

**4K 全天映像を使った皆既日食の超臨場感中継**  
**Ultra-Realistic Real Time Projection of the Total Solar Eclipse**  
**Using Whole-Sky Movie with 4K Resolution**

尾久土正己<sup>1,2</sup>, 荒川佳樹<sup>3</sup>, 佐藤正人<sup>4</sup>, 藤井竜也<sup>5</sup>, 白井大介<sup>5</sup>, 徳永正巳<sup>6</sup>, 西垣順二<sup>7</sup>,  
 大場省介<sup>8</sup>, 香取啓志<sup>9</sup>, 吉住千亜紀<sup>1</sup>, 荻原文恵<sup>2</sup>, 渡辺健次<sup>10</sup>

Masami OKYUDO<sup>1,2</sup>, Yoshiki ARAKAWA<sup>3</sup>, Masahito SATO<sup>4</sup>, Tatsuya FUJII<sup>5</sup>  
 Daisuke SHIRAI<sup>5</sup>, Masami TOKUNAGA<sup>6</sup>, Junji NISHIGAKI<sup>7</sup>, Seisuke OHBA<sup>8</sup>  
 Keishi KANDORI<sup>9</sup>, Chiaki YOSHIZUMI<sup>1</sup>, Fumie OGIHARA<sup>2</sup>, Kenzi WATANABE<sup>10</sup>

<sup>1</sup> 和歌山大学観光学部 / Faculty of Tourism, Wakayama University, <sup>2</sup> 和歌山大学学生自主創造科学センター / Student Center for Independent Research in the Sciences, Wakayama University, <sup>3</sup> 情報通信研究機構 / NICT, <sup>4</sup> JVC ケンウッドホールディングス株式会社 / JVC KENWOOD Holdings, Inc., <sup>5</sup> 日本電信電話株式会社未来ねっと研究所 / NTT Network Innovation Laboratories, <sup>6</sup> 西日本電信電話株式会社 / NTT West, <sup>7</sup> コニカミノルタプラネタリウム株式会社 / Konica Minolta Planetarium Co., Ltd., <sup>8</sup> ソニーPCL株式会社 / Sony PCL Inc., <sup>9</sup> 朝日放送株式会社 / Asahi Broadcasting Corp., <sup>10</sup> 佐賀大学理工学部 / Faculty of Science and Engineering, Saga University

### 概要

皆既日食では、太陽が月に完全に隠されることで周囲の環境がまさに天変地異のように急変する。しかし、これまでの日食映像は太陽だけをズームアップしていたために、観測地で体験する感動を伝えていなかった。そこで我々は2009年7月22日に奄美大島で見ることができた皆既日食を4Kの超高精細ビデオカメラで観測地の風景を丸ごと収録し、遠隔地のドームスクリーンにリアルタイムに再現する公開実験を行った。その結果、被験者として集まった市民に、観測地でしか体験できない月の影の通過に伴う環境の急激な変化を高い臨場感を持って実感してもらうことに成功した。

## 1 はじめに

皆既日食は人気のある自然現象で、これまでもテレビやインターネットで繰り返し放送されてきた。しかし、それらの映像のほとんどは、望遠レンズや望遠鏡を使って太陽をアップで撮影した映像であり、皆既の前後には太陽面の強烈な光から機材を守るために1万分の1から10万分の1の減光フィルターを装着してい

る。そのため実際には青空であるはずの部分食中の空も真っ黒になっている。皆既になった瞬間に減光フィルターを外すが、そのときは太陽が完全に隠されたために本当に空は暗くなっており、この間の変化を知ることができない。実際に、皆既日食の観測に出かけると、頭上を通過する月の影（天文学では本影という）による急激な環境の変化に驚き、皆既日食は月の影

