

IPv6網におけるスケーラブルリアルタイムメディア伝送と放送の実現に向けて

5

Establishing Scalable Real-time Media Transport and Broadcast using IPv6

杉浦一徳 (慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科(2008年4月開設))

堀場勝広 (慶應義塾大学政策・メディア研究科)

中村 修 (慶應義塾大学環境情報学部)

放送のデジタル化とそのユニバーサルサービスの提供が現在日本のメディアインフラストラクチャの発展に貢献している。特にリアルタイムかつ高精細・高品質な動画転送が、放送の世界でも利用可能となり、インターネットインフラストラクチャの技術と融合する形で新しい創造的展開を見せつつある。インターネットインフラストラクチャにおける伝送プロトコルも、より利便性、スケーラビリティの確保が可能なIPv6へとシフトしつつあり、現在、応用に向けてさまざまなメディア伝送・放送実験が国内外で精力的に行われている。本稿では、高精細動画情報のIP伝送を用いた転送技術の研究開発に関する最新動向、特にマルチキャスト運営に特化した実証実験と、これらを利用したデジタル地上波・ワンセグのIP放送実験の報告を(1)インターネットプロトコルとの親和性・信頼性の高いメディア伝送技術、(2)インターネット伝送体系のIPv6化によって生じるさまざまな技術的解決、という2点に焦点をおいて解説する。

背景

インターネットで流通するデータ量の増加に伴い、バックボーンおよびアクセス網の広帯域化が進んでいる。ラストワンマイルと呼ばれる一般家庭への接続においては、光ファイバなどのデータリンク普及により、広帯域かつ常時接続の環境が一般化している。また、計算機および、メディア機器の高性能化に伴い、計算機上で扱うことができるデータとして高品質な映像・音声の利用が可能となり、従来にくらべてデータ量が膨大化した。今後、デジタル映像技術の発達、ネットワークの広帯域化が進むにつれ、データ転送量が大きい高品質映像伝送アプリケーションを利用するユーザ数は急激に増加するものと考えなければならない。またネットワーク(インターネット)をデジタル化されたメディアコンテンツ配信のための伝送経路として活用できるインタフェース技術が近年さまざまな標準化とともに開発されている。これによりストリーミングアプリケーションがインターネット上に占めるネットワークリソースの消費割合も急激に増加することになる。このような高品質映像伝送に対する要求の質と量の両面に関する増加に伴い、インターネットインフラストラクチャが持つ、スケーラビリティやモビリティなどの技術的利便性を継続確保・維持す

るために、従来のIPv4アドレス体系からIPv6体系への移行が進行しつつある。IPv6化されたインフラストラクチャを用いた、大容量・高品質メディア伝送環境の構築実験ならびに運用実験が近年盛んに行われてきた背景とその目的は、新しい伝送系プロトコルの開発と相互接続性の保証、新たに生じる技術的課題の発見と克服が重要な課題として認識されてきていることにある。IPv6化され、スケーラビリティが確保された環境で、映像・音声を多用するメディア伝送系アプリケーション(ストリーミングアプリケーション)は、さまざまな用途で用いられる。用途に応じて要求される伝送事項は異なる。イベント中継、ビデオ会議、遠隔教育、リアルタイム放送といった目的では、映像フォーマットが高品位であることだけではなく、インタラクティブ性および受信ノード側での映像・音声の継続的な再生品質維持が必須の条件として要求される。このように(1)インターネットプロトコルとの親和性・信頼性の高いメディア伝送技術、(2)インターネット伝送体系のIPv6化によって生じるさまざまな技術的解決という2点が、現在のインターネットを活用したメディアコンテンツ配信、しいては、次世代放送技術の発展へとつながっていく。

インターネットを活用したリアルタイム放送型コンテンツストリーミングの信頼性

メディアコンテンツ配信インフラストラクチャとしてインターネットを活用するためには、信頼性の高いアプリケーション、伝送系のサポートが必須となる。特に自律・協調型のインターネットインフラストラクチャでは、共有されるネットワーク帯域幅を有効利用することによってスケーラビリティを確保しつつ伝送するメディアコンテンツの品質と信頼性向上を目指さなければならない。非リアルタイムコンテンツの場合、ストア型アプリケーション方式を用いることで上記課題を克服することが可能であるが、放送型コンテンツ、特にリアルタイム放送型コンテンツにおいては、アプリケーション側、特に伝送プロトコル体系においても、マルチキャストでの運用、輻輳制御、品質制御といった自律制御・協調制御が必要となる。

