

論文

# キャンパス間ネットを用いた HD 映像ストリーミング配信に関する検討

佐藤 純也    伊藤 亮介    藤井 哲郎

東京都市大学内において、キャンパスネットを用いたフル HD 映像のストリーミング配信に対するニーズが高まってきている。例えば、平成 25 年 12 月に世田谷キャンパスで行われたノーベル賞受賞者、白川英樹先生の講演をリアルタイムで横浜キャンパスに配信したいという要請等があげられる。これらの要請に答える為に、キャンパス間ネットワークの特性を正確に測定し、トラヒックの推定を行った。この結果に基づいて、キャンパス間で HD 映像を伝送する様々な方式を検討し、方式選定を行った。本稿では、構築した HD 映像ストリーミング配信システム、及びその運用結果を報告する。さらに、付属塩尻高校用に提供する遠隔講義用に構築した、インターネットを介したライブ中継システムについても併せて報告する。

キーワード：キャンパスネット、ストリーミング配信、HD 映像、ライブ中継、遠隔講義

## 1 まえがき

近年、ニコニコ動画や YOUTUBE に代表されるように、動画のライブストリーミング配信によるイベントの生中継が様々な場所で注目を集めている。本学においても、高品質な HD 映像を用いて、平成 25 年 12 月に世田谷キャンパス (SC) で開催されたノーベル賞受賞者である白川英樹先生の講演を横浜キャンパス (YC) に生中継して欲しいという要請があったりする。筆者らはこれまでも、付属塩尻高校への遠隔講義の実施にあたり、HD 映像でストリーム配信を行ったり [1]、青山教授の最終講義を USTREAM を用いて HD 映像で外部発信を行ったりと [2]、キャンパスネットを活用した HD 映像による生中継を実施してきた。今後、このような、キャンパス間ネットワークを用いた HD 映像による生中継の要請が増えるものと思われる。

筆者らは、2011 年から横浜キャンパス内のネットワーク特性を調べ始め、横浜キャンパス内での HD 映像によるストリーム配信の可能性を検討してきた。本稿ではさらに、キャンパス間 (主に SC と YC 間) の特性を評価し、どの様な映像ストリーミング方式が可能なのか検討した結果を示す。さらに、それを基に構築した HD 映像配信システムの設計方針及び構築したシステムを

紹介する。その運用結果も併せて報告する。また、映像配信システムを再構築し、継続実施してきた付属塩尻高校への HD 映像ストリーミングシステムについてもその詳細と運用実績を併せて報告する。

## 2 キャンパス間ネットワークの特性

横浜キャンパスと世田谷キャンパスの間は、文科省が提供する SINET (Science Information NETwork) を中継点として、1Gbps の広域イーサネットワークで図 1 の様に接続されている。基本的に、両キャンパスの学生及び教職員がインターネットにアクセスする為に整

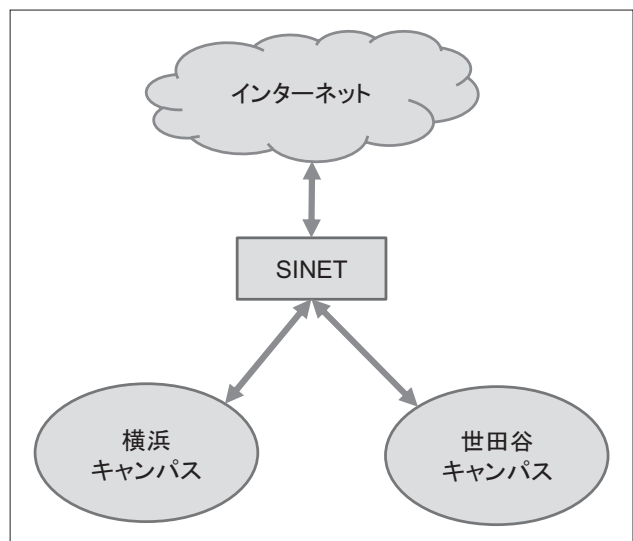


図 1 キャンパス間ネットワークの構成。SINET を介して 1Gbps の広域イーサネットワークで接続されている。

SATO Junya  
東京都市大学 環境情報学部 情報メディア学科 2013 年度卒業生  
ITOH Ryosuke  
東京都市大学 環境情報学部 情報メディア学科 2013 年度卒業生  
FUJII Tetsuro  
東京都市大学 メディア情報学部 情報システム学科 教授