の中に入る現象であると実感する。そこで、我々は皆既日食が起こっている観測地の環境の変化をできる限り再現することができないか研究を続けてきた。

インターネットを使った皆既日食の中継は、1997年3月9日にライブ！エクリプス97実行委員会がシベリアからの皆既日食と国内各地での部分日食の中継を行って以来、毎回多くのグループによって実施されている<sup>(1)</sup>。2005年10月3日のマドリッドでの金環日食と2006年3月29日のエジプトでの皆既日食では、はじめて魚眼レンズを取り付けたデジタルカメラで風景を含む全天映像(視野角180度の円形映像)を撮影し、静止面のスライドショー的な映像であるが、撮影後すぐに国内のプラネタリウムドームに伝送、ドームスクリーン上に投影した。この実験によって、日食で周囲が暗くなることを被験者に実感させることに成功した<sup>(2)</sup>。しかし、回線の帯域やシステム全体の処理能力から

コマ数は30秒に1枚と少なく、皆既日食の醍醐味である皆既前後の月の影の移動とそれに伴う劇的な変化を表現することはできなかった。ここでビデオカメラの動画ではなく、デジタルカメラの静止画を採用した理由は、広いドームスクリーンにはハイビジョンの解像度をもっても次のように不十分であるからである。太陽の見かけの角度は約0.5度である。ハイビジョンで撮影可能な全天映像は直径1K(1080画素)であるため、1画素あたりの分解能は約0.18度であり、太陽が直径3ドットにもならない。これではコロナをまとった黒い太陽を表現できなかった。

しかし、4Kの解像度(3840x2160画素)があれば太陽は6画素で丸く表現でき、周囲を取り囲んでいるコロナを十分に表現できる。このことは1年前の2008年8月1日のシベリアでの皆既日食で4K解像度の全天静止画の撮影実験で確認している(図1)。



図1 2008/8/1のシベリアでの皆既日食を4K解像度の全天映像で撮影したものから一方向だけトリミングした映像。黒い太陽と周囲のコロナを十分な解像度で捉えている。

