

《新連載》

講座：UHDを支える映像の高画質化技術 [全6回] 開講にあたって

前編集長 甲藤二郎

アナログ放送からハイビジョン放送に完全移行してからまだ6年ですが、技術の進化はすさまじく、UHD (Ultra High Definition) 映像が年々身近なものになってきています。昨年は衛星による4K・8K試験放送が開始され、HDRや広色域化の対応も進み、その一方で、数多くの4K対応のカメラ、ディスプレイ、スマートフォンなどが店頭に並んでいます。

会誌でも、今月号の「4K・8K試験放送」を含め、UHD映像に関わる話題をタイムリーに取り上げてきたつもりですが、本講座では、それらの総括の意図も含め、全6回の講座を組むことにいたしました。UHD映像の全体像からスタートし、撮像系、記録系、表示系、伝送系、処理系へと、それぞれの分野をリードされている専門家の皆様に解説をお願いさせていただきました。ご多忙中、ご執筆を引き受けて頂いた著者の皆様には、この場を借りて深く感謝申し上げます。また、若手・学生の皆さんには、もしかすると理解が断片的かもしれなかったUHD映像の背景や個別の技術について、連載を通じて、有機的かつ一気通貫に理解を深める機会になれば、と期待しています。

なお、本講座は、林直人編集理事、久保田節編集幹事、高取憲一編集幹事と私甲藤が担当いたします。1年間の講座となりますが、なにとぞよろしくお願いいたします。

予定目次 (全6回)

(第1回) UHD映像の概要	西田幸博氏 (NHK)
(第2回) UHD映像の撮像系	三谷公二氏 (NHK)
(第3回) UHD映像の記録系	小塚雅之氏 (パナソニック)
(第4回) UHD映像の表示系	吉田育弘 (シャープ)*
(第5回) UHD映像の伝送系	田中祥次氏 (NHK)
(第6回) UHD映像の処理系	関口俊一氏 (三菱電機)*

* 執筆者変更の可能性あり。

UHD映像の概要

正会員 西田幸博[†]

1. まえがき

テレビジョン映像のパラメータは、技術的・経済的な実現性ととも、人間科学的側面すなわち視覚特性を考慮したシステム設計に基づいて規定されている。HDTVの次の世代の超高精細度テレビジョン(UHDTV: Ultra High Definition Television)についても人間科学的側面からの研究を中心とした検討の結果、仕様が定められた。

本稿では、4K・8KのUHD映像フォーマットを構成する空間解像度、時間解像度、表色系、ビット数、伝達関数、伝送信号などの仕様について、その背景・根拠とともに解説する。

2. 映像パラメータ

映像システムを特徴付けるパラメータには、空間解像度、時間解像度、表色系、ビット数、伝達関数などがある。これらのパラメータ値は、心理物理的効果との関係や要求条件、実現性に基づいて決定されている。空間解像度、時間解像度、階調、色の各映像パラメータと心理物理的要因の関係を表1に示す。

UHD映像のパラメータは、HDTVのパラメータを参照しつつ、HDTVに比べて意味のある品質向上があることや、HDTVとの互換性・両立性・共通性、さらに実現性などを考慮して決定された。その過程では、心理物理的効果に関する多くの人間科学的研究のほか、国際標準化での議論があった。一方、映像フォーマットとしては規定されないが、映像品質に影響する要素として、空間解像度に関するMTF(Modulation Transfer Function)、時間解像度に関する時間開口率といった、空間・時間の周波数応答特性がある。

3. UHDTV映像フォーマット

UHD映像を代表する仕様として、ITU-R(International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector: 国

表1 映像パラメータに関わる要素

映像パラメータ		視覚・心理
空間解像度	水平・垂直画素数, 画面形状(アスペクト比)	臨場感, 実物感
時間解像度	フレーム周波数	動きぼやけ, ストロボ効果, フリッカー
階調	ビット数, 伝達関数	輝度弁別閾
色	原色(色域)	色知覚

際電気通信連合無線通信部門) 勧告BT.2020¹⁾に規定されているUHDTVの映像パラメータおよびITU-R勧告BT.2100²⁾に規定されている高ダイナミックレンジテレビジョン(HDR-TV: High Dynamic Range Television)の映像パラメータを、ITU-R勧告BT.709³⁾に規定されているHDTVと比較して表2に示す。BT.2020は標準ダイナミックレンジ(SDR: Standard Dynamic Range)のUHDTV映像を、BT.2100はHDTV解像度とUHDTV解像度の高ダイナミックレンジのテレビ映像を規定している。

次章以降では、これらのパラメータ値の背景を説明する。

4. 空間解像度

UHDTVの空間解像度は、視野角(画面を見込む角度)と画素密度(角解像度=視野角1°あたりの解像度)に基づいて検討された。空間解像度に関係する人間科学的要素として、臨場感や実物感がある。いずれも主観的感覚であるが、臨場感は「その場に居るような感じ(sense of being there)」, 実物感は「実物を見ているような感じ(sense of realness)」を表すものとして、UHDTVと従来のテレビジョンを区別する要因として検討された。高い臨場感が得られる視野角と高い実物感が得られる画素密度ならびに画面の横縦比(アスペクト比)から空間解像度が定まる。

4.1 臨場感

HDTVの空間解像度は、視野角が20°程度から臨場感が明らかになり、30°程度でかなり顕著になるという主観評価実験の結果や⁴⁾、画像内容や画面面積によらず画面アスペクト比(横:縦)5:3から2:1が最も好まれるという主観

[†] NHK 放送技術研究所

"Picture Quality Enhancement Technologies Supporting UHD (1): An Overview of Ultra High Definition Images" by Yukihiro Nishida (NHK Science & Technology Research Laboratories, Tokyo)

表2 UHD-TV, HDR-TVとHDTVの映像パラメータ

		UHD-TV (Rec. ITU-R BT.2020)		HDR-TV (Rec. ITU-R BT.2100)		HDTV (Rec. ITU-R BT.709)	
画面アスペクト比		16:9		16:9		16:9	
空間解像度		7680 × 4320, 3840 × 2160		7680 × 4320, 3840 × 2160, 1920 × 1080		1920 × 1080	
フレーム周波数 (Hz)		120, 120/1.001, 100, 60, 60/1.001, 50, 30, 30/1.001, 24, 24/1.001		120, 120/1.001, 100, 60, 60/1.001, 50, 30, 30/1.001, 24, 24/1.001		60, 60/1.001, 50, 30, 30/1.001, 24, 24/1.001	
走査		順次走査		順次走査		順次走査, 飛越走査	
表色系	(CIE 1931)	x	y	x	y	x	y
	R	0.708	0.292	0.708	0.292	0.640	0.330
	G	0.170	0.797	0.170	0.797	0.300	0.600
	B	0.131	0.046	0.131	0.046	0.150	0.060
	白	D65		D65		D65	
		0.3127	0.3290	0.3127	0.3290	0.3127	0.3290
伝達関数		OETF $E' = \begin{cases} 4.5E, & 0 \leq E < \beta \\ \alpha E^{0.45} - (\alpha - 1), & \beta \leq E \leq 1 \end{cases}$ $\alpha = 1.09929682680944\dots$ $\beta = 0.018053968510807\dots$		HLG OETF $E' = \text{OETF} [E] = \begin{cases} \sqrt{E}/2 & 0 \leq E \leq 1 \\ a \cdot \ln(E - b) + c & 1 < E \end{cases}$ $a = 0.17883277, b = 0.28466892,$ $c = 0.55991073$ PQ EOTF $F_D = \text{EOTF} [E'] = 10000 Y$ $Y = \left(\frac{\max[(E')^{1/m_2} - c_1], 0}{c_2 - c_3 E'^{1/m_2}} \right)^{1/m_1}$ $m_1 = 2610 / 16384 = 0.1593017578125$ $m_2 = 2523 / 4096 \times 128 = 78.84375$ $c_1 = 3424 / 4096 = 0.8359375 = c_3 - c_2 + 1$ $c_2 = 2413 / 4096 \times 32 = 18.8515625$ $c_3 = 2392 / 4096 \times 32 = 18.6875$		OETF $E' = \begin{cases} 4.5E, & 0 \leq E < 0.018 \\ 1.099E^{0.45} - 0.099, & 0.018 \leq E \leq 1 \end{cases}$	
輝度・色差信号	非定輝度	$Y' = 0.2627R' + 0.6780G' + 0.0593B'$ $C'_B = \frac{B' - Y'}{1.8814}$ $C'_R = \frac{R' - Y'}{1.4746}$		$Y' = 0.2627R' + 0.6780G' + 0.0593B'$ $C'_B = \frac{B' - Y'}{1.8814}$ $C'_R = \frac{R' - Y'}{1.4746}$		$Y' = 0.2126R' + 0.7152G' + 0.0722B'$ $C'_B = \frac{B' - Y'}{1.8556}$ $C'_R = \frac{R' - Y'}{1.5748}$	
	定輝度	$Y'_C = (0.2627R + 0.6780G + 0.0593B)'$ $C'_{BC} = \begin{cases} \frac{B' - Y'_C}{-2N_B}, N_B \leq B' - Y'_C \leq 0 \\ \frac{B' - Y'_C}{2P_B}, 0 < B' - Y'_C \leq P_B \end{cases}$ $C'_{RC} = \begin{cases} \frac{R' - Y'_C}{-2N_R}, N_R \leq R' - Y'_C \leq 0 \\ \frac{R' - Y'_C}{2P_R}, 0 < R' - Y'_C \leq P_R \end{cases}$ $P_B = 0.7910, N_B = -0.9702$ $P_R = 0.4969, N_R = -0.8591$		$I = 0.5L' + 0.5M'$ $C_T = (6610L' - 13613M' + 7003S') / 4096$ $C_P = (17933L' - 17390M' - 543S') / 4096$ $L = (1688R + 2146G + 262B) / 4096$ $M = (683R + 2951G + 462B) / 4096$ $S = (99R + 309G + 3688B) / 4096$			
	サンプリング	4:4:4, 4:2:2, 4:2:0		4:4:4, 4:2:2, 4:2:0		4:2:2	
ビット数 (bit)		12, 10		12, 10		10, 8	

評価実験の結果⁵⁾に基づいて設計されたものである。

UHD-TVの仕様検討の過程で行われた、水平視野角に対する臨場感の主観評価実験結果を図1に示す⁶⁾。撮影画角60°の4つの映像を33°から100°の5つの視野角で評価者に提示し、それぞれの評価者はいずれか1種類の視野角についてのみ評価し(それぞれの視野角で40名、合計200名の評価者が評価)、0(まったく臨場感がない)から10(非常に臨場感がある)の連続尺度で「その場に居るような感じ」を評価した結果である。視野角の増加とともに「その場に居るような感じ」が増加し、視野角80~100°辺りで飽和して

いる。撮影画角100°の映像を用いた実験も行われたが、同様の評価結果であった。

この結果より、高臨場感を提供するための目標視野角は80~100°とされた。このとき、視力1.0の人が画素構造を丁度検知できない視距離は、画面高の0.75~1.00倍、水平画素数は約6000~8000画素となる。

この他、視野角が異なる映像を提示した時の平衡機能の応答の違いを臨場感の指標とし、視野角と重心動揺の関係測定する実験も行われた⁷⁾。表示画像が現実に近いほど姿勢制御が安定し、重心動揺が小さくなると想定され、実

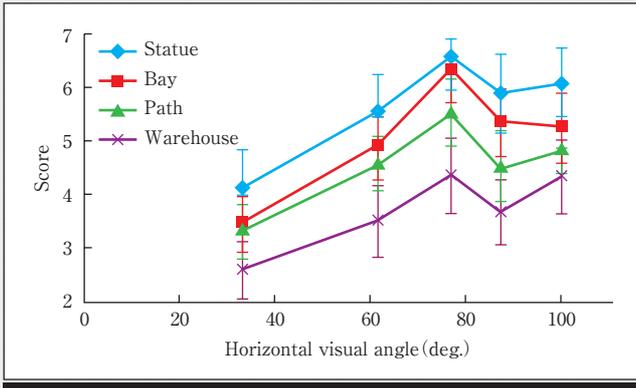


図1 水平視野角と臨場感

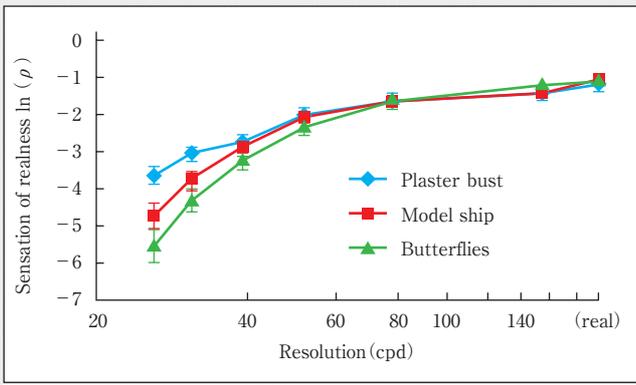


図2 画素密度と実物感

験の結果、視野角が広がるにつれて重心動揺が小さくなり、76.9°以上で人間の平衡機能が飽和傾向であることが示された。この結果からも、視野角80°程度を実現することが目標とすることが妥当とされた。

4.2 実物感

実物と映像とを区別できずに「実物を見ているような感じ」は画素密度に関係する。画素密度(角解像度)に対する「実物を見ているような感じ」の主観評価実験の結果を図2に示す⁸⁾。26～155 cpd (cycles per degree) の6種類の角解像度の映像とその被写体(実物)の任意の対を評価者に提示し、評価者はどちらが実物に近く見えるかを選択する一対比較法によって評価した結果である。実験に当たっては、両眼視差、画像の大きさ、輝度、色など、解像度以外の要因が実験結果に影響しないように厳密に実験装置を構成し、必要な信号処理が施されている。角解像度が高くなるにしたがって「実物を見ているような感じ」が増加し、角解像度60 cpd (120画素/deg.) 辺りから増加が緩やかになることが示されている。

4.3 UHDTVの空間パラメータ値

UHDTVの空間パラメータは、超高解像度映像 (Extremely High Resolution Imagery) のITU-R勧告BT.1201が、超高解像度映像の縦・横画素数をHDTVの画素数1920×1080 (2K)の整数倍とすることを推奨していることに基づき⁹⁾、画面ア

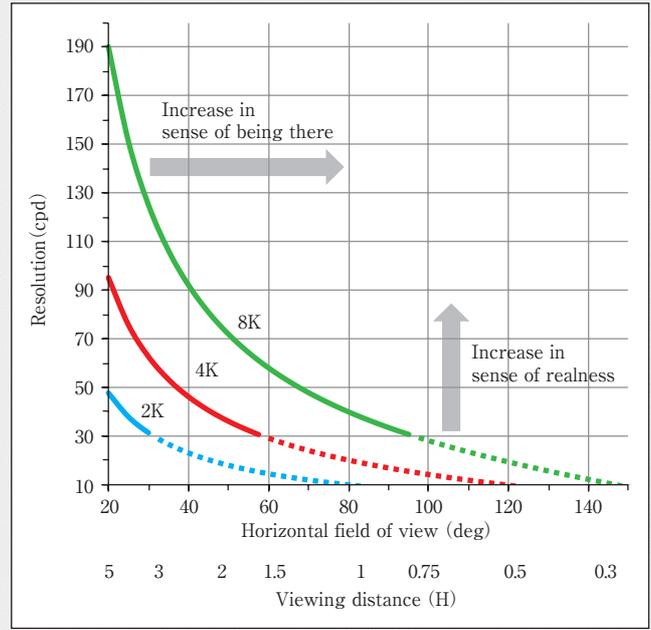


図3 映像システムの水平視野角と画素密度

スペクト比はHDTVと同じ16:9、縦・横画素数はHDTVの2倍および4倍の3840×2160 (4K) および7680×4320 (8K) が採用された。

画面高に対する視距離 D (H)、水平視野角 θ (deg.)、画面中央の角解像度 R (cpd)、垂直画素数 V 、画面アスペクト比(横/縦) r において、以下の関係がある。

$$2R = \frac{1}{\tan^{-1}\left(\frac{1/V}{D}\right)} \quad (1)$$

$$\theta/2 = \tan^{-1}\left(\frac{r/2}{D}\right) \quad (2)$$

これらから、2K (1920×1080)、4K (3840×2160)、8K (7680×4320)それぞれの水平視野角と画素密度(角解像度)の関係を図3に示す。ここで視力1.0の人が画素構造を検知できない角解像度30 cpd以上となる視距離をそれぞれのシステムで想定する必要がある。2Kから4K、8Kへと画素数が増大するにつれて臨場感と実物感が向上する。

5. 時間解像度

UHDTVの時間解像度は、動画の画質劣化である動きぼやけ、ストロボ効果、フリッカーを低減することを目的に検討された。これらの画質劣化は、時間開口(蓄積時間)やフレーム周波数に依存するほか、被写体速度や観視環境の影響を受ける。

5.1 動きぼやけ

動きぼやけは、カメラの撮像素子で一定時間光を蓄積することにより生じる蓄積ぼやけと、ディスプレイのホールド型表示での追従視と視覚の時間積分効果による動きぼや

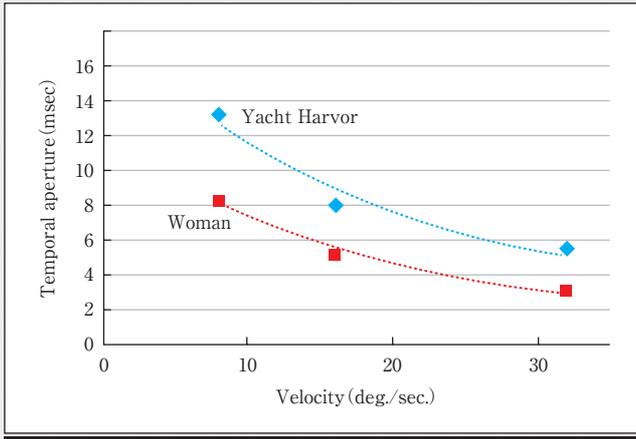


図4 動きぼやけが許容限となる動き速度と時間開口

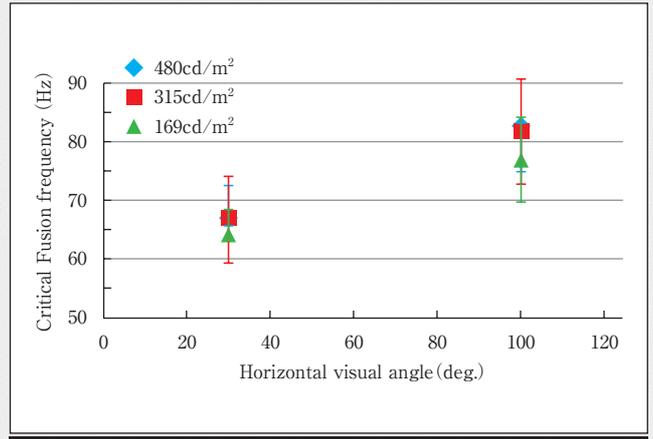


図6 視野角とCFF(時間開口30%)

けである。いずれも、時間開口が空間周波数応答に影響し、動き速度の増加とともにsinc関数にしたがって応答が低下する。

動きぼやけと時間開口に関する画質評価実験結果の1つとして、図4に動きぼやけが許容限となる被写体速度と時間開口の関係を示す¹⁰⁾。この実験では、静止画を横方向にスクロールさせ、静止画の画質を基準として、動画の画質を評価し、動画の画質が許容限となる被写体速度と時間開口の組合せをプロットしたものである。被写体速度30°/sを想定すると、時間開口を1/200sから1/300s以下にする必要がある。

5.2 ストロボ効果

時間開口は、フレーム周波数を高くすることで短くできるが、カメラでのシャッタの使用やディスプレイでの黒挿入でも、フレーム周波数を変えずに時間開口を短くできる。しかし、シャッタや黒挿入によって、動きが不連続で多重像のように見えるストロボ効果と呼ばれる画質劣化が生じる可能性がある。動きぼやけの許容限を与える時間開口1/240sの場合、フレーム周波数に対するストロボ効果の主観評価実験の結果を図5に示す¹¹⁾。この結果か

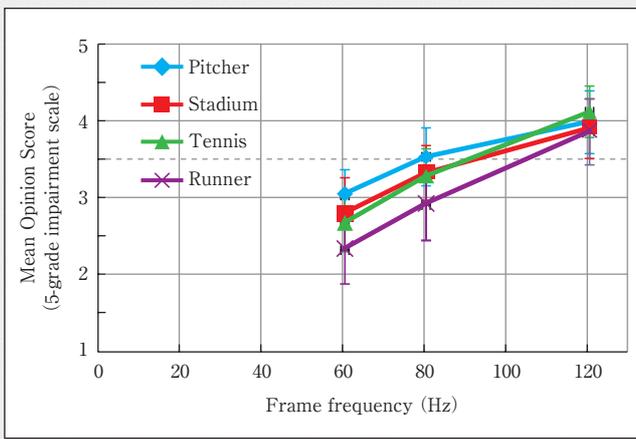


図5 ストロボ効果とフレーム周波数(時間開口1/240s)

ら、ストロボ効果が許容限以上の画質を得るには、100Hzを超えるフレーム周波数が必要である。

5.3 フリッカー

フリッカー知覚は周辺視で敏感であるので、視野角が大きくなるUHDTVではフリッカーが検知されやすくなる。また、ホールド型表示のホールド時間を短くすることもフリッカーの知覚に影響する。視野角30°と100°における、3通りの画面輝度、時間開口30%での臨界融合周波数(CFF: Critical Fusion Frequency)の実験結果を図6に示す¹²⁾。視野角が大きくなるとCFFが高くなり、視野角100°とする場合は80Hz以上のフレーム周波数が必要である。

5.4 UHD映像の時間パラメータ

以上の結果から、UHDTVのフレーム周波数は少なくとも100Hzとする必要がある。フレーム周波数と動画質の関係を主観評価実験で求めた結果によると、フレーム周波数を高くすると動画質が向上し、60Hzと120Hzで0.46(5段階尺度)、120Hzと240Hzで0.23の有意な画質向上があった¹³⁾。より高いフレーム周波数とすることによって、さらなる画質改善が期待されるが、改善の度合いは小さくなる。コストパフォーマンスや従来方式との互換性を考慮し、100Hz以上のフレーム周波数として、従来のフレーム周波数の2倍の100Hz、120/1,001Hz、120Hzが採用された。

6. 表色系

テレビジョンの表色系は、要求する色域や表示デバイスの技術的制約などを考慮して定められてきた。HDTVの三原色はCRTの蛍光体に基いて定められたものであるが、2000年代後半には、CRTからフラットパネルディスプレイへの移行が進み、また、デジタルシネマで用いられるDCI-P3¹⁴⁾や電子出版で用いられるAdobe RGB¹⁵⁾などHDTVよりも広い色域が使用されるようになった。そこで、UHDTVの表色系は、要求条件を改めて設定して検討された。

色域については、HDTVのほかD-Cinemaなど主要な映像システムの色域を包含するとともに、実在する物体色を

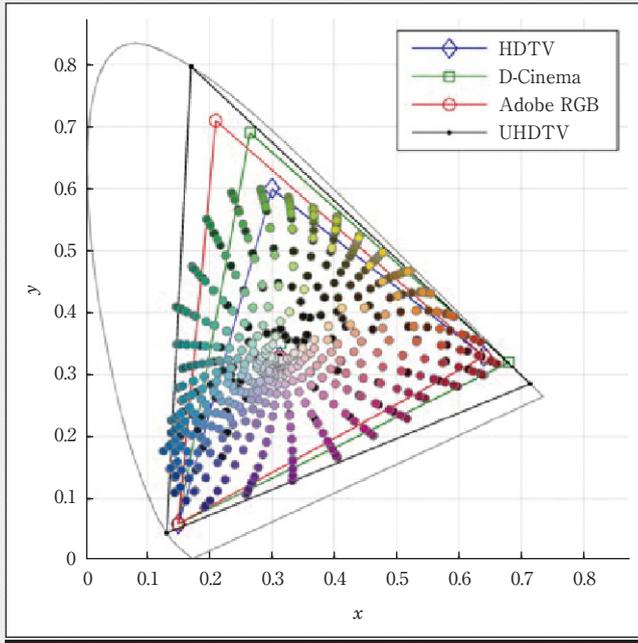


図7 主要映像規格の三原色とポインターカラー

表3 ポインターカラーおよび最明色の包含率¹⁶⁾

	ポインターカラー	最明色
HDTV	74.4%	35.9%
D-Cinema	91.4%	53.6%
Adobe RGB	90.3%	52.1%
UHDTV	99.9%	75.8%

できるだけ包含することを要求条件とした。色を表現する方法については、色をスペクトル情報として扱う方法、多原色方式の場合の原色数、原色の色度、原色信号の値の範囲などを比較検討した。テレビジョンが情報伝送システムであることを考慮し、原色数が最少の三原色表色系とした。また、映像信号が表現可能なすべての色を制作作用の基準ディスプレイで管理できるように、実在色を原色とすることとした。これらの要求条件に基づき、スペクトル軌跡上の単波長光源に相当する色度点を三原色とする広色域表色系が設計された¹⁶⁾。ITU-RでのUHDTV映像フォーマットの標準化の結果、最終的に表2の色度点が採用され、それらは波長630 nm (R), 532 nm (G), 467 nm (B)に相当する。また、HDR-TVにも同じ広色域表色系が採用された。

図7に、実在する表面色を代表するポインターカラーとともに、UHDTV, HDTV, DCI-P3, Adobe RGBの各三原色をCIE xy色度図に示す。表3にポインターカラーおよび物体色の理論的な最大色域を表す最明色の包含率を示す。

7. 伝達関数

テレビジョンの伝達関数は、撮像側の光-電気伝達関数(OETF: Opto-Electronic Transfer Function)、表示側の電

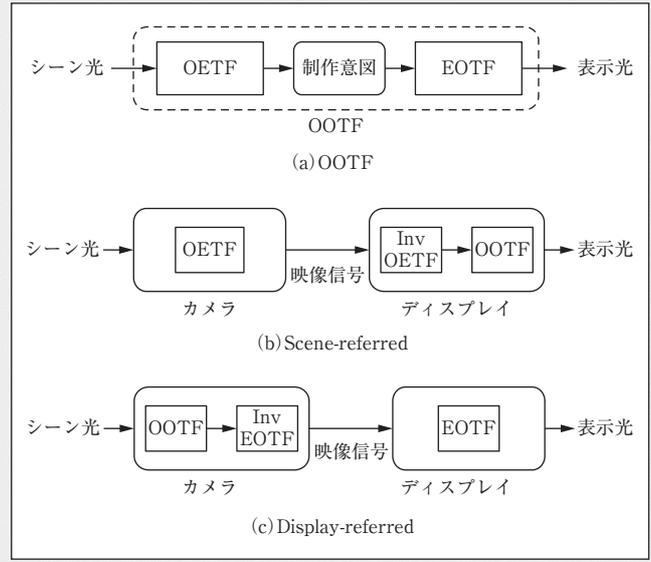


図8 テレビの伝達関数

気-光伝達関数(EOTF: Electro-Optical Transfer Function)、シーン光から表示光の総合特性を表す光-光伝達関数(OOTF: Opto-Optical Transfer Function)から構成される。図8にOOTF, OETF, EOTFの関係を示す。