リアルタイム放送型コンテンツストリーミングを行う場合、通常受信ノード側のデータバッファを小さくすることで、送信側から伝送されるメディアコンテンツの再生遅延時間を短くすることが可能である。しかし、ネットワーク上での輻輳発生に対し、再配信、パケットエラー修正といった補償技術が採用しにくくなり、再生品質劣化へとつながる。インターネットでは、インタラクティブ性と再生品質の維持を同時に保証するためには、完全伝送保証型のネットワークインフラストラクチャを構築しなければ、実現はできない。今後、高品位・広帯域リアルタイムコンテンツストリーミングが一般に普及した場合、広帯域なネットワーク上においてもストリーミングフロー同士の競合による輻輳が発生することが懸念される。輻輳に対し、限られたネットワークリソース範囲内で可能な限りでの映像品質で転送を行い、再生品質維持を行うためには、ネットワーク状態（輻輳の状態やパケットの経路、あるいはネットワークトポロジの情報など）を正確に把握し、状況に応じてアプリケーションでの伝送状態ならびに伝送方法の改善努力が必要となってくる。しかし、多種多様な要素から構成されるインターネット環境では、IP の特性によりアプリケーションレベルでのネットワーク状態の正確な把握を実現することは、きわめて困難である。したがって、リアルタイムストリーミングを利用するユーザに対し、(1) ネットワークリソースを有効活用した最良の映像品質での転送、(2) 許容範囲内で再生品質が維持される信頼性の高い快適なストリーミングを提供するための、要素技術と運用技術の研究開発とその確立が重要な課題となる。近年精力的に、多くの研究者ならびに事業者によって推進されている放送型リアルタイムコンテンツストリーミン

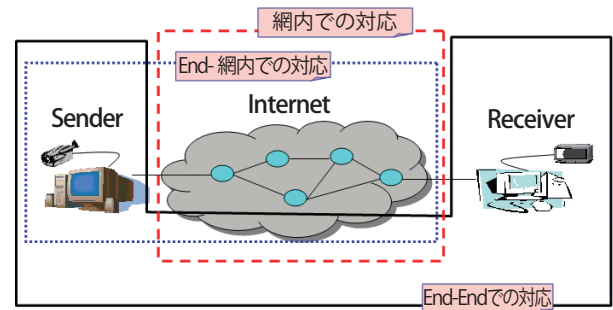


図-1 モデル別におけるストリーミング形態

グ実験は、このような課題を克服することを目的としている^{1), 2)}。

効率的かつ信頼性の高い伝送を行う手段として、中継網内ノードが協調し、特定ストリーミングフローに対して一定割合でネットワークリソース予約を行う、またネットワーク状態を正確に把握するために中継ノードを利用する手法が提案されている。このような実現手法群は、NGNをはじめさまざまな専用ネットワークインフラストラクチャ構想での実現手法となる。いわゆるインターネットインフラストラクチャにおいては、途中経路上のノードすべてが該当するプロトコルが実装・適用されることを仮定することが容易ではなく、さらに、AS間の運用ポリシーは自律的に定義ならびに適用されるために、運用ポリシーは同一のものとはならないと仮定しなければならない。すなわち、いわゆる、一般的名インターネットの環境において、良好な高品質・大容量の高品質映像伝送を、複数のASにまたがる環境で実現することは、現状では事実上不可能であるといわざるを得ない。良好な高品質・大容量の高品質映像伝送の実現には、サービス提供側と、エンドユーザ側での、図-1に示したような3つの形態での協調処理が不可欠となる。

また、高品質映像伝送の実現においては、ストリーム転送の制御フレームワークの検討だけでなく、高精細目メディアフォーマットによる、メディアの特性や通信サービス品質に対する要求条件の違いを正確に把握することが重要となる^{3), 4)}。図-2にインターネットで現在伝送実証実験が行われている主要な映像フォーマットのデータ量と品質の関係を示した。

地上デジタル放送の一般化が進んでいる。放送データのデジタル化に伴い、デジタルハイビジョン画質による映像をデータ放送、双方向通信などのサービスとともに得られることが可能となった。また2006年4月よりワンセグ放送が開始され、携帯端末でもデジタル放送を受信することが可能となっている。デジタル放送の利点として、伝送データがデジタル処理されているため、従来のアナログ放送と比べゴーストへの劣化耐性や、IP