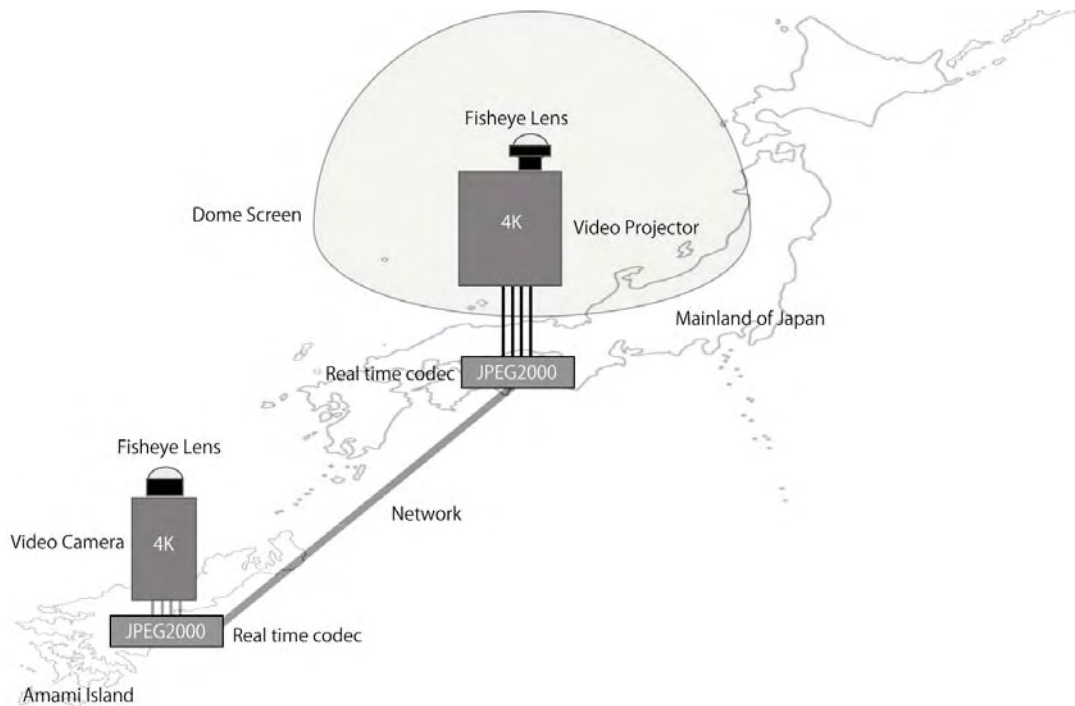


図2 4K 全天映像中継システムの概略図。途中のネットワーク構成については省略した。

2009年7月22日の皆既日食は、国内を46年ぶりに通過するため、帯域の確保や機材の運搬などのハードルが海外での日食に比べて低かった。また、日本ビクターで開発中の4Kの解像度を持つ超高精細ビデオカメラ<sup>3)</sup>がリアルタイムに4K映像を出力する能力を持っており、生中継で利用可能であった。これらのシステムを使うことで、これまで観測地でしか体験できなかった月の影の動きとそれによる周辺的环境変化をドームスクリーンに高い臨場感を持って再現することが現実の目標になった。

本論文では、撮影、伝送、投影の各システムの概要と、一般市民を集めて行った上映イベントから得られた成果について紹介する。

## 2 4K 全天映像中継システム

プラネタリウムの現場では、ドームスクリーンに全天映像を投影するシステムが、ここ数年

一般的になっている。この際、大型のスクリーンに高解像度で表示するために、複数のプロジェクタで分割投影するものが多い。

しかし、我々の実験では遠隔地で撮影された超高精細の実写映像をリアルタイムにドームスクリーンに再現することを要求するが、分割式では画像の分割、変形等の演算に時間がかかるため、リアルタイムに投影することは難しい。

そこで、今回我々は、ビデオカメラ、ビデオプロジェクタ共に4Kの解像度の機器を用いることにした。4Kカメラ専用の魚眼レンズを製作し、撮影した4K全天映像を、魚眼レンズを取り付けたプロジェクタで光学的にドーム内に再現するという方法で時間のかかる演算なしでリアルタイム投影することを可能にした。

4K映像の伝送には非圧縮の場合、およそ6Gbpsの帯域を要するが、今回の観測地である奄美市立屋仁小学校には、公営の光ファイバが

導入されていた。インターネットへの出口になっている市役所までは帯域に不自由はないが、奄美市役所から本州（鹿児島市）へは ATM の 155Mbps（そのうち利用できるのは 135Mbps）の回線サービスしか提供されていなかった。また、鹿児島大学から利用する実験ネットワーク JGN2plus も 100Mbps しか帯域がないため、100Mbps 以内で 4K の映像を伝送しないと行けないことがわかった。

そこで、エンコード/デコードに NTT 未来ねっと研究所が開発した JPEG2000 リアルタイムコーデックを採用した<sup>4)</sup>。300Mbps 程度のストリームを想定して開発されたシステムであったが、我々の映像が魚眼レンズを取り付けた映像であるために中心の円形の映像以外はほとんど真っ黒であること、また、空の部分が多いため圧縮が効くと考え、事前の室内実験で要求された帯域内で十分な画質の伝送が可能であることを確認した。

図 2 は、今回の 4K 全天映像中継システムの概略図であるが、実際のネットワークは、奄美市内の公営ファイバ、奄美～鹿児島間の ATM 回線、鹿児島～大阪への JGN2plus、そして 4 会場になった上映会場への回線など複雑になっていた。奄美～鹿児島間では帯域が限られていたため、奄美の映像を本州の複数地点に配信するためには、マルチキャストのような多地点配信技術が必要となった。しかし本実験ネットワークはレイヤ 3 で構成したため、通常の IP マルチキャストは利用できなかった。これに対し、NTT 未来ねっと研究所が開発した Flexcast<sup>5)</sup>技術を用い、奄美からのストリームを大阪で分岐することで、レイヤ 3 ネットワー

ク上での多地点配信を実現した。更なる伝送路に関しての詳細は別の場を借りて報告する予定である。

また、全天映像だけでは太陽の欠けていく様子や皆既中のコロナの詳細を見ることができないため、135Mbps の残りの帯域である 35Mbps を使って、ハイビジョンカメラによる太陽の拡大映像の伝送も行ったが、この詳細についても別の機会で報告したい。

