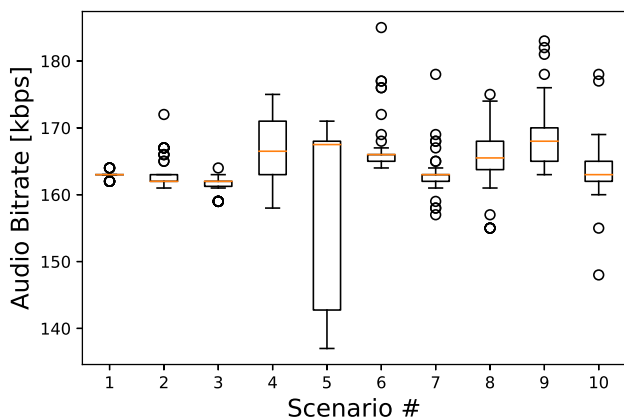


図8 シナリオごとの音声トラフィックのビットレート  
Fig. 8 Audio bitrate[kbps] in each scenarios.

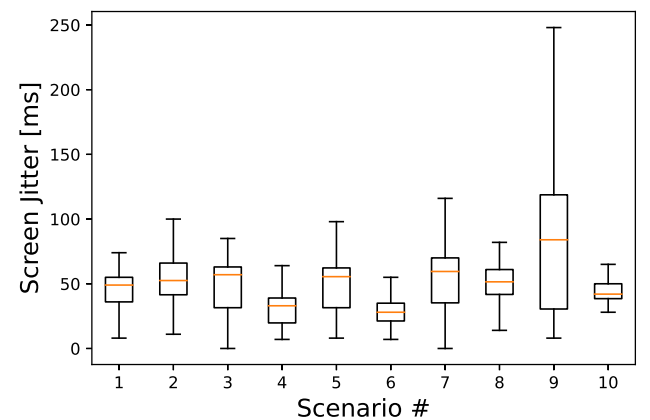


図10 シナリオごとの画像共有ジッタの分布  
Fig. 10 Distribution of Screen Sharing Jitter(ms).

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映像を画面共有したシナリオ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、3 Mbps 前後の高いビットレートで受信している端末と、500 kbps 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にばらつきが発生することが見てとれる。図9にシナリオ2における端末種別ごとの映像ビットレートを示す。Mac BookとiPadを除く端末では、高いビットレートを受信している端末、および低いビットレートを受信している端末の両方が存在し、端末の種別ごとに受信ビットレートの高低差はみられなかった。Mac BookとiPadでは全台が低いビットレートで受信していたが、無線インタフェースの仕様上の性能はクライアント群では高いほうであり、クライアントソフトウェアの挙動に依存すると考えられる。

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なかった。

図10、図11にシナリオごとの映像・音声のジッタ分

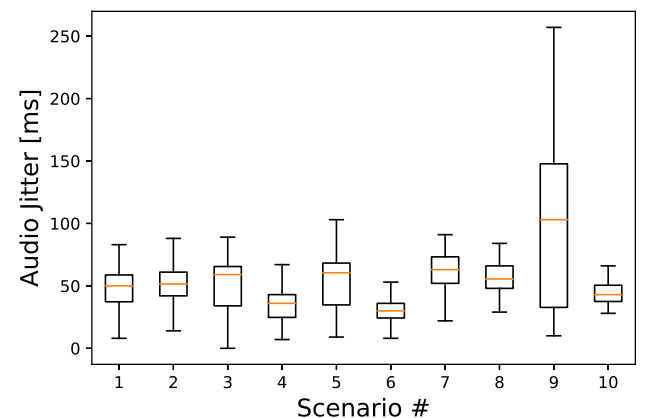


図11 シナリオごとの音声ジッタの分布  
Fig. 11 Distribution of Audio Jitter(ms).

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分かる。

Zoomの画面共有のトラフィックについて、図12、図13に802.11acで接続を行った際のアプリケーションレイ

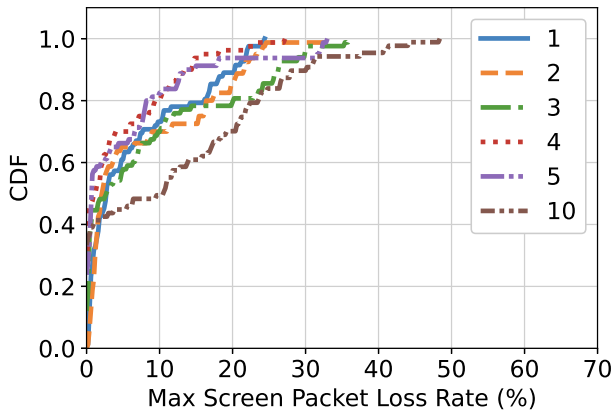


図 12 802.11ac での画面共有のペケットロス率 (最大値)

