

超高精細映像コンテンツ配信技術

白井 大介

日本電信電話株式会社 NTT 未来ねっと研究所

〒239-0847 神奈川県横須賀市光の丘 1-1

E-mail: shirai.daisuke@lab.ntt.co.jp

あらまし 高帯域ネットワークを利用したハイエンド映像通信アプリケーションとして、800 万画素超の映像を符号化、蓄積、伝送及び表示する超高精細映像配信システムを開発し、実ネットワークを利用した様々な配信実験、上映評価実験を行った。この結果、2005 年にハリウッド標準の最高品質のデジタルシネマ規格として 4K (4096x2160 ピクセル) 解像度が採用された。また、デジタルシネマのみならず、超高精細映像によりカメラワークの必要ない高臨場ライブ配信や、黒板の小さな字も判読できる遠隔講義等のアプリケーションが実現できる。

本稿では、超高精細映像配信システム及びこれを用いた配信実験について紹介し、4K デジタルシネマ規格の解説、2006 年 1 月に行った 4K クラス非圧縮映像伝送実験などについて触れ、超高精細映像コンテンツ配信における技術動向を述べる。

The Technology of Super High Definition Movie Transmission

Daisuke SHIRAI

NTT Network Innovation laboratories, Nippon Telegraph And Telephone Corporation

1-1 Hikarinooka, Yokosuka-Shi, Kanagawa, 239-0847 Japan

E-mail: shirai.daisuke@lab.ntt.co.jp

Abstract We developed Super High Definition movie distribution system, which allows encoding, decoding and distributing over 8 Mega pixel resolution images, as a high-end application on broadband network. We have conducted various transmission experiments and image quality estimation using actual IP network. These results has been endorsed by professionals working in Hollywood and 4K (4096 x 2160 pixels) resolution has been adopted as the highest level of the digital cinema specification formalized in Hollywood. Besides a digital cinema, this system allows implementing a high realistic live image distribution system not requiring any camera work, and a distance education system which allows a student to recognize small written words on the chalkboard.

This paper introduces the Super High Definition movie distribution system and experiments using the system, and surveys the technology of Super High Definition movie transmission covering the 4K digital cinema specification .

1. はじめに

近年、映像処理技術の発展やネットワークの高帯域化、ストレージデバイスの大容量化などに伴って、映像通信分野における高精細化、高画質化の流れが加速している。その中でも映像コンテンツの王様といえる映画の配信においては、きわめて高い映像品質が要求されている。従来の映画は通常、35mm フィルムを用いて撮影・制作・配給を行ってきた。この 35mm フィルムの本来有している品質を十分に再現するためには、走査線 2000 本クラスの解像度が必要だと考えられている。また、デジタルシネマに限らず、劇場・ホールを利用した高臨場スポーツ中継、ライブコンサート中継といったサービス、教育機関での遠隔講義といった分野で超高精細映像の配信の需要が期待できる。このような要求を満たすため、JPEG 2000 を利用してリアルタイムに 800 万画素超の映像を符

号化・復号し、ネットワーク送受信可能な映像配信システムを開発してきた[1][2]。このシステムでは最大 4096x2160 ピクセルの SHD (Super High Definition) 映像を扱うことができる。SHD とは垂直方向の走査線数が 2000 本 (HDTV の倍) クラスの画像を指す[3]。デジタルシネマの規格では、この解像度を横方向の画素数を用いて“4K”と呼んでいる。

本稿では、SHD 映像配信システムの概要を説明し、これを用いた様々な配信・上映評価実験の結果を紹介する。また、本システムによる実証実験等の活動を通して影響を与えた、4K デジタルシネマ規格に関して簡単に説明する。他にも 4K 非圧縮映像伝送実験などにも触れ、超高精細映像コンテンツ配信に関する技術動向について述べる。

2. SHD 映像配信システム

SHD 動画のビットレートは非圧縮で 6Gbps を超えるが、本システムを用いることで、視覚的劣化を起さずにビットレートを 300~450Mbps 程度に圧縮し、現在普及が進んでいる 1Gbps のネットワークを用いた SHD 映像の伝送が可能になる。本システムの諸元を表 1 に示す。