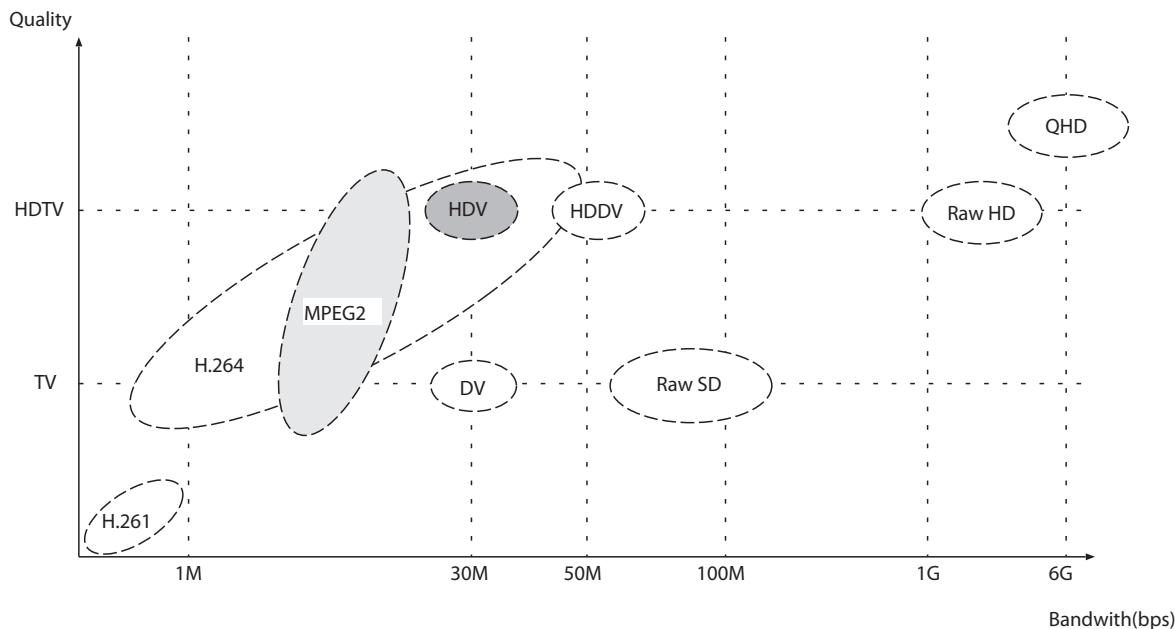


図-2 映像フォーマットのデータ量と品質の関係

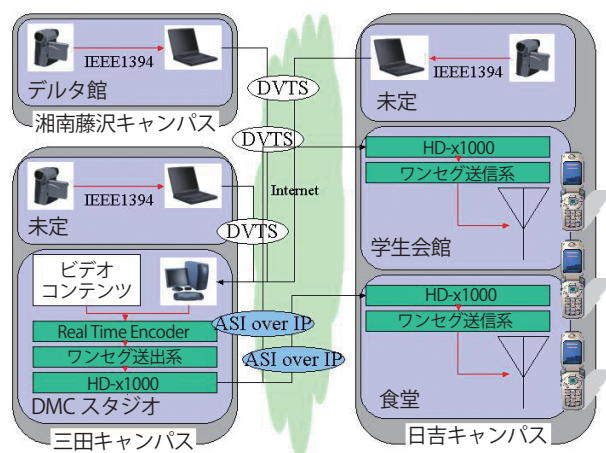


図-3 IP伝送を用いた限定的ワンセグ配信



図-4 送信側オンラインスタジオ

伝送路との親和性が高いことがあげられる。IP網と電波網を併用したコンテンツ配信実証実験もさまざまな組織によって推進されている⁵⁾。

図-3に、慶應義塾大学日吉キャンパスで行った限定的ワンセグ配信実験の構成図を示した。

2007年4月16日から20日の5日間、慶應義塾大学日吉キャンパスにおいて、エリア限定型ワンセグ配信実験を行った。放送時間は、10:00～18:00の8時間であり、12:00を境に以下の2つのコンテンツが配信された。コンテンツ制作・実験は、同大学経済学部武山研究室との共同で行った。

1. 他キャンパスに設置された定点カメラからの中継

中継網を経由したコンテンツ配信として、慶應義塾大

学湘南藤沢キャンパス(神奈川県藤沢市)から伝送されたリアルタイム映像を用いた

2. 予定されたコンテンツ

DVDに記録された1番組あたり5分のコンテンツをソースとして用いた。放送時間内はループ再生され、コンテンツの内容は配信する日によって異なる。コンテンツ内容は、新入生に向けての生活ガイドである。

IP伝送路を用いた限定的ワンセグ配信実験の実現に伴い、インターネットインフラストラクチャを用いた自動化されたスタジオ運営の実証が可能となった。図-4に送信側オンラインスタジオの構成写真を示す。



図-5 World Wide IDMR トポロジ

IPv4/v6 dual stack HD Live Streaming in SIGCOMM2007

次に IPv6 放送型コンテンツ配信の実証実験の例として、SIGCOMM2007 で行われた IPv4/v6 デュアルスタックでの HD 放送実証実験について、放送型サービスの可能性とその技術課題の解説を行う。

