

スーパーハイビジョンの 映像パラメータと国際標準化



西田 幸博 (NHK 放送技術研究所)

スーパーハイビジョン

スーパーハイビジョンは、既存のテレビジョンシステムを凌駕する高臨場感と新たな視聴体験を提供する究極の2次元テレビジョンとして開発された、3,300万画素の超高精細映像と22.2chの3次元音響からなる高臨場感放送システムである。スーパーハイビジョンの映像パラメータと音響パラメータは、映像、音響それぞれの心理物理的な効果に関する研究に基づいて設計されている。

NHKにおけるスーパーハイビジョンの研究は、1995年に「ハイビジョンを超える超高精細映像の研究」に始まり、その後、「走査線数4,000本級映像の研究」へと進展した。システム設計のための研究と並行して、機器開発、番組制作、国内外での展示、標準化などにも精力的に取り組んできた。2005年の愛知万博でのスーパーハイビジョン上映をはじめとして、最近では2012年8月のロンドンオリンピックのパブリックビューイングなど国内外で数多くの展示を行い、スーパーハイビジョンの魅力や実現性を多くの人々に示してきた。

標準化については、放送システムの国際標準化を担っているITU-R（国際電気通信連合無線通信部門）での対応を中心に取り組んできた。その結果、2012年8月、超高精細度テレビジョン（UHDTV：Ultra High Definition Television）の番組制作および国際番組交換のための映像フォーマットを定めた勧告が発行された。スーパーハイビジョンの映像フォーマットがこのITU-R勧告に規定されている。

以下では、スーパーハイビジョンの映像パラメータの成り立ち、そして、UHDTVのスタジオ規格のITU-R勧告について述べる。

スーパーハイビジョンの映像パラメータ¹⁾

映像システムの構成要素である空間解像度、時間解像度、階調、色の各パラメータと心理物理的效果の関係を表-1に示す。それぞれの映像パラメータに関する心理物理的な研究に基づき、スーパーハイビジョンに相応しいパラメータを決定した。この仕様を満足するシステムをフルスペック・スーパーハイビジョンと呼んでいる。

■ 空間解像度

視角（画面を見込む角度）と画素密度（視角あたりの解像度）に基づいて空間解像度を検討した。臨場感にはさまざまな側面があるが、「臨場感＝その場にいるような感じ（sense of being there）」と「実物感＝実物を見ているような感じ（sense of realness）」をスーパーハイビジョンと既存のテレビジョンとを区別する要因として検討した。

水平視角に対する臨場感の主観評価実験により、水平視角の増加とともに臨場感が増加し、視角80°～100°辺りで飽和することが分かった。この結果より、高臨場感を提供するスーパーハイビジョンの目標視角を100°とした。水平視角100°で観視する場合の視距離は、HDTVと同じ画面アスペクト比16：9の場合、画面高（H）の0.75倍であり、このとき、視力1.0の人が画素構造をちょうど検知できないようにするためには水平画素数を約

映像パラメータ		心理物理的效果
空間解像度	画素数	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	輝度弁別
色	原色（色域）	色再現

図-1 映像パラメータと心理物理的效果

8,000 にする必要がある。HDTV との関係や後述の超高解像度映像のITU-R 勧告を考慮し、スーパーハイビジョンの画素数を縦横それぞれ HDTV の4 倍の 7,680×4,320 とした。

空間解像度は、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を与えることに関係する。視角 1° あたりの画素数（画素密度）に対する実物感の主観評価実験の結果から、画素密度が高くなるに従って実物感が増加し、画素密度 60cpd^{☆1}（120 画素 /deg.）あたりから増加が緩やかになることが分かった。