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

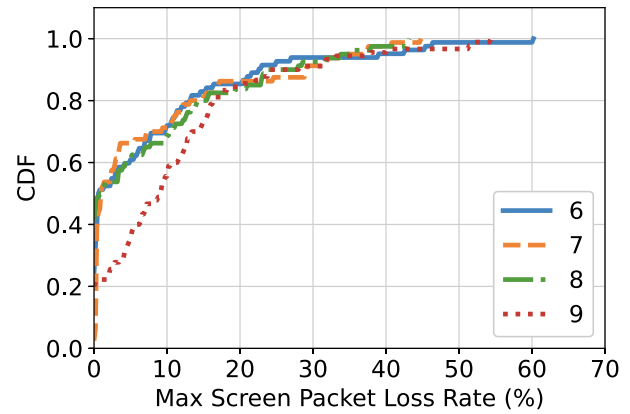


図 14 802.11n での画面共有のペケットロス率 (最大値)

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

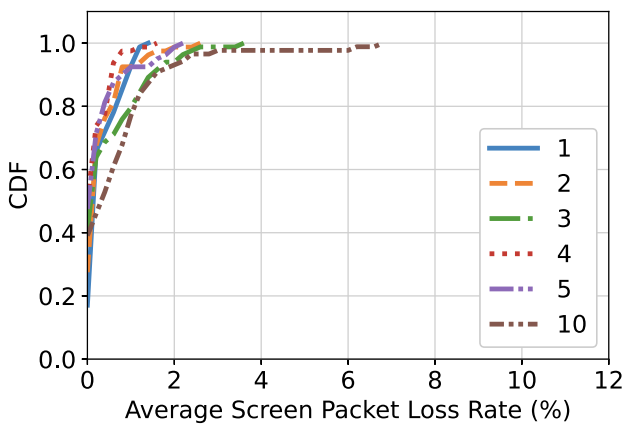


図 13 802.11ac での画面共有のペケットロス率 (平均値)

Fig. 13 Mean packet loss rate for screen sharing on 802.11ac.

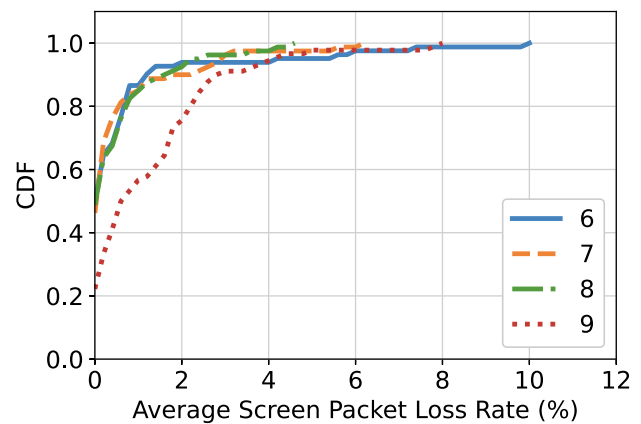


図 15 802.11n での画面共有のペケットロス率 (平均値)

Fig. 15 Mean packet loss rate for screen sharing on 802.11n.

ヤでのペケットロス率のそれぞれ最大値と平均値を、図 14, 15 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すべての端末が同一の Zoom 講義に接続する場合 (シナリオ 1, 2, 3, 10) に比べて、複数の Zoom 講義に接続する場合 (シナリオ 4, 5) の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 1 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、それ以外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行ったシナリオ 9 において顕著なペケットロス率の最大値の悪化がみられた (図 14)。また、シナリオ 9 はペケットロス率の平均値も同様に悪化しており (図

15)、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 16 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分かる。

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。これ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

