



ARIB TR-B9

1125/60方式HDTVスタジオ規格における 測色パラメータ運用ガイドライン

GUIDELINE FOR COLORIMETRY
FOR 1125/60 HDTV PRODUCTION SYSTEMS

技術資料

ARIB TECHNICAL REPORT

ARIB TR-B9 1.0版

平成10年7月21日 1.0版 策定

社団法人 電波産業会
Association of Radio Industries and Businesses

まえがき

社団法人電波産業会は、無線機器製造者、放送機器製造者、電気通信事業者、放送事業者、その他利用者等の参加を得て、各種の無線通信設備、放送送受信設備に係わる基本的な要件を「標準規格」または「技術資料」として策定している。

技術資料は、国の定める技術基準と民間の任意基準をとりまとめた標準規格を踏まえて、各種の無線通信設備、放送送受信設備の適正品質、互換性の確保を図るため、当該設備に関する測定法、試験法、その他の運用上のガイドラインを民間の規格として具体的に定めたものであり、策定段階における公正性及び透明性を確保するため、広く無線機器製造者、放送機器製造者、電気通信事業者、放送事業者、その他の利用者等の参加を得た当電波産業会の規格会議の総意により策定されたものである。

本技術資料は、BTA-S-001B（1125/60高精細度テレビジョン方式スタジオ規格）における測色パラメータ混在時の番組制作を混乱無く進めるために、信号発生器、カメラ、モニタ、方式変換器等の放送機器製造者及び放送事業者の色管理担当者などにより「1125/60方式 HDTVスタジオ規格における測色パラメータ運用ガイドライン」を示したものである。

本技術資料が、無線機器製造者、放送機器製造者、電気通信事業者、放送事業者、その他利用者等に積極的に活用されることを希望する。

目 次

まえがき

第1章 目 的	1
第2章 適用範囲	2
第3章 用語の説明	3
第4章 運用上のガイドライン	5
4.1 カメラを含む信号発生器	5
4.1.1 伝送マトリクス	5
4.1.2 カメラのリニアマトリクス	5
4.1.3 ガンマ特性	5
4.2 モニタ	5
4.2.1 CRT色度点	5
4.2.2 基準白色	5
4.2.3 輝度方程式	6
4.2.4 ガンマ	6
4.3 方式変換器	6
4.3.1 伝送マトリクス	6
4.3.1.1 1080システム ⇔ 1035システム相互変換	6
4.3.1.2 1080(1035)システム ⇔ 525システム相互変換	6

解 説

1 カメラを含む信号発生器	7
1.1 伝送マトリクス	7
1.2 カメラのリニアマトリクス	7
1.3 ガンマ特性	7
2 モニタ	7
2.1 C R T色度点	7
2.2 基準白色	8
2.3 輝度方程式	8
3 方式変換器	8
3.1 1080システム ⇔ 1035システム相互変換	8
3.2 1125系(1080、1035) ⇔ 525系相互変換	8
3.3 カラーバー信号の扱い	9

付 錄

1 カラリメトリに関する計算機シミュレーションについて	11
2 C R T色度点	18
3 変換実験資料	20
4 マトリクス変換におけるガンマの影響	27
5 デジタルマトリクス係数	31
6 R、G、Bレベル計算資料	55
7 波形モニタの写真	60

第1章 目的

1125/60方式 HDTV用スタジオ規格では、BSデジタル時代の番組制作に備え、有効ライン数1080システムを追加し、ここでは測色パラメータ（カラリメトリ）としてITU-R BT.709-3 Part 2カラリメトリ（以下709）を適用した。

しかし、有効ライン数1035システムに基づくスタジオ機器では測色パラメータとしてSMPTE 240Mカラリメトリ（以下240M）が、また525方式スタジオ機器（525p、525i）ではITU-R BT.601カラリメトリ（以下601）が引き続き適用される。

一方、放送に関しては、MUSEは709が引き続き適用され、BSデジタル放送では3種類の映像入力信号（1125i、525p、525i）の測色パラメータとして709が、アナログ地上波放送（525i）、CSデジタル放送（525p、525i）は601が引き続き適用される。

したがって、測色パラメータとしてスタジオ機器では1125系/525系合わせて709、240M、601の3種類が、放送では709、601の2種類が混在使用される。

そこで、これら測色パラメータ混在時の番組制作を混乱無く進めるため「1125/60方式 HDTVスタジオ規格における測色パラメータ運用ガイドライン」を定め、関係者に周知徹底することを目的とする。

「運用ガイドライン」とは、制定された規格に基づいた機器またはシステムを導入する際、不具合なく機器やシステムを接続し、運用するための留意事項をまとめたものである。

第2章 適用範囲

この運用ガイドラインは、高精細度テレビジョン機器の内、番組制作用として使用される信号発生器、カメラ、モニタ、方式変換器等とその運用に適用する。

第3章 用語の説明

(1) C R T色度点

709、240M、ITU 470-4B,G(以下EBU)、ITU 470-4M(以下NTSC)などの規格に定められた3原色は、受像ディスプレイにおける3原色色度として与えられる。現在のテレビ受像機では、CRTディスプレイが主流であり、その蛍光体の3原色色度をCRT色度点と言う。NTSCでは色度図上において、3原色を結んだ3角形は広くとられているが、蛍光体の実現が難しいため、709、240M、EBUでは、実現可能な値に3原色色度を決めた経緯がある。

(2) 測色パラメータ(カラリメトリ)

測色パラメータとは、色再現に関する規定の総称であり、基準原色(3原色及び基準白色)と信号処理(ガンマ特性、輝度方程式など)の2つに大別できる。

(3) 伝送マトリクス

伝送方式はR、G、B信号伝送と輝度(Y)信号、2つの色差(PB、PR)信号の伝送の2方式がある。

R、G、B信号伝送はカメラ出力のR、G、B信号を伝送するものである。

Y、PB、PR信号伝送は、3原色色度及び基準白色が与えられ、R、G、B信号からマトリクス変換により、求められたY、PB、PR信号を伝送するものである。

709システムでは

$$Y = 0.7152G + 0.0722B + 0.2126R$$

$$P_B = (B - Y) / 1.8556$$

$$P_R = (R - Y) / 1.5748$$

で与えられる。上記変換式を伝送マトリクスと呼んでいる。

(4) リニアマトリクス

カメラの撮像特性は、規定された3原色により、等エネルギースペクトル色を等色する3刺激値曲線で与えられる。このとき、3原色色度がスペクトル色軌跡よりも内側にあるため、負の光成分を必要とする。実際のカメラでは負の光の再現が出来ないため、リニアな領域でマトリクス回路を挿入し、近似的に理想撮像特性に近づける方式である。

(5) モニタガンマ

現在使用されているモニタ(テレビ受像機)では、CRTディスプレイが主流であり、その信号電圧と光出力の関係はガンマ特性といわれ、約2.2乗に比例している。なお、ブライトネス、スクリーン電圧及びアノード電圧等によりその値は変化する。

(6) カメラガンマ

モニタガンマ（前項参照）の補正を送像側でおこなうため、カメラのガンマ特性をその逆数である $1/2.2$ 乗の特性にしてある。なお、立ち上がりの部分は 4.5 倍（709）に規定されている。

(7) ユーザーマトリクス

ユーザーにおいてある特定の色を強調する等、画作りの上から使用するカメラの色再現調整用マトリクスのことを使う。

(8) フェーストーン

いわゆる人の肌色（顔色）の再現色のことである。テレビ受像機を見ている人は、現実の場面にいないため、記憶されている肌色の再現色に注意が向く。したがって、放送局の色管理者はこのフェーストーンの再現色をもっとも重要視している。

(9) マスタモニタ

放送局で使用されるモニタの中で、色再現や画質管理など画像の最終的な測定器と位置づけられているモニタである。

(10) D₆₅

D光源として定められている 6,504 K の色温度のこと。

光源の色は光源色と言い、色順応により無色と感じられる範囲を、白色光源という。白色光源の色具合の表し方として色温度が使われている。現実には無い黒体という物質を仮定し、その温度により発光する色と同じ時、その絶対温度をその光源の色温度という。

CIE（国際照明委員会）は 1960 年に標準の光 A、B、C に対して、D を加えた。D は Daylight の略であり、自然光に近い。

(11) D₉₃

D₉₃ は 9,305 K の色温度であり、日本におけるモニタの基準白色として使用されている。D の意味は（10）を参照。

(12) JAPAN特定蛍光体

日本の放送局などを中心に現行放送の制作・監視等のモニタ用途として主に使用されている蛍光体。EBU、SMPTE の蛍光体とは色度点が若干異なっている。「JAPAN 特定蛍光体」は 1996 年頃まで日本の放送局などで主に使用されていたが、現在では EBU、SMPTE などの蛍光体に置き換わりつつあり減少傾向にある。

第4章 運用上のガイドライン

4.1 カメラを含む信号発生器

4.1.1 伝送マトリクス

正確な再現を求めるには、1080システムと1035システムで伝送マトリクスを切り替える必要があるが、実用上は切替えなくても問題ないとする。

(解説 1.1 及び 3.3 参照)

4.1.2 カメラのリニアマトリクス

運用するにあたって、リニアマトリクスをはずしても良いこととする。これまで通りの運用で問題ないとする。

(解説 1.2 参照)

4.1.3 ガンマ特性

運用するにあたって、標準ガンマをずらしても良いこととする。これまで通りの運用で問題ないとする。

(解説 1.3 参照)

4.2 モニタ

4.2.1 CRT色度点

709カラリメトリに移行する。許容範囲は暫定的に、各色とも x、y それぞれ ± 0.005 とし、これを運用上のガイドラインとする。ただし、現在 709カラリメトリに準拠した CRT が無いため、当面、現在使用している SMPTE、EBU 及び JAPAN 特定蛍光体を使用しても良いこととする。

(解説 2.1 参照)

表1 許容範囲

	709カラリメトリ	許容範囲
R	x = 0.640 y = 0.330	± 0.005
G	x = 0.300 y = 0.600	± 0.005
B	x = 0.150 y = 0.060	± 0.005

4.2.2 基準白色

運用するにあたって、D65、D93 のどちらの選択も可能とする。

(解説 2.2 参照)

4.2.3 輝度方程式

正確な再現を求めるには、1080システムは709、1035システムは240Mにする必要があるが、実用上は切り替えなくとも問題ないとする。

(解説 2.3 及び 3.3 参照)

4.2.4 ガンマ

CRTは、これまで通りCRTのガンマに依存する。今後実用化されるであろうPDP、LCD等については709を適用する。

4.3 方式変換器

4.3.1 伝送マトリクス

4.3.1.1 1080システム \Leftrightarrow 1035システム相互変換

1080システム(709)から、1035システム(240M)への変換、あるいは、逆変換に際し、正確な再現を求めるには、伝送マトリクス変換を行う必要があるが、実用上はマトリクス変換を行わなくても問題ないとする。

ガンマについては、微少な差であり、変換しなくても問題ないとする。

(解説 3.1 参照)

4.3.1.2 1080(1035)システム \Leftrightarrow 525システム相互変換

伝送マトリクスの差が大きいため、伝送マトリクス変換を行う必要があるが、この際にガンマのかかった状態で伝送マトリクス変換を行っても問題ないとする。

(解説 3.2 参照)

解 説

1 カメラを含む信号発生器

1.1 伝送マトリクス

「カラリメトリに関する計算機シミュレーションについて」（付録 1）の計算による色度図上の差異の検討、また同資料による 709 カメラ出力と 240M カメラ出力を 240M ディスプレイ上で、比較するシミュレーションを実施し、目視検査した。結果はほとんど見分けが付かないレベルであった。

以上から、正確な再現を求めるには、伝送マトリクス切替えを行う必要があるが、実用上は切替えなくても問題無いと判断した。
 (付録 1、付録 3)

1.2 カメラのリニアマトリクス

カメラのリニアマトリクスとは、カメラの理想的な撮像特性が 3 原色に対して負の信号を伴うために、擬似的に補正を行うものである。したがって、より忠実な色再現を求めるには 1035 カメラは 240M、1080 カメラは 709 対応のマトリクス補正が必要となる。

しかし、これまで運用の際、マトリクス補正をしないで使用している場合や映像表現の一つとしてユーザーマトリクスを使用している場合があり、今まで通りの運用で問題ないと判断した。

1.3 ガンマ特性

ガンマの差異は、特に映像信号の立ち上がりの部分に顕著に現れる。しかし、実際の運用では、映像表現の一つとして標準ガンマからずらして使用している場合があり、今まで通りの運用で問題ないと判断した。

2 モニタ

2.1 CRT 色度点

付録 2 に各蛍光体の色度を示す。許容範囲を決めるにあたり、EBU 及び SMPTE における範囲、また現在スタジオ仕様のモニタにおける製造上の許容誤差等を検討した。SMPTE における許容範囲は x、y とも ± 0.005 で規定されている。709 対応の蛍光体が製造されたときは、この範囲を適用することが妥当と考えた。

また、これまで SMPTE、EBU 及び JAPAN 特定蛍光体において、規定された色度点の CRT を、混在使用していた状況があり、大きな問題指摘がされなかつたことを考慮し、当面これらの蛍光体使用も許容範囲とした。

2.2 基準白色

日本における 525 系の運用においては D93 を基準としてきた。

規格上の基準白色は 709、240M とも D65 となっているが、今後同一空間内に 525 系と 1125 系とが混在する傾向であり、同じ環境下での運用においてはモニタの色温度が統一されていることが望ましい。

同一空間において色温度が統一されていれば人間の色順応性からみてあまり大きな問題はないと考える。またカメラ調整はグレースケールチャートで行われるため、カメラ出力はモニタの色温度に影響されることなく一定である。

運用上の観点から本運用ガイドラインとしては運用環境に応じて D65、D93 の選択が可能となるようにした。

2.3 輝度方程式

1080 システムは 709、1035 システムは 240M とするが、シミュレーション（付録 1）及び変換実験（付録 3）の結果から分かるように、マスター モニタであっても 240M と 709 の差は検知限以下である。

3 方式変換器

3.1 1080 システム ⇔ 1035 システム相互変換

カメラ出力を 709 の伝送マトリクスと 240M の伝送マトリクスと交互に切替え、マスター モニタ、ベクトルスコープにて、その差異を観る実験を行った。黄色、オレンジ系の色で若干の差異（色相で 1 度位）は認められたが、フェーストーンでは殆ど差が無く、問題となるべき量ではなかった。
(付録 3)

ガンマについては、立上りを 4.5 倍（1080 システム）、4 倍（1035 システム）と切り替えてその差異を観る実験を行った。色の変化は全く感じず、わずかに黒の部分の再現が異なるが、問題となるレベルでは無かった。
(付録 3)

3.2 1125 系（1080、1035） ⇔ 525 系相互変換

「カラリメトリに関する計算機シミュレーションについて」（付録 1）の“3. 輝度方程式の違いによる色再現誤差”に示されているように、709 カメラ出力を 601 のモニタに表示したときの再現誤差が大きいため、伝送マトリクス変換を行う必要があると判断した。また変換にあたって、ガンマ特性を考慮した場合（リニアに戻して行う）と考慮しない場合においての差異を計算により求めた。
(付録 4)

PB、PR とともにその差異は、最大で ±1 % であった。検知限以下と判断する。
(付録 5) に各変換伝送マトリクスのデータを添付する。

3.3 カラーバー信号の扱い

1080システムと1035システムを混在使用するにあたり、伝送マトリクス変換を行わなかった場合、システム調整する上での基準信号であるカラーバー信号の扱いについて、以下に示す。

波形モニタ表示において709と240Mの差異は、Y、P_B、P_R表示ではそれぞれのp-p値は全く変わらず700mVであるが、R、G、B表示においては若干の差異を生じる。

(付録6、付録7)

R、G、B表示をする波形モニタは709及び240M対応を明記する必要がある。

また、カラーモニタ調整時もR、G、B表示が異なるためHUE、CHROMA調整は、モニタの伝送マトリクスと合った信号で調整する必要がある。

付 錄

付録 1

ARIB TR-B9

(ARIBカラリメトリAHG資料)

1998年2月5日

NHK技研

熊田純二

カラリメトリに関する計算機シミュレーションについて (12月8日のデモンストレーションの詳細内容)

1. カラリメトリ現状

カラリメトリとは、色再現に関する規定の総称であり、基準原色(3原色及び基準白色)と信号処理(ガンマ特性、輝度方程式、ダイナミックレンジなど)の2つに大別できる。その現状は表1のとおりである。

3原色点については、実態的にはSMPTEやEBUの3原色が使用されている。1953年に規定されたNTSC3原色は実際のCRTで実現できないため、米国ではSMPTE原色(並びにD65白色)を規定している。欧州ではPAL方式の規定としてEBU原色を採用している。わが国では省令に記されているNTSC原色が唯一の規定値である。このように525(NTSC)方式において、3原色が規定値と実態値とが乖離していることが、カラリメトリ論議の混乱を招いている最大の要因である。

一方、HDTVについては、実現可能なCRT原色としてITU-R勧告709の3原色が規定されている。なお、SMPTE、EBU、勧告709の各原色の差は極めて小さく、混用しても色再現誤差は実用上全く問題ないレベルである(カメラ調整誤差の方が大きい)。

表1 カラリメトリの現状

項目	規定		実態		答申	
	525	HDTV	525	HDTV	525	HDTV
原色点	3原色 NTSC	勧告709	SMPTE/EBU	SMPTE	勧告709	
	(カメラ) 基準白色 (モニタ)	C D65	D65	D65	D65	
信号処理	輝度方程式 ガンマ補正	NTSC 定性的	勧告709 勧告709	NTSC ≈SMPTE	勧告709 SMPTE	勧告709

2. 原色の違いによる色再現誤差

色の定量的な表現方法を表色系というが、テレビジョン方式では通常RGB表色系が用いられている。周知のように任意の色は、独立な3つの色で等色できるが、この系では、RGB3原色を規定し、等色時における各原色の発光量で「色」を表す。ただし、「発光量」は基準白色を等色するのに必要な各発光エネルギーで正規化した値を用いる。この正規化した値が、テレビ方式で使用されるRGB信号である。すな

わち、

$$\vec{F} = r \vec{R} + g \vec{G} + b \vec{B} \quad (1)$$

$$\vec{W} = r_0 \vec{R} + g_0 \vec{G} + b_0 \vec{B}$$

のとき、信号(R, G, B)= $(r/r_0, g/g_0, b/b_0)$ となる。ここで、ベクトル F は等色すべき任意の色、ベクトル R, G, B は3原色、ベクトル W は基準白色である。また、 r, g, b は色 F を等色するのに必要な各3原色の発光エネルギー、 r_0, g_0, b_0 は基準白色を等色するのに必要な発光エネルギーである。

各テレビ方式において規定されている3原色並びに基準白色は、そのテレビ方式が使用する表色系を規定していることに他ならない。表色系が異なれば、同一の色を表す刺激値(R GB信号値)は異なる値を取りし、逆に同一の刺激値であっても表色系が異なれば、違った色が再現される。

1例として、NTSC表色系のカメラで撮像した信号を、勧告709表色系のディスプレイで表示した場合の色再現を図1に示す。図のように検知限を越える大きな色再現誤差が生じる。現実のNTSC放送は、それなりに忠実な色再現が得られているが、表1に示すように、現実のCRTには勧告709の3原色に近いものが用いられており、この表色系で忠実な色再現がされているということは、カメラも勧告709(或いはそれに近いもの)の表色系で運用されているということになる。すなわち、SMPTE、EBU、勧告709の各原色の微少な差違を無視すれば、525方式、HDTVいずれも同じ表色系で運用されている。したがって、方式間で原色変換(マトリックス変換)を行う必要はない(行うべきでない)。

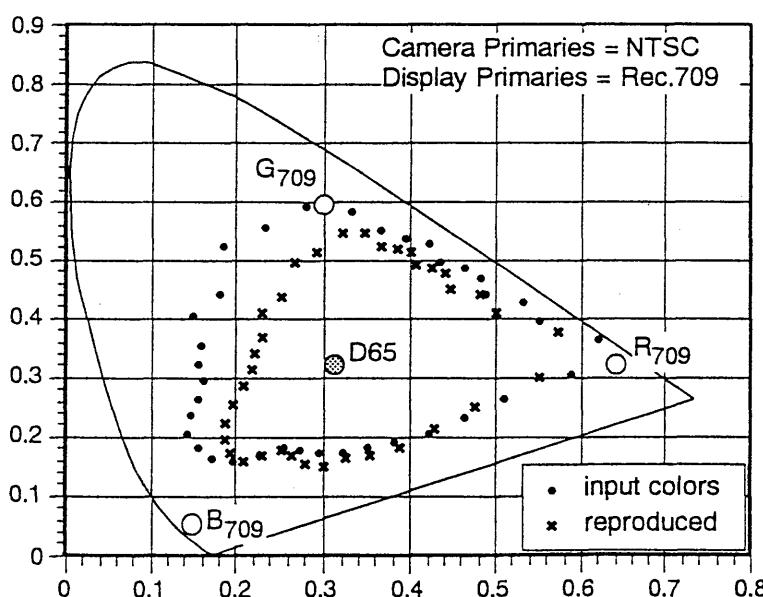


図1 撮像と受像で3原色が異なる場合の色再現誤差の例

3. 輝度方程式の違いによる色再現誤差

前述のように、現実のテレビ方式はすべて同じRGB表色系で運用されていると

言える。つまり、RGB信号であれば方式間で互換性は成立している。しかし放送ではRGB信号を輝度・色差信号に変換して伝送し、受信機で再度RGB信号に戻してディスプレイに表示している。この場合、送信側のマトリックス(RGB-->Y Pb Pr)と受信側のマトリックス(Y Pb Pr-->RGB)は、逆マトリックスの関係にある。この関係が崩れると受信機で復元したRGB信号値は、カメラのRGB信号とは異なるものとなるので色再現誤差が生じる。

