



平成28年度 文化庁補助事業
「映画におけるデジタル保存・活用に関する調査研究事業」
デジタル映画の保存と活用に関する技術セミナー

デジタル映画のカラーマネジメント

第1.0版

2017年2月28日

株式会社 IMAGICA

・本技術セミナー開催の目的

映像データを保存・活用していくにあたり、重要な技術要素の一つに「色」がある。フィルムの場合は再生環境が限定されているが、デジタルの場合は、劇場上映・放映・配信・パッケージ化といった様々な再生環境が存在し、またデータ自身の形態も変化する可能性があるために、作品の見え方を一定なものとし続けるには、高度なカラーマネジメントの知識が必要である。そこで本セミナーでは、色温度や色域、ガンマといったカラーマネジメントを考える上で必要となる基礎概念と、関連するさまざまな国際標準の内容について説明する。さらに、色に関する最新の技術動向と、映像データの保存にかかわる話題も触れる。

・セミナー担当者について

長谷川 智弘 (カラーマネジメントアドバイザー)

2012年4月、株式会社IMAGICA入社。新作映画の色変換処理に必要なアプリケーションの開発を行いつつ、視環境の管理などメンテナンス業務も担当。最近では、日本に現存する最古のカラー・トーキー映画『千人針』(1937年)の復元作業において、当時の発色の再現を目指すため新たなツールを開発。また、High Dynamic Range技術や広色域映像処理など、色に関わる最新技術の研究も担っている。

水戸 遼平

2008年4月、株式会社IMAGICA入社。フィルムからデジタルシネマへの過渡期の経験を生かし、アナログ・デジタルを横断しての技術コーディネートを担当。最近の担当作品は松竹『桃太郎 海の神兵』、東京国立近代美術館フィルムセンター『千人針』など。

・本資料について

本資料は、2016年11月25日に株式会社IMAGICAにおいて開催された「デジタル映画のカラーマネジメント」の講義資料をWeb公開向けに加筆修正したものである。

はじめに	p. 2
1. カラーマネジメントの基礎(色の見た目の定量的な管理のために)	p. 4
1. 1. 加法混色と減法混色, RGB値による色の数値表現	p. 6
1. 2. 等色関数による色の見えの数値化, 三刺激値X,Y,Zによる色の表現	p.11
1. 3. チャートと色度座標	p.17
1. 4. xy色度図の読み取り	p.21
1. 5. sRGB値からXYZへの変換	p.23
1. 6. カラースペース間の変換	p.28
1. 7. ルックアップテーブル(LUT)	p.32
2. カラーマネジメントの基礎(映像の“見え”を決める要素)	p.34
2. 1. 色域	p.38
2. 2. OETFとEOTF, End to End ガンマ	p.40
2. 3. ビデオとLog	p.51
2. 4. 白色点の色温度	p.52
2. 5. キャリブレーション	p.58
3. カラーマネジメントの最前線	p.59
3. 1. カラーコレクションの有無, カラーコレクションの効果	p.60
3. 2. 色管理されたさまざまなワークフロー	p.66
3. 3. ACES(Academy Color Encoding System)	p.72
3. 4. イメージの状態の3区分	p.75
3. 5. 残すべき色の情報について	p.79
終わりに	p.81

1. カラーマネジメントの基礎

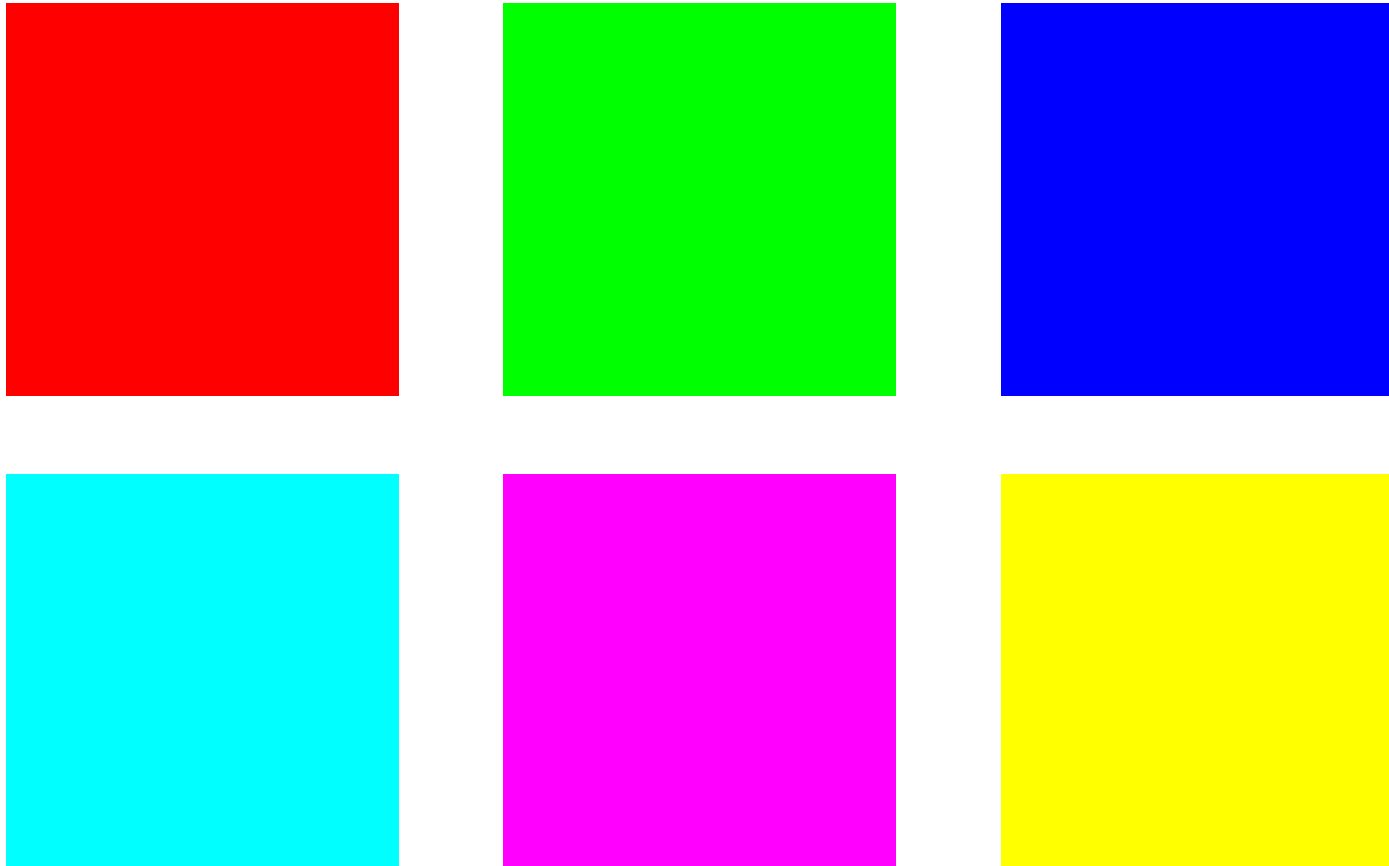
(色の見た目の定量的な管理のために)

1. カラーマネジメントの基礎(色の見た目の定量的な管理のために)

カラーマネジメントとは、言葉のとおり色を管理するということである。本資料は『デジタル映画のカラーマネジメント』であるから、映画監督やカメラマンにより決められた作品の色(見た目)が他の環境、他のメディアにおいても正しく引き継がれるために必要なこと、その基礎をなす技術に重点を置き議論をすすめる。

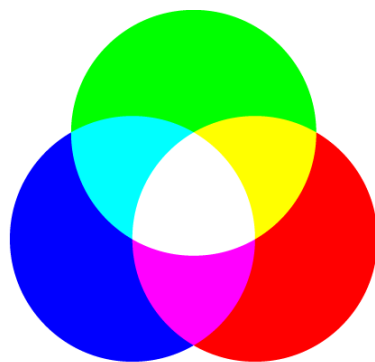
色が正しく引き継がれるためには、定性的な観点だけでなく、定量的な観点から色を把握することが重要となる。例えば、映画制作で作品の色の仕上げを行うポストプロダクションでは、試写室のプロジェクターと編集室モニターの発色がどれだけ離れているのかということ、人間の目で感じ取ることができる“色の差”に対し、何倍の差が生じているのかといった点からチェックを行うことがある。このような「色の見た目の数値化」により、プロジェクターやモニター等、機材の管理を可能にしているのである。一方、「色の数値化」に関して、ペイントソフトやフォトタッチソフトが一般化したことにより、例えば、赤を#FF0000(16進数による表記)、緑を(0,255,0)と表現するなど、色のデジタル表現は一般に浸透していると思われる。しかしながら、これらは「色の見た目の数値化」ではないため、#FF0000や(0,255,0)といった情報だけでは、それが具体的にどのような赤なのか、緑なのかを決定することができないことに注意しなければならない。この章では、「色の見た目の数値化」に必要な考え方について順を追って説明していく。また、「色の見た目の数値化」により何が実現可能になるのかということ、具体例を交えながら紹介していく。

1. 1. 加法混色と減法混色, RGB値による色の数値表現

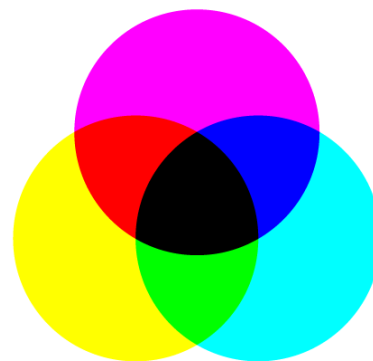


これら6色のカラーパッチから色の表記方法について考えてみたい. 左上から順にカラーパッチの色を赤, 緑, 青, シアン, マゼンタ, 黄色と呼ぶことができるが, これらはどのように数値化すればよいだろうか.

1. 1. 加法混色と減法混色, RGB値による色の数値表現



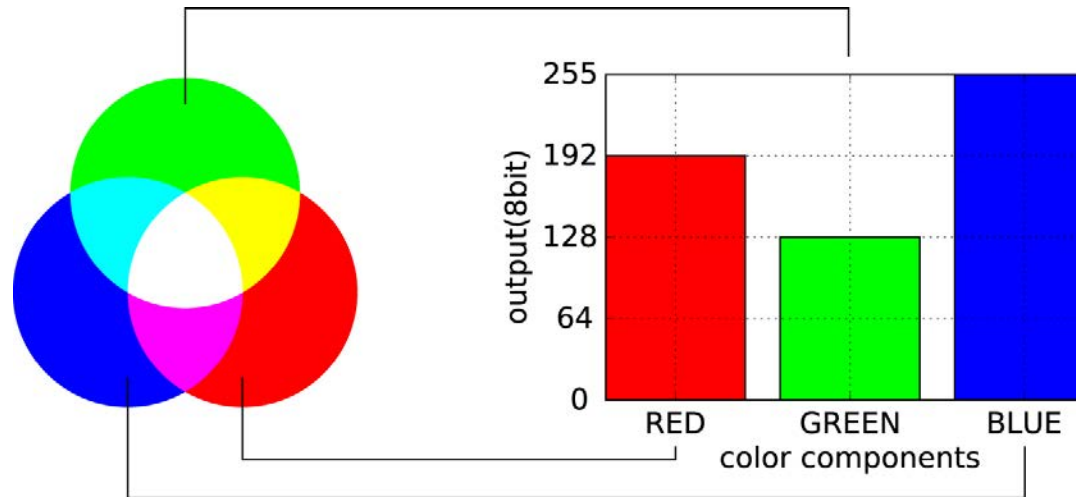
加法混色



減法混色

上図のとおり, 色の混ぜ合わせ (混色) には, 加法混色と減法混色がある. 加法混色とは, “複数の色刺激が目に同時に入射して生じる混色”であり, “目に分解できない程度に細かく入り交じった形で入射しても生じる”¹⁾. 減法混色とは, “色フィルターまたは色素などの光の吸収媒質の重ね合わせによって別の色が生じる”混色を言う¹⁾. TVやパソコンなどで使用される液晶ディスプレイは, 微小な領域から赤と緑と青の光が出力される. その領域は目でわからないほどの細かさのために加法混色の効果が得られる. つまり, 加法混色の原色と異なる色を感じることができるのである. このような表示装置を使用していることに関係し (または, 混色結果の算出の容易さから), 画像ファイルや動画ファイルをデジタル表現する場合は, 加法混色の原色である赤, 緑, 青がベースとなることが多い. (印刷することを目的としたデータなどは, 減法混色の原色で表現されることがある). 一方で減法混色は, 映画で用いられるフィルムの色表現に関係する. 本稿は『デジタル映画のカラーマネジメント』であるから加法混色に限定し論じていくが, 映画フィルムの色表現について考えるとき, 減法混色は必要不可欠なアイディアであることを付記しておく.

1. 1. 加法混色と減法混色, RGB値による色の数値表現



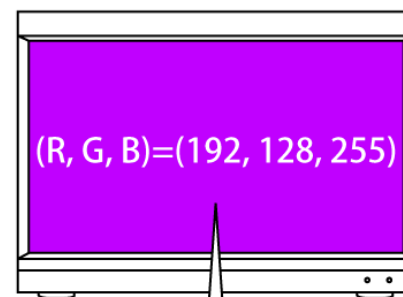
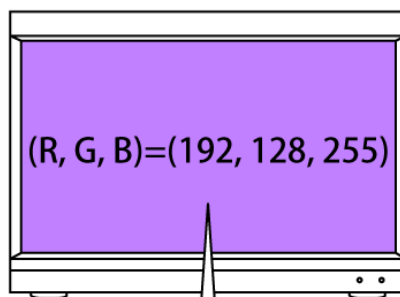
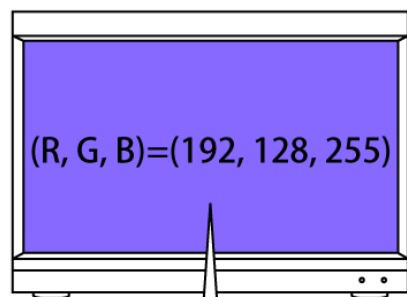
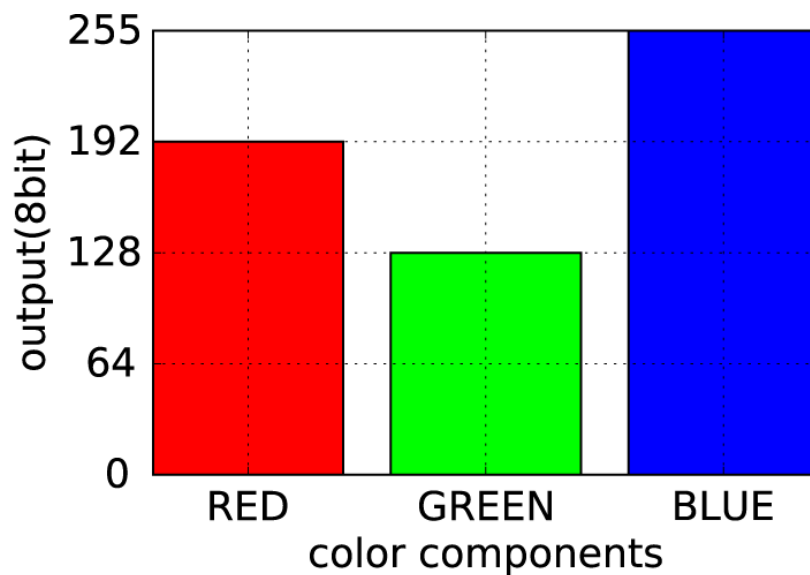
加法混色の原色 (R,G,B) それぞれの混合割合を決定するとモニター上で色が定まる



(R, G, B)=(192, 128, 255)

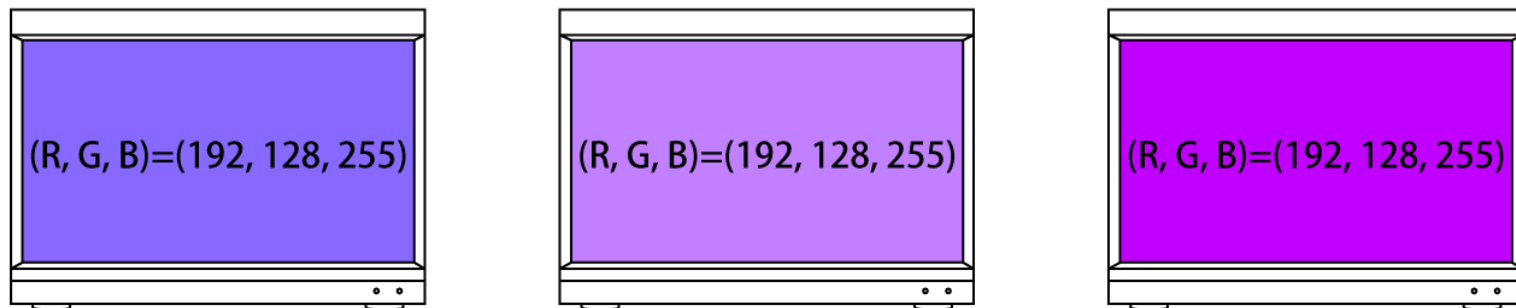
加法混色とデジタル表現の関係性について図示している. 先に述べたように, モニターは赤, 緑, 青の微小な領域から光を出力することにより色を作り出している. 赤, 緑, 青のそれぞれの出力割合が変化すれば, 結果として得られる色は変化する. 右上の棒グラフは, モニターに入力される信号を図示したものである. 赤は75%, 緑は50%, 青は100%の入力となり, それらがモニター上で紫色として表示されている. 色をデジタルで表現する場合, どの程度の階調表現力が必要かという問題はあるものの, ここでは一例として0~255の256階調(8bit)での表現としている.

1. 1. 加法混色と減法混色, RGB値による色の数値表現



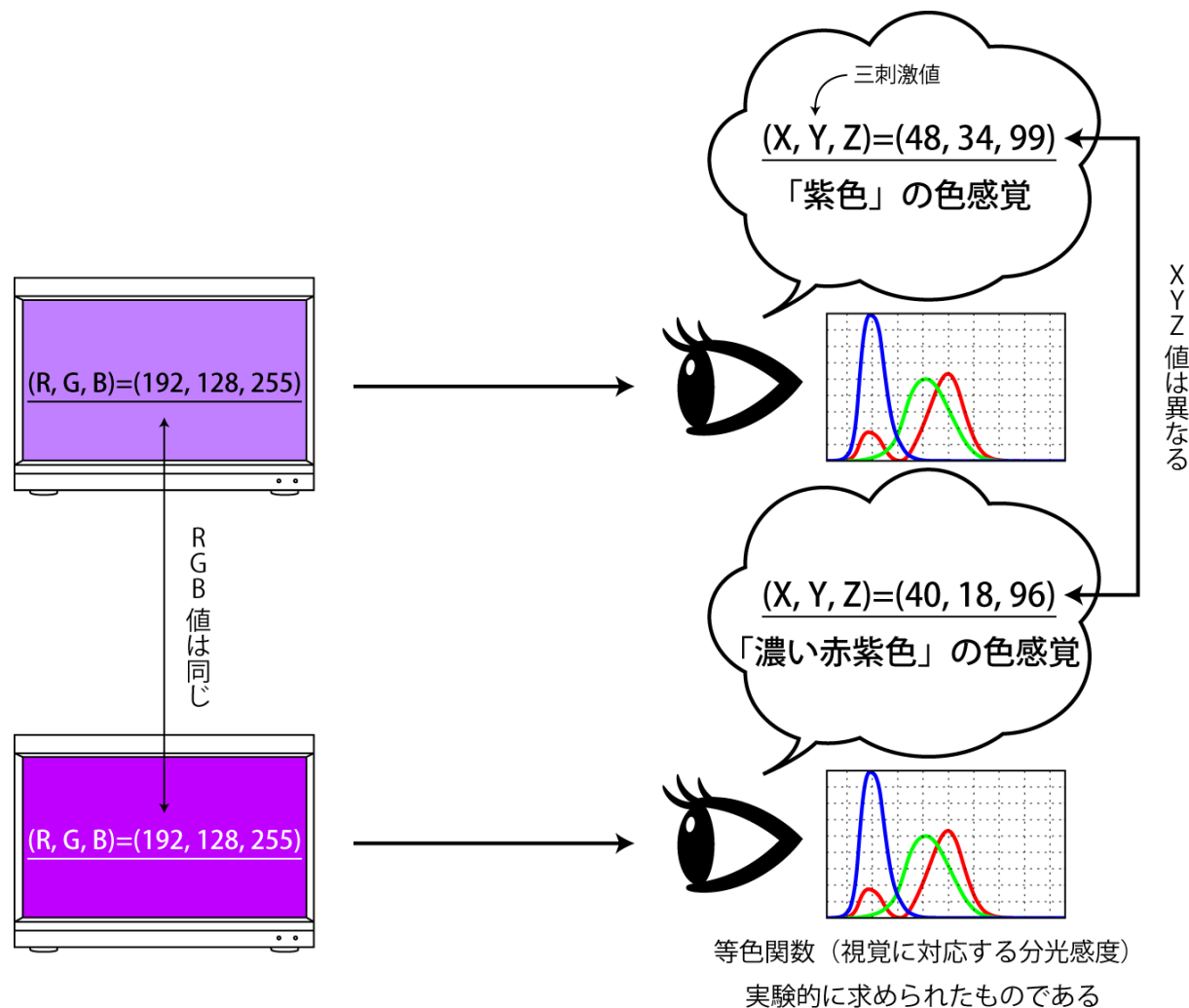
同じ RGB 値であったとしても、カラーマネジメントされていないならば、同じ色に見えるとは限らない
(つまり、色の一致には「RGB 値の一致」だけでは不足なのである)

1. 1. 加法混色と減法混色, RGB値による色の数値表現



上図で示される紫色の8bit表記は $(R, G, B) = (192, 128, 255)$ となっている. しかしながら, これは色の数値表現ではあるものの, 色の見た目の数値表現ではないことに注意しなければならない. 前頁(P.9)では, 同じ信号を入力したにも関わらず, 異なる見た目の紫色が表示されている状態を示している. TVの設定を変えることで, 映像の見た目が変化したという経験はあるのではないだろうか. これは, モニターの設定の違い, モニターで使用するパネル特性の違いなど, 様々な原因が考えられるが, 明らかなのは $(R, G, B) = (192, 128, 255)$ という信号だけでは, 常に同じ紫色が表示されるとは限らないということである.

1. 2. 等色関数による色の見えの数値化, 三刺激値X,Y,Zによる色の表現



同一の信号 $(R, G, B) = (192, 128, 255)$ でありながらも, 左上のモニターのイラストに対し左下のほうが赤みを帯びて感じられる. これらは異なる X, Y, Z 値となっているが, このような“目で見たときの感じ方”に対応する色の数値表現を三刺激値と呼ぶ.