### 3 中継実験

奄美大島の屋仁小学校で撮影した 4K 全天映像は、京都府にある「けいはんなプラザ」、大阪府にある「ABC ホール」、「大阪市立科学館」、茨城県にある「つくばエキスポセンター」の 4 会場で上映され、それぞれで市民に公開された。

けいはんなプラザでは、和歌山大学が今回の実験のために導入したコニカミノルタプラネタリウム製の Super Media Globe II（和歌山大仕様）で傾斜式の 5m 吸引式エアドームに、ABC ホールでは、Super Media Globe II で 4m 加圧式エアドームに、大阪市立科学館では、日本ビクター製の 4K プロジェクタ DLA-SH4K に対角魚眼レンズを装着したもので 26.5m のプラネタリウムドームに、そしてつくばエキスポセンターでは、機材の関係から JPEG2000 リアルタイムコーデックで受信した 4K 映像を 2K 映像にダウンコンバートしてコニカミノルタプラネタリウム製の Media Globe II で 6m 加圧式エアドームに投影した。このうち大阪市立科学館のケースでは、レンズの画角が狭く、ドームが広がったために、ドームの一部に丸い映像を投影する形になった。



日食当日は時折薄雲を通して欠けた太陽の姿が見えていたが、晴れ間が出ることはなく皆既時刻を迎えた。これまでの太陽だけにフォーカスした映像では、「悪天のために映像を撮影できませんでした」という失敗に終わっていた状況だが、我々の実験は月の影に入ることによる環境変化を捉えることであり、どんどん暗くなっていく様子、皆既前後の強風、鳥の行動、人々の興奮した様子を生々しく撮影することに成功した。さらに、薄雲が透過型スクリーンの役割を演じて、現地の上空に現れた月の影の輪郭をはっきりと映し出していた。

撮影された映像は、現地の 2ch の環境音と 1ch の著者の一人である尾久土による現地レポ

ートの音声（非圧縮）とともに JPEG2000 リアルタイムコーデックでエンコードされてパケットロスもほとんどなく本州各地の上映会場に伝送された。当日の 4K 映像が実際に使用した帯域は 92Mbps（映像のみで 88Mbps）であった。4K 映像のために ATM ルータで与えられた帯域は 100Mbps だったが、同時に 35Mbps の帯域を使って流したハイビジョン映像の影響で 100Mbps の帯域の実効帯域は 93Mbps になっており、ほぼ帯域すべてを使っての伝送となった。限られた帯域で最大限の映像品質を得るために、JPEG 2000 エンコードパラメータのチューニングを行った。カメラからの入力映像は輝度成分と色差成分に分けられてエンコ