図2は、送像・受像マトリックスが不一致の場合の色再現の例である。図中左は、勧告709の方程式の信号を240Mのマトリックスで復元した場合を、右は同信号をNTSCのマトリックスで復元した場合を示す。また図3は、輝度レベルの再現誤差を示す。図のように、240Mマトリックスの場合には、再現誤差は小さいが、NTSCマトリックスの場合には大きな再現誤差が生じていることが分かる。

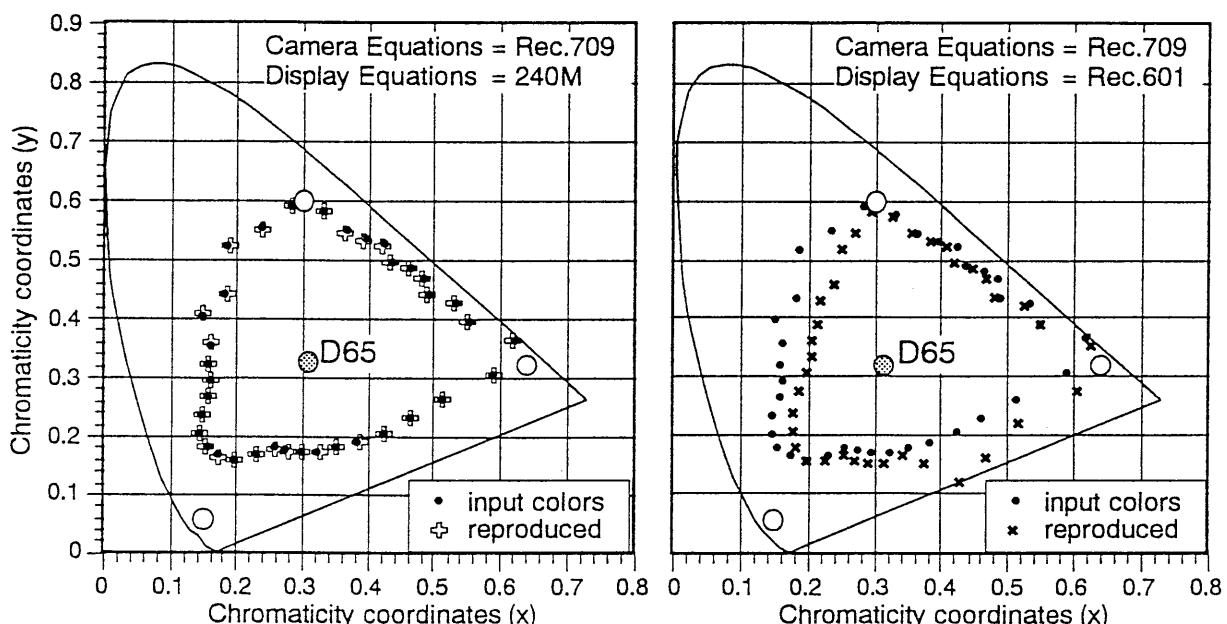


図2 送像・受像マトリックスが不一致の場合の色再現誤差の例

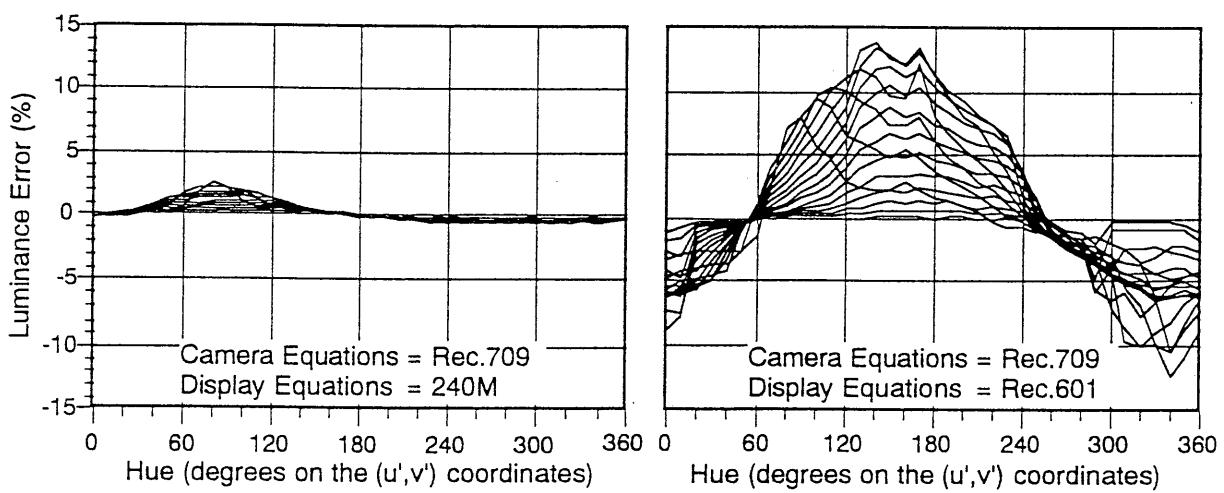


図3 送像・受像マトリックスが不一致の場合の輝度再現誤差

3.1 デモンストレーション

送像・受像マトリックスが不一致の場合の再現誤差がどの程度であるかを実感するため、図4に示す計算機シミュレーションを行った。その結果、勧告709と240Mのマトリックス(方程式)は混用しても実用上問題ないが、NTSCと709或いは240Mとは混用できないことが確認された。

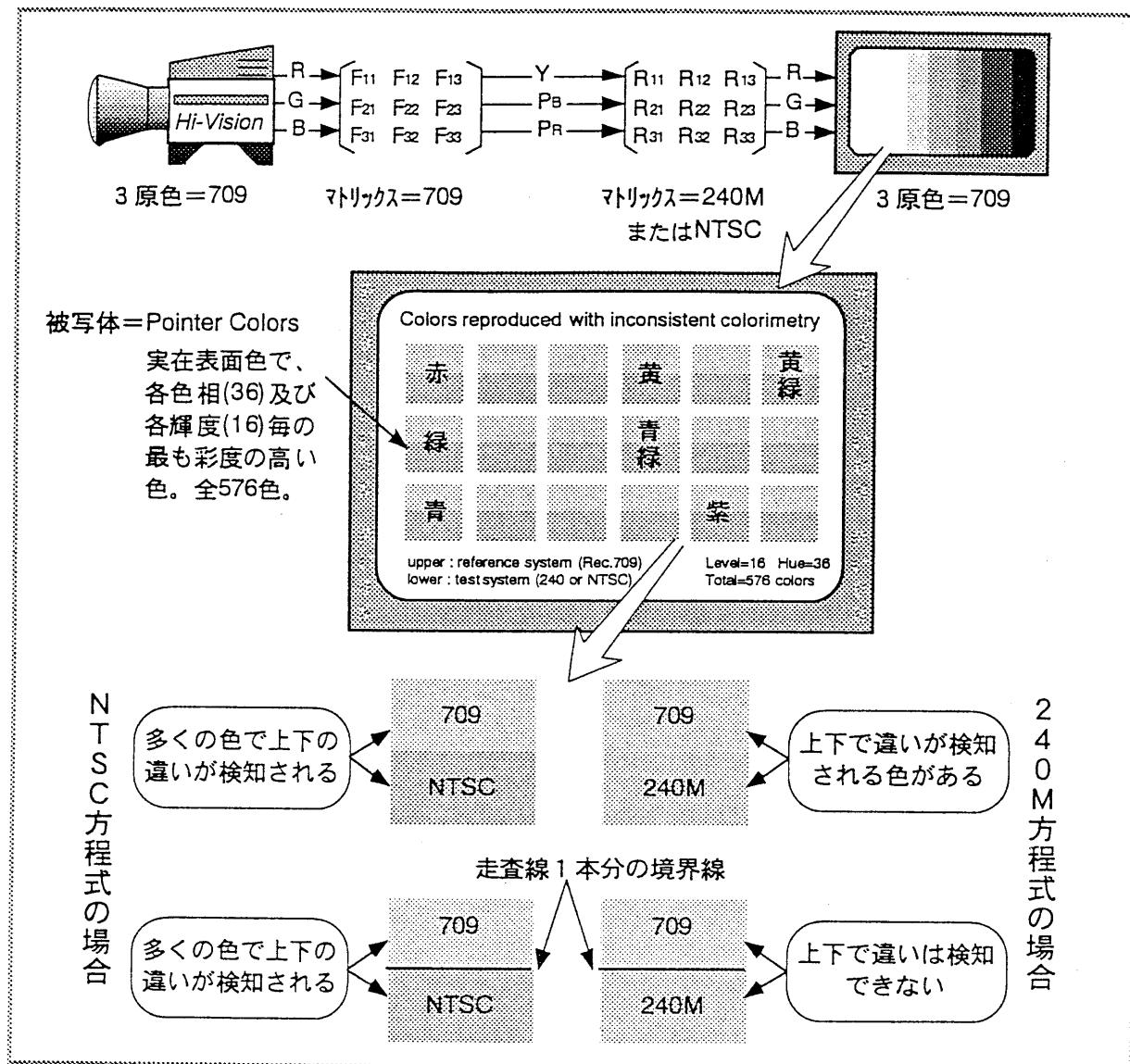


図4 漆度方程式の不一致による再現誤差の計算機シミュレーション

4. 色差信号帯域制限による再現誤差

色差信号を帯域制限すると、単に解像度劣化が生じるばかりでなく、高周波成分を含む彩度の高い色模様で色再現誤差が生じる。その誤差の大きさは、漆度方程式に依存する。

図5は、赤と黒の縞模様の信号がディスプレイに表示されるまでにどのように変形されるかを示したものである(説明を簡略にするためガンマ補正は考慮していない)。

図のように、受信機で復元したRGB信号には負の成分も含まれるが、CRTで負の光を放出することは不可能であるため、この負の成分はクリップされる。したがって再現される色は原画と異なるものとなってしまう。

図6、7は、帯域制限による輝度再現誤差の例である。入力画像は、各ポインターカラーと黒の縞模様である。図の横軸はポインターカラーの色相を表す。また図には16の曲線が描かれているが、これはポインターカラーの輝度レベルに対応している。図6は輝度の低周波成分(縞模様の平均輝度)、図7は同高周波成分(明部と暗部の輝度差)の再現誤差を示す。図から分かるように3原色と輝度方程式が一致している方が再現誤差は小さい。

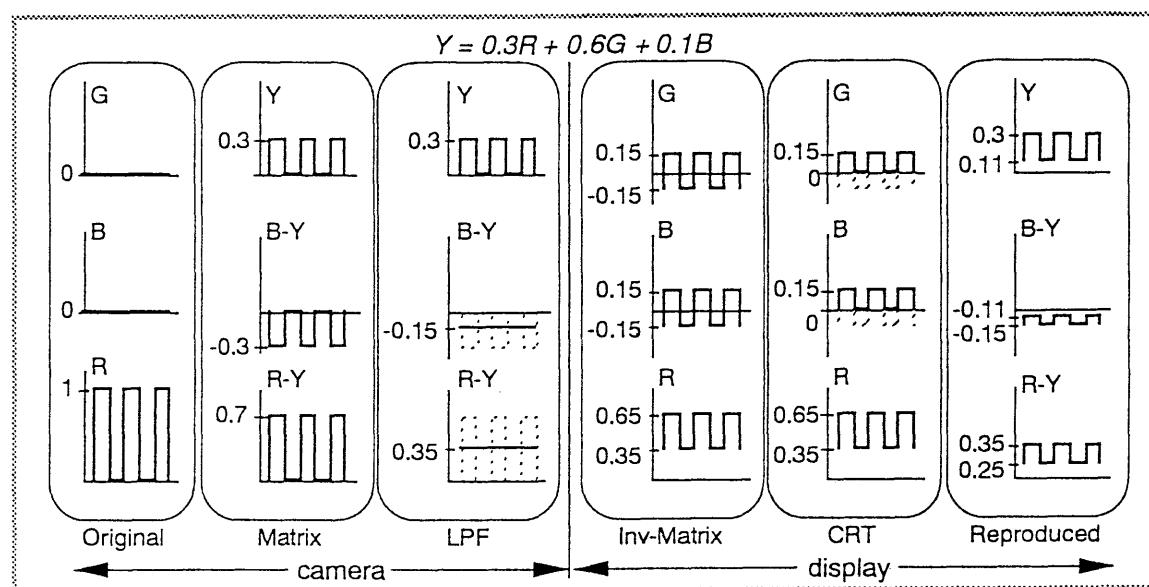


図5 色差信号帯域制限による再現誤差発生の説明図

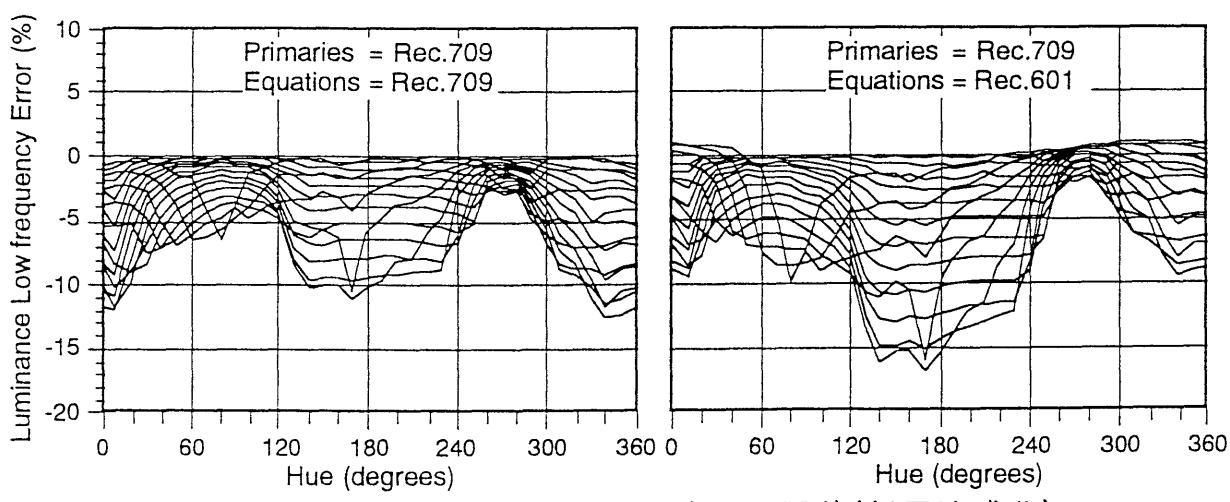


図6 色差信号帯域制限による輝度再現誤差(低周波成分)

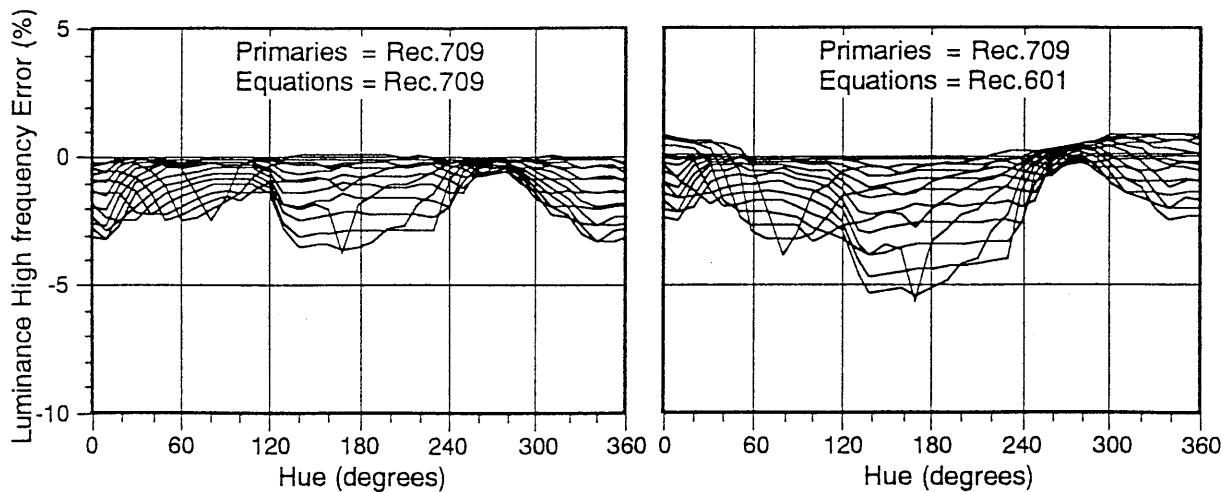


図7 色差信号帯域制限による輝度再現誤差(高周波成分)

4.1 デモンストレーション

帯域制限の色再現に及ぼす影響は大きく、多くの色の場合で原画(帯域制限なし)との差が顕著にわかる。これは、現行のガンマ前置補正方式の1つの欠点である。なお、今回のシミュレーションでは、勧告709の方程式についてのみ行ったので(NTSC方程式の計算は時間の都合で準備できなかった)、輝度方程式の違いによる再現誤差を直接比較できなかった。

なお、帯域制限による色再現歪みを低減する信号方式(P EQ: Pre-EQualizing system)についても紹介したが、ここではその詳細は割愛する。

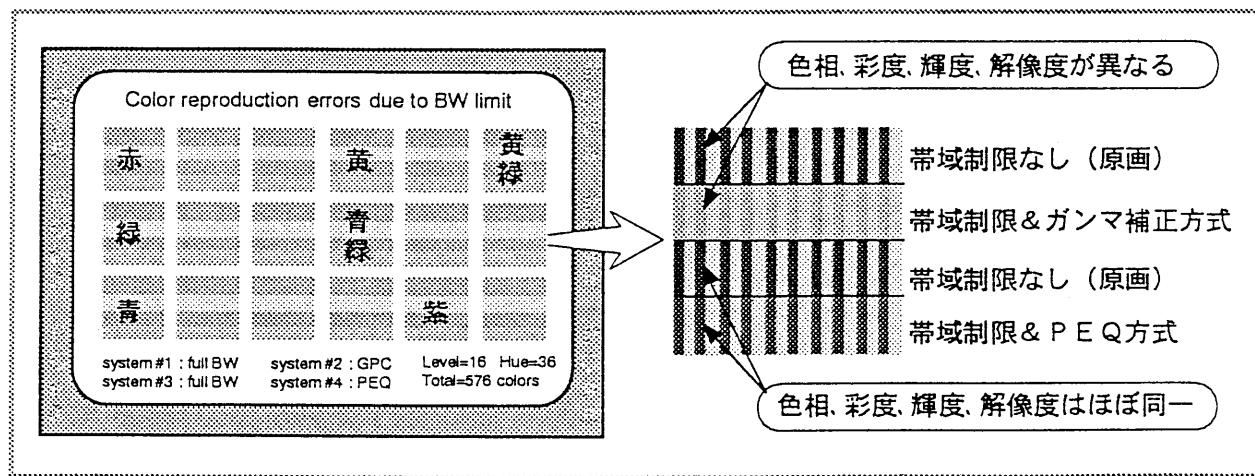


図8 色差信号帯域制限による色再現誤差の計算機シミュレーション

5. まとめ

現実のテレビ方式は、規格上の規定はともかく実態的にはSMPTEまたはEBUの基準原色に基づいて運用されている。SMPTEやEBU原色と勧告709原色との差違は僅かであり、この差は実用上無視できるレベルである(ほとんど検知限以下)。すなわち、現実のすべてのテレビ方式は勧告709原色で統一されていると言える。ITU-Rではこの事実に基づき、「新しいテレビ方式は勧告709のカラリメトリを採用すべき」という世界統一カラリメトリの勧告を制定した。わが国のデジタル方式において、輝度方程式を一本化したのもこれに基づいている。

基準原色が実態的に統一されていること、すなわちRGB信号レベルでは方式間で互換性が成立していることから、NTSCスタジオ信号をデジタル放送で使用する場合にも原色変換を行うべきではない。勿論、厳密な色再現を求める場合には、それぞれのシステムが実際に立脚しているカラリメトリに従った原色変換は必要となる。しかし、カラリメトリ論議で最大の問題は、わが国のNTSC方式が厳密にどのような基準原色で運用されているかが不明であることである。経験的には上述のようにほぼ勧告709原色であるが、これについても調査研究が望まれる。

