

4K 超高精細映像のための伝送手法の確立

油谷 暁 垣内 正年 香取 啓志 尾久土 正己 猪俣 敦夫
藤川 和利 砂原 秀樹 眞鍋 佳嗣 千原 國宏

2009年7月22日に日本で皆既日食という天体ショーが起こり、様々な組織が皆既日食映像の伝送実験や多彩なイベントを行った。4K 超高精細映像の伝送方法について共同研究を行っている朝日放送株式会社 (ABC) では大規模な IP ネットワークを使用した全天 4K 超高精細映像の伝送実験を企画し、奈良先端科学技術大学院大学 (NAIST) も参加協力を行った。この伝送実験では、世界初の試みとして、皆既日食が起こっている場所の臨場感を全天 4K 超高精細映像を使用して可能な限り伝送するという目的で行われ、無事に実験の目的を達成することができた。本論文では、NAIST 独自で非圧縮全天 4K 超高精細映像の Layer 3 ネットワークを用いた伝送実証実験を行い、有効な伝送手法として実験を成功させたことについて報告し考察を与えることとする。

We already know that a total solar eclipse show at July 22th 2009 will be one of the most-watched events in our lifetime. There were some kinds of event and trials of video transmission for the total solar eclipse. We were involved in joint research for IP network transmission experimentation of a whole sky 4K Ultra High Definition image between NAIST (Nara Institute of Science and Technology) and ABC (Asahi Broadcasting Corporation). In this paper, we propose the transmission technique based on IP network Layer 3 of the non-linear whole sky 4K Ultra High Definition image and report results of the experimentation. In this experimentation, we could achieve to transmit a liveliness of a location for occurring the total eclipse as possible in ours experiment by using the whole sky 4K as the first in the world. Finally we consider the effectiveness of our proposal.

1 はじめに

2011年に予定されているアナログテレビ放送の停波に伴い、一般家庭へのハイビジョンテレビの普及

が加速して進んでいる。この普及により、多くの人たちが高画質の映像を身近に感じるようになり、画質へのこだわりがより高画質方向にシフトしていくことが十分予想される。現在、ハイビジョンテレビのHD画質より高画質な映像として4K超高精細映像(以下、4K映像)があげられる。4K映像とは画素数4096×2160 pixelsで構成される映像で、HDTVの画素数1920×1080 pixelsの縦横各2倍以上、面積比にして4倍以上の画素数を持つ映像である[1]。また、一般的にはQHD(Quadruple HD)(3840×2160 pixels)も広義で4K映像に含まれる。

4K映像は既に映画業界にデジタルシネマとして存在しており、従来のアナログフィルム文化からデジタルデータ文化にシフトする上でとても重要な映像技術として捉えられている[2]。映画館で映画を見て期待することのひとつに、超高精細な映像とサラウンド音声などの力を借りて映画の世界観に没入し、主人公に

Establishment of Transmission Technique for 4K Ultra High Definition Image.

Akira Yutani, Masatoshi Kakiuchi, Atsuo Inomata, Kazutoshi Fujikawa, Yoshitsugu Manabe, Kunihiko Chihara, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology.

Keishi Kandori, 朝日放送株式会社, Asahi Broadcasting Corporation.

Masami Okyudo, 和歌山大学観光学部, Faculty of Tourism, Wakayama University.

Hideki Sunahara, 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科, Graduate School of Media Design, Keio University.

コンピュータソフトウェア, Vol.28, No.4 (2011), pp.318-332. [研究論文] 2010年7月15日受付.

なりきるといふ体験が可能になることがあげられる。この没入感を得るための映像的な条件の1つとして、映像のより高精細化が必要である。没入感を得るときのスクリーンの見方は従来のように映像全体を眺めるのではなく、映像中の注視しているポイントを中心に映像を切り取って見ており、その切り取られた部分に対しても高精細な映像を提供する必要が生じる。したがって、全体としてより高精細な超高精細映像を提供する必要がある。

この4K映像を取り扱うための機器の現状は、カメラやテレビ、プロジェクタ、録画再生装置、放送伝送媒体に至るほとんどのものがHDTVで使用している規格をそのまま4K用に応用し製品化しているもので、まだ一般に普及する段階には来ていない。加えて、4K映像を遠隔地に伝送する唯一の方法として考えられるのはIPネットワークを使用する方法であり、これにより理論的には世界のどこへでも伝送することが可能になる。また、従来の衛星放送などの設備費用などに比べ、とても安価に環境構築が行えるという利点もあげられる。ただ、この4K映像のデータをIPネットワークを使用して伝送するために必要なネットワーク帯域は、非圧縮ではHD-SDI信号規格(SMPTE 292M)4本分と各ネットワークパケットのTCP/IPヘッダ分の和に相当する約6.4 Gbps (bits per second)という膨大な帯域が必要となり、容易に伝送することができない。そこで、映像データを圧縮し伝送するデータ量を少なくする方法が考えられている。現在、4K映像の圧縮形式として普及しているJPEG 2000形式を使用し、視覚的に劣化のない(Visually Lossless)映像品質を考慮すると約1/20倍にまで圧縮でき、伝送に必要な帯域は約300 Mbpsとなり、伝送に必要な帯域を大幅に節約することが可能である。JPEG 2000形式が他の圧縮方式よりも普及している背景としては、フレーム単位での圧縮処理を行なうため、(1)処理時間が比較的短い、(2)映像の編集が行ないやすい、などの理由があり、他の圧縮方式であるMPEG2形式やH.264形式よりも優れている点だと言える。しかし、この比較的圧縮の処理時間が短いJPEG 2000形式を使用しても、圧縮と展開に必要な処理時間は合計で100 ms程度必要になる

[3]。この4K映像を使用して双方向通信を行なう会議システムやライブ中継での遠隔伝送を考慮した場合、遅延を発生させる大きな要因となりうる圧縮と展開という工程は可能な限り避けるべきで、非圧縮のまま伝送する手法を選択すべき状況は大いに存在すると考えられる。

2009年7月22日に日本で皆既日食という天体ショーが起こり、様々な組織が皆既日食映像の伝送実験や多彩なイベントを行った。4K映像の伝送方法について共同研究を行っている朝日放送株式会社(以下、ABC)にて大規模なIPネットワークを使用した全天4K映像の伝送実験が企画され、奈良先端科学技術大学院大学(以下、NAIST)も参加協力を行った[4]。この伝送実験では、世界初の試みとして、今までの皆既日食時の撮影手法である太陽全景や太陽拡大景の映像を撮影するのではなく、皆既日食が起こっている場所での臨場感を伝えるべく、全天4K映像を使用してその場の雰囲気全てを伝送するという実験を実施し、目的を達成することができた。また、NAISTではABCとの間で、TCP/IP Layer 3の経路制御に従った非圧縮4K映像の伝送実験を行い、目的を達成することができた[5][6][7]。

本論文では、はじめに、非圧縮4K映像のIPネットワーク伝送の現状と問題点について述べる。次に、ABCが皆既日食時に行った伝送実験の全体像と4K映像の伝送技術、全天4K映像の撮影手法について述べる。最後に、筆者らが独自に行なった非圧縮4K映像を使用した実証実験について述べ、実験結果について考察を与える。

2 非圧縮4K映像のIPネットワーク伝送

本章では、非圧縮4K映像をIPネットワークを使用して伝送するにあたり、従来より使用されてきたVLAN技術の利点と問題点について述べ、これまで行われてこなかったTCP/IP Layer 3の経路制御を使用した伝送方法の可能性と実証実験の必要性について述べる。