画素数の異なる 2k^{☆2}（HDTV）、4k、8k（スーパーハイビジョン）の 3 つのシステムにおける、視角と視距離に対する臨場感と実物感を図-1 に示す。なお、画素密度を各システムの空間解像度に対応する視角および視距離に換算している。臨場感は広視角になるほど高くなる。ただし、広視角（短視距離）において画素構造が検知されないようにするためには、画素数が多いシステムである必要があり、8k システムでは視角 100° 以下（視距離 0.75H 以上）、4k システムでは視角 60° 以下（視距離 1.5H 以上）、2k システムでは視角 30° 以下（視距離 3H 以上）である必要がある。一方、実物感は同じ視角では画素数の多いシステムほど高く、また、画素数が多いシステムほどより短い視距離で高い実物感を与えることができる。スーパーハイビジョンは、2k や 4k よりも高い臨場感と実物感を、広い範囲の視距離（視角）で提供するものであると言える。このような特徴により、スーパーハイビジョンは、さまざまな観視環境や画面サイズで有効に使用されることが期待される。

■ 時間解像度

時間解像度に関係する動画像の画質劣化として、動きぼやけ、ストロボ効果、フリッカーがある。これらは、時間開口（カメラの露光時間やディスプレイの発光時間）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も受ける。

動きぼやけには、カメラの撮像素子で一定時間光

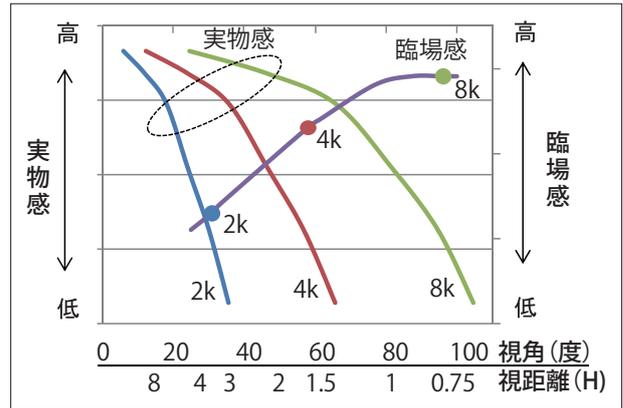


図-1 映像システムの臨場感と実物感

を蓄積することによるより生じる蓄積ぼやけと、ホールド型ディスプレイでの追従視による視覚的な時間積分効果による動きぼやけがある。動きぼやけを低減するためには、カメラとディスプレイそれぞれで時間開口を小さくする必要がある。動きぼやけと時間開口の関係の主観評価実験から、動きぼやけの許容限（5 段階劣化尺度における評価値 3.5）を満足するためには時間開口を 1/200s ~ 1/300s 以下にする必要があることが分かった。

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ー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、シャッターや黒挿入によって、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満足する時間開口 1/240s の場合のフレーム周波数に対するストロボ効果の主観評価実験から、ストロボ効果の許容限以上の画質を得るには、80Hz を超えるフレーム周波数が必要であり、120Hz とすれば許容限を満足するに十分であることが分かった。

フリッカーもまた動画像の画質劣化の一つである。フリッカー知覚は周辺視で敏感であるので、大画面化によって視角が大きくなるとフリッカーが検知されやすくなる。また、ホールド型ディスプレイのホールド時間が短くなると、フリッカーが検知されやすくなる。視角 100° における臨界融合周波数（CFF : Critical Fusion Frequency）の実験から、フリッカーが検知されないためには 80Hz を超えるフレーム周波数が必要であることが分かった。