デジタル映像において伝達関数は非線形量子化の役割を担い、映像再現において階調の不連続性が視覚的に検知されないこと、すなわち、画面上で隣り合う量子化コード1の差が検知されないような伝達関数とビット数が必要である。

以下では、SDRとHDRの伝達関数について説明する。

7.1 SDR

SDRの伝達関数はCRTのEOTF(ガンマ特性)に基づいて規定されている。表2に示したHDTVのOETFは概ね0.5乗べき関数で近似でき(図9(a))、一方、基準ディスプレイのEOTFは2.4乗べき関数であり、総合特性は1.2乗べき関数となる。この総合特性を表すべき関数の指数はシステムガンマと呼ばれる。UHDTVにおいてもHDTVとの互換性の観点から同等の伝達関数が採用された。

所要の量子化ビット数は視覚のコントラスト感度によって定まる。古典的なWeber-Fechnerの法則では、輝度弁別閾と輝度の比(コントラスト感度)が一定($\Delta L/L = \text{const.}$)となる。Schreiber¹⁷⁾は、概ね1~1000 cd/m²の範囲でこの値は0.02であり、この輝度範囲の上下ではこれよりも大きくなることを示している。Bartenのモデル¹⁸⁾は、輝度弁別閾が輝度のほかに空間周波数や視野角に依存することを考慮しており、デジタルシネマのビット数12ビットの根拠になっている¹⁹⁾。UHDTVのビット数の検討においても2.4乗べき関数のEOTFとBartenのモデルに基づき検討し、図10に示すように、0.1~100 cd/m²の輝度範囲において11ビット以上あれば階調の不連続性は検知されないことから12ビットが採用された。また、10ビットはSchreiberのコントラスト感度を満足し、ノイズを含む一般自然画像

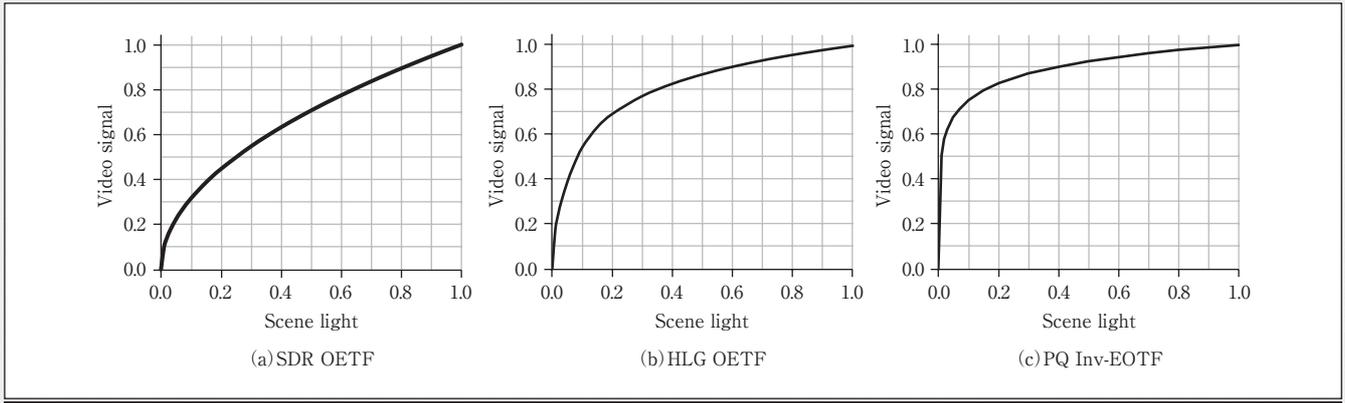


図9 SDRとHDRの伝達関数

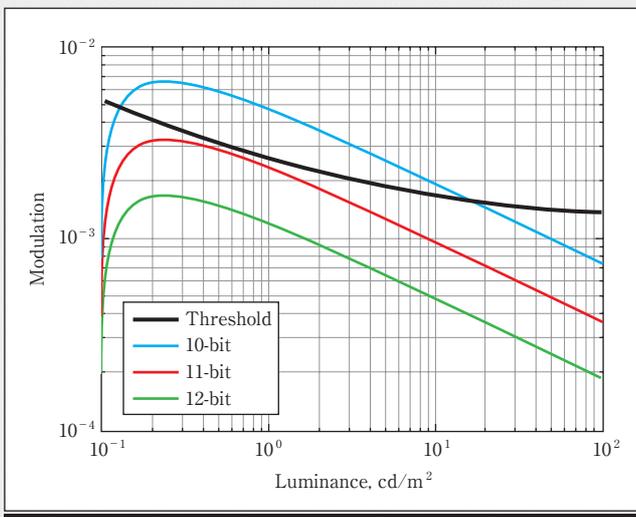


図10 輝度弁別閾とビット数

においては10ビットで問題はないと考えられる。

7.2 HDR

近年のLCD (Liquid Crystal Display) のバックライト制御技術やOLED (Organic Liquid Emitting Diode) のような自発光型ディスプレイ技術によって、高輝度・高コントラスト比のディスプレイが実現し、すでにピーク輝度1000 cd/m²以上、黒レベル0.01 cd/m²以下、コントラスト比10万:1以上のディスプレイが入手できるようになっている。このような高輝度・高コントラスト比のディスプレイで表示するのに適し、反射光や発光物などの再現や、ひなたと日陰の同時再現などを目的として、高ダイナミックレンジ映像方式が開発された。

HDR-TVのITU-R勧告BT.2100では、それぞれのコンセプトに基づいて設計・開発されたHybrid Log-Gamma (HLG)方式とPerceptual Quantization (PQ)方式が規定されている。

HLG方式は、SDRと同様に、黒からピーク白の間の相対的な階調を表す映像信号特性を決定する撮像側のOETFを規定する(図8(b))。HLG方式のOETFは、信号レベル

50%まではSDRのOETFと同等の0.5乗べき関数、信号レベル50%を超える部分は対数関数である(図9(b))。この特性によって、SDR信号やSDRディスプレイとの高い互換性を備えている。なお、表2のHLG方式のOETFは、 E を0~1で正規化した以下の式と等価である。

$$E' = \text{OETF}[E] = \begin{cases} \sqrt{3E} & 0 \leq E \leq \frac{1}{12} \\ a \cdot \ln(12E - b) + c & \frac{1}{12} < E \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

HLG方式のEOTFはOETFの逆関数とOOTFから構成される。OOTFの非線形特性を決定するシステムガンマは、非線形特性による色相のずれを避けるために輝度成分にのみ適用され、また、ピーク輝度が異なるディスプレイでの見えの違いを低減するため、システムガンマはディスプレイ輝度に応じて設定される²⁰⁾。

PQ方式は、SDRやHLG方式とは異なり、基準ディスプレイのEOTFを規定する(図8(c))。PQ方式のEOTFは、最大10000 cd/m²のディスプレイ輝度を絶対値で表し、Bartenのモデルに基づいてEOTFが設計され、このような広い輝度範囲の視覚特性に適合するよう、暗部により多くの映像コード値を与える特性となっている(図9(c))。PQ方式のOETFはOOTFとEOTFの逆関数から構成され、OOTFはSDRのOETFとEOTFの総合特性に準じた特性である。

HLG方式とPQ方式の映像信号を相互に変換することが可能である(図11)。ただし、HLG方式とPQ方式の映像信号は、それぞれ輝度の相対値と絶対値を表すため、相互変換のためには、両者の映像を同等に表示する条件を設定する必要がある、変換の条件としてディスプレイのピーク輝度を任意に設定することによって、所定の伝達関数に基づき相互変換が可能となる。

8. 伝送用信号

RGB原色信号のほか、テレビの伝送用信号としては輝度信号と色差信号が用いられている。HDTVスタジオ規格の

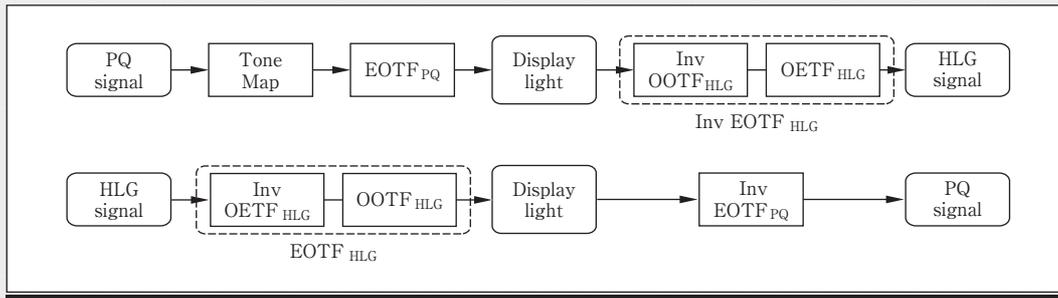


図11 HLG方式とPQ方式の映像信号相互変換

ITU-R勧告BT.709では色差信号のサンプリング構造は水平方向のみ2:1にダウンサンプリングした4:2:2が規定されていたが、UHDTVでは順次走査であることを考慮し、垂直方向にも2:1ダウンサンプリングした4:2:0も規定されている。

HDTVではOETF後のRGB信号から輝度信号を生成する非低輝度伝送が規定されていたが、UHDTVでは、非定輝度伝送に加えて、OETF前の線形RGB信号から輝度信号を生成する定輝度伝送が併記されている。また、HDR-TVの定輝度伝送には、従来の輝度・色差信号とは異なるIC_{TCp}と呼ばれる信号方式が採用されている。

9. むすび

UHD映像を代表するUHDTVの映像パラメータ値とその規定の背景を説明した。UHDTVは、第一義には視野角を増大させることによる臨場感の向上を目指したものであるが、そのための画素数の増大だけではなく、時間解像度や色域などの他のパラメータも含めて、人間科学的研究に基づいてパラメータ値を見直したものである。UHDTVは、超高精細映像に高フレーム周波数や広色域、高ダイナミックレンジ、高ビット数といった性能改善が加わることによって、制作者には映像表現の拡大、視聴者には映像体験の向上をもたらした。
(2016年11月30日受付)

〔文 献〕

- 1) ITU-R, Recommendation BT.2020-2: "Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange" (2015)
- 2) ITU-R, Recommendation BT.2100-0: "Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme exchange" (2016)
- 3) ITU-R, Recommendation BT.709-6: "Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange" (2015)
- 4) T. Hatada, et al: "Psychophysical analysis of the "sensation of reality" induced by a visual wide-field display", SMPTE J., 89, pp.560-569 (1980)

- 5) T. Fujio: "High-definition wide-screen television system for the future - Present state of the study of HD-TV systems in Japan", IEEE Trans. Broadcasting, 26, 4, pp.113-124 (1980)
- 6) K. Masaoka, et al: "Contrast Effect in Evaluating the Sense of Presence for Wide Displays", J. Int. SID, 14, pp.785-791 (2006)
- 7) M. Emoto, et al: "Viewing Angle Effects from Wide Field Video Projection Images on the Human Equilibrium", Displays, 26, 1, pp.9-14 (2005)
- 8) K. Masaoka, et al: "Sensation of Realness from High-Resolution Images of Real Objects", IEEE Trans. Broadcasting, 59, 1, pp.72-83 (2013)
- 9) ITU-R, Recommendation BT.1201-1: "Extremely High Resolution Imagery" (2004)
- 10) 大村ほか: "静止画との比較による動画蓄積はやけの評価", 2008年信学総全大, DS-3-3 (2008)
- 11) 大村ほか: "撮像のフレーム周波数・開口率をパラメータとしたジャーキネスの主観評価", 信学技報, HI2009-3, pp.7-11 (2009)
- 12) M. Emoto, et al: "Flicker Perception for Wide-Field-of-View and Hold-Type Image Presentations", IDW'09, VHF6-3L, pp.1233-1234 (2009)
- 13) M. Emoto, et al: "High-Frame-Rate Motion Picture Quality and Its Independence of Viewing Distance", Journal of Display Technology, 10, 8, pp.635-641 (2014)
- 14) SMPTE RP 431-2: "D-Cinema Quality - Reference Projector and Environment" (2007)
- 15) Adobe Systems Inc.: "Adobe RGB (1998) Color Image Encoding" (2005)
- 16) K. Masaoka, et al: "Design of Primaries for a Wide-Gamut Television Colorimetry", IEEE Trans. Broadcasting, 56, 4, pp.452-457 (2010)
- 17) W.F. Schreiber: "Fundamentals of Electronic Imaging Systems", 3rd ed., Springer-Verlag, pp.61-62 (1992)
- 18) P.G. J. Barten: "Contrast Sensitivity of the Human Eye and Its Effects on Image Quality", SPIE Optical Engineering Press, Washington, USA (1999)
- 19) M. Cowan, et al: "Contrast Sensitivity Experiment to Determine the Bit Depth for Digital Cinema", SMPTE Motion Imaging J., 113, pp.281-292 (2004)
- 20) ITU-R, Report BT.2390-1: "High dynamic range television for production and international programme exchange" (2016)



にしだ ゆまひろ
西田 幸博 1985年、慶應義塾大学大学院工学研究科修士課程修了。同年、NHK入局。現在、放送技術研究所テレビ方式研究部研究主幹。超高精細映像システムの研究開発、国内外の標準化活動に従事。ITU-R SG6議長。博士(工学)。正会員。

UHD映像の撮像系

正会員 三谷公二†

1. まえがき

UHD映像は従来の映像フォーマットの仕様を大きく拡張し、今までに経験したことのない臨場感ある視聴体験ができる映像システムを目的としたものである。そのパラメータは、人間科学的研究をベースにして空間解像度だけでなく、色再現範囲、明るさの再現範囲、各画素の階調特性、時間解像度について改善が図られている。

本稿では、具体的にこれらの性能を実現するUHD映像用カメラの開発経過を振り返るとともに、高画質化に向けて開発・導入された特徴的な技術を解説する。

2. カメラの開発経過

筆者らはUHD映像の中でも最上位フォーマットとなる8Kシステムの前身として、2002年に初めて4000本級映像システムを提案し、カメラ、およびプロジェクタを展示した¹⁾。当時のシステムはカメラヘッド80kg、収録装置200kgという大掛かりなものであり、屋外ロケではカメラヘッドを運ぶのに車両を用意したこともあった。当然のことながら、ハイビジョンカメラのような機動性ある運用は実現できないだろうと思われた。しかし、2015年には撮像、収録部を合わせてもわずか約7kgのカムコーダが実用化され、カメラマン1人による撮影が可能になった(図1)。

この例に見るように、この10年余でUHDに係る撮像技術は大きく進歩した。図2に主な放送・映画用4K、8Kカメラの試作開発時期、または実用化時期をプロットした。

2000ラインの走査線を持つ4Kカメラは、1995年頃から撮像実験が行われた²⁾が、実用的なものが開発されるようになるのは2000年代中頃からである。デジタルシネマの普及とともに、映画制作用のフィルムカメラの置き換えとして、単板カラーカメラを中心に開発が進められた。2000年代の後半には光学系フォーマットとしてスーパー35mm(以下、S35mmと記す)を採用したカメラが各社から発表、または



図1 8K撮影収録システムの進化

発売され、本格的な実用化の時期を迎えた。さらにテレビジョン用フォーマット(UHDTV)として4K、8Kフォーマットが国際規格として承認され³⁾、スポーツや劇場のライブ中継などもハイビジョンと同様の制作環境が求められるようになる。2014年以降には2/3型の色分解プリズムを用いる4Kカメラも開発、実用化された。

8Kカメラは、テレビジョン用カメラとして開発が進められたが、1枚では十分な解像度を得られる撮像素子が開発されておらず、そのため撮像素子を複数枚用いることによって高解像度を図った。このことから、当初よりプリズム撮像方式を用いたカメラの開発が進められた。その後、2007年に初めて動画用3,300万画素の撮像素子が開発される⁴⁾と、単板方式の8Kカメラの開発も進められるようになり、2015年にはS35mm光学系を採用した実用的なカメラが複数のメーカーから発表された。

現在、放送用の4K、8K単板カメラとしては、S35mm光学系を採用したものが主流であるが、4/3型や2/3型光学系を採用した小型化も進んできた。プリズム撮像方式のカメラは、4Kでは2/3型光学系、8Kでは1.25型光学系のもので用いられている。これらの光学系に関するカメラ・レンズ機器の相互接続に関しては、ARIBの技術資料TR-B37⁵⁾に詳細が規定されている。

† NHK 放送技術研究所

"Picture Quality Enhancement Technologies Supporting UHD (2): New Features in UHD Cameras for Enhancing Image Quality" by Kohji Mitani (NHK Science & Technology Research Laboratories, Tokyo)

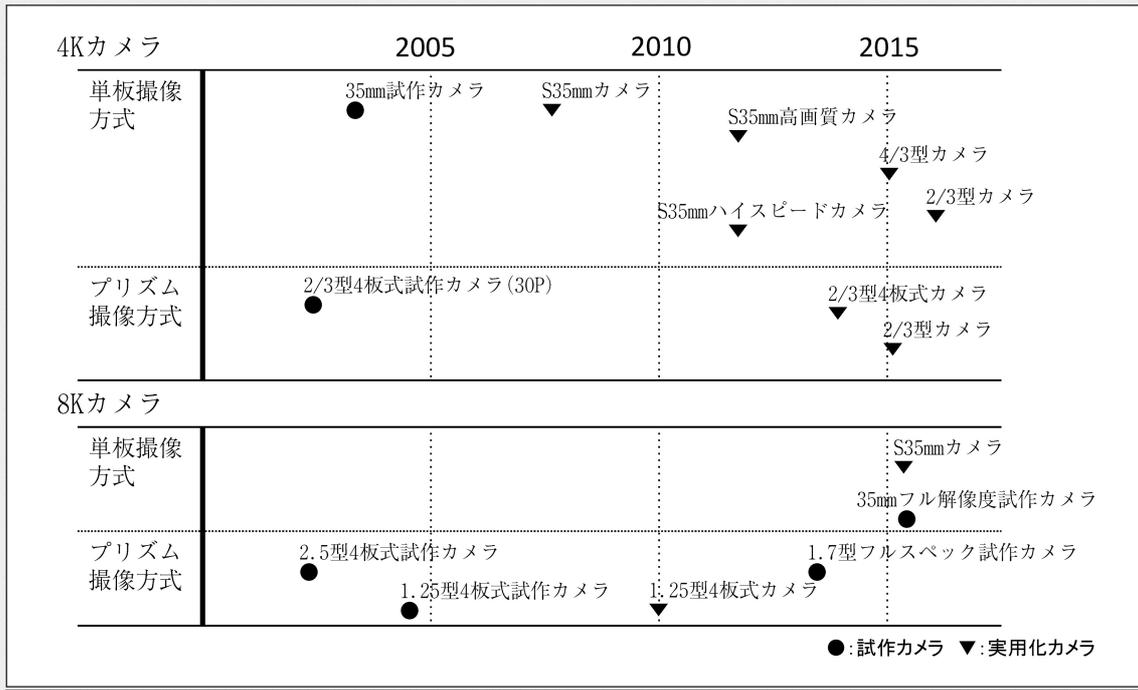


図2 主なUHDカメラの試作、実用化時期

次章ではこれらのUHD用カメラの特徴的な技術について解説する。

3. 高解像度、高フレームレート化に係る技術

3.1 光学系の解像度特性

高精細な映像を撮影するためには撮像素子の多画素化とともに、それに見合った解像度特性を有する光学系が求められる。一方で、実用的なカメラ開発には機動性や運用性を考慮する必要がある、自ずと光学系のサイズにも制約が生じる。

図3は光学系の収差や歪みを無視した理想的なレンズの各光学系サイズにおける光学像の変調伝達関数 (Modulation Transfer Function, 以下、MTFと記す)を示す。加えて、2/3型ハイビジョンカメラに用いられる光学系の特性例も併せて記載した。限界解像周波数における光学系のMTFとして、ハイビジョンカメラとほぼ同じ50%程度の応答を得ようとする、8Kカメラでは1.25型以上の光学系が必要となる。同様に4Kカメラでは少なくとも2/3型光学系が必要となる。したがって、図2のカメラ開発年表からわかるように、光学系で十分な解像度を得るために、UHDの撮像系、特に8Kカメラでは、S35mmや1.25型などハイビジョンに比べ大型の光学系を採用している。

ここまでの検討は理想的な光学系を前提とした場合である。実際の光学系では収差や歪み、製造上の誤差などにより、光学系の解像度が劣化するが、UHD用カメラでは、それらの解像度劣化をできるだけ補償するような信号処理機能が設けられている。その一つがレンズの倍率色収差を補正する機能である。

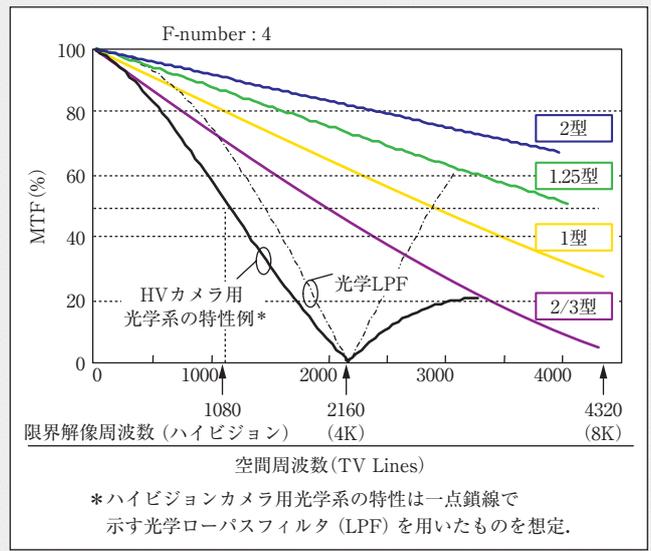


図3 理想レンズの解像度特性

倍率色収差は、レンズの屈折率が赤、緑、青の光によって異なるために生じる光学像の色ずれである。それはレンズの光軸から離れるほど、つまり画面の中央部から周辺部に行くほど大きくなる。また、レンズのズーム倍率や絞り、焦点距離によっても変化する。そこで多くのUHD用カメラには、高精度な補正を実時間で行うために、レンズ個々の補正データを自動的に読み込み、そのデータに応じて補正する機能が設けられている⁶⁾。その処理回路の一例を図4に示す。

その他にも、画面の中央部と周辺部で輪郭強調処理のパラメータを変更するなど、適応的な処理を実現しているも

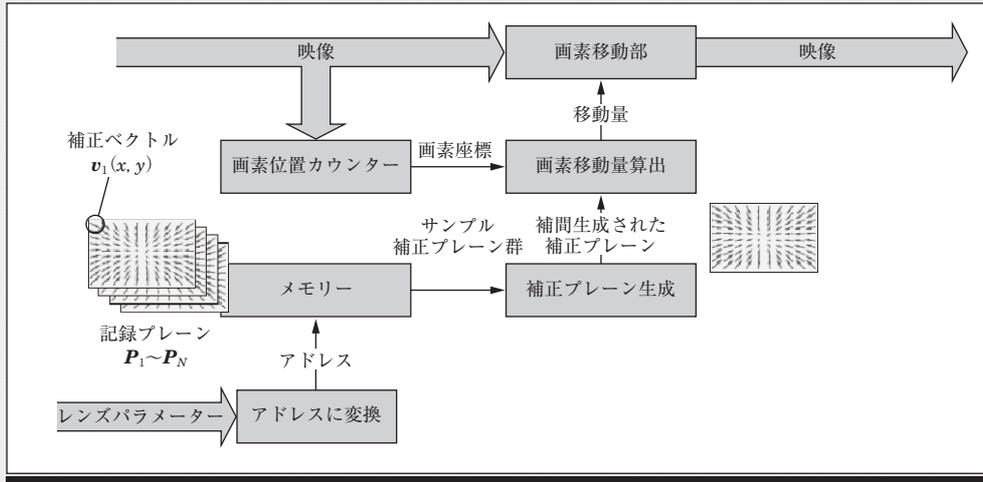


図4 倍率色収差補正機能

のもあり、今後も光学系の特性と密接に関連した高度な信号処理が開発・導入されるものと思われる。

3.2 撮像素子の性能向上

UHDカメラ用撮像素子の開発には画素サイズの微細化とともに、感度、ダイナミックレンジなどの高性能化が求められる。図5は、1996年以降に当会情報センシング研究会に

報告された、固体撮像素子の画素サイズと感度特性をプロットしたものである。これを見ると、画素サイズはこの20年で約1/5～1/7程度まで縮小し、1 μ m角程度の画素まで製造できるようになったことがわかる(図5(a))。

画素の微細化と併行して、撮像性能を向上するための検討も進められている。すでに一部の回路を複数画素で共有する画素共有型レイアウト技術や、光導波路構造、裏面照射型の画素構造などの技術が実用化されている。その結果、画素サイズの微細化が進んだにもかかわらず、感度特性は図5(b)に示すようにほぼ一定、もしくはさらなる高感度化を実現している。

高感度化の一方法である裏面照射型の画素構造を図6⁷⁾に示す。光が入射する側にフォトダイオードを作り、信号読み出し回路をその下に形成することにより、ほぼ100%の開口径を実現している。加えて、信号読み出し回路の設計や配線の自由度が増し、光電変換により生成された電荷を確実に捕獲できることから、感度や飽和電荷数などの撮像性能が大きく向上している。