2.1 VLAN技術利用の利点

非圧縮の4K映像をIPネットワークを使用して

伝送する実験は、これまでも何度か行われており、NTT 未来ねっと研究所が OXC (Optical cross(X) Connect) を用いた伝送実験 [8]、Thomson が行った大陸横断の伝送実験 [9]、慶應義塾大学と NTT 未来ねっと研究所による 2 大洋横断の伝送実験などがある [10][11][12]。これまでの非圧縮 4K 映像の伝送実験では、データ伝送のインフラであるネットワーク環境構築の部分で、TCP/IP Layer 2 の技術の 1 つである VLAN (Virtual LAN) を用いてデータ伝送を行なう手法を採用してきた。

この VLAN 技術を使用しデータ伝送する手法が行われてきた理由として、以下の利点が挙げられる。

- データ伝送の経路固定化
- ネットワーク機器の処理を軽減
- VLAN 内の機器設定が容易

一点目のデータ伝送経路の固定化は、どの組織のネットワークを使用するか、そして、どの回線を使用するかを必要なネットワーク帯域を考慮しながら計画的に選定することが可能になり、伝送可能な範囲を拡大させることが可能になる。また、伝送帯域を確保し続ける点においても、他のネットワークとの影響度を考慮してトポロジー設計を行なうことで、影響を少なく抑えることが可能になる。

二点目のネットワーク機器の処理軽減化については、Layer 2 の技術を用いて通信が行われているため、途中のネットワーク機器において IP アドレスの解釈無しにデータの伝送を行うことが可能となり、ネットワーク機器内の処理が軽減され比較的高速に処理される可能性がある。

三点目の VLAN 内の機器設定については、関係するネットワーク機器が単一の VLAN 内の同一セグメント上に存在することになり、たとえ遠隔地間の通信においてもネットワーク設計と設定が容易に行えることになる。

2.2 VLAN 技術利用の問題点

前述の利点により、VLAN 技術を使用して伝送する実験が行われてきているが、実際には以下に示す問題点も存在する。

- 設計経路の ISP (Internet Service Provider) との接続交渉
- 設定時の影響が甚大でリスクが大きい

一点目の設計経路の ISP との接続交渉は、VLAN 接続での使用、使用する日時およびネットワーク帯域の打診を行い、接続の可否と実際の工数について検討する必要がある。また、この交渉は設計した経路にあたる全ての ISP に対して行なう必要がある。VLAN 接続を複数の ISP 間で行なうための技術的な要件の 1 つに、VLAN を識別するための VLAN ID を全経路に渡って統一させる必要がある。今までは使用されていない VLAN ID を各 ISP 間で調整し統一化を行ってきっていたが、最近では ISP 内で IEEE 802.1ad (Provider Bridges) または IEEE 802.1ah (Provider Backbone Bridges) 技術を使用することで VLAN を再度仮想化することが可能になっている。ただし、これらの設定を行うにあたっては、設計経路上の全てのネットワーク機器に設定を行う必要があり、結果的には膨大な工数が必要となることに変わりはない。また、各 ISP では接続ポリシーを策定しており、全ての ISP において上記の技術的要件が満たされているわけではなく、設計していた ISP に接続できない場合は全体トポロジーの再構築が必要になる。当然ながら、伝送先が遠隔地であればあるほど設計経路にある ISP の数やネットワーク機器の数も増大することになり、工数が膨らむことが容易に想像される。

二点目の設定時の影響については、各 ISP は様々な ISP と相互接続しあって全体としてインターネットを構成しており、実際に運用中のネットワーク機器の設定がその ISP 全体、および、隣の ISP に影響を与えることも考えられ、結果的にはインターネット全体にまで影響を与えるという大きなリスクが常に存在し、慎重に設定を行う必要がある。

2.3 Layer 3 伝送の実証必要性とその課題

これまで行われた非圧縮 4K 映像の伝送実験では、VLAN 技術を使用するにあたり、事前準備として前述のような膨大な工数の作業を行なう必要があった。一方、昨今のネットワークは拡大成長を続けており、

使用可能な帯域も順次広くなることで、近い将来には VLAN 設定を行わずとも非圧縮 4K 映像の伝送がより広範囲で行える状況になっている可能性がある。ここでは、現在の Layer 3 での問題点を挙げ、実証実験の必要性とその課題について述べる。

2.3.1 Layer 3 伝送の問題点

主に VLAN 技術を使用して伝送する実験が行われてきた理由として、以下に示す Layer 3 伝送時の問題点が挙げられる。

- 伝送経路が動的に変化する
- ルーティング時のネットワーク機器への負荷が比較的大きい

一点目の問題点として、伝送経路が動的に変化することが挙げられ、意図的に変更したり固定することができない。実際に伝送実験を行うにあたり、想定される伝送経路上の公表されているネットワーク帯域と実際のネットワーク機器の調査により伝送の可能性を判断することが可能であるが、経路変更に伴う極短期的な映像伝送停止が頻発したり、伝送経路の帯域不足に伴う恒久的な映像伝送停止が発生する可能性がある。帯域不足になった場合の方策については「2.3.2 データの優先破棄」の節で述べる。

二点目の問題点として、Layer 3 の経路制御は IP アドレスを解釈し経路制御表とのマッチングを行うという経路検索処理の関係上、VLAN 設定時の MAC アドレス解釈の処理に比べてネットワーク機器への負荷が比較的大きいと考えられる。従って、経路上の各ルータでの経路検索処理に遅延を生じ、経路全体としてデータ転送遅延などの影響を引き起こす可能性がある。

2.3.2 データの優先破棄

伝送経路が動的に変化することは、最初に想定していた経路以外に影響を及ぼす可能性を秘めていることになる。このため、新しい伝送経路に非圧縮 4K 映像トラフィックの流入が起こることにより、ネットワークを輻輳させてしまうことが考えられる。輻輳を起こさせた場合、映像データを優先的に破棄し、他のデータに影響を与えないような方策を講じる必要が生じる。これを実現させる方法として、映像データに

対して破棄する優先度を高く指定しておき、経路上のルータで必要に応じて優先的にパケットを破棄するという手法が考えられる。

2.3.3 実証実験の必要性と課題

2.2 節に述べた検討の結果、VLAN 設定を施さない Layer 3 の経路制御に従った IP ネットワーク (以下、インターネット) を使用して、非圧縮 4K 映像の伝送がどのような条件下で可能であるかについての実証実験が必要であると考えられる。この実証実験での課題は、前述の Layer 3 での問題点である伝送経路の動的変化がどの程度発生し映像伝送に支障をきたすか、また、経路変化に伴う他のネットワークへの輻輳の方策として、映像データの優先破棄で期待した効果が得られるかを検証することである。加えて、経路上の各ルータの処理能力が影響を与える映像データの遅延についても、実験を通して検証することが課題であると考えられる。

伝送経路が動的に変化する点については「5.1 Layer 3 経路制御での伝送の可能性」の節で、輻輳発生時の映像データの優先破棄については「5.2 パケット優先破棄処理の必要性」の節で、映像データの遅延については「5.3 ネットワーク遅延」の節で考察を与える。

3 皆既日食イベントと 4K 映像技術

本章では、皆既日食イベントの全体像と、4K 映像を IP ネットワークを使用して伝送するための手法、全天 4K 映像撮影技術について述べる。

3.1 皆既日食イベントの全体像

2009 年 7 月 22 日に起こった皆既日食は、日本の陸地で起こる皆既日食としては実に 46 年ぶり、今後 26 年間は観測することができない。加えて特徴的であったのは、皆既の時間が 6 分 25 秒と今世紀最大の長さであり、様々な組織がこの皆既日食の映像を多様な形で伝送する試みを行った。

独立行政法人情報通信研究機構 (以下、NICT) と超臨場感コミュニケーション産学官フォーラム (以下、URCF) は、ABC と協力し「7.22 皆既日食超高精細全天映像ライブ伝送上映一般公開実験【神秘的皆既日食 from 奄美】」イベントを、大阪・ABC ホール