備されたネットワーク構成である。このネットワークを流用して、両キャンパス間で TV 会議がしばしば開催されている。例えば、大学院環境情報学研究科は環境情報学専攻が横浜キャンパスに、都市生活学専攻が等々力キャンパスに分かれており、月一回の研究科委員会は、このキャンパス間ネットワークを活用した TV 会議システムを用いて実施している。ところが、映像専用のネットワークではないため、映像伝送レートを 1～2Mbps に落とし、映像品質を落とした状態で利用している。研究科委員会の途中において、しばしばパケット落ちが発生している。このキャンパス間ネットワークに関して、その正確な特性が把握できていない状況である。

まず、世田谷キャンパスと横浜キャンパスを結ぶキャンパス間ネットワークの調査を行った。2 台のパソコンを用意し、1 台を情報基盤センター YC（世田谷キャンパス）内に設置し、もう一台を情報基盤センター SC（横浜キャンパス）内の藤井研究室に設置した。計測用ソフトウェアとして jperf を使い、伝送プロトコルとして TCP と UDP を用いた場合の測定を行った。TCP を用いた場合の測定結果を表 1 に示す。同表より明らかなように、TCP を用いた伝送では、約 75Mbps での伝送が可能であった。また、RTT を計測したところ 6msec であった。TCP を用いた場合、SC・YC 間でそれなりの帯域が確保できることが明らかとなった。

ところが UDP を用いた測定結果は、大きく異なっていた。測定結果を図 2 に示す。同図から明らかなように、高品質な映像を伝送する為に必要な伝送速度 10Mbps において、SC → YC 方向で最大 0.7%、YC → SC 方向

で最大 1.4% パケット損失が発生することが判明した。パケット損失が 1% を超えると、歴然とした HD 映像の画質劣化が発生する。パケット損失の映像への影響をなくすためには、伝送速度を 1Mbps まで落とさざるをえない。経験的に TV 会議での映像の伝送レートを 1～2Mbps に落として運用していたが、その原因が明らかとなった。この測定結果から、UDP を用いての HD 映像ストリーミング配信は無理であるとの結論に至った。

さらに日時を変えて計測を行ったところ、12 時 40 分から 13 時までの昼休みと、17 時 30 分から 18 時 30 分までの放課後に集中してネットワークが混雑していることが判明した。しかも SINET 接続点から世田谷キャンパスに向かうトラヒックのみが非常に混雑していると推定された。世田谷キャンパスには総勢 5,000 人の学生が在籍しており、明らかに、インターネットを学生が利用する休憩時間帯に、インターネットからのダウンストリーム方向にトラヒックが集中しているのである。従って、この世田谷キャンパスへのダウンストリームトラヒックと重なる YC から SC に向けての HD 映像のストリーミングが困難となるのである。

### 3 HD 映像ストリーミング配信システムの構築

#### 3.1 ストリーミング配信方式の選定

前節で特性が明らかとなったキャンパス間ネットワークを利用して、12 月 18 日（水）に世田谷キャンパスで 13 時から行われたノーベル賞受賞者、白川英樹先生の講演を HD 映像で横浜キャンパスに生中継することとなった。従来用いられてきた TV 会議システムでは、ビットレートが低く、黒板の文字を鮮明に読み取ることができないことは明らかである。高品質なフル HD 映像での講演の生中継を実現する必要がある。そのために、フル HD 映像を伝送できる Teradek 社製の映像符号化装置 Cube 205 を用いることにした。本装置は、付属塩尻高校への遠隔講義用に平成 25 年度に新規導入した装置である。

この Cube205 は、H.264 方式を採用した最新の映像伝送用 CODEC であり、ハイビジョンの映像を 10Mbps の伝送速度でストリーム配信できる。最近、地デジのテレビ放送においても現場からの生中継に広く使われている。Cube205 は、伝送プロトコルとして TCP 或いは UDP を選択でき、配信方式として以下の 4 方式が選択可能である。この中から実際に行うストリーミング方式を選択することになる。なお、ライセンスの都合で、MPEG-TS over IP (UDP or TCP) を利用することは残念ながらできない。