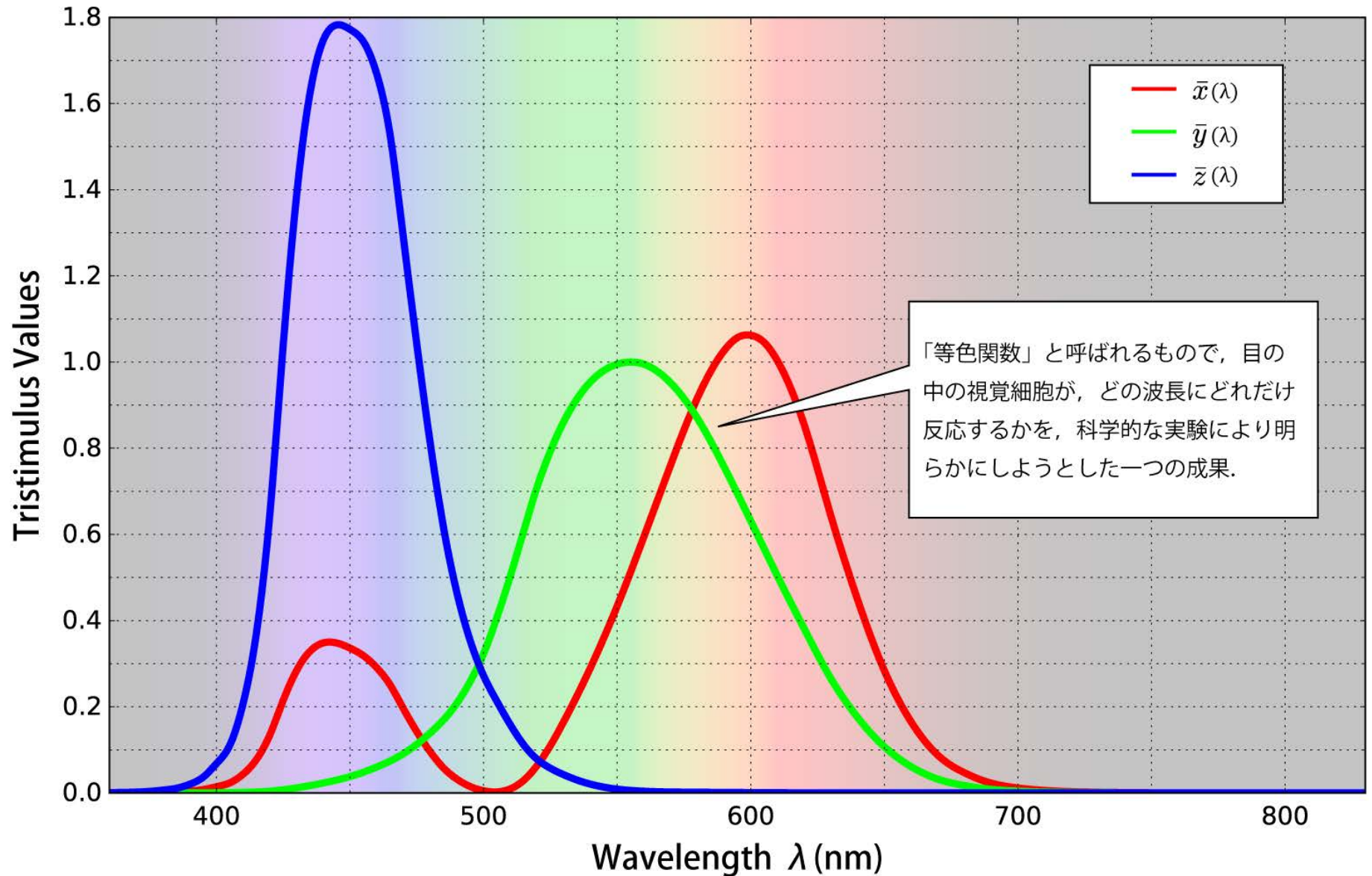
1. 2. 等色関数による色の見えの数値化, 三刺激値 X, Y, Z による色の表現

次頁(P.13)に示すのが等色関数であり, これは, 人間の目がどの波長にどれだけ反応するかを科学的な実験により明らかにしようとした一つの成果である. P.14では, デジタル信号がモニター画面上に表示され, モニターから出力された光を「紫色」と感じるまでの一連の流れが示されているが, 重要なことは“目で見たときの感じ方”の数値表現も同様な流れを経て算出できるということである. 具体的には, モニター画面から出力される光(特に, どの波長の光がどれだけ含まれているか, といった分光分布の情報)と, 等色関数を積分することで算出される. 得られる三刺激値(X, Y, Z)は, “目で見たときの感じ方”に対応している.

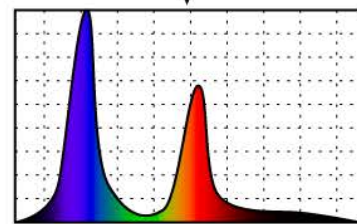
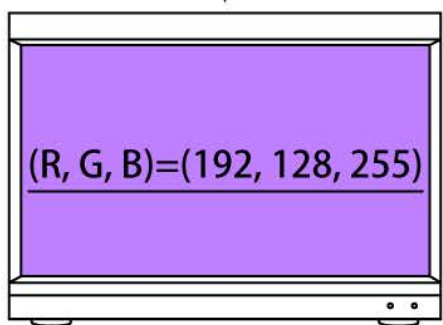
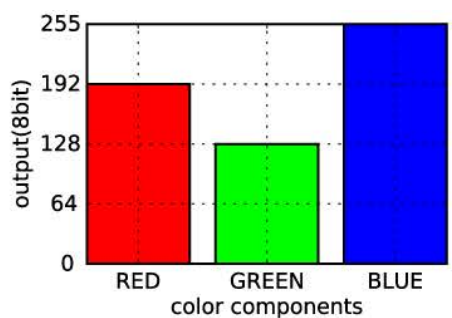
この三刺激値(X, Y, Z)は, P.15で示される式により Y, x, y に変換することができる. この変換により, 三刺激値(X, Y, Z)を明るさに関する成分 Y と色味(赤み, 緑み)に関する成分 x, y に分離, 二次元平面で色味の把握を可能にしている. P.16は「CIE xy 色度図」と呼ばれ, 光源や物体等の色味の把握に活用される.

1. 2. 等色関数による色の見えの数值化, 三刺激値X,Y,Zによる色の表現

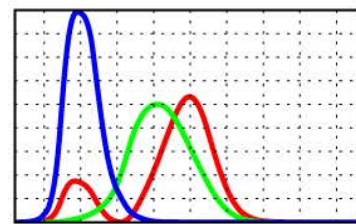
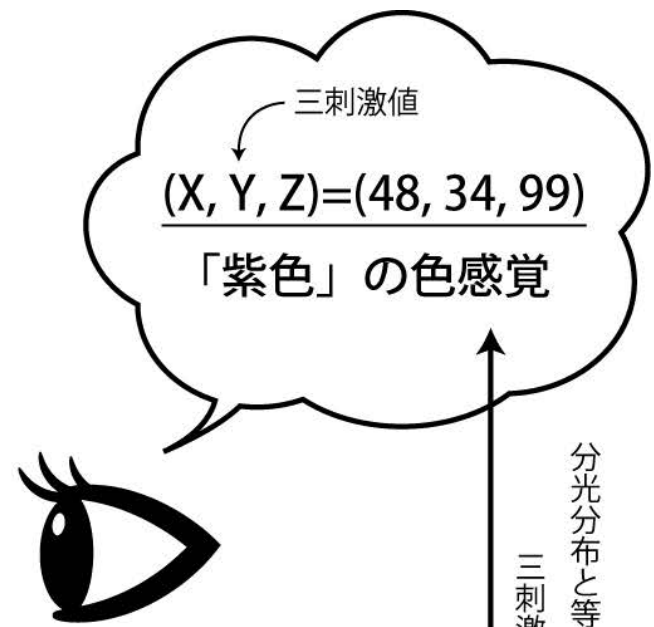
等色関数 (CIE 1931 2° Standard Observer)



1. 2. 等色関数による色の見えの数値化, 三刺激値X,Y,Zによる色の表現



分光分布（どの波長がどれだけ含まれているか）



等色関数（視覚に対応する分光感度）

分光分布と等色関数が積分された結果
三刺激値が算出される

1. 2. 等色関数による色の見えの数値化, 三刺激値X,Y,Zによる色の表現

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$
$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$
$$z = 1 - (x + y)$$

二次元で色を把握できるようにするため
上記の変換を行う

$$(X, Y, Z) = (48, 34, 99)$$

「紫色」の色感覚



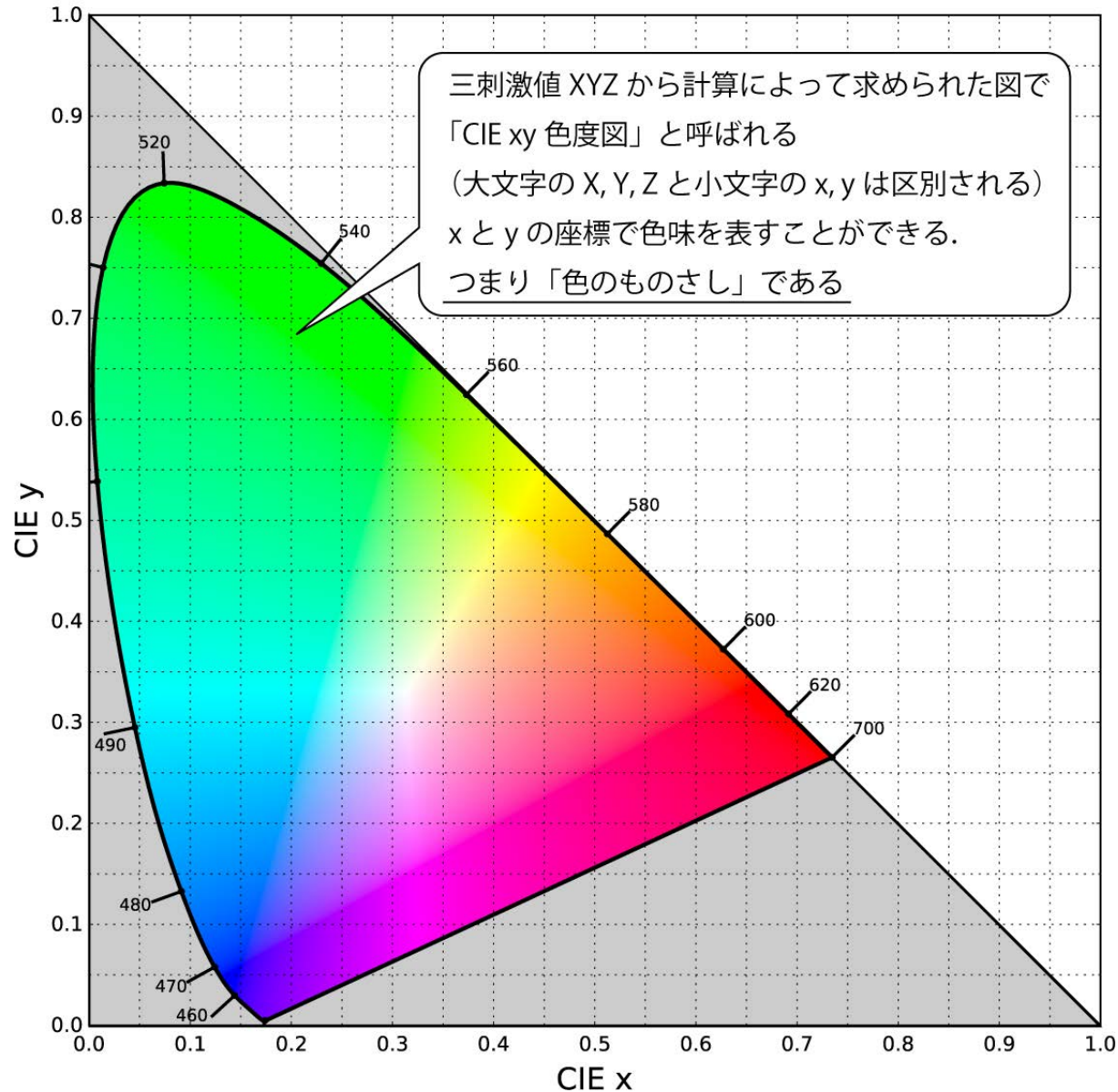
$$(Y, x, y) = (34, 0.265, 0.187)$$

「紫色」の色感覚

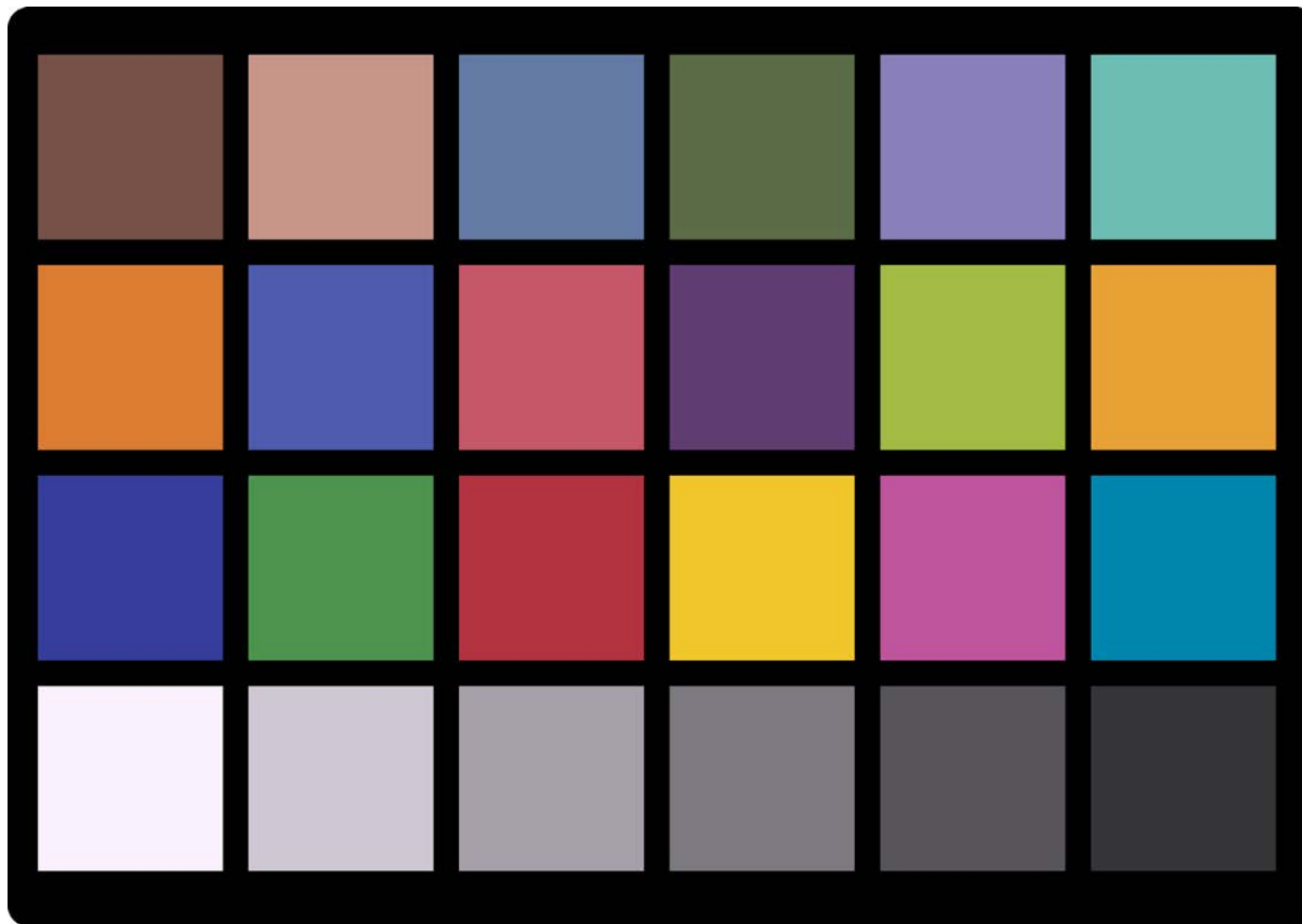


1. 2. 等色関数による色の見えの数値化, 三刺激値X,Y,Zによる色の表現

CIE 1931 Chromaticity Diagram

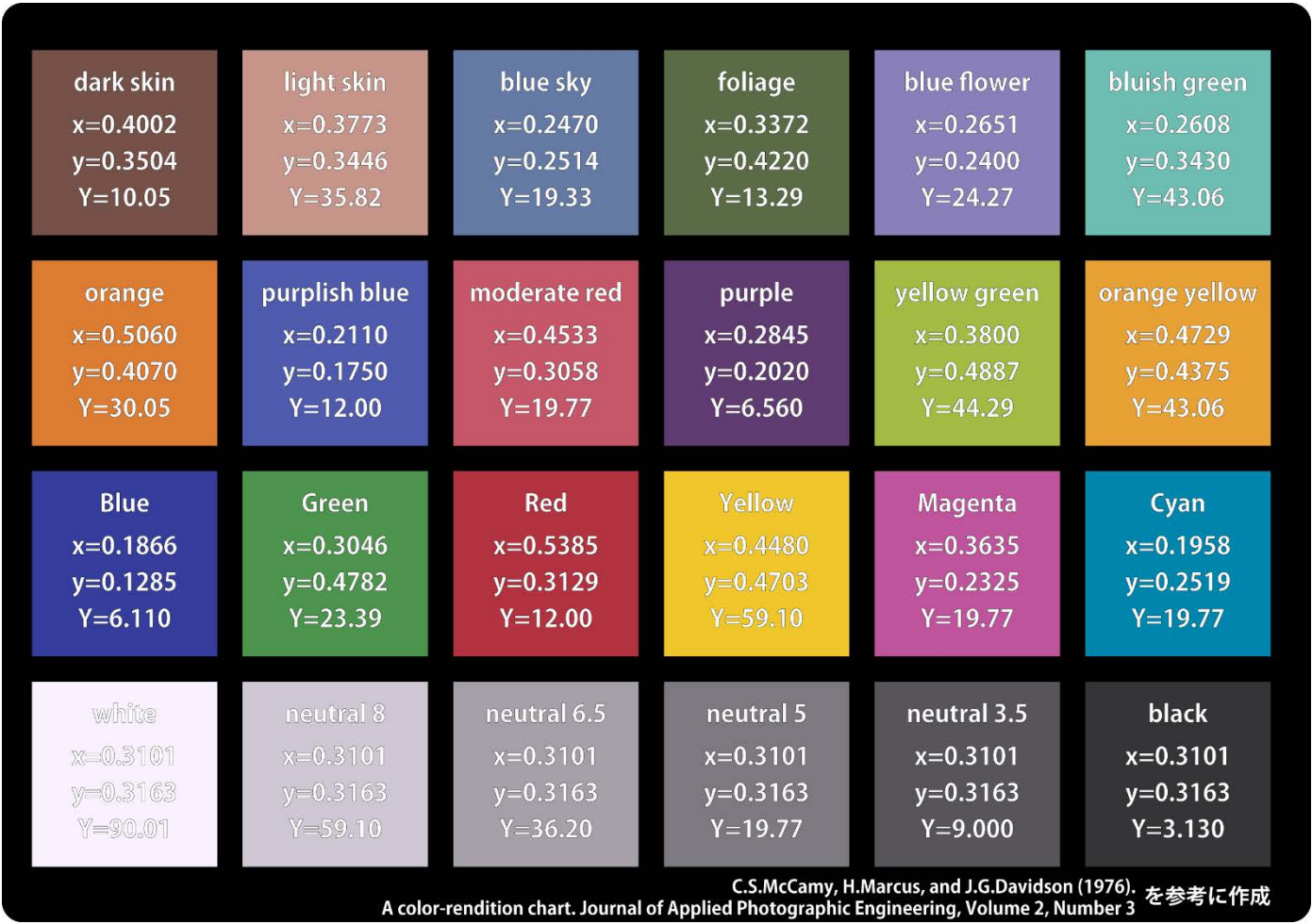


1. 3. チャートと色度座標



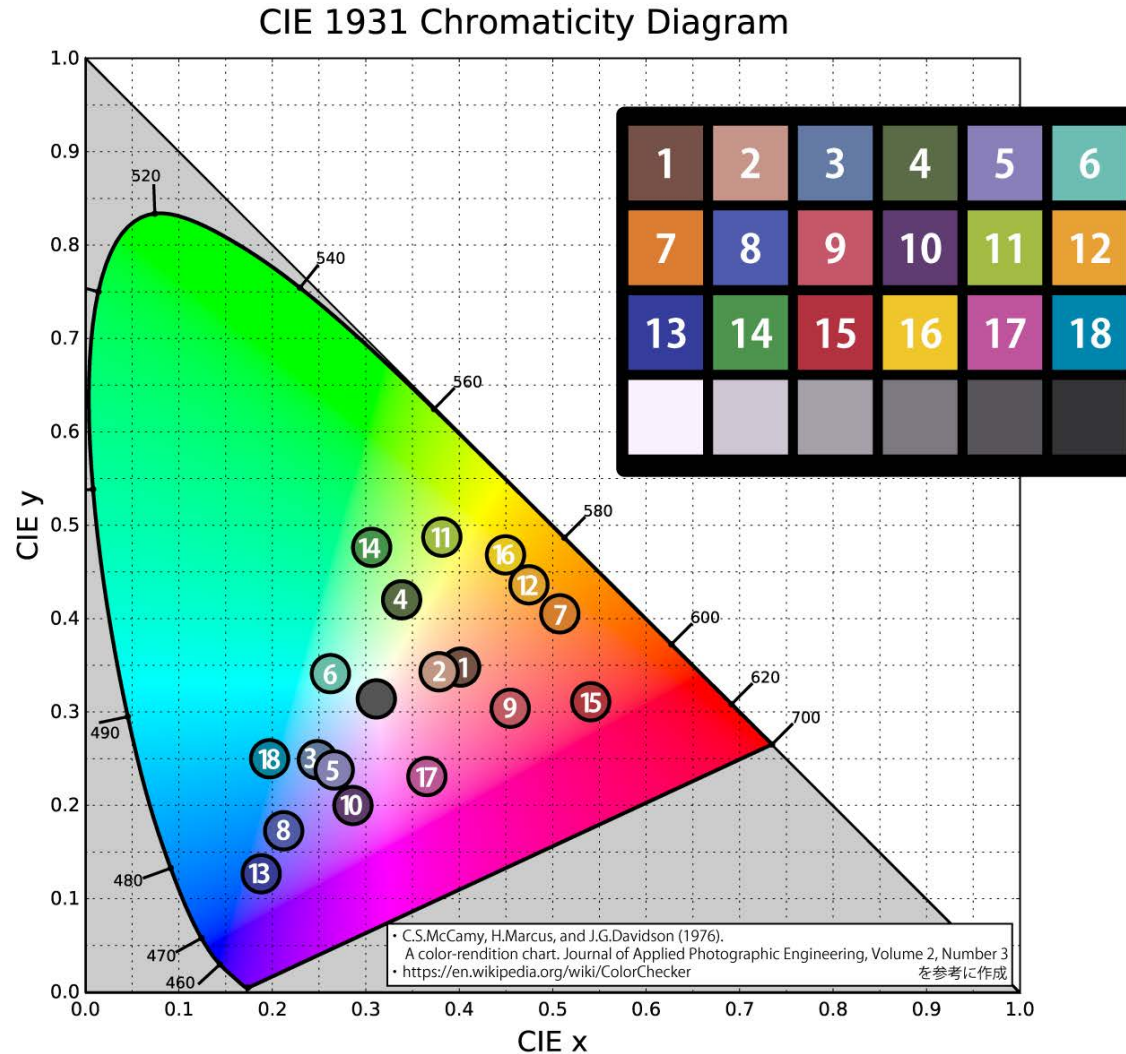
CIE xy 色度図について、色と色度座標との関係を直感的に把握するために、映画のテスト撮影などでよく用いられる「カラーチャート」を使用する. カラーチャートは、18色のカラーと6段階の無彩色が用意され、それぞれの分光反射率は元となった論文“A Color-Rendition Chart”²⁾で定義される.

