

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	印刷画像の表色定量評価に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	関晴之
Author(English)	Haruyuki Seki
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9180号, 授与年月日:2013年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小杉 幸夫
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9180号, Conferred date:2013/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

## 論文要旨

論文題目： 印刷画像の表色定量評価に関する研究

本論文は全 6 章から構成され、以下に各章の要約を述べる。

第 1 章 「序論」では本研究の背景および意義について述べる。昨今の LED 照明の急速な普及に伴って生じた、カラー画像データ交換時に照明光源と色再現が同時に異なる状況での再現印刷画像の表色不一致の問題を指摘し、本研究の目的を、従来の評価に替わり光源と色再現双方をパラメータとして同時同一の方法で取得された分光データに基づく定量評価方法の提案とし、ハイパースペクトルセンサを用いた精緻な分光データを用いた提案方法による表色定量評価実験を行い、その結果を主観評価実験で検証する。

第 2 章 「光源の演色性評価方法の検討」では、現在 CIE（国際照明委員会）が定めた光源の演色性評価方法で用いられている CRI（演色評価数）を表色環境構築の基準として用いる実態に対して、その問題点とその解決方法について検討し第 3 章以下の関連する課題への位置づけを明らかにする。CRI は単一の試験色の異光源下での表色ずれを評価するものであって、異光源下での元色と再現色間の色差の相違を評価対象としたものではなく、本研究の主要な背景であるカラー画像データ交換時に照明光源と色再現が同時に異なる実態に即したのではないことを指摘し、問題解決に向けて、光源と色再現双方から定量評価方法の導入の必要性について述べ、さらに本研究提案方法と CRI との併用についてもその有効性を検討する

第 3 章 「色差を用いた表色評価法の提案と検討」では、はじめに本論文のテーマである印刷画像の表色定量評価に際して、異光源下での元色と再現色間の色差の相違を評価対象とする新しい評価指標を提案し、評価指標を求める色票間もしくは光源間での色差およびすべての表色評価の基礎データとなる分光測色方法と取得データの処理方法および評価指標値の計算方法について述べる。特に、定量評価方法として分光データ取得に優れた特徴を有するハイパースペクトルセンサを導入し、得られたデータから換算した  $CIE L^*a^*b^*$  均等色空間色値に基づく表色評価指標値による評価比較方法を提案する。また本研究の測色方法の精度と汎用性についての検証を行う。本章では、さらに提案する表色評価指標に至る検討過程で特にその基礎となる分光色差についての検討を加え、最適な実験方法と処理方法を提案し、提案方法に基づいた予備実験を行い、データ取得、データの正規化処理、 $CIE L^*a^*b^*$  均等色空間色値への展開を行い最終的な測色精度について検証する。

第 4 章 「定量評価結果と主観評価実験によるその検証」では、異光源下での印刷画像の表色定量評価実験と主観評価実験を行い、両者の結果を比較・検証する。定量評価実験では昨今、高効率、長寿命などの特徴により普及が著しい LED 光源を試験用光源として用いる。LED 光源は分光放射輝度特性の異なる照明環境間でのカラー画像データ交換時に、従来の白熱電球や蛍光灯などの光源に比べて数倍に及ぶ分光的色差を生じ、忠実な表色を損なっていると考えられる。このような現在の実態に即し、試験用光源には現在市販され

ている 11 種の LED 光源を使用することとし提案方法に基づく定量評価実験結果を被験者 15 名についての主観評価実験により検証し、提案した定量評価の結果が主観評価と矛盾のないことを明らかにする。

第 5 章 「異光源下での表色定量評価方式の提案」では、本論文研究内容の実験結果、分析結果および研究成果に基づいた印刷画像の表色定量評価についての具体的な方法と内容を確認するとともに、本研究過程で得られた問題解決軽減のための具体的な研究成果である光源の分光放射輝度分布、あるいは色再現分光反射率分布の調整のために有効な着目点およびその指標の提案を行う。さらに関連するイメージング機器の開発に際して、現在イメージング機器開発現場で大きな負担となっている主観評価の方法について本研究を通じて獲得した正確で効率よく安全な評価方法の提案を行い、より多くの成果を得るための示唆も併せて行う。

第 6 章 「結論」では、全体を総括し、本研究の成果をまとめ成果に基づく評価標準化に向けての提案と実応用実装への可能性を展望する。特に、イメージング機器内に実装され、自律してその表色条件に合致した画像出力得る方式についての具体的な示唆を行い、画像再生環境での照明光源の分光放射輝度分布の相違の影響を受けにくいイメージング機器の実現を展望する。

## 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b> .....	7
1.1	研究テーマと背景.....	8
1.1.1	はじめに.....	8
1.1.2	表色の不一致.....	9
1.1.3	問題の背景にある 3 つの要因.....	12
	(1)プリンタの再現色域の拡大.....	12
	(2)文書配布方法の変遷.....	13
	(3)LED 照明の普及.....	15
1.1.4	メタメリズム(Matamerism).....	15
1.1.5	印刷画像の表色評価まとめ.....	16
1.2	既存研究事例.....	17
1.2.1	はじめに.....	17
1.2.2	忠実色再現の研究例.....	17
1.2.3	分光的解析によるメタメリズム低減.....	18
1.3	本論文の構成.....	18
1.4	第 1 章参考文献.....	21
<b>第 2 章</b>	<b>光源の演色性評価方法の検討</b> .....	23
2.1	CIE,JIS の光源の演色性評価.....	24
2.2	現状の光源の演色性評価の問題点と課題.....	27
2.3	第 2 章のまとめ.....	28
2.4	第 2 章参考文献.....	28
<b>第 3 章</b>	<b>色差を用いた表色評価法の提案と検討</b> .....	31
3.1	印刷画像の表色定量評価指標への提案.....	32
3.2	色差についての検討.....	33
3.2.1	単純なスペクトル差による色差.....	33
3.2.2	三刺激値を加味した色差.....	34
3.2.3	CIEL*a*b*均等色空間での色差.....	41
3.2.4	色差表現提案.....	41
3.3	データの取得と処理 (ハイパースペクトルセンサ導入, 正規化) .....	45

3.3.1	ハイパースペクトルセンサ	45
3.3.2	定量評価のためのデータの処理	46
3.4	予備実験：データの取得，処理，指標値と色差の精度検証	48
3.4.1	予備実験	48
3.4.2	取得データの検討	50
3.4.3	付随的成果（植物繊維，水分含有）	57
3.4.4	単純なスペクトル差と三刺激値を加味した提案色差比較	58
3.4.5	提案手法の評価	59
3.4.6	本研究測定方法の精度と汎用性の検証	59
3.5	第3章のまとめ	73
3.6	第3章参考文献	74
<b>第4章</b>	<b>定量評価結果と主観評価実験によるその検証</b>	<b>75</b>
4.1	定量評価実験	76
4.1.1	定量評価実験の目的	76
4.1.2	定量評価実験実施内容	78
4.1.3	試験用 LED 光源（特徴，仕様）	79
4.1.4	LED 光源の仕組み	80
4.1.5	試験用 LED 光源の分光放射輝度分布	81
4.1.6	定量評価実験結果	82
4.1.7	結果分析	88
4.2	主観評価実験	90
4.2.1	主観評価実験の目的	90
4.2.2	主観評価実験実施内容	90
4.2.3	主観評価実験結果	93
4.3	第4章のまとめ	94
4.4	第4章参考文献	95
	（第4章付録）	97
	Fig.4-A: 全試験光源下での色票#1と#2間各色票色の平均色差と提案表色評価指標値	98
	Fig.4-B: 疫学研究等倫理審査実施申請書	99
	Fig.4-C: 主観評価実験案内文	100
	Fig.4-D-1: 主観評価実験被験者募集要項（1/2）	101
	Fig.4-D-2: 主観評価実験被験者募集要項（2/2）	102
	Fig.4-E: 主観評価実験被験者同意書式	103
	Fig.4-F: 主観評価実験被験者同意書撤回書式	104

<b>第 5 章 異光源下での表色定量評価方式の提案</b> .....	105
5.1 データの取得と処理に関する提案.....	106
5.1.1 データの取得に関する提案.....	106
5.1.2 データの処理に関する提案.....	106
5.2 表色評価指標に関する提案.....	108
5.2.1 表色評価に用いた基準色票.....	108
5.2.2 表色評価指標を求める処理手順.....	108
5.3 問題解決改善への示唆提案.....	110
5.3.1 光源の分光放射輝度分布の偏在.....	110
5.3.2 色再現の分光反射率分布の偏在.....	112
5.4 第 5 章参考文献.....	117
<b>第 6 章 結論</b> .....	119
6.1 結論.....	120
6.2 今後の展望.....	122
6.2.1 自律型機器組み込み型分光測色手段の開発.....	122
6.2.2 分光的なカラーマッチング用 LUT 選択アルゴリズム開発.....	123
6.3 第 6 章参考文献.....	125
<b>謝辞</b> .....	126
<b>著者略歴</b> .....	127
<b>関連業績</b> .....	128



# 第 1 章

# 序論

## 第1章 序論

### 1.1 研究テーマと背景

#### 1.1.1 はじめに

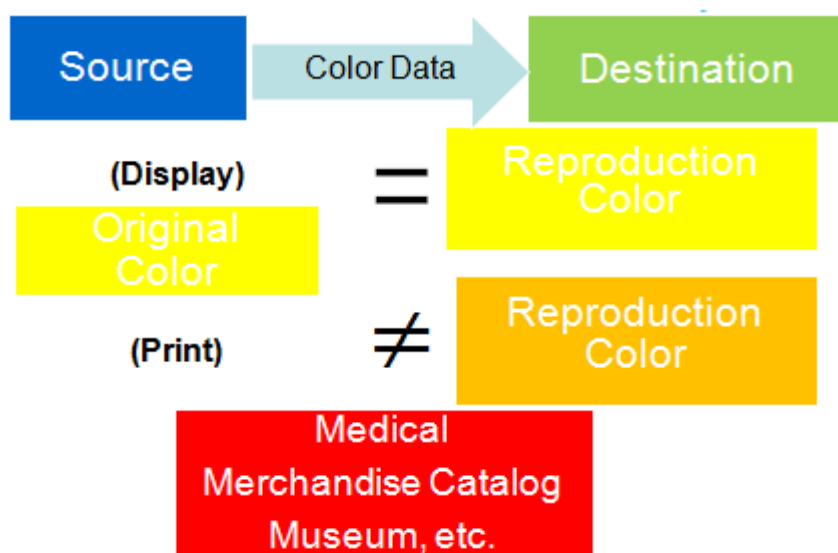
カラープリンタ製品が一般に導入されて約 20 年が経過した。特にインクジェット方式を用いたカラープリンタ装置は、インクや印刷用紙などの印刷材料の性能向上、液滴を吐出するプリンタ装置内のノズル性能の向上による印刷画像画素の微細化、半導体製造技術の向上および応用技術の進化によるプリンタ装置コントロール系の高機能化、カラー画像処理技術の向上によって、いわゆる写真画質と呼ばれるような高精彩な表現が可能になった。勿論この間の製品の低価格化も大きく進展して一般にプリンタ装置と言えばカラーと言われるまでに普及している。

プリンタ装置に関して、市場や顧客の要求は常に高性能化と低価格化を要求し、多大な開発努力が関連する機器開発サイドで行われているが、表現色域の拡大によって得られた高精彩カラープリンタの高忠実表色について、更にはその表色における分光的表色性についてはその評価方法を含めて、意外にも取り組みの内容や歴史が乏しい。一つには、各関連機器を製造販売する企業の表色に対する姿勢の中に、「正確な色」より「好ましい色」の方が良く売れる商品という認識があった。結果として、特定メーカーの製品は肌色が美しいとか、緑色が自然であるというまさに前代の銀塩写真材の供給メーカー間による「色の違い」の様に表色の正確さとは異なる競争状態が生まれつつあったが、近年になり次項に述べる様な再現表色環境の急激な変化が、否応なしにプリンタ装置の正確な表色に関する課題を浮き上がらせている。

本研究では、プリンタ装置の正確な表色性能の向上のために、実践的な性能評価方法として応用できる定量的で分光的な評価方法として、関連する機器開発の現場でのカラーマッチング工程等に応用できるような方法の導入を提案し、さらに主観評価によって定量評価結果を検証し、機器開発の効率化に直接貢献出来る方式の確立を目指した。同時に、定量評価過程から得られる問題解決のヒントや、付随的に得られる関連情報について注意深く拾い上げて研究の成果とし、今後の実応用に還元することも本研究の目的である。

### 1.1.2 表色表色の不一致

近年、省エネルギーに対する社会的意識が高揚する中で効率、寿命、応答性などで優れた特徴を有するLED照明に代表されるような新しい照明方法が急激に普及しているが、それらの持つ分光放射輝度分布は従来の蛍光灯などの光源の分光放射輝度分布と大幅に異なっている。一方、電子的な情報交換手段の発達普及によりカラー画像データを交換する機会が急増しているが、とりわけ正確な表色が必要とされる医療、商品見本、美術、学術などの分野では分光放射輝度分布の異なる異光源下での印刷画像の表色不一致が深刻な問題を起こしており早急な対策が必要である<sup>[1-5),1-13]</sup>。



**Fig. 1-1, Different Color Appearance between Source and Destination.**

自発光するディスプレイ装置と異なり、プリンタの出力画像は再現環境の照明の影響を受けるので、表色不一致の問題が生じる。

一般に物体色の三刺激値は、国際照明委員会、CIE XYZ (1931)により式(1-1,1-2)のように定義されている。

$$X, Y, Z = K \int_{\lambda=380}^{780} S(\lambda) R(\lambda) \bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (1-1)$$

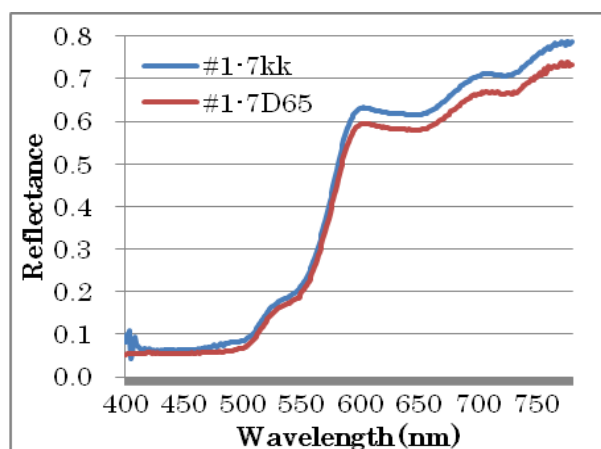
$$K = \frac{100}{\int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} \quad (1-2)$$

ここで、 $X, Y, Z$  は三刺激値、 $S(\lambda)$  は光源の分光放射輝度値、 $R(\lambda)$  は物体分光反射率、

## 第1章 序論

$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$  は CIE1931XYZ 表色系における等色関数（標準比視感度関数）である。表色は光源の分光放射輝度分布と物体分光反射率分布の両方に影響されることがわかる。厳密な表色一致には、再現側の光源の分光放射輝度と再現物体色の分光反射率を一致させる必要があるが、多くの場合これを実現するには大きな困難が伴う。現在、関連するイメージング機器開発のカラーマッチング工程の実態としては刺激値直読み法による評価が多く、分光測色法による評価を加味して製品に反映させている例は少ない。しかし今後 LED 光源をはじめ新しい原理や構造による光源の変遷が予測される中で、分光的解析を関連イメージング機器開発における色評価に応用する方法についての検討、提案、実験、検証、分析、および解決の方向性を見出すことは急務である。

**Fig. 1-2-2**, 標準色票グレッタグマクベスカラーチェッカ<sup>TM, 1-1)</sup> (以下カラーチェッカと呼称) の色票色 Orange の, 標準光源 D65 下と本研究での試験用 LED 光源 kk 下における正規化した分光反射率分布を示す。Fig. 1-2-2 から Fig. 1-2-4 には分光反射率に等色関数をかけて求めた, 三刺激値 X,Y,Z のそれぞれの値を示す。異光源間での表色が比較的安定しているとされるカラーチェッカでも, 光源間でこれだけの刺激値差が生じ, 表色不一致の問題が生じている実態が分かる。



**Fig. 1-2-1 #1-7 Orange reflectance (normalized).**

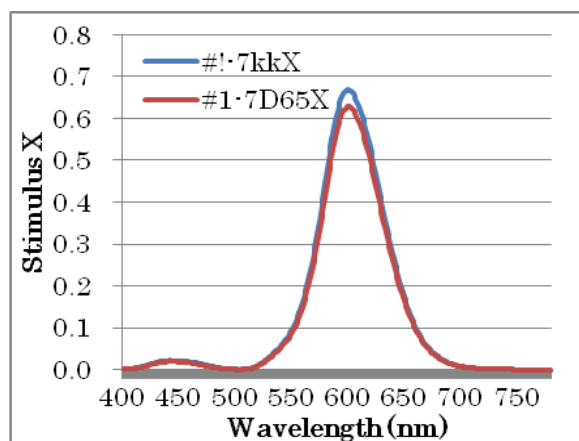


Fig. 1-2-2 #1-7 Orange Stimulus X.

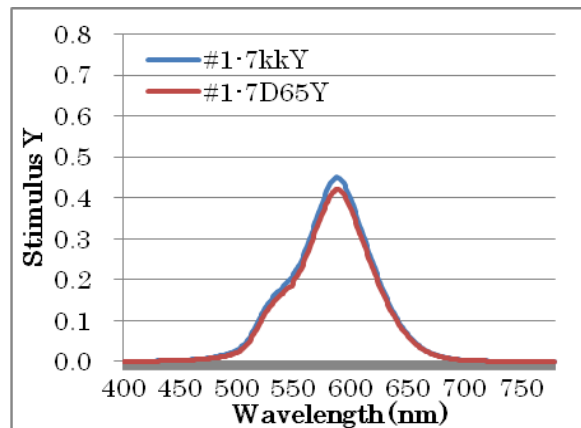


Fig. 1-2-3 #1-7 Orange Stimulus Y

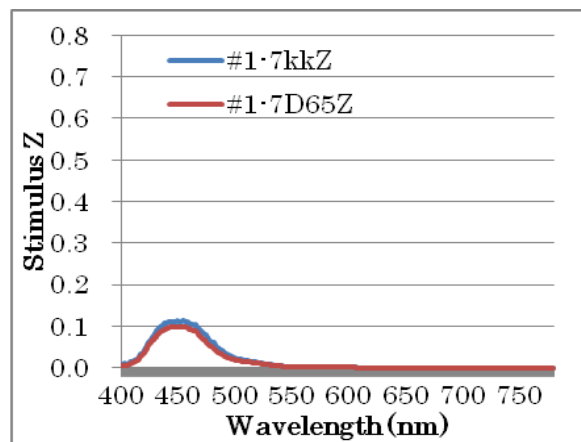


Fig. 1-2-4 #1-7 Orange Stimulus Z.

Fig. 1-2-5 には、前記の表色差の原因となった、標準光源 D65 と試験用 LED 光源 kk の分光放射輝度特性を示す。Fig.1-2-5 では、放射輝度値の正規化は行っていない。

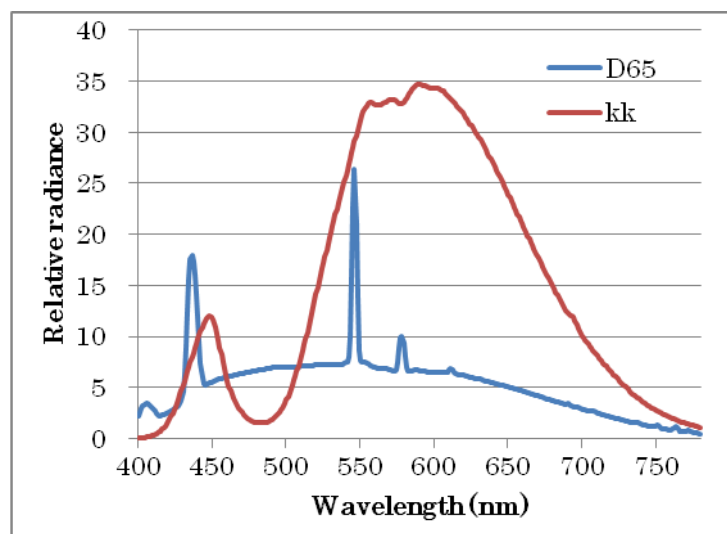


Fig. 1-2-5 Relative radiance of D65 and LED kk.

前述のように表色不一致の問題は、大きく照明光源の分光放射輝度分布と物体色の分光反射率分布の単独又は複合での相違によることがわかる。

### 1.1.3 問題の背景にある3つの要因

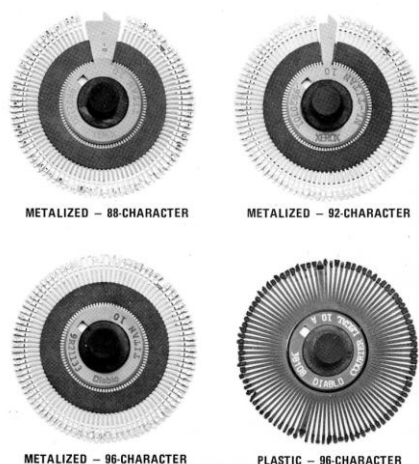
近年、印刷画像の伝送に際して表色の不一致問題が大きくクローズアップされてきた主な要因として下記3点を挙げる。

- (1) プリンタの再現色域の拡大
- (2) 文書配布方法の変遷
- (3) LED 照明の普及

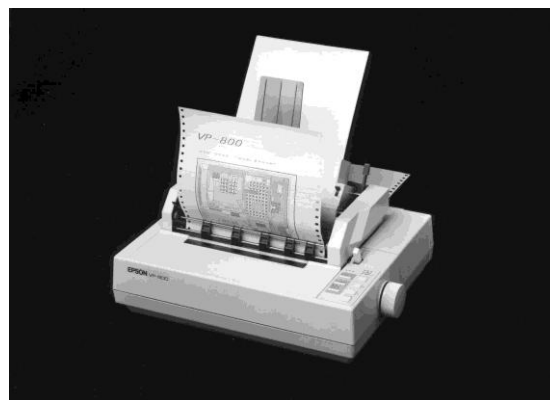
それぞれについて、以下に詳述する。

- (1) プリンタの再現色域の拡大

プリンタ装置の開発の歴史をみると、1970年代は文字を表現する活字型 (**Fig.1-3-1**)、1980年代からは、モノクロで文字に加えて画像も表現するドットマトリックス型 (**Fig.1-3-2**)、1990年代にカラー画像を表現するカラープリンタが本格導入される。2000年代入ると、ホストコンピュータの飛躍的な処理能力の向上と相まって、カラー画像表現の更なる高精彩化が求められるようになる。加えて、写真画質的な色表現が可能となって、表色性能で先行した CRT や液晶ディスプレイ装置との表色の一致が求められるようになった。(筆者関晴之著作<sup>1-2)</sup>：“コンピュータプリンティング”)。以降カラープリンタ装置の進化は主として表現色域の拡大に注力されてきた。



**Fig.1-3-1** Dasy wheel solid Font.



**Fig.1-3-2** Dot matrix(1982, EPSON MX-80).

2000年初頭の代表的なカラーインクジェットプリンタの表現色域を **Fig.1-4-1** に示す。当時のコンピュータ用カラーディスプレイの表現色域である sRGB の色域と比べると sRGB の表現色域内に含まれて、色域範囲的にもかなり小さい。2005年頃になると5色以上の多色インク技術が導入されて表現色域が飛躍的に拡大した。**Fig. 1-4-2** は当時の代表的な6色カラーインクジェットプリンタの表現色域であり部分的には sRGB を凌いでいる。

Fig. 1-4-3 は 2010 年に発表され、高画質なテレビジョンにも使用されている 5 原色液晶ディスプレイ<sup>1-3,14)</sup>の表現色域であるが、現在の高精彩インクジェットプリンタの表現色域はこれにも拮抗している。従って現在プリンタ装置の表現色域能力に関しては、表色不一致の要因にはならない。

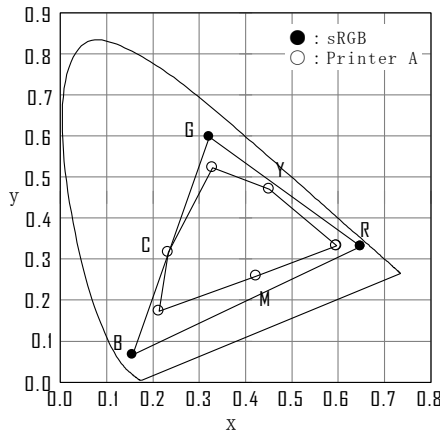


Fig.1-4-1 sRGB vs. 4-Color inkjet printer(2000).

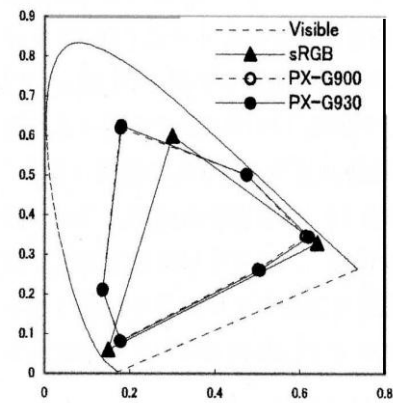


Fig.1-4-2 6-Color inkjet printer(2005).

(2005年セイコーエプソン製品カタログより)

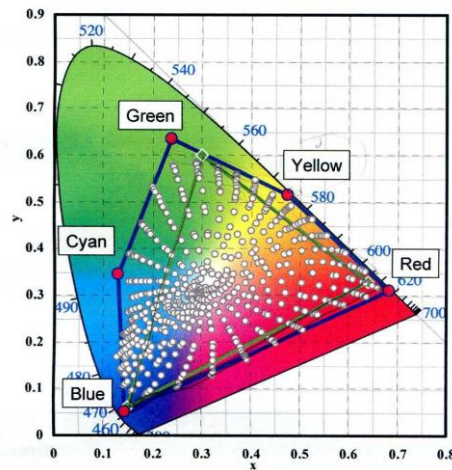


Fig. 1-4-3 Wide gamut technology of multi-primary color display.

(2) 文書配布方法の変遷

電子的な情報交換手段の発達普及は、文書の配布方法にも変遷をもたらしている。Fig1-5-1 の様に、これまでの文書配布方法は「印刷してから配布する方法」が一般的であったのに対して、通信手段やプリンタ装置の発展によって電子的なデータによって「配布してから印刷」する方法が可能になり、距離的あるいは時間的等の配布条件によっては後者が効果的である場合も多く存在するようになったが、これによって文書配布先では「照

明光源と色再現が同時に異なる」という表色不一致を起こしやすい実態が生じている。

## 文書配布方法

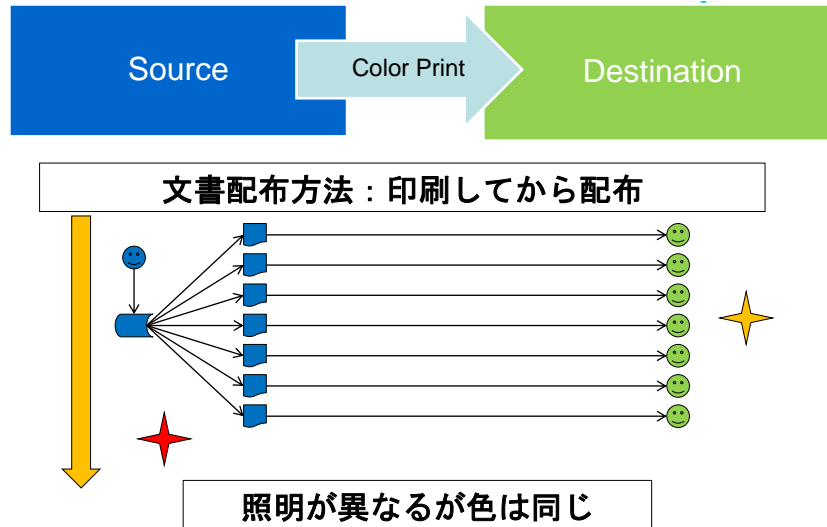


Fig. 1-5-1 Ordinary method of document distribution.

## 文書配布方法

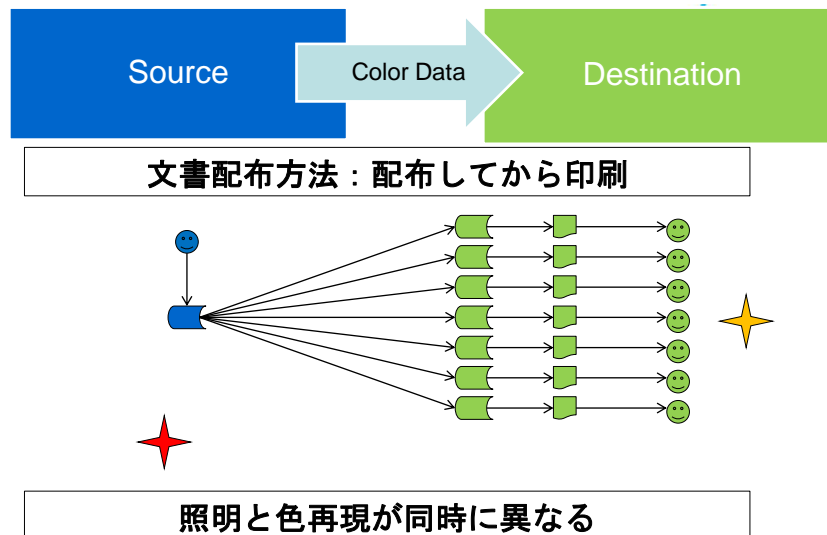


Fig. 1-5-2 Recent method of document distribution.

## 第1章 序論

### (3) LED 照明の普及

LED 照明は、省エネルギー以外に以下の様な特徴を持ち今後も急速な普及が進むものと予測される<sup>1-3,4)</sup>。

- ・長寿命（40,000 時間）
- ・小型，軽量
- ・熱や紫外線をほとんど出さない。（白熱電球：熱，蛍光灯：紫外線）
- ・色と明るさを自由に変えやすい。
- ・環境に有害な物質を含まない。（蛍光灯：水銀など）
- ・衝撃に強い（割れない）
- ・点滅性能に優れる。

しかし、現在の LED 光源の分光放射輝度分布には、1.1.2 項の Fig. 1-2-5 に示す様な大きな偏在が見られ、印刷画像交換時の異光源下での表色の不一致の問題につながっているものと考えられる。

#### 1.1.4 メタメリズム(Matamerism)

自発光して表色を行うディスプレイ装置と、照明光源光を反射して表色を行うプリンタ装置の出力とでは明らかに光源の分光放射輝度分布が表色に与える影響が異なる。プリンタ装置の出力が照明光源の相違に起因して表色が異なる問題は、当初はディスプレイ装置との表色不一致の問題としてプリンタ装置関連機器業界で問題となったのだが、実態としてより深刻な問題は、異なるプリンタ装置間、もしくは元画像と再現画像間の異照明光源下間での表色の不一致である。関連業界ではメタメリズム（条件等色）という言葉を用いて問題視してきたが、「画像の再現時に特別な条件下で光源の分光放射輝度分布が変わると表色が異なる」という捉え方であった。学術的には、メタメリズムとは「分光スペクトルの異なる2つの色刺激が特定の条件で同じ色に見えること」で、むしろ表色環境が異なればほとんどの場合は厳密な等色はできないという意味である。それまでは常に同じ光源で評価を行ってきた業界から見ると LED 照明の登場、普及以前は、関連機器開発現場のカラーマッチングの工程で使われる標準光源である D50 や D65 と呼ばれる色測定用蛍光灯光源の分光放射輝度分布が自然光や、一般のオフィスや家庭の蛍光灯光源に近いために特別の表色一致を必要とする場合を除いて異光源下の表色不一致の問題がそれほど深刻にならなかったのも事実だった。プリンタ装置そのものが表現色域の拡大などの性能向上によって、より高次元の表色性能が求められるようになったこともポジティブな意味で大きな変化である。さらに昨今の LED 光源下では、明らかな表色の相違が広く認められることとなり、この原因の究明、対策が急務となっている。

#### 1.1.5 印刷画像の表色評価まとめ

## 第1章 序論

以上のように印刷画像の表色評価についての課題を下記にあげる。下記の条件で実効的な評価方法を提案，検証，分析し，結果を実態に還元し，表色評価基準の標準化や機器内蔵型分光測色手段によるプリンタ装置の自律表色調整機能開発へと発展させて行くことを本論文の目標とする。

- 印刷画像は自己発光しない（ディスプレイと異なる）。
- 表色は照明に影響される。
- メタメリズム（条件等色）が問題となる。
- 印刷画像の表色評価は，分光的であるべき。
- 評価は定量的であるべき。

## 1.2 既存研究事例

### 1.2.1 はじめに

Fig. 1-6-1 には, 1.1.3 項に述べた問題の背景にある 3 つの要因である(1) プリンタの再現色域の拡大, (2) 文書配布方法の変遷, (3) LED 照明の普及, それぞれの要因に対して対応したプリンタ装置における既存研究事例について述べる. 次の 1.2.2 項では忠実色再現に, プリンタ表現色域拡大に併せた測色的な手法を用いてカラーマッチングの精度を向上させて結果的に忠実な色再現を行った研究例について述べる. また 1.2.3 項では, 分光解析手法を用いて 4 色インクに替わり, 6 色インクを用いてカラープリンタ出力のメタメリズム特性を改善した研究例について述べる. なお, 次第 2 章に述べる光源の演色性評価(CIE, JIS) <sup>1-6,7,8,9)</sup>では, 既に照明装置について工業規格化されている光源の演色性評価方法の詳細と, 現時点における印刷画像の表色への問題点について述べる.

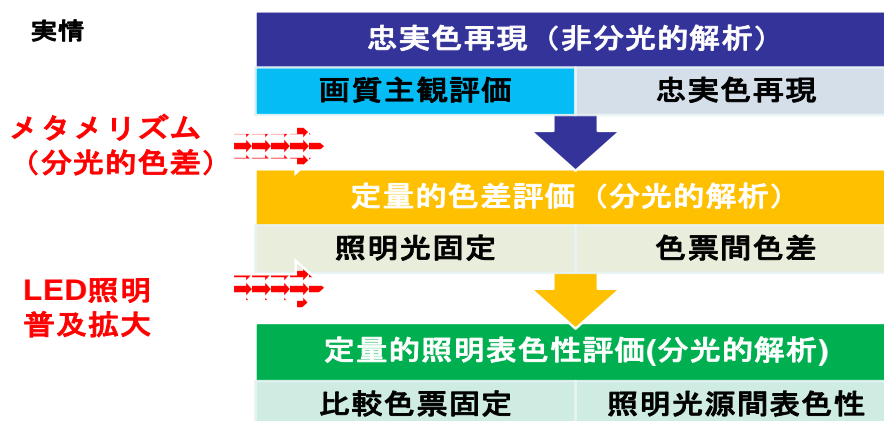


Fig. 1-6-1 Previous research examples.

### 1.2.2 忠実色再現の研究例

宋, 関, 下平 <sup>1-10)</sup>は 6 色インクジェットプリンタを用いて, 精度の高いカラーマッチング技術を開発して, カラー再現画像の忠実色再現を行い平均色差で従来の方式に対して色差 30%以下を実現した. Fig. 1-6-2 に研究の概要を示す. しかしこれは分光的な解析を行わず, 光源を D65 標準光源に限定して行っている. 色差は最大値比較で 11.97 から 3.32 に減少, 平均値でも 7.58 から 1.89 に減少し, 平均でも 2.0 以下となりこれは専門家以外ではほとんど識別の出来ない値である.

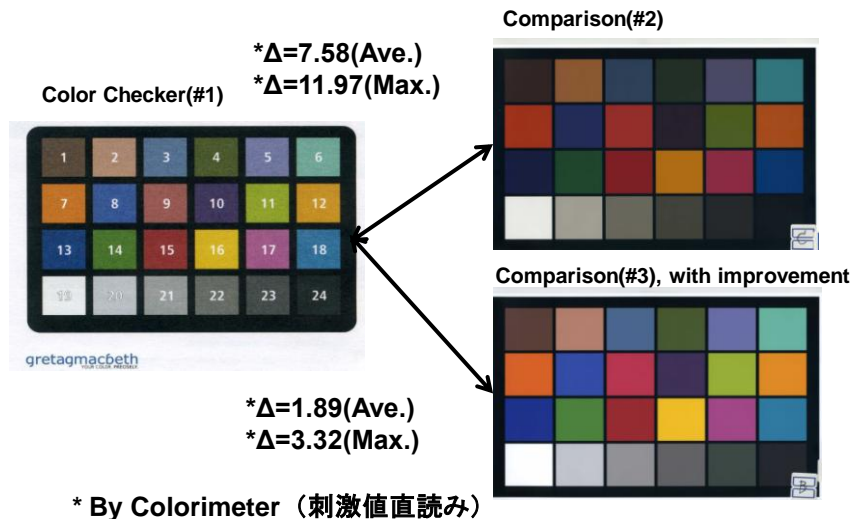


Fig. 1-6-2 Wanqing, Song, Haruyuki, Seki, and Yoshifumi, Shimodaira: “Development of a Fidelity Color Calibration Method Based on the Colorimetric Characterization of an Inkjet printer”(2006).