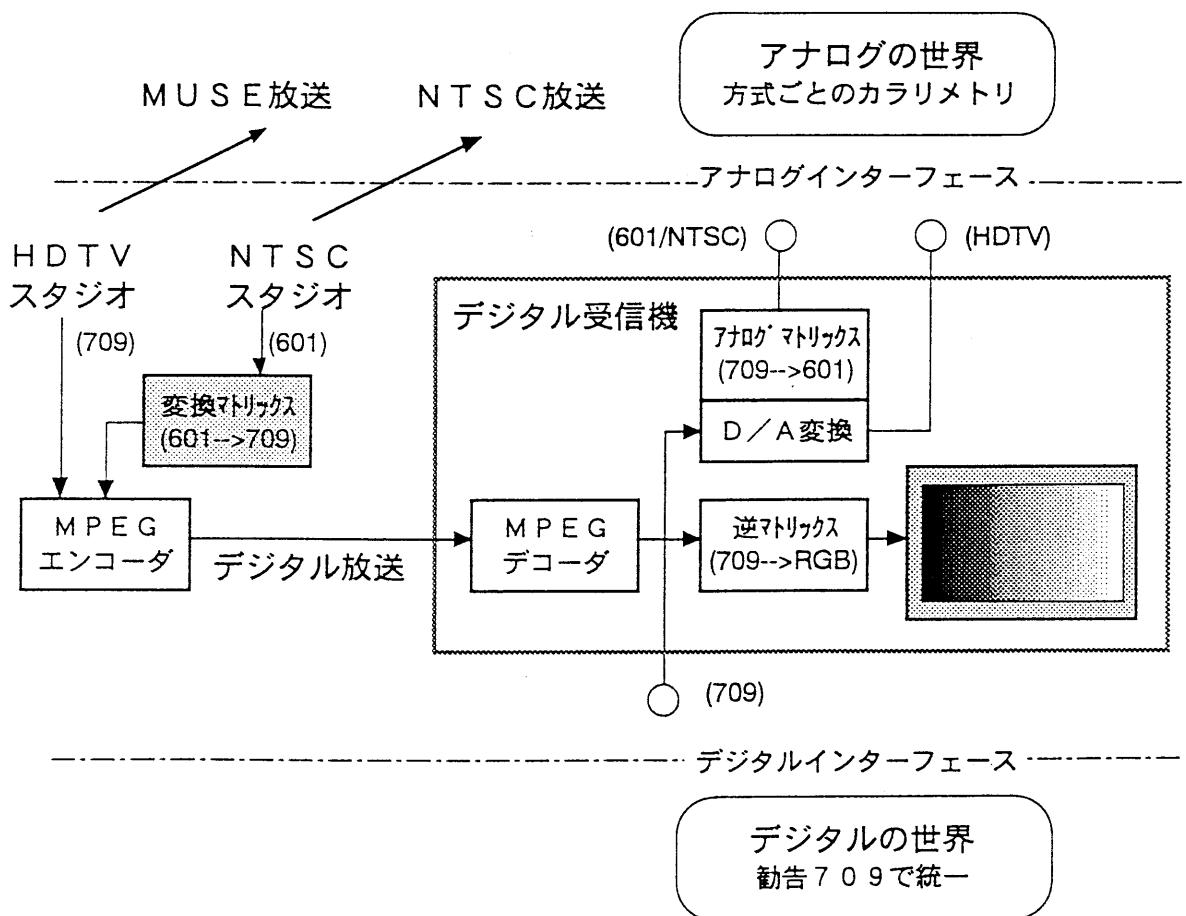


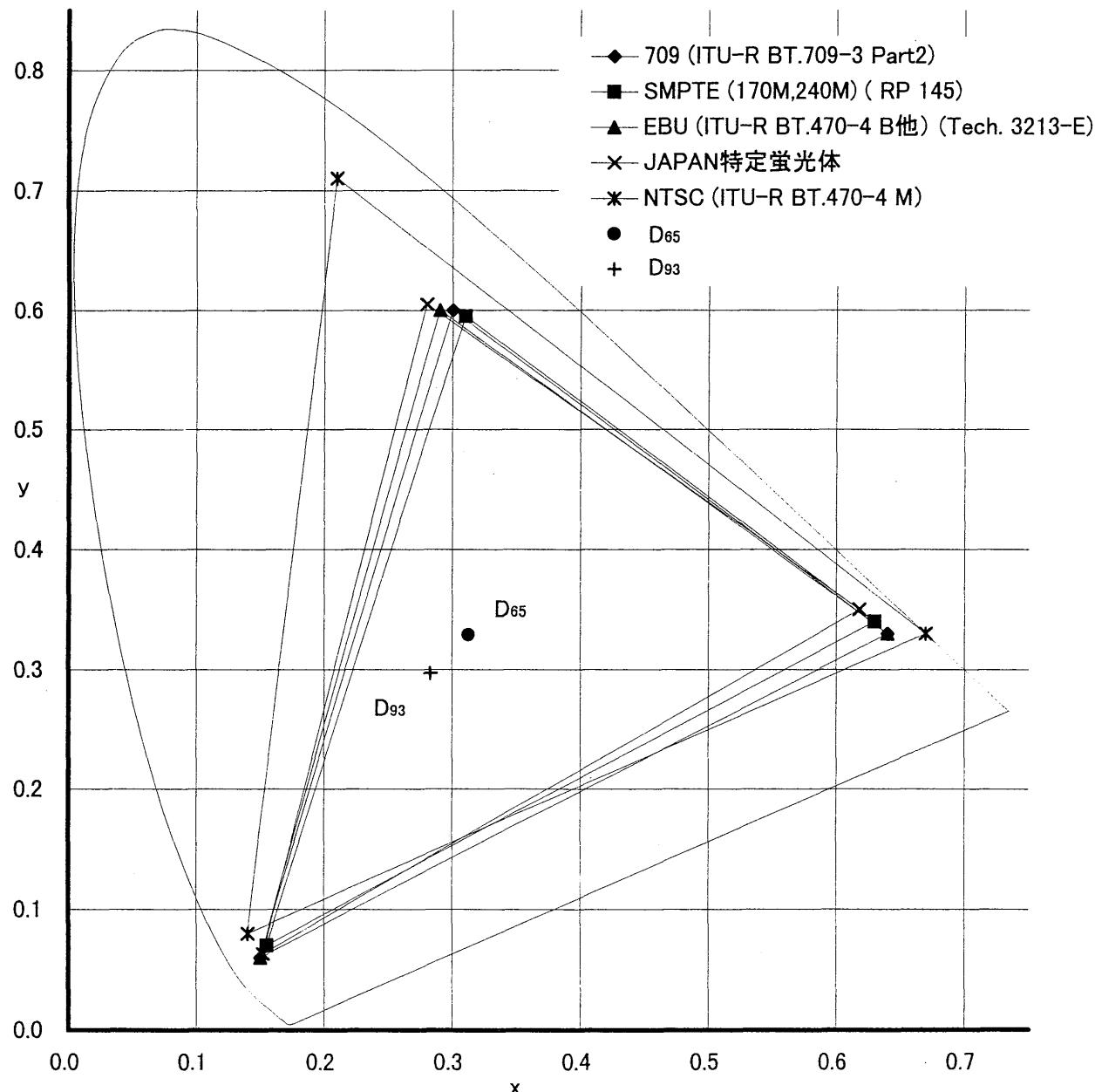
図9 デジタル放送方式導入後のカラリメトリ

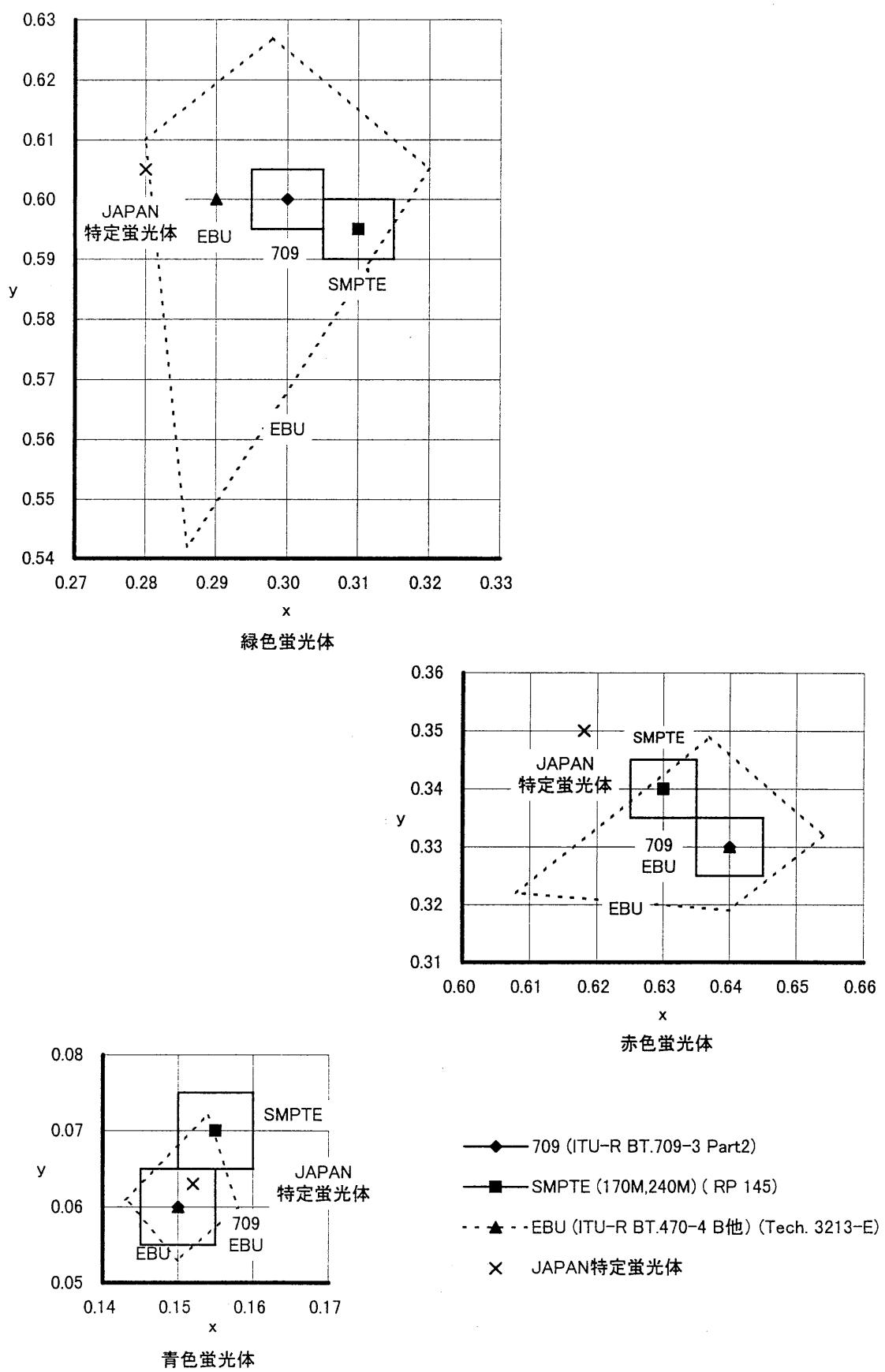
ARIB TR-B9

CRT色度点

CIE(x,y)	Green		Blue		Red	
	x	y	x	y	x	y
709 (ITU-R BT.709-3 Part2)	0.300	0.600	0.150	0.060	0.640	0.330
SMPTE (170M,240M) (RP 145)	0.310	0.595	0.155	0.070	0.630	0.340
EBU (ITU-R BT.470-4 B他) (Tech. 3213-E)	0.290	0.600	0.150	0.060	0.640	0.330
JAPAN特定蛍光体	0.280	0.605	0.152	0.063	0.618	0.350
NTSC (ITU-R BT.470-4 M)	0.210	0.710	0.140	0.080	0.670	0.330

3原色色度のCIE色度座標





3原色色度と許容範囲

付録 3

ARIB TR-B9

(A R I B カラリメトリ A H G 資料)

1998. 6. 1

ソニー 辻川、川田、小杉

シバソク 山元、N H K 安藤

変換実験資料

カラリメトリ審議の中で 1035 システム／1080 システム変換および 1125 系／525 系変換時のガンマ特性差によるモニタ上の色の違いやベクトルスコープ上のカラーバーレベル／位相差の確認が課題となっていた。ガンマ特性は非直線であり計算で変換の影響を把握するのは複雑だが、実際のカメラでガンマを変えたり、非直線アンプで特性差をシミュレーションするには比較的容易に実現できる。そこで実機材による確認実験を行った。

1. 実験日時：1998年3月18日14:00～18:00
2. 実験場所：ソニー（株）大崎西テクノロジーセンター・プロジェクトデモルーム
3. 評価者：カラリメトリ Ad-hoc 委員 16名およびオブザーバー 4名、計 20名

4. 実験内容：

[実験 1] カメラにおける SMPTE 240M と ITU 709 の色の違いの確認

(1) 方法

HD カムコーダ（ソニー HDW-700）の EE モード (Y, P_B, P_R) でガンマ、伝送方程式を 240M／709 で切り替え、両者の色調、レベルの違いをモニタおよびベクトルスコープ（リーダー電子 LV5150HD）で観察する。

(2) 条件

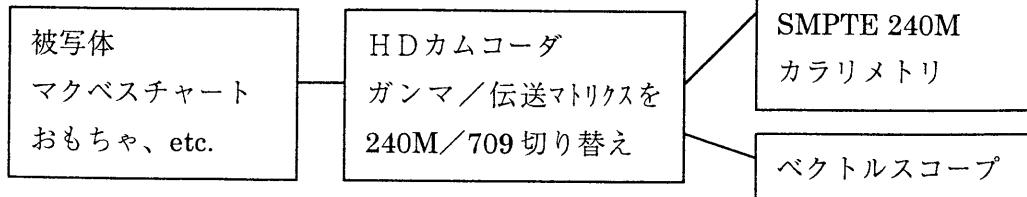
(2-1) モニタ

30 インチ HD モニタ（ソニー HDM-3030）で、SMPTE240M 蛍光体および伝送マトリクスのもの。

(2-2) 被写体

被写体はマクベスチャートおよび中間色のある適切な被写体。

(3) 接続



[実験 2] モニタの色温度 D₆₅ と D₉₃ の違いのチェック

(1) 方法

HD モニタ（ソニーHDM-3030）の基準白色を D₆₅ と D₉₃ で切り替え、違いを見る。

(2) 条件

モニタおよび被写体の条件は実験 1 と同じ。

[実験 3] SMPTE 240M と ITU 601 の違いのチェック

(1) 方法

1035 システム (SMPTE 240M) を 525 ダウンコンバート (ITU 601) する際のカラリメトリの影響をチェックする。ダウンコンバータのガンマはリニア（ガンマ変換なし）とし、替わりに HD カムコーダ側で SMPTE 240M と ITU 709 を切り替える。

(2) 条件

(2-1) モニタ

モニタの規格上の色温度は D₆₅ だが、実運用を考慮し 1035、525 共 D₉₃ とする。

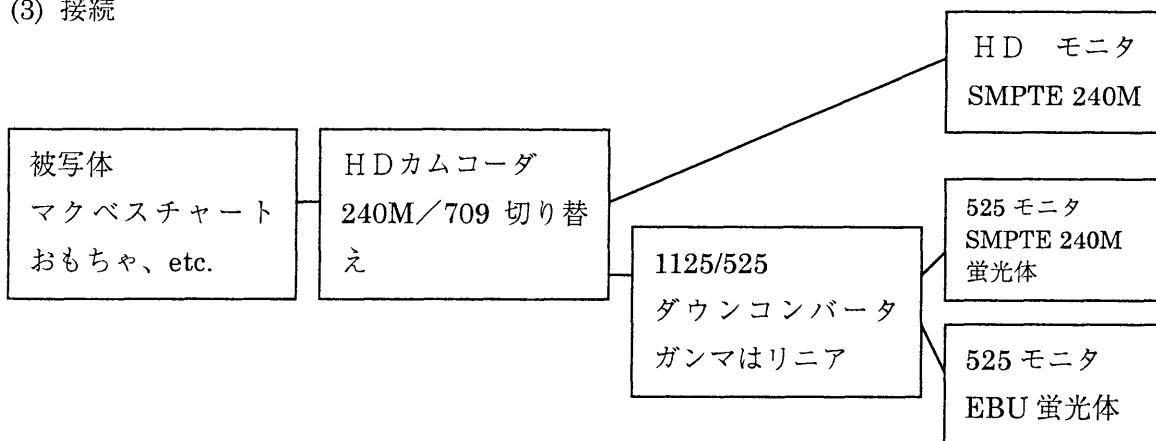
(2-2) モニタの蛍光体 (SMPTE 240M と EBU)

525 モニタの蛍光体として 240M (ソニーBVM20F1U)、EBU (ソニーBVM20F1J) による差異を見る。

(2-3) 被写体

被写体の条件は実験 1 と同じ。

(3) 接続

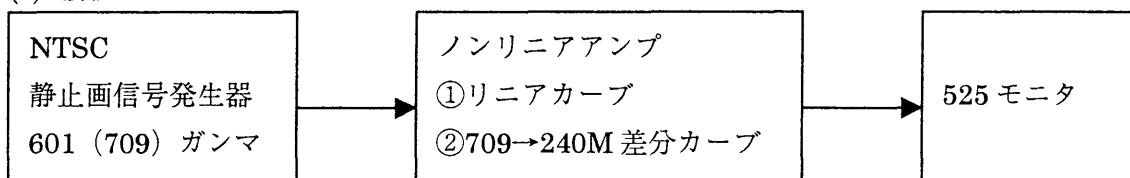


[実験4] ノンリニアアンプを使ったITU 709とSMPTE 240Mのガンマ差比較

(1) 方法

ITU 601 ガンマ (ITU 709 と同じ) のかかった NTSC 静止画信号発生器 (シバソク TM05A6) の信号をノンリニアアンプ (シバソク VB13DX) にて、①リニア、②ITU 709 と SMPTE 240M ガンマ差分の逆補正、の2つのカーブを通った信号を切り替えてモニタリングする。これにより擬似的に ITU 709 と SMPTE 240M のガンマの違いの影響を見る。

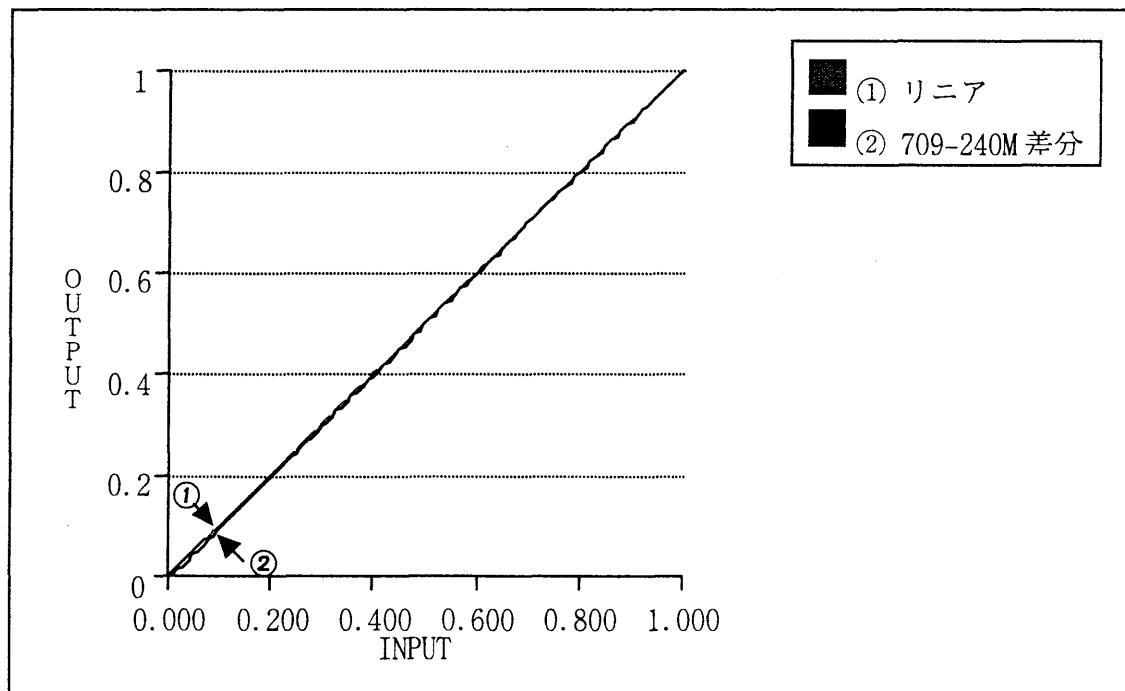
(2) 接続



①を通った信号は 709 ガンマ

②を通った信号は 240M ガンマとなる

図1. ノンリニアアンプのカーブ



補足：計算データによるガンマの比較

下記送信側ガンマ補正式において、Lに0から1まで0.01ステップで値を代入した時の709と240MのVの値の比較を表1に示す。また、709と240Mのガンマ補正カーブの比較を下図2に示す。

