

アバター使用を想定した Starlink の通信特性評価実験

特定非営利活動法人けいはんなアバターチャレンジ

最近注目される NTN (Non-Terrestrial Network) の代表格が Starlink である。地上の 500km 離れた 2 地点を結ぶ光ファイバーケーブル上の光の伝搬時間は 2.5ms、この 2 地点の midpoint の 500km 上空の低軌道衛星経由の光の伝搬時間は、簡単な計算で、3.8ms である。衛星中継という点、これまでは静止衛星のイメージが強く、長遅延と思いがちだが、Starlink の場合、簡単な幾何学で光の伝搬時間はさほど大きくないことが分かる¹。この報告は、Starlink の特性を実験によって評価したものである。

I. 評価サマリ

一部に問題があるが、アバター操縦メディアとして Starlink は LTE や LTE 転用型の 5G を凌駕する。

- ① 6 台接続時に、ダウンリンクもアップリンクもそれぞれ 10Mbps、2.56Mbps を下回ることなく、JITTER も PC 接続台数にほとんど依存せず平均 10ms でほぼ一定かつ小さい。この点で、アバター操縦メディアとしては LTE を凌駕する。
- ② RTT に関しては、33~51ms と LTE を凌駕する場合もあるが、**今回は 182~201ms の場合も観測された。**前者をキープするように運用すれば RTT に関しても LTE を凌駕できるが、何故後者に移行したのか、今後の検証が必要である。
- ③ Connectivity to OpenTok Servers への接続特性は良好である。1280x720@30fps の PC を 8 台接続して生成される映像信号は、約 21Mbps と推定できる。アップリンクは 27Mbps 以上と推定できるため、8 台接続の競技会を開催可能と推定できる。

II. 評価方法

1. USEN のスピードテストをする <https://speedtest.gate02.ne.jp/>

- ① PC を、1 台、2 台、3 台、4 台、5 台、6 台同時に通信させて測定する。以下は、実測例。
- ② 各測定ごとに、スクリーンをキャプチャ (PrintSCRN²で画面をコピーし、ペイントにペースト) してセーブする。

¹ 現実には、地上の光ケーブルは 2 地点を一直線で結ぶことは通常ないこと、ルータ等多くの通信機器を経由することによる処理遅延が加わることから、伝搬時間は 2.5ms より長い。

² Windows マシンであれば、Windows+Shift+s キーを押すとマウスで範囲指定できるので便利


速度測定や速度診断を行います

USENのスピードテストは1クリックで簡単にインターネット通信速度を測定できます。



測定開始

IP Address:106.133.222.192 - Unknown ISP

用途別回線スピード判定結果

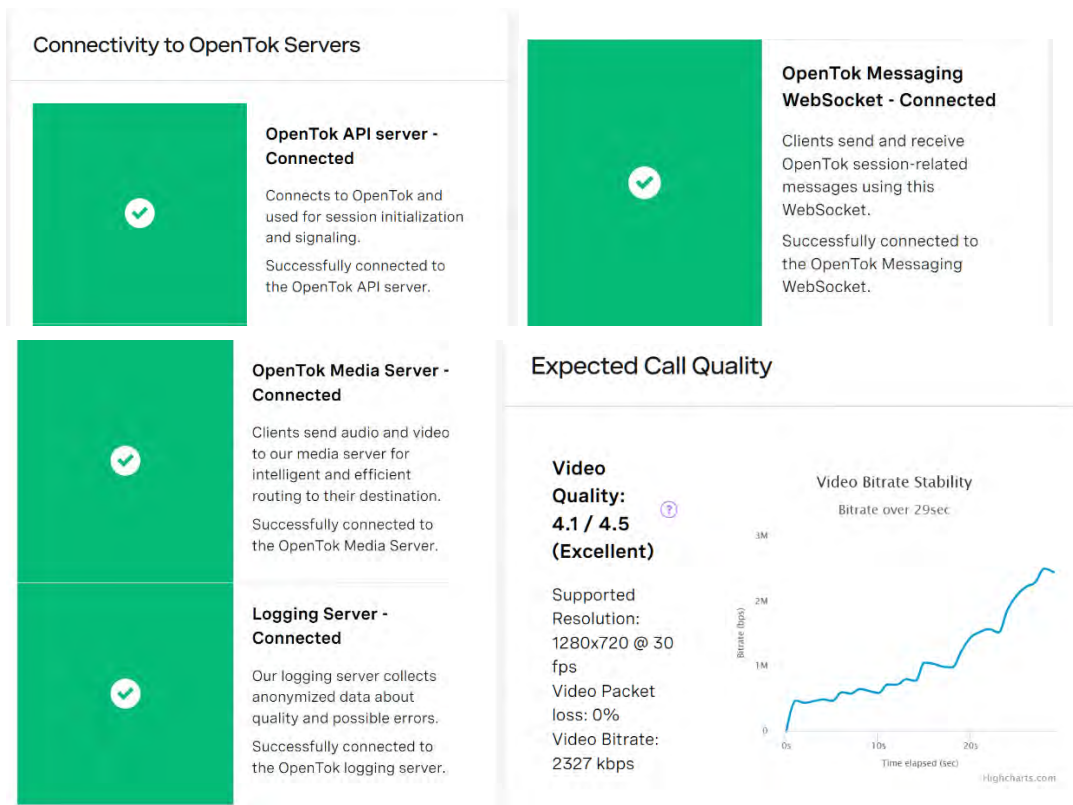
Webサービス		動画閲覧(youtube)	
Webサイト閲覧	😊 快適	高画質 (480p)	😊 快適
SNS利用	😊 快適	フルHD (1080p)	😊 快適
ビデオ通話	😊 快適	4K	😞 ストレス