SHD 映像配信システムは、CPU (Intel Xeon 3.2GHz) を 2 個搭載した IA32 ベースの Linux (kernel 2.6) PC に、Analog Devices 社製 JPEG 2000 プロセッサ (ADV-202) を利用した独自開発の JPEG 2000 コーデック PCI-X ボード 4 枚と、外部クロック同期回路を実装したクロックジェネレータユニット、GbE-NIC、RME 社製デジタルオーディオボードを搭載して構成した。JPEG 2000 コーデックボードは、モード切替により JPEG 2000 エンコーダもしくはデコーダとして動作する。図 1 に本システムを利用した配信ネットワークの構成図、図 2 にシステム外観の写真を示す。

2.1. JPEG 2000 符号化方式の採用

動画の符号化では、一般的には、動き予測とフレー

表 1 SHD 映像配信システムの概要

符号化方式	JPEG 2000
最大解像度	4096x2160 画素
カラー空間	RGB, YCbCr (4:4:4, 4:2:2)
色深度	12bit
フレームレート	24p, 30p, 48i, 60i (1000/1001 周波数対応可)
Codec LSI	ADV-202 ES5 (計 12 個)
Wavelet フィルタ	9/7I, 5/3R
OS	Linux kernel 2.6
CODEC ボード PC-IF	PCI-X
映像デジタル入出力	TMDS
オーディオフォーマット	非圧縮 PCM 最大 96KHz, 24bit, 24ch
オーディオ IF	RME 社 HDSP9652
配信プロトコル	TCP/IP, UDP/IP(マルチキャスト可能)

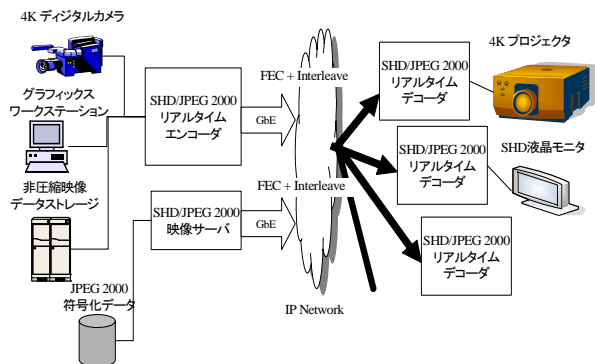


図 1 SHD 映像配信ネットワーク

ム間相関を利用することで高い圧縮率が得られる MPEG2/4 が広く用いられている。一方、動画をフレーム単位で独立に符号化する方式 (Intra-frame) は、圧縮率は低下するが、(1) 符号化・復号の過程でフレーム遅延が発生しないこと、(2) フレーム単位でのアクセスが容易で、画像編集など多彩な用途に適していること、といったメリットがある。また、(3) 4K デジタルシネマクラスの映像で要求される品質 (ビットレート) においては、フレーム間相関による効果が小さいこと、(4) リアルタイム処理を実現するためのマルチプロセッサ構成において、画面分割による並列処理に適していること、(5) 4:4:4、色深度各色 10bit 以上の取扱いが可能であること、(6) 1 種類の符号化データから様々なビットレート、解像度の映像を取り出して利用するワンソース・マルチユースを将来的に実現できる、といった理由から JPEG 2000 符号化方式を採用した。

2.2. SHD/JPEG 2000 リアルタイムコーデック

SHD/JPEG 2000 リアルタイムコーデックボードのブロック図を図 3 に示す。SHD 映像の入出力は、4 チャンネルの TMDS 伝送方式を用いた専用デジタルインターフェースにより、1 チャンネルあたり 2048 x 1080 画素に分割して行われ、コーデックボード 1 枚につき 1 チャンネルの映像の符号化・復号を行う。別途 TMDS/HD-SDI コンバータを利用することで、HD-SDI x 4 本の信号として入出



図 2 SHD 映像配信システムの外観

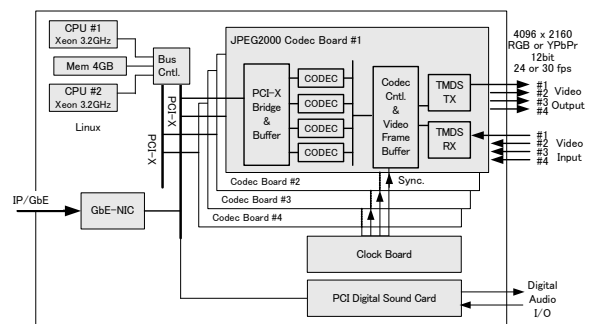


図 3 JPEG 2000 コーデックブロック図

力が可能である。この場合 HD-SDI 1 本あたりの解像度は 1920 x 1080 となり、Single Link で YCbCr 4:2:2, Dual Link で RGB もしくは YCbCr 4:4:4 の信号の取り扱いが可能である。