このような最先端の技術を用いた撮像素子はすでにディ

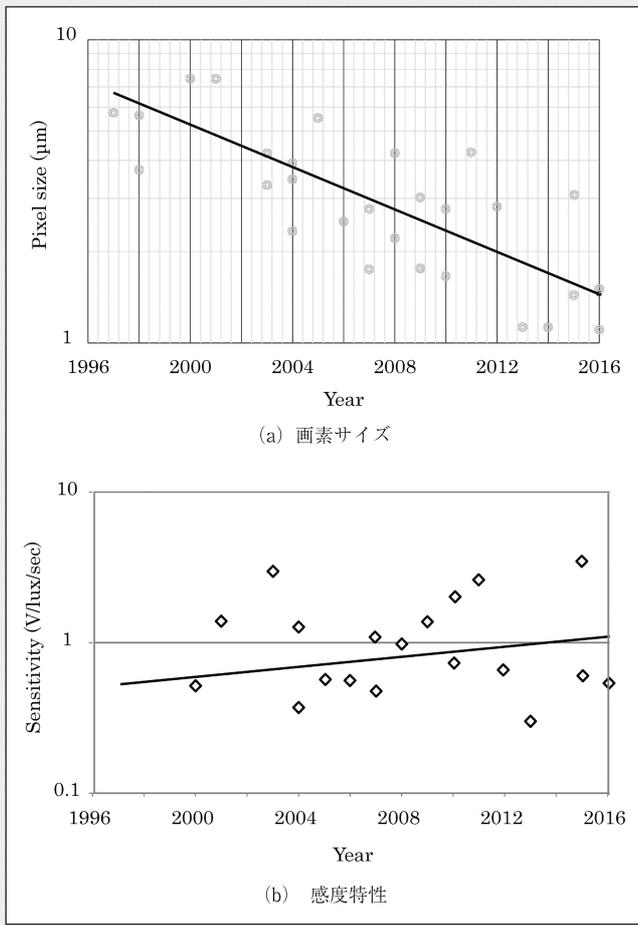


図5 画素サイズと感度特性の変遷

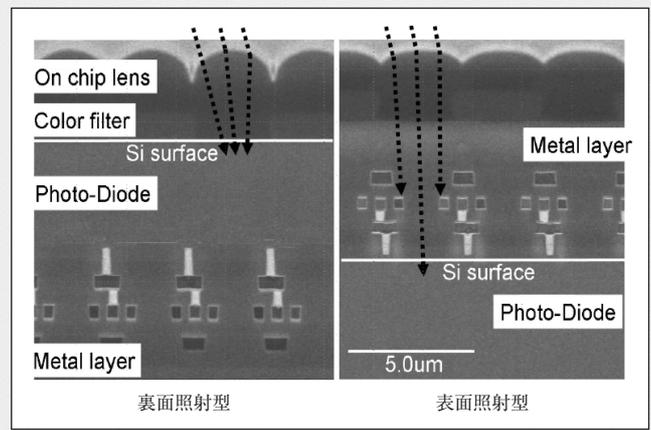


図6 裏面照射撮像素子の構造(文献⁷⁾より引用一部追記)

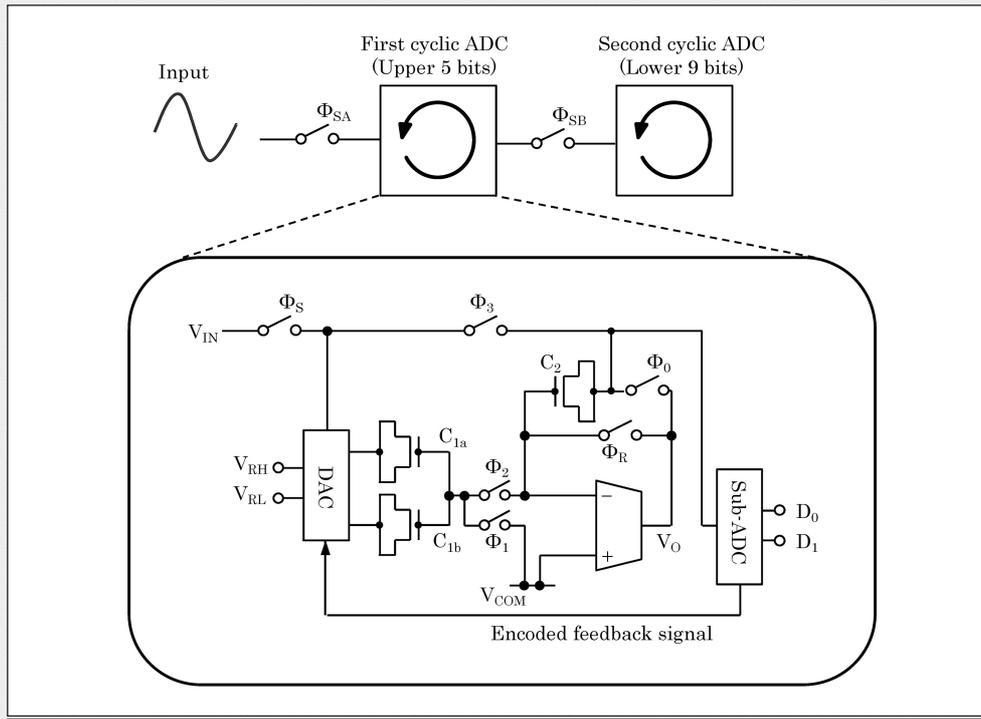


図7 高速2段サイクリック型ADC

デジタルカメラやスマートフォン搭載カメラに用いられているが、小型化が進むUHDカメラ用撮像素子にも応用され始めている（例えば、2/3型980万画素撮像素子⁸⁾や、2/3型3,300万画素撮像素子⁹⁾）。

以上のような画素の特性改善と並んで、高速で安定に動作する回路技術も大きく進展している。UHDカメラ用撮像素子では、高速で高精度に画素データを读出す必要があるため、カラム毎にA/Dコンバータ（以下、ADCと記す）を配置し、並列動作させる列並列ADC技術が用いられている。例えば、4K用撮像素子として開発された890万画素撮像素子¹⁰⁾、1,800万画素撮像素子¹¹⁾、8K用の3,300万画素撮像素子⁴⁾、1億3,300万画素撮像素子¹²⁾などが報告されている。

さらに列ごとに配置するADC部の動作速度を向上し、120フレーム/秒の撮影を可能とする8K用撮像素子も開発された¹³⁾。本撮像素子には、新たに開発された2段サイクリック型ADCが採用されている（図7）。サイクリック型ADCを2段構成にし、パイプライン動作させることで、高速動作と低消費電力を同時に実現したものである。本撮像素子を用い、ハイビジョンカメラに迫る起動性や運用性を実現した8K単板カメラが商品化される^{14) 15)}とともに、3板式の8K/120pフルスペックカメラが試作されている¹⁶⁾。

3.3 フォーカス調整機能

UHDの特徴である高解像度化の性能を充分発揮できるように、フォーカス調整機能も検討が進められてきた。開発初期の8Kカメラではビューファインダ（以下、VFと記す）でピント位置を確認することが困難であったために、リ

モートフォーカス機能を用いて、中継車などに設置した4Kモニタ上で、映像を確認しながらビデオ技術者がフォーカス調整を行っていた。

最近のUHD用カメラでは、小型で低解像度のVFでもピント位置が確認しやすいように、フォーカス調整をアシストする機能が搭載されている。例えば、VF上に映像の高域周波数成分を着色して表示する機能や（図8(a)）、画面内に設けたフォーカス検出エリア内の被写体の凹凸成分を抽出して、その積算値をレベルインジケータに変換し、表示する機能である（図8(b)）。

このようなフォーカス調整アシスト機能と、コントラスト比の高い有機ELモニタや小型の4Kモニタを使ったVFを組み合わせることにより、8KカメラでもカメラマンがVFを見ながら単独でピント調整できるようになってきた。

UHDのような超高精細映像システムの撮像系では、VFやレンズ制御インタフェースなどの周辺機器の機能や性能も、撮影映像の画質を大きく左右する。今後、オートフォーカス機能なども含め、UHD用カメラの操作インタフェースでも更なる改善・改良を期待したい。

4. 広色域化に対応する技術

UHD映像システムでは3原色点をスペクトル軌跡上に配置することで、システムの色再現範囲を拡大している。この新しい3原色点を使ったモニタ上の映像が、実際に人の目を見た時と同じ色に見えるためには、撮像系での分光感度特性が、新しい3原色点で定められる理想撮像特性を実現する必要がある。



図8 ビューファインダ上のフォーカス補助機能

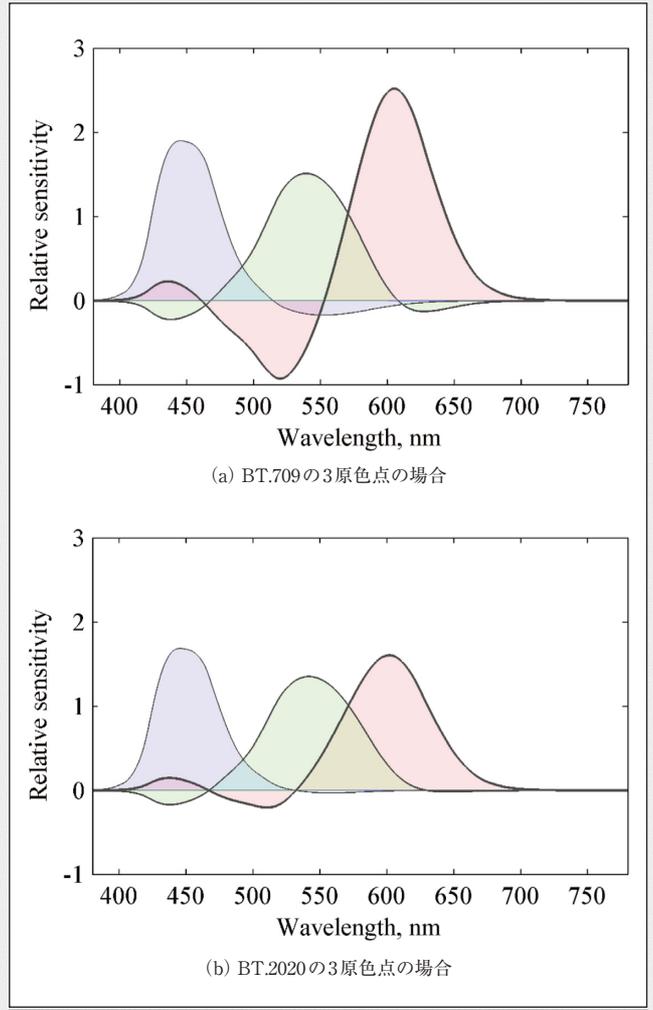


図9 理想撮像特性

従来のITU-R勧告BT.709¹⁷⁾で規定されている3原色点と、UHD用の新しい規格ITU-R勧告BT.2020¹⁸⁾に規定されている3原色点で、撮像系に求められる理想撮像特性を示す(図9)。

BT.709の3原色点を使った理想撮像特性では、負の成分が大きくなるのがわかる(図9(a))。一般にこのような負の成分を含む理想撮像特性を実現するためには、赤、緑、青に分光するプリズムの分光感度特性を調整するとともに、リニアマトリックスなどの信号処理を併用し、補正する方法が用いられる。しかし、従来の3原色点の場合には、補正係数が大きくなりすぎ、S/Nの劣化などの画質低下を招くため、近似的な処理しか行うことができなかった。

一方、UHD用撮像系では、3原色点で囲まれる色域が広がったために負の成分が減少している(図9(b))。そのため、分光特性を最適化した色分解プリズムとリニアマトリックスによる補正処理により、ほぼ理想撮像特性を再現できる。図10は、BT.2020の3原色点に合わせて新規開発した色分解プリズムと、補正回路により実現したカメラの分光感度特性である。短波長側の赤信号の特性に多少の誤差が残るが、ほぼ理想的な特性を再現できていることがわかる¹⁹⁾。

また、新規開発の色分解プリズムは図11に示すように、従来プリズムの前面に設置していた視感度補正用の赤外カット(IRカット)フィルタを不要とする構成とし、光の

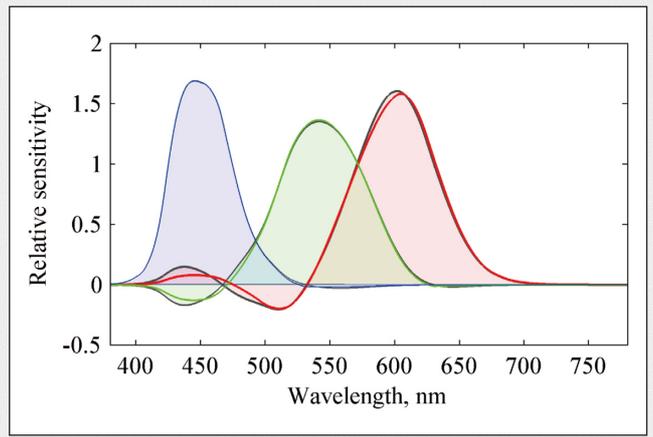


図10 新規開発した色分解プリズムとリニアマトリックス補正による分光感度特性

利用効率を改善している。

これら光学系部分の特性改善により、広い色域にわたって彩度の高い被写体を高画質で撮影可能となった。

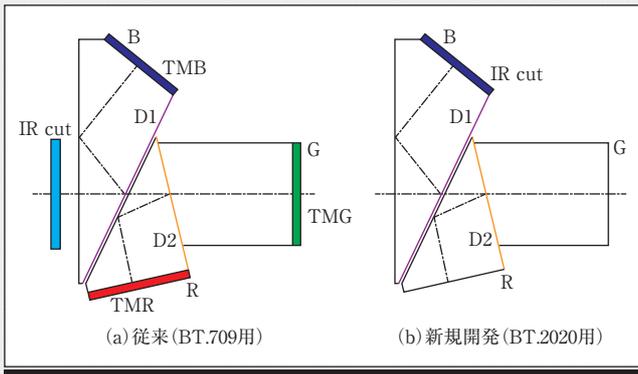


図11 色分解プリズムの構成(文献¹⁹⁾より引用)

(a) R, G, Bの射出口にトリミングフィルタ(TMR, TMG, TMB)を設け、プリズム前面にIRカットフィルタを配置、(b)反射面(D1, D2)の特性を調整し、IRカットフィルタをB射出口のみに配置することで光の利用効率を改善。

5. 高ダイナミックレンジ化に対応する技術

高ダイナミックレンジ(HDR: High Dynamic Range)映像の代表的な方式としてHybrid Log-Gamma(HLG)方式と、Perceptual Quantization(PQ)方式が挙げられる²⁰⁾。ここでは、撮像系におけるHDR化として、従来の標準ダイナミックレンジ(SDR: Standard Dynamic Range)モードと、HDR映像を撮影するHLGモードの実装例を紹介する。

従来のSDRモードでは撮像素子の性能を見極め、撮像素子出力信号におけるピーク白(100%白)を決定し、BT.709に規定された撮像側の光-電気伝達関数(Opto-Electronic Transfer Function: OETF)を用いて電気信号に変換している。SDRモードでのOETFの一例を示す(図12: SDRモード)。撮像素子出力信号の飽和信号の約1/6のレベルをピーク白と規定し、0から1/6までのレベルをOETFに沿ってカ

メラ出力信号に変換している。カメラ出力信号では10%程度のヘッドルームを有し、ピーク白を超えるスーパー白の領域を確保している。ここでは、撮像素子出力信号の1/6から1までの範囲を、カメラシステム出力のスーパー白の領域(カメラ出力1~1.1)に圧縮する例を示している。

一方、HLGモードでは、高輝度部分も含めてOETFに規定されているため、SDRモードに比べてより高いレベルの撮像素子出力をピーク白に設定する。ここでは飽和信号レベルをピーク白としてHLG方式のOETFを用い、電気信号に変換した例を示す(図12: HLGモード)。SDRと同等の0.5乗べき関数のOETFは、撮像素子の飽和レベルの約1/12までのレベル、それ以上のところは対数関数でのOETFとなる(講座第1回参照²¹⁾)。SDRモードではスーパー白領域に圧縮されていた信号が、HLGモードでは0.7~1の範囲で伝送されるため、撮像系から高輝度領域の情報が、より忠実に後段に伝送できることがわかる。さらにHLGモードでもSDRモード同様に、スーパー白の部分を利用して、より高ダイナミックレンジの映像情報を出力できるカメラもある。

HDR撮影において撮像系に求められるのは、上記のような高輝度領域の再現性ととも、中低輝度領域におけるS/Nの確保である。従来SDRモードと同じべき関数のOETFとなる領域はHLGモードにおいては、飽和信号の約1/12までと従来の約半分の信号レベルとなっている。したがって、この範囲の映像がHDRモニタ上でSDRと同様に見える方となるためには6 dB程度のS/N改善が必要となる。また、取り扱う信号電荷も少なくなることから、入射光による光ショットノイズの抑圧も大きな課題である。

現在、更なる高画質HDR映像の撮影に向け、撮像素子側ではノイズレベルの低減によるS/N改善や、飽和信号電荷

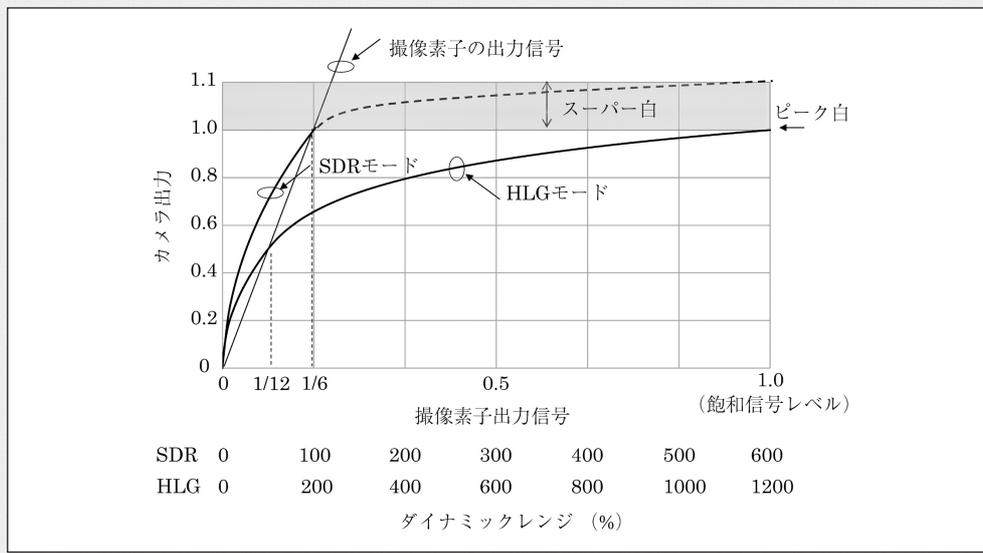


図12 カメラ出力信号におけるOETF適用例(SDRモードとHLGモード)

量の拡大など、ダイナミックレンジ拡大に向けた検討が進んでいる。先に紹介した裏面照射型の構造のほかに、光電変換膜を用いた積層膜型撮像素子²²⁾や、3次元構造撮像素子²³⁾も検討されている。また、カメラシステム内の信号処理では、確率統計技術を使った処理など、より柔軟で適応的なノイズ抑圧法の開発が進められている。

6. むすび

UHDは、広色域化やHDRなど、従来の映像システムにはない新しい仕様が盛り込まれており、より臨場感や実物感ある映像を提供できるシステムである。本稿では、このような高画質なUHD映像を撮影するための、撮像系における特徴的な技術を解説した。

先述したように、この10年余の撮像系に係る技術進歩は目を見張るものがある。撮像素子をはじめ、光学系、信号処理回路、操作インタフェースなど、それぞれの分野の技術者が連携して高画質化に向けて研究開発に取り組んだ成果である。

すでに幅広い制作機材が開発され、それらを用いてUHD映像の特徴を活かした番組作りが盛んに行われている。カメラを含めた高画質なUHD機材が運用面、コスト面からもハイビジョン機材並みの身近なものになるのも、そう遠くないように思われる。

(2017年2月23日受付)

〔文 献〕

- 1) Kanazawa et al.: "Ultrahigh-definition Video System with 4000 Scanning Lines", Proc. IBC, pp.321-329 (2003)
- 2) 三谷公二, 島本洋, 藤田欣裕: "4板撮像方式を用いた2000ライン動画撮像装置", テレビ誌, 50, 2, pp.295-301 (1995)
- 3) 西田幸博: "スーパーハイビジョンの映像パラメータと国際標準化", NHK技R&D, 137, pp.10-19 (Jan. 2013)
- 4) S. Huang, et al.: "A 2.5 inch, 33Mpixel, 60 fps CMOS Image Sensor for UHD TV Application", Proceeding of 2009 International Image Sensor Workshop (June 22-28, 2009)
- 5) ARIB技術資料TR-B37: "超高精細度テレビジョン方式カメラ・レンズ機器の互換接続"
- 6) 山下ほか: "スーパーハイビジョン・フル解像度カメラシステム", NHK技研R&D, 122 (July 2010)
- 7) 丸山ほか: "裏面照射型CMOSイメージセンサ", 映情学技報, 30, 25, pp.25-28 (Mar. 2006)
- 8) 映画テレビ技術: "2/3型4K 3CMOS搭載4KカメラHDC-4300の開発", pp.48-50 (Nov. 2016)

- 9) T. Arai et al.: "A 1.1 μm 33Mpixel 240fps 3D-Stacked CMOS Image Sensor with 3-Stage Cyclic-Based Analog-to-Digital Converters", 2016 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.126-127 (Feb. 2016)
- 10) S. Matsuo, et al.: "8.9-Megapixel Video Image Sensor with 14-b Column-Parallel SA-ADC", IEEE Transaction on Electron Devices, 56, 11 (Nov. 2009)
- 11) T. Toyama, et al.: "A 17.7Mpixel 120fps CMOS image sensor with 34.8Gbps readout", in Proc. ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.420-422 (Feb. 2011)
- 12) R. Funatsu, et al.: "A 133-Mpixel 60-fps CMOS Image Sensor with 32-Column Shared High-Speed Column Parallel SAR-ADCs", 2015 ISSCC Dig. Tech. Papers, 6.2 (Feb. 2015)
- 13) T. Yasue, et al.: "A 14-bit, 33-Mpixel, 120-fps Image Sensor with DMOS Capacitors in 90-nm/65-nm CMOS", Proc. 2015 Int. Image Sensor Workshop, 7.03, pp.200-203 (2015)
- 14) <http://hitachi-kokusai.co.jp/news/2015/news150406.html>
- 15) <http://www.ikegami.co.jp/archives/menu1/shk-810>
- 16) K. Kitamura, et al.: "Full-specification 8K Super Hi-Vision camera", 1st International Conference on Advanced Imaging (ICAI 2015), T304-02, pp.366-369 (2015)
- 17) ITU-R, Recommendation ITU-R BT.709-6: "Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange" (1990)
- 18) ITU-R, Recommendation ITU-R BT.2020-2: "Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange" (2012)
- 19) K. Masaoka et al.: "Designing Camera Spectral Sensitivities for UHD TV", SMPTE Motion Imaging Journal, pp.26-32 (Nov. /Dec. 2014)
- 20) ITU-R, Recommendation BT.2100-0: "Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme exchange" (2016)
- 21) 西田幸博: "講座：UHDを支える映像の高画質化技術 (第1回) UHD映像の概要", 映情学誌, 71, 2, pp.216 (Mar. 2017)
- 22) 村上ほか: "有機CMOSイメージセンサ～120dBワイドダイナミックレンジ, 光電変換制御グローバルシャッター～", 映情学技報, 40, 12, pp.53-56 (Mar. 2016)
- 23) M. Goto, et al.: "3-D Silicon-on-Insulator Integrated Circuits with NFET and PFET on Separate Layers Using Au/SiO₂ Hybrid Bonding", IEEE Transactions on Electron Devices, 61, 8, pp.2886-2892 (2014)



三谷 公二 1987年, NHK入局。放送技術研究所において、画像処理、ハイビジョンカメラの小型化、スーパーハイビジョンカメラなどの研究開発に従事。2010年より、技術局にて、番組制作機材や設備の開発・整備を担当。2014年～2016年、スーパーハイビジョン開発部長として、SHV試験放送システムを開発・整備。2016年6月より、放送技術研究所副所長。工学博士。SMPTEフェロー。正会員。

UHD映像の記録系

～Ultra HD Blu-ray™規格とそのHDR技術～

小塚雅之†

1. まえがき

近年4K表示対応テレビの販売が始まり、販売も好調に推移している。4Kテレビで利用可能な4Kコンテンツの提供は、4K IP配信サービスか、4K対応光ディスクであるUltra HD Blu-ray™になる(4K放送が2018年末以降になるため)。IP通信インフラが整備された日本においても4K映像のIPサービスをストレスなく視聴できる世帯数は限られており、Ultra HD Blu-ray(ハリウッド映画を中心に4K/HDR映画が100タイトルを超えた)に注目が集まっている。

本稿では、Ultra HD Blu-rayの規格とUltra HD Blu-rayの最大の特徴であるHDR技術について解説する。

2. Ultra HD Blu-ray 規格の概要

Ultra HD Blu-rayは4K映像用に新たに開発されたBlu-rayファミリーの光ディスクである。

1996年のSD映像用のDVD、2006年のHD映像用のBlu-ray

に続き、2016年に4K映像用のUltra HD Blu-rayと、映像配信用光ディスクは10年毎に大きく進化している(図1)。技術面では、映像圧縮技術は、MPEG-2、AVC、HEVCと最新技術を、光ディスクの容量も10GB、50GB、100GBと進化した技術を採用してきた。

表1にUltra HD Blu-rayの基本仕様について映像関連技術を主体にまとめた。Ultra HD Blu-rayでは、4K解像度のサポートのみならず、色空間をBT.709からBT.2020に変更することで、約2倍の範囲の色を表せるように拡張された。

表1 Ultra HD Blu-rayの基本仕様

要素技術	Ultra HD Blu-ray™	Blu-ray™	従来比
解像度	UHD (3840 × 2160)	HD (1920 × 1080)	4倍
色空間	BT. 2020	BT. 709	2倍
HDR (最高輝度)	10000 nit	100 nit	100倍
圧縮技術	MPEG HEVC	MPEG-4 AVC	2倍
階調	10ビット	8ビット	4倍
転送レート	100 Mbps	40 Mbps	2.5倍
最大ディスク容量	100 GB	50 GB	2倍

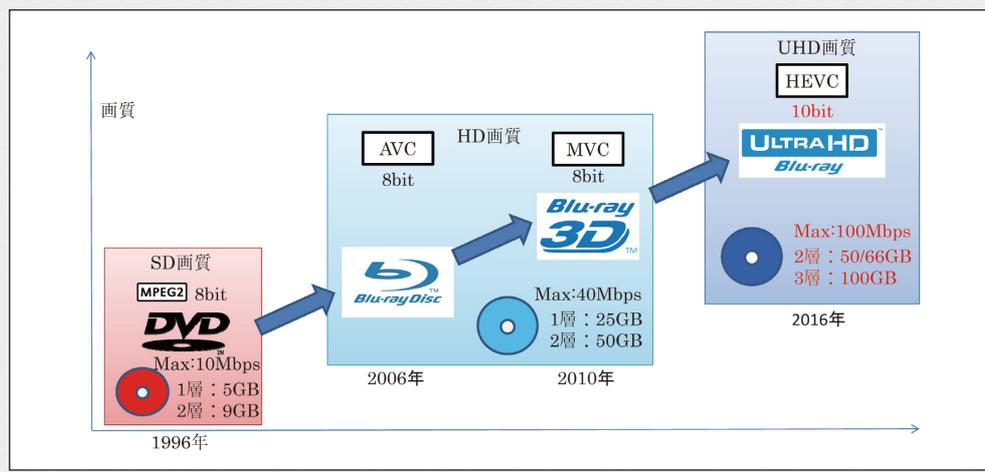


図1 映像用民生光ディスクの歴史

† パナソニック株式会社 アプライアンス社 技術本部 イノベティブ・エンタテインメント開発センター メディアアライアンス室

"Picture Quality Enhancement Technologies Supporting UHD (3): UHD Video Recording Technologies: An overview of Ultra HD Blu-ray™ and its HDR technologies" by Masayuki Kozuka (Media Alliance Office, Innovative Entertainment Development Center, Corporate Engineering Division, Appliance Company, Panasonic Corporation, Osaka)