ITU 709

$$V = 1.099 \times L^{0.45} - 0.099$$

$$1 \geq L \geq 0.018$$

$$V = 4.5L$$

$$0.018 > L \geq 0$$

SMPTE 240M

$$V = 1.1115 \times L^{0.45} - 0.1115$$

$$1 \geq L \geq 0.0228$$

$$V = 4.0L$$

$$0.0228 > L \geq 0$$

図2. 709と240Mのガンマ補正カーブの比較

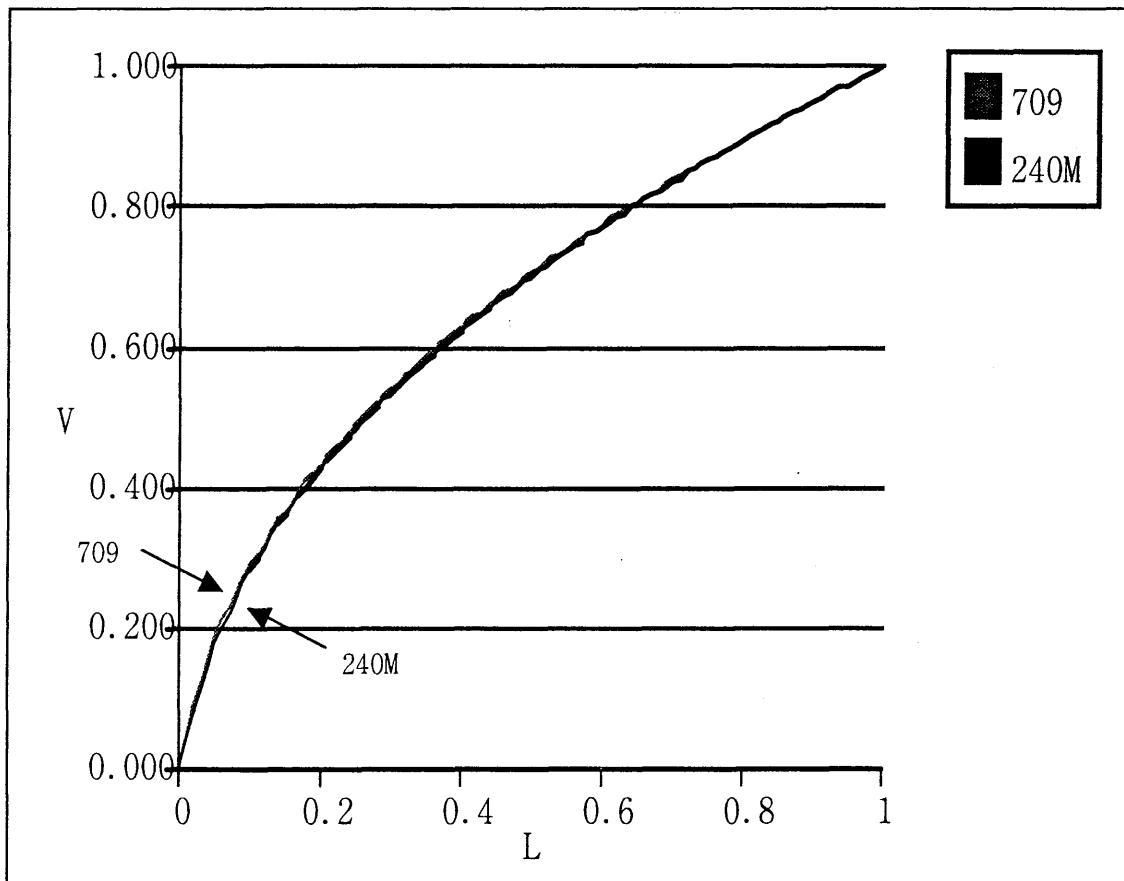


表1. 709と240MのV値の比較

送信側ガンマ補正式のLに0から1まで0.01ステップで値を代入した時のV値

但し L: 再生時の光
V: 映像信号

	L	V(709)	V(240M)	709-240M差分		L	V(709)	V(240M)	709-240M差分
0	0.00	0.000	0.000	0.000					
1	0.01	0.045	0.040	0.005	51	0.51	0.713	0.709	0.003
2	0.02	0.090	0.080	0.010	52	0.52	0.720	0.717	0.003
3	0.03	0.128	0.118	0.010	53	0.53	0.727	0.724	0.003
4	0.04	0.159	0.150	0.010	54	0.54	0.734	0.731	0.003
5	0.05	0.186	0.177	0.009	55	0.55	0.741	0.738	0.003
6	0.06	0.211	0.202	0.009	56	0.56	0.748	0.745	0.003
7	0.07	0.233	0.224	0.009	57	0.57	0.754	0.752	0.003
8	0.08	0.254	0.245	0.008	58	0.58	0.761	0.758	0.003
9	0.09	0.273	0.265	0.008	59	0.59	0.768	0.765	0.003
10	0.10	0.291	0.283	0.008	60	0.60	0.774	0.772	0.003
11	0.11	0.308	0.300	0.008	61	0.61	0.781	0.778	0.002
12	0.12	0.324	0.317	0.008	62	0.62	0.787	0.785	0.002
13	0.13	0.340	0.332	0.008	63	0.63	0.794	0.791	0.002
14	0.14	0.355	0.347	0.007	64	0.64	0.800	0.798	0.002
15	0.15	0.369	0.362	0.007	65	0.65	0.806	0.804	0.002
16	0.16	0.383	0.376	0.007	66	0.66	0.813	0.810	0.002
17	0.17	0.396	0.389	0.007	67	0.67	0.819	0.817	0.002
18	0.18	0.409	0.402	0.007	68	0.68	0.825	0.823	0.002
19	0.19	0.422	0.415	0.007	69	0.69	0.831	0.829	0.002
20	0.20	0.434	0.427	0.006	70	0.70	0.837	0.835	0.002
21	0.21	0.445	0.439	0.006	71	0.71	0.843	0.841	0.002
22	0.22	0.457	0.451	0.006	72	0.72	0.849	0.847	0.002
23	0.23	0.468	0.462	0.006	73	0.73	0.855	0.853	0.002
24	0.24	0.479	0.473	0.006	74	0.74	0.861	0.859	0.002
25	0.25	0.490	0.484	0.006	75	0.75	0.867	0.865	0.002
26	0.26	0.500	0.495	0.006	76	0.76	0.872	0.871	0.001
27	0.27	0.511	0.505	0.006	77	0.77	0.878	0.877	0.001
28	0.28	0.521	0.515	0.005	78	0.78	0.884	0.882	0.001
29	0.29	0.531	0.525	0.005	79	0.79	0.889	0.888	0.001
30	0.30	0.540	0.535	0.005	80	0.80	0.895	0.894	0.001
31	0.31	0.550	0.545	0.005	81	0.81	0.901	0.899	0.001
32	0.32	0.559	0.554	0.005	82	0.82	0.906	0.905	0.001
33	0.33	0.568	0.563	0.005	83	0.83	0.912	0.911	0.001
34	0.34	0.577	0.573	0.005	84	0.84	0.917	0.916	0.001
35	0.35	0.586	0.582	0.005	85	0.85	0.922	0.922	0.001
36	0.36	0.595	0.590	0.005	86	0.86	0.928	0.927	0.001
37	0.37	0.604	0.599	0.005	87	0.87	0.933	0.932	0.001
38	0.38	0.612	0.608	0.004	88	0.88	0.939	0.938	0.001
39	0.39	0.620	0.616	0.004	89	0.89	0.944	0.943	0.001
40	0.40	0.629	0.624	0.004	90	0.90	0.949	0.949	0.001
41	0.41	0.637	0.633	0.004	91	0.91	0.954	0.954	0.001
42	0.42	0.645	0.641	0.004	92	0.92	0.960	0.959	0.000
43	0.43	0.653	0.649	0.004	93	0.93	0.965	0.964	0.000
44	0.44	0.661	0.657	0.004	94	0.94	0.970	0.969	0.000
45	0.45	0.668	0.664	0.004	95	0.95	0.975	0.975	0.000
46	0.46	0.676	0.672	0.004	96	0.96	0.980	0.980	0.000
47	0.47	0.683	0.680	0.004	97	0.97	0.985	0.985	0.000
48	0.48	0.691	0.687	0.004	98	0.98	0.990	0.990	0.000
49	0.49	0.698	0.695	0.003	99	0.99	0.995	0.995	0.000
50	0.50	0.706	0.702	0.003	100	1.00	1.000	1.000	0.000

5. 実験結果：

[実験1] カメラにおける SMPTE 240M と ITU 709 の色の違いの確認

結果：ガンマの差については、暗部での違いはあったが色の変化はなかった。伝送マトリクスの差については、709 から 240M への切り替え時に黄色が赤方向に若干動く現象が見られた。(ベクトル表示で 1 度程度、写真1、2 参照)

[実験2] モニタの色温度 D₆₅ と D₉₃ の違いのチェック

結果：両者の色の違いを確認した。

[実験3] SMPTE 240M と ITU 601 の違いのチェック

結果：ガンマの差については、暗部での違いはあったが色の変化はなかった。伝送マトリクスの差については、709 と 240M との切り替えにおいて以下を確認した。

- ・ EBU 蛍光体の場合は変化が少ないと。
- ・ SMPTE 蛍光体の場合、1125、525 共変化が少ないと。

[実験4] ノンリニアアンプを使った ITU 709 と SMPTE 240M のガンマ差比較

結果：709 と 240M とのガンマ切り替えにおいて、暗部でわずかな違いはあったが色の変化はなかった。

なお、リニアマトリクスの ON/OFF 状態に伴う差についても上記実験を行ったが、709 と 240M との間に有意の差はなかった。

6. 確認された事項

評価実験の結果などをもとに確認された事項は以下のとおり。

- ・ 709 と 240M とのガンマの差は混在しても問題のないレベルである。
- ・ 709 と 240M との伝送マトリクスの違いによる色相の差は少なく、問題のないレベルである。
- ・ 709 と 240M との相互変換時におけるガンマ、伝送マトリクスのパラメータ変換については、必ずしも不可欠な用件ではないと考えられるが、カラーバーなどリファレンス信号の扱いを含めどのような表現にするかを別途整理する。

以上

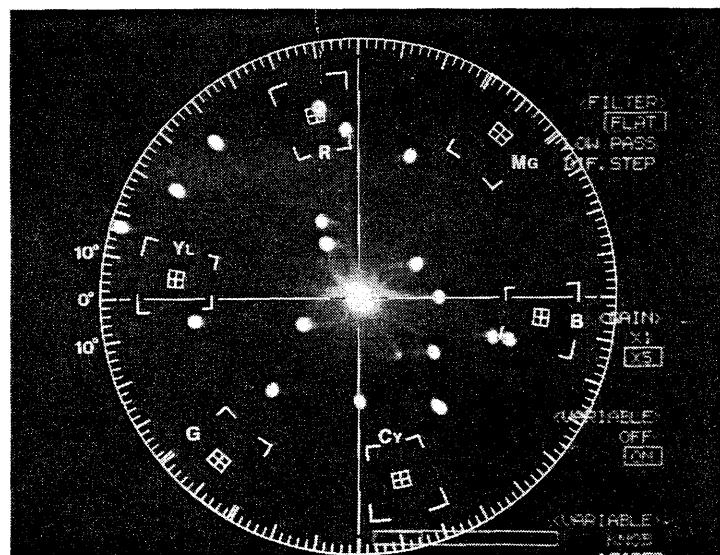


写真1 伝送マトリックス240Mにおける、
マクベスチャート撮像時のベクタ波形

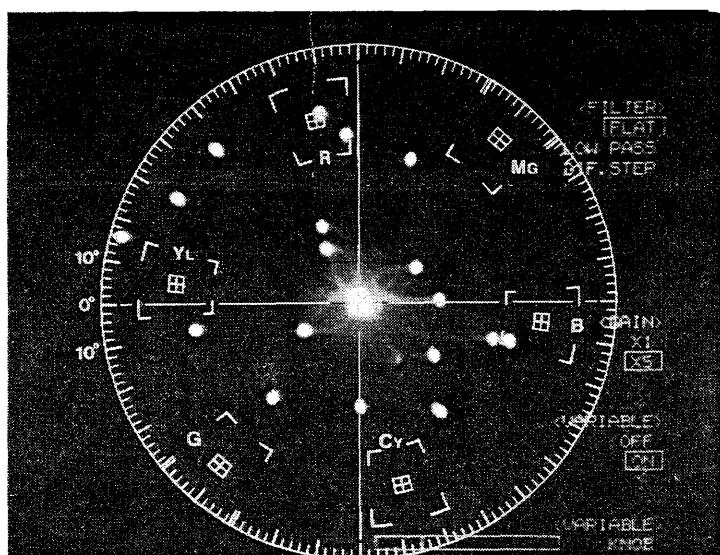


写真2 伝送マトリックス709における、
マクベスチャート撮像時のベクタ波形

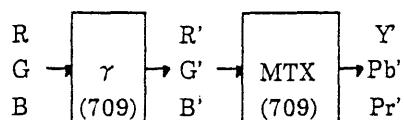
(カラリメトリアドホック資料)

1998.3.18
NHK 西田

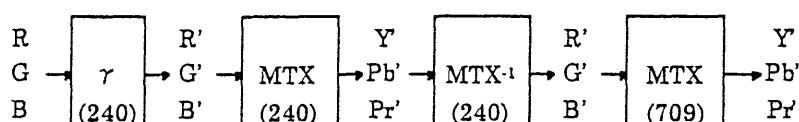
マトリクス変換におけるガンマの影響

【条件】

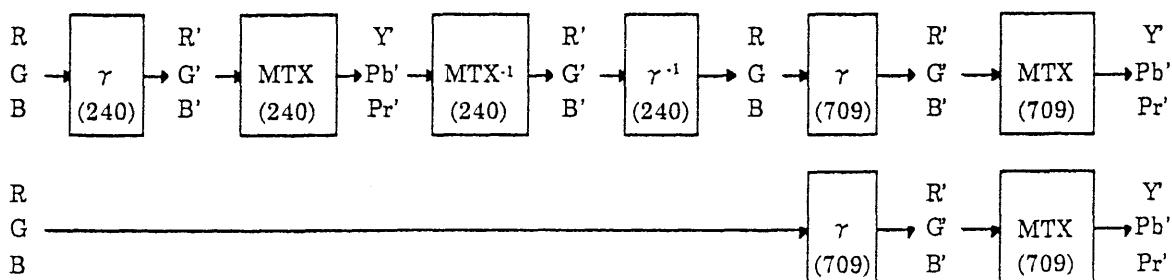
- (1) 240M の Y、Pb'、Pr'から BT.709 の Y、Pb'、Pr'へ変換する場合を考える。
- (2) マトリクス-逆マトリクス、ガンマ-逆ガンマの演算誤差は無視できるものとする。



(a) 709



(b) 240M->709 ガンマ特性を考慮しない



(c) 240M->709 ガンマ特性を考慮

図1 マトリクス変換

(3) ガンマ特性

BT.709	240M
$V = 4.5 L$ $0 \leq L < 0.018$ $V = 1.099 L^{0.45} - 0.099$ $0.018 \leq L \leq 1$	$V = 4.0 L$ $0 \leq L < 0.0228$ $V = 1.1115 L^{0.45} - 0.1115$ $0.0228 \leq L \leq 1$

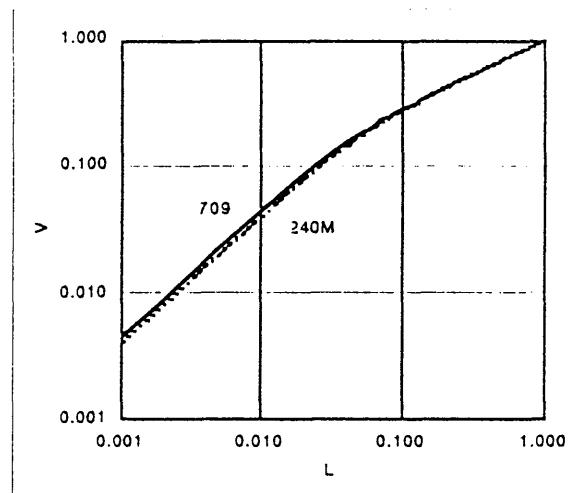


図2 ガンマ特性

(4) R、G、B それぞれ {0.00, 0.01, 0.02, 0.05, 0.10, 0.20, 0.50, 0.75, 1.00} の全ての組み合せについて計算。

(結果)

1. 輝度、色差信号レベルと変換誤差

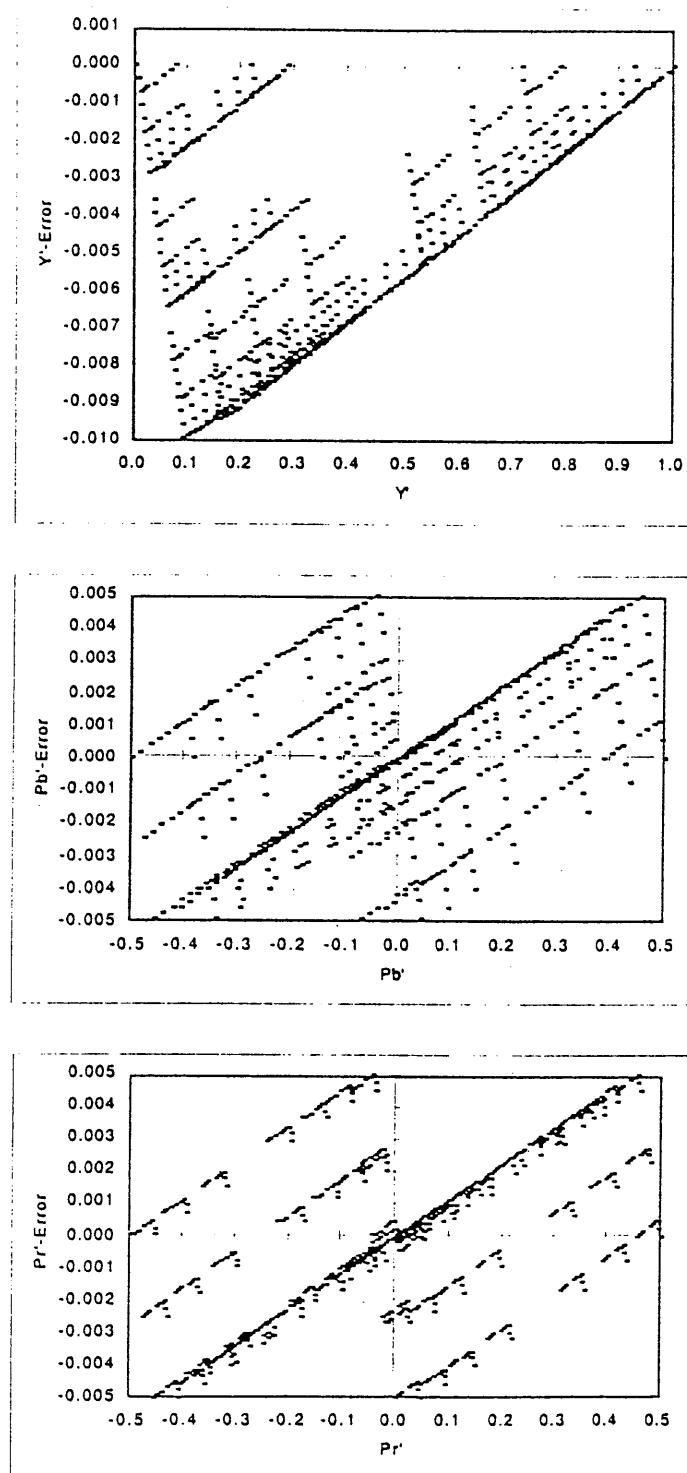
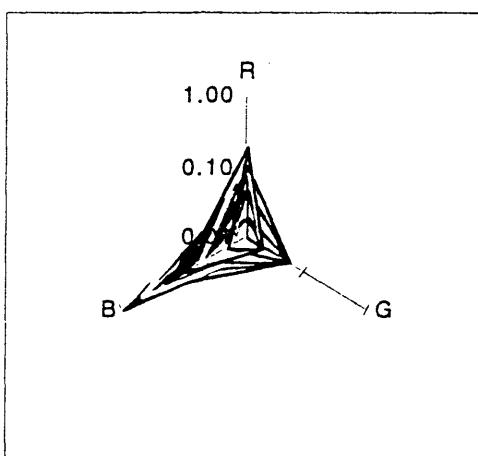
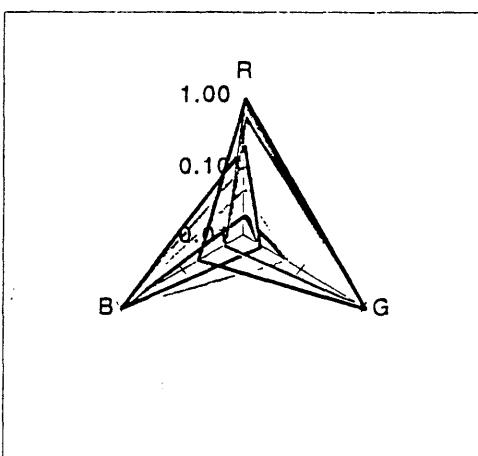