映像信号は RGB もしくは YCbCr の各色成分に分けられて JPEG 2000 プロセッサに入力され、JPEG 2000 符号化・復号される。符号化されたデータは本システムに合わせた独自フォーマットでパッキングされる。

音声は外部 A/D コンバータを用いてデジタルオーディオ IF ボードより取り込む。映像に比べると音声のビットレートはわずかなため、非圧縮のマルチチャンネル PCM データとしてそのまま伝送する。映像出力のクロックはクロックジェネレータユニット(図3のClock Board)から供給される。当ユニットからは音声用ワードクロックも出力可能であり、このワードクロックをオーディオ IF ボードに供給してスレーブ動作させることで、映像と音声の同期再生を行う。

2.3. 符号化データ伝送・再生プログラム

コーデックボードの制御及びネットワークを介した符号化データの送受信は、Linux 上で動作する符号化データ伝送・再生プログラムで行う。サーバ側プログラムではディスクに蓄積した符号化データ、もしくはエンコーダ(コーデックボード)によるリアルタイム符号化データをユーザメモリに読み出し、パケット分割してネットワーク送信する。デコーダ側プログラムでは符号化データを受信してリングバッファに格納し、デコーダ(コーデックボード)に書き込んで映像を表示する。同時に音声データもオーディオ IF を用いて再生する。

データの送受信は TCP もしくは UDP を用いて行われる。UDP を用いたマルチキャスト配信も可能である。UDP を用いたデータ伝送では、輻輳などによるパケットロスと再送によって回復することができないため、FEC 機能を実装した。FEC は、符号化データを一定サイズのパケットに分割し、一定数のパケットグループに対して水平パリティ計算を行い、パリティパケットを付加するという方式で行う。符号ブロック長が短く、リードソロモン符号などに比べエラー訂正能力は低い、処理が非常に軽いため、プログラム上に実装してもほとんど CPU 付加をかけずに数百 Mbps のストリームを扱うことができる。

3. SHD 映像伝送実験及び上映評価実験

本システムの有効性を実証するため、また、映画関係者等へのアピールのため、本システムを用いた SHD 映像の伝送実験及び上映評価実験を行ってきた。その中でも特に重要なものを以下に紹介する。

3.1. Internet2 ネットワークを利用した長距離

TCP ストリーム伝送実験

2002 年 10 月 28 日, 29 日, アメリカ南カリフォルニア大学 (USC) において Internet2 Member meeting が開催され、ここで SHD デジタルシネマ配信システムを用いた長距離の配信上映実験を行った[4]。映像サーバをシカゴのイリノイ大学 (UIC) に、デコーダをロサンゼルス USC に配置し、それぞれスイッチ及びルータを用いて Internet2 の運用する Abilene ネットワークに接続した。その際の実験ネットワーク構成を図 4 に示す。アクセス回線は GbE で 1Gbps の帯域幅を有し、バックボーンとなる回線は 10GbE や OC-192 で構成される。シカゴーロサンゼルス間の距離は約 3000km であり、RTT は 59msec, HOP 数は 7 であった。Internet2 には 200 以上の大学、企業が参加しており、Abilene ネットワークのバックボーンには常時多量のトラフィックが存在する。当実験の実施時にも、他の実験トラフィックがロサンゼルスに向けて存在していた。

実験には、平均ビットレートが異なる 24fps, 約 5 分間のエンコード済み動画データデータを、約 50Mbps から約 300Mbps まで 50Mbps おきに 6 種類用意して使用した。それぞれのビットレートにおいて、デコーダの受信バッファがアンダーランせず最後までストリーム伝送が完了するかどうかを確かめた。