#### 【RTMP (Real Time Messaging Protocol) 方式】

Adobe が開発した音声・動画・データをやりとりするストリーミングのプロトコル。TCP プロトコルを使

表 1 TCP 測定結果

| 伝送方向  | 伝送速度     |
|-------|----------|
| SC→YC | 74.7Mbps |
| YC→SC | 77.9Mbps |

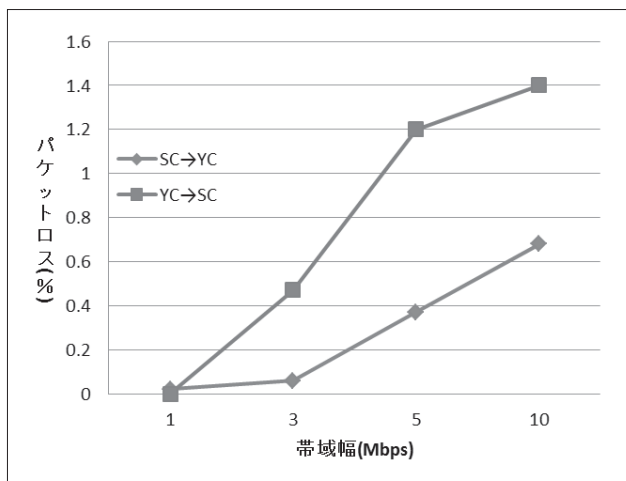


図 2 UDP におけるパケット損失測定結果 (YC, SC 間)

表 2 配信方式の比較 (SC・YC 間の映像伝送において)

| 方式           | プロトコル | 1 対多 | サーバ | レート (bps) | 遅延 (秒) | 総合評価 |
|--------------|-------|------|-----|-----------|--------|------|
| RTMP         | TCP   | ◎    | 有   | 10M       | 6-7    | ◎    |
| RTSP         | UDP   | ×    | 無   | 1M        | 1      | ○    |
| RTP Push     | UDP   | ◎    | 有   | 1M        | 2-3    | △    |
| RTSP マルチキャスト | UDP   | ◎    | 無   | 1M        | 1      | △    |

用する。プロトタイプを構築して計測したところ、遅延時間は約 6-7 秒。受信装置として PC を利用でき、ウェブページにて映像を再生できる。Adobe Media Server あるいは Wowza などのサーバを設置する必要がある。複数の PC に同時配信が可能である。

【RTSP (Real Time Streaming Protocol) 方式】

IETF において標準化されたリアルタイム性のあるデータのストリーミングを制御するためのプロトコル。UDP プロトコルを使用。遅延は 1 秒。受信装置として PC を利用でき、VLC プレイヤーによって再生できる。ただし、1 対 1 の配信のみが可能。YC・SC 間のキャンパスネットワークで用いる場合、パケット損失の観点から伝送レートは 1Mbps 程度となり、映像品質が悪くなる。

【RTSP Push 方式】

RTSP 方式と同様に、UDP を用いた伝送である。プロトタイプを構築して計測したところ、遅延時間は 2-3 秒。サーバを介して配信することで複数の PC に配信可能である。

【RTSP マルチキャスト方式】

RTSP Push 方式と同様であり、UDP を用いた伝送となる。配信方式としてマルチキャストを用いることでサーバへの負担が大幅に軽減。残念ながら、東京都市大学のキャンパスネットワークはマルチキャストをサポートしていないので、別途 VPN (Virtual Private Network) をキャンパスネットワークの上に構築して利用することになる。

以上の方式の特性を相対的に評価した結果を表 2 に示す。今回の講演の生中継では、双方向通信で重要とされる遅延時間は殆ど問題とならない。これに対し、パケット損失による画像の乱れは、映像の大幅な品質劣化を生じ、講演の配信に影響を与えると判断し、パケット損失の影響が比較的小さく抑えられる TCP プロトコルを用いた RTMP 方式で配信を行うことに決定した。TCP を用いることにより、パケットの自動再送が行われるので、映像が乱れにくいという特徴を持つ。但し、映像伝送の遅延が約 6 秒程度加わることで、付加的なサーバを 1 台新たに設置する必要も生じる。なお、普通のノートパソコンにて映像を受信でき、しかもサーバを介しているため複数の PC で受信できる。この方式は、Ustream のサーバをキャンパスネットワーク内に設置する方式と理解してもらえば良い [4]。