1. 3. チャートと色度座標



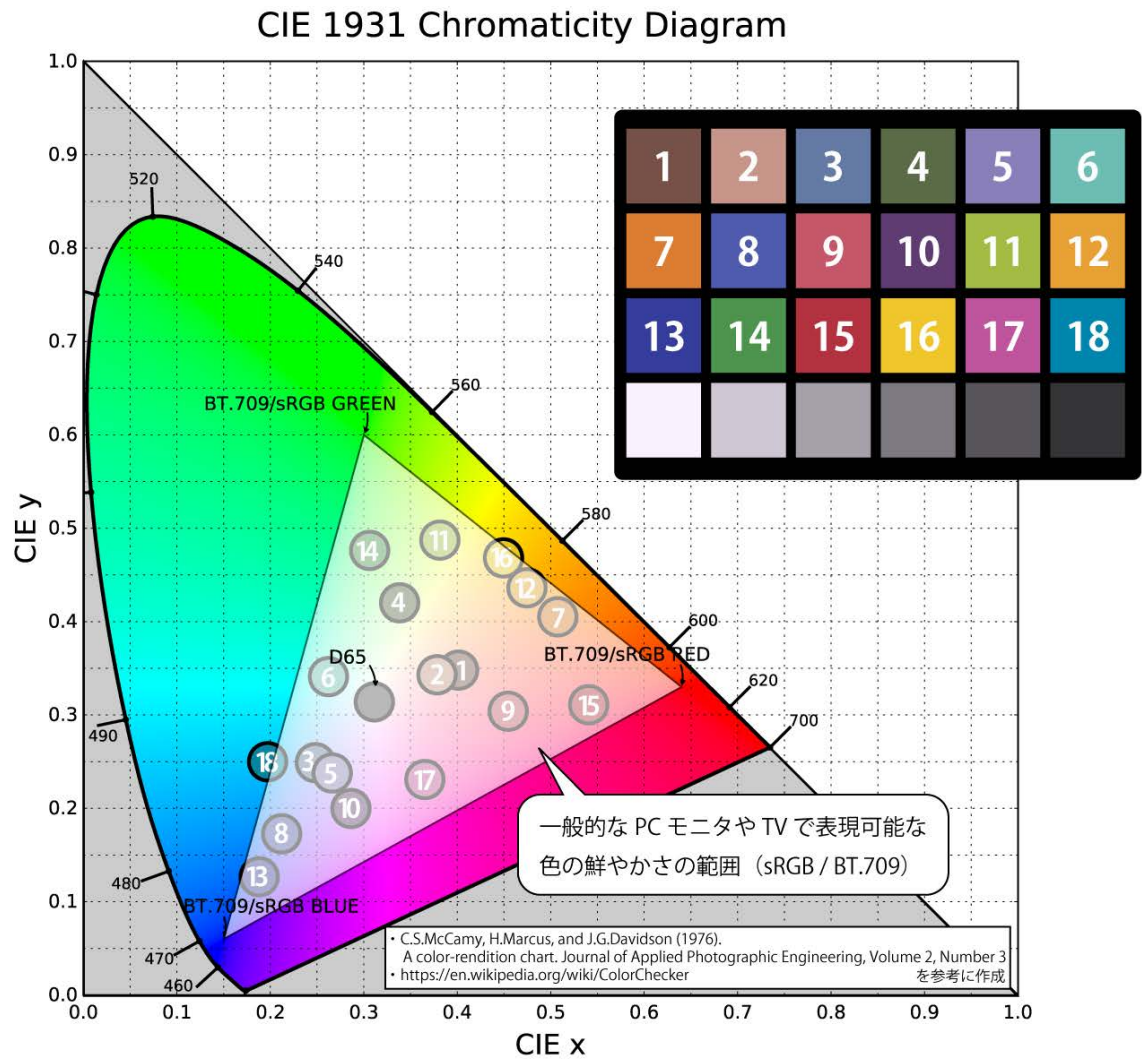
分光反射率が定義されていることで、光源を決めれば、その光源に照らされたカラーチャートの三刺激値、および色度座標を算出することができる。上図はイルミナントCの光源の元で得られるY, x, yを示している。

1. 3. チャートと色度座標



上図は前頁(P.18)で示すカラーチャートの色度座標を「色のものさし」、CIE xy色度図にプロットしたものである。(例えば、P.18における”blue sky”は、3番とナンバリングしている)。

1. 3. チャートと色度座標



イルミナントC光源下のカラーチャートと、一般的なPCモニターやTVで表現可能な“色の鮮やかさの表現範囲”との比較を示している. この図から、一般的なPCモニターやTVでは、カラーチャートのほとんどの色をカバーしていることが確認できる.

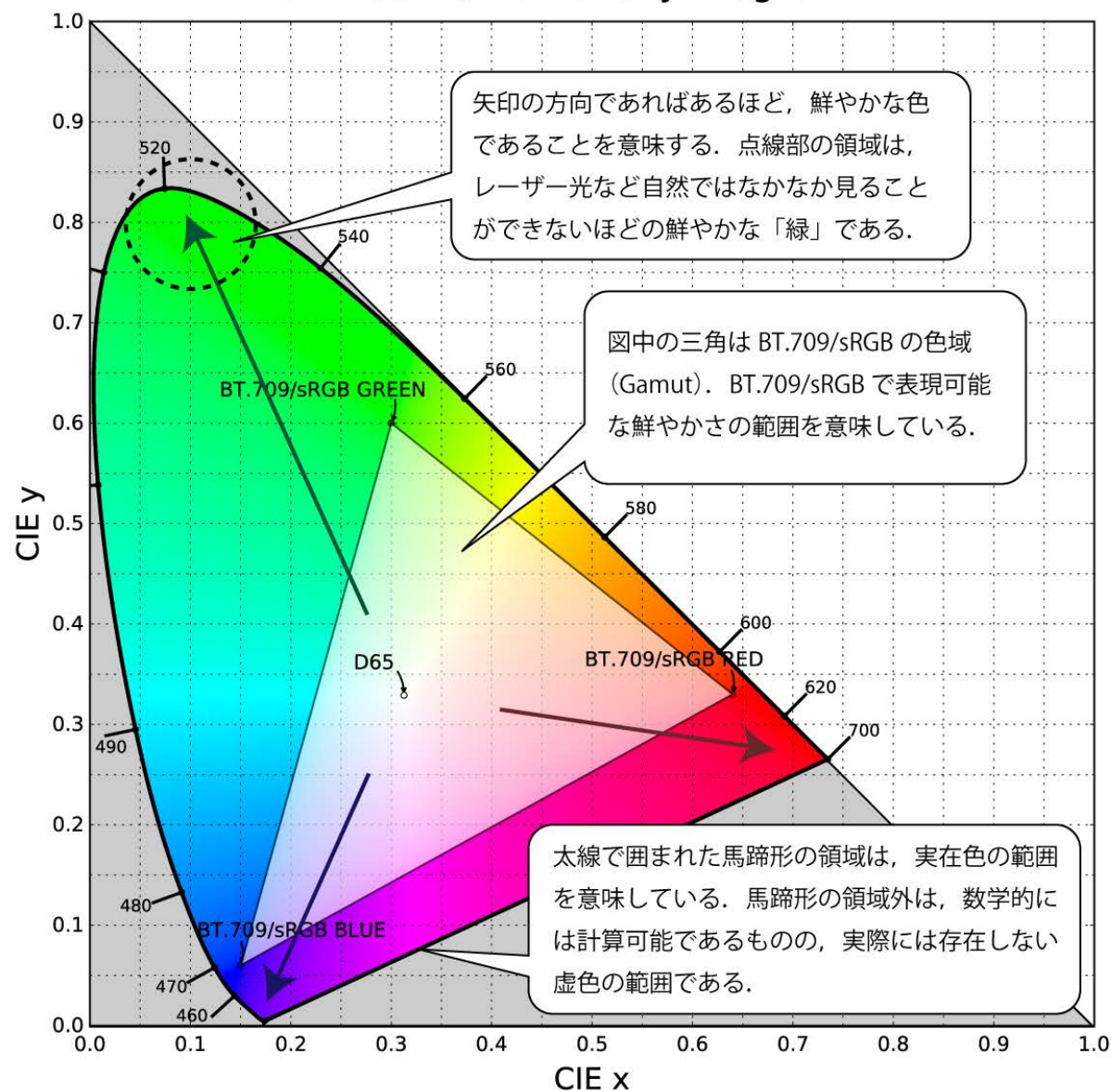
1. 4. xy色度図の読み取り

次頁(P.22)はCIE xy色度図の読みとり方を説明している. P.22で示すとおり, CIE xy色度図上の太線で囲まれた馬蹄形の領域(実在色の領域)は, 人間の目で捉えることができる色味の範囲を示している. 馬蹄形の中に示される三角形の領域は, 一般的なPCモニターやTVで採用される“色の鮮やかさの表現範囲”を示すもので, 色域と呼ばれる.

人間が見ることのできる色味の範囲と比べると, 一般的なPCモニターやTVでサポートしている色域は限定的であることが, CIE xy色度図を利用することで明らかとなる. (色の範囲とは色味だけでなく明るさも関係するが, P.22はY, x, yのうちYを省いた色味だけの状態でグラフ化していることに注意されたい.)

1. 4. xy色度図の読み取り

CIE 1931 Chromaticity Diagram



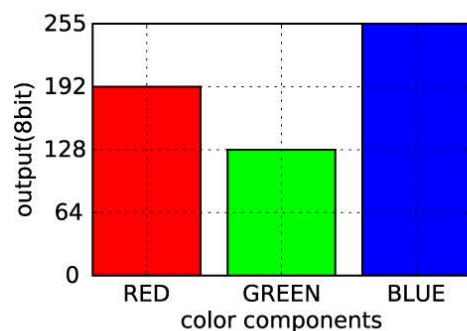
1. 5. sRGB値からXYZへの変換

(R, G, B)=(192, 128, 255) は色の数値表現ではあるものの、色の見た目の数値表現でないということは、先に述べたとおりである。このRGB値をX, Y, ZおよびY, x, yに変換し、CIE xy色度図上で表示するには、どのような追加の情報が必要だろうか。

カメラやスキャナーなど画像をキャプチャーするデバイスは、受け取った光をデジタルデータに変換する際、トーンの処理も同時に行われる。モニター表示においても、デジタルデータを光として出力する際に同様の処理が行われている。これらは一般にガンマ処理と呼ばれるが、この処理によるRGB値の変化分は事前に相殺されなければならない。ガンマ処理分が取り除かれたRGB値は、ある三原色の混合割合（相対値）となる。これを絶対値に変換するためには、基本となる三原色の色度座標に関する情報と、白色、つまり(R, G, B)=(255, 255, 255) がどのような色となるのかの情報が必要となる。ガンマ処理、基本となる三原色、白色は、デバイスに固有な場合と、国際標準に従う場合があるが、次頁(P.24)ではRGB値が国際標準の一つ、sRGBであるという情報を基にしてX, Y, ZおよびY, x, yに変換する例が示されている。

1. 5. sRGB値からXYZへの変換

RGB値を「色のものさし」上で表す手順について

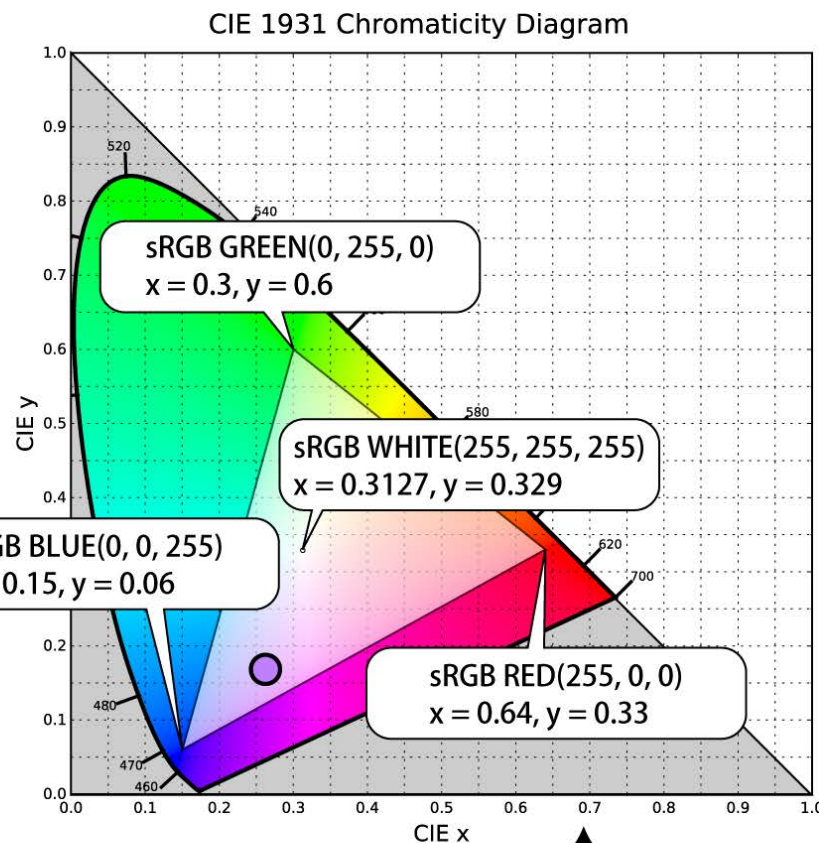


(R, G, B)=(192, 128, 255)

例：「この RGB 値は sRGB である」

sRGB → XYZ → Yxy への変換処理

RGB 値を XYZ（または Yxy）に変換するには、色域と白色点、ガンマの情報が必要

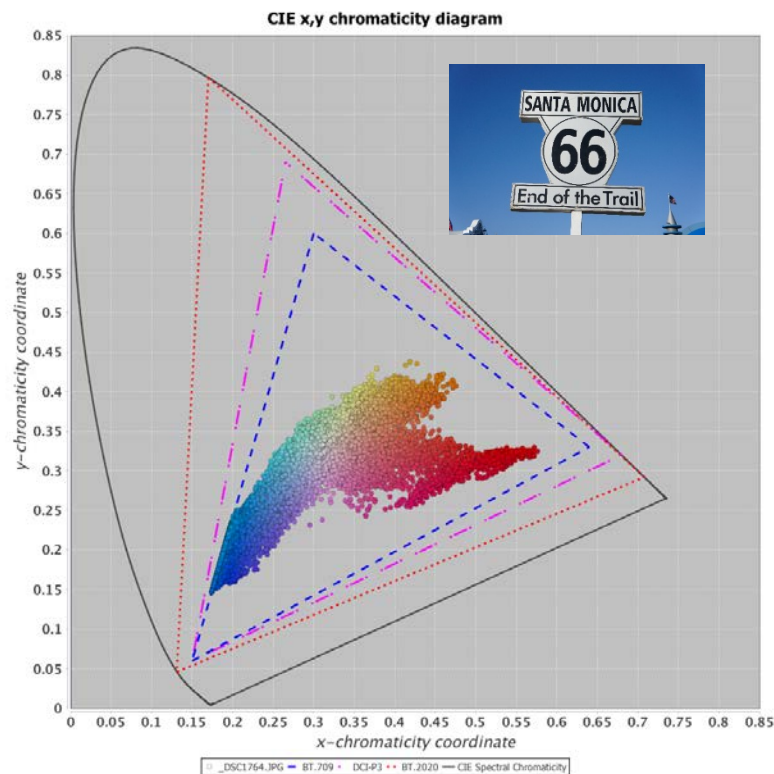
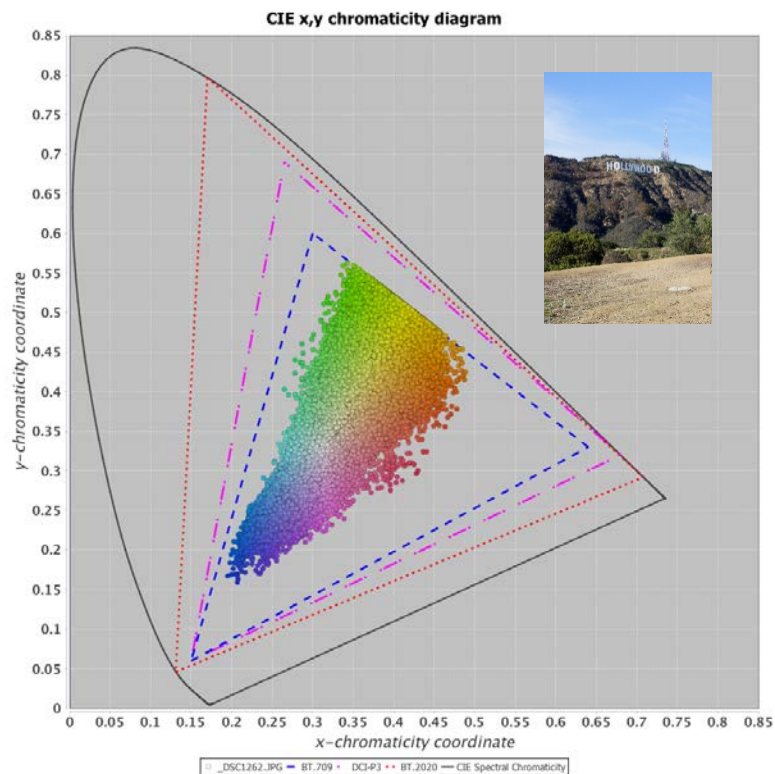


1. 5. sRGB値からXYZへの変換





1. 5. sRGB値からXYZへの変換

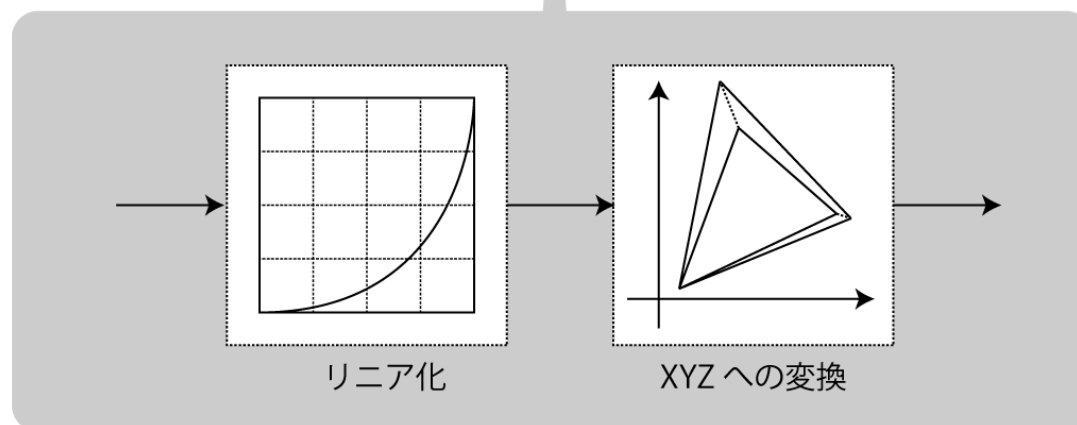
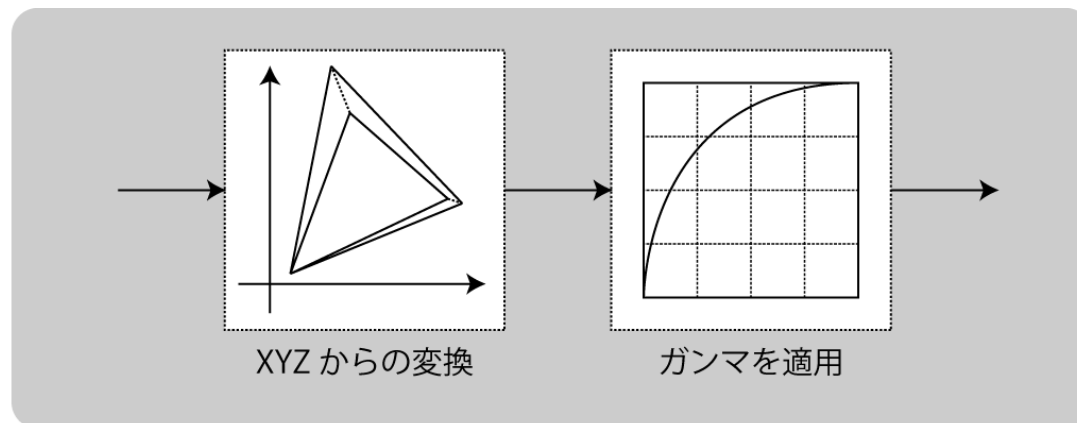


上図はsRGBモードで撮影された写真の 픽셀すべてをY, x, yに変換し, CIE xy色度図上にプロットしたものである. 左では緑色からオレンジ色, 右では青色が三角形(sRGBの色域)の辺上に張り付いていることが確認できる. これはsRGBの表現域では本来の色が収まらず色が飽和していることを示すものである.

1. 6. カラースペース間の変換

XYZ は、異なる二つの色空間（カラースペース）を接続するために用いられることがある。

色空間に関する情報（色域・白色点・ガンマ）から XYZ への変換を求めることができる。変換と逆変換を組み合わせることで、色空間の行き来が可能となっている。

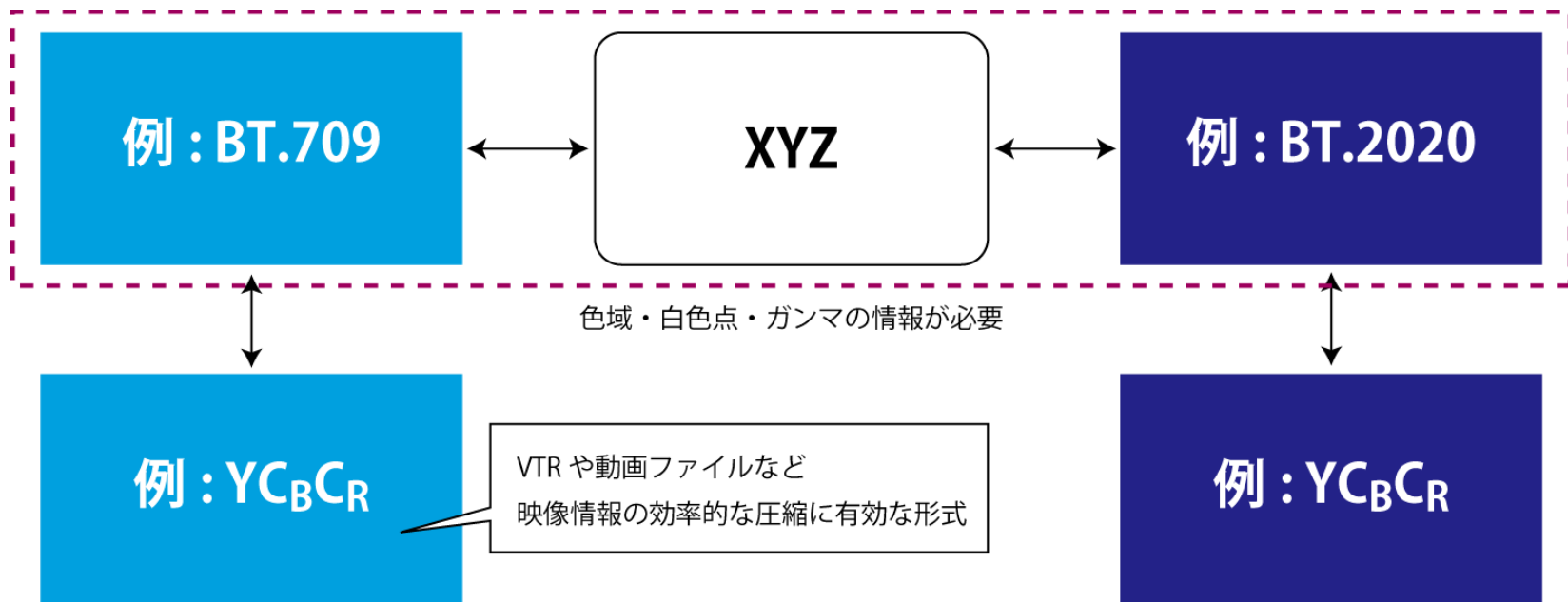


実際には、変換前後の色域の大小の問題（出力の色空間ではカバーできない鮮やかな色をどのように変換するか等 Gamut Mapping の問題）や、色温度変換をどのように扱うかという問題があるため、このモデルはあくまで単純化されたものである。