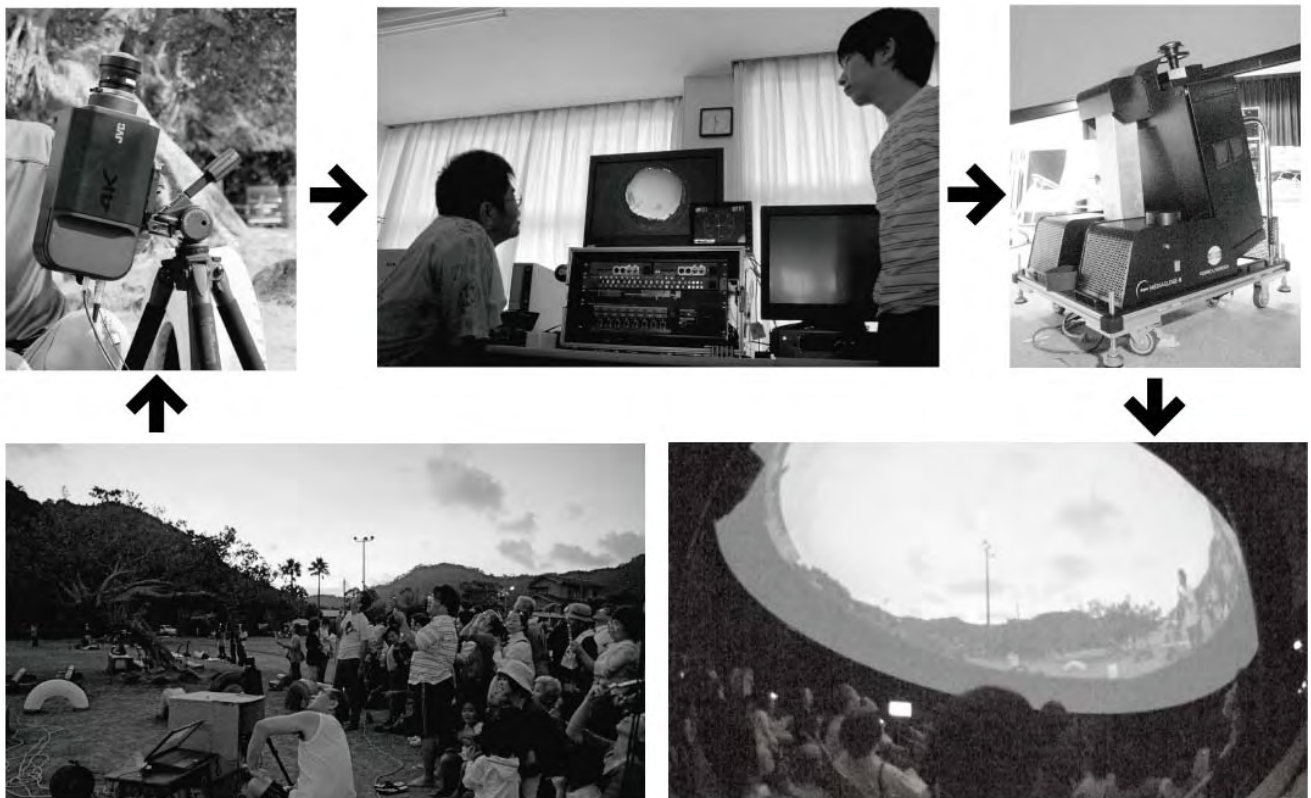


図 3 当日の中継実験の様子。左下：我々の全天カメラは地域住民によって取り囲まれた。左上：使用した 4K カメラと専用に製作した魚眼レンズ。中央上：中継センターになった屋仁小学校のパソコン教室の 4K モニタに映し出された皆既中の全天映像。右上：けいはんなプラザに設置された 4K 全天投影システム。右下：けいはんなプラザに設置された 5m ドーム内に再現された日食中の屋仁小学校の風景。

ードされるが、日食中の全天周映像においては色差成分よりも輝度成分の情報がより画質に対する重みを持つため、ビットレート割り当てを輝度：色差=9:1としてエンコードを行った。結果として、解像感、色ともに高い再現性を得ることができた。なおビットレート割り当ては事前に主観評価に基づき最適な割合を求めた。

## 4 評価

大阪市立科学館を除いてドームは小型のエアドームであったために、生中継を観賞できた市民は各会場とも30名ほどであった。そのため、各上映会場では、生中継だけでなく本州側で録画された映像を使って再上映も行っており、4会場当日実施した日食イベントに参加した総数は7100人と大規模なものになった。

このうち、投影機、スクリーン共に設計時点から今回の実験のために用意してきた和歌山大学のシステムを用いて上映したけいはんなプラザで観賞した市民に対してアンケート調査を行ったので、その結果を紹介する。

けいはんなプラザでは、1843人の希望者の中から生中継に30人、5回の録画上映に147人を抽選で選び案内状を送付した。その結果、生中継には29人、録画には97人が参加した。録画の方の欠席率が高いのは当日の天候が悪かったことがニュース等から参加者に伝わっていたことも影響していると思われる。まず、生中継映像を視聴した市民の層について紹介する。29人のうち27人の有効な回答を得ており、男女比、年齢層、職業に20代が少ないという以外に目立った偏りはなかった。また、科学への関心の高い人々が集まったのではなく、

