

# 多様な番組制作のための 8Kスーパーハイビジョン カメラの開発

島本 洋

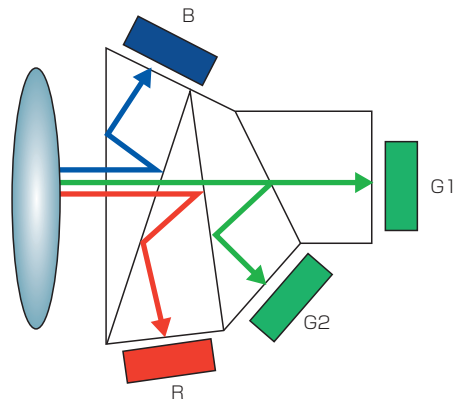
NHKでは、次世代の超高臨場感放送システムの実現を目指し、現行ハイビジョンの16倍の画素数となる3,300万画素（7,680×4,320画素：8K）の映像と、22.2チャンネルの3次元音響（22.2ch音響）を持つ、8Kスーパーハイビジョン（8K Super Hi-Vision）の研究開発を進めている。これまでに、この8K映像を用いて、愛知万博展示やオリンピックのライブ中継など、多くの番組制作（8Kコンテンツ制作）を行ってきた。このような多様な番組制作を行うためには、映像入力装置であるカメラの開発が必要である。これまでに、フレーム周波数が120Hzのフルスペック8Kリファレンスカメラや、高感度・低騒音のシアターカメラ、小型単板カメラなど、さまざまな8Kカメラを開発してきた。2018年の8Kの実用放送開始を目指し、8Kカメラも開発段階から実用化の段階にシフトしつつある。本稿では、これまで取り組んできた8Kカメラシステムの研究開発と今後の実用化について解説する。

## 1. はじめに

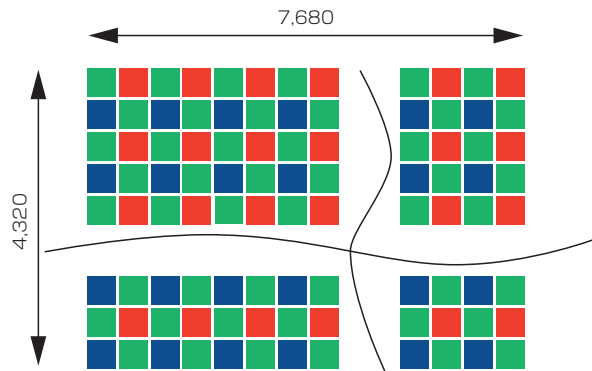
NHKでは、次世代の超高臨場感放送システムの実現を目指し、3,300万画素の映像と22.2ch音響を持つ8Kスーパーハイビジョン（以下、8Kと略称）の研究開発を進めている<sup>1)</sup>。これまでに、この8K映像を用いて、多くの番組制作（8Kコンテンツ制作）を行ってきた<sup>2)</sup>。2005年に行われた愛知万博をはじめ、NAB（National Association of Broadcasters：全米放送事業者協会）やIBC（International Broadcasting Convention：国際放送会議）で開催された展示会での上映や国際伝送実験、ロンドンオリンピックやソチ冬季オリンピックでのパブリックビューイング、2014年FIFAワールドカップサッカーでのライブ中継など、多くの方々に8K映像をご覧いただいていた。

このような多様な番組制作を行うためには、映像入力装置であるカメラの開発が必要である。8Kのカメラとして要求される条件は、（1）カメラシステムとして8Kの画素数（3,300万画素）を有すること、（2）フレーム周波数（1秒あたりのコマ数）が60Hzないし120Hzの順次走査であること、（3）小型で実用的であること、などである。

（1）の画素数については、当初は8K映像フォーマットに必要な3,300万画素のイメージセンサーが開発されていなかったため、約800万画素のイメージセンサーを4枚使用し、画素ずらしと補間処理により必要な画素数を得ていた。その後、3,300万画素のイメージセンサーが開発され、このイメージセンサーを3つ用いる3板式のフル画素カ