これに伴い、階調数も従来の8ビットから10ビットで4倍に拡張した。BT.2020はデジタルシネマで使われているDCI-P3規格よりも広い色空間を扱う規格であり、従来は不可能であった映画館と同じ色の映像を家庭で視聴することが可能になった。

映像の画質に影響を与える最大転送レートは、Blu-rayディスクの物理仕様を拡張することにより、最大100 Mbpsの2.5倍に拡張された。このUltra HD Blu-rayの転送レートは、最大20 Mbpsの4K-IP配信の転送レートと比較すると5倍以上になり、圧倒的な高画質が期待できる。

Ultra HD Blu-rayでの映像系の最大の特徴は民生機器では初となるHDR技術のサポートである。SDR映像に比較して10～100倍程度のダイナミックレンジを持つ映像の格納を可能にした。

図2にUltra HD Blu-rayでサポートされる4つの映像の組合せを示す。もっとも特徴的なディスクは4K/HDR映像を格納したものだが、4K/SDR映像、HD/HDR映像、

HD/SDR映像を格納したディスクもUltra HD Blu-rayディスクとして製作可能である。ただし、現時点ではハリウッド映画は、ユーザーにBlu-rayとの画質差を訴求しやすい4K/HDR映像のUltra HD Blu-rayディスクのみを製品化している。

3. HDRとは

図3にSDR映像伝送システムと人間の視覚特性との関係を示す。人間の目は、瞳孔を調整することにより、非常に暗い部分から明るいものまで見ることができるが、同時に認識できるダイナミックレンジは10,000対1程度と言われている（目は絶対輝度を認識するのではなく、相対輝度を認識している）。

SDR伝送システムでは1,000対1程度のダイナミックレンジの映像を送るように設計されていたため、目の能力以下のダイナミックレンジを持つ映像しか送れなかった。

近年撮像素子等の性能が向上し、目のダイナミックレン

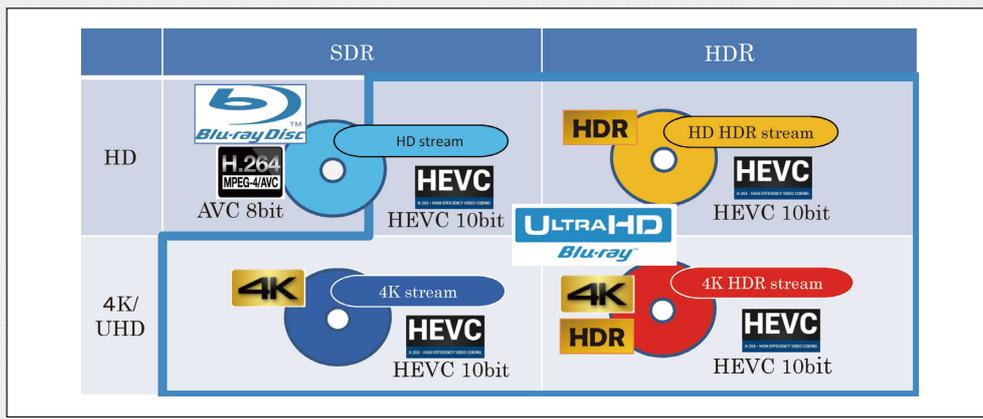


図2 Ultra HD Blu-rayの種類

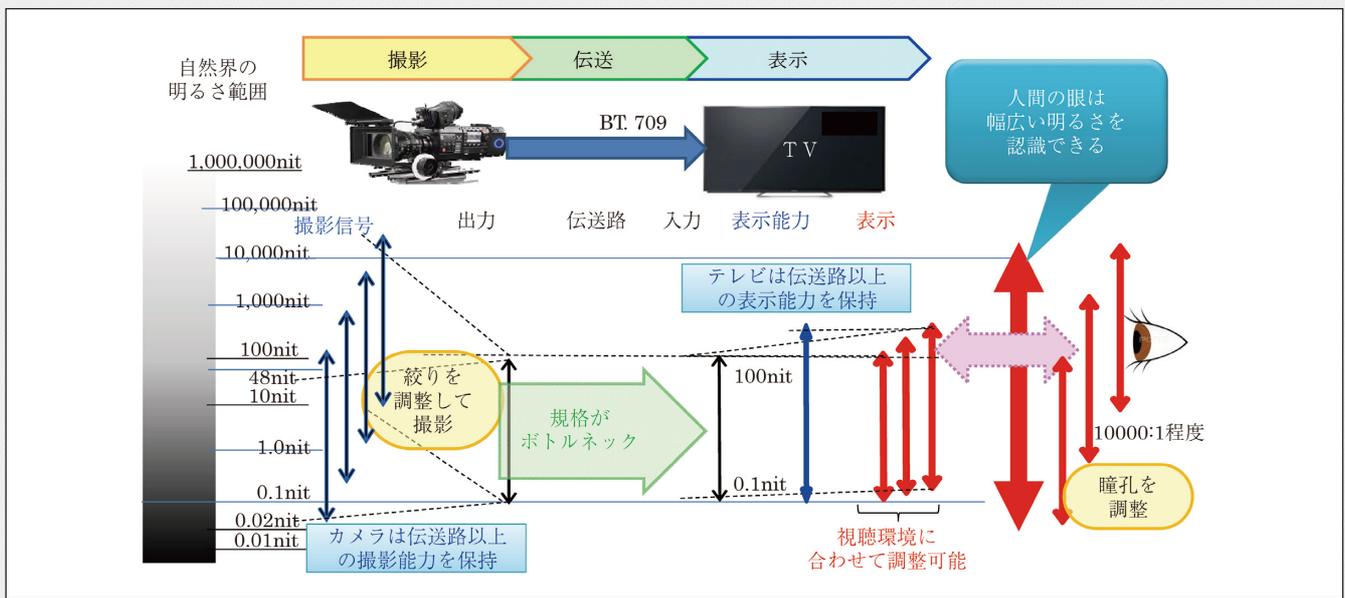


図3 人間の視覚特性とSDR映像表現

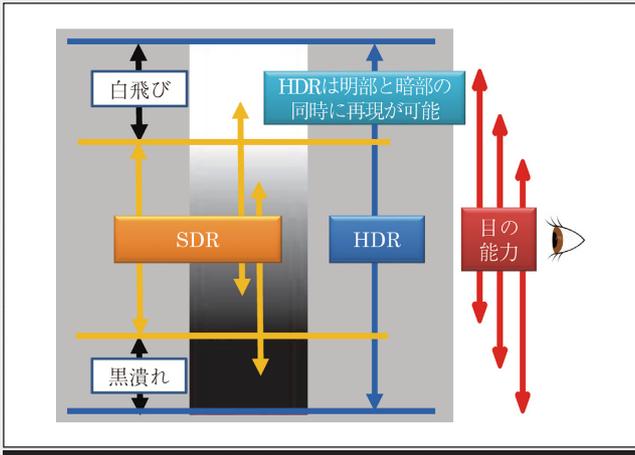


図4 HDR映像とSDR映像の表現能力の違い

表2 ITU BT.2100で規定された2つのHDR (EOTF) 技術

EOTF	名称	提案者	表示方式	主な用途
PQ	Perceptual Quantizer	Dolby	絶対輝度	パッケージ (Ultra HD Blu-ray), IP配信サービス (OTT) 等
HLG	Hybrid Log Gamma	BBC/NHK	相対輝度	放送, ライブIP配信等

ジを越える映像を撮影することが可能になったが、SDR伝送方式の制約でその性能を有効に使うことができなかった。また表示装置側も性能が向上し、SDRの制約を超える映像を表示することが可能になってきたが、SDR伝送方式の制約で、撮像素子と表示装置の性能を有効に使うことができなかった。

図4で示すように、HDRは、SDR伝送の制約を開放することにより、人間の目の能力を超える映像の撮影・伝送・表示を行うエコシステムを実現可能にする。つまり、「人間が見ている映像(風景と同じ)のような自然な映像を表示装置内に再現することを可能にするものである。SDRでは黒つぶれや白とびを起こすようなダイナミックレンジの広い映像も、HDRを使うことで同時に再現することが可能になる。

HDR映像を扱う場合、従来のガンマカーブ(BT.1886)でHDR映像を送ることも可能であるが、伝送効率が悪化する(明るい部分の目の感度が低いため、暗い部分により多くの情報を配分する方が高効率なため)。このためITUでHDR国際標準化規格BT.2100(表2)が制定された。SDRより広いダイナミックレンジを扱うため、階調数を8ビット

から10ビットに拡張することで、バンディング等の映像の問題が発生しにくい規格になっている。

BT.2100では、Dolbyが提案し、人間の視覚特性を配慮して変換カーブを設計した絶対輝度ベースのPQ(Perceptual Quantizer)方式(SMPTE ST 2084)と、NHKとBBCが共同提案した、現行のガンマカーブをベースに高輝度領域部分をHDR用に拡張した相対輝度ベースのHLG(Hybrid Log Gamma)方式の2つの方式が採用された。

ハリウッド映画会社はコンテンツ制作時と同じ輝度で表示することを意図しているPQ方式を好むが、放送業界は、実時間処理、テキスト・グラフィック合成等の容易さ等の視点でHLGを好む傾向がある。

Ultra HD Blu-ray(再生専用BD-ROMディスク規格)は、ITUのBT.2100規格が公開される前に規格化が完了した点と、ハリウッドの要請に基づきPQ方式のみを採用している。

将来、Blu-ray Disc Association(BDA)で4K/HDR放送録画規格(録画用BR-R/REディスク規格)が策定され、放送がHLGを採用した場合は、そのままHLG方式で4K/HDR映像信号が記録されると予想する。

4. Ultra HD Blu-rayのHDR技術

表3にUltra HD Blu-rayで採用された必須HDR技術(業界では、HDR10と呼称されている)の仕様を示す。HDR10は、SMPTEの2つの標準(ST-2084とST-2086)をベースにしている。この2つの標準に加え、BDA内でHDRの画質、制作(グレーディング)方法、表示装置での表示方法等を議論した結果、テレビでのHDR表示処理を助けるためにHDRコンテンツの属性を示す2つの静的メタデータ(MaxCLLとMaxFALL)を追加した。Ultra HD Blu-rayのHDR技術はこの4つの仕様のみで構成されるシンプルな構成である。BDAではHDR映像の主観評価試験等を通じて、この4つの技術で十分なHDR効果が得られることを確認した上で規格化を行った。

PQカーブを使ったHDRシステムの場合、絶対輝度で表示されることを前提にしている。PQで表現できる表示装置の最高輝度(DPL: Display Peak Luminance)は10,000 nitに達し、この輝度を表示できる表示装置は製造が非常に困難な上、電力消費の点でも実用的ではない。現状は最高輝度が350 nitから1,000 nit程度のHDRテレビが実用化されている。そこで、10,000 nitまで表現可能なHDR映像信号をDPLが500 nitや1,000 nitのHDRテレビで表示するため

表3 Ultra HD Blu-rayのHDR技術

	名称	意味	製作ガイド
EOTF	SMPTE ST 2084		
静的メタデータ	SMPTE ST 2086	グレーディングした表示装置の特性値	1000 nit以上の輝度を持つ表示装置を推奨
	Maximum Content Light Level (MaxCLL)	タイトル内の最大輝度の値	1000 nit以上の輝度の点は少ないこと規定
	Maximum Frame-Average Light Level (MaxFALL)	タイトル内の各フレームの平均輝度の最大値	MAXFALL値が400 nitを超えないことを規定

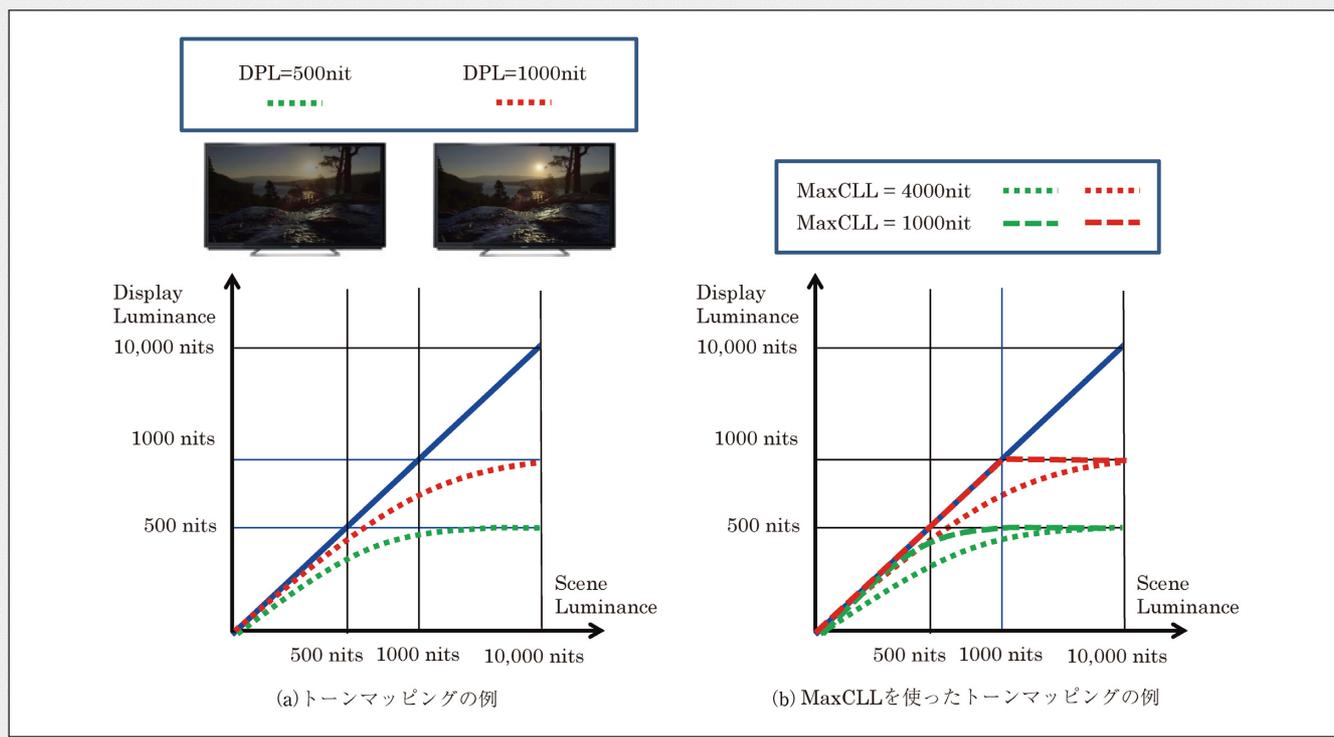


図5 HDRTV内でのHDR映像処理：Tone Mapping

のトーンマッピングと呼ばれる特殊処理が必要になる。

HLGの場合は、ガンマカーブを同様に、相対輝度(コントラスト)での表示を前提にしているため、このような処理は不要になる。しかし、元映像の最高輝度(SPL: Scene Peak Luminance)が1,000 nitの映像をDPLが500 nitのHDRテレビで表示する場合は、1,000 nitが500 nitに対応するため暗部がコンテンツの持つ絶対輝度と比較した場合、表示される輝度が暗くなり、映画監督の意図を正確に反映できていないという批判もある。

図5に示すように、PQ方式のHDR映像をHDRテレビで表示する場合はHDRテレビの表示能力(DPL)に合わせて、実際のシーンの明るさを表示装置の明るさに変換するトーンマッピング処理を行う。この処理では、暗部は絶対輝度どおりに表示されるため、映画監督の意図通りの映像が表現できる。しかし高輝度部分は、この処理により、HDRテレビの表示能力に応じて丸められる。

図5(a)のグラフと写真は、DPLが500 nitのHDRテレビと1,000 nitのHDRテレビの差を模式的に表現している。このトーンマッピングの仕方は規格では定義されていないためテレビ会社の絵つくりの考え方、ノウハウで表示されるHDR映像に差が出る。

図5(b)では、BDAで追加した静的メタデータのMaxCLLを使ったトーンマッピング処理の例を示した。MaxCLLが1,000 nitの映像コンテンツを表示する場合は、そのコンテンツ内に1,000 nit以上の輝度の点がないため、DPLが1,000 nitのHDRテレビでは赤の破線のようにトーンマッピングは不要になる。DLPが500 nitのHDRテレビ

の場合でも、緑の破線のように、MaxCLLが4,000 nitの緑の点線の場合に比べて、低輝度部分に情報を割当てることが可能になる。

図5の例のようにHDRテレビ内のHDR変換処理では、MaxCLLの値に応じて変換方法を変えることで、最適なHDR効果が得られるようにテレビメーカー各社が工夫することができる。

図6に、コンテンツ全体最高輝度を示すMaxCLL(左側)、とシーン毎の最高輝度(Scene MaxCLL:右側)の概念を模式的に表す。

MaxCLLは映画全体で1つしかないため、ほとんどのシーンが1,000 nit以下であっても、1カ所でも1,000 nitを超えるシーンがあると、その値に引っ張られてトーンマッピングが決められることになってしまい、ほとんどのシーンで適切なトーンマッピングを選べないリスクがある。

シーン毎のMaxCLLに当たる値(Scene MaxCLL)を、コンテンツに同期してHDRテレビに送ることで、シーン毎に最適なトーンマッピングを選択できる可能性がある。

Ultra HD Blu-rayのHDRでは、必須技術のHDR10とオプション技術のDolbyVisionとPhilip方式の3つが規定されている。図7に示すように、2つのオプションは共に基本HDRストリームはHDR10完全互換にする必要があり、該当オプション機能を持たないUltra HD Blu-ray機器やHDRテレビが使われた場合は、必須のHDR10映像として表示される。

DolbyVisionの場合は、HDR10ストリームとDolbyVision用拡張ストリーム(ダイナミックメタデータ)とから構成さ

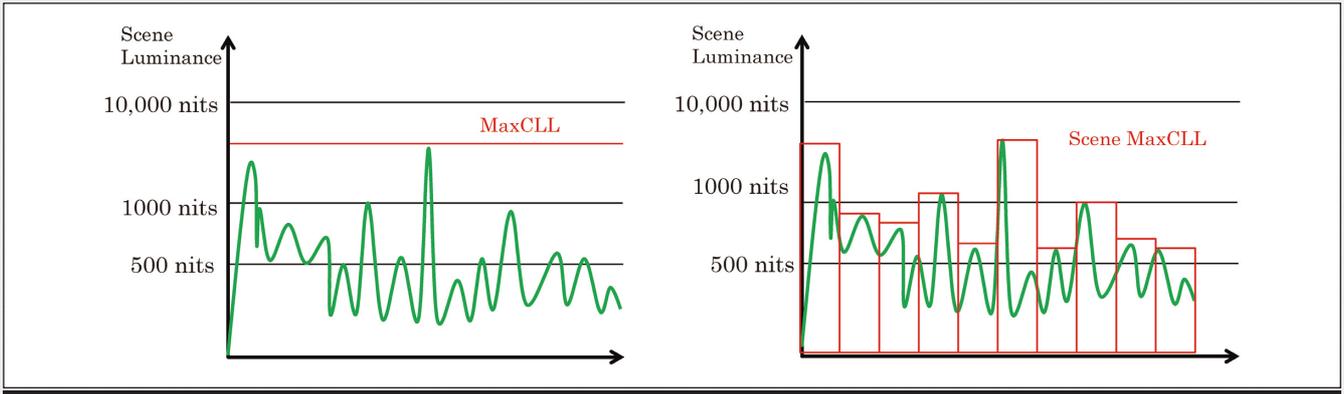


図6 Scene毎のダイナミックメタデータの例 (Scene MaxCLL)

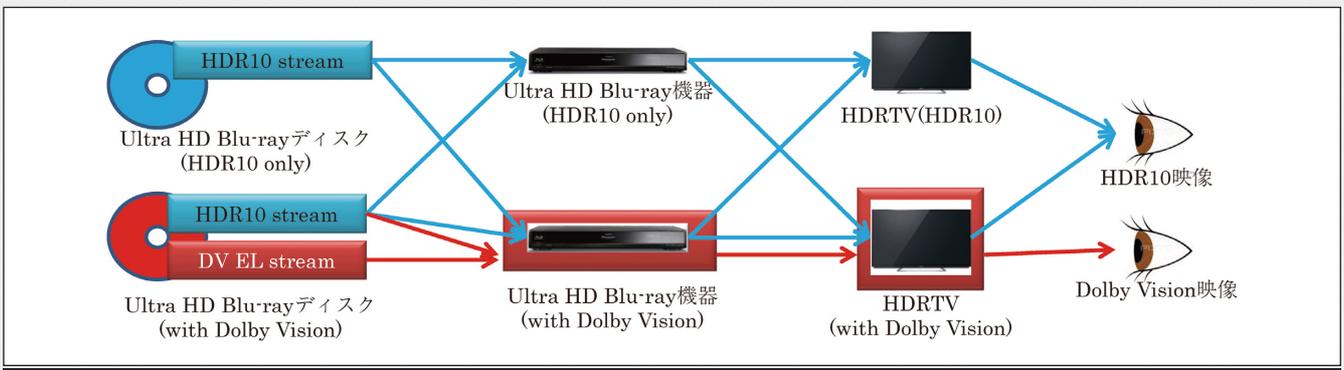


図7 必須HDRとオプションHDRの関係

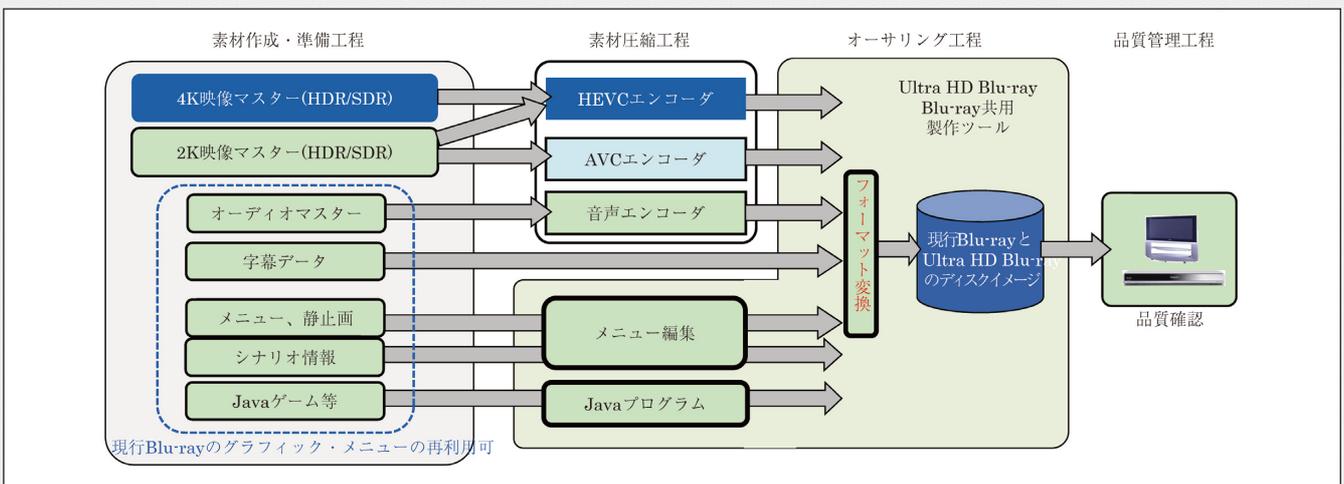


図8 Ultra HD Blu-rayの製作工程

れ、DolbyVision対応プレーヤとDolbyVision対応テレビを組合せて表示した場合は、12ビット映像表現が可能になる。Philips方式の場合は、HDR10ストリームとPhilips用ダイナミックメタデータとから構成される。

5. Ultra HD Blu-ray規格のその他の特徴

Ultra HD Blu-rayでは、映画会社の製作負担をできるだけ軽減するために、Blu-rayの製作との共通化を図った。

図8のように、映像以外の素材(メニュー、字幕等)を現行Blu-rayのものを流用できるように、敢えて4K化を行わずに、2Kに留めている。このことで、Blu-rayとUltra HD Blu-rayの同時製作が容易にでき、Ultra HD Blu-rayディスクが発売しやすくしている。

図9に示すようにUltra HD Blu-rayの再生では、4K映像に2Kグラフィックや2Kテキストで2K→4K変換した後、合成して出画する方式を採用している。この画質について

UHD映像の表示系

正会員 藤根俊之†, 櫻井涼二†, 正会員 吉田育弘†

1. まえがき

1995年にNHKが研究を開始した超高精細映像は、2000年以降は捜査線数4,000本級の映像研究として進められ¹⁾、その後、現行のハイビジョンを大きく超える臨場感と質感を伝える次世代テレビを目指したスーパーハイビジョン(SHV: Super Hi-Vision)の研究へと進展した。そのような中、2012年8月には、超高精細度テレビジョン(UHDTV)の映像フォーマットを規定したITU-R勧告BT.2020²⁾が発行され、テレビの国際規格となった。スーパーハイビジョンの国際規格として、超高精細表示系として目指すべき目標が明示された。さらに、ITU-R勧告BT.2100³⁾で高ダイナミックレンジのテレビ映像を規定している。

本稿では、従来映像フォーマットに対してUHD映像フォーマットで拡張された解像度、高フレームレート、広色域、および高ダイナミックレンジを実現する表示系の技術について、現在実用化されている液晶ディスプレイ(LCD)を中心に解説する。

2. UHD映像パラメータ

8K UHDの国際標準化規格ITU-R BT.2020、および、高ダイナミックレンジのテレビ映像規格ITU-R勧告BT.2100³⁾の映像パラメータを表1に示す。表のように、従来映像フォーマットBT.709に対して、空間解像度は16倍の7680×4320(以下、8K4K)、フレーム周波数も120Hz、RGB3原色点はスペクトル軌跡上の色度まで拡張されている。データのビット数も12bitまでが規格化されている。また、ダイナミックレンジは、従来の100 cd/m²から最大10,000 cd/m²まで100倍のレンジまで拡張されている。2018年から開始を計画している8K4K実用放送では、フレームレート60 Hzであるが、将来に備えて、フレームレート120 Hzに対応したディスプレイの開発を行っていく必要がある。

3. 高解像度、高フレームレート

液晶ディスプレイの画素構造模式図を図1に示す。データを画素電極へ書込みを行う駆動として、1本のゲートライン(Gate Line)を選択し、1本のデータライン(Data Line)

表1 HDTVおよびUHDTVの映像パラメータ

	UHDTV Rec.ITU-R BT.2020		HDR-TV Rec.ITU-R BT.2100		HDTV Rec.ITU-R BT.709	
画面アスペクト比	16:9		16:9		16:9	
空間解像度	7680×4320, 3840×2160		7680×4320, 3840×2160, 1920×1080		1920×1080	
フレーム周波数(Hz)	120, 120/1.001, 100, 60, 60/1.001, 50, 30, 30/1.001, 24, 24/1.001		120, 120/1.001, 100, 60, 60/1.001, 50, 30, 30/1.001, 24, 24/1.001		60, 60/1.001, 50, 30, 30/1.001, 24, 24/1.001	
走査	順次走査		順次走査		順次走査, 飛越操作	
表色系	x	y	x	y	x	Y
R	0.708	0.292	0.708	0.292	0.640	0.330
G	0.170	0.797	0.170	0.797	0.300	0.600
B	0.131	0.046	0.131	0.046	0.150	0.060
白	D65		D65		D65	
伝達関数	OETF (E<1の規定)		HLG OETF (1<Eまで規定) PQ EOTF (Y最大10,000 cd/m ²)		OETF (E<1の規定)	
ビット数	12, 10		12, 10		10, 8	