### 1.2.3 分光的解析によるメタメリズム低減

メタメリズム改善のための方策研究として、Di-Yuan Tzeng(Applied Science Fiction, Inc. austin, Texas), Roy S. Berns(Munsell Color Science Laboratory RIT Chester F. Carlson Center for Imaging Science)は、IS&T/SID Color Imaging Conference(2000)<sup>1-11</sup>で、4色モデルのインクに対して6色モデルインクを用いて表現色域拡大を行ったプリンタを用いることで有利となる混色方法の制限条件の緩和（インク浸透飽和値の緩和）を利用したハーフトニング処理方法の見直しによって、分光的な処理を行いメタメリズムを軽減する方法の提案と、実印刷モデルでの検証を行っている。結果として、色差ベース比較で平均45%の改善ができたと報告している。印刷カラー画像のメタメリズム軽減のための研究として極めて少ない研究事例として今後の研究発展に期待されている。

### 1.3 本論文の構成

本論文は印刷画像の表色定量評価をテーマとして、Fig. 1-7に示す全6章により構成される。以下に各章の要約を述べる。

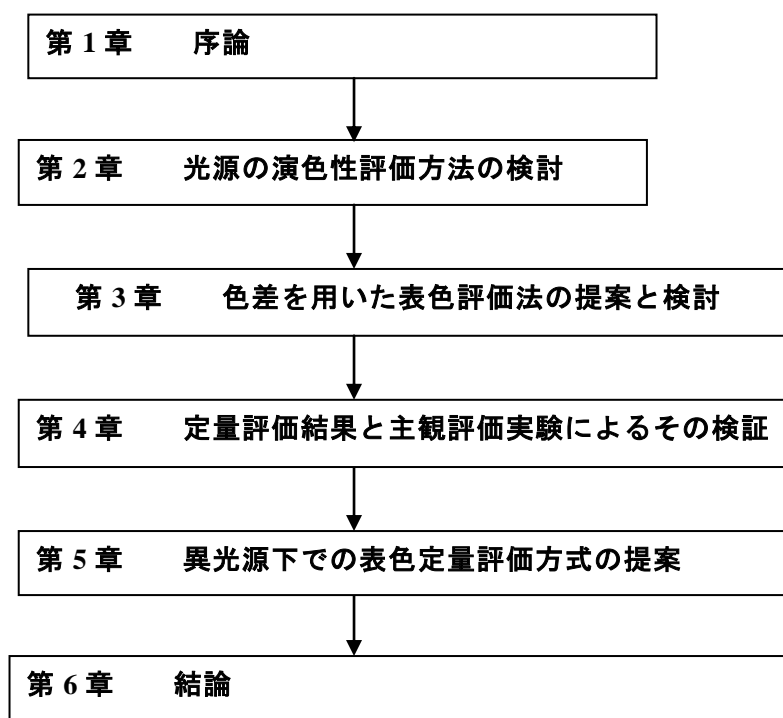


Fig.1-7 Structure of this Paper

第1章 「序論」では本研究の背景および意義について述べ、更に既存研究事例について述べる。

第2章 「光源の演色性評価方法の検討」では、現在 CIE（国際照明委員会）が定めた光源の演色性評価方法で用いられている CRI（演色評価数）を表色環境構築の基準として用いる実態に対しての問題点とその解決方法について検討し、第3章以下の関連する課題への位置づけを明らかにする。CRIは単一の試験色の異光源下での表色ずれを評価するものであって、異光源下での元色と再現色間の色差の相違を評価対象としたものではなく、本研究の主要な背景であるカラー画像データ交換時に照明光源と色再現が同時に異なる実態に即したものではない。問題解決のためには光源と色再現双方からの新しい定量評価方法の導入が必要である。さらに本研究提案方法と CRI との併用についてもその有効性を検討する。

第3章 「色差を用いた表色評価法の提案と検討」では、はじめに本論文のテーマである印刷画像の表色定量評価に際して、異光源下での元色と再現色間の色差の相違を評価対象とする新しい評価指標を提案し、評価指標を求める色票間もしくは光源間での色差およびすべての表色評価の基礎データとなる分光測色方法と取得データの処理方法および評価指標値の計算方法について述べる。本研究では定量評価方法として分光データ取得に優れた特徴を有するハイパースペクトルセンサを導入し、得られたデータから換算した

## 第1章 序論

CIEL\*a\*b\*均等色空間色値に基づく表色評価指標値による評価比較方法を提案する。本章では、さらに提案する表色評価指標に至る検討過程で特にその基礎となる分光色差についての検討を行い最適な実験方法と処理方法を提案する。提案方法に基づいた予備実験を行い、データ取得、データの正規化処理、CIEL\*a\*b\*均等色空間色値への展開を行い最終的な測色精度について検証し、次章の主題に対する実験検証に際しての基礎的な条件を整える。

第4章 「定量評価結果と主観評価実験によるその検証」では、異光源下での印刷画像の表色定量評価実験と主観評価実験を行い、定量評価実験結果を主観評価実験によって検証する。定量評価実験では昨今、高効率、長寿命などの特徴により普及が著しいLED光源を試験用光源とする。LED光源は分光放射輝度特性の異なる照明環境間でのカラー画像データ交換時に、従来の白熱電球や蛍光灯などの光源に比べて数倍に及ぶ分光的色差を生じ、忠実な表色を損なっていると考えられる。このような現在の実態に即し、試験用光源には現在市販されている11種のLED光源を使用することとし提案方法に基づく定量評価実験結果を主観評価実験により検証する。主観評価実験の実施に当たっては被験者の人権と健康保護を目的としたとりきめにより東京工業大学疫学研究等倫理委員会の承認を得て、全被験者に対して、文書による説明、同意書の取得および同意撤回書の配布、万一の場合に備えての保険加入を行った上で実施した。

第5章 「異光源下での表色定量評価方式の提案」では、本論文研究内容の実験結果、分析結果および研究成果に基づいた印刷画像の表色定量評価についての具体的な方法と内容を確認し、さらに、本研究過程で得られた問題解決軽減のための具体的な研究成果である光源の分光放射輝度分布、あるいは色再現分光反射率分布の調整のために有効な着目点およびその指標の提案を行う。さらに関連するイメージング機器の開発に際して、現在イメージング機器開発現場で大きな負担となっている主観評価の方法について本研究を通じて獲得した正確で効率よく安全な評価方法の提案を行い、より多くの成果を得るための示唆も併せて行う。

第6章 「結論」では、全体を総括し、本研究の成果をまとめ成果に基づく評価標準化に向けての提案と実応用実装への可能性を展望する。特に、イメージング機器内に実装され、自律してその表色条件に合致した画像出力得る方式についての具体的な示唆を行い、画像再生環境での照明光源の分光放射輝度分布の相違の影響を受けにくいイメージング機器の実現を展望する。

#### 1.4 第1章参考文献

- 1-1) Gretagmacbeth: “ColorChecker™Color Rendition Chart” (2006).
- 1-2) 関晴之, “コンピュータプリンティング”, クリエイトクルーズ(1994).
- 1-3) 2010年度画像4学会合同研究会 宮沢一成, 吉田惣一, 森智彦, 長谷川誠, 吉田明子, 吉山和良, 古川浩之, 吉田育弘 (シャープ株式会社) “新しい光源と画像再現技術, LED光源を中心として”2010年12月15日, 日本画像学会予稿集 pp.22-30.
- 1-4) Tomoko Kotani: “Color Rendering of LED Lamp” Journal of the Imaging Society of Japan Vol. 50, No. 3, pp. 229-233(2011)
- 1-5) Tomoko Kotani: “Approach for Realization of Comfortable Lighting Environment Using LED”, IDW’11 The 18th International Display Workshops, pp. 481-484(2011)
- 1-6) Publ. CIE No.13.2: “Method of Measuring and Specifying Color rendering Properties of Light Sources”, 2’nd Ed (TC-3. 2), ( 1974)
- 1-7) CIE No. 3. 3: “Method of Measuring and Specifying color Rendering of Light Source”, (1995)
- 1-8) Japanese Industrial Standards Committee: “JIS Z 8726 Method of Specifying Color Rendering Properties of Light Sources”, Japanese Standards Association, (1990)
- 1-9) Japanese Industrial Standards Committee: “Japanese Industrial Standard Method of Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources JIS Z-8726”, (1990), (Reaffirmed 2001)
- 1-10) Wanqing. Song, Haruyuki. Seki, and Yoshifumi. Shimodaira: “Development of a Fidelity Color Calibration Method Based on the Colorimetric Characterization of an Inkjet printer”, 2006 Conference of the Institute of Image Electronics Engineers of Japan 06-06-04. [ in Japanese] .
- 1-11) Di-yuan Tzeng and Roy S.Burns, “Spectral-Based Six-Color Separation Minimizing Metamerism”, Prec.IS & T/SID Eight Color Imaging Conference (2000) , pp.342-347.
- 1-12) CIE(International Commission of Illumination): “CIE 1976 L\*a\*b\* color space” (1976)
- 1-13) Japanese Industrial Standards Committee: 照明基準総則照明基準総則 JIS Z9110(2010).
- 1-14) 吉田惣一, 森智彦, 長谷川誠ほか “多原色液晶ディスプレイ技術”, シャープ技報 第101号, 2010年8月.
- 1-14) Takahiko Horiuchi, “Spectral Analysis of Omnidirectional Illumination in a Natural Scene”, Journal of Imaging Science and Technology, Vol.51, No.4, pp. 040502-1 - 040502-9, 2010.
- 1-15) Kimiyoshi Miyata, Masayuki Saito, “An evaluation method for the images obtained by multi-level error diffusion technique”, Journal of Imaging Science and Technology, Vol. 42, No. 2, pp. 115-120, 1998.

## 第 1 章 序論

1-16) Hideaki Haneishi, Kimiyoshi Miyata, Hirohisa Yaguchi, Yoichi Miyake, “A new method of color correction in hardcopy from CRT images”, Journal of Imaging Science and Technology, Vol. 37, No. 1, pp. 30-36, 1993.

## 第2章

# 光源の演色性評価方法の検討

## 2.1 CIE, JIS の光源の演色性評価

光源の演色性とは人間の色を感じる三刺激値に影響を及ぼす光源の特性である。従って 1.1.3 項に述べた文書配布方法で、従来の「印刷してから配布する」方法であれば光源の演色性評価は、本論文のテーマの一部である印刷画像の表色定量評価となる。ただし、同じく 1.1.3 項に述べた文書配布方法で、近年多く見られる「配布してから印刷する」方法に対しては十分な条件を満たしていない。本項では従来の光源の演色性評価方法について、その実態と問題点について述べ、更に本研究が指向する方向との相違を通じて本研究の位置づけを明らかにする。

光源の演色性評価方法の規格としては、CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage* , 国際照明委員会) や JIS (日本工業規格) が定めた工業規格として以下に定められている。

- (1) Publ. CIE No. 13. 2: “Method of Measuring and Specifying Color rendering Properties of Light Sources”, 2’nd Ed (TC-3. 2), ( 1974)<sup>2-1)</sup>
- (2) CIE No. 3. 3: “Method of Measuring and Specifying color Rendering of Light Source”, (1995).<sup>2-2)</sup>
- (3) Japanese Industrial Standards Committee: “JIS Z 8726 Method of Specifying Color Rendering Properties of Light Sources” Japanese Standards Association, (1990) [in Japanese].<sup>2-3)</sup>
- (4) Japanese Industrial Standards Committee: “Japanese Industrial Standard Method of Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources JIS Z-8726”, (1990), (Reaffirmed 2001) [in Japanese] Japanese Standards Association, (1990) [in Japanese]<sup>2-4)</sup>.

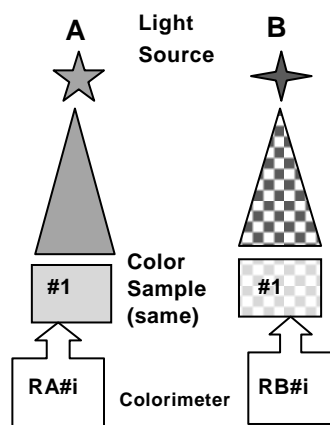
現在、上記工業規格の中では光源の演色性評価方法を下記の式(2-6),(2-7) に表される演色評価数 CRI (Color Rendering Index、以下 CRI と呼称) により定義している。

$$Ra = 100 - 4.6 \sum_{i=1}^n \Delta E_i / 8 \quad (i=1 \sim 8) \quad (2-1)$$

$$Ri = 100 - 4.6 \sum_{i=1}^n \Delta E_i / n \quad (i=9 \sim 14: CIE, 15: JIS) \quad (2-2)$$

(∵ n=7: CIE, n=8: JIS)

ここで、 $Ra$  は平均演色評価数、 $Ri$  は特殊演色評価数、 $\Delta E_i$  は試験色を基準光源と試験光源で照らした時の色差[CIE L\*a\*b\*1976 の色差式、本論文では第3章 3.2.3 項の式 (3-11) ] としている。CIE<sup>1)</sup> や JIS<sup>2)</sup> により定められた光源の演色性評価方法を **Fig. 2-1** に示す。評価に際しての基準光源には、試験光源の色温度が 5000K (ケルビン) 未満の場合は黒体(完全放射体) 5000K 以上の場合は CIE 昼光の光源が使用される。



$$\Delta E_i(A, B) = |RA\#i - RB\#i|$$

**Fig. 2-1 Method of Industrial Standard CIE and JIS.**

試験色票色  $i$  は, 1 から 8 は日常生活周囲の平均的な色, 9 から 14 は生活環境での赤, 緑, 青など彩度の高い色と肌色及び木の葉の色を採用している. JIS では日本人の肌色が  $i=15$  として追加されている. 試験色票色の詳細を **Table2-1** に示すが, ここで表示した標本色は規格とは異なり類似したものを表示した. 規格では各試験色票色の分光放射寄与率を可視域波長帯で 5 nm 間隔で定義しているが, 規格として定義しているだけで CIE, JIS ないしその認定機関は実際の試験色票を用意していない.

Table 2-1 Color samples for CRI.

試験色番号	マンセル記号	色名	備考	
No.1	7.5R6/4	くすんだ黄みの赤		
No.2	5Y6/4	明るい灰みの黄		
No.3	5GY6/8	くすんだ黄緑		
No.4	2.5G6/6	くすんだ緑		
No.5	10BG6/4	くすんだ青緑		
No.6	5PB6/8	明るい紫みの青		
No.7	2.5P6/8	明るい青紫		
No.8	10P6/8	明るい赤みの紫		
No.9	4.5R/13	赤		
No.10	5Y8/10	黄		
No.11	4.5G5/8	緑		
No.12	3PB3/11	こい青		
No.13	5YR8/4	明るい灰みの黄赤	西洋人女性の顔色	
No.14	5GY4/4	暗い灰みの黄緑	黄の葉の色	
No.15	1YR6/4	灰みの黄赤	日本人女性の顔色	

1879年のエジソンの炭素フィラメントを用いた白熱電灯の発明，1938年のインマンの蛍光灯の発明から長い歴史を経てこれらの照明光源の表色特性改善がなされてきた。白熱電球から約60年後に実用化された蛍光灯は効率，寿命などで白熱電灯よりもすぐれた特徴を持つ反面，比較的太陽光に近いとされる可視域の分光放射輝度分布をもつ白熱電灯に比べて分光放射輝度分布が異なり，表色がずれる（演色性）の問題が生じた。これを改善する目的で CIE<sup>2-1,2)</sup> や JIS<sup>2-3,4)</sup>などの機関は，光源の演色性評価方法を工業規格化し，これらの規格に沿った CRI（演色評価数値）を用いた評価で蛍光灯光源の性能改善がなされてきた。

近年急速な普及が進む LED 光源は，2010年の日本電球工業会報<sup>2-5)</sup>では，LED 光源の演色評価数は色温度 5000 K 以上の寒色系で 62~78，5000 K 以下の暖色系で 66~87 と報告されている。CIE や JIS が定める今日の LED 光源の演色性評価数は蛍光灯に比べて数値的には遜色ないのだが，実態として表色の相違が多方面で生じ，特に第1章 1.1.2 項に述べた正確な表色が望まれる応用環境では深刻な問題を生じている。現在，演色評価数，CRI は，高忠実表色を必要とする表色環境構築時の光源選択に際して一定の参考にはなり得るが，本来大きな分光放射輝度分布の偏在を有する LED 光源を対象とした評価には不十分である。さらに CRI は同一色票の異光源下での表色ずれを評価するものであって，元色と再現色間色差の異光源下での相違を評価の対象としたものではなく，第1章に述べたカラー画像再現時での表色不一致問題の実態に即した評価方法とは異なり，表色不一致の問題に対してより実態に即した評価方法の開発が必要である。

Table 2-2 には LED 光源以外の各種光源の演色評価数 CRI を示す。

**Table 2-2 CRI of traditional light sources<sup>2-6)</sup>(Panasonic HP:  
<http://www2.panasonic.biz/es/lighting/plam/knowledge/document/0107.html>)**

種類	呼称	色温度(K)	RA
電球	シリカ電球	2800	100
電球	クリプトン電球	2750	100
蛍光灯	電球色(EL)	2800	84
	ナチュラル色(EN)	5000	84
	クール色(ED)	6700	84
	演色 AAA 疑白色(N-EDL)	5000	99
	演色 AA 疑光色(D-SDL)	6500	92
ハロゲン	ミニハロゲン 85W	2850	100
	ハロゲン電球両口金型 500W	3000	100
高圧ナトリウム灯	ハイゴールド効率本位型	2100	25
	ハイゴールド演色改善型	2150	60
水銀灯	蛍光水銀灯(X)	3900	40
	透明水銀灯	5800	14

## 2.2 現状の光源の演色性評価の問題点と課題

既存の光源演色性評価方法により得られた演色評価数、CRI(Color Rendering Index)の実態として、現在様々な環境でひろく使用されている蛍光灯では、高演色形製品で演色評価数 90 以上、三波長域発光形と呼ばれる一般形でも 80 以上（東芝ライテック㈱カタログ）である。2.1 項にも述べた様に、近年普及の著しい LED 光源では、寒色系で Ra62~78、暖色系で Ra66~87<sup>2-5)</sup>である。JIS Z9110:2010 「照明基準総則」<sup>2-9)</sup>では、Ra の最低値として診療室 90 以上、事務室 80 以上を定めているので、現状で LED 光源はこれらの条件を満たしていない。現在の CIE/JIS 演色性評価方法には主として以下の問題点があり CIE では CIE TC-62(2003) 「白色 LED の演色性」として、白色 LED の演色性は現行の演色評価数では必ずしも適切に評価されない、とし CRI に替わる演色評価数を検討している<sup>2-7)</sup>。

現象的な CRI の問題点としては、

- (1) 特殊演色評価数でマイナス値が出る。マイナス値の意味づけがわかりにくい。
- (2) 知覚色のずれの方向についての情報を含まない、評価数が等しい光源でも等しい演色性を持つとは限らない。（色差のみの評価）
- (3) LED 光源では、色の見え方と平均演色評価数が合わない場合がある。

## 第2章 光源の演色性評価方法の検討

以上の問題点は、CIE L\*a\*b\*均等色空間に替わる新しい色空間として CIE 内で検討されている CIECAM02 の動向とリンクしたもので、CRI-CAM02USC として CRI 改定の有力な理由となっているが、現行とのずれが、逆に既存製品に対して厳しい評価数となるなど新たな問題点もあって、結論にはまだ時間がかかると予測される<sup>2-7)</sup>。

上記以外にも現行 CIE<sup>2-1,2)</sup>や JIS<sup>2-3,4)</sup>光源演色性評価方法には以下の問題がある。

(4). 色温度により異なる基準光源が使用されるため、異色温度間での演色評価数の比較が困難。

(5) 規格に定義されている色票はデータのみであり、実際の評価のための色票が用意が無く、用意されている分光データは 5 nm 間隔で定義されているため更なる分解能を必要とする場合に対処できない。例えば現在の LED 光源に使用されている白色 LED など大きな分光放射輝度分布の偏在をもつ光源の評価に CRI は不向きである。急峻なスペクトル特性を持つ光源下では試験色の種類によっては演色評価数に大きな相違が出てきてしまう。

このように CIE, JIS が工業規格として定めた演色評価数 CRI は、第 1 章に述べたカラー画像再現時での表色不一致問題の実態に即した評価方法としては十分ではなく、より実態に即した評価方法の導入が必要である。

### 2.3 第2章のまとめ

第2章では、CIE, JIS が白熱電灯や蛍光灯への適用を前提として長い歴史の中から定めた工業規格である光源の演色性評価方法が、主として今日の文書配布方法の変遷に伴う応用環境で生じている表色不一致の問題に対して必ずしも合致する方法ではないこと、また急速に普及が進む LED 光源の持つ特性にも合致していない実態に対して、これらの問題点を反映した表色評価方法の必要性を明らかにした。

### 2.4 第2章参考文献

- 2-1) Publ. CIE No. 13. 2: “Method of Measuring and Specifying Color rendering Properties of Light Sources”, 2’nd Ed (TC-3. 2), ( 1974)
- 2-2) CIE No. 3. 3: “Method of Measuring and Specifying color Rendering of Light Source”, (1995)
- 2-3) Japanese Industrial Standards Committee: “JIS Z 8726 Method of Specifying Color Rendering Properties of Light Sources”, Japanese Standards Association, (1990)
- 2-4) Japanese Industrial Standards Committee: “Japanese Industrial Standard Method of Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources JIS Z-8726”, (1990), (Reaffirmed 2001)
- 2-5) Japan Electric Lamp Manufacturers Association: “Reports of investigation on self-ballasted

## 第2章 光源の演色性評価方法の検討

LED lamps”(2010)

- 2-6) PanasonicHP: <http://www2.panasonic.biz/es/lighting/plam/knowledge/document/0107.html>)
- 2-7) Tomoko Kotani: “Color Rendering of LED Lamp” Journal of the Imaging Society of Japan Vol. 50, No. 3, pp. 229-233(2011)
- 2-8) Tomoko Kotani: “Approach for Realization of Comfortable Lighting Environment Using LED”, IDW’11 The 18th International Display Workshops, pp. 481-484(2011)
- 2-9) Japanese Industrial Standards Committee: 照明基準総則照明基準総則 JIS Z9110(2010).

## 第2章 光源の演色性評価方法の検討

## 第3章

# 色差を用いた表色評価法の提案と 検討

### 第3章 色差を用いた表色評価法の提案と検討

はじめに：

第3章では、第1,2章に述べた本研究の課題に対する検討と具体的な解決策提案を行う。本章で検討する課題は、印刷画像の表色定量評価を指標化するための方法手順を提案し、その内容について検証する。特に色差に関しての物理量と心理物理量による人間の知覚への影響を予備実験を通じて実証的に検証し、提案する印刷画像の表色定量評価を指標化する方法の有効性を検証する。

#### 3.1 印刷画像の表色定量評価指標への提案

本研究ではカラー画像データ交換時に照明と色再現が同時に異なる表色環境の実態に即して、元光源下での元色と再現色間の色差値と再現光源下での同じ2色間の色差値との比率を表色評価指標値として新たに定め、それを用いた評価方法を提案する。

表色評価指標値は以下のようにして求めた。昨今普及が著しいLED光源や、再現色域が拡大されたインクジェットプリンタ装置の色再現では、それらの分光放射輝度や分光反射率のスペクトルの偏在が1nm台に及ぶ狭波長帯域内で生じて問題となっている。<sup>3-1)</sup>このため、本研究では、できるだけ高い波長分解能を持つ分光データ取得手段を用いることとした。高波長分解能、広帯域、高速動作など優れた性能を有するハイパースペクトルセンサ<sup>3-2)</sup> (以下HSセンサと呼称) を用いて Fig. 3-1 に示すように2種類の光源 xx, yy 下での色票#1, #2 の分光放射輝度値 L を測定し、2章に記載する処理で求めた光源 xx, yy 下での CIEL\*a\*b\*均等色空間<sup>3-3)</sup> 上の2つの色票における同じ試験色間の色差を  $\Delta E_{xx}(\#1, \#2)$ ,  $\Delta E_{yy}(\#1, \#2)$  として、これら2つの色差値の比率を式(3-1)により求め、表色評価指標値  $INDEX_{\Delta E}(yy/xx)$  として表した。

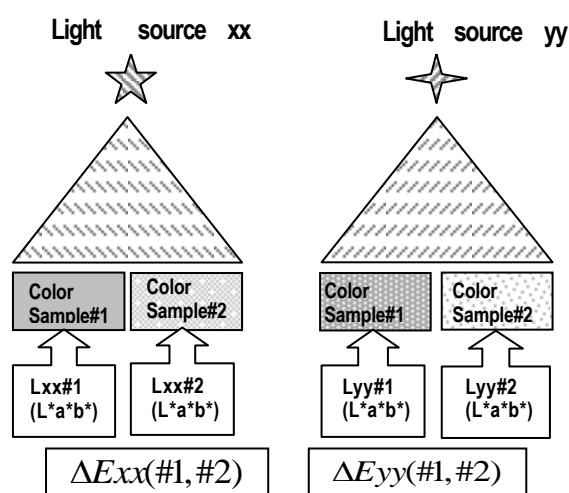


Fig. 3-1 Method of this study by using original and color reproduction samples under different light sources.

### 第3章 色差を用いた表色評価法の提案と検討

式(3-1) で光源  $xx$  を基準光源とし,  $yy$  を試験光源とすれば試験光源  $yy$  の表色評価指標値は  $INDEX\Delta E(yy/xx)$  となる.

$$INDEX\Delta E(yy/xx) = \frac{\Delta E_{yy}(\#1, \#2)}{\Delta E_{xx}(\#1, \#2)} \quad (3-1)$$

前記の本研究提案の表色評価指標値は, 元環境と再現環境下での同じ2つの色票間の色差の相対的な比率を表している. 従って評価測定時に両方の環境で使用する測色手段と色票を同じにすれば, 例えば絶対的な測色手段の較正のずれや色票の褪色は無視することができる. 又, 基準となる色票に一般的なカラーチェッカ<sup>3-5)</sup>を導入することで色再現側でも従来の文書配布方法である印刷してから配布した場合と等条件を実現でき, 再現環境下での基準色の表色に絶対性を持たせることができるので, 表色評価に際しての基準設定に有効である.

注) 本論文中では分布図等の表現上の理由で上記の表色評価指標値を逆数で表示する場合がある. この時は  $\overline{INDEX}$  と表示する.

#### 3.2 色差についての検討

前項 3.1 では, 元表色環境と再現表色環境間での表色の相違をそれぞれの環境での色差の比を用いた指標値で表す方法について言及した. さらに本研究では, 照明光源の分光放射輝度分布と色再現の分光反射率分布が同時に異なる環境を想定して, 精緻な方法により同時に同方法で取得した各試験光源下での各試験色票色の分光データより求めた CIEL\*a\*b\*均等色空間<sup>3-3)</sup>上での色値をもとに, 光源を固定した色票間の色差と, 色票を固定した光源間での色票色の色差を表現して比較検討を行う. この色差比較検討の詳細は 3.2.4 項に述べるが, まず分光的に取得されたデータを基に求められた分光反射率分布を用いた分光的色差について以下 3.2.1 項と 3.2.2 項で検討する.

##### 3.2.1 単純なスペクトル差による色差

取得された2色間の分光的色差を表す方法として, まず単純なスペクトル差による色差を検討した. Fig. 3-2(a),(b)には, 色票番号  $m, m'$  色番号  $n, n'$  の2色  $C_{mn}, C_{m'n'}$  について測定波長バンド  $i$  で取得し正規化した分光反射率  $R_{m}(i), R_{m'n'}(i)$  を示すが, (b)にはそれぞれの分光反射率の差を強調して表示した. 黒く強調した部分が単純なスペクトル差による色差に相当する.

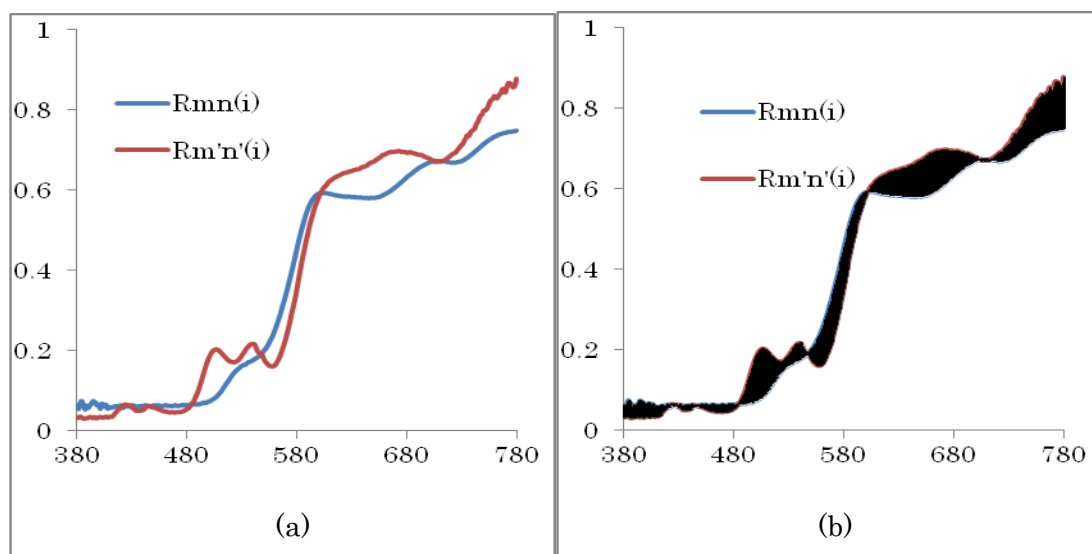


Fig. 3-2 Spectral reflectance of color  $R_{mn}$  and  $R_{m'n'}$ (a), absolute difference (b).

Fig. 3-2 で色票番号  $m, m'$  色番号  $n, n'$  の 2 色  $C_{mn}, C_{m'n'}$  について測定波長バンド  $i$  で取得し正規化した分光反射率を  $R_{mn}(i), R_{m'n'}(i)$ , 絶対値分光反射率差を  $|\Delta r(mn-m'n')(i)|$ , 可視域色票間色差絶対値累計を  $\Delta E_{ABS}(mn-m'n') = \Delta R(mn-m'n')$  として式(3-2)に表す. この値が Fig. 3-2 右図上で黒く強調した 2 色間の単純なスペクトル差による色差となる.

$$\Delta E_{ABS}(mn-m'n') = \sum_{i=380}^{i=780} |\Delta r(mn-m'n')(i)| \quad (3-2)$$

ただし,

$$\Delta r(mn-m'n')(i) = |R_{mn}(i) - R_{m'n'}(i)| \quad (3-3)$$

以上の様に求めた 2 色間の単純なスペクトル差であって人間の知覚感度は一切加味されていない物理量である.

### 3.2.2 三刺激値を加味した色差

前項 3.2.1 では 2 色間での単純な物理量での色差を求めたが, 人間の知覚としては色の三刺激値を加味した色差である心理物理量が必要である.

Fig. 3-2 左図の  $R(i)$  に Fig. 3-3 に示す等色関数 (標準比視感度関数) を重畳して Fig.3-4 ~ Fig.3-6 左図に三刺激値  $x(i), y(i), z(i)$  を示す, 右図には 2 色の分光反射率  $R_{mn}$  と  $R_{m'n'}$  間の  $x(i), y(i), z(i)$  の差  $\Delta x(i), \Delta y(i), \Delta z(i)$  を黒で強調した.

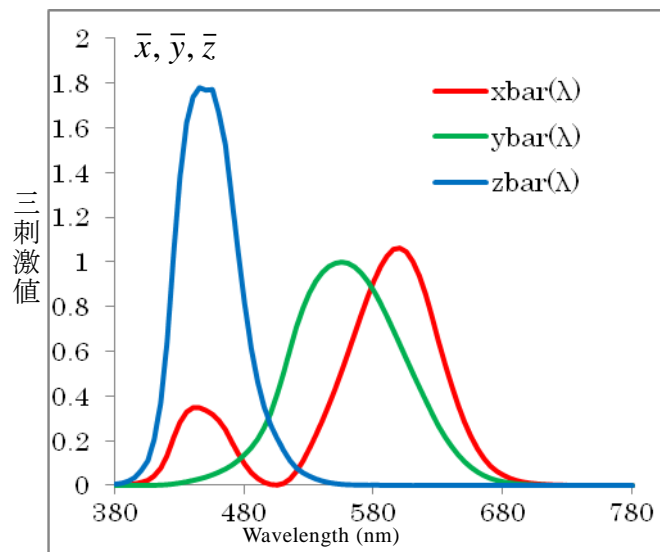


Fig. 3-3 Color matching function (to have tri-stimulus of human vision).

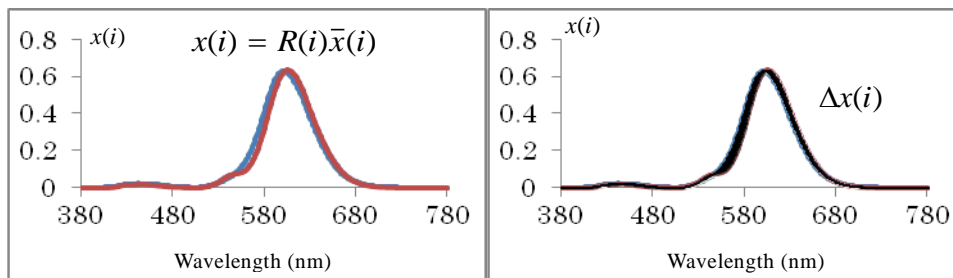


Fig. 3-4 Tri-stimulus of human vision  $x(i)$ .

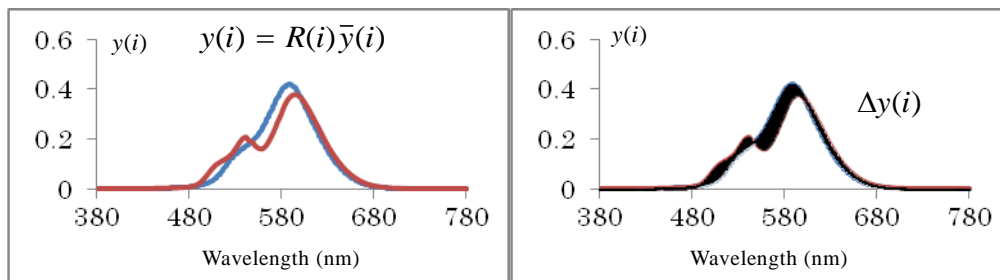


Fig. 3-5 Tri-stimulus of human vision  $y(i)$ .

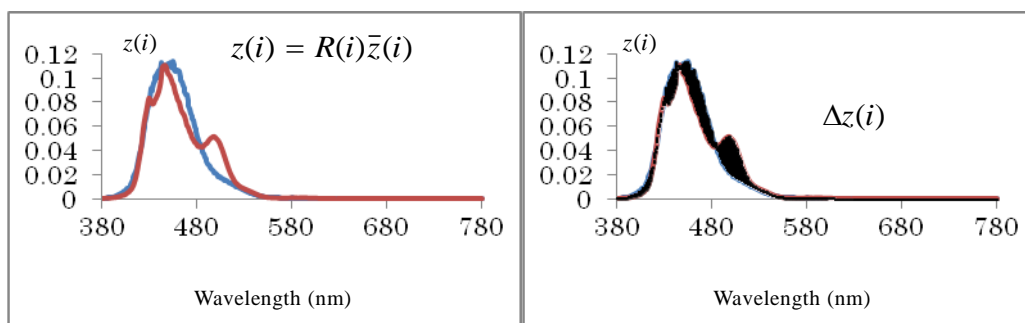


Fig. 3-6 Tri-stimulus of human vision  $z(i)$ .

### 第3章 色差を用いた表色評価法の提案と検討

ここで測定バンド  $i$  での、等色関数値を  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}(i)$ 、三刺激値を加味した 2 色間三刺激値の絶対値差  $\Delta x, \Delta y, \Delta z(mn-m'n')(i)$  を式(3-4)で示す。また可視領域での三刺激値の絶対値差累計を  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z(mn-m'n')$  を式(3-5)に示す。

$$\Delta x, \Delta y, \Delta z(mn-m'n')(i) = \left| \Delta r(mn-m'n')(i) \right| \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}(i) \quad (3-4)$$

$$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z(mn-m'n') = \sum_{i=380}^{i=780} \Delta x, \Delta y, \Delta z(mn-m'n')(i) \quad (3-5)$$

本研究では解析評価を容易にするために、3 値で表現される三刺激値を単一の数値で表わすこととし、**Fig. 3-7** に示す座標空間距離を用いた測定バンド  $i$  での 2 色間の分光の色差値を  $\Delta erms(mn-m'n')(i)$ 、同じく可視領域での分光の色差値を  $\Delta Erms(mn-m'n')$  として式(3-6)、(3-7)で表すことを提案する。

本研究では、上記 3.2.2 項で求めた三刺激値を加味した色差を rms と呼称し、3.2.1 項で求めた単純なスペクトル差による色差を abs と呼称する。例えば色票#1 と #2 間の色差では、三刺激値を加味した色差は rms#1-#2、絶対色差値は abs#1-#2 のように表すこととする。

$$\Delta erms(mn-m'n')(i) = \sqrt{\{\Delta x(mn-m'n')(i)\}^2 + \{\Delta y(mn-m'n')(i)\}^2 + \{\Delta z(mn-m'n')(i)\}^2} \quad (3-6)$$

$$\Delta Erms(mn-m'n') = \sqrt{\{\Delta X(mn-m'n')\}^2 + \{\Delta Y(mn-m'n')\}^2 + \{\Delta Z(mn-m'n')\}^2} \quad (3-7)$$

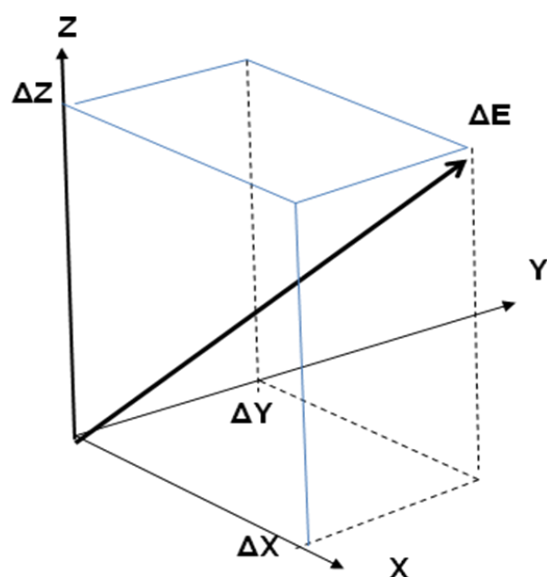


Fig.3-7 Getting  $\Delta E$

以下 **Fig.3-8-1~4** には、取得データより求めた各色票（#1,#2,#3）の代表色（15.Red, 7.Orange, 13.Blue, 14.Green）の可視域での分光反射率分布と色票間色差（#1-#2, #1-#3）を左図に、前項に説明した手法のより求めた三刺激値を加味した色差値 rms と絶対値差 abs を右図に示す。ここで注目するのは三刺激値を加味した色差値 rms と絶対値差 abs の分光分布が一致せず、図中に矢印で示すようにずれが生じていることがわかる。ここから人間の知覚は心理物理量であり、分光データを基に色再現を評価する場合には単純なスペクトルによる色差を取り扱うのではなく、三刺激値を加味した色差である心理物理量として扱うべきであり、機器開発に際してのカラーマッチングの方法もこれにならったものでなければならない。例えば本項の **Fig.3-8-1 ~4** については、色差低減の目標は abs の値ではなく、rms の値に注目してなされるべきである。

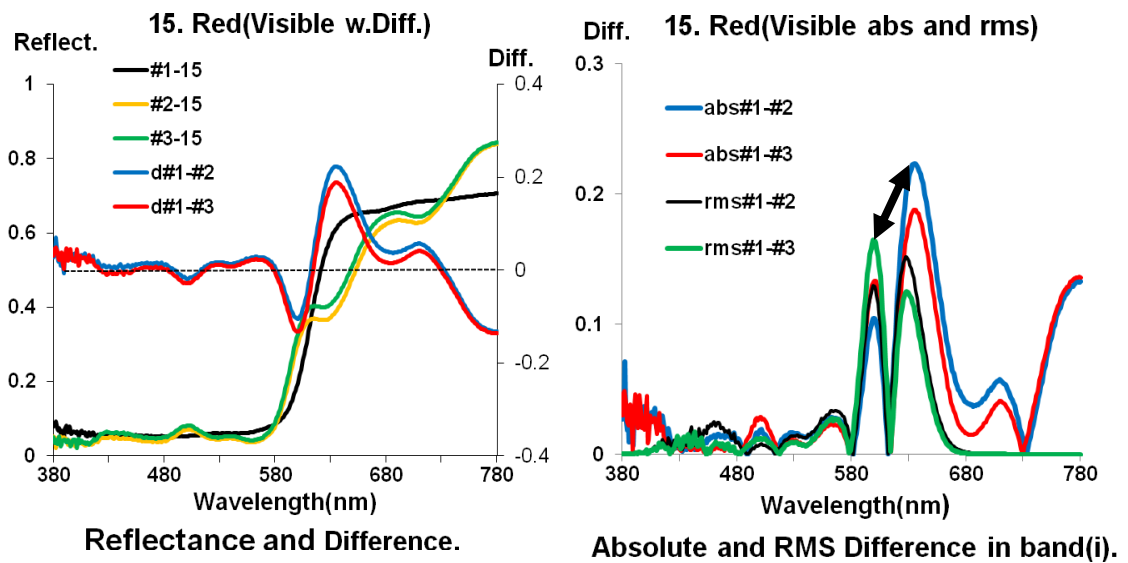


Fig.3-8-1 Red

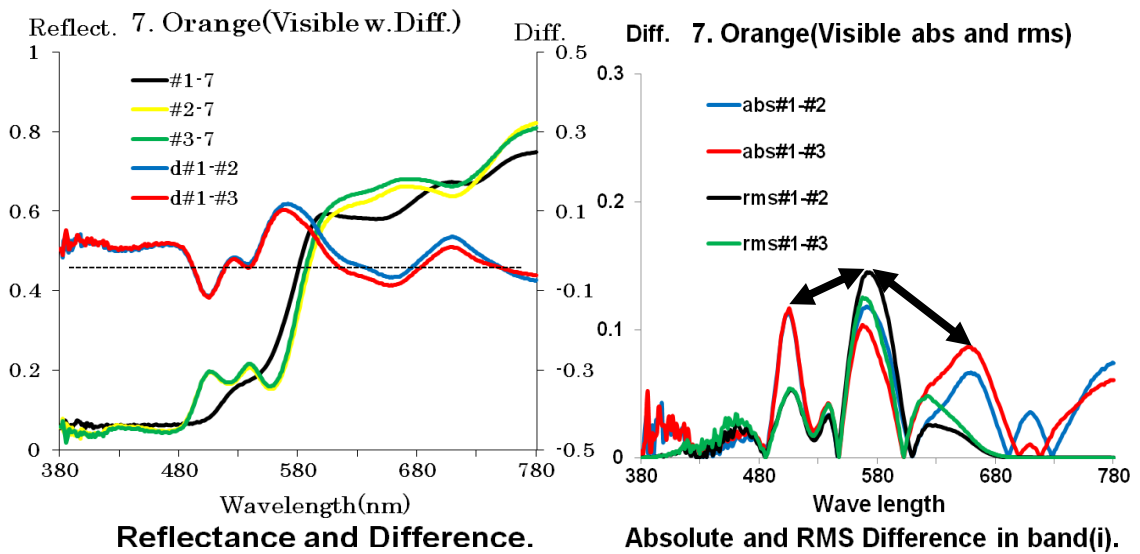


Fig.3-8-2 Orange

上図では、rms（三刺激値を加味した色差）と abs（単純なスペクトル差による色差）には黒矢印で示した分光の色差分布のずれが生じている。

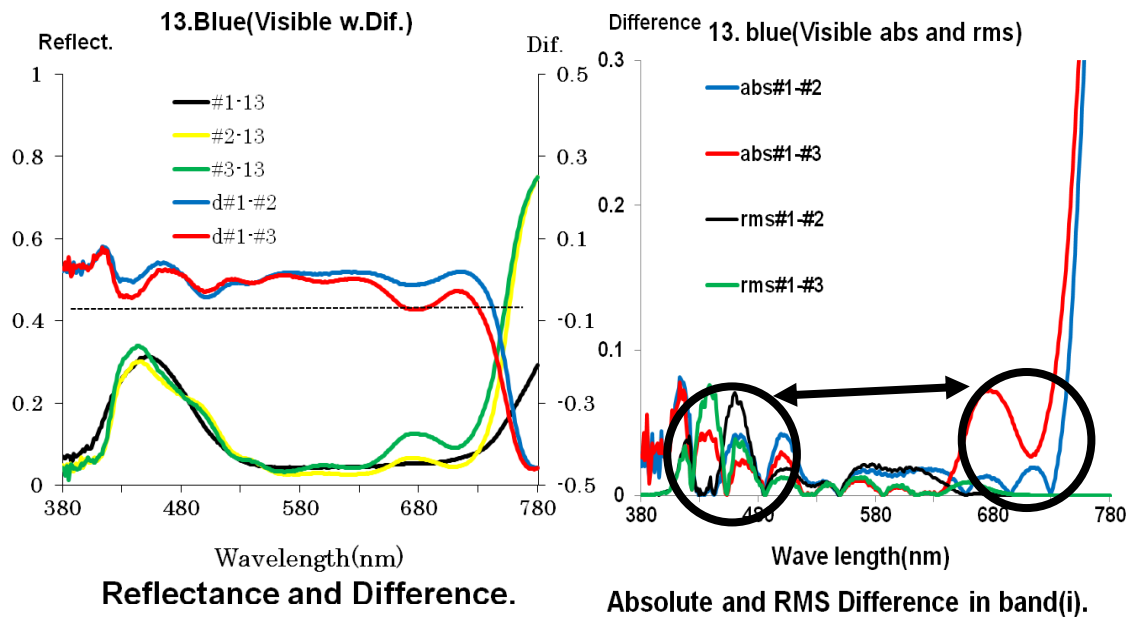


Fig.3-8-3 Blue

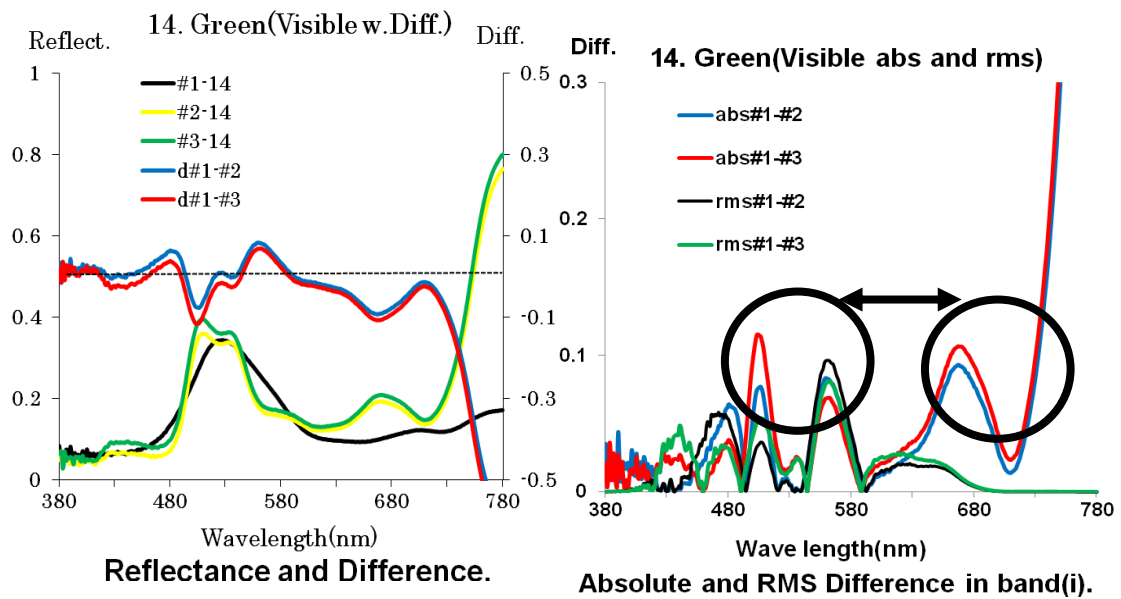


Fig.3-8-4 Green

上図では、rms（三刺激値を加味した色差）と abs（単純なスペクトル差による色差）には黒矢印で示した分光的色差分布のずれが生じている。

### 3.2.3 CIE L\*a\*b\*均等色空間<sup>3-3)</sup>での色差

CIE L\*a\*b\*均等色空間は、CIE(Commission Internationale de l'Eclairage)国際照明委員会が1976年に定めた CIE 1976 L\*a\*b\* color space<sup>3-3)</sup>に基づき、L\* (明度指数)、a\*,b\* (色み指数)を軸とする直交座標色空間で、色の解析時に一般的に使用されている色空間である。CIE (1931) X,Y,Z色空間では、どのような分光放射輝度分布または分光反射率分布が同じ色として知覚されるかを予測することはできるが、知覚的均等性(色値の変化量と人間の知覚変化量が等しい)を持っていないのに対して、CIE L\*1976\*a\*b\*均等色空間色空間は、知覚的均等性を有しているため、主観評価検証を前提とした本研究への適用必然性は高い。日本では JIS Z 8729 に規定されている。なお、CIE (1931) X,Y,Z 色値から CIE 1976 L\*a\*b\* 色値への変換は、以下の CIE 推奨式 (3-8~3-10) で変換される。

$$L^* = 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \quad (3-8)$$

$$a^* = 500 \left[ \left( \frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right] \quad (3-9)$$

$$b^* = 200 \left[ \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left( \frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right] \quad (3-10)$$

ただし

$$\frac{Y}{Y_n} > 0.008856, \quad \frac{X}{X_n} > 0.008856, \quad \frac{Z}{Z_n} > 0.008856$$

2色 a, b 間の色差  $\Delta E^*_{ab}$  は式(3-11)で表される

$$\Delta E^*_{ab} = \left[ (\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{1/2} \quad (3-11)$$

ここで、X,Y,Zは色票のXYZ表色系における三刺激値、 $X_n, Y_n, Z_n$ は完全拡散反射面の三刺激値とする。

Fig. 3-9 には CIE L\*a\*b\*均等色空間の立体イメージを示すが、明度を L\*,色相と彩度を表す色度を a\*,b\*で表す。a\*,b\*は色の方向を示し、a\*は赤方向、-a\*は緑方向、b\*は黄方向、-b\*は青方向を示し、数値が大きくなるに従って鮮やかな色に、数値が小さくなって中心

に近づくほどくすんだ色になる。

CIE L\*a\*b\* 均等色空間の立体イメージ

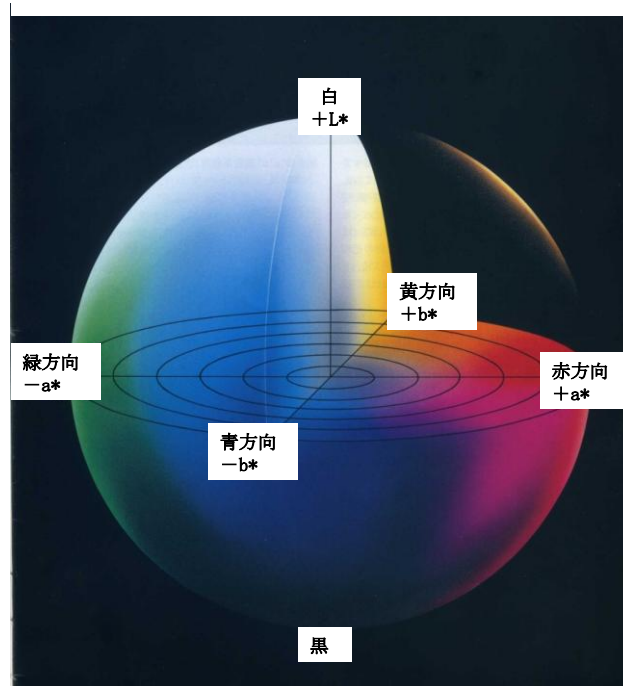


Fig. 3-9 CIE L\*a\*b\* uniform color space<sup>3-2)</sup>.