SIGCOMM は ACM が主催している通信とコンピュータネットワークに関して議論を行う国際会議である。2007 年の SIGCOMM は京都で開催され、そのホストとして、WIDE プロジェクトは来場者へのネットワーク接続性とワークショップおよびカンファレンスの模様を IPv6 マルチキャスト技術によって全世界へライブ配信した。

▲マルチキャストネットワークトポロジ

WIDE (AS2500) は IPv4 マルチキャストを APAN-JP (AS7660) から MBGP と MSDP を用いて接続し、IPv6 マルチキャストを APAN-JP と RENATER-FR (AS1717) から MBGP と PIM を用いて接続している。IPv6 に関しては、RENATER-FR を経由した接続性は IPv6 over IPv4 トンネルを用いて M6BONE に接続している。M6BONE は IPv6 マルチキャストのテスト用バックボーンネットワークであり、IPv6 マルチキャストが学術ネットワークにおいても実験段階であった時期に広く接続性を提供するために RENATER-FR が中心となって活動しているプロジェクトである。しかし広大な接続性と引き替えにトンネル接続による帯域に関するパフォーマンスが問題視されており、広帯域を必要とする高解像度ビデオ等のアプリ

ケーション利用に適していなかった。図-5 に各地域における主要な学術 AS のマルチキャスト接続トポロジを示す。

近年 APAN-JP・GEANT2・TEIN2・Internet2・AARNET をはじめとした各大陸の大規模な学術ネットワークが IPv6 に対応することで、トンネル接続を必要としない広域な AS 間マルチキャストネットワークが整備され、定常的にサービスとして広帯域なマルチキャストアプリケーションの利用が可能となった。また各主要 AS が複数の AS と接続することで AS パスが冗長化され、M6BONE が IPv6 マルチキャスト接続の主流だった時期と比較して、単一 AS の障害による接続性の喪失被害の可能性は、格段に減少している。

WIDE プロジェクトは 2006 年から APAN-JP との AS 境界において IPv6 マルチキャストの接続を MBGP による経路交換および、PIM によるマルチキャスト配送木構築によって実現した。これによりトンネル接続による帯域制限を緩和し、1Gbps までのマルチキャストトラフィックを AS 外と交換可能な環境にすることに成功している。

SIGCOMM2007 では後述する DVTS を用いて MPEG2-TS によるライブ配信を行った。MPEG2-TS は単一ストリームで約 30Mbps の帯域幅を使用する。SIGCOMM2007 では IPv4 と IPv6 のデュアルスタックでの配信を行ったため、約 60Mbps のトラフィックを WIDE 外に送信した。これは、従来のトンネル技術を用いた場合には実現できなかった帯域幅である。

