

カラーファクシミリ用色空間の評価

富士ゼロックス(株) 画像技術研究所	正会員	池 上 博 章
早稲田大学理工学部	正会員	花 村 剛
大日本印刷(株) 画像研究所		会 津 昌 夫
キャノン(株) 製品技術開発センター		山 田 修
富士通(株) 応用システム事業本部		遠 藤 博 之
(株)リコー FCP 事業部	正会員	石 川 安 則
松下技研(株) 画像情報研究所	正会員	金 森 克 洋
ソニー(株) 中央研究所デバイス研究部門		加 藤 直 哉
コニカ(株) 技術研究所		洪 博 哲
東京工業大学電気電子工学科		木 下 宏 揚

〈あらまし〉 カラーファクシミリの標準化の要望が高まっており ITU-T に日本から貢献する意味で画像電子学会にカラーファクシミリ検討会が設置され活動を行っている。本報告では色空間ワーキンググループ (WG 2) で行った、カラーファクシミリ標準色空間の選定方法とその結果を報告する。検討結果として *CIELAB* が選定され、ITU-T において mandatory (必須) として承認された。本検討では評価作業を評価対象色空間の選定、評価項目別評価、総合評価の 3 段階に分けて行った。評価対象色空間は *CIELAB*, *CIELUV*, *RGB* など、15 種類の色空間が選ばれ、10 の大評価項目、26 の小評価項目にわたって定量的な評価、あるいは主観的画質評価が行われた。更に、各評価項目についてランク付けが行われ、各委員の平均によりランク間の重みを点数表にして色空間の総合評価がなされた。今後は必要に応じて白基準の検討、色空間各軸のレンジの検討、マルチカラーの検討を行っている。

キーワード：色空間、カラー・ファクシミリ、*CIELAB*、色空間ワーキンググループ (WG 2)、JPEG、JBIG

〈Summary〉 In response to the request for the standardization of Color Facsimile, Color Facsimile Committee was organized in The Institute of Image Electronics of Japan to contribute Japanese suggestions to ITU-T. This paper reports an evaluation method which is adopted at WG2 of the committee to select the standard color space and its result. In this method, the evaluation task is partitioned into three parts, that is, selecting "the color spaces for evaluation", evaluating within each subitem, and finally evaluating. As "the color spaces for evaluation", fifteen color spaces such as *CIELAB*, *CIELUV*, *RGB* etc. were selected. The evaluating task consists of 10 categories and these categories have 26 subitems. Some subitems include subjective evaluation items and others quantitative ones. For next step, the ranks for each subitem were marked in accordance with the mean opinion of the WG2 members. Consequently, *CIELAB* marked the top score and was selected as the standard color space within WG2. This result was suggested to ITU-T and the *CIELAB* was selected as the mandatory at ITU-T/SG8 meeting held in Geneva in April, 1993. For further task, we will start on demand to investigate the remained problems such as white point, color space dynamic range, and multicolor.

1. はじめに

国際的なカラーファクシミリの標準化活動は、1990年3月のCCITT SGVIII 会合から検討が開始され、現在はITU-T (旧 CCITT) SG 8/WP-C/Q 4 (Color Model) を中心として検討が継続されている¹⁾。これに対応する国内の組織は、画像電子学会テレマティクス研究専門委員会カラーファクシミリ検討会、および、郵政省電気通信技術審議会電気通信標準化委員会第6専門委員会カラーモデル分科会である。

カラーファクシミリ用色空間の標準化の必要性は、カラーファクシミリに想定される標準的なシステムを考えるとわかりやすい (図1)。まず、通信されるカラー画像は、入力に用いられるデバイスに依存した色空間 (device dependent color space) のデータとして入力される。このようなデータが、デバイスに依存しない標準色空間 (device independent standardized color space) に変換され、符号化されて通信される。受信側では、受信データが復号され、標準色空間から出力装置に依存した色空間へ変換された後、ハードコピーあるいは、ディスプレイなどのソフトコピーとして出力される。ここで、標準色空間を設定することにより、入力、あるいは、出力装置の発色特性の多様性に、1台のファクシミリ装置が対応する必要がなくなり、各々のファクシミリ装置内では単一の色変換装置を持つことで済むという、経済的な長所を持つことができる。このように、カラーファクシミリを含んだカラー画像情報の通信システムにおいては、デバイスに依存しない色空間を標準化することの意義は小さくない。

このような標準色空間の選定を目的として1991年5月には、カラーファクシミリ検討会のもとに色空間ワーキンググループ (WG 2) が設けられた。

類似した標準色空間の選定は、ISO/IEC/JTC 1/SC 18 での ODA Color Addendum の作成時に行われており、そこでは、幾つかの色の空間について机上の評価が行われ、XYZ, RGB, CMYK, CIELAB, CIELUV など²⁾、複数の色空間が標準として採用されようとしている³⁾。

これに対し、カラーファクシミリの標準化では、前述のような経済的な長所を生かすために1つの色空間に絞りたいという要望が強く、WG 2 では、色空間の評価を広範な評価項目にわたって定量的に行い、最終的に、CIELAB をカラーファクシミリに最適な色空間として選定した。

この検討結果は、検討途中の段階から、順次、ITU-T に寄書として提出され、ITU-T のカラーファクシミリの標準化活動に貢献することができた。ITU-T での最終結果としては、1993年4月から5月にかけてジュネーブで開かれた ITU-T SG 8 会合で「カラーファクシミリでは、CIELAB をマングトリー (必須) として採用する」ことが正式に認められた (表1)。

本解説は、WG 2 での色空間選定の検討内容を報告するものであり、次章では、色空間選定作業全体の手順を概観し、第3章では、評価対象色空間の選定結果を示す。第4章では、各評価項目の説明と項目ごとの色空間評価結果を説明し、第5章では、色空間の総合評価の集約方法と総合評価結果について述べる。最後に、第6章では、色空間に関連した WG 2 の今後の課題について触れる。

2. 色空間選定作業の手順

WG 2 で行った色空間選定作業の全体の流れを図2に示す。

まず、リストアップされた色空間候補の中から、評価作業をできるだけ定量的に、しかも迅速に行うために、評価対象色空間を15個に絞り込んだ。一方、評価項目をリストアップし、その各項目について評価方法の詳細を決定し、評価項目別に2~7段階のランクを定義して、評価対象色空間について「項目別評価」作業を行って、その評価項目についての評価対象色空間のランクを決定した。次に、各項目別ランク同士の相対的な重要度に応じた重み点数を決定して、色空間ごとの全ランクを重み点数で置き換え、その総合得点によって評価対象色空間の順位を決定して最終的な色空間の選定を行った。

3. 評価対象色空間の選定

国際照明委員会 (Commission Internationale de l'Éclairage, 以後 CIE) を始めとした様々な機関から、様々な色空間が提案されているが、前述の通り全ての色

"Evaluation of Color Space for Image Communication—Focusing on Color Facsimile—Hiroaki Ikegami (Imaging Technology Research Laboratory, Fuji Xerox Co., Ltd.), Tsuyoshi Hanamura (School of Science and Engineering, Waseda University), Masao Aizu (Image & Information Research Institute, Dai Nippon Printing Co., Ltd.), Osamu Yamada (Products Technology Development Center, Canon Inc.), Hiroyuki Endo (Specialized Systems Group, Fujitsu Limited), Yasunori Ishikawa (FCP Business Division, Ricoh Co., Ltd.), Katsuhiro Kanamori (Image Processing Research Laboratory, Matsushita Research Institute Tokyo, Inc.), Naoya Kato (Device Technology Research Division, Research Center, Sony Corporation), Po-Chieh Hung (Electronic Imaging Laboratories, R & D Center, Konica Corporation) Hirotsugu Kinoshita (Dept. of Electrical & Electronic, Tokyo Institute of Technology).

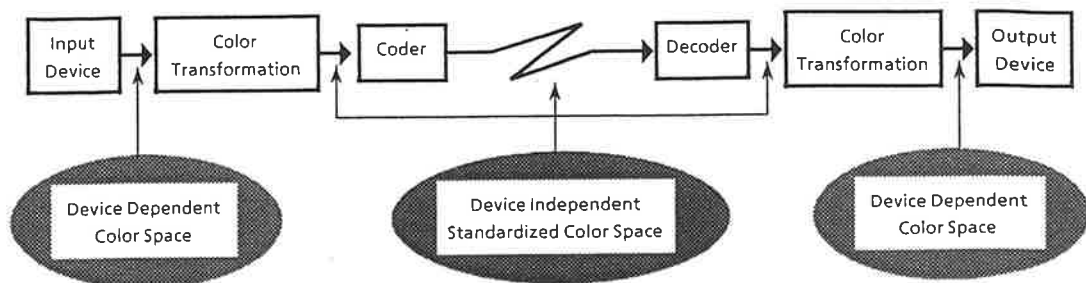


図1 標準的なカラーファクシミリシステム
Fig.1 A Typical Color Facsimile System

表1 標準化経緯
Table 1 Standardization Details

年月/場所/形式	内容
'91.8. サンタクララ CCITT/SGVIII/Q4 (G4Fax) エキスパート会合	ヨーロッパのビデオテックスでのYCbCr採用を背景とし、YCbCrをマンドトリー、CIELABをオプションとする提案が仮承認された。
'91.10. ジュネーブ CCITT/SGVIII会合	日本(WG2)より、以下の趣旨の寄書を対抗として提出した。 - デバイスインディペンデントを重視するべきで、RGBとガンマが1つに決まっていないうYCbCrをマンドトリーと決めるのは、問題がある。 - 色空間選択は、きちんと評価を行った後に実施すべきである。(評価項目のみ提案) 米国からも、色の表現可能範囲が狭い等の理由からYCbCrをマンドトリーと決める事への反対意見が出され、色空間選択は時期尚早ということになった。
'92.4. ジュネーブ CCITT/SGVIII会合	日本(WG2)より、色空間の評価の途中結果(CIELABが有力)とそのバックデータを寄書として提出し、色空間の評価の必要性を訴えた。又、米国からも、YCbCrとCIELABの比較ではCIELABが良いという寄書が出された。結論としては、「CIELABが有力候補ではあるが、次会期にもこの結果を裏付ける更なる検討が必要」ということになった。
'92.11. 東京 CCITT/SGVIII/Q4 (G4 Fax) 会合	日本(WG2)より、色空間の評価/選択の途中結果(CIELABを選定)とそのバックデータを寄書として提出し、CIELABの採用を提案した。又、米国からも、視覚均等空間であるという理由からCIELABが良いという寄書が出された。議論の結果、「カラーファクシミリではCIELABをマンドトリー(必須)として採用する」ということが、仮承認された。
'93.4. ジュネーブ ITU-T/SG8 会合	'92.11.のQ4 (G4 Fax)東京会合の結論が報告され、だめ押しとして、日本(WG2)より、色空間の評価/選択の最終結果(CIELABを選定)を寄書として提出した。特に反対は無く、「カラーファクシミリではCIELABをマンドトリー(必須)として採用する」ということが、正式に承認された。