図3 変換誤差

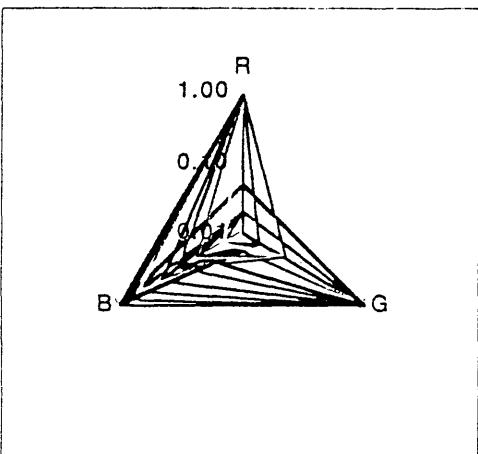
2. 誤差が大きくなる RGB の組み合せ



(a) $|Y\text{-error}| > 0.009$



(b) $|Pb\text{-error}| > 0.0045$



(c) $|Pr\text{-error}| > 0.0045$

図3 誤差が相対的に大きくなる RGB の組み合せ

付録 5

ARIB TR-B9

(ARIB カラリメトリ AHG 資料)

1998 年 6 月 10 日

N H K 西田

デジタルマトリクス係数

1. 映像信号の量子化

$$\begin{aligned}
 D'_R &= \text{INT}[(219E'_R + 16)2^{n-8}] & D'_Y &= \text{INT}[(219E'_Y + 16)2^{n-8}] \\
 D'_G &= \text{INT}[(219E'_G + 16)2^{n-8}] & D'_{CB} &= \text{INT}[(224E'_{CB} + 128)2^{n-8}] \\
 D'_B &= \text{INT}[(219E'_B + 16)2^{n-8}] & D'_{CR} &= \text{INT}[(224E'_{CR} + 128)2^{n-8}]
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

$0 \leq E'_R, E'_G, E'_B, E'_Y \leq 1.0, -0.5 \leq E'_{CB}, E'_{CR} \leq 0.5$: アナログ映像信号

n : 信号ビット数

$\text{INT}[\quad]$: 小数点以下第一位の四捨五入

2. デジタルマトリクスの一般式

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} D'_{Y1} \\ D'_{Y2} \\ D'_{Y3} \end{bmatrix} &= \text{INT} \left\{ [Scale_Y][MTX][Scale_X] \left(\begin{bmatrix} D'_{X1} \\ D'_{X2} \\ D'_{X3} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Offset_{X1} \\ Offset_{X2} \\ Offset_{X3} \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} Offset_{Y1} \\ Offset_{Y2} \\ Offset_{Y3} \end{bmatrix} \right\} \\
 &= \text{INT} \left\{ [AMTX] \left(\begin{bmatrix} D'_{X1} \\ D'_{X2} \\ D'_{X3} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Offset_{X1} \\ Offset_{X2} \\ Offset_{X3} \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} Offset_{Y1} \\ Offset_{Y2} \\ Offset_{Y3} \end{bmatrix} \right\} \\
 &\approx \text{INT} \left\{ [DMTX] \left(\begin{bmatrix} D'_{X1} \\ D'_{X2} \\ D'_{X3} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Offset_{X1} \\ Offset_{X2} \\ Offset_{X3} \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} Offset_{Y1} \\ Offset_{Y2} \\ Offset_{Y3} \end{bmatrix} \right\} \\
 &= \text{INT} \left\{ [DMTX] \begin{bmatrix} D'_{X1} \\ D'_{X2} \\ D'_{X3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} DOFFSET'_{Y1} \\ DOFFSET'_{Y2} \\ DOFFSET'_{Y3} \end{bmatrix} \right\} \\
 &= \text{INT} \left\{ \begin{bmatrix} \frac{k_{11}}{2^m} & \frac{k_{12}}{2^m} & \frac{k_{13}}{2^m} \\ \frac{k_{21}}{2^m} & \frac{k_{22}}{2^m} & \frac{k_{23}}{2^m} \\ \frac{k_{31}}{2^m} & \frac{k_{32}}{2^m} & \frac{k_{33}}{2^m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D'_{X1} \\ D'_{X2} \\ D'_{X3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{k_{14}}{2^m} \\ \frac{k_{24}}{2^m} \\ \frac{k_{34}}{2^m} \end{bmatrix} \right\} \\
 \begin{bmatrix} DOFFSET'_{Y1} \\ DOFFSET'_{Y2} \\ DOFFSET'_{Y3} \end{bmatrix} &= -[DMTX] \begin{bmatrix} Offset_{X1} \\ Offset_{X2} \\ Offset_{X3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Offset_{Y1} \\ Offset_{Y2} \\ Offset_{Y3} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [MTX] &= \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \\
 [Scale_Y] &= \begin{bmatrix} s_{Y1} & 0 & 0 \\ 0 & s_{Y2} & 0 \\ 0 & 0 & s_{Y3} \end{bmatrix} \\
 [Scale_X] &= \begin{bmatrix} 1/s_{X1} & 0 & 0 \\ 0 & 1/s_{X2} & 0 \\ 0 & 0 & 1/s_{X3} \end{bmatrix} \\
 [AMTX] &= [Scale_Y][MTX][Scale_X] = \begin{bmatrix} m_{11} \frac{s_{Y1}}{s_{X1}} & m_{12} \frac{s_{Y1}}{s_{X2}} & m_{13} \frac{s_{Y1}}{s_{X3}} \\ m_{21} \frac{s_{Y2}}{s_{X1}} & m_{22} \frac{s_{Y2}}{s_{X2}} & m_{23} \frac{s_{Y2}}{s_{X3}} \\ m_{31} \frac{s_{Y3}}{s_{X1}} & m_{32} \frac{s_{Y3}}{s_{X2}} & m_{33} \frac{s_{Y3}}{s_{X3}} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} m'_{11} & m'_{12} & m'_{13} \\ m'_{21} & m'_{22} & m'_{23} \\ m'_{31} & m'_{32} & m'_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_{11}}{2^m} & \frac{r_{12}}{2^m} & \frac{r_{13}}{2^m} \\ \frac{r_{21}}{2^m} & \frac{r_{22}}{2^m} & \frac{r_{23}}{2^m} \\ \frac{r_{31}}{2^m} & \frac{r_{32}}{2^m} & \frac{r_{33}}{2^m} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

D'_{Xi} : 入力デジタル信号 ($Xi : R, G, B$ or Y, C_B, C_R)

s_{Xi} : 入力デジタル信号のゲイン

$Offset_{Xi}$: 入力デジタル信号のオフセット

D'_{Yi} : 出力デジタル信号 ($Yi = R, G, B$ or Y, C_B, C_R)

s_{Yi} : 出力デジタル信号のゲイン

$Offset_{Yi}$: 出力デジタル信号のオフセット

[MTX] : アナログマトリクス

[$AMTX$] : 入出力デジタル信号のゲインを考慮したマトリクス

[$DMTX$] : デジタルマトリクス (整数化係数)

m : デジタルマトリクス係数ビット数

r_{ij} : 実数係数

k_{ij} : 整数化係数

3. マトリクス、逆マトリクス

3.1 709 (Rec. ITU-R BT.1361、Rec. ITU-R BT.709-3、BTA S-001B、SMPTE 274M)

(1) アナログ信号

$$\cdot (R', G', B') \rightarrow (Y', C_B', C_R')$$

$$\begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{709} = [MTX_{709}] \begin{bmatrix} E'_R \\ E'_G \\ E'_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ -\frac{0.2126}{1.8556} & -\frac{0.7152}{1.8556} & 0.5 \\ 0.5 & -\frac{0.7152}{1.5748} & -\frac{0.0722}{1.5748} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_R \\ E'_G \\ E'_B \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\cdot (Y', C_B', C_R') \rightarrow (R', G', B')$$

$$\begin{bmatrix} E'_R \\ E'_G \\ E'_B \end{bmatrix} = [MTX_{709}]^{-1} \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{709} = \begin{bmatrix} 1.0000 & \frac{0.0000}{0.0722 \times 1.8556} & \frac{1.5748}{0.2126 \times 1.5748} \\ 1.0000 & \frac{0.7152}{1.8556} & \frac{0.7152}{0.0000} \\ 1.0000 & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{709} \quad (3.2)$$

ARIB TR-B9

(2) デジタル信号

$$\cdot (R', G', B') \rightarrow (Y', C_B', C_R')$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} D'_Y \\ D'_{CB} \\ D'_{CR} \end{bmatrix}_{709} &= \text{INT} \left\{ \begin{bmatrix} AMTX_{709} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D'_R - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_G - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_B - 16 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
&\approx \text{INT} \left\{ \begin{bmatrix} DMTX_{709} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D'_R - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_G - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_B - 16 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
&= \text{INT} \left\{ \begin{bmatrix} DMTX_{709} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D'_R \\ D'_G \\ D'_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} DOFFSET_Y \\ DOFFSET_{CB} \\ DOFFSET_{CR} \end{bmatrix}_{709} \right\}
\end{aligned}$$

$$[AMTX_{709}] = \begin{bmatrix} 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ -\frac{0.2126}{1.8556} \times \frac{224}{219} & -\frac{0.7152}{1.8556} \times \frac{224}{219} & 0.5 \times \frac{224}{219} \\ 0.5 \times \frac{224}{219} & -\frac{0.7152}{1.5748} \times \frac{224}{219} & -\frac{0.0722}{1.5748} \times \frac{224}{219} \end{bmatrix}$$

(3.3)

$$\cdot (Y', C_B', C_R') \rightarrow (R', G', B')$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} D'_R \\ D'_G \\ D'_B \end{bmatrix} &= \text{INT} \left\{ \begin{bmatrix} AMTX_{709} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D'_Y - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CB} - 128 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CR} - 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix}_{709} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 16 \cdot 2^{n-8} \\ 16 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
&\approx \text{INT} \left\{ \begin{bmatrix} DMTX_{709} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D'_Y - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CB} - 128 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CR} - 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix}_{709} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 16 \cdot 2^{n-8} \\ 16 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
&= \text{INT} \left\{ \begin{bmatrix} DMTX_{709} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D'_Y \\ D'_{CB} \\ D'_{CR} \end{bmatrix}_{709} + \begin{bmatrix} DOFFSET_R \\ DOFFSET_G \\ DOFFSET_B \end{bmatrix}_{709} \right\}
\end{aligned}$$

$$[AMTX_{709}]^{-1} = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0000 & 1.5748 \times \frac{219}{224} \\ 1.0000 & -\frac{0.0722 \times 1.8556}{0.7152} \times \frac{219}{224} & -\frac{0.2126 \times 1.5748}{0.7152} \times \frac{219}{224} \\ 1.0000 & 1.8556 \times \frac{219}{224} & 0.0000 \end{bmatrix}$$

(3.4)

3.2 240 (BTA S-001A、 SMPTE 240M)

(1) アナログ信号

$$\cdot (R', G', B') \rightarrow (Y', C_B', C_R')$$

$$\begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{240} = [MTX_{240}] \begin{bmatrix} E'_R \\ E'_G \\ E'_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.212 & 0.701 & 0.087 \\ -\frac{0.212}{1.826} & -\frac{0.701}{1.826} & 0.5 \\ 0.5 & -\frac{0.701}{1.576} & -\frac{0.087}{1.576} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_R \\ E'_G \\ E'_B \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\cdot (Y', C_B', C_R') \rightarrow (R', G', B')$$

$$\begin{bmatrix} E'_R \\ E'_G \\ E'_B \end{bmatrix} = [MTX_{240}]^{-1} \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{240} = \begin{bmatrix} 1.000 & \frac{0.000}{0.087 \times 1.826} & \frac{1.576}{0.212 \times 1.576} \\ 1.000 & \frac{0.701}{1.826} & \frac{0.701}{0.000} \\ 1.000 & 1.826 & 0.000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{240} \quad (3.6)$$

ARIB TR-B9

(2) デジタル信号

$$\cdot (R', G', B') \rightarrow (Y', C_B', C_R')$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} D'_Y \\ D'_{CB} \\ D'_{CR} \end{bmatrix}_{240} &= \text{INT} \left\{ \begin{bmatrix} AMTX_{240} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D'_R - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_G - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_B - 16 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
&\approx \text{INT} \left\{ \begin{bmatrix} DMTX_{240} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D'_R - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_G - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_B - 16 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
&= \text{INT} \left\{ \begin{bmatrix} DMTX_{240} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D'_R \\ D'_G \\ D'_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} DOffset_Y \\ DOffset_{CB} \\ DOffset_{CR} \end{bmatrix}_{240} \right\} \\
\begin{bmatrix} AMTX_{240} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0.212 & 0.701 & 0.087 \\ -\frac{0.212}{1.826} \times \frac{224}{219} & -\frac{0.701}{1.826} \times \frac{224}{219} & 0.5 \times \frac{224}{219} \\ 0.5 \times \frac{224}{219} & -\frac{0.701}{1.576} \times \frac{224}{219} & -\frac{0.087}{1.576} \times \frac{224}{219} \end{bmatrix} \\
(3.7)
\end{aligned}$$

$$\cdot (Y', C_B', C_R') \rightarrow (R', G', B')$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} D'_R \\ D'_G \\ D'_B \end{bmatrix} &= \text{INT} \left\{ \begin{bmatrix} AMTX_{240} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D'_Y - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CB} - 128 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CR} - 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix}_{240} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 16 \cdot 2^{n-8} \\ 16 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
&\approx \text{INT} \left\{ \begin{bmatrix} DMTX_{240} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D'_Y - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CB} - 128 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CR} - 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix}_{240} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 16 \cdot 2^{n-8} \\ 16 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
&= \text{INT} \left\{ \begin{bmatrix} DMTX_{240} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D'_Y \\ D'_{CB} \\ D'_{CR} \end{bmatrix}_{240} + \begin{bmatrix} DOffset_R \\ DOffset_G \\ DOffset_B \end{bmatrix}_{240} \right\} \\
\begin{bmatrix} AMTX_{240} \end{bmatrix}^{-1} &= \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0000 & 1.576 \times \frac{219}{224} \\ 1.0000 & -\frac{0.087 \times 1.826}{0.701} \times \frac{219}{224} & -\frac{0.212 \times 1.576}{0.701} \times \frac{219}{224} \\ 1.0000 & 1.826 \times \frac{219}{224} & 0.0000 \end{bmatrix} \\
(3.8)
\end{aligned}$$

3.3 601 (Rec. ITU-R BT.601-5、Rec. ITU-R BT.1358)

(1) アナログ信号

$$\cdot (R', G', B') \rightarrow (Y', C_B', C_R')$$

$$\begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{601} = [MTX_{601}] \begin{bmatrix} E'_R \\ E'_G \\ E'_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -\frac{0.299}{1.772} & -\frac{0.587}{1.772} & 0.5 \\ 0.5 & -\frac{0.587}{1.402} & -\frac{0.114}{1.402} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_R \\ E'_G \\ E'_B \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\cdot (Y', C_B', C_R') \rightarrow (R', G', B')$$

$$\begin{bmatrix} E'_R \\ E'_G \\ E'_B \end{bmatrix} = [MTX_{601}]^{-1} \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{601} = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0000 & -\frac{1.402}{0.299 \times 1.402} \\ 1.0000 & -\frac{0.114 \times 1.772}{0.587} & -\frac{0.299 \times 1.402}{0.587} \\ 1.0000 & \frac{0.587}{1.772} & \frac{0.0000}{0.587} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{601} \quad (3.10)$$

ARIB TR-B9

(2) デジタル信号

$$\cdot (R', G', B') \rightarrow (Y', C_B', C_R')$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} D'_Y \\ D'_{CB} \\ D'_{CR} \end{bmatrix}_{601} &= \text{INT} \left\{ \begin{bmatrix} AMTX_{601} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D'_R - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_G - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_B - 16 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
&\approx \text{INT} \left\{ \begin{bmatrix} DMTX_{601} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D'_R - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_G - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_B - 16 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
&= \text{INT} \left\{ \begin{bmatrix} DMTX_{601} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D'_R \\ D'_G \\ D'_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} DOffset_Y \\ DOffset_{CB} \\ DOffset_{CR} \end{bmatrix}_{601} \right\} \\
&\quad \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -\frac{0.299}{1.772} \times \frac{224}{219} & -\frac{0.587}{1.772} \times \frac{224}{219} & 0.5 \times \frac{224}{219} \\ 0.5 \times \frac{224}{219} & -\frac{0.587}{1.402} \times \frac{224}{219} & -\frac{0.114}{1.402} \times \frac{224}{219} \end{bmatrix} \\
[AMTX_{601}] &=
\end{aligned} \tag{3.11}$$

$$\cdot (Y', C_B', C_R') \rightarrow (R', G', B')$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} D'_R \\ D'_G \\ D'_B \end{bmatrix} &= \text{INT} \left\{ \begin{bmatrix} AMTX_{601} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D'_Y - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CB} - 128 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CR} - 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix}_{601} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 16 \cdot 2^{n-8} \\ 16 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
&\approx \text{INT} \left\{ \begin{bmatrix} DMTX_{601} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D'_Y - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CB} - 128 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CR} - 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix}_{601} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 16 \cdot 2^{n-8} \\ 16 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
&= \text{INT} \left\{ \begin{bmatrix} DMTX_{601} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D'_Y \\ D'_{CB} \\ D'_{CR} \end{bmatrix}_{601} + \begin{bmatrix} DOffset_R \\ DOffset_G \\ DOffset_B \end{bmatrix}_{601} \right\} \\
&\quad \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0000 & 1.402 \times \frac{219}{224} \\ 1.0000 & -\frac{0.114 \times 1.772}{0.587} \times \frac{219}{224} & -\frac{0.299 \times 1.402}{0.587} \times \frac{219}{224} \\ 1.0000 & 1.772 \times \frac{219}{224} & 0.0000 \end{bmatrix} \\
[AMTX_{601}]^{-1} &=
\end{aligned} \tag{3.12}$$

4. 輝度・色差信号のシステム間変換マトリクス

4.1 709→240

(1) アナログ信号

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{240} &= [MTX_{240}] \begin{bmatrix} E'_R \\ E'_G \\ E'_B \end{bmatrix} = [MTX_{240}] [MTX_{709}]^{-1} \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{709} = [MTX_{709 \rightarrow 240}] \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{709} \\
 &= \begin{bmatrix} 1.000 & \left(-\frac{0.701 \times 0.0722}{0.7152} + 0.087 \right) \times 1.8556 & \left(0.212 - \frac{0.701 \times 0.2126}{0.7152} \right) \times 1.5748 \\ 0.000 & \left(\frac{0.701 \times 0.0722}{1.826 \times 0.7152} + 0.5 \right) \times 1.8556 & \left(-0.212 + \frac{0.701 \times 0.2126}{0.7152} \right) \times \frac{1.5748}{1.826} \\ 0.000 & \left(\frac{0.701 \times 0.0722}{0.7152} - 0.087 \right) \times \frac{1.8556}{1.576} & \left(0.5 + \frac{0.701 \times 0.2126}{1.576 \times 0.7152} \right) \times 1.5748 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{709}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

(2) デジタル信号

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} D'_Y \\ D'_{CB} \\ D'_{CR} \end{bmatrix}_{240} &= \text{INT} \left\{ [AMTX_{709 \rightarrow 240}] \begin{bmatrix} D'_Y - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CB} - 128 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CR} - 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix}_{709} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
 &\approx \text{INT} \left\{ [DMTX_{709 \rightarrow 240}] \begin{bmatrix} D'_Y - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CB} - 128 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CR} - 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix}_{709} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
 &= \text{INT} \left\{ [DMTX_{709 \rightarrow 240}] \begin{bmatrix} D'_Y \\ D'_{CB} \\ D'_{CR} \end{bmatrix}_{709} + \begin{bmatrix} DOFFSET_Y \\ DOFFSET_{CB} \\ DOFFSET_{CR} \end{bmatrix}_{709 \rightarrow 240} \right\} \\
 [AMTX_{709 \rightarrow 240}] &= \begin{bmatrix} 1.000 & \left(-\frac{0.701 \times 0.0722}{0.7152} + 0.087 \right) \times 1.8556 \times \frac{219}{224} & \left(0.212 - \frac{0.701 \times 0.2126}{0.7152} \right) \times 1.5748 \times \frac{219}{224} \\ 0.000 & \left(\frac{0.701 \times 0.0722}{1.826 \times 0.7152} + 0.5 \right) \times 1.8556 & \left(-0.212 + \frac{0.701 \times 0.2126}{0.7152} \right) \times \frac{1.5748}{1.826} \\ 0.000 & \left(\frac{0.701 \times 0.0722}{0.7152} - 0.087 \right) \times \frac{1.8556}{1.576} & \left(0.5 + \frac{0.701 \times 0.2126}{1.576 \times 0.7152} \right) \times 1.5748 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