### 3.2.4 色差表現提案

前項 3.2.3 では、元表色環境と再現表色環境間での表色の相違を指標値で表す方法について言及したが、本研究では、3.1 項に提案した印刷画像の表色定量評価指標と併せて照明光源の分光放射輝度分布と色再現の分光反射率分布が同時に異なる環境を想定し、取得した各試験光源下での各試験色票の分光データより求めた CIE L\*a\*b\*均等色空間上での色値をもとに、下記のような色差比較解析方法を提案する。

#### (1) 光源を固定した色票間色差表現

Fig. 3-10 には、D65 標準光源下での色票#1 と色票#2 の各色の CIE L\*a\*b\*均等色空間上での色値を、a\*-b\* (色彩) 平面と c (彩度) -L\* (明度) 平面により示す。Fig. 3-11 には、試験用 LED の kk 光源下での色票#1 と色票#2 の各色の CIE L\*a\*b\*均等色空間上での色値を、同じく a\*-b\* (色彩) 平面と、c (彩度) -L\* (明度) 平面により示した。なお彩度 c は式 (3-12) で求めた。

$$c = \left[ (a^*)^2 + (b^*)^2 \right]^{1/2} \quad (3-12)$$

ここで、 $c$  は彩度値、 $a^*$ 、 $b^*$  は CIEL\*a\*b\*均等色空間上での色値である。このような分布図の表現によって、同一光源下での2つの色票における同じ試験色間の色差の大きさを比較することができる。例えば Fig. 3-10 と Fig. 3-11 からは色票#1 と色票#2 の色差は、D65 標準光源下に比べて  $kk$  光源下の方が大きくなることがわかる。

(2) 色票を固定した光源間色差表現

**Fig. 3-12** には、色票#1 の D65 標準光源下と試験用 LED の  $kk$  光源下での色票#1 の各色の CIEL\*a\*b\*均等色空間上での色値を、 $a^*$ - $b^*$  (色彩) 平面と、 $c$  (彩度) - $L^*$  (明度) 平面により示した。**Fig. 3-13** には、色票#2 の D65 標準光源下と試験用 LED の  $kk$  光源下での色票#2 の各色の CIEL\*a\*b\*均等色空間上での色値を、同じく  $a^*$ - $b^*$  (色彩) 平面と  $c$  (彩度) - $L^*$  (明度) 平面により示した。このような分布図の表現によって、同一色票の2つの光源下での、同じ試験色票色間の色差の大きさを比較することができる。例えば Fig. 3-12 と Fig. 3-13 からは D65 標準光源下と  $kk$  光源下での色票#1 の色差は、同じく D65 標準光源下と  $kk$  光源下での色票#2 の色差より小さいことがわかる。

なお Fig. 3-10, Fig. 3-11, Fig. 3-12 および Fig. 3-13 の分布図に使用した各色票色の色値のシンボルの凡例は Fig. 3-24 (後述 3.2.6 項) に示すが、Fig. 3-10, Fig. 3-11, Fig. 3-12 および Fig. 3-13 では各色シンボル#1 は#1 色票、#2 は#2 色票の各色票色の色値を表す。

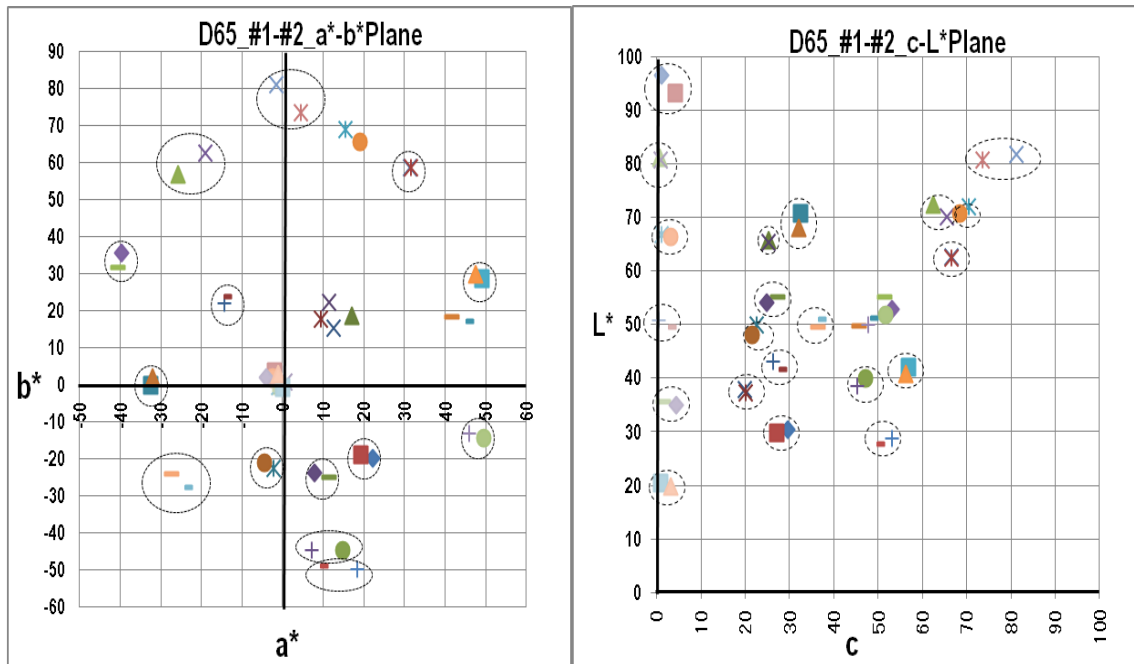


Fig. 3-10 Under light source “D65” color sample #1 vs. #2 in  $a^*$ - $b^*$ plane(left), under light source “D65” color sample #1 vs. #2 in  $c$ - $L^*$ plane(right).

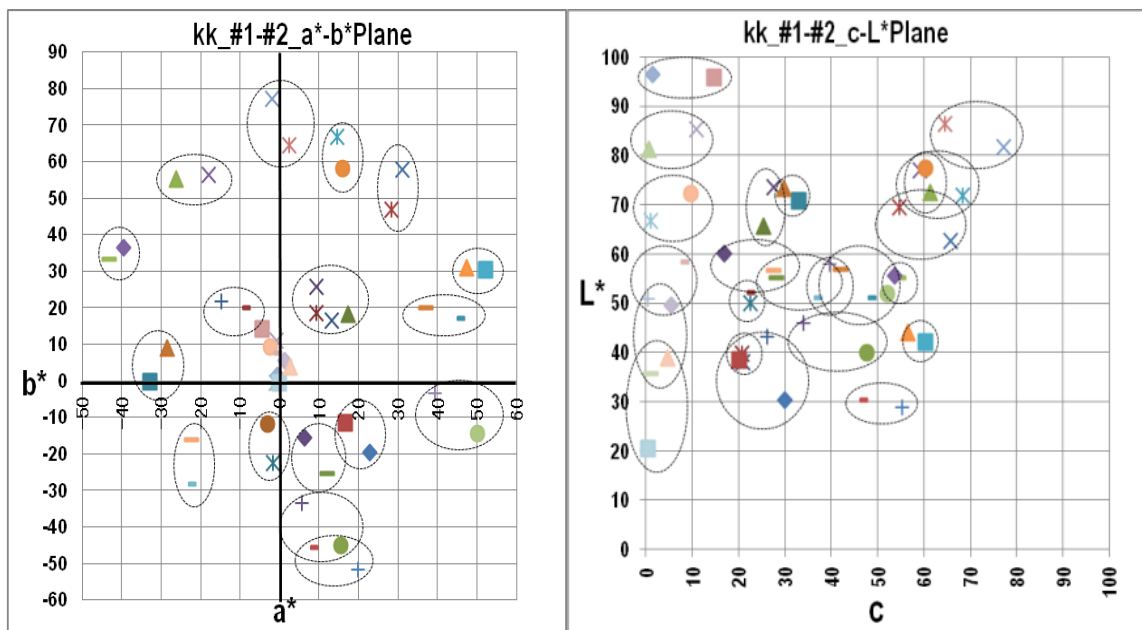


Fig. 3-11 Under light source “kk” color sample #1 vs. #2 in  $a^*$ - $b^*$ plane(left), under light source “kk” color sample #1 vs. #2 in  $c$ - $L^*$ plane(right).

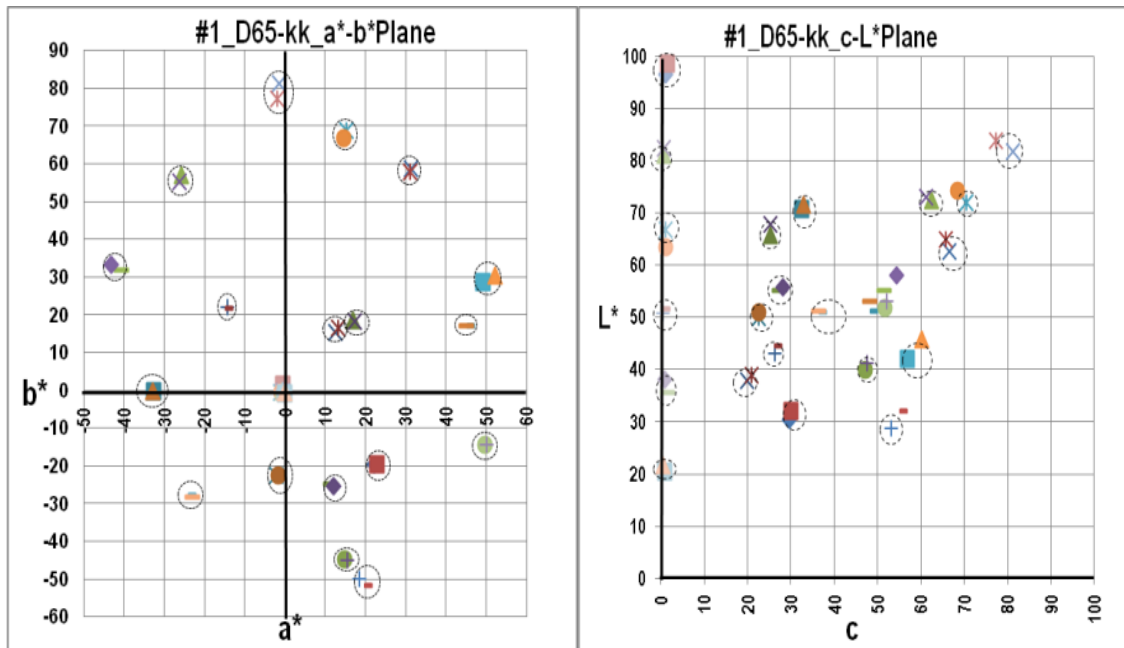


Fig.3-12 Under light source “D65” vs. “kk” color sample #1 fixed in  $a^*-b^*$ plane(left), under light source “D65” vs. “kk” color sample #1 fixed in  $c-L^*$ plane.

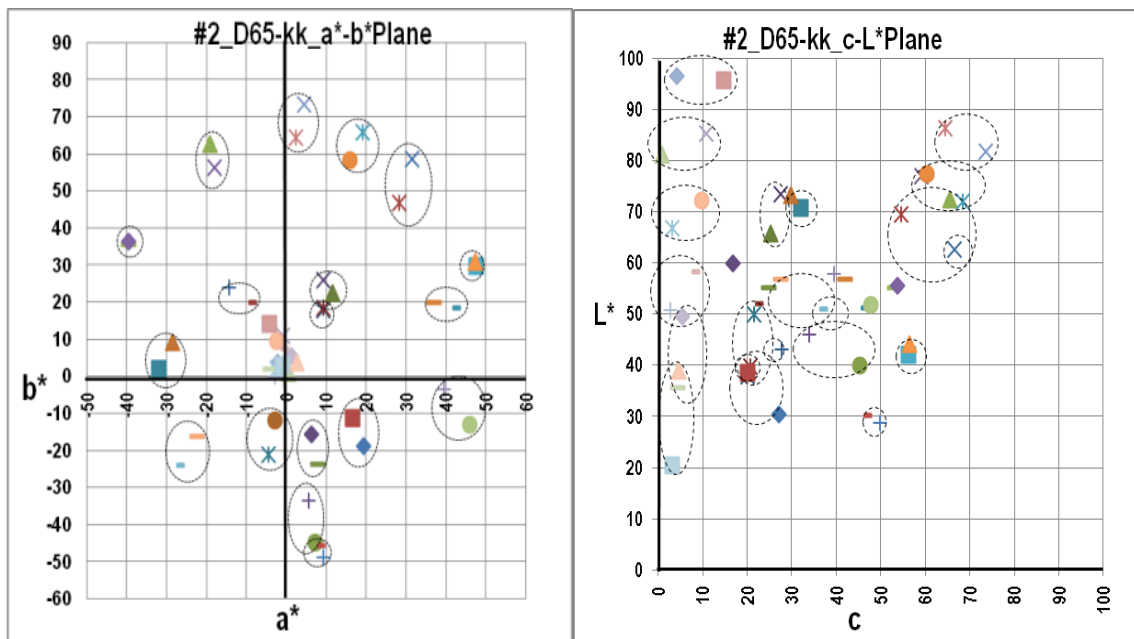


Fig.3-13 Under light source “D65” vs. “kk” color sample #2 fixed in  $a^*-b^*$ plane(left). under light source “D65” vs. “kk” color sample #2 fixed in  $c-L^*$ plane(right).

### 3.3 データの取得と処理（ハイパースペクトルセンサ導入、正規化）

#### 3.3.1 ハイパースペクトルセンサ

分光データの取得手段として、本研究ではハイパースペクトル（以降 HS と呼称）センサを導入した。現在 HS センサはリモートセンシングに広く応用されている分光測定装置であり、高波長分解能、広帯域、高速動作などの特徴を有しており、本研究に現在導入可能な測定手段として最適な測定装置の一つである。

HS センサには、ラインカメラを機械的にスキャンして対象物の 2 次元 HS 画像を取得する画像センサと、対象物の 1 点もしくは単一領域の反射光のみの分光放射輝度を測定するスペクトロメータがあるが、本研究では十分な波長分解能の得られる後者を使用する。HS センサは、米国 ASD<sup>3-2)</sup> (Analytical Spectral Devices, Inc.) 社製の FieldSpec 3 を使用する。Table 3-2 にその概仕様を、Fig.3-14 にはその外観と測定状況を示し、以下にその特徴について述べる、

##### (1) 波長分解能が高い：

本研究で使用する HS センサ FieldSpec 3<sup>3-2)</sup> 波長 1 nm 間隔で、スペクトルデータの取得ができる。予備実験で求めた試験色票の物体色分光反射率および試験 LED 光源の分光分光放射輝度のスペクトル分布は複雑であり、特定の波長域に急峻なピークや谷を持っていることが確認されている。FieldSpec 3<sup>3-2)</sup> HS センサの持つ 1 nm の波長分解能により得られる高分解能なデータは、精密な定量評価解析に有効である。

##### (2) 測定波長帯域が広い：

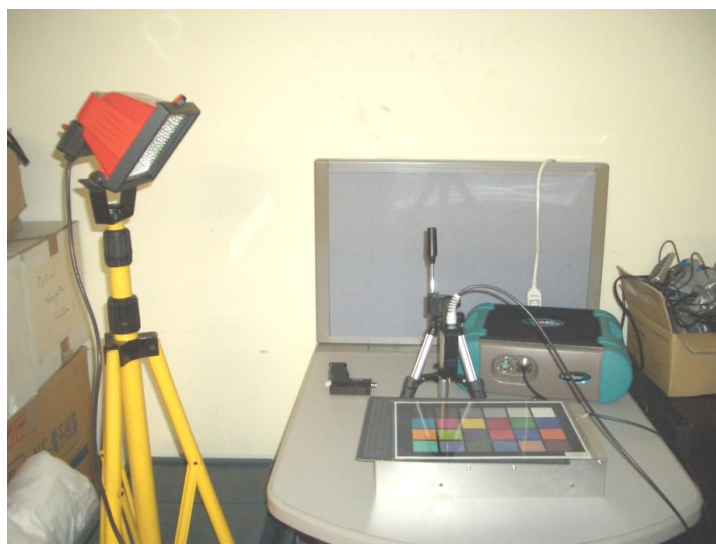
本研究で使用する HS センサ FieldSpec 3<sup>3-2)</sup> は波長 350 nm から 2500 nm の測定域があり、従来の分光測色計の測定域が可視領域（波長 380~780 nm）であるのに対して特に赤外域に広い測定域がある。これら可視領域外の波長域での分光スペクトルデータからは、印刷再現色特性や画像の耐候性に影響のあるインクや印刷用紙の材料構成要素固有の分光反射特性や含有水分特性などについての解析データが得られる。昨今の LED 照明に代表される多様化した照明環境や物体色再現主要素であるインクの種類や組成の中においても、経験的あるいは発見的に蛍光材料が選択されているが、HS センサの特徴を生かして可視領域外の波長域を含めた蛍光物質の影響についてもデータの取得と解析の可能性が期待される。

##### (3) 高速な動作：

本研究で使用する HS センサ FieldSpec 3<sup>3-2)</sup> は、1 つの測定対象に対して波長 350 nm から 2500 nm までの帯域で 1 nm 間隔のデータ 2151 個を 0.1 秒で取得できる。本研究の様に膨大な量のデータ取得が良給される状況下では、本装置の高速な動作性能は大変有効である。

**Table 3-2 Specification of hyper spectral sensor.**

Model	FieldSpec 3
Wavelength range	350–2500 nm
Sampling ratio	1nm: @350-1050 nm 2 nm: @1000-2100 nm
Scanning time	100 msec.
Accuracy	1 nm
Angle (std. 25)	1 ° ,3 ° ,8 ° ,10 ° Available
Reflectance	Available
Radiance	Available



**Fig.3-14 Hyper Spectral Sensor and View of Expremtation.**

### 3.3.2 定量評価のためのデータの処理

#### (1) 正規化

本研究に於ける定量評価実験のために取得するデータは主として、照明光源の分光放射輝度値と色票色の分光反射率であるが、様々な様態でこれらを測定取得する際には、物理的配置や暗室の条件などの測定環境、および測定装置自体の周囲温度による動作値変動やセンサ素子自体の暗電流の影響などを影響を最小化したうえでの正規化されたデータとして処理することで本研究および今後の発展的な研究応用に効果的に使用できることを考慮しなければならない。本研究では解析に使用する全ての分光データを下記の式(3-13)により正規化処理した。なお、本測色手段に限らず、分光測定機器の動作点は常に適切な較正が行われていることは基本条件である。例えば前記の正規化処理では波長方向のずれには対処できない。

$$R(i) = \frac{L(i) - Drk(i)}{Lw(i) - Drk(i)} \quad (3-13)$$

ここで測定波長バンド*i*での、 $R(i)$ は正規化された分光反射率、 $L(i)$ は色票色の分光放射輝度値、 $Lw(i)$ はセンサのデータ取得時に映し込んだ較正用標準白色板の分光放射輝度値、 $Drk(i)$ は外部からの光を遮断した時のセンサの暗電流値とする。本処理により取得分光反射率データは、数値的に正規化されるのと同時に、計測機器の温度特性、暗電流、光源以外の光や乱反射等の影響などを回避できる。また今後、他の研究解析にも汎用的に活用できる。

## (2) 標準白色板

標準白色板は、完全拡散反射板とも呼ばれる白板で完全拡散反射面を持ち、画像の物体分光反射率値と照明光源の分光放射輝度値を策定する際の基準測定対象として利用される。本研究では前項の分光解析データの正規化基準値を求める際に使用した。**Fig. 3-15**に標準白色板（完全拡散反射板）の写真を示す。標準白色板の反射面については、複数の標準白色板の分光測定を行い十分な管理がなされていることを確認した。



**Fig. 3-15 Standard white board.**

### 3.4 予備実験：データの取得，処理，指標値と色差の精度検証

#### 3.4.1 予備実験

前項までに記述した本研究の基本的な推進方針に沿って取得され，処理されたデータを用いた色差検討の有効性を検証し，第4章以降の本研究提案表色指標や色差解析用の基本的条件を整えるための予備実験として，まず実際にHSセンサを用いて分光データの取得を行い，得られたデータを基に先行研究結果<sup>3-4)</sup>との比較を行った。

予備実験の基準色色票用には色調整用として写真や印刷の業界で広く使用されている標準色サンプル Gretagmacbeth ColorChecker™Color Rendition Chart<sup>3-5)</sup>（以降，カラーチェッカと呼称）を使用した。色票に付属する試験色の構成，各試験色の色データを Fig. 3-16 に示す。比較用色票をカラーインクジェットプリンタで出力する際に前記付属データを使用し，プリンタ装置付属の標準ドライバで出力したものと，これに測色的手法で色差改善したもの計2種類<sup>[宋，関，下平<sup>3-4)</sup>]</sup>を用意した。Table 3-3 に各色票の概要を示す。

Table 3-3 Color samples.

#1: Standard	Gretagmacbeth ColorChecker color sample.	™Color Rendition Chart.
#2:	Printed out by standard Comparison printer device drivers.	color sample.
#3:	Printed out by improved Comparison printer device drivers.	color sample.

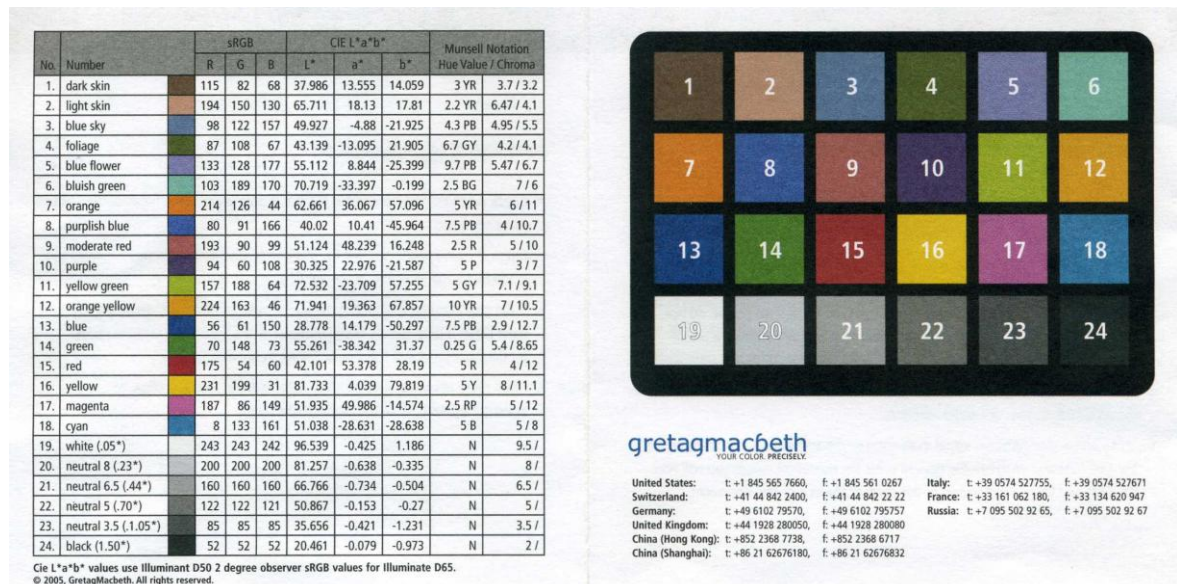


Fig. 3-16 Data of Color Samples, attached.

Fig.3-17 には、予備実験で使用した3つの色票<sup>3-4)</sup>の概要を示す。

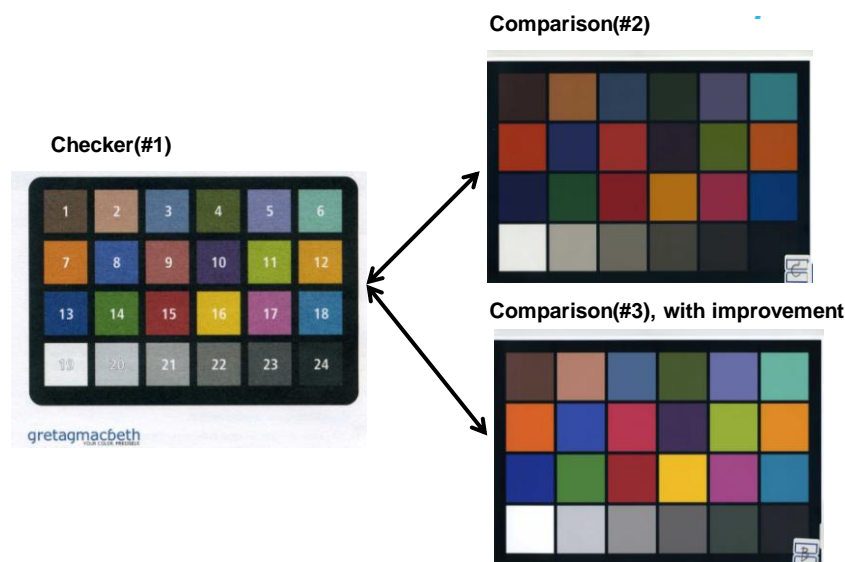


Fig.3-17 Used 3-Color Samples #1, #2 and #3.

各色票は時間的に褪色等の変化による測定結果への影響をなくすため分光測定を行って品質の管理維持をした。特に基準となるカラーチェッカについては厳重に管理する必要がある。本研究に使用されたカラーチェッカは経時変化に対して安定していた。

Fig. 3-18 に実験環境の全景を示す。測定台上に色票，HS センサを色票に対して垂直方向 56 mm の距離に設置，照明は色票に対して 45°の角度で照射，光源と色票間の距離は 600 mm とした。取得データ正規化のための標準白色板を用いて各色票色測定のたびに，正規化のためのデータを取得した。実験は室温を一定 (20° C) にした完全な暗室内で行った。照明光源には，計測する 350~2500 nm の波長域で発光エネルギーが高く，安定した輝度が得られるハロゲンランプを使用した。

HS センサ FieldSpec 3 は，視野角を 8°に設定し各カラーパッチのほぼ中央部分の直径約 9 mm の円内を計測する。絞りは自動とした。機器に備わった調整操作を行って暗電流の影響を極小化した。標準白色板と対象色票色の両方の分光放射輝度値を各計測ステージで計測して，2つのデータから式(3-12)により前項に述べた正規化された分光反射率を求めた。

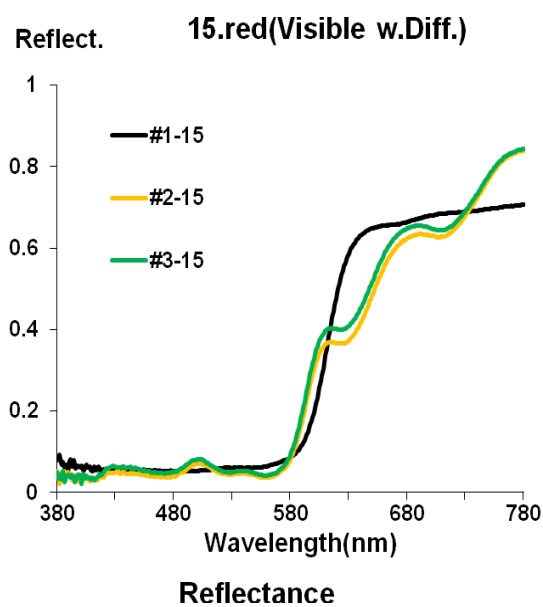
各色票色はそれぞれ3回のスキャンを行ってデータを取得したが，3回の取得データには大きな相違が表れなかったので3回のデータの平均値を使用した。取得したデータは，バンド数 2151。波長帯域 350-2500 nm，サンプリング間隔 1nm として，各色色票の各色パッチに対して 2151 個のデータを取得した。各色色票の色パッチ数は 24 色，3種類の測定色票となるので，合計で 154,872 個のデータを取得した。

### 第3章 色差を用いた表色評価法の提案と検討

**Fig. 3-19** に本研究提方法により，取得されたデータを用いた処理を行った例として，色票色 Red の可視域分光反射率分布を示す．#1 元色票とインクジェットプリンタによる再現色票 2 種（#2 色差改善なし#3 色差改善あり）の分光反射率分布を分かりやすく見ることができる．



**Fig. 3-18** HS Sensor and objects.



**Fig. 3-19** Obtained data Color Sample 15 Red in Visual band.

#### 3.4.2 取得データの検討

### 第3章 色差を用いた表色評価法の提案と検討

予備実験結果の分析として、全色票の24色について、#1元色票、#2再現色色差改善なし、#3再現色票色差改善あり、から取得したデータをもとに作成した分光反射率分布及び分光色差分布のグラフの中から、代表的な9色をFig.3-20-1~3に示す。各色、左側のグラフには、可視領域（波長380~780nm）の色票#1、#2、#3の分光反射率分布と各波長に対応した色票#1と#2との差（ $d\#1 - \#2$ ）と色票#1と#3との差（ $d\#1 - \#3$ ）の分布を示す。右側のグラフには今回測定した全波長域（波長350~2500nm）の色票#1、#2、#3の分光反射率分布を示す。それぞれの色の特性が反映されたデータが取得されており、局所的な不連続性もなく正確なデータが得られている。Fig.3-20-1~3には、代表的な色として全24色から15.red, 7.orange, 16.yellow, 14.green, 13.blue, 10.purple, 19.white(05\*), 21.neutral6.5(.44\*), 24.black(1.50\*)の9色を選出した。

結果から、色票#1は過去の写真や印刷のカラーマッチングに多くの使用、改良の実績があり、#2や#3に比べてグラフ形状がなめらかである。逆に#2と#3は相互に類似した傾向を持ち、#1との間では顕著な差を有している。特に波長420nm以下の短波長域での反射率が#1に比べて低く、逆に波長700nmから800nmにかけては、反射率が高く、以降2500nmまで減衰していくが、#2、#3が、#1に比べてグラフ形状の変動が激しい。これら取得データおよび処理結果を以下で分析する。

(1) 本研究で計測取得されたデータの有効性を検証するため、3.2.1項および3.2.2項に提案した方法を用いた色票#1と#2、色票#1と#3間の色差値を求め、先行研究<sup>3-4)</sup>で行った#2から#3への色差改善効果を検証した。

ここで、各色票色の三刺激値はそれぞれ $X_s, Y_s, Z_s$ とする。

$$X_s = \sum_{i=380}^{i=780} R(i) \bar{x}(i) \quad (3-14)$$

$$Y_s = \sum_{i=380}^{i=780} R(i) \bar{y}(i) \quad (3-15)$$

$$Z_s = \sum_{i=380}^{i=780} R(i) \bar{z}(i) \quad (3-16)$$

ここで、 $R(i)$ は波長領域（380~780nm）で1nmごとの波長での測定分光反射率数値、 $\bar{x}(i), \bar{y}(i), \bar{z}(i)$ は各波長における等色関数数値（標準比視感度関数）とする。これを色票#1、#2、#3について求め、

更に#1の数値から#2の数値を引いた値（差）の絶対値を $\#2\Delta X_s, \#2\Delta Y_s, \#2\Delta Z_s$ とし、#1の数値から#3の数値を引いた値（差）の絶対値を $\#3\Delta X_s, \#3\Delta Y_s, \#3\Delta Z_s$ として求める。Fig.3-7に示す座標空間距離で色票#1データが示す座標と色票#2データが示す座標との距離を $\#2D$ 、色票#1データが示す座標と色票#3データが示す座標との距離を $\#3D$ とすると、

$$\#2D = \sqrt{(\#2\Delta X_s)^2 + (\#2\Delta Y_s)^2 + (\#2\Delta Z_s)^2} \quad (3-17)$$

$$\#3D = \sqrt{(\#3\Delta X_s)^2 + (\#3\Delta Y_s)^2 + (\#3\Delta Z_s)^2} \quad (3-18)$$

となり、それぞれ#1と#2、#1と#3の色差値として表される。以上の方法で求めた前述第3で選んだ24色中の代表色9色(Fig.3-20-1~3参照)について、上式(3-16)、(3-17)で得られた結果をTable3-4に示す。

本研究の提案手法を用いて得られた色差指標値は、先行研究<sup>3-4)</sup>で測色的な手法を用いて色差改善を行った色票#3の値が色差改善を行わない資料#2より小さく、先行研究<sup>3-4)</sup>での改善効果が認められる。更に注目すべきは、7. orange, 10. purple, 13. blue, 14. green, 16. yellow, 24. blackでは、色票#1と色票#3の単純なスペクトル差による色差absは、資料#1と資料#2の単純なスペクトル差による色差より大きいにもかかわらず、三刺激値を加味して求めた色差rmsは、色票#3の方が値が小さくなっている。これは、色再現手法があくまで、人間の知覚に対し構築されているためである。以上の結果より、本研究方法の色差解析への応用に際しての有効性を確認した。

Table3-4 Color difference between selected 3 samples(normalized value).