☆1 cpd : cycle per degree
 ☆2 k : kilo

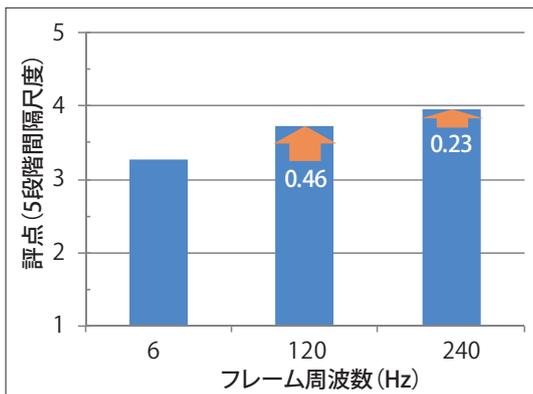


図-2 フレーム周波数と動画質

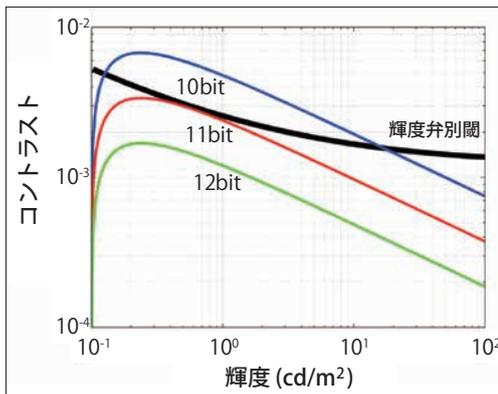


図-3 輝度弁別閾とビット数

大画面表示におけるフレーム周波数と動画質の関係を、HDTV ハイスピードカメラで 60, 120, 240Hz で撮影した映像を 240Hz で表示可能な 100-inch HDTV プロジェクタで表示して評価した。ここで、撮影と表示の時間開口はともに 100% である。12 種類の動画像の平均評価値を図-2 に示す。フレーム周波数を高くすると動画質が向上するが、60Hz から 120Hz の改善に比べて 120Hz から 240Hz の改善は小さい。

これらの結果から、フルスペック・スーパーハイビジョンのフレーム周波数を 120Hz とした。シャッターなどによって時間開口を短くすることも動画質の向上に効果的である。

■ 階調

高臨場感や高実物感の再現のためには偽輪郭として現れる階調の不連続性が視覚的に検知されないことが必要である。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にする必要がある。図-3 に、家庭での高品質映像の観視条件としてふさわしいと考えられる薄明環境における輝度弁別閾と 10bit, 11bit, 12bit 精度のべき関数の表示伝達関数の関係を示す。11bit 以上あれば、0.1-100cd/m² の輝度範囲全体で階調の不連続性は検知されないことから、フルスペック・スーパーハイビジョンではビット数を 12bit としている。

■ 表色系

被写体には、高彩度で HDTV の色域外となるものが存在し、広色域化によって、実物に近い色再現が可能となり、質感の向上が期待される。スーパー

ハイビジョンが対象とすべき色域と表現方法ならびにテレビ用としての要求条件を検討し、広色域表色系を設計した。

広色域化の方法には、(1) HDTV

などの既存システムと同じ三原色を用いつつ RGB 信号値に負や 1 を超える値を許容する方法、(2) 彩度のより高い色を三原色とする方法、(3) 3 色よりも多くの原色を用いる方法などがある。たとえば、(1) の方法には Rec. ITU-R BT.1361 や xvYCC、(2) の方法には Adobe RGB や D-Cinema、(3) の方法にはナチュラルビジョンなどがある。

スーパーハイビジョンの色域の要求条件を、HDTV の色域のほか D-Cinema など主要な映像システムの色域も包含し、実在する物体色をできるだけ多く包含することとした。さらに、テレビジョン用としてコストパフォーマンスに優れ、基準ディスプレイとシステム表色系の原色が共通となり得ることを考慮した。その結果、上記 (2) の方法で、スペクトル軌跡上の単波長光源に相当する色度点を RGB 三原色とする広色域表色系を設計した。図-4 に、物体色を代表するポインターカラーと、スーパーハイビジョン、HDTV、D-Cinema 基準プロジェクタ、Adobe RGB の各三原色を CIE xy 色度図に示す。スーパーハイビジョンの表色系によるポインターカラーの包含率は 99.9% 以上、物体色の理論的な最大色域を表す最明色の包含率は 75.8% である。

スーパーハイビジョン映像フォーマットの ITU-R における標準化

■ 超高精細度映像の標準化経緯²⁾

ITU-R における超高精細度映像に関係する用語として「超高解像度映像 (EHRI : Extremely High Resolution Imagery)」、 「大画面デジタル映像 (LSDI : Large Screen Digital Imagery)」、 「超高