1図 4板撮像方式の光学プリズムの構成



2図 4板撮像方式の画素空間サンプリング構造

ラーカメラが開発された。(2)のフレーム周波数については、これまで60Hzで撮影が行われていたが、120Hzで撮影可能なイメージセンサーが開発され、フレーム周波数120Hzのフルスペック8Kカメラが開発された。(3)の小型化については、3,300万画素の単板イメージセンサーを用いて、カメラヘッドの重量を5kgや2kgとした小型8Kカメラが開発された。

このように、これまでに多くの8Kカメラシステムが開発されてきた。本稿では、これまで取り組んできた8Kカメラシステムの研究開発と、今後の実用化に向けた取り組みについて解説する。

## 2. 8Kカメラの要素技術

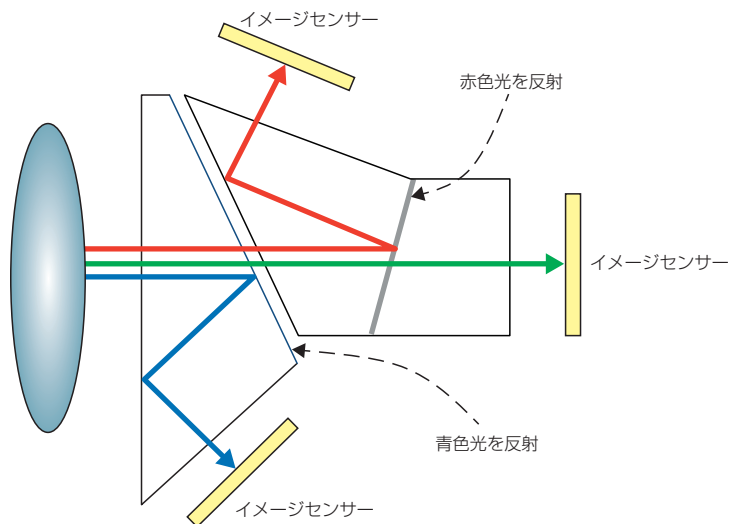
### 2.1 撮像方式

これまでに開発した8Kカメラの撮像方式には、(1)800万画素のイメージセンサーを4つ使用した4板撮像方式、(2)3,300万画素のイメージセンサーを3つ使用した3板撮像方式、(3)3,300万画素の単板カラーイメージセンサーを使用した単板カラー撮像方式の3つがある。以下に、それぞれの撮像方式について、その特徴を説明する。

#### (1) 4板撮像方式 (デュアルグリーン方式)

8Kの超高精細映像を実現するためには約3,300万画素のイメージセンサーが必要となる。しかし、このように多画素かつ60フレーム/秒の動画像が撮影できる撮像素子は、当初はまだ開発されていなかった。そこで、800万画素級のイメージセンサーを用いて、画素ざらしにより3,300万画素の映像を得る4板撮像方式(4板式)<sup>3)</sup>を用いた。

4板撮像方式による光学プリズムの構成を1図に、光学像からみた画素空間サンプリング配置を2図に示す。この撮像方式は、緑色信号(Gチャンネル)に2つのイメージセ



3図 3板撮像方式

ンサー，赤色信号（Rチャンネル）と青色信号（Bチャンネル）にそれぞれ1つのイメージセンサーを用いる。2つのGチャンネル用イメージセンサーを光学像に対して空間的に斜め方向に半画素ずらして貼り合わせることにより，水平方向および垂直方向のナイキスト周波数<sup>\*1</sup>を，イメージセンサーの持つ解像度の2倍にすることが可能となる。Gチャンネル信号は輝度信号に対する寄与が一番大きいため，Gチャンネル信号の解像度を上げることにより，少ない画素数のイメージセンサーで効果的にシステムの解像度を改善することができる。この800万画素と4板撮像方式による空間サンプリングパターンは，後述する3,300万画素のベイヤー配列<sup>\*2</sup>の単板カラーイメージセンサーと同じサンプリング構造となる。この方式は，緑色（グリーンチャンネル）のイメージセンサーを2枚使用することから，デュアルグリーン（DG：Dual Green）方式とも呼ばれている。