ゲーム		ビジネス	
オンラインゲーム	😐 普通	メール	😊 快適
スマホアプリゲーム	😊 快適	ビデオ会議	😊 快適
		クラウド利用	😐 普通
		大容量通信 (動画や画像の送受信)	😞 ストレス

2. Connectivity to OpenTok Servers への接続特性を調べる

<https://tokbox.com/developer/tools/precall/results>

- ① PC を、1台、2台、3台、4台、5台、6台同時に通信させて測定する。以下は、実測例。
- ② 各測定ごとに、スクリーンをキャプチャしてセーブする。



III. 設置場所と使用機材

① 設置場所

2023年11月19日のけいはんなアバターチャレンジ会場である日時計広場から右の場所を選択した。

(ここで赤い△印はアンテナの位置、赤丸は電源コンセントを表している。)

測定用PCは直射日光下では画面の判読が難しいため、ATRから借用したパラソルの下に(株)けいはんなから借りたテーブルと椅子を置いて、その上にPCを設置して測定した。



② Starlink キット

(a) アンテナとその設置状況

アンテナ設置については一定以上の仰角で障害物が無いことが求められる。

日時計広場の場合、交差点／日時計あたりからなら大丈夫そうだが、建物に近づくと視野が限定される。選んだ場所は右の写真の位置³。

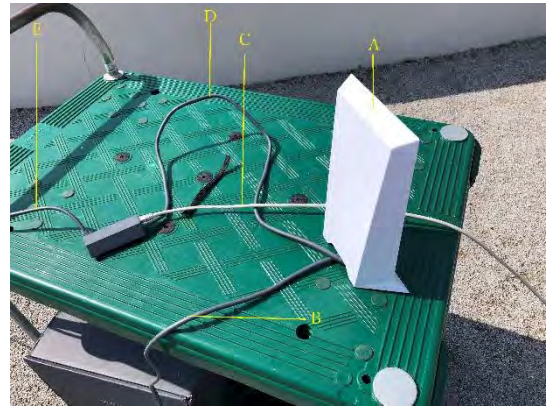


当該場所の全周の状況を以下に示す。北の空域が開けた場所なので「これは Starlink に非常に適した場所です」と表示されている。



(b) ルータと Ethernet

ルータ A にはケーブル B で 100V が供給され、通常は Power on Ether ケーブル E でアンテナと接続する。これで Wi-Fi で PC やスマホをスターリンクにつなぐのが標準構成である。今回は、Starlink の本来の実力を測るため、固定の Ethernet 接続にしている。このため、右図の濃い灰色のハブ経由でアンテナからの Power



³ Starlink のサイト (<https://www.starlink.com/>) から、設置候補場所での視野確認のスマホソフトを得ることができる。このウェブページの下の方に “Manage Starlink on the Mobile App” という項があり、その下に IOS 用、アンドロイド用各アプリがある。iPhone の場合：