TCP マルチコネクションによるスループットの改善

Linux のデフォルト TCP ウィンドウサイズは 64KB であるため、RTT が 59msec というネットワーク環境において、スループットの理論値は $(64KB \times 8bit) / 59msec \approx 9Mbps$ となる。通常の伝送では 50Mbps のストリームの伝送も不可能であることは明らかである。これに対し、(1)TCP ウィンドウサイズの拡大、(2)TCP マルチコネクションの利用、というアプローチでスループットの改善を試みた。(1)において、システムの TCP ウィンドウサイズを 4MB に拡張したところ、スループットは 50Mbps 程度

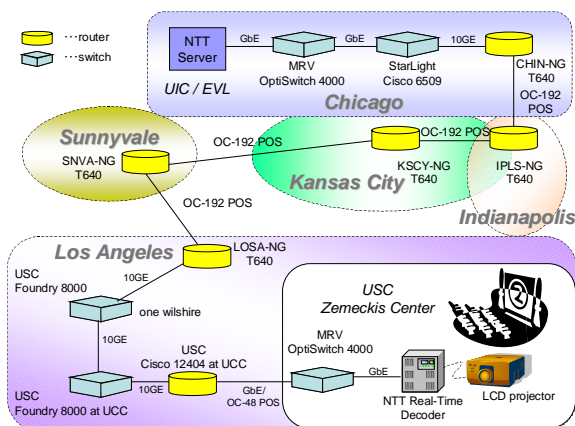


図 4 Internet2 伝送実験ネットワーク

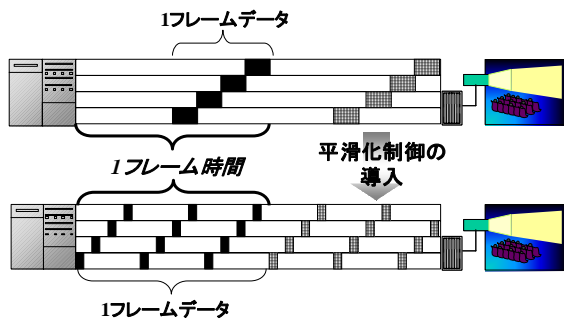


図 5 平滑化処理の導入

までしか改善しなかった。次に(2)において 64 本の TCP ソケットを利用し、200Mbps までのストリームの伝送を確認した。ここで、1msec の解像度でトラフィックパターンを表示可能なトラフィックモニタを利用しストリームの解析を行ったところ、ピークレートが 800Mbps を超える、バースト性の非常に高いデータ伝送が行われていることが確認された。このため、TCP ソケットの書き込みデータ量を分割し、各書き込みごとにウェイト（待ち時間）を挿入するという方法（図 5）でトラフィックの平滑化を試みた。この結果、ピークレートが抑えられ、当実験の目標値である 300Mbps のストリーム伝送が成功した。

3.2. 映画関係者に対する上映評価実験

本システムを用いて、ハリウッドから提供されたコンテンツを中心に、ハリウッド映画関係者及びヨーロッパ映画関係者に対して、SHD 映像の上映デモンストレーションを行った。2002 年 11 月には、ハリウッドにおけるデジタルシネマ標準評価機関である ETC (Entertainment Technology Center) において、同一の素材を 35mm 映画フィルム、2K (1920 x 1080) デジタル映像、4K (SHD) デジタル映像の 3 種類で同時に上映し、比較を行うという手法で、ハリウッド 7 大スタジオの映像制

作関係者 100 名による上映評価を行った。また 2003 年 7 月にはヨーロッパのデジタルシネマ推進団体である EDCF (European Digital Cinema Forum) に対する上映デモを行った。結果として、本システムのポテンシャルと 4K (SHD) 解像度の重要性が認められ、後述する 4K デジタルシネマが最上位規格として取り込まれた[5]。

3.3. iGrid 2005 における日米間マルチキャスト配信実験

2005 年 9 月、カリフォルニア大学サンディエゴ校 (UCSD) で開催された国際会議 iGrid 2005 において、SHD ライブ映像の日米間リアルタイム伝送実験を行った[6]。

東京三田の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 (DMC) に 4K デジタル動画カメラを設置、UCSD/Calit2 (カリフォルニア通信情報機構) 内のオーディトリウムに 4K プロジェクタを設置し、SHD 映像配信システムを用いたリアルタイム伝送を行った。伝送はマルチキャストを用いて行い、UCSD/Calit2 内の 2 箇所までデータを受信、映像の再生を行った。その際のネットワーク構成を図 6 に示す。日米間のネットワークは実 IP 網であり、マルチキャスト packets を到達させるために Flexcast[7] を用いた。本システムを用い、4K カメラによるテレビ会議、遠隔操作によるリアルタイムレンダリング CG 伝送、SHD 映像サーバからのオンデマンド配信を実施した。