空間を定量的に評価するのは不可能であり、WG2では、以下の方針で評価対象色空間の絞り込みを行った。

- ・産業界で広く使われている。
- ・評価項目を念頭において、類似するものはなるべく避ける。

この結果として選定された15の評価対象色空間とその相対的な関係を図3に示す。図では、YIQ、YCbCr⁴⁾などの輝度色差分離RGB系、NTSC、一般のRGBなどRGB系、CIELAB、CIELUVなどの均等知覚空間系⁵⁾と、修正マンセル表色系(Munsell Renotation System, 以下MUNSELL)⁶⁾、HSL⁷⁾などの極座標系に分類した。ここで、輝度色差分離RGB系およびRGB系のうち、ガ

ンマ補正処理を行ったものには接尾語-γを(例えば、YIQ-γ)、行っていないものには接尾語を付けないで区別している。また、CIELABなどの極座標表示には接尾語-Pをつけて区別した、更に、極座標系にはHSL、HSV、HSIなどCGを対象とした色空間の定義式が幾つか存在するが、HSLで代表させて定量的な評価を行った。ここで、YIQとYCbCrは、ガンマ補正処理を行うものと、行わないものの合計4種類があるが、産業応用の場で双方とも用いられており、しかも、評価の段階で差異が出てくることが予想されたので、4つの別の評価対象色空間として選定した。また、杉浦らの提案している、CES-RGB⁸⁾を標準外のRGBの1つとして評価対

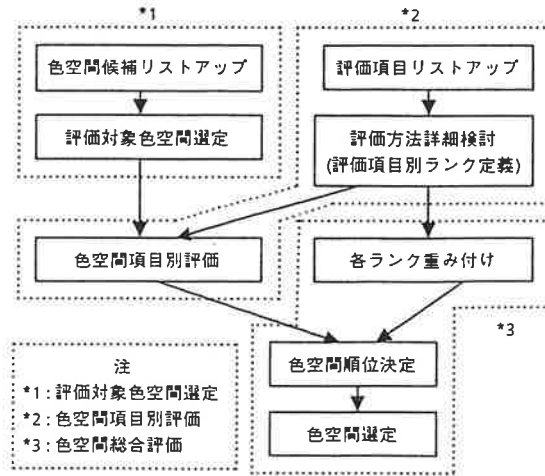


図2 色空間選定作業
Fig. 2 Procedure of Color Space Selection

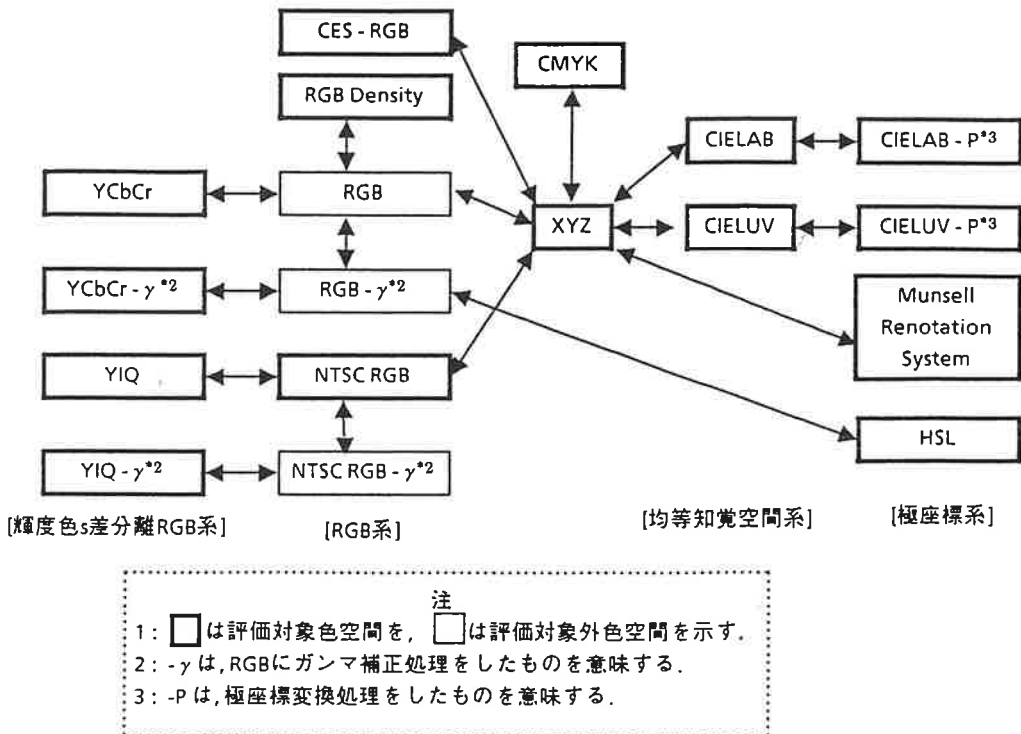


図3 評価対象色空間とその関係
Fig. 3 Selected Color Spaces & Their relationship

象空間として組み入れた。

4. 評価項目と項目別評価結果

評価項目としては、最初に 10 の大評価項目を設定した。次に、各々の評価項目について詳細な評価方法を検討した結果として、26 の小項目に細分化することにし、その小項目ごとのランクの定義を決めた。そのランクに従って評価した結果を表 2 に示す。

表 2 の中で、カッコでくくられたランク値は、作業負荷の関係、または、色空間の定義の関係から評価できなかったため、類似の他の色空間の評価結果から類推してランク付けしたことを意味している。なお、評価対象色空間の中には、項目によっては条件を固定しないと数値計算ができないものがあるので、そのような色空間につ

いては表 2 のように計算条件を固定して評価した。例えば、 $YCbCr$ は RGB の色度座標値と γ の値に規定がないので、それらを定めないと XYZ への変換ができない。この場合は、RGB と γ は NTSC の規定に固定し、評価した。

同様に、白基準についても、これを決めなくては計算できない項目があるので、C 光源に統一して評価した。ここで、C 光源にしたのは、NTSC-RGB の修正マンセル表色系が、C 光源のみで定義されているためである。以下、表 2 に従い、各評価項目について、その評価方法および結果について説明する。各項目のランクの定義は付録 1 にある。

4.1 デバイス・インディペンデント

様々な色空間のうち、何か情報を付加してやらないと

表 2 色空間の項目別評価結果
Table 2 Evaluation Results of Subitems

色空間			項目別評価値 ^{*1}													
			デバイスイン ディペンデント	量子化誤差	圧縮アルゴリズムとの関係					色空間表現 可能範囲	白基準の変化 への対処	XYZとの変換	入力からの変換	出力への変換	白黒との互換性	他の標準・機器 との互換性
主観評価	画質の 誤差	圧縮還元 誤差			圧縮率	可逆圧縮時の 圧縮率	サブサン ピング対応									
名称	特記事項	計算条件 ^{*2}														
XYZ			A	C/C	C	D	C	A/B	A	A/A/B	A/A	C	D/E	C	A/C/A/B /B/B/B/B	
CIELAB			A	A/B	A	A	B	A/A	A	A/B/A	C/A	E	E/D	A	B/C/A/B /C/C/B/C	
CIELAB - P			A	B/B	C	C	C	B/A	A	A/B/A	D/A	F	E/B	A	C/C/C/C /C/C/B/C	
CIELUV			A	B/D	A	A	B	A/A	A	A/D/B	D/B	F	E/D	A	B/A/C/C /C/B/C/B	
CIELUV - P			A	B/C	(C)	(C)	(C)	B/A	A	A/D/B	E/B	G	E/B	A	C/A/C/C /C/C/C/C	
CMYK	任意のCMYKで 負値を許す	印刷のCMYと 3色Neugebauer	C	(B/B)	(B)	(C)	(A)	A/B	A	A/(C/A)	G/A	G	A/E	E	A/C/A/A /C/C/A/C	
NTSC RGB			A	B/C	B	C	C	A/B	A	B/(C/A)	B/A	C	C/E	F	A/C/A/C /A/A/C/C	
CES - RGB	可視光域を包含 する任意のRGB	特定RGB	B	C/C	(B)	(C)	(C)	A/B	A	A/C/A	B/A	C	C/E	F	A/C/A/C /C/C/C/C	
RGB Density	任意のRGB	NTSC RGB	B	B/(B)	B	C	A	A/B	B	A/C/A	C/A	B	B/E	E	A/C/A/B /C/C/B/B	
YIQ	負値を許す		A	C/D	(A)	(B)	(B)	A/A	A	B/(C/A)	B/A	C	D/D	C	A/C/A/C /C/C/C/C	
YIQ - γ			A	B/(B)	(A)	(A)	(A)	A/A	C	B/(C/A)	D/C	E	D/D	B	A/C/A/C /C/A/C/C	
YCbCr	任意のRGBで 負値を許す	NTSC RGB	B	D/D	A	B	B	A/A	A	A/C/A	B/A	C	D/D	C	A/C/A/C /C/A/C/C	
YCbCr - γ	任意のRGBとγ	NTSC RGB γ = 2.2	B	B/(B)	A	A	A	A/A	B	A/C/A	D/C	C	D/D	B	A/A/A/C /C/A/C/C	
HSL	任意のRGBとγ	NTSC RGB γ = 2.2	B	C/C	(C)	(C)	(C)	B/A	B	A/C/(B)	D/A	C	C/C	D	C/C/B/C /A/C/C/C	
Munsell Renotation System			A	(B/C)	(C)	(C)	(C)	B/A	C	B/(C/B)	G/C	G	E/A	A	C/C/C/C /C/C/C/C	