一方，4板撮像方式で画素ずらしによって解像度を向上させる場合，画素ずらし位置の精度が悪いと，合成映像の空間解像度も劣化するため，高精度でイメージセンサーをプリズムに貼り合わせる必要がある。我々が開発した8Kカメラでは，貼り合わせ誤差を0.5 $\mu\text{m}$ 以内（およそ1/10画素以内）とすることにより，3,200TV本以上の限界解像度<sup>\*3</sup>を得ている<sup>4)</sup>。

## (2) 3板撮像方式

3板撮像方式（3板式）は，通常の放送用カメラでも用いられているもので，色を分解するための光学プリズムと，その面に構成され特定の波長の光を反射するダイクロイックミラーを用いて赤，緑，青（RGB）の3色を分光する方式である（3図）。それぞれの色に対し，3,300万画素のイメージセンサーを貼り合わせることにより，RGBともに3,300万画素のカラー信号が得られ，高品質で十分な解像度特性が得られることが特徴である。4板撮像方式と3板撮像方式の比較を4図に示す。

一方，3板撮像方式を用いて8Kカメラを作るためには，3,300万画素のイメージセンサーが必要となるため，3,300万画素のフル画素イメージセンサーの開発を待つ必要があった。さらに，4板式や3板式の撮像方式では，色の分解に光学プリズムが必要になるとともに，複数のイメージセンサーを用いるため，機構が複雑で機材が大型となり，価格も高価になるという課題があった。