表 1 撮影ポイント

撮影ポイント	映像 (圧縮形式)	撮影組織
中国 (武漢, 上海)	HDTV (H.264)	慶應義塾大学
奄美大島	4K (JPEG 2000) & HDTV (H.264)	URCF, NICT
硫黄島	HDTV (H.264)	NAOJ, NHK, NICT, JAXA

表 2 再伝送会場

再伝送会場	映像 (伝送形式)
NAIST	4K (非圧縮) & HDTV (非圧縮)
けいはんなプラザ	4K (JPEG 2000) & HDTV (H.264)
つくばエキスポセンター	4K (JPEG 2000) & HDTV (H.264)
慶應義塾大学	HDTV (非圧縮)
大阪市立科学館	4K (非圧縮) & HDTV (非圧縮)

大阪市立科学館へは、NTT「120 GHz 帯ミリ波無線伝送システム」を使用。

で行った[13][14][15][16][17][18]。この実験では、奄美大島で魚眼レンズを装着した 4K カメラによって撮影された全天映像を、IP ネットワーク網を使用して ABC まで伝送し、ABC ホールに設置されたデジタルプラネタリウムで上映するというものであり、世界初の試みである。

実際にこの公開実験で使用された映像は、URCF が主体となって撮影した奄美大島の全天 4K 映像および HDTV 映像だけではなく、慶應義塾大学の協力による中国 2ヶ所 (武漢, 上海) の HDTV 映像、国立天文台 (以下、NAOJ)、日本放送協会 (以下、NHK)、NICT、宇宙航空研究開発機構 (以下、JAXA) の協力による硫黄島の HDTV 映像である。これらの撮影ポイントから ABC までの映像伝送は、使用可能なネットワーク帯域の都合上、4K 映像は JPEG 2000 形式、HDTV 映像は H.264 形式で圧縮した映像の伝送が行われた。撮影ポイントと映像の種類、圧縮形式、撮影組織について表 1 に示す。

ABC に集約された映像は、様々なイベント会場にリアルタイムで再伝送され上映を行った。再伝送された会場は、NAIST、けいはんなプラザ、つくばエキスポセンター、慶應義塾大学、大阪市立科学館である。ABC から各会場に映像を伝送するにあたり、NAIST への 4K 映像と HDTV 映像および慶應義塾大学へ

の HDTV 映像が非圧縮で行われたのを除き、その他の会場へは圧縮した映像の伝送が行われた。ただし、ABC と川を挟んで対岸に位置する大阪市立科学館への伝送は、NTT が現在開発中である「120 GHz 帯ミリ波無線伝送システム」を使用し非圧縮で行われた。再伝送会場と映像の種類、圧縮形式について表 2 に示す。各撮影ポイントから ABC、ABC から再伝送ポイントへの映像伝送経路をネットワーク帯域と共に図 1 に示す。また、ABC 内に設置された映像伝送機器を図 2 に示す。

各組織ごとに VLAN 設定を行うことで伝送トポロジーが明確にはなっているが、今回のような大規模で集中的な利用の場合、組織間での調整を行う必要がある。この調整は、各組織ごとに必要な帯域を正確に把握し、ネットワーク帯域を超えることがないように、ネットワーク利用率の計画を厳密に行う必要がある。皆既日食時には、筆者らの ABC を中心としたプロジェクト以外にも 6 つのプロジェクトが実験を行い、組織を超えての利用率管理を行なう必要があった。従来から行われていた管理方法では、トポロジーの変更などの経路変更が発生すると関係するネットワークについての帯域計算を再度行う必要があり、煩雑な作業を行っていた。しかし、今回行った方法では“帯域計算シート”と題して表計算ソフトを利用して

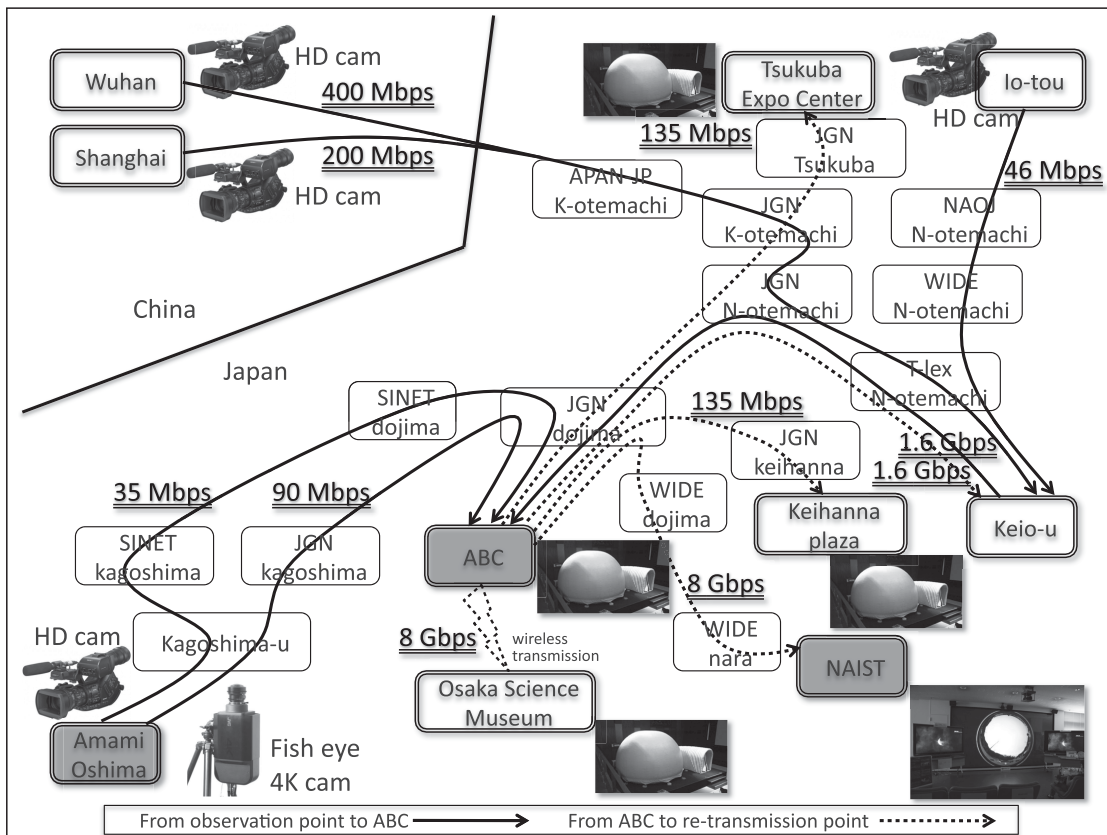


図 1 映像伝送経路



図 2 映像伝送機器 (ABC)

帯域の管理を行い、簡単な入力で自動的に帯域と利用率の再計算を行なうことが可能になった[19]。

3.2 4K 映像伝送技術

現在、4K 映像を取り扱える製品は、HDTV 映像で使用している規格を 4K 用に応用しているものがほとんどであり、HDTV 映像 4 本を“田”の字に並べ

て使用する方法が一般的である。そのため、各 4 画面の同期処理などの複雑な制御を必要とし、汎用的に使用するためには様々な課題をクリアする必要がある。

今回、4K 映像データを IP ネットワークを使用して伝送するために使用したシステムは、NTT 未来ねっと研究所が開発した 4K 映像伝送において唯一実績のあるもので、映像伝送時にデータ圧縮を行なうか否かによって 2 種類の機器が存在する。