*1: カッコは、作業負荷又は色空間の定義との関係で評価できなかったため、類似の他の色空間の評価結果から類推したことを示す。

*2: 計算条件とは、量子化誤差/圧縮アルゴリズムとの関係の一部/白基準の変化への対応への一部については、計算/絵だし時に何らかの条件設定が必要であったため、その条件を示す。

デバイスに独立な色空間にならないものがある。例えば $YCbCr$ は RGB の色度座標値と γ の値に規定がないので、この情報を持たないとデバイス・インディペンデントと言えない。ここでは、この付加すべき情報をキャリブレーション・データと呼び、デバイス・インディペンデントな空間に変換するのに必要なキャリブレーションデータの数を数えて、その数の少ないものをデバイス・インディペンデント性が高いとして、これを3段階に分けて評価した。但し、光源の種類に起因する白基準座標値は勘定に入れなかった。

評価結果は以下の通りであった。 $CIELAB$ 、 $CIELUV$ 、 $NTSC-RGB$ などは、デバイス・インディペンデントな色空間なので A ランクであり、 $CMYK$ はデバイス・インディペンデントの色空間なので C ランクであった。中間の B ランクは、 $NTSC$ 系を除く RGB 系であり、先の $YCbCr$ の例では、 RGB の xy 座標値と γ の値の合計7個がキャリブレーションデータ数となる。なお、デバイス・インディペンデントの重要性を訴えるため、 $YCbCr$ で、あるデジタル画像データがあったと仮定して、それを $NTSC$ と見なすか、 PAL と見なすかによって、どの程度の色差となるかを試算した。計算方法と結果は、付録2に示したが、 ΔE_{ab} の最大値で40を越える色空間上の点があることが確認できた。

4.2 量子化誤差

カラーファクシミリの標準化では、使用する圧縮アルゴリズムとの関係から、使用する色空間の各軸に8ビットを割り当てることがデフォルトとなる可能性が高いので、それを前提として、量子化誤差を計算し、色差換算したものを評価した。量子化誤差の要因としては、各軸のレンジの大小、各軸が視覚特性に近い特性を持つかの2点が考えられ、評価作業では、この2点に対して各色空間の比較条件が揃うように設定する必要がある。

評価方法とその結果の詳細は別途報告予定であるので省略し、ここではその概略を示す。まず、評価方法は以下の通りである。

(1) 色域は、 $NTSC-RGB$ と、MacAdam の最明色を作る色域 (最明色域)⁹⁾ を使用して、各軸のレンジを決定する。

(2) 量子化誤差は、色域内の点を対象として $CIELAB$ および $CIELUV$ に変換し、各々の空間での色差の統計量 (Root Mean Square および最大値) を算出する (計4つの統計量となる)。

(3) 最終評価は、4つの統計量をもとに1つの評価指標を構成し、 $CIELAB$ 空間での許容色差の分類¹⁰⁾ を参考として、5段階に評価する。

また、表2のうち、左側のランクが $NTSC$ に対応し、右が最明色域に対応する。結果として、 $CIELAB$ は $NTSC$ に対して A、最明色域に対して B ランクで最も良い評価となった。

4.3 圧縮アルゴリズムとの関係

カラーファクシミリの標準化で、現在、検討対象としている圧縮アルゴリズムは、JPEG 方式と JBIG 方式である。圧縮アルゴリズムとの関係については、JPEG Baseline 方式に基づく非可逆圧縮に関して2項目、JPEG Lossless (independent function) 方式および JBIG 方式に関して1項目、共通項目として、サブサンプリングに関して2項目の評価を行った。JPEG 方式および JBIG 方式に関する評価方法とその結果の詳細は、別途報告予定であるので、ここでは、概略の説明と共通項目について述べる。

JPEG Baseline 方式は連続調カラー画像を対象とした非可逆圧縮であるため、圧縮復元した後の画質の劣化の程度を評価する必要がある。そこで、各色空間の原画像と圧縮復元画像を以下の手順で作成し、主観的画質評価を行うとともに、圧縮復元誤差として、両画像の差分画像を均等色空間上の統計量で評価した。また、作業負荷の関係から、類似した結果が期待されるものは代表的な色空間のみを実験対象空間とすることにより、8つの色空間に絞って評価した。なおこの実験は、カラーファクシミリ検討会符号化ワーキンググループ (WG3) とともに行った。

(1) $NTSC-RGB$ の色域を仮定して各色空間のレンジを決定し、「超高精細画像デジタルテスト画像」(NTTより提供されているもので RGB 各12 bit) を各色空間に変換した後、各色のデータを8ビットに量子化し、各色空間の原画像とした。

(2) 同一のハフマンテーブルと量子化テーブル (recommended table) を用いて、2種類の圧縮率 (0.5 bpp と 1.0 bpp) で JPEG 方式 (Baseline) で圧縮復元したデータを圧縮復元画像とした。

(3) 原画像と圧縮復元画像を同一条件でハードコピーを作成するとともに、量子化誤差と同様の手法を用いて、両画像の色差計算を行った。

ここでの、主観評価は、テストに用いた画像の種類や、JPEG 方式のパラメータに大きく左右されることが予想されるため、厳密なものではないことを付記しておく。このような事情から主観評価は3段階のランク設定に止めた。

評価結果は、 $YCbCr$ 、 $CIELAB$ 、 $CIELUV$ のような輝度色差分離 RGB 系と均等知覚空間系が高く、 XYZ 、

CIELAB-P は低い評価であり、RGB 系は中間であった。また、圧縮復元誤差の評価は、色差計算の結果を量子化誤差とほぼ同様の手法で評価したが、ほぼ同様の結果が得られた。

JBIG 方式および JPEG Lossless 方式の評価は、両者が可逆アルゴリズムであるため、圧縮率のみを評価対象とし、JPEG Baseline 方式の場合と同様な条件で圧縮を行い、評価した。

評価結果は、RGB-Density と $YCbCr-\gamma$ が A ランクで最も高く、XYZ, CIELAB-P, NTSC-RGB の評価が低かった。

圧縮に関してもう1つ考慮すべき点として、サブサンプリングの有無がある。サブサンプリングとは、輝度信号はそのまま、色度信号のみ空間的に間引き処理をすることをいう。これにより視覚の解像度特性に沿った冗長度圧縮が行えるので、JPEG 方式でもオプションとして採用されている。本評価実験では、次の2項目で評価した。

(1) 極座標系の色相成分は、 $0^\circ \sim 360^\circ$ の角度で表されるので、サブサンプリング時に単純に平均をとることができず、余分なハードウェアを必要とするので、極座標系でない方が高いランクとする。

(2) 輝度成分が分離された空間であるかどうか、分離された空間の評価を高くする。

4.4 色空間表現可能範囲

標準となる色空間は、現存する入出力機器の色域の範囲だけでは不十分であり、色の編集、Computer Graphics (CG)、将来の入出力機器の技術革新に伴って、拡大するであろう色域のことを考慮に入れば、可視光を全て記述できることが理想的である。そこで、各色空間が可視光の範囲全てを記述できるかどうかを3段階で評価した。評価結果は、 $YIQ-\gamma$ と MUNSSELL は、表現できない色があるので C ランク、RGB-Density, $YCbCr-\gamma$, HSL は RGB 3 原色の設定によって表現できない色が存在するので B ランク、これ以外は、A ランクである。

4.5 白基準の食い違いへの対処

入力と出力で白基準が異なる場合は出力側でどう色を再現したら良いとか、一般に色温度の高いディスプレイとハードビーを色の見えとして一致させるにはどうしたら良いか¹¹⁾ などが、白基準の変化に関係する課題である。しかし、これらは、色の見え、順応、反射物と発光体の見えなどの研究テーマとして、学会で議論されている研究段階にあり、標準化を検討する上での判断基準となり得る段階にないので、時期尚早であると判断した。

そこで、本評価項目については、以下のように、白基準の変化に対処する何らかの処理を行うという前提で1つ、何も処理を行わないという前提で2つ、計3つの評価基準を設けて、独立に評価した。

4.5.1 白基準変更処理を行う場合

将来の研究の進展により学会での議論が収束した段階で、その結果に対応できる余地を残すため、任意に白基準を指定できる色空間であるかどうかという基準を2段階で評価した。従って、NTSC-RGB 空間などのように、白基準が規定されている色空間は評価が低く、特に規定がなく任意に白基準を設定できる色空間が高い評価となった。

4.5.2 白基準変更処理を行わない場合

第一は、送信側から送られてきた色空間データに対し、受信側が異なる白基準を用い変換、出力しても、色の変化が少ない色空間が望ましいという観点に立つものである。そこで、各色空間での格子点を、複数の白基準を用いて CIELAB, CIELUV 空間に変換した時の色差の統計量 (ΔE_{rms} , ΔE_{max}) を求めて評価した。計算方法は、量子化誤差の評価と同様、特定の色域を想定し、色域内部の格子点について行った。評価方法は、計算結果の ΔE を許容色差をもとに分類し、ランク分けした。その結果、XYZ と CIELAB 空間の評価が高く、CIELUV 空間の評価が低くなった。

第二は、同一の画像を、異なる白基準下(光源下)で測色(画像入力)した時の測定値に変化の少ない色空間が望ましいという観点に立つものである。そこで、複数の画像サンプル(印刷/写真)を異なる白基準で測定して NTSC-RGB の色域を想定して規格化した各色空間に変換し、以下の3つの統計量を計算した。①同一サンプル間の白基準が変わった場合のユークリッド距離の平均値と Max 値、②白基準が変わった場合の異種サンプル間のユークリッド距離の差の平均値と Max 値、③白基準が変わった場合の異種サンプル間のユークリッド距離の差の相関係数¹²⁾ の3つである。そしてそれらの結果を一定の尺度により2段階で評価した。結果は、CIELAB, RGB, $YCbCr$ 空間が高い評価となり、XYZ, CIELUV 空間は低い評価となった計算方法の詳細と結果を付録3に示す。