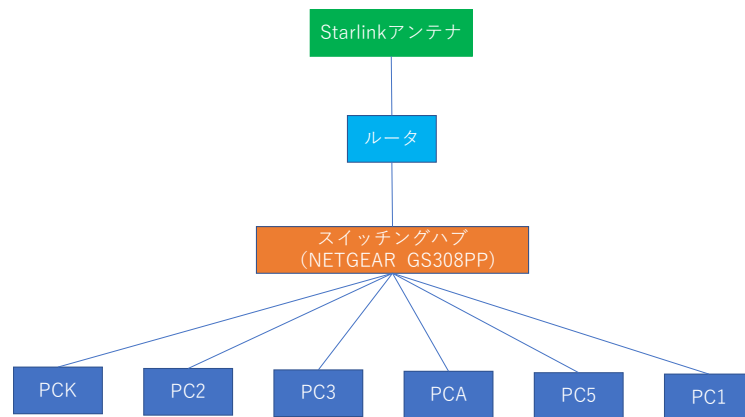
<https://apps.apple.com/us/app/starlink/id1537177988>

からダウンロードし、アプリ起動後、カメラを On にして天頂を見ながら 360 度一周すると、全周の状況が判る。

on Ether ケーブル E とルータ A からの Power on Ether ケーブル D を繋ぎ、さらに 6 台の PC を繋ぐスイッチングハブ (NETGEAR アンマネージスイッチ GS308PP) への Ethernet ケーブル C を繋ぐ構成にしている。

③ ネットワーク構成

今回の構成は Starlink の一般的な使い方ではない。Wi-Fi による端末収容ではなく、固定の Ethernet 接続である。Starlink の素の性能を評価することが目的であった。実験に用いたネットワークのブロック図を次の図に示す。



④ PC の仕様と組み合わせについて

- (a) PC 番号 1 : DELL Vostro 1520(Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU P8600 @ 2.40GHz, 2GB, Windows 10 Pro, Mozilla Firefox 110.0.1 (64 ビット))
- (b) PC 番号 2 : VAIO(Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU P9700 @ 2.80GHz, 4GB, Windows 10 Pro, Mozilla Firefox 110.0.1 (64 ビット))
- (c) PC 番号 3 : LetsNote CF-SX2D(Intel(R) i7-3540 CPU @ 3.00GHz, 4GB, Windows 10 Pro, Mozilla Firefox 110.0.1 (64 ビット))
- (d) PC 番号 5 : VAIO Z13A1 (Intel(R) Core(TM) i7-5557U CPU @ 3.10GHz, 16GB, Windows 10 Pro, Mozilla Firefox 110.0.1 (64 ビット))
- (e) PC 番号 A : LetsNote CF-SV (Intel(R) Core(TM) i5-8365 CPU @ 1.60GHz 1.90GHz, 4GB, Windows 10 Pro, Mozilla Firefox 110.0.1 (64 ビット))
- (f) PC 番号 K : DELL Vostro 14 (3468) (Intel(R) Core(TM) i3-6100U CPU @ 2.30GHz, 4GB, Ubuntu 16.04 (Linux kernel 4.4.0-210-generic)、Mozilla Firefox 88.0 for Ubuntu canonical - 1.0)

ここで PC の台数別に用いた PC を以下に示し、セッション 1 ~ 12 と呼ぶことにする。セッション 12, 11, 10, 9, 8, 7, 6 の PC の台数は、それぞれ 6,

5, 4, 3, 2, 1台である。平均値は同じPC台数のセッションないでとっている。

- セッション1=PC1台の場合：PC番号K
- セッション2=PC2台の場合：PC番号K、PC番号2
- セッション3=PC3台の場合：PC番号K、PC番号2、PC番号3
- セッション4=PC4台の場合：PC番号K、PC番号2、PC番号3、PC番号A
- セッション5=PC5台の場合：PC番号K、PC番号2、PC番号3、PC番号A、PC番号5
- セッション6=PC6台の場合：PC番号K、PC番号2、PC番号3、PC番号A、PC番号5、PC番号1
- セッション7=PC6台の場合：PC番号K、PC番号2、PC番号3、PC番号A、PC番号5、PC番号1
- セッション8=PC5台の場合：PC番号K、PC番号2、PC番号3、PC番号A、PC番号5
- セッション9=PC4台の場合：PC番号K、PC番号2、PC番号3、PC番号A
- セッション10=PC3台の場合：PC番号K、PC番号2、PC番号3
- セッション11=PC2台の場合：PC番号K、PC番号2
- セッション12=PC1台の場合：PC番号K