Color#	Color	#1-#2 Total absolute value (cf.1).	#1-#3 Total absolute value(cf.2).	#1-#2 Total absolute value(cf.3).	#1,-3 Total absolute value(cf.4).
7	orange	15.378	16.283	8.089	7.937
10	purple	37.058	35.029	4.136	2.539
13	blue	18.928	23.647	3.327	2.789
14	green	30.435	33.708	5.367	4.597
15	red	20.443	17.998	8.142	4.115
16	yellow	14.661	15.847	9.95	6.878
19	white(.05*)	44.945	29.338	22.027	9.947
21	neutral6.5(.44*)	37.629	36.835	6.796	5.622
24	black(1.50*)	8.763	12.689	1.109	0.879

(cf.1)“#1-#2 Total absolute value.”とは、可視領域（波長 380～780 nm）で、1 nm ごとに取得した色票#1と色票#2の分光反射率の差（絶対値）の単純な累計値である。

(cf.2)“#1-#3 Total absolute value.”とは、可視領域（波長 380～780 nm）で、1 nm ごとに取得した色票#1と色票#3の分光反射率の差（絶対値）の単純な累計値である。

(cf.3)“#1-#2 Total absolute value.”とは、可視領域（波長 380～780 nm）で、1 nm ごとに取得

### 第3章 色差を用いた表色評価法の提案と検討

した色票#1 と色票#2 の分光反射率の差(絶対値)と、三刺激値を加味して式(3-14), (3-15), (3-16)および式(17)により求めた色差値である。

(cf.4) “#1-#3 Total absolute value.”とは、可視領域(波長 380~780 nm)で、1 nm ごとに取得した色票#1 と色票#3 の分光反射率の差(絶対値)と、三刺激値を加味して式(3-14), (3-15), (3-16)および式(18)により求めた色差値である。

第3章 色差を用いた表色評価法の提案と検討

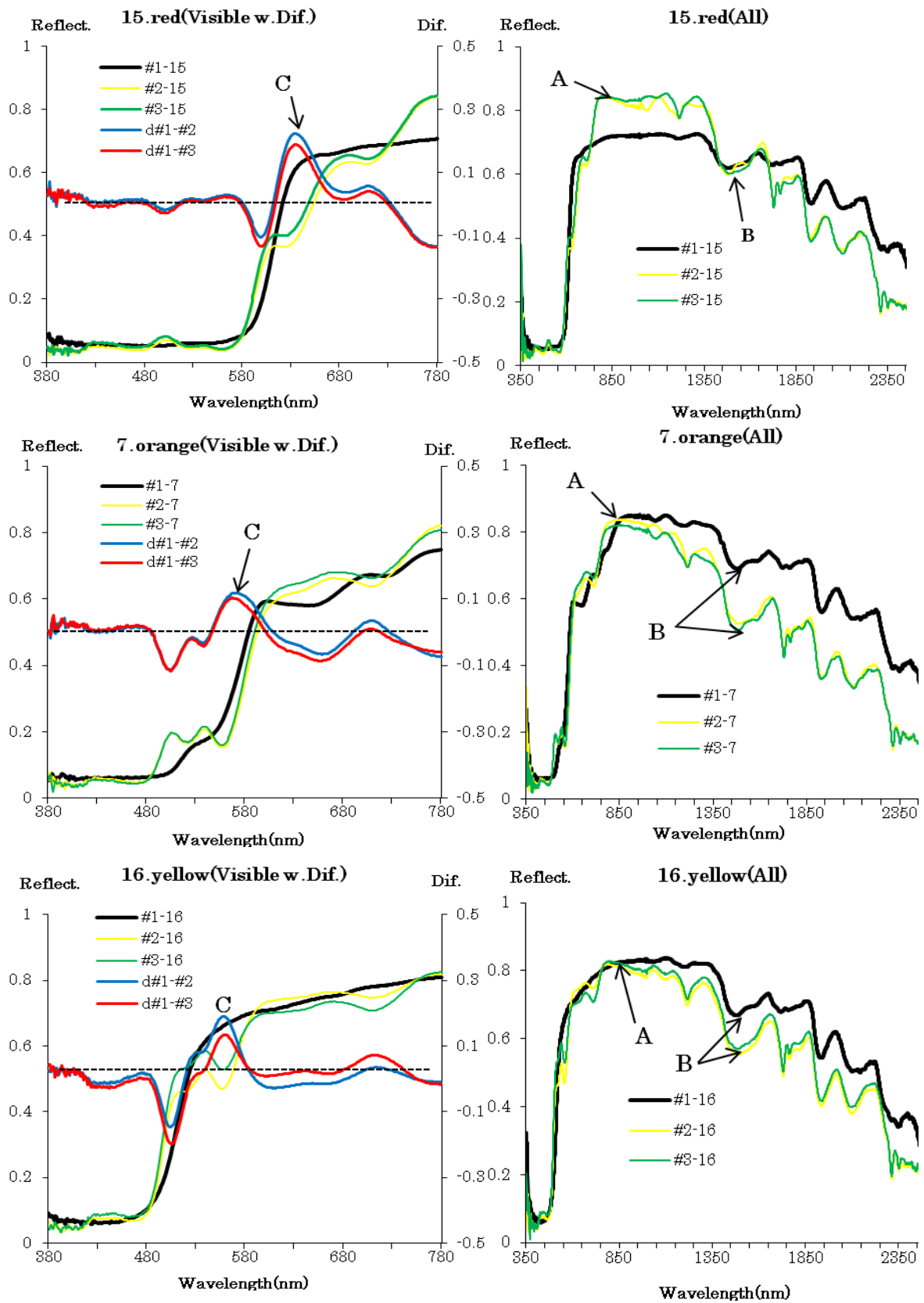


Fig. 3-20-1 red, orange, yellow

第3章 色差を用いた表色評価法の提案と検討

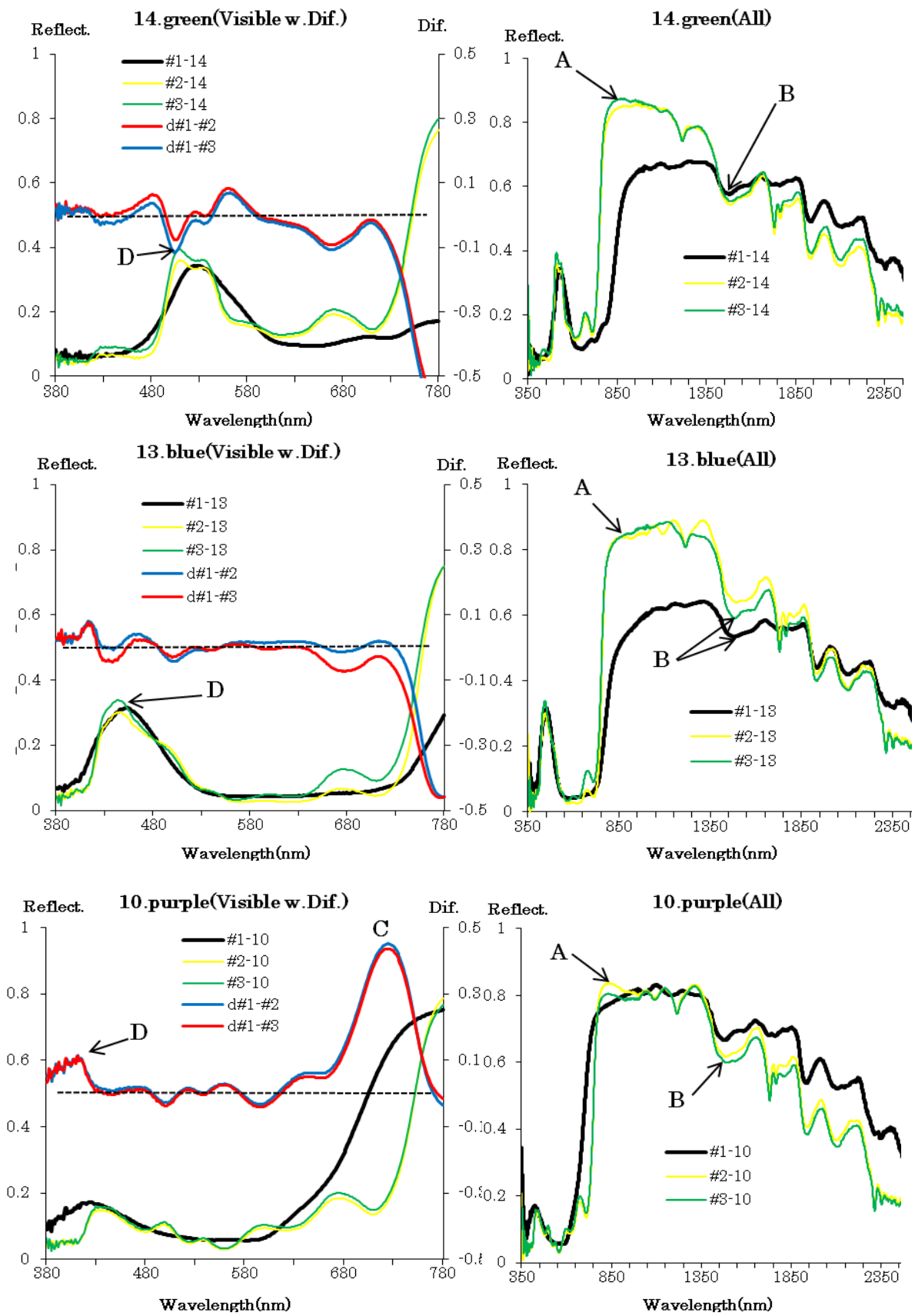


Fig.3-20-2 Green, Blue, Purple

第3章 色差を用いた表色評価法の提案と検討

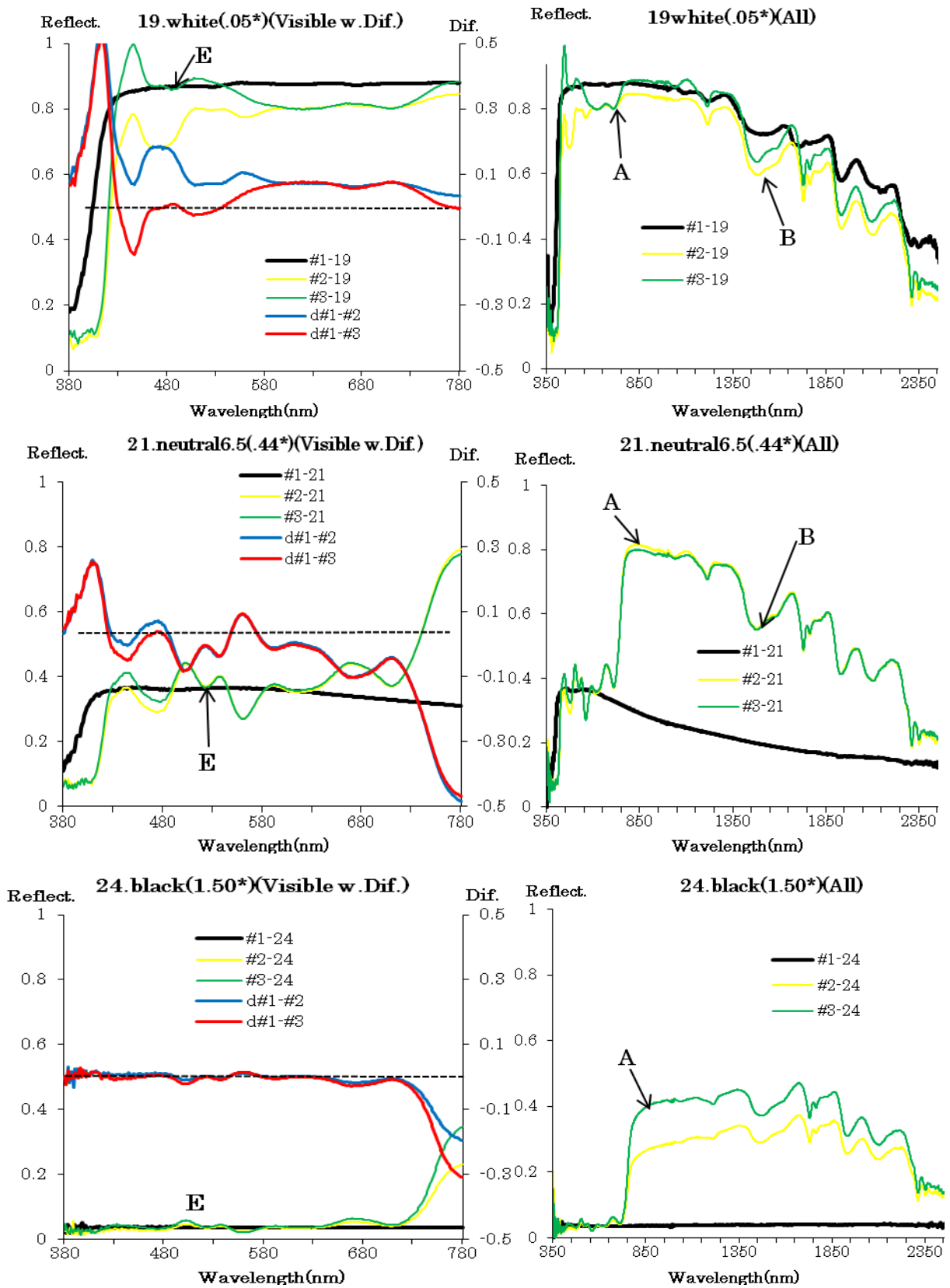


Fig. 3-20-3 White, Neutral, Black

### 3.4.3 付随的成果（植物繊維，水分含有）

Fig.3-21-1～3には、色票色 15.Red, 7.Orange, 16.Yellow の全バンドでの分光反射率を示すが、グラフ中の矢印で示す A には植物繊維の特征的スペクトル、B には水分含の特徴が見られる。Fig.3-20-1～3にも可能な限り A および B の表示を行った。いずれも赤外域での特性分析で、HS センサを用いたことで得られた特性である。本研究の目的と異なるので今回は事象の確認に留めたが、次期研究テーマとして還元して行きたい。

再現画像には忠実色再現とならんで、獲得された再現画像の劣化を防止して品質を保持することも重要な要件である。劣化の要因となる用紙やインクなどの画像構成部材の特性を非破壊的に獲得する手段として、画像構成部材に含まれる物質固有の分光反射率を用いた解析は有効な方法であるが、物質を特徴づける分光反射率の特異波長域は、可視領域外にも存在する。HS センサの持つ広帯域な測定能力を用いてこれらのデータが取得できる。さらに、蛍光物質の含有やその影響も分光スペクトルを分析することにより推定が可能である。

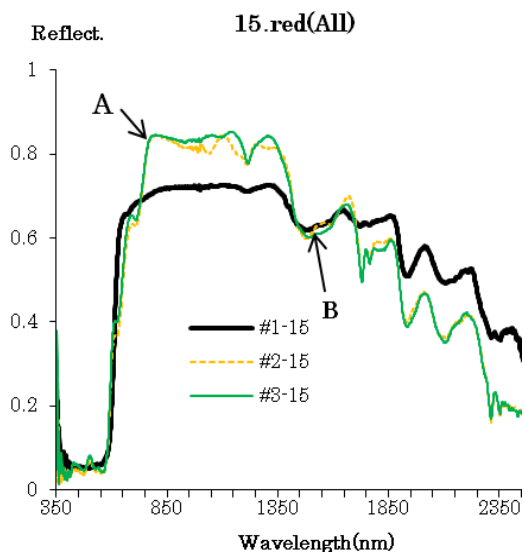


Fig.3-21-1 Red

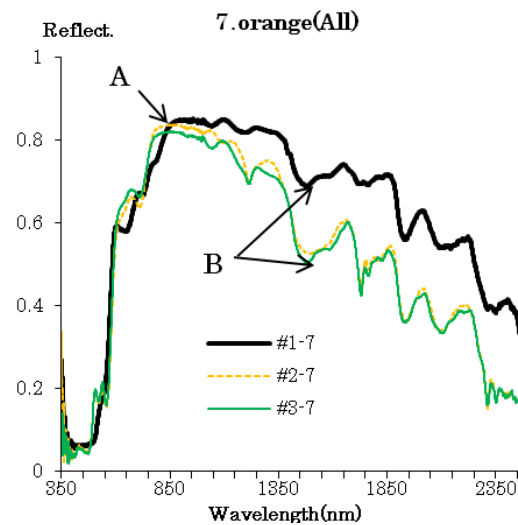


Fig3-21-2 Orange

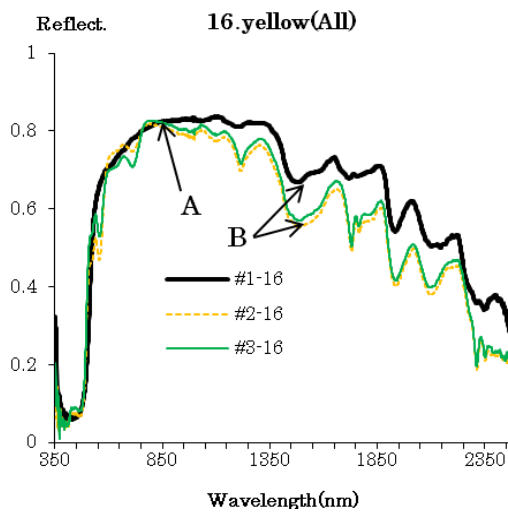


Fig.3-21-3 Yellow

#### 3.4.4 単純なスペクトル差と三刺激値を加味した提案色差比較

Fig.3-22 は、全ての色票色について、前項に述べた処理に基づき、単純なスペクトル差による色差  $abs$  値と三刺激値を加味した色差  $rms$  を比較したものである。左図の  $abs$  値では、色票#1 と#2 間と色票#1 と#3 間の比較では 13 色対 11 色で色票#1 と#2 間が勝り、数値の累計でも 1:1 であり、先行研究<sup>3-5)</sup>で求めた結果に一致しない。三刺激値を加味した色差指標  $rms$  値では、15 色対 9 色で色票#1 と#3 間が勝り、数値の累計でも 1:0.9 で色票#1 と#3 間が勝っており、色差改善の効果が表れた先行研究<sup>3-5)</sup>の結果と一致した結果となった。ここからも三刺激値を加味した色差指標の提案の妥当性が検証できた。

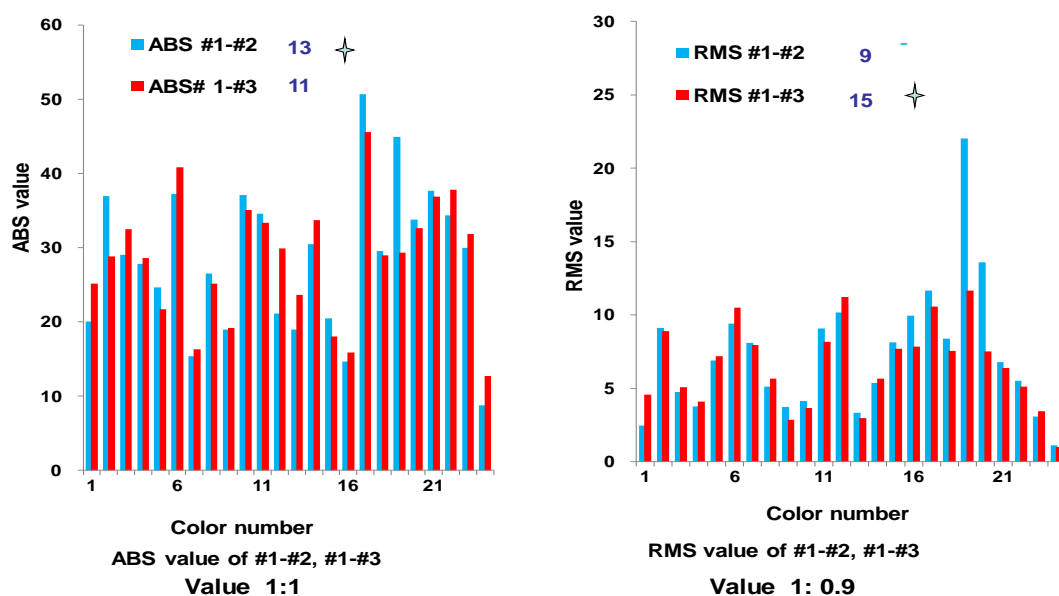


Fig.3-22 Comparison abs(=ABS) vs. rms(=RMS) in all color.

### 3.4.5 提案手法の評価

予備実験を行った結果、

- (1) HS センサは、カラー印刷画像の評価に効果的に活用できること
- (2) 取得データの正規化処理は、多様な解析が可能や応用に展開が可能なこと
- (3) 三刺激値を加味した色差の提案表現は、単一の数値による色差指標として解析時に有効に応用可能であることが確認できた。

しかし、(3)では色値の変化量と人間の知覚変化量は等しくないため、第4章に述べる定量評価実験および主観評価実験検証には人間の知覚的均等性（色値の変化量と人間の知覚変化量が等しい）を持った CIEL\*a\*b\*均等色空間での解析が必要になる。この為の検討を以降に行い、併せて本研究測定系の精度と汎用性の検証を行った。

### 3.4.6 本研究測定方法の精度と汎用性の検証

本研究では測色手段として HS センサを使用した。データ処理や第3章、第4章で行った実験、検証に用いた CIEL\*a\*b\*均等色空間での色値への変換などでは、一般に実績のある従来の分光測色計を用いた方法とは異なる方法を用いている。測定環境、測定装置の精度や、取得データの処理、CIEL\*a\*b\*均等色空間色値への変換式など十分な吟味を行う必要がある。また本研究測色系での測色値は単一の HS センサによって取得された値によって閉じた系となっており他の測色手段を参照することで汎用性を確認することとした。

測定精度に関する検証方法としてまず、色票にカラーチェッカ<sup>3-5)</sup>を用い、光源にはプリ

### 第3章 色差を用いた表色評価法の提案と検討

ンタ装置の出力画像評価時に一般に使用される D65 標準光源を用いて本研究提案方法により測定したデータから換算した CIEL\*a\*b\*均等色空間色値と、色票に付属している各色票色の CIEL\*a\*b\*均等色空間での色値 (Fig.3-16) を直接比較して各色の色差を求める方法を行った。なお、色票に付属している CIEL\*a\*b\*均等色空間色値は、D50 標準光源下での色値データであるため、D65 標準光源下での色値データとの間には色差が生じる (第2章 2.1 項 Table2-2 参照) ため、更に D50 光源による同様な測定を行って取得した色値データによる比較を行った。

また、汎用性の検証方法として別の分光測色計を導入し、同じく色票にカラーチェッカ<sup>3-5)</sup>を用い、光源には D65 標準光源 (換算値) と D50 光源 (換算値) を用いて取得された測色データに基づく色値を用いた比較解析を行った。

(1) D65 光源下 HS センサによる取得測色データに基づく色値と色票に付属している色票各色の CIEL\*a\*b\*均等色空間色値の比較：

**Fig. 3-22** および **Fig. 3-23** には D65 光源下での測定したデータから換算した CIEL\*a\*b\*均等色空間色値 (凡例#2) と、色票に付属している色票各色の CIEL\*a\*b\*均等色空間色値 (凡例#1) を CIEL\*a\*b\*均等色空間での色値分布図で示す。Fig. 3-22 には、CIEL\*a\*b\*均等色空間における a\*-b\*平面 (色み指数平面)、Fig. 3-23 には、各色の彩度  $c$  [3.2.4 項式 (3-12)] 対 L\*平面 (彩度対明度指数平面) の各色値の分布図を示す。同じ円内で囲われた色値が対応する色値データである。分布図の表現を損なわない範囲で円で囲み色差の判定としたがここでの色差は小さく、本研究提案方法の精度が期待できる。**Fig. 3-24** は Fig. 3-22 および Fig. 3-23 の分布図に使用した各色値のシンボルの凡例である。Fig. 3-24 の凡例では Color #1 はカラーチェッカ付属のデータ、Color #2 は本研究で HS センサを用い、D65 光源下で測定されたデータに基づく色値である。

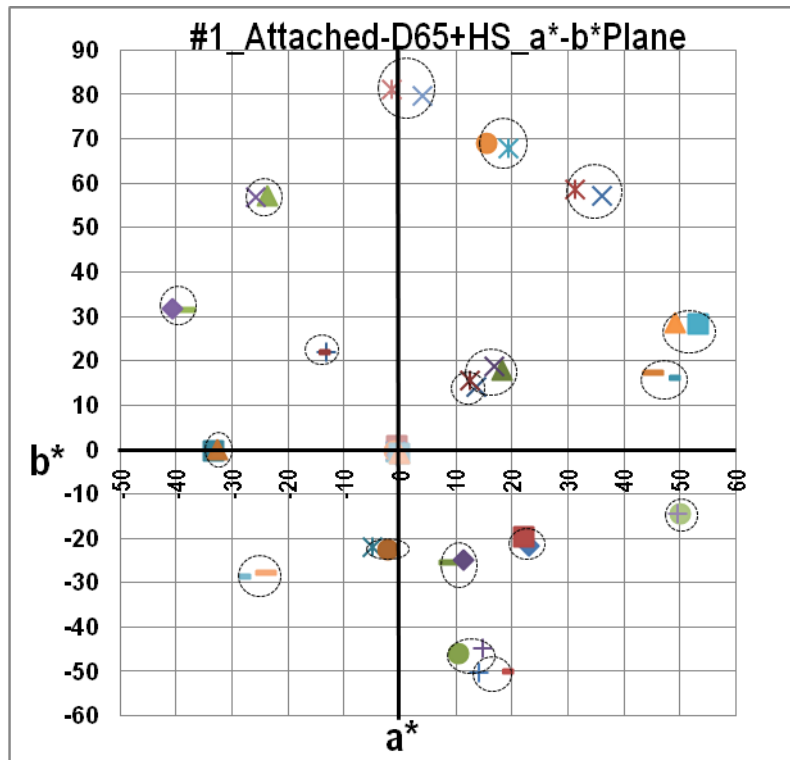


Fig. 3-22 Colorsample #1 attached data vs D65+HS sensor2-2 a\*-b\* Plane

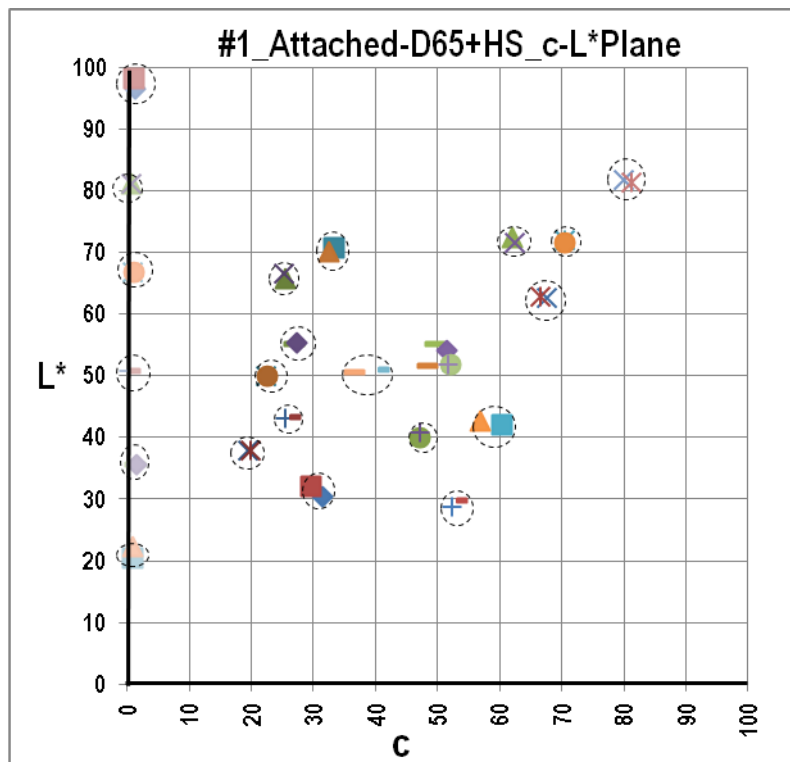


Fig. 3-23 Colorsample #1 attached data vs D65+HS sensor2-2 c-L\* Plane

× 1_darkskin#1	× 1_darkskin#2
▲ 2_Light skin#1	× 2_Light skin#2
× 3_Blue sky#1	● 3_Blue sky#2
+ 4_Foliage#1	- 4_Foliage#2
- 5_Blue Flower#1	◆ 5_Blue Flower#2
■ 6_Bluish green#1	▲ 6_Bluish green#2
× 7_Orange#1	× 7_Orange#2
● 8_Purplish blue#1	+ 8_Purplish blue#2
- 9_Moderate red#1	- 9_Moderate red#2
◆ 10_Purple#1	■ 10_Purple#2
▲ 11_Yellow green#1	× 11_Yellow green#2
× 12_Orange yellow#1	● 12_Orange yellow#2
+ 13_Blue#1	- 13_Blue#2
- 14_Green#1	◆ 14_Green#2
■ 15_Red#1	▲ 15_Red#2
× 16_Yellow#1	× 16_Yellow#2
● 17_Magenta#1	+ 17_Magenta#2
- 18_Cyan#1	- 18_Cyan#2
◆ 19_White#1	■ 19_White#2
▲ 20_Neutral8#1	× 20_Neutral8#2
× 21_Neutral6.5#1	● 21_Neutral6.5#2
+ 22_Neutral5#1	- 22_Neutral5#2
- 23_Neutral3.5#1	◆ 23_Neutral3.5#2
■ 24_Black#1	▲ 24_Black#2

Fig. 3-24 Remarks of Fig. 3-22 and Fig. 3-23. Color #1 is based on the data attached in standard color samples and Color #2 is obtained in this study by using HS sensor and D65 light sources.

また、Table 3-5-1には、前記の色票付属と実測2つの色値データ差の計算結果数値を示す。相対的に大きな数値を色分けしたが、例えば色差比較で 16 Yellow が最も大きな値 (5.699) を示している。筆者らの先行研究<sup>3-4)</sup>での主観評価実験では、CIEL\*a\*b\*均等色空間色差値で、3.0以下は専門家以外はほとんど識別ができない、3.0~5.0では専門家以外が一部識別ができる、5.0以上は専門家以外でもほとんど識別できるという識別区分を確認した。なお、Table 3-5の色差の平均値は2.51である。Fig. 3-22, Fig. 3-23およびTable 3-5より、標準色票付属のCIEL\*a\*b\*色値と本研究での実測定の結果は、D50とD65光源との差を鑑みても妥当な色差値の範囲に収まっておりHSセンサを使ったデータ取得、本研究提案のデータの正規化処理、CIE(1931) X,Y,Z色空間への換算およびCIE 1976 L\*a\*b\*色値への変換という一連の処理結果の精度は次章の研究に使用可能であると推定したが、更に“(2) D50光源下でのHSセンサによる取得測色データに基づく色値と色票に付属している色票各色のCIEL\*a\*b\*均等色空間色値の比較”を行って更なる精度検証を行った。

**Table 3-5-1 Color Difference Macbeth vs. D65 1'st observation 2010 ( $\Delta 2.5$ )**

		MacbethD50 vs. HSD65(1'st)			
Color #	Color	dL*	da*	db*	dRMS
1	Dark skin	-0.018	0.988	-1.369	1.688
2	Light skin	-0.910	1.200	-0.824	1.717
3	Blue sky	-0.007	-2.700	0.516	2.749
4	Foliage	-0.274	1.280	-0.029	1.309
5	Blue flower	-0.358	-2.582	-0.480	2.651
6	Bluish green	0.503	-0.813	-0.078	0.959
7	Orange	-0.311	4.688	-1.557	4.950
8	Purplish blue	-0.860	-4.486	-1.247	4.735
9	Moderate red	-0.560	3.011	-0.965	3.211
10	Purple	-1.772	0.778	-1.878	2.696
11	Yellow green	0.857	2.075	0.344	2.271
12	Orange yellow	0.250	3.994	-1.031	4.133
13	Blue	-1.053	-4.258	-0.417	4.406
14	Green	1.119	2.272	-0.436	2.569
15	Red	-0.627	4.262	-0.486	4.335
16	Yellow	0.272	5.535	-1.332	5.699
17	Magenta	0.079	0.411	-0.119	0.435
18	Cyan	0.411	-4.679	-0.891	4.780
19	White(.05')	-1.727	0.221	0.252	1.759
20	Neutral8(.23')	0.133	0.134	-0.110	0.219
21	Neutral6.5(.44')	0.019	0.395	-0.076	0.402
22	Neutral5(.70')	0.149	0.346	-0.254	0.454
23	Neutral3.5(1.05')	0.066	0.216	0.092	0.244
24	Black(1.50')	-1.754	-0.065	-0.139	1.761
total					60.133
AVR					2.506

\* 各値の差が, +-1.0 以内は緑で表示, 以外は茶で表示

\* \* 色差 3 (一般人が確実に識別出来る) 以上は赤表示

(2) D50 光源下での HS センサによる取得測色データに基づく色値と色票に付属している色票各色の CIEL\*a\*b\*均等色空間色値の比較 :

Table 3-5-2 には, 色票に付属している色票各色の CIEL\*a\*b\*均等色空間色値に対する第 1 回目の D65 光源下, D50 光源下および第 2 回目の D65 光源下での取得データによる色差の比較を示す. D50 光源下での平均色差の値は 3.52 となり, 予測に反して第 1 回目の D65 光源下 HS センサによる取得データに基づく色値と色票に付属している色票各色の CIEL\*a\*b\*均等色空間色値の比較の値である 2.51 より拡大している. 第 2 回目の D65 光源下での取得データによる平均色差の値は 5.64 である. 第 1 回目の D65 光源下でのデータ取得は HS センサの較正直後の 2010 年 9 月に測定を行い, D50 光源下および第 2 回目の D65 光源下でのデータ取得は 2013 年 1 月の測定であり, この間 HS センサの較正は行っていない.

### 第3章 色差を用いた表色評価法の提案と検討

<上記の結果に対する考察>

前記の結果は D65 光源下での第 1 回目と D50 光源下および D65 の第 2 回目のデータ取得時期には 2 年以上の隔りがありこの間の HS センサの較正が行われていないためと推測し、D50 および D65 の第 2 回目のデータ取得値より換算した色値による色差からは、第 1 回目の D65 光源下での測定時での D50 光源下での平均色差の推定値は第 1 回目の D65 光源下での測定による平均色差値より小さくなると推定した。(Table 3-5-2 参照)

**Table 3-5-2 Average Color Difference Macbeth vs. D65(1'st), D50 and D65(2'nd).**

光源	色票付属の色値データ	第 1 回測定(2010.9.9)の平均色差	第 2 回測定(2013.1.17)の平均色差
D50	あり	推定値<2.506*	3.519
D65	なし	2.506	5.638

\*推定値は、第 2 回目測定結果の D50,D65 光源下での測定結果の差を第 1 回目測定結果に反映させた。

**Table 3-5-3 Color Difference Macbeth vs. D65(1'st), D50 and D65(2'nd).**

Color #	Color	MacbethD50 vs. HSD65(1'st)				MacbethD50 vs. HSD50				MacbethD50 vs. HSD65(2'nd)			
		dL*	da*	db*	dRMS	dL*	da*	db*	dRMS	dL*	da*	db*	dRMS
1	Dark skin	-0.02	0.99	-1.37	1.69	-1.97	2.36	0.21	3.08	0.48	2.74	0.94	2.94
2	Light skin	-0.91	1.20	-0.82	1.72	1.46	1.49	0.37	2.12	4.85	2.25	0.93	5.42
3	Blue sky	-0.01	-2.70	0.52	2.75	1.39	-2.61	-0.54	3.00	2.16	-2.65	-0.82	3.51
4	Foliage	-0.27	1.28	-0.03	1.31	0.92	1.01	0.84	1.61	1.33	0.61	1.35	1.99
5	Blue flower	-0.36	-2.58	-0.48	2.65	1.15	-2.20	-0.72	2.58	4.79	-1.20	-3.32	5.95
6	Bluish green	0.50	-0.81	-0.08	0.96	2.67	-1.58	0.07	3.10	5.02	-2.87	-0.51	5.80
7	Orange	-0.31	4.69	-1.56	4.95	-0.55	5.47	0.58	5.53	3.15	7.03	4.47	8.91
8	Purplish blue	-0.86	-4.49	-1.25	4.73	-0.13	-4.11	-2.17	4.65	2.58	-2.30	-6.67	7.51
9	Moderate red	-0.56	3.01	-0.96	3.21	0.52	4.53	-0.09	4.56	3.44	7.57	0.99	8.37
10	Purple	-1.77	0.78	-1.88	2.70	-0.75	1.66	-3.04	3.55	0.94	3.52	-4.18	5.55
11	Yellow green	0.86	2.08	0.34	2.27	3.20	1.20	3.26	4.73	4.60	0.40	4.68	6.57
12	Orange yellow	0.25	3.99	-1.03	4.13	1.91	4.95	1.71	5.57	3.05	4.80	2.50	6.21
13	Blue	-1.05	-4.26	-0.42	4.41	0.12	-2.99	-1.89	3.54	0.11	-2.27	-3.19	3.92
14	Green	1.12	2.27	-0.44	2.57	1.93	-0.38	2.70	3.33	3.63	-1.72	3.22	5.15
15	Red	-0.63	4.26	-0.49	4.34	-0.87	5.81	0.78	5.92	0.63	8.44	2.92	8.95
16	Yellow	0.27	5.53	-1.33	5.70	1.92	5.32	3.72	6.77	5.29	4.95	6.17	9.52
17	Magenta	0.08	0.41	-0.12	0.43	0.82	1.56	-0.52	1.84	3.49	4.34	-1.77	5.84
18	Cyan	0.41	-4.68	-0.89	4.78	1.29	-5.79	-1.13	6.04	5.19	-7.82	-4.40	10.37
19	White(.05')	-1.73	0.22	0.25	1.76	4.41	0.35	-0.40	4.44	6.35	0.32	-1.08	6.45
20	Neutral8(.23')	0.13	0.13	-0.11	0.22	2.78	0.03	0.11	2.78	5.68	-0.07	-0.40	5.69
21	Neutral6.5(.44')	0.02	0.39	-0.08	0.40	1.71	0.23	0.21	1.74	5.67	0.13	-0.23	5.68
22	Neutral5(.70')	0.15	0.35	-0.25	0.45	1.76	0.21	0.04	1.77	2.54	0.23	-0.06	2.55
23	Neutral3.5(1.05')	0.07	0.22	0.09	0.24	-0.67	-0.06	0.00	0.67	0.06	0.12	0.25	0.29
24	Black(1.50')	-1.75	-0.06	-0.14	1.76	-1.51	-0.05	-0.21	1.53	-2.18	0.04	-0.03	2.18
total					60.13				84.46				135.32
AVR					2.51				3.52				5.64

\* 各値の差が, +-1.0 以内は緑で表示, 以外は茶で表示

\*\* 色差 3 (一般人が確実に識別出来る) 以上は赤表示

### 第3章 色差を用いた表色評価法の提案と検討

さらに、CIEL\*a\*b\*均等色空間色値の分布図上で前記の各色値の比較を行った。

Fig. 3-25-1 から Fig. 3-25-3 および Fig. 3-26-1 から Fig. 3-26-3 には、それぞれ色票に付属している各色票色の CIEL\*a\*b\*均等色空間色値と第 1 回目の D65 光源下、D50 光源下および第 2 回目の D65 光源下での測定データから換算した CIEL\*a\*b\*均等色空間色値を分布図で示す。Fig. 3-25 から Fig. 3-25-3 には、CIEL\*a\*b\*均等色空間における a\*-b\*平面（色み指数平面）、Fig. 3-26 から Fig. 3-26-3 には、各色の彩度 c [3.2.4 項式 (3-12)] 対 L\*平面（彩度対明度指数平面）の各色値の分布図を示す。同じ円内で囲われた色値が対応する 2 色間の分布値となるが、第 1 回目の D65 光源下での測定結果に基づく色値に比べ、D50 光源下での色値は明度、彩度が低くなる方向へずれ、さらに第 2 回目の D65 光源下での測定結果に基づく色値ではさらに明度、彩度が低くなる方向にずれていることが分かる。これは HS センサの特性変動に相関しているものと推察される。（Fig. 3-25-3 と Fig. 3-26-3 に代表的な変動例を矢印で表示した）

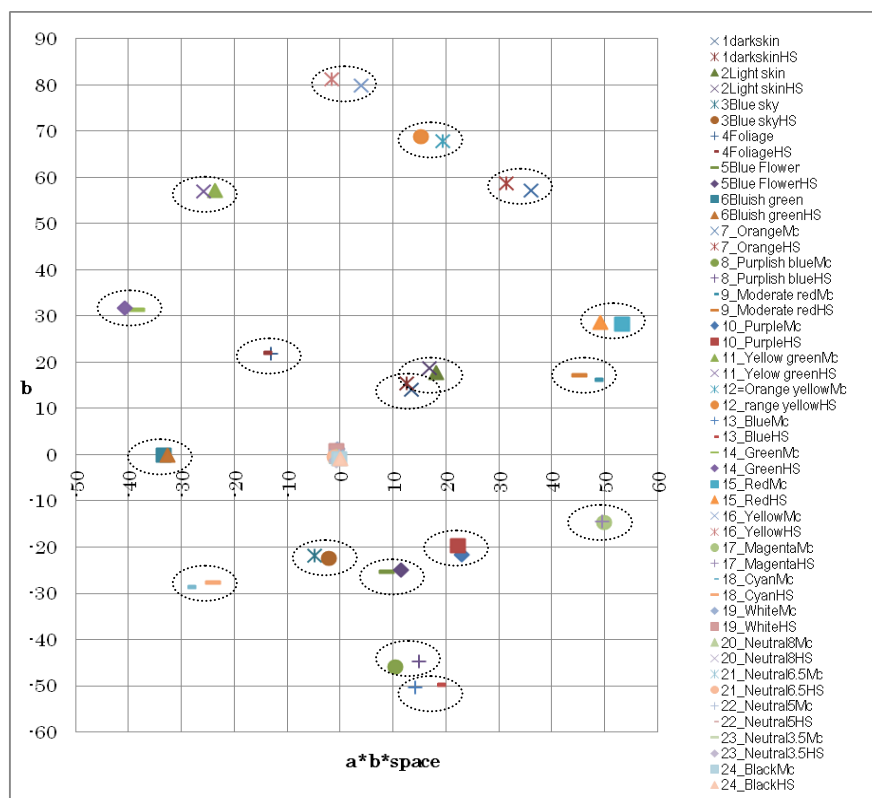


Fig. 3-25-1 Macbeth vs. D65-1'st observation 2010 ( $\Delta 2.5$ ) a\*-b\* plane.

第3章 色差を用いた表色評価法の提案と検討

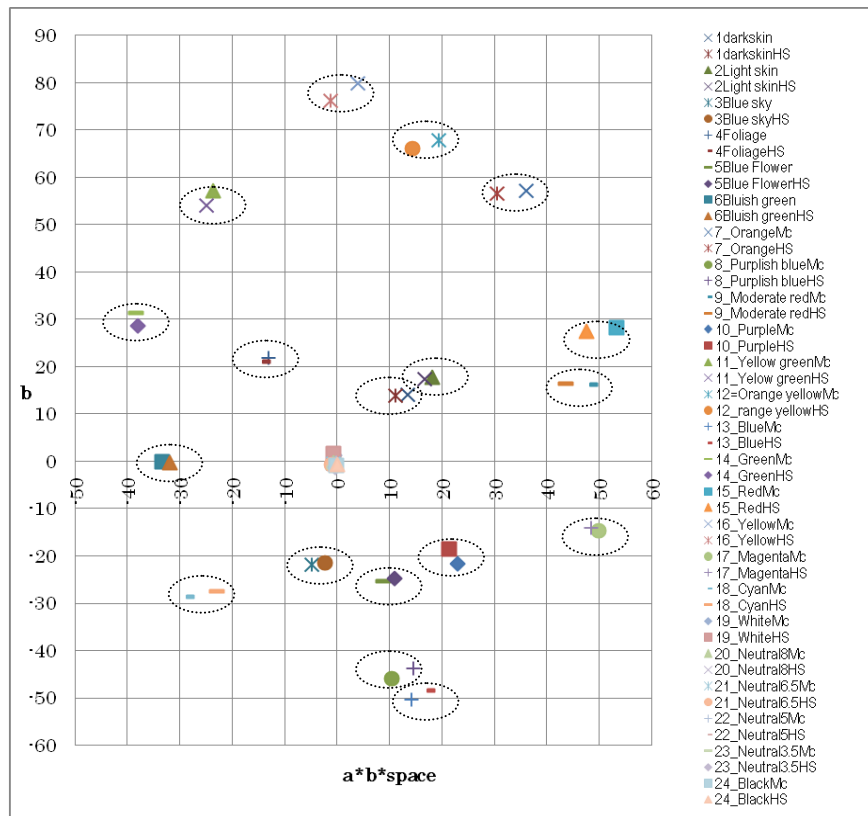


Fig. 3-25-2 Macbeth vs.D50 2013( $\Delta 3.5$ )  $a^*-b^*$  Plane.