ARIB TR-B9

4.2 709→601

(1) アナログ信号

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{601} &= [MTX_{601}] \begin{bmatrix} E'_R \\ E'_G \\ E'_B \end{bmatrix} = [MTX_{601}] [MTX_{709}]^{-1} \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{709} = [MTX_{709 \rightarrow 601}] \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{709} \\
 &= \begin{bmatrix} 1.000 & \left(-\frac{0.587 \times 0.0722}{0.7152} + 0.114 \right) \times 1.8556 & \left(0.299 - \frac{0.587 \times 0.2126}{0.7152} \right) \times 1.5748 \\ 0.000 & \left(\frac{0.587 \times 0.0722}{1.772 \times 0.7152} + 0.5 \right) \times 1.8556 & \left(-0.299 + \frac{0.587 \times 0.2126}{0.7152} \right) \times \frac{1.5748}{1.772} \\ 0.000 & \left(\frac{0.587 \times 0.0722}{0.7152} - 0.114 \right) \times \frac{1.8556}{1.402} & \left(0.5 + \frac{0.587 \times 0.2126}{1.402 \times 0.7152} \right) \times 1.5748 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{709}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

(2) デジタル信号

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} D'_Y \\ D'_{CB} \\ D'_{CR} \end{bmatrix}_{601} &= \text{INT} \left\{ [AMTX_{709 \rightarrow 601}] \begin{bmatrix} D'_Y - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CB} - 128 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CR} - 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix}_{709} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
 &\approx \text{INT} \left\{ [DMTX_{709 \rightarrow 601}] \begin{bmatrix} D'_Y - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CB} - 128 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CR} - 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix}_{709} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
 &= \text{INT} \left\{ [DMTX_{709 \rightarrow 601}] \begin{bmatrix} D'_Y \\ D'_{CB} \\ D'_{CR} \end{bmatrix}_{709} + \begin{bmatrix} DOffset_Y \\ DOffset_{CB} \\ DOffset_{CR} \end{bmatrix}_{709 \rightarrow 601} \right\} \\
 [AMTX_{709 \rightarrow 601}] &= \\
 &\begin{bmatrix} 1.000 & \left(-\frac{0.587 \times 0.0722}{0.7152} + 0.114 \right) \times 1.8556 \times \frac{219}{224} & \left(0.299 - \frac{0.587 \times 0.2126}{0.7152} \right) \times 1.5748 \times \frac{219}{224} \\ 0.000 & \left(\frac{0.587 \times 0.0722}{1.772 \times 0.7152} + 0.5 \right) \times 1.8556 & \left(-0.299 + \frac{0.587 \times 0.2126}{0.7152} \right) \times \frac{1.5748}{1.772} \\ 0.000 & \left(\frac{0.587 \times 0.0722}{0.7152} - 0.114 \right) \times \frac{1.8556}{1.402} & \left(0.5 + \frac{0.587 \times 0.2126}{1.402 \times 0.7152} \right) \times 1.5748 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

4.3 240→709

(1) アナログ信号

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{709} &= [MTX_{709}] \begin{bmatrix} E'_R \\ E'_G \\ E'_B \end{bmatrix} = [MTX_{709}] [MTX_{240}]^{-1} \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{240} = [MTX_{240 \rightarrow 709}] \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{240} \\
&= \begin{bmatrix} 1.0000 & \left(-\frac{0.7152 \times 0.087}{0.701} + 0.0722 \right) \times 1.826 & \left(0.2126 - \frac{0.7152 \times 0.212}{0.701} \right) \times 1.576 \\ 0.0000 & \left(\frac{0.7152 \times 0.087}{1.8556 \times 0.701} + 0.5 \right) \times 1.826 & \left(-0.2126 + \frac{0.7152 \times 0.212}{0.701} \right) \times \frac{1.576}{1.8556} \\ 0.0000 & \left(\frac{0.7152 \times 0.087}{0.701} - 0.0722 \right) \times \frac{1.826}{1.5748} & \left(0.5 + \frac{0.7152 \times 0.212}{1.5748 \times 0.701} \right) \times 1.576 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{240}
\end{aligned} \tag{4.5}$$

(2) デジタル信号

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} D'_Y \\ D'_{CB} \\ D'_{CR} \end{bmatrix}_{709} &= \text{INT} \left\{ [AMTX_{240 \rightarrow 709}] \begin{bmatrix} D'_Y - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CB} - 128 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CR} - 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix}_{240} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
&\approx \text{INT} \left\{ [DMTX_{240 \rightarrow 709}] \begin{bmatrix} D'_Y - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CB} - 128 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CR} - 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix}_{240} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
&= \text{INT} \left\{ [DMTX_{240 \rightarrow 709}] \begin{bmatrix} D'_Y \\ D'_{CB} \\ D'_{CR} \end{bmatrix}_{240} + \begin{bmatrix} DOOffset_Y \\ DOOffset_{CB} \\ DOOffset_{CR} \end{bmatrix}_{240 \rightarrow 709} \right\} \\
[AMTX_{240 \rightarrow 709}] &= \\
&\begin{bmatrix} 1.0000 & \left(-\frac{0.7152 \times 0.087}{0.701} + 0.0722 \right) \times 1.826 \times \frac{219}{224} & \left(0.2126 - \frac{0.7152 \times 0.212}{0.701} \right) \times 1.576 \times \frac{219}{224} \\ 0.0000 & \left(\frac{0.7152 \times 0.087}{1.8556 \times 0.701} + 0.5 \right) \times 1.826 & \left(-0.2126 + \frac{0.7152 \times 0.212}{0.701} \right) \times \frac{1.576}{1.8556} \\ 0.0000 & \left(\frac{0.7152 \times 0.087}{0.701} - 0.0722 \right) \times \frac{1.826}{1.5748} & \left(0.5 + \frac{0.7152 \times 0.212}{1.5748 \times 0.701} \right) \times 1.576 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.6}$$

ARIB TR-B9

4.4 240→601

(1) アナログ信号

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{601} &= [MTX_{601}] \begin{bmatrix} E'_R \\ E'_G \\ E'_B \end{bmatrix} = [MTX_{601}] [MTX_{240}]^{-1} \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{240} = [MTX_{240 \rightarrow 601}] \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{240} \\
 &= \begin{bmatrix} 1.0000 & \left(-\frac{0.587 \times 0.087}{0.701} + 0.114 \right) \times 1.826 & \left(0.299 - \frac{0.587 \times 0.212}{0.701} \right) \times 1.576 \\ 0.0000 & \left(\frac{0.587 \times 0.087}{1.772 \times 0.701} + 0.5 \right) \times 1.826 & \left(-0.299 + \frac{0.587 \times 0.212}{0.701} \right) \times \frac{1.576}{1.772} \\ 0.0000 & \left(\frac{0.587 \times 0.087}{0.701} - 0.114 \right) \times \frac{1.826}{1.402} & \left(0.5 + \frac{0.587 \times 0.212}{1.402 \times 0.701} \right) \times 1.576 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{240}
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

(2) デジタル信号

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} D'_Y \\ D'_{CB} \\ D'_{CR} \end{bmatrix}_{601} &= \text{INT} \left\{ [AMTX_{240 \rightarrow 601}] \begin{bmatrix} D'_Y - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CB} - 128 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CR} - 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix}_{240} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
 &\approx \text{INT} \left\{ [DMTX_{240 \rightarrow 601}] \begin{bmatrix} D'_Y - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CB} - 128 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CR} - 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix}_{240} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
 &= \text{INT} \left\{ [DMTX_{240 \rightarrow 601}] \begin{bmatrix} D'_Y \\ D'_{CB} \\ D'_{CR} \end{bmatrix}_{240} + \begin{bmatrix} DOffset_Y \\ DOffset_{CB} \\ DOffset_{CR} \end{bmatrix}_{240 \rightarrow 601} \right\} \\
 [AMTX_{240 \rightarrow 601}] &= \begin{bmatrix} 1.0000 & \left(-\frac{0.587 \times 0.087}{0.701} + 0.114 \right) \times 1.826 \times \frac{219}{224} & \left(0.299 - \frac{0.587 \times 0.212}{0.701} \right) \times 1.576 \times \frac{219}{224} \\ 0.0000 & \left(\frac{0.587 \times 0.087}{1.772 \times 0.701} + 0.5 \right) \times 1.826 & \left(-0.299 + \frac{0.587 \times 0.212}{0.701} \right) \times \frac{1.576}{1.772} \\ 0.0000 & \left(\frac{0.587 \times 0.087}{0.701} - 0.114 \right) \times \frac{1.826}{1.402} & \left(0.5 + \frac{0.587 \times 0.212}{1.402 \times 0.701} \right) \times 1.576 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

4.5 601→709

(1) アナログ信号

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{709} = [MTX]_{709} \begin{bmatrix} E'_R \\ E'_G \\ E'_B \end{bmatrix} = [MTX]_{709} [MTX]_{601}^{-1} \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{601} = [MTX]_{601 \rightarrow 709} \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{601} \\
& = \begin{bmatrix} 1.0000 & \left(-\frac{0.7152 \times 0.114}{0.587} + 0.0722 \right) \times 1.772 & \left(0.2126 - \frac{0.7152 \times 0.299}{0.587} \right) \times 1.402 \\ 0.0000 & \left(\frac{0.7152 \times 0.114}{1.8556 \times 0.587} + 0.5 \right) \times 1.772 & \left(-0.2126 + \frac{0.7152 \times 0.299}{0.587} \right) \times \frac{1.402}{1.8556} \\ 0.0000 & \left(\frac{0.7152 \times 0.114}{0.587} - 0.0722 \right) \times \frac{1.772}{1.5748} & \left(0.5 + \frac{0.7152 \times 0.299}{1.5748 \times 0.587} \right) \times 1.402 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{601}
\end{aligned} \tag{4.9}$$

(2) デジタル信号

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} D'_Y \\ D'_{CB} \\ D'_{CR} \end{bmatrix}_{709} = \text{INT} \left\{ [AMTX]_{601 \rightarrow 709} \begin{bmatrix} D'_Y - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CB} - 128 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CR} - 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix}_{601} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
& \approx \text{INT} \left\{ [DMTX]_{601 \rightarrow 709} \begin{bmatrix} D'_Y - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CB} - 128 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CR} - 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix}_{601} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
& = \text{INT} \left\{ [DMTX]_{601 \rightarrow 709} \begin{bmatrix} D'_Y \\ D'_{CB} \\ D'_{CR} \end{bmatrix}_{601} + \begin{bmatrix} DOOffset_Y \\ DOOffset_{CB} \\ DOOffset_{CR} \end{bmatrix}_{601 \rightarrow 709} \right\} \\
& [AMTX]_{601 \rightarrow 709} = \\
& \begin{bmatrix} 1.0000 & \left(-\frac{0.7152 \times 0.114}{0.587} + 0.0722 \right) \times 1.772 \times \frac{219}{224} & \left(0.2126 - \frac{0.7152 \times 0.299}{0.587} \right) \times 1.402 \times \frac{219}{224} \\ 0.0000 & \left(\frac{0.7152 \times 0.114}{1.8556 \times 0.587} + 0.5 \right) \times 1.772 & \left(-0.2126 + \frac{0.7152 \times 0.299}{0.587} \right) \times \frac{1.402}{1.8556} \\ 0.0000 & \left(\frac{0.7152 \times 0.114}{0.587} - 0.0722 \right) \times \frac{1.772}{1.5748} & \left(0.5 + \frac{0.7152 \times 0.299}{1.5748 \times 0.587} \right) \times 1.402 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.10}$$

ARIB TR-B9

4.6 601→240

(1) アナログ信号

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{240} &= [MTX]_{240} \begin{bmatrix} E'_R \\ E'_G \\ E'_B \end{bmatrix} = [MTX]_{240} [MTX]_{601}^{-1} \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{601} = [MTX]_{601 \rightarrow 240} \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{601} \\
 &= \begin{bmatrix} 1.0000 & \left(-\frac{0.701 \times 0.114}{0.587} + 0.087 \right) \times 1.772 & \left(0.212 - \frac{0.701 \times 0.299}{0.587} \right) \times 1.402 \\ 0.0000 & \left(\frac{0.701 \times 0.114}{1.826 \times 0.587} + 0.5 \right) \times 1.772 & \left(-0.212 + \frac{0.701 \times 0.299}{0.587} \right) \times \frac{1.402}{1.826} \\ 0.0000 & \left(\frac{0.701 \times 0.114}{0.587} - 0.087 \right) \times \frac{1.772}{1.576} & \left(0.5 + \frac{0.701 \times 0.299}{1.576 \times 0.587} \right) \times 1.402 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_Y \\ E'_{CB} \\ E'_{CR} \end{bmatrix}_{601}
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

(2) デジタル信号

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} D'_Y \\ D'_{CB} \\ D'_{CR} \end{bmatrix}_{240} &= \text{INT} \left\{ [AMTX]_{601 \rightarrow 240} \begin{bmatrix} D'_Y - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CB} - 128 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CR} - 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix}_{601} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
 &\approx \text{INT} \left\{ [DMTX]_{601 \rightarrow 240} \begin{bmatrix} D'_Y - 16 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CB} - 128 \cdot 2^{n-8} \\ D'_{CR} - 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix}_{601} + \begin{bmatrix} 16 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \\ 128 \cdot 2^{n-8} \end{bmatrix} \right\} \\
 &= \text{INT} \left\{ [DMTX]_{601 \rightarrow 240} \begin{bmatrix} D'_Y \\ D'_{CB} \\ D'_{CR} \end{bmatrix}_{601} + \begin{bmatrix} DOffset_Y \\ DOffset_{CB} \\ DOffset_{CR} \end{bmatrix}_{601 \rightarrow 240} \right\} \\
 [AMTX]_{601 \rightarrow 240} &= \begin{bmatrix} 1.0000 & \left(-\frac{0.701 \times 0.114}{0.587} + 0.087 \right) \times 1.772 \times \frac{219}{224} & \left(0.212 - \frac{0.701 \times 0.299}{0.587} \right) \times 1.402 \times \frac{219}{224} \\ 0.0000 & \left(\frac{0.701 \times 0.114}{1.826 \times 0.587} + 0.5 \right) \times 1.772 & \left(-0.212 + \frac{0.701 \times 0.299}{0.587} \right) \times \frac{1.402}{1.826} \\ 0.0000 & \left(\frac{0.701 \times 0.114}{0.587} - 0.087 \right) \times \frac{1.772}{1.576} & \left(0.5 + \frac{0.701 \times 0.299}{1.576 \times 0.587} \right) \times 1.402 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

5. デジタルマトリクス整数化係数の最適化

5.1 最適化法

デジタルシステムでは、マトリクス係数が有限のビット長で表現されることによる演算誤差が含まれることがある。また、信号処理の順序（アナログマトリクス後に量子化する場合と、アナログ信号を量子化した後でデジタルマトリクス処理する場合）によって、得られる信号値に差異が生じることもある。これらの演算誤差や信号処理による差異を最小化するため、マトリクス係数の有限長への丸めに当たっては最適化が必要である。ITU-R勧告BT.1361「世界統一カラリメトリ」では、 $(R', G', B') \rightarrow (Y', C_B', C_R')$ のマトリクス係数の最適化手法が ANNEX 2 に記載されている。以下では、この最適化手法を一般化して説明する。

デジタルマトリクスによる変換出力信号は § 2 より以下のように表される。

$$D'_{Y_i} = \text{INT}[m'_{i1}(D'_{X1} - O_{X1}) + m'_{i2}(D'_{X2} - O_{X2}) + m'_{i3}(D'_{X3} - O_{X3}) + \text{Offset}'_{Y_i}] \quad (5.1)$$

$$= \text{INT}\left[\frac{r_{i1}}{2^m}(D'_{X1} - O_{X1}) + \frac{r_{i2}}{2^m}(D'_{X2} - O_{X2}) + \frac{r_{i3}}{2^m}(D'_{X3} - O_{X3}) + \text{Offset}'_{Y_i}\right] \quad (5.2)$$

$$\approx \text{INT}\left[\frac{k_{i1}}{2^m}(D'_{X1} - O_{X1}) + \frac{k_{i2}}{2^m}(D'_{X2} - O_{X2}) + \frac{k_{i3}}{2^m}(D'_{X3} - O_{X3}) + \text{Offset}'_{Y_i}\right] \quad (5.3)$$

$$= \text{INT}\left[\frac{k_{i1}}{2^m}D'_{X1} + \frac{k_{i2}}{2^m}D'_{X2} + \frac{k_{i3}}{2^m}D'_{X3} + \frac{\text{Offset}'_{Y_i} \cdot 2^m - (k_{i1}O_{X1} + k_{i2}O_{X2} + k_{i3}O_{X3})}{2^m}\right] \quad (5.4)$$

ここで、 O_{Xi} は入力デジタル信号のオフセット（整数）、 r_{ij} は係数の真値、 k_{ij} は m ビットで整数化された係数を表し、

$$r_{i1} = m'_{i1} \times 2^m \quad k_{i1_{init}} = \text{INT}[r_{i1}]$$

$$r_{i2} = m'_{i2} \times 2^m \quad k_{i2_{init}} = \text{INT}[r_{i2}]$$

$$r_{i3} = m'_{i3} \times 2^m \quad k_{i3_{init}} = \text{INT}[r_{i3}]$$

である。ただし、添字 *init* は整数化係数最適化の初期値を示す。式(5.3)は係数が有限長のビット数で表現されることによる演算誤差を含んでおり、係数のビット数 m が大きくなると、式(5.2)との差は減少し、真値に近づく。そこで、式 (5.2) と(5.3)の差を係数最適化の指標とみなすことができる。この差は、入力信号に依存するため、二乗誤差最小化 (LSE) による最適化は、適正な範囲のすべての入力信号に対する二乗誤差の和が最小となるよう行う。すなわち、

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= \sum_{D'_{X1}} \sum_{D'_{X2}} \sum_{D'_{X3}} \left\{ \left(\frac{k_{i1}}{2^m}(D'_{X1} - O_{X1}) + \frac{k_{i2}}{2^m}(D'_{X2} - O_{X2}) + \frac{k_{i3}}{2^m}(D'_{X3} - O_{X3}) + \text{Offset}'_{Y_i} \right) \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{r_{i1}}{2^m}(D'_{X1} - O_{X1}) + \frac{r_{i2}}{2^m}(D'_{X2} - O_{X2}) + \frac{r_{i3}}{2^m}(D'_{X3} - O_{X3}) + \text{Offset}'_{Y_i} \right) \right\}^2 \\ &= \sum_{D'_{X1}} \sum_{D'_{X2}} \sum_{D'_{X3}} \left\{ \frac{(k_{i1} - r_{i1})}{2^m}(D'_{X1} - O_{X1}) + \frac{(k_{i2} - r_{i2})}{2^m}(D'_{X2} - O_{X2}) + \frac{(k_{i3} - r_{i3})}{2^m}(D'_{X3} - O_{X3}) \right\}^2 \end{aligned} \quad (5.5)$$

を最小化する。このLSE最適化は、r.m.s誤差を最小化するとともに、ある特定の入力信号で生じ得るピーク誤差をも最小化する。

ARIB TR-B9

なお、マトリクス入力信号が (Y', C_B', C_R') の場合、全ての入力信号レベル範囲で最適化を行うことは必ずしも適切でない。なぜなら、 (Y', C_B', C_R') が表現可能な色範囲と (R', G', B') が表現可能な色範囲が異なり、全ての (Y', C_B', C_R') 信号レベルを用いると虚色も含めた色範囲で最適化を行うことになるからである。

最適化手順は以下の通りである。

Step 1：整数化係数 k_{ij} ($j = 1, 2, 3, 4$)の初期値として、係数の真値 r_{ij} に最も近い整数（小数点以下第一位四捨五入）を当てる。

Step 2：整数化係数初期値を用い、入力デジタル信号の適正な信号振幅範囲（e.g. 8bitのRGB信号の場合では16~235）に渡って、式（5.5）で表される二乗誤差和 ε_i を求める。

Step 3：整数化係数を1だけ増減させた場合の二乗誤差和 ε_i を求める。3つの係数 $k_{i1} \sim k_{i3}$ についてそれぞれ3通り（+1、+/-0、-1）、合計27 (=3³)通りの組み合わせについて行う必要がある。

Step 4：27通りの組み合わせの中で、最小の二乗誤差和を与える組み合わせが最適化された整数化係数セットである。

式(5.5)の計算は、以下のように簡略化が可能である。整数化係数と真値との差を $\delta_{ij} = k_{ij} - r_{ij}$ 、デジタル入力信号（オフセット考慮）を $X_j = D'_{Xj} - O_{Xj}$ と表すと、式(5.5)は次式で表される。

$$\varepsilon_i = \frac{1}{2^m} \sum_{X_1=L_1}^{H_1} \sum_{X_2=L_2}^{H_2} \sum_{X_3=L_3}^{H_3} (\delta_{i1} X_1 + \delta_{i2} X_2 + \delta_{i3} X_3)^2 \quad (5.6)$$