1. 6. カラースペース間の変換

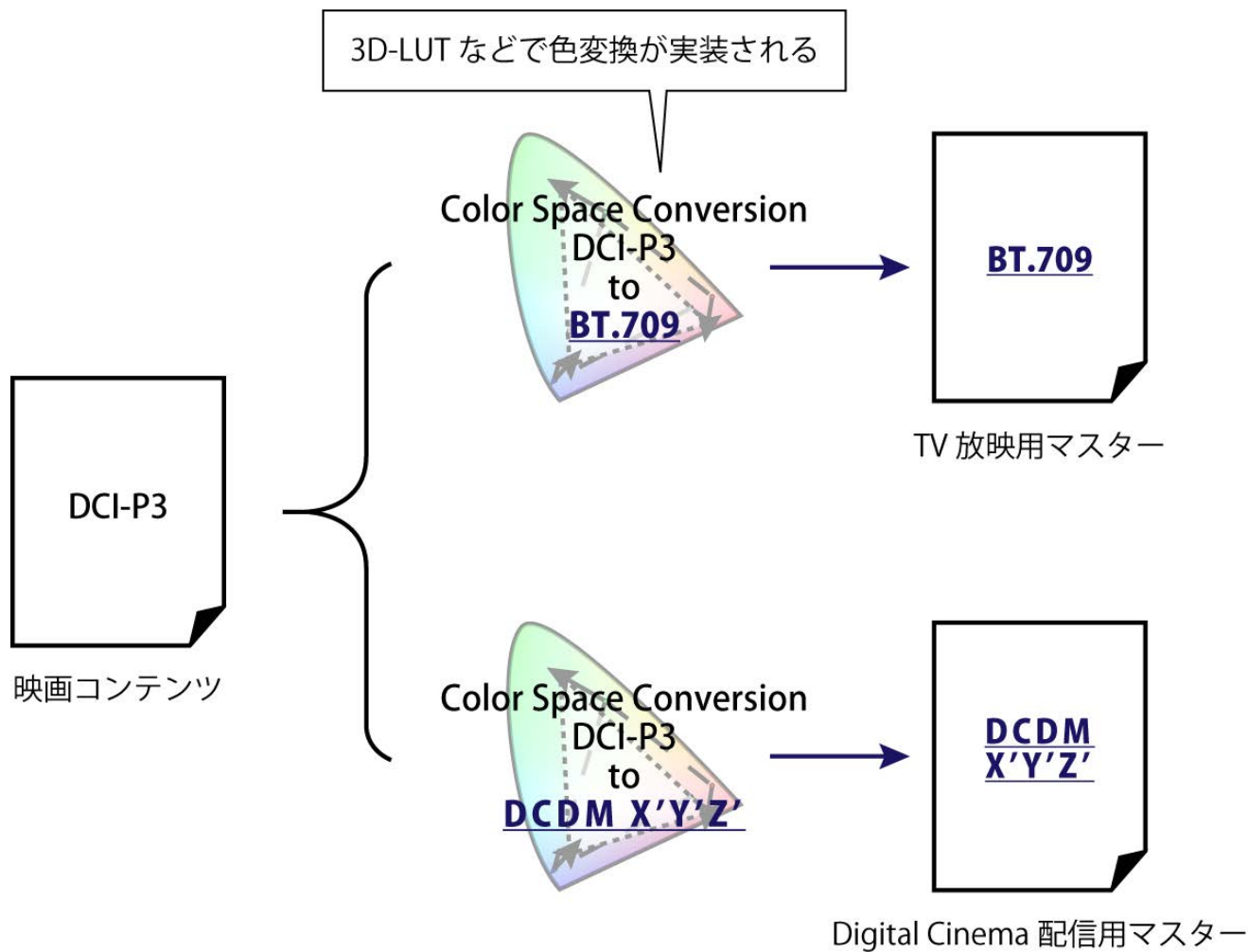
規格名	Recommendation ITU-R BT.709-6 ³⁾	SMPTE RP 431-2:2011 ⁶⁾	Recommendation ITU-R BT.2020-2 ⁵⁾	SMPTE ST 428-1-2006 ⁶⁾
色に関する通称名	Rec.709 BT.709 709	DCI-P3 P3	Rec.2020 BT.2020 2020	DCDM X'Y'Z' XYZ
カラースペースとして扱われる事柄	色域(sRGBと同じ) ガンマ 白色点(D65) 表示のため CRT/BT.1886 ⁴⁾ と使用	色域(sRGBと比べ広い) ガンマ 白色点 (x=0.314, y=0.351)	色域(非常に広い) ガンマ 白色点(D65) BT.1886と使用	色域(非常に広い) ガンマ 白色点(EF) 白輝度 ピーク:52.37cd/m ² 基準:48cd/m ²
用途	HDTV 日本ではBT.709の表示をD93で運用	Digital Cinema	UHDTV	Digital Cinema 配信用マスター

1. 6. カラースペース間の変換



XYZは色変換時のハブとして機能する

1. 6. カラースペース間の変換



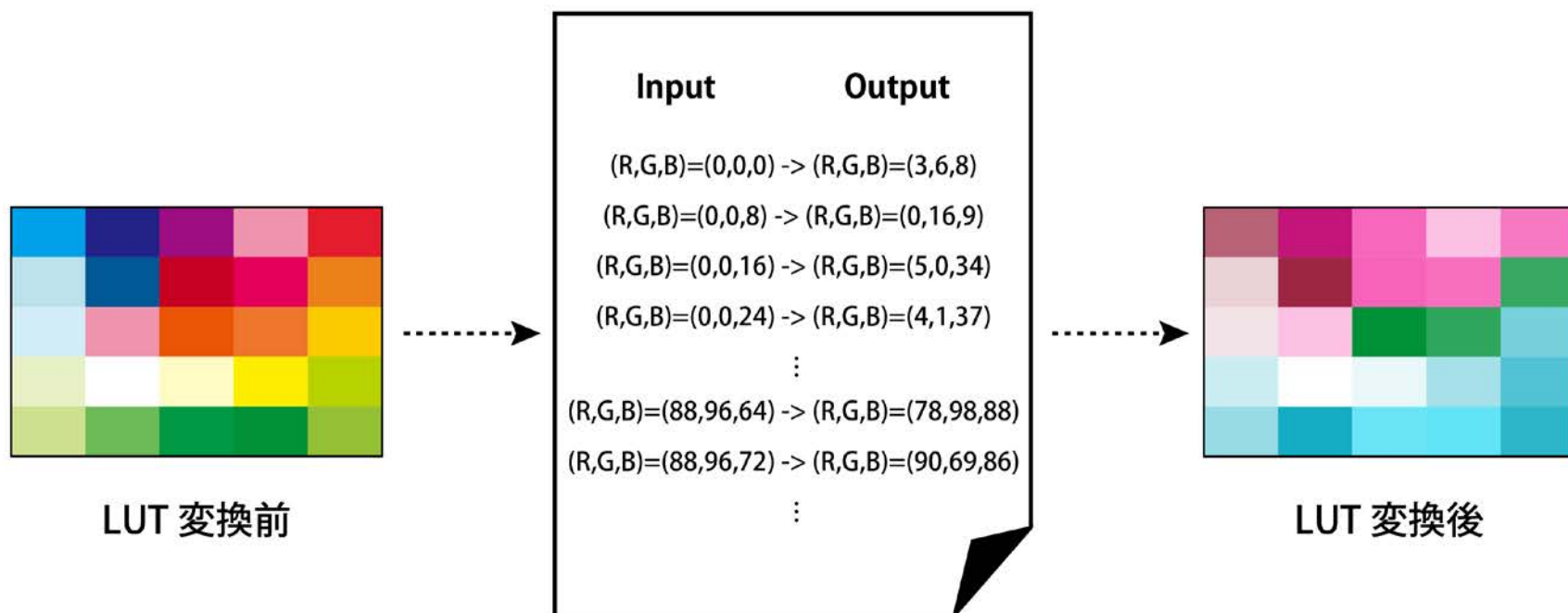
正しく変換することで、色の見た目を引き継ぐことができる

1. 7. ルックアップテーブル(LUT)

LUTとはLook Up Tableの略で、“ラット”と発音されることが多い。LUTは名前のとおり参照表のことであり、変換前後(変換前の数値は省略されていることが多い)の値の組が記されている。LUT自体は情報処理のさまざまな場面で活用されているが、殊に映像制作の場面では色変換のために使用されることがほとんどである。カメラマン、VE(ビデオエンジニア)、カラリスト(またはグレーダー)が作成した映像の見た目(ルックと呼ばれることが多い)をLUTとしてやり取りしたり、前頁(P.31)のように、カラースペースの変換のために用いられったり、用途はさまざまである。

ポストプロダクションの中でも特にフィルム処理を扱う施設は、デジタルデータとフィルムの色の橋渡しのためにLUTを独自開発しているケースがある。例えば、モニター上で色が決められたコンテンツを、フィルムにレコーディング、現像処理し、最終的にスクリーンにプロジェクションする場合、決められた色をスクリーン上で再現するためには非常に高度なカラーマネジメントが必要となる。使用するフィルムの種類、レコーディングの方法、現像処理など色が変わる要因は多岐に及ぶが、フィルムを処理する工程を厳密に管理した上で、LUTを使用し詳細な色のコントロールを行うことで、スクリーン上での色の再現を可能にしている。他にも、デジタルデータを“フィルムらしい見た目”に変換する目的でLUTが使用されるケースもある。このような独自開発のLUTは、一般に長い年月をかけて大量の計測データをもとに開発されている。

1. 7. ルックアップテーブル(LUT)



3D-LUT (Look Up Table)

R,G,B の値をどのように変化させるか記述されている

LUTは複雑な色の変換を短時間で処理するために活用される

2. カラーマネジメントの基礎

(映像の“見え”を決める要素)

2. カラーマネジメントの基礎(映像の“見え”を決める要素)

前章では、「色の見た目の数値化」に必要な考え方と、「色の見た目の数値化」により実現可能となる事柄を取り扱った。RGB値のやり取りだけでは色の見た目は保障されず、適用されたガンマ処理、基本となる三原色の色度座標(色域)、白色に関する追加の情報が必要であると説明した。

映像制作の現場ではマスターモニターと呼ばれる専用のモニターや、シネマ向けの専用のプロジェクターが使用されている。映像データは基本的にそれらに表示され、監督やカメラマンにより最終的な色が決められる。つまり、どのようにして撮影、スキャンされたにせよ、基本的には色が決められた時点で使用されていたデバイスの表示(そしてデバイスが設置された環境)に映像データの見えが依存するものと考える。そのため、表示デバイスの発色を決める要素の把握とともに、その要素をターゲットにあわせて正しく調整していることが、映像コンテンツのやり取り、または、長期保存を考える上で大変重要となるのである。本章では、映像データの見えを決定付ける要素について、関係する国際標準の紹介とともに深堀を進める。

2. カラーマネジメントの基礎(映像の“見え”を決める要素)

色域

- 色の範囲, 広さと狭さについて

ガンマ(OETF/EOTF), 視環境

- 入力と出力の応答特性について

白色の色度

- 色温度について

コントラスト

- 明部と暗部の比率について

表示デバイスの発色を決める要素(データの色に関係する項目も含む)

2. カラーマネジメントの基礎(映像の“見え”を決める要素)

映像の見え(または、モニター・プロジェクターの色)を決定する要素は、前頁(P.36)に示すとおりである。

色域とは、色の鮮やかさの表現可能な範囲のことである。カメラやモニター自身の色域と国際標準で定められた色域が存在する。モニターを例に取れば、映像制作の場面でモニター自身の色域がそのまま使用されることはほとんどなく、一般的には、モニター自身の色域の中で国際標準により定められた色域(BT.709など)が再現された状態で使用される。色域の再現が十分であれば、そこで制作されたコンテンツは色域に関する国際標準を満たしていると考えてよい。

ガンマ処理は、最近では撮像側か表示側かを明確にするために、OETF(撮像側のガンマ処理)またはEOTF(表示側のガンマ処理)といった用語が用いられている。OETFとEOTFは完全に相殺されるようには設計されておらず、最終的なガンマ(End to End Gamma)はリニアである必要がないことが知られている⁷⁾⁸⁾。

白色の色度は、xy色度座標としてだけでなく色温度として表現される。国内の映像制作では主にD65またはD93が使用され、デジタルシネマ向けには基準となる専用の白色が規格化されている。

コントラストは、白と黒の明るさの比率である。最近では有機ELパネルが採用されたマスターモニターの使用が増えている。有機ELは従来の液晶に比べコントラストが高く設定可能であることが特徴である。(映像の見えに影響する要素ではあるものの、表示に使用するパネルの種類に依存するため本稿では扱わない。)

色域

- 色の範囲, 広さと狭さについて

ガンマ(OETF/EOTF), 視環境

- 入力と出力の応答特性について

白色の色度

- 色温度について

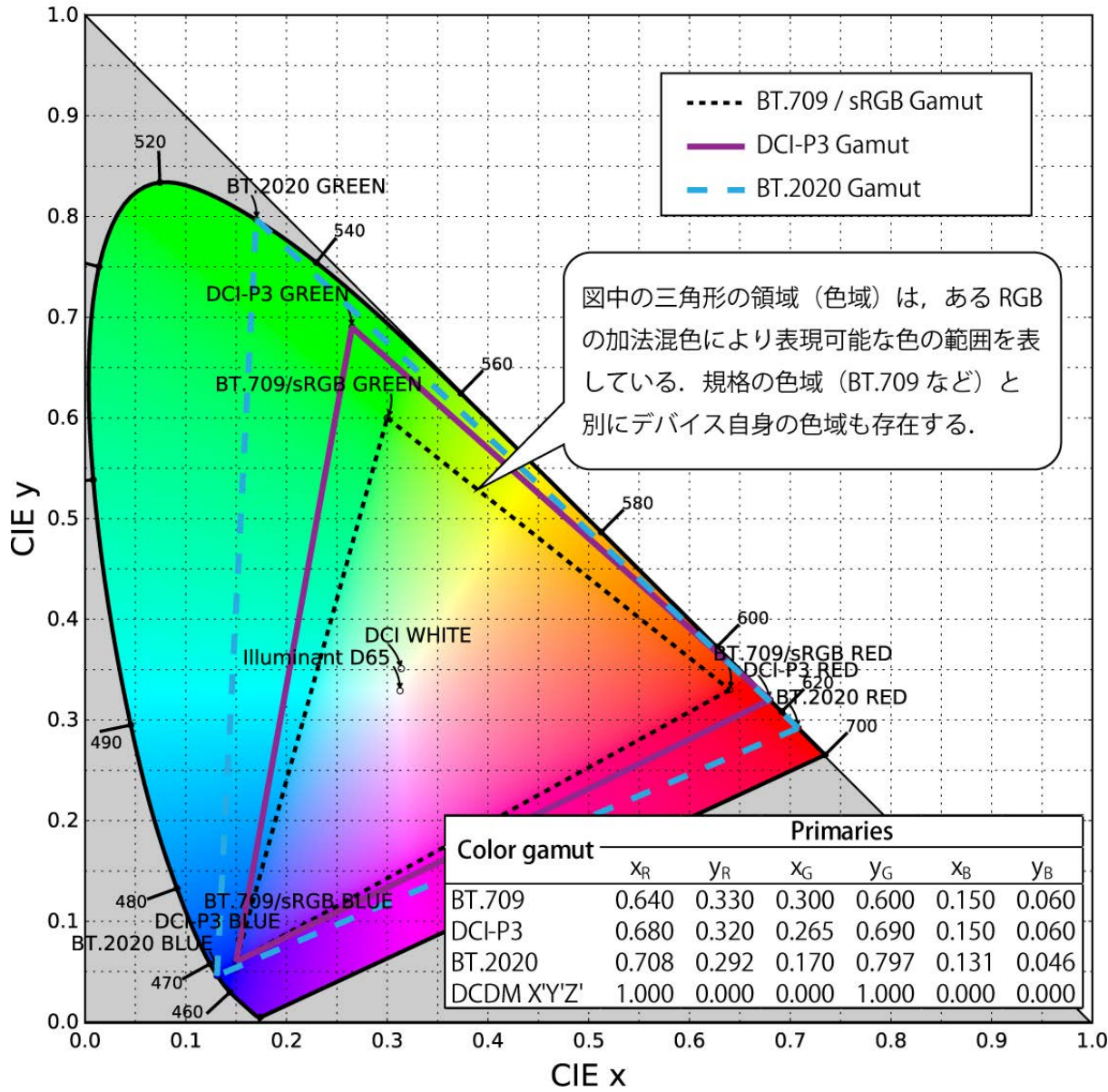
コントラスト

- 明部と暗部の比率について

表示デバイスの発色を決める要素(データの色に関係する項目も含む)

2. 1. 色域

CIE 1931 Chromaticity Diagram



2. 2. OETFとEOTF, End to End ガンマ

色域

- 色の範囲, 広さと狭さについて

ガンマ(OETF/EOTF), 視環境

- 入力と出力の応答特性について

白色の色度

- 色温度について

コントラスト

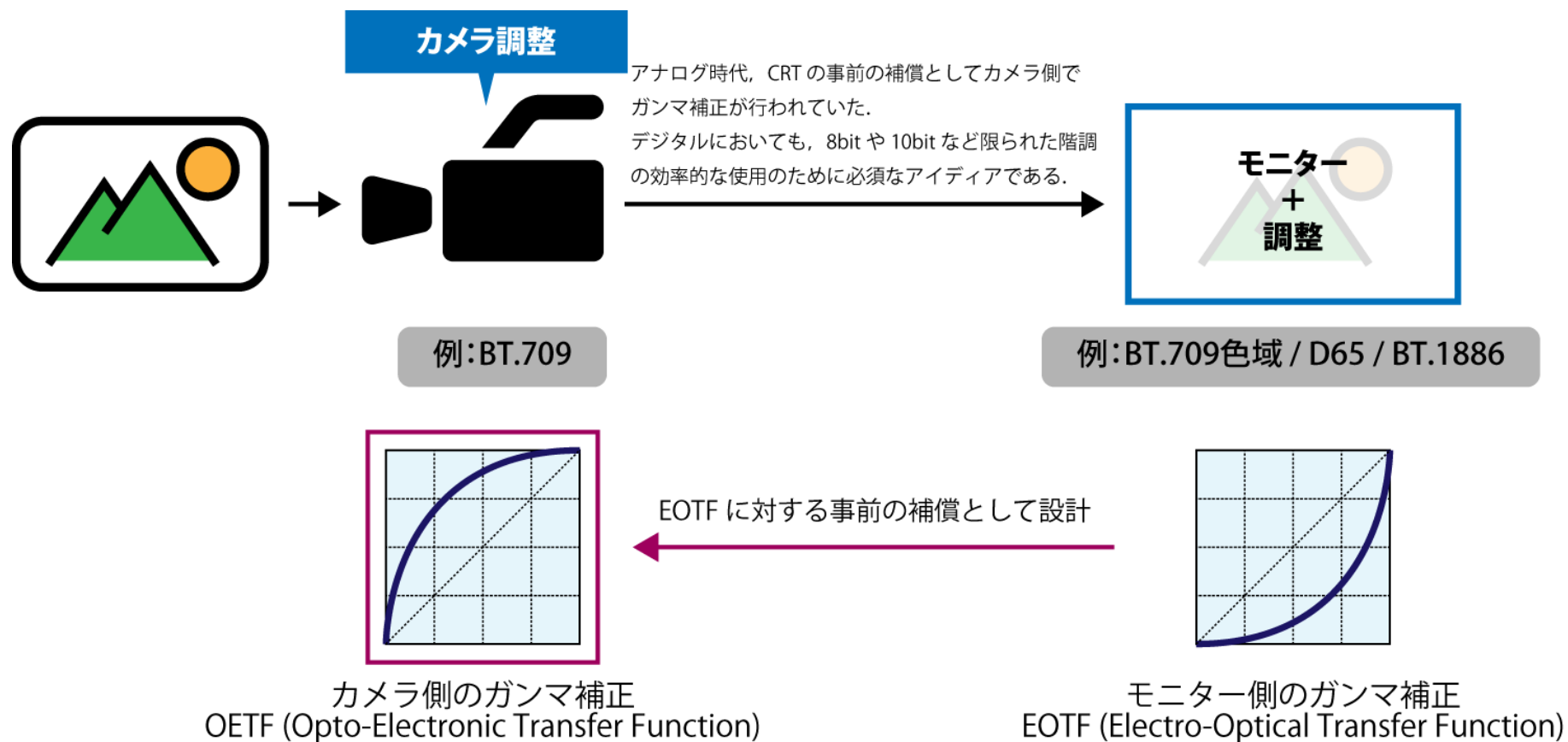
- 明部と暗部の比率について

表示デバイスの発色を決める要素(データの色に関係する項目も含む)

次頁(P.42)は、ビデオカメラで撮影された映像をTVで表示するというシンプルな関係をガンマ処理中心に図示したものである。通常、ビデオカメラで出力された映像はカメラ側のガンマ処理が適用されている。カメラはシーンの光を受け取り、電気信号に変換するという役割を担っていると考えると、そこで処理されるガンマの変換はOETF(Opto-Electronic Transfer Function)と呼ばれる。表示側では受け取った信号をモニターでガンマ処理し、その結果を画面に映し出す。モニターが電気信号を光に変える役割を担っていると考えると、モニターで行われるガンマ処理はEOTF(Electro-Optical Transfer Function)と呼ばれる。これらOETF-EOTFの処理はいわば透過的に行われることから、映像を扱う中でガンマ処理について意識することは少ないかもしれない。

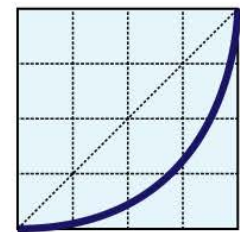
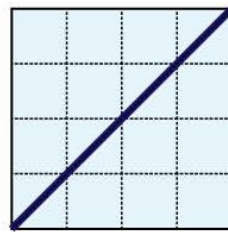
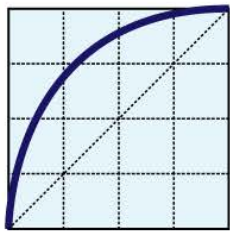
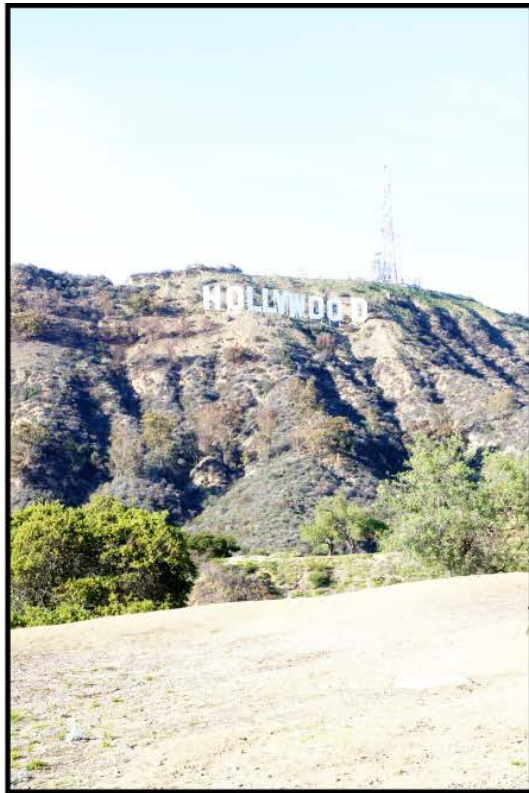
P.43で示すように、OETFでは映像を軟調にし、EOTFで硬調にする。この軟調・硬調の処理があらかた互いを打ち消しあうために、画面上では問題なく映像を見ることができるのである。

2. 2. OETFとEOTF, End to End ガンマ



「ガンマ」という用語はカメラ側をさすのか, モニター側をさすのか明確ではない
最近では, 「ガンマ」という言葉よりも, OETF や EOTF といった用語が用いられることが増えてきている

2. 2. OETFとEOTF, End to End ガンマ



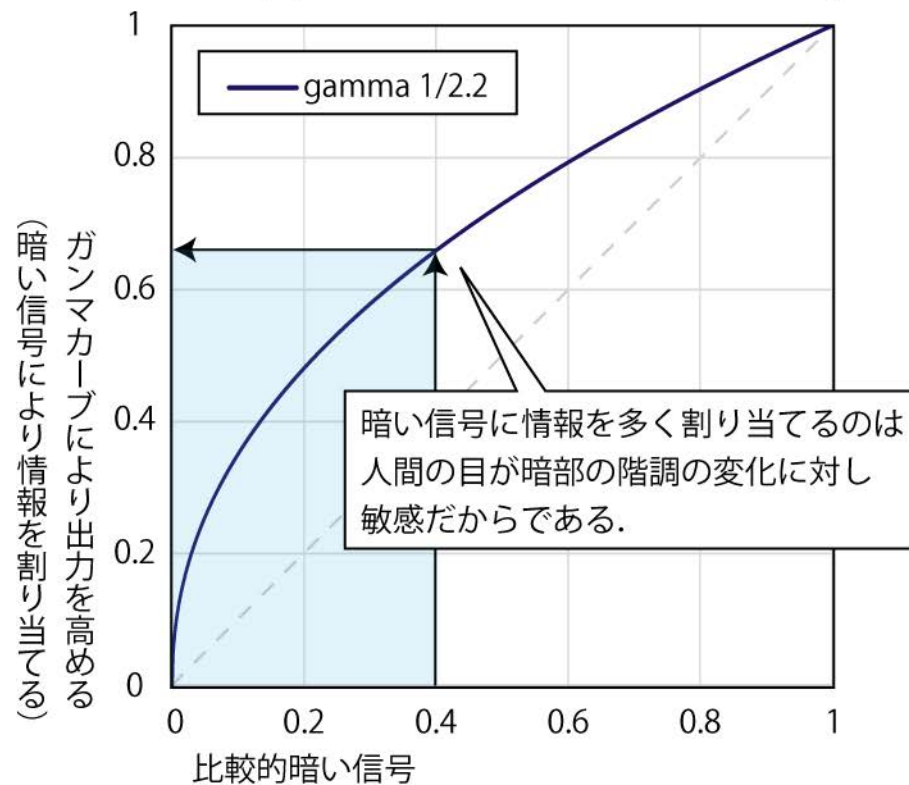
ガンマカーブにより出力を高めた結果
(OETF で行われる処理のイメージ)

ガンマカーブにより出力を弱めた結果
(EOTF で行われる処理のイメージ)

なぜこのようなガンマ処理が必要なのだろうか. 次頁(P.45)にその必要性を示す. ヴェーバー・フェヒナーの法則で知られるように, 人間の視覚は暗い光の変化には敏感で, 明るい光の変化には鈍感になる傾向がある. デジタルデータは8bitならば各色256階調, 10bitならば各色1024階調というように, 使用できる階調数は有限である. そのため, 人間にとって光の変化に敏感な領域に階調をより多く割り当てることで, 限られた階調数で可能な限り高品質な映像を扱えるようにしているのである.