まず、データの圧縮を行わずに伝送するためには「HDTV 伝送装置 i-Visto Gateway」システム (以下、非圧縮 HDTV 伝送装置) を使用する。このシステムは、基本的に HDTV 映像を伝送するもので、4K 映像を伝送するためには HDTV 映像 4 本分の機器が必要になる。この非圧縮 HDTV 伝送装置 1 台で対応できる HDTV 映像の本数は 2 本で、4K 映像に対応させるためには非圧縮 HDTV 伝送装置が 2 台必要になる。この HDTV 映像 4 本分の同期処理につい

表 3 4K 映像の非圧縮と圧縮の差異

	非圧縮	圧縮
帯域	6.4Gbps	80-500Mbps
処理時間	15ms	50ms
両端遅延	30ms	100ms
遅延フレーム数	1 枚弱	3 枚強

ては非圧縮 HDTV 伝送装置間で行われており、4 枚の HDTV 映像が乱れることはない。HDTV 映像の伝送に必要な帯域は、「HD-SDI 規格 + TCP/IP ヘッダ分」の約 1.6 Gbps 程度になり、4K 映像を送送する場合には 4 倍の 6.4 Gbps が必要となる。HD-SDI により入力されたデータは、15ms 以内という非常に短い時間で IP パケットに変換されネットワークに送出されることになる [20][21][22][23][24]。

次に、データの圧縮を行ってから伝送するためには「JPEG 2000 リアルタイムコーデック」システムを使用する。このシステムは、4K 映像を JPEG 2000 形式で圧縮し伝送を行うシステムで、伝送帯域を約 80-500 Mbps にまで圧縮 (1/80 倍-1/12 倍) することが可能になる [25]。圧縮および展開に必要な処理時間は、前述の通り合計で 100ms になり、3 フレーム以上の遅延が生じることになる。

表 3 に、これらのシステムが 4K 映像の伝送に必要な帯域と処理時間の関係を示す。

3.3 全天 4K 映像

HDTV 映像で使用した皆既日食の映像は、これまでの一般的な撮影方法である太陽全体を撮影する全景映像や、太陽の一部を拡大して撮影する拡大景映像を使用した。4K 映像では、没入感を得るための撮影方法として全天を撮影した映像を使用した。この全天映像とは、魚眼レンズを用いて空の部分の半球全てを 1 つの映像で撮影することを指し、一層の没入感が得られると期待される。図 3 に示すように、魚眼レンズを用いた全天映像は円で表されることになり、有効画素数は画像の短辺の画素数に依存する。例えば、HDTV 映像で撮影した場合、直径が 1080 pixels の円で表されることになり、太陽の見かけの角

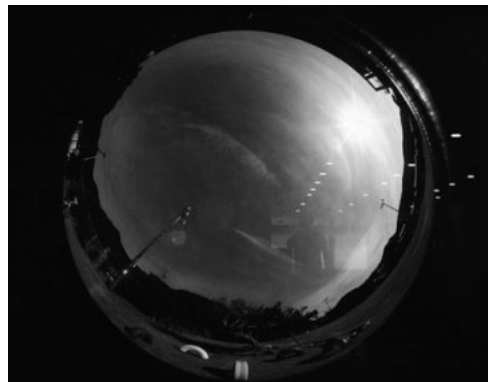


図 3 全天 4K 映像 (実験前日の準備時)

度が 0.5 度であることを考慮すると、太陽の直径は 3 pixels で表現され十分な解像度が得られるとはいいがたい。4K 解像度の場合では、直径が 2160 pixels の円で表すことができるようになり、太陽の直径は 6 pixels で表現され最低限の解像度が確保できると考えられる [26][27]。

実際の撮影には、日本ビクターが和歌山大学と共同で新開発した 190 度魚眼レンズと、日本ビクター社製の 4K カメラ「4K2K 60P 単板カメラ」を使用して撮影が行われた [28]。また、最近ではデジタルプラネタリウムにおいても 4K 映像が使用されており、大阪・ABC ホールではコニカミノルタプラネタリウム社製の「Super Media Globe II」を使用し上映を行なった。構造的には 4K プロジェクタに魚眼レンズを装着するという手法が取られている [29]。

4 NAIST での非圧縮 4K 映像伝送実験

本章では、皆既日食時に NAIST が独自に行った非圧縮 4K 映像の伝送実証実験と別の日に行われた対比実験、NAIST 4K 映像環境について述べる。

4.1 皆既日食時のインターネット伝送実験

VLAN 設定を施した IP ネットワーク上に非圧縮 4K 映像の伝送を行なうという実験は既に行われているが、NAIST では皆既日食イベント時の ABC からの映像伝送を、VLAN の設定を行っていない Layer 3 の経路制御に従ったインターネット上で試みた。今回の実験では、1. 最初に想定された経路での通常実

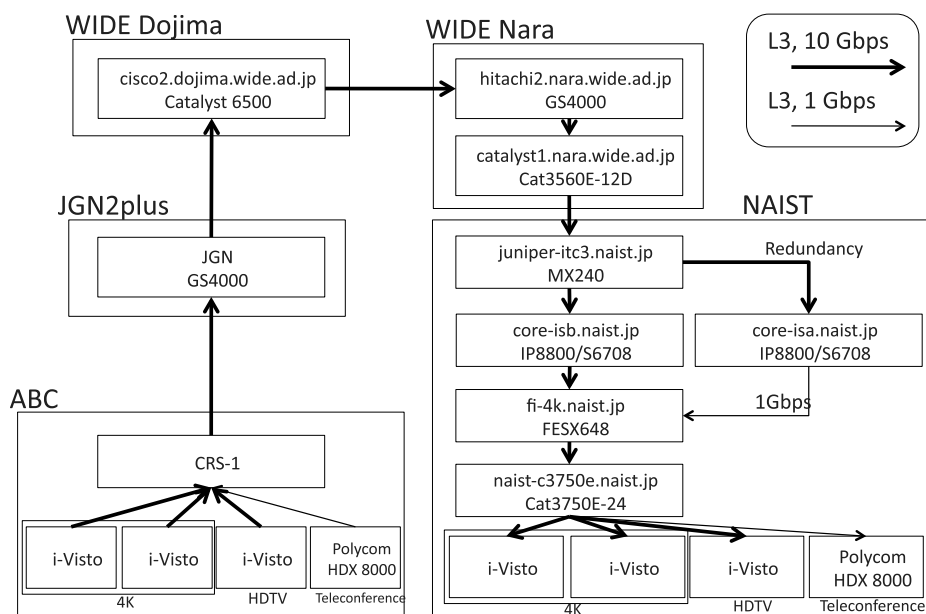


図 4 皆既日食実験時の映像データ伝送トポロジー

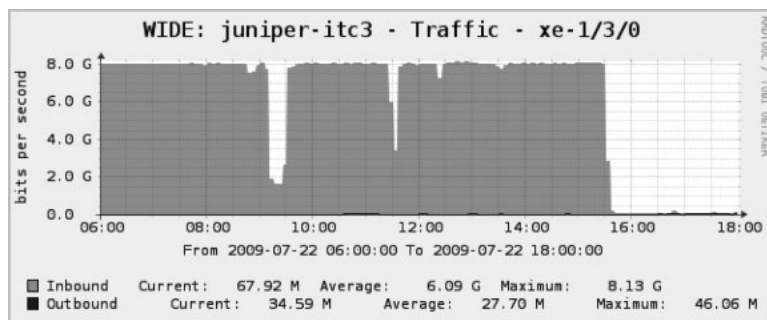


図 5 皆既日食実験時のトラフィック量

験，2. 伝送経路が変更されネットワークに輻輳が起こった場合を想定した伝送経路変更実験の二種類を行った。

4.1.1 通常経路伝送実験

ABC から NAIST への映像データの伝送トポロジーを図 4 に示す。ABC から NAIST への通信は、まず“JGN2plus Dojima”，“WIDE Dojima”，“WIDE Nara”を経由して NAIST に到達している。この伝送経路は、経路を調査するための traceroute コマンド (UNIX) で確認したもので、各ネットワーク機器の経路制御表のエントリに一致しており、かつ、想定される最短経路とも一致している。また、公