4.6 XYZ 三刺激値との変換容易性

ほとんどの色空間は XYZ 空間との関係で定義されており、ある色空間から別の色空間への変換式は、XYZ 空間を経由する場合が多く、XYZ 空間は色変換を行う上での中心的な色空間である。そこで、本評価項目では、XYZ 空間との変換の容易性と変換の可能性という2つ

の評価基準を設け、独立に評価した。

XYZ空間から各色空間への変換の可能性は、色空間表現可能範囲の評価と等価である。そこで、XYZ空間から各色空間への変換については、それが容易にできるかどうかだけを取り上げ、XYZ空間から各色空間への変換を実現する場合の演算規模を見積もり、それを規模の大きさにより7段階で評価した。その結果、RGB、 $YCbCr$ 、 YIQ 空間は、線形変換であるので単純な演算で済み、高い評価となり、*CIELAB*、*CIELUV*、 $YCbCr$ 、 YIQ 空間などは、非線形変換を含むことから複雑な演算となり、評価が下がった。*MUNSELL*、*CMYK*空間に関しては、特定の変換方法がないので、テーブルを参照する方式でなければならず、最も低い評価であった。

また、これの逆変換つまり、各色空間からXYZ空間への変換の容易性は、XYZ空間から各色空間への変換の容易性とほぼ等価である。しかし、各色空間からXYZ空間への変換の可能性については、XYZ空間から各色空間への変換の可能性とは別の種類の問題が考えられる。例えば、各色空間で編集をしたり、圧縮または復元したりすることを考えると、各軸独立で処理が行われるので、その色空間では値を持つものの、XYZ空間には変換できない場合が発生することがある。この場合は、その色空間で、各軸独立ではない処理（色域圧縮など）を行ってからでないと、XYZ空間には変換できない。そこで、各色空間からXYZ空間は、XYZ空間への変換が可能であるかを取り上げ、各色空間の全ての点がXYZ空間へ変換可能かなど、3段階に評価した。ほとんどの色空間は変換可能であり、高い評価となった。しかし、*CIELUV*空間はXYZへ変換できない点が存在し、評価が下がった。また、 $YCbCr$ （ガンマ補正あり）、 YIQ （ガンマ補正あり）、*MUNSELL*空間は計算不可能の領域が大きく、更に低い評価となった。

4.7 入力からの変換容易性

入力機器の内部色空間から標準伝送色空間への変換は、容易にできることが望ましい。変換が可能かどうかは、XYZ空間から各色空間への変換と等価であるので省略した。そこで、本評価項目については、ルータ条件^{13)~15)}を満たすスキナのRGB空間を入力色空間と想定し、これから各色空間に変換するために必要な演算規模を見積もり、規模の大きさにより7段階に評価した。この7つの段階は、XYZ空間から各色空間への変換のものと共通にしてある。なお、スキナ以外にも、入力機器としてCRT、ビデオカメラなどが想定されるが、多少の差はあっても相対的な順序には差がないと判断し、

入力色空間をスキナのRGB空間で代表させた。評価の結果、XYZ、RGB、 $YCbCr$ 、 YIQ 空間など、線形変換で行える色空間は評価が高く、*CIELAB*、*CIELUV*空間など、非線形変換を含む色空間は評価が低くなった。そして、*CMYK*、*MUNSELL*空間は、最も低い評価となった。

4.8 出力への変換容易性

標準伝送色空間から出力機器の内部色空間への変換も、入力機器の場合と同様、その容易性のみを考えれば良い。但し、入力機器と異なるのは、出力機器の色域の中に色を圧縮する必要があることを考慮に入れる点である。そこで、それぞれを独立の評価項目とした。

出力機器の色域の中に色を圧縮する方法の容易性の評価としては、色空間の各軸が、色相/明度/彩度（HVC）にいかにか近いかという尺度を設け、5段階に評価した。この尺度は、出力機器の色域の中に色を圧縮する場合、色相を一定に保って明度と彩度を圧縮することが好まれる¹⁶⁾ので、HVCに分離した色空間の方が処理が容易であるという観点から導入した。また、ワークステーションなどにおいて色を編集する時、HVCで調整することがしばしば行われるので、この場合も、HVCに分離した色空間の方が有利になる。そして、更に人間の視覚特性により近い色空間の評価を高くした。従って、*MUNSELL*空間が最も高い評価となり、*CIELAB*極座標、*CIELUV*極座標空間がそれに続く結果となった。当然、XYZ、RGB系、*CMYK*空間が最も低い評価であった。この評価は、色を編集する機器を入出力に想定した時の評価という意味も併せ持っている。

変換の容易性を評価する出力機器の内部色空間としては、*CMYK*空間を想定した。他に、CRTなどのRGB空間もあるが、これは入力からの変換と等価になるので省略した。*CMYK*空間と他の色空間とは強い非線形関係にあるため、正確な色再現を行おうとすると、どの色空間からの変換もテーブルを参照するような方式にならざるを得ない。そこで、評価としては、正確な色再現を目指さない場合に限定し、*CMYK*空間へ変換するのに必要な演算規模（墨版生成を含む）を見積もり、規模の大きさにより5段階に評価した。正確な色再現を目指さないとは、ある出力機器の*CMYK*信号を別の出力機器の*CMYK*信号として直接出力しても、正確な色は保証されないが、それなりの色は出るというような意味である。評価の結果、墨生成のみの変換で済むRGB-Density空間が最も評価が高く、更に濃度変換が必要となるRGB空間がその次となった。*CIELAB*系、*CIELUV*系、*MUNSELL*空間は、複雑な変換が必要となり、最も低い

評価となった。

4.9 白黒機器との互換性

カラーファクシミリといえども、従来からの白黒ファクシミリとの互換性は非常に重要な項目である。標準伝送色空間は、明度軸が分離されていて、その明度信号をそのまま白黒ファクシミリとの交信に使用できる色空間であることが望ましい。そこで、各色空間の明度軸の有無と、更にその明度軸が視覚特性に近い特性を持つかどうかという2つの尺度を組み合わせて1つの尺度とし、6段階に評価した。結果は、*CIELAB*系、*CIELUV*系、*MUNSELL*空間が最も高い評価となり、*RGB*空間が最も低い評価となった。

4.10 他標準や機器との互換性

他の標準や機器との互換性については、ODA, Videotex, SPDL, 印刷, Computer Graphics, TV, 複写機, 写真といった他の標準, 他のメディアのカラー入出力分野で使われているかどうかという尺度から、3段階に評価した。標準については、それぞれの標準書を調査して評価した^{17)~20)}。

5. 総合評価方法とその結果

色空間の総合評価は、個別評価項目ごとのランクに全て重みを付け、表2の項目別評価値を重み点数で置き換えて、そのトータルを算出して、色空間の順位を決定する方法を用いた。最終的な色空間選定は、その結果に基づいて行われた。

5.1 各ランクの重み付け

重みの付け方は、以下のようなルールで、WG2各委員に重み点数を提出してもらい、その単純平均をとる方法を採用した。但し、量子化誤差はランク値は用いず、最

小の色差に対応する重みを付け、その他の重みは、色差の値そのものを使って比例配分した。

(1) 最も重要な大評価項目の最高ランクの重み点数を100とする。但し、その大評価項目が複数の小評価項目に分かれている場合は、その和が100となるように割り振る。

(2) 他の項目の最高ランクの重み点数は、それを基準に相対的に決める。

(3) 各項目の最低ランクの重み点数は、全て0とする。

(4) 各項目の中間ランクの重み点数は各項目の最高と最低の中間的な任意の点数を割り振る。

結果を表3に示す。表によると、デバイス・インディペンデント性が最重要評価項目となっており、標準色空間を1つに絞りたいという要望と軌を一にしている。

5.2 結合評価

表2の結果を表3の重み点数で置き換え、評価対象色空間ごとの総合点数を集計した結果を表4に示す。これから次のような点が、読み取れる。

- ・*CIELAB*が第1位であり、総合得点は、第2位以下を引き離している。各項目別の得点を見ても、上位を占めており、総合的に適していることがわかる。
- ・第2位から第12位までは、重み付けの値が少し変わると順位も変わってしまうような小差であった。
- ・第13位は*CMYK*であるが、デバイス・インディペンデント性の欠如が大きく影響している。

以上の結果をもとに、WG2としては、*CIELAB*をカラーファクシミリに最適な色空間として選定した。

表3 ランクと重み点数
Table 3 Rank vs. Its Weight

ラ ン ク	重み																											
	デバイスイン ディペンデント	量子化誤差		圧縮アルゴリズムとの関係						色空間表現可能範囲	白基準の変化 への対処			XYZとの 変換		入力からの変換	出力への変換		白黒との互換性	他の標準/ 機器との 互換性								
No 1	No 2	画質の主観評価	圧縮復元誤差	圧縮率	可逆圧縮時の 圧縮率	リング対応	サブサン ピング	No 1	No 2	No 3	No 1	No 2	No 3	No 1	No 2	No 1	No 2	No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6	No 7	No 8			
A	96	35	-	34	31	17	8	5	85	27	20	17	38	34	-	35	29	53	9	6	11	6	6	6	9	5		
B	40	-	43	16	10	8	0	0	40	0	13	0	28	16	54	29	22	43	4	3	5	3	3	3	5	2		
C	0	-	-	0	0	0	-	-	0	-	7	-	22	0	44	18	15	32	0	0	0	0	0	0	0	0		
D	-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	0	-	16	-	-	11	9	19	-	-	-	-	-	-	-	-		
E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	-	24	0	0	8	-	-	-	-	-	-	-		
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-		
G	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