3. 2 ストリーミング配信システムの構築

RTMP 方式を用いて映像のストリーミング配信を実現するために、Wowza を用いたサーバを横浜キャンパス藤井研に設置し、映像ストリーミング配信システムを図 3 に示すように構築した。白川英樹先生の講演が行われる世田谷キャンパス SC21 教室から、藤井研のサーバを介し、横浜キャンパス学生ホールへの生中継となる。システム構成の概要を以下に示す。

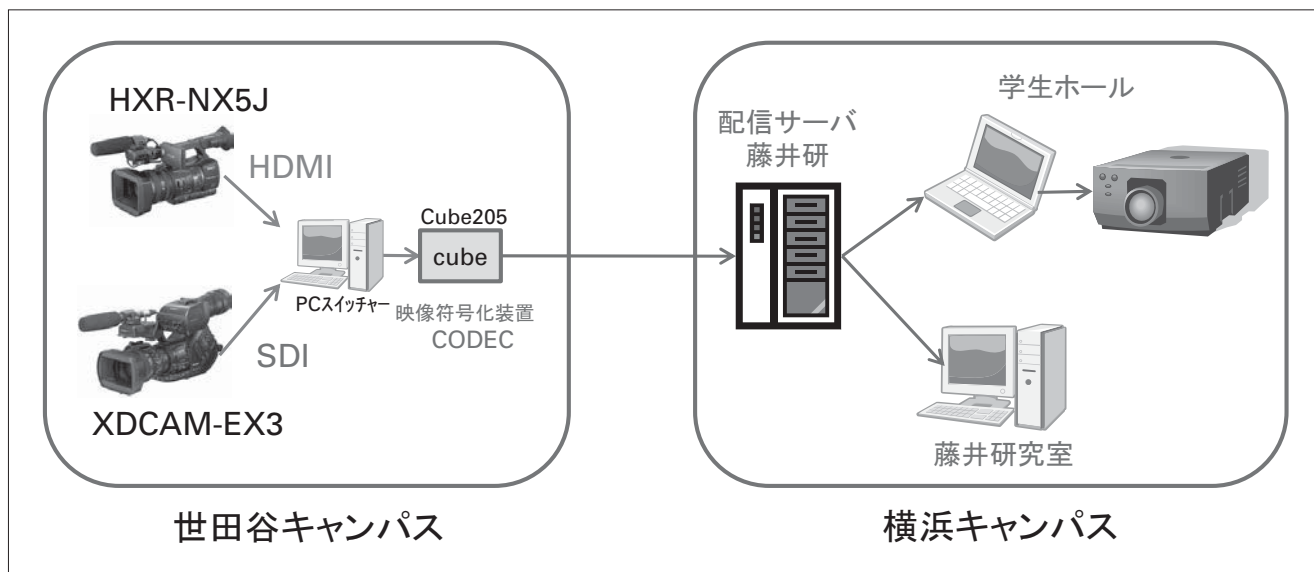


図 3 キャンパス間ネットワークを用いた HD 映像ストリーミング配信システムの構成



図4 世田谷キャンパス講演会場の様子



図5 横浜キャンパス講演会場の様子

#### 【SC21C 教室設置機材】

HD カメラを2台設置, SONY 製 HXR-NX5J と PMW-EX3 である。2台のカメラの出力をスイッチャー用 PC に入力し, 画面の切り替え及びピクチャーインピクチャーを実現する。スイッチャー用 PC は Windows 7 Pro 搭載, CPU が Core i3 550, ビデオボードが Deck Link SDI & Intensity Pro, ビデオスイッチソフトが vMix である。HD 映像の映像伝送装置 (エンコーダー) として, Teradek 製の Cube205 を2台使用。夫々, RTMP 方式と RTSP 方式に設定。通常は RTMP を利用し, RTSP 方式をバックアップとする。RTMP 方式で配信中にトラブルが発生した場合に RTSP 方式に素早く切り替える。なお, PROTECH 製 MINI MONITOR LVM-89W を用いて送信映像の最終チェックを行う。