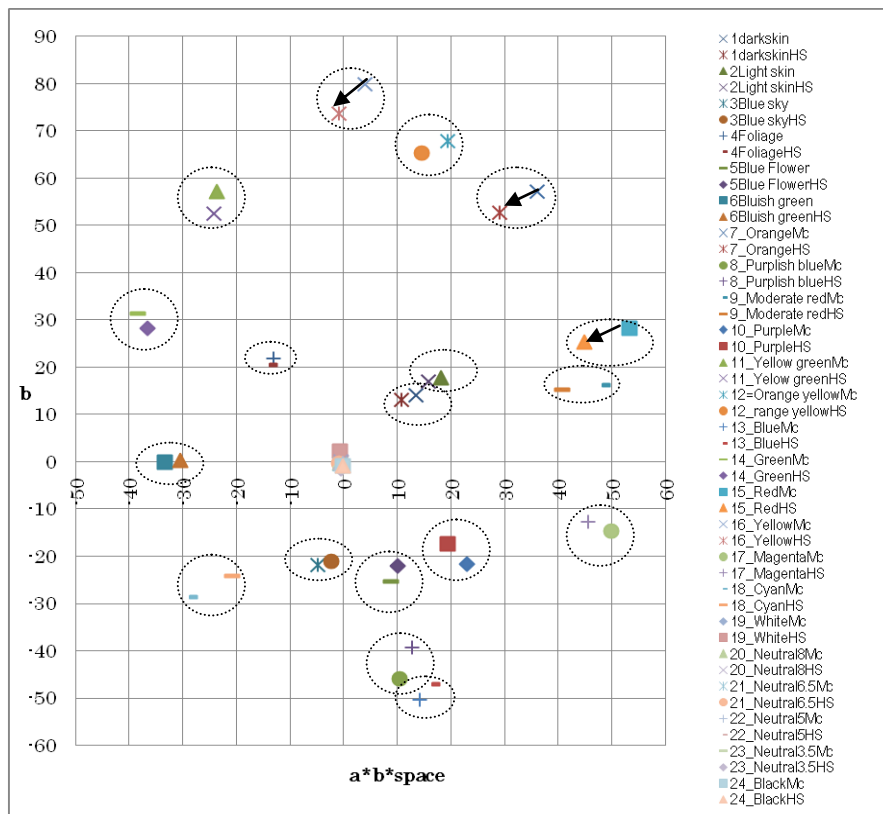


Fig. 3-25-3 Macbeth vs.D65-2'nd observation 2013 ( $\Delta 5.6$ )  $a^*-b^*$  Plane.

第3章 色差を用いた表色評価法の提案と検討

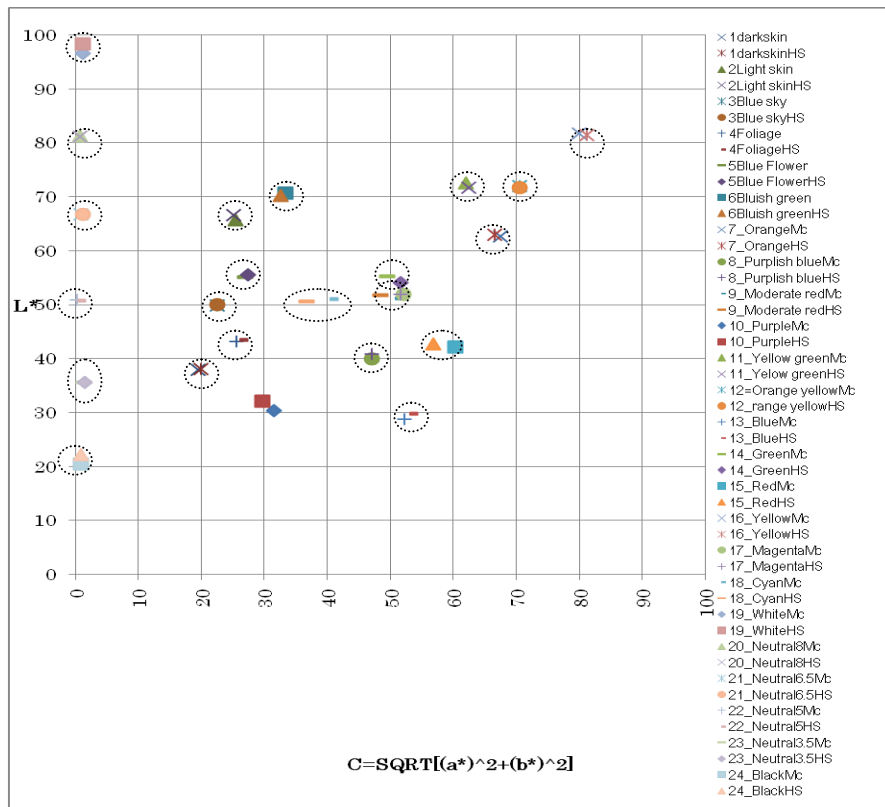


Fig. 3-26-1 Macbeth vs. D65-1's observation 2010 ( $\Delta 2.5$ ) c-L\* plane.

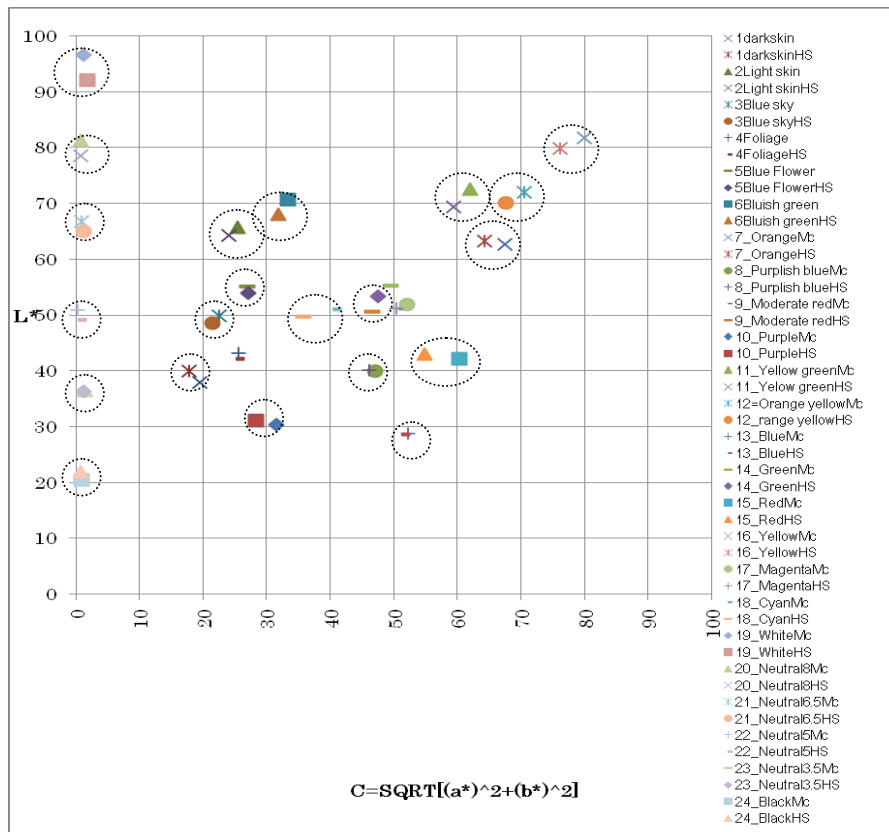


Fig. 3-26-2 Macbeth vs. D50 2013 ( $\Delta 3.5$ ) c-L\* Plane.

### 第3章 色差を用いた表色評価法の提案と検討

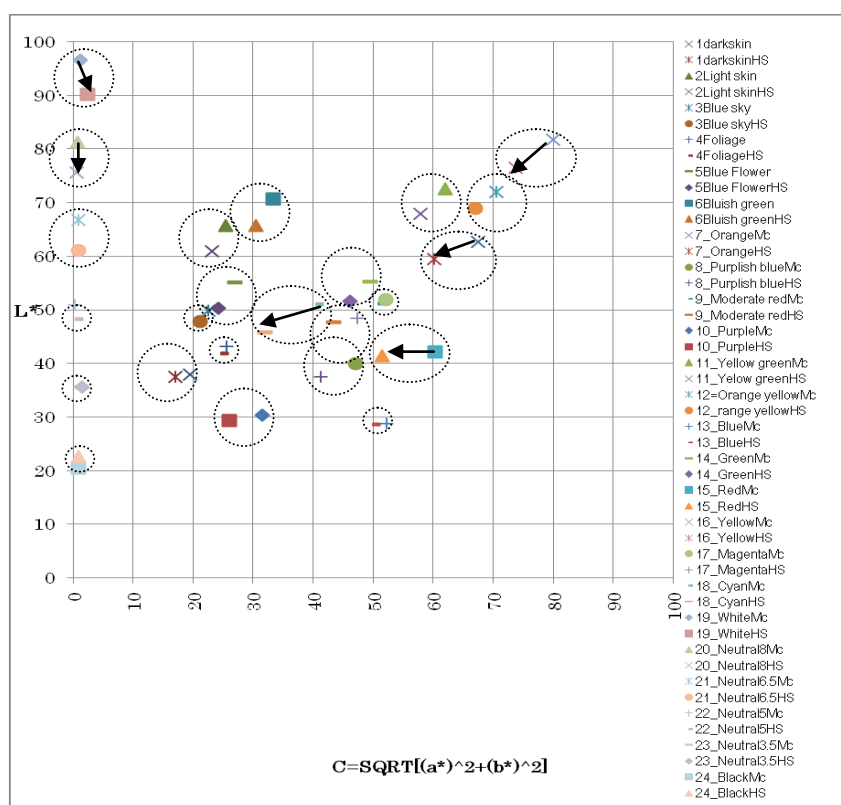


Fig. 3-26-3 Macbeth vs.D65-2'nd observation 2013 ( $\Delta 5.6$ ) c-L\* Plane.

(3) 汎用性の検証方法としては、別の分光測色手段として X-rite 社製"i1Pro"分光測色計を導入し、HS センサによる測定時同様、色票にカラーチェッカ<sup>3-5)</sup>を用い、光源には D65 標準光源相当と D50 光源（相当）を用いて取得された測色データに基づく色値を用いた比較を行った。X-rite 社製"i1Pro"分光測色計はセンサ部分の自動移動機能とプロフィール作成ソフトの充実が充実している理由でプリンタ装置の開発現場でひろく使用されている装置である。Table 3-6 には、X-rite 社製"i1Pro"分光測色計の仕様を、Fig. 3-27 には測定の様子を示す。また、Table 3-7 には X-rite 社製"i1Pro"分光測色計による測定データより得られた色値と色票に付属している色票各色の CIEL\*a\*b\*均等色空間色値より得られた色差をしめす。平均色差は D50 光源下 1.83, D65 光源下 2.88 であった。この結果(1.83/2.88=0.64)は、同時に測定された HS センサを用いた D50 光源下および第 2 回目 D65 光源下での測定結果による平均色差値の比較(3.52/5.64=0.62)に近い値となった。本結果を Table 3-5-2 の D50 光源下での推定値に適用すると第 1 回目の D65 光源下測定時に同時に測定した D50 光源下での平均色差の推定値は(2.51x0.64=1.61)となり、本研究で用いた HS センサによる測定から得られる推定平均色差は、汎用性の検証のために導入した分光測色計の測定による平均色差 1.83 より小さく、色票付属の色値に近い。

**Table 3-6 Specifications of Spectral Color Meter “i1Pro”.**

i1Pro 測定器	
測定器のタイプ	分光測色計
分光分析	128 pixel ダイオード・アレーによるホログラフィック回折格子
測定用光源	ガス充填式タングステンランプ（照明タイプ A）
測定モード	反射率スポット測定、自動パッチ検出機能付きスキヤニング反測定、発光：放射輝度測定（モニタ測定）、放射照度測定（照明測定）
光学分解能	10nm
測定間隔	3.5nm
測定範囲	0.2～300cd/m <sup>2</sup>
分光波長域	380 ～ 730 nm（10 nm 間隔）
測定アパーチャ	直径 4.5mm



**Fig. 3-27 Observation of “i1pro” Spectral Color Meter.**

Table 3-7 Color Difference Macbeth vs. X-riteD50 and X-riteD65.

Color #	Color	MacbethD50 vs. X-riteD50				MacbethD50 vs. X-riteD65			
		dL*	da*	db*	dRMS	dL*	da*	db*	dRMS
1	Dark skin	1.79	0.02	-0.81	1.96	1.29	0.15	-1.27	1.82
2	Light skin	0.78	-1.30	-0.46	1.58	3.31	1.26	-0.32	3.56
3	Blue sky	0.59	0.29	-1.36	1.51	0.73	-0.38	-1.46	1.67
4	Foliage	0.21	-0.79	-0.43	0.93	0.34	-1.00	-1.20	1.59
5	Blue flower	0.58	-0.16	-1.60	1.71	0.71	0.04	-1.30	1.48
6	Bluish green	0.62	-0.30	-1.00	1.21	0.89	-1.10	-2.80	3.13
7	Orange	0.26	-0.07	-0.64	0.69	1.36	0.80	-0.67	1.72
8	Purplish blue	-0.28	0.54	-2.26	2.35	0.65	-0.09	-2.56	2.65
9	Moderate red	-0.04	0.31	-1.25	1.29	1.12	2.27	0.25	2.55
10	Purple	-1.01	2.84	-3.65	4.74	-0.91	2.64	-2.19	3.55
11	Yellow green	1.00	-2.01	1.29	2.59	1.03	-2.61	-1.04	2.99
12	Orange yellow	0.44	-0.40	-0.48	0.76	1.14	-0.34	-0.91	1.50
13	Blue	-0.72	2.48	-1.13	2.82	-0.12	1.41	-0.66	1.57
14	Green	0.76	-0.78	0.20	1.11	0.49	-1.84	-2.03	2.79
15	Red	-0.60	1.81	-0.28	1.93	0.50	4.41	1.26	4.61
16	Yellow	0.69	0.47	0.72	1.10	0.69	0.77	-1.45	1.78
17	Magenta	1.24	0.72	-1.97	2.44	2.60	2.49	0.03	3.60
18	Cyan	0.64	-0.70	-1.54	1.81	0.54	-0.56	-3.17	3.27
19	White(.05°)	1.17	-0.36	-2.35	2.65	1.57	-0.23	-2.61	3.06
20	Neutral8(.23°)	0.86	-0.34	-1.60	1.85	-8.74	-0.44	-1.84	8.94
21	Neutral6.5(.44°)	0.63	-0.03	-1.40	1.54	0.87	-0.03	-1.60	1.82
22	Neutral5(.70°)	2.33	-0.05	-1.27	2.66	0.97	-0.09	-1.30	1.63
23	Neutral3.5(1.05°)	1.12	-0.02	-0.93	1.46	0.76	-0.12	-0.93	1.21
24	Black(1.50°)	-0.57	-0.18	-1.01	1.17	-6.47	-0.25	-1.01	6.55
total					43.84	0.00	0.00	0.00	69.03
AVR					1.83	0.00	0.00	0.00	2.88

カラーチェッカの色票及び色票付属の色値データをの基準として、X-rite社製"i1Pro"分光測色計による測定結果色値とHSセンサによる測定から求めた色値の比較を行い、本研究で使用したHSセンサを用いた測定結果の汎用性を以下に確かめた。Fig. 3-27-1 (a\*-b\*)とFig. 3-28-1 (c-L\*)は色票付属の色値データと"i1Pro"によるD50光源下での色値の比較である。前述した平均色差値1.83が示す様に極めて近い色値を示している。Fig. 3-27-2 (a\*-b\*)とFig. 3-28-2 (c-L\*)は"i1Pro"によるD50光源下での色値と同じくD50光源下でのHSセンサによる測定から求めた色値の比較である。前述したD50光源下でのHSセンサによる測定から求めた色票付属の色値データとの平均色差値3.52が示す様な分布となっている。Fig. 3-27-3 (a\*-b\*)とFig. 3-28-3 (c-L\*)は色票付属の色値データと"i1Pro"によるD65光源下での色値の比較である。前述した平均色差値2.88が示す様にD50光源下より少し色差が増えている。Fig. 3-27-4 (a\*-b\*)とFig. 3-28-4 (c-L\*)は"i1Pro"によるD65光源下での色値と同じくD65光源下でのHSセンサによる測定から求めた色値の比較である。前述したD65光源下

第3章 色差を用いた表色評価法の提案と検討

でのHSセンサによる測定から求めた色票付属の色値データとの平均色差値2.51が示す様な分布となりD50光源下より少ない色差となっていることが分かる。以上の結果から本研究で使用したHSセンサを用いた測定結果の汎用性について一定の検証を得た。

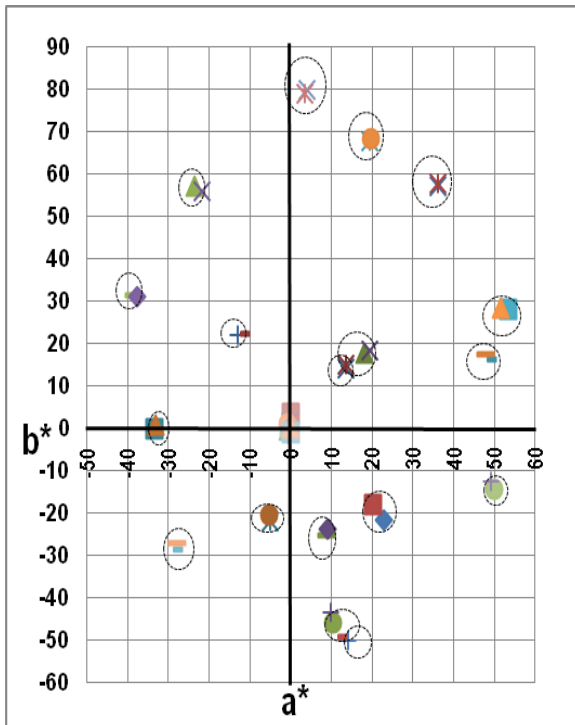


Fig. 3-27-1 Macbeth vs. X-riteD50, ( $a^*-b^*$ ) .

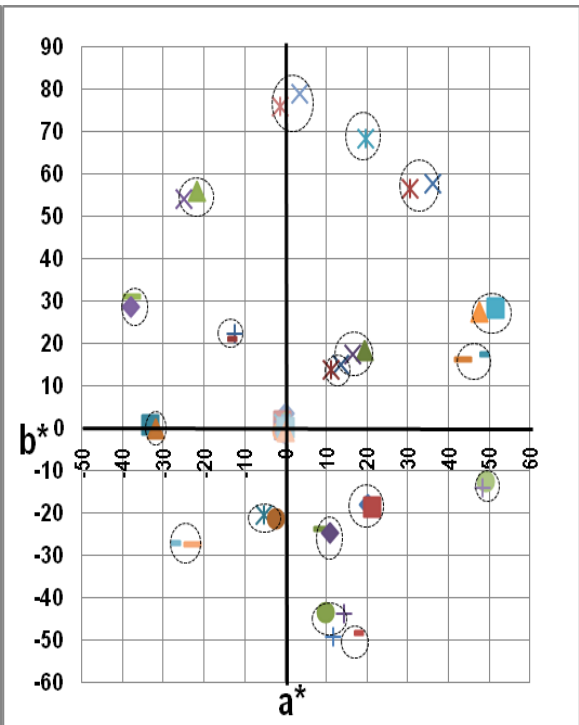


Fig. 3-27-2 X-riteD50 vs. HS-D50( $a^*-b^*$ ).

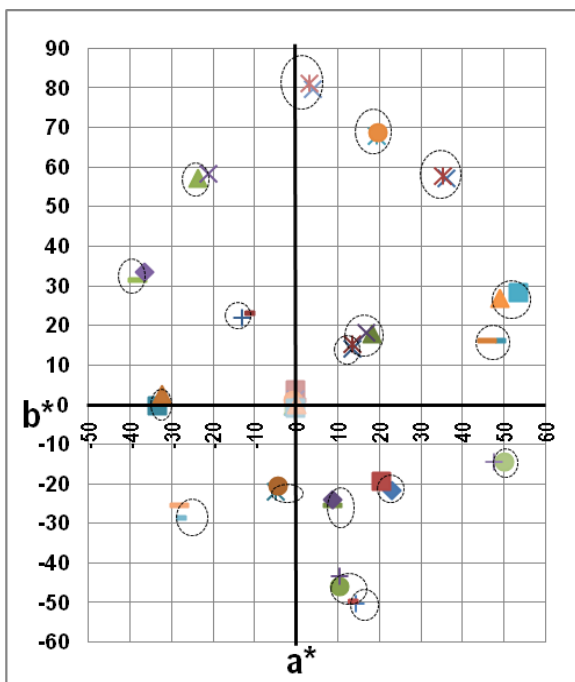


Fig. 3-27-3 Macbeth vs. X-riteD65( $a^*-b^*$ ).

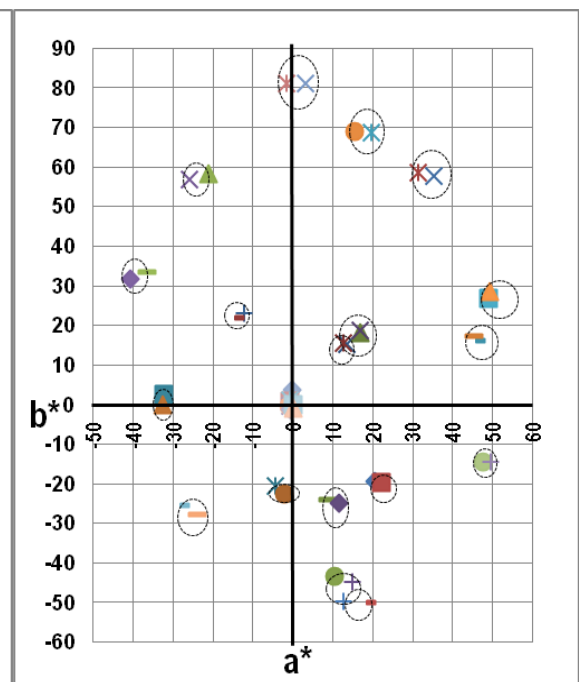


Fig. 3-27-4 X-riteD65 vs. HS-D65-1'st( $a^*-b^*$ ).

第3章 色差を用いた表色評価法の提案と検討

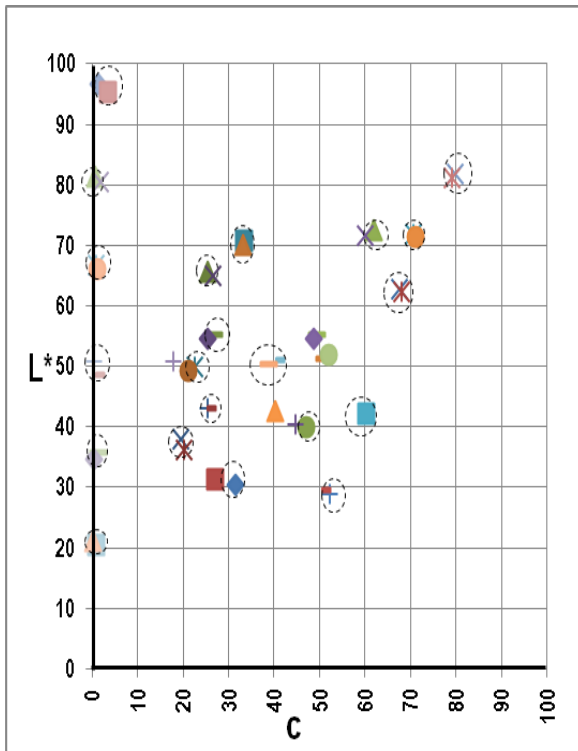


Fig. 3-28-1 Macbeth vs. X-riteD50, (c-L\*) .

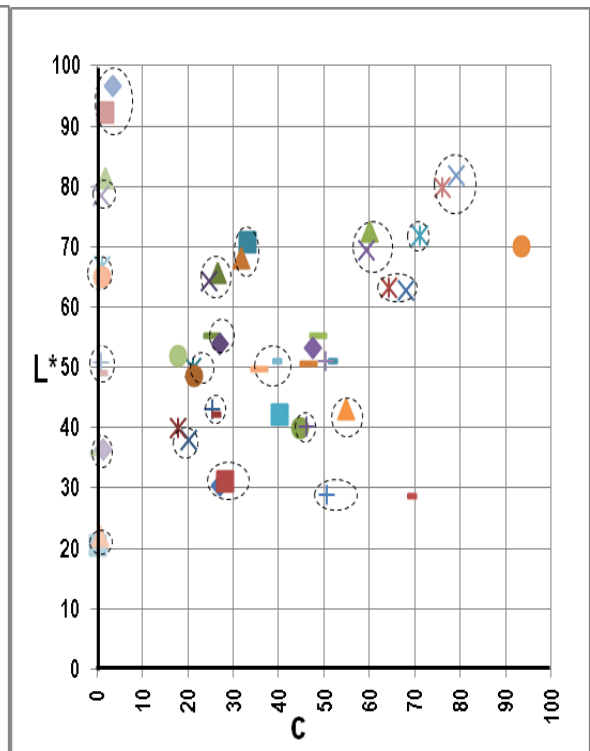


Fig. 3-28-2 X-riteD50 vs. HS-D50( c-L\*).

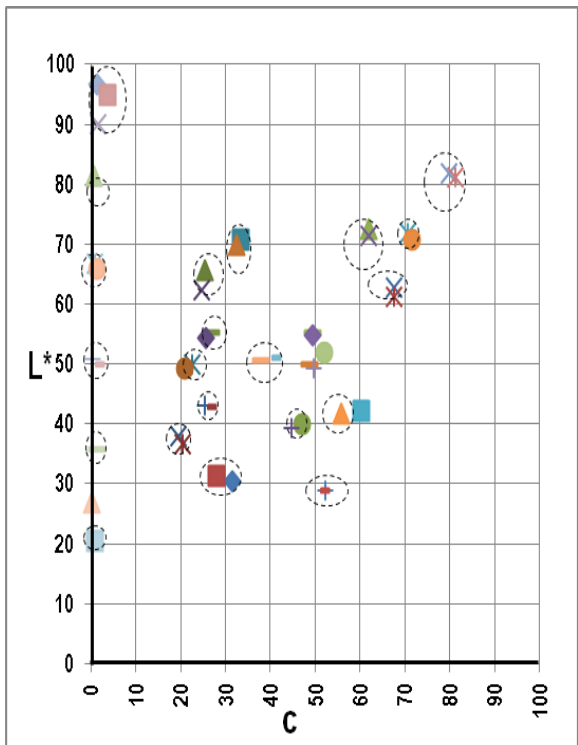


Fig. 3-28-3 Macbeth vs. X-riteD65-1'st(c-L\*).

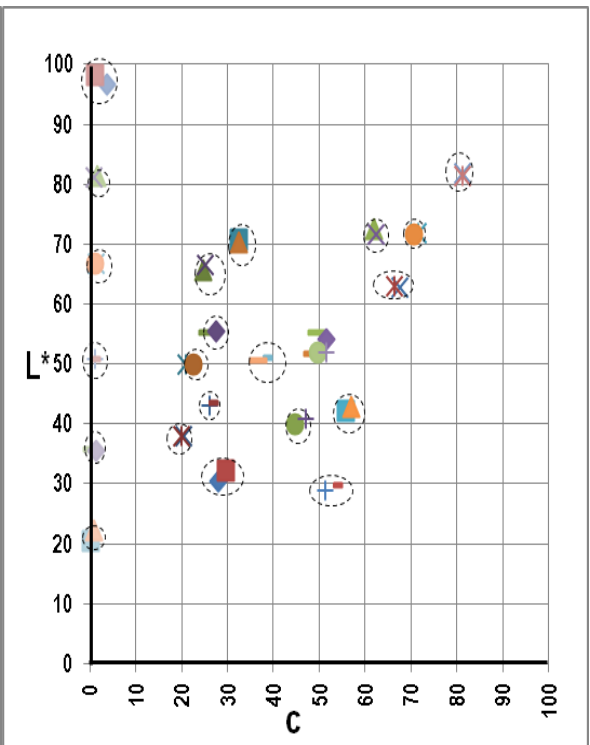


Fig. 3-28-4 X-riteD65 vs. HS-D65-1'st(c-L\*).

### 3.5 第3章のまとめ

第3章ではまずテーマである印刷画像の表色定量評価の課題に対して、CIEL\*a\*b\*均等色空間<sup>3-3)</sup>上での色値を用いた元光源下での元色と再現色間の色差値と再現光源下での同じ2色間の色差値との比率を表色評価指標値として提案した。

続いて、これらの指標の基礎となる色差について、単純なスペクトル差による色差と心理物理量である三刺激値を加味した色差について検討し心理物理量を用いる妥当性を検証し、更に人間の知覚均等性を得るためにはCIEL\*a\*b\*均等色空間<sup>3-3)</sup>上での色値を用いる妥当性を検証した。また研究遂行に際してのデータ取得と処理方法について検討提案を行い、これらの提案内容の検証のための予備実験を行った。予備実験からは、以下の成果が得られ、次章以降の研究遂行についての基本的な条件が得られた。

- (1) HS センサを用いて標準色サンプルやインクジェットプリンタによる出力を測定し、HS センサの特徴を生かした1 nmの高分解能で、350 nmから2500 nmまでの広帯域なスペクトルデータが取得できた。
- (2) 本手法の一応用可能性検証事例として、可視領域での対象資料間の色差指標値を求めた。ここでは、先行研究<sup>3-4)</sup>において得られた結果と同様の結果を得ることができた。本手法の当該分野への応用可能性が検証された。
- (3) HS センサのように精度の高い分光データに基づくスペクトルのグラフ形状の相違で、標準色サンプルとインクジェットプリンタとの出力間に顕著な相違がみられるように色の「見え」を定量的に把握できることを確認した。
- (4) 研究の付随的成果として特徴のある分光域、例えば波長700 nm付近での植物繊維(紙パルプ)特有の反射率のピークや波長1400 nm付近での用紙の水分含有による光の吸収影響による反射率低下などが認められた。これらは、用紙やインクの乾燥の状態を調べる指標として有効な要素と期待できる。今後の用紙、インクの特性、色処理、などの改善や分析要素としての活用が期待される。

さらにD65に加え、D50光源下でのデータ取得と、他の分光測色手段の導入を行ってのデータ取得および解析を行い、本研究測定方法の精度と汎用性の検証を行った。

### 3.6 第3章参考文献

- 3-1) Haruyuki. Seki, Kuniaki. Uto, and Yukio. Kosugi: “Acquisition and Evaluation of Printing Color Data by using Hyper Spectral Sensing”, Journal of the Imaging Society of Japan, Vol. 50, No. 3, pp. 208-216(2011)
- 3-2) <http://imageone.co.jp>, <http://www.asdi.com>,: (Analytical Spectral Devices, Inc and ImageONE Co. Ltd.)
- 3-3) CIE(International Commission of Illumination): “CIE 1976 L\*a\*b\* color space”
- 3-4) Wanqing. Song, Haruyuki. Seki, and Yoshifumi. Shimodaira: “Development of a Fidelity Color Calibration Method Based on the Colorimetric Characterization of an Inkjet printer”, 2006 Conference of the Institute of Image Electronics Engineers of Japan 06-06-04. [ in Japanese] .
- 3-5) Gretagmacbeth, “ColorChecker™Color Rendition Chart” (2006).
- 3-6) <http://www.i1color.jp/prdd02.html>, <http://www.x-rite.com>,: (X-Rite Incorporated, X-rite Japan).
- 3-7) X-rite, “The ColorGuide and Glossary”,  
[http://www.xrite.com/documents/literature/en/L11-029\\_color\\_guide\\_en.pdf#search='spectral+color+meter+papers](http://www.xrite.com/documents/literature/en/L11-029_color_guide_en.pdf#search='spectral+color+meter+papers).

## 第4章

# 定量評価結果と主観評価実験によるその検証

## 第4章 定量評価結果と主観評価実験によるその検証

はじめに：

本研究は、プリンタ装置の正確な表色性能の向上のために、実践的な性能評価方法として応用できる定量的で分光的な評価方法を導入し、関連する機器開発に実際に応用できるような方法の提案、検証を目指すものである。同時に本研究過程から得られる問題解決のヒントや、付随的に得られる関連成果についても、今日までの実務経験から得られた知見と併せて注意深く拾い上げて研究の成果とし実应用到に還元することも本研究の目的である。これらの目的に沿って、本章では下記の(1)定量評価実験研究と、これらに関連する(2)主観評価検証実験研究を主たる研究内容とした。特に第1章に述べた色再現と照明の両方が同時に異なる環境下での表色不一致の問題に関して、LED照明の急激な普及という今日の問題を反映させて、出来るだけ多くのLED光源をパラメータとし、更にこれらの照明対象を実際のカラーデータ交換を想定した元画像と再現画像とすることで、CRI<sup>4-1~4</sup>（光源の演色評価数）に代表される従来の方法や研究方法に替わる取り組みを行った。それらの概要を下記に述べる。

### (1) LED光源下での印刷画像の表色定量評価に関する実験研究

近年省エネルギーに対する社会的意識が高揚する中で高効率、長寿命、高速応答性などの特徴を有するLED照明が急激に普及しているが、こうした表色環境の飛躍的な変容を前提として色再現と並んで表色におけるもう一つの重要要素である光源の表色性、すなわち光源の分光放射輝度分布の相違が表色に及ぼす影響を、HSセンサを用いて得られた分光データを用いて定量的に解析した。本実験研究は今日直面する異照明環境間での表色不一致の実態に即した実験研究条件を具現化したものである。

### (2) 前述(1)の定量評価結果の主観評価による検証実験

前述(1)の定量評価結果を主観評価により検証し、本研究提案方法による定量評価方法の有効性を主観評価によって確認した。目的達成のために本研究では、分かりやすく正確で平易な主観評価実験を行うための条件を設定し、定量評価実験に比べて実施困難度の高い主観評価実験に対して効果的な解決となる方法についても検討、提案、検証した。また、主観評価実験に際しては、被験者の人権と健康保護のために2011年新たに制定された東京工業大学疫学研究等倫理委員会の承認を得て、定められた基準に沿った主観評価実験を行った。

## 4.1 定量評価実験

### 4.1.1 定量評価実験の目的

定量評価実験の目的は第3章に提案し、予備実験によって確かめられた方法によりHSセンサを用いて取得した分光データを正規化処理し、CIEL\*a\*b\*均等色空間<sup>4)9)</sup>上に展開した色値より求めた色差により本研究提案の表色評価指標値を求めることと、得られた色値を3.2.4項で提案した色差表現方法によりCIEL\*a\*b\*均等色空間上に展開して表現された

#### 第4章 定量評価結果と主観評価実験によるその検証

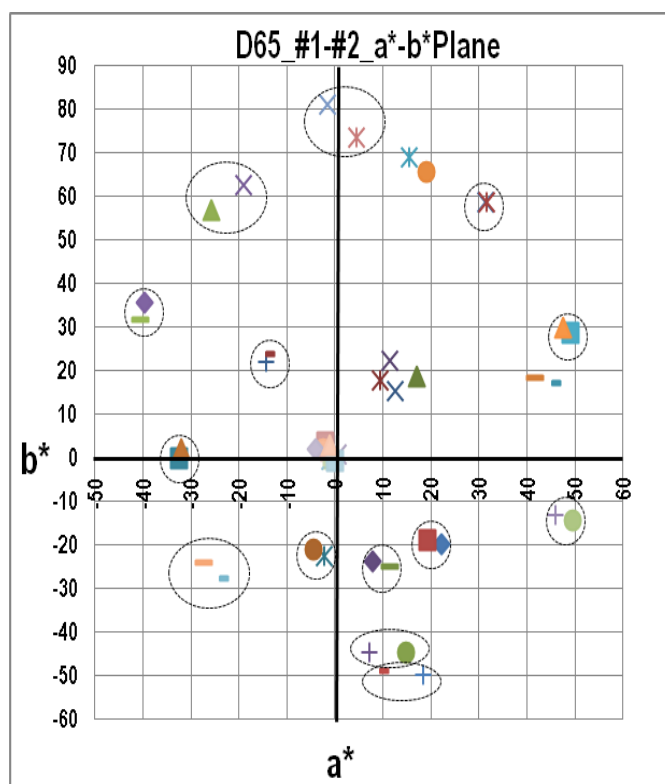
色差を用いた実験結果解析および検討を行うことである。

**Fig.4-1-1,2**にはこのようにして得られた CIEL\*a\*b\*均等色空間上に展開した色値の例として D65 試験光源下での色票#1 と#2 の各色票色の色値を色彩平面 (a\*-b\*) 上に表した。また, Fig.4-1-2 には同じく D65 試験光源下での色票#1 と#2 の各色票色の色値を彩度対明度 (c-L\*) 平面上で表した。なお彩度 c は 3.2.4 項の式 (3-12) で求めた。

$$c = \left[ (a^*)^2 + (b^*)^2 \right]^{1/2} \quad (3-12)$$

ここで, c は彩度値, a\*, b\* は CIEL\*a\*b\*均等色空間上での色値である。

なお Fig.4-1-1,2 の分布図に使用した各色値のシンボルの凡例は Fig. 3-24 (前述 3.2.6 項) に示すが, Fig.4-1-1,2 では各色シンボル#1 は#1 色票, #2 は#2 色票の各色票色の色値の色値を表す。



**Fig.4-1-1 Under light source D65, #1 vs. #2 in a\*-b\* plain.**

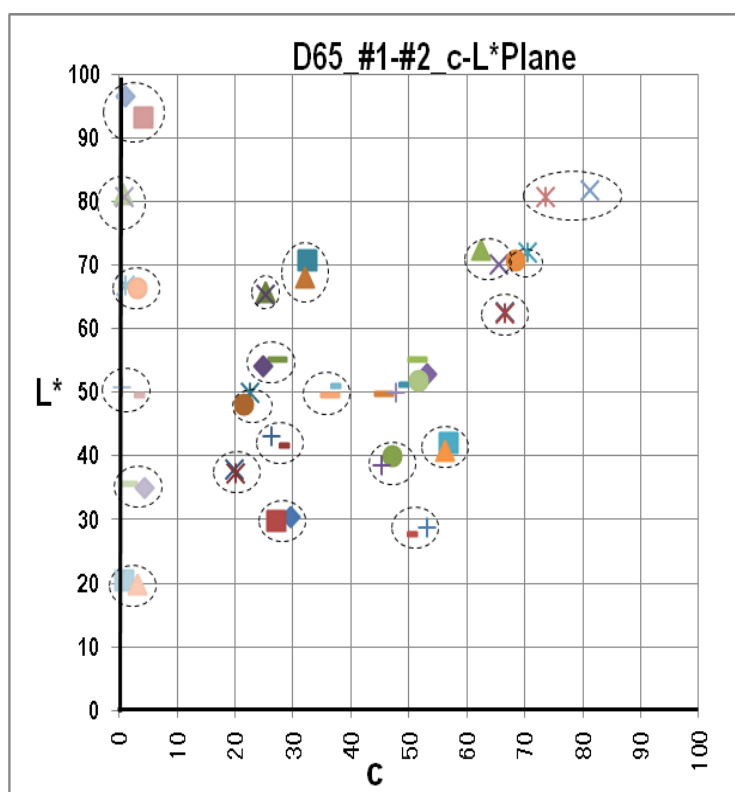


Fig.4-1-2 Under light source D65, #1 vs. #2 in c-L\* plain.

#### 4.1.2 定量評価実験実施内容

データの取得に HS センサを用い、基準光源を D65 標準光源とし、試験用光源として 4.2.1 項に述べる 2011 年 3 月に市販されていた 11 種類の LED 電球、参考用光源としてハロゲンランプを用いた。各光源下での試験色間色差を求める 2 つの色票として、元色用には標準色となるカラーチェッカ™<sup>4-5)</sup>を、再現色用には、光源の表色が問題となる実際的な局面を想定してカラーチェッカ付属の色データによるインクジェットプリンタの出力を用いた。元色用の色票にカラーチェッカを用いた理由は実色票の入手が容易で耐候性が高く、標準色としての分光特性も安定しているからである。各色票の色数は 24 色である。

Fig. 4-2 に実験環境の全景を示す。測定台上に色票、色票に対して垂直方向 56 mm の距離に HS センサを設置し、照明は色票に対して 45°の角度で照射し、光源と色票間の距離は 600 mm とした。取得データ正規化のための標準白色板を各色票測定のために使用し、同時に機器に備わった各種の初期化操作を行って暗電流の影響を極小化した。HS センサは、視野角を 8 度に設定し各試験色面のほぼ中央部分の直径約 9 mm の円内を計測した。実験は室温を一定 (20 度 C) にした完全な暗室内で行った。

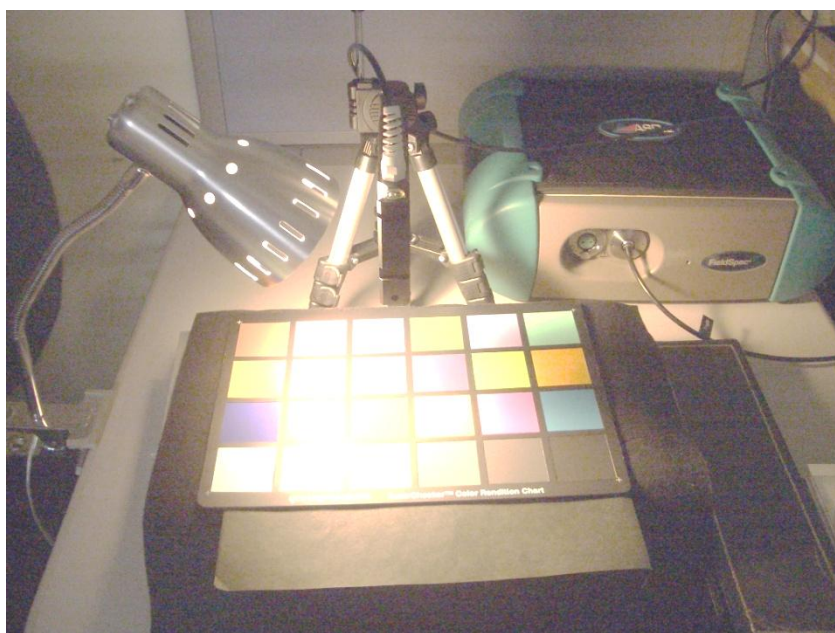


Fig. 4-2 HS sensor, light source and color samples.