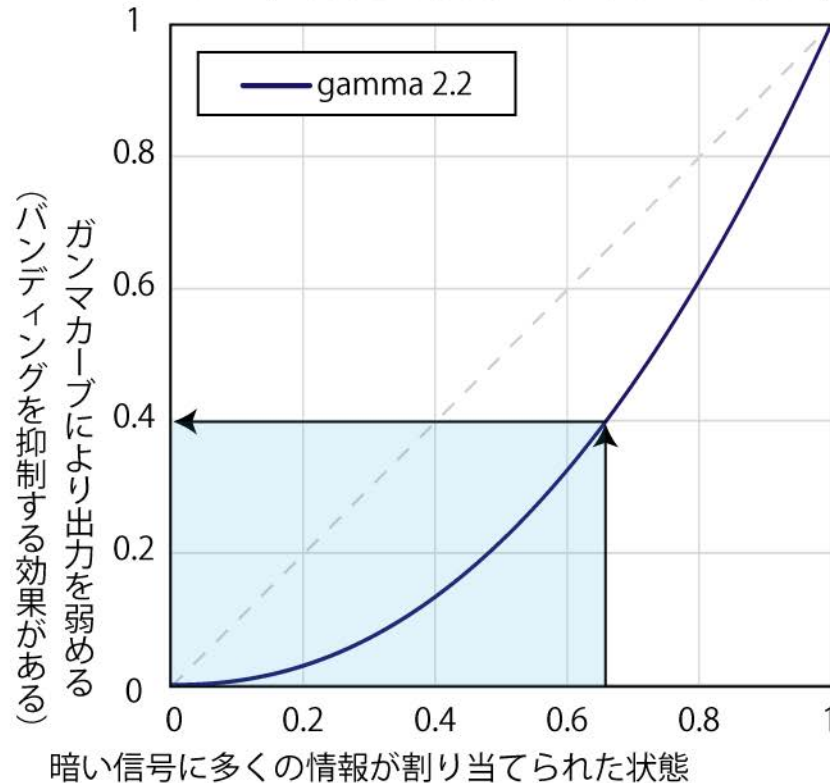
2. 2. OETFとEOTF, End to End ガンマ

カメラ側のガンマ補正
OETF (Opto-Electronic Transfer Function)



$$\text{Output} = \text{Input}^{(1/2.2)}$$

モニター側のガンマ補正
EOTF (Electro-Optical Transfer Function)



$$\text{Output} = \text{Input}^{(2.2)}$$

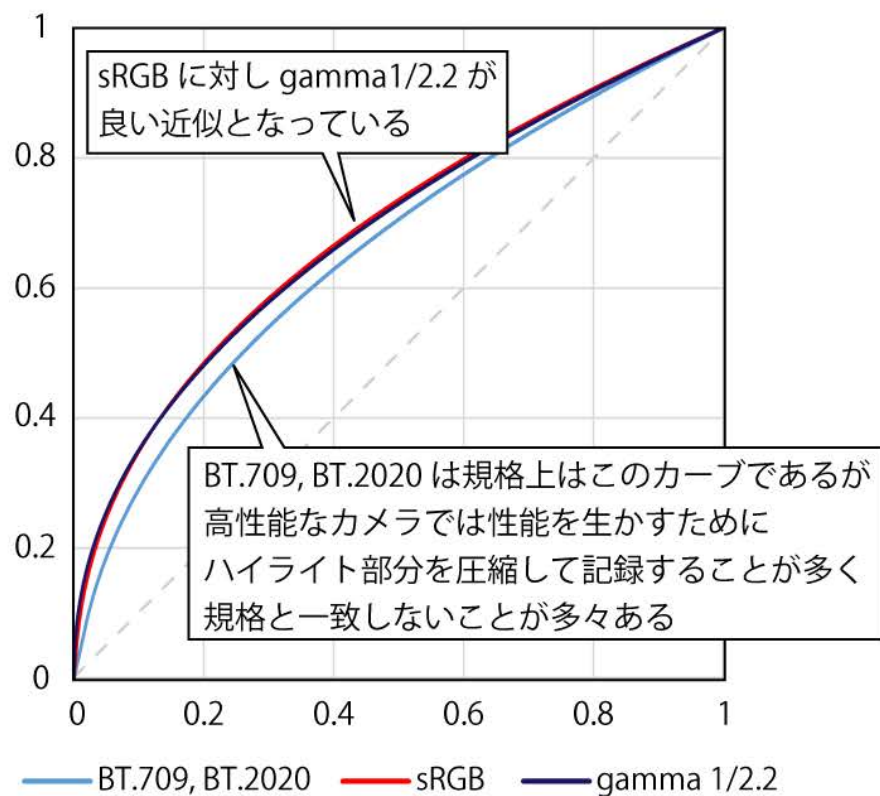
2. 2. OETFとEOTF, End to End ガンマ

次頁(P.47)に国際標準で定められたOETFとEOTFを示す. HDTVの標準であるBT.709, UHDTVの標準であるBT.2020で定義されるのはOETFのみであり, EOTFはBT.1886で規定されている. 元来, BT.709に対応するEOTFは存在していなかったが, スタジオで使用されてきたCRTの老朽化が進んだこと, また新規に入手することが不可能になったという背景があり, 代替であるフラットパネルディスプレイ向けに標準のEOTFが規定されたという経緯がある.

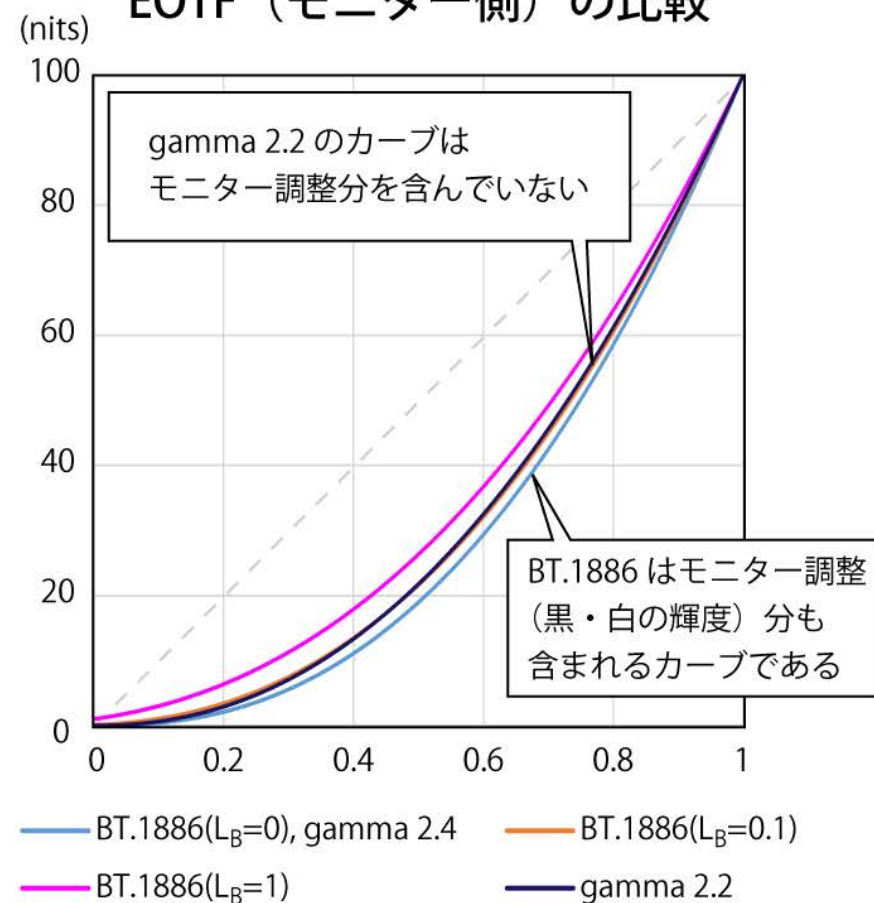
BT.1886は入力信号に対する画面上の輝度値の関係を規定するものであり, 黒に対する画面上の輝度値が0nitsであるとき, 入力信号と画面上の輝度値との対応が, 2.4のべき乗のカーブと一致する(尚, CRTとの一致を望む場合は, BT.1886文章中に L_B を0.1nitsまたは0.01nitsとする具体例も示されている. グラフに示すとおり, L_B を0.1nits とする場合, 2.2のべき乗のカーブに近くなる).

2. 2. OETFとEOTF, End to End ガンマ

OETF（カメラ側）の比較⁹⁾



EOTF（モニター側）の比較



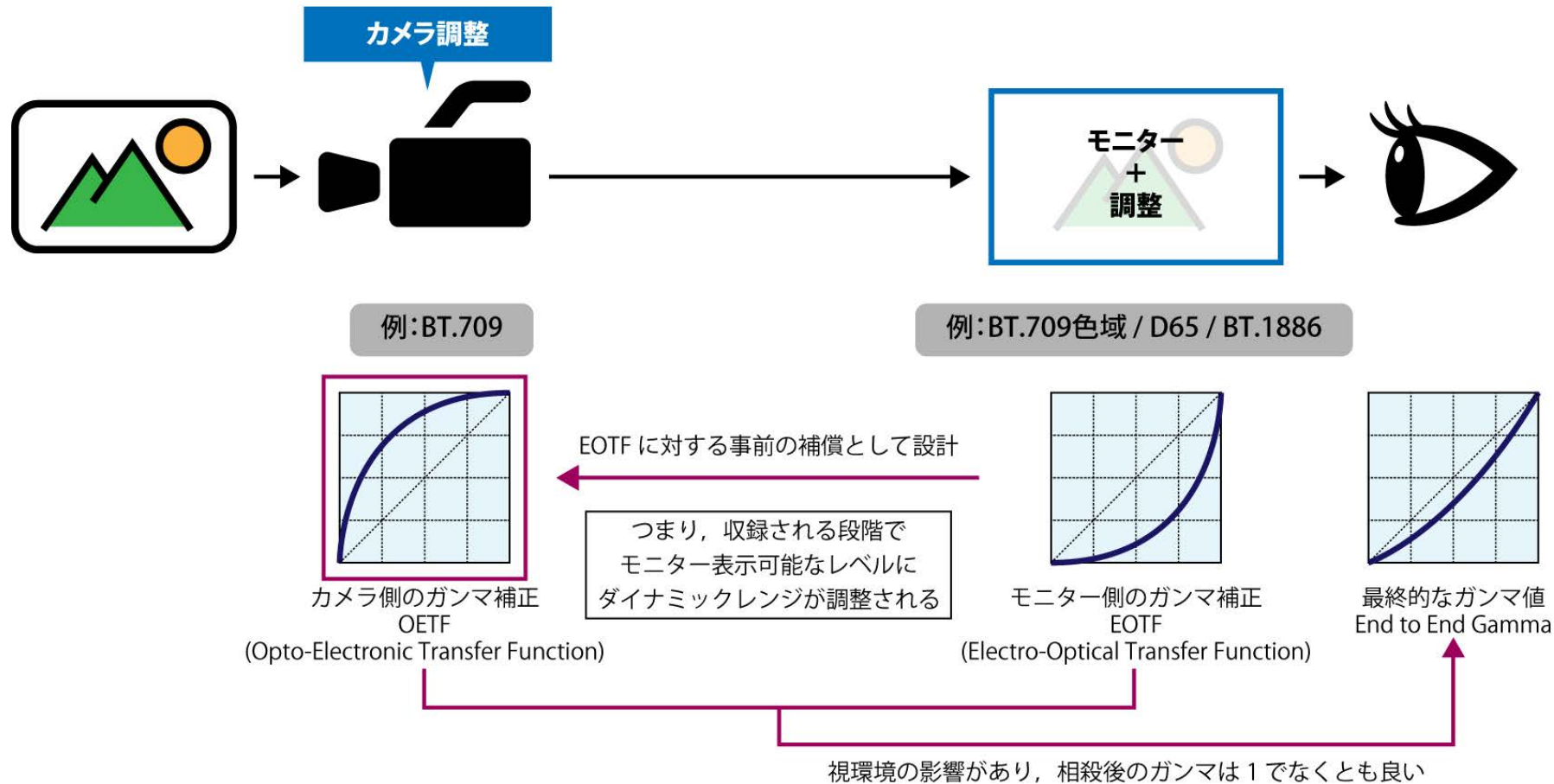
2. 2. OETFとEOTF, End to End ガンマ

ここまでで明らかであるが、TVに関する国際標準で規定されたOETFとEOTFは互いに完全に相殺しあう関係には無く、EOTFによる硬調化がわずかに残った状態が最終的なガンマ(End to End Gamma)となる。P.49にはその関係が、P.50には詳細なグラフが示されている。

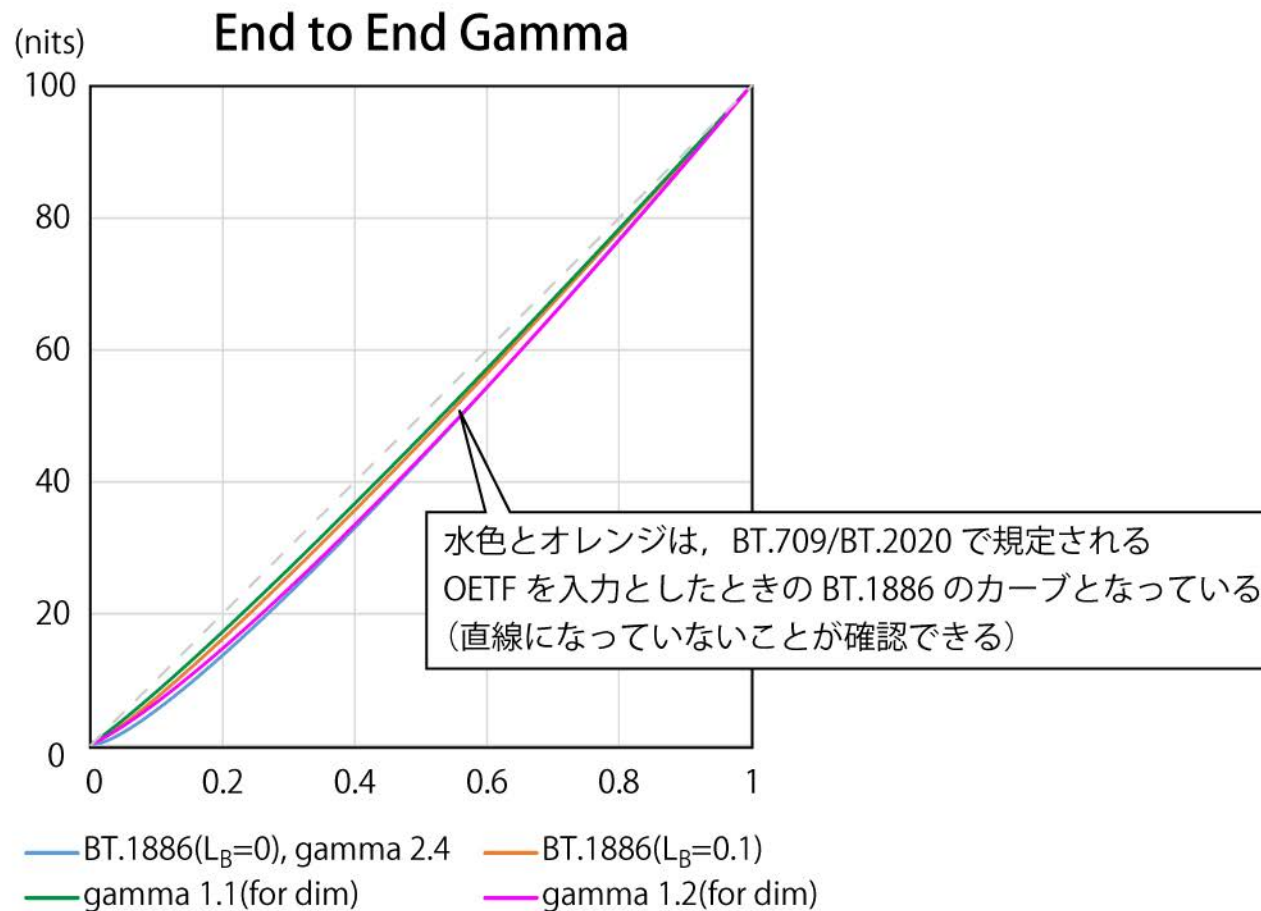
OETFとEOTFが完全に相殺しないという事実は、撮影される環境と閲覧される環境の視環境の差による人間の視覚への影響に対し、“よりよい見た目”を提供することに役立っている。編集室では、モニターへの光の映り込みを防ぐなどの理由で一般的に薄暗い照明下で作業が行われるが、これは映像が撮影された環境の明るさと比べると(ほとんどのケースで)暗い環境で作業していることになる。その視環境の差による映像の見え方の変化を、最終的なガンマ(End to End Gamma)が補償していると考えられている。

P.51は、BT.709/2020のOETFと、デジタルシネマカメラで使用される“Log”を比較したものである。“Log”はメーカー各社さまざまなトーンを開発しているが、これらも光を電気信号に変換しているという役割から、OETFとして分類することができる。

2. 2. OETFとEOTF, End to End ガンマ

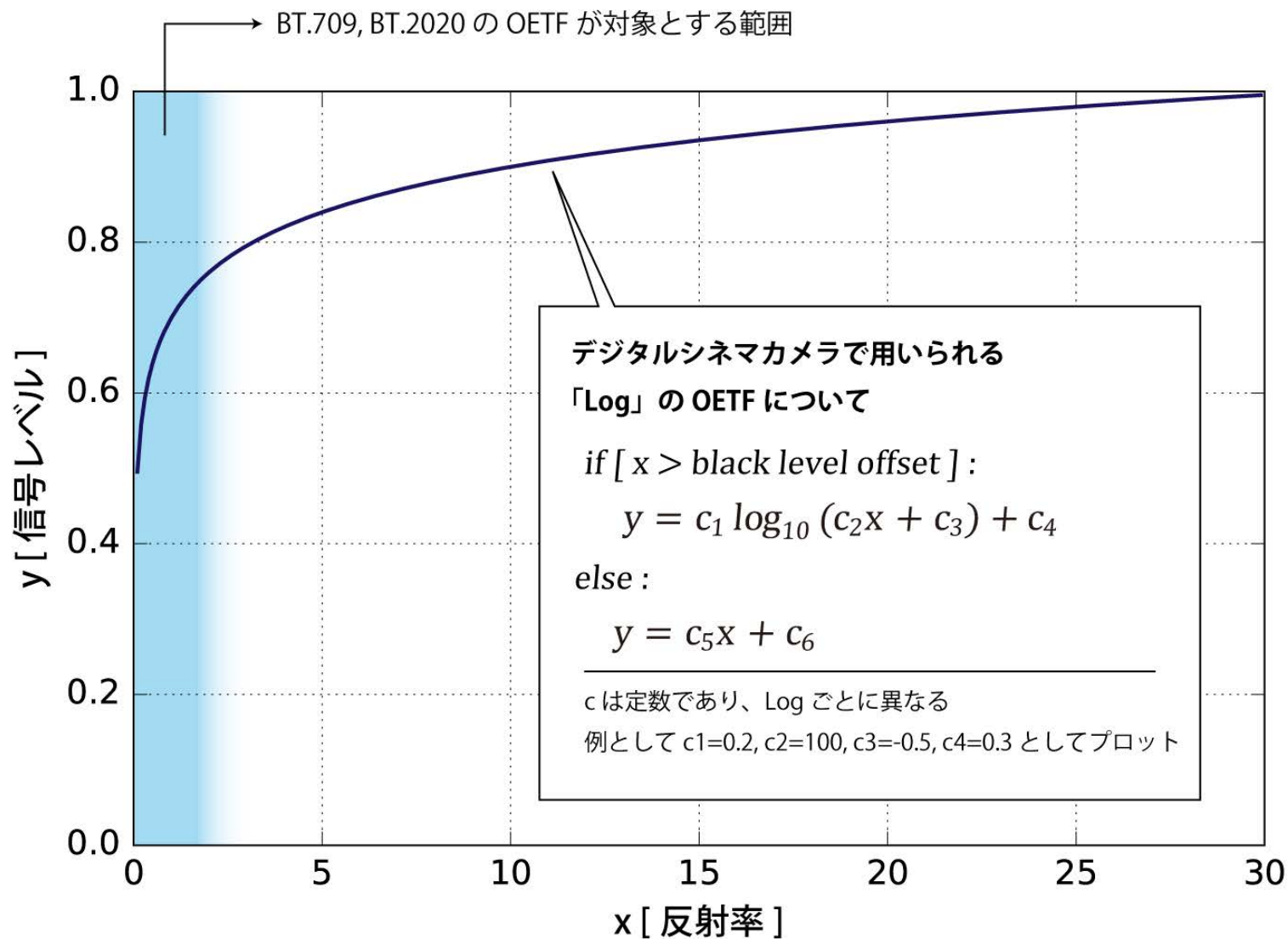


2. 2. OETFとEOTF, End to Endガンマ



「薄暗い環境 (dim surround)」においては, その条件が人間の感覚に与える影響により最終的なガンマ (End to End Gamma) が 1 である必要がないことが知られている. (ただし, この議論は「カラーコレクションを前提としないフロー」に限定される)