過半数が平均的な人々であった。一方、録画上映に集まった97人の市民も、性別、年齢、職業に20代が少ないという以外の目立った偏りはなかった。しかし、67%が科学に関心を持つ層になっていた。これは悪天のために無関心層が見学を取り止めたものと思われる。

図4に生中継と録画を見た市民のアンケートの結果を並べたが、生中継、録画に関係なく多くの市民が今回の4K全天映像に満足し、周囲の環境の変化を理解し、月の影が横切る様子を理解している。やや録画の方の評価が低い、生中継独特の緊張感がないこと、悪天と知っていながら参加したイベントへの期待感の高いサンプルであったことを考えると当然の結果であろう。また、生中継のときは現地での日食の進み具合に合わせて70分のイベントの中に組み込まれ、十分な日食についての解説が行われたのに対して、録画上映では10分間の録画映像を視聴しただけである。それにも拘わらず、ほとんど同じような結果が出たことは注目し値する。

アンケートの自由記述欄に、生中継以上に、録画上映で「現地にいるかのような体験」とか「臨場感のある」という言葉が多く書かれていた。この臨場感の理由を引き出すために、けいはんなプラザで平面スクリーンに上映した別会場も用意してアンケートをとったが、そこに太陽の拡大映像のスクリーンも並べてセットされていたため、単純に比較できず今回はこの点の考察は省かせてもらう。ただ、録画上映でも同様の高い臨場感の声があるため、改めて録画映像でドーム映像と平面映像の比較を行いたい。