表されているネットワーク帯域と実際のネットワーク機器の調査により、この伝送経路において 10 Gbps の帯域が使用可能とのことで実験を行った。WIDE Project ネットワーク内、および、NAIST 内での経路制御は OSPF プロトコルを使用している。

非圧縮での 4K 映像の伝送には、前述の非圧縮 HDTV 伝送装置を用いた。皆既日食時の実験では、非圧縮 4K 映像の伝送以外に非圧縮 HDTV 映像とテレビ会議システム (Polycom 社製 HDX 8000 : 720p, H.264, 2 Mbps) での伝送も同時に行い、使用したネットワーク帯域は約 8.0 Gbps (6.4+1.6+0.002 Gbps) に達した。IP パケットの送出には UDP を用い、伝送

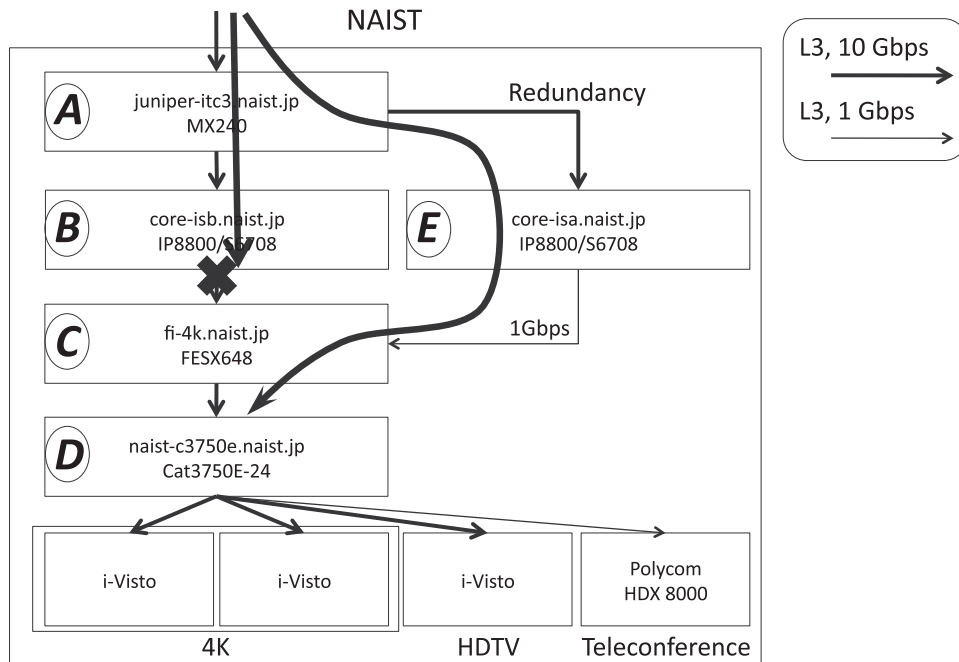


図 6 伝送経路変更実験時のトポロジー

効率を高めるために MTU をジャンボフレーム 9000 Byte として実験を行った。

実験中に、大学の対外接続用ネットワーク機器でトラフィックの計測を行った。図 5 に、横軸に時間、縦軸にトラフィック量を表すグラフを示す。ABC での皆既日食イベントは 10:00–15:00 の間で開催された。皆既日食の 4K ライブ映像は 10:00–11:20 の間で伝送を行い、13:00–15:00 の間には ABC で録画された皆既日食 4K 映像の伝送を行った。前日から 9:00 まで、および、12:00–13:00 の間はカラーパー映像を流し、映像機器のテストを行っていたためトラフィックが観測され続けている。その他、実験の都合で伝送を一時停止していたとき以外は、途切れることもなく 8.0 Gbps のトラフィックが正常に流れ続けていたことが示されている。

NAIST の対外接続用ネットワーク帯域は 10 Gbps で、イベントや実験を行っていない定常時のトラフィックは 200 Mbps 程度である。実験時には帯域全体の 8 割に相当するトラフィックを使用することになったが、伝送された映像は体感される途切れや乱れが一切無かった。非圧縮 HDTV 伝送装置のステータスや口

グの確認も行ったが、4 枚の映像の乱れやパケットロスについて一切確認することなく、実験は成功した。

本実験では Layer 3 の経路制御を使用して映像伝送を行なったが、Layer 3 の問題点の 1 つである伝送経路の変更については、実験中に一度も起こらなかった。

4.1.2 伝送経路変更実験

NAIST 内の冗長化されたネットワークの一部を意図的に切断し、伝送経路の変更実験を行なった。この実験の伝送トポロジーを 図 6 に示す。本実験の目的は、Layer 3 での経路制御を用いた場合に発生する経路変更の擬似実験を行い、映像データの伝送に十分な帯域を確保できないときに、他の通信データに悪影響を及ぼさないかを検証することにある。

NAIST のインGRES ルータ (図中記号 A) で、非圧縮 4K 映像データと HDTV 映像データの IP パケットヘッダの ToS (Type of Service) フィールドに優先破棄を設定することでトラフィックのクラス分けを行い、以降のルータで必要に応じてパケットの優先破棄処理が行われることを期待する。

変更実験は、午前中に行われた皆既日食のライブ

表 4 対比実験内容

実験時期	経路制御方式	実験目的
2009/3 事前実験	L2	皆既日食の事前準備
2009/7/22 皆既日食	L3	Layer 3 実証実験本番
2009/9 追加実験	L3 (一部 L2)	Layer 3 でのより遠距離実験

映像の伝送が終了し、ABC からの録画映像の伝送を行っていた時の 14:30–15:00 の間に実施した。皆既日食時の通常経路は図中記号の $A \Rightarrow B \Rightarrow C \Rightarrow D$ を通る経路で、10 Gbps の帯域での伝送が可能であった。伝送経路の変更のため、図中記号 B の図中記号 C 向きインターフェースのシャットダウンを行い、 $B \Rightarrow C$ 間の経路を遮断した。トポロジーの変更に伴い OSPF コスト値の再計算が行われた後、新しく決定された経路は $A \Rightarrow E \Rightarrow C \Rightarrow D$ を通ることになった。この場合、 $E \Rightarrow C$ 間においてネットワーク帯域が 1 Gbps に制限されるため、4K 映像および HDTV 映像のデータは正常に伝送することができなくなった。実際の映像では、 $B \Rightarrow C$ 間の経路を遮断した時点ですべての映像が途切れたが、新しい経路の決定後、テレビ会議システムの映像のみが無事に映しだされ、それ以降も安定して正常に映り続けた。

図中記号 E を確認したところ、帯域の最大量である 1 Gbps のトラフィックが流れていたこと、および、パケット破棄数がカウントアップしていることが確認でき、この状況下でもテレビ会議システムの映像データが正常に流れ続けていたことになる。また、前述の図 5 に示されるとおり、本実験中においても NAIST には 8 Gbps のトラフィックが流れ続けていたことが分かる。

通信遮断が発生した時間を測定するため図中記号 D への疎通を測定した結果、通信遮断は 2.6 秒間であったことが分かり、新しい経路の決定が短時間で行われたことが確認できた。また、経路遮断を解除することで、46 秒間の OSPF コスト値の再計算後に通常経路に復帰することが分かり、10 Gbps の帯域での伝送が可能になったことも確認できた。この経路復帰に伴うパケットの欠落は発生していない。