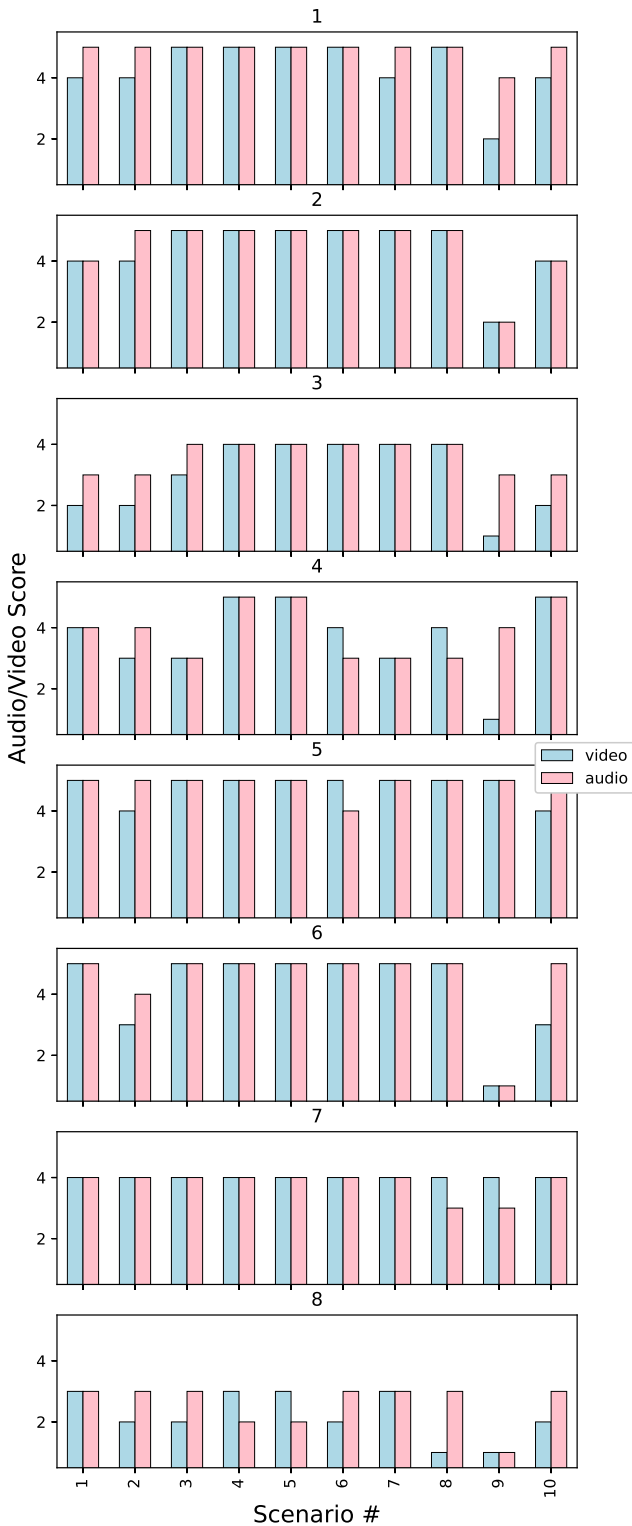


図 16 シナリオごとの実験協力者のスコア  
Fig. 16 Subject's Scores per scenario.

の個体の影響によるものと考えられる。

図 17, 図 18 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 200 ms を上回った場合には, 実験協力者の相対的なスコアのほとんどが平均以下になっている

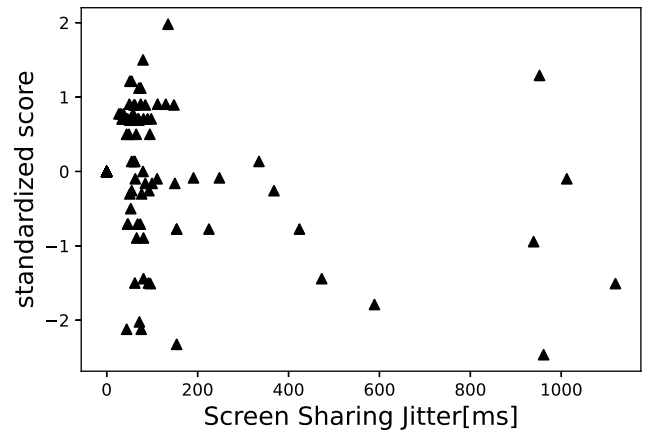


図 17 標準化した実験協力者の映像へのスコアと画面共有ジッタの関係  
Fig. 17 Standardized Score for a video vs Screen Sharing Jitter(ms).