表 4 色空間の総合評価結果
Table 4 Total Evaluation Result of Color Spaces

色空間 名称	重み付け結果													総合		
	デバイス ディペンデント	量子化誤差	圧縮アルゴリズムとの関係					色空間表現 可能範囲	白基準の変化 への対処	XYZとの変換	入力からの変換	出力への変換	白黒との互換性	他の標準/機器 との互換性		
			主観評価	画質の 誤差	圧縮復元 圧縮率	可逆圧縮時の リング対応	サブサン ピング対応							総合点	総合点 (正規化)	順位
XYZ	96	13/19	0	0	0	8/0	85	27/20/0	38/34	44	0/9	32	9/0/11/3 13/3/5/2	465	82	4
CIELAB	96	35/43	34	31	8	8/5	85	27/13/17	22/34	24	11/0	53	4/0/11/3 10/0/5/0	569	100	1
CIELAB-P	96	31/38	0	10	0	0/5	85	27/13/17	16/34	9	29/0	53	0/0/0/0/ 0/0/5/0	468	82	2or3
CIELUV	96	31/6	34	31	8	8/5	85	27/0/0	16/16	9	11/0	53	4/6/0/0/ 0/3/0/2	451	79	6
CIELUV-P	96	23/28	0	10	0	0/5	85	27/0/0	11/16	0	29/0	53	0/6/0/0/ 0/0/0/0	389	68	12
CMYK	0	33/41	16	10	17	8/0	85	27/7/17	0/34	0	0/29	8	9/0/11/6 10/0/9/0	367	64	13
NTSC RGB	96	24/24	16	10	0	8/0	85	0/7/17	28/34	44	0/15	0	9/0/11/0 16/6/0/0	439	77	7
CE5-RGB	40	18/21	16	10	0	8/0	85	27/7/17	28/34	44	0/15	0	9/0/11/0 10/0/0/0	391	69	11
RGB Density	40	33/41	16	10	17	8/0	40	27/7/17	22/34	54	0/22	8	9/0/11/3 10/0/5/2	426	75	9
YIQ	96	8/4	34	20	8	8/5	85	0/7/17	28/34	44	11/9	32	9/0/11/0 10/0/0/0	468	82	2or3
YIQ-γ	96	33/41	34	31	17	8/5	0	0/7/17	16/0	24	11/9	43	9/0/11/0 10/6/0/0	418	73	10
YCbCr	40	0/0	34	20	8	8/5	85	27/7/17	28/34	44	11/9	32	9/0/11/0 10/6/0/0	435	76	8
YCbCr-γ	40	32/39	34	31	17	8/5	40	27/7/17	16/0	44	11/9	43	9/6/11/0 10/6/0/0	452	79	5
HSL	40	15/22	0	10	0	0/5	40	27/7/0	16/34	44	18/9	19	0/0/5/0/ 6/0/0/0	317	56	14
Munsell Renotation System	96	27/18	0	10	0	0/5	0	0/7/0	0/0	0	35/0	53	0/0/0/0/ 0/0/0/0	251	44	15

6. 今後の課題

WG2 設立の主な目的である色空間の選定については、1993 年 4~5 月ジュネーブの ITU-T/SG 8 会合で、「カラーファクシミリでは CIELAB をマングトリー(必須)として採用する」ということが正式に認められたので、その責務はほぼ終了したと考えているが、カラーに関係する事項として、その後も以下のような検討を継続している。

(1) 白基準の検討

CIELAB の選定に伴い発生したことで、ディフォルトとして D_{50} を採用することでは ITU-T/SG 8/Q 4 レベルでの合意ができていたが、オプションについては単

に xy のみを定めるのか、 D_{65} , C, etc. というスペクトラムを定めるのかという点で、プロトコルや ODA と関連して検討課題として残っている。

(2) レンジの検討

これも色空間の選定に伴い発生したことで、CIELAB の各軸のレンジのディフォルト値について色空間決定後の 2 回の Q 4 会合で議論され、具体的な数値が既に決定されている。但し、現存のハードコピーのみを対象として決定された値で、CRT などのソフトコピーの場合はどうするかという課題が残されている。

(3) Color Reproduction Information の検討

例えば、新聞紙のような黄色っぽい紙は、そのまま黄色っぽく再現するのか、または、白く再現するのかなど、

単に色情報を送るだけでは済まない問題がいろいろあるということで、黒色点、色域圧縮についての情報を Color Reproduction Information として情報を送るべきであるということについて、Q4 レベルで検討が始まっている。

(4) マルチカラーの検討

これまではフルカラーを前提に話を進めてきたが、2~256 色程度の色数を送付する場合の方式については、これからの課題。ODA でもまだきちんと決められていないという事情もあって、ITU-T では 1994 年 6 月ジュネーブ会合前後から本格的な検討が始まる予定である。

7. む す び

カラーファクシミリ検討会 WG2 における標準色空間の選定方法を説明し、結果として、CIELAB が選定された経緯を報告した。現在、標準化の手続きとしては、CIELAB/D₅₀/ディフォルト・レンジなどの項目を含んだ最初の標準書 T. Continuous Tone Color が、1994 年 6 月の ITU-T ジュネーブ会合で、G4/G3 の Color Extension とともに勧告化の加速手続きにかけられることがほぼ確定するまでに至っている。また、1993 年の ITU-T の中で組織変更に伴い、従来の G4 の中でカラーファクシミリの検討から、「カラーモデル」という Question に変更になったことから、カラーファクシミリ以外の機器に対象が拡大されていく可能性が開けてきた。また、本検討ではカラーファクシミリを対象としたが、評価項目のうち多くがカラーファクシミリに限定されないで、今後、他の機器へ拡張する場合の礎となれば幸いである。

謝 辞 最後に、圧縮との関係を検討する上で貴重な 12 ビット超高精画像データを提供して頂いた NTT 光ネットワークシステム研究所伝送処理研究部小野定康氏に謹んで感謝の意を表します。また、日頃有益な助言を頂く東京工業大学酒井善則教授、並びに NTT ヒューマンインターフェース研究所松木眞氏を始めとするカラーファクシミリ検討会委員各位に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 酒井善則, 池上博章, 小野文孝, 大町隆夫, 松木 眞: “カラーファクシミリ標準化の現状と課題”, 画像電子学会誌, Vol. 21, No. 3, pp. 188-193 (1992).
- 2) 日本色彩学会編: “色彩工学ハンドブック”, 東京大学出版会, 昭和 55 年発行.
- 3) 山崎 徹: “文書の処理と交換における最新動向技術解説特集-5. 文書交換のためのカラー技術”, 画像電子学会誌, 第 20 巻, 第 6 号, pp. 617-622 (1991).
- 4) CCIR Report 624-4, “Characteristics of television systems”, XVIIth Plenary Assembly, Annex to Vol. XI-1, Dusseldorf (1990).
- 5) Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), Colorimetry, 2nd ed., CIE Publication No. 15.2, Central Bureau of the CIE, Vienna (1986).
- 6) Sidney M. Newhall, Dorothy Nickerson and Deane B. Judd: “Final report of the O.S.A. subcommittee on the spacing of the munsell color”, Journal of the Optical Society of America, 33-7, pp. 385-418 (1943).
- 7) 福江, 下田, 坂田: “HSI-RGB 変換に関する諸方式の比較”, 第 1 回色彩工学コンファレンス論文集, pp. 91-94 (1984).
- 8) 杉浦 進, 宇佐美彰浩: “異機種間カラー画像通信における色空間”, 画像電子学会誌, Vol. 22, No. 1, pp. 11-19 (1993).
- 9) David L. MacAdam: Journal of Optical Society of America, Vol. 25, p. 361 (1935-11).
- 10) 日本色彩研究所編: カラーマッチングの基礎と応用.
- 11) 矢口, 他: “照明学会, 色彩情報と色の見え研究調査委員会報告書” (1991).
- 12) Koichi Ikeda, Masaharu Nakayama, Kiyoshige Obara: CIE Proceedings 19th Session (Kyoto), P-7-10, p. 83 (1979).
- 13) N. Ohta: “Practical Transformation of CIE Color Matching Functions”, Color Research and Application, Vol. 7, No. 1, pp. 53-56 (1982).
- 14) R. Luther, “Aus dem Gebiet der Farbreizmetrik”, Zeitschrift für Technische Physik, Nr. 12, pp. 540-558 (1927).
- 15) H. E. Neugebauer, “Quality Factor for Filters Whose Spectral Transmittances are Different from Color Mixture Curves”, and Its Applications to Color Photography”, Journal of Optical Society of America, Vol. 46, No. 10, pp. 821-824 (1956).
- 16) 筑木, 山崎, 池上: 第 5 回色彩工学コンファレンス予稿集, 3-3, p. 55 (1988).
- 17) ISO IEC DIS 10180.
- 18) Post Script Language Reference Manual 第 2 版 (訳); アスキー出版.
- 19) Special Rapporteur On Q. 14 VIII: CCITT SGVIII Geneva 22-30, TD 5007 (1992-04).
- 20) Information Technology—Text Communication—Standard Page Description Language (SPDL).

付録 1

Table 1-1 Evaluation Method of Device Independent

Rank	Criterion	Note
A	No calibration data is necessary to transform to XYZ.	-
B	Several calibration data is necessary to transform to XYZ.	RGB primary and/or gamma in CES-RGB, RGB Density, YCbCr, YCbCr-γ, HSL
C	More than 1000 calibration data is necessary to transform to XYZ.	CMYK & Munsell Renotation System

Table 1-2 Evaluation Method of Device Quantizing Error

Rank	Criterion*1	Note
A	Total $\Delta E \leq 1.2$	-
B	$1.2 < \text{Total } \Delta E \leq 2.5$	-
C	$2.5 < \text{Total } \Delta E \leq 5.0$	-
D	$5.0 < \text{Total } \Delta E \leq 10.0$	-
E	$10.0 < \text{Total } \Delta E$	-

*1 : Japan Color Research Institute: "Classification of permitted color difference" is referred for these criteria.

$$\text{Total } \Delta E = (\Delta E_{\text{rmsab}} \times 3 + \Delta E_{\text{maxab}} \times 1 + \Delta E_{\text{rmsuv}} \times 2.4 + \Delta E_{\text{maxuv}} \times 0.8) / 4$$

Table 1-3 Evaluation Method of Relation with Compression Algorithm No. 1 Image Quality

Rank	Criterion	Note
A	Good image quality	-
B	between A & C	-
C	Poor image quality	-

Table 1-4 Evaluation Method of Relation with Compression Algorithm No. 2 Compression Error