このように現状の学術 AS によって展開されている IPv6 マルチキャストネットワークはトンネル技術を用

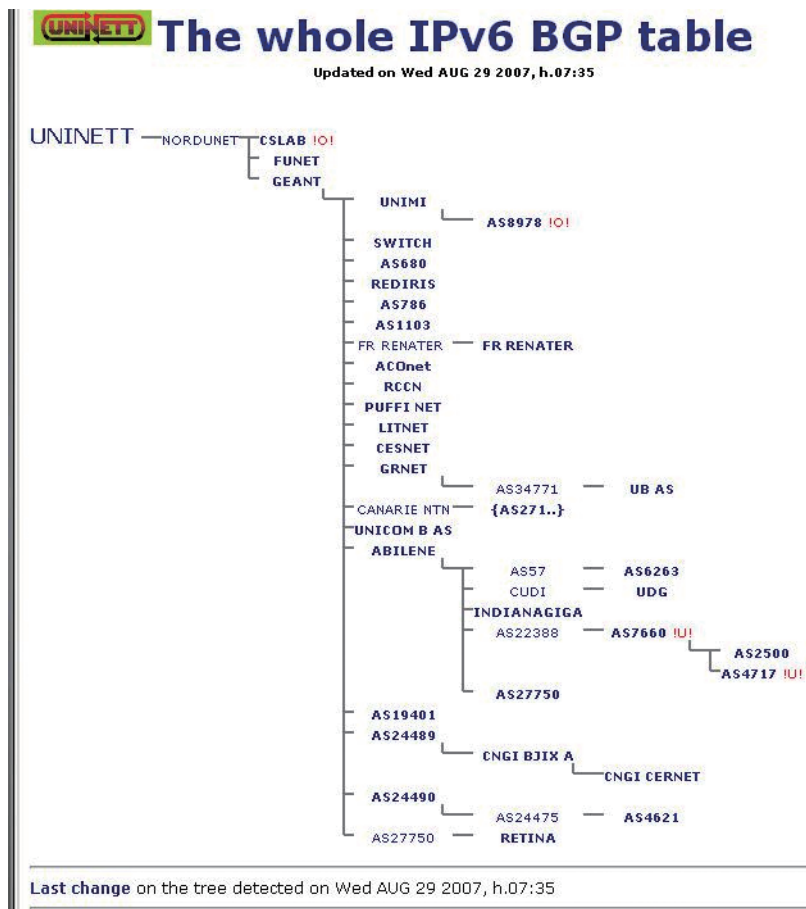


図-6 IPv6 マルチキャスト BGP テーブル

いることなく、広域な配送木構築・冗長性・広帯域トラフィックの配送を実現している。

▲広帯域マルチキャスト運用と問題点

IP マルチキャストには IPv4・IPv6 を問わず、ユニキャストにおける送信者から受信者へのパスを特定する Traceroute に該当するプロトコル・アプリケーションが存在しないため、送信者から自 AS 以外での受信ノードを特定する手法が存在しない。そのため SIGCOMM2007 では他 AS が提供するいくつかの経路情報を用いて、受信 AS の特定を試みた。

図-6 に UNINETT (AS224) が持つ MBGP address-family IPv6 Multicast Table を図示した。UNINETT は NORDNET (AS8362) を経由し GEANT2 (AS) に接続している AS である。この図より UNINETT から WIDE に到達する MRIB-Path (PIM Join が送信される AS-Path) を把握することができた。

なお、図-5 は図-6 の一部をもとに作成したものである。しかし、MBGP address-family IPv6 Multicast はルータベンダおよびルータソフトウェアにおいて普及しているとは言い難く、一部の AS では static に MRIB を設定しているため、図-6 のような MBGP Table からは確認

されない場合が存在する。そのため次の手段として、一部の主要 AS が提供する Router Proxy (Router Looking Glass) を活用し、明示的に RPF Check を行うことで、図-5 を作成した。

図-7, 8 に受信 AS を示す。Router Proxy を用いることで、各所から WIDE への MRIB-Path だけでなく、実際に受信している AS および拠点の検索を行った。その結果と Internet2 の multicast working group のメーリングリストにおいて受信 AS 情報の開示を求めることで受信 AS を収集した。

映像・音声機器とソフトウェアの構成

SIGCOMM2007 では、DVTS を用いて MPEG2-TS による HD 品質 (1080i) 映像を配信した。DVTS は 1998 年から WIDE プロジェクトによって開発されている高解像度・高遅延なストリーミングソフトウェアである。DVTS は主に送信ソフトウェアと受信ソフトウェアに分類される。送信ソフトウェアは IEEE1394 を介して映像機器から DV または MPEG2-TS の信号を PC に入力し、RTP/UDP にカプセル化し送信する。受信ソフトウェアはインターネットを介してデータを受信し RTP/UDP ス