IV. 実験結果

1. Starlink アプリの品質評価結果

- ① 速度テストアプリは、ダウンロード138Mbps、アップロード27Mbps、遅延時間39msと表示した。
- ② ネットワーク統計アプリは、10時33分以前の1時間内に1分24秒通信途絶期間があったこと（ネットワークの問題で断が9秒あったこと）、遅延が22ms～89msであったこと⁴、スループットがダウンロード10kbps、アップロード20kbpsと表示した。⁵

⁴ 「分：20ms」の意味は分からず。

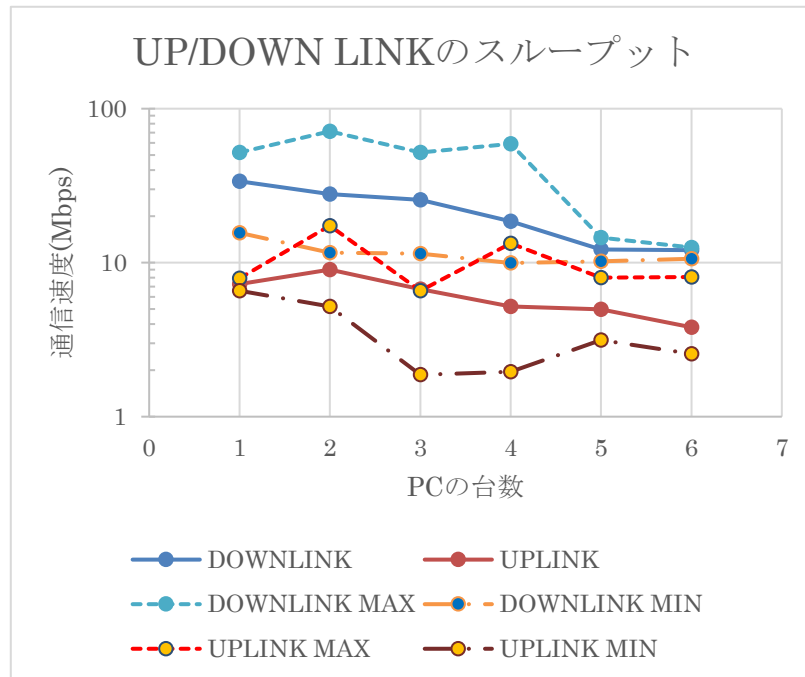
⁵ 速度テストアプリのアップ/ダウンの速度と、ネットワーク統計アプリのスループットのアップ/ダウン速度はダウンロード速度がかなり異なる。前者は9時20分の測定ダウン138Mbps、アップ27Mbpsであるが、後者は10時33分の値でダウン20kbps、アップ10kbpsとなっている。



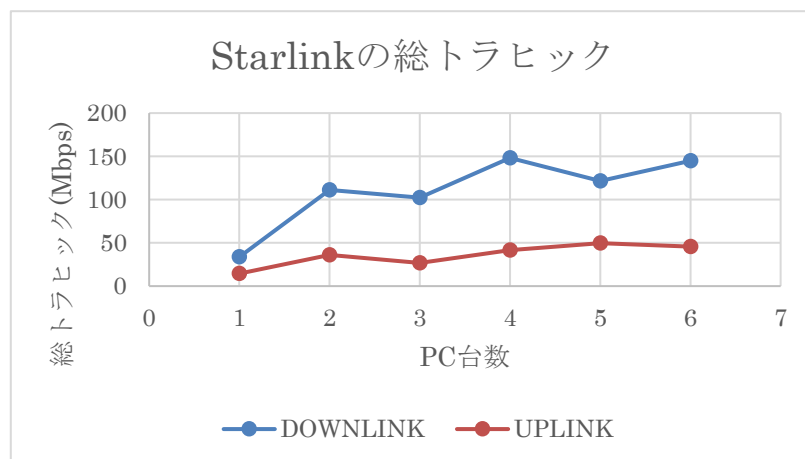
2. USEN のスピードテスト (<https://speedtest.gate02.ne.jp/>) の結果
測定結果（各端末 2 回）を下図に示す。