なお、コンテンツ配信中、定期的なパケットロスが発生した。伝送プログラムに実装した FEC+インターリーブ機能により大部分のデータが回復できた。ただしバーストロスの範囲が長かったために回復しきれない映像フレームも生じた。これに対処するには FEC 符号ブロック長を長くする必要があり、映像のレスポンス（遅延）との兼ね合いが生じる。テレビ会議のように映像のレスポ

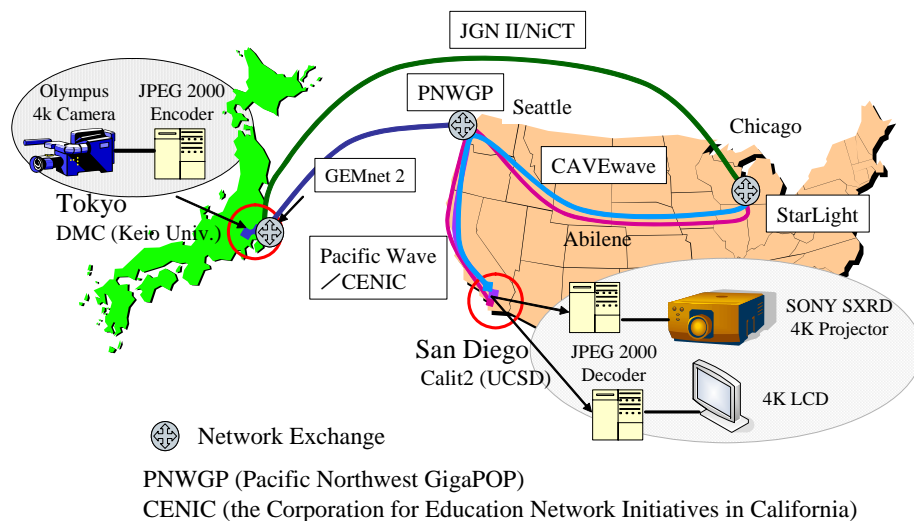


図 6 iGrid 2005 ネットワーク構成

ンスが重要なアプリケーションに適用する際には、十分なネットワークのメンテナンスが必要であると言える。

4. 4K デジタルシネマ規格

ハリウッドの7大スタジオが中心となって設立された DCI (Digital Cinema Initiative, LLC) により、2005年7月にデジタルシネマ仕様の最終勧告がされた。それに基づき、現在、SMPTE においてデジタルシネマ規格の標準化が進んでいる。DCI 仕様は将来にわたって利用可能な映像品質と拡張性を達成することを目指しており、特にセキュリティと互換性の確保に重点が置かれている。表2にその主な特徴を示す。

映像の解像度は2Kおよび4Kの2種類が規定される。色信号は色域制限の無いXYZ色空間を利用することで、将来の広い色域を有する表示デバイスへの対応や、デバイスの色特性にマッチした柔軟な色変換を可能にしている。

フレームレートは従来のフィルムと同じ24fpsである。ただし2Kフォーマットに関しては48fpsが規定され、ステレオ視による立体表示などへの拡張が考慮されている。映像信号の圧縮方式はJPEG2000が採用され、全画面1タイトルでの圧縮を行い、最大ビットレートを250Mbpsとすることが規定された。

コンテンツは、映像、オーディオ、字幕データ等、複数のデータファイルで構成されたDCP (Digital Cinema Package) により劇場まで伝送される。規格では具体的なデータ配信方法は規定されていないが、セキュアな配信が望まれている。

データの暗号化に関しては、映像音声データをMXF (Material eXchange Format) というフォーマットでラッピングした後、米国標準暗号規格であるAES (Advanced Encryption Standard) の128bit, CBCモードにより暗号化を行う。暗号の復号は、上映時にリアルタイムに行うことが義務付けられている。