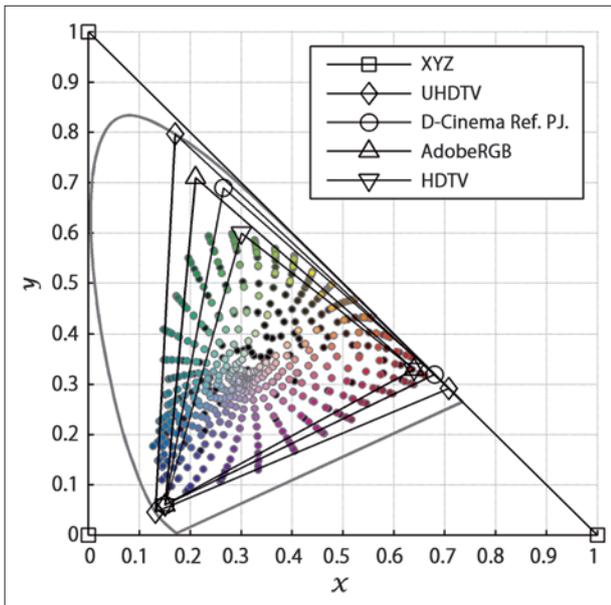


図-4 ポインターカラーと各種映像システムの三原色

精細度テレビジョン (UHDTV)」がある。EHRI は高解像度の映像システムの総称である。LSDI は大画面表示を目的としたシステムであり、このうち超高解像度映像を用いるものが拡張階層 LSDI と呼ばれる。UHDTV は EHRI をテレビジョンに応用したものである。これらの関係を図-5 に示す。

ITU-R における HDTV の解像度を超える映像システムの研究は、HDTV スタジオ規格の ITU-R 勧告 BT.709³⁾ が 1990 年に策定された後の 1993 年、EHRI の研究課題に始まる。本研究課題に基づいて 1995 年に勧告 BT.1201 「超高解像度映像」⁴⁾ が作成され、HDTV の空間解像度 1,920×1,080 の縦横整数倍とする考え方が示された。2002 年に開始された「D-Cinema 放送」の研究は、その後、劇場等での大画面上映を目的とした LSDI の研究と位置付けられた。SDTV や HDTV を LSDI に応用するための諸勧告の策定の後、2006 年、日本提案に基づく 7,680×4,320 と 3,840×2,160 の 2 種類の映像フォーマットを LSDI 用として規定する勧告 BT.1769 「拡張 LSDI の番組制作および国際交換の映像フォーマット」⁵⁾ が策定された。勧告 BT.1769 によって、スーパーハイビジョンの映像フォーマットが初めて国際規格として規定された。

EHRI を家庭向けの放送に応用することを目的とした UHDTV の研究は、2008 年の日本からの研究課題提案によって始まった。EHRI と拡張 LSDI の 2 つの勧告が策定されていたことから、映像フォー

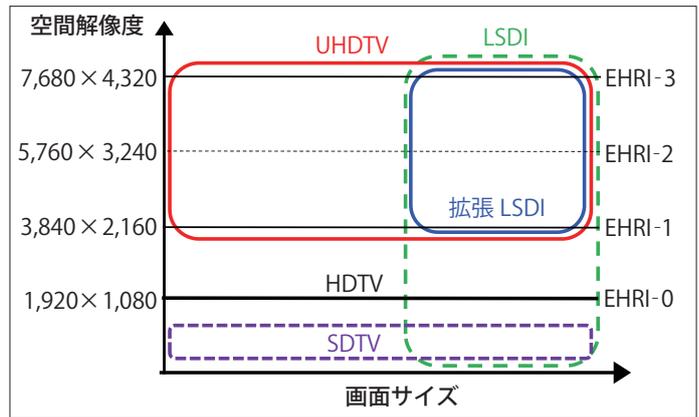


図-5 EHRI, LSDI, UHDTV の関係

マットに関する議論は、広色域化の方法 (三原色の選定) と伝送信号形式 (輝度信号と色差信号の規定) に関する事項が中心となり、日本と韓国が主張を展開しつつ合意点を見出す議論が続いた。また、日本は、従来の 60Hz よりも高いフレーム周波数の必要性から 120Hz を世界統一値として提案した。