4.2 対比実験

皆既日食イベントに前後して、事前実験と追加実験の 2 回の対比実験を行った。表 4 に、皆既日食イベントを含む、合計 3 回の伝送実験の経路制御方式と実験目的を示す。

4.2.1 事前実験

2009 年 3 月に行われた大学のイベント時に、ABC から NAIST までの非圧縮 4K 映像の伝送実験を行った。両組織間では初めての伝送実験で、皆既日食時の事前準備という位置付けの実験であり、経路制御方式として、まずは VLAN 設定を用いることにした。

ABC から NAIST への映像データ伝送トポロジーを図 7 に示す。ABC から NAIST への通信は、まず “JGN2plus Dojima”, “WIDE Dojima”, “WIDE Nara” を経由して NAIST に到達しており、Layer 3 使用時に想定される経路と同様の経路を使用した。

実験中に、大学の対外接続ネットワーク機器でトラフィックの計測を行った。図 8 に、横軸に時間、縦軸にトラフィック量を表すグラフを示す。この実験は、10:00 と 16:30 から各 10 分間ずつ行われた。12:30 付近と 16:15 付近にもトラフィックが観測されるが、映像機器のテストを行っていたもので、実験は行われていない。実験中、途切れることもなく 6.4 Gbps のトラフィックが正常に流れ続けていたことが示されている。また、伝送された映像も体感される途切れや乱れが一切なく正常に表示することができた。非圧縮 HDTV 伝送装置のステータスやログの確認も行ったが、4 枚の映像の乱れやパケットロスについて一切確認することなく、実験は成功した。

4.2.2 追加実験

皆既日食時に伝送実験を成功させたが、実際に大阪から奈良へという物理的に近距離の環境での実験であったため、東京から奈良への Layer 3 での経路制

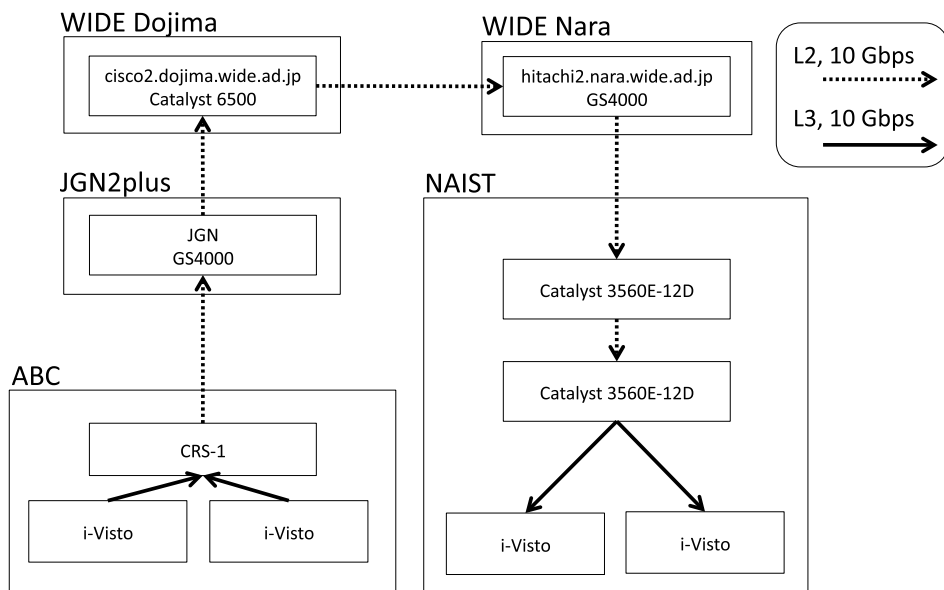


図 7 事前 L2 実験時の映像データ伝送トポロジー

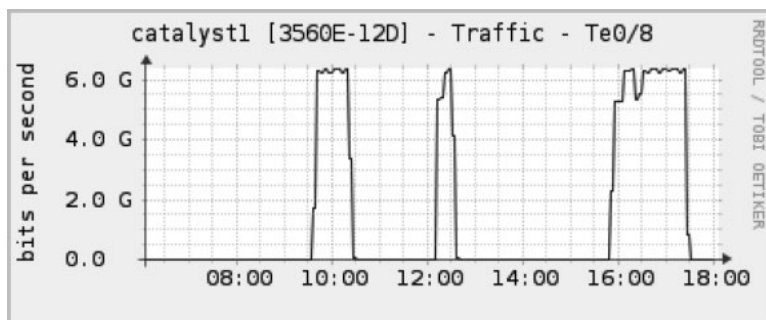


図 8 事前 L2 実験時のトラフィック量

御に従った伝送実験を追加で実施した。

この実験において、東京まで強制的に映像データを送信するために、ABC から東京までの“JGN2plus Dojima”，“WIDE Dojima”を經由して“WIDE Otemachi”まで VLAN 設定を行い、この“WIDE Otemachi”から NAIST までを Layer 3 の経路制御に従ったインターネット伝送として実験を行うことにした。

ABC から NAIST への映像データ伝送トポロジーを図 9 に示す。東京から NAIST への通信は、はじめに“WIDE Otemachi”，“WIDE Dojima”，“WIDE Nara”を經由して NAIST に到達している。

実験中に、大学の対外接続用ネットワーク機器でネットワークトラフィックの計測を行った。図 10 に、横軸に時間、縦軸にトラフィック量を表すグラフを示す。実験は、16:30–18:30 の間に行われた。実験の前後にもトラフィックが観測されるが、映像機器のテストを行っていたもので、実験は行われていない。実験中、途切れることもなく 6.4 Gbps のトラフィックが正常に流れ続けていたことが示されている。また、伝送された映像も体感される途切れや乱れが一切なく正常に表示することができた。非圧縮 HDTV 伝送装置のステータスやログの確認も行ったが、4 枚の映像の乱れやパケットロスについて一切確認することなく、

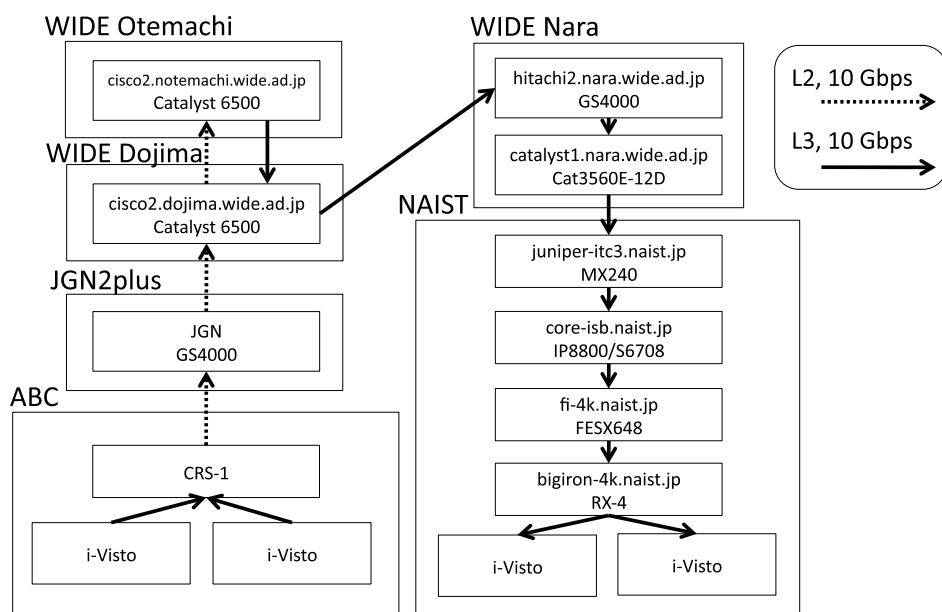


図 9 追加 L3 実験時の映像データ伝送トポロジー

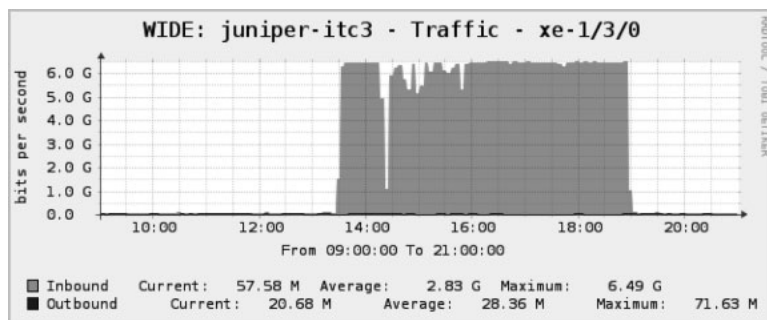


図 10 追加 L3 実験時のトラフィック量

実験は成功した。

本実験においても Layer 3 の経路制御を使用して映像伝送を行なったが、Layer 3 の問題点の 1 つである伝送経路の変更については、実験中に一度も起こらなかった。