データを復号するための暗号鍵は、上映装置の持つ秘密鍵とペアとなる公開鍵によりRSAを用いて暗号化され、ライセンス期間の情報とともにKDM (Key Delivery Message) と呼ばれるメッセージフォーマットにより劇場まで配布される。上映装置は秘密鍵を保管してデータの復号を行うため、耐タンパ性を有するなど高いセキュリティ能力が求められる。また、上映ログの生成と管理を行うことが規定されている。さらに、盗撮防止のため、上映装置において上映時間と場所を特定できる情報を電子透かしとして埋め込むことが要求されている。

2005年10月22日より、Warner Bros. Entertainment Inc., ワーナー・エンタテインメント・ジャパン, NTT, NTT西日本, 東宝の5社により、上記DCI仕様準拠4Kデジタルシネマの配給から興行までのサービスモデルの確立

や、技術検証を目指した共同トライアル「4K Pure Cinema」が実施されている。

なお、この仕様に基づくデジタルシネマシステムを、ライブ中継など、映画コンテンツの劇場公開以外の用途に利用することも考慮に入れられており、ODS (Other Digital Stuff) と呼ばれ規定されている。

表2 DCI デジタルシネマ仕様の概要

符号化方式	JPEG2000
解像度	2K(2048 x 1080), 4K(4096 x 2160)
ビットレート	250Mbps
カラースペース	XYZ
色深度	12bit
フレームレート	24fps, 48fps(2Kのみ)
オーディオフォーマット	非圧縮 PCM 48KHz/96KHz, 24bit, 最大 16ch
字幕	XML 形式 (静止画像ファイル重量もしくは文字データ指定)
メディアフォーマット	MXF (Material eXchange Format)
データ暗号化方式	AES (128bit, CBC モード)
データ復号鍵配信	KDM (Key Delivery Message, RSA 公開鍵暗号を利用)

5. 4K 非圧縮映像 IP 伝送実験

現在、4K デジタルシネマコンテンツは35mmフィルムをスキャンし、色補正等を行い、符号化・配信するという流れになっている。今後は、撮影の段階でのみネガフィルムを用い、その後の編集・加工は全てデジタルドメインで行うという傾向が強まっていくと考えられる。さらに、CG作品などは4Kでのレンダリングが主流になり、4Kのデジタルビデオカメラの品質が向上すれば、撮影の段階からデジタルで制作されるコンテンツが増加すると考えられる。

ただし、4Kクラスの映像制作は、非圧縮で6Gbps超というその膨大なデータ量のため、ノンリニア編集や保存、遠隔地との協調作業が非常に困難である。このような次世代型の映像コンテンツ制作における制作流通支援技術確立の一環として、4K非圧縮映像伝送技術の研究開発を行っている[8]。

この伝送技術を、実IPネットワークを用いて実証することを目的とし、2006年1月18日に開催された「JGNIIシンポジウム in 仙台」において、JGNIIネットワークを用いた4Kクラス非圧縮映像のIPストリーム伝送及び光クロスコネクタ装置(OXC)によるストリーム切り替え実験を行った。