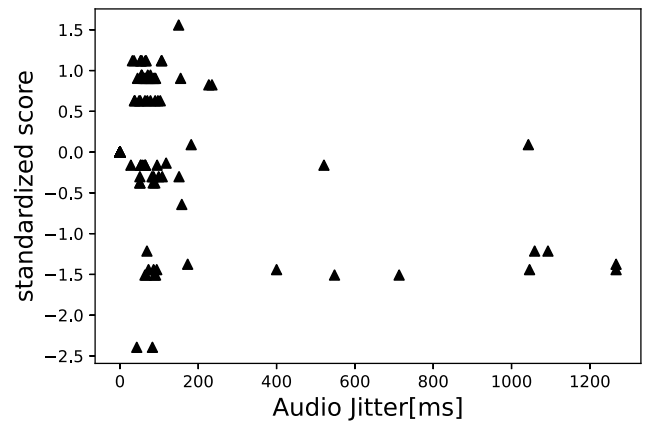


図 18 標準化した実験協力者の音声へのスコアと音声ジッタの関係  
Fig. 18 Standardized Score for a audio vs Audio Jitter(ms).

ことが分かる。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うえでの重要な指標のうちの 1 つであるといえる。

#### 4. 実験結果の考察

本実験では, 感染症対策のため教室の定員を半分とした状態で, 学生の持つ様々な種類の端末を想定し 6 種類の PC・タブレットで同時にオンライン講義を視聴できるかの確認を行った。まず下記に本実験から得られた知見をまとめる。

- 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みられたが、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。

本実験の目的は実際の教室において、多人数での同時オンライン講義の受講が可能であるかを確認することである。そしてその結果は、本来定員 160 名の教室で 80 人が視聴した場合、様々なパラメータはあるものの総じて可能であると言えるものであった。ここでは、本実験から得られた知見をもとに、それ以外の教室でのオンライン講義の視聴について考察する。

今回我々が実験を行った部屋は、定員 160 名と比較的大きな部屋であり、実際の大学の教室はこれよりも小さな部屋が多い。実際に東京大学駒場 1 キャンパスの教室の約半分が定員 50 名以下である。こうした部屋で同時にオンライン講義の受講が可能かどうかについては、本実験結果から可能であると推察される。シナリオ 10 では AP 1 つに 80 台の端末が接続し、パケットロスの増加はみられたものの視聴に問題はなかった。50 名規模までの教室においては一部屋に 1 台は AP が設置されている場合が多く、そうした部屋でも問題なくオンライン講義の視聴は可能であろう。一方部屋の定員が少ないなどの理由で AP が設置されていない教室の場合は、廊下に AP があれば視聴は可能であると推察される。図 3 にあるように、本実験でも一部の端末が教室の外、廊下の天井裏に設置された AP に接続しているが、それによる問題は報告されていない。しかし AP の設置されていない複数の教室が一箇所に集中している場合、廊下等に設置された AP に端末の接続接続が集中する。そういった配置の AP については、AP の機種やスペックによるもの、本実験が示した 80 台を 1 つの目安として、接続端末数が過剰にならないか注意して配置等を設計する必要がある。

次に定員が 160 名よりも多い大教室では、設備機材やコストの関係で十分な数の AP が設置されていない場合がある。たとえば本学において、実験を実施した教室は定員

160 名に AP が 2 台（1 台は廊下）であるが、定員が 2 倍以上のある教室に設置されている AP は 3 台である。そういった場合でも、感染症対策によって教室の利用人数が制限され人口密度が一定以上にならない現在の状況では、オンライン講義視聴については問題無い可能性がある。先ほど述べた AP が 3 台設置されている教室は定常時は定員 335 名だが、感染症対策で利用できる席を減らした結果、利用できる人数は 184 名までとしている。これは、本実験の AP 3 台でオンライン視聴が可能であると推定できる人数である。このように大教室においては感染症対策による人口密度の低下が AP の設置台数と収容能力に余裕を生み出している場合がある。

一方教室の規模や AP の数とは別にオンライン講義の品質に大きな影響を与えるものとしてモバイル WiFi ルータがある。シナリオ 9 の結果から、この悪影響は顕著であると言え、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。

最後に、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 の接続操作を行ってもらったが、設定が分からない、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。この点は、環境や規模によらず、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できたのも本実験の実施を通じて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、複数の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行った。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分かった。

2020 年度秋学期よりハイブリッド方式での講義が開始したが、さらに継続して実運用環境での測定を行うことにより、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行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いただきました。心より感謝いたします。

参考文献

[1] 田浦健次朗, 明比英高, 秋田英範, 郡司 彩, 工藤知宏, 空閑洋平, 栗田佳代子, 黒田裕文, 三浦紗江, 中村文隆, 中村 宏, 小川剛史, 岡田和也, 坂口菊恵, 関谷貴之, 柴山悦哉, 玉造潤史, 友西 大, 椿本弥生, TAVARES VASQUES Diego, 吉田 壘: 東京大学におけるオンライン授業の始まりと展望, コンピュータ ソフトウェア, 2020, 37 巻, 3 号, p.3\_2-3\_8, 公開日 2020/09/22, Print ISSN 0289-6540, <[https://doi.org/10.11309/jssst.37.3\\_2](https://doi.org/10.11309/jssst.37.3_2)>, <[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jssst/37/3/37\\_3\\_2/\\_article/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jssst/37/3/37_3_2/_article/-char/ja)>, 抄録:

[2] 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).