4.3 NAIST での 4K 映像環境

NAIST では情報科学研究科棟 1 階ロビーの壁面に、200 インチの埋め込み平面スクリーンがあり、4K 映像を映し出すことが可能になっている。残念ながらドーム型のスクリーンは所有しておらず、今回の皆既日食の映像は平面スクリーンに映し出すことに

なった。

図 11 に NAIST での皆既日食ライブ中継実験の様子を示す。中央のスクリーンに全天 4K 映像を表示し、左側の 65 インチ液晶ディスプレイに HDTV 映像を表示した。右側の 65 インチ液晶ディスプレイには、伝送経路変更実験での擬似実験を行なうため、テレビ会議システムを使用して HDTV 映像と同一の映像の伝送を行なった。左右の映像比較としては、皆既日食の映像が動きの少ないものだったため、テレビ会議システムでも比較的安定して映像の視聴ができたが、太陽の前を雲が流れるような動きのある映像の場合には圧縮時のノイズが目立ち、HDTV 映像と対照



図 11 ライブ中継実験の様子

的な映像を表示する結果になった。皆既日食イベントとしては、視聴者として学内構成員である学生と教職員参加の下で行われ、ピーク時で約 250 人の参加があり、全体では約 400 人以上の人が参加し映像を視聴した。

5 考察

筆者らは、VLAN 設定を施さない通常の Layer 3 の経路制御に従ったインターネットを使用して非圧縮 4K 映像の伝送実験を行い、将来の伝送手法についての可能性を探った。この実験結果の評価を行なうため、以下の 4 つの節で考察を与える。

5.1 Layer 3 経路制御での伝送の可能性

筆者らは、あえて VLAN の設定を施さず、通常の Layer 3 の経路制御に従って非圧縮 4K 映像の伝送実験を行った。この実験を成功させるためには、まず、実際に使用する伝送経路に対して、公表されている帯域と実際のネットワーク機器への調査を行い、映像データの伝送が可能であるという調査結果を得た上で行なう必要があった。事前調査の下での実験ではあったが、皆既日食実験時と追加実験時の双方で、伝送された非圧縮 4K 映像が少しの途切れや乱れも確認すること無しに実験を終えることができ、この伝送方法での有効性を示すことができた。

2.3.1 節で一点目の問題点として述べた伝送経路の動的な変更は、皆既日食時および追加実験時の 2 つの実験を通して一度も起こらず、常に安定した映像伝送を行なうことができた。実際の伝送経路の動的な変更は、経路障害等の事故が発生しない限り短期間で起

こることはないと考えられる。

加えて、皆既日食時に行った意図的な経路変更実験時に、経路障害発生時の迂回や経路増強時の経路改善変更などの動的な経路制御の動作を確認することができ、Layer 3 の経路制御が有効に働くことを期待する結果が得られた。

5.2 パケット優先破棄処理の必要性

Layer 3 での動的な経路変更が起こり、映像データの伝送に十分な帯域を確保できないことを想定し、他の通信データに対して悪影響を及ぼさないようにするという目的で、映像データの packets を必要に応じて優先的に破棄するという実験を行なった。実験では、ボトルネックになった部分において伝送可能な帯域すべてを使い果たしたにもかかわらず、一般データに見立てたテレビ会議システムのデータには影響を及ぼすことなく安定した映像を映し出していたことが確認され、2.3.2 節で述べたデータの優先破棄の手法が有効であることが分かった。

この優先破棄の設定は、膨大な映像データの伝送を行なうときは必要であると考えられる。本来、各パケットの TCP/IP ヘッダ内の ToS フィールドへの優先破棄設定は、本実験で行った NAIST のインGRES ルータなどで行なうのではなく、パケット作成時に行うのが効率的で現実的であると考えられる。

5.3 ネットワーク遅延

表 5 に、皆既日食実験時の映像データ伝送の有無、追加実験時の映像データ伝送の有無の 4 つの場合においての、非圧縮 HDTV 伝送装置間の平均した往復遅延時間 (RTT) とその標準偏差について示す。表の数値は、ping コマンドを 0.1 秒間隔で 600 回行ったものを一定間隔で繰り返し、その平均値を求めたものである。

RTT の結果から、皆既日食時のデータ伝送中は伝送を行っていない時に比べ 0.032 ms、追加実験時には 0.440 ms 遅延が増加したことがわかった。また、標準偏差の結果から、皆既日食時ではデータ伝送の有無でもほとんど変化が無く、追加実験時でも RTT の値から比較すれば、ほとんど変化が無いと考えら

表 5 伝送実験時のレスポンス時間

実験時期	平均 RTT	標準偏差	パケットロス
皆既日食 (4K 伝送中 (8 Gbps))	1.204 ms	0.080 ms	無し
皆既日食 (伝送無し)	1.172 ms	0.082 ms	無し
追加実験 (4K 伝送中 (6.4 Gbps))	19.118 ms	0.198 ms	無し
追加実験 (伝送無し)	18.678 ms	0.176 ms	無し

れ、パケットの揺らぎは生じていないと判断できる。これらのことから、平均 RTT が 19.118 ms、標準偏差 0.198 ms のネットワーク環境においても、問題なく非圧縮 4K 映像の伝送を行うことができることが確認できた。

また、2.3.1 節で二点目の問題点として述べたルータの経路検索処理について、特に問題にはならないことも実証された。この理由として、最近のルータでの経路検索処理には、専用に開発された ASIC (Application Specific Integrated Circuit) が用いられ、ハードウェアでの処理を行なっているのが要因の 1 つであると考えられる。

5.4 非圧縮 4K 映像の優位性

4K 映像を JPEG 2000 形式で Visually Lossless を考慮して圧縮することで、伝送に必要なネットワーク帯域を非圧縮の 1/20 である 300 Mbps 程度にまでに節約することができ、1 Gbps のネットワーク帯域があれば問題無く伝送することが可能になる。このことは、伝送可能な組織が増えることを意味しており大変有用である。

ただし、前述の通り 4K 映像の圧縮と展開に必要な時間は合計で 100 ms であり、双方向の通信が必要な会議システムを構築する場合には、自分のトリガに対して相手のレスポンスが自分に返ってくるまでに 200 ms の遅延時間を発生させることになり、少なからずコミュニケーションの支障になると考えられる。また、この 200 ms はネットワーク遅延の時間と比較しても 10 倍程度と大きく、非圧縮 4K 映像を使用することでコミュニケーションの質を格段に上げることができると考えられる。