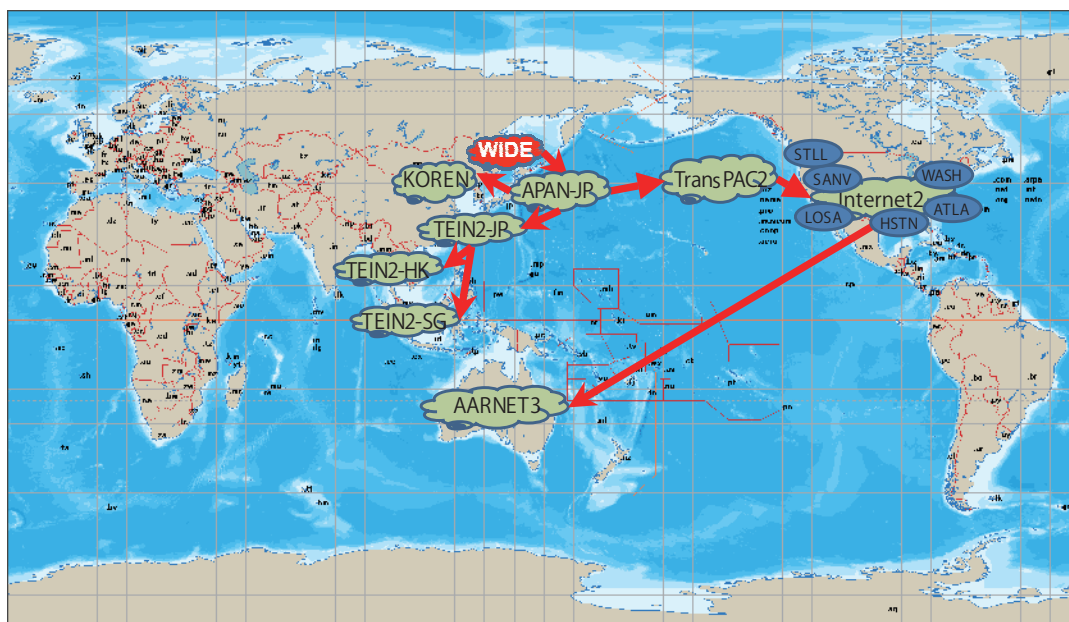


図-7 IPv4 環境における受信 AS 情報

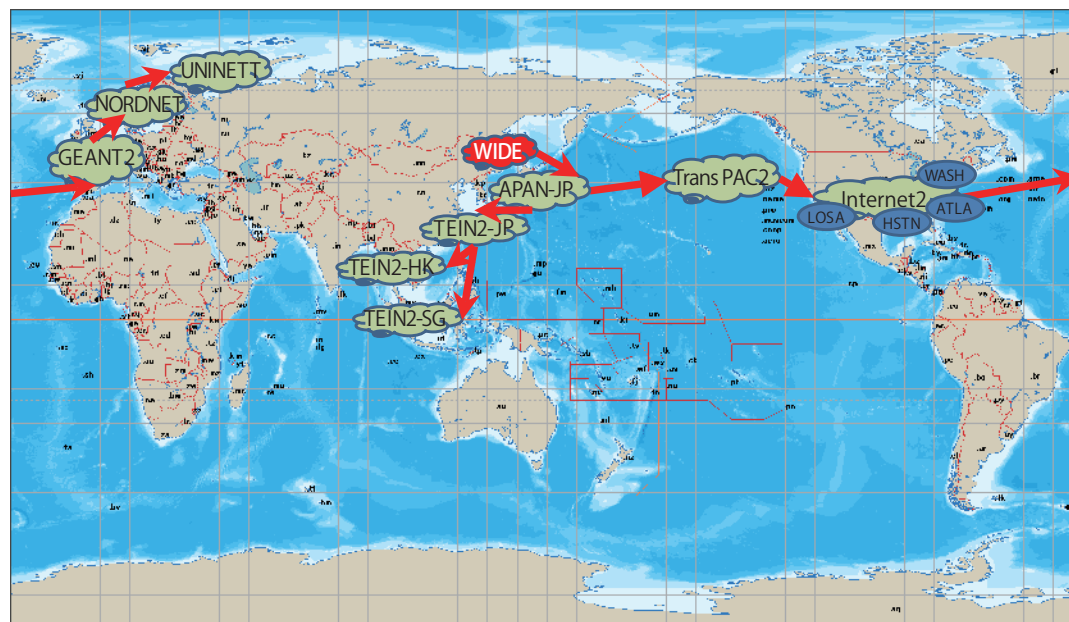


図-8 IPv6 環境における受信 AS 情報

トリームを脱カプセル化した後ディスプレイデバイスまたは IEEE1394 デバイスへと書き込みを行う。DVTS は Layer-3 通信プロトコルにおいて IPv4 と IPv6 のユニキャスト・マルチキャストに対応している。また、映像フォーマットでは DV および MPEG2-TS をサポートしている。MPEG2-TS に関しては VLC との相互運用性を持っており、受信ソフトウェアとして VLC を活用できる⁶⁾。

MPEG2-TS は DV と比較してエンコード遅延が大きいが、より高解像度な映像が同じ帯域幅で提供可能である。SIGCOMM2007 では片方向の放送型マルチキャストとして活用したため、MPEG2-TS を採用し、高解像度かつ VLC によるさまざまなオペレーティングシス

テムへのサービス提供を可能にした。MacOS X, Linux, WindowsXP での視聴を確認した。

図-9 に映像・音声機器と DVTS 送信ソフトウェアが動作するノードのトポロジ図を示した。映像の入力としてビデオカメラを 2 台、発表者のプレゼンテーション資料映像用の PC を 1 台用意した。ビデオカメラからの入力はコンポーネントを介した YCbCr 信号を活用し、PC からの入力は VGA を介した RGB 信号を活用した。各映像入力機器からの映像はスキャンコンバータ機能を備えたビデオミキサーを用意し、解像度と信号を変換してミキシング後の出力をコンポーネントを用いた YCbCr 信号へ調整した。音声は会場 PA からの音源を入力として、