2. 3. ビデオとLog



ビデオで使用される OETF と比べ、Log の OETF はシーンの情報を幅広く記録することができるように設計されている。
(一方で、そのままの状態ではモニター表示には向かない)

2. 4. 白色点の色温度

色域

- 色の範囲, 広さと狭さについて

ガンマ(OETF/EOTF), 視環境

- 入力と出力の応答特性について

白色の色度

- 色温度について

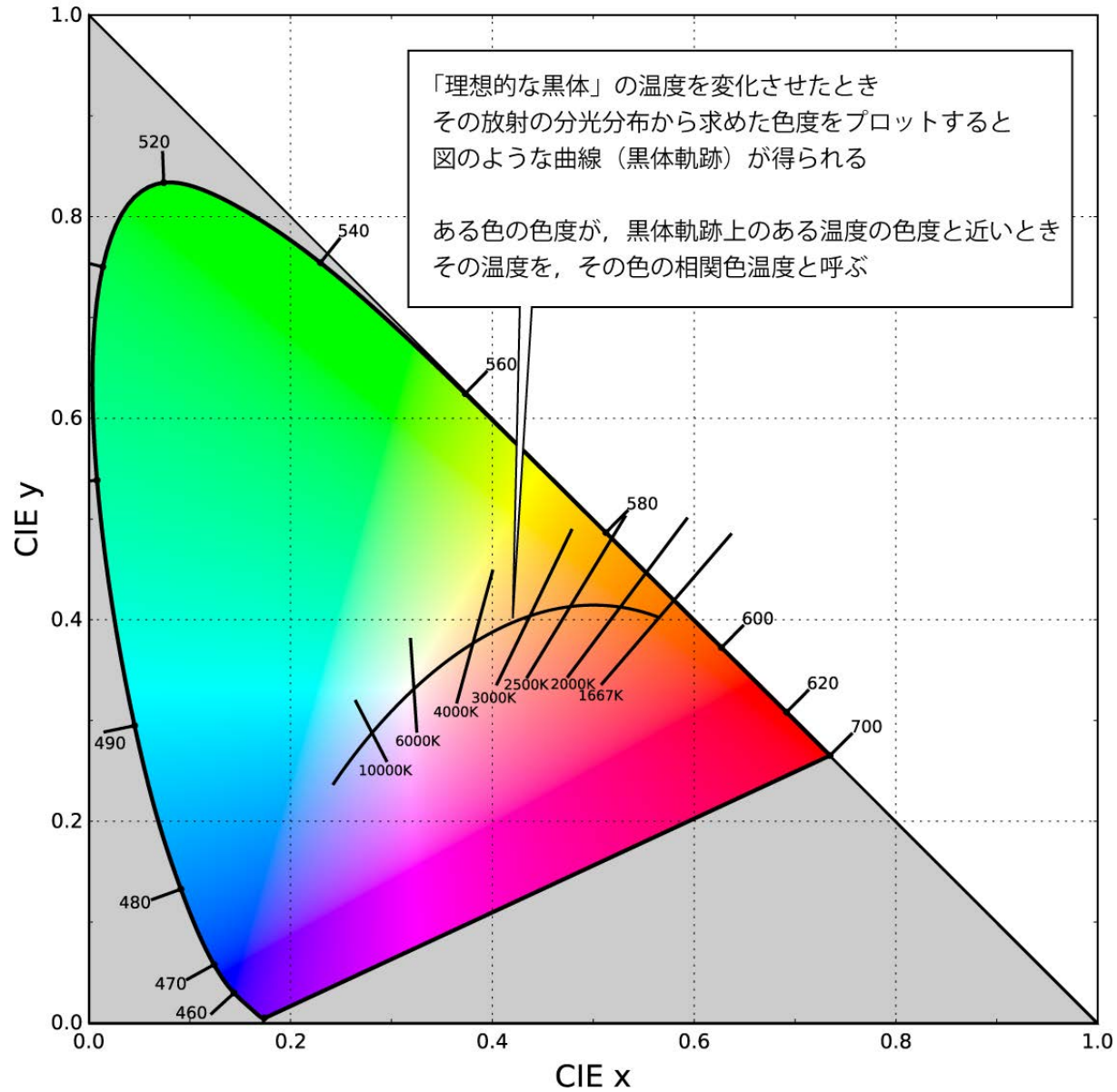
コントラスト

- 明部と暗部の比率について

表示デバイスの発色を決める要素(データの色に関係する項目も含む)

2. 4. 白色点の色温度

CIE 1931 Chromaticity Diagram

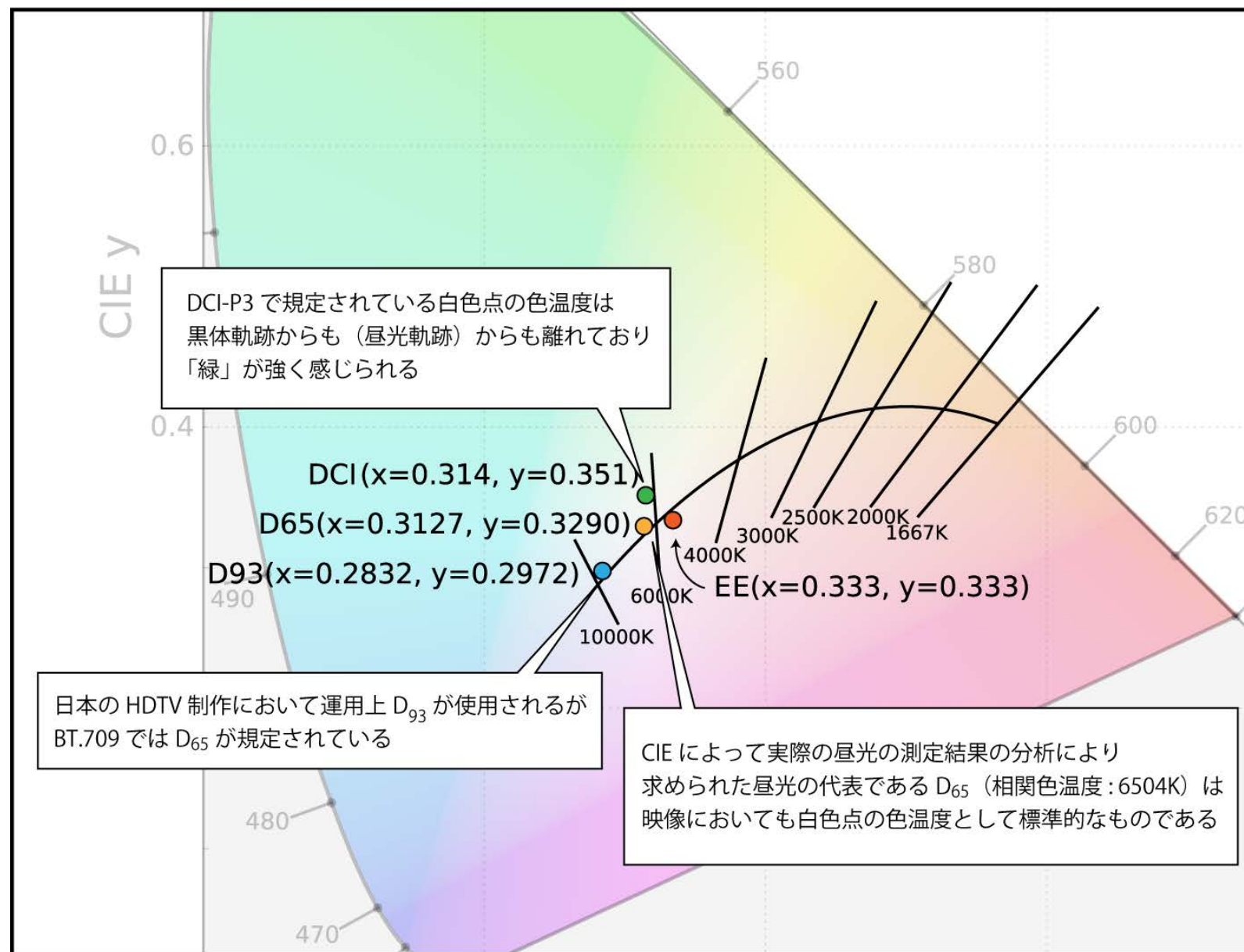


2. 4. 白色点の色温度

映像制作の基準となる白色は, xy 色度座標以外に色温度として表記することが可能である. 次頁(P.55)で示すように, HDTV, UHDTVではその国際標準においてD65が規定されている(しかしながら国内のHDTV向けコンテンツでは, SDTVで使用されていたD93が引き続き使用されている事実がある). D65, D93ともに, 昼光軌跡上に存在し, 黒体軌跡上に位置しないということに注意されたい.

デジタルシネマで使用される白色は, スクリーンの基準として $Y=48\text{nits}$, $x=0.314$, $y=0.351$, DCDM(配信用マスター)で使用されるエンコーディング上の基準は等エネルギー白色の色度座標 $x=1/3$, $y=1/3$ が規定されている. その中でコンテンツの白色を選択することができ, D65やD55などの色温度でカラーコレクションが可能になっている(D93のコンテンツも作成可能であるものの, 基準である48nitsを下回ってしまう).

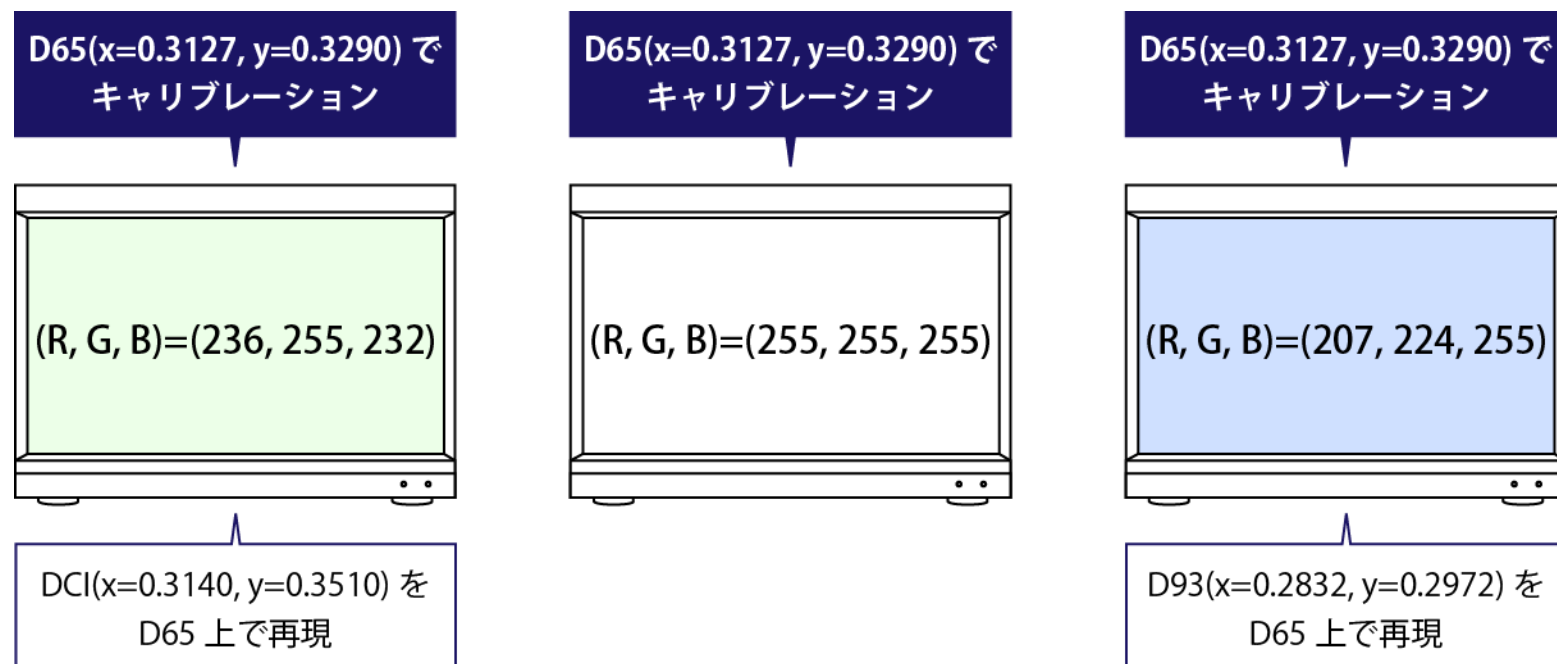
2. 4. 白色点の色温度



2. 4. 白色点の色温度

規格名	Recommendation ITU-R BT.709-6	SMPTE RP 431-2:2011	Recommendation ITU-R BT.2020-2	SMPTE ST 428-1-2006
色に関する通称名	Rec.709 BT.709 709	DCI-P3 P3	Rec.2020 BT.2020 2020	DCDM X'Y'Z' XYZ
カラースペースとして扱われる事柄	色域(sRGBと同じ) ガンマ <u>白色点(D65)</u> 表示のため CRT/BT.1886と使用	色域(sRGBと比べ広い) ガンマ <u>白色点</u> <u>(x=0.314, y=0.351)</u>	色域(非常に広い) ガンマ <u>白色点(D65)</u> BT.1886と使用	色域(非常に広い) ガンマ <u>白色点(E)</u> 白輝度 ピーク:52.37cd/m ² 基準:48cd/m ²
用途	HDTV <u>日本ではBT.709の表示をD93で運用</u>	Digital Cinema	UHDTV	Digital Cinema 配信用マスター

2. 4. 白色点の色温度



上図は、モニターの基準白色と、コンテンツの基準白色の考え方を示すものである。中央のモニターでは、D65で調整されたモニター上で白 $(R, G, B) = (255, 255, 255)$ がそのまま出力されており、白はD65の色として表示される。右側のモニターでは、D65で調整されたモニター上で、 $(R, G, B) = (207, 224, 255)$ が表示されているが、これは、D65のモニター上でD93の白色が再現されている状態である。一度D93で仕上げたコンテンツであっても、もとの xy 色度が維持されるような再現は可能である。しかしながらこの変換は、コンテンツの輝度低下を避けることができないために、D65のモニターを使用した、カラリストによる再度のカラーコレクションが求められるケースが多い。

2. 5. キャリブレーション



専用の計測器を使用したモニターキャリブレーションの様子
専門のスタッフによる定期的な調整が求められる
(写真撮影のため部屋を明るくしている)

3. カラーマネジメントの最前線

3. カラーマネジメントの最前線

ここまでで、色域、色温度、ガンマといったカラーマネジメントを行う上で基本となる概念について説明してきた。本章では、「カラーマネジメントの最前線」と題し、現在の映画制作のワークフローにおいてカラーマネジメントが担う役割と、その重要性がより高まっているという時勢の動きを伝える。

カラーマネジメントは映像制作の効率化に役立つ技術である一方で、映像コンテンツのアーカイブ分野においても非常に重要なアイデアといえる。新作であれ旧作であれ、どのような色で閲覧するのが正しいのかの判断は、色にかかわる必要なデータが残されていないと難しい。映像をその状態で3つに区分した上で、それぞれに対しどのような色情報が残されるべきかを説明する。

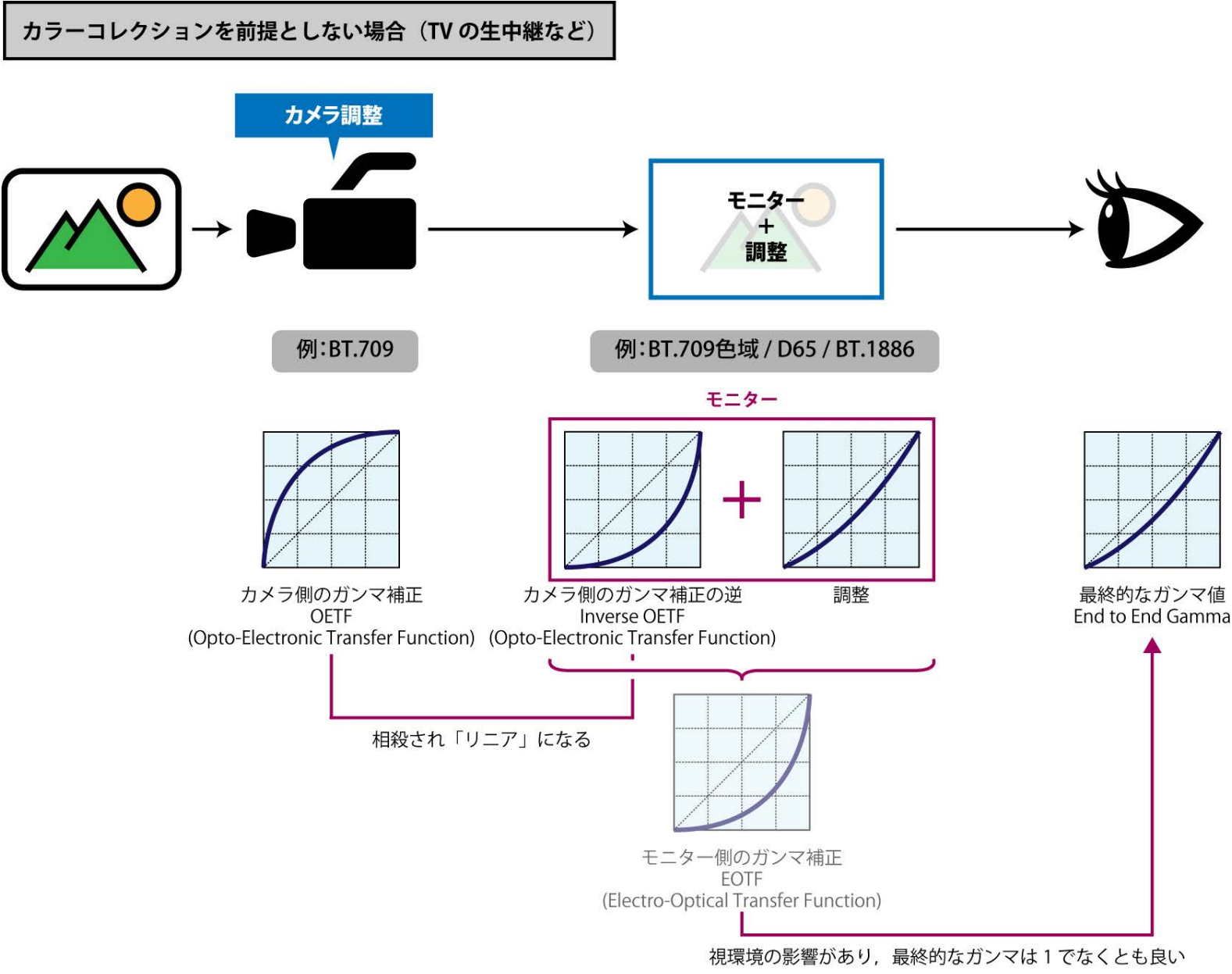
3. 1. カラーコレクションの有無, カラーコレクションの効果

ワークフローの説明前に, カラーコレクションの効果について確認しておきたい(映像の色をコントロールする作業をグレーディングと呼ぶこともあるが, 本資料ではカラーコレクションに統一している).

次頁(P.62)は, 調整済みのビデオカメラで撮影された映像がそのままモニターに表示される関係を示すものである. 先に述べたように, TVの国際標準で規定されるOETFとEOTFは完全に相殺されるわけではなく, 最終的なガンマ(End to End Gamma)はリニアにはならない. 最終的なガンマによりわずかに映像が硬調に変化することで, 薄暗い環境下でその見えを改善していると考えられている.

ここでEOTFが担う役割について考察してみると, 図示されるとおりEOTFは“逆OETF”と“視環境に合わせたガンマ処理”が合成されたものとみなせることがわかる. “視環境に合わせたガンマ処理”= “最終的なガンマ”であるから, EOTFに映像をよりよく見せる, いわばカラーコレクションに近い効果を見出すことができるのである.

3. 1. カラーコレクションの有無，カラーコレクションの効果



3. 1. カラーコレクションの有無, カラーコレクションの効果

次頁(P.64)ではカラーコレクションを行うシンプルな流れが示されている. カラーコレクションを行う場合, マスターモニターやプロジェクターを使用しながら色のコントロールを行う. OETFはカラーコレクションにより変化するため, カラーコレクション自体は, “色作り”と“逆EOTF”が合成されたものと解釈することができる.

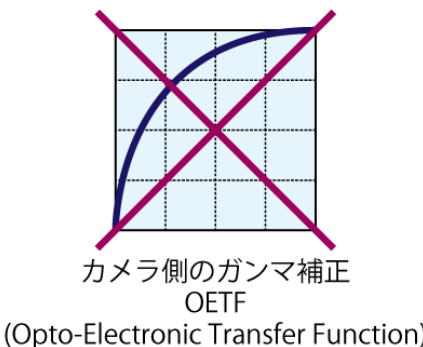
TVの国際標準で規定されるOETFとEOTFの関係性が生み出す色作りと, カラーコレクションを行うことによる色作り. 重要なことは, 生成された映像コンテンツがOETFの影響下にあるのか, 逆EOTFの影響下にあるのかということである. それらの把握が, 映画制作におけるワークフローの理解と, アーカイブにおける残すべき色情報の判断に役立つのである.