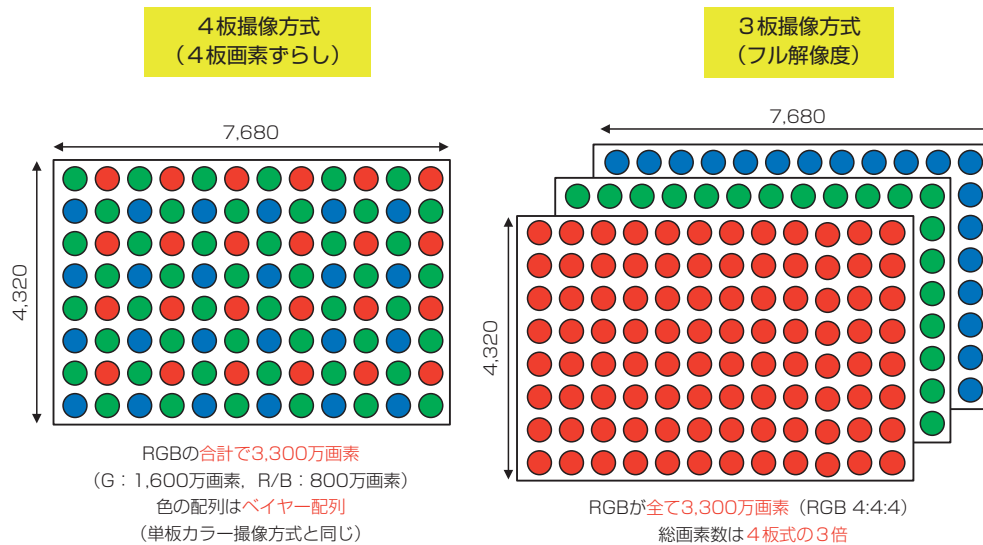
## (3) 単板カラー撮像方式

単板カラー撮像方式（単板式）は，1枚のイメージセンサーで全てのカラー信号を取

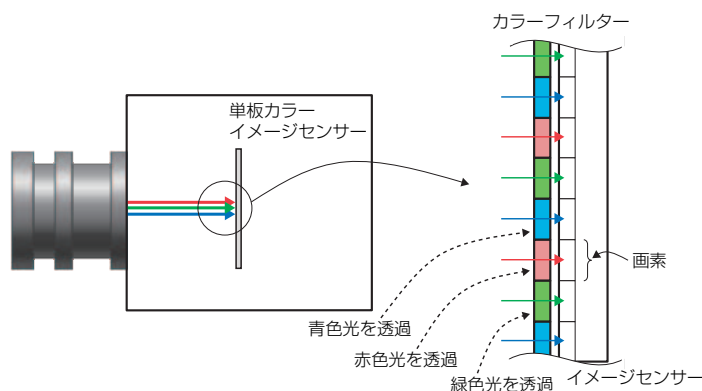
\*1 標準化定理により定まる，撮影可能な最高空間周波数。

\*2 縦2×横2の4画素を繰り返し単位とし，対角2画素を緑に，残る2画素を赤と青に1画素ずつ割り当てる配列パターン。

\*3 撮影可能な最大の空間解像度。



4図 4板撮像方式と3板撮像方式の比較



5図 単板カラー撮像方式

得するもので、各画素の上に微細なカラーフィルターを搭載し、画素ごとに異なる色の信号（例えば赤、緑、青）を撮像する方式である（5図）。画素ごとの色信号の割り振り方は、前述の4板撮像方式と同じく、隣接する4つの画素のうち、2つを緑色の信号に、残りの2つを赤色および青色の信号に割り当てている。すなわち、3,300万画素のイメージセンサーの場合、緑色に約1,600万画素、赤色および青色にそれぞれ約800万画素が割り当てられている。従って、システム全体の画素数は4板撮像方式と同一で、補間処理によって8Kの画素数を得ている。

単板カラー撮像方式は、解像度特性は3板式には及ばないものの、色の分解に光学プリズムを使用しないため、カメラヘッドの機構が大幅に簡略化でき、小型化や低価格化に有利である。また、光学プリズムを用いないため、フランジバック（レンズ後端からイメージセンサー受光面までの距離）が短いレンズが利用できる利点もある。その結果、デジタルシネマ用レンズなど、市販のレンズも使用することが可能となり、レンズ選択のバリエーションが増える利点もある。さらに、画素数が3,300万を超えるイメージセンサーが開発されれば、単板カラー撮像方式で補間処理が不要な、フル解像度の8Kカメラを実現することが可能である。

## 2.2 イメージセンサー

イメージセンサーは、カメラの性能を決定する重要なデバイスである。1表に、これ

1表 これまでに開発した主なイメージセンサー

開発時期 (年)	2000	2002	2007	2012
画素数	830万	890万	3,300万	3,300万
撮像素子	CCD	CMOS	CMOS	CMOS
フレーム周波数 (Hz)	60	60	60	120
光学サイズ (インチ)	2.5	1.25	2.5	1.5
画素サイズ (μm)	8.4	4.2	3.8	2.8
内蔵ADCビット幅 (bit)	なし	10	12	12
消費電力 (W)	—	1.1	3.8	2.5
全出力データレート (Gb/s)	—	5.3	24	48
カラー化対応	モノクロ	モノクロ	モノクロ/カラー	モノクロ/カラー

までに開発した主なイメージセンサーを示す。

最初に開発した8K用イメージセンサーは、約800万画素（正確には830万画素）のCCD（Charge Coupled Device）イメージセンサーであった。1画素の大きさは $8.4 \times 8.4 \mu\text{m}$ で、イメージセンサーの光学サイズ（受光面の対角長）は2.5インチ相当であった。その後、小型化を目指して、890万画素のCMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor）イメージセンサーを開発した。これは、1画素の大きさが縦、横、ともに従来の半分の $4.2 \times 4.2 \mu\text{m}$ であり、光学サイズも1.25インチと大幅に小型になった。また、このイメージセンサーは、画素から読み出されるアナログ信号をデジタル信号に変換するAD変換回路（ADC：Analog to Digital Converter）が内蔵されており、低消費電力で出力も安定しており、現在でも4板式カメラに用いられている。