† シャープ株式会社

"Picture Quality Enhancement Technologies Supporting UHD (4): Display System of the UHD Picture" by Toshiyuki Fujine, Ryoji Sakurai and Yasuhiro Yoshida (SHARP Corporation, Tenri)

表2 垂直解像度、パネル構造、フレームレート毎のデータ書き込み期間(1H)の関係

	FHD		4K2K				8K4K			
	60Hz	120Hz	60Hz		120Hz		60Hz		120Hz	
リフレッシュレート	60Hz	120Hz	60Hz		120Hz		60Hz		120Hz	
垂直解像度	1080	1080	2160		2160		4360		4360	
パネル構造	1G1D	1G1D	1G1D	1G2D	1G1D	1G2D	1G1D	1G2D	1G1D	1G2D
1H期間	15.4 μ s	7.7 μ s	7.7 μ s	15.5 μ s	3.9 μ s	7.7 μ s	3.9 μ s	7.7 μ s	1.9 μ s	3.9 μ s

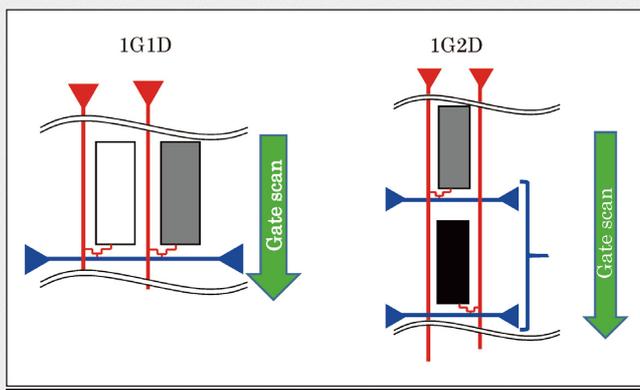


図1 液晶ディスプレイの画素構造

で書き込みを行う1G1D方式や、1本のゲートライン(Gate Line)を選択し、2本のデータライン(Data Line)で同時に書き込みを行う1G2D方式などが採用されている。表2に垂直解像度、パネル構造、フレームレート毎のデータ書き込み期間(1H)の関係を示す。8K4K 120Hzの場合、FHD 60Hzの1/2~1/4の短時間でデータの書き込みを行う必要がある。このような高速書き込み動作を実現する液晶ディスプレイを開発・設計する際には、ディスプレイサイズを想定してパネル開発を行う必要がある。

本連載第1回目で説明されているように⁴⁾、UHDの映像パラメータは、高臨場感と高質感の享受を目的に策定された映像パラメータである。視聴画角としては、有効視野30度を超えると臨場感が顕著になり、さらに誘導視野100度まで臨場感が増加することが示されている⁵⁾。また、UHDTVとして新たに実物感と空間解像度の検討が行われ、視力1.0の空間分解能に相当する空間解像度30cpdを超えても実物感は空間解像度が高くなるにつれて増加し、60cpdで徐々に飽和する傾向を持つことが示されている⁶⁾。

実物感と臨場感を別の感性と考え、筆者らの調査結果から家庭におけるディスプレイの観視距離を一定距離2.5m⁷⁾と想定し、画面サイズと解像度の関係を整理したものが図2である。横軸を視聴画角とし、縦軸は水平角解像度(cpd)とした。臨場感が十分に得られるのは横軸の視聴画角30度以上であり、実物感が充分得られるのは縦軸の水平空間解像度60cpd以上とすると、黄色枠で示したエリアが臨場感と実物感が両立するUHDTV向けの表示ディスプレイの画面サイズと解像度となる。60型4K2Kディスプレイ、および、60型以上の画面サイズの8K4Kディスプレイがこの範囲に

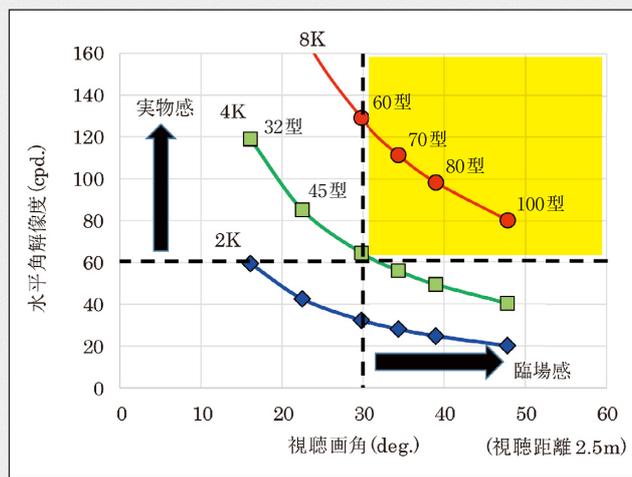


図2 観視距離2.5mから見たディスプレイにおける視聴画角と水平角解像度の関係(青実線:2K1K, 緑実線:4K2K, 赤実線:8K4K)

含まれる。このように、UHDTVディスプレイでは、60型以上の大画面化と超高精細化の二つの軸を同時に実現する技術開発が必要になる。

液晶ディスプレイでは、60型以上の大型ディスプレイを高速で駆動、充電するために、低抵抗配線、高移動度のバックプレーン技術が必要になる。

図3に、バックプレーン製造技術毎の特徴を示す⁸⁾。高い移動度を有する低温ポリシリコン(LTPS)技術は、プロセス温度が高いため、低抵抗の配線技術との組合せに難易度があり、比較的小さいサイズで高い画素密度のディスプレイに向けたプロセスである。一方、a-Siは、プロセス温度が低く、大画面サイズまで適用可能であるが、高い画素密度へ対応することは困難である。一方、IGZOをはじめとする酸化半導体は、プロセス温度が低く、低抵抗率配線技術も適用可能であるため、大画面と高い画素密度を持ったディスプレイに最適なTFTプロセスである。60型以上の大画面と100dpiを超える高い画素密度と、120Hzの高速充電を考慮した場合、バックプレーン技術としてはIGZOが適していると言える。図4にIGZOプロセスを採用し、液晶データ書き込み方式として1G2Dを採用し、120Hz高速データ書き込み(データ期間7.7 μ s)の8K4K 85型120Hzの市販された液晶ディスプレイと表3に主な仕様を示す。本ディスプレイは、IGZOによるTFTの小型化により高透過率を有する。画素密度は104dpiである⁹⁾¹⁰⁾。

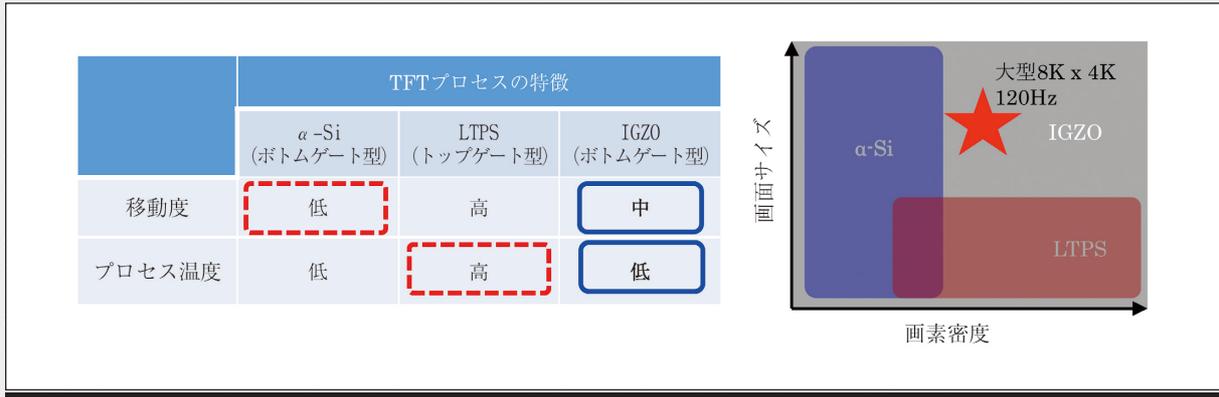


図3 バックプレーン製造技術毎の特徴

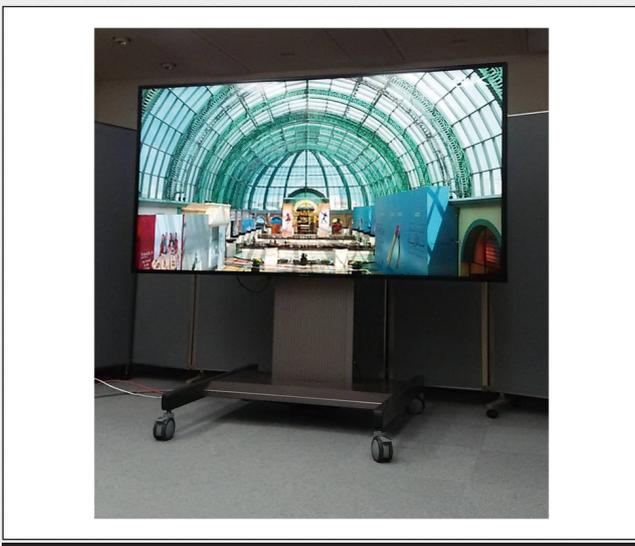


図4 8K4K 120 Hz駆動のHDR対応IGZO 85型液晶ディスプレイ

表3 8K4K 120 Hz駆動のHDR対応液晶ディスプレイの主な仕様

解像度	7680 × 4320	
液晶パネル	85VワイドIGZO	
フレームレート	120Hz	映像入力は8K60Hz, 表示は8K 120Hz
最大輝度	1000 cd/m ²	
コントラスト比	100000:1以上	
色域 (BT.2020 包含率)	79%	CIE1931 xy色度図において

4. 広色域

ディスプレイの色域は、RGB 3原色の色度点が色度図上で作る三角形の内側の領域に限られる。したがって、再現できる色度範囲を広くするには、この三角形ができるだけ大きくなるように3原色色度を選ばばよく、3原色色度はスペクトル軌跡に近い彩度の高い色が望まれる。

しかし、カラーテレビ放送方式開発当時、スペクトル軌跡に近い狭い発光スペクトルのCRT用蛍光体の作製は困難であった。そのため、3原色色度の選定には適当な妥協が

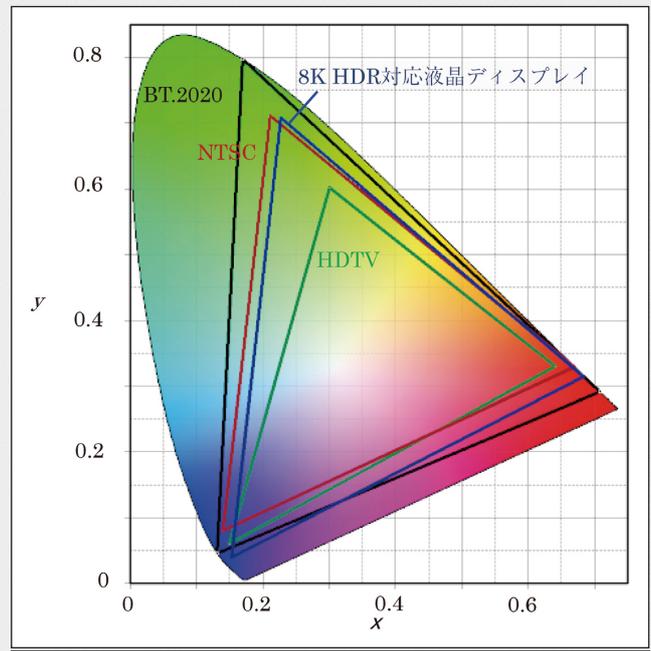


図5 NTSC, HDTVのBT.2020の色域、および、表3の8K HDR対応液晶ディスプレイの色域

必要であった。NTSC方式の3原色は、1950年頃のカラーCRTに用いられていた蛍光体の発光色度点を元に制定された。当時の印刷インク、絵の具、繊維用染料などの色域が、NTSCの3原色色度で囲まれる三角形の内側であり、普通の被写体が持つ色度を再現するには充分であるという検証結果も3原色色度決定の要因となっている。その後、寿命、発光効率の観点より材料、3原色色度の見直しが行われ、HDTV方式では、NTSC方式よりもむしろ後退した色域とされている。一般的なテレビ受像機は、現在、HDTVの3原色色度を元に原色色度の設計が行われている。

UHDTV規格策定時にもディスプレイの高彩度原色技術の動向と将来の技術予測、さらに、被写体としての物体色の分布が考慮され3原色点が決定的された^{11) 12)}。NTSC, HDTV, およびUHDTV (BT.2020) の色域を図5に示す。UHDTVの3原色点はスペクトル軌跡上に配置され、従来

のHDTVから大きく拡張された色域であることがわかる。

液晶ディスプレイの色再現は、カラーフィルタの分光特性CF(λ)と光源となるバックライト(BL)の発光特性BL(λ)の積で決定される。すなわち、CFの分光特性の分光特性を急峻に(色濃く)する技術の開発と、BLの発光特性を半値幅の狭い発光とする技術が開発されている。

2015年NHK技研公開では、4K液晶ディスプレイとレーザーBLを組合せて、BT.2020の色域に対する包含率98%(CIE1931 xy色空間に置いて)を実現している¹³⁾。また、量子ドット蛍光体によりBT.2020包含率90%を超える液晶ディスプレイ開発の報告も行われている¹⁴⁾。

近年の一般的な液晶ディスプレイでは、青色LEDと緑、赤の蛍光体を組合せた高効率の白色LEDが採用されている。2015年8K4K HDR技術搭載の高輝度1000 cd/m²市販液晶ディスプレイでは高彩度の緑色(β -SiAlON蛍光体)と赤色(KSF蛍光体)の蛍光体を採用した白色LED BL¹⁵⁾と高彩度CFによりBT.2020包含率79%を実現している¹⁰⁾。図5中に色域を記載する。赤色、緑色原色色度の改善が今後必要である。

5. HDR (High Dynamic Range)

5.1 液晶ディスプレイのバックライト制御技術

液晶ディスプレイのコントラストは、背面からBLを照射し表示をする構成上、液晶パネルのコントラストが支配的となる。液晶配向の方式にも依存するが、おおよそ5,000:1である。最大輝度が500 cd/m²のディスプレイでは、黒レベ

ルは0.1 cd/m²となる。さらに局所的なバックライト輝度レベルの制御を行うことにより高コントラスト化を図る、ローカルディミング技術の技術開発が行われている^{16) 17)}。バックライト輝度の制御を行わない場合、100 cd/m²の輝度情報を持つ映像は500 cd/m²のバックライトの手前の液晶の階調を20%に絞ることで100 cd/m²の表示が視認される。一方適切なバックライト制御を行うと、液晶階調を100%、バックライトを100 cd/m²にすることで、同じ100 cd/m²の輝度となる。このバックライト制御により、漆黒の黒は究極的にはバックライトを完全消灯することで実現することができる。このバックライト制御は、低消費電力化と高ダイナミックレンジ表示技術への発展が可能である。

バックライト制御を行わない場合、常にバックライトは点灯状態となる。例えば、500 cd/m²で点灯し続け、その分の消費電力が常に必要である。一方バックライト制御を行うことで、先の例では500 cd/m²から100 cd/m²にバックライト輝度を落とすことができ、電力を1/5とすることが可能になる。この1/5になった電力をそのまま享受するだけではなく、高ダイナミックレンジ表示に生かす技術について説明を行う。

図6にその概要を示す。液晶ディスプレイのLEDバックライトはパルス幅変調(PWM)制御によりその輝度をきめ細かく制御することが可能である。このLEDバックライトを液晶の背面にタイル状に敷き詰めることで、明るい太陽の部分は輝度を高く、日陰になった部分の輝度を低くなるようPWM制御し、エリアごとに輝度を制御することが可

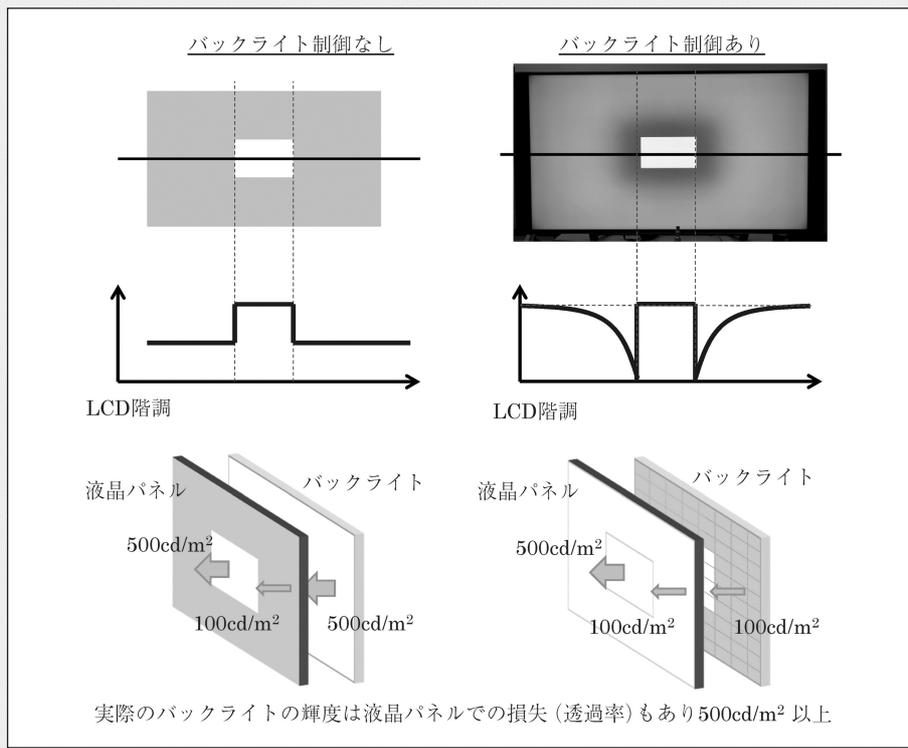


図6 バックライト制御

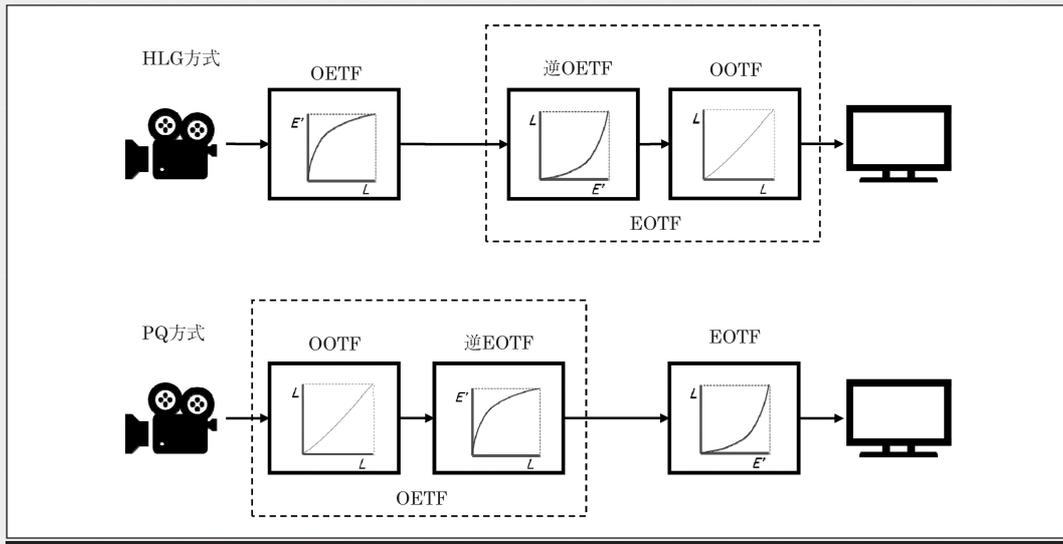


図7 HLG方式、PQ方式のカメラ～ディスプレイシステム

能になる。これによりバックライト制御を行わない場合、全エリアを500 cd/m²で点灯していたところを、例えば、太陽の部分を1,500 cd/m²、日陰の部分を20 cd/m²とし、映像のエリアごとの情報に応じて電力を再配分することが可能になる。この電力再配分により、最大輝度はこの場合500 cd/m²から1,500 cd/m²となり3倍、バックライトのエリア制御により黒レベルも下げることができるため、高コントラスト表示が可能になる¹⁸⁾。

5.2 HDR映像の表示技術

現在の一般的なデジタル放送で用いられている標準ダイナミックレンジ信号では、リファレンスモニタ表示規格BT.1886で最大輝度が100 cd/m²と規定されている。一方、人間の目は2.0 × 10⁴ cd/m²から1.0 × 10⁻³ cd/m²という非常に広い範囲の輝度情報を知覚することができるとされている。

本来のシーンが持っている輝度情報をカメラで撮像し、信号として保持している映像をHDR映像と呼ぶ。まばゆい太陽は具体的にその輝度(例えば、10,000 cd/m²)を示す信号としてディスプレイ側へ信号送出される。HDR信号については、ITU-R勧告BT.2100で規格化されている³⁾。BT.2100では二つの方式が規格化されている。

一つはDisplay-referredタイプのPQ(Perceptual Quantization)方式、もう一つがScene-referredタイプのHLG(Hybrid Log-Gamma)方式である。

PQ方式は表示デバイス上の信号-輝度特性をEOTF(Electro-Optical Transfer Function)関数で規定する。HDR信号として送出された映像信号と、ディスプレイ上の輝度値の関係を絶対値で規定している。従来のディスプレイが信号値と輝度値の関係を相対値で示しているのに対して、PQ方式では輝度値を絶対値で表現していることが大きな特徴である。また人間の視覚特性に基づき、暗部に多くの信号を割当てた非線形性の強い信号-輝度特性を持つ。

一方HLG方式は撮像時の輝度-信号特性をOETF(Opto-Electronic Transfer Function)関数で規定する。撮像時のシーン輝度を相対輝度として信号変換し、HDR信号として送出する。標準ダイナミックレンジ信号(SDR)同様、相対輝度値としてディスプレイのピーク輝度に合わせた形でディスプレイ輝度特性が決まる。さらに映像信号の0~0.5までのOETF特性が標準ダイナミックレンジ信号と同じガンマ特性を持っており、従来ディスプレイとの互換性が高いという特徴を持つ。

両方式のカメラ～ディスプレイ間の信号伝達の概要を図7に示す。さらにPQ方式のディスプレイ特性(=EOTF特性)と、HLG方式の特性(=逆OETF特性とOETF特性の積)を図8に示す。グラフの縦軸はディスプレイ上の輝度を示すが、PQでは正規化輝度値1が絶対輝度値10,000 cd/m²を表し、HLGではディスプレイのピーク白(例えば、1,500 cd/m²)を表す。いずれにせよ、両方式ともにSDR信号の100 cd/m²と比較すると非常に広い範囲の輝度情報を表現できることがわかる。

ただしこれは液晶ディスプレイが10,000 cd/m²の輝度を出せるバックライトシステムを有している場合で、通常コンシューマ向けの液晶ディスプレイでは消費電力や熱の問題から実現が難しい。このため最大輝度に制約をもつディスプレイにHDR信号の輝度情報をマッピングするトーンマッピング処理が必要となる。

前節で説明したバックライト制御を用いた液晶ディスプレイにおいては、表示する映像APL(Average Picture Level)によって最大輝度が動的に変化する(図9(a))。このため、

- (1) 高輝度階調のトーンマッピング処理
- (2) 動的に輝度変化するディスプレイへの輝度ゲイン処理が必要となる。

図9に動的に輝度変化するディスプレイへの輝度ゲイン

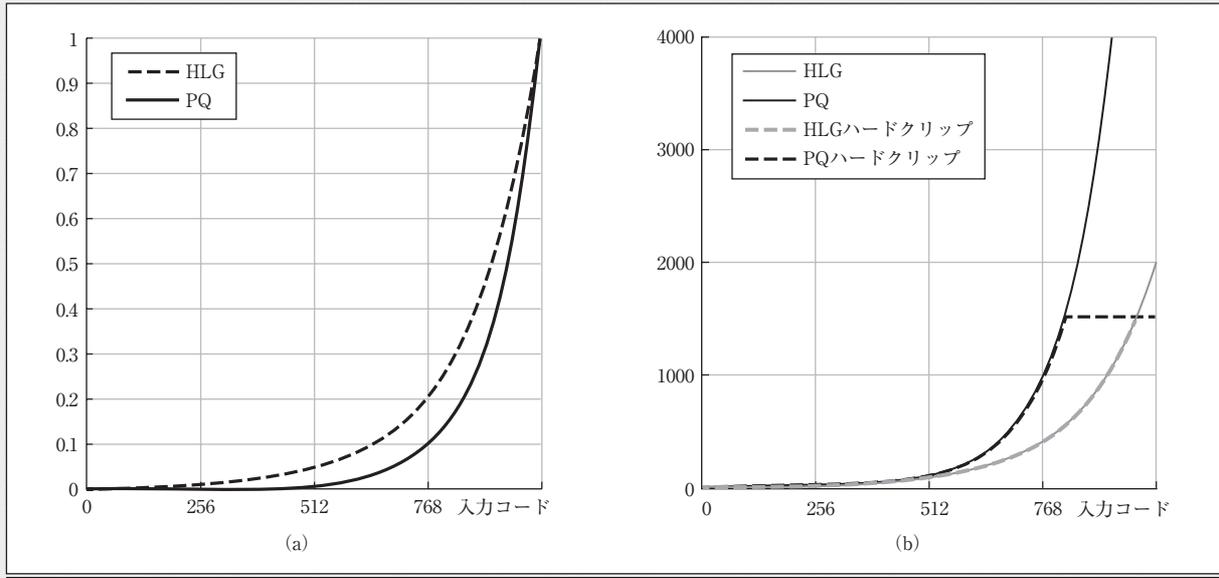


図8 PQ, HLG方式の輝度伝達関数

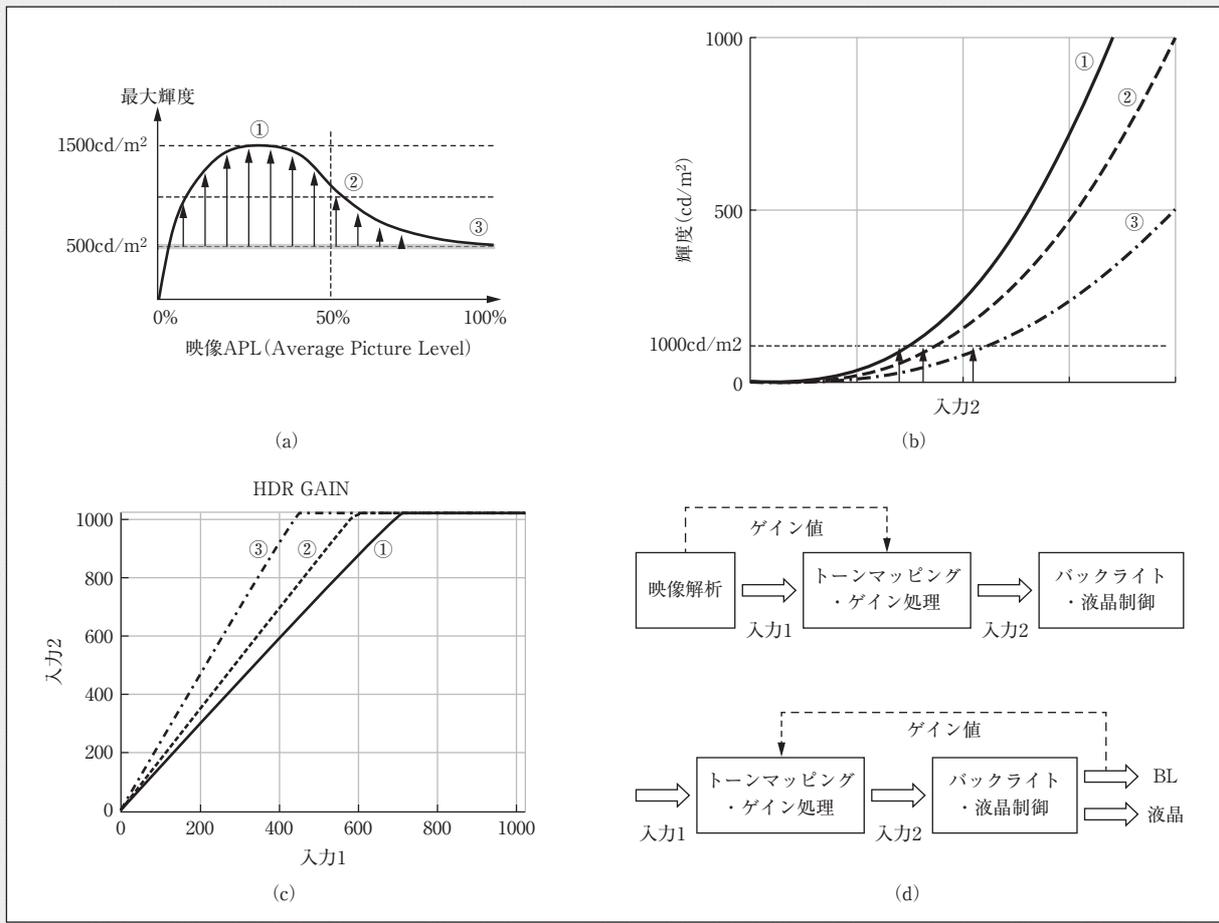


図9 動的に輝度変化するディスプレイへの輝度ゲイン処理の例

処理の一例を示す。表示する映像によってディスプレイの最大輝度が500, 1000, 1500 cd/m²と変化した場合(図9(a)①~③), 例えば, 100 cd/m²の階調の輝度を一定に保ったまま表示するには, 映像のAPLによって変化するバックライト輝度カーブ(図9(b))に合わせて入力映像に

対するゲイン調整を行う必要がある(図9(c)). 入力映像を解析した結果からフィードフォワード処理でゲイン調整するものや, バックライト制御の結果をフィードバックしてゲイン調整するものなど, 複数のゲイン調整方法が提案されている(図9(d)).