Rank	Criterion*1	Note
A	Total $\Delta E \leq 1.2$	-
B	$1.2 < \text{Total } \Delta E \leq 2.5$	-
C	$2.5 < \text{Total } \Delta E \leq 5.0$	-
D	$5.0 < \text{Total } \Delta E \leq 10.0$	-
E	$10.0 < \text{Total } \Delta E$	-

*1 : Japan Color Research Institute: "Classification of permitted color difference" is referred for these criteria.

$$\text{Total } \Delta E = ((\Delta E_{\text{rmsab}}(0.5\text{bpp}) + \Delta E_{\text{rmsab}}(1.0\text{bpp})) \times 1 + (\Delta E_{\text{rmsuv}}(0.5\text{bpp}) + \Delta E_{\text{rmsuv}}(1.0\text{bpp})) \times 0.8) / 4$$

Table 1-5 Evaluation Method for Relation with Compression Algorithm No. 3 Compression Rate

Rank	Criterion*1	Note
A	$R \leq 8.0$	-
B	$8.0 < R \leq 9.0$	-
C	$9.0 < R$	-

*1 : R is compression ratio (bit/pixel)

Table 1-6 Evaluation Method of Relation with Compression Algorithm No. 4 Sub-Sampling No. 1 Sub-sampling Hardware

Rank	Criterion	Note
A	Rectangular coordinate	Others
B	Polar coordinate	CIELAB-P, CIELUV-P, HSL, Munsell Renotation System

Table 1-7 Evaluation Method of Relation with Compression Algorithm No. 4 Sub-Sampling No. 2 Image Quality

Rank	Criterion	Note
A	Chrominance axes are independent of Luminance axis.	Others
B	There are no independent chrominance axes from Luminance axis.	XYZ, YMCK, NTSC RGB, CES-RGB, RGB Density

Table 1-8 Evaluation Method of Ability to Represent all Visible Colors

Rank	Criterion	Note
A	Able to represent all visible colors	Able to represent in CMYK, NTSC RGB and YIQ, because negatives are permitted
B	Sometimes unable to represent all visible colors	Sometimes unable to represent in RGB Density and YCbCr- γ , because Log/gamma transformation is impossible in the case of arbitrary RGB including negatives. It depends on RGB primary.
C	Unable to represent all visible colors	Unable to represent in YIQ- γ because gamma transformation is impossible in the case of arbitrary RGB including negatives, and in Munsell Renotation System because there are visible colors which have no entries in the transformation table between XYZ and Munsell Renotation System

Table 1-9 Evaluation Method of Color Stability with White Point Change No. 1

Rank	Criterion	Note
A	white point description is possible	Others
B	white point description is impossible	NTSCRGB, YIQ, YIQ- γ and Munsell Renotation System are defined only by C

Table 1-10 Evaluation Method of Color Stability with White Point Change No. 2

Rank	Criterion*1	Note
A	Total $\Delta E \leq 0$	-
B	$0.0 < \text{Total } \Delta E \leq 20.0$	-
C	$20.0 < \text{Total } \Delta E \leq 30.0$	-
D	$30.0 < \text{Total } \Delta E$	-

*1: Total $\Delta E = ((\Delta E_{\text{rmsab}}(C) + \Delta E_{\text{rmsab}}(D50)) \times 1 + (\Delta E_{\text{rmsuv}}(C) + \Delta E_{\text{rmsuv}}(D50)) / \times 0.8) / 4$

Table 1-11 Evaluation Method of Color Stability with White Point Change No. 3

Rank	Criterion*1			Note
	Normalized Difference*1	Difference of Normalized Differences*2	Correlation Coefficient of Normalized Distance*3	
A	Total $\Delta D \leq 15$	Total $\Delta D \leq 15$	Total $R^2 \leq 0.980$	-
B	$15 < \text{Total } \Delta D$	$15 < \text{Total } \Delta D$	$0.980 < \text{Total } R^2$	-

*1: Total $\Delta D =$

$$((\Delta D_{\text{rms}}(\text{Print}) + \Delta D_{\text{rms}}(\text{Photo})) \times 3 + (\Delta D_{\text{max}}(\text{Print}) + \Delta D_{\text{max}}(\text{Photo})) / \times 1) / 4$$

*2: Total $\Delta D = ((\Delta D_{\text{rms}}(\text{Print}) + \Delta D_{\text{rms}}(\text{Photo})) \times 3 + (\Delta D_{\text{max}}(\text{Print}) + \Delta D_{\text{max}}(\text{Photo}) - \Delta D_{\text{min}}(\text{Print}) - \Delta D_{\text{min}}(\text{Photo})) / \times 1) / 4$

*3: Total $R^2 = (R^2(\text{Print}) + R^2(\text{Photo})) / 2$

Table 1-12 Evaluation Method of Transformation form XYZ

Rank	Criterion		Note
	Hardware for Transformation from XYZ	Hardware Size Example	
A	None		-
B	3×3 Matrix or equivalent circuit	Adder $\times 6$ + Multiplier $\times 9$	-
C	[1-Dimentional LUT $\times 3$] + [3 $\times 3$ Matrix] or equivalent circuit	Adder $\times 6$ + Multiplier $\times 9$ + 256 Byte Memory $\times 3$	[1-D LUT $\times 3$] + [3 $\times 3$ Matrix] are enough for CIELAB transform..
D	[3 $\times 3$ Matrix] + [1-Dimentional LUT $\times 3$] + [3 $\times 3$ Matrix] or equivalent circuit	Adder $\times 12$ + Multiplier $\times 18$ + 256 Byte Memory $\times 3$	Transform. from polar to rectangular causes one rank down from LCIEAB to CIELAB-P. CIELUV transform. needs one ranked more complex circuit from CIELAB.
E	[1-Dimentional LUT $\times 3$] + [3 $\times 3$ Matrix] + [1-Dimentional LUT $\times 3$] + [3 $\times 3$ Matrix] or equivalent circuit	Adder $\times 12$ + Multiplier $\times 18$ + 256 Byte Memory $\times 6$	Transform. from polar to rectangular causes one rank down from LCIEUV to CIELUV-P.
F	Between E and G	Between E and G	-
G	Table refer or equivalent circuit	Max. 50M Byte Memory	Table refer is needed in YMCK and Munsell

Table 1-13 Evaluation Method of Transformation to XYZ

Rank	Criterion	Note
A	All data can be transformed to XYZ	-
B	Some point cannot be transformed to XYZ	In CIELUV and CIELUV-P, $L^* = 0, u^* \neq 0, v^* \neq 0$ is not able to be transformed to XYZ.
C	Some area cannot be transformed to XYZ	In YIQ- γ and YCbCr- γ , RGB values before inverse gamma transformation of some area are negatives. In Munsell, the colors out of table cannot be transformed to XYZ.

Table I-14 Evaluation Method of Transformation from Input Device Color Space

Rank	Criterion		Note
	Hardware for Transformation from XYZ	Hardware Size Example	
A	None		-
B	3 × 3 Matrix or equivalent circuit	Adder × 6 + Multiplier × 9	-
C	[1-Dimensional LUT × 3] + [3 × 3 Matrix] or equivalent circuit	Adder × 6 + Multiplier × 9 + 256 Byte Memory × 3	-
D	[3 × 3 Matrix] + [1-Dimensional LUT × 3] + [3 × 3 Matrix] or equivalent circuit	Adder × 12 + Multiplier × 18 + 256 Byte Memory × 3	-
E	[1-Dimensional LUT × 3] + [3 × 3 Matrix] + [1-Dimensional LUT × 3] + [3 × 3 Matrix] or equivalent circuit	Adder × 12 + Multiplier × 18 + 256 Byte Memory × 6	{[1-D LUT × 3] + [3 × 3 Matrix]} × 2 are enough for CIELAB transformation.
F	Between E and G	Between E and G	Transform. from polar to rectangular causes one rank down from LCIEAB to CIELAB-P. CIELUV transform. needs one ranked more complex circuit from CIELAB. HSL transformation is done by [1-D LUT × 3] + [3 × 3 Matrix] + [1-D LUT × 3] + some additional circuit.
G	Table refer or equivalent circuit	Max. 50M Byte Memory	Table refer is needed in YMCK and Munsell

Table 1-15 Evaluation Method of Transformation to Output Device No.1 Gamut Mapping & Color Adjustment

Rank	Criterion		Note
	Color Space Coordinate	Hardware for Transformation from HVC	
A	HVC coordinate (polar) & very accurate hue	-	Munsell
B	HVC coordinate (polar) & accurate hue	-	CIELAB-P and CIELUV-P
C	HVC coordinate (polar) & non-accurate hue	-	HSL
D	V and 2 chrominance (rectangular coordinate)	Rectangular to polar	CIELAB,CIELUV,YIQ,YIQ- γ , YCbCr,YCbCr- γ
E	No chrominance axis	Rectangular to polar & the other	Others

Table 1-16 Evaluation of Transformation to Output Device. No.1 Transformation to YMCK without Accurate Color Correction

Rank	Criterion		Note
	Hardware for Transformation to YMCK without Color Correction	Hardware Size Example	
A	None	-	YMCK
B	Some UCR	UCR circuit	RGB Density
C	[1-Dimentional LUT $\times$ 3] + some UCR	256 Byte Memory $\times$ 3 + UCR circuit	NTSC RGB, CIE-RGB
D	[3 $\times$ 3 Matrix] + [1-Dimentional LUT $\times$ 3] + some UCR or equivalent circuit	Adder $\times$ 6 + Multiplier $\times$ 9 + 256 Byte Memory $\times$ 3 + UCR circuit	XYZ,YIQ,YIQ- γ , YCbCr,YCbCr- γ ,HSL
E	More Complex than D	-	Others

Table 1-17 Evaluation Method of Compatibility with Black and White

Rank	Criterion		Note
	Luminance Axis	Linellity to Eye Characte-ristics	
A	Yes	Linear	L in cielab, cielab-P, cieluv, cieluv-p and v in munsell are linear to eys charcteristics
B	Yes	Semi-linear	Y in YIQ- γ and YCbCr- γ is semi-linear to eys charcteristics
C	Yes	Non-linear	Y in xyz, YIQ, YCbCr is linear to reflectance
D	Yes/No (Semi-Luminance Axis)	-	L in HSL is not a luminance exactly, but similar to luminance
E	No	Semi-linear	M in CMYK and G dens. in RGB Dens. are semi-linear to eys charcteristics
F	No	Non-linear	G in NTSC RGB and CES-RGB is linear to reflectance