三原色

2009 年 4 月、韓国は有機 EL の色度点を等色相で拡張した虚色を含む三原色を提案した。これに対し、同年 11 月、日本はスペクトル軌跡上の実在色を三原色とした広色域化を提案し、合意された。その後、日韓で隔たりがあった赤の色度点 (波長) について協議を継続し、2010 年 10 月、日本提案の 635nm と韓国提案の 625nm の折衷案として 630nm が合意された。

輝度・色差信号

2009 年 4 月の韓国提案は従来通りの非定輝度方式であったが、同年 11 月、韓国は線形 RGB から輝度信号を生成した後に非線形処理 (ガンマ補正) を行う定輝度方式と、赤緑軸と青黄軸を用いる色差信号を提案し、さらに、輝度・色差信号のサンプル比として 4:1:0 が含まれていた。これに対し、2010 年 10 月、日本は、従来通りの B-Y と R-Y に基づく色差信号を提案するとともに、4:1:0 はスタジオ規格として不相当との考えから 4:2:2 と 4:2:0 を提案した。4:1:0 を含めないことや B-Y と R-Y に基づくことには合意されたが、定輝度と非定輝度のいずれとするかは合意されなかった。韓国は定輝度方式による信号誤差の低減や符号化効率の改善効果を主張した。日本は、定輝度を用いる場合に R'G'B' での処理結果と Y'C'B'C'R の処理結果

が一致しなくなり、これを改善するためにはリニア信号で処理する必要があり、リニア-ノンリニア相互の信号変換が新たに必要になることを指摘した。2011年10月、日本は定輝度方式におけるB-YとR-Yの代わりにBとRを用いるYBR方式と従来の非定輝度の輝度・色差を併記する提案を行った。事態を開拓するため、ラポータグループを設置して定輝度と非定輝度の両方式を比較検討した結果、両方式に主観的な画質差はないことが確認され、結局、それぞれに利点と欠点があることが共通の理解となり、2012年4月、両方式を併記する案が合意された。

上述のように、日韓から勧告化に向けた積極的な寄与があった一方、世界的にはやっとデジタルHDTV放送が普及し始めている段階にあり、UHDTV(特に7,680×4,320)の勧告化は時期尚早という意見が根強かった。しかし、2011年9月、NHK

は2台の85インチLCDと22.2ch音響再生装置によるスーパーハイビジョンのデモを行い、ITU-Rでの早期標準化の必要性が認識されることになった。そして、2012年4月に新勧告案が合意され、主管庁による承認手続きを経て、同年8月に承認された。超高解像度映像の研究課題策定から20年目にあたり、くしくもBT.2020⁶⁾という番号が与えられた。また、勧告化に向けた審議と並行してITU-Rからその情報をITU-T SG 16やISO/IEC(MPEG)に提供した結果、HEVC規格はRec. ITU-R BT.2020を考慮したものとなっている。

■ 勧告 ITU-R BT.2020 の UHDTV 映像パラメータ

勧告 ITU-R BT.2020 に規定されている UHDTV の主要な映像パラメータ値を HDTV のスタジオ規格の勧告 ITU-R BT.709 と比較して表-2 に示す。

空間解像度は、1,920×1,080 の縦横それぞれ2倍および4倍の2種類が規定されている。フレーム周波数は、HDTVと同じ24～60Hzのほか、60Hzを超えるフレーム周波数がテレビジョン規格として初めて、唯一120Hzが規定されている。図-6にUHDTVとHDTVの空間解像度と時間解像度を示す。表色系は、スペクトル軌跡上のRGBを三原色とする広色域システムが規定され、RGBの色度点は、それぞれ、波長630nm、532nm、467nmに相当する。基準白色はHDTVと同じD65である。映像信号形式としては、RGBおよび輝度・色差信号が規定されている。輝度・色差信号