#### 4.1.3 試験用 LED 光源（特徴，仕様）

使用した 11 種類の試験用 LED 光源の仕様を **Table4-1** に示す。全ての LED 光源は 2011 年 3 月の時点で一般に広く流通している製品である。

仕様によれば，5 種が昼光色(Day light)，5 種が電球色(Lamp color)，1 種が中間色(Intermediate)であり，昼光色の方が発光効率は高い。いずれも製品に添付された仕様上に CRI (1.2.3 項に述べた CIE や JIS の定めた光源の演色評価数) の公表は無いが<sup>cf.1)</sup>，2010 年の日本電球工業会報<sup>4-6)</sup>などでは，演色評価数は色温度 5000 K 以上の寒色系（昼光色）で 62~78，5000 K 未満の暖色系（電球色）で 66~87 と報告されているので，**Table4-1** の CRI 欄にはこの値を，また欄外には D65 標準光源と参考用ハロゲンランプの CRI を記した。D65 標準光源は，今回の本研究で提案する表色評価指標を求める際の基準光源として使用した。色の測定に際して広く使用されている試験用光源である。ハロゲンランプはその分光放射輝度分布が平坦であり，放射波長帯域が広く 2.1.項の **Table2-2** に示す様に，CRI も 100 という最高評価数値となっており，表色性に優れた参考用光源として最適である。

#### 第4章 定量評価結果と主観評価実験によるその検証

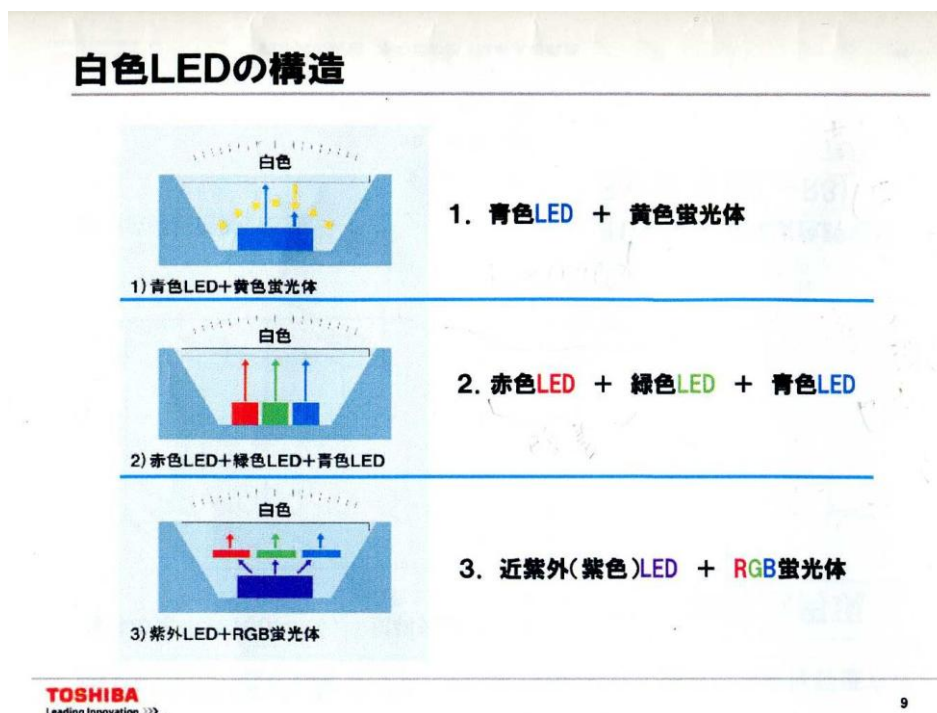
**Table 4-1** Specifications of LED light sources.

#	Vendor	Type	*Rad.	**Pow.	CRI <sup>(cf.1)</sup>	Life. (h)
aa	V1	D	825	9.2	62~78	40000
bb	V1	L	650	9.2	66~87	40000
cc	V2	D	550	7.5	62~78	40000
dd	V2	L	405	7.5	66~87	40000
ee	V3	D	260	4	62~78	40000
ff	V3	M	230	4	none	40000
gg	V3	L	210	4	66~87	40000
hh	V4	D	535	7.1	62~78	40000
ii	V4	L	330	7.1	66~87	40000
jj	V5	D	820	9.2	62~78	40000
kk	V5	L	610	9.2	66~87	40000

D: Day light, L: Lamp color, M: Intermediate, \*(lm), \*\*(W).  
CRI : D65=98, Halogen Lamp=100

#### 4.1.4 LED光源の仕組み

**Fig.4-3** に代表的な白色 LED の構造例 3 種を示す。1.は青色 LED+黄色蛍光体によるもので 2012 年の時点で流通しているほとんどの LED 照明の構造である。高効率で低価格という特徴を有する。2.は赤色 LED+緑色 LED+青色 LED によるもので演色性向上のために商品化が進めれている。3.は近紫外（紫色）LED+RGB 蛍光体によるもので、効率は、1., 2.に対して劣るが暖色系の色発光に有利であり演色性の向上も期待できるものとして商品化が期待されている<sup>4-7)</sup>。



**Fig.4-3 Structure of typical LED.**

[小谷, LED 電球の演色性, 日本画像学会誌 Vol.50, No.3(2011).]

#### 4.1.5 試験用 LED 光源の分光放射輝度分布

各試験用光源の特性個体差を考慮し実験準備として, HS センサを用いて実際に実験に使用した基準光源や参考用光源を含む全ての光源の分光放射輝度を測定した. ここで得られた各光源の分光放射輝度分布を **Fig. 4-4** に示す. なお, Fig. 4-4 で使用した分光輝放射輝度値は, 各測定時の測定値をそのまま使用したものであり, それぞれの輝度値や測定諸条件に対しての正規化を行っていない. 結果より, 試験用 LED 光源は, いずれも波長 430 ~460nm と 550~640nm の波長域に分光放射輝度値のピークを持っている. 全ての試験用 LED 光源は 4.1.4 項に述べた青色発光ダイオード及び黄色蛍光体により構成された LED 光源で, 構成部材の性質により分光放射輝度分布が異なる. また, 同一の製品であっても個体間で特性差があることが知られている<sup>4-7)</sup>. Fig. 4-4 から LED 光源の分光放射輝度分布は, D65 標準光源やハロゲンランプに比べて分光放射輝度分布の偏在が大きいことがわかる. D65 標準光源は蛍光灯であるので 430 nm および 550 nm の波長帯域に鋭い水銀輝線を持っている.

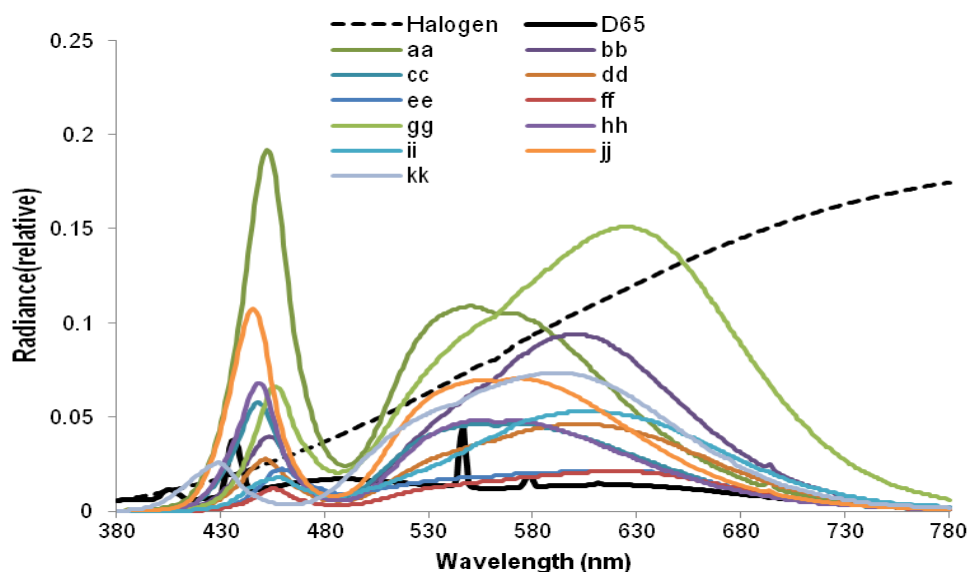


Fig. 4-4 Spectral radiance value of light sources.

#### 4.1.6 定量評価実験結果

4.1.2 項に述べた定量評価実験環境と条件により，標準光源 D65，参考用ハロゲンランプおよび 11 種類の試験用 LED 光源下での色票#1（元色用標準色となるカラーチェッカの色票）と色票#2（カラーチェッカ付属の色データによるインクジェットプリンタの出力を用いた色票）の各 24 色から，350 nm～2500 nm の波長帯域内で 1 nm 間隔での分光データの取得および 3.3.2 項式 (3-13) による正規化処理を行った．実験結果から下記の条件により選んだ代表試験光源下での実験結果について以下に述べる．

(1) 各試験光源の表色評価指標値：

取得したデータから，色票#1, #2 の各 24 試験色, 13 種類の光源について 3.1 項式(3-1) によって求めた D65 標準光源を基準光源として正規化した各試験用 LED 光源の平均表色評価指標値を Fig. 4-5 に示す．なお Fig. 4-5 では，表色評価指標値を 3.1 項式(3-1)での逆数表示 ( $\overline{INDEX}$ ：分子を基準光源である D65) で示した．従って数値が大きい方が表色性が良好となる．

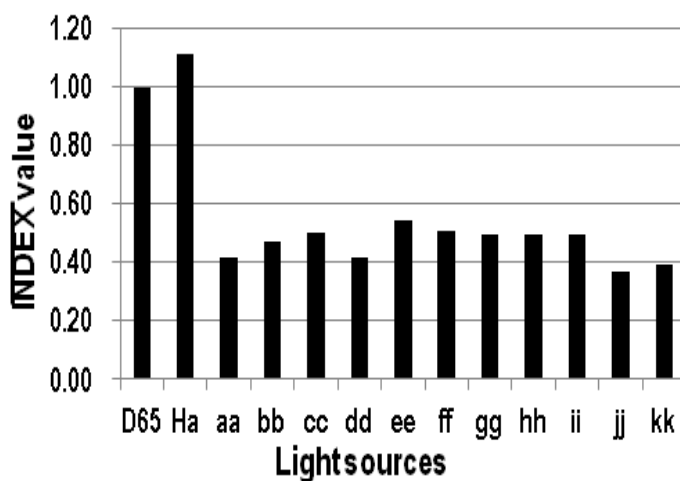


Fig. 4-5 Average  $\overline{INDEX}$  value of each LED light source normalized by D65.

(2) Fig. 4-6 から Fig. 4-13, (なお, Fig. 4-6 は各試験色シンボルの凡例) に標準光源 D65, および D65 に対して色票#1 と#2 の2つの色票における同じ試験色の色差が相対的に小さな代表試験用 LED 光源 ee, ff, 大きな代表試験用 LED 光源 jj, kk, 平均的な試験用 LED 光源 aa および参考用ハロゲンランプにおける測定結果を, 3.2.4 項で色差表現として提案した各光源下での光源を固定した色票間色差表現として各光源下での取得データから CIEL\*a\*b\*色空間への換算色値として, a\*-b\* (色彩) 平面と c (彩度) -L\* (明度) 平面により示した. なお彩度 c は 3.2.4 項式 (3-12) により求めた.

また章末の Fig.4-A に全ての試験用 LED 光源, D65 標準光源およびハロゲンランプ下での色票#1 と#2 の2つの色票における同じ試験色間の色差と D65 標準光源を基準光源とした 3.1 項に述べた本研究提案による表色評価指標値 ( $\overline{INDEX}$ ) および全試験光源, 色票色の平均値を示す.

× 1_darkskin#1	× 1_darkskin#2
▲ 2_Light skin#1	× 2_Light skin#2
× 3_Blue sky#1	● 3_Blue sky#2
+ 4_Foliage#1	- 4_Foliage#2
- 5_Blue Flower#1	◆ 5_Blue Flower#2
■ 6_Bluish green#1	▲ 6_Bluish green#2
× 7_Orange#1	× 7_Orange#2
● 8_Purplish blue#1	+ 8_Purplish blue#2
- 9_Moderate red#1	- 9_Moderate red#2
◆ 10_Purple#1	■ 10_Purple#2
▲ 11_Yellow green#1	× 11_Yellow green#2
× 12_Orange yellow#1	● 12_Orange yellow#2
+ 13_Blue#1	- 13_Blue#2
- 14_Green#1	◆ 14_Green#2
■ 15_Red#1	▲ 15_Red#2
× 16_Yellow#1	× 16_Yellow#2
● 17_Magenta#1	+ 17_Magenta#2
- 18_Cyan#1	- 18_Cyan#2
◆ 19_White#1	■ 19_White#2
▲ 20_Neutral8#1	× 20_Neutral8#2
× 21_Neutral6.5#1	● 21_Neutral6.5#2
+ 22_Neutral5#1	- 22_Neutral5#2
- 23_Neutral3.5#1	◆ 23_Neutral3.5#2
■ 24_Black#1	▲ 24_Black#2

Fig. 4-6 Color symbol remarks.

第4章 定量評価結果と主観評価実験によるその検証

(1) Fig. 4-7 には D65 標準光源下での色票#1 と#2 の各色票色の CIEL\*a\*b\*均等色空間上の色値を色彩平面 a\*-b\* (左) と彩度対明度平面 c-L\* (右) に表す.

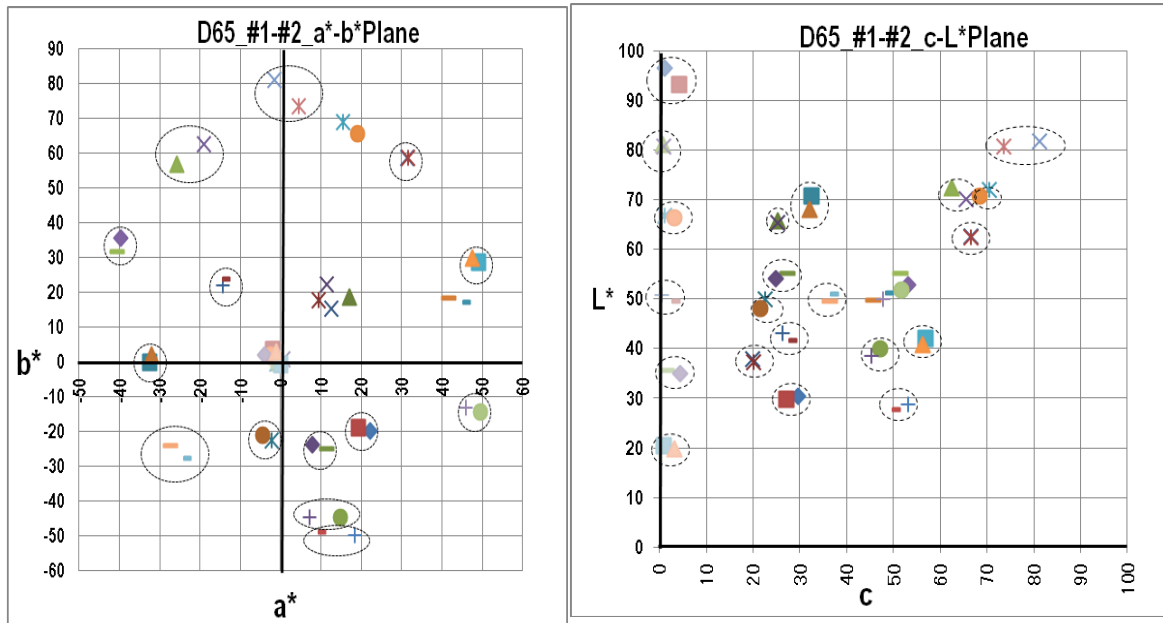


Fig. 4-7 “D65” a\*-b\*(left),c-L\*(right)

(2) Fig. 4-8 には試験用 LED 光源 ee 下での色票#1 と#2 の各色票色の CIEL\*a\*b\*均等色空間上の色値を色彩平面 a\*-b\* (左) と彩度対明度平面 c-L\* (右) に表す.

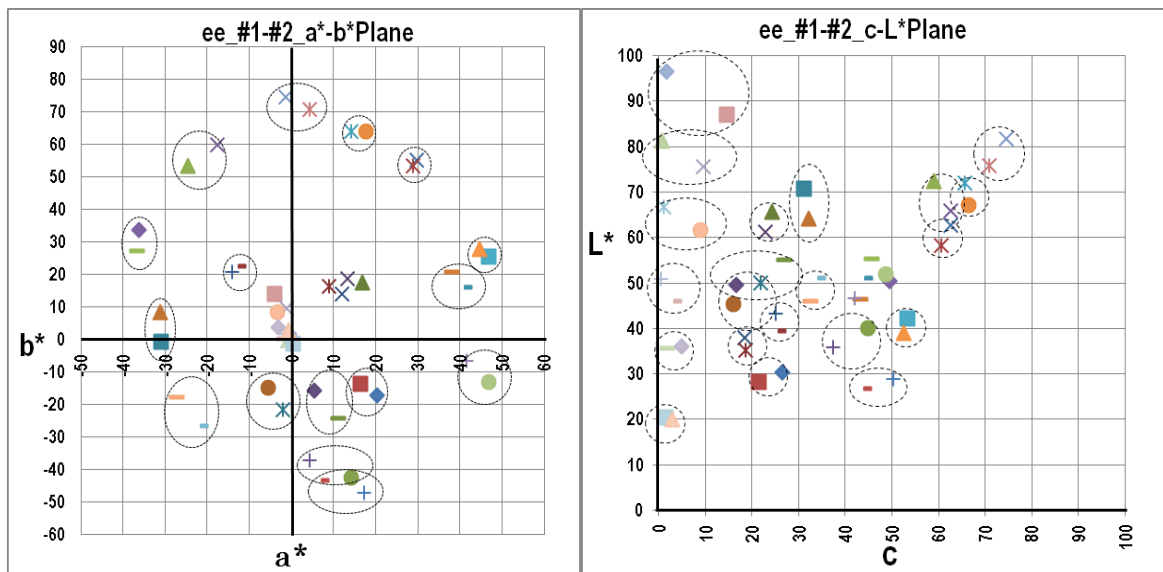


Fig. 4-8 “ee” a\*-b\*(left),c-L\*(right)

第4章 定量評価結果と主観評価実験によるその検証

(3) Fig. 4-9 には試験用 LED 光源 ff 下での色票#1 と#2 の各色票色の CIEL\*a\*b\*均等色空間上の色値を色彩平面 a\*-b\* (左) と彩度対明度平面 c-L\* (右) に表す。

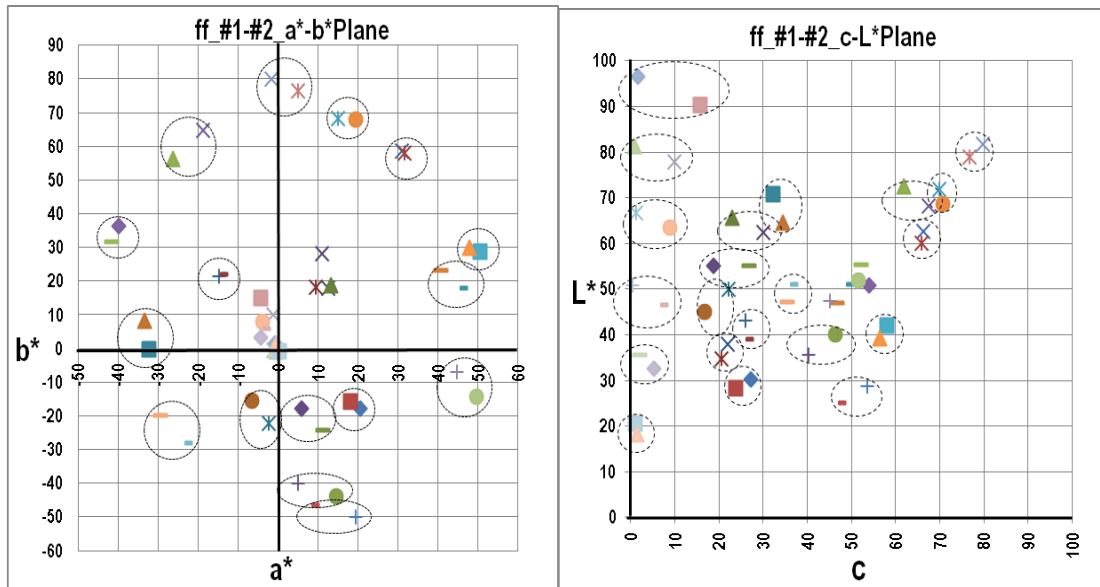


Fig. 4-9 “ff” a\*-b\*(left),c-L\*(right)

(4) Fig. 4-10 には試験用 LED 光源 jj 下での色票#1 と#2 の各色票色の CIEL\*a\*b\*均等色空間上の色値を色彩平面 a\*-b\* (左) と彩度対明度平面 c-L\* (右) に表す。

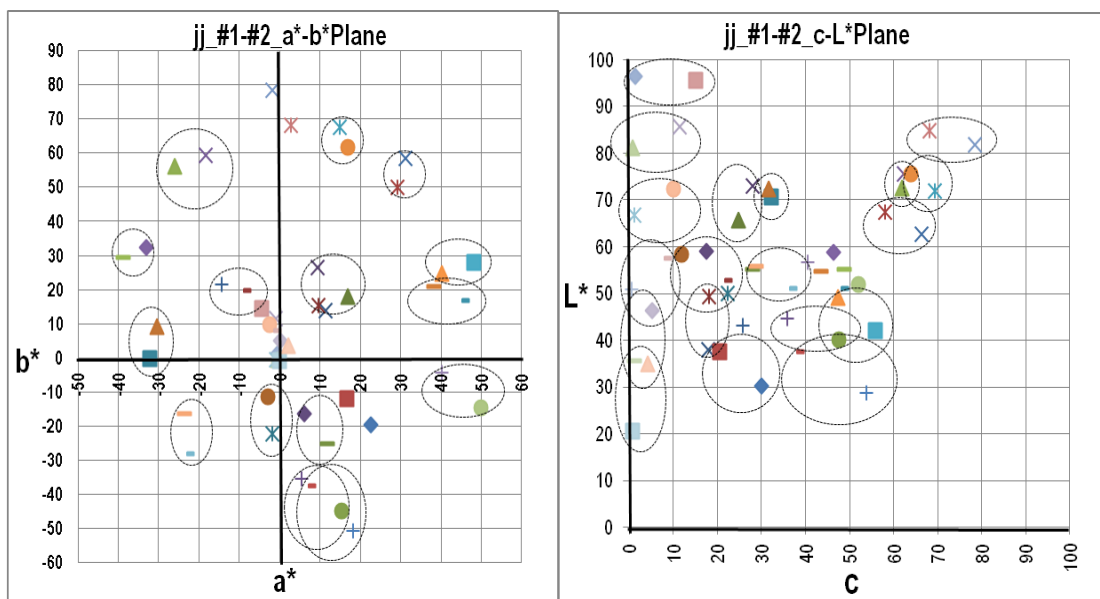


Fig. 4-10 “jj” a\*-b\*(left),c-L\*(right)

第4章 定量評価結果と主観評価実験によるその検証

(5) Fig. 4-11 には試験用 LED 光源 kk 下での色票#1 と#2 の各色票色の CIEL\*a\*b\*均等色空間上の色値を色彩平面 a\*-b\* (左) と彩度対明度平面 c-L\* (右) に表す。

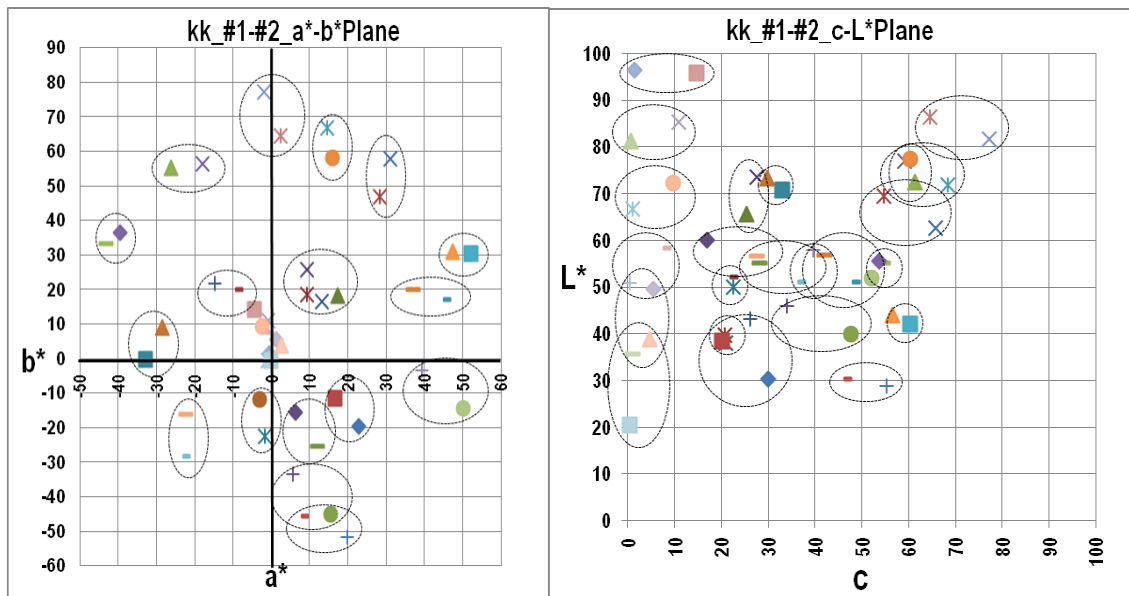


Fig. 4-11“kk” a\*-b\*(left),c-L\*(right)

(6) Fig. 4-12 には試験用 LED 光源 aa 下での色票#1 と#2 の各色票色の CIEL\*a\*b\*均等色空間上の色値を色彩平面 a\*-b\* (左) と彩度対明度平面 c-L\* (右) に表す。

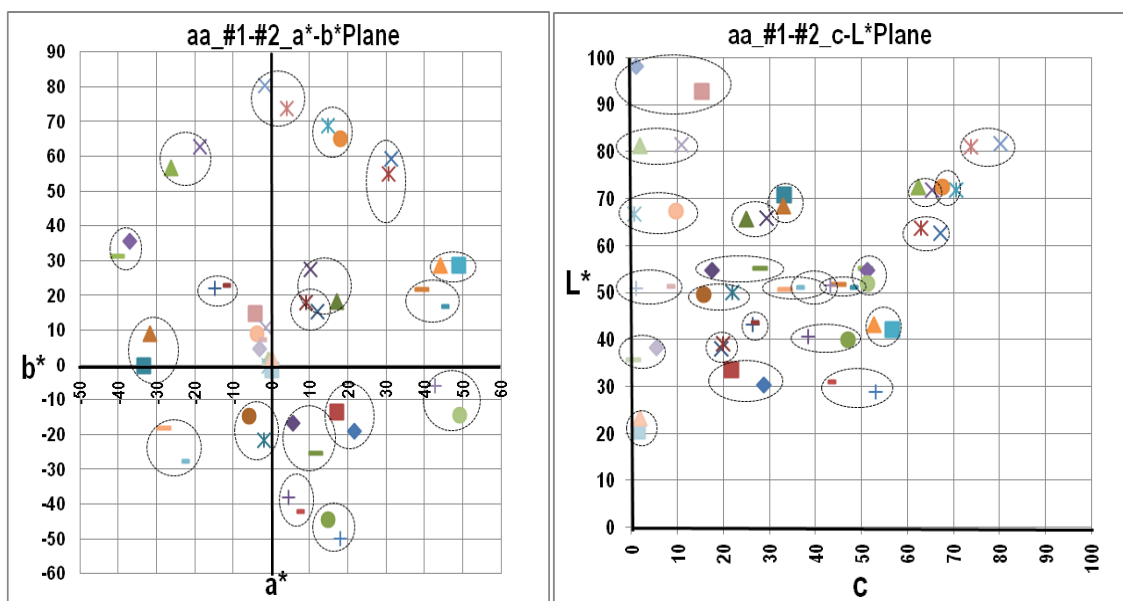


Fig. 4-12“aa” a\*-b\*(left),c-L\*(right)

(7) Fig. 4-13 には参考用ハロゲンランプ下での色票#1 と#2 の各色票色の CIEL\*a\*b\*均等色空間上の色値を色彩平面 a\*-b\* (左) と彩度対明度平面 c-L\* (右) に表す。

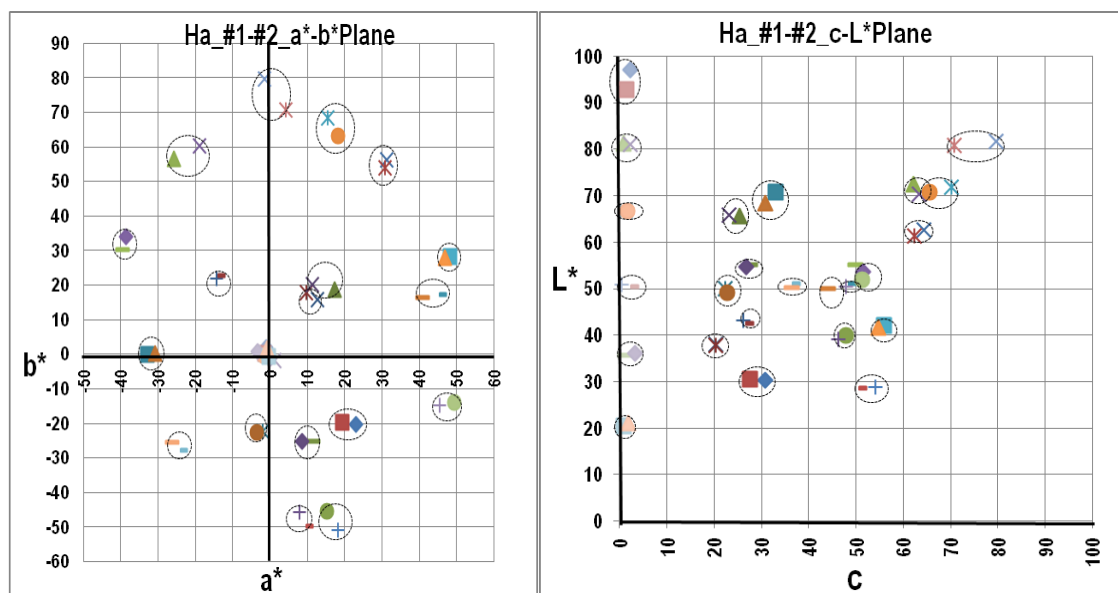


Fig. 4-13 “Halogen” a\*-b\*(left),c-L\*(right)

#### 4.1.7 測定結果の分析

(1) Fig. 4-7～4-13 には、2つの色票における同じ試験色の色値を、表示を損なわない様配慮した円で囲んだ。円の大きさから色差の大きさが判断できる。色彩平面 a\*-b\*および彩度対明度平面 c-L\*の両方で、標準光源 D65 や参考光源のハロゲンランプに比べて LED 光源下での色差が大きく、また相対的に表色評価指標値の良好な ee, ff 光源が表色評価指標値の良好でない jj, kk 光源に比して色差が少ないことが判別できる。

(2) カラーチェッカの色票#1 に比べインクジェットプリンタ出力の色票#2 は無彩色に彩度が含まれ、明度が高いほど彩度差となって表れる傾向が見られる。Fig. 4-5～4-12 からは色差の大きさと、明度、彩度、色相との明確な関連性は見いだせない。

(3) Fig. 4-5 より標準光源 D65 光源下での色差は、試験用 LED 光源下に比べて少ない。これはプリンタ装置のカラーマッチングが D65 光源下で行われているためである。

(4) Fig. 4-12 より、LED 光源に対する比較参考用として測定したハロゲンランプ(CRI=100)の表色評価指標値( $\overline{INDEX}$ )は 1.11 であり試験用 LED 光源に比べて極めて良好であり、更に D65 標準光源(CRI=98)をも上回っている。一方、11 種の試験用 LED 光源の表色評価

#### 第4章 定量評価結果と主観評価実験によるその検証

指標値 ( $\overline{INDEX}$ ) は最上位(ee の 0.55), 最下位(jj の 0.37), 平均値 0.465 であり, D65 標準光源やハロゲンランプに比べて数値的に大きな隔たりがあり, LED 光源による表色不一致の実態を定量的に反映した値となっている.

## 4.2 主観評価実験

### 4.2.1 主観評価実験の目的

定量評価結果を検証するため主観評価実験を行った。主観評価実験では試験用 LED 光源下での表色評価を行い、この結果を定量評価実験結果と比較した。

色情報は最終的には観測者の知覚として認識されるので、色の見え方は、下記の様な要因によって左右される。

光源の相違

照明方向の及び観測の相違 (BRDF : Bi-directional Reflectance Distribution Function)

観測する色票の大きさの相違

背景の相違

観察者の相違

従って、正確で信頼性の高い主観評価を行うには要求される評価パラメータやその取得方法、処理方法に十分な検討を行う必要がある。

現在一般に、関連イメージング機器および光源開発過程での色再現評価の最終的な確認手段として主観評価の重要性がひろく認識されているが、精度の高い主観評価には、費用や時間的に大きな負担が強いられる。また主観評価実験の性格上、実験が機器の開発終了段階で行われる場合が多い為、問題発覚時の前工程への帰還は容易ではない。精度信頼性が高く、かつ実施が容易な定量的評価方法の導入がコスト低減納期短縮に有効である。本研究では主観評価の位置づけをあくまで定量評価の信頼性検証におき、効率が高く信頼性の高い主観評価の実行を目的とし主観評価実験の推進にあたり下記事項に留意することで目的の達成を計った。

一般に主観評価は人数、時間をかけた方が良好な結果を期待できるが、無制限なりソースの投入は現実的ではない。研究目的として主観評価を実施するのであれば当然妥当な制限を設けて実施し、結果を十分に分析して今後の研究やその応用のために役立てることを優先した。実施の基本的な条件として、総被験者数を 20 名、実施期間を 3 か月以内とし、被験者負荷軽減のため実験時間は 1 時間以内、できるだけ簡単な実験内容で正確で迷いのない判断を可能とし、被験者の人権と健康保護を優先することとした。

主観評価を行うに当たっては被験者の人権と健康保護を最優先課題とした。2011 年東京工業大学疫学研究等倫理委員会が定めた規定に従って作成した計画に従った承認申請を行い申請許諾を得て主観評価実験を行った。(承認番号 : 第 2011002 号)

### 4.2.2 主観評価実験実施内容

Fig.4-15 に主観評価実験の概要を示す。観測空間にはマクベスジャッジ II <sup>4-8)</sup> (CIE No.152

1986, JIS Z 8723 準拠) 標準光源装置の筐体を使用した。標準光源装置はカラー印刷やカラー写真等の目視によるカラーマッチング作業に一般的に用いられる作業空間である。上部には各種の光源が備えられていてそれらの照明を切り替えながらカラーマッチング作業を行い、多様な環境での表色をバランスよく行うための装置であるが、今回はその内側上部に試験用 LED 光源 2 種をスイッチ付きソケットを使用して配置し、主観評価実験環境とした。観測空間の大きさは H55.5, W67.4, D52.1 cm である。筐体の色は灰色で被験者に対して余分な刺激を抑えるよう配慮されている。観測面に 2 つの色票 #1, #2 を配置した。試験用 LED 光源の輝度の相違による影響を極小化するため被験者は最も判定を行いやすい位置に色票を自由に置いて観測することとした。評価環境は暗室ではなく、被験者に対し心理的に圧迫感のない通常の事務室の環境とし、室内照明光や日光などが直接観測空間内を照射しない様配慮した。光源の相違による 2 つの色票間の同じ色の違いを判定するために、被験者は 2 つの試験光源をスイッチで排他的に選択点灯して観測空間内の 2 つの試験色の相違が少なく見える光源を勝ちとする単純な判定で比較を行った。

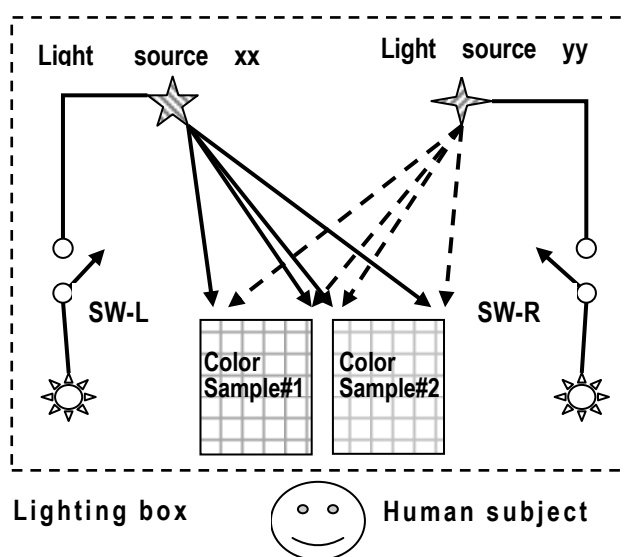


Fig. 4-15 Subjective evaluation: Lighting box, Light sources, Color samples and Human subject.

色順応<sup>1-10)</sup>に対する対応について、本研究主観評価に際して想定される 2 つの状況 (1. 照明が切り替わった瞬間切り替わった照明光源の色が強調されて知覚される状況。2. 同じ色を見続けていると、その色みが次第に褪せて見える現象) からの影響を排除するため、評価判断を照明光源を切り替えてから 10 秒以上 30 秒以内<sup>1-11)</sup>に被験者に判断してもらえる様配慮した。さらに先行研究<sup>4-12,4-13,4-14)</sup>での主観評価実験後の被験者へのインタビューでは、多くの被験者が通常の識別判断の時は、被験者が意識するいくつかの要素、条件で色の相違を判断しているのが、判断に迷うような微妙な色の相違を判断する時の基準とする

#### 第4章 定量評価結果と主観評価実験によるその検証

識別条件が、いくつかの要素を加味するのではなく特定の要素によってのみ識別するような傾向が強くなり、同じような状況が持続するとすべての識別に際してもそのような判断を下してしまうと回答していることから、状況判断によって休憩もしくはリラックスするような会話をするなど被験者が冷静さと集中力を保てるよう配慮した。なお、被験者には色順応に関する情報を事前に告知していない。

主観評価実験の全景を **Fig. 4-16** に示す。



**Fig.4-16 Chamber of subjective evaluation.**

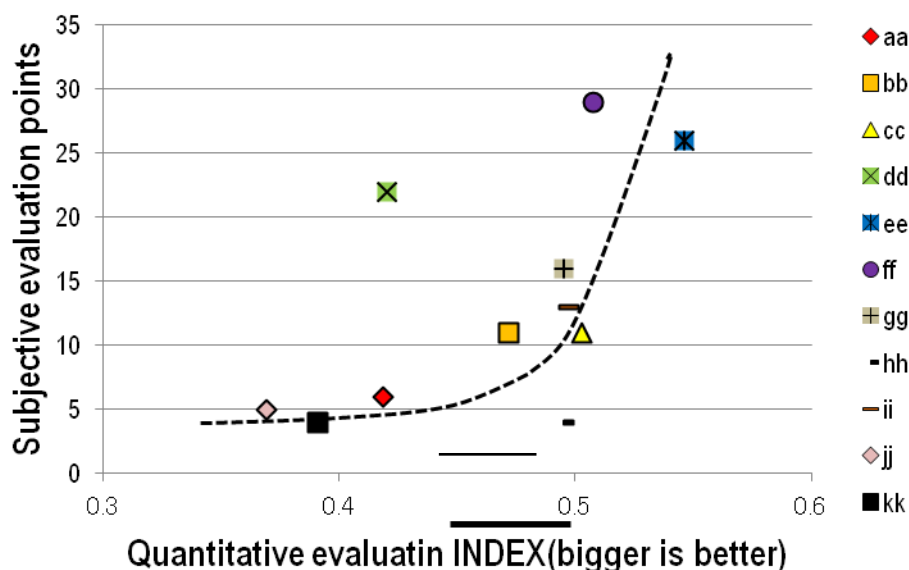
主観評価としてはっきりした評価順位を得るため、色票の 24 試験色で比較を行い、勝ち数が多い光源を勝者とするトーナメント方式の比較を 11 種類の試験用 LED 光源について行った。今回は 1 回戦からの比較対象が 6 種、2 回戦からが 5 種となるので、定量評価結果上位 5 種を 2 回戦からの参加として定量評価結果下位 6 種に試合数でのアドバンテージを与え、さらに 1,2 回戦の初戦の組み合わせをランダムとして全体の公平性を期した。各試験光源は、1 回の比較での 1 勝を 1 得点として獲得した総合点で得点順位を定め、定量評価結果との関連を検証した。被験者は全部で 15 名（年齢 23～65 歳、女 3 名、男 12 名）全員が日本人、視覚健常者である。なお本主観評価を行うに当たっては東京工業大学疫学研究等倫理委員会の承認を得た上で、全被験者からは文書による同意書を取得するなど、東京工業大学疫学研究等倫理委員会の承認内容に則った手続きを経て主観評価実験を行った。なお、被験者には定量評価結果を事前に告知していない。

### 4.2.3 主観評価実験結果

試験用 LED 光源 11 種類の主観評価実験得点と順位を **Table 4-2** に、また定量評価実験で求めた表色評価指標値 (*INDEX*) の結果(Fig. 4-5)と主観評価実験結果の関連を **Fig. 4-16** に分布図で示す。

**Table 4-2** Light source and points of subjective evaluation.

Lank	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Light	ee	ff	dd	gg	ii	bb	cc	hh	aa	jj	kk
Points	29	26	22	16	13	11	11	7	6	5	4



**Fig.4-16** Relations between results of quantitative evaluations and subjective Evaluations.

Table 4-2, Fig. 4-16 より主観評価結果は、試験用 LED 光源 11 種中 dd, hh の 2 種を除き、定量評価結果と相関することが確認できた。特に両評価方法において、上位 2 種(ee,ff)と下位 2 種(jj,kk)の試験用 LED 光源の順位が一致したことは、実際の問題局面を想定した定量評価として本研究が提案した評価方法の有効性を確認できた。従来の CRI との併用により色再現環境の表色性評価精度向上により貢献出来る手法である。

試験用光源 dd は定量評価結果に対し主観評価結果が例外的に良好な値を示したが、**Fig. 4-4** の各試験用 LED 光源の分光放射輝度分布、および **Table 4-1** の仕様を見る限り一般的な電球色 LED 光源の特性を示しており、他の試験用 LED 光源と特性上の大きな差異は見当たらない。**Fig.4-17** にメーカー提供資料<sup>4-15)</sup>による配光曲線図を同一メーカーの製品である試

## 第4章 定量評価結果と主観評価実験によるその検証

験用 LED 光源 cc (昼光色) の配光曲線図と示す. 本研究定量評価の方法に対して影響を及ぼすような特性は見当たらない. 目視では比較的暖かい色をしていて視覚的な刺激が少ない様に見える.