Table 1-18 Evaluation Method of Compatibility with the other Standards or Instruments

Rank	Criterion	Note							
		ODA	Video Tex	SPDL /Post-script	Printing	CG	TV	Hard Copy	Photo-graphy
A	Primaly used in the other Standards or Instruments	Other	CIELUV -P, CMYK, YCbCr - γ	Other	CMYK	NTSC RGB, HSL	NTSC RGB, YIQ- γ , YCbCr - γ	CMYK	NO
B	sometimes used in the other Standards or Instruments	CIELUV	NO	HSL	XYZ, CIELAB, RGB Dens.	XYZ	XYZ, CIELUV	XYZ, CIELAB, CIELAB -P, RGB Dens.	XYZ, CIELUV, RGB Dens.
C	Not so used in the other Standards or Instruments	CIELAB/L UV-P, HSL, Munsell	Other	CIELAB/L UV-P, Munsell	Other	Other	Other	Other	Other

付録 2

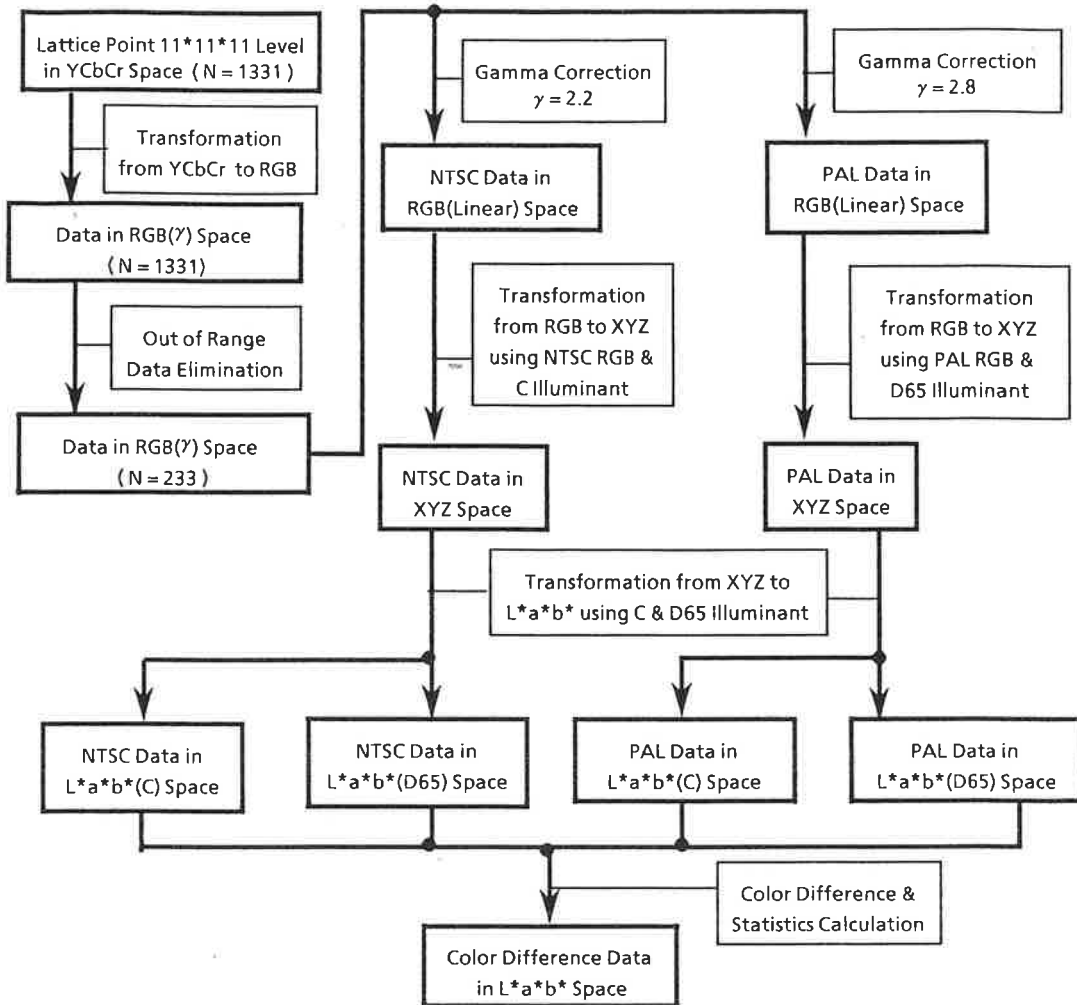


Fig. 2-1 ΔE Calculation Method between $YCbCr$ (NTSC) & $YCbCr$ (PAL)

Table 2-1 ΔE Calculation Results between $YCbCr$ (NTSC) & $YCbCr$ (PAL)

	Illuminant	ΔE	NTSC $L^*a^*b^*$	
			C	D65
PAL $L^*a^*b^*$	C	rms**	18.2	18.5
		max	44.8	41.6
	D65	rms	19.3	18.4
		max	48.9	45.6

$$N = 233, \Delta E_{rms} = \text{SQRT}(\sum \Delta E^2 / N)$$

付録 3

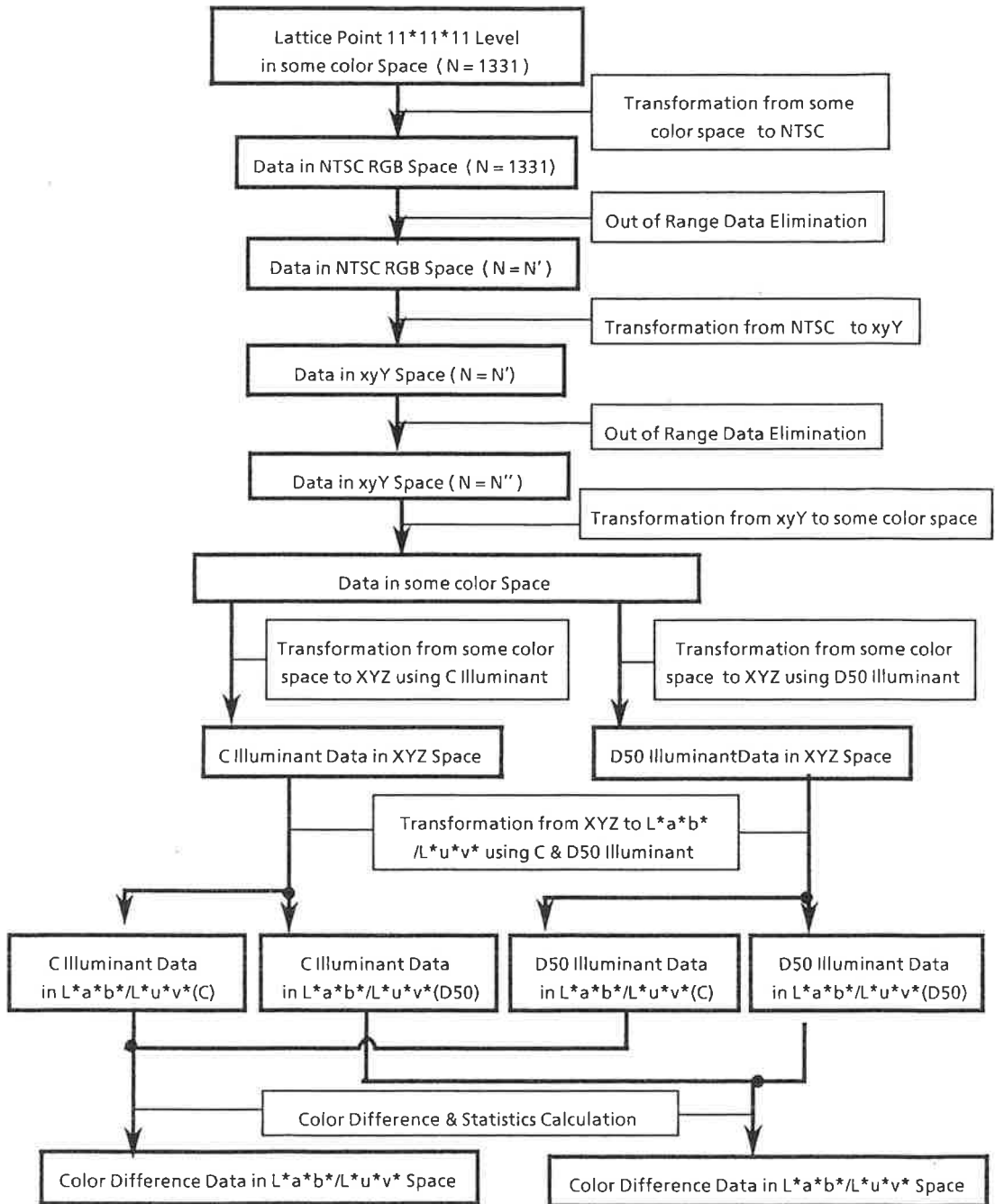


Fig. 3-1 ΔE Calculation Method of Color Stability with White Point Change No. 2

Table 3-1 Evaluation Results for Color Stability with White Point Change No.2

Color Space Name	Ranked Value	L*a*b*ΔE between C & D50				
		L*a*b*		L*u*v*		Total
		C	D50	C	D50	
XYZ	A	0.0(20.08)		0.0(28.01)		0.0
CIELAB	B	14.03	15.79	20.79	20.79	15.77
CIELAB-P	B	Same as CIELAB				
CIELUV	D	37.19	47.21	23.90	23.90	30.66
CIELUV -P	D	Same as CIELUV				
CMYK	(C)	Assumed the same as RGB Density				
NTSC RGB	(C)	Assumed the same as CES-RGB				
CES-RGB	C	18.34	20.52	28.27	28.22	21.01
RGB Density	C	17.48	19.61	27.89	28.05	20.46
YIQ	(C)	Assumed the same as YCbCr				
YIQ-γ	(C)	Assumed the same as YCbCr-γ				
YCbCr	C	Same as RGB Density				
YCbCr-γ	C	Same as RGB Density				
HSL	C	Same as RGB Density				
Munsell Renotation System	(C)	Assumed the same as the average of CIELAB-P & CIELUV -P				