2.1 ダウンリンクとアップリンクのスループットについて

- ① ダウンリンクのスループットは PC の台数に関して、それほど急速には下がらず、6 台接続時にも 10Mbps を下回らない。
- ② アップリンクに関しても同様であり、6 台接続時の平均スループットは 3.8Mbps、最小値の PC でも 2.56Mbps であった。



一方、各 PC の送受のトラヒックの総和は、Starlink のアップリンクとダウンリンクの速度の実力を見るのに有用な指標を与えてくれる。総和から実質的ダウンロード速度は 140Mbps 程度、アップロード速度は 40Mbps 程度と推定される。これは、Starlink 速度テストアプリがダウンロード 138Mbps を示していることにほぼ合致している。アップロードは 27Mbps であったので、やや乖離している。



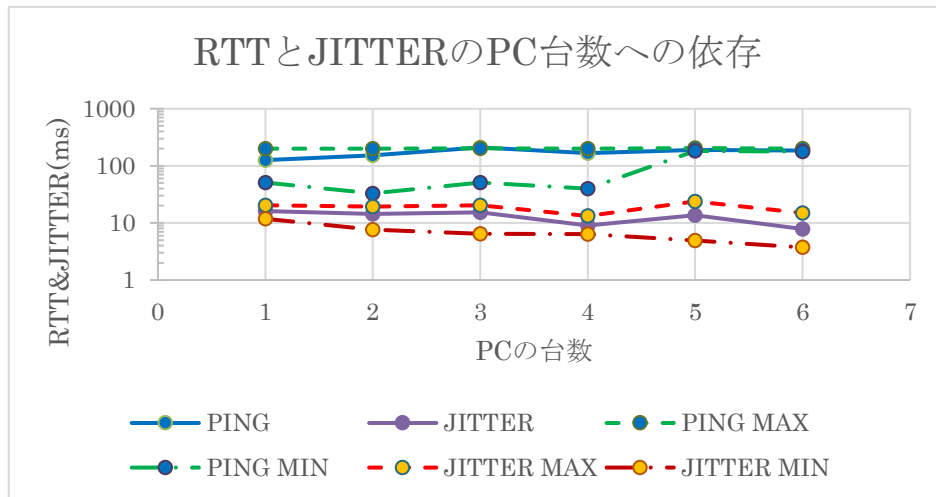
2.2 通信遅延 (RTT) について

Ping による測定結果を下図に示す。

- ① RTT(Ping 値)は PC 台数にほとんど依存せず、平均 190ms でほぼ一定。分散も小

さく PC が 6 台の時、最大と最小の差は 28ms しかない⁶。

- ② JITTER も PC 台数にほとんど依存せず、平均 10ms でほぼ一定。PC が 6 台の時、最大と最小の差は 11.28ms。平均値を考えると相対的に大きい。

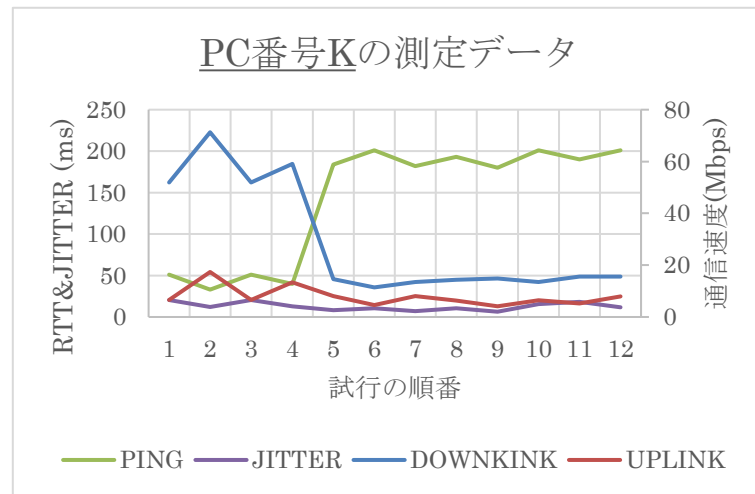


ここで、RTT の最小値は PC 台数 4 台のセッションまで 33~51ms 程度で、5 台以降に 180ms 程度に上昇する。最小値をとるのは PC 番号 K である。この PC がセッション 1 参加 PC であるため、最初にトラヒックを作り、その後他の PC が加わるという手順であった。