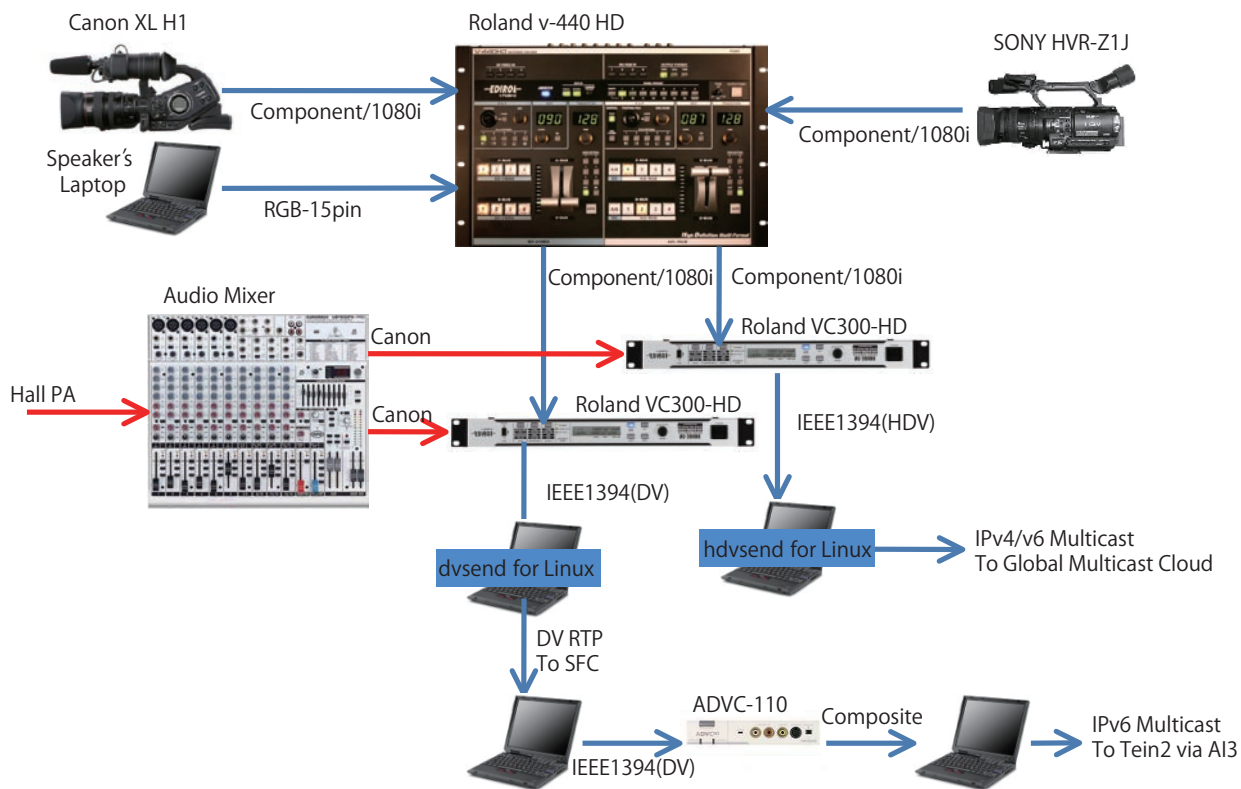


図-9 AV 機器接続系

メディアコンバータへ出力した。その際メディアコンバータの音声遅延機能を利用して映像と音声のリップシンクを補正した。次に映像信号の流れを示す。

1. 映像入力機器からの映像信号をミキサーに出力し、利用映像ソースを選択後メディアコンバータへコンポーネントを用いて YCbCr 信号を出力する。
2. メディアコンバータはミキシング後の YCbCr 信号を入力とし、MPEG2-TS へ変換後 IEEE1394 から PC へと出力する。
3. IEEE1394 から MPEG2-TS の信号入力を得た PC (DVTS 送信ノード) は、UDP/RTP ヘッダ・IP ヘッダを付加しインターネットへと送信する。

ユニキャストと比較して送信ノード資源および通過経路の帯域資源を大幅に削減できる IP マルチキャストは、デジタル映像のデータ配信基盤として長年期待されてきた。また、通常コンテンツ 1 つに対して 1 つの IP アドレスを用いる IP マルチキャストでは、アドレス枯渇に対する対策として IPv6 の利用が不可欠である。しかしその商用利用が広域にわたるケースは稀であり、AS 間での IPv6 マルチキャストが運用されている例は非常に少ない。

SIGCOMM2007 における HD 品質映像の広域 IP マル

チキャスト配信は、単一コンテンツの利用帯域が大きく、数万・数十万単位の視聴者数を想定する放送事業へのインターネット利用の可能性を示したと言えよう。

しかし、単一広帯域コンテンツの広域配信だけでは放送事業の一翼をインターネットが担うためには不足している機能がいくつか存在する。多数のマルチキャストフローが存在した場合のルータにおける経路表爆発問題に対する対処法・解決法、あるいは AS 単位ではなく視聴者単位での視聴率調査の実現と匿名性の確保など、放送事業の要求に対するインターネットと IP マルチキャスト技術が持つべき新たな機能に関する研究が必要である。