パラメータ	UHDTV (BT.2020)		HDTV (BT.709-5 PART2)		
映像アスペクト比	16:9		16:9		
画素数 (水平×垂直)	7,680×4,320, 3,840×2,160		1,920×1,080		
フレーム周波数 (Hz)	120, 60, 60/1.001, 50, 30, 30/1.001, 25, 24, 24/1.001		60, 60/1.001, 50, 30, 30/1.001, 25, 24, 24/1.001		
走査	順次走査		順次走査, 飛越走査		
表色系 (CIE 1931)		<i>x</i>	<i>y</i>	<i>x</i>	<i>y</i>
	R	0.708	0.292	0.640	0.330
	G	0.170	0.797	0.300	0.600
	B	0.131	0.046	0.150	0.060
	白	D65		D65	
		0.3127	0.3290	0.3127	0.3290
非線形伝達関数	$E' = \begin{cases} 4.5E, & 0 \leq E < \beta \\ \alpha E^{0.45} - (\alpha - 1), & \beta \leq E \leq 1 \end{cases}$ $\alpha = 1.099, \quad \beta = 0.018 \text{ (10bit system)}$ $\alpha = 1.0993, \quad \beta = 0.0181 \text{ (12bit system)}$		$E' = \begin{cases} 4.5E, & 0 \leq E < 0.018 \\ 1.099E^{0.45} - 0.099, & 0.018 \leq E \leq 1 \end{cases}$		
輝度信号	$Y'_c = (0.2627R + 0.6780G + 0.0593B)'$	$Y' = 0.2627R' + 0.6780G' + 0.0593B'$	$Y' = 0.2126R' + 0.7152G' + 0.0722B'$		
色差信号	$C'_{bc} = \begin{cases} \frac{B' - Y'_c}{1.9404}, & B' - Y'_c \leq 0 \\ \frac{B' - Y'_c}{1.5816}, & 0 < B' - Y'_c \end{cases}$ $C'_{rc} = \begin{cases} \frac{R' - Y'_c}{1.7184}, & R' - Y'_c \leq 0 \\ \frac{R' - Y'_c}{0.9936}, & 0 < R' - Y'_c \end{cases}$		$C'_B = \frac{B' - Y'}{1.8814}$ $C'_R = \frac{R' - Y'}{1.4746}$		
			$C'_B = \frac{B' - Y'}{1.8556}$ $C'_R = \frac{R' - Y'}{1.5748}$		
輝度・色差信号の画素構造	4:4:4, 4:2:2, 4:2:0		4:2:2		
ビット数	10bit または 12bit		8bit または 10bit		
量子化方法	$R', G', B', Y' : D' = INT[(219 \times E' + 16) \times 2^{n-8}]$ $C'_B, C'_R : D' = INT[(224 \times E' + 128) \times 2^{n-8}]$		同左		

表-2 Rec. ITU-R BT.2020 の映像パラメータ値

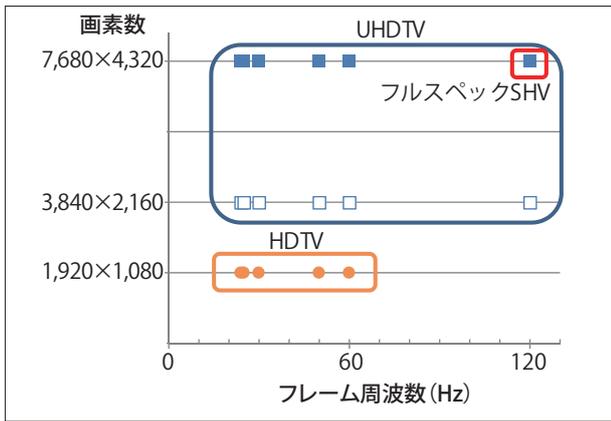


図-6 UHDTVとHDTVの空間解像度と時間解像度

については、ガンマ補正したRGBから輝度・信号を生成する従来通りの非定輝度伝送と、線形RGBから輝度信号を生成する定輝度伝送が併記されている。非線形伝達関数は、HDTVと同等の特性であるが、12bitの場合に伝達特性の線形部と非線形部の不連続を避けるために、精度を高めた規定がされている。輝度・色差信号の画素構造として、4:4:4、4:2:2に加えて、順次走査であることを考慮して4:2:0が規定されている。画素ビット数は、階調の不連続が検知されないように8bitは規定されず、10bitと12bitが併記されている。量子化方法や量子化レベルの割り当ては、HDTVと同様である。