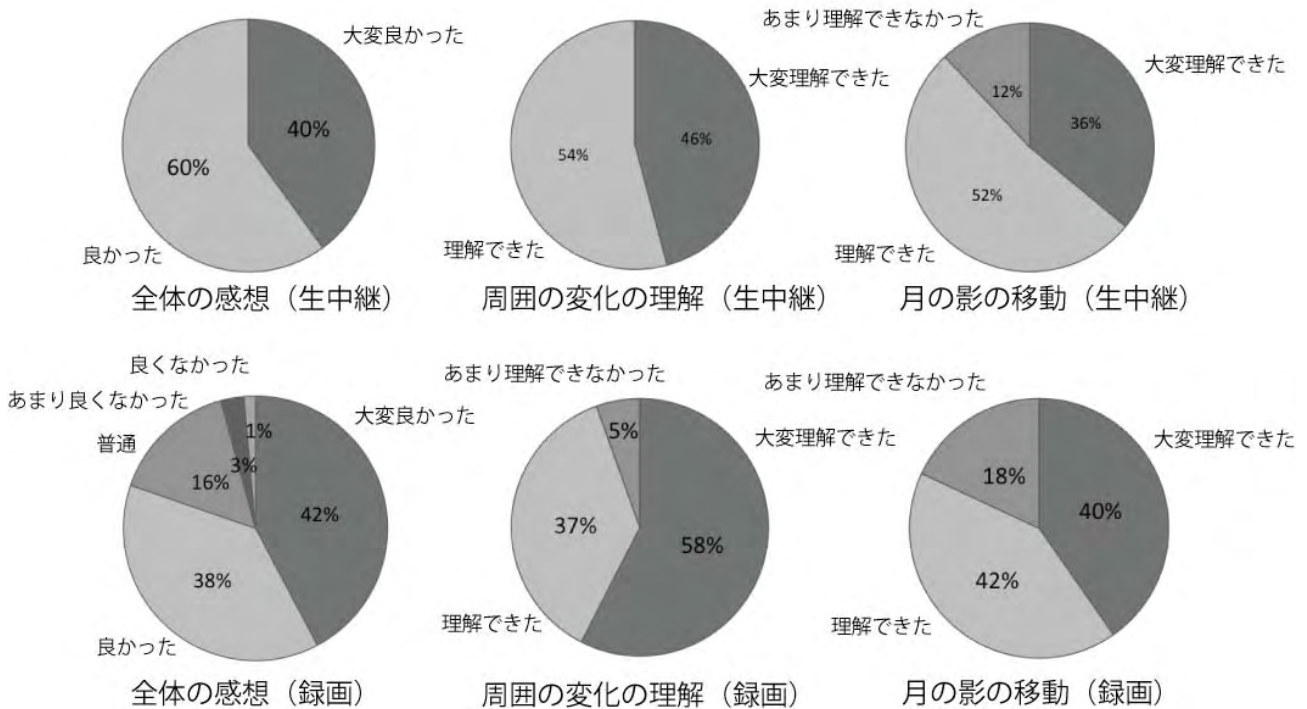


図4 けいはんなプラザの上映会場でのアンケート結果。上段が生中継、下段が録画上映を見た人たち。

客観的な評価ではないが、臨場感を高めた原因として音声と地域住民のエキストラ参加があると考えている。音声は、周囲の環境音だけでなく、現地レポートをレポーターになった尾久土の姿とともにドームスクリーンに再現した。そのため、解説者が指を指しながらスクリーン上で解説すれば、360度のドーム内ではその指示に従って首を動かしている見学者の映像がモニタカメラの映像に記録されている。このため、上映会場での解説がなくても、映像を見るだけである程度の理解を助けているのだらうと思われる。また、偶然に我々の4Kカメラを取り囲むように集まった地域住民が同じくドームスクリーン上に現れ、興奮した様子を届けることでCGではなく実写映像であることを強く印象付けたものと考えても良いだろう。

同様の効果は、日食後の7月24日、25日に小金井の情報通信研究機構の一般公開の会場でも見られた。そこには、けいはんなプラザのシステム一式を持ち込んで、解説なしで2000人近い市民の前で全天映像を公開したが、相対的評価ではあるが他の展示コーナーよりも高い評価を得たと言う報告を受けている。

## 5 まとめと議論

我々は、皆既日食を観測地を月の影が横切ることで起こる劇的な環境変化であると言う、これまでに注目されて来なかった視点で表現しようと、4Kの全天映像中継システムを構築し、2009年7月22日の皆既日食で撮影、中継、投影実験を行った。その結果、目標としていた環境の変化や月の影の移動を多くの市民に理解

してもらふことに成功した。また、多くの市民から高い臨場感が味わえたという声を聞くことができた。今回の実験に当たって多くの苦労があったが、それらについてのドキュメンタリーは別に紹介しているので合わせて読んでいただきたい<sup>(6)</sup>。

しかし、現地で実際の光景を目にしたスタッフからは明るさや色調、そして地平線の位置についての意見が出ている。これは、今回のシステムで日食中継を行ったのは初めてであり、明るさや色調の調整が場当たりのことであったことが原因である。また、ドーム内での地平線の位置であるが、カメラの解像度が縦方向 2160 ピクセルであるのに対してプロジェクタは 2400 ピクセルであるために、ドームに投影した場合、1 割ほど地平線が高くなってしまふ。現地では非圧縮の連番静止画データとして記録しているので、このデータからドームスクリーン上で適切な明るさや色になるよう、また、地平線位置が正しくなるように編集加工を行う予定である。この加工後の映像を使って、今回評価できなかったドーム映像と平面映像の臨場感の違いなどを調査したい。

なお、慶応大学と五藤光学研究所のチームは、今回の日食でデジタルカメラの連写機能とインターネットの太い帯域を活用して秒数コマの静止画からなる疑似動画による全天映像中継を行っている<sup>(7)</sup>。静止画中継と動画中継の違いについても今後、機会を見つけて調査してみたい。

最後に皆既日食に限定せず全天映像の進むべき方向性について議論したい。4K の魚眼映像では、その円周の直径は 2K である。視野角

の 180 度を 2K で割れば 1 ピクセルあたり 0.09 度、5.4 分角になる。人間の視力は 1.0 で 1 分角の分解能を持っている。つまり単眼で人間の分解能に迫る映像を撮影、投影するためには、10K 程度の映像システムが必要になる。すでに 8K のスーパーハイビジョンは開発されていることから 8K での同様の実験を近い将来に行いたい。