2007年には、ついに8K解像度を有する、3,300万画素のフル画素イメージセンサーを開発した。2012年には、同じく画素数が3,300万で、フレーム周波数が2倍の120Hzのイメージセンサーを開発した。また、これら2つの3,300万画素イメージセンサーについては、それぞれ単板カラー用のものも開発した。

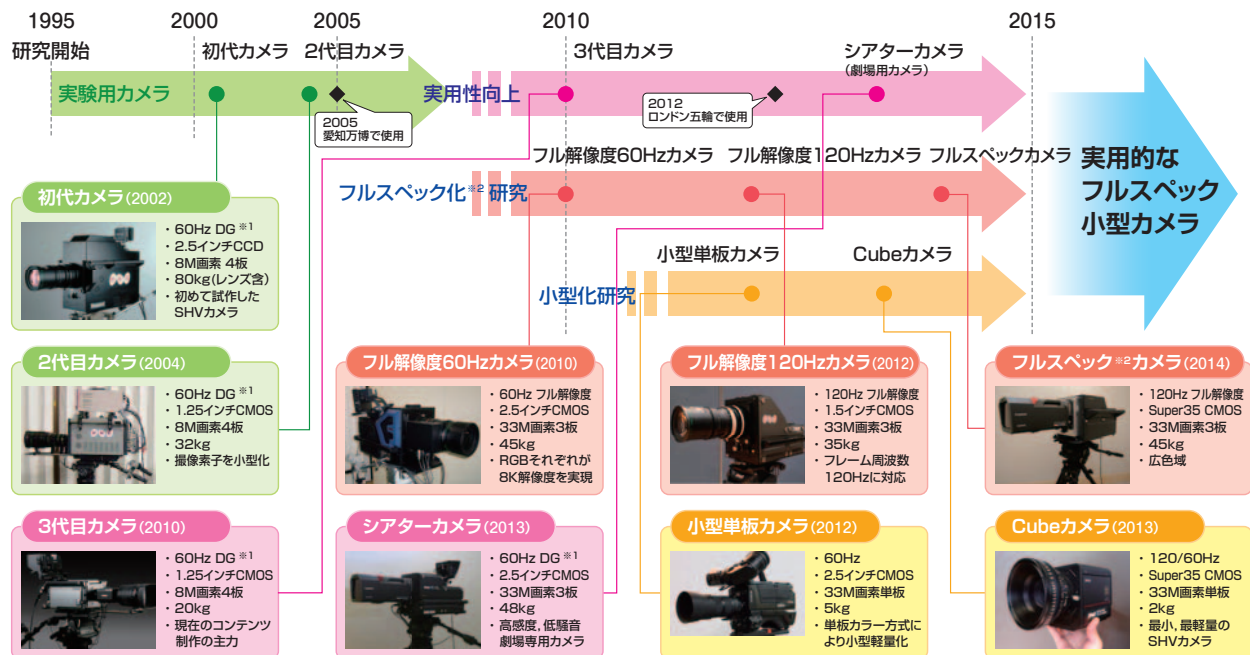
このように、イメージセンサーも年々高性能化され、カメラ性能の改善につながっていった。