スーパーハイビジョンの音響システム

スーパーハイビジョンの音響システムの要求条件は、視聴者を取り囲む全方向から音が聞こえ、全方向で音に包み込まれる印象がし、スクリーンに表示された映像の方向に音像が明確に定位することである⁷⁾。音響評価実験の結果、水平方向の良好な音像定位のためには、スピーカの間隔を30°～45°以下、音に包み込まれる感じを良好に与えるためにはスピーカの間隔を45°～60°以下にする必要があることが分かった。また、垂直方向の良好な音像定位のためには、スピーカの間隔を30°以下、音に包み込まれる感じを良好に与えるためにはスピーカの間隔を45°～60°以下にする必要があることが分かった。これらの結果に基づき、垂直方向に3層の図-7に示すスピーカ配置を採用し、さらに低音効果用の2個のスピーカを追加して22.2ch音響とした。この音響システムについても、従来の5.1ch

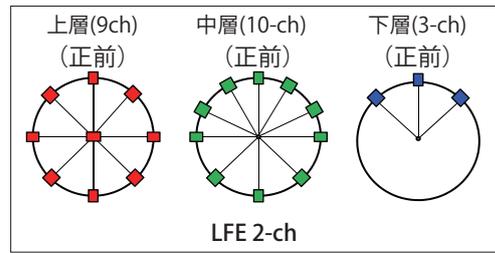


図-7 22.2ch音響システム

を超えるマルチチャンネル音響システムの勧告化に向けてITU-Rに提案し、審議が進められている。

スーパーハイビジョン放送に向けて

映像フォーマットは、テレビジョン放送システムの基盤をなす技術的条件の一つである。今後、ITU-R勧告BT.2020に準拠したスーパーハイビジョン番組制作が国内外で一層活発になり、そのための機器開発が加速することが期待される。

2012年11月、総務省は「放送サービスの高度化に関する検討会」を立ち上げた。その検討事項の一つとして、4k・8k(スーパーハイビジョン)に関する放送サービスや受信機器の実用化・普及に関するロードマップの策定が挙げられている。放送開始に向けて、インタフェースや圧縮符号化、多重化、伝送、表示装置など、放送チェーンのさまざまな要素技術の研究開発の進展と標準化が期待される。

参考文献

- 1) 西田：スーパーハイビジョンの映像パラメーターと心理物理効果、映像学技報【高臨場感ディスプレイフォーラム2011】、Vol.35, No.43, AIT2011-77 (2011)。
- 2) 菅原：超高精細度テレビのITU-R勧告化とその意義、ITUジャーナル、Vol.42, No.11 (2012)。
- 3) Parameter Values for the HDTV Standards for Production and International Programme Exchange, Recommendation ITU-R BT.709-5 (2002)。
- 4) Extremely High Resolution Imagery, Recommendation ITU-R BT.1201-1 (2004)。
- 5) Parameter Values for an Expanded Hierarchy of LSDI Image Formats for Production and International Programme Exchange, Recommendation ITU-R BT.1769 (2006)。
- 6) Parameter Values for Ultra-high Definition Television Systems for Production and International Programme Exchange, Recommendation ITU-R BT.2020 (2012)。
- 7) Performance Requirements for an Advanced Multichannel Stereophonic Sound System for Use with or Without Accompanying Picture, Recommendation ITU-R BS.1909 (2012)。

(2013年1月11日受付)

西田 幸博 nishida.y-fe@nhk.or.jp

1985年NHK入社。現在、同放送技術研究所テレビ方式研究部主任研究員。スーパーハイビジョンの映像方式の研究、ならびに、国内外の標準化に従事。ITU-R SG 6副議長、同WP 6B議長。