また、今回は曇ったために幸いしたが晴れていれば、日陰と日向の輝度差は非常に大きく、現在の映像システムではダイナミックレンジが不足する。新しい素子や撮影方法などを検討しダイナミックレンジの面でも人間の能力に近づきたいが、これは今後の技術革新に期待したい。さらに、現地では日食の進行に従って起こる気温の低下やそれに伴うと考えられる突風が吹いていた。これらの五感で感じる気象変化をドーム内で再現できれば、更なる臨場感の高い空間を提供できるであろう。このうち気温の変化だけであれば、空調を制御することで可能である。

なお、今回のアンケートではこの上映を通じて科学への関心の高まりについて質問しているが、中継、録画共に 9 割以上の市民が自身の興味関心が増したと回答していることから、4K 全天映像は科学の理解増進を行うツールとして今後の活用が期待できる。

## 謝辞

今回の実験を行うに当たって超臨場感コミュニケーション産官学フォーラム (URCF) の中に全天映像伝送プロジェクトを立ち上げ多くの組織や人々に協力していただいた。プロジ



ェクトの立ち上げに当たって、東京大学の相澤清治教授、情報通信研究機構けいはんな研究所の榎並和雅所長を始め、事務局スタッフの皆さんから多大なる協力を得た。また、観測地になった奄美市立屋仁小学校の太田寿校長を始めとする小学校のスタッフの皆さん、奄美市役所紬観光課のプロジェクト 2009 の重久春光調整監を始めとする市役所の皆さんから献身的なサポートを受けた。さらに、ここに個々の名前を書くことができないほどの多くの人々に、現地からの伝送、経路上のサポート、各会場でのデータの交換など支援していただいた。ここに感謝の意を表したい。なお、本論文で使用した現地での写真データは、記録係として参加してくれた東京医科大学病院の河合陽子氏によるものである。本研究は、科学研究費補助金基盤研究(C)「超高精細動画を使った皆既日食の全周デジタルミュージアム」(課題番号:21601003、研究代表者:尾久土正己)を受けて実施した。

## 参考文献

- (1) 尾久土正己、板垣朝子、高橋典嗣、和田英一、森友和、相川成周、安田豊、中山雅哉、森下貴裕、市川雄一、大原弘美、渡辺健次、近藤弘樹:「インターネットを使った大規模な日食中継システムの実現とその教育への応用」, 教育システム情報学会誌 Vol. 18, No. 2, pp. 219 - 231 (2001.7).
- (2) 尾久土正己、荻原文恵、小澤友彦、吉住千亜紀、富田晃彦、山田宏之、明井英太郎、石川雅一、山本文治、中山雅哉、半田利弘:「プラネタリウムにおける日食の全天周生中継」, 地学教育, Vol. 60, No. 3, pp. 99 - 107

(2007.5).

- (3) 田中英史、田中健二、鈴木健治、磯貝光雄、荒川佳樹、佐藤 正人:「3 板式 4kx2k CMOS カラーカメラの開発」電子情報通信学会総合大会講演論文集, D-11-69, (2001).
- (4) 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」, 信学技報, vol. 107, no. 244, CS2007-29, pp. 43-48, (2007. 10).
- (5) 井上武、谷誠一郎、高橋宏和、湊真一、宮崎敏明、豊島鑑:「Flexcast による段階的導入に優れたマルチキャストシステムの設計と実装」, 信学論 (D-I) , vol.J88-D-I, no.2, pp.272-291, (2005. 2).
- (6) 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, pp. 1385 - 1389 (2009.10).
- (7) 五藤光学研究所「トピックス～7月22日皆既日食を捉えました!」

[http://www.goto.co.jp/topics/2009/topics\\_090722.html](http://www.goto.co.jp/topics/2009/topics_090722.html)