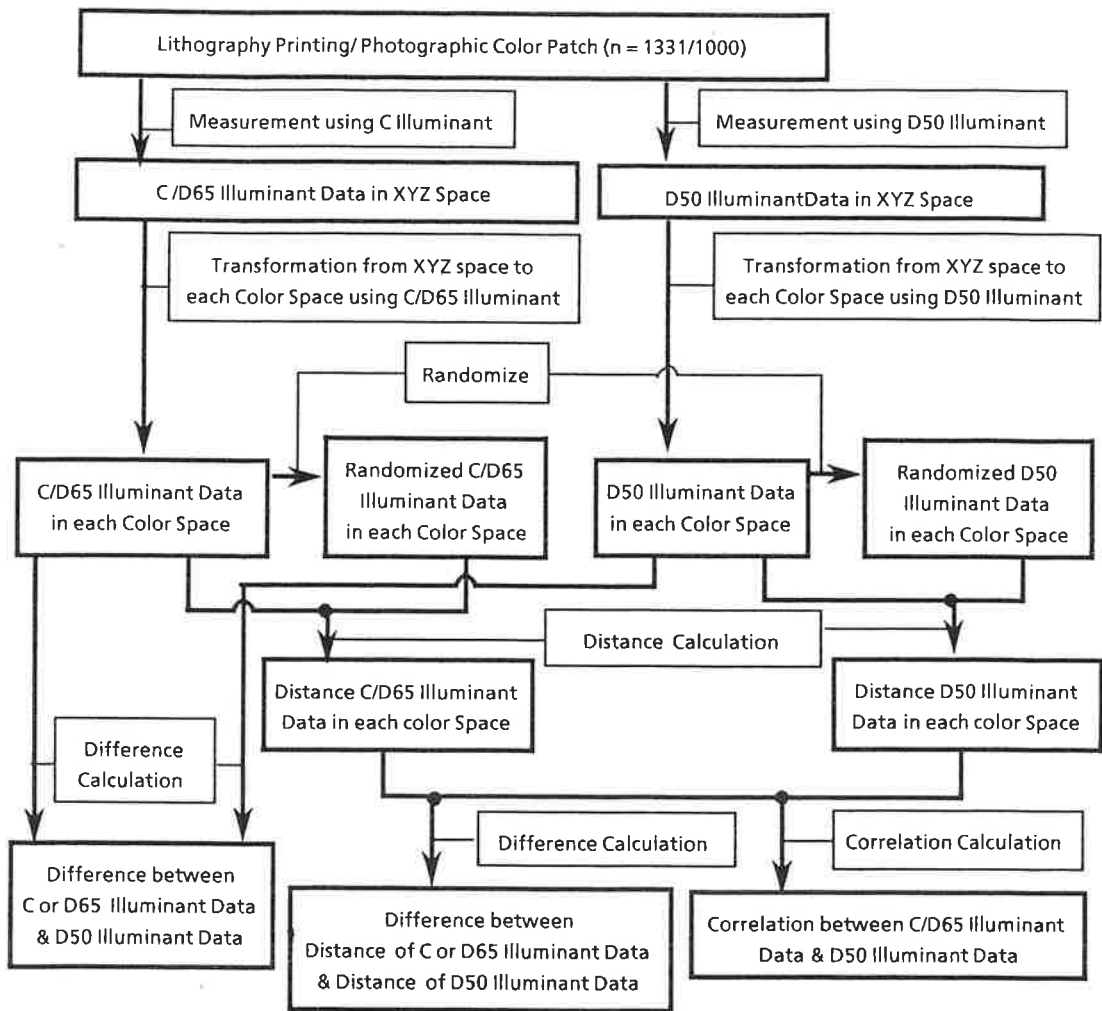


Fig. 3-2 Correlation Calculation Method of Color Stability with White Point Change No. 3

Table 3-2 Evaluation Results Color Stability with White Point Change No. 3

Color Space Name	Rank-ed Value	Normalized Difference*1			Difference of Normalized Distances*1				[Correlation Coefficient]**2 between Normalized Distances	
		Max	RMS	Total	Min	Max	RMS	Total	Each*1	Total. (Ave.)
XYZ	B	59.00 43.75	18.32 12.93	49.13	-44.54 -36.84	9.56 11.64	11.50 9.18	41.16	0.945 0.972	0.959
CIELAB	A	14.07 7.70	4.57 3.42	11.43	-6.10 -5.84	13.71 9.62	3.50 2.68	13.45	0.980 0.993	0.987
CIELAB-P	A	Same as CIELAB								
CIELUV	B	27.48 18.36	9.13 6.82	23.42	-26.00 -20.60	11.20 12.79	7.30 5.27	27.08	0.933 0.979	0.956
CIELUV-P	B	Same as CIELUV								
CMYK	(A)	Assumed the same as RGB Density								
NTSC RGB	(A)	Assumed the same as CES-RGB								
CES-RGB	A	8.28 6.69	3.07 2.46	7.89	-3.22 2.72	9.65 7.60	2.71 2.27	9.53	0.998 0.999	0.999
RGB Density	A	14.37 4.87	1.91 1.77	7.57	-11.27 -2.33	12.13 6.13	1.73 1.47	10.37	0.995 0.998	0.997
YIQ(linear)	(A)	Assumed the same as YCbCr								
YIQ- γ	(A)	Assumed the same as YCbCr- γ								
YCbCr	A	5.02 5.10	1.67 2.11	5.37	-5.20 -9.47	3.36 6.55	1.31 2.11	8.71	0.998 0.998	0.998
YCbCr- γ	A	5.80 6.47	1.64 2.54	5.16	-6.57 -1.45	3.03 8.24	1.35 2.40	7.64	0.998 0.997	0.998
HSL	(B)	Assumed the same as the average of CIELAB-P & CIELUV-P								
Munsell Renotation System	(B)	Assumed the same as the average of CIELAB-P & CIELUV-P								

*1 : Upper is the lithography print data and lower is the photography data.

池上博章 (正会員)



昭48, 早稲田大学理工学部応用物理学科卒。昭50, 同大学院修士課程修了。同年, 富士ゼロックス(株)入社。同社品質保証部での画質評価法の開発を経て, 現在, 同社画像技術研究所にてカラー画像処理の研究に従事。日本光学会, 照明学会, 各会員, カラーファクシミリ検討会WG2主査。

花村剛 (正会員)



昭63, 早稲田大学理工学部電子通信科卒。平5, 同大学院博士後期課程修了。平4, 同大助手。平6, 早稲田大学理工学部総研・客員研究員。主に動画像符号化, ドキュメント・アーキテクチャ, ビジュアル・コミュニケーションなどの研究に従事。工学博士。電子情報通信学会, IEEE, 情報処理学会, テレビジョン学会, 各会員。本学会編集委員, テレマティクス研究専門委員会委員, カラーファクシミリ検討会委員 (WG2)。

会津昌夫



昭55, 電気通信大学電気通信学部経営工学科卒。昭57, 東京工業大学大学院システム科学専攻修士課程修了。同年, 大日本印刷(株)中央研究所入所。現在, 同社画像研究所にて色彩工学, 印刷用画像処理, 印刷用画像符号化の研究に従事。平5, 東京大学大学院電子工学専攻博士課程に在職のまま入学。電子情報通信学会, テレビジョン学会, IEEE, 各会員。画像電子学会カラーファクシミリ検討会委員 (WG2)。

山田修



昭62, 千葉大学工学部画像工学科卒。平1, 同大学院工学研究科画像工学専攻修士課程修了。同年, キヤノン(株)入社。現在, 製品技術開発センターにおいて画像処理, 色再現の研究・開発に従事。画像電子学会カラーファクシミリ検討会委員 (WG2)。

遠藤博之



昭57, 豊橋技科大学工学部情報工学科程卒。昭59, 同大学院修士課程修了。同年, 富士通(株)入社。現在, 同社にて印刷用画像処理の研究・開発に従事。電子情報通信学会会員。画像電子学会カラーファクシミリ検討会委員 (WG2)。

石川安則 (正会員)



昭52, 東京大学工学部計数工学科卒。昭57, (株)リコー入社。ワークステーション, カラーファクシミリ, カラーコピーの開発, 画像処理・画像符号化の研究・開発に従事。電子情報通信学会, テレビジョン学会, 各会員, カラーファクシミリ検討会委員 (WG2)。

金森克洋 (正会員)



昭59, 早稲田大学理工学部応用物理学科卒。昭61, 同大学院修士課程修了。同年, 松下電器産業(株)入社。松下技研(株)にてカラー画像処理, 色空間変換アルゴリズムなどの研究・開発に従事。平4, IS&T Journal Honorable Mention受賞。電子情報通信学会会員。画像電子学会カラーファクシミリ検討会委員 (WG2)。

加藤直哉



昭62, 京都大学工学部精密工学科卒。同年, ソニー(株)入社。新規プリンターの研究・開発に従事。平3より平4まで, アメリカ・ロチェスター工科大学, マンセル色彩科学研究室にて色彩工学を学ぶ。以後, 異種メディアにおける見えのモデリングを中心とした色彩画像処理の研究に従事。電子写真学会, 日本色彩学会, IS&T, 各会員。画像電子学会カラーファクシミリ検討会委員 (WG2)。

洪博哲



昭56, 早稲田大学理工学部電気工学科卒。昭58, 同大学院修士課程修了。同年, 小西六写真工業(株)(現・コニカ(株))入社。ビデオプリンタの設計・開発を経て, 現在, 異種メディア間の色再現の研究に従事。平1〜平3, アメリカ・ロチェスター工科大学研究員。以後, 画像評価・画像処理の研究に従事。画像電子学会カラーファクシミリ検討会委員 (WG2)。

木下宏揚



昭60, 電気通信大学電気通信学部電子情報学科卒。平2, 東京工業大学大学院博士課程修了。同年, 東工大助手。画像工学, 情報セキュリティの研究に従事。電子情報通信学会会員。画像電子学会カラーファクシミリ検討会委員 (WG2)。