ゲイン調整の結果、ディスプレイの最大輝度を超える信号についてはクリッピング処理を行う。クリッピング処理についても、ハードクリップ、ソフトクリップなどいくつかの方法が考えられる。図8 (b) の点線が、ハードクリップによる高輝度階調のトーンマッピング後の輝度グラフを示している。

この例では1,500 cd/m²以上のHDR信号については液晶ディスプレイの表示性能の限界のため、信号が持つ輝度情報を正確に表示することができない。このため高輝度、高効率のバックライトシステムや高効率の電源を構成することが、液晶ディスプレイでの高ダイナミックレンジ表示技術では重要となる。

5.3 8K HDRディスプレイの実現

2011年に、世界初の85インチの8K液晶ディスプレイが開発された¹⁹⁾。このディスプレイは、RGB LEDを直下型バックライトとして用いることで、ディスプレイ輝度300 cd/m²以上が実現された。さらに2015年には、IGZOバックプレーン技術を適用し、8K 120 Hz駆動で高輝度1000 cd/m²でBT.2100 HDR信号に対応した8Kディスプレイが実用化されるにいたった^{9) 10)}。表3に、このディスプレイの仕様を示す。この液晶ディスプレイは、8K解像度、フレームレート120 Hz、色域BT.2020 79%、HDR対応1,000 cd/m²の他、リアル10bitで信号処理により12bit相当の表示ビット数を実現している。

6. むすび

本稿では、現在実用化されている液晶ディスプレイについて、従来映像フォーマットに対してUHD映像フォーマットで拡張された解像度、高フレームレート、広色域、および高ダイナミックレンジを実現する表示系の技術や課題について解説した。

本稿で述べた最新の表示技術は、2016年8月より開始されている4K/8K「スーパーハイビジョン」試験放送に対応して全国のNHKの放送局に配備された、85インチ液晶ディスプレイに搭載され実用化されている。

しかしこの実用化を通じて、本稿にも述べたいいくつかの課題が浮き彫りにされている。サイズ展開などの、幅広い普及のステージに向けた努力に加え、基礎的な研究開発により、今後これらの課題が解消されることを願って止まない。

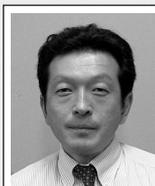
また、本稿では述べなかったが、有機ELディスプレイに代表される新世代表示技術の、8Kでの実用化についても注目していく必要があろう。

(2017年7月2日受付)

〔文 献〕

1) M. Sugawara, et al.: "Ultra-high-Definition Video System with 4000 Scanning Lines", SMPTE Motion Imaging, 112, pp.339-346 (2003)
 2) ITU-R, Recommendation BT.2020-2: "Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange" (2015)

3) ITU-R, Recommendation BT.2100-0: "Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme exchange" (2016)
 4) 西田: "UHD映像の概要", 映情学誌, 71, 2, pp.216-222 (2017)
 5) T. Hatada, et. al.: "Psychophysical analysis of the "sensation of reality" induced by a visual wide-field display", SMPTE J., 89, pp.560-569 (1980)
 6) K. Masaoka, et. al., : "Sensation of realness from High-Resolution Images of Real Objects", IEEE Trans. Broadcasting, 59, pp.72-83 (2013)
 7) T. Fujine, et. al.: "Real-Life In-Home Viewing Conditions for Flat Panel Displays and Statistical Characteristics of Broadcast Video Signal", Japanese Journal of Applied Physics, 46, 3B, pp.1358-1362 (2007)
 8) S. Yamada, et. al.: "Development of a 27-in. 8K x 4K Liquid-Crystal Display Utilizing an InGaZnO TFT Backplane", SID Digest, 37-4L, pp.480-483 (2016)
 9) <http://www.nhk.or.jp/pr/keiei/shiryuu/kaichou/2015/09/006.pdf> (2015)
 10) T. Kumakura, et al.: "Development of a Novel Wide-Gamut 8K 120Hz LCD Complying with ITU-R BT.2020", SID Digest, pp.1070-1073 (2015)
 11) K. Masaoka, et al.: "Design of Primaries for a Wide-Gamut Television Colorimetry", IEEE Trans. Broadcast., 56, 4, pp.452-457 (2010)
 12) D.S. Park, et al. "A New Wide-Gamut RGB Primary Set and Efficient Color Encoding Methods for Ultrahigh-Definition Television (UHDTV)", Proceedings of the IEEE 2013, 101, 1, pp.18-30 (2013)
 13) <http://www.nhk.or.jp/pr/marukaji/m-giju394.html>
 14) J. Chen, et. al.: "Quantum Dots: Optimizing LCD Systems to Achieve Rec. 2020 Color Performance", SID digest, 46, 1, pp.173-175 (2015)
 15) K. Yoshimura, et al.: "White LEDs Using Sharp β -sialon:Eu Phosphor and K₂SiF₆:Mn Phosphor for Wide-Color Gamut Display Application", Proceedings of IDW 2015, PH1-4L, pp.504-505 (2015)
 16) H. Chen, et al.: "Locally Pixel-Compensated Backlight Dimming for Improving Static Contrast on LED Backlit LCDs", SID Digest, pp.1339-1342 (2007)
 17) 増田ほか: "大画面液晶テレビ用超薄型タンデムLEDバックライト", 映情学誌, 64, 10, pp.1482-1488 (2010)
 18) K. Fujiwara, et al.: "PWM Limit Control Method and Block Contrast Ratio for Local-Dimming Backlights", IDW09, Poster, pp.1513-1516 (2009)
 19) T. Kumakura, et al.: "Development of Super Hi-Vision 8Kx4K Direct-View LCD for Next Generation TV", SID digest, pp.780-783 (2012)



藤根 俊之 1985年、東北大学工学部応用物理学科卒業。同年、シャープ(株)入社。2001年より、液晶テレビ開発に従事し、2014年より、8K液晶ディスプレイ開発に従事。博士(工学)。正会員。



櫻井 涼二 1995年、豊橋技術科学大学大学院情報工学専攻修了。同年、シャープ(株)入社。LSIのCAD開発、高位合成の研究開発を経て、2007年より、液晶パネルコントローラ、バックライト制御LSIの開発に従事。2015年より、8KディスプレイにおけるHDR技術開発を担当し、現在に至る。



吉田 脊弘 1986年、長岡技術科学大学大学院修士課程修了。同年、シャープ(株)入社。8Kを中心とした次世代映像システムの幅広い研究開発に従事。工学博士。正会員。

UHD映像の伝送系

正会員 田中祥次†

表1 放送用伝送路の特性

メディア	衛星放送		地上放送	ケーブルテレビ	
	狭帯域	広帯域		HFC	FTTH
周波数	12.2~12.75 GHz	11.7~12.2 GHz	470~710 MHz	90~770 MHz	90~2071 MHz
占有帯域幅	27 MHz	34.5 MHz	6 MHz	6 MHz	地上・衛星放送と同じ
偏波	水平・垂直	右旋・左旋	水平・垂直		
受信形態	固定	固定	固定・移動	固定	固定
マルチパス	無	無	有	無	無
増幅器等による歪み	非線形増幅によるAM-AM変換, AM-PM変換	非線形増幅によるAM-AM変換, AM-PM変換	線形領域で増幅	マルチキャリア増幅による相互変調歪	マルチキャリア増幅やE/O, O/E変換による相互変調歪
変調方式	位相変調	振幅位相変調	振幅位相変調-OFDM	振幅位相変調	振幅位相変調, 位相変調

1. まえがき

4K・8KのUHD映像¹⁾を放送として一般家庭まで送り届けるためには、映像符号化による情報の圧縮が必須であるが、圧縮後の情報は、衛星放送、地上放送およびケーブルテレビなどの伝送路の特性に応じた伝送方式により放送局から送出および送信される。

本稿では、UHD映像を各家庭まで伝送するために導入された技術について解説する。

2. デジタル放送方式の経緯

日本のデジタル放送は、1996年の狭帯域CSデジタル放送の開始を皮切りに、2000年にBSデジタル放送、2002年に広帯域CSデジタル放送、2003年に地上デジタル放送が順次開始された。ケーブルテレビは1998年のデジタルケーブルテレビ開始以降、放送のデジタル化に伴い本格化した。各伝送方式は高精細映像(HDTV)が伝送可能な伝送容量を確保するために、帯域幅、受信形態および伝送路で用いられる増幅器の特性等、それぞれの伝送路の特性に適した変調方式を採用している。表1に各放送用伝送路の特性を示す。これらの特性は、UHD映像の伝送におい

ても基本的には変わることはなく、表1に示す各伝送路の特性に応じてUHD映像を伝送するための新しい技術開発が行われた。次節以降ではUHD映像の放送方式のうちの主に伝送方式について、衛星放送およびケーブルテレビに関しては国の技術基準に反映されている方式について、地上放送に関しては、現時点での暫定仕様について概要を解説する。

3. 衛星デジタル放送

情報通信審議会情報通信技術分科会放送システム委員会において、周波数帯域幅34.5 MHzの衛星放送(以下、広帯域伝送)を対象とした高度広帯域伝送方式(ISDB-S3)および周波数帯域幅27 MHzの衛星放送(以下、狭帯域伝送)を対象とした高度狭帯域伝送方式を利用した超高精細度テレビジョン放送システムに関する技術的条件が2013年5月より検討され、2014年3月に答申された²⁾。答申に基づき、7月に国の技術基準としての省令・告示が公布されるとともに、電波産業会(ARIB)において、より詳細に規定する民間標準規格^{3) 4)}が策定された。また、ISDB-S3は勧告ITU-R BO.2098⁵⁾として国際標準化された。

3.1 狭帯域伝送における伝送路符号化方式³⁾

狭帯域伝送における超高精細度テレビジョン放送は、現行の高度狭帯域CSデジタル放送の伝送路符号化方式を採用した。8PSK(LDPC符号化率2/3)のとき、一つの放送衛星中継器(帯域幅27 MHz)で約45 Mbpsの伝送容量を確保し、

† NHK 放送技術研究所

"Picture Quality Enhancement Technologies Supporting UHD (5): Transmission Systems for Ultra High Definition Television" by Shoji Tanaka (NHK Science and Technology Research Laboratories, Tokyo)

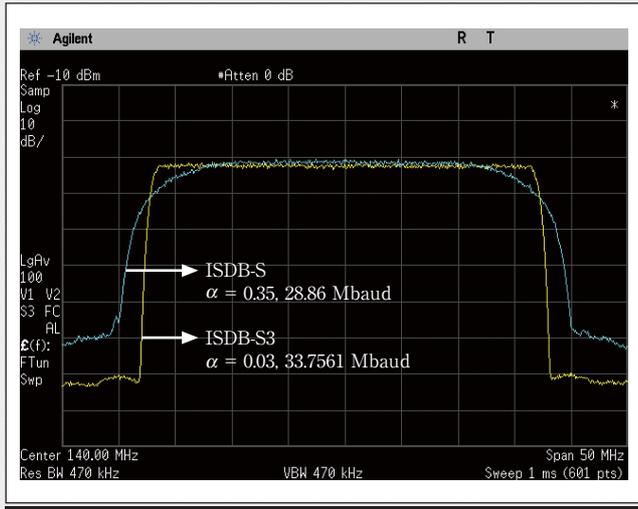


図1 送信スペクトル

High Efficiency Video Coding (HEVC/H.265) 方式により圧縮符号化された4Kを1番組放送することが可能となる。

3.2 広帯域伝送における伝送路符号化方式 (ISDB-S3) ⁴⁾

広帯域伝送における超高精細度テレビジョン衛星放送は、8K放送が可能となる伝送容量への拡大に向けて、新しい伝送路符号化方式ISDB-S3を規定した。ISDB-S3の主な特徴は以下の通りである。

3.2.1 伝送容量の拡大

波形整形フィルタのロールオフ率0.03の採用により、現行方式のISDB-S (ロールオフ率0.35) に比べ、スペクトルが平坦な領域の広帯域化と帯域端の急峻な減衰特性を実現することで送信電力を占有帯域幅内に効率良く集中し、シンボルレートを28.86 Mbaudから33.7561 Mbaudまで高速化した。送信スペクトルを図1に示す。

誤り訂正符号は、内符号としてLow Density Parity Check code (LDPC) 符号、外符号としてBCH符号を採用した。LDPC符号については、検査行列において、エラーフロアの発生要因であるサイクル4やサイクル6といった検査行列内の1の要素位置によって形成される周期構造を極力除去する最適設計を行った。また、変調方式としてAmplitude and Phase Shift Keying (APSK)を採用することで周波数利用効率を向上させた。LDPC復号後の誤り率特性が最適となるようにシンボル点配置を設計してトータルでの伝送性能の向上を図った。16APSKと符号化率7/9の組合せのときのシンボル点配置を図2に示す。この組合せのとき、占有帯域幅34.5MHzを満たしつつ、一つの放送衛星中継器で約100 Mbpsの伝送容量を確保し、HEVC/H.265方式により圧縮符号化された4Kを3番組、8Kを1番組放送することが可能となる²⁾。

図3に、本方式で採用する変調方式と誤り訂正符号の組合せについての伝送容量と所要CN比との関係を示す。図3に示す関係から、放送事業者は、所望の伝送容量とサービス時間率(所要C/Nにより決まる)に応じて変調方式と誤

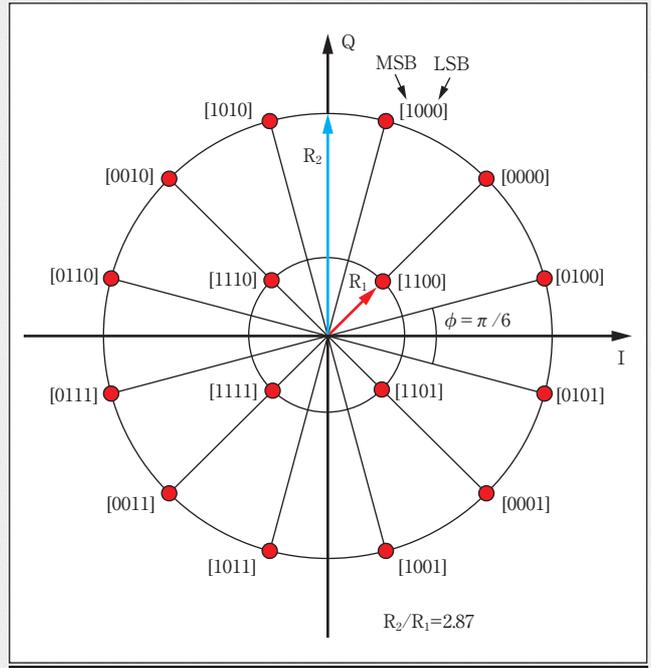


図2 16APSK符号化率(7/9)のシンボル点配置

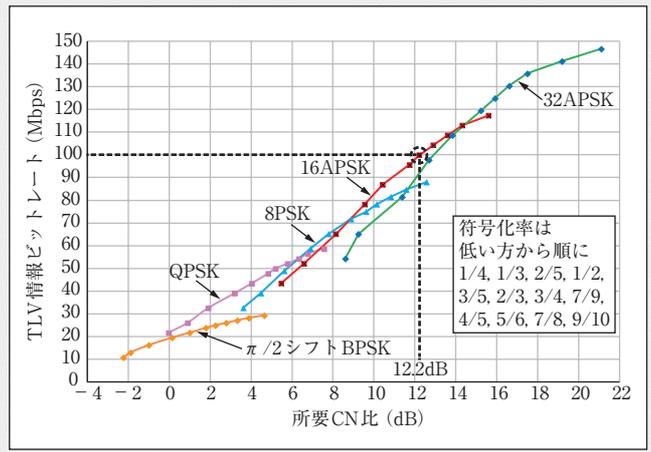


図3 所要CN比と伝送容量の関係

り訂正符号化率の組合せを選択することができる。一例として、16APSK、符号化率7/9とすることで、8K放送に必要な100 Mbpsの伝送容量を確保するための所要CN比は12.2 dBである。この場合、45 cmの受信アンテナにより東京で受信したときの年間サービス時間率は99.9%以上を確保できる。なお、変調方式と誤り訂正符号化率の組合せは、伝送制御信号であるTransmission and Multiplexing Configuration and Control (TMCC) 信号により放送事業者が選択可能である。

3.2.2 可変長パケット伝送の実現

TMCC信号に、フレーム構成において格納されるデータパケットの開始および終了ポイントを示すポイント情報を追加することで、MPEG-2 TSに加えてTime Length Value (TLV) に対応し、IPパケットの効率的な伝送を可能とした。

表2 ISDB-S3の概要

項目	内容
変調方式	$\pi/2$ シフトBPSK, QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK*
誤り訂正符号	内符号:LDPC符号(符号長44880) 外符号:BCH符号
TMCC信号による制御	・変調方式(符号化率)の制御 ・多重データフォーマット制御(MPEG-2 TS, TLV) ・階層伝送 ・緊急警報放送起動制御
フレーム構造	120スロット/フレーム
シンボルレート	33.7561 Mbaud
ロールオフ率	0.03
非線形伝送路での性能改善	伝送信号点配置情報による受信性能改善

*民間規格のみの規程で、省令では規定されていない

3.2.3 ISDB-Sの機能継承

降雨時にも安定した放送サービスの継続が可能な階層伝送の実現、TMCC信号による伝送制御、 $\pi/2$ シフトBPSK同期補強バースト信号による低C/Nでの同期強化、緊急警報放送起動制御など、現行放送方式の有する機能は継続して採用した。

3.2.4 衛星非線形特性による性能劣化改善

伝送信号点配置信号の導入により、衛星中継器の非線形性の影響があっても最適なLDPC復号を可能とした。

3.2.5 伝送路符号化部の構成

変調方式の切替えや複数の独立したストリーム(TSおよびTLVパケット)を柔軟に制御するために、スロットと呼ぶデータブロック単位と120のスロットからなるフレーム単位で信号処理を行う。変調方式・符号化率の指定やストリームIDの指定などの伝送制御はスロット単位で可能である。データ信号については、BCH符号による符号化、擬似ランダム符号によるエネルギー拡散、およびLDPC符号化が行われた後、TMCCにより指定した方式で変調される。TMCC信号についてもデータ信号と同様の処理を行うが、変調方式は $\pi/2$ シフトBPSKである。伝送信号点配置信号は、非線形増幅時の伝送特性劣化を抑制するためのパイロット信号として用いられ、データ信号と同じ方式で変調される。

以上をまとめたISDB-S3方式の概要を表2に示す。

4. 地上デジタル放送

2015年7月に総務省から公表された4K・8Kロードマップに関するフォローアップ会合第2次中間報告⁶⁾には、地上放送に関する取組として、UHDTV放送実現に向けた総合的な研究開発の取組と伝送実験等による技術的な可能性の検証について記載されている。現在、NHKが中心となって研究開発を進めており、超多値変調技術や水平・垂直偏波を同時に使用する偏波Multi-Input Multi-Output(MIMO)

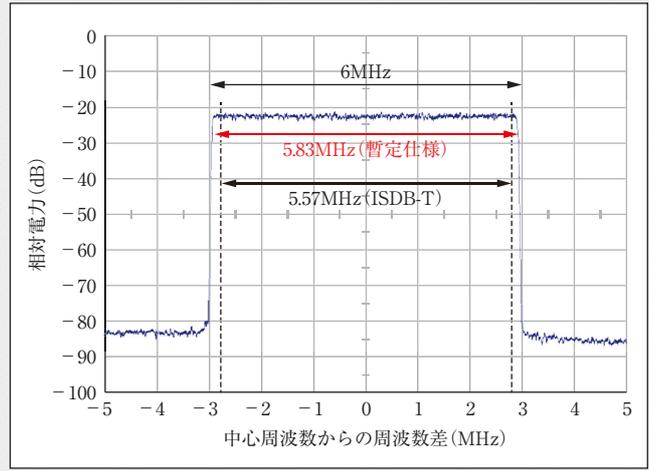


図4 暫定仕様の送信スペクトル(測定値)

技術などによる大容量化や、限られた地上放送用周波数の中での次世代地上放送の導入に向けた符号化Single frequency Network (SFN) 技術などを採用した暫定的な仕様(以下、暫定仕様)⁷⁾が提案されている。暫定仕様の主な特徴は以下の通りである。

4.1 伝送容量の拡大

暫定仕様では、地上波1チャンネルの周波数帯域幅である6MHzを36分割した1/6MHz(≒167kHz)を1セグメントとして、最大で35セグメントを使用できるようにしており、Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) 信号の伝送帯域幅をISDB-Tより約5%拡大した。試作変調装置の送信スペクトルを図4に示す。

また、Fast Fourier Transform (FFT) のポイント数をISDB-Tの8,192点から32,768点とすることで、OFDM信号の有効シンボル長が4倍長くなり、ガードインターバル(GI: Guard Interval)をISDB-Tと同じ126 μ sに設定した場合でも、伝送シンボル全体の時間長に占めるGIの割合(以下、GI比)は1/32とISDB-Tの1/4に縮小でき、伝送容量を約9%拡大できる。誤り訂正符号は、LDPC符号とBCH符号の接続符号を適用している。

搬送波の変調方式としてQuadrature Phase Shift Keying (QPSK)、16 Quadrature Amplitude Modulation (QAM)、64QAM、256QAM、1024QAM、4096QAMを採用した。16QAM以上の多値変調方式については、従来の均一コンスタレーションに加え、シンボル点の配置を不均一化することで伝送特性を改善する不均一コンスタレーション(NUC)を導入している⁸⁾。図5に、4096QAMのシンボル点配置を示す。各シンボル点に対するビット割当ては、グレイコード化したシンボル点配置を用いている。図6に、単一偏波を利用したときの1チャンネル(6MHz)当たりの伝送容量と所要CN比(計算機シミュレーション)の関係を示す。ISDB-Tと比較すると、同じ所要CN比で伝送容量を約10Mbps増やすことができ、同じ伝送容量で所要CN比を

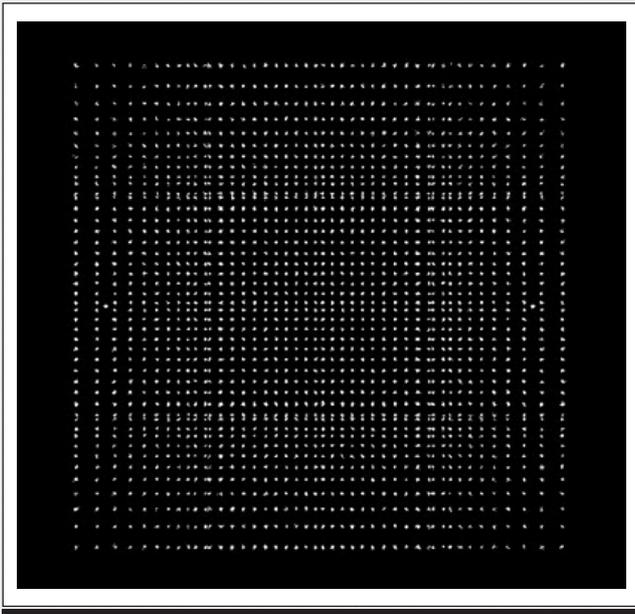


図5 不均一コンスタレーションの信号点配置例 (4096QAM)