[3] 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).

[4] TR-398 Wi-Fi In-Premises Performance Testing: Broadband Forum, <<https://www.broadband-forum.org/download/TR-398.pdf>> (2019 Oct)

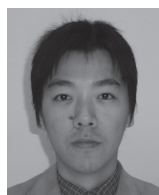
[5] Zink M., Suh K., Gu Y. and Kurose J.: "Characteristics of YouTube network traffic at a campus network—Measurements, models, and implications", Computer Networks, Vol.53, Issue 4, pp.501-514 (2009).

[6] Rao A., Legout A., Lim Y., Towsley D. F., Barakat C. and Dabbous W. S.: 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).

[7] Huang T.-Y., Handigol N., Heller B., McKeown N., and Johari R.: "Confused, timid, and unstable: picking a video streaming rate is hard", IMC '12: Proceedings of the 2012 Internet Measurement Conference, pp.225-238 (2012).

[8] 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).

[9] School Administrator's Guide to Rolling Out Zoom: <<https://zoom.us/docs/doc/School%20Administrators%20Guide%20to%20Rolling%20Out%20Zoom.pdf>>, (accessed 2020-09-01)



石原 知洋

2009 年慶応義塾大学政策・メディア研究科後期博士課程修了。2010 年博士 (政策・メディア)。2009 年より東京大学総合文化研究科特任助教に就任。2016 年同研究科助教, 2019 年同研究科准教授。ドメインネームシステムおよびインターネット・無線 LAN の運用技術に関する研究・開発に従事。



四本 裕子

東京大学 大学院総合文化研究科 教授。Ph.D. (Psychology)。東京大学卒業後, 米国ブランダイス大学大学院で Ph.D. を取得。ボストン大学およびハーバード大学医学部付属マサチューセッツ総合病院リサーチフェロー, 慶應義塾大学特任准教授, 東京大学准教授を経て現職。専門は認知神経科学, 知覚心理学。



角野 浩史 (非会員)

2000 年東京大学理学系研究科博士課程中退, 同研究科附属地殻化学実験施設助手, 2001 年博士 (理学) 取得。2015 年東京大学総合文化研究科准教授, 2022 年同教授を経て, 2022 年 4 月より現職。2020 年に東京大学総合文化研究科の研究科長・学部長補佐として, コロナ禍におけるハイブリッド授業環境の整備に携わる。専門は地球化学, 環境化学, 質量分析学。



玉造 潤史

2008 年より東京大学情報システム本部にて, 情報システム戦略に基づいた全学的な情報サービス提供を担当。全学的な WiFi 環境として UTokyo WiFi の導入整備・運用を行う。現在は大学活動の ICT による高度化を utelecon プロジェクトで推進中。



中村 遼

東京大学 情報基盤センター ネットワーク研究部門助教。博士 (情報理工学)。2017 年東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了。オペレーティングシステムのネットワークサブシステム, SDN/NFV, ネットワークアーキテクチャの研究に従事。



小川 剛史

1997年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。1999年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。2000年同研究科博士後期課程中退後、同大学サイバーメディアセンター助手。2007年東京大学情報基盤センター講師、2010年同准教授となり、現在に至る。拡張現実感、ヒューマンインタフェース、グループウェアなどに関する研究に従事。博士（情報科学）。



相田 仁

1980年東京大学工学部卒業。1985年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。東京大学工学部助手、講師、准教授を経て1999年東京大学大学院工学系研究科教授。情報通信ネットワーク、並列・分散コンピューティングの研究に従事。2020～IFIP日本代表。電子情報通信学会、人工知能学会、ソフトウェア科学会、電気設備学会、IEEE、ACM会員。



工藤 知宏

1991年慶應大学理工学部電気工学専攻博士課程修了。1991～1997年東京工科大学情報工学科助手/講師/助教授。1997～2002年技術研究組合新情報処理開発機構。2002年4月独立行政法人産業技術総合研究所、2015年4月より東京大学情報基盤センターネットワーク研究部門教授。工学系研究科電気系工学専攻兼担。産業技術総合研究所特定フェロー。