3. 1. カラーコレクションの有無, カラーコレクションの効果

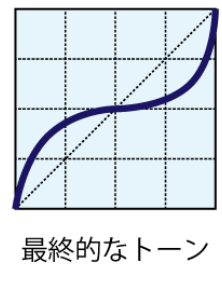
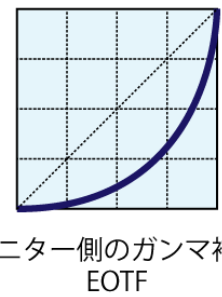
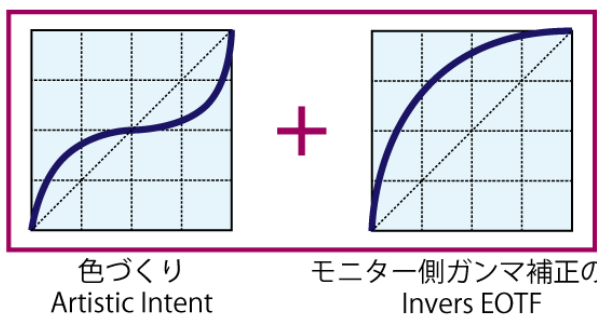
カラーコレクションを行うシンプルなフロー（映画・ドラマ・CM など）



カラーコレクションにより上書き



カラーコレクション

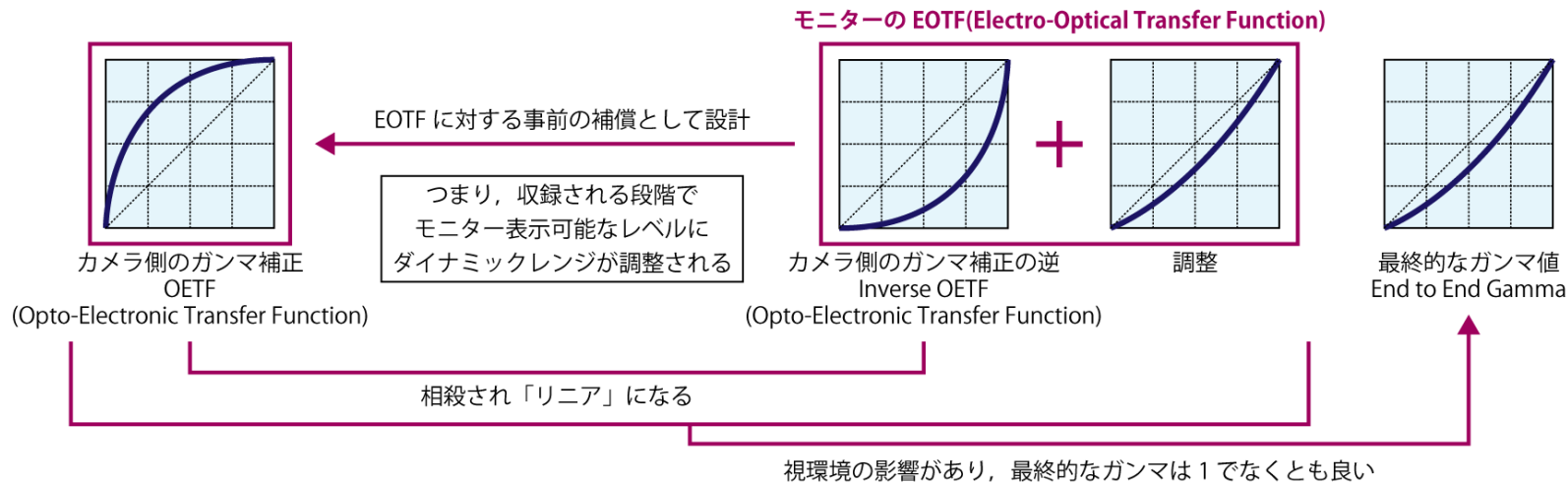


収録の段階では、モニター表示を目的としたトーンで記録する必要がなくオリジナルのシーンの階調を保持できるようなトーンを選択できる

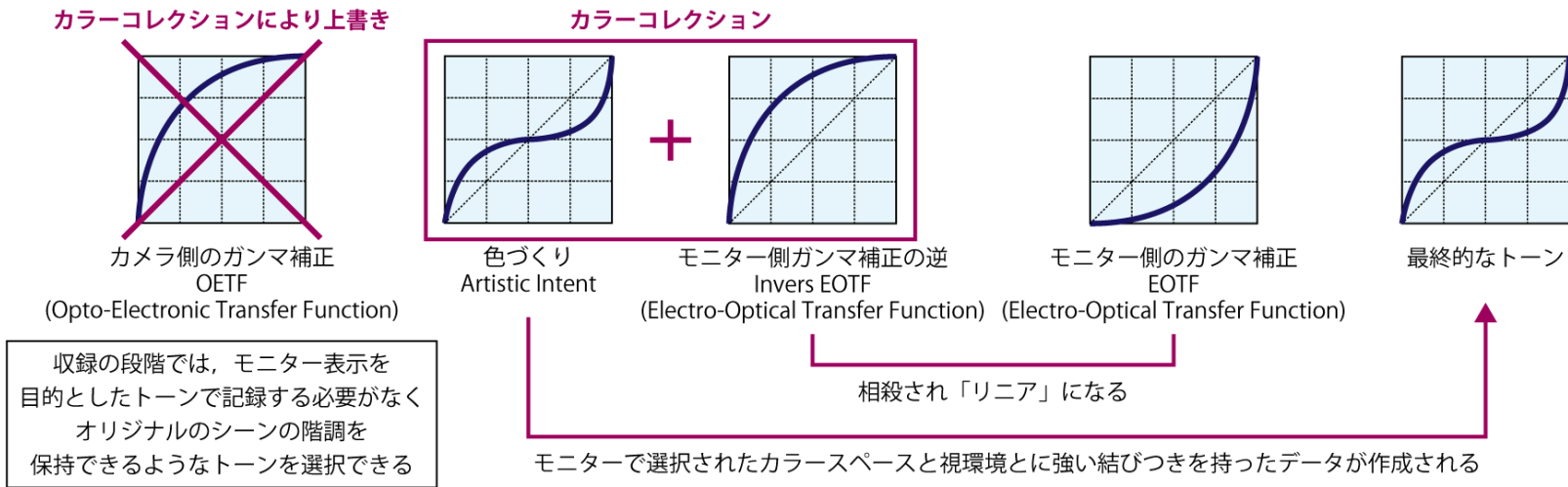
モニターで選択されたカラースペースと視環境とに強い結びつきを持ったデータが作成される (なぜなら、カラーコレクションに「モニター側の特性」が含まれると考えるからである)

3. 1. カラーコレクションの有無, カラーコレクションの効果

カラーコレクションを前提としない場合



カラーコレクションを行うシンプルなフロー

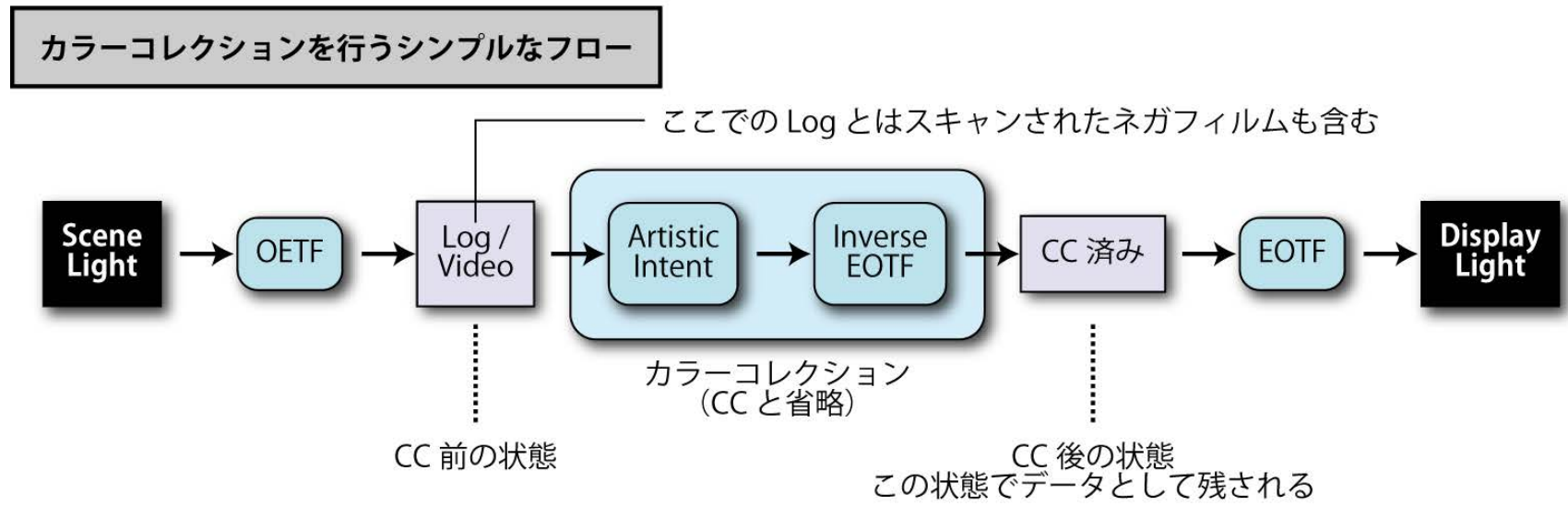
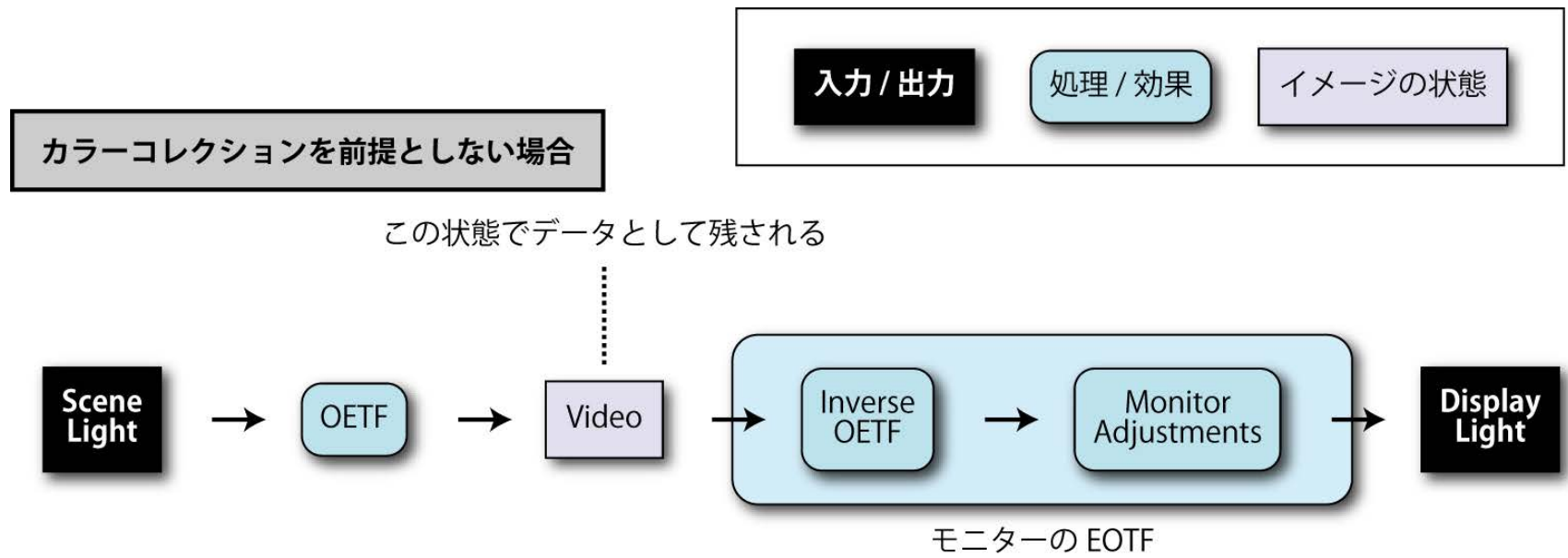


3. 2. 色管理されたさまざまなワークフロー

次頁(P.67)は、P.65で示したカラーコレクションの有無それぞれのフローをブロック図で書き直したものである。「カラーコレクションを前提としない」場合、データとして残されるのはOETFが適用された“Video”である(使用したモニターの表示に比較的依存しないデータであると考え)。

一方で、「カラーコレクションを行う」場合、デジタルシネマカメラ等で撮影された“Log”や“Video”のデータは、カラーコレクションによりそのトーンが変化する。結果、データとして残されるカラーコレクション済みの映像は、“逆EOTF”の特性を含むもの考えられる(つまり、使用したモニターの表示・設定に依存したデータが生成されると考える)。

3. 2. 色管理されたさまざまなワークフロー

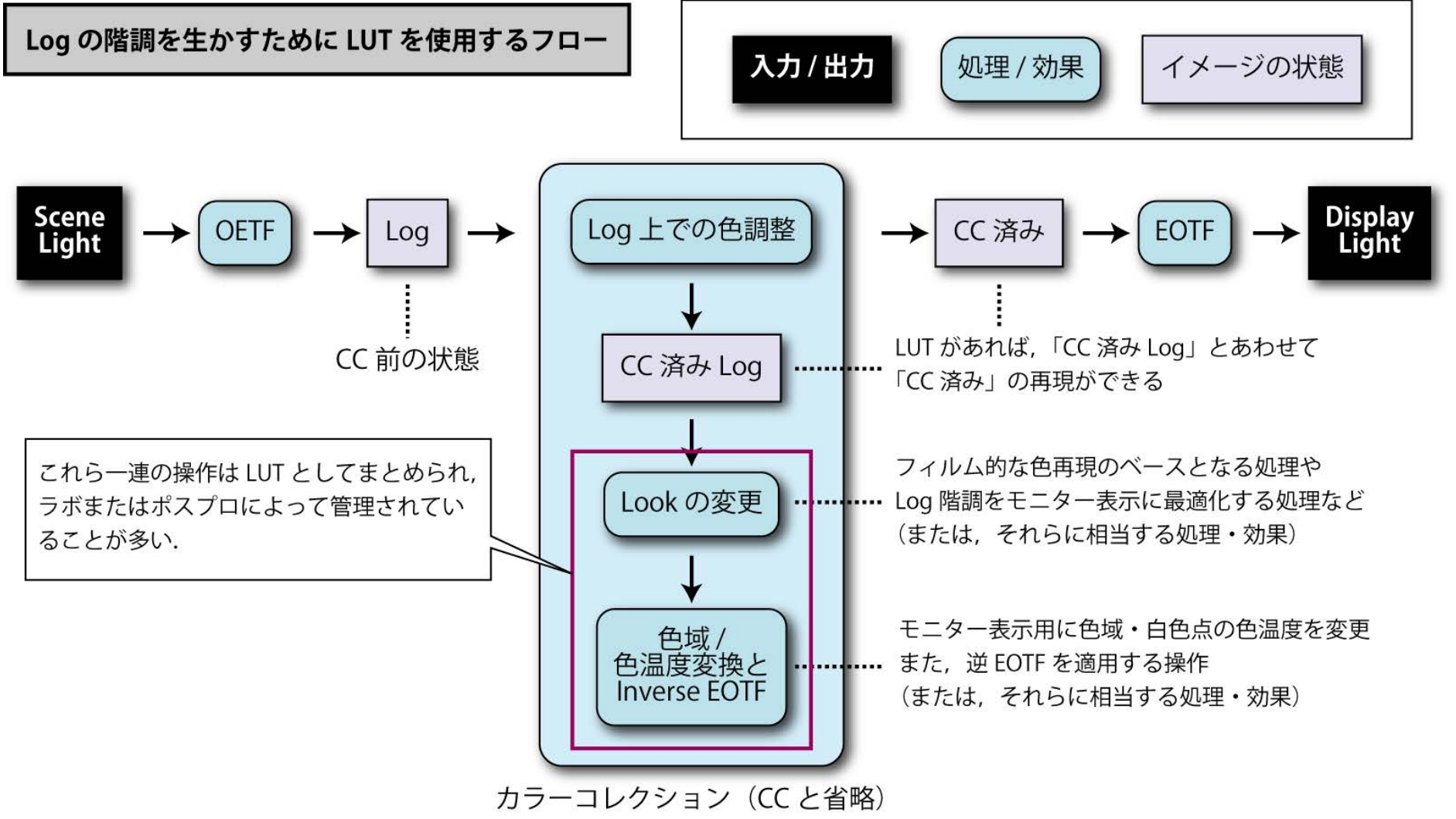


3. 2. 色管理されたさまざまなワークフロー

P.70ではより実践的なフローが示されている。P.51で示されるとおり、デジタルシネマカメラによる撮影やフィルムのスキャンから得られる“Log”のデータは、“Video”で使用されるOETFと比較し多くの情報を効率的に格納することができる。この情報をなるべく維持したままカラーコレクションを行うためにLUTが使用されている。LUTは“好ましい色変化”とカラースペース変換とが合成されたものとみなすことができる。

映画制作では、フィルムらしさの演出のためフィルムのネガ・ポジの発色が求められることが多いが、そのような発色を実現するLUTを使用した状態でカラーコレクションを行うことで、光の情報をできるだけ維持しながらも、ポジフィルムで仕上げたような色調が再現できる。P.70では、データで残されるのはカラーコレクション済みの“Log”データと使用したLUTである。つまり、OETFの影響下にあるデータが残されることになる。

3. 2. 色管理されたさまざまなワークフロー

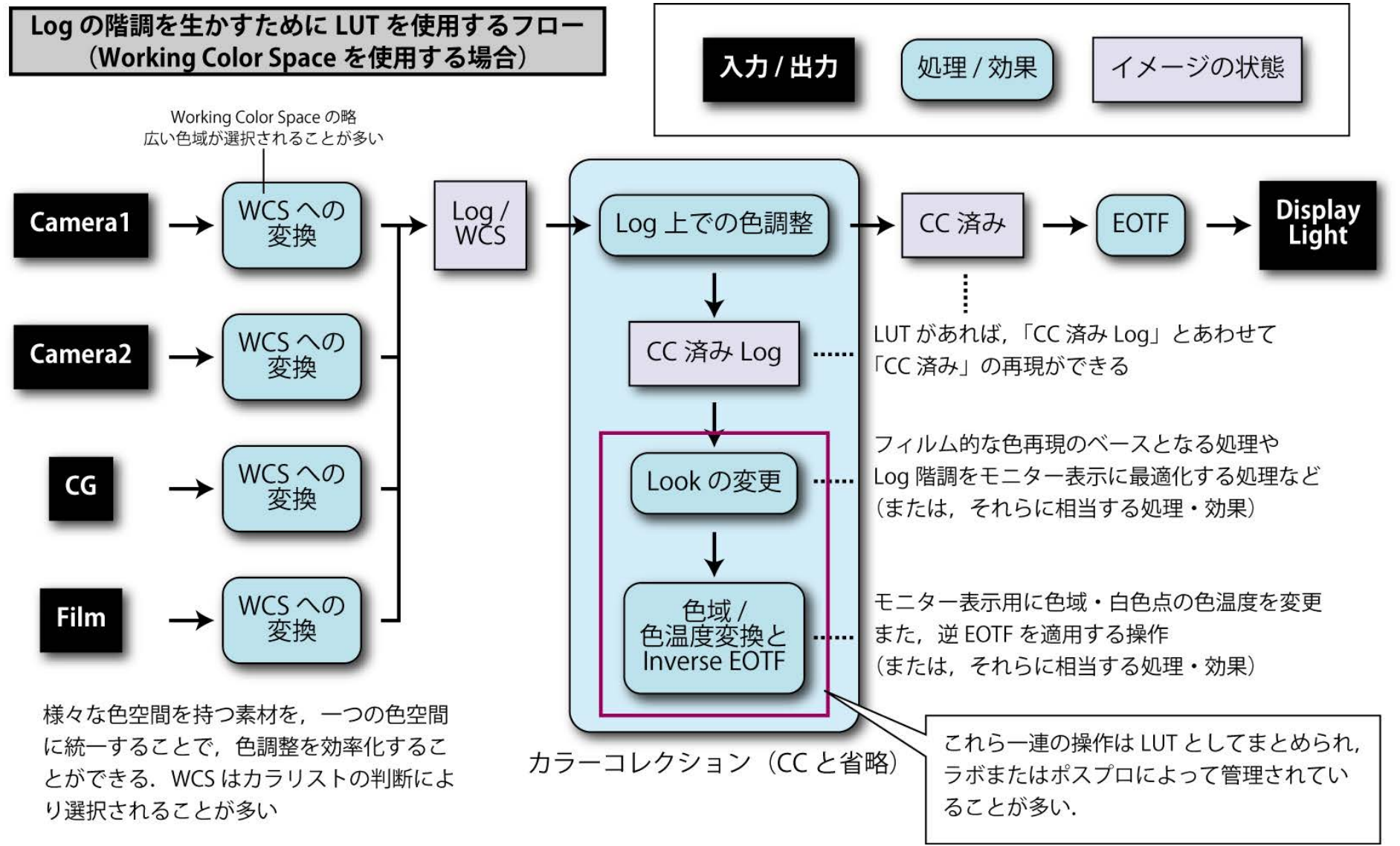


3. 2. 色管理されたさまざまなワークフロー

次頁(P.72)は専用のシステムを使用することで実現できる, より色管理されたワークフローである. LUTを使用し, データを“Log”で保存する点は前頁(P.69)で紹介したワークフローと変わらないが, 違いは素材の扱いにある.

映画制作ではさまざまな素材が使用されるため, これらを統一的にカラーコレクションできれば効率がよい. そのため, このワークフローでは一旦すべての素材の色空間を一つの作業用の色空間(Working Color Space)に置き換える処理を行う. この変換を行うことでカラーコレクションを行う土台が整うことから, 素材の色空間の差異に関係なく, カラーコレクションの効果が同様に得られるようになる.

3. 2. 色管理されたさまざまなワークフロー



3. 3. ACES(Academy Color Encoding System)

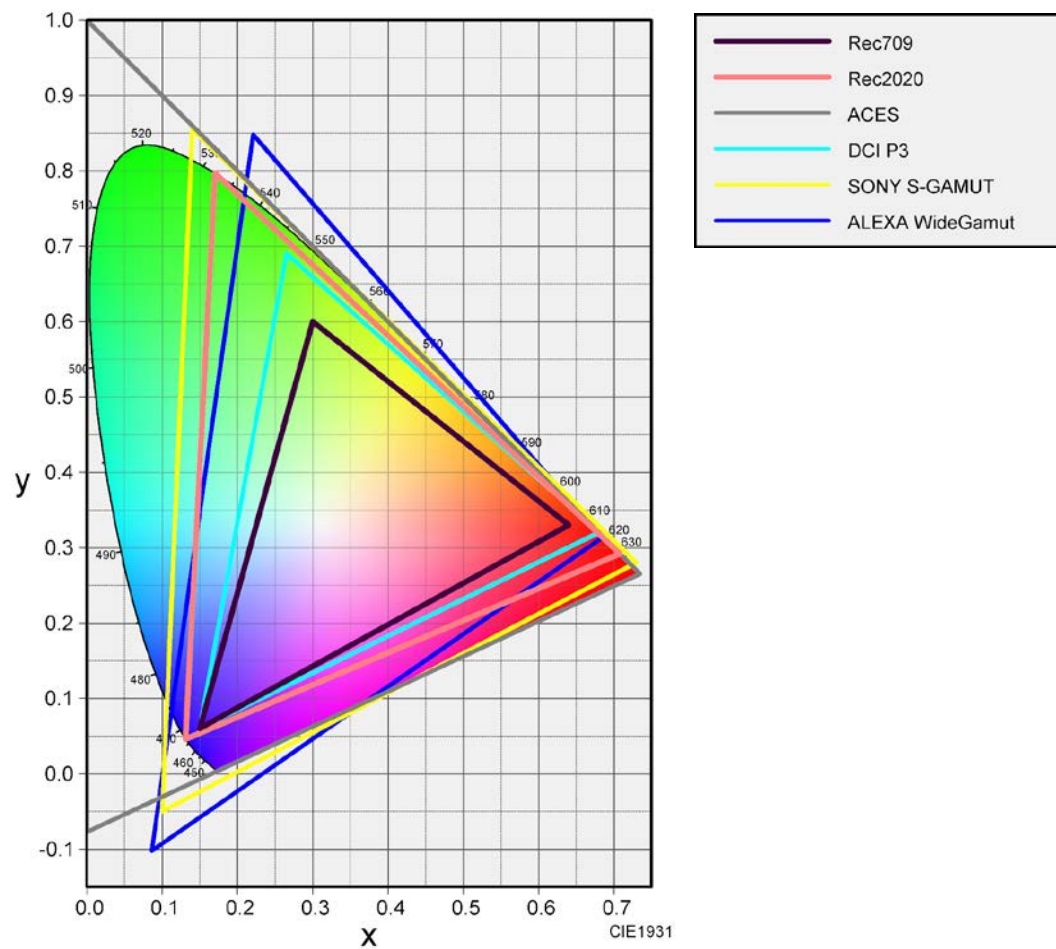
P.74は今後の映画制作で期待されるACES(Academy Color Encoding System)を示すものである.

P.71と比較すると, 顕著な違いはフローの後半に現れる. P.71ではLUTが担う機能を, ACESでは“RRT (Reference Rendering Transform)”と“ODT(Output Device Transform)”に区別, “ODT”を切り替えることで色空間が変換され, カラーコレクションで行った「見た目」を他の用途でも引き継ぐことを可能にしている. ACESでは, 浮動小数点形式をサポートするOpenEXRが使用され, 光の反射率でデータを記述する“シーンリニア”が土台となるなど, CGコンテンツとの親和性の高さがポイントである.

また, P.73で示す広い色域の採用により, 表示に使用される様々な色域がカバーされることで, 映像コンテンツのアーカイブ向けフォーマットとしても注目されている.