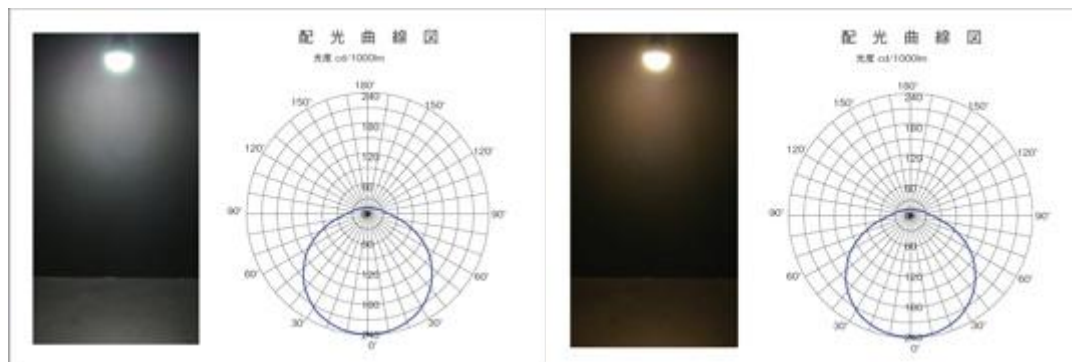


Fig.4-17 Illuminant distribution of light source “cc”(left) and “dd”(right).

本研究では被験者に負担の大きい段階的な評価方法ではなく, 2つの色票間の色の相違を2つの光源下で単純に優劣判定する評価方法を採用したが, 結果的に実験結果のばらつきを抑えることができた. 15名の被験者数ではあったが, 傾向のはっきりした実験結果を得ることができた.

### 4.3 第4章のまとめ

前章までに提起した課題に対する予備実験を含めた実験研究方法の検討と提案に基づき, 本章では D65 標準光源に加えて 11 種類の試験用 LED 光源および参考光源としてハロゲンランプの合計 13 種類の光源下での, 色票#1 (元色用標準色となるカラーチェッカの色票)と色票#2 (カラーチェッカ付属の色データによるインクジェットプリンタの出力) の各色票色 24 色について HS センサを用いての分光データの取得を行った. さらに, 第3章の予備実験結果を踏まえた提案方法による正規化処理をした分光反射率データを CIEL\*a\*b\*均等色空間<sup>4-9)</sup>上に展開し, 各色票色の色値より求めた色差により本研究提案の表色評価指標値を求め, さらに得られた色値を 3.2.4 項で述べた提案方法により CIEL\*a\*b\*均等色空間上に展開して色差解析を行った. この結果, 以下の成果を得ることができた.

- (1) 取得した分光データより求めた色値には例外的な傾向を示すものではなく, 正確なデータの取得ができた.
- (2) 本研究提案による表色定量評価指標値による各試験光源の表色性評価では, 従来の蛍光灯やハロゲンランプに比べて, 全ての LED 光源が, 数値的に約 2 倍の比率で表色性が劣ることが判明した.
- (3) また試験用 LED 光源の中でも, 表色性評価指標値の良いものと悪いものが存在することが判明した.

#### 第4章 定量評価結果と主観評価実験によるその検証

- (4) 主観評価による検証により，本研究提案評価指標による(3)の LED 光源間の表色性の差異は順位を含めて検証された。
- (5) CIEL\*a\*b\*均等色空間上に色彩平面と彩度対明度平面により展開した本研究で取得された全ての色票色の色値から求めた各光源下での 2 色票間の同じ色票色の色差解析の結果も，上記(1)~(4)までの結果を反映したものとなった。
- (6) 上記(5)の CIEL\*a\*b\*均等色空間上の色値による色差解析の結果からは，特定の色相，彩度，明度領域と色差の大きさとの相関は見られなかった。
- (7) 安全で効果的な主観評価実験を行うために検討し，提案した主観評価実験方法は結果的にも安全であり，信頼性の高い結果が得られた点で有効であることが確認できた。

#### 4.4 第4章参考文献

- 4-1) Publ. CIE No. 13. 2: “Method of Measuring and Specifying Color rendering Properties of Light Sources”, 2<sup>nd</sup> Ed (TC-3. 2), ( 1974).
- 4-2) CIE No. 3. 3: “Method of Measuring and Specifying color Rendering of Light Source”, (1995).
- 4-3) Japanese Industrial Standards Committee: “JIS Z 8726 Method of Specifying Color Rendering Properties of Light Sources”, Japanese Standards Association, (1990).
- 4-4) Japanese Industrial Standards Committee: “Japanese Industrial Standard Method of Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources JIS Z-8726”, (1990), (Reaffirmed 2001).
- 4-5) Gretagmacbeth, “ColorChecker™Color Rendition Chart” (2006).
- 4-6) Japan Electric Lamp Manufacturers Association: “Reports of investigation on self-ballasted LED lamps”(2010).
- 4-7) Tomoko Kotani: “Color Rendering of LED Lamp” Journal of the Imaging Society of Japan Vol. 50, No. 3, pp. 229-233(2011).
- 4-8) <http://www.inx-eng.co.jp/product/vb/j2S.html> (Sakata Engineering).
- 4-9) CIE(International Commission of Illumination): “CIE 1976 L\*a\*b\* color space”
- 4-10) [http://www.daicolor.co.jp/color/color\\_01.html](http://www.daicolor.co.jp/color/color_01.html)
- 4-11) [http://gc.sfc.keio.ac.jp/class/2003\\_14454/slides/05/83.html](http://gc.sfc.keio.ac.jp/class/2003_14454/slides/05/83.html)
- 4-12) W. Song, H. Seki, G. Ohashi, Y. Shimodaira: “Subjective assessment of printed color image quality as saturation of the primary colors RGB decrease” Color Imaging XI: Processing,

#### 第4章 定量評価結果と主観評価実験によるその検証

Hardcopy, and applications, 17-19 January 2006 San Jose, California, USA, SPIE Vol.6058-45, pp. 161-170(2006).

4-13) 宋万青, 関晴之, 大橋剛介, 下平美文:“RGB 彩度低下に対するカラー印刷画像の画質主観評価” 電子情報通信学会技報 EID2003-15, pp. 5-8(2003)

4-14) 宋万青, 関晴之, 大橋剛介, 下平美文:“三原色 RGB の彩度低下に対する印刷画像の画質” 画像電子学会誌 Vol.35 No.3, pp. 185-190.

4-15) <http://www.nelt.co.jp/products/lifeled.html>.

## 第4章 定量評価結果と主観評価実験によるその検証

### (第4章付録)

**Fig.4-A:** 全試験光源下での色票#1 と#2 間各色票色の平均色差と提案表色評価指標値

**Fig.4-B:** 疫学研究等倫理審査実施申請書

**Fig.4-C:** 主観評価実験案内文

**Fig.4-D-1:** 主観評価実験被験者募集要項 (1/2)

**Fig.4-D-2:** 主観評価実験被験者募集要項 (2/2)

**Fig.4-E:** 主観評価実験被験者同意書式

**Fig.4-F:** 主観評価実験被験者同意書撤回書式

第4章 定量評価結果と主観評価実験によるその検証

Light Source	Color #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	AVR
	Color	Dark skin	Light skin	Blue sky	Foliage	Blue flower	Bluish green	Orange	Purplish blue	Moderate red	Purple	Yellow green	Orange yellow	Blue	Green	Red	Yellow	Magenta	Cyan	White(.05')	Neutral8(.23')	Neutral6.5(.44')	Neutral5(.70')	Neutral3.5(1.05')	Black(1.50')	AVR(/24)*
D65	Diff.	4.06	6.74	3.13	2.66	3.99	3.06	3.02	8.08	4.16	3.81	8.95	4.94	9.37	3.99	1.7	9.79	4.30	5.30	4.32	1.73	9.37	3.36	4.65	4.59	4.96
	Index	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Ha	Diff.	3.78	6.24	2.09	1.65	3.09	3.19	2.80	7.68	5.06	4.15	8.08	6.45	8.82	4.16	1.59	10.57	4.17	3.32	4.66	2.88	0.54	1.92	3.17	2.38	4.27
	Index	0.93	0.93	0.67	0.62	0.77	1.04	0.93	0.95	1.22	1.09	0.90	1.31	0.94	1.04	0.94	1.08	0.97	0.63	1.08	1.66	0.06	0.57	0.68	0.52	0.90
aa	Diff.	4.22	4.22	8.11	2.49	10.71	10.04	4.60	12.16	7.17	7.34	9.56	5.03	13.66	5.55	3.09	8.86	10.60	10.86	15.46	2.88	4.22	17.78	13.14	10.98	8.45
	Index	1.04	0.63	2.59	0.94	2.68	3.28	1.52	1.51	1.72	1.93	1.07	1.02	1.46	1.39	1.82	0.90	2.46	2.05	3.58	1.66	0.45	5.30	2.82	2.39	1.93
bb	Diff.	4.99	5.14	12.72	3.53	9.61	10.06	2.25	11.81	7.29	5.36	10.79	5.32	12.41	5.62	2.63	6.86	9.89	10.74	16.09	20.87	4.99	7.57	6.45	3.74	8.20
	Index	1.23	0.76	4.06	1.33	2.41	3.29	0.74	1.46	1.75	1.41	1.21	1.08	1.33	1.41	1.55	0.70	2.30	2.03	3.72	12.04	0.53	2.26	1.39	0.81	2.12
cc	Diff.	5.14	5.14	9.31	4.81	11.22	10.49	1.54	12.13	8.40	6.52	11.18	6.78	12.71	5.62	3.18	8.40	10.53	11.05	16.37	11.27	10.13	8.03	7.14	5.09	8.42
	Index	1.27	0.76	2.97	1.81	2.81	3.43	0.51	1.50	2.02	1.71	1.25	1.37	1.36	1.41	1.87	0.86	2.45	2.09	3.79	6.50	1.08	2.39	1.53	1.11	1.99
dd	Diff.	4.97	4.97	8.90	2.80	9.61	10.10	3.33	13.11	8.59	6.95	10.63	7.98	13.47	5.96	3.64	10.39	11.56	11.30	17.38	11.47	10.16	8.02	6.96	3.78	8.58
	Index	1.23	0.74	2.84	1.05	11.13	3.30	1.10	1.62	2.06	1.83	1.19	1.62	1.44	1.49	2.14	1.06	2.69	2.13	4.02	6.61	1.09	2.39	1.50	0.82	2.38
ee	Diff.	4.53	11.88	8.37	3.59	11.13	9.63	2.03	11.48	5.86	5.24	9.85	3.55	10.83	6.66	2.46	6.99	8.62	10.39	14.19	11.91	9.06	7.18	5.28	4.25	7.71
	Index	1.12	1.76	2.67	1.35	2.79	3.15	0.67	1.42	1.41	1.38	1.10	0.72	1.16	1.67	1.45	0.71	2.00	1.96	3.28	6.87	0.97	2.14	1.13	0.93	1.83
ff	Diff.	4.18	11.54	9.06	5.42	9.49	10.17	2.58	11.44	8.43	5.71	12.22	5.76	12.29	6.22	2.88	7.71	9.51	10.47	16.03	11.64	9.51	7.86	6.52	4.38	8.37
	Index	1.03	1.71	2.89	2.04	2.38	3.33	0.85	1.42	2.03	1.50	1.36	1.17	1.31	1.56	1.69	0.79	2.21	1.98	3.71	6.71	1.02	2.34	1.40	0.95	1.97
gg	Diff.	5.77	12.76	8.01	4.58	9.90	10.00	1.09	11.92	7.57	5.32	12.32	5.55	13.10	6.05	3.23	8.99	10.28	12.15	16.68	11.71	10.41	8.49	7.90	5.69	8.73
	Index	1.42	1.89	2.56	1.72	2.48	3.27	0.36	1.48	1.82	1.40	1.38	1.12	1.40	1.52	1.90	0.92	2.39	2.29	3.86	6.75	1.11	2.53	1.70	1.24	2.02
hh	Diff.	4.26	11.80	8.76	4.26	10.83	9.74	3.12	12.79	7.86	6.41	10.13	6.81	13.44	5.53	3.43	10.81	11.45	10.74	16.30	11.51	9.96	7.94	6.22	3.11	8.63
	Index	1.05	1.75	2.80	1.60	2.71	3.18	1.03	1.58	1.89	1.68	1.13	1.38	1.44	1.39	2.02	1.10	2.66	2.03	3.77	6.64	1.06	2.37	1.34	0.68	2.01
ii	Diff.	4.81	11.74	7.67	9.73	9.73	9.77	3.96	11.59	6.24	5.47	9.76	5.19	13.02	5.07	3.53	10.24	11.00	10.84	15.65	11.38	9.37	7.00	6.38	3.42	8.44
	Index	1.19	1.74	2.45	3.66	2.44	3.19	1.31	1.43	1.50	1.44	1.09	1.05	1.39	1.27	2.08	1.05	2.56	2.05	3.62	6.56	1.00	2.09	1.37	0.75	2.01
jj	Diff.	9.68	14.00	14.00	11.60	11.60	10.01	9.40	14.23	8.28	11.16	9.00	6.60	9.68	6.83	6.72	11.50	14.80	12.80	14.46	12.20	10.98	9.99	10.23	13.77	10.98
	Index	2.39	2.08	4.47	4.37	2.91	3.27	3.11	1.76	1.99	2.93	1.00	1.34	1.03	1.71	3.95	1.17	3.44	2.42	3.35	7.04	1.17	2.98	2.20	3.00	2.71
kk	Diff.	4.37	12.45	12.38	12.17	12.17	10.44	12.35	15.88	9.39	11.96	9.14	9.30	13.40	5.45	5.23	4.37	16.03	13.42	13.58	4.37	10.81	10.36	13.06	17.98	10.84
	Index	1.08	1.85	3.95	4.58	3.05	3.41	4.08	1.97	2.26	3.14	1.02	1.88	1.43	1.37	3.07	0.45	3.73	2.53	3.14	2.52	1.15	3.09	2.81	3.92	2.56
Diff AVR		4.981	9.125	8.655	5.329	9.468	8.978	4.005	11.87	7.253	6.57	10.12	6.096	12.02	5.593	3.331	8.883	10.21	10.26	13.94	9.68	8.423	8.114	7.469	6.398	8.199
IndexAVR		1.338	3.072	2.618	3.177	3.242	1.297	1.418	1.705	1.713	1.054	1.159	1.207	1.338	2.127	0.831	2.588	1.975	3.622	8.088	0.822	2.506	1.562	1.278	2.012	
			2.1	:more than 2(Index)					8.1	:more than 8(Difference)																

Fig.4-A Color difference and proposed INDEX for all color samples #1 vs. #2 under all light sources.

Fig.4-B

別紙様式第1-1号

※ 受付番号	
--------	--

疫学研究等倫理審査(実施・変更)申請書(A)

平成 23年 12月 15日提出

東京工業大学長 殿

下記の課題の研究実施計画について倫理審査を申請いたします。

記

講習会受講修了証 No. \*1) 疫倫第 11009号

研究課題名	LED 光源の演色性評価に関する研究
研究責任者所属・職名・氏名	総合理工学研究科・教授・小杉幸夫 印
研究担当者・所属・氏名 (書ききれない場合は別紙添付のこと)	総合理工学研究科・助教・宇都有昭 印 総合理工学研究科・物理情報システム専攻・博士後期課程2年・関晴之 印
研究期間(西暦年)	年 月 日(承認後) ~ 2012年 6月 30日
研究対象者の研究への関与形態 (区分はガイドライン参照)	少しでも関係のある形態の番号全てを○で囲む ①。観察研究 2。介入研究 3。侵襲あり ④。侵襲なし
研究費の出所	科研費(A)ハイパースペクトル画像処理の高度化に関する研究(代表:小杉)及び運営費交付金、委任経理金
研究方法の概要	市販 LED を使用し、ハイパースペクトルセンサによる LED 光源の演色性の定量的評価結果を主観評価により検証し、その関連を分析する。半解放空間内での LED を含む各種光源下での色票の色観測主観評価
期待される成果、および結果公表方法(社会的利益にどのように結びつくかを簡潔に)	LED 照明の演色性能向上のための正確で簡単な評価方法の確立、学会論文誌及び学会研究会等で発表。演色性向上により特に医療、商品見本、美術館等の応用分野での色表現精度向上に貢献できる。
研究対象者の選択方法および最大人数	最大 10 名, 研究室HP上で公募する。
研究対象者への説明文および同意書の内容(別紙添付のこと)	別紙説明文、同意書、募集要項
研究対象者に患者が含まれるか否か該当する方を○で囲む	Yes <input checked="" type="radio"/> No
研究対象者への謝礼等の有無	有、当学ロゴ入り小物文具等(500円以下)
研究対象者が受ける不利益の可能性: 該当項方を○で囲む	有 <input checked="" type="radio"/> 無
個人情報保護の具体的方法	連結不可能匿名化処理

注) 以下の枠内は記入しないこと

※申請受付番号	A 号
※申請受付年月日	年 月 日
※審査結果(一方を抹消)	・詳細な審査が必要→書式(B)の提出 ・申請を承認する(承認番号:A 号)
※審査結果決定年月日	年 月 日

\* 1) 実験申請前に、研究責任者は講習会を必ず受講して下さい。

講習会の受講修了証番号が必要となります。(有効期限: 修了証発行日より2年間)

(注) ※は記入しないこと。

Fig.4-C

(募集要項1)

案内文

研究テーマ「LED光源の演色性評価に関する研究の主観評価実験への参加について」

近年普及が著しいLED光源の照明ですが、自然光や既存の白熱電球や蛍光灯と比べて色に違和感を覚えることはありませんか？特に正確な表色が要求される医療、商品見本、美術館などでは問題は深刻です。これらは、LED光源に含まれる光の性質に起因しているのですが、本研究ではこれまでにハイパースペクトルセンサという測定器を使って光の性質の相違を定量的にとらえることに成功しましたが、定量評価結果の主観への反映が十分に解明できていません。そこで主観評価実験を行って定量評価との関連を調べます。

このためには、主観評価被験者が必要となることから、東工大小杉研究室では主観評価実験の被験者となって研究に参加していただける方を募集しています。

\* 研究場所：東京工業大学すずかけ台キャンパスG2-4F小杉研究室内

\* 研究期間：～2012年6月30日

\* 研究に参加していただく日時：期間内随時、所用時間は1時間以内です。

\* 研究参加の謝礼など：粗品進呈

\* 個人情報の取り扱いについて：連結不可能匿名化処理により保護されます。

\* 研究に関する資料開示について：研究室にて開示しております。

\* 研究中断する場合について：希望により随時実験の中止ができ、データは破棄します。ただし論文等で公表済みのデータは破棄できません。

：研究への参加に伴う利益・不利益と危害の可能性について：本研究により得られたLED光源の演色性向上という研究成果は、特に医療、商品見本、美術館等の応用分野での色表現精度向上に貢献できます。被験者の不利益はありませんが、測定に際しては細かい色の変化を判別するなど一時的に精神的、目の疲労を覚える可能性があります。被験者の不利益はありません。

\* 研究終了後の対応と研究成果の公表について：関連学会誌への論文掲載、及び研究会での発表を予定しています。

\*\*\* 本件問い合わせ先 \*\*\*

研究責任者：小杉幸夫

説明者：小杉幸夫，宇都有昭

東京工業大学大学院総合理工学研究科小杉研究室

電話：045-924-5466 / 5484

(平日10:30～17:30)

e-mail：[kosugi@pms.titech.ac.jp](mailto:kosugi@pms.titech.ac.jp) [uto@pms.titech.ac.jp](mailto:uto@pms.titech.ac.jp)

## 第4章 定量評価結果と主観評価実験によるその検証

### Fig.4-D-1

#### 募集要項

「LED光源の演色性評価に関する研究」へご協力いただく方への説明書

#### (1) 研究の概要について

研究題名： LED光源の演色性評価に関する研究

近年普及が著しいLED光源の照明ですが、自然光や既存の白熱電球や蛍光灯と比べて色に違和感を覚えることがありませんか？特に正確な表色が要求される医療、商品見本、美術館などでは問題は深刻です。これらは、LED光源に含まれる光の性質に起因しているのですが、本研究ではこれまでにハイパースペクトルセンサという測定器を使って光の性質の相違を定量的にとらえることに成功しましたが、定量評価を検証するために主観評価を行い、定量評価との関連を調べます。  
研究期間： 平成23年承認後から平成24年6月30日

#### (2) 研究の意義・目的について

現在のLED光源電球は色再現よりも発光効率を重視した製品となっていますが、今後色再現性能の向上を目指して製品開発が進められています。これらの性能向上のためには、測定器を使った定量評価と、主観評価の結果が一致することが必要です。両者の関連が明らかになればLED光源の開発と性能評価に関する技術が飛躍的に向上し、表色性能向上や普及に大きく寄与できる可能性があります。

#### (3) 研究の方法について

下写真のような半解放の環境で、各種光源で照明された色票の色の相違を判別してもらいます。測定時間は1時間以内、いつでも中断休憩できます。測定結果は誰の判別結果かといった個人情報削除したうえで、コンピュータで解析します。1時間ほど微妙な色判別をして頂くため、目が疲れたり、集中力維持による精神的疲労が生じる可能性があります。



#### (4) 試料の保管と、他の研究への利用について

この評価実験で得られたデータは、誰からとったかということが分からないように、匿名にして保管・管理しますので、研究対象者の個人情報が外部に漏れることはありません。

#### (5) 予測される結果（利益・不利益）について

本研究により得られたLED光源の演色性向上という研究成果は、特に医療、商品見本、美術館等の応用分野での色表現精度向上に貢献できます。被験者の不利益はありませんが、測定に際しては細かい色の変化を判別するなど一時的に精神的、目の疲労を覚える可能性があります。

#### (6) 研究協力の任意性と撤回の自由について

この研究にご協力いただくか、協力されないかは全く自由です。

また、一旦同意しても、あとで協力しなくなつた場合には、その旨申し出ただいた時点で測定は中止し、データは破棄いたします。測定後の同意撤回も可能ですが、論文等で公表済みの

## 第4章 定量評価結果と主観評価実験によるその検証

### Fig.4-D-2

データは、破棄できません。

(7) 個人情報の保護について

データに付随して記録される研究対象者名を「匿名化」するので、研究対象者の個人情報は一切外部に漏れることはありません。

(8) 研究成果の公表について

日本画像学会学会など、情報処理関連の専門学会、専門委員会、国際会議並びに内外の工学専門雑誌に研究成果を公表することがあります。この場合にもご協力いただいた方を特定できる情報は一切公表いたしません。

(9) 費用について

研究に伴う測定・解析によって研究対象者が負担する付加的な費用は一切ありません。

(10) 健康被害の補償について

この研究では、安全には万全の対策をとっていますが、万一、測定によって健康被害が発生した場合には、適切な医療等の手配を行います。また万一に備えての「補償」が可能な、傷害保険に加入しています。

(11) 本件に関する問い合わせ先

東京工業大学 研究企画課 松永、乙津、武藤、濱田  
03-5734-3802 / 7016 / 7223  
メール: [kenkik.som@jim.titech.ac.jp](mailto:kenkik.som@jim.titech.ac.jp)

研究についての連絡先

東京工業大学大学院総合理工学研究科 教授 小杉幸夫、助教 宇都有昭  
045-924-5466 / 5484  
メール: [kosugi@pms.titech.ac.jp](mailto:kosugi@pms.titech.ac.jp), [uto@pms.titech.ac.jp](mailto:uto@pms.titech.ac.jp)

Fig.4-E

(同意書式)

平成 年 月 日提出

〒152-8550  
東京都目黒区大岡山二丁目12番1号  
東京工業大学長 殿

### 同意書式

私は、「LED光源の演色性評価に関する研究」について、目的・方法・予測される問題等について説明者より説明文書を用いて十分な説明を受け、以下の項目を理解しました。

- 研究の目的、方法そしてあらゆる危険性とそれに対する対応について。
- 私は自らの自由意思でいつでも実験を中止することができること。
- 私はいかなる時点において実験の参加の拒否をしても何ら不利益を被らないこと。
- 記録された個人情報、外部に漏洩しないよう厳密に管理され、再実験または事故が生じたときの連絡以外の目的には使用されないこと。
- 私は、万一不利益を被った場合に東京工業大学に対して申し立てを行うことができること。そこで自らの自由意思により、主観評価実験の研究対象者になることを同意します。

平成 年 月 日

ご本人による場合：

氏名 \_\_\_\_\_ (自筆署名)

・親権者/保護者：

署名 \_\_\_\_\_

・親権者/保護者：

住所 \_\_\_\_\_

代諾者による場合：

氏名 \_\_\_\_\_ (自筆署名)

・代諾者：

住所 \_\_\_\_\_

参加者との続柄： \_\_\_\_\_

「LED光源の演色性評価に関する研究」の主観評価実験について、書面及び口頭により平成 年 月 日に説明を行い、上記のとおり同意を得ました。

説明日 平成 年 月 日

研究責任者 所属 \_\_\_\_\_

氏名 \_\_\_\_\_ (自筆署名又は記名押印)

説明者 所属 \_\_\_\_\_

氏名 \_\_\_\_\_ (自筆署名又は記名押印)

\*\*\* 本件問合わせ先 \*\*\*

研究責任者：小杉幸夫

説明者：小杉幸夫，宇都有昭

東京工業大学大学院総合理工学研究科小杉研究室

Tel：045-924-5466 / 5484

e-mail：[kosugi@pms.titech.ac.jp](mailto:kosugi@pms.titech.ac.jp) [uto@pms.titech.ac.jp](mailto:uto@pms.titech.ac.jp)

Fig.4-F

(同意撤回書)

平成 年 月 日提出

〒152-8550  
東京都目黒区大岡山二丁目12番1号  
東京工業大学長 殿

### 同意撤回書

私は、「LED光源の演色性評価に関する研究」の研究対象者となることに同意し、同意書に署名しましたが、その同意について、撤回することを研究担当者( )に伝えました。提出した同意書は返却されて確かに受領いたしましたので、ここに同意撤回書を提出いたします。

平成 年 月 日

ご本人による同意書をご提出の場合：

氏名 \_\_\_\_\_  
(自筆署名)

- ・親権者/保護者： \_\_\_\_\_  
署名
- ・親権者/保護者： \_\_\_\_\_  
住所

代諾者による同意書をご提出の場合：

氏名 \_\_\_\_\_  
(自筆署名)

- ・代諾者： \_\_\_\_\_  
住所

参加者との続柄： \_\_\_\_\_

「LED光源の演色性評価に関する研究」の研究について、書面及び口頭により平成 年 月 日に同意撤回の申し出があり、上記のとおり確かに同意撤回書を受領したことをここに証します。

研究責任者 所属 \_\_\_\_\_

氏名 \_\_\_\_\_  
(自筆署名又は記名押印)

研究担当者 所属 \_\_\_\_\_

氏名 \_\_\_\_\_  
(自筆署名又は記名押印)

\*\*\* 本件問合わせ先 \*\*\*  
研究責任者：小杉幸夫  
説明者：小杉幸夫，宇都有昭  
東京工業大学大学院総合理工学研究科小杉研究室  
Tel：045-924-5466 / 5484  
e-mail：[kosugi@pms.titech.ac.jp](mailto:kosugi@pms.titech.ac.jp) [uto@pms.titech.ac.jp](mailto:uto@pms.titech.ac.jp)

## 第5章

# 異光源下での表色定量評価方式の 提案

## 第5章 異光源下での表色定量評価方式の提案

はじめに：

第5章では、本研究を通じて異光源下での表色定量評価に関して、特に有効性が確認された事項について内容を精査し今後の発展的な研究に有効に活用できる手法として具体的に提案する。

### 5.1 データの取得と処理に関する提案

本研究成果として以下 5.1.1, 項と 5.1.2 項に本研究提案するデータの取得方法と処理の手順を定め、提案とする。

#### 5.1.1 データの取得に関する提案

一般に、色を定量的に測定する手段としては色彩計と分光測色計があり、前者は刺激値直読方法、後者は分光測色方法が用いられるが、本研究の目的からは分光測色方法でなければならない。大きな分光放射輝度分布の偏在を持つ LED 光源や複雑な分光反射率分布を持つプリンタ装置出力画像を測定対象とした結果からも本研究に用いた HS センサは、特に 1 nm の波長分解能精度において従来の 5 nm の波長分解能しか持たない測定機器に替わり、測定系としての基本的な条件を満たしている。研究目的を可視域でのデータ取得に限定した場合、現在入手可能な 1 nm 以上の波長分解能を持つ分光測色計の使用も十分に可能である。今後同様の分光測色手段での波長分解能での性能向上がなされれば新たな展開も期待できるので、関連する機器、装置の性能向上のための開発研究を行う側では、当面こうした最高性能の測定手段の活用が有効である。Andrew Stockman<sup>5-1)</sup>らは、人間の標準比視感度関数（等色関数）に関する研究実績として等色関数値の更新公開を行っているが、既に 1 nm 間隔での等色関数値の公開を行っている。CIE（国際照明委員会）でも現在の CRI<sup>5-2,3)</sup>（演色評価数）の見直しを行う中で、従来の 5 nm 間隔で扱っていた波長分解に関して昨今の LED 光源等が持つ分光放射輝度分布の偏在に対応して高分解能化の検討<sup>5-4,5)</sup>を行っている。

また、HS センサ固有の性能として赤外域である 2500 nm までの測定帯域から得られたデータは、今後の展開の中で印刷画像を測定し画像の耐久性や保全性などを解析する上での貴重なデータとなった。

#### 5.1.2 データの処理に関する提案

測定環境や測定装置の温度などの変化変動に対して、あるいは測定光源の輝度の変化変動などに対して、取得データを正規化処理することは、本研究への取得データの適用のみならず今後各種の関連研究を行う上でも有効である。本研究では標準白色板を用いた 3.3.2 項の正規化式 (3-13) を用いたデータの正規化を行い、予測した研究推進条件を満たすこ

## 第5章 異光源下での表色定量評価方式の提案

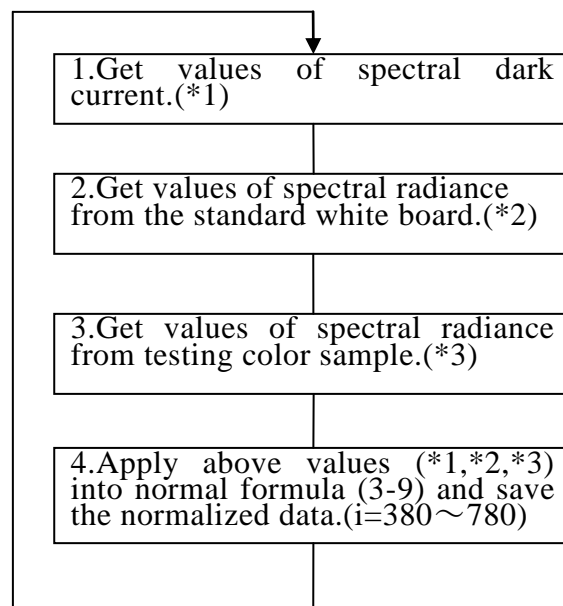
とができた。以下に本研究で用いた試験光源下での色票色の分光データ取得から、正規化された分光反射率を求めるまでの処理手順をフローチャートとして **Fig. 5-1** に示す。

- (1) 分光的な測定センサの暗電流値の計測。
- (2) 取得データ正規化のために用意した標準白色板の分光放射輝度の測定。
- (3) 試験色票の分光放射輝度の測定。
- (4) 上記で取得されたデータを 3.3.2 項の正規化式 (3-13) に適用して正規化された分光反射率が求められる。

$$R(i) = \frac{L(i) - Drk(i)}{Lw(i) - Drk(i)} \quad (3-13)$$

ここで  $i$  は測定波長バンド、 $R(i)$  は正規化された試験色の分光反射率、 $L(i)$  は試験色の分光放射輝度値、 $Lw(i)$  は試験色のデータ取得時に同時に取得した標準白色板の分光放射輝度値、 $Drk(i)$  は同様にデータ取得時に外部からの光を遮断した状態で取得したセンサの暗電流値である。本処理による分光反射率データは、数値的に正規化されるのと同時に、計測機器の温度特性、暗電流、光源以外の光や乱反射等の条件を正規化処理できる。そのため他の研究解析にも汎用的に活用可能である。

### (Normalized data acquisition)



**Fig. 5-1** Flow chart of Data Normalization.

## 5.2 表色評価指標に関する提案

### 5.2.1 表色評価に用いた基準色票

本研究提案の表色評価指標は、相対的な色差比で計算されるので例えばプリンタ装置の出力画像に実効的な表色指標を適用するためには基準となる実色票が必要である。本研究では、3.4.1 項にも述べたように、色調整用として写真や印刷の業界で広く使用されている標準色サンプルのカラーチェッカ<sup>5-9)</sup>を使用した。本論文第3章の予備実験で取得したデータでもインクジェットプリンタの出力と比べてスペクトル分布特性グラフの形状がなめらかである。また 4.1.2 項に述べた様に本研究定量評価実験を行う中で、実色票の入手が容易で対候性が高く、標準色としての分光特性も安定していると評価している。演色評価数 CRI を求める場合も同様に基準色色票が、規格の中で分光放射寄与率として定義され使用されているが、第2章に述べた様に実色票としては製作入手が難しい。本研究では、予め定義された分光放射寄与率に基づいて実色票を製作するより、基準色票として必要な条件を満たしている既存色票であるカラーチェッカと、カラーチェッカの実測分光データを基準色票として使用して表色評価指標を求め、実効的な成果を得た。

### 5.2.2 表色評価指標を求める処理手順

本研究が想定した「照明光源と色再現の分光特性が同時に異なる環境下での表色定量評価指標」として提案した評価指標を求める処理手順をフローチャートとして **Fig.5-2** に示す。処理の流れ順は 5.1.1 項から継続した(5)～(8) で表す。

(5) 前項に述べた方法で求めた分光反射率正規化データを 1.1.2 項の式(1-1)に適用して三刺激値を求める。

(6) 上記(5)で求めた三刺激値 X,Y,Z より 3.2.3 項の式(3-8～10) を用いて CIEL\*a\*b\*均等色空間<sup>5-6)</sup>上の色値を求める。

(7) 上記(6)で求めた CIEL\*a\*b\*均等色空間上<sup>5-6)</sup>の色値から、二つの比較色票で対応する色の色差を 3.2.3 項の式(3-11)を用いて求める。

(8) 上記で取得された二つの色差値から、提案表色評価指標値を 3.1 の式(3-1)を用いて D65 標準光源を基準光源として求める。

(Proposed index)

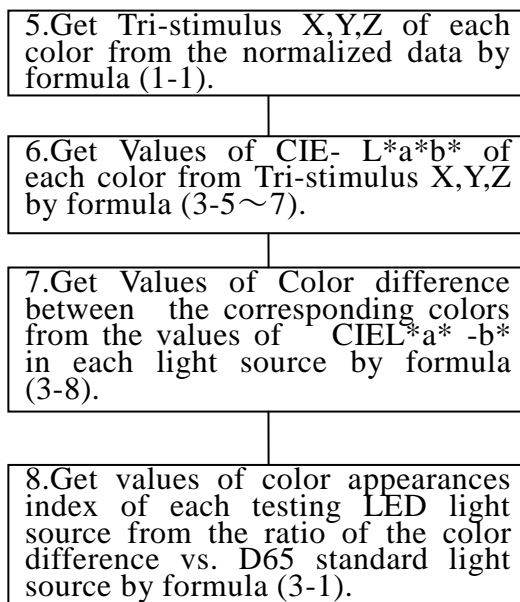


Fig. 5-2 Flow chart of Proposed index.

上記処理に使用した第1章および第3章で定義した計算式を下記に列記する。

$$X, Y, Z = K \int_{\lambda=380}^{780} S(\lambda)R(\lambda)\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)d\lambda \quad (1-1)$$

$$L^* = 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \quad (3-5)$$

$$a^* = 500 \left[ \left( \frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right] \quad (3-6)$$

$$b^* = 200 \left[ \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left( \frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right] \quad (3-7)$$

$$\Delta E = \left[ (\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{1/2} \quad (3-8)$$

$$INDEX_{\Delta E}(yy / xx) = \frac{\Delta E_{yy}(\#1, \#2)}{\Delta E_{xx}(\#1, \#2)} \quad (3-1)$$

### 5.3 問題解決改善への示唆提案

#### 5.3.1 光源の分光放射輝度分布の偏在

本研究提案の表色評価指標は第4章の定量評価実験および主観評価実験検証により、表色評価指標としての有効性が確認できたが、その傾向については第4章の実験結果からは彩度的、色相的、明度的な依存性についての特徴抽出ができない[4.4項(6)].

先行研究<sup>5-7,8)</sup>において、筆者らは色再現の分光反射率分布の偏在の大きさが、表色不一致に対して大きな影響を及ぼしているものと推論した。1.1.2項の式(1-1)で人間の色に対する知覚に直接作用する心理物理量である三刺激値を求める方法を参照すれば、色再現の分光反射率分布と照明光源の分光放射輝度分布も同様な影響を及ぼすものと考えられる。本研究の試験用照明光源の分光放射輝度分布でも、基準光源のD65標準光源はもとより参考用ハロゲンランプ光源と比較して試験LED光源の分光放射輝度分布の偏在が大きいことが確認されている。そこで、光源の分光放射輝度分布の偏在について考察した。Fig. 5-3は試験用LED光源 ee,ff,jj,kk の可視域分光輝度特性である。LED光源 ee,ff は4.1.6項の定量評価実験結果の本研究提案表色評価指標で、11種の試験用LED光源中の最上位2種であり、jj,kk は最下位2種である。

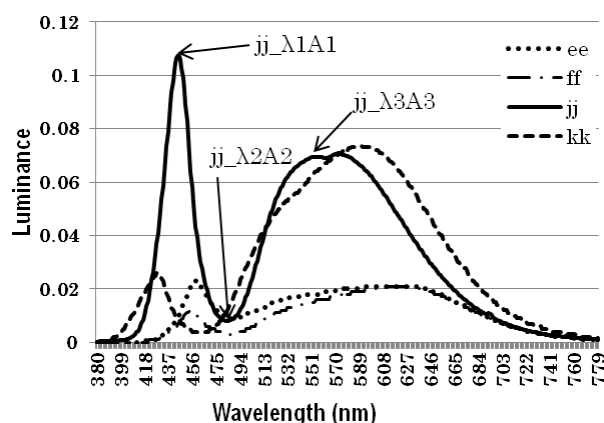


Fig. 5-3 Spectral luminance of light sources ee,ff,jj,kk.

実測により得られた各試験光源の分光放射輝度分布の偏在を表す指標として、LED光源に用いられている青色LEDの発光ピーク値（例えば光源jjの場合 Fig. 5-3の $\lambda_{1,A1}$ ）と、黄色蛍光体による発光ピーク値（例えば光源jjの場合 Fig. 5-3の $\lambda_{3,A3}$ ）および両ピーク値間の谷の値（例えば光源jjの場合 Fig. 5-3の $\lambda_{2,A2}$ ）との関係をTable5-1に示す。ここで各試験用LED光源の分光放射輝度分布の偏在を式(5-1)を用いて正規化し指数をNDLSとして表した。

$$NDLS = \frac{Ap - Ad}{Ap + Ad} \quad (5-1)$$

NDLS: Normalized Difference Light source Steepness.

Ap: Amplitude in peak, Ad: Amplitude in dip.