なお, RTMP および RTSP の配信が可能のように, SC31C 教室から横浜キャンパスに向けた通信に関して, RTMP 用ポート番号 1935 と RTSP 用ポート番号 554 の開放を事前に情報基盤センター SC に依頼しておく必要がある。世田谷キャンパスでは, USTREAM などを介した映像の学外への配信を禁止している。これに対し, 横浜キャンパスでは, 他の利用者に迷惑をかけない範囲で許されている。キャンパスネットの運用が一部異なっており, 注意が必要である。

#### 【YC 藤井研究室設置機材】

OS として Windows Media Server 2012 Standard を搭載したサーバー Dell 社製 Power Edge T320 を新たに設置した。配信サーバーソフトとして Wowza Media Server を組み込んだ。なお, 監視のためにノートパソコンを1台設置し, 映像が問題なく中継できていることを常時チェックした。

#### 【YC 学生ホール設置機材】

Windows 8 の SONY 製 Vaio ノートパソコンを用意した。ノートパソコンの HDMI 出力をホールに設置されているプロジェクターに直接出力し, 200 インチのスクリーンに映し出す。

### 3. 3 ライブ中継について

RTMP 方式の 10Mbps で配信を開始し, 約2時間半問題なくストリーミング配信を行うことができた。生中継の様子を図4及び図5に示す。多数の学生が横浜キャンパスでも白川先生のご講演を聴講している様子が解る。また, サーバー機からの映像を横浜キャンパス内の複数の PC で受信したが, 全く映像の乱れは生じなかった。これに対し, 横浜キャンパス藤井研究室のサーバーからの映像を世田谷キャンパスでもパソコンで受信し, その品質を確認した。残念ながら, 映像に大きな乱れが生じており, TCP を用いても横浜キャンパスから世田谷キャンパスに映像配信するのは非常に難しいことも明らかとなった。

## 4 付属塩尻高校への生中継

### 4. 1 ストリーミング配信

高大連携の一環として, 付属高校の学生が大学の講義を受講できる制度が運用されている。昨年度より, 長野県にある付属塩尻高校の学生も遠隔講義により, この制度に加わった。黒板等にかかれた文字を読み取るために, HD 映像を用いた遠隔講義システムの運用を昨年度より開始した。昨年度は, 機材調達の問題から安価な Sling Media 社製の Slingbox PRO-HD を用いて映像伝送システムを構築した。この装置は, 家庭で録画したテレビ映像をインターネット経由で出張先等にて視聴するためのものである。非常に安価な反面, 遅延時間が大きく, 遅延時間は約7秒に達していた。この遅延により, 授業中の講師と付属塩尻高校の生徒間での双方向のやりとりが難しくなるという問題が指摘されていた。

本年度は, HD 映像を伝送できる Teradek 社製の映像符号化装置 Cube 205 に更新し, 上述の遅延時間を改善することが目標である。昨年度の経験から, 横浜キャンパスから SINET を経由して塩尻高校へインターネットを介してほぼ 5Mbps で問題なく UDP にて伝送できる。この経験に基づいて, Cube205 を新規導入し, 遅