ここで、 L_j と H_j は入力信号 X_j の下限、上限をそれぞれ示す。 L_j と H_j は定数（e.g. 8bitのRGB信号の場合は $L_j = 16 - 16 = 0$ 、 $H_j = 235 - 16 = 219$ ）であるので、 X_j に関する和もまた定数となる。したがって、式(5.6)は δ_{ij} のみの関数として次式で表される。

$$\varepsilon_i = \frac{1}{2^m} \left\{ (C_1 \delta_{i1}^2 + C_2 \delta_{i2}^2 + C_3 \delta_{i3}^2) + 2(C_4 \delta_{i1} \delta_{i2} + C_5 \delta_{i2} \delta_{i3} + C_6 \delta_{i3} \delta_{i1}) \right\} \quad (5.7)$$

$$C_1 = \sum_{X_1=L_1}^{H_1} \sum_{X_2=L_2}^{H_2} \sum_{X_3=L_3}^{H_3} X_1^2 \\ = \frac{H_1(H_1+1)(2H_1+1) - (L_1-1)L_1(2L_1-1)}{6} \cdot (H_2-L_2+1)(H_3-L_3+1)$$

$$C_2 = \sum_{X_1=L_1}^{H_1} \sum_{X_2=L_2}^{H_2} \sum_{X_3=L_3}^{H_3} X_2^2 \quad C_3 = \sum_{X_1=L_1}^{H_1} \sum_{X_2=L_2}^{H_2} \sum_{X_3=L_3}^{H_3} X_3^2$$

$$C_4 = \sum_{X_1=L_1}^{H_1} \sum_{X_2=L_2}^{H_2} \sum_{X_3=L_3}^{H_3} X_1 X_2 \\ = \frac{H_1(H_1+1) - (L_1-1)L_1}{2} \cdot \frac{H_2(H_2+1) - (L_2-1)L_2}{2} \cdot (H_3-L_3+1)$$

$$C_5 = \sum_{X_1=L_1}^{H_1} \sum_{X_2=L_2}^{H_2} \sum_{X_3=L_3}^{H_3} X_2 X_3 \quad C_6 = \sum_{X_1=L_1}^{H_1} \sum_{X_2=L_2}^{H_2} \sum_{X_3=L_3}^{H_3} X_3 X_1$$

以上により、式(5.5)の計算は式(5.7)によって計算できることとなる。

以下では、最適化処理によって得られた整数化係数セットを、§2の表記を用いて示す。

$$(1) \quad (R', G', B') \rightarrow (Y', C_B', C_R')$$

§5.2では、信号ビット数 $n = 8$ 、マトリクス係数のビット数 $m = 8 \sim 16$ の各ビット数について、入力信号として全ての (R', G', B') レベル ($16 \sim 235$) を用いて最適化した整数化係数セットを示す。最適化処理による結果が小数点以下第一位の四捨五入によるものと異なるものを Bold-Italic-Underlined で示している。

$$(2) \quad (Y', C_B', C_R') \rightarrow (R', G', B')$$

§5.3では、信号ビット数 $n = 8$ 、マトリクス係数のビット数 $m = 8 \sim 16$ の各ビット数について、入力信号として全ての (Y', C_B', C_R') レベル ($Y': 16 \sim 235, C_B': 16 \sim 240$) を用いて最適化した整数化係数セットを示す。この場合は前述のように (R', G', B') の値域を超えた色範囲も含めた処理であり、適正な色範囲での最適化結果とは異なる可能性があることに注意が必要である。なお、適正な色範囲のみでの最適化については検討中である。

$$(3) \quad (Y', C_B', C_R')_A \rightarrow (Y', C_B', C_R')_B$$

§5.4では、信号ビット数 $n = 8$ 、マトリクス係数のビット数 $m = 8 \sim 16$ の各ビット数について、入力信号として全ての (Y', C_B', C_R') レベル ($Y': 16 \sim 235, C_B': 16 \sim 240$) を用いて最適化した整数化係数セットを示す。 $(Y', C_B', C_R') \rightarrow (R', G', B')$ の場合と同様に、適正な色範囲だけの最適化結果とは異なる可能性があることに注意が必要である。なお、適正な色範囲のみでの最適化については検討中である。

5.2 整数化係数 $(R', G', B') \rightarrow (Y', C_B', C_R')$ (1) 709 $(R', G', B') \rightarrow (Y', C_B', C_R')$

m	2^m	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{21}	k_{22}	k_{23}	k_{24}	k_{31}	k_{32}	k_{33}	k_{34}
8	256	54	183	19	0	-30	-101	131	32768	131	-119	-12	32768
9	512	109	366	37	0	-60	-202	262	65536	262	-238	-24	65536
10	1024	218	732	74	0	-120	-404	524	131072	524	-476	-48	131072
11	2048	435	1465	148	0	-240	-807	1047	262144	1047	-951	-96	262144
12	4096	871	2929	296	0	-480	-1615	2095	524288	2095	-1903	-192	524288
13	8192	1742	5859	591	0	-960	-3230	4190	1048576	4189	-3805	-384	1048576
14	16384	3483	11718	1183	0	-1920	-6459	8379	2097152	8379	-7611	-768	2097152
15	32768	6966	23436	2366	0	-3840	-12918	16758	4194304	16758	-15221	-1537	4194304
16	65536	13933	46871	4732	0	-7680	-25836	33516	8388608	33516	-30443	-3073	8388608

-48

(2) 240 $(R', G', B') \rightarrow (Y', C_B', C_R')$

m	2^m	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{21}	k_{22}	k_{23}	k_{24}	k_{31}	k_{32}	k_{33}	k_{34}
8	256	54	180	22	0	-30	-101	131	32768	131	-117	-14	32768
9	512	109	359	44	0	-61	-201	262	65536	262	-233	-29	65536
10	1024	217	718	89	0	-122	-402	524	131072	524	-466	-58	131072
11	2048	434	1436	178	0	-243	-804	1047	262144	1048	-932	-116	262144
12	4096	869	2871	356	0	-487	-1608	2095	524288	2095	-1864	-231	524288
13	8192	1737	5742	713	0	-973	-3217	4190	1048576	4190	-3727	-463	1048576
14	16384	3473	11485	1426	0	-1946	-6433	8379	2097152	8379	-7454	-925	2097152
15	32768	6947	22970	2851	0	-3891	-12867	16758	4194304	16758	-14908	-1850	4194304
16	65536	13894	45941	5701	0	-7782	-25734	33516	8388608	33516	-29816	-3700	8388608

(3) 601 $(R', G', B') \rightarrow (Y', C_B', C_R')$

m	2^m	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{21}	k_{22}	k_{23}	k_{24}	k_{31}	k_{32}	k_{33}	k_{34}
8	256	77	150	29	0	-44	-87	131	32768	131	-110	-21	32768
9	512	153	301	58	0	-88	-174	262	65536	262	-219	-43	65536
10	1024	306	601	117	0	-177	-347	524	131072	524	-439	-85	131072
11	2048	612	1202	234	0	-353	-694	1047	262144	1047	-877	-170	262144
12	4096	1225	2404	467	0	-707	-1388	2095	524288	2095	-1754	-341	524288
13	8192	2449	4809	934	0	-1414	-2776	4190	1048576	4189	-3508	-681	1048576
14	16384	4899	9617	1868	0	-2828	-5551	8379	2097152	8379	-7016	-1363	2097152
15	32768	9798	19235	3735	0	-5655	-11103	16758	4194304	16758	-14033	-2725	4194304
16	65536	19595	38470	7471	0	-11311	-22205	33516	8388608	33516	-28066	-5450	8388608

5.3 整数化係数 $(Y', C_B', C_R') \rightarrow (R', G', B')$ (1) 709 $(Y', C_B', C_R') \rightarrow (R', G', B')$

m	2^m	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{21}	k_{22}	k_{23}	k_{24}	k_{31}	k_{32}	k_{33}	k_{34}
8	256	256	0	394	-50432	256	-47	-117	20992	256	464	0	-59392
9	512	512	0	788	-100864	512	-94	-234	41984	512	929	0	-118912
10	1024	1024	0	1577	-201856	1024	-188	-469	84096	1024	1858	0	-237824
11	2048	2048	0	3153	-403584	2048	-375	-937	167936	2048	3715	0	-475520
12	4096	4096	0	6306	-807168	4096	-750	-1875	336000	4096	7431	0	-951168
13	8192	8192	0	12613	-1614464	8192	-1500	-3749	671872	8192	14862	0	-1902336
14	16384	16384	0	25226	-3228928	16384	-3001	-7499	1344000	16384	29724	0	-3804672
15	32768	32768	0	50451	-6457728	32768	-6001	-14997	2687744	32768	59447	0	-7609216
16	65536	65536	0	100902	-12915456	65536	-12002	-29994	5375488	65536	118894	0	-15218432

↓50

(2) 240 $(Y', C_B', C_R') \rightarrow (R', G', B')$

m	2^m	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{21}	k_{22}	k_{23}	k_{24}	k_{31}	k_{32}	k_{33}	k_{34}
8	256	256	0	394	-50432	256	-57	-119	22528	256	457	0	-58496
9	512	512	0	789	-100992	512	-113	-239	45056	512	914	0	-116992
10	1024	1024	0	1578	-201984	1024	-227	-477	90112	1024	1828	0	-233984
11	2048	2048	0	3156	-403968	2048	-454	-954	180224	2048	3656	0	-467968
12	4096	4096	0	6311	-807808	4096	-908	-1909	360576	4096	7312	0	-935936
13	8192	8192	0	12622	-1615616	8192	-1815	-3817	720896	8192	14625	0	-1872000
14	16384	16384	0	25245	-3231360	16384	-3630	-7635	1441920	16384	29249	0	-3743872
15	32768	32768	0	50490	-6462720	32768	-7260	-15269	2883712	32768	58499	0	-7487872
16	65536	65536	0	100979	-12925312	65536	-14520	-30539	5767552	65536	116998	0	-14975744

(3) 601 $(Y', C_B', C_R') \rightarrow (R', G', B')$

m	2^m	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{21}	k_{22}	k_{23}	k_{24}	k_{31}	k_{32}	k_{33}	k_{34}
8	256	256	0	351	-44928	256	-86	-179	33920	256	444	0	-56832
9	512	512	0	702	-89856	512	-172	-357	67712	512	887	0	-113536
10	1024	1024	0	1404	-179712	1024	-345	-715	135680	1024	1774	0	-227072
11	2048	2048	0	2807	-359296	2048	-689	-1430	271232	2048	3548	0	-454144
12	4096	4096	0	5614	-718592	4096	-1378	-2860	542464	4096	7096	0	-908288
13	8192	8192	0	11229	-1437312	8192	-2756	-5720	1084928	8192	14192	0	-1816576
14	16384	16384	0	22458	-2874624	16384	-5512	-11439	2169728	16384	28384	0	-3633152
15	32768	32768	0	44915	-5749120	32768	-11025	-22878	4339584	32768	56769	0	-7266432
16	65536	65536	0	89831	-11498368	65536	-22050	-45757	8679296	65536	113538	0	-14532864

5.4 整数化係数 $(Y', C_B', C_R')_A \rightarrow (Y', C_B', C_R')_B$ (1) 709 $(Y', C_B', C_R') \rightarrow 240 (Y', C_B', C_R')$

m	2^m	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{21}	k_{22}	k_{23}	k_{24}	k_{31}	k_{32}	k_{33}	k_{34}
8	256	256	8	1	-1152	0	256	-1	128	0	-5	255	768
9	512	512	15	3	-2304	0	512	-2	256	0	-10	510	1536
10	1024	1024	30	6	-4608	0	1024	-3	384	0	-20	1020	3072
11	2048	2048	60	11	-9088	0	2047	-6	896	0	-39	2039	6144
12	4096	4096	121	23	-18432	0	4095	-13	1792	0	-78	4078	12288
13	8192	8192	241	46	-36736	0	8190	-26	3584	0	-157	8156	24704
14	16384	16384	483	91	-73472	0	16379	-51	7168	0	-313	16312	49280
15	32768	32768	965	183	-146944	0	32759	-102	14208	0	-626	32624	98560
16	65536	65536	1930	365	-293760	0	65517	-205	28672	0	-1253	65249	197120

(2) 709 $(Y', C_B', C_R') \rightarrow 601 (Y', C_B', C_R')$

m	2^m	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{21}	k_{22}	k_{23}	k_{24}	k_{31}	k_{32}	k_{33}	k_{34}
8	256	256	25	49	-9472	0	253	-28	3968	0	-19	252	2944
9	512	512	51	98	-19072	0	507	-57	7936	0	-37	503	5888
10	1024	1024	102	196	-38144	0	1014	-113	15744	0	-74	1007	11648
11	2048	2048	203	393	-76288	0	2027	-227	31744	0	-148	2014	23296
12	4096	4096	407	785	-152576	0	4054	-453	63360	0	-297	4028	46720
13	8192	8192	814	1570	-305152	0	8109	-906	126592	0	-594	8056	93440
14	16384	16384	1627	3141	-610304	0	16218	-1813	253312	0	-1187	16112	186752
15	32768	32768	3254	6282	-1220608	0	32436	-3626	506624	0	-2374	32224	373504
16	65536	65536	6508	12563	-2441088	0	64871	-7252	1013376	0	-4748	64448	747008

(3) $240(Y', C_B', C_R') \rightarrow 709(Y', C_B', C_R')$

m	2^m	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{21}	k_{22}	k_{23}	k_{24}	k_{31}	k_{32}	k_{33}	k_{34}
8	256	256	-8	-1	1152	0	256	1	-128	0	5	257	-768
9	512	512	-15	-3	2304	0	512	2	-256	0	10	514	-1536
10	1024	1024	-30	-6	4608	0	1024	3	-384	0	20	1029	-3200
11	2048	2048	-61	-12	9344	0	2049	6	-896	0	39	2057	-6144
12	4096	4096	-121	-23	18432	0	4097	13	-1792	0	79	4114	-12416
13	8192	8192	-242	-47	36992	0	8195	26	-3712	0	157	8229	-24832
14	16384	16384	-484	-93	73856	0	16390	51	-7296	0	315	16457	-49664
15	32768	32768	-969	-187	147968	0	32779	103	-14592	0	629	32914	-99200
16	65536	65536	-1938	-373	295808	0	65559	206	-29312	0	1259	65828	-198528

53

(4) $240(Y', C_B', C_R') \rightarrow 601(Y', C_B', C_R')$

m	2^m	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{21}	k_{22}	k_{23}	k_{24}	k_{31}	k_{32}	k_{33}	k_{34}
8	256	256	19	48	-8576	0	253	-28	3968	0	-14	253	2176
9	512	512	38	96	-17152	0	506	-55	7808	0	-27	506	4224
10	1024	1024	75	192	-34176	0	1012	-111	15744	0	-55	1011	8704
11	2048	2048	150	383	-68224	0	2024	-221	31360	0	-110	2023	17280
12	4096	4096	301	767	-136704	0	4047	-443	62976	0	-220	4045	34688
13	8192	8192	602	1533	-273280	0	8094	-885	125824	0	-439	8090	69248
14	16384	16384	1204	3067	-546688	0	16189	-1770	251520	0	-878	16180	138496
15	32768	32768	2407	6133	-1093120	0	32377	-3540	503168	0	-1756	32360	276992
16	65536	65536	4814	12267	-2186368	0	64754	-7081	1006464	0	-3512	64720	553984

(5) $601(Y', C_B', C_R') \rightarrow 709(Y', C_B', C_R')$

54

m	2^m	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{21}	k_{22}	k_{23}	k_{24}	k_{31}	k_{32}	k_{33}	k_{34}
8	256	256	-30	-53	10624	0	261	29	-4352	0	19	262	-3200
9	512	512	-59	-106	21120	0	522	59	-8832	0	38	525	-6528
10	1024	1024	-118	-213	42368	0	1043	117	-17408	0	77	1050	-13184
11	2048	2048	-237	-426	84864	0	2086	235	-34944	0	154	2100	-26368
12	4096	4096	-473	-852	169600	0	4172	469	-69760	0	307	4200	-52608
13	8192	8192	-947	-1703	339200	0	8345	939	-139776	0	615	8399	-105216
14	16384	16384	-1893	-3407	678400	0	16689	1878	-279424	0	1230	16799	-210560
15	32768	32768	-3786	-6814	1356800	0	33379	3756	-558976	0	2459	33598	-420992
16	65536	65536	-7573	-13627	2713600	0	66758	7512	-1117952	0	4918	67196	-841984

(6) $601(Y', C_B', C_R') \rightarrow 240(Y', C_B', C_R')$

m	2^m	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{21}	k_{22}	k_{23}	k_{24}	k_{31}	k_{32}	k_{33}	k_{34}
8	256	256	-22	-51	9344	0	261	29	-4352	0	14	261	-2432
9	512	512	-44	-102	18688	0	521	57	-8448	0	28	522	-4864
10	1024	1024	-87	-204	37248	0	1043	114	-17024	0	57	1043	-9728
11	2048	2048	-174	-407	74368	0	2085	228	-33920	0	113	2086	-19328
12	4096	4096	-349	-814	148864	0	4170	456	-67840	0	226	4172	-38656
13	8192	8192	-697	-1629	297728	0	8340	912	-135680	0	453	8345	-77568
14	16384	16384	-1395	-3258	595584	0	16681	1825	-271616	0	905	16689	-154880
15	32768	32768	-2790	-6516	1191168	0	33362	3650	-543232	0	1810	33379	-309888
16	65536	65536	-5579	-13032	2382208	0	66723	7300	-1086336	0	3621	66758	-619904

(ARIB カラリメトリAHG資料)

R、G、Bレベル計算資料**SMPTE240Mのカラーバーレベル計算資料**

$$Y = 0.212R + 0.701G + 0.087B$$

$$PB = -0.116R - 0.384G + 0.5B$$

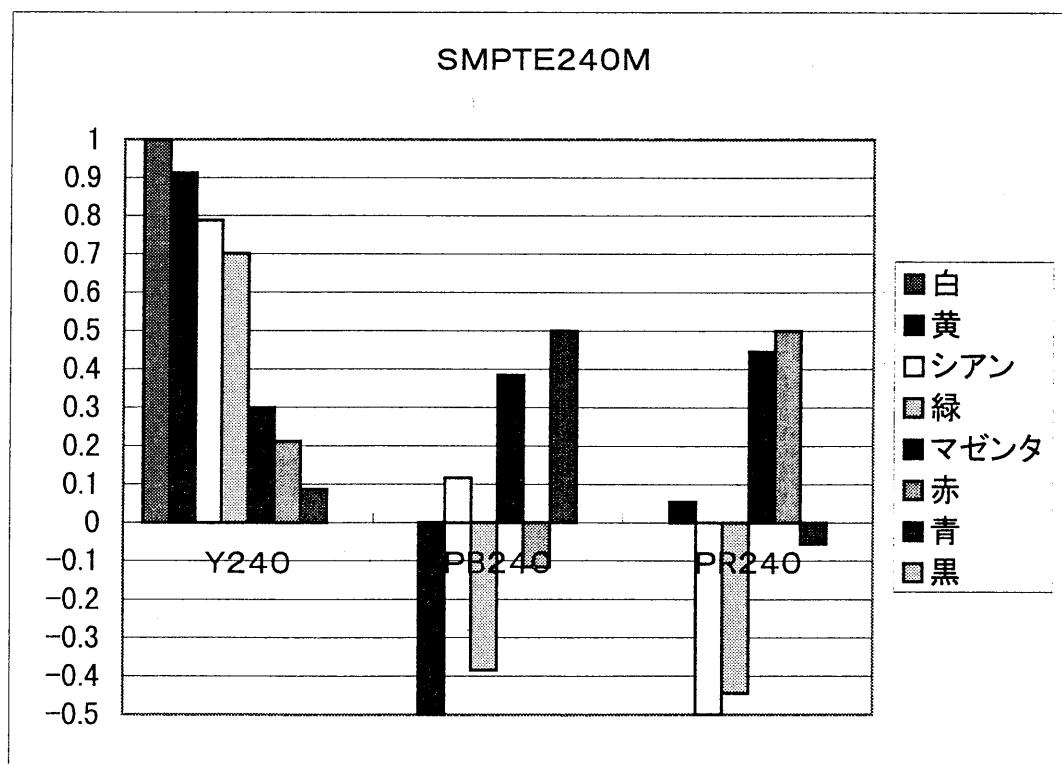
$$PR = 0.5R - 0.445G - 0.055B$$

$$R = Y + 1.576PR$$

$$G = Y - 0.477PR - 0.227PB$$

$$B = Y + 1.826PB$$

	R	G	B	Y ₂₄₀	P _{B240}	P _{R240}
白	1	1	1	1	0	0
黄	1	1	0	0.913	-0.5	0.055
シアン	0	1	1	0.788	0.116	-0.5
緑	0	1	0	0.701	-0.384	-0.445
マゼンタ	1	0	1	0.299	0.384	0.445
赤	1	0	0	0.212	-0.116	0.5
青	0	0	1	0.087	0.5	-0.055
黒	0	0	0	0	0	0