6 まとめ

筆者らは、非圧縮 4K 映像の伝送を行なうにあたり、VLAN 設定や Layer 3 の利点と欠点について比較検討を行った結果、VLAN 設定を施していない Layer 3 の経路制御に従ったインターネットを使用する上で、実際にどのような条件下で使用可能かの検証を行なうべきであるという結論に至った。Layer 3 使用時の問題点を課題とし、実際に複数の実験を行い、伝送を成功させることができた。この実験の成功は、今まで一般的に必要とされていた VLAN 設定が必ずしも必要でないことを示し、VLAN 設定時の工数や高リスクにとらわれることなく、非圧縮 4K 映像の伝送をより簡便に行える可能性を示すことができ、非常に有益であったと考えられる。

将来的には世界規模でネットワーク帯域が急速に拡充すると予想され、非圧縮 4K 映像の伝送において、現在より広範囲にわたり容易に安定して行えることが期待できる結果となった。

謝辞 本研究は朝日放送株式会社との共同研究、および、和歌山大学、超臨場感コミュニケーション産学官フォーラム、国立天文台、日本放送協会、宇宙航空研究開発機構、慶應義塾大学、WIDE Project、シスコシステムズ合同会社、日本電信電話株式会社、日本ビクター株式会社、コニカミノルタプラネタリウム株式会社の協力を受けて行ったものであり、独立行政法人情報通信研究機構の委託研究の成果である。

また、今回のこの素晴らしい連携は、産学官の協力体制のたまものだと言える。

参考文献

- [1] Digital Cinema System Specification, Digital Cinema Initiatives LLC, <http://www.dcmovies.com/DCIDigitalCinemaSystemSpecv1.2.pdf>
- [2] 山口高弘, 藤井竜也, 野村充, 白井大介, 白川千洋, 藤井哲郎: 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, D-1, Vol. J88-D-1, No. 2 (2005), pp. 361-370.
- [3] 低遅延の双方向高臨場感コミュニケーション環境を世界で初めて構築, NTT News Release, <http://www.ntt.co.jp/news/news09/0910/091028a.html>
- [4] 油谷曉, 垣内正年, 藤川和利, 猪俣敦夫, 香取啓志, 眞鍋佳嗣, 千原國宏: 非圧縮 4K 超高精細映像のためのインターネット伝送実験, 電子情報通信学会技術研究報告, IA2009-42 (2009), pp. 55-58.
- [5] Yutani, A. Kakiuchi, M., Inomata, A., Fujikawa, K., Kandori, K., Manabe, Y. and Chihara, K.: - Total Solar Eclipse- Fish-eye 4K image transmission experimentation on the Internet, in *ACM SIGGRAPH Asia 2009*, Poster, Japan, 2009.
- [6] Kakiuchi, M., Yutani, A., Inomata, A., Fujikawa, K. and Kandori, K.: Uncompressed 4K2K and HD Live Transmission on Global Internet, in *ACM SIGGRAPH Asia 2009*, Poster, Japan, 2009.
- [7] Yutani, A., Kakiuchi, M., Inomata, A., Fujikawa, K., Kandori, K., Manabe, Y. and Chihara, K.: A Realization of the Total Solar Eclipse Live Transmitting with Liveliness by using 4K, in *International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT) 2010*, No. 183, Malaysia, 2010.
- [8] Shirai, D., Shimizu, K., Sameshima, Y. and Takahashi, H.: 6-Gbit/s Uncompressed 4K Video IP Stream Transmission and OXC Stream Switching Trial Using JGN II, *NTT Technical Review*, Vol. 5 No. 1 (2007), pp. 78-82.
- [9] Thomson demonstrates 4k real-time data streaming of uncompressed digital content over ip network, <http://www.technicolor.com/en/hi/about-technicolor/press-center/2007>
- [10] 4K 超高精細映像素材の日米欧 2 大洋横断リアルタイム編集配信に成功, 慶應義塾大学, <http://note.dmc.keio.ac.jp/topics/archives/176>
- [11] 4K 超高精細映像による多地点テレビ会議の実演に成功, 慶應義塾大学, <http://note.dmc.keio.ac.jp/topics/archives/540>
- [12] Shirai, D., Kawano, T., Fujii, T., Kaneko, K., Ohta, N., Ono, S., Arai, S. and Ogoshi, T.: Real time switching and streaming transmission of uncompressed 4K motion picture, *Future Generation Computer Systems*, Vol. 25 (2009), pp. 192-197.
- [13] 7.22 皆既日食を 4K 超高精細全天映像でライブ伝送上映, NICT Press Release, <http://www2.nict.go.jp/pub/whatsnew/press/h21/090612/090612-3.html>
- [14] 7.22 皆既日食のライブ中継伝送に NTT の伝送技術を集結, NTT News Release, <http://www.ntt.co.jp/news/news09/0907/090716a.html>
- [15] NICT と URCF 皆既日食 4K 超高精細全天映像の伝送に成功, Cisco Systems, <http://www.cisco.com/web/JP/news/pr/2009/036.html>
- [16] 大谷イピサ: 皆既日食超高精細映像ライブ中継を追う!【システム編】, ASCII.jp, <http://ascii.jp/element/000/000/438/438505/>
- [17] 大谷イピサ: 皆既日食超高精細映像ライブ中継を追う!【レポート編】, ASCII.jp, <http://ascii.jp/element/000/000/438/438549/>
- [18] 大谷イピサ: 皆既日食中継の舞台裏, ASCII.technologies, Vol. 14, No. 10 (2009), pp. 90-97.
- [19] 山本成一, 長谷部克幸, 太田善之, 田中仁, 小林和真, 下條真司: 複数の研究開発ネットワークにて協調した大規模映像配信実験, 電子情報通信学会技術研究報告, IA2009-40 (2009), pp. 43-48.
- [20] 川野哲生, 清水健司, 小倉毅, 君山博之, 丸山充: 非圧縮 HDTV over IP システムの実装と評価, 電子情報通信学会技術研究報告, IN2004-29 (2004), pp. 13-18.
- [21] 持田武明, 川野哲生: 10 ギガビットネットワークにおける非圧縮 HDTV 映像多重化伝送技術「i-Visto ゲートウェイ XG」, NTT 技術ジャーナル, Vol. 17, No. 2 (2005), pp. 46-49.
- [22] 持田武明, 原田啓司, 丸山充: 非圧縮 HDTV 映像多重伝送システム (i-Visto XG) の実用化, 電子情報通信学会技術研究報告, NS2005-44 (2005), pp. 25-28.
- [23] 赤藤倫久, 本田彰, 川野哲生, 八田誠治, 中山裕, 南陽, 香取啓志: IP 伝送に基づく非圧縮 HDTV 映像の放送利用の実用化, 映像情報メディア学会誌, Vol. 60, No. 10 (2006), pp. 1681-1688.
- [24] i-Visto: NTT i-Visto, <http://www.i-visto.com/>
- [25] 白井大介, 北村匡彦, 藤井竜也: JPEG 2000 を用いた 4K 超高精細映像ストリーミングシステム, 電子情報通信学会技術研究報告, CS2007-29 (2007), pp. 43-48.
- [26] 尾久土正己: 4K 映像システムを使った皆既日食の全天投影, 映像情報メディア学会誌, Vol. 63, No. 10 (2009), pp. 1385-1398.
- [27] 尾久土正己: 4K 全天映像を使った皆既日食の超臨場感中継, Internet Conference 2009, 2009, pp. 91-99.
- [28] 当社 4K カメラなどが “皆既日食 4K 超高精細全天映像ライブ伝送上映” に採用, ピクチャー, <http://www.jvc-victor.co.jp/press/2009/4k2k.html>
- [29] デジタルドーム映像, コニカミノルタ, http://konicaminolta.jp/planetarium/hard/digitaldome_imaging/supermediaglobe2/index.html