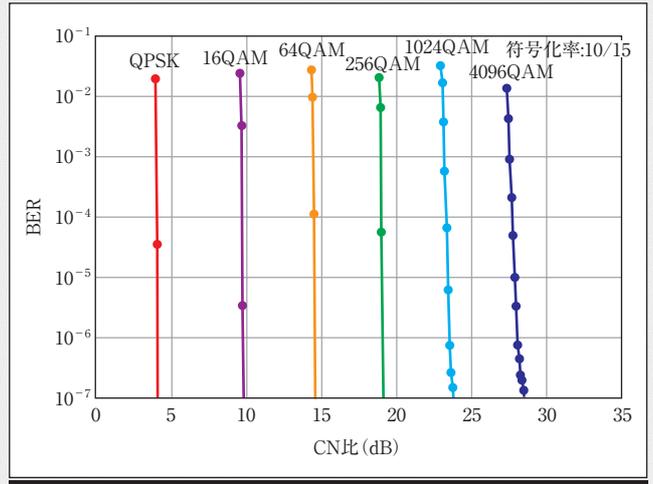


図7 CN比対BER特性

表3 次世代地上デジタル放送暫定仕様の概要

項目	内容		
FFTポイント数	8192	16384	32768
セグメント数	最大35		
セグメント帯域幅	167 kHz		
帯域幅	5.83 MHz		
搬送波総数	7561	15121	30241
搬送波変調方式	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM, 1024QAM, 4096QAM 均一コンスタレーション 不均一コンスタレーション		
有効シンボル長	1296 μ s	2592 μ s	5184 μ s
ガードインターバル比	1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64, 1/128		
誤り訂正符号	内符号	LDPC符号	
	外符号	BCH符号	

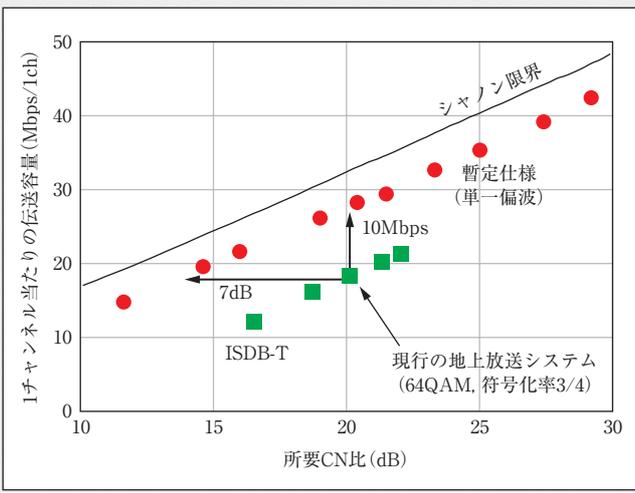


図6 伝送容量と所要CN比の関係

約7 dB低減することができる。直交偏波を同時に利用したMIMOシステムを用いると、伝送容量を最大2倍に増やすことができ、ISDB-Tに比べて2から5倍 (30~80 Mbps) となる大容量の情報が伝送可能となる⁹⁾。図7に、試作した変調・復調装置を用いたときのCN比対Bit Error Rate (BER) 特性を示す。

4.2 符号化SFN技術

次世代地上放送で超多値変調が用いられる場合においても、安定したSFNを構築できるように、暫定仕様では隣接する二つの送信所間の送信信号を時空間符号化して伝送する符号化SFN技術¹⁰⁾を検討している。従来のSFNは、二つの送信所から同じ周波数で同じ電波が送信されるため、二つの受信信号の電力差が小さく、逆位相で到着してしまうと、互いの信号を弱めあい、特に超多値変調では受信特性が劣化することがあった。一方、符号化SFN技術を用い

ると、二つの送信所から同じ周波数で互いに符号化された電波、つまり異なる電波が送信されるため、二つの送信所からの信号は弱め合うことはなく、超多値変調を用いても受信特性の劣化が少ない。この符号化SFN技術を用いることで、安定したSFNの構築が可能になる。

以上をまとめた暫定方式の概要を表3に示す。

5. ケーブルテレビ

超高精細度テレビジョン衛星放送の伝送方式 (ISDB-S3) の標準化に伴い、日本CATV技術協会 (JCTEA) において、ケーブルテレビによる再放送のための伝送方式の検討が開始された。伝送方式としては、FTTHによるBS-IFパススルー方式 (1.03~3.22 GHz) に加え、複数搬送波伝送方式¹¹⁾¹²⁾、DVB-C2¹²⁾ が提案され、実証実験等の検討が進められた。この結果は、情報通信審議会放送システム委員会での審議に反映され、2014年に答申¹³⁾された後、国の技術基準が策定された。その後日本ケーブルラボでは複数搬送波伝送方式の運用仕様の策定が行われた。また、複数搬送波伝送方

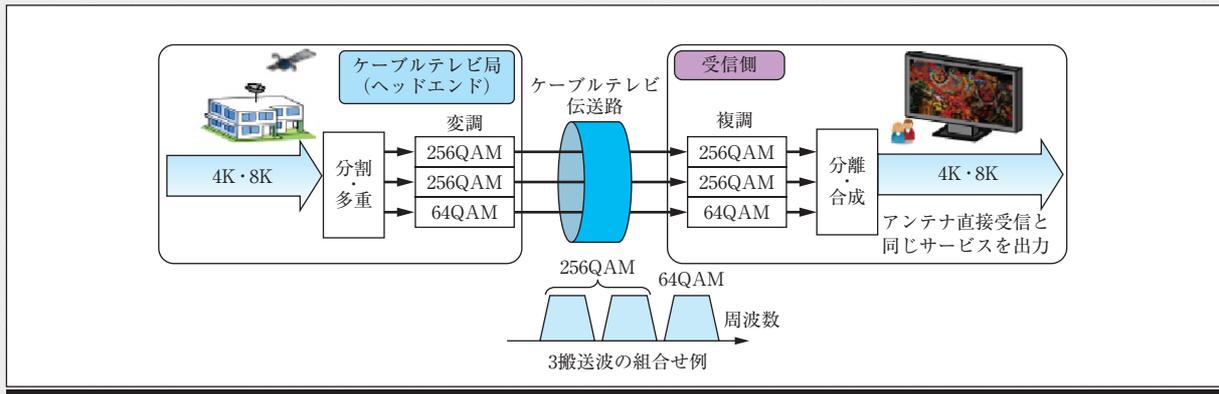


図8 複数搬送波伝送方式の概要

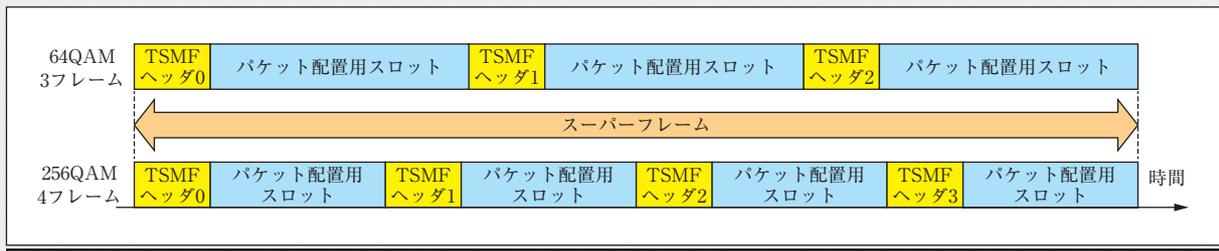


図9 スーパーフレームの構成例

式は勧告ITU-T J.183¹⁴⁾として国際標準化された。複数搬送波伝送方式の主な特徴は以下の通りである。

5.1 大容量信号の分割・合成による伝送

複数搬送波伝送方式は、現行のケーブルテレビとの親和性を担保しつつ、ISDB-S3方式の大容量伝送や可変長パケットなどへの対応を考慮して設計された。帯域幅34.5 MHzを利用して放送されるISDB-S3方式の伝送容量は約100 Mbpsである。複数搬送波伝送方式はこれを1チャンネルの帯域幅6 MHzのケーブルテレビで伝送するために、受信機で復調した4K・8Kのベースバンド信号をケーブルテレビの1チャンネルの伝送容量以下に分割し、それぞれをケーブル用多重フレーム Transport Streams Multiplexing Frame (TSMF)¹²⁾に多重化し、複数の搬送波で伝送する。受信機では、各搬送波を復調してTSMFを抽出し、同期合成することにより大容量信号を再生する。送信機での大容量信号の分割および受信機での同期合成に必要な情報は、TSMFヘッダ内に格納する。各搬送波の変調方式は各チャンネルの伝送品質に応じて選択可能であり、例えば、品質が高いチャンネルには256QAMを割当て、品質が低いチャンネルでは所要CN比が8 dB低い64QAMを割当てる。図8に複数搬送波伝送方式の概要を示す。多重フレームとして、現行のケーブルテレビ再放送で使用されているTSMFを用いることで現行のケーブルテレビ伝送システムとの親和性を考慮した。一方、受信機における合成では、64QAMの搬送波の信号と256QAMの搬送波の信号の伝送速度が異なるため、TSMFの1フレームの情報伝送に必要な時間が64QAMと256QAMで異なる。このため、64QAMと256QAMを混

表4 UHDケーブル伝送の変調方式の概要

項目	内容	
変調	64QAM	256QAM
入力信号	TSMFまたは分割TLVパケット	
誤り訂正	短縮化リードソロン符号(204, 188)	
インタリーブ	バイト単位畳込み(深さ12)	
ロールオフ率	13%	
帯域幅	6 MHz	
シンボルレート	5.274 Mbaud	

在して組合せた複数の搬送波の場合、TSMFのフレームヘッダを用いてフレームを同期させることができず、受信した信号を合成することができない。そこで、64QAMと256QAMの搬送波の信号を受信機で同期合成するために、64QAMと256QAMの伝送速度の整数比(3:4)によって決められた複数の多重フレームを単位とするスーパーフレーム¹²⁾を導入した。受信機で、同期合成に必要な“スーパーフレーム内のTSMFフレーム数情報”、“スーパーフレーム内のTSMFフレームの位置情報”をTSMFのフレームヘッダに格納して伝送することで、受信機では、スーパーフレーム単位で複数の搬送波の信号を正しく合成することが可能となる。図9にスーパーフレームの構成例を示す。

5.2 可変長パケットへの対応

ISDB-S3方式では可変長パケットへの対応としてTLV多重化方式が採用されているため、現行のケーブルテレビの多重フレームであるTSMFに多重するためにTLVパケットを分割・カプセル化(分割TLVパケット)¹²⁾する。分割

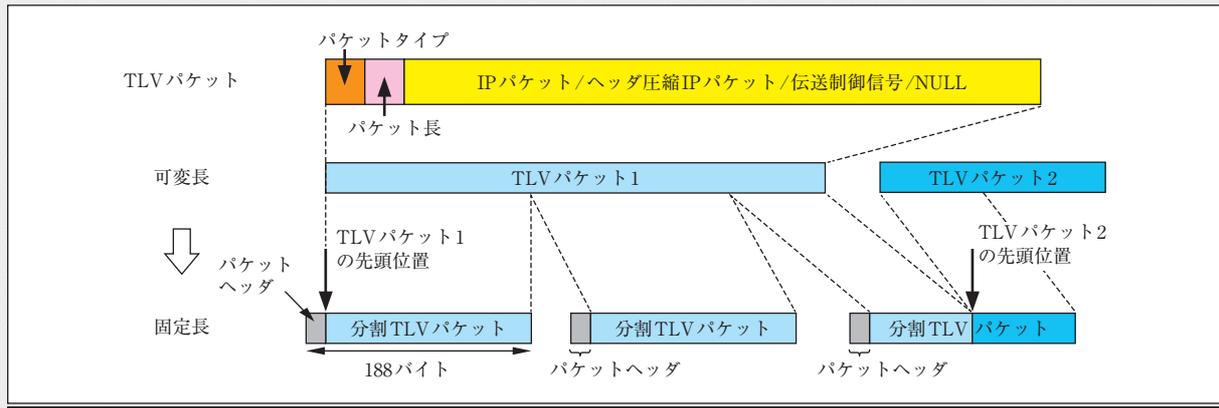


図10 可変長パケットのカプセル化

TLVパケットのヘッダに分割前のTLVパケットの先頭位置情報を格納することで、受信機側では、分割TLVパケットヘッダに格納している先頭位置情報とTLVパケット内に格納されているパケット長情報により元のTLVパケットを復元できる。分割TLVパケットのサイズを現行のMPEG-2 TSパケットと同じ188バイトとすることでTSMFフレームへの格納が可能となり、MPEG-2 TSパケットとの混在も可能となる。図10に可変長パケット(TLVパケット)のカプセル化の概要を示す。

6. むすび

UHD映像の放送については、2015年に東経124/128度通信衛星の27MHz帯域を利用した4K放送の実用放送が開始された。また、2016年に東経110度放送衛星の34.5MHzを利用した試験放送が始まっており、2018年には実用放送を開始する予定である⁶⁾。これに応じてケーブルテレビでのサービスも開始されつつある。これらの放送では、UHD映像や22.2chマルチチャンネル音響などが本稿で解説した伝送技術を用いて届けられ、家庭で臨場感や実物感のある放送を楽しむことができる。

今後は、地上デジタル放送でのUHD放送の実現に向けた研究開発の大いなる進展が期待される。

(2017年8月2日受付)

〔文 献〕

- 1) 西田幸博：“講座：UHDを支える映像の高画質化技術（第1回）UHD映像の概要”，映情学誌，71，2，pp.216-222（2017）
- 2) 情報通信審議会情報通信技術分科会情報通信審議会答申 諮問第2023号（平成26年3月25日）

- 3) ARIB STD B-1 3.1版：“CSデジタル放送用受信装置（望ましい仕様）”（2015/7）
- 4) ARIB STD B-44 2.1版：“高度広帯域衛星デジタル放送の伝送方式”（2016/3）
- 5) ITU-R Recommendation BO.2098-0：“Transmission system for UHDTV satellite broadcasting”（2016）
- 6) 総務省：“「4K・8Kロードマップに関するフォローアップ会合第2次中間報告」の公表”（平成27年7月30日）
- 7) 竹内ほか：“次世代地上放送に向けた暫定仕様の検討”，映情学年大，31A-1（2016）
- 8) 藤ほか：“次世代地上放送に向けた伝送技術－Non-Uniform Mappingによる超多値信号の伝送特性改善－”，映情学技報，38，5，BCT2014-30，pp.117-120（2014）
- 9) 齋藤ほか：“偏波MIMO-超多値OFDM方式を用いた8Kスーパーハイビジョン地上波伝送実験”，映情学技報，38，8，BCT2014-45，pp.53-56（2014）
- 10) 齋藤ほか：“熊本・人吉地区での次世代SFN実験”，映情学年次大，33D-2（2015）
- 11) Y. Hakamada, et al.：“UHDTV（8K）Distribution Technology and Field Trial on Cable Television Networks”，ITE Trans. On MTA，2，1，pp.2-7（2014）
- 12) JCTEA STD-002，6.1版：“デジタル有線テレビジョン放送多重化装置”（2017）
- 13) 情報通信審議会情報通信技術分科会情報通信審議会答申 諮問第2024号（平成26年12月9日）
- 14) Rec. ITU-T J.183：“Time-division multiplexing of multiple MPEG-2 transport streams and generic format of transport stream over cable television systems”（2016）



たなか しゅうじ
田中 祥次 1988年、NHK入局。現在、放送技術研究所伝送システム研究部上級研究員。衛星搭載アンテナ、放送衛星システムの研究開発および衛星放送の伝送方式の標準化に従事。正会員。

UHD映像の処理系

正会員 峯澤 彰†

1. まえがき

UHD映像は4K解像度で7.46 Gbps以上と膨大な情報量を有しており、これを放送やパッケージメディア等のサービスで扱うには10 Mbpsのオーダまでに映像信号を圧縮する必要がある。国際標準化では30年来このような市場での圧縮要求を受けて数々の映像符号化方式を策定してきており、UHD映像においても先の要求を満たす方式の策定を実現している。

本稿では、UHD映像サービスを実現可能とする処理技術として、UHD映像の映像符号化技術について、関連する標準化活動を含めて解説する。

2. UHD映像の処理系と標準化

2.1 UHD映像に対する圧縮要求と国際標準化

デジタル放送やパッケージメディア等のデジタル映像サービスの発展には、ITU-T (International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector) と MPEG (Moving Picture Experts Group, 正式名称 ISO/IEC JTC1/SC29/WG11) による国際標準化を中心とした映像符号化方式の高効率化が大きく寄与している。図1に国際標準化の変遷を示す。代表的な国際標準規格として、現在の日本のデジタル放送やDVD等に採用され、デジタル映像サービスの拡大に多大な貢献を果たしたMPEG-2¹⁾や、MPEG-2の2倍の圧縮効率を有し、インターネット動画、

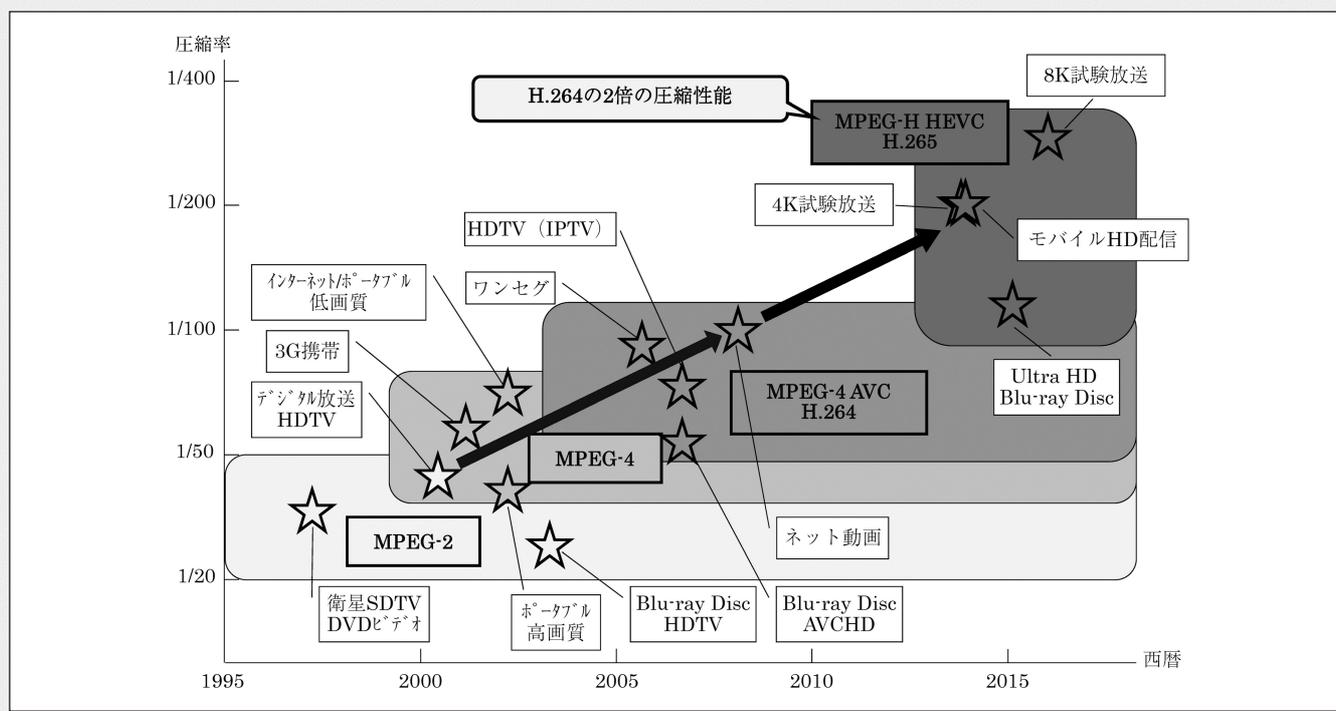


図1 国際標準化の変遷

†三菱電機株式会社 情報技術総合研究所
 "Picture Quality Enhancement Technologies Supporting UHD (Final study); Video Coding Technologies for UHD Video" by Akira Minezawa (Information Technology R & D Center, Mitsubishi Electric Corporation, Kanagawa)

ビデオオンデマンド、テレビレコーダ、Blu-rayパッケージ等で幅広く利用されているAVC/H.264²⁾がある。しかし、これらの映像符号化方式は主に圧縮効率の問題からHD解像度までを対象としており、4K/8Kと呼ばれるUHD映像の実用化においては、より高効率に圧縮可能な新たな国際標準方式の規格化が求められていた。

本要求を受けて、2010年4月よりAVC/H.264の2倍の圧縮効率を目標として新たな映像符号化方式HEVC (High Efficiency Video Coding) /H.265³⁾の標準化活動がITU-T SG16/WP3 (ITU-T映像符号化方式作業部会 VCEG (Video Coding Experts Group)の上部組織)とMPEGの標準化共同作業班JCT-VC (Joint Collaborative Team on Video Coding)によって開始され、目標の圧縮性能を実現する形で2013年に第一版の規格化を完了している。第一版は4K/8K放送やモバイル映像配信サービス等、最も広く活用されることが想定されるMain/Main10プロファイルや、静止画圧縮に対応したMain Still Pictureプロファイルが策定されている。

さらに、第一版規格化完了後も規格拡張方式の標準化作業が進められ、色密度や画素階調を拡張する高品質拡張 (Range Extensions: RExt)、多様な空間解像度のサブストリームから成る階層符号化を実現するスケーラブル符号化拡張 (SHVC)、各視点の映像をサブストリームとして符号化する多視点映像符号化拡張 (MV-HEVC)、奥行き情報を含む3次元映像を符号化する3次元映像符号化拡張 (3D-HEVC)、PC・ゲーム画面向けのスクリーンコンテンツ符号化拡張と、複数の規格拡張方式が規格化された⁴⁾。表1にHEVC/H.265の諸元をまとめる。

2.2 HEVC/H.265の業界標準への適用

近年、HEVC/H.265のUHD映像サービスへの適用が拡大しており⁵⁾、放送システム規格を規定するAdvanced

表1 HEVC/H.265諸元

項目	仕様
空間解像度	最大8192×4320画素 (レベル6.2)
ビット深度	8～16ビット
色フォーマット	4:0:0/4:2:0/4:2:2/4:4:4
フレームレート	最大120fps (レベル6.2)
機能	スケーラブル符号化、多視点映像符号化、3次元映像符号化

Television Systems Committee standards (ATSC) や Digital Video Broadcasting (DVB) でのUHDテレビ (UHDTV) 映像放送規格⁶⁾⁷⁾や、Blu-ray規格を定めるBlu-ray Disc Association (BDA) でのUHD映像をサポートする“Ultra HD Blu-ray Disc”⁸⁾規格にHEVC/H.265が映像符号化方式として採用されている。日本国内においても、2018年より実用放送が開始される国内4K/8K放送の映像符号化方式としてHEVC/H.265が採用されている⁹⁾。このように、MPEG-2の4倍、AVC/H.264の2倍の圧縮性能を有するHEVC/H.265はUHD映像サービスの実現への大きな原動力の一つとなっている。

3. HEVC/H.265概要

原信号レートにして4K解像度で7.46 Gbps (60 Hz/10bit)、8K解像度で29.9 Gbps (60 Hz/10bit)にもなるUHD映像を伝送・蓄積可能とするために、高品質を維持しながら映像信号の高圧縮を実現する必要がある。HEVC/H.265は当初よりUHD映像を評価画像として採用し、HD解像度以下の低解像度映像からUHD映像までの高精細映像に対して効率的に符号化可能な方式の実現を目指して標準化が行われた。

図2に符号化処理のブロック図を示す。HEVC/H.265はAVC/H.264等と同様に、符号化対象信号を予測して得られ

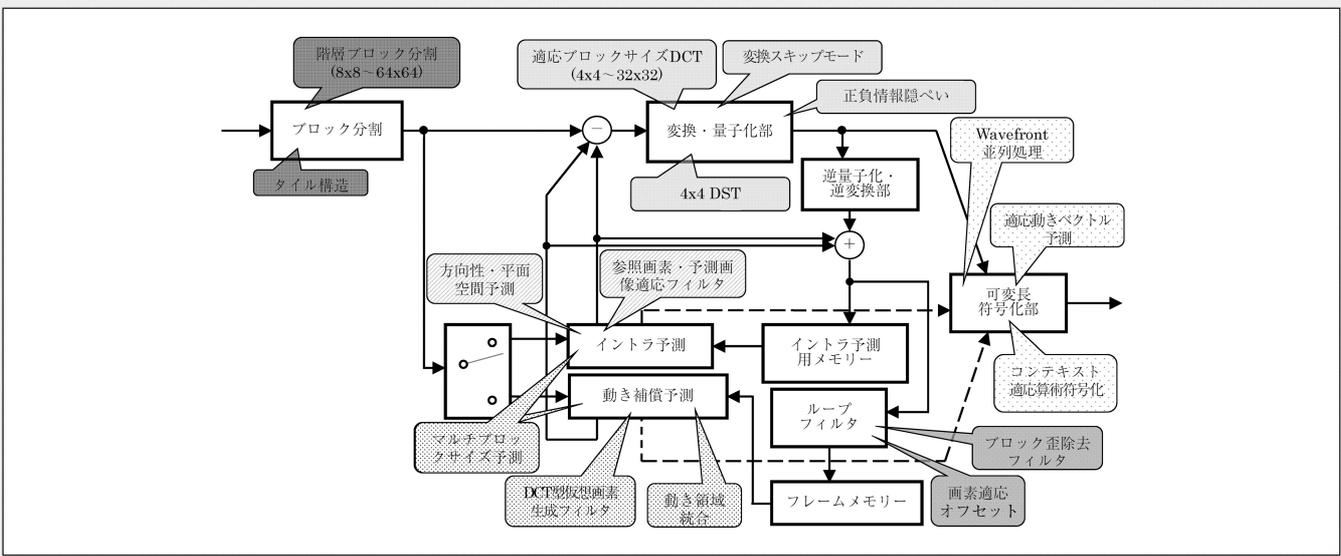


図2 HEVC/H.265符号化ブロック図

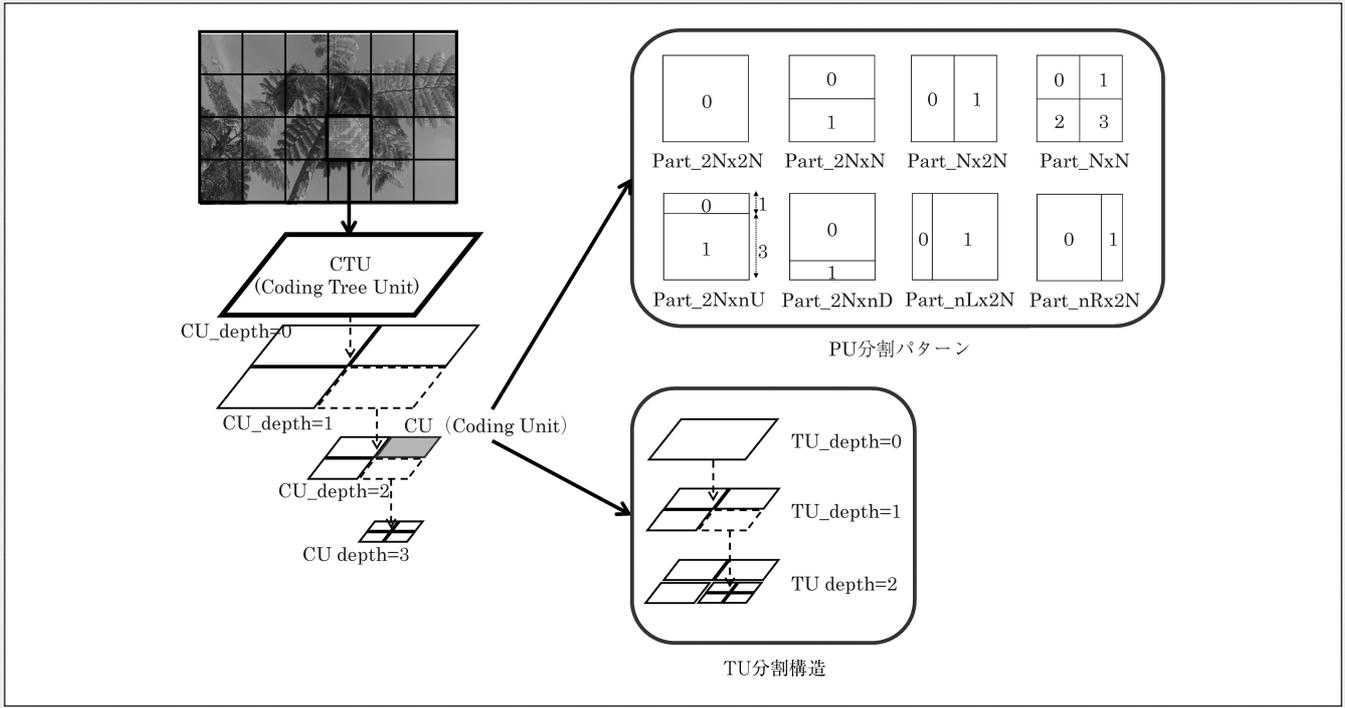


図3 適応ブロック分割

た予測残差信号を変換・量子化し、変換・量子化後の予測残差信号をエントロピー符号化するハイブリッド符号化の構成を踏襲しており、各処理ブロックの性能改善によってAVC/H.264比2倍以上の圧縮性能を実現している。本章では、特にUHD映像に対する符号化効率改善への寄与という視点でHEVC/H.265の主要技術について述べる^{10) 11)}。