ITU709のカラーバーレベル計算資料

$$Y = 0.2126R + 0.7152G + 0.0722B$$

$$P_B = -0.1146R - 0.3854G + 0.5B$$

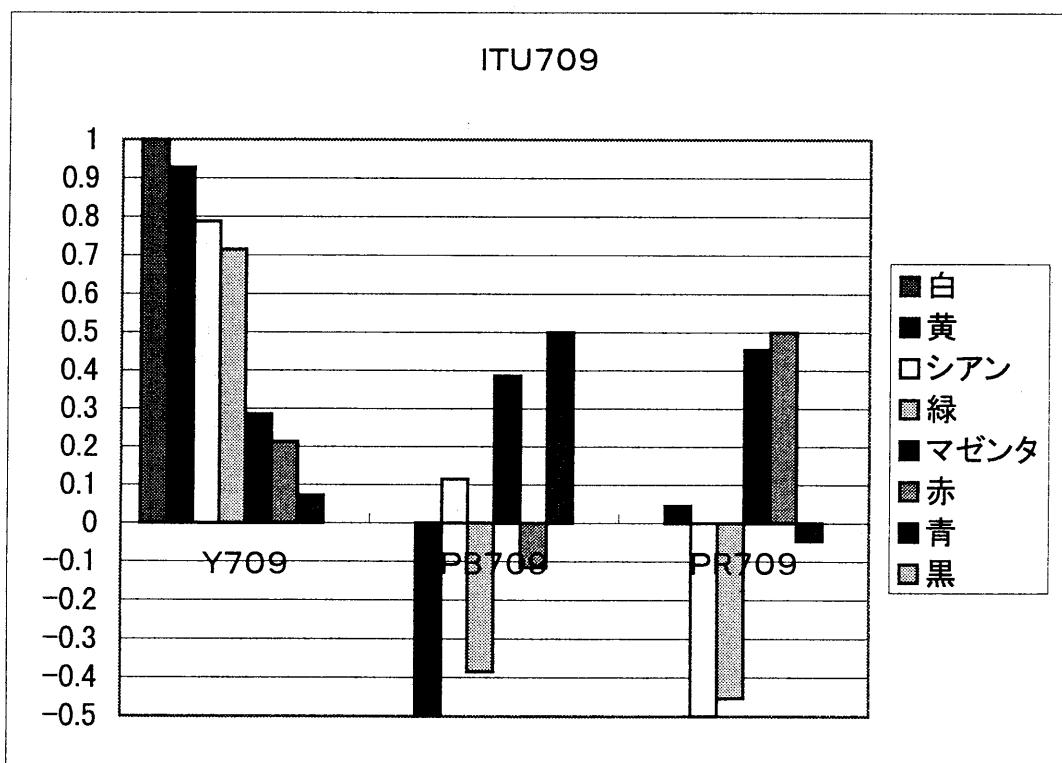
$$P_R = 0.5R - 0.4542G - 0.0458B$$

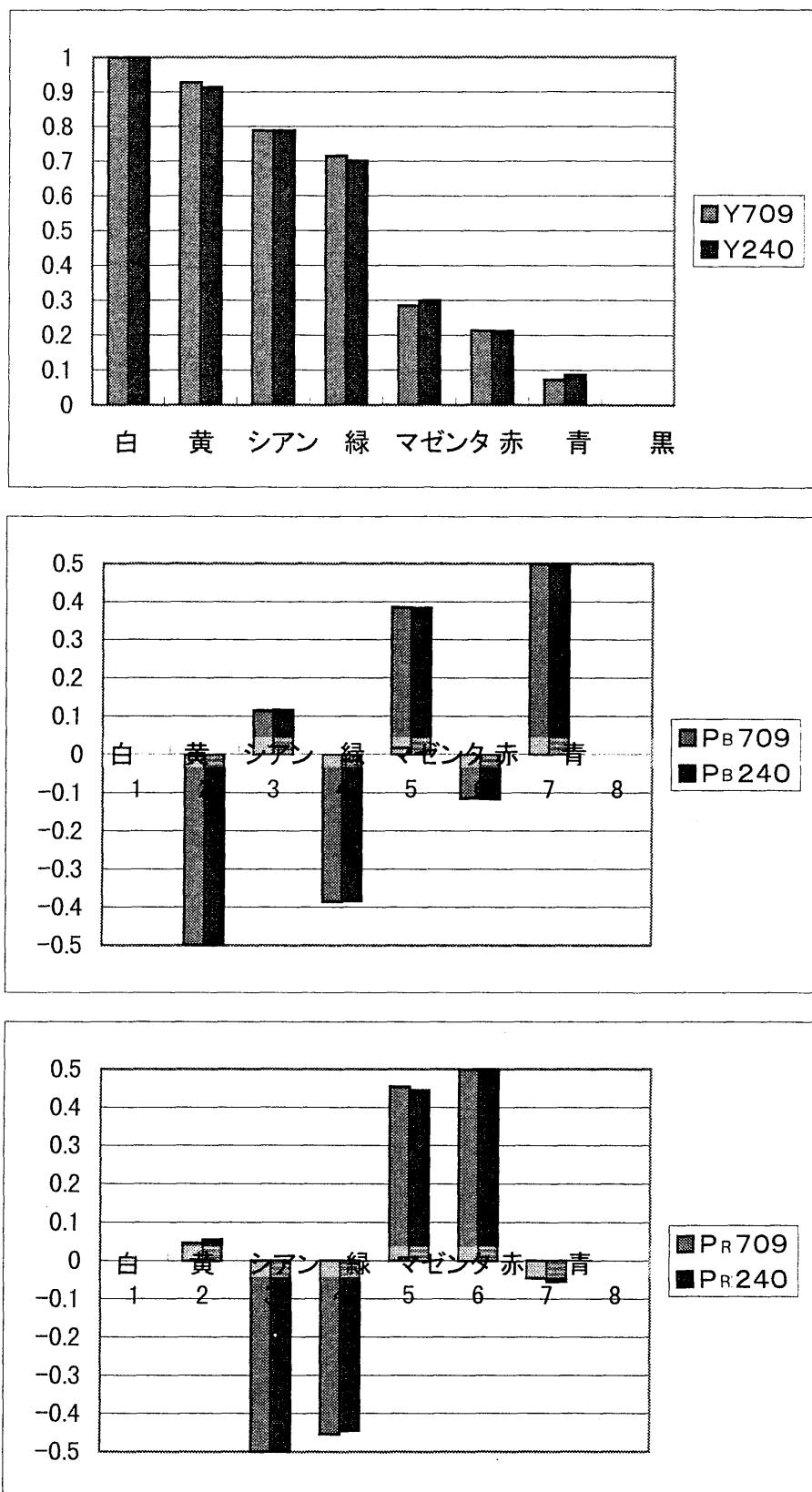
$$R = Y + 1.5748P_R$$

$$G = Y - 0.4681P_R - 0.1874P_B$$

$$B = Y + 1.8556P_B$$

	R	G	B	Y_{709}	P_{B709}	P_{R709}
白	1	1	1	1	0	0
黄	1	1	0	0.9278	-0.5	0.0458
シアン	0	1	1	0.7874	0.1146	-0.5
緑	0	1	0	0.7152	-0.3854	-0.4542
マゼンタ	1	0	1	0.2848	0.3854	0.4542
赤	1	0	0	0.2126	-0.1146	0.5
青	0	0	1	0.0722	0.5	-0.0458
黒	0	0	0	0	0	0



SMPTE240MとITU709のカラー・パーレベル差

ITU709→SMPTE240M変換時のRGB誤差計算資料

$$Y = 0.212R + 0.701G + 0.087B$$

$$P_B = -0.116R - 0.384G + 0.5B$$

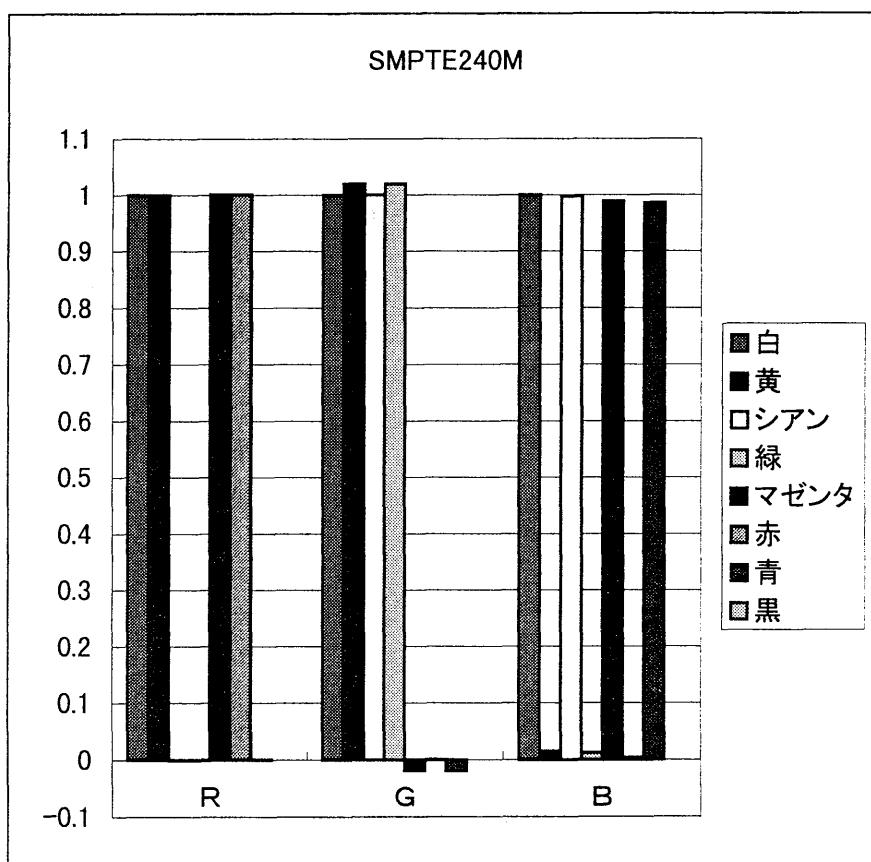
$$P_R = 0.5R - 0.445G - 0.055B$$

$$R = Y + 1.576P_B$$

$$G = Y - 0.477P_R - 0.227P_B$$

$$B = Y + 1.826P_B$$

	Y_{709}	P_{B709}	P_{R709}	R	G	B
白	1	0	0	1	1	1
黄	0.9278	-0.5	0.0458	0.999981	1.019453	0.0148
シアン	0.7874	0.1146	-0.5	-0.0006	0.999886	0.99666
緑	0.7152	-0.3854	-0.4542	-0.00062	1.019339	0.01146
マゼンタ	0.2848	0.3854	0.4542	1.000619	-0.01934	0.98854
赤	0.2126	-0.1146	0.5	1.0006	0.000114	0.00334
青	0.0722	0.5	-0.0458	1.92E-05	-0.01945	0.9852
黒	0	0	0	0	0	0



SMPTE240M→ITU709変換時のRGB誤差計算資料

$$Y = 0.2126R + 0.7152G + 0.0722B$$

$$P_B = -0.1146R - 0.3854G + 0.5B$$

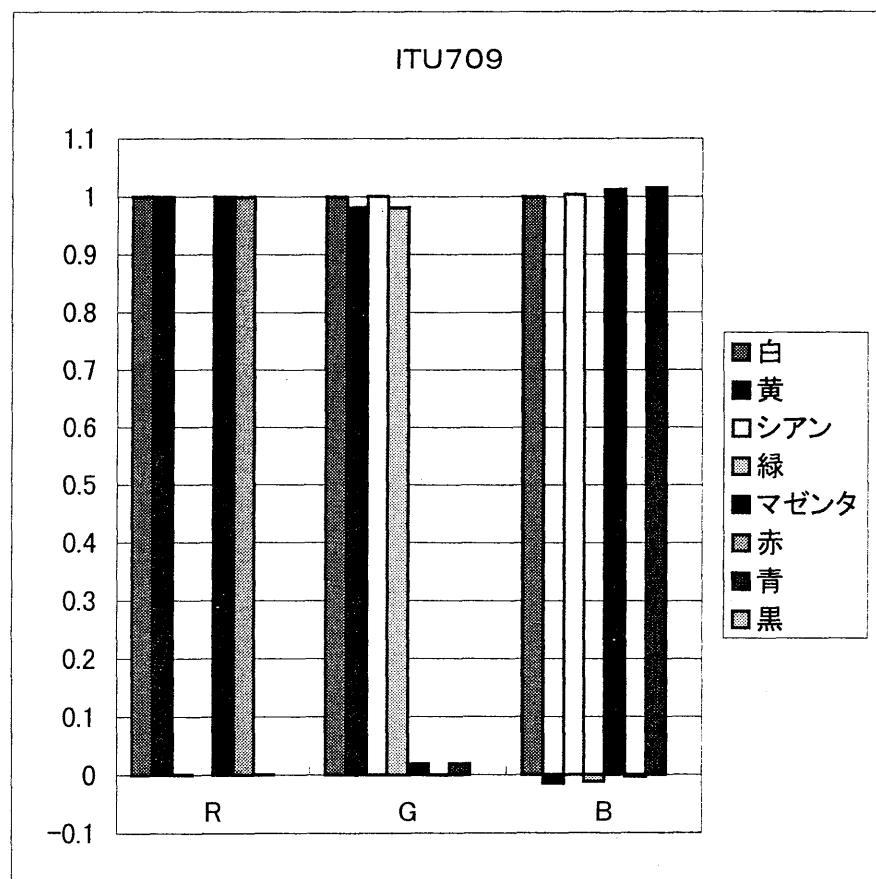
$$P_R = 0.5R - 0.4542G - 0.0458B$$

$$R = Y + 1.5748P_R$$

$$G = Y - 0.4681P_R - 0.1874P_B$$

$$B = Y + 1.8556P_B$$

	Y_{240}	P_{B240}	P_{R240}	R	G	B
白	1	0	0	1	1	1
黄	0.913	-0.5	0.055	0.999614	0.980955	-0.0148
シアン	0.788	0.116	-0.5	0.0006	1.000312	1.00325
緑	0.701	-0.384	-0.445	0.000214	0.981266	-0.01155
マゼンタ	0.299	0.384	0.445	0.999786	0.018734	1.01155
赤	0.212	-0.116	0.5	0.9994	-0.00031	-0.00325
青	0.087	0.5	-0.055	0.000386	0.019046	1.0148
黒	0	0	0	0	0	0

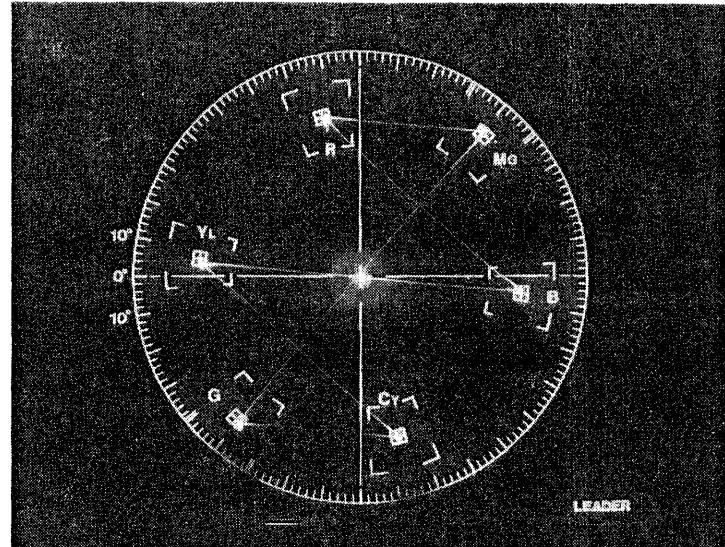


(ARIB カラリメトリ AHG 資料)

波形モニタの写真

カメラカラーバー信号において、カメラ伝送マトリックス 240M、
波形モニタ伝送マトリックス 240M とし Y、P_B、P_R→RGB
変換時のベクター波形（写真1）、及びRGB波形写真（写真2）

写真 1



カメラカラーバー信号において、カメラ伝送マトリックス 709、
波形モニタ伝送マトリックス 240M とし Y、P_B、P_R→RGB
変換時のベクター波形（写真3）、及びRGB波形写真（写真4）

写真 3

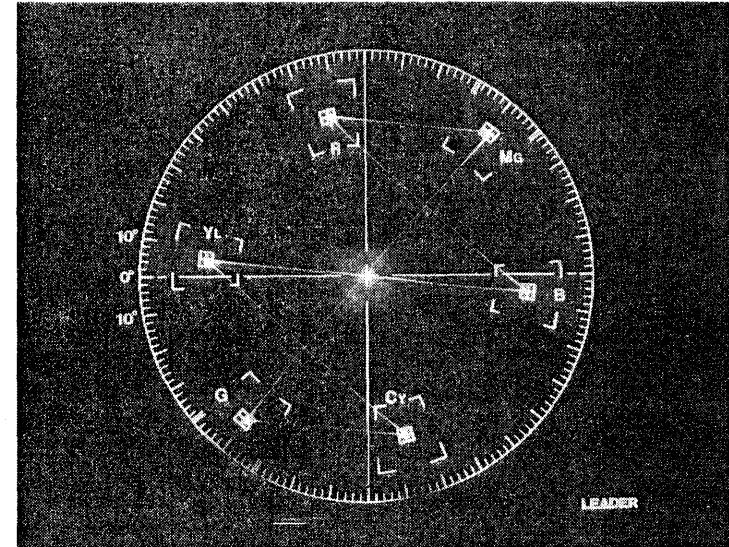


写真 2

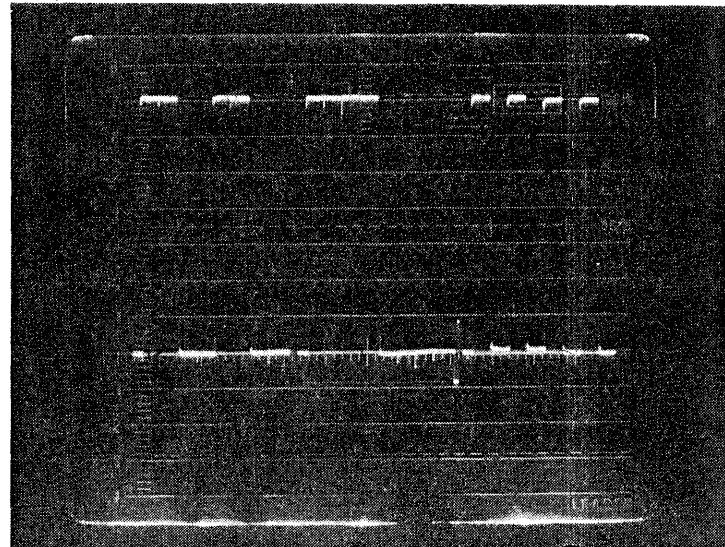
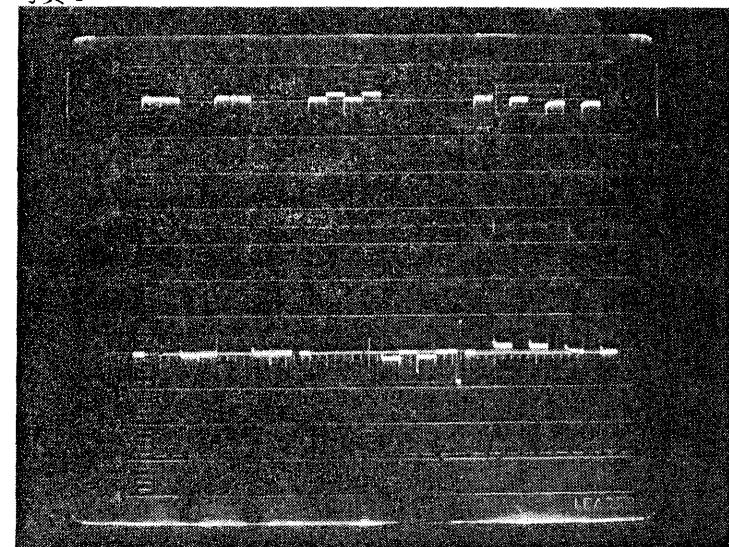


写真 4



1125/60方式HDTVスタジオ規格における
測色パラメータ運用ガイドライン
技 術 資 料
ARIB TR-B9 1.0版

平成10年7月 1.0版 策定

発 行 所

社団法人 電 波 産 業 会
〒100-0013 東京都千代田区霞が関1-4-1
日土地ビル14階

電 話 03-5510-8590
F A X 03-3592-1103