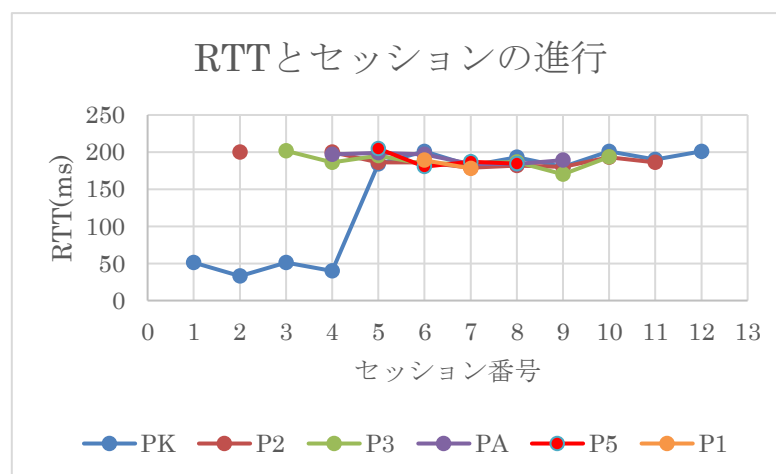
PC 番号 K の測定を時間順に追ってみると、4 番目の試行まで 50Mbps のダウンロード速度、33~51ms の RTT だったものが、5 番目の試行から 14.55Mbps、184ms の RTT に激変している。以後の PC 番号 K の RTT は他の PC 同様 184ms 程度でほぼ固定される⁷。

⁶ これは、Starlink 速度テストアプリが遅延時間 39ms を示していることを考えると、5 倍ほど大きい。理由は不明である。

⁷ この理由は不明である。ルータが流量制御している可能性がある。



このため、各 PC がセッションの進行に対してどのような RTT を示したかを下図に示した。UBUNTU でセッション 1 に参加した PC 番号 K はセッションまでは、33～51ms の RTT だったが、セッション 5 以降は他の PC と同様な RTT(182～201ms)に移行していた。他の PC は Windows 10 であったが、終始 170.1～204.8ms の RTT であった。



RTT が 33～51ms と 182～201ms ではアバターの操縦性が全く異なる。前者を常に出来るように運用する必要がある。解決すべき課題は以下。

2.3 まとめと課題

- ① ダウンリンクもアップリンクも 6 台接続時にもそれぞれ 10Mbps、2.56Mbps を下回ることではなく、JITTER も PC 接続台数にほとんど依存せず平均 10ms でほぼ一定かつ小さい。この点で、アバター操縦メディアとしては LTE を凌駕する。
- ② RTT に関しては、33～51ms と LTE を凌駕する場合もあるが、今回は 182～201ms

の場合も観測された。前者をキープするように運用すれば RTT に関しても LTE を凌駕できるが、何故後者に移行したのか、今後の検証が必要である。

3. Connectivity to OpenTok Servers への接続特性の実験結果

今回使った PC は 1280x720@30fps (PC 番号 2 と PC 番号 3)、および 640x480@30fps の (PC 番号 K、PC 番号 A、PC 番号 5) であり、場面サイズが異なっているため、生成するビデオ信号速度に差が出る。

3.1 OpenTok 機能評価

正常に接続することが確認された。

OpenTok API server	Connects to OpenTok and used for session initialization and signaling. Successfully connected to the OpenTok API server.
OpenTok Messaging WebSocket	Clients send and receive OpenTok session-related messages using this WebSocket. Successfully connected to the OpenTok Messaging WebSocket.
OpenTok Media Server	Clients send audio and video to our media server for intelligent and efficient routing to their destination. Successfully connected to the OpenTok Media Server.
Logging Server	Our logging server collects anonymized data about quality and possible errors. Successfully connected to the OpenTok logging server.