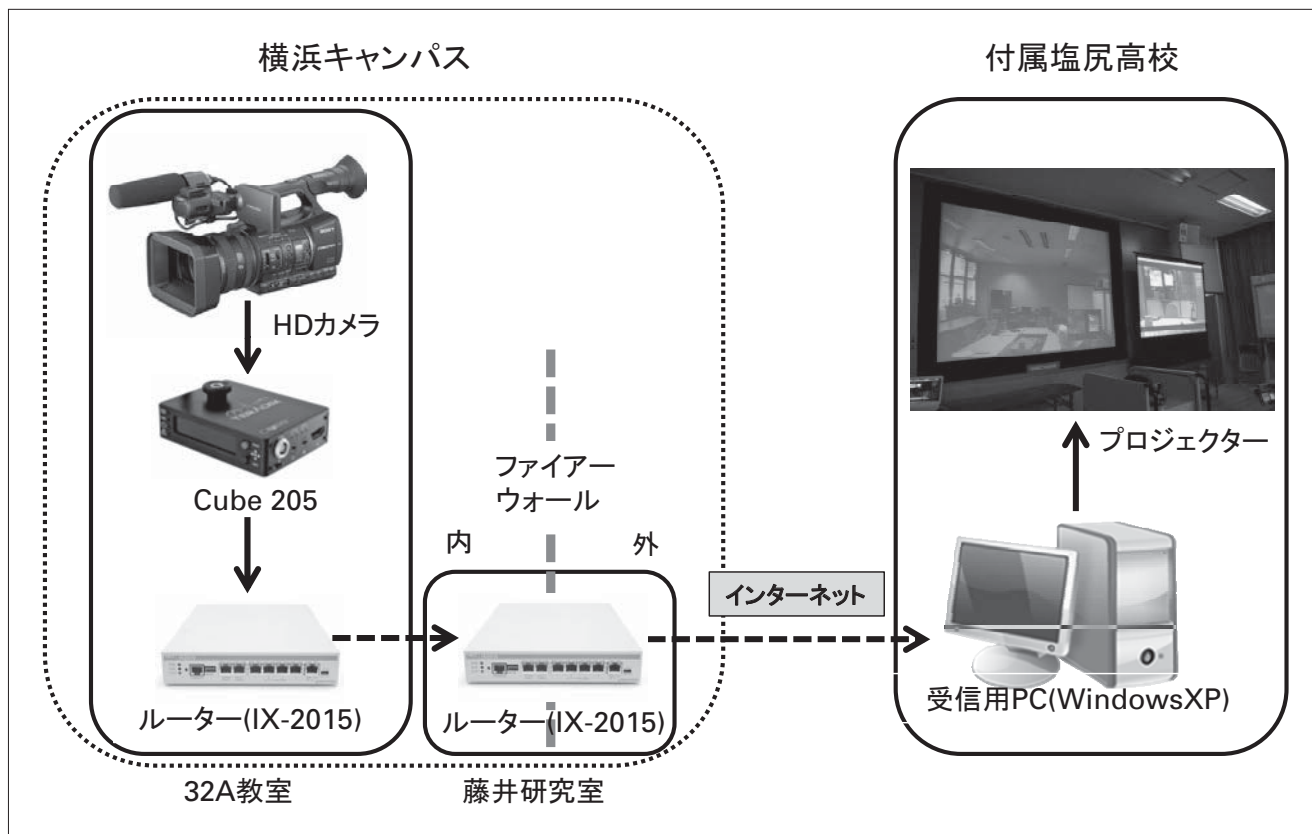


図 6 インターネットを介した塩尻高校への HD 映像ストリーミング配信システムの構成

延の改善を図る。なお、遠隔講義に選定された講義は、昨年と同様金曜日 5 限に開講される大守教授による「マクロ経済学」であった。講義室は 32A 教室である。この教室から、付属塩尻高校に HD 映像でライブ中継を行う。以下、撮影機材、伝送装置に関して述べる。

【撮影機材】

昨年と同様に、撮影に使用するカメラは SONY NEXCAM HXR-NX5J である。教室などの暗部の撮影において低ノイズレベルで撮影でき、1920 × 1080 60i の HD ファイル記録が可能である。音声はワイヤレスマイクの出力を直接記録する。

【送信機材】

映像符号化装置を変更し、映像符号化方式として H.264 を用いた最新の teradeck 社製 cube を導入した。Cube205 はカメラのホットシューに簡単に装着できる非常に小型の装置である。Cube205 の動作方式として UDP プロトコルを用いた RTSP 方式を選択した。前年度の実績より、横浜キャンパスから付属塩尻高校まで、インターネットを介して UDP にて 5Mbps で問題無く伝送できるという経験に基づいている。RTSP 方式で配信できるので、遅延時間は非常に小さくなる。専用の復号装置を用いると僅か 300msec である。付属塩尻高校側では PC を用いて、VLC player にて受信するため、

伝送遅延は約 1 秒となる。

【インターネット接続】

付属塩尻高校のネットワークは、塩尻インターネットと言われる市の行政サービスの一環で提供されているネットワークに接続されている。このネットワークへの塩尻高校のアクセスラインの通信速度は 100Mbps である。以下に塩尻高校のネットワーク情報を示す。