**Table 5-1** Spectrum inflection point of each light source.

Light source	ee	ff	jj	kk
λ1(nm)	459	455	446	428
λ2(nm)	489	485	485	463
λ3(nm)	615	619	556	591
A1	0.0023	0.012	0.107	0.026
A2	0.009	0.003	0.008	0.004
A3	0.021	0.021	0.069	0.074
NDSL(A1-A2)	0.59	0.60	0.86	0.73
NDSL(A3-A2)	0.40	0.75	0.79	0.90

各試験用 LED 光源の分光放射輝度分布の偏在の大きさを表す正規化指数 NDLS は ee,ff に比べて jj,kk の値が約 1.5 倍大きく、分光放射輝度分布の偏在の大きさが表色性に影響していることがわかる。さらに **Table 5-2** には全ての試験用 LED 光源の NDLS を表す。ここでは試験用 LED 光源の分光放射輝度分布で、青色 LED と黄色蛍光体による 2 つのピークとその間の谷から求めた 2 つの NDLS 値をもとめ、更にその合計も表した。

**Table 5-2** Spectrum inflection point of all light source.

LED Light	aa	bb	cc	dd	ee	ff	gg	hh	ii	jj	kk
A1	0.192	0.04	0.058	0.028	0.023	0.012	0.066	0.068	0.018	0.107	0.026
A2	0.024	0.008	0.008	0.005	0.009	0.003	0.002	0.006	0.008	0.008	0.004
A3	0.109	0.094	0.046	0.046	0.021	0.021	0.151	0.048	0.053	0.069	0.074
NDSL(A1-A2)	0.78	0.67	0.76	0.70	0.44	0.60	0.53	0.84	0.38	0.86	0.73
NDSL(A3-A2)	0.64	0.84	0.70	0.80	0.40	0.75	0.77	0.78	0.74	0.79	0.90
Add NDLS	1.42	1.51	1.46	1.50	0.84	1.35	1.92	1.62	1.12	1.65	1.63

Table 5-2 から各試験用 LED 光源の 2 つの NDLS 値合計値と第 4 章で求めた各試験用 LED 光源の本研究提案による表色評価指標値 (*INDEX*) を分布図で **Fig. 5-4** に表す。Fig. 5-4 からは各試験用 LED 光源の NDLS 値と第 4 章 4.1.6 項で求めた各試験用 LED 光源の本研究提案による表色指標値との間に明確な相関があることが確認できる。NDLS は光源の表色性改善のための有効な評価指標として今後の開発などの局面で活用できる。

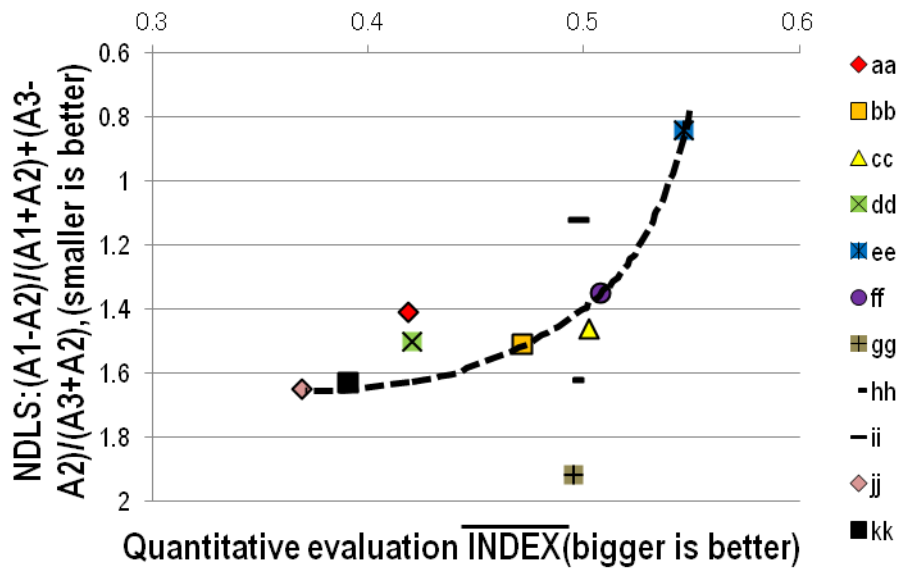


Fig. 5-4 NDLS vs. Proposed INDEX.

### 5.3.2 色再現の分光反射率分布の偏在

前項と同様に色再現の分光反射率分布の偏在についても同様の傾向が見られる。色票#1 (左) と#2(右)の D65 標準光源と表色評価指標値が最も悪い kk 光源下での各 24 色の CIEL\*a\*b\*の a\*-b\*色彩平面上の色値を Fig.5-5-1 に示す。同じ 2 つの光源間で色差を比較した時、色票#1 の方が#2 より色差が少ない。

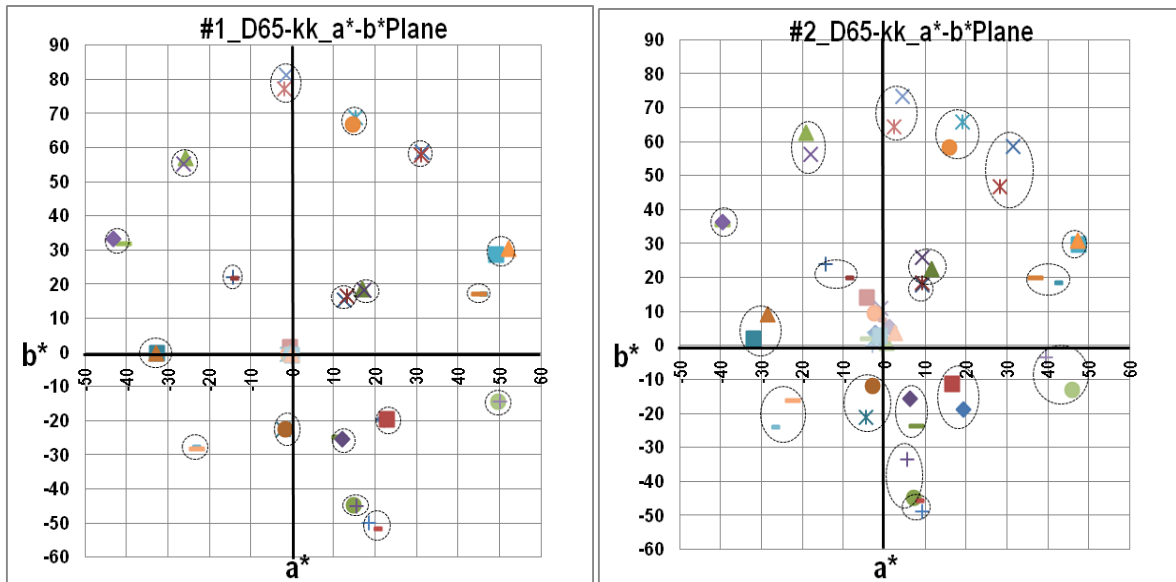


Fig. 5-5-1 Color sample #1 under D65 vs. kk(left), #2 under D65 vs. kk(right) in a\*-b\* plane.

色票#1 (左) と#2(右)の D65 と kk 光源下での各 24 色の CIEL\*a\*b\*の c-L\*彩度対明度平面(右) 上の色値を Fig.5-5-2 に示す。色彩平面上と同様、同じ 2 つの光源間で色差を比較した時、色票#1 の方が#2 より色差が少ない。

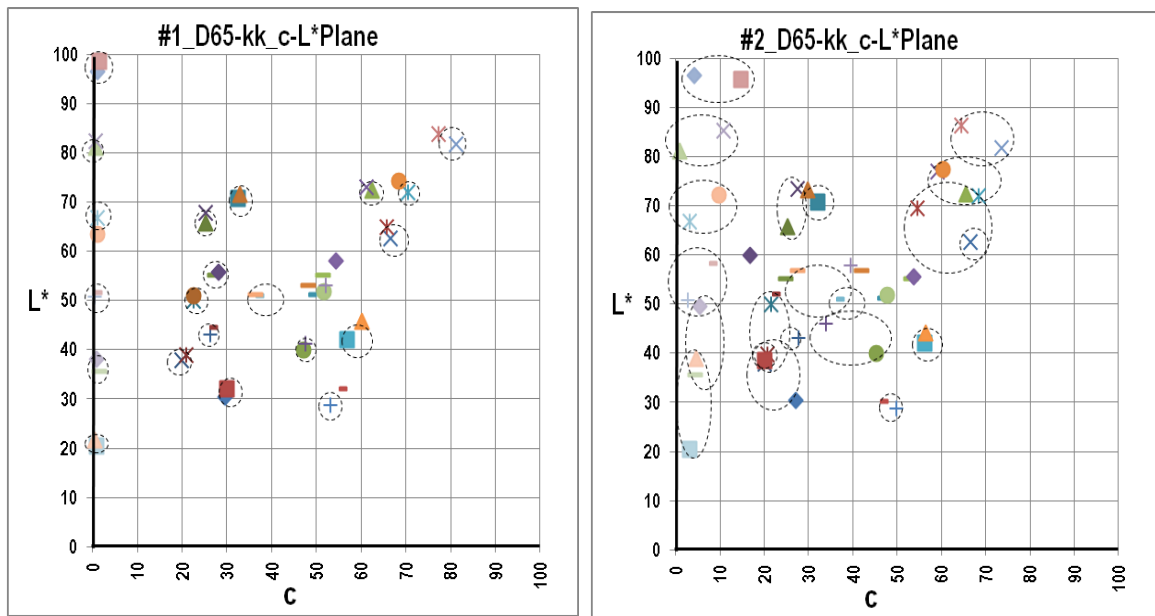


Fig. 5-5-2 Color sample #1 under D65 vs. kk(left), #2 under D65 vs. kk(right) in c-L\* plane.

Fig. 5-5-1,5-5-2 から、色票#1 は色票#2 よりも 2 つの光源(D65 と kk)下間での同じ試験色の色差が少ないことがわかる。次に色票#1 (左) と#2(右)の D65 標準光源と本研究提案表色評価指標値が最も良いハロゲンランプ光源下での各 24 色の CIEL\*a\*b\*の a\*-b\*色彩平面上の色値を Fig.5-6-1 に示す。

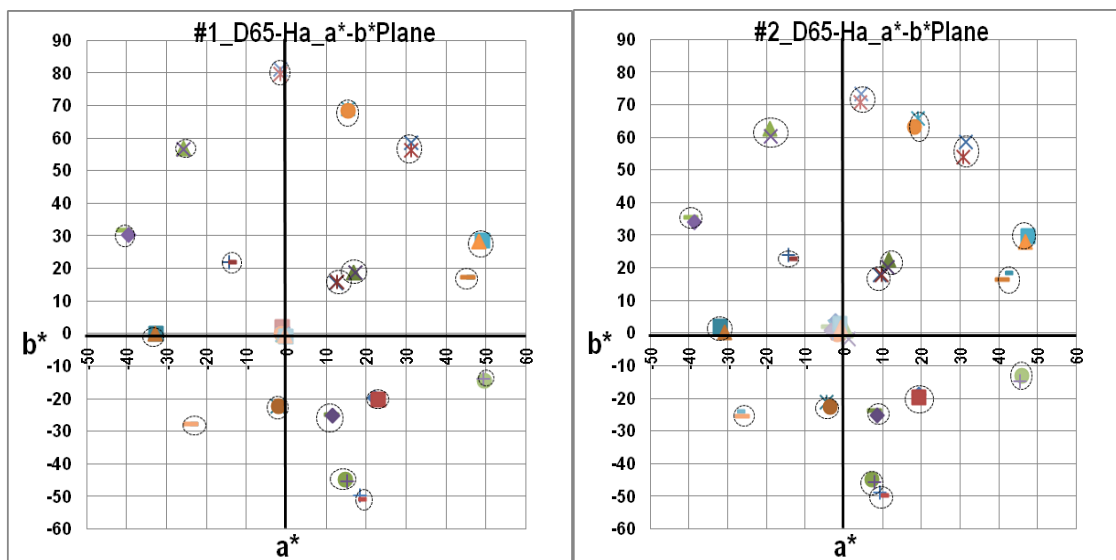
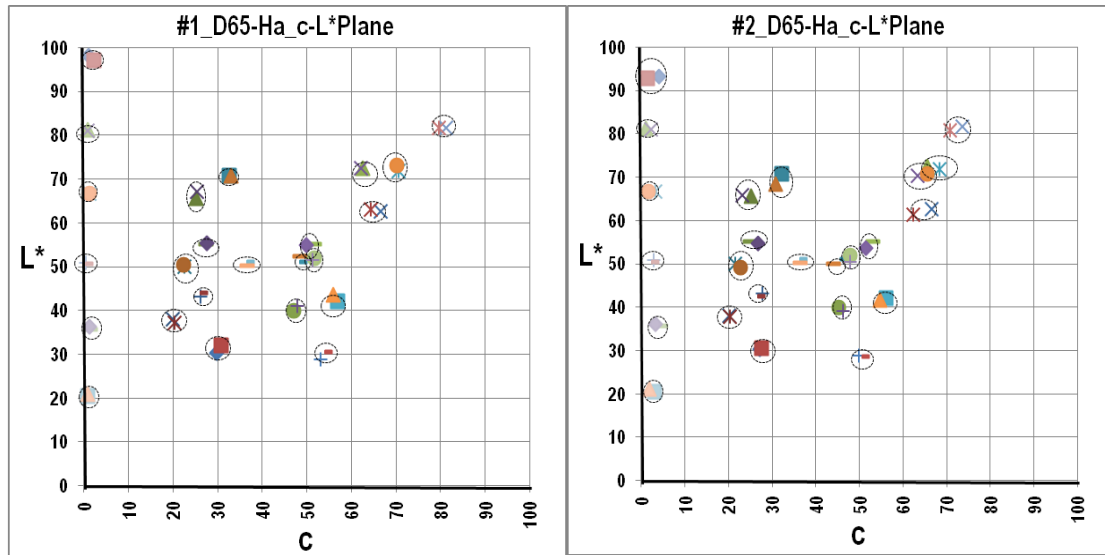


Fig. 5-6-1 Color sample #1 under D65 vs. Halogen(left), #2 under D65 vs. Halogen(right) in a\*-b\* plane.

## 第5章 異光源下での表色定量評価方式の提案

同じく色票#1（左）と#2(右)の D65 標準光源と本研究提案表色評価指標値が最も良いハロゲンランプ光源下での各 24 色の CIEL\*a\*b\*の c-L\*彩度対明度平面上の色値を **Fig.5-6-2** に示す。



**Fig. 5-6-2 Color sample #1 under D65 vs. Halogen(left), #2 under D65 vs. Halogen(right) in c-L\* plane.**

なお、**Fig. 5-5-1,5-5-2** と **Fig. 5-6-1,5-6-2** の凡例を **Fig. 5-7** に示す。(前章までと異なり本章では、色票を固定して光源間の色差を表しているのので Fig. 5-7 凡例で、#1,#2 は色票ではなく、比較する試験用光源を表している.)

× 1_darkskin#1	× 1_darkskin#2
▲ 2_Light skin#1	× 2_Light skin#2
× 3_Blue sky#1	● 3_Blue sky#2
+ 4_Foliage#1	- 4_Foliage#2
- 5_Blue Flower#1	◆ 5_Blue Flower#2
■ 6_Bluish green#1	▲ 6_Bluish green#2
× 7_Orange#1	× 7_Orange#2
● 8_Purplish blue#1	+ 8_Purplish blue#2
- 9_Moderate red#1	- 9_Moderate red#2
◆ 10_Purple#1	■ 10_Purple#2
▲ 11_Yellow green#1	× 11_Yellow green#2
× 12_Orange yellow#1	● 12_Orange yellow#2
+ 13_Blue#1	- 13_Blue#2
- 14_Green#1	◆ 14_Green#2
■ 15_Red#1	▲ 15_Red#2
× 16_Yellow#1	× 16_Yellow#2
● 17_Magenta#1	+ 17_Magenta#2
- 18_Cyan#1	- 18_Cyan#2
◆ 19_White#1	■ 19_White#2
▲ 20_Neutral8#1	× 20_Neutral8#2
× 21_Neutral6.5#1	● 21_Neutral6.5#2
+ 22_Neutral5#1	- 22_Neutral5#2
- 23_Neutral3.5#1	◆ 23_Neutral3.5#2
■ 24_Black#1	▲ 24_Black#2

Fig. 5-7 Remarks for Fig. 5-5-1,5-5-2(#1:D65,#2:kk), Fig. 5-6-1,5-6-2(#1:D65,#2:Halogen).

Fig. 5-6-1, 5-6-2 から色票#1 は色票#2 よりも 2 つの光源(D65 とハロゲンランプ)下間での同じ試験色の色差が少ないことがわかるが、その差は D65 と kk 間よりもはるかに少ないが、この両者(D65 とハロゲンランプ)と光源 kk 間には大きな差がある。そこで、色票#1, #2 の各試験色の各色相(Red, Orange, Green, Blue)の代表色である 15(Red), 7(Orange), 6(Bluish green), 8 (Purplish blue)の 2 つの光源下での分光反射率分布を Fig. 5-8, 5-9 に示す。Fig. 5-8, 5-9 から色票#2 の各試験色の方が、色票#1 に比べて各色票色の分光反射率分布の偏在が大きい。本研究が想定した照明光源と色再現が同時に異なる実態では、光源の分光放射輝度分布の偏在と、色再現の分光反射率分布の偏在が相乗して表色に影響していることがわかる。照明光源又は、イメージング機器の開発に際しては、その分光放射輝度分布と分光反射率分布の偏在を少なくする様に特性を調整することで、表色性能を向上させることができる。

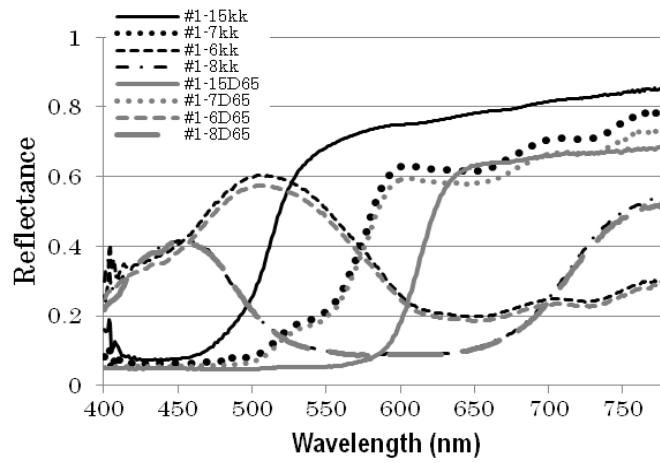


Fig. 5-8 Spectral reflectance of #1 under light souece kk and D65.

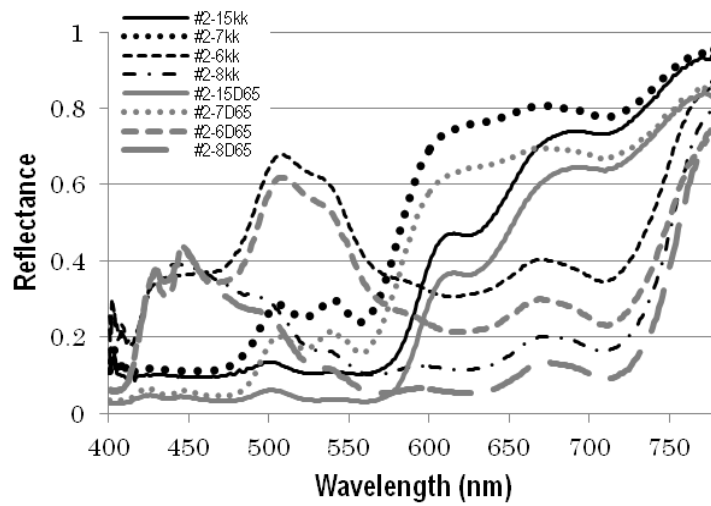


Fig. 5-9 Spectral reflectance of #2 under light souece kk and D65.

#### 5.4 第5章参考文献

- 5-1) [http://www.vision.ucl.uk/people/andrew\\_stockman.html](http://www.vision.ucl.uk/people/andrew_stockman.html), (Andrew stockman/UCL Institute of Ophthalmology)
- 5-2) Publ. CIE No. 13. 2: “Method of Measuring and Specifying Color rendering Properties of Light Sources”, 2<sup>nd</sup> Ed (TC-3. 2), ( 1974) .
- 5-3) CIE No. 3. 3: “Method of Measuring and Specifying color Rendering of Light Source”, (1995).
- 5-4) Tomoko Kotani: “Color Rendering of LED Lamp” Journal of the Imaging Society of Japan Vol. 50, No. 3, pp. 229-233(2011) [in Japanese]
- 5-5) Tomoko Kotani: “Approach for Realization of Comfortable Lighting Environment Using LED”, IDW’11 The 18th International Display Workshops, pp. 481-484(2011)
- 5-6) CIE(International Commission of Illumination): “CIE 1976 L\*a\*b\* color space”
- 5-7) Haruyuki. Seki, Kuniaki. Uto, and Yukio. Kosugi: “Acquisition and Evaluation of Printing Color Data by using Hyper Spectral Sensing”, Journal of the Imaging Society of Japan, Vol. 50, No. 3, pp. 208-216(2011) [in Japanese].
- 5-8) Haruyuki. Seki, Kuniaki. Uto, and Yukio. Kosugi: “Quantitative Color difference Evaluation for Reproduction Color Printing Images by using Hyper Spectral Data”, The 107th Annual Conference of the Imaging Society of Japan, pp. 101-104(2011) [in Japanese].
- 5-9) Gretagmacth, “ColorChecker™Color Rendition Chart” (2006).

## 第5章 異光源下での表色定量評価方式の提案

## 第6章

## 結論

## 第6章 結論

### 6.1 結論

本論文では、プリンタ装置の再現色域の拡大、文書配布方法の変遷、および昨今の LED 照明の急速な普及を背景としたカラー画像データ交換時に照明光源と色再現が同時に異なる状況での再現印刷画像の表色不一致の問題に対して、従来の評価方法に替わり、光源と色再現双方をパラメータとし同時同一の方法で取得された分光データに基づく定量評価方法を提案し、ハイパースペクトルセンサを用いた提案方法による表色定量評価実験を行い、結果を主観評価実験で検証して有効性を確認した。

以下第1章（研究テーマの背景が主たる内容）を除く各章で得られた結果を総括して結論とする。

第2章 「光源の演色性評価方法の検討」では、現在 CIE（国際照明委員会）が定めた光源の演色性評価方法で用いられている  $CRI^{6-1,2)}$ （演色評価数）を表色環境構築の基準として用いる実態に対しての問題点とその解決方法について検討し、第3章以下の関連する課題への位置づけを明らかにした。

(1) 本論文の主要テーマは異光源下での元色と再現色間の色差の相違を評価対象としたが、 $CRI$  は単一の試験色の異光源下での表色ずれを評価するものであって、本研究の主要な背景であるカラー画像データ交換時に照明光源と色再現が同時に異なる実態に即したのではない。本論文では問題解決のためには光源と色再現双方からの新しい定量評価方法の導入の必要性を明らかにした。

(2) さらに  $CRI$  そのものが最新の照明光源の実態である。LED 光源に代表される分光放射輝度分布の偏在特性に対して十分に対処出来ていない、などの問題点<sup>5-3,4)</sup>を明らかにした。

(3) 本研究提案方法と  $CRI$  との併用についてもその有効性を検討した。第3章以降の研究で明らかになった結果として、随所で  $CRI$  と本研究提案表色指標値との間には相関がうかがわれた。

第3章 「色差を用いた表色評価法の提案と検討」では、はじめに本論文のテーマである印刷画像の表色定量評価に際して、異光源下での元色と再現色間の色差の相違を評価対象とする新しい評価指標を提案した。本章では、特に提案手法を用いた予備実験を通して、

(1) まず色差に関しては、純粋な物理量である分光測色で得られる単純なスペクトル差による色差に対して、心理物理量である輝度に標準比視感度関数をかけた三刺激値による色差の有効性を先行研究事例<sup>6-5,6)</sup>の結果を参照し検証した。

(2) 表色評価指標を求める色票間もしくは光源間での色差およびすべての表色評価の基礎データとなる分光測色方法と取得データの処理方法および評価指標値の計算方法について、分光データ取得に優れた特徴を有するハイパースペクトルセンサの導入、標準白色板

## 第6章 結論

を用いた取得分光データの正規化処理，得られたデータから換算した CIEL\*a\*b\*均等色空間<sup>6,7)</sup>色値に基づく表色評価指標値による評価，同じく色値の分布図表現による色差解析方法を提案し，それらの有効性を確認した．

(3) データ取得から CIEL\*a\*b\*均等色空間色値への展開に至る最終的な測色精度について検証し，次章の主題に対する実験検証に際しての基礎的な条件を整えた．

第4章 「定量評価結果と主観評価実験によるその検証」では，第3章で予備実験およびその結果を踏まえて確立した方法に基づき，異光源下での印刷画像の表色定量評価実験とその検証のための主観評価実験を行い，本研究提案による定量評価実験結果の有効性を主観評価実験によって検証した．

(1) 定量評価実験では昨今，高効率，長寿命などの特徴により普及が著しい LED 光源を試験用光源とし，本研究テーマの主要な背景となったカラー画像データ交換時での LED 光源の分光放射輝度分布の相違による表色不一致についての定量的な原因をあきらかにした．

(2) 主観評価実験の実施に当たっては，定量評価実験結果の検証を正確に効率よく行うための方法検討と被験者の人権と健康保護を目的とした東京工業大学疫学研究等倫理委員会の承認と基準に従った手順の実行に留意した．傾向のはっきりした主観評価結果を得ることができ，極めて明瞭な定量評価結果との相関を確認できた．

第5章 「異光源下での表色定量評価方式の提案」では，本論文研究内容の実験結果，分析結果および研究成果に基づいた印刷画像の表色定量評価についての具体的な方法と内容を確認し有効な手法を標準的なプロセスとして提案にまとめた．さらに，本研究過程で得られた問題解決軽減のための具体的な研究成果である光源の分光放射輝度分布，又は色再現の分光反射率分布の調整のために有効な着目点およびその実行過程における新しい指標の提案を行った．

全体を通じて：

(1) 精緻な分光データによる解析で異光源下での印刷画像の表色の実態が明らかになった．

(2) 本研究提案による定量評価方法の関連機器のカラーマッチング等への応用有効性が明らかになった．

(3) 研究の過程で見出された表色改善ヒント：NDLS（正規化された光源の分光放射輝度分布の偏在性を表す）を参照した特性改善は色再現と光源双方に問題軽減の可能性を示唆できる．カラーマッチング作業の方向性として，色再現の分光反射率分布の偏在も極小化するよう配慮すべき必要性が明確になった．表色一致の目的からこれらは光源開発と印刷装置開発の両面において必要な改良の方向性である．

現在一般に，関連機器開発過程での色再現評価の最終的な確認手段として主観評価の重要性がひろく認識されているが，主観評価には，費用や時間的に大きな負担が強いら

る。また主観評価が機器の開発終了段階で行われる為、問題発覚時の前工程への帰還は容易ではない。精度信頼性の高い定量的評価手法の導入がコスト低減納期短縮に有効であることに鑑みると、本研究提案が、一解決策となり得る。

## 6.2 今後の展望

本研究の今後の発展の方向性として以下を指向している。

多様な色再現の環境上で共通に使用できる基準色票として安定で入手が容易な条件を具備したものであるカラーチェッカ<sup>6-8)</sup>は、本研究を通じて得た分光的な特性を含めて有効な解として期待できる。多様な環境下での表色の普遍性を得る上で基準色票は絶対的に必要なものであるため、関連業界への働きかけを行っていく。

基準色票およびその分光データの存在を前提とすれば、イメージング機器内に実装され自立して再現環境や印刷用紙などの材料による表色への影響を極小化するようなカラーマッチング手段、例えば機器内の Look Up Table (以下 LUT) の選択などの方法が可能となる。そこで今後の発展の方向性を具現化する展望として以下の開発可能性について検討する。

### 6.2.1 自律型機器組み込み型分光測色手段の開発

Fig. 6-1 に現在構想設計中の小型化ダウンスケール化された分光器モジュールの実例を示す。

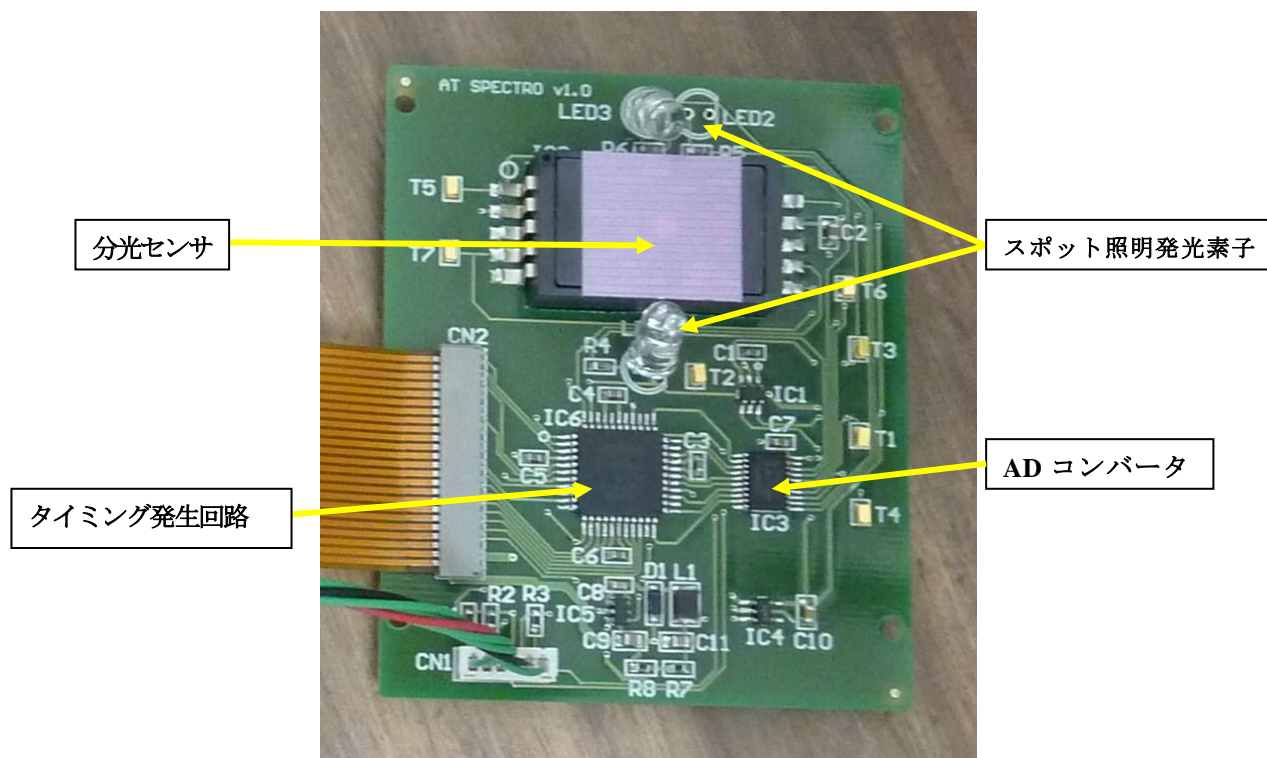


Fig.6-1 Down scaled spectro color sensor.

## 第6章 結論

本実装例に示された分光器は、形状的価格的に装置実装の可能性を有するものであり 14 nm の波長分解能を有する。<sup>6-9)</sup> 機器に組み込む場合は、LUT を選択する情報が得られれば目的を達成できるので、プリンタ装置開発時ほど高い波長分解能を必要とせず、コストや形状を優先した分光器を選択することが妥当である。その意味で、機器組み込み型の分光器の波長分解能は 14 nm でも使用可能な表色補正システムを構築する必要がある。

Fig. 6-2 には実装例をブロック図で示す。

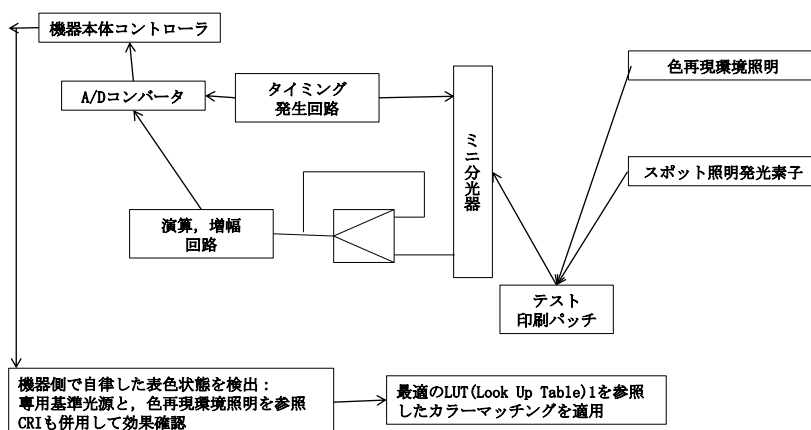


Fig. 6-2 Block diagram for embedded spectral adjusting system.

本システムは装置内に実装され、自発光する基準光源下での印刷出力色票色の分光データを自立して取得し、必要に応じて色再現環境の光源の分光放射輝度分布も併せて取得して、機器本体の主制御部に複数実装されたカラーマッチング用 LUT を参照して最も表色性を向上させるような色再現を自律して行う。ただし、この場合の出力は特定の環境に特化した表色となるので、異なる表色環境での再現色には注意を払わねばならない。

### 6.2.2 分光的なカラーマッチング用 LUT 選択アルゴリズム開発

現在のカラープリンタ装置では、使用する用紙の種類によってコントローラに搭載している複数のカラーマッチング用 LUT の中から最適なものをオペレータの操作によって選択する機能を備えているものは存在するが、6.2.1 項に述べた自律型の分光測色手段により表色結果の分光的特性が得られれば、この結果をコントローラに還元して最適なカラーマッチング用の LUT を選択することが可能になる。さらに、得られた分光的表色データと直交関係にある多数の人工合成色を用意して最適の LUT を合成する動作を行うアルゴリズム

## 第6章 結論

ム開発が次のステップでは大きな課題になる。現在、半導体技術の進化によってプリンタコントローラに使用されるシステム LSI の機能強化が著しく、システム LSI 機能の限界が緩和されて、カラーマッチングの処理など大容量のメモリー空間上で高速な演算を行うことが可能になっているが、それらを使ったプリンタ装置の付加価値向上には、有効な方法である。

以上 6.2.1 項および 6.2.2 項に述べた次世代のプリンタ装置での可能性を、現世代の機能と比較して Table 6-1 に示す。

**Table 6-1 プリンタ装置表色評価方式の比較**

	従来法	本提案法
LUT 作成	刺激値直読み	分光測色
表色評価	主観評価主体	定量評価主体
印刷色の検知	刺激値直読み	分光測色
LUT の分光精度	保証なし	分光的精度向上

これまでプリンタ装置の出力画像による色再現は限りなく元色の元光源下での分光反射率分布に近づけることが目標であった。これが実現できれば再現環境下での再現表色は照明光源にのみ影響されることになる。前記提案による表色評価を応用することで異光源下での表色を元色に忠実に再現する手段も生まれるが、逆にその条件で出力された画像が更なる異光源下での表色がされるか予測ができないという問題も新たに生じる可能性もあり、あくまで限定的な用途に限られるべきであろう。当面の目標はメタメリズムを極小化する再現色を実現するプリンタ装置であり、本研究の成果を踏まえて今後の展開目標とする。

**第6章参考文献**

- 6-1) Publ. CIE No. 13. 2: “Method of Measuring and Specifying Color rendering Properties of Light Sources”, 2<sup>nd</sup> Ed (TC-3. 2), ( 1974) .
- 6-2) CIE No. 3. 3: “Method of Measuring and Specifying color Rendering of Light Source”, (1995).
- 6-3) Tomoko Kotani: “Color Rendering of LED Lamp” Journal of the Imaging Society of Japan Vol. 50, No. 3, pp. 229-233(2011) [in Japanese]
- 6-4) Tomoko Kotani: “Approach for Realization of Comfortable Lighting Environment Using LED”, IDW’11 The 18th International Display Workshops, pp. 481-484(2011)
- 6-5) Haruyuki. Seki, Kuniaki. Uto, and Yukio. Kosugi: “Acquisition and Evaluation of Printing Color Data by using Hyper Spectral Sensing”, Journal of the Imaging Society of Japan, Vol. 50, No. 3, pp. 208-216(2011) [in Japanese].
- 6-6) Haruyuki. Seki, Kuniaki. Uto, and Yukio. Kosugi: “Quantitative Color difference Evaluation for Reproduction Color Printing Images by using Hyper Spectral Data”, The 107th Annual Conference of the Imaging Society of Japan, pp. 101-104(2011) [in Japanese].
- 6-7) CIE(International Commission of Illumination): “CIE 1976 L\*a\*b\* color space”
- 6-8) Gretagmacbeth, “ColorChecker™Color Rendition Chart” (2006).
- 6-9) 浜松ホトニクス株式会社, ミニ分光器 C10988MA, C11708MA カタログ, Cat. No. KACC1169J06 Feb. 2012.

## 謝辞

本論文が完成に至るまでには周囲の皆様よりご指導・ご協力をいただきました。ここで改めて謝意を表します。

東京工業大学大学院総合理工学研究科, 小杉幸夫教授には社会人としての博士課程進学に際して入学前からアドバイスを頂き, 入学後も研究活動におけるご指導はもちろんのこと, 他の業務と学業の両立にもきめ細かなご配慮を頂き, 大変に感謝しております。

内川恵二教授には COE メンターをお願いし, お忙しい中を第 1 年次よりご指導を頂き学会のご紹介や論文についての貴重なご意見を頂きここに感謝いたします。

本論文をまとめるにあたり羽鳥好律教授, 山口雅浩教授, 熊澤逸夫教授, 長橋宏教授, より有意義なご意見を頂きここに感謝いたします。

静岡大学下平美文教授には, 先行研究でのご指導を頂き, 東京工業大学大学院入学後も学会研究会のご紹介などで有意義なご意見を頂きここに感謝いたします。

小杉研究室宇都有昭助教には, HS センサを使っての測色実験にあたり深夜に至るまで多くのご指導, ご協力を頂き更には研究室での諸活動についてのアドバイスやサポートを頂き研究活動を円滑に楽しく進めることができました。ここに感謝いたします。

小杉研究室の皆様にも, 研究機材の設営他で多くのご協力をいただき, 居心地の良い研究室での楽しい時間を共有させていただいたことをここに感謝いたします。

主観評価実験に被験者としてご協力いただいた 15 名の方々に感謝いたします。

ナルテック株式会社および社員の方々には, 色票サンプルの提供や観測装置の貸与を頂き研究へのご協力に対して感謝いたします。

最後に, 長期にわたる研究期間を通じて絶えず私の健康管理に注力してくれた妻の美佐子に感謝します。(2013.1.31)

## 著者略歴

**本籍地：**

静岡県静岡市葵区瓦場町 48

**現住所：**

静岡県静岡市葵区瓦場町 48

**氏名：**

関（せき）晴之（はるゆき）

**生年月日：**

昭和 22 年 9 月 30 日

**略歴：**

昭和 45 年 3 月	静岡大学工学部電子工学科卒業
昭和 45 年 4 月	セイコーエプソン株式会社入社
平成 4 年 9 月	セイコーエプソン株式会社退社 (研究開発本部 部長)
平成 4 年 9 月	アドビシステムズ株式会社入社
平成 8 年 6 月	アドビシステムズ株式会社退社 (Printing Sysytem Engineering Director)
平成 8 年 6 月	キヤノンアイテック株式会社入社
平成 10 年 4 月	キヤノンアイテック株式会社退社 (常務取締役 開発本部長)
平成 10 年 4 月	ナルテック株式会社入社
平成 23 年 3 月	ナルテック株式会社退社 (専務取締役開発設計本部長)
現在に至る	

## 関連業績

### 論文

1. 関晴之, 宇都有昭, 小杉幸夫, “ハイパースペクトルセンサによるカラー印刷画像の分光スペクトルデータ取得と評価”日本画像学会誌 第 50 巻, 第 3 号 pp.208-216 (2011)
2. 関晴之, 宇都有昭, 小杉幸夫, “LED 光源下での印刷画像の表色定量評価”, 日本画像学会誌 第 51 巻, 第 6 号 pp.613-621(2012)

### 研究速報

1. 宇都有昭, 関晴之, 村瀬亨, 高岸成典, 小杉幸夫, “携帯型人肌検出装置の開発”, 電子情報通信学会誌 D Vol.J95-D No.5 pp.1312-1316(2012)

### 国際会議

1. Haruyuki Seki, Kuniaki Uto, Yukio Kosugi “Spectral Evaluations of Color Rendering Properties Of LED Light Sources by Using Hyper Spectral Sensor”,ITE The Institute of Image Information and Television Engineers and SID Society for Information Display, IDW’11 The 18th International Display Workshops Nagoya, Japan, Dec.7-9, 2011 pp.1439-1442(2011)
2. Kuniaki Uto, Haruyuki Seki, Yukio Kosugi, Toru Murase, Sigenori Takagishi “Human Detection Based on Active Infrared Illumination”, IEEE Global Humanitarian Technology Conference, October 21-24, 2012  
Presentation : October 22, 2012

### 国内学会・研究会

1. 関晴之, 宇都有昭, 小杉幸夫, “ハイパースペクトルセンサにより取得したスペクトルデータによる印刷再現カラー画像の定量的色差評価”, 日本画像学会年次大会 (107 回) 論文集(pp.101-104), 東京, 2011 年 6 月 6-7 日
2. 宇都有昭, 関晴之, 齋藤元也, 小杉幸夫, “UAV 搭載 HS ミニセンサによる圃場測定”, 日本写真測量学会 平成 24 年度秋季学術講演会, 日本写真測量学会 平成 24 年度秋季学術講演会発表論文集(pp.157-160), 秋田, 2012 年 11 月 1-2 日

### **特許出願**

- 1.特願 2011-265416, 対象物検出装置, 小杉幸夫, 宇都有昭, 関晴之, 高岸成典, 村瀬亨
- 2.特願 2012-137131, 対象物検出装置, 小杉幸夫, 宇都有昭, 関晴之(2012,06,18)