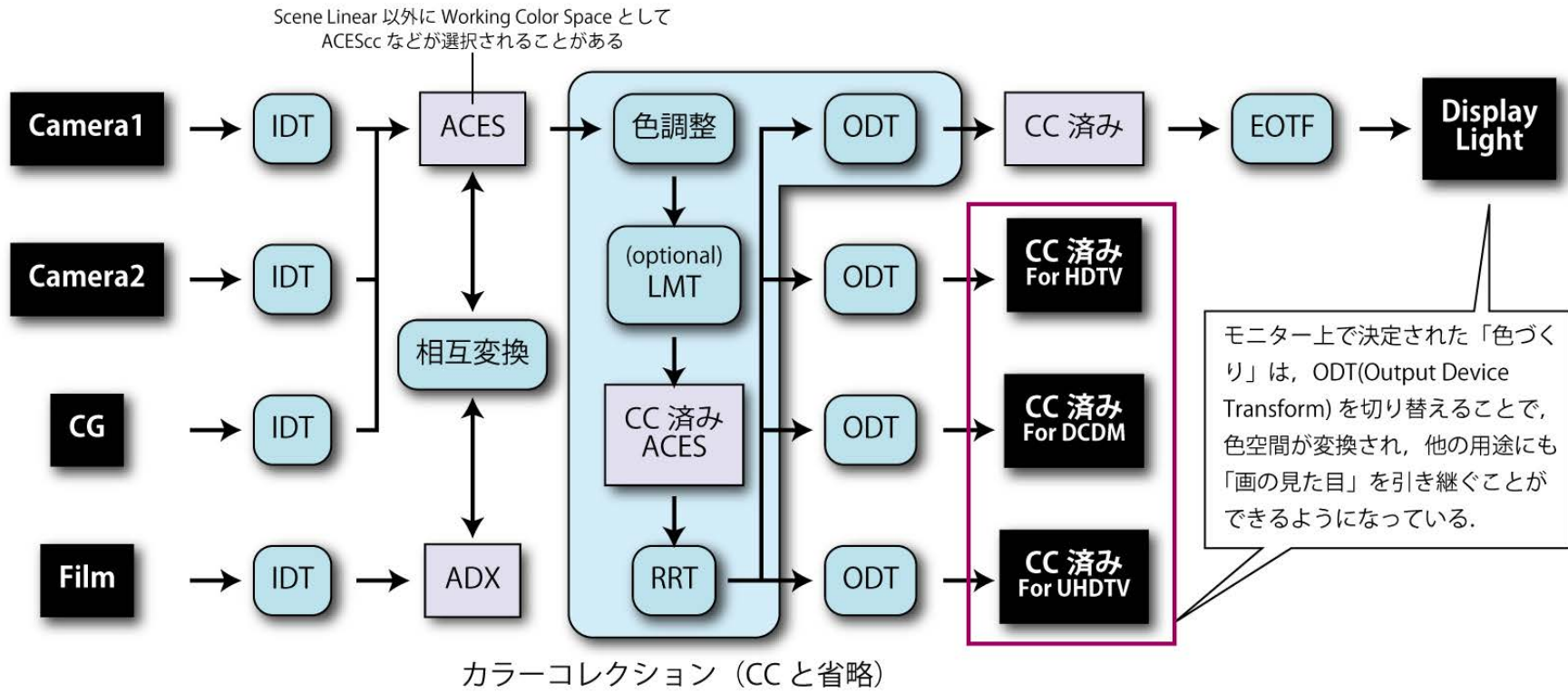
3. 3. ACES(Academy Color Encoding System)

ACES(Academy Color Encoding System)の色域との比較



3. 3. ACES(Academy Color Encoding System) 10)

ACES(Academy Color Encoding System) を使用した
全体的に色管理されたフロー



ACES	Academy Color Encoding System 広い色域・16bit 半精度浮動小数による シーンリニアをサポートする符号化形式	IDT	Input Device Transform カメラやスキャナーの色空間から ACES への変換を提供	RRT	Reference Rendering Transform シーンの色を「好ましい色」に変更する 標準的な変換を提供
ADX	Academy Density Exchange Encoding カラーネガフィルムの APD 値を 格納するための符号化形式	LMT	Look Modification Transform 通常の色空間では難しい 特殊な色変換を提供	ODT	Output Device Transform 出力先の色空間への 変換を提供

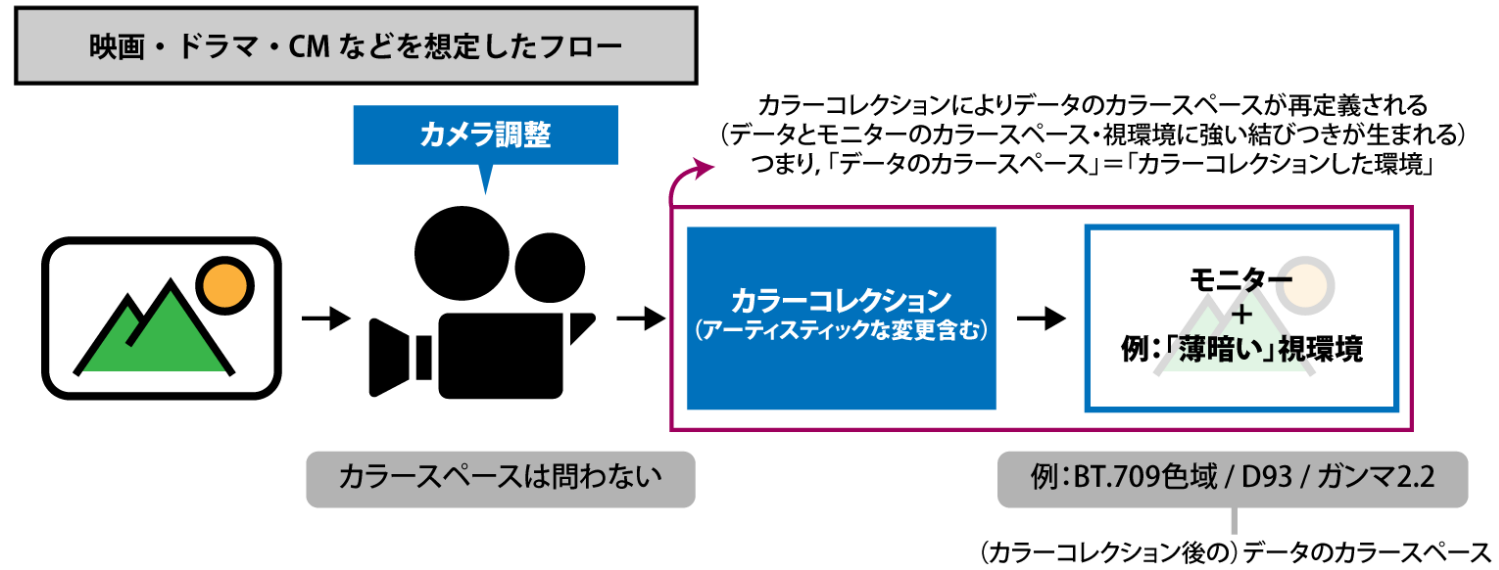
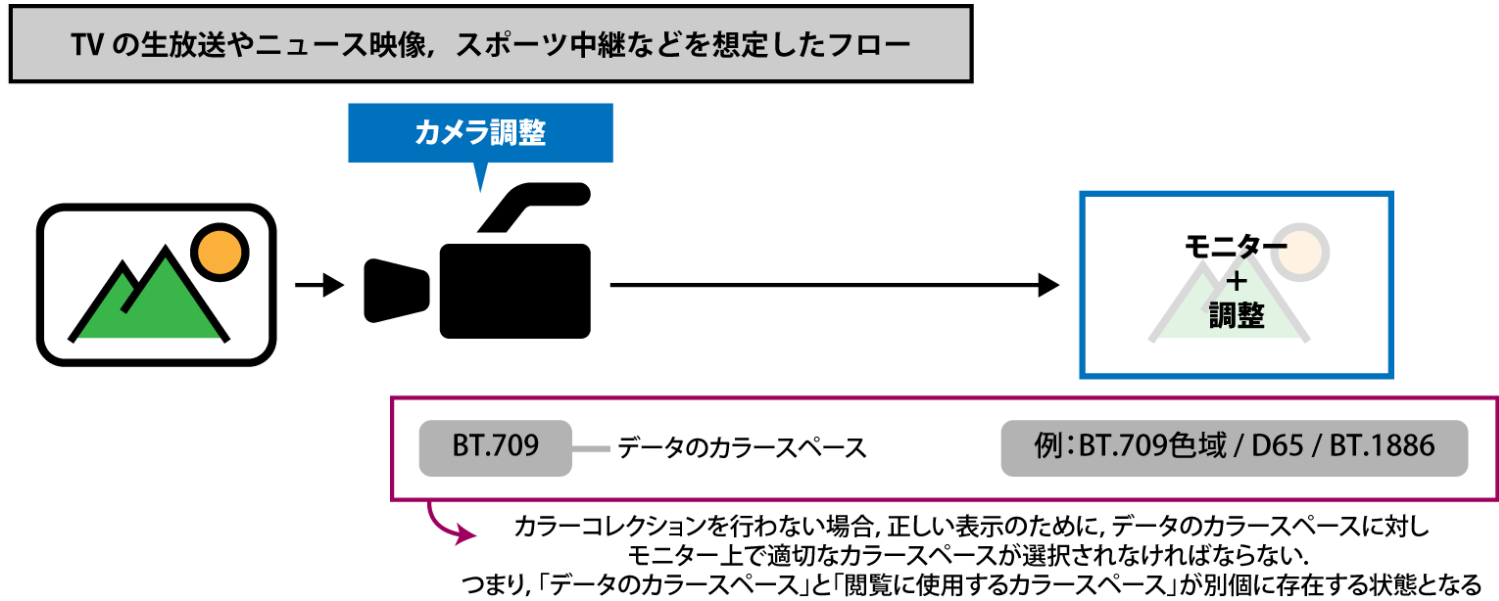
Michael S Tooms, "Colour reproduction in electronic imaging systems: photography, television, cinematography" を参考に作成

3. 4. イメージの状態の3区分

次頁(P.76)では、カラーコレクションの有無それぞれのフローが再掲されている。「TVの生放送やニュース映像、スポーツ中継などを想定したフロー」の場合、データとして残されるのはカメラから出力されたBT.709の信号である。一方で「映画・ドラマ・CMなどを想定したフロー」においては、カラーコレクションにより、使用したモニターの表示・設定に依存したデータが生成され则认为。つまり、カラーコレクションの有無により、表示するモニターへの依存度に差が生じる結果となる。

ACESで扱われる“シーンリニア”や“Log”のデータはどのように考えるべきだろうか。これらはモニターの表示向けというよりもむしろ、シーンの情報をより多く保持できるところに重点を置き設計されたフォーマットといえる。これら、カラーコレクションされたデータ、カメラから出力されたままのデータ、シーンリニア・“Log”データ、の3カテゴリーで様々なフォーマットを整理したものがP.77である。

3. 4. イメージの状態の3区分



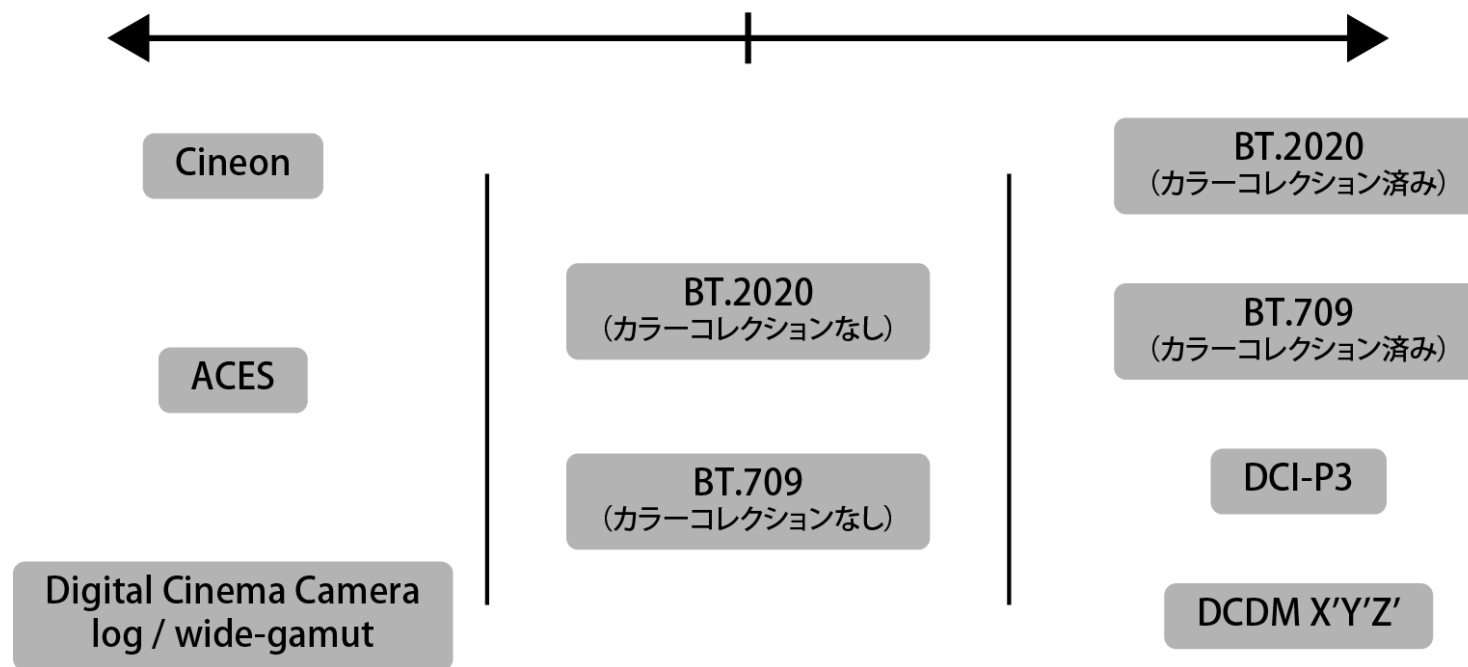
3. 4. イメージの状態の3区分



オリジナルの情報が
多いが
モニターでの表示は適さない



オリジナルの情報は少ないが
モニターでの表示に適する



P.78～P.80では、それぞれのカテゴリーに対し、データを保存する上で留意すべき項目を箇条書きした。データの保存を考える場合、扱っている映像がどのカテゴリーに属するものかを判断した上で、カテゴリーに対し適切な色情報が保存されることが求められる。

3. 5. 残すべき色の情報について



オリジナルの情報が
多いが
モニターでの表示は
適さない

- [シーンリニア] 16bit 半精度浮動小数点以上の精度か
- [Log] 10bit 以上の階調が存在するか
- カラーコレクションに使用した LUT は管理されているか
- [ACES] ACES 自身のバージョンは管理されているか
- [D-Cinema Camera] 色域, Log の種類は記録されているか



オリジナルの情報は
少ないが
モニターでの表示は
適する



Cineon

ACES

Digital Cinema Camera
log / wide-gamut

BT.2020
(カラーコレクションなし)

BT.709
(カラーコレクションなし)

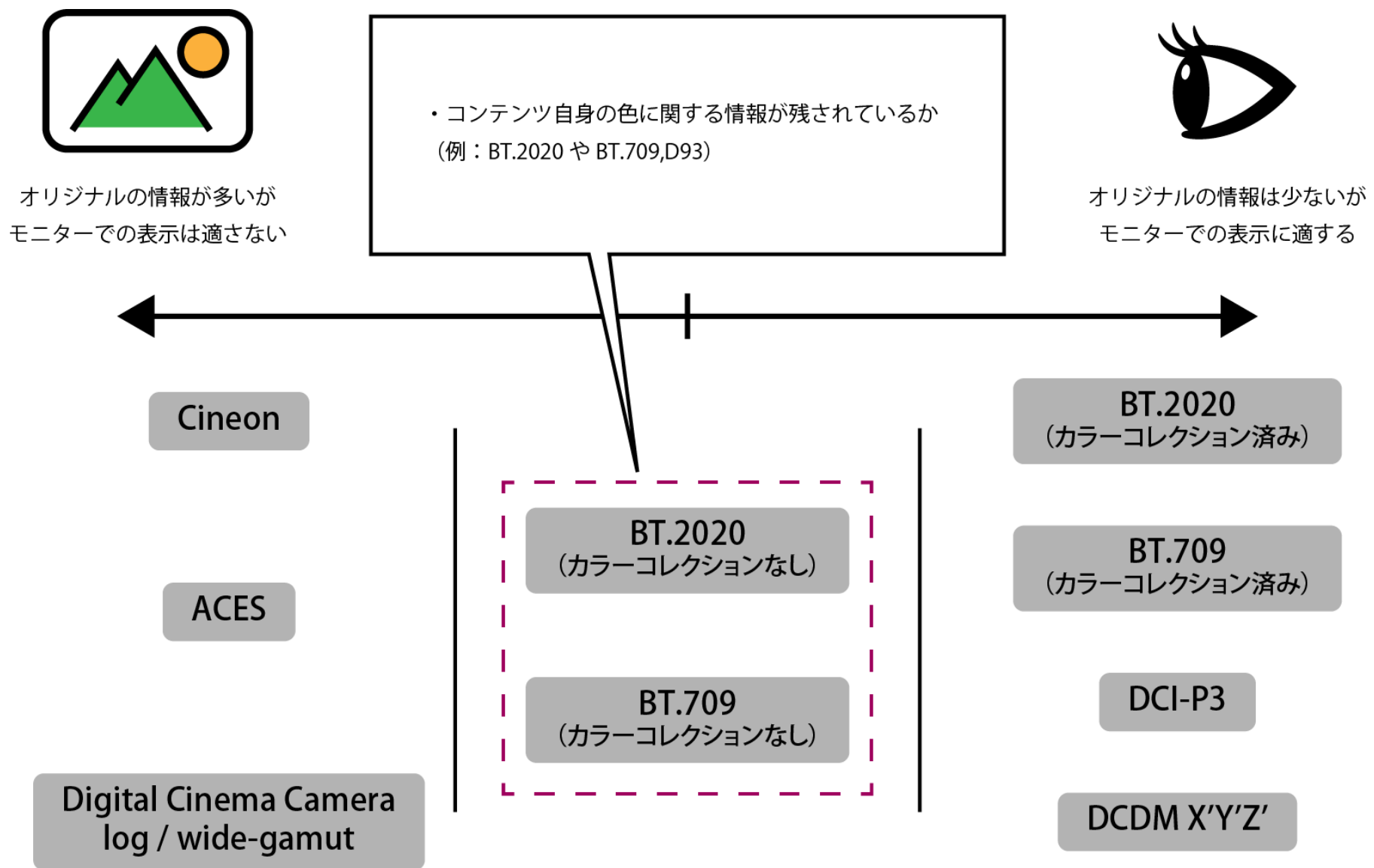
BT.2020
(カラーコレクション済み)

BT.709
(カラーコレクション済み)

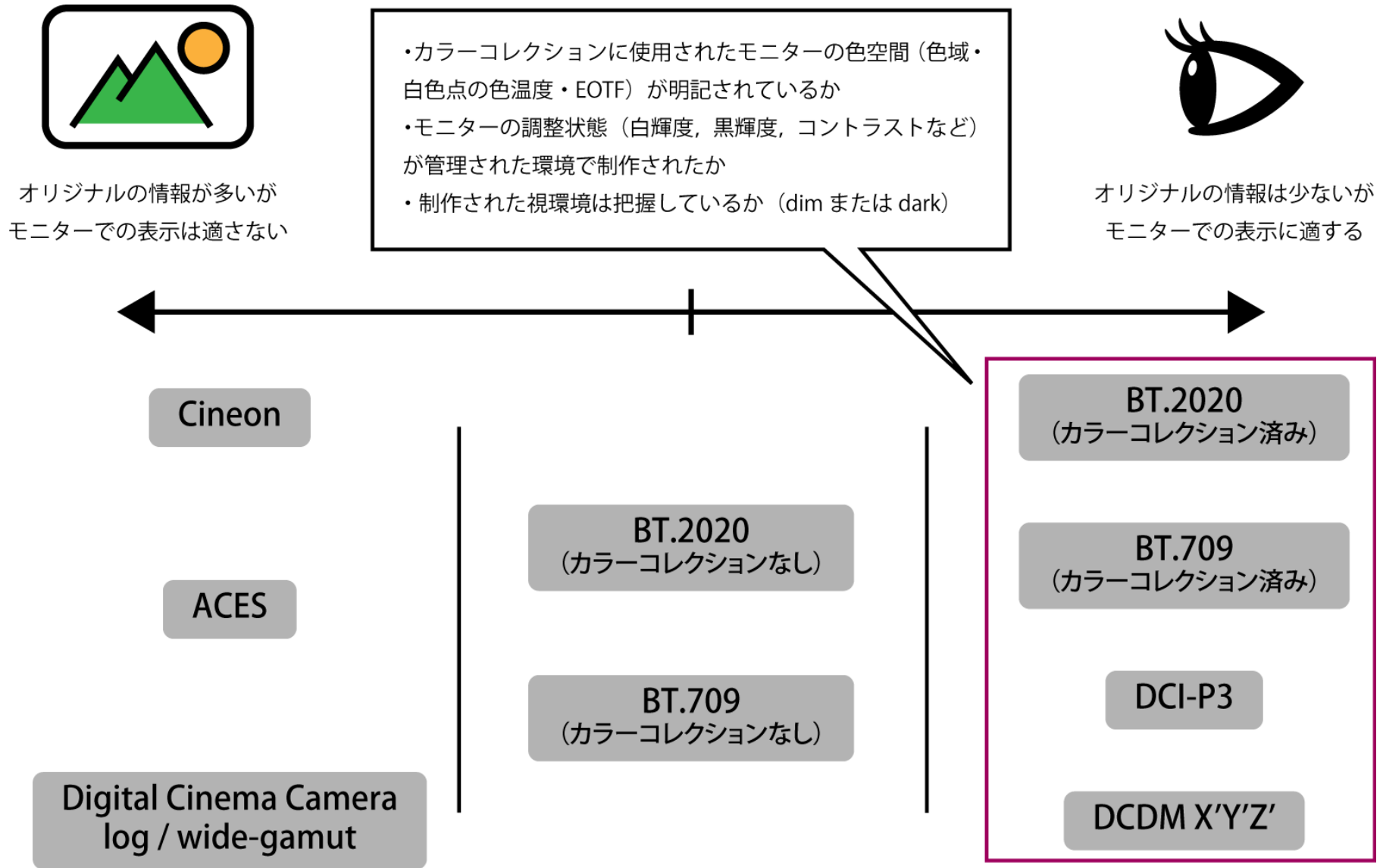
DCI-P3

DCDM X'Y'Z'

3. 5. 残すべき色の情報について



3. 5. 残すべき色の情報について



終わりに

・参考文献

- 1) 大田 登,『色彩工学 第2版』,東京電機大学出版局, 2003.
- 2) C.S.McCamy, H.Marcus, and J.G.Davidson “A color - rendition chart”, Journal of Applied Photographic Engineering, Volume2, Number 3, 1976.
- 3) ITU-R, Recommendation ITU-R BT.709-6(06/2015), “Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange”.
- 4) ITU-R, Recommendation ITU-R BT.1886(03/2011), “Reference electro-optical transfer function for flat panel displays used in HDTV studio production”.
- 5) ITU-R, Recommendation ITU-R BT.2020-2(10/2015), “Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange”.
- 6) Glenn Kennel, “Color and Mastering for Digital Cinema” (Digital Cinema Industry Handbook Series), Focal Press, 2013.
- 7) スティーブ・ライト,『ノードベースのデジタルコンポジット コンポジターのための理論と手法』(株式会社Bスプラウト訳), 株式会社ボーンデジタル, 2012.
- 8) ITU-R, Report ITU-R BT.2246-5(07/2015), “The present state of ultra-high definition television”.
- 9) ISO 22028-1: 2016. Photography and graphic technology - Extended colour encodings for digital image storage, manipulation and interchange - Part 1: Architecture and requirements.
- 10) Michael S Tooms, “Colour reproduction in electronic imaging systems: photography, television, cinematography”, John Wiley & Sons Ltd, 2016.

・利用上の注意事項

このドキュメントは正確な情報提供のために十分な調査の元作成されましたが、扱う内容についてそれが明示的かどうかにかかわらず、いかなる種類の保障をするものではありません。また、このドキュメントの使用により生じたいかなる種類の損害等について一切の責任を負いません。このドキュメントは著作権の保護下にあります。無断転載を禁じます。