3.2 映像品質の評価

MOS 値は、1280x720@30fps も 640x480@30fps 3.5 から 4.5 であり、Excellent レベルである。映像信号は全者の平均が約 2Mbps、後者の平均は 673kbps。

1280x720@30fps の最大値が 2.576Mbps であることから、全てこのタイプとしたときには 6 台で 15.456Mbps。

	PC1280x720@30fps	PC640x480@30fps
映像品質の MOS 客観評価値		
MOS min	3.8	3.5
MOS MAX	4.5	4.5
Video Bitrate kbps		
MIN	909	293
MAX	2576	739
AVE	1949.09	672.75

3.3 通信経路の評価

今回はうっかりミスで、ルータの WAN 側の (グローバル) IP アドレス、Traceroute でインターネットに出る経路の確認、JPIX 等との RTT の実測を行わなかった。下記は、東京大学の越塚登教授からいただいた

た www.google.com への経路であるが、参考までに添付した。なお、接続はWi-Fiであるが、DHCP サーバー等の設定は同じと推定できる。ここで、4番目の 149.19.109.14 は SPACEX-STARLINK-IPV4-0 のネットワークアドレス 149.19.108.0/23 の中のアドレスであることが分かる。また、starlinkrouter の Wi-Fi 側の 192.168.1.1 と 172.16.248.4 は Starlink が使っているプライベート IP アドレスである。100.64.0.1 は、Shared Address Space(100.64.0.0/10)である。これからわかるのは、Starlink 内の中継は Starlinkrouter も含めて 4 台で、149.19.109.14 の次のホップは JPIX である。日本のインターネットの中心までのホップ数も少ない。これは中継に伴う遅延の減少に貢献している。

```
% traceroute www.google.com
traceroute to www.google.com (142.250.207.100), 64 hops max, 52 byte packets
 1 starlinkrouter (192.168.1.1) 4.662 ms 3.051 ms 3.322 ms
 2 100.64.0.1 (100.64.0.1) 31.403 ms 51.747 ms 44.692 ms
 3 172.16.248.4 (172.16.248.4) 25.389 ms 30.361 ms 45.414 ms
 4 149.19.109.14 (149.19.109.14) 30.561 ms 29.190 ms
 149.19.109.18 (149.19.109.18) 51.940 ms
 5 as15169-2.ix.jpix.ad.jp (210.171.224.95) 29.118 ms 31.391 ms 29.266 ms
 6 108.170.242.208 (108.170.242.208) 26.552 ms
 108.170.242.177 (108.170.242.177) 33.408 ms
 108.170.242.144 (108.170.242.144) 29.335 ms
 7 209.85.246.213 (209.85.246.213) 26.816 ms
 209.85.244.62 (209.85.244.62) 30.308 ms
 209.85.244.37 (209.85.244.37) 25.423 ms
 8 142.250.58.20 (142.250.58.20) 29.302 ms
 142.250.58.92 (142.250.58.92) 38.607 ms
 142.250.58.20 (142.250.58.20) 29.044 ms
 9 108.170.243.65 (108.170.243.65) 35.717 ms
 108.170.243.33 (108.170.243.33) 49.663 ms
 108.170.243.65 (108.170.243.65) 34.584 ms
 10 142.251.69.231 (142.251.69.231) 28.310 ms 38.683 ms 30.711 ms
 11 kix06s11-in-f4.1e100.net (142.250.207.100) 41.304 ms 33.847 ms 31.863 m
```

3.4 まとめと課題

Connectivity to OpenTok Servers への接続特性は良好である。1280x720@30fps の映像信号最大値が 2.576Mbps であることから、全てこのタイプとしたときには 6 台で 15.456Mbps となる。8 台接続で約 21Mbps である。今回の測定では、実験 1 でアップリンクは 27Mbps、実験 2 で 40Mbps と推定できていることから、8 台接続の競技会を開催可能と推測できる。

データを取りそこなったものは以下。

- ① PC に割り当てられたプライベート IP アドレス
- ② アンテナもアプリから制御できるのでプライベート IP アドレスがある。その値。
- ③ ルータの WAN 側の (グローバル) IP アドレス
- ④ Traceroute でインターネットに出る経路の確認。
- ⑤ JPIX 等との RTT の実測。

以上