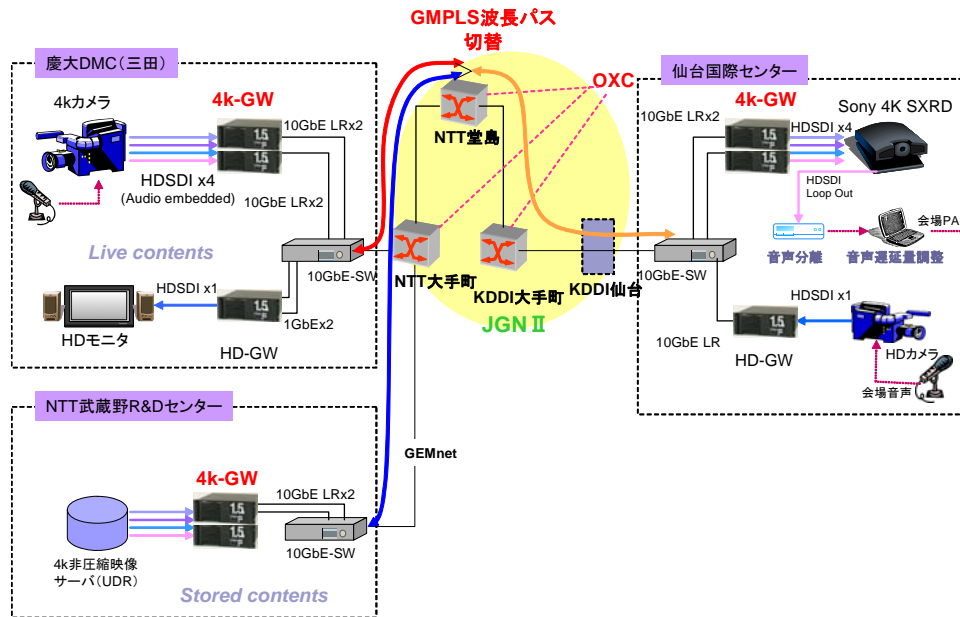


図 7 4K 映像非圧縮 IP 伝送実験の構成図

実験では、慶大 DMC 機構（東京・三田）に 4K デジタルビデオカメラを設置し、ビットレート 6Gbps で JGNII を介してシンポジウム会場（仙台国際センター）に IP ストリーム伝送し、ライブ中継（会場との対話を含む）を行った。また、NTT 武蔵野研究開発センタ（東京・武蔵野）に 4K 非圧縮映像ストレージを設置し、仙台からの遠隔制御により 4K デジタルシネマ素材（フィルム映像、CG）を会場まで非圧縮伝送した。慶大 DMC と NTT 武蔵野研究開発センタとの接続を GMPLS 制御により OXC で切り替え、IP ストリームの切り替えを行った。実験の構成図を図 7 に示す。

この実験の成功により、4K クラスの非圧縮映像を用いて低遅延のライブ中継の実現可能性を実証するとともに、地理的に分散する複数の超大容量コンテンツの蓄積・編集・配信の可能性が実証された。

6. 結び

超高精細映像配信システム及びこれを用いた配信実験を中心に、次世代型映像コンテンツである超高精細映像コンテンツの配信技術について述べた。本技術により、オリジナルの 35mm 映画フィルムの有する品質を保ったまま映画をデジタル化、上映が可能となった。また、スポーツやコンサート、演劇などのライブ映像を、1Gbps のネットワークを利用して非常に高い臨場感で中継することが可能になり、新たなサービスの実現が期待できる。超高精細映像の制作分野においては、非圧縮の 4K 映像を実 IP 網で伝送可能であることが実証され、今後の次世代型映像コンテンツの制作効率性は飛躍的に向上することが考えられる。一方、実際に商用ネットワークを利用してこれら大容量コンテンツを伝送する際には、パケット

ロスへの対処やレート制御の必要性、セキュリティの確保といった技術的な課題が残されている。今後は、これらの課題を解決しつつ、より幅広いビジネス展開を可能にするためのスケーラブル配信プラットフォームの実現に向けた検討が必要であると考ええる。

参考文献

- [1] 山口, 藤井, 野村, 白井, 白川, 藤井, “800 万画素超高精細デジタルシネマ配信・上映システム,” 電子情報通信学会論文誌 Vol.J88-D-I, No.2, pp.361-370, 2005.
- [2] T.Yamaguchi, M.Nomura, K.Shirakawa, T.Fujii., “SHD Movie Distribution System Using Image Container with 4096x2160 Pixel Resolution and 36 Bit Color,” Proc. ISCAS 2005, Vol.6, pp.5918-5921, May 2005.
- [3] S. Ono, N. Ohta, and T. Aoyama, “All-Digital Super High Definition Images,” Signal Processing: Image Communication 4, pp. 429-444, 1992.
- [4] 白井, 山口, 清水, 野村, 白川, 藤井, “TCP マルチコネクションを用いた超高精細動画の長距離・高速ストリーム伝送実験,” 信学技報 CS2003-126, pp.11-16, Dec. 2003.
- [5] Digital Cinema Initiatives, LLC Technology Committee, “Digital Cinema Systems Specification,” 2005.
- [6] iGrid2005.org, <http://www.igrid2005.org/>
- [7] T. Inoue, S. Tani, H. Takahashi, S. Minato, T. Miyazaki, K. Toyoshima, “Design and implementation of advanced multicast router based on cluster computing,” Proc. IEEE ICPADS 2005, vol 1, pp. 328-334, July, 2005.
- [8] 次世代型映像コンテンツ制作・流通支援技術の研究開発 http://www.soumu.go.jp/menu_02/ictseisaku/ictR-D/051020_2_3_1.html