### 3. 8Kカメラ開発の歴史

#### 3.1 最初の8Kカメラと、小型化への取り組み

6図に、これまでに開発してきた8Kカメラの一覧を示す。

最初の8Kカメラは、2002年に開発された。当時はまだ8K映像フォーマットに必要な3,300万画素のイメージセンサーが開発されていなかったため、830万画素のCCDイメージセンサーを4枚使用して、画素ずらしと補間処理により、8K解像度を得た。これにより初の8Kカメラが完成したが、重量はレンズも含めると80kgもあった。そこで、次にカメラの小型化に取り組んだ。カメラを小型化するためには、イメージセンサーの光学サイズ（受光面の対角長）を小さくすることが効果的である。そのため、イメージセンサーも新たに開発され、従来の半分の光学サイズ（1.25インチ）となった。これにより、カメラヘッドの重量は32kgまで小型化された。その後、カメラシステムなどが改善され、またさらなる小型化が図られ、2010年に開発された3代目8Kカメラでは、重量も20kgとなった。このカメラは、2012年のロンドンオリンピックなどで使用され、現在も主力カメラとして利用されている。



6 図 8Kカメラ開発の歴史

その後も、8Kカメラをさらに小型化するための研究を継続し、2012年には、3,300万画素で単板カラー方式を用いた重量5kgの小型単板カメラ<sup>5)</sup>、さらに2013年には、重量がわずか2kgのCube型超小型8Kカメラを開発した<sup>6)</sup>(詳細は本特集号の報告「超小型8Kスーパーハイビジョンカメラ「Cubeカメラ」の開発」を参照)。このCubeカメラは、フレーム周波数も120Hzに対応しており、動きの速い被写体の撮影にも適している。

### 3.2 フルスぺック化を目指した研究

一方、8Kカメラの本来の性能である、フルスペック化(8Kの映像パラメーター<sup>7)</sup>のうち最上位のものにすること)を目指した研究も開始された。2010年には、開発した画素数3,300万(フレーム周波数は60Hz順次走査)のイメージセンサーを用いて、3板式フル解像度カメラを開発した<sup>8)</sup>。これにより、8K映像にするための補間処理が不要となり、赤色・緑色・青色(RGB)それぞれが8K解像度を実現できた。2012年には、画素数が3,300万で、さらにフレーム周波数が従来の2倍の120Hz(1秒間に120コマ)で撮影可能なイメージセンサーが開発され、これを用いてフル解像度120Hzカメラを開発した<sup>9)</sup>。さらに、2014年には、色分解光学プリズムが広色域特性となった、初の8Kフルスペックカメラを開発した<sup>10)</sup>。一方、広色域特性の実現は、撮像素子から得られるRGB信号値に対して3行3列の行列を掛け合わせるリニアマトリクス処理によっても可能である。このリニアマトリクスによる広色域特性への補正手法を、単板カラーカメラを用いて開発した(詳細は本特集号の報告「超小型8Kスーパーハイビジョンカメラ「Cubeカメラ」の開発」を参照)。

### 3.3 シアターカメラの開発

一方、8Kカメラの実用性を向上させるためのもう1つのカメラとして、シアターカメラ(劇場用カメラ)を開発した。これは、3,300万画素のフル画素イメージセンサーを用いて、画素加算処理により高感度化し、さらにカメラの空冷ファンの音が漏れないようにして静粛性を追求し、暗くて静かな劇場でも撮影可能としている<sup>11)</sup>。

#### 4. 今後に向けて

8K放送の実現に向け、実用的なフルスペック小型カメラの早期実用化が求められている。そのためには、画素数が1億画素以上（RGBそれぞれ3,300万画素以上）、フレーム周波数が120Hzで、単板カラー方式の、イメージセンサーとカメラシステムを開発する必要がある。当所ではすでに、画素数1億3,300万のフル画素単板カラーイメージセンサーの開発に成功した<sup>12)</sup>。今後、開発したイメージセンサーのカメラ化に取り組むとともに、フレーム周波数の120Hz化にも取り組む予定である。

一方、画素の微細化、フレーム周波数の高速化、単板カラー化による感度低下が予想されるため、イメージセンサーの高感度化が重要な課題となる。またカメラシステムとしても、小型化のほかに、フォーカス調整や手ぶれ補正などの補助機能、ポータブル収録機やワイヤレス伝送などの新たな機材も求められている。