- ・IP アドレス : 203.141.200.0/28
- ・ネットワーク名: SHINSHU-THS
- ・上位組織 : 塩尻インターネット (塩尻市役所)

前述の付属塩尻高校の TV 会議用システムは、4 (=32-28) ビットで割り当てられるアドレス空間内に設定され、利用されている。

RTSP 方式でストリーミング配信を行う場合、受信側から送信装置に直接アクセスできるネットワーク環境であることが求められる。残念ながら、横浜キャンパス内のネットワークはファイアーウォールにより、外部から遮断されている。従って、講義が行われる 32A 教室内にファイアーウォール外へのアクセスポイントを新たに設定する必要がある。このインターネットへのアクセスポイントを設定するために、NEC 社製ルーター IX2015 を用いる。このルータは、イーサネットフレームを IP ネットワーク上に構成したトンネルを経由して

ブリッジ転送する Ethernet over IP 機能を持つ。この ip を用いたトンネルモードを活用し、32A 教室に設置した IX2015 と藤井研究室内のファイアーウォール外アクセスポイントをブリッジ接続し、32A 教室内にインターネットアクセスポイントを設定する。このアクセスポイントから附属塩尻高校に向けて HD 映像のストリーミング配信を行う。

#### 【映像受信機器】

映像の再生には、附属塩尻高校備え付けのパソコンを利用する。その仕様は、Core 2 Duo E7400, OS が Windows XP Pro である。このパソコン上で VLC player を用いて HD 映像を再生する。再生された映像は、大型プロジェクトにより、150 インチ程度のスクリーンに映し出される。

これらの映像伝送装置、ルーター等を組み合わせた HD 映像ストリーミング配信システムの構成を図 6 に示す。遠隔講義の映像をインターネットを介してライブ中継したところ、平均 5Mbps で HD 映像を問題なく配信することができた。15 回の講義のうち 13 回をライブ中継により遠隔講義を行なった。昨年より、大幅に遅延時間が短くなり、講師と生徒間の双方向のやりとりがスムーズに行えるようになった。なお、質疑応答の双方向通信の為に、従来の TV 会議システムも同時に用いて遠隔講義を行っている。

昨年より附属塩尻高校の学生の要望により、毎週の復習用動画素材の作成を行っている。32A 教室での撮影時に録画した動画を SONY 社製の Vegas PRO 12 で編集し、タイトルと末尾にクレジットを挿入する。パソコンでの利用に適したファイル形式として Windows Media Video 11 形式を用いる。1920 × 1080 画素のフル HD 映像でレンダリングを行い、塩尻高校に提供する。完成した動画ファイルは、昨年度構築した VPN を用いて配信した。1 時間半の講義の映像は約 5GB の Windows Media Video 形式の映像ファイルとなり、転送時間に平均して約 2 時間を要した。

## 5 まとめ

本学のキャンパス間ネットワークの特性を測定し、そのトラフィック状況に適した HD 映像ストリーミング方式を選択し、キャンパス間の HD 映像ストリーミング配信システムを構築した。これにより、世田谷キャンパスから横浜キャンパスに向けた、高品質な HD 映像のストリーミング配信が問題無く実現できた。本システムを用いて、平成 25 年 12 月に行われたノーベル賞受賞者、白川英樹先生の講演を無事に横浜キャンパスに生中継することができた。さらに、インターネットを介した附属塩尻高校への HD 映像ストリーミング配信システムの再構築を行い、遅延の少ない遠隔講義システムを実現

できた。

## 参考文献

- [1] 小林英一, 藤井哲郎「HD 映像による遠隔講義ライブ中継システムの構築 - 都市大付属塩尻高校への遠隔講義 -」東京都市大学横浜キャンパス, 情報メディアジャーナル, 第 14 号, pp.78-83, 2013 年 3 月
- [2] 花澤弘樹「学内ネットワークを用いた HD 映像ライブストリーミングの検討」東京都市大学 2011 年度卒業論文
- [3] 藤井竜也, 藤井哲郎, 小野定康, 白川千洋, 白井大介「デジタルシネマ劇場へのライブ配信 (ODS) 技術」電子情報通信学会, 基礎境界サイエティ Fundamentals Review, Vol.5, No.1, pp.80-89, 2011 年 7 月
- [4] Ustream, <http://www.ustream.tv/>