まとめ：将来への展望

本稿では、2 つの実証実験を例にして、インターネット基盤を用いて実現可能な放送型リアルタイムストリーミング環境の構築に向けた実証実験活動について (1) インターネットプロトコルとの親和性・信頼性の高いメディア伝送技術、(2) インターネット伝送体系の IPv6 化によって生じるさまざまな技術的解決という 2 点に焦点をあて解説した。現在のインターネット基盤は、放送型リアルタイムストリーミング環境の実現に資するために、以下の 2 つの方向性を持った研究開発を推進している。1 つは、データ伝送品質を保证するための占有回線化技

術, もう1つは, 協調性を確保した自律・分散・協調型のアプリケーションインフラストラクチャの実現である。NGN, サービスプロバイダによって提供されるネットワークポロジ限定型サービスという環境と, 相互接続された中で協調利用されるアプリケーション環境の, 2つのネットワーク環境および研究開発の方向性が並行して推進ならびに発展していく中で, スケーラビリティと利便性がプロトコル設計思想として組み入れられている IPv6 を軸として, 相互接続性を組み入れた環境構築を行っていく必要がある。

IPv6 環境がインターネットインフラストラクチャとして浸透しつつある近年, 放送型スケーラブルメディアコンテンツ配信を実現する上で我々は本稿で示した, 「IPv6 インフラストラクチャにおける親和性の実現」, 「メディアコンテンツとインターネットにおけるインタフェース親和性の実現」といった2つに着目し, 共有されたスケーラブルインターネットインフラストラクチャの実現に向けて開発・実証実験を行ってきた。IPv6 の 128 ビットといった広大なアドレス空間は, 共有されたネットワークインフラストラクチャがあつてこそ, その優位性が実証される。ネットワークポロジが限定されたインフラストラクチャでは, 広大な IPv6 環境の利点を活用することが難しい。しかし, 一方で IPv6 というプロトコル技術だけでは近い将来に実現したい統合的なユニバーサルアーキテクチャとしてのメディアコンテンツ配信環境をインターネットで実現することは難しい。

本稿で述べたような自律協調性を保つ品質制御と, スケーラビリティ制御, ユーザの要求に応じたアプリケーション, メディア伝送制御といったミドルウェア技術と, アプリケーションとの協調といった技術は, ネットワークを伝送インタフェースとして考慮していなかったさま

ざまなデジタル機器をも相互接続可能とし, コミュニケーションメディアの発展へとつながっていく。そして, これらのスケーラブルな協調制御技術, 品質保証技術によって, 生まれる新しいメディアコンテンツ配信プロトコルとアプリケーションによって, 初めて IPv6 の利便性が実証されると確信する。

参考文献

- 1) Matsuzono, K., Sugiura, K., Asaeda, H. and Murai, J. : Analysis of FEC Function for Real-Time DV Streaming, Sustainable, Internet, Third Asian Internet Engineering Conference, AINTEC, pp.114-122 (Dec. 2007).
- 2) Keio University, WIDE Project, DVTS (Digital Video Transport System). <http://www.sfc.wide.ad.jp/DVTS/>
- 3) Ogawa, A., Kobayashi, K., Sugiura, K., Nakamura, O. and Murai, J. : Design and Implementation of DV based Video over RTP, In Packet Video 2000 (May 2000).
- 4) Ogawa, A., Sugiura, K., Nakamura, O. and Murai, J. : Implementing Tcp-friendliness in Digital Video over IP, 情報処理学会論文誌, Vol.43, No.2 (Feb. 2002).
- 5) (社) デジタル放送推進協会, [http://www.dpa.or.jp/\(2007\)](http://www.dpa.or.jp/(2007)).
- 6) Video Lan Working Group : VideoLAN, VLC media player, <http://www.videolan.org> (Jan. 2008).

(平成 20 年 2 月 2 日受付)

杉浦一徳

uhyo@sfc.wide.ad.jp

博士 (政策・メディア)。慶應義塾大学デジタルメディアコンテンツ統合研究機構准教授。専門：オペレーティングシステム, 広帯域ネットワークアプリケーション, メディアコンテンツストリーミング。

堀場勝広

qoo@sfc.wide.ad.jp

2004 年慶應義塾大学総合政策学部卒業, 2006 年同大政策メディア研究科修士課程を修了。2007 年同大同学部後期博士課程在学。

中村 修 (正会員)

osamu@sfc.wide.ad.jp

1985 年 (株) リコーソフトウェア研究所, 東京大学大型計算機センターを経て 1993 年慶應義塾大学環境情報学部助手, 1997 年同専任講師, 2000 年同助教。2006 年より現職として同教授。