8Kは、2016年に試験放送が、さらに2018年には実用放送が予定されている。2020年の東京五輪は、ぜひ8Kの高臨場感をみなさまのご家庭で楽しんでいただけるよう、今後も8Kカメラの研究開発に取り組んでいく。

## 参考文献

- 1) M. Sugawara, M. Emoto, K. Masaoka, Y. Nishida and Y. Shishikui : “Super Hi-Vision for the Next Generation Television,” ITE Trans. on MTA, Vol.1, No.1, pp.27-33 (2013)
- 2) 石田 : “SHV (8K) コンテンツ制作の最近,” 映画テレビ技術2014/6 (742), pp.18-25 (2014)
- 3) M. Sugawara et al. : “Four-chip CCD Camera for HDTV,” SPIE Proc., 2137, pp.122-129 (1994)
- 4) H. Shimamoto, T. Yamashita, N. Koga, K. Mitani, M. Sugawara, F. Okano, M. Matsuoka, J. Shimura, I. Yamamoto, T. Tsukamoto and S. Yahagi : “An 8K×4K Ultrahigh-Definition Color Video Camera with 8M Pixel CMOS Imager,” SMPTE Motion Imaging Journal, July/August, pp.260-268 (2005)
- 5) 船津, 山下, 添野, 柳, 高橋, 吉田 : “スーパーハイビジョン用小型カメラヘッドの開発,” 映情学誌, Vol.68, No.3, pp. J117-J124 (2014)
- 6) H. Shimamoto, T. Yasue, K. Kitamura, T. Watabe, N. Egami, S. Kawahito, T. Kosugi, T. Watanabe and T. Tsukamoto, “A Compact 120 Frames/sec UHDTV2 Camera with 35mm PL Mount Lens,” SMPTE Motion Imaging Journal, Vol.123, No.4, pp.21-28 (2014)
- 7) ITU-R Rec. BT.2020, “Parameter Values for UHDTV Systems for Production and International Programme Exchange” (2012)
- 8) T. Yamashita, R. Funatsu, T. Yanagi, K. Mitani, Y. Nojiri and T. Yoshida, “A Camera System Using Three 33-Megapixel CMOS Image Sensors for UHDTV2,” SMPTE Motion Imaging Journal, November/December, pp.24-30 (2011)
- 9) H. Shimamoto, K. Kitamura, T. Watabe, H. Ohtake, N. Egami, Y. Kusakabe, Y. Nishida, S. Kawahito, T. Kosugi, T. Watanabe, T. Yanagi, T. Yoshida and H. Kikuchi : “120Hz Frame-rate Super Hi-Vision Capture and Display Devices,” SMPTE Motion Imaging Journal, Vol.122, No.2, pp.55-61 (2013)
- 10) T. Soeno, T. Yasue, K. Kitamura, K. Masaoka, Y. Kusakabe, H. Shimamoto, T. Yamashita, Y. Nishida and M. Sugawara : “Development of 8K-UHDTV System with Wide-Color Gamut and 120-Hz Frame Frequency,” IBC2014 (2014)
- 11) 中村, 林田, 船津, 添野, 山下, 柳, 吉田 : “シアターコンテンツ撮影用スーパーハイビジョンカメラの試作,” 映情学冬大, 11-12 (2013)
- 12) NHK技研報道発表資料, “世界初! 8Kスーパーハイビジョン用1億3,300万画素撮像素子を開発,” 平成26年5月15日



しまもと ひろし  
島本 洋

1991年入局。金沢放送局を経て、1993年から放送技術研究所において、固体撮像素子を用いた撮像技術、スーパーハイビジョン用カメラおよびイメージセンサーの研究開発に従事。2007年から2010年まで(財)NHKエンジニアリングサービスに出向。現在、放送技術研究所テレビ方式研究部上級研究員。博士(工学)。