3.1 適応ブロックサイズ符号化

HEVC/H.265では、まず映像フレームをCTU (Coding Tree Unit) と呼ばれる正方ブロックに分割する。CTUサイズは16×16画素、32×32画素、64×64画素から選択可能であり、CTUを起点に再帰的に四分木分割したCU (Coding Unit) 単位に符号化処理を実施する(図3)。さらに、CUを予測、変換処理の単位に分割することで、多様な大きさのブロックで予測、変換処理を行うことができる。UHD映像では同一シーンを撮像する場合に低解像度映像に比べて画素間相関が高くなるため、従来のAVC/H.264の処理単位である最大16×16画素の正方ブロックよりも大きいCUによる予測、変換処理によって符号化効率を高めることができる。一方、予測、変換処理の選択肢増加に伴って適切な組合せを探索するのに要する演算量が増加するため、高い解像度を持つUHD映像をリアルタイムで符号化するためには、エンコーダの設計に工夫を要する。

3.2 動きパラメータ符号化

ブロック単位に動き予測を行う映像符号化では、ブロック毎に動き情報を符号化する必要がある。細かい絵柄や複雑な動きのある領域に対しては、動き予測のブロックサイズを小さくすることで予測効率を高めることができるが、動

きパラメータの符号量は増加する。動きパラメータを高効率に符号化するため、HEVC/H.265では動きパラメータの符号化に関してマージモード、適応動きベクトル予測という技術が導入されている。マージモードは、図4に示す通り、符号化対象の動きパラメータを近傍の予測ブロックから引き継いで使用するモードであり、動きが同一の領域を統合し、動きパラメータの情報を削減する効果がある。マージモードで最適な符号化ができない場合は、適応動きベクトル予測によって動きベクトルの符号化を行う。適応動きベクトル予測は、近傍にある複数の符号化済み動きベクトルの中から予測ベクトルを適応的に選択する技術である。予測ベクトル候補は空間近傍ベクトルだけでなく、時間近傍ベクトルも含める。これらの技術により、動きベクトルの符号化効率が改善されている。

3.3 イントラ予測

HEVC/H.265のイントラ(画面内)符号化は、AVC/H.264に採用された多方向対応の適応空間予測を踏襲しており、イントラ予測モード等のパラメータの符号量を抑制するため、動き予測と同様、さまざまなブロックサイズでの予測が可能となっている。予測効率を高めるため、予測対象ブロック毎に図5に示す35種類の予測モードから選択可能となっている。また、予測モードは動きパラメータと同様に近傍の符号化済み予測モードによる予測符号化を行う。

3.4 並列処理との親和性

HEVC/H.265では、処理画素数の多いUHD映像を対象としていることから、符号化・復号処理を並列化しやすいように符号化データ構造に工夫がなされている。AVC/H.264

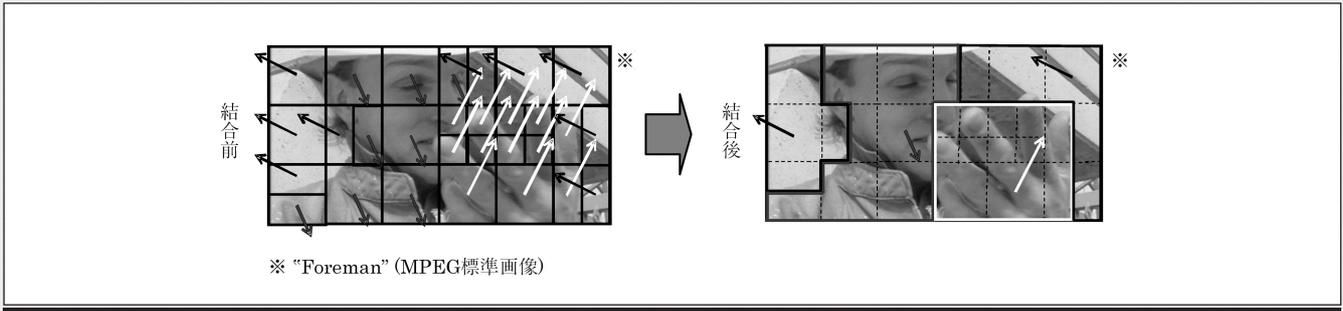


図4 マージモード

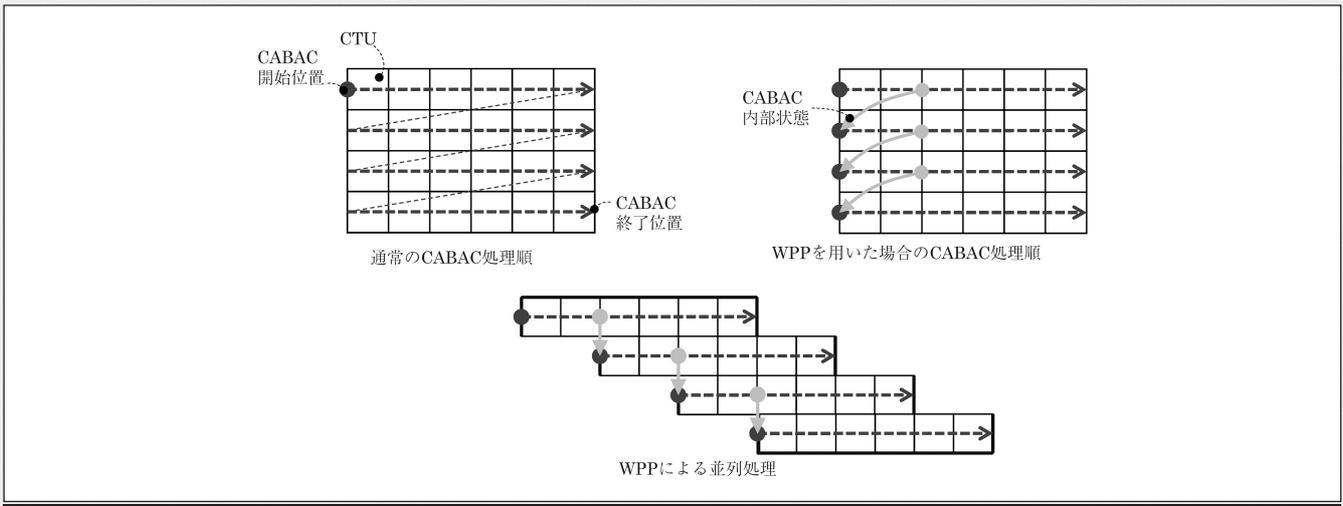


図6 Wavefront Parallel Processing

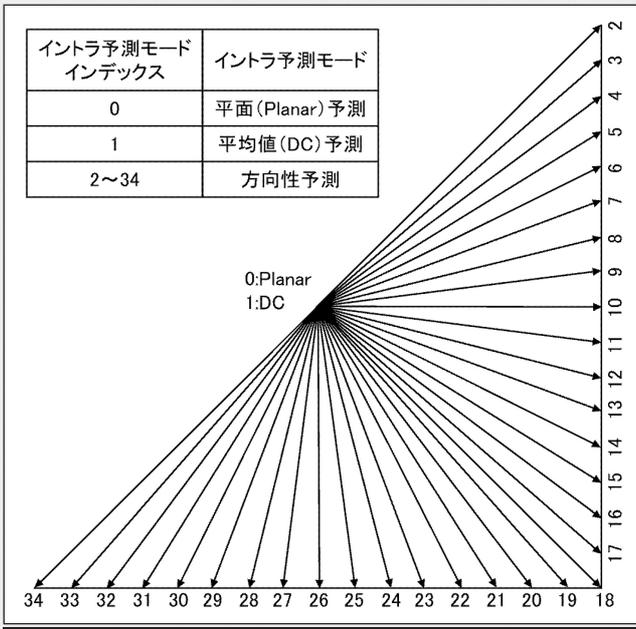


図5 イントラ予測モード

る。さらに、HEVC/H.265では図6に示すように、エンタロピー復号処理(CABAC: Context Adaptive Binary Arithmetic Coding)を1CTUライン毎にパイプライン化するWavefront Parallel Processing(WPP)という機能も有している。これにより2CTUずつずれた並列処理を可能としている。

3.5 リアルタイム符号化

リアルタイム符号化の実現には、AVC/H.264の約2~5倍と言われるHEVC/H.265の符号化演算量の低減を図る必要がある。例えば、CTUサイズを64×64画素に設定した場合、イントラ予測ではブロックサイズの候補として4×4画素、8×8画素、16×16画素、32×32画素、64×64画素の5種類が存在し、ブロックサイズごとに35種類の予測モードが用意されている。CTUサイズを最大の64×64画素としても1フレームが4K映像で2040個、8K映像で8160個に上るCTUで構成されるため、全CTUに対してブロックサイズと予測モードの最適な組合せを総当りで探索すると演算量が膨大となる。リアルタイム符号化の実現には、上記組合せ決定処理をはじめとした各処理の低演算量化および並列化アルゴリズムの開発が必要であるが、すでに8K映像においてもリアルタイム符号化が実現されている¹²⁾¹³⁾。

にもあるスライス構造はCTUのラスタスキャンに基づいて分割されている他、1フレームを画面内で複数の矩形領域(サブピクチャ)に分割して、それぞれに独立な符号化・復号処理を行うことができるタイル構造にも対応してい

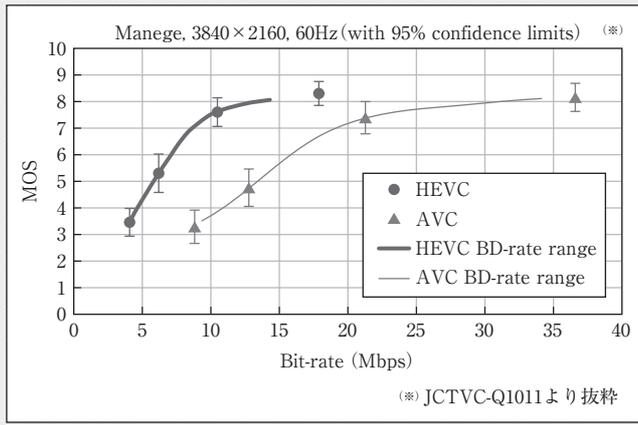


図7 主観評価結果の例

4. UHD映像に対する符号化性能

本章では、HEVC/H.265のUHD映像に対する符号化性能について紹介する。

HEVC/H.265の基本性能確認として、JCT-VC公式の性能評価実験(Verification Test)が実施されている¹⁴⁾。本実験では、1世代前の国際標準方式であるAVC/H.264との主観画質比較を行っている。図7は4K映像ManegeにおけるAVC/H.264とHEVC/H.265の主観評価結果を示す。図7に示す通り、HEVC/H.265はすべてのビットレートにおいて主観画質が大幅に改善していることが確認できる。評価の結果、平均でUHD映像では約60%、HD映像では約57%の符号化効率が確認されている。なお、主観画質の評価指標として平均評価値(MOS: Mean Opinion Score)と呼ばれる各被験者の品質評価値の平均値を用いており、本実験では評価映像自身の絶対評価を行い、表2(a)に示す11段階劣化尺度¹⁵⁾を品質評価値として用いている。

さらに、UHD映像に対する実運用のための性能評価も行われている。国内放送・通信システム規格を規格化する電波産業会(ARIB)にて、UHDTV放送システムを検討する上でHEVC/H.265によるUHDTV映像の所要ビットレートについて調査を実施している¹⁶⁾。表3に評価結果を示す。本表は各符号化ビットレートでのテスト画像のMOSの分布を示す(テスト画像数: 10)。なお、本実験では二重刺激劣化尺度(DSIS: Double Stimulus Impairment Scale)法による原画像との相対評価を行い、表2(b)に示す5段階劣化尺度¹⁵⁾を品質評価値としたMOSを用いている。MOS=3.5が画質の許容限と言われ、放送品質を満たすための所要レートとして、ほぼすべての映像で許容限以上となる表4に示すビットレートに定めている。本結果より、UHDTV映像については4K解像度で1/250程度、8K解像度で1/370程度の圧縮率まで放送品質を担保したまま圧縮できることがわかる。この技術的進歩により、HEVC/H.265を利用した国内4K/8K放送の試験放送が実現しており、2018年には実用放送が開始されようとしている¹⁷⁾。

表2 品質評価値

(a) 11段階劣化尺度

評点	意味
10	Denotes a quality of reproduction that is perfectly faithful to the original. No further improvement is possible.
9	Excellent
8	
7	Good
6	
5	Fair
4	
3	Poor
2	
1	Bad
0	Denotes a quality of reproduction that has no similarity to the original. A worse quality cannot be imagined.

(b) 5段階劣化尺度(相対評価)

評点	意味
5	Imperceptible (劣化がわからない)
4	Perceptible but not annoying (劣化がわかるが気にならない)
3	Slightly annoying (劣化が気になるが邪魔にならない)
2	Annoying (劣化が邪魔になる)
1	Very annoying (劣化が非常に邪魔になる)

表3 UHDTV映像の主観評価結果

(a) 4K解像度(3840×2160画素), 60fpsに対する評価結果

ビットレート [Mbps]	15	20	30	40
テスト画像数 MOS3.5以上	8	8	9	10
MOS3.0未満	2	1	0	0

(b) 8K解像度(7680×4320画素), 60fpsに対する評価結果

ビットレート [Mbps]	60	80	100	120
テスト画像数 MOS3.5以上	8	9	10	10
MOS3.0未満	1	0	0	0

表4 HDTV/UHDTV映像の所要ビットレート

解像度	所要ビットレート [Mbps]
4K (60fps)	30~40
8K (60fps)	80~100

5. HDR映像への対応

UHD映像の特徴の一つとして、従来より高いダイナミックレンジを持つ高ダイナミックレンジ(HDR: High Dynamic Range)への対応が挙げられる。例として、テレビ映像の仕様を規定しているITU-R(International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector)では、ITU-R BT.2020¹⁸⁾にて標準ダイナミックレンジ(SDR: Standard Dynamic Range)のUHDTV映像を、ITU-R BT.2100¹⁹⁾にてHRDのUHDTV映像を規定している。ITU-R BT.2100では、HDR映像方式としてHybrid Log-Gamma(HLG)方式と、

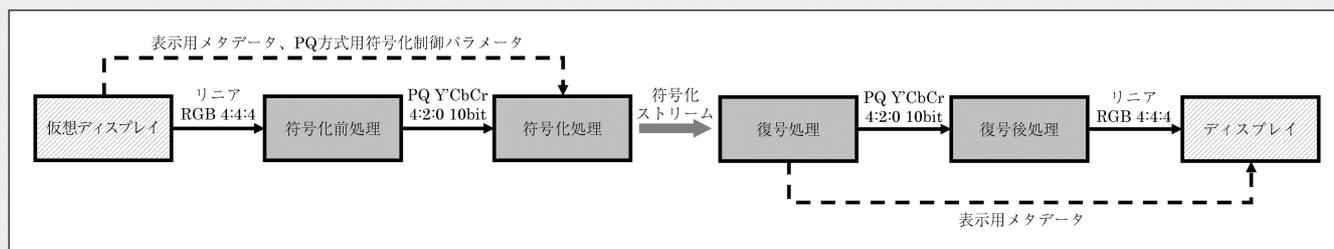


図8 PQ方式による符号化・復号処理フロー図

Perceptual Quantization (PQ) 方式を規定している²⁰⁾。HLG方式はSDRと同様にコントラスト(黒からピーク白までの相対的な階調)を表す映像信号特性を決定する撮像側の光-電気伝達関数(OETF: Opto-Electronic Transfer Function)を規定するものであり、SDRのOETFで規定されるCRTのガンマ特性を元としているのでSDR表示系に対する後方互換性が高い。一方で、SDRと同じく表示側の絶対輝度を規定するものでないため、映像制作者の意図通りの輝度で表示されないという欠点もある。PQ方式は、撮像側での相対輝度を示すOETFを規定するものではなく、表示側での絶対輝度を示す基準ディスプレイの電気-光伝達関数(EOTF: Electro-Optical Transfer Function)を規定するものである。したがって、ディスプレイで表示される輝度はディスプレイに依存せず同一となる。しかし、PQ方式で規定する最大輝度値より低い輝度までしか表現できないディスプレイに対しては、ディスプレイの持つ最大輝度値までで表現できるように各映像コード値が示す輝度値を変換するトーンマッピングと呼ばれる特殊処理が必要になる。PQ方式のEOTFは、最大10000 cd/m²のディスプレイ輝度を絶対値で表すものであり、現状のHDRディスプレイではそこまでの輝度を表示できないため上記処理が必要となる。

HEVC/H.265では、ダイナミックレンジの違いに関わらず単純に符号化処理への入力信号の空間解像度とビット深度に応じて処理される。例えば、ビット深度が10ビット、色フォーマットが4:2:0の映像であればSDR映像であろうがHDR映像であろうがMain 10プロファイルで対応する。しかし、特に従来のSDRとまったく異なる伝達関数を持つPQ方式では、HDR映像を高品質に圧縮したり、SDR表示系との互換性を保持するためには符号化処理の前後の処理も含めて対処する必要がある。そこで、HDR映像を扱う際の符号化前後処理を含めた手引書の策定やストリーム補足情報に関わる規格化がJCT-VCにて行われた。文献²¹⁾では、PQ変換特性を持ったY'CbCr 4:2:0のHDR映像を符号化する場合に出力側で高品質な映像を表示可能とするための処理(図8)を記述し、文献²²⁾では、HEVCにおけるHDR映像信号の記述方法や、SDRのビットストリームの後方互換性、適応表示方法を記述している。

6. 国際標準化の最新動向

HEVC/H.265の次の映像符号化方式の規格化にむけた議論がITU-T SG16/WP3とMPEG合同の次世代映像符号化の検討作業部会JVET (Joint Video Exploration Team)にて開始されている。JVETではHEVC/H.265に対して更なる符号化効率の改善を目標とした技術的検討を進めており、毎回150名程度のエキスパートが参加して活発な議論が行われている。また、対象とする映像については、HEVC/H.265と同様にHDRを含むUHD映像をメインターゲットとしつつ、新たに没入型メディア等で利用される360度映像も対象としている。JVETのテストモデルJEM (Joint Exploration Model) 6.0では、HEVC/H.265をベースとして、最大ブロックサイズの拡張、ブロック分割手法の改善、予測・変換処理の改善、CABACの改善を行っている²³⁾。JEM6.0は、HEVC/H.265のMain 10プロファイルに対して約30%の符号化効率改善を実現している²⁴⁾。ただし、処理負荷の点では、符号化処理、復号処理共にJEM6.0はHEVC/H.265の10倍以上と非常に高い演算負荷を要しており、今後いかに演算量を現実的なレベルに抑えた上で符号化性能を改善することができるかが課題である。今後は表5に示すスケジュールで規格化を進めていく予定である。

7. むすび

UHD映像は、空間解像度に加えてダイナミックレンジや色空間も拡張されたことで、高い臨場感を有する新しい映像体験が期待されるコンテンツである。UHD映像によるサービスを実現するには映像信号の伝送・蓄積が必要不可欠であり、これを実現するための映像符号化方式HEVC/H.265について解説した。HEVC/H.265は過去に規格化された方式とは異なり、規格化開始当初からUHD映像をターゲットとして開発を進めてきたものであり、現在広く普及しているAVC/H.264と比較して2倍以上高い符号化効

表5 標準化スケジュール

日程	内容
2017年10月	Call for Proposal発行
2018年2月	CfP提案方式募集締切
2020年10月	規格化完了

率でUHD映像を圧縮することが可能である。本方式により、国内4K/8K放送等のさまざまなUHD映像サービスがまさに実用化されようとしている。(2017年10月2日受付)

〔文 献〕

- 1) ISO/IEC 13818-2: "Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information - Part 2 : Video" | Recommendation ITU-T H.262: "Information Technology - Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information: Video" (1995)
- 2) ISO/IEC 14496-10: "Coding of Audio-Visual Objects - Part 10 : Advanced Video Coding" | Recommendation ITU-T H.264: "Advanced Video Coding for Generic Audiovisual Services" (2005)
- 3) ISO/IEC 23008-2: "High Efficiency Coding and Media Delivery in Heterogeneous Environments - Part 2 : High Efficiency Video Coding" | Recommendation ITU-T H.265: "High Efficiency Video Coding" (2013)
- 4) ISO/IEC 23008-2: "High Efficiency Coding and Media Delivery in Heterogeneous Environments - Part 2 : High Efficiency Video Coding" | Recommendation ITU-T H.265: "High Efficiency Video Coding" (2016)
- 5) G. Sullivan: "Deployment status of the HEVC standard", Document of Joint Collaborative Team on Video Coding, JCTVC-AB0020 (July 2017)
- 6) ATSC Candidate Standard: ATSC 3.0 System (A/300) , Advanced Television Systems Committee (Apr. 2017)
- 7) ETSI/DVB Technical Specification 101 154: "Specification for the use of Video and Audio Coding in Broadcasting Applications based on the MPEG-2 Transport Stream", v2.3.1 (Feb. 2017)
- 8) "Audio Visual Application Format Specifications for BD-ROM Version 3.0", White Paper Blu-ray Disc Read-Only Format (July 2015)
- 9) ARIB TR-B39 : "高度広帯域衛星デジタル放送運用規定", 電波産業会, 1.2版 (Dec. 2016)
- 10) 大久保 榮 (監修), 鈴木輝彦, 高村誠之, 中條健 (編) : "H.265/HEVC教科書", インプレス (Oct. 2013)
- 11) 村上篤道, 浅井光太郎, 関口俊一 (編) : "高効率映像符号化技術 HEVC/H.265とその応用", オーム社 (Feb. 2013)
- 12) K. Iguchi, A. Ichigaya, Y. Sugito, S. Sakaida, Y. Shishikui, N. Hiwasa, H. Sakate and N. Motoyama: "HEVC Encoder for Super Hi-Vision", IEEE International Conference on Consumer Electronics 2014 (ICCE 2014), p.61-62 (2014)
- 13) 境田慎一, 杉藤泰子, 千田和博, 市ヶ谷敦郎, 井口和久, 鹿喰善明, 井對貴之, 宮澤一之, 坂手寛治, 越地正行, 本山信明, 関口俊一 : "8KスーパーハイビジョンHEVC/H.265エンコーダ装置の開発", 映像学誌, 69, 1, pp.J23-J29 (Jan. 2015)
- 14) T.K. Tan, M. Mrak, V. Baroncini and N. Ramzan: "Report on HEVC compression performance verification testing", Document of Joint Collaborative Team on Video Coding, JCTVC-Q1011 (2014)
- 15) Recommendation ITU-T P.910: "Subjective video quality assessment methods for multimedia applications" (2008)
- 16) ARIB デジタル放送システム開発部会 : "超高精細度テレビジョン放送システムに関する中間報告 (映像符号化方式)", 情報通信審議会 情報通信技術分科会 放送システム委員会 超高精細度テレビジョン放送システム作業班 (第4回), 資料UHD作4-2-3 (Nov. 2013)
- 17) 総務省 : "4K・8K放送の推進", http://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/housou_suishin/4k8k_suishin.html
- 18) Recommendation ITU-R BT.2020-2: "Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange" (2015)
- 19) Recommendation ITU-R BT.2100-0: "Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme exchange" (2016)
- 20) 西田幸博 : "講座 : UHDを支える映像の高画質化技術 (第1回) UHD映像の概要", 映像学誌, 71, 2, p.216 (Mar. 2017)
- 21) J. Samuelsson, C. Fogg, A. Norkin, A. Segall, J. Strom, G. Sullivan, P. Topiwala and A. Tourapis: "Conversion and Coding Practices for HDR/WCG Y' CbCr 4:2:0 Video with PQ Transfer Characteristics (Draft 4) ", Document of Joint Collaborative Team on Video Coding, JCTVC-Z1017 (Jan. 2017)
- 22) E. Francois, D. Rusanovskyy, P. Yin, P. Topiwala, G. Sullivan and M. Naccari: "Signalling, Backward Compatibility and Display Adaptation for HDR/WCG Video Coding (Draft 2) ", Document of Joint Collaborative Team on Video Coding, JCTVC-Z1012 (Jan. 2017)
- 23) J. Chen, E. Alshina, G. Sullivan, J. Ohm and J. Boyce: "Algorithm Description of Joint Exploration Test Model 6 (JEM 6) ", Document of Joint Video Exploration Team, JVET-F1001 (Apr. 2017)
- 24) M. Karczewicz and E. Alshina: "JVET AHG report: Tool evaluation (AHG1) ", Document of Joint Video Exploration Team, JVET-G0001 (July 2017)



みねざわ 彰 2008年, 東京理科大学大学院理工学研究科修了。同年, 三菱電機(株)入社。情報技術総合研究所にて, 映像符号化・伝送技術および映像解析技術の研究開発, 国際標準化活動に従事。ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 11/Video小委員